



**UFOP**  
Universidade Federal  
de Ouro Preto



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica  
Mestrado Profissional em Construção Metálica – MECOM

---



**ESCOLA DE MINAS**

**MODELAGEM DE ESTRUTURA METÁLICA PARA EQUIPAMENTO DE  
PERFURAÇÃO E SONDAÇÃO**

**OURO PRETO - MG  
2018**

RAFAEL SEGATTO GHIDETTI  
rafaelghidetti@hotmail.com

MODELAGEM DE ESTRUTURA METÁLICA PARA EQUIPAMENTO DE  
PERFURAÇÃO E SONDAGEM

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos, para a obtenção do título de Mestre em Construção Metálica.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Vieira Magalhães

**OURO PRETO – MG  
2018**

G423m

Ghidetti, Rafael Segatto .

Modelagem de estrutura metálica para equipamento de perfuração e sondagem [manuscrito] / Rafael Segatto Ghidetti. - 2018.

139f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Vieira Magalhães.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Mestrado Profissional em Construção Metálica.

Área de Concentração: Construção Metálica.

1. Sondagem. 2. Estrutura metálica. 3. Análise estrutural. 4. Método de elementos finitos. I. Paula, Geraldo Donizetti de. II. Magalhães, Paulo Henrique Vieira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624.014

Catálogo: [www.sisbin.ufop.br](http://www.sisbin.ufop.br)



  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica  
Mestrado Profissional em Construção Metálica – MECOM



## MODELAGEM DE ESTRUTURA METÁLICA PARA EQUIPAMENTO DE PERFURAÇÃO E SONDAGEM

**AUTOR: RAFAEL SEGATTO GHIDETTI**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 14 de setembro de 2018, pela Comissão Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Geraldo Donizetti de Paula, D. Sc. – UFOP (Presidente)

Prof. Paulo Henrique Vieira Magalhães, D. Sc. – UFOP

Prof. Flávio Teixeira de Souza, D. Sc. – IFMG

Prof. André Luis Riqueira Brandão, D. Sc. – UNIFEI

Dedico este trabalho à minha mãe Rosemary, ao meu irmão Dyonni e à minha namorada Gabriela por toda a confiança que depositaram em mim.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade de Ouro Preto por mais uma oportunidade de estudo e crescimento acadêmico.

À GEOSOL pela oportunidade de participar de um projeto tão importante para a Empresa.

Aos professores Paulo Henrique e Geraldo Donizetti, responsáveis pela minha inserção nesse projeto e pelas contribuições acadêmicas e orientações.

Ao professor Mário Ayres, pelos conhecimentos passados.

A toda equipe do PD&I da GEOSOL, Ananias, Arthur, Chaves, Douglas, Marciano Macedo, Marciano Silva, Marcus e Tilico, que contribuíram diretamente para a realização deste trabalho.

Aos colegas do MECOM por compartilhar informações durante essa caminhada.

Ao Gustavo (Portamala), pelas conversas e incentivos.

À Gabi, por sempre acreditar e ficar ao meu lado durante toda essa jornada.

Ao meu irmão Dyonni, que sempre estava torcendo pelo meu sucesso.

À minha mãe Rosemary, que sempre fez de tudo para que eu chegasse até aqui.

E a todos aqueles, amigos e amigas, que de certa forma contribuíram diretamente ou indiretamente para este trabalho.

Obrigado!

*“A persistência é o menor caminho do êxito”.*

*Charles Chaplin*

## RESUMO

As perfuratrizes são equipamentos capazes desempenhar diversas funções sendo uma delas a perfuração para localizar riquezas minerais nos mais variados terrenos, papel fundamental no processo de extração. Estes equipamentos atuam com muita frequência no Brasil devido à presença de uma enorme riqueza natural como o minério de ferro, água e petróleo. Com a necessidade de utilizar esses equipamentos em áreas de difícil acesso foi necessário desenvolver uma nova estrutura metálica da torre de uma perfuratriz com o objetivo de reduzir o peso do equipamento como forma de facilitar as operações, além de ser uma estrutura robusta e capaz de atender aos requisitos de projeto estabelecidos pela empresa. Para a realização das análises estruturais utilizou-se cálculos analíticos e o método de elementos finitos. Na primeira etapa da análise, foi utilizado o software FTOOL como forma de verificar as reações, cortantes, normais e momentos fletores e após estas verificações, cálculos estruturais para encontrar as máximas tensões e fatores de segurança. Para a segunda etapa da análise, foi utilizado o software ANSYS, que através da modelagem em 3D das estruturas foi possível aplicar todos os apoios e carregamentos que gerou as máximas tensões e fatores de segurança. Com as análises, foi possível realizar a comparação e validação dos resultados que resultou na construção de um protótipo. Este protótipo foi submetido à testes internos e testes em campo. Foi possível verificar um alívio de peso nas estruturas analisadas e conseqüentemente uma redução de peso do equipamento como um todo.

Palavras-chave: Modelagem, Sondagem, Perfuração, Estrutura Metálica, Análise Estrutural, Método de Elementos Finitos.

## **A B S T R A C T**

Rotary drills are equipment capable of performing various functions; Being one of them drilling boreholes to determine ore reserves in different terrains, main hole on extraction process. This kind of equipment perform very frequently in Brazil due to the presence of large ore deposits such as iron, water and oil. With the need to use these equipment in abrasive terrains, it was necessary to develop a new tower metallic structure of the drill with the objective of reducing the weight of the equipment to facilitate operations, besides being a robust structure being able to meet requirements established by the company. In order to perform the structural analyzes, it was used analytical calculations and the finite element method. In the first stage of the analysis, FTOOL software was used to verify the reactions, shear, normal and bending moments and after these verifications, structural calculations to find the maximum tensions and safety factors. For the second stage of the analysis, ANSYS software was used, which allowed apply all the supports and loads that generated the maximum tensions and safety factors through the 3D modeling of the structures. With the analysis generated, it was possible to perform the comparison and validation of the results that lead to the construction of a prototype. This prototype was subjected to internal tests and field tests. With the study, It was possible to verify a weight relief in the analyzed structures and consequently a reduction of weight of the equipment as a whole.

Key words: Modeling, Boring, Drilling, Metallic Structure, Structural Analysis, Finite Element Method.

## **LISTA DE SÍMBOLOS**

3D – Modelação tridimensional

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISC – American Institute of Steel Construction

ASME – American Society of Mechanical Engineers

ASTM – American Society for testing and Materials

CAD – Computer Aided Desing

ESSS – Engineering Simulation and Scientific Software

MEF – Método dos Elementos Finitos

NBR – Norma Brasileira

TAP – Termo de Abertura de Projeto

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Perfuratriz rotativa .....	13
Figura 2: Sondagem Air Core e Screw Core (sondagem em bauxita e prospecção de alumínio).....	17
Figura 3: Sondagem subterrânea .....	18
Figura 4: Sondagem diamantada (sondagem para pesquisa de minério de ferro).....	19
Figura 5: Perfuração de poços .....	21
Figura 6: Sondas de perfuração para gás natural.....	22
Figura 7: Perfuratriz percussiva manual (martetele).....	23
Figura 8: Perfuratriz rotativa T4BH.....	23
Figura 9: Perfuratriz roto-percussiva MACH 16.....	24
Figura 10: Primeiro lance (à direita) e segundo lance (à esquerda) .....	25
Figura 11: Sonda CS 14 .....	25
Figura 12: Sonda LF90.....	26
Figura 13: Braço manipulador de hastes.....	26
Figura 14: Braço manipulador de hastes fixado no mastro .....	27
Figura 15: Apoio do mastro.....	27
Figura 16: Cilindros de articulação.....	28
Figura 17: Guincho principal.....	28
Figura 18: Chassi .....	29
Figura 19: Suporte da mesa .....	29
Figura 20: Cilindro de perfuração.....	30
Figura 21: Cabeça hidráulica.....	30
Figura 22: Mesa de articulação.....	31
Figura 23: Nós e elementos em uma malha no olhal de içamento do chassi da sonda... 35	
Figura 24: Fluxograma da metodologia .....	39
Figura 25: Detalhamento do mastro inferior .....	42
Figura 26: Mastro inferior .....	42
Figura 27: Peso dos componentes do mastro inferior.....	43
Figura 28: Detalhamento do mastro superior .....	43
Figura 29: Mastro superior.....	44
Figura 30: Peso total do mastro superior.....	44
Figura 31: Posição de transporte com a torre recolhida.....	45
Figura 32: Posição de transporte com a torre estendida.....	46
Figura 33: Posição de trabalho a 45° .....	46

Figura 34: Posição de trabalho a 60° .....	47
Figura 35: Posição de trabalho a 90° .....	47
Figura 36: Modelagem 3D do primeiro lance .....	53
Figura 37: Modelagem 3D do segundo lance .....	53
Figura 38: Início da análise no Ansys .....	54
Figura 39: Inserção da geometria .....	55
Figura 40: Estrutura inserida no Ansys .....	56
Figura 41: Estrutura da torre simplificada.....	56
Figura 42: Contato entre o flange e o tubo do segundo lance .....	57
Figura 43: Criação de um novo material.....	57
Figura 44: Geração da malha na estrutura.....	58
Figura 45: Estrutura com malha tetraédrica e refinada .....	59
Figura 46: Apoios da mesa e cilindros de articulação .....	59
Figura 47: Apoio do mastro.....	60
Figura 48: Aplicação do momento torçor .....	61
Figura 49: Aplicação do esforço Pull Down .....	61
Figura 50: Aplicação da carga do bloco de roldanas .....	62
Figura 51: Aplicação das cargas do guincho principal .....	62
Figura 52: Deslocamentos no segundo lance .....	63
Figura 53: Tensões de Von Mises no segundo lance .....	64
Figura 54: Fator de segurança do segundo lance .....	65
Figura 55: Deslocamentos no primeiro lance .....	65
Figura 56: Tensões de Von Mises no primeiro lance .....	66
Figura 57: Concentrador de tensões no primeiro lance.....	66
Figura 58: Fator de segurança do primeiro lance .....	67
Figura 59: Deslocamentos na torre completa .....	67
Figura 60: Tensões de Von Mises na torre completa.....	68
Figura 61: Fator de segurança da torre completa.....	68
Figura 62: Detalhamento do primeiro lance .....	70
Figura 63: Detalhamento do segundo lance .....	70
Figura 64: Etapas da fabricação do primeiro lance.....	71
Figura 65: Etapas de fabricação do segundo lance .....	72
Figura 66: Protótipo otimizado - Sonda 560 .....	73
Figura 67: Sonda 560 em teste .....	74
Figura 68: Sonda 558 em teste .....	75



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos materiais pesquisados .....	44
Tabela 2: Momentos, esforços e deslocamentos da análise bidimensional .....	49
Tabela 3: Fatores de concentração de tensões .....	51
Tabela 4: Tensões, deformações e fatores de serviço da análise bidimensional .....	52
Tabela 5: Análise comparativa entre as análises bidimensionais e elementos finitos ....	69

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	Formulação do Problema .....	13
1.2	Justificativa.....	14
1.3	Objetivos .....	15
1.3.1	Geral.....	15
1.3.2	Específicos .....	15
1.4	Estrutura do Trabalho .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
2.1	Setores da indústria de perfuração .....	17
2.1.1	Geotécnica.....	18
2.1.2	Fundação e Construção .....	19
2.1.3	Exploração Mineral.....	19
2.1.4	Explosão de Furos e Estudo Sísmico .....	20
2.1.5	Poços artesianos.....	20
2.1.6	Meio ambiente .....	21
2.1.7	Óleo e Gás .....	21
2.2	Equipamento de perfuração.....	22
2.2.1	Classificação.....	22
2.2.2	Principais componentes da perfuratriz .....	24
2.3	Análise estrutural.....	31
2.3.1	Desenvolvimento de um produto.....	32
2.4	Método de Elementos Finitos.....	33
2.5	FTOOL.....	36
2.6	ANSYS.....	36
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>38</b>
3.1	Introdução.....	38
3.2	Normas técnicas utilizadas para os cálculos analíticos.....	40
3.3	Critérios utilizados para os cálculos analíticos.....	40
3.4	Critérios utilizados na análise numérica .....	41
3.5	Estruturas analisadas .....	41
3.5.1	Mastro Inferior.....	41
3.5.2	Mastro Superior .....	43
3.6	Tipos de materiais.....	44
3.7	Posições de operação do equipamento.....	45

3.7.1	Posição de transporte (0°)	45
3.7.2	Posição de trabalho (45°)	46
3.7.3	Posição de trabalho (60°)	46
3.7.4	Posição de trabalho (90°)	47
3.8	Operações críticas do equipamento	48
3.9	Carregamentos considerados	48
3.9.1	Carregamentos estáticos devido à operação:	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>49</b>
4.1	Análise bidimensional e analítica – FTOOL	49
4.2	Projeto da Torre em CAD 3D – SolidEdge	52
4.3	Análise de Elementos Finitos da Torre- ANSYS	54
4.3.1	Decisões preliminares	54
4.3.2	Pré-processamento	55
4.3.3	Solução	62
4.3.4	Pós-processamento	63
4.4	Análise Comparativa das Estruturas	69
4.5	Construção das Torres	69
4.6	Discussão dos Resultados	72
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES</b>	<b>76</b>
5.1	Considerações finais	76
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	76
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE – ANÁLISES BIDIMENSIONAIS NO SOFTWARE FTOOL</b>	<b>81</b>
	Posição (0°)	81
	Posição (45°)	86
	Posição (60°)	98
	Posição (90°)	118

## 1 INTRODUÇÃO

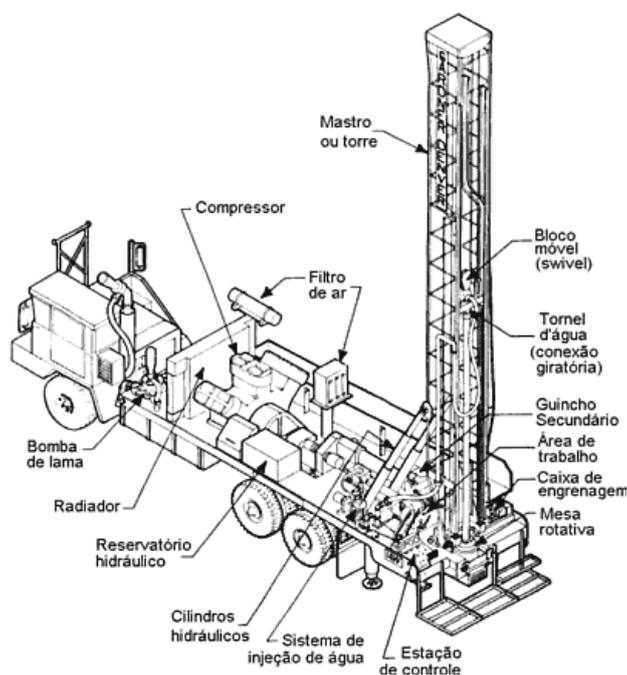
A introdução deste trabalho contempla os motivos pelo qual este trabalho foi realizado. Será apresentado a formulação do problema, a justificativa, os objetivos e a estrutura do trabalho.

### 1.1 Formulação do Problema

A perfuração é um processo essencial para o desenvolvimento de vários setores da indústria tais como: água, exploração e investigação mineral, petróleo, gás, estudos geotérmicos, investigação geotécnica, ambiental e fundações, explosões e construção de buracos de perfuração.

A Figura 1 mostra o exemplo de um modelo de máquina perfuratriz rotativa equipada com diversos elementos essenciais para a operação.

Figura 1: Perfuratriz rotativa



Fonte: [www.perfuradores.com.br](http://www.perfuradores.com.br)

Para a pesquisa mineral, a perfuração do solo tem como objetivo a obtenção de amostras, para que diversas análises sejam feitas. Essa atividade é realizada através de equipamentos denominados sondas ou também perfuratrizes que podem variar de forma e tamanho de acordo com as funções a serem exercidas.

As perfuratrizes são equipamentos que possuem diversas funções. Dentre elas são capazes de localizar os minerais, desempenhando assim um papel fundamental no processo de extração. São capazes também de criar um acesso às águas subterrâneas para diferentes formas de utilizações, como no uso doméstico, em estoque, na irrigação e no abastecimento de cidades. São utilizadas para analisar terrenos assegurando a estabilidade de estruturas civis e efetuar furos para fundações de grandes obras tais como pontes e edifícios. Além disso, ajudam na localização de áreas contaminadas no subsolo e auxiliam em seus tratamentos. Outro papel das perfuratrizes é encontrar acessos que levam a extração de óleo, gás e análises geotérmicas.

O Brasil é um país que apresenta uma enorme riqueza natural. Alguns exemplos importantes são o minério, água e petróleo. Devido às atividades extrativistas relacionadas a essas áreas, os equipamentos de perfuração são bastante requisitados no meio industrial do país.

Com a necessidade desses equipamentos nas áreas de operação no Brasil, surgiram também algumas dificuldades. A primeira delas foi quanto à origem dos equipamentos e peças para manutenção. Outro empecilho foi devido aos locais de operação e como o equipamento teria acesso a esses locais.

O desenvolvimento de um equipamento nacional, robusto, leve e que agregue novas tecnologias representaria um marco para o setor. Com o objetivo de melhorar o projeto de um sistema de sondagem de médio porte, inserindo análise numérica e o dimensionamento das estruturas de apoio do equipamento, este trabalho apresentará as etapas necessárias para o projeto de uma estrutura mais leve e ao mesmo tempo capaz de atender os quesitos de projeto e de vida útil do equipamento.

## **1.2 Justificativa**

A tecnologia do processo de perfuração e sondagem no Brasil é ainda pouco explorada e desenvolvida, pois os equipamentos utilizados são em grande parte mecânicos e com controles manuais.

As sondas existentes, em sua maioria, são adquiridas no exterior, onde tem ocorrido o desenvolvimento tecnológico dos equipamentos de sondagem com a progressão para o uso de sondas hidráulicas, que possuem controles analógicos automatizados, exigem maior investimento e não atendem as condições operacionais

impostas pelo ambiente geológico, clima e normas de segurança do Brasil. A introdução desses sistemas no Brasil demanda grandes adaptações como, por exemplo, as proteções e dispositivos de segurança, antes de se tornarem operacionais.

Tais avanços no cenário mundial geraram uma desvantagem competitiva para as empresas nacionais de sondagem, haja visto que as sondas mecânicas apresentam uma menor eficiência operacional e maior necessidade de esforço braçal humano, tornando o processo menos seguro.

Estes equipamentos são normalmente utilizados em áreas de difícil acesso o que dificulta o transporte e posicionamento na área de perfuração. As análises e estudos propostos neste trabalho visam à redução de peso para minimizar os impactos do mesmo em transporte e posicionamento do equipamento no campo.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Geral**

Dimensionamento da estrutura que compõe a torre de um protótipo de sondagem utilizado para pesquisas minerais, a fim de obter uma nova estrutura que seja robusta, leve e capaz de atender aos requisitos de projeto. A análise terá como foco as estruturas metálicas que compõe a torre do equipamento: primeiro lance e segundo lance. Estas estruturas serão dimensionadas e simuladas através de softwares baseado no método de elementos finitos.

#### **1.3.2 Específicos**

- Dimensionamento de uma nova estrutura de torre.
- Redução de peso na estrutura e no equipamento como um todo.
- Melhorar as condições de transporte do equipamento em rodovias e em campo.
- Apresentar uma nova estrutura resistente.
- Desenvolver o projeto estrutural de um novo protótipo, associado às dimensões pré-estabelecidas e as cargas que a estrutura estará submetida.
- Realizar as análises estruturais da torre utilizando os softwares FTOOL e ANSYS.

## **1.4 Estrutura do Trabalho**

No primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho, e os objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo aborda a revisão bibliográfica onde serão apresentados os processos de perfuração, seus tipos, as perfuratrizes (equipamentos de sondagem), suas características como capacidades, profundidades, parte mecânica e hidráulica, velocidades de perfuração, suas partes como chassi, lances da torre, mesa de articulação, guincho, motores, bombas hidráulicas, cabeças hidráulicas, morsas, caixas de redução e uma introdução à análise estrutural por elementos finitos.

No terceiro capítulo é exposto a metodologia e os procedimentos utilizados para realização das análises estruturais da torre do equipamento.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados e discussões tomando como base os dimensionamentos realizados de acordo com a metodologia estabelecida no terceiro capítulo.

No quinto capítulo são apresentadas as discussões, conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho abrange conhecimentos a respeito da atividade de perfuração, perfuratrizes, estrutura metálica, elementos de máquinas, módulos de falha e métodos de dimensionamento.

### 2.1 Setores da indústria de perfuração

A perfuração já existia como uma indústria há 4.000 anos. Começou com os Chineses através de uma ferramenta de cabo e com o passar dos tempos foi se aperfeiçoando cada dia mais (DRILLING, 1996).

A ferramenta de cabo foi o primeiro método utilizado para perfuração. O cabo refere-se à corda de cânhamo de Manila usado para suspender as hastes de madeira e as ferramentas de perfuração nas primeiras operações (DRILLING, 1996).

A partir do desenvolvimento do ferramental, das plataformas de perfuração, e do surgimento de novas técnicas, o processo de perfuração obteve uma expansão no parque industrial, atingindo oito setores (DRILLING, 1996):

- Geotécnica
- Fundação e Construção
- Exploração Mineral
- Estudo sísmico
- Explosão de furos
- Poços de água
- Estudo ambiental
- Óleo e Gás

Figura 2: Sondagem Air Core e Screw Core (sondagem em bauxita e prospecção de alumínio)



Fonte: [www.geosol.com.br](http://www.geosol.com.br)

Na Figura 2 são mostradas algumas fotos do processo de sondagem Air Core e Screw Core que são métodos desenvolvidos pela empresa GEOSOL para sondagem em bauxita e prospecção de alumínio (GEOSOL, 2018).

### 2.1.1 Geotécnica

Este tipo de perfuração é realizado para determinação das características dos solos e rochas. A perfuração é realizada para avaliar as condições dos locais em termos de potencial de construção. É sempre importante ter informações detalhadas das propriedades do solo e da rocha, obtidos através da perfuração geotécnica de modo que as construções civis não sejam colocadas em lugares instáveis (DRILLING, 1996).

A perfuração geotécnica precede os processos de fundações e de construções. Alguns projetos se sobrepõem em ambos os setores (DRILLING, 1996):

- Edifícios e estruturas de armazenagem
- Fábricas e usinas
- Barragens, pontes e estradas
- Cais e outras obras civis

Além disso, o trabalho geotécnico pode auxiliar a perfuração do ambiente em estudos de locais onde existe um potencial para perigos ambientais. Na Figura 3 são apresentadas técnicas para escavação em solo com minério sólido na sondagem subterrânea (DRILLING, 1996).

Figura 3: Sondagem subterrânea



## 2.1.2 Fundação e Construção

Perfuração para fundação e construção garantem bases sólidas para uma série de aplicações, como as quais que foram listadas acima (DRILLING. 1996).

## 2.1.3 Exploração Mineral

Projetos de exploração mineral geralmente envolvem uma busca de certos minerais ou materiais que possuem um grande valor no mercado mundial. Exploração é uma busca de minerais ocultos ou até mesmo desconhecidos. A investigação, também importante na exploração, é o processo de verificação para estabelecer se o mineral extraído possui uma quantidade que seja viável para todo o processo. A perfuração é realizada para (DRILLING, 1996):

- Informações estratigráficas
- Pesquisa sísmica
- Gravidade, magnetismo e levantamento geoquímico
- Aprimoramento e interpretação
- Controle de qualidade do minério
- Cálculos de reservas de minério
- Definição do corpo do minério (comprimento, forma, tipo de grão, etc).

Na Figura 4 são apresentados alguns equipamentos que são utilizados para a exploração mineral utilizando a sondagem diamantada onde através de uma coroa é realizado o corte da rocha (GEOSOL, 2018).

Figura 4: Sondagem diamantada (sondagem para pesquisa de minério de ferro)



#### **2.1.4 Explosão de Furos e Estudo Sísmico**

Essencialmente, a perfuração para explosão é utilizada para inserir explosivos com o intuito de remover rochas e minério. A perfuração é voltada a produção de material fragmentado. As áreas em que a perfuração para explosão de furos é utilizada são (DRILLING, 1996):

- Pedreiras
- Dentro das minas
- Construção de estradas
- Barragens

A perfuração para estudos sísmicos é geralmente conduzida em áreas remotas. Este tipo de perfuração acontece com baixa profundidade e auxilia para a ampliação dos conhecimentos geológicos e também para identificar possíveis fontes de extração, como mineral, petróleo e gás (DRILLING, 1996).

#### **2.1.5 Poços artesianos**

A perfuração de poços de água é conduzida principalmente por empresas privadas e em sua maioria em regiões rurais. Entretanto, algumas grandes empresas são responsáveis de extrair água do subsolo para cobrir regiões mais extensas. Com isso a perfuração de poços de água começou a ser utilizado para (DRILLING, 1996):

- Poços de monitoramento
- Uso doméstico
- Irrigação
- Abastecimento de água da cidade
- Planta industrial
- Remoção de água para poços de minas e construções.

Na Figura 5 são apresentados alguns equipamentos utilizados para a perfuração de poços. Geralmente são equipamentos com dimensões maiores devido às perfurações serem mais profundas (GEOSOL, 2018).

Figura 5: Perfuração de poços



Fonte: [www.geosol.com.br](http://www.geosol.com.br)

### 2.1.6 Meio ambiente

Perfuração ambiental envolve as aplicações especializadas em métodos geotécnicos e de poços para monitorar a qualidade das águas subterrâneas e auxiliar no controle contra a poluição. Especificamente, os métodos de perfuração e de amostragem ambiental são realizados para (DRILLING, 1996):

- Monitoramento de aterros ou lagoas com chances de serem poluídos.
- Monitoramento e testes ambientais em áreas protegidas e de utilização para abastecimento público
- Testes para identificar causas de problemas de poluição já existentes
- Retirar amostras que contribuam para a recuperação e tratamento de águas subterrâneas que apresentem poluentes.
- Identificação de produtos ou artefatos humanos.

### 2.1.7 Óleo e Gás

A perfuração de petróleo e gás é conduzida tanto em plataformas ao mar quanto também em solo. Essa atividade, geralmente é feita por empreiteiros, contratados por grandes empresas responsáveis pela exploração desses materiais. Essa perfuração envolve (DRILLING, 1996):

- Riscos tanto no mar quanto em solo
- Perfuração estratigráfica para melhor compreensão da geologia no local.
- Poços de produção

As indústrias de petróleo e gás também fazem uso extensivo de outros setores de perfuração tais como a perfuração ambiental, poços de água e explosão de furos para melhor avaliar o local de exploração (DRILLING, 1996).

Na Figura 6 são apresentados alguns equipamentos utilizados para a sondagem de óleo e gás. São equipamentos, na sua maioria, de grande porte devido às profundidades maiores para este tipo de pesquisa (GEOSOL, 2018).

Figura 6: Sondas de perfuração para gás natural



Fonte: [www.geosol.com.br](http://www.geosol.com.br)

## 2.2 Equipamento de perfuração

De acordo com o tópico anterior, pode-se dizer que os principais objetivos do equipamento de perfuração são (MATOSKI, 2009):

- Amostras geológicas;
- Determinação das propriedades físicas;
- Determinação das propriedades químicas;
- Identificação mineralógica;
- Escavação (explosivos)

### 2.2.1 Classificação

#### 2.2.1.1 Perfuratrizes Percussivas

A perfuração é feita através de golpes com uma broca específica causando a fragmentação por esmagamento da rocha. Na Figura 7 é apresentado um modelo de

perfuratriz manual que utiliza do processo de percussão para fragmentar rochas. Os cascalhos gerados no interior do poço, após os vários golpes, são retirados posteriormente. Apesar da percussão, ela produz um giro da broca imediatamente após cada golpe e seu acionamento é feito por ar comprimido. No entanto existem as acionadas a gasolina, diesel, etc (AZZOUZ, 2008).

Figura 7: Perfuratriz percussiva manual (martetele)



Fonte: Apostila de Perfuratrizes (UTFPR)

### 2.2.1.2 Perfuratrizes rotativas

Esse tipo de perfuratriz transmite à broca somente o movimento de rotação que trabalha a uma pressão constante. Na Figura 8 é apresentado um equipamento de grande porte que utiliza o processo de rotação para realizar as perfurações. Essa atividade é voltada para perfurações na qual é necessário alcançar grandes profundidades, como por exemplo: Poços artesianos e poços petrolíferos (AZZOUZ, 2008).

Figura 8: Perfuratriz rotativa T4BH



Fonte: [www.atlascopco.com.br](http://www.atlascopco.com.br)

### 2.2.1.3 Perfuratrizes percussivo-rotativas

Esta perfuratriz apresenta uma rotação contínua além das percussões sobre a broca. Um modelo de equipamento que realiza este tipo de operação pode ser visto na Figura 9. São utilizadas para diâmetros maiores (38 a 125 mm) A sua rotação também pode ser reversível (AZZOUZ, 2008).

Figura 9: Perfuratriz roto-percussiva MACH 16



Fonte: [www.maquesonda.com.br](http://www.maquesonda.com.br)

## 2.2.2 Principais componentes da perfuratriz

Os principais componentes citados são aqueles ligados diretamente às estruturas a serem analisadas. Esses componentes são responsáveis por transmitir os esforços adotados no momento das análises.

### 2.2.2.1 Primeiro e segundo lance do mastro de perfuração

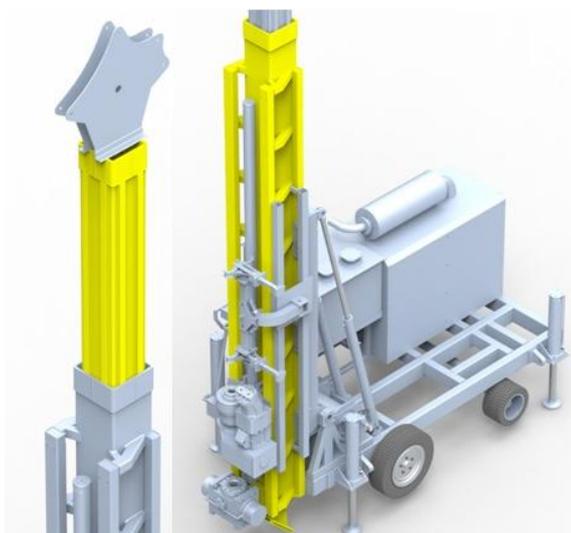
A torre é um dos componentes principais do sistema de sustentação de cargas de uma perfuratriz. Sua principal função é a de sustentar e distribuir todas as cargas de forma mais uniforme até a base da estrutura (THOMAS, 2001).

As estruturas que compõe a torre são projetadas para resistirem aos esforços estáticos e também aos esforços dinâmicos que acontecem durante as operações da sonda, como: descida e retirada dos ferramentais do furo (RIBEIRO, 2016).

Elas podem variar de tamanho e formas de acordo com a finalidade da perfuração (RIBEIRO, 2016).

Em alguns casos elas podem ser divididas em dois lances para facilitar as manobras dos ferramentais e de alguns componentes internos assim como também servir de extensão do primeiro lance de acordo com a Figura 10.

Figura 10: Primeiro lance (à direita) e segundo lance (à esquerda)



Fonte: Própria

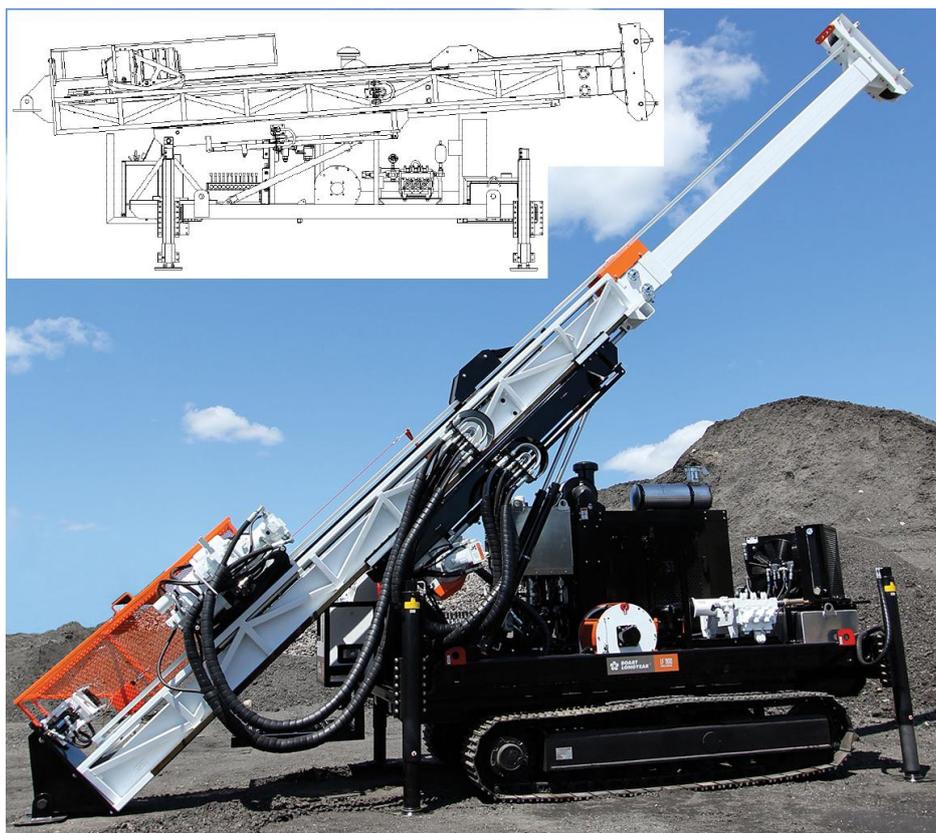
Em outros casos, a torre pode ser treliçada e dividida em duas partes. Dessa forma a torre deverá ser articulada, como pode ser visto na Figura 11 ou poderá também possuir um sistema de deslizamento de uma estrutura na outra conforme Figura 12.

Figura 11: Sonda CS 14



Fonte: [www.atlascopco.com.br](http://www.atlascopco.com.br)

Figura 12: Sonda LF90

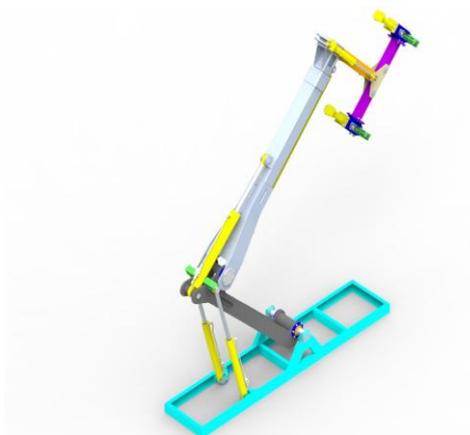


Fonte: [www.boartlongyear.com](http://www.boartlongyear.com)

### 2.2.2.2 Braço manipulador de hastes

O braço manipulador (Figura 13) trata-se de um braço mecânico com a finalidade de manusear os ferramentais tubulares na sonda. É um equipamento importante para que o manuseio das hastes ocorra sem que haja um esforço humano, eliminando assim, riscos existentes durante a movimentação.

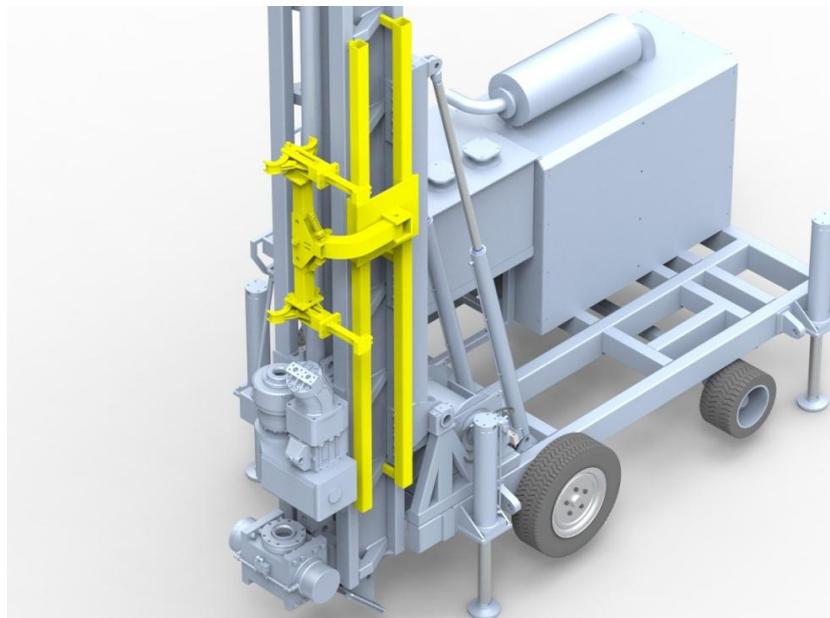
Figura 13: Braço manipulador de hastes



Fonte: Própria

O braço manipulador é fixado no mastro para facilitar a operação de manuseio das hastes assim como mostra a Figura 14.

Figura 14: Braço manipulador de hastes fixado no mastro

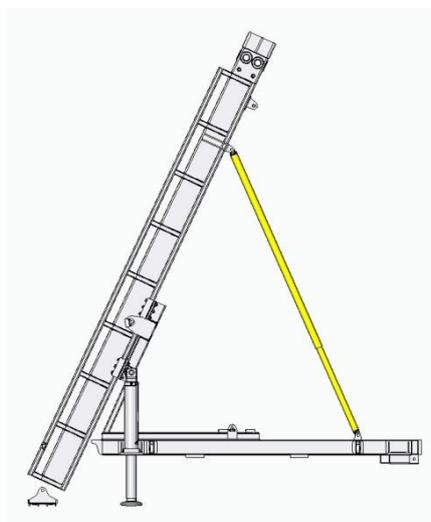


Fonte: Própria

### 2.2.2.3 Suporte auxiliar do mastro

Componente metálico para ancoragem da torre no momento em que a mesma estiver inclinada ( $45^\circ$  ou  $90^\circ$ ). Responsável por aplicar ao sistema uma maior estabilidade, diminuindo assim o balanço do mastro e momentos no pé da torre conforme Figura 15.

Figura 15: Apoio do mastro



Fonte: Própria

#### 2.2.2.4 Cilindros hidráulicos de articulação da torre

São os cilindros responsáveis pela movimentação da torre, como mostra a Figura 16. Quando o equipamento for transportado, os cilindros devem garantir que a torre esteja a  $0^\circ$  e quando o equipamento for operar em campo, ele deve ser acionado para movimentar os conjuntos da torre para  $45^\circ$  ou  $90^\circ$  de acordo com a necessidade da operação.

Figura 16: Cilindros de articulação



Fonte: Própria

#### 2.2.2.5 Guincho principal

O guincho principal (Figura 17) é o equipamento da sonda responsável pela movimentação vertical das tubulações no poço, ou seja: retirada do ferramental.

Figura 17: Guincho principal



Fonte: Própria

### 2.2.2.6 Chassi

Estrutura de suporte para todos os componentes da sonda. O chassi do equipamento pode ser visto na Figura 18. É o principal elemento de sustentação da sonda, para garantir a movimentação do equipamento como um todo e para garantir a segurança na hora da operação.

Figura 18: Chassi

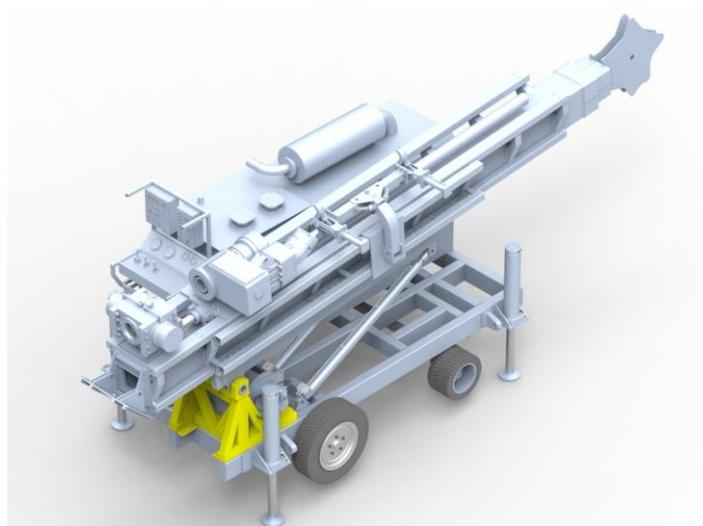


Fonte: Própria

### 2.2.2.7 Suporte da mesa de articulação

Suporte metálico para sustentação da mesa de articulação, como mostra a Figura 19. Componente de ligação entre o chassi e a mesa.

Figura 19: Suporte da mesa

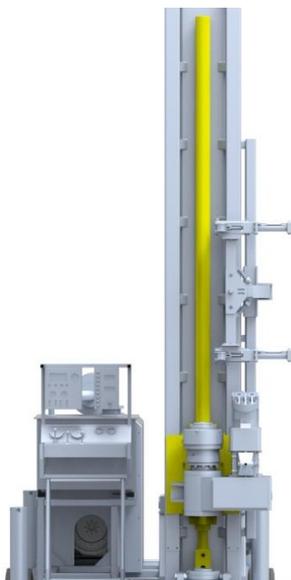


Fonte: Própria

### 2.2.2.8 Cilindro hidráulico de avanço da cabeça de perfuração

Cilindro (Figura 20) responsável pelo avanço da cabeça hidráulica. Através desse cilindro a cabeça hidráulica é acionada fazendo com que ocorra a movimentação vertical das hastes.

Figura 20: Cilindro de perfuração

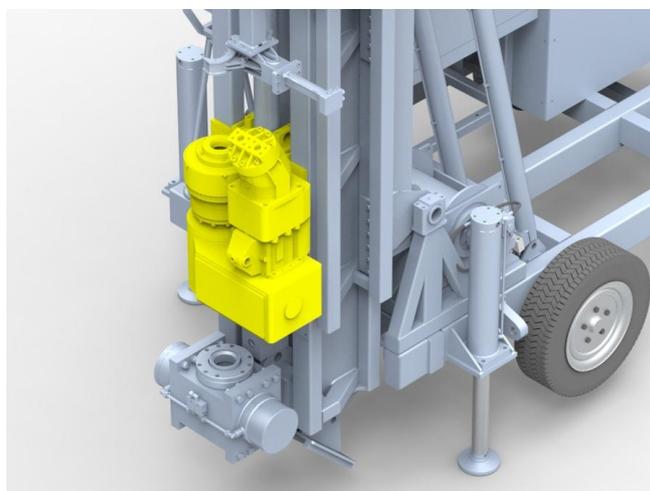


Fonte: Própria

### 2.2.2.9 Unidade de perfuração

A unidade de perfuração (Figura 21) é a parte do equipamento responsável pela rotação e torque das hastes no momento do processo de perfuração da sonda e também para a retirada do ferramental.

Figura 21: Cabeça hidráulica



Fonte: Própria

### 2.2.2.10 Mesa de articulação do mastro

A mesa de articulação (Figura 22) é o componente metálico responsável por sustentar o primeiro e segundo lance da torre. Responsável também por transmitir o movimento dos cilindros de articulação para a torre, assim como permitir o deslizamento da torre para que a mesma seja apoiada no chão no momento da operação do equipamento.

Figura 22: Mesa de articulação



Fonte: Própria

## 2.3 Análise estrutural

Na engenharia, a análise estrutural tem como principal objetivo garantir que uma determinada estrutura ou equipamento suporte as condições de operação sem que ocorram falhas durante a sua vida útil. Os métodos utilizados para a realização das análises estruturais são geralmente obtidos a partir dos princípios de resistência dos materiais (ALVES FILHO, 2007).

De maneira geral, a análise pode ser: estática ou dinâmica; linear ou não linear; elástica ou elasto-plástica (CHAMBERLAIN, 2013).

A análise estática não leva em consideração a variação da aplicação das ações no tempo, e considera que as ações são aplicadas gradualmente. Já a análise dinâmica avalia estruturas com cargas que variam no tempo (CHAMBERLAIN, 2013).

Trata-se de uma análise linear quando se considera que os deslocamentos produzidos pelas ações são relativamente pequenos, e a análise é desenvolvida sobre a configuração geométrica inicial da estrutura (indeformada). Quando a análise passa a

ser não linear são consideradas estruturas com deslocamentos finitos (CHAMBERLAIN, 2013).

Trata-se de uma análise elástica se o comportamento do material não excede o limite de escoamento, ou seja, segue a lei de Hooke (deformações proporcionais às tensões). Se as estruturas excedem as tensões de escoamento, faz-se necessário uma análise elasto-plástica (CHAMBERLAIN, 2013).

A análise estrutural estática tem como objetivo calcular os efeitos de condições de carregamento estático na estrutura, sem considerar os efeitos causados por cargas que variam em função do tempo. A análise estática pode, entretanto, incluir cargas de inércia estática, como por exemplo, a aceleração da gravidade (AZEVEDO, 2016).

A análise estática pode ser usada para determinar os deslocamentos, tensões, deformações específicas e forças nas estruturas ou componentes causadas por carregamentos estáticos. Os tipos de carregamentos que podem ser aplicados em análise estática incluem (AZEVEDO, 2016):

- Forças, momentos e pressões aplicadas externamente;
- Forças inerciais estáticas (como a gravidade);

A análise estática pode ser linear ou não linear. Todos os tipos de não linearidades são permitidos, por exemplo, grandes deformações, plasticidade, tensão de rigidez, elementos hiper-elásticos e assim por diante (AZEVEDO, 2016).

As normas mais modernas consideram que uma análise avançada se faz necessário, ou seja, análises não lineares (CHAMBERLAIN, 2013).

A análise estrutural é uma das análises mais comuns em aplicações com o método de elementos finitos. Trata-se de uma análise que não se limita em estruturas voltadas para a engenharia civil como edifícios e pontes, mas tem uma vasta utilização na engenharia naval, aeronáutica e mecânica, realizando análises de cascos de navios, corpos de aeronaves e diversos componentes mecânicos (AZEVEDO, 2016).

### **2.3.1 Desenvolvimento de um produto**

Uma análise estrutural pode ser realizada de diversas formas até se chegar a um produto final. As etapas podem ser reunidas em três fases (PFEIL, 2009):

- a) Projeto básico: Onde é definido o sistema estrutural, os materiais a serem utilizados e o sistema construtivo.
- b) Dimensionamento ou análise estrutural: Fase na qual são definidas as dimensões dos elementos da estrutura e suas ligações de maneira a garantir a segurança e o bom desempenho da estrutura
- c) Detalhamento: Quando são elaborados os desenhos executivos da estrutura contendo as especificações de todos os seus componentes.

Nas fases de dimensionamento e detalhamento, utiliza-se, além dos conhecimentos de análise estrutural e resistência dos materiais, grande número de regras e recomendações referente à (PFEIL, 2009):

- Critérios de garantia de segurança;
- Padrões de testes para caracterização dos materiais e limites dos valores de características mecânicas;
- Definição de níveis de carga que representem a situação mais desfavorável;
- Limites de tolerâncias para imperfeições na execução;
- Regras construtivas, etc.

## **2.4 Método de Elementos Finitos**

O início do desenvolvimento do Método de Elementos Finitos (MEF) ocorreu no final do século XVIII, quando Gauss propôs a utilização de funções de aproximação aplicadas à solução de problemas matemáticos (OLIVEIRA, 2000).

Por séculos, diversos matemáticos desenvolveram teorias e técnicas analíticas para a solução de problemas. Com as dificuldades e limitações de equipamentos capazes de processar as equações algébricas na época, pouco se evoluiu (GALLAGHER, 1975).

O desenvolvimento prático deste método só ocorreu após muitos anos, quando, por volta de 1950, houve o aparecimento da computação com os avanços tecnológicos. Este desenvolvimento permitiu a elaboração e resolução de equações extensas e complexas (GALLAGHER, 1975).

Em 1956, Turner, Clough, Martins e Topp, quando estavam trabalhando em um projeto de aeronaves, propuseram um método de análise estrutural, similar ao método de elementos finitos. Em 1960, eles adotaram o nome de método de elementos finitos,

explicando-o. A partir deste ponto, o desenvolvimento do método ocorreu exponencialmente, e começou a ser aplicado em diversas áreas da Engenharia e afins (OLIVEIRA, 2000).

Método dos elementos finitos é um procedimento numérico para a análise de estruturas e meios contínuos, e é baseado no conceito de discretização, onde a estrutura é dividida em pequenos subdomínios. A ideia consiste em transformar um problema complexo na soma de diversos problemas simples (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 1997).

O comportamento desses subdomínios é descrito com o emprego de funções simples. A principal característica desse método consiste em utilizar aproximações de caráter global. Para a obtenção de respostas cada vez melhores, aumenta-se o número de subdomínios ao invés de se adotar funções de ordem maior. Esses subdomínios são denominados como elementos finitos (ALVES, 2007).

A enorme utilização do método dos elementos finitos se deve ao fato de poder ser aplicado em problemas clássicos da mecânica estrutural (para o qual foi inicialmente desenvolvido) e também para diversos outros problemas, como (UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2013):

- Problemas não lineares, estáticos ou dinâmicos;
- Mecânica dos sólidos;
- Mecânicas dos fluidos;
- Eletromagnetismo;
- Transmissão de calor;
- Filtração de meios porosos;
- Campo elétrico;
- Acústica, etc.

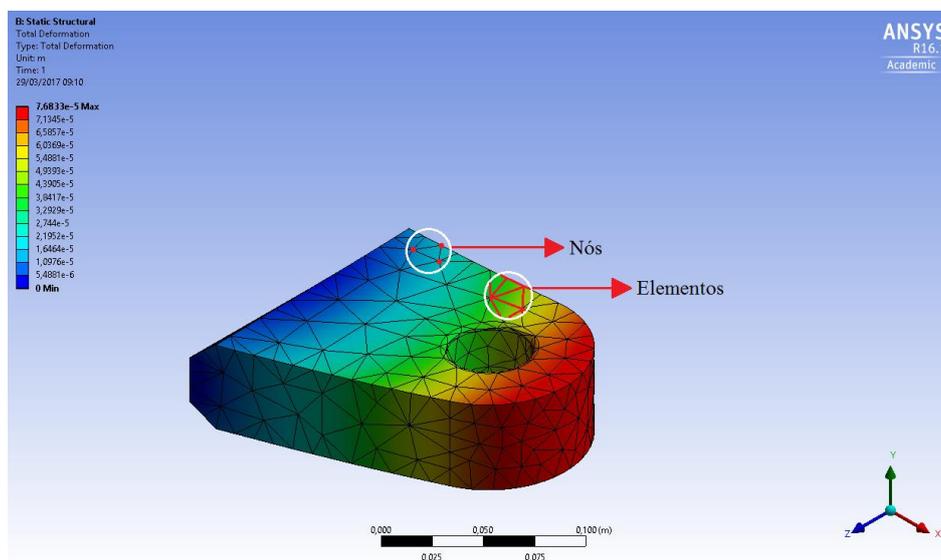
A simulação computacional é bastante utilizada dentro das empresas a fim de possibilitar análises de diversas formas e melhorar a qualidade dos produtos e projetos. As análises são feitas a partir de softwares que utilizam o Método de Elementos Finitos, que possibilita a obtenção de soluções para inúmeras problemáticas de engenharia (ESSS, 2017).

As análises feitas através do método de elementos finitos são realizadas com a entrada de uma geometria do objeto a ser analisado. A partir dessa geometria são

estabelecidas as propriedades mecânicas, condições de contorno, carregamentos, etc., para assim obter os resultados (ESSS, 2017).

Os elementos finitos são conectados por nós ou pontos nodais. Ao conjunto de elementos e nós dá-se o nome de malha, como mostra a Figura 23. Em função dessas malhas, o que significa uma subdivisão da geometria, as equações matemáticas que representam os comportamentos físicos da estrutura ou meio, não serão resolvidas de maneira exata, mas de forma aproximada por este método numérico. A precisão do Método dos Elementos Finitos depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número deles em uma determinada malha, maior a precisão nos resultados da análise (ESSS, 2017).

Figura 23: Nós e elementos em uma malha no olhal de içamento do chassi da sonda



Fonte: Própria

Os softwares de simulação computacional estão evoluindo e buscam aprimorar as análises feitas pelo método dos elementos finitos, melhorando os tipos e a geração das malhas de elementos, as técnicas de modelagem, erros e a apresentação dos resultados, facilitando a utilização desta ferramenta. Dessa forma, é importante que a pessoa que utilize o software tenha o conhecimento dos fundamentos do método para que juntamente com o domínio dos softwares sejam desenvolvidas boas práticas para uma aplicação consistente e mais próxima do real no desenvolvimento e avaliação de produtos e projetos (ESSS, 2017).

A análise pelo método dos elementos finitos se divide em três importantes etapas (AZEVEDO, 2016):

- Pré-processamento: Onde é necessário definir a geometria, tipo de análise, malha, propriedades dos materiais e condições de contorno;
- Processamento: Definição do tipo de análise desejada para obter os deslocamentos nodais;
- Pós-processamento: Onde se obtém os resultados tais como, tensões, deslocamentos, fator de segurança, etc.

## 2.5 FTOOL

O Ftool é um programa para a realização de análise estrutural. O principal objetivo deste software é a representação simples e eficiente das estruturas. O programa foi inicialmente desenvolvido para uso em sala de aula, mas evoluiu para uma ferramenta frequentemente utilizada em projetos estruturais profissionais (FTOOL, 2018).

A edição básica do Ftool permite definir modelos de maneira eficiente e simples. Ele analisa o modelo estrutural e oferece muitos resultados diferentes, como diagramas de força interna e configuração deformada das estruturas, bem como linhas de influência para qualquer ponto na estrutura e nos envelopes de resultado do trem de carga. As seções transversais podem ser definidas parametricamente de acordo com vários modelos (formas retangulares, T, L e I, etc.), selecionando-se de uma variedade de formas padrão (AISC, Gerdau, etc.) ou genericamente (definindo as seções propriedades geométricas como área e momento de inércia). Os apoios podem ser rígidos ou elásticos e podem ser inclinados ou sofrer deslocamentos impostos (FTOOL, 2018).

## 2.6 ANSYS

O ANSYS é um software de elementos finitos que pode ser utilizado nas mais diversas classes de problemas de engenharia. A capacidade do ANSYS inclui habilidades para resolver alguns tipos de análises estruturais.

Algumas análises de estruturas que podem ser realizadas são:

- **Análise estática:** usada para determinar deslocamentos, tensões, etc. sob condição de carga estática. Têm-se dois tipos de análises estáticas, linear e não linear, sendo que as não linearidades podem incluir plasticidade, tensão, rigidez, grandes deformações, grandes tensões, hiperelasticidade, superfície de contato e fissuração.
- **Análise modal:** usada para calcular as frequências naturais e modos de vibração de uma estrutura. Há diferentes métodos disponíveis de extração de modos;
- **Análise dinâmica transiente:** usada para determinar a resposta de uma estrutura às cargas arbitrariamente variáveis no tempo. São permitidas todas as não linearidades mencionadas na análise estática;

Além dos tipos de análises citados, várias características especiais estão disponíveis, como: mecânica da fratura, compósitos, fadiga, etc.

Para a análise de uma estrutura, o Ansys divide o procedimento em três etapas:

- **Preprocessor:** onde é feita a modelagem da estrutura, a definição do tipo de elemento estrutural, das constantes características do elemento e do tipo de material relacionado ao mesmo;
- **Solution:** onde é feita a definição dos tipos de forças atuantes na estrutura e suas condições de apoio e do tipo de análise escolhido;
- **Postprocessor:** onde é feita a apresentação dos resultados da análise da etapa anterior.

O ANSYS é um software complexo e que permite uma infinidade de análises em uma mesma estrutura. É necessário um conhecimento de engenharia para que as simulações sejam realizadas de forma correta e com isso os resultados obtidos estarão mais próximos das condições reais.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Introdução

Este capítulo é destinado à apresentação da metodologia adotada para o desenvolvimento dos cálculos analíticos das estruturas metálicas do equipamento de sondagem, bem como o desenvolvimento e aplicação dos modelos numéricos, mostrando o comportamento das estruturas analisadas.

Alguns aspectos de modelagem serão discutidos, como a geometria e os modelos adotados. Apresentam-se, ainda, discussões mais abrangentes sobre a representatividade do modelo proposto e a aplicação da modelagem numérica na análise do comportamento das estruturas.

Os modelos numéricos serão definidos visando obter resultados mais próximos do comportamento real das estruturas e tornando desta forma possível a comparação entre os resultados analíticos e de simulação numérica com os resultados reais obtidos do primeiro protótipo do equipamento.

Foram utilizados modelos bidimensionais gerados no software FTOOL para verificações de reações e deslocamentos das estruturas.

Serão também utilizados modelos tridimensionais gerados pelo software Solid Edge, que serão utilizados em análise de elementos finitos através do *software* Ansys, verificando as máximas tensões e deformações das estruturas para identificar os pontos críticos e dessa forma realizar o dimensionamento das estruturas.

Após verificação dos resultados do software Ansys, será feita uma análise visando uma nova geometria com um peso reduzido e capaz de suportar todas as cargas do processo de perfuração.

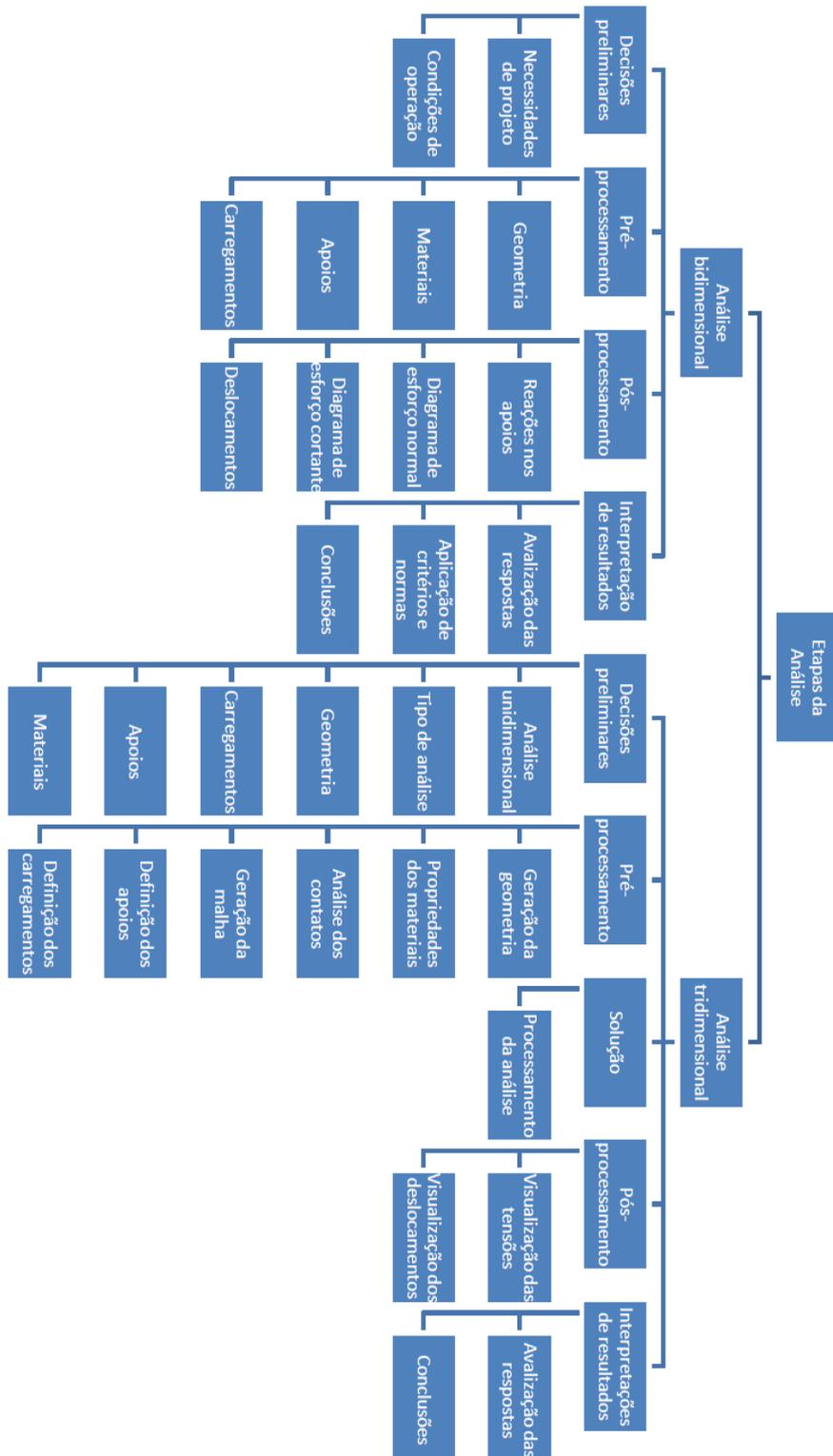
Na Figura 24 é mostrado um fluxograma das etapas realizadas para a realização da análise deste trabalho.

A análise foi dividida em duas partes sendo a primeira a análise bidimensional e a segunda a análise tridimensional.

Na análise bidimensional utilizou-se o software FTOOL para encontrar as reações nos apoios, diagramas de esforços e momentos em toda a estrutura. Com os

resultados, foram realizados alguns cálculos analíticos para a verificação das tensões nas estruturas.

Figura 24: Fluxograma da metodologia



Fonte: Própria

Para a realização da análise tridimensional foram gerados as estruturas em 3D e utilizando o software Ansys, foram realizadas algumas simulações numéricas. Os carregamentos considerados partiram das piores circunstâncias de operação encontradas na análise bidimensional.

### **3.2 Normas técnicas utilizadas para os cálculos analíticos**

Para o dimensionamento das estruturas, as principais normas técnicas pesquisadas para este trabalho foram:

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
  - NBR 8261 (1983): Perfil tubular, aço-carbono, formado à frio, com e sem costura, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais.
  - NBR 6591 (1981): Tubos de aço carbono com costura de seção circular quadrada, retangular e especiais para fins industriais.
  - NBR 8800 (2008): Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.
- ASTM – American Society of Testing and Materials
  - ASTM A36 / A36 – 14: Standard Specification for Carbon Structural Steel
- ASME – American Society of Mechanical Engineers
  - ASME B106, 1M – Desing of Transmission Shafting Desing

### **3.3 Critérios utilizados para os cálculos analíticos**

Para o dimensionamento da estrutura foram realizadas algumas verificações. As principais foram:

- Flexão
- Torção
- Flexo-Torção
- Compressão

Para a análise de falhas da estrutura foi utilizado o Método de Von Mises, conhecido como a teoria da máxima energia de distorção.

### **3.4 Critérios utilizados na análise numérica**

Para se representar um modelo adequadamente à modelagem numérica depende de uma série de critérios, dos quais os mais significativos são a escolha dos elementos finitos, a escolha dos modelos de plasticidade dos materiais com as respectivas descrições constitutivas da relação tensão-deformação e a adequação da geometria de alguns componentes para simular comportamentos específicos.

Esses fatores influenciam diretamente nos mecanismos utilizados para simular o comportamento das estruturas estudadas e são de fundamental importância na validação dos resultados numéricos, viabilizando assim a utilização da modelagem numérica.

Considerando-se a natureza dos resultados que se pretende obter, a adoção de modelos tridimensionais é ainda mais representativa pela possibilidade de simular determinados mecanismos de transferência de esforços que, muitas vezes por impossibilidades numéricas, não podem ser considerados em tipos específicos de elementos finitos bidimensionais.

### **3.5 Estruturas analisadas**

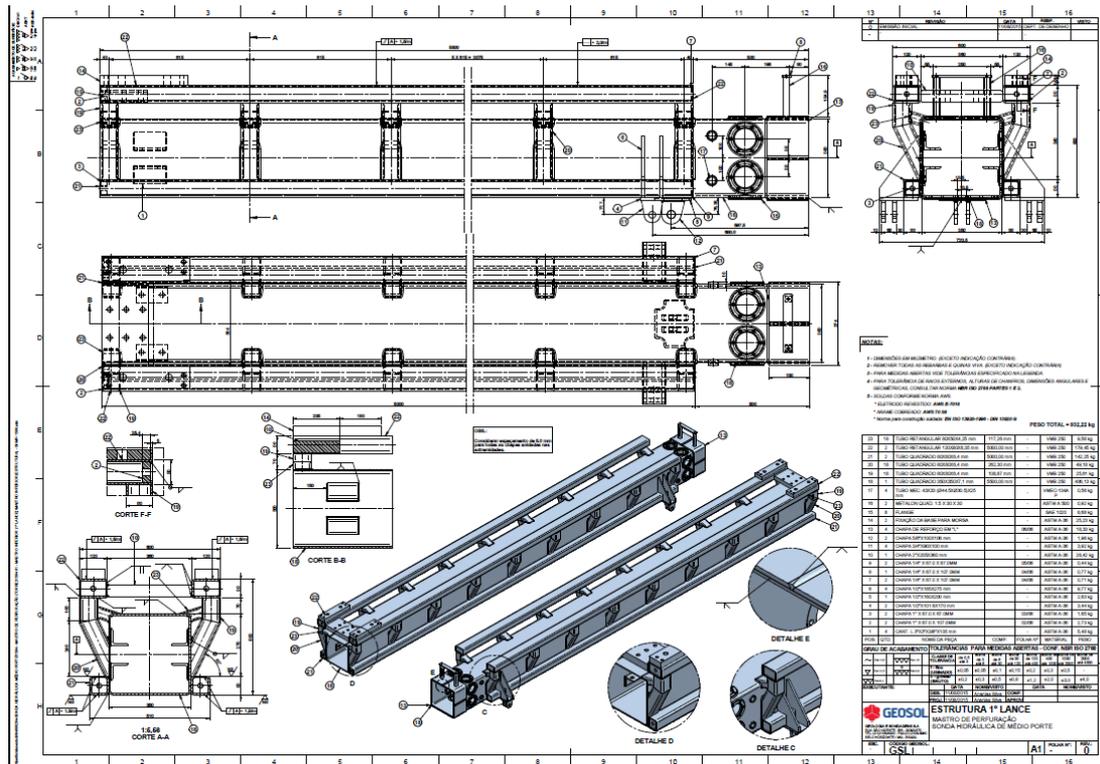
As estruturas analisadas neste trabalho são os principais componentes da torre de perfuração. Levando em consideração os termos de abertura de projeto (TAP) da empresa GEOSOL, a torre terá como característica um sistema telescópico, onde se tem um mastro inferior e um mastro superior.

#### **3.5.1 Mastro Inferior**

O mastro inferior contempla a primeira parte da torre. As Figuras 25, 26 e 27 são os detalhamentos referentes ao primeiro protótipo anterior ao novo dimensionamento.

Na Figura 25 é representado o detalhamento do mastro inferior.

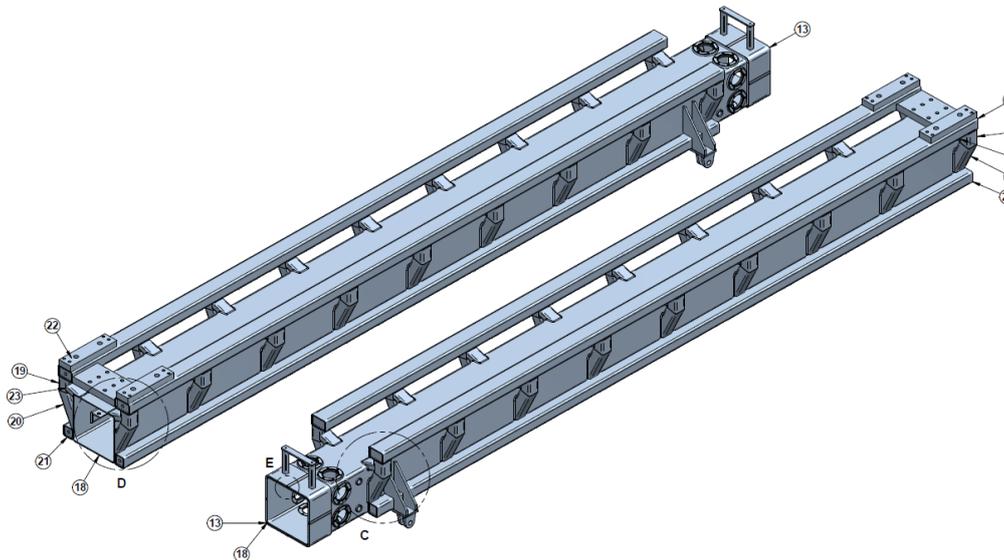
Figura 25: Detalhamento do mastro inferior



Fonte: Própria

A Figura 26 representa a modelagem da estrutura do mastro inferior.

Figura 26: Mastro inferior



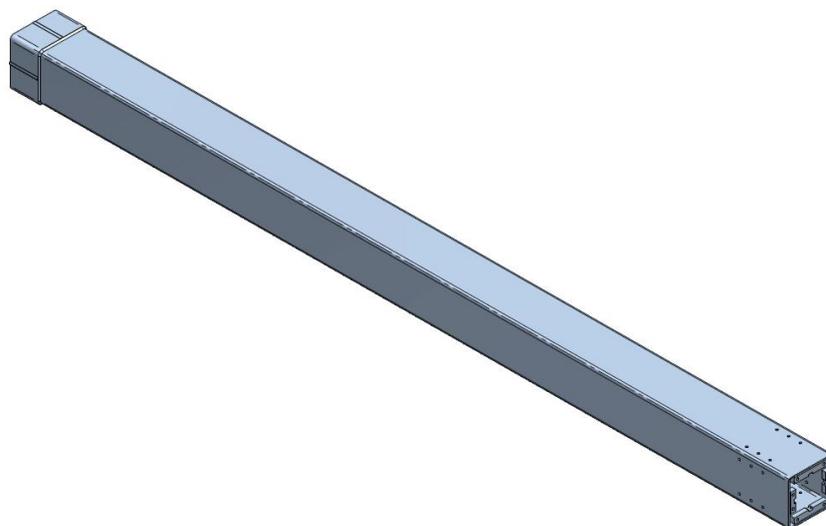
Fonte: Própria

Na Figura 27 é apresentada uma parte do detalhamento da estrutura do mastro inferior onde está a listagem dos materiais. Nesta lista é possível notar o peso de cada um dos itens da estrutura. A estrutura a ser analisada possui um peso total de 932,22 kg.



A Figura 29 apresenta a modelagem do mastro superior.

Figura 29: Mastro superior



Fonte: Própria

A Figura 30 mostra a uma parte do detalhamento da estrutura com o peso do mastro superior.

Figura 30: Peso total do mastro superior

1	ESTRUTURA 2º LANCE			377,35 kg
POS.	DENOMINAÇÃO E MEDIDAS	QUANT.	MATERIAL	PESO Kg

Fonte: Própria

### 3.6 Tipos de materiais

Na busca de uma nova estrutura, foram pesquisados alguns tipos de materiais que poderiam resultar em estruturas com perfis menores, o que resultaria em uma diminuição de peso.

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos materiais pesquisados

MATERIAL	Limite de escoamento [MPa]	Limite de ruptura [MPa]	Alongamento [%]
Aço SAC 350	350	500 ~ 650	19
Aço A500 Grau B	317	400	23
Aço A36	250	400 ~ 550	21
Alumínio 6160 T6	240	260	8
Alumínio 7075	495	559	11

Fonte: Própria

Dessa forma, foram realizadas buscas de possíveis materiais a serem utilizados nas estruturas. Na Tabela 1 são apresentados os materiais pesquisados juntamente com os valores do limite de escoamento, limite de ruptura e alongamento.

Para a análise da estrutura, o material escolhido foi o aço A500 Grau B.

O motivo pela escolha deste material se deve pela sua viabilidade. Trata-se de um material com propriedades mecânicas superiores ao aço A36, possui tubos disponíveis no mercado, ao contrário do aço SAC350 e o custo da matéria prima e fabricação são menores quando comparados às ligas de alumínio.

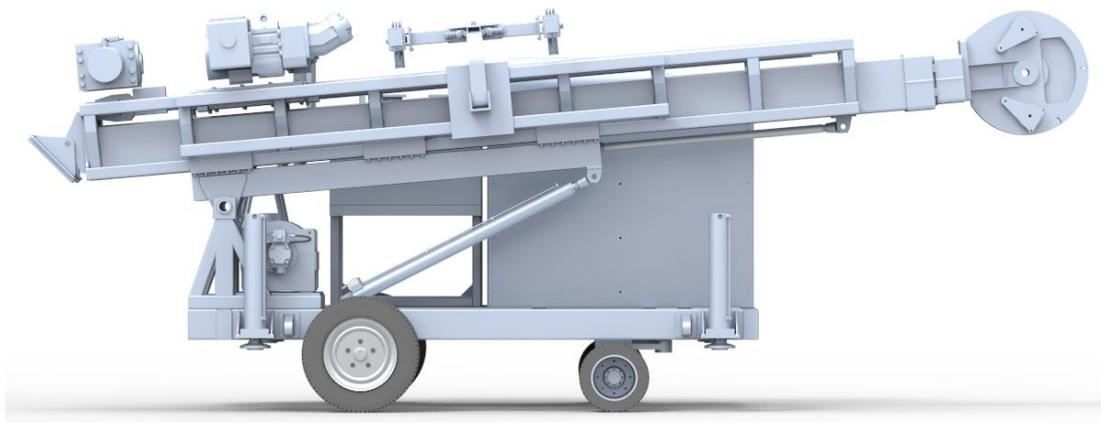
### 3.7 Posições de operação do equipamento

O equipamento de perfuração pode operar de diversas maneiras, dependendo do objetivo do cliente. A torre de perfuração pode trabalhar de  $45^\circ$  a  $90^\circ$ . Isso acaba interferindo nas distribuições das cargas aplicadas e conseqüentemente nas reações das estruturas.

#### 3.7.1 Posição de transporte ( $0^\circ$ )

A Figura 31 mostra a posição do equipamento quando este está posicionado para transporte. Está com a torre completamente recolhida.

Figura 31: Posição de transporte com a torre recolhida



Fonte: Própria

A Figura 32 apresenta o equipamento ainda na posição de transporte, porém iniciando o processo de posicionamento para operação. Torre estendida.

Figura 32: Posição de transporte com a torre estendida



Fonte: Própria

### 3.7.2 Posição de trabalho (45°)

Na Figura 33 o equipamento está posicionado a 45° (posição de operação).

Figura 33: Posição de trabalho a 45°



Fonte: Própria

### 3.7.3 Posição de trabalho (60°)

A Figura 34 apresenta o equipamento em operação na posição de 60°.

Figura 34: Posição de trabalho a 60°



Fonte: Própria

### 3.7.4 Posição de trabalho (90°)

Na Figura 35 o equipamento encontra-se em 90° para a operação.

Figura 35: Posição de trabalho a 90°



Fonte: Própria

### **3.8 Operações críticas do equipamento**

- Perfuração a 45°, 60° e 90°:
  - Momento torçor
  - Momento fletor
- Retirada do ferramental a 45°, 60° e 90°:
  - Compressão
- Trancamento do furo a 45°, 60° e 90°:
  - Momento torçor
  - Momento fletor
  - Compressão

### **3.9 Carregamentos considerados**

Os carregamentos considerados serão todas as cargas aplicadas, distribuídas e torques que a torre de perfuração esteja submetida.

#### **3.9.1 Carregamentos estáticos devido à operação:**

- Momento;
- Torque;
- Forças;
- Esforços axiais.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados analíticos, os resultados numéricos e os resultados experimentais para a verificação da torre e seu dimensionamento para redução do peso. As condições de contorno utilizadas estão citadas no capítulo anterior.

Para a realização da análise estrutural, foi necessária uma verificação em todos os dados de projeto para que a avaliação da estrutura se tornasse válida para a operação do equipamento de sondagem.

### 4.1 Análise bidimensional e analítica – FTOOL

A análise de elementos bidimensionais foi utilizada para uma primeira verificação de reações, momentos e deslocamentos na estrutura.

Tabela 2: Momentos, esforços e deslocamentos da análise bidimensional

	Posição	Força Normal [N]	Força Cortante [N]	Momento Fletor [N.m]	Momento Torçor [N.m]	Flecha Máxima [mm]
2° Lance Torre	0°	0	3.800	8.300	0	2,3
	45°	101.300	10.000	32.800	0	10,4
	60°	102.500	11.100	34.700	0	11,6
	90°	103.200	8.600	30.100	0	9,7
1° Lance Torre	0° (Transporte)	0	18.200	17.300	0	2,0
	0° (Posicionando)	0	109.100	50.700	0	4,0
	45° (Posicionando)	115.300	432.000	113.900	0	9,4
	45° (PULL UP)	106.300	45.100	50.000	5.600	0,5
	45° (PULL DOWN)	116.800	113.300	61.900	5.600	2,6
	60° (Posicionando)	121.400	488.900	107.200	0	9,3
	60° (PULL UP)	121.400	24.100	50.000	5.600	0,5
	60° (PULL DOWN)	121.400	129.100	63.200	5.600	2,8
	90° (Posicionando)	125.000	432.500	95.500	0	9,4
	90° (PULL UP)	125.000	30.700	50.000	5.600	1,0
	90° (PULL DOWN)	125.000	172.000	67.000	5.600	0,8

Fonte: Própria

Para a verificação das reações, momentos e deslocamentos, foi utilizado o software FTOOL.

A Tabela 2 mostra os máximos valores de força normal, cortante e momento fletor na estrutura de acordo com a posição analisada. A tabela foi estruturada de acordo com os resultados obtidos nas análises disponíveis no Apêndice.

O momento torçor é o torque máximo da unidade de rotação que só ocorre quando o equipamento está em processo de operação. Por esse motivo, quando o equipamento está em transporte ou no processo de posicionamento, esta carga não é considerada.

Para o cálculo da tensão cisalhante foram utilizados os máximos esforços cortantes e as áreas das seções transversais para cada posição analisada, conforme a equação 4.1 (NORTON, 2013):

$$\tau_{\text{máx cis}} = \frac{F_{\text{cis}}}{A_{\text{st}}} \quad (4.1)$$

onde:

$\tau_{\text{máx cis}}$  é a tensão máxima cisalhante

$F_{\text{cis}}$  é o esforço máximo cisalhante

$A_{\text{st}}$  é a área da seção transversal

Para o cálculo da tensão atuante devido à torção e flexão foram utilizadas as equações 4.2 e 4.3.

$$M_e = \sqrt{(k_m \times M_f)^2 + (k_t \times M_t)^2} \quad (4.2)$$

onde:

$M_e$  é o Momento equivalente

$k_m$  é o fator de concentração de tensões para flexão

$M_f$  é o momento fletor

$k_t$  é o fator de concentração de tensões para torção

$M_t$  é o momento torçor

$$\sigma_{\text{atuante}} = \frac{M_e}{W_t} + \frac{F_n}{A_{st}} \quad (4.3)$$

onde:

$\sigma_{\text{atuante}}$  é a tensão máxima atuante

$W_t$  é o módulo de rigidez

$F_n$  é o esforço normal

Os valores de concentração de tensão foram obtidos através da Tabela 3. Para as condições de operação do equipamento, foi considerada uma carga gradualmente aplicada (TROYANI, 2002).

Tabela 3: Fatores de concentração de tensões

TIPO DE CARGA	$k_m$	$k_t$
Gradualmente aplicada	1,0	1,0
Subitamente aplicada com pequenos choques	1,5 a 2,0	1,0 a 1,5
Subitamente aplicada com grandes choques	-	1,5 a 3,0

Fonte: ASME

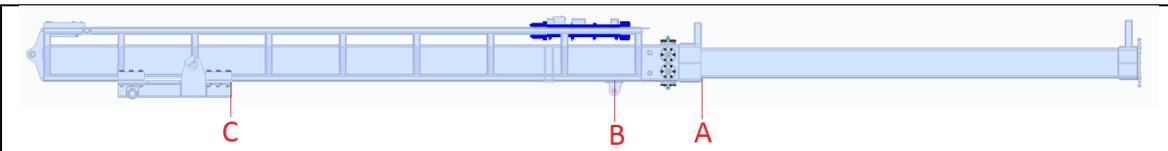
A Tabela 4 mostra os valores das tensões máximas encontradas nas estruturas de acordo com o posicionamento. Mostra também os máximos deslocamentos e o fator de segurança para a estrutura.

Através dessa análise foi possível verificar qual seria a pior condição de trabalho para o primeiro e segundo lance da estrutura.

O 2º lance da torre obteve o menor fator de segurança quando a operação ocorre a 60 graus. Desta forma, esta condição foi considerada a pior para o 2º lance.

O 1º lance da torre apresentou um menor fator de segurança no momento em que a estrutura está sendo posicionada para a operação em 45 graus. Pelo fato de ser um curto período de tempo em que o equipamento fica nesta condição, a pior condição considerada para o 1º lance foi a operação de pull down a 90 graus por apresentar o menor fator de segurança quando o equipamento encontra-se em operação.

Tabela 4: Tensões, deformações e fatores de serviço da análise bidimensional



	Posição	Ponto de maior tensão	Tensão Cisalhamento [MPa]	Tensão Atuante [MPa]	Deformação [mm]	Fator de Segurança
<b>2º Lance Torre</b>	0°	A	0,6	22	2,3	10,9
	45°	A	1,6	103	10,4	2,8
	60°	A	1,8	108	11,6	2,6
	90°	A	1,4	96	9,7	3,0
<b>1º Lance Torre</b>	0° (Transporte)	B	2,5	19	2,0	12,8
	0° (Posicionando)	C	15,1	55	4,0	4,4
	45° (Posicionando)	C	60,0	72	9,4	1,9
	45° (PULL UP)	B	6,3	55	0,5	4,4
	45° (PULL DOWN)	B	15,7	68	2,6	3,5
	60° (Posicionando)	C	56,9	69	9,3	2,1
	60° (PULL UP)	B	3,3	56	0,5	4,4
	60° (PULL DOWN)	B	16,5	70	2,8	3,5
	90° (Posicionando)	C	60,0	64	9,4	2,3
	90° (PULL UP)	B	3,3	56	1,0	4,4
	90° (PULL DOWN)	B	6,3	74	0,8	3,3

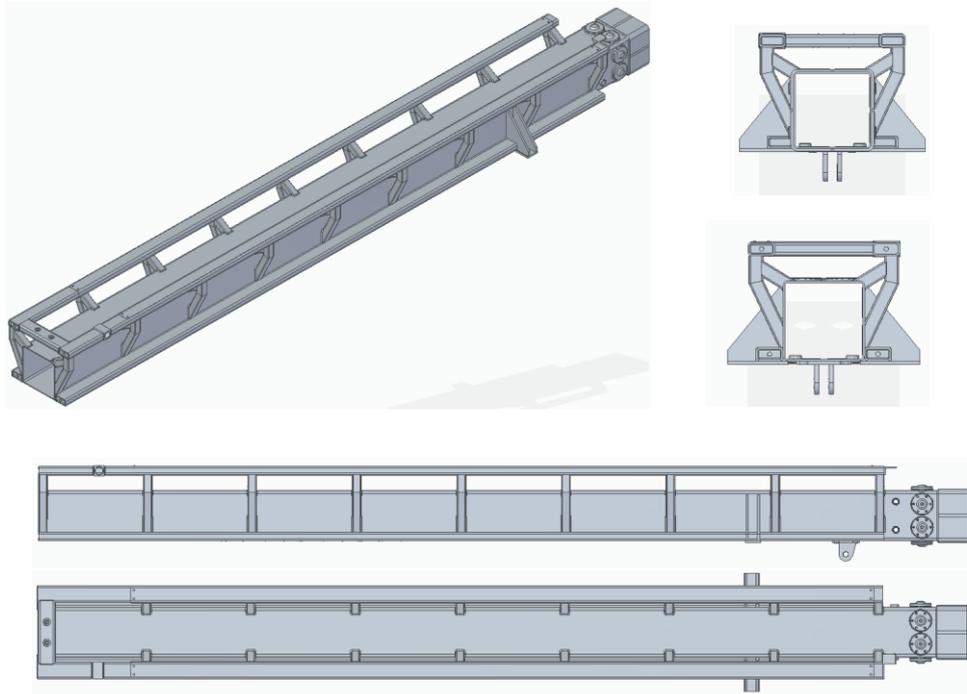
Fonte: Própria

## 4.2 Projeto da Torre em CAD 3D – SolidEdge

Após a análise bidimensional, foram realizadas as modelagens em CAD 3D das estruturas no software Solid Edge.

A modelagem do primeiro lance pode ser vista na Figura 36.

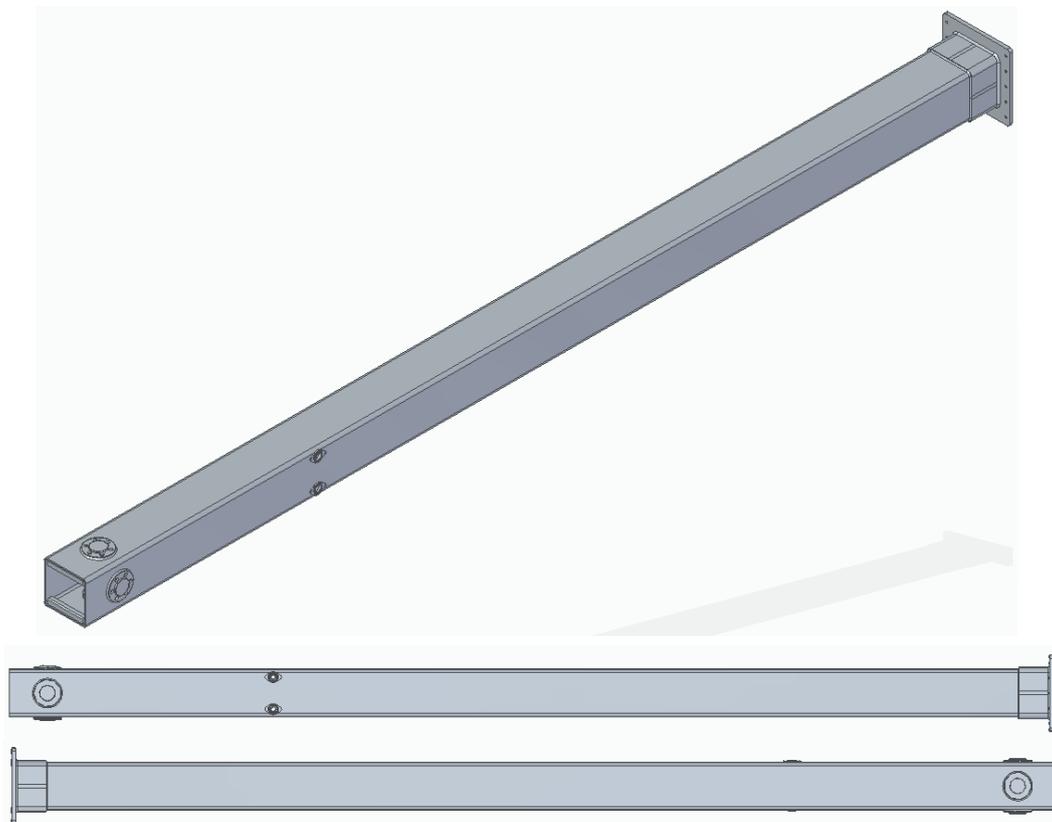
Figura 36: Modelagem 3D do primeiro lance



Fonte: Própria

A Figura 37 apresenta a modelagem do segundo lance da torre.

Figura 37: Modelagem 3D do segundo lance



Fonte: Própria

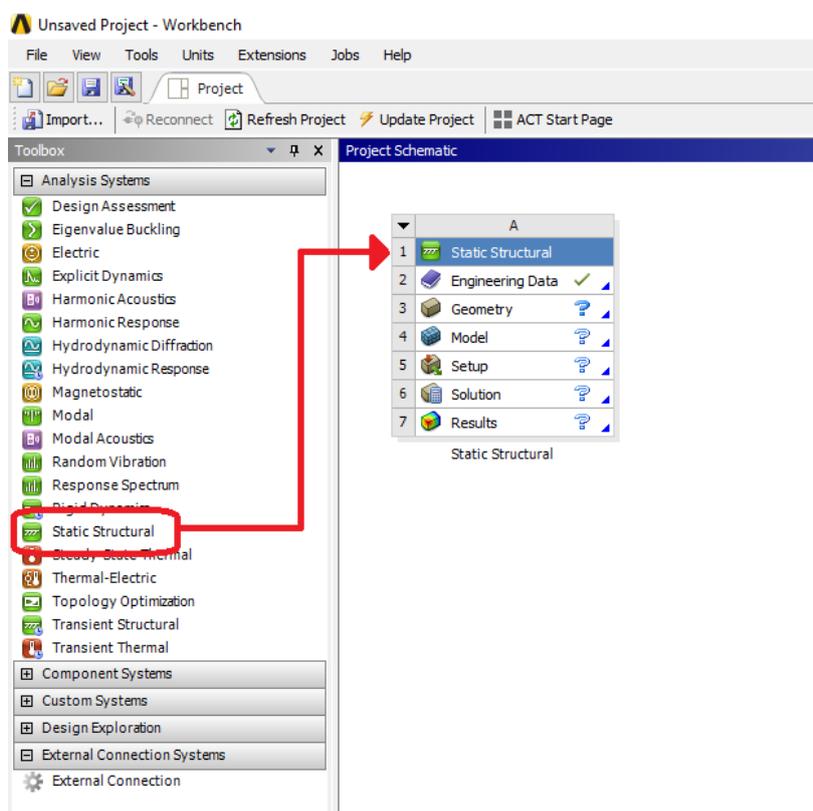
### 4.3 Análise de Elementos Finitos da Torre- ANSYS

Esta análise foi realizada a partir dos resultados obtidos na análise anterior. Dessa forma, foi possível verificar qual seria a pior situação em que a estrutura da torre (primeiro e segundo lance) estaria submetida.

#### 4.3.1 Decisões preliminares

A torre deve ser capaz de suportar todos os carregamentos sem que haja grandes deslocamentos e também tensões superiores à tensão admissível do material em questão. A análise feita no software Ansys será a Análise estrutural estática, conforme a Figura 38.

Figura 38: Início da análise no Ansys



Fonte: Própria

Para que a análise aproxime-se mais do real, é necessário apresentar na geometria, além da estrutura a ser estudada, os locais onde as cargas serão aplicadas.

Alguns componentes do equipamento foram inseridos na montagem da torre para a aplicação dos apoios e carregamentos. Com isso, a simulação ficará mais

próxima da situação real do equipamento e desta forma os resultados obtidos serão mais próximos do real.

Os carregamentos utilizados para a análise serão de acordo com a pior situação vista na análise bidimensional. Os apoios serão adotados de acordo com o processo de perfuração do equipamento.

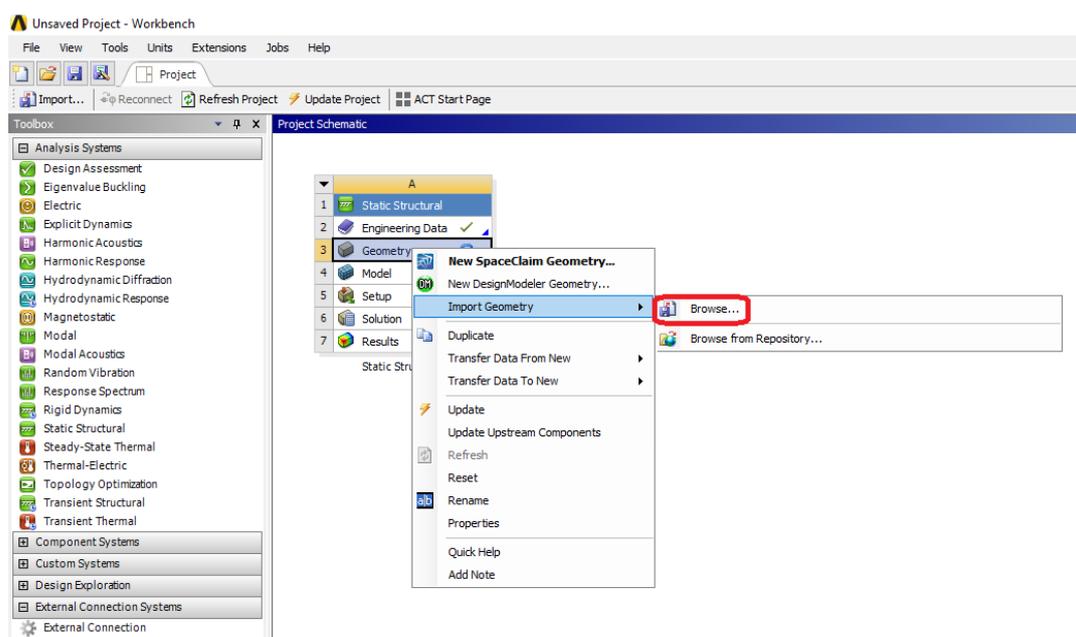
### 4.3.2 Pré-processamento

#### 4.3.2.1 Geometria

Após as modelagens das estruturas no software Solid Edge, as mesmas foram utilizadas para as análises no software Ansys.

Essa geometria foi importada para o software Ansys, conforme a Figura 39 e 40.

Figura 39: Inserção da geometria

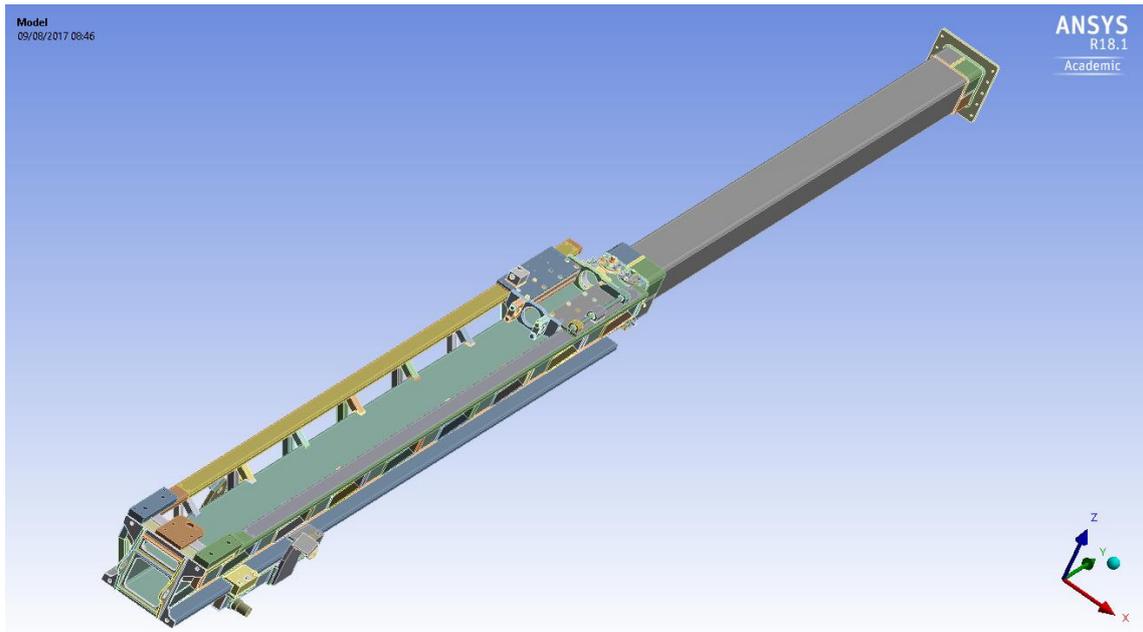


Fonte: Própria

Para obter respostas mais rápidas sem interferir nos resultados, alguns ajustes foram realizados nas estruturas, com o objetivo de deixá-las mais simples.

Os ajustes consistiram em eliminar alguns componentes das montagens, deixando assim a estrutura limpa e favorecendo o tempo de processamento do software, como pode ser visto na Figura 41.

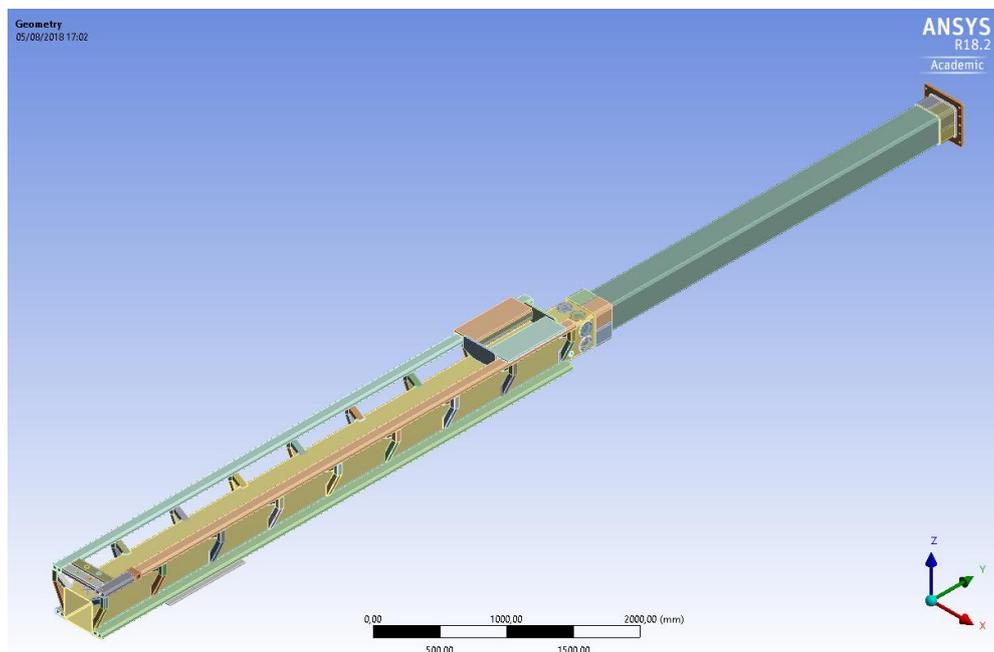
Figura 40: Estrutura inserida no Ansys



Fonte: Própria

Foi necessário também verificar os contatos existentes entre os elementos que compõem a torre. A Figura 42 mostra um exemplo de contato entre o tubo do segundo lance e a flange.

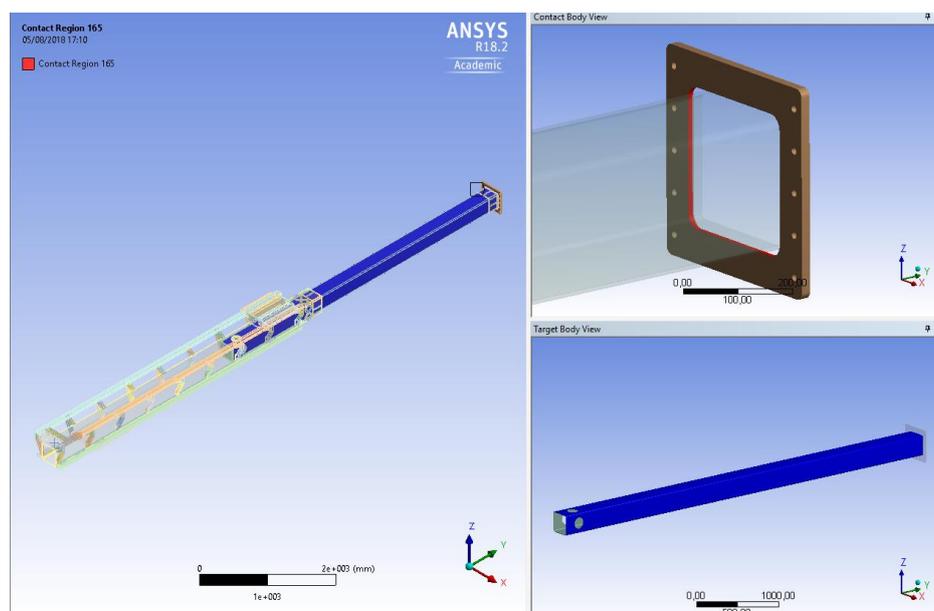
Figura 41: Estrutura da torre simplificada



Fonte: Própria

Todos os contatos foram analisados de tal forma que não houvesse nenhuma interpretação errada do software. Alguns contatos são criados automaticamente, mas devem ser revistos, pois em algumas circunstâncias o software cria contatos inexistentes. Em outras circunstâncias o software não cria os contatos e, portanto é necessário inseri-los.

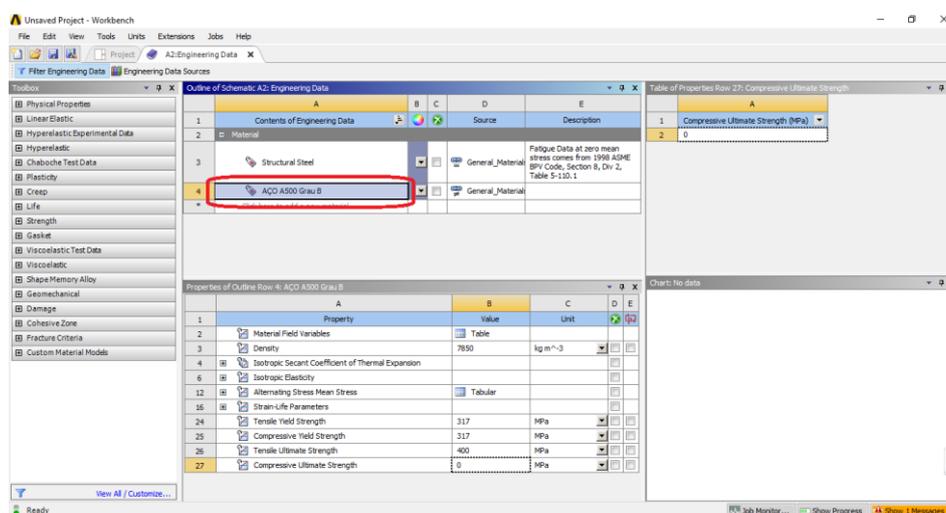
Figura 42: Contato entre o flange e o tubo do segundo lance



Fonte: Própria

O Ansys possui uma biblioteca enorme de materiais com suas propriedades, mas as vezes é necessário criar alguns materiais por não existir na plataforma do Ansys. Nesse caso, foi necessário criar o cadastro do Aço A500 Grau B, conforme Figura 43.

Figura 43: Criação de um novo material



Fonte: Própria

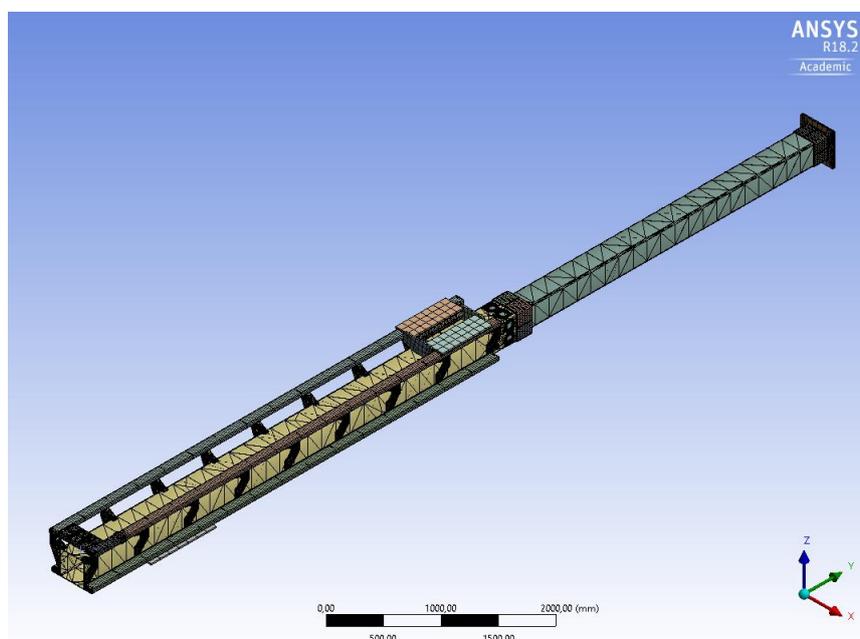
As informações do aço foram obtidas através da Norma NBR 8261.

O material utilizado para essa análise da torre foi o aço A500 Grau B. O motivo da escolha desse material se deve pelo fato de ser um aço com boas propriedades mecânicas, sendo seu limite de ruptura igual a 400 MPa, limite de escoamento igual a 317 MPa e alongamento igual a 23%. Outro ponto analisado foi quanto à disponibilidade dos materiais no mercado, o valor da matéria prima e o valor da mão de obra para transformá-lo no produto final.

#### 4.3.2.2 Malha

Definidas as geometrias e os materiais utilizados, o próximo passo foi a geração da malha na estrutura, conforme Figura 44.

Figura 44: Geração da malha na estrutura

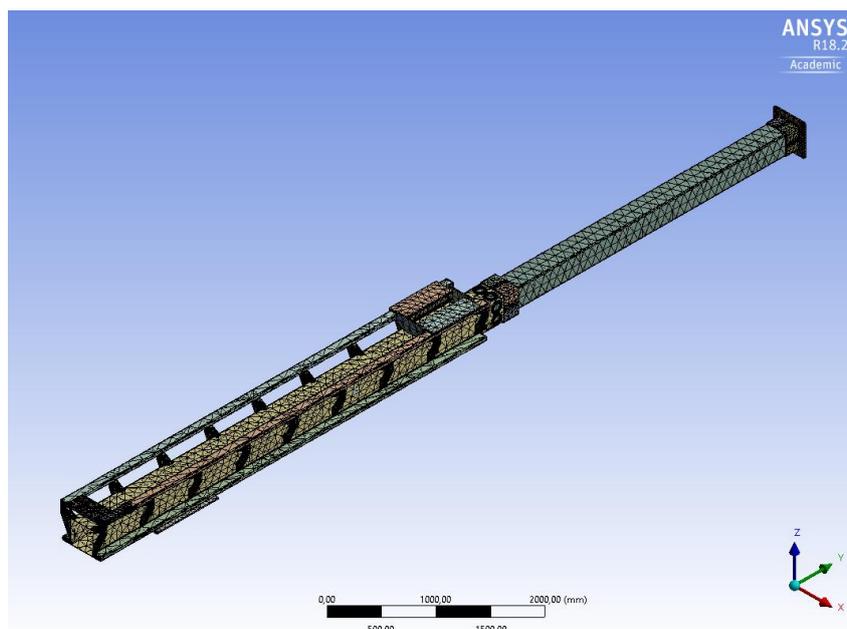


Fonte: Própria

Visto que as malhas iniciais não estavam uniformes e grandes, foi necessário buscar outros modelos de malha e alguns métodos de refinamento, como mostra a Figura 45.

Para a análise da estrutura foi considerado elementos de volume por haver simulações contendo montagens de conjuntos.

Figura 45: Estrutura com malha tetraédrica e refinada



Fonte: Própria

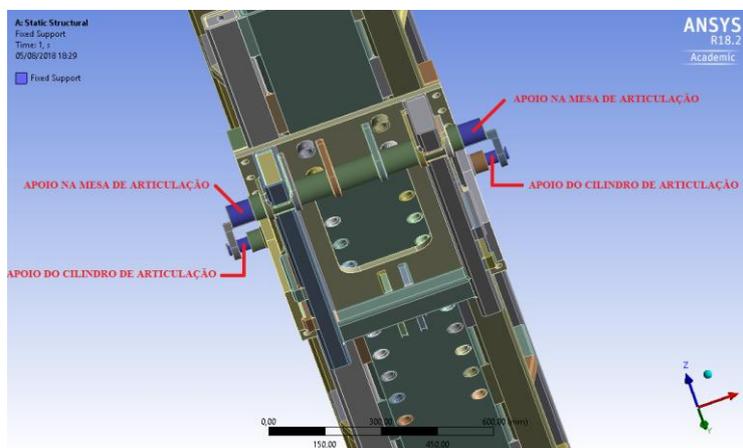
#### 4.3.2.3 Apoios

Após a geração da malha, foi necessário definir os locais dos apoios e os carregamentos a serem aplicados na estrutura.

Os apoios utilizados foram: mesa de articulação e cilindros de articulação, conforme Figura 46.

Na mesa de articulação foi considerado um apoio fixo, pois não há movimento relativo entre a mesa e a estrutura na qual ela é fixada no momento da operação. O mesmo acontece com o apoio dos cilindros de articulação.

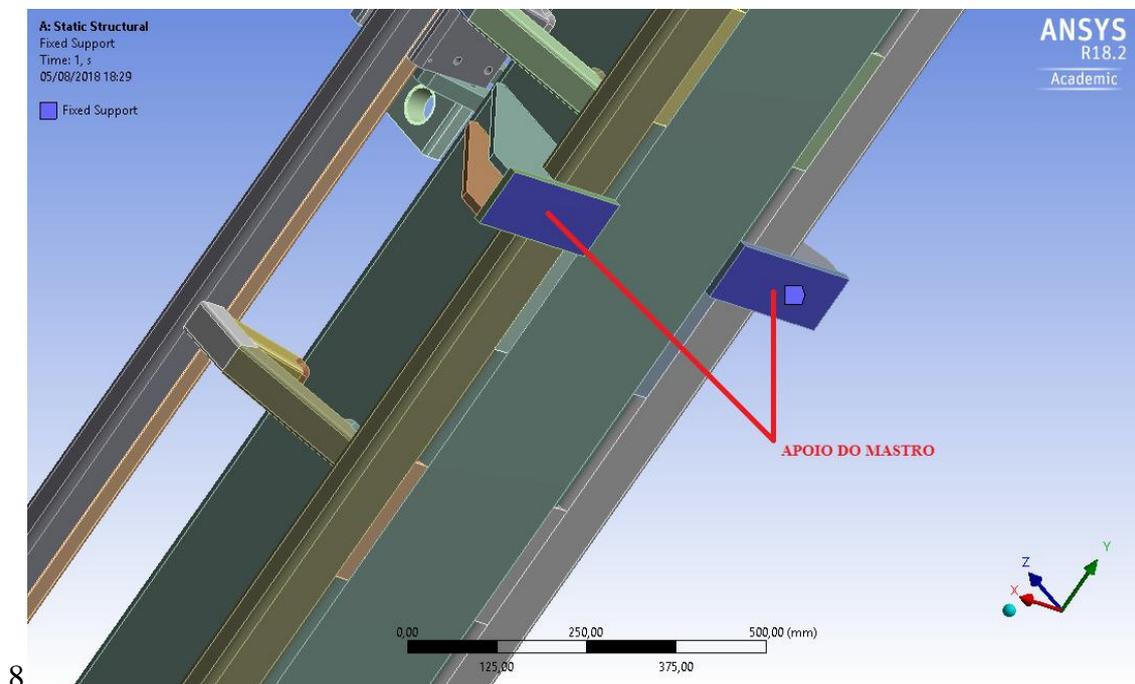
Figura 46: Apoios da mesa e cilindros de articulação



Fonte: Própria

Outro ponto de apoio utilizado foi o do apoio no mastro, conforme Figura 47. Neste caso também foi considerado um apoio fixo, pois no momento da operação não há movimento entre as partes.

Figura 47: Apoio do mastro



Fonte: Própria

#### 4.3.2.4 Carregamentos

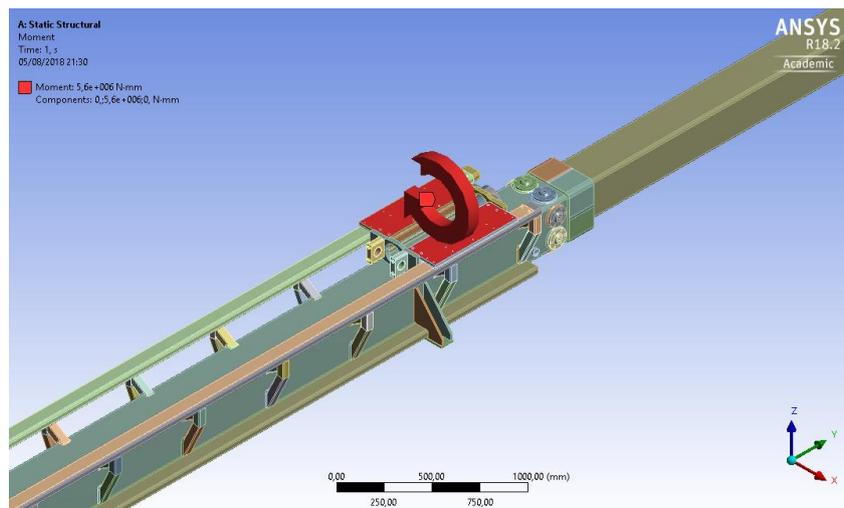
Os carregamentos aplicados na estrutura serão de acordo com a pior situação apresentada na análise bidimensional.

Para o primeiro lance, teremos a posição de 90° (PULL DOWN) como a pior situação. Na análise bidimensional, o pull down estava representado pelo momento causado pelo avanço do ferramental.

Nessas condições, teremos os seguintes carregamentos aplicados:

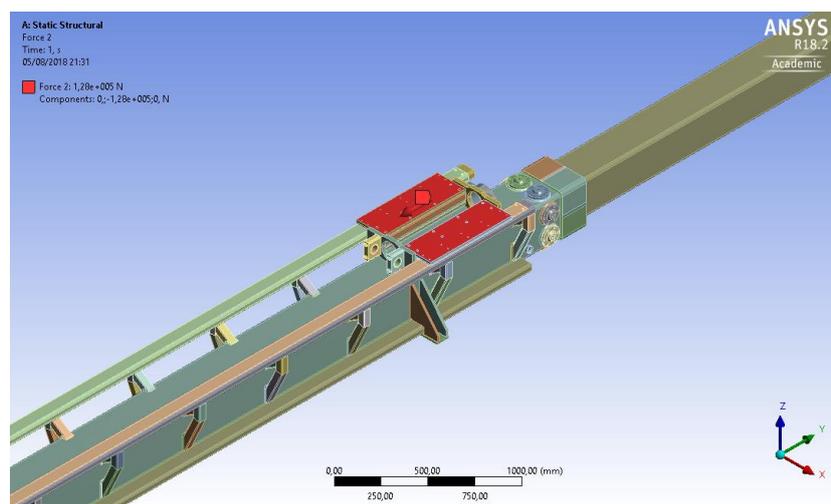
- Momento torção: 5.600.000 N.mm (Figura 48)
- Esforço PULL DOWN: 128.000 N (Figura 49)

Figura 48: Aplicação do momento torçor



Fonte: Própria

Figura 49: Aplicação do esforço Pull Down



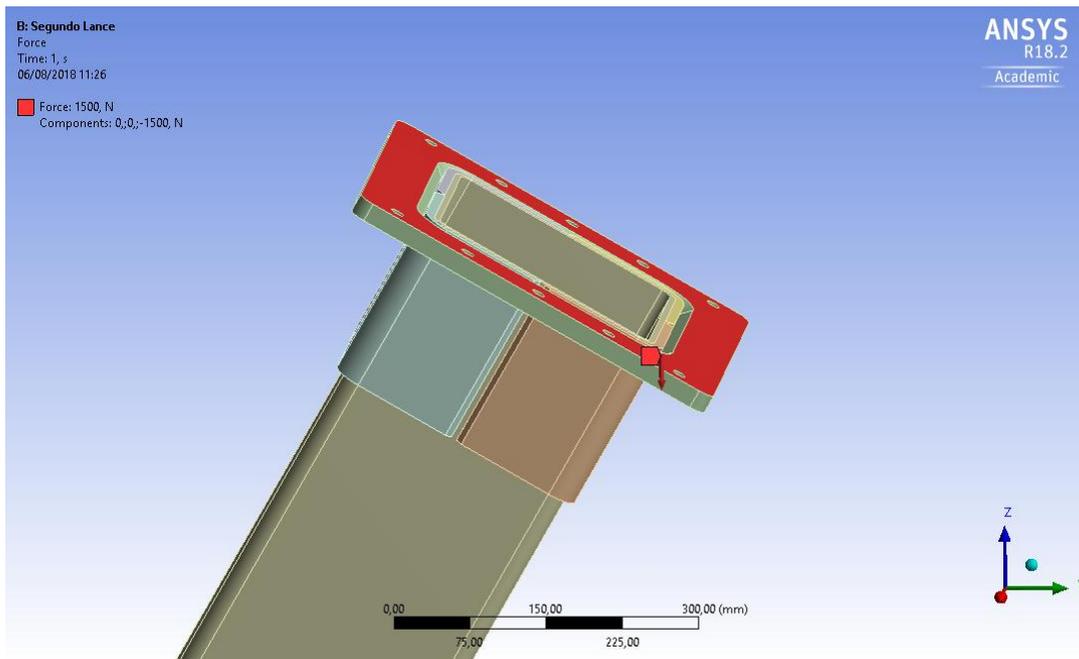
Fonte: Própria

Para o segundo lance, teremos a posição de  $60^\circ$  como a pior situação.

Nessas condições , teremos os seguintes carregamentos aplicados:

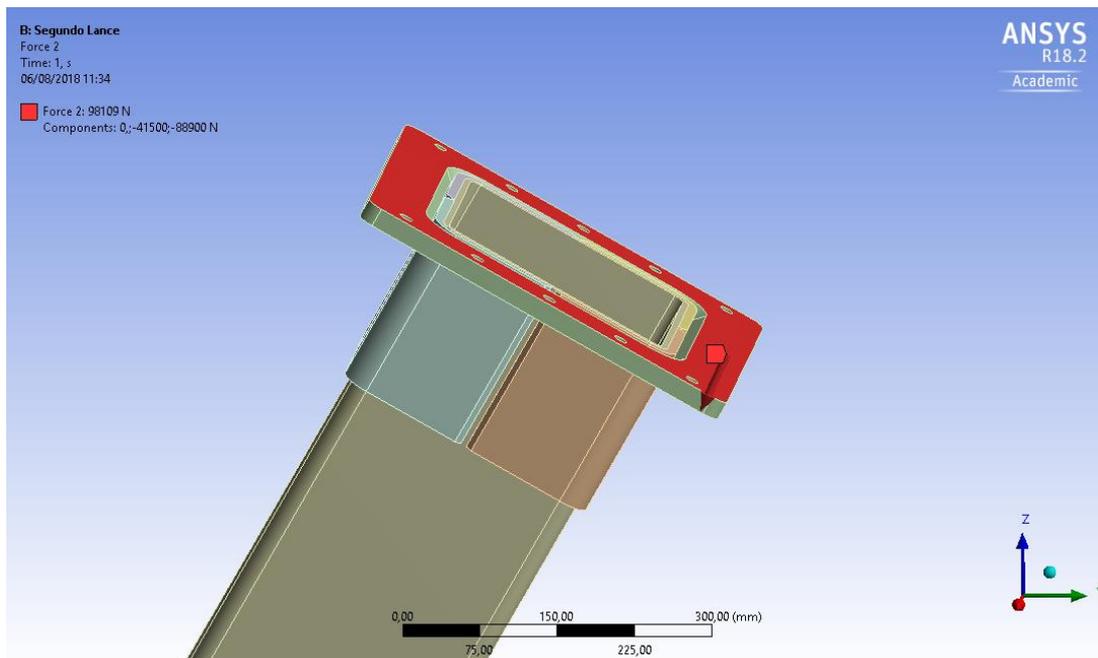
- Carga do bloco de roldanas: 1.500 N (Figura 50)
- Carga do guincho principal:  $F_x=41.500$  N;  $F_y=88.900$  N (Figura 51)

Figura 50: Aplicação da carga do bloco de roldanas



Fonte: Própria

Figura 51: Aplicação das cargas do guincho principal



Fonte: Própria

### 4.3.3 Solução

Após as aplicações dos apoios e carregamentos, foram solicitadas ao software as análises de acordo com os parâmetros adotados.

O tempo de processamento variava de acordo com os tipos de análises, versões do software, desempenho da máquina utilizada, etc.

Um dos principais motivos para um aumento no tempo de processamento era o tamanho da malha utilizada. Quando muito refinada, criavam-se muitos nós e elementos.

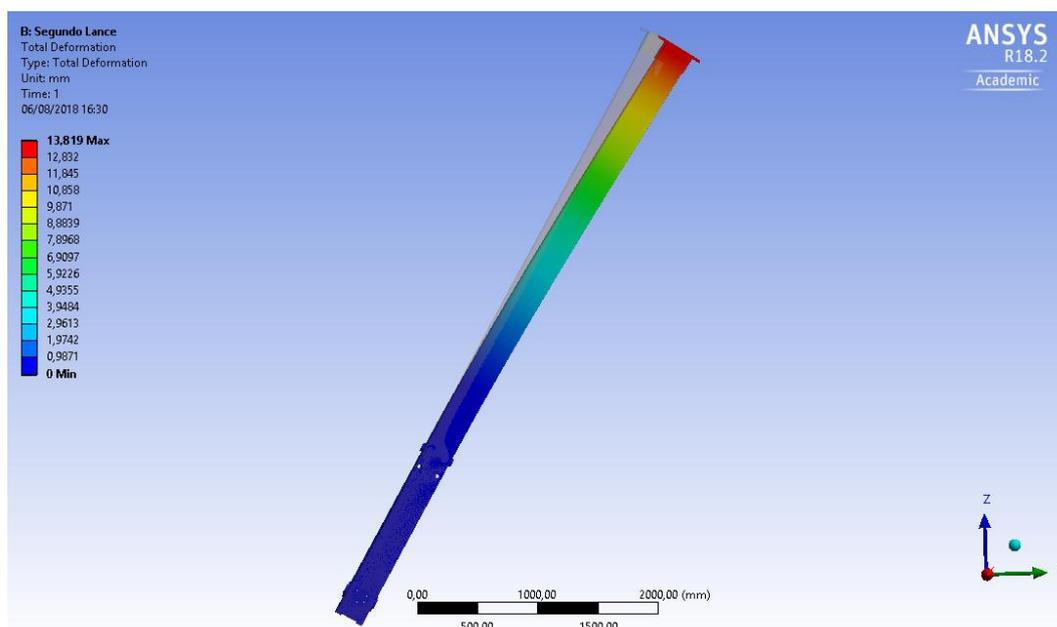
O tempo médio de processamento das análises eram de 6 minutos.

#### 4.3.4 Pós-processamento

No pós-processamento são mostrados os resultados do software. Nesses resultados é possível verificar as tensões em cada parte da estrutura, onde estão as maiores tensões e os deslocamentos da estrutura.

A Figura 52 é o resultado dos deslocamentos do segundo lance. Percebe-se que o deslocamento máximo é de 13,82 mm.

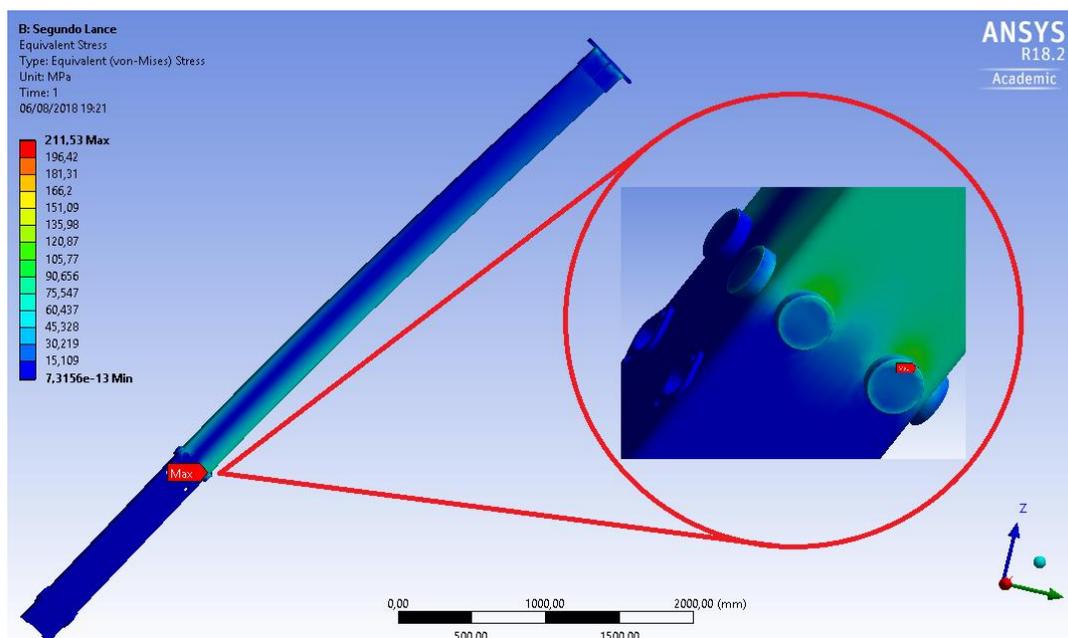
Figura 52: Deslocamentos no segundo lance



Fonte: Própria

A Figura 53 já apresenta as tensões no segundo lance. É possível notar que a máxima tensão encontra-se na região de apoio do segundo lance no primeiro lance. Percebe-se uma máxima tensão de 211,53 MPa na estrutura.

Figura 53: Tensões de Von Mises no segundo lance



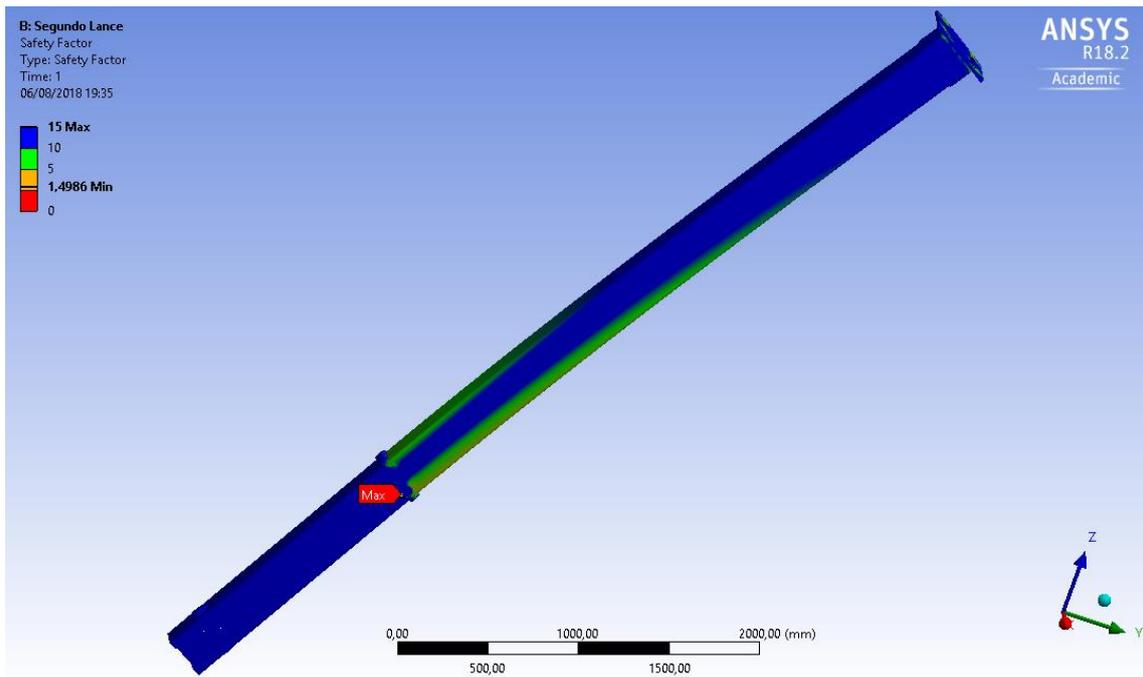
Fonte: Própria

Esta máxima tensão ocorre devido a uma singularidade numérica na solução dos resultados. Tal singularidade ocorre pode ocorrer por não haver uma distribuição correta do carregamento na estrutura ou pelo fato da tensão estar concentrada em uma determinada malha. A singularidade pode ser notada quando os pontos ao redor do local com a máxima tensão apresentam tensões bem inferiores.

Ao desconsiderar estes pontos de concentração, percebe-se uma tensão na estrutura de 105,77 MPa.

Com os resultados das análises do software, chegou-se a um fator de segurança na estrutura de 1,49, conforme Figura 54. Esse fator se deve pelo fato da tensão ocorrer no tubo cuja tensão de escoamento é de 317 MPa. Considerando a singularidade numérica conforme dito anteriormente, o coeficiente de segurança passa a ser 3,01.

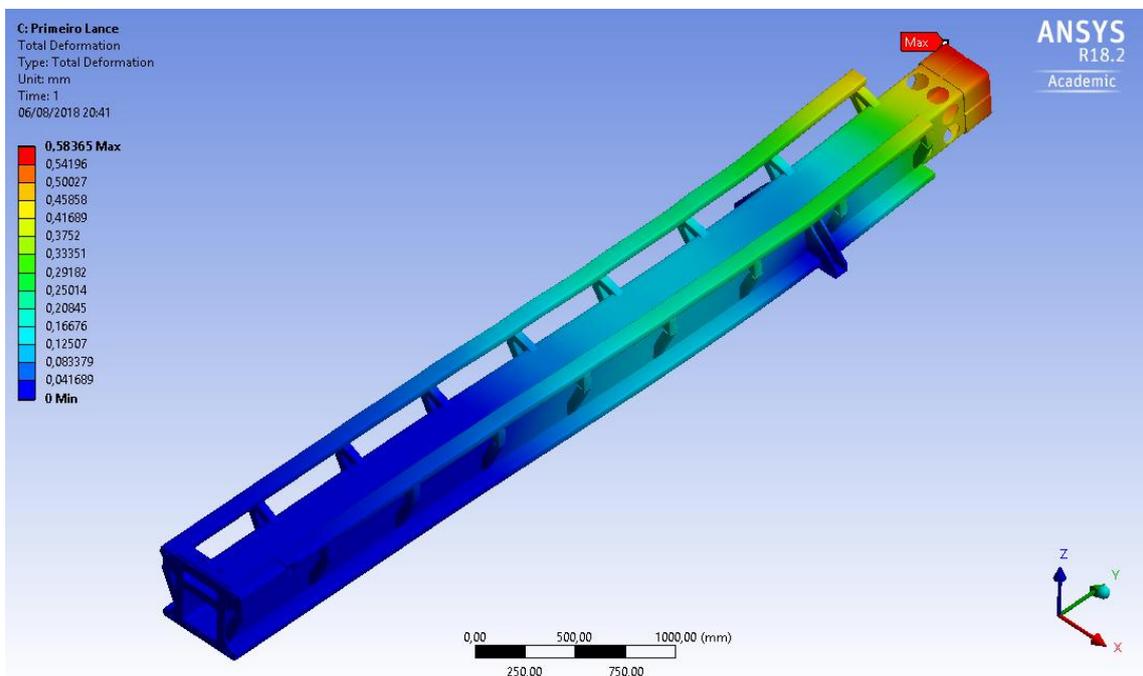
Figura 54: Fator de segurança do segundo lance



Fonte: Própria

O primeiro lance também foi analisado, e se mostrou uma estrutura rígida obtendo um deslocamento máximo de 0,58 mm, como mostra a Figura 55.

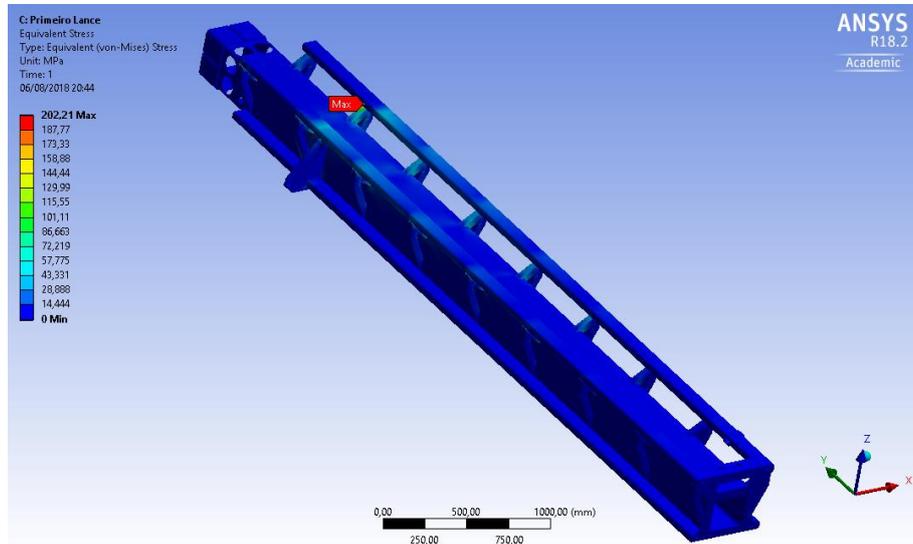
Figura 55: Deslocamentos no primeiro lance



Fonte: Própria

Da mesma forma, foram analisadas as tensões e verificou-se uma máxima tensão de 202,21 MPa, conforme Figura 56.

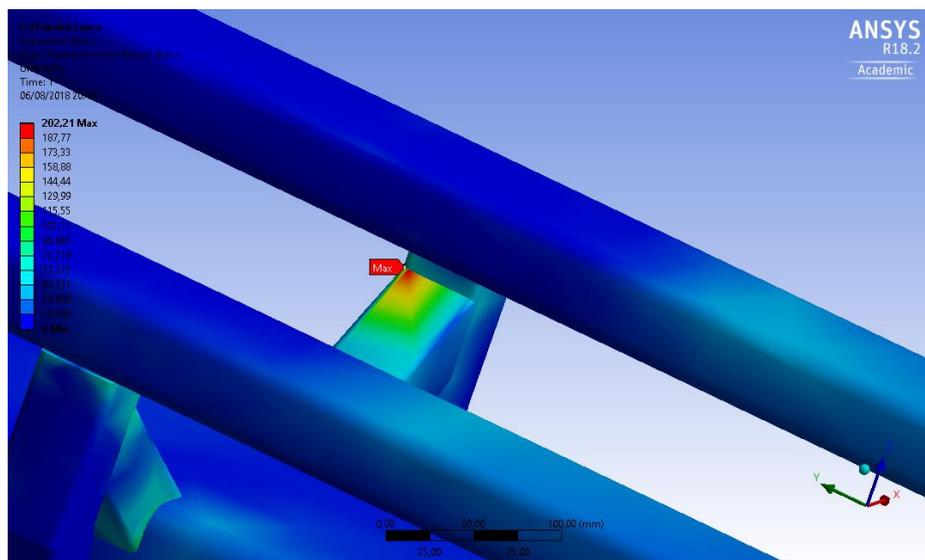
Figura 56: Tensões de Von Mises no primeiro lance



Fonte: Própria

A máxima tensão encontra-se em uma área muito pequena e específica da estrutura. Essa máxima tensão se deve também pela singularidade numérica da solução da análise. Isso se deve pelo fato da região concentrar o carregamento em um determinado local onde há a união de tubos estruturais, como pode ser visto na Figura 57. Tal tensão não apresenta risco para a estrutura. Dessa forma, percebe-se uma tensão na estrutura de 86,66 MPa.

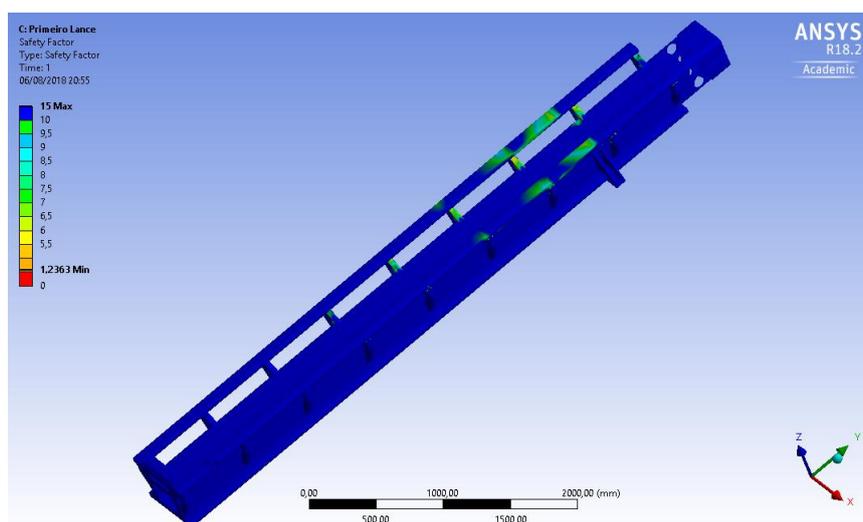
Figura 57: Concentrador de tensões no primeiro lance



Fonte: Própria

Após a análise, percebe-se um fator de segurança na estrutura de 1,23, conforme Figura 58. Percebe-se também que a estrutura apresenta uma grande região azul, caracterizada por locais com baixas tensões. Sendo o fator de segurança 1,23 devido à singularidade numérica, o fator real de segurança da análise é de 3,65 por a estrutura apresentar uma tensão média de 86,66 MPa.

Figura 58: Fator de segurança do primeiro lance

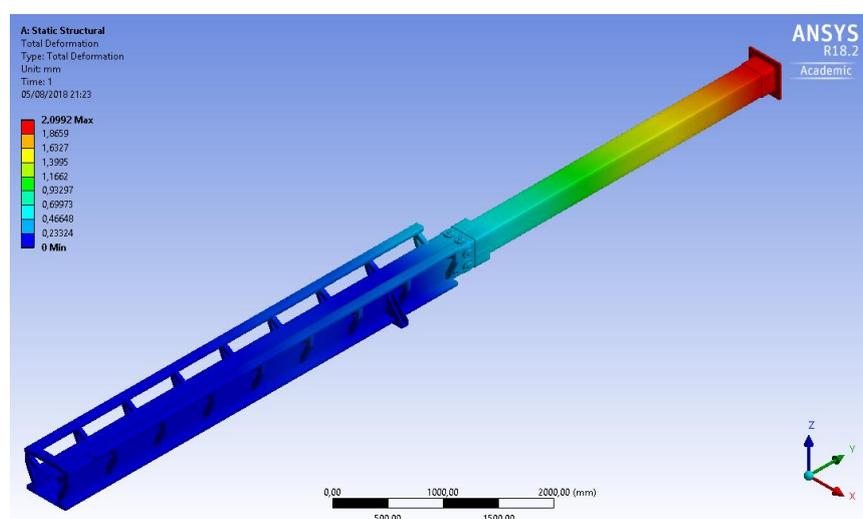


Fonte: Própria

Após as análises individuais das estruturas, fez-se a simulação da torre completa para verificação também dos deslocamentos e tensões.

A Figura 59 mostra os deslocamentos na torre. Percebe-se um deslocamento máximo na ponta do segundo lance de 2,1 mm.

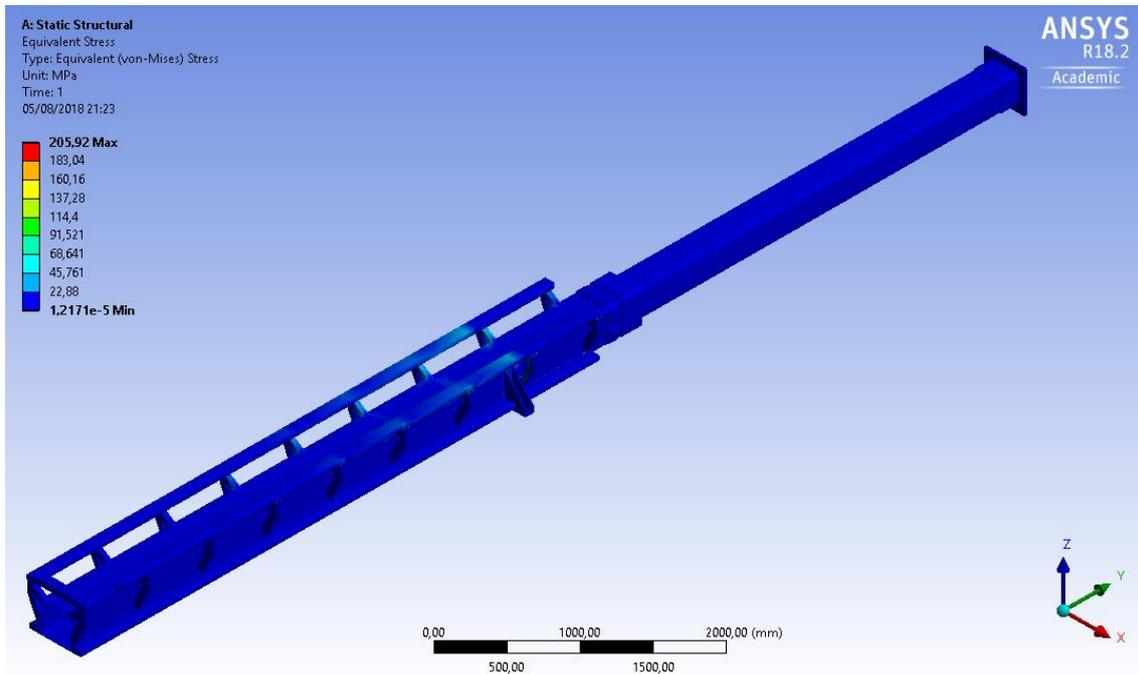
Figura 59: Deslocamentos na torre completa



Fonte: Própria

A Figura 60 apresenta a máxima tensão na torre sendo de 205,92 MPa.

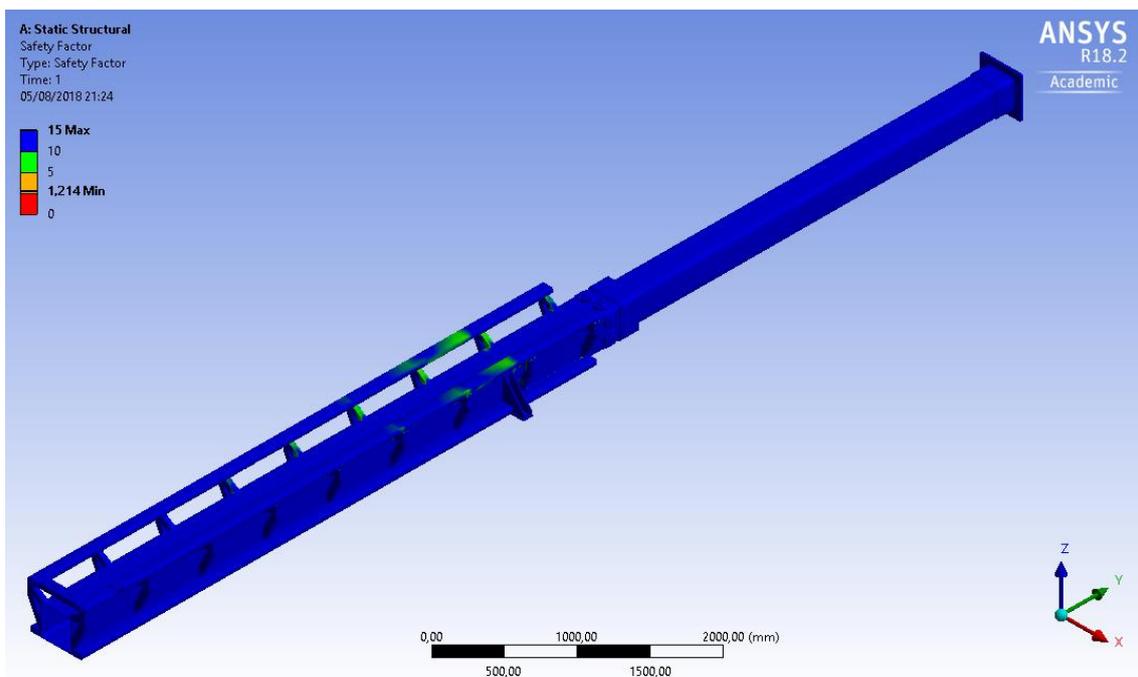
Figura 60: Tensões de Von Mises na torre completa



Fonte: Própria

Com isso, para a simulação da torre completa, havendo a interação direta entre os lances da torre, percebe-se um fator de segurança de 1,21, como mostra a Figura 61.

Figura 61: Fator de segurança da torre completa



Fonte: Própria

Levando em consideração a ocorrência da singularidade numérica na simulação da torre completa, percebe-se uma tensão de 91,52 MPa e portanto um fator de segurança de 3,46.

#### 4.4 Análise Comparativa das Estruturas

A Tabela 5 apresenta os resultados das análises bidimensionais e de elementos finitos das estruturas para a pior situação de trabalho

Tabela 5: Análise comparativa entre as análises bidimensionais e elementos finitos

	Posição	Análise Bidimensional			Análise de Elementos Finitos		
		Deslocamento [mm]	Tensão Máxima [MPa]	Fator de Segurança	Deslocamento [mm]	Tensão Máxima [MPa]	Fator de Segurança
<b>Segundo Lance</b>	60°	11,6	109,8	2,6	13,82	105,77	3,01
<b>Primeiro Lance</b>	90° (PULL DOWN)	0,8	80,3	3,3	0,58	86,66	3,65

Fonte: Própria

Percebem-se algumas variações nas análises pelo fato de serem análises utilizando métodos diferentes.

Mesmo com as variações, as estruturas possuem um determinado coeficiente de segurança. As tensões máximas na análise de elementos finitos são áreas de concentradores de tensão, conforme dito anteriormente.

Sendo as áreas de concentradores de tensão, valores que não apresentam risco para as estruturas, o fator de segurança da estrutura acaba sendo maior, aproximando ainda mais os resultados das duas análises.

#### 4.5 Construção das Torres

Depois de realizadas as análises e aceitação do projeto, as estruturas foram detalhadas para fabricação, conforme Figuras 62 e 63.



Figura 64: Etapas da fabricação do primeiro lance



Fonte: Própria

Figura 65: Etapas de fabricação do segundo lance



Fonte: Própria

#### 4.6 Discussão dos Resultados

Com as análises realizadas, foi possível apresentar uma nova estrutura de torre para o equipamento de sondagem. Essa nova estrutura, foi capaz de suportar as cargas, se mantendo resistente e mais leve favorecendo assim o transporte e manuseio do equipamento no campo.

Com o dimensionamento da estrutura, o primeiro lance passou a ter uma massa de 671.13 kg (conforme detalhamento da Figura 60), o que significou um alívio de 261.09 kg. Já o segundo lance, por ser formado somente por um tubo, passou a ter uma massa de 279.9 kg (conforme detalhamento da Figura 61), portanto um alívio de 97.45 kg.

Com isso, a análise da estrutura significou uma redução total de 358.54 kg na estrutura da torre. Com essa redução da torre, outros componentes do equipamento foram redimensionados, com o objetivo de reduzir ainda mais o peso de todo o conjunto.

Neste trabalho, foi possível verificar o quanto o método de elementos finitos pode ser útil em análises de estruturas complexas. Trata-se de uma análise mais rápida quando comparada com os cálculos analíticos. Além da rapidez, é um método testado e confiável para estes tipos de análises.

Pode-se concluir que a torre possui um coeficiente de segurança superior a dois. Este coeficiente acontece em pontos que são considerados concentradores de tensões da estrutura. Percebe-se que tanto o primeiro lance quanto o segundo lance da torre, estão com tensões e deslocamentos baixos por toda a estrutura.

Após os resultados obtidos neste trabalho, foi iniciado o processo de fabricação dos protótipos com a nova estrutura.

A Figura 66 é uma foto do primeiro protótipo do equipamento com a nova estrutura.

Figura 66: Protótipo otimizado - Sonda 560



Fonte: Própria

A Figura 67 mostra o equipamento sendo testado pelos operadores. O teste realizado foi uma perfuração de 200 metros. Após os testes, verificou-se que a estrutura atendia aos requisitos e por fim o protótipo foi disponibilizado para atender ao campo.

Figura 67: Sonda 560 em teste



Fonte: Própria

A Figura 68 foi o primeiro protótipo (sonda 558) construído antes da realização do dimensionamento da torre. O equipamento apresentou um peso total de aproximadamente 9000 kgf.

Figura 68: Sonda 558 em teste



Fonte: Própria

## 5 CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES

### 5.1 Considerações finais

A partir das considerações de projeto apresentados pela empresa, este trabalho contribuiu para:

- Redução de peso do equipamento
  - O equipamento que anteriormente possuía uma massa de 9000 kg passou a apresentar uma massa total de 8310 kg.
  - Facilitação no processo de transporte
  - Melhores condições de operação e traslado do equipamento no campo.
- Desenvolvimento de um equipamento nacional
  - A empresa deixou de importar outros equipamentos
  - Diminuição de gastos com aquisição de equipamentos novos.
  - Diminuição no custo de manutenção.
  - Facilitação no processo de fabricação do equipamento
- Equipamento resistente
  - Equipamento com uma capacidade de perfuração de 1500 metros.
  - Torque de 5.600 Nm no mandril.
  - Torre com capacidade de manuseio de hastes de até 6 metros.
  - Torre com pré-disposição para a instalação de um manipulador de hastes.

Foi possível notar com estes resultados a importância da análise bidimensional e tridimensional realizadas a partir de dois softwares: FTOOL e ANSYS.

Ambos os softwares contribuíram para o dimensionamento e validação da estrutura do equipamento.

Com os resultados obtidos, o método de elementos finitos se mostrou ser uma ferramenta que possibilita uma análise rápida e com resultados bem próximos aos cálculos analíticos.

### 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros propõem-se:

- Simulações utilizando o método de elementos finitos para:
  - Análise dinâmica
    - Verificar reações e tensões de acordo com a operação do equipamento
  - Fadiga
    - Verificar se há alguns componentes da estrutura que sofram fadiga e verificar a quantidade de ciclos
  - Vibratória
    - Verificar se a vibração do equipamento pode interferir na estrutura do equipamento
  - Térmica.
    - Verificar se o enclausuramento do motor é eficiente
- Análise estrutural de outras estruturas:
  - Sobrechassi
  - Chassi
  - Mesa de articulação
  - Mesa do mandril.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES FILHO, A. Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE. 5ed. São Paulo: Érica, 2007.

ALVES, Lucas M. Apostila de Métodos dos Elementos Finitos. 2007. 438 p. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B106.1M: Desing of Transmission Shafting. 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8261: Perfil tubular, de aço-carbono, formado à frio, com e sem costura, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais. 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. 2008.

AZEVEDO, Domingos de., Análise estrutural com Ansys Workbench: Static Strutral, 2016. 180 p.

AZZOUZ, ALI – Drilling & Mudd Logging - Economical Studies Engineer – Sonatrach – USA 2008.

CHAMBERLAIN, Zacarias – Projeto e Cálculo de Estruturas de Aço, 2013. 238 p.

DRILLING, The Manual of Methods, Applications, and Management. 4. ed. Australia: J.S. McMillan Printing Group, 1996. 615 p.

ESSS. Disponível em: < <http://www.esss.com.br/blog/2016/01/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em 15 de Maio de 2018.

FERREIRA DA SILVA JR., Jayme. Resistência dos materiais. 5. ed. Belo Horizonte: Engenharia e Arquitetura, 1982. 456 p.

FTOOL. Disponível em: <<https://www.ftool.com.br/Ftool/>>. Acesso em 16 de Maio de 2018.

GALLAGHER, R. H. Finite element analysis: Fundamentals. 4.ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975.

GEOSOL. Disponível em: <[www.geosol.com.br/servicos/](http://www.geosol.com.br/servicos/)>. Acesso em 15 de Maio de 2018.

MATOSKI, Adalberto. Apostila de Perfuratrizes. 2009. 16 p. - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

NORTON, Robert L. Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada. (4<sup>a</sup> ed.). Worcester, Massachusetts. 2013.

OLIVEIRA, E. J. Biomecânica básica para ortodontistas. 1ed, Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

PFEIL, W. M. Estruturas de aço: dimensionamento prático. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 357 p.

PETROBRAS, Fundamentos de Perfuração. [S.l.: s.n.], 2002. 328 p.

PONS DA SILVA, Rogério. Equipamentos de Perfuração: Perfuratriz rotativa. Disponível em: <http://www.perfuradores.com.br/index.php?CAT=pocosagua&SPG=equipamentos>. Acesso em: 27 maio 2016.

REACHING greater depths this way: Annual guide to mineral exploration. Canada: Sandvik, 2013.

RIBEIRO, Ronaldo. Sistemas de Sonda. [S.l.: s.n.], 2016. 42 p.

THOMAS, José Eduardo (Org.). Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Rio de Janeiro: Interciência, 2001. 278 p. Disponível em: [http://www.escolaelectra.com.br/alumni/biblioteca/Fundamentos\\_da\\_Engenharia\\_do\\_Petroleo.pdf](http://www.escolaelectra.com.br/alumni/biblioteca/Fundamentos_da_Engenharia_do_Petroleo.pdf). Acesso em: 30 de maio 2016.

TROYANI, N. GOMES, C. AND STERLACCI, G. Theoretical Stress Concentration Factors for Short Rectangular Plates With Centered Circular Holes. ASME J. Mech. Design, V. 124, PP. 126-128, 2002.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Aplicação do método dos elementos finitos em projetos estruturais, 1997. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~pava/Lectures/EF1/Cap2.pdf>. Acesso em: 02 de novembro de 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Método dos elementos finitos na simulação de tensão e elasticidade em placas, 2013. Disponível em:

[http://www.mat.ufmg.br/gaal/aplicacoes/elementos\\_finitos.pdf](http://www.mat.ufmg.br/gaal/aplicacoes/elementos_finitos.pdf). Acesso em: 02 de novembro de 2018.

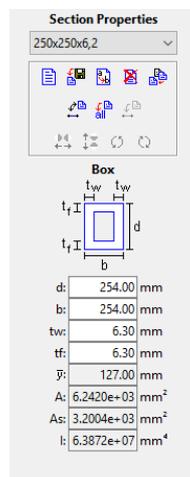
**APÊNDICE – ANÁLISES BIDIMENSIONAIS NO SOFTWARE FTOOL****Posição (0°)**

## A) Segundo Lance

## Considerações:

- Carregamentos:
  - Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura: 0.49 kN/m
  - Peso próprio da roldana: 1.5 kN
- Condições de Contorno:
  - Apoio Engastado na Saída do Primeiro Lance
  - Apoio Rotulado na Parte interna do Primeiro Lance

- Seção Transversal:



## Modelo Estrutural



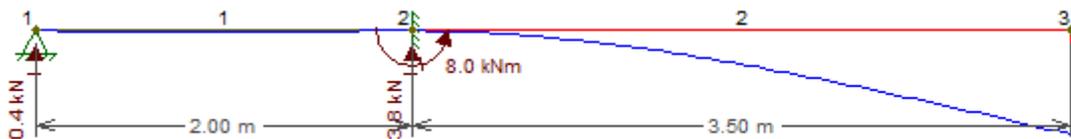
### Diagrama de Esforço Cortante



### Diagrama de Momento Fletor



### Deformação



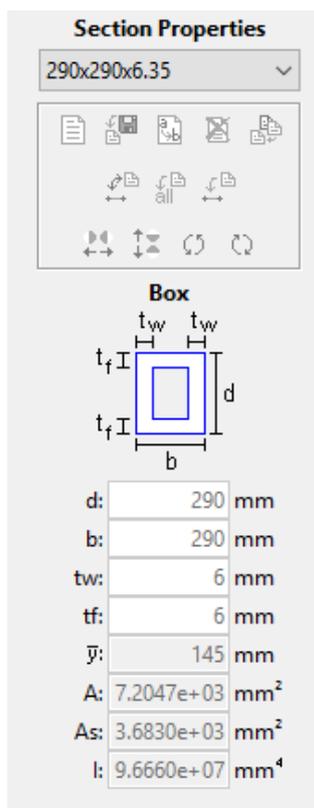
Displ./rotat. at local pos.: x = 3.50 m L = 3.50 m - Dx: 0.000e+000 mm Dy: -2.281e+000 mm Rz: -9.460e-004 rad

### B) Primeiro Lance

Considerações:

- Carregamento:
  - Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura: 2,95 kN/m

- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura + Carga distribuída devido ao peso do conjunto da unidade de rotação: 12,51 kN/m
- Carga aplicada devido à morsa: 3,0 kN
- Carga Aplicada devido ao Manipulador de Hastes: 5,5 kN
- Reações do Segundo Lance quando totalmente estendido: 0,4 kN, 3,7 kN e 8,1 kNm
- Modelo Estrutural I
  - Posição de transporte: apoiado em dois pontos
- Modelo Estrutural II
  - Posição Inicial do Levantamento da Torre para Operação: Apoiado na mesa de Articulação e no Pistão de Posicionamento
- Seção Transversal



Modelo Estrutural I – Posição de Transporte

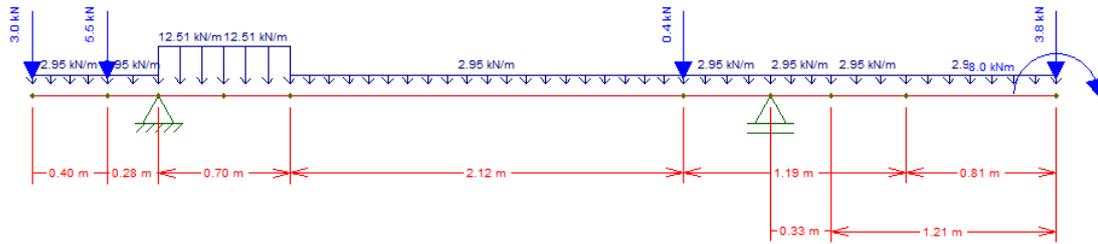


Diagrama de Força Cortante

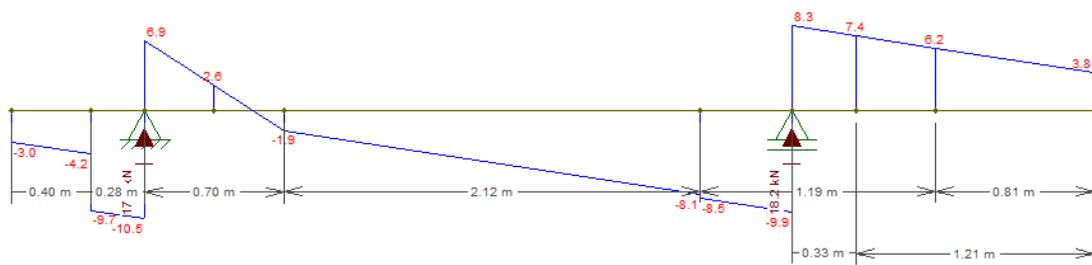
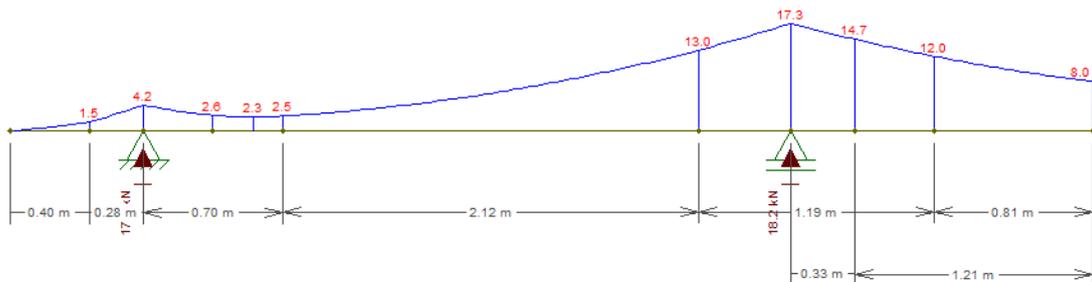


Diagrama de Momento Fletor



Deformação

Displ./rotat. at local pos.: x = 0,81 m L = 0,81 m - Dx: 0,000e+000 mm Dy: -2,005e+000 mm Rz: -1,716e-003 rad

Modelo Estrutural II – Posição inicial do levantamento da torre para operação

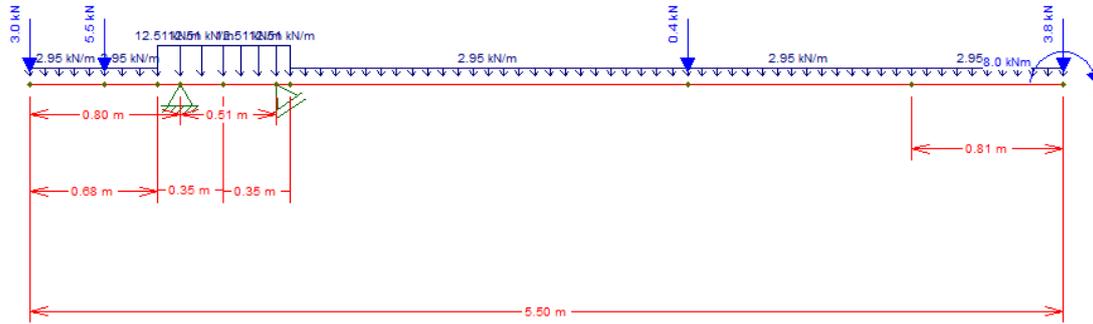


Diagrama de Força Cortante

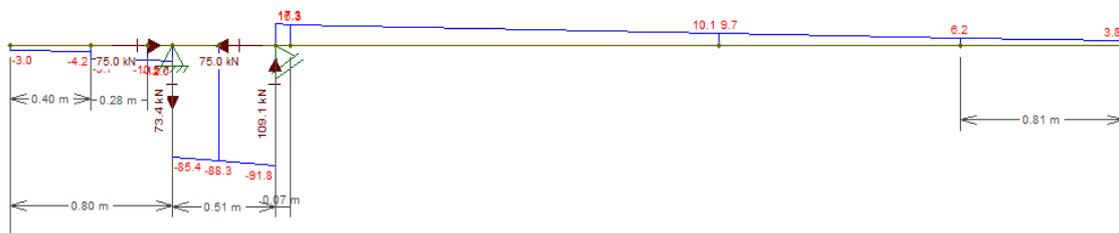
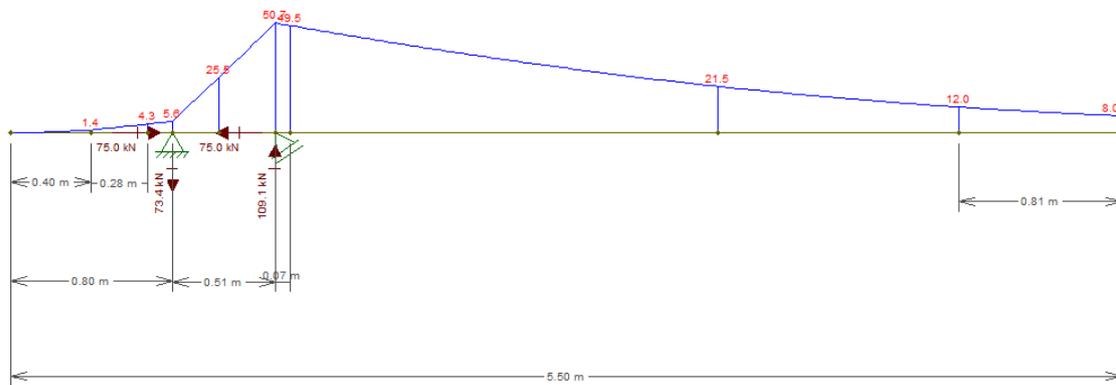
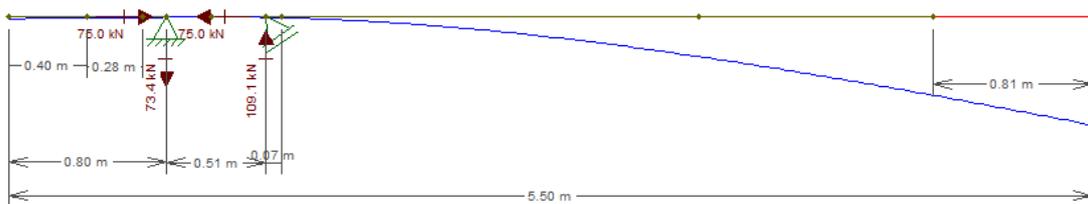


Diagrama de Momento Fletor



Deformação



Displ./rotat. at local pos.: x = 0.80 m L = 0.81 m - Dx: -2.522e-002 mm Dy: -1.579e+001 mm Rz: -5.600e-003 rad

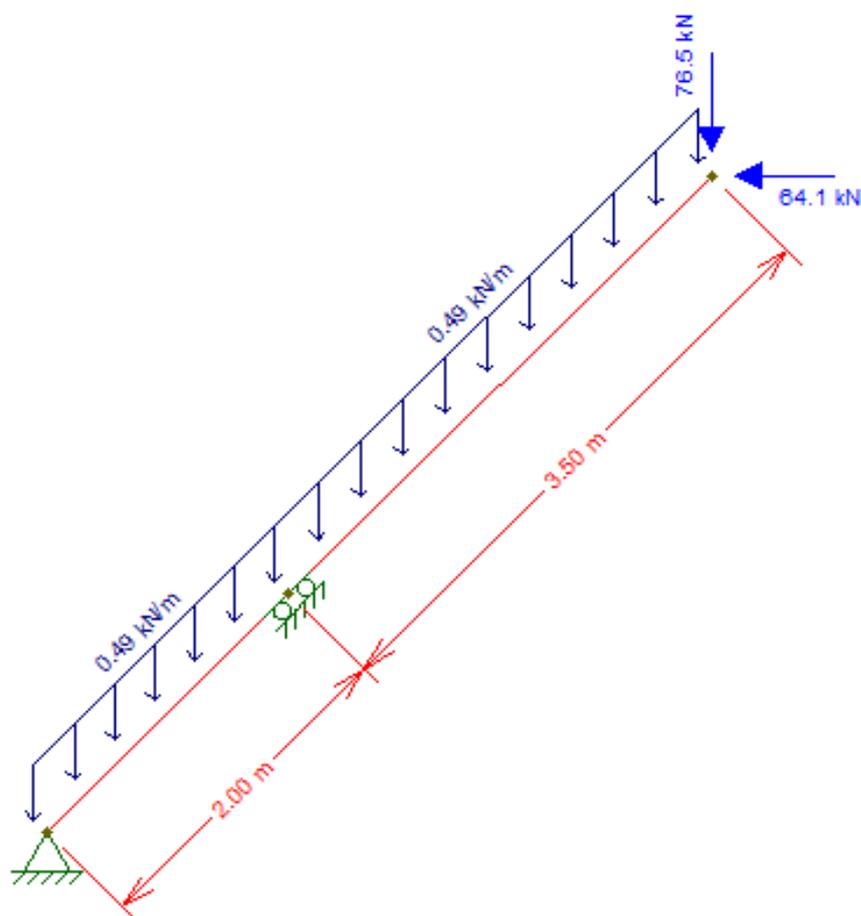
**Posição (45°)**

## A) Segundo Lance

## Considerações:

- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura: 0.49 kN/m
- Capacidade do guincho principal: 10 toneladas ( $F_x = 64.1$ ;  $F_y = 75.0$  kN)
- Peso da roldana: 1.5 kN

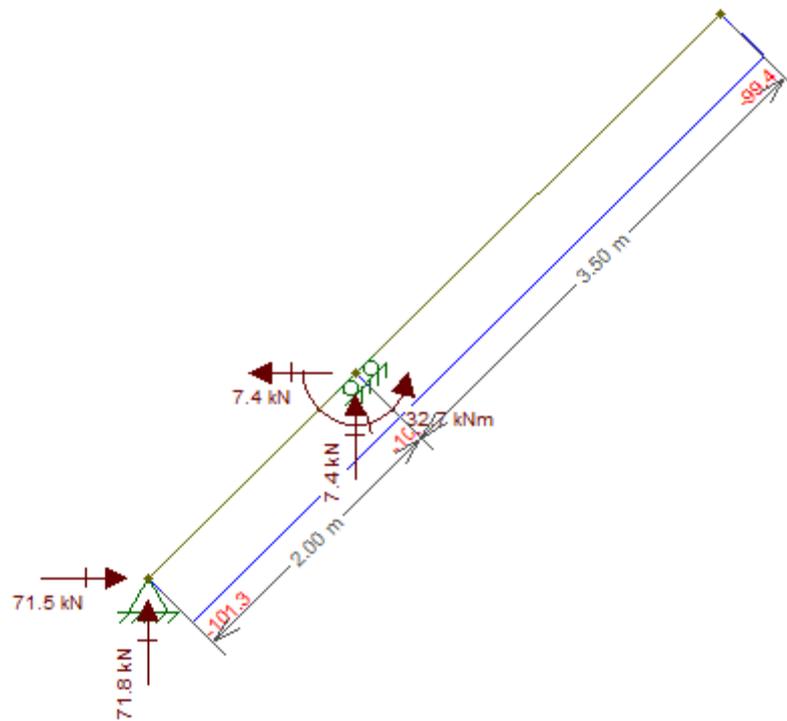
## Modelo Estrutural



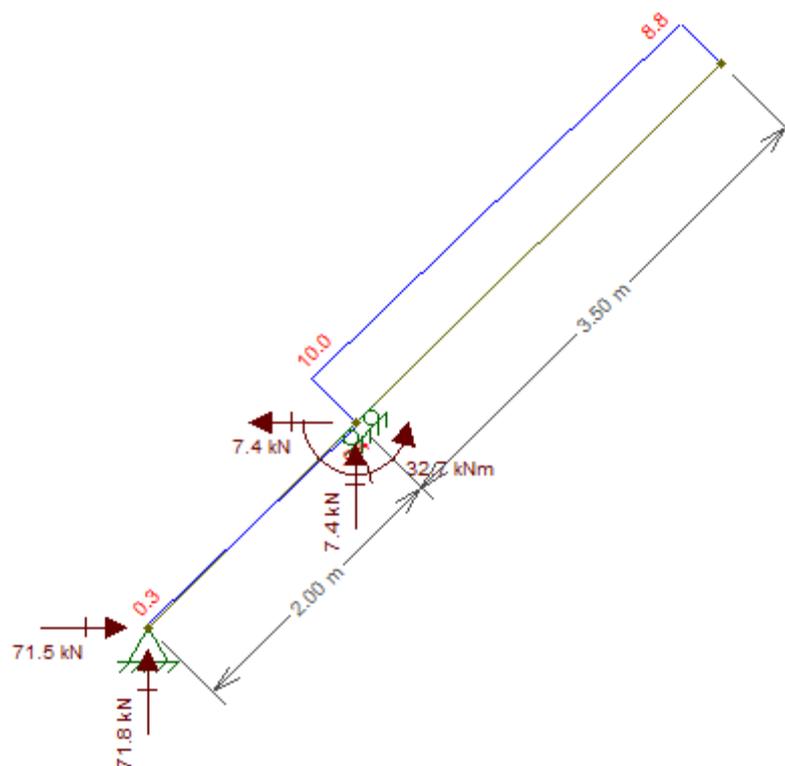
OBS.: As cargas referentes à capacidade do guincho principal foram decompostas a partir de um ângulo de 5° entre a torre e o cabo de aço.

OBS.: O ângulo de 5° permanece para as análises posteriores.

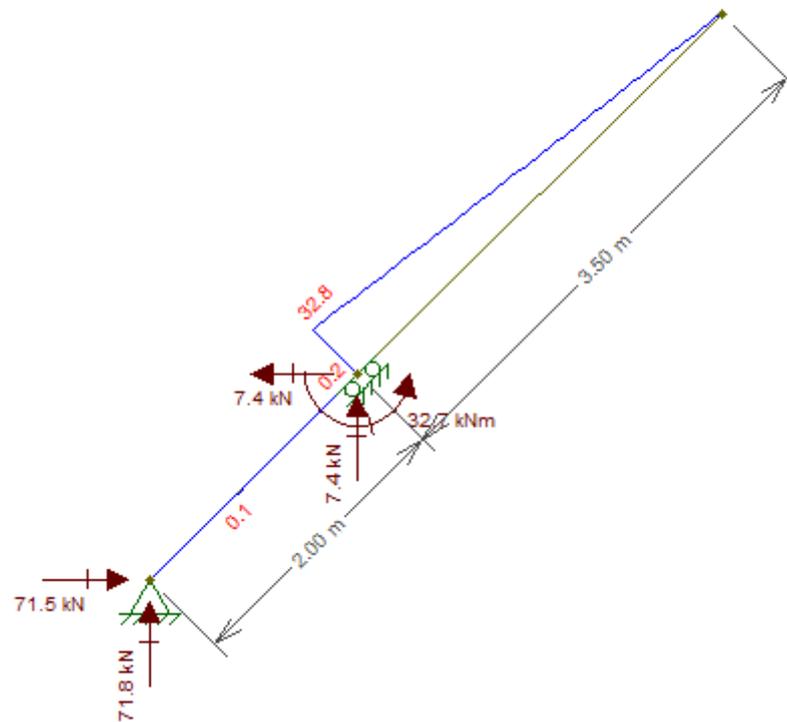
## Diagrama de Força Normal



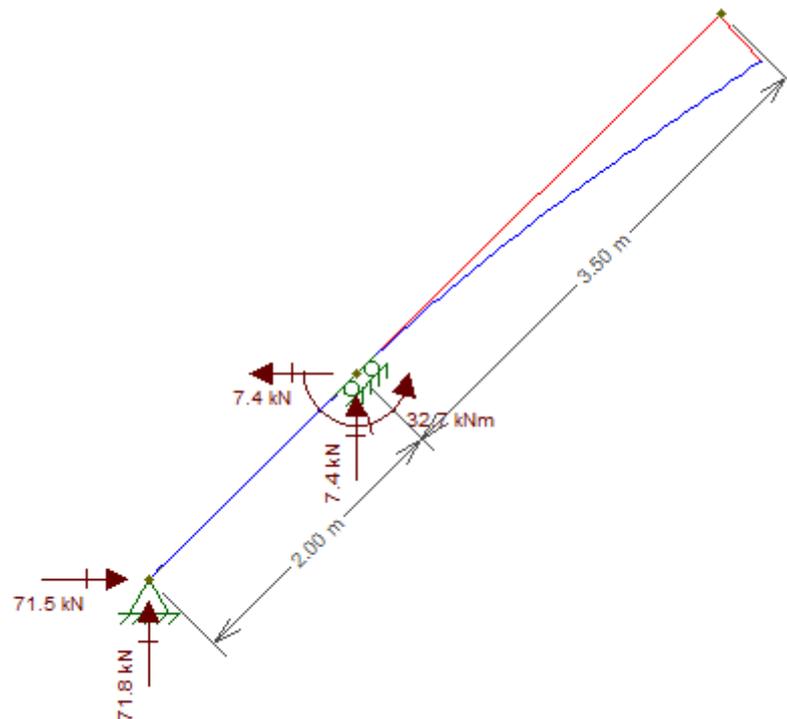
## Diagrama de Força Cortante



## Diagrama de Momento Fletor



## Deformação



Displ./rotat. at local pos.: x = 3.48 m L = 3.50 m - Dx: 7.073e+000 mm Dy: -7.686e+000 mm Rz: -4.482e-003 rad

## B) Primeiro Lance

Considerações:

- Carregamento:
  - Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura: 2,95 kN/m
  - Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura + Carga distribuída devido ao peso do conjunto da unidade de rotação: 12,51 kN/m
  - Carga aplicada devido à morsa: 4,4 kN
  - Reações do Segundo Lance: 71,5 kN – 71,8 kN ; 7,4 kN – 7,4 kN e 32,7 kNm
  - Reações do Manipulador de Hastes: 5,5 kN e 7,8 kNm

Modelo Estrutural

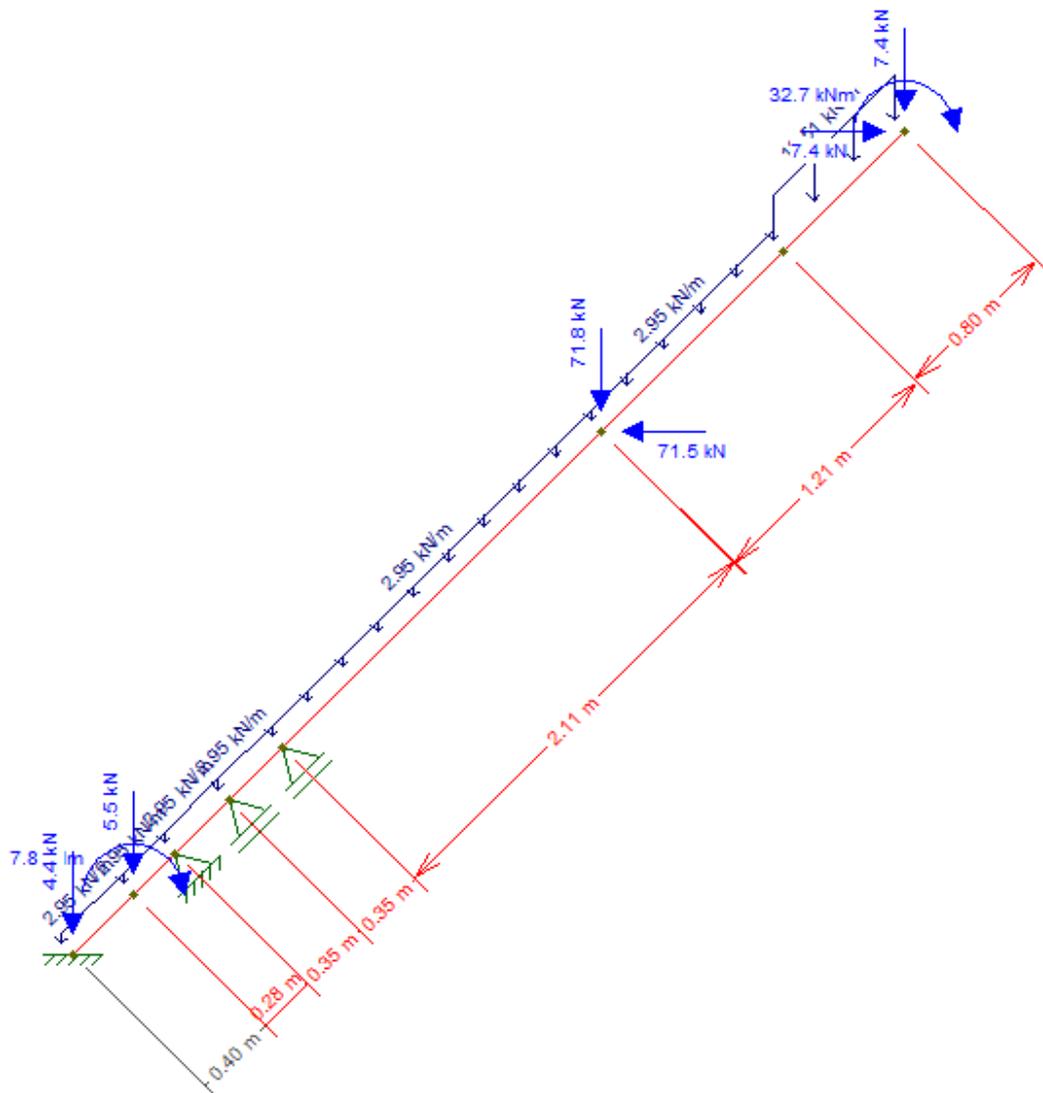


Diagrama de Força Normal

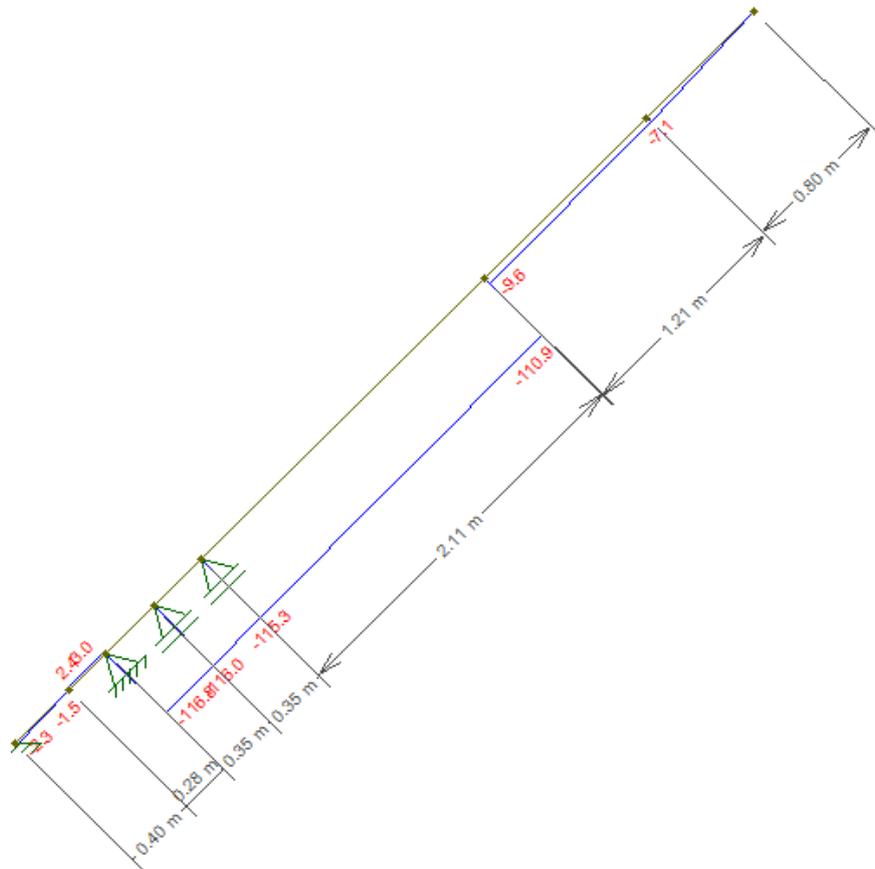
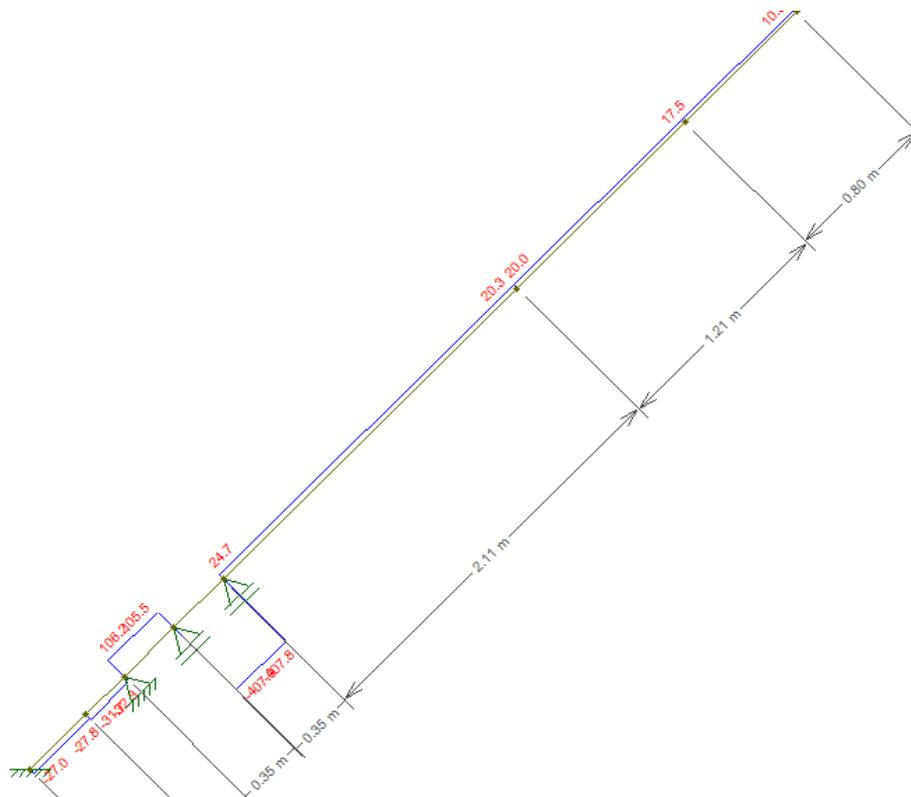
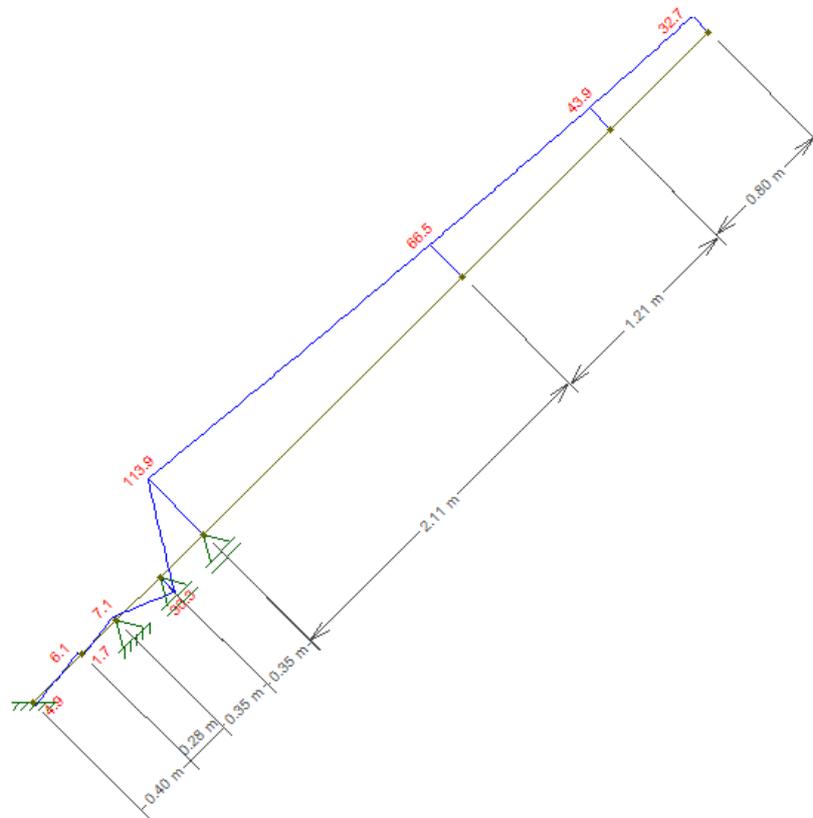


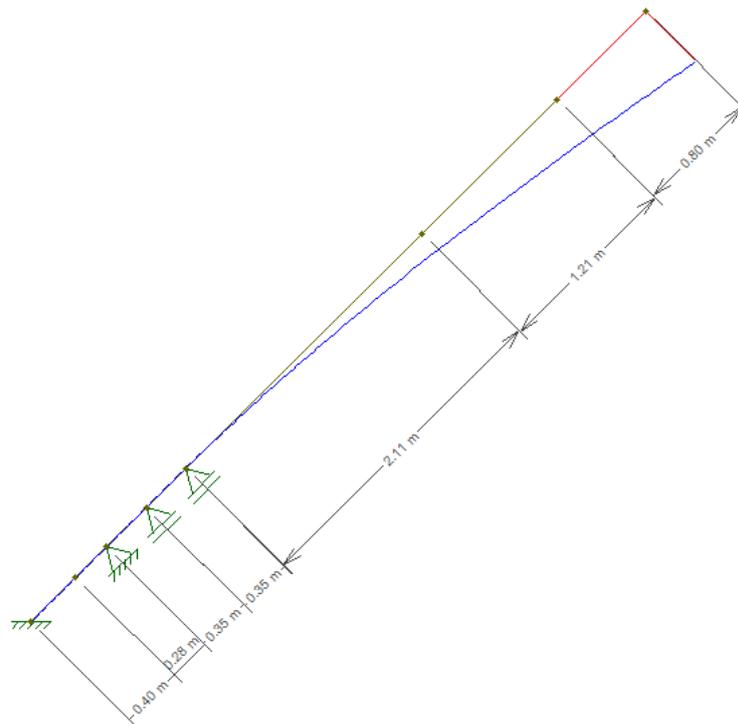
Diagrama de Força Cortante



## Diagrama de Momento Fletor



## Deformação



Displ./rotat. at local pos.: x = 0.80 m L = 0.80 m - Dx: 2.599e+001 mm Dy: -2.631e+001 mm Rz: -1.462e-002 rad

### C) Primeiro Lance (Pull Up)

Considerações:

- Carregamento:
  - Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura: 2,95 kN/m
  - Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura + Carga distribuída devido ao peso do conjunto da unidade de rotação: 12,51 kN/m
  - Carga aplicada devido à morsa: 4,4 kN
  - Reações do Segundo Lance: 71,5 kN – 71,8 kN ; 7,4 kN – 7,4 kN e 32,7 kNm
  - Momento causado pela retirada do ferramental: 50 kNm
  - Reações do Manipulador de Hastes: 5,5 kN e 7,8 kNm

Modelo Estrutural – Ancorado no Topo

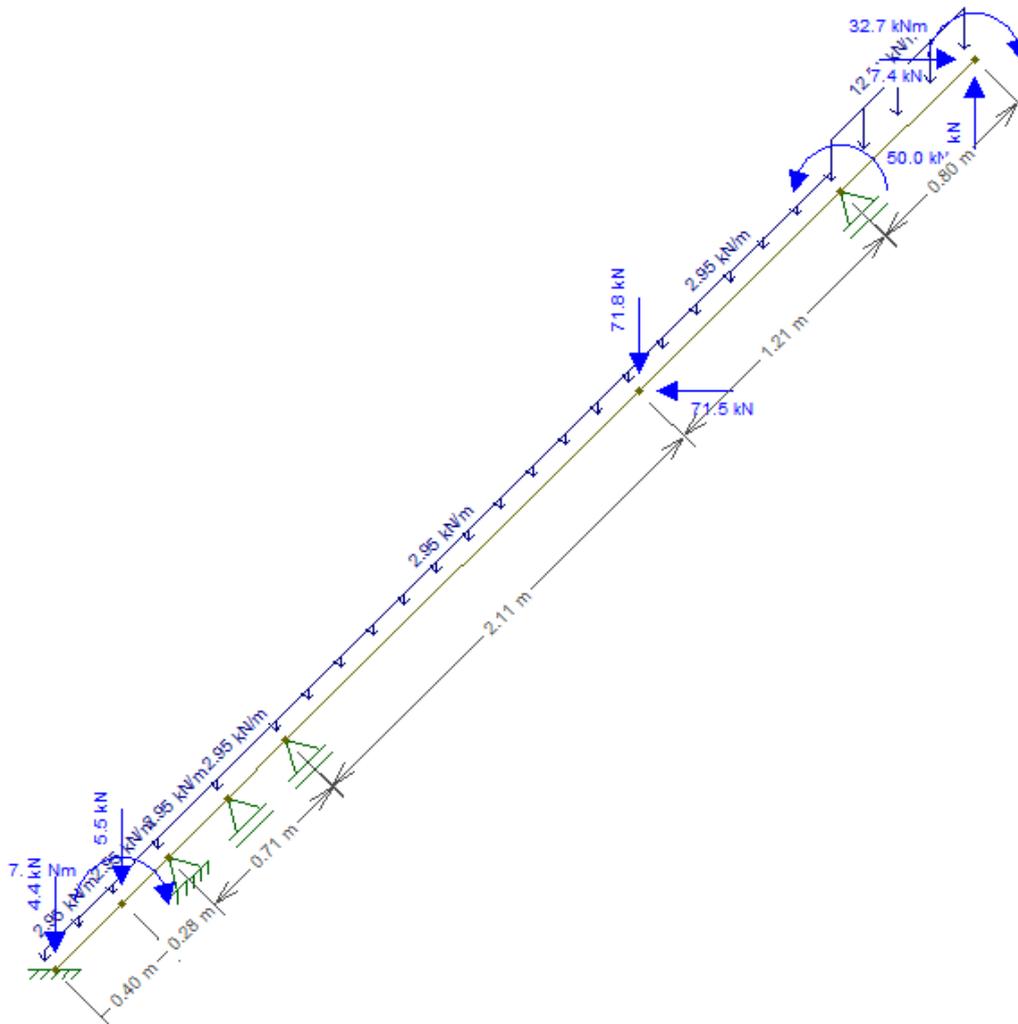


Diagrama de Força Normal

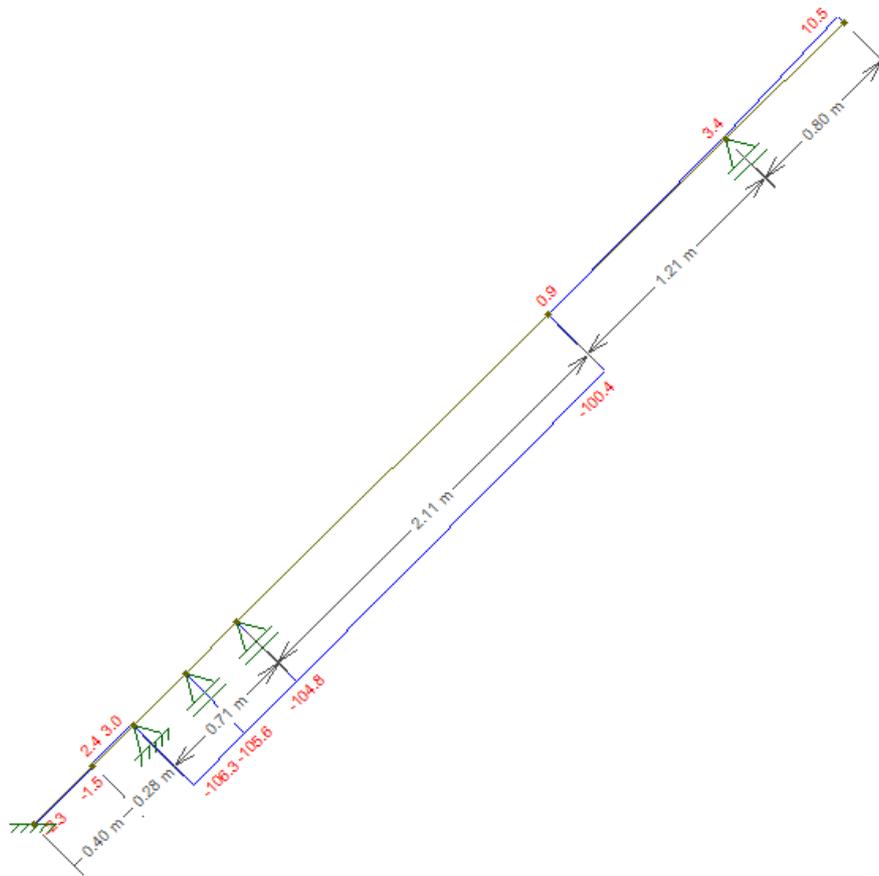
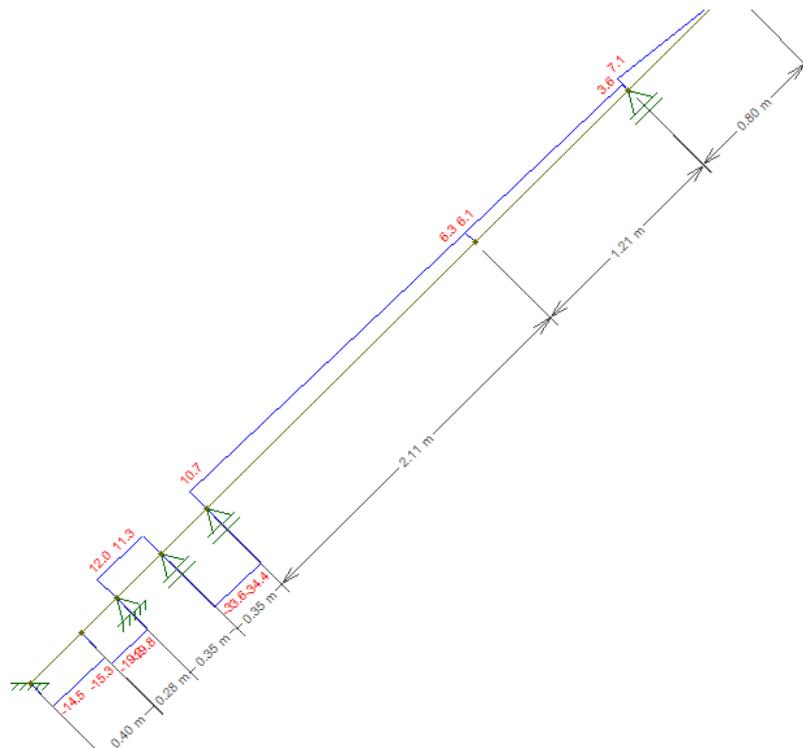
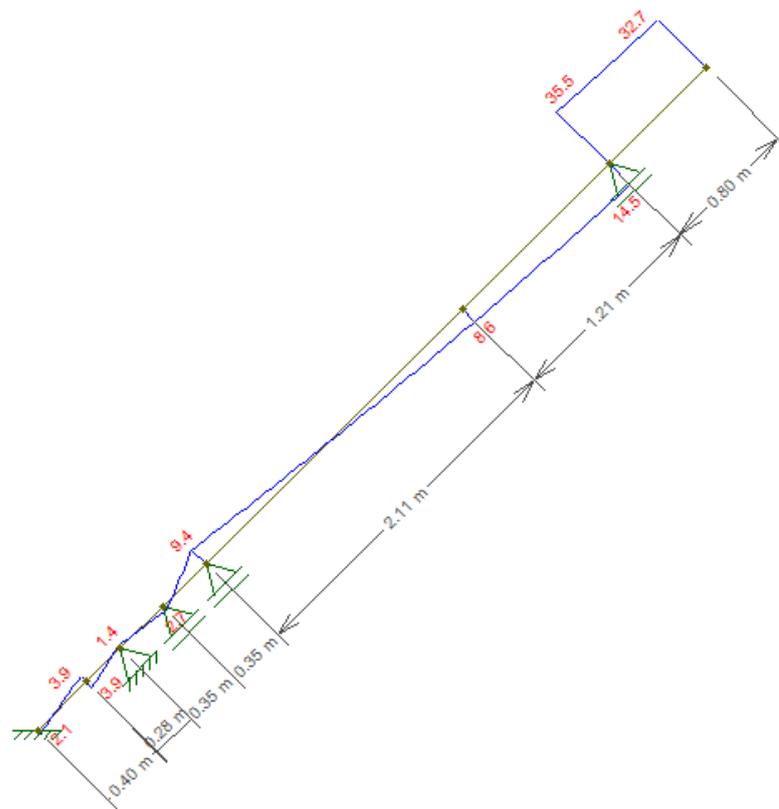


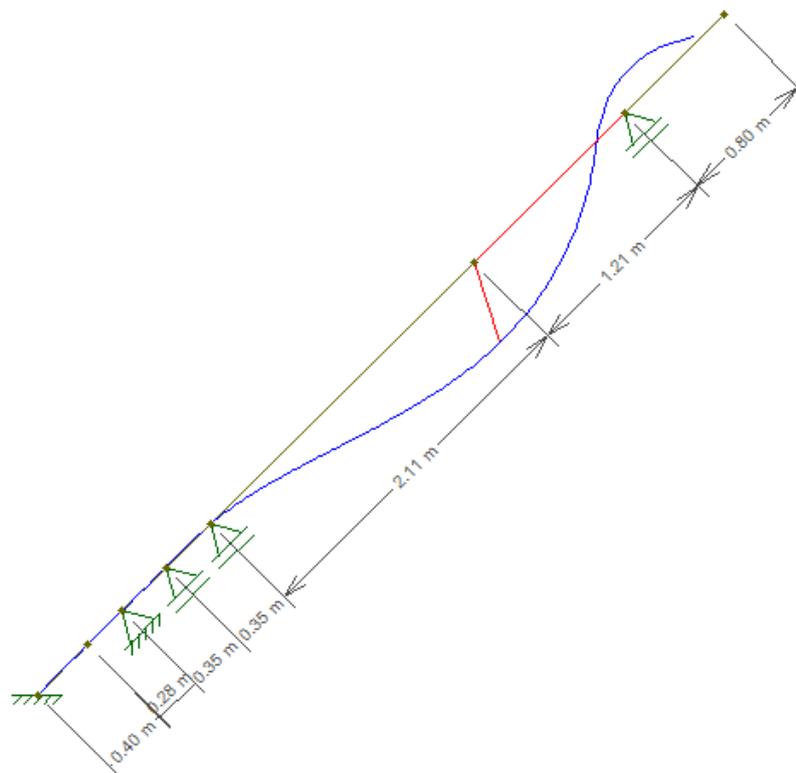
Diagrama de Força Cortante



## Diagrama de Momento Fletor



## Deformação



Displ./rotat. at local pos.: x = 0.00 m L = 1.21 m - Dx: 1.342e-001 mm Dy: -4.063e-001 mm Rz: -4.709e-006 rad

## D) Primeiro Lance (Pull Down)

Considerações:

- Carregamento:
  - Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura: 2,95 kN/m
  - Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura + Carga distribuída devido ao peso do conjunto da unidade de rotação: 12,51 kN/m
  - Carga aplicada devido à morsa: 4,4 kN
  - Reações do Segundo Lance: 71,5 kN – 71,8 kN ; 7,4 kN – 7,4 kN e 32,7 kNm
  - Momento causado pelo Avanço do ferramental: 18 kNm
  - Reações do Manipulador de Hastes: 5,5 kN e 7,8 kNm

Modelo Estrutural – Ancorado no Topo

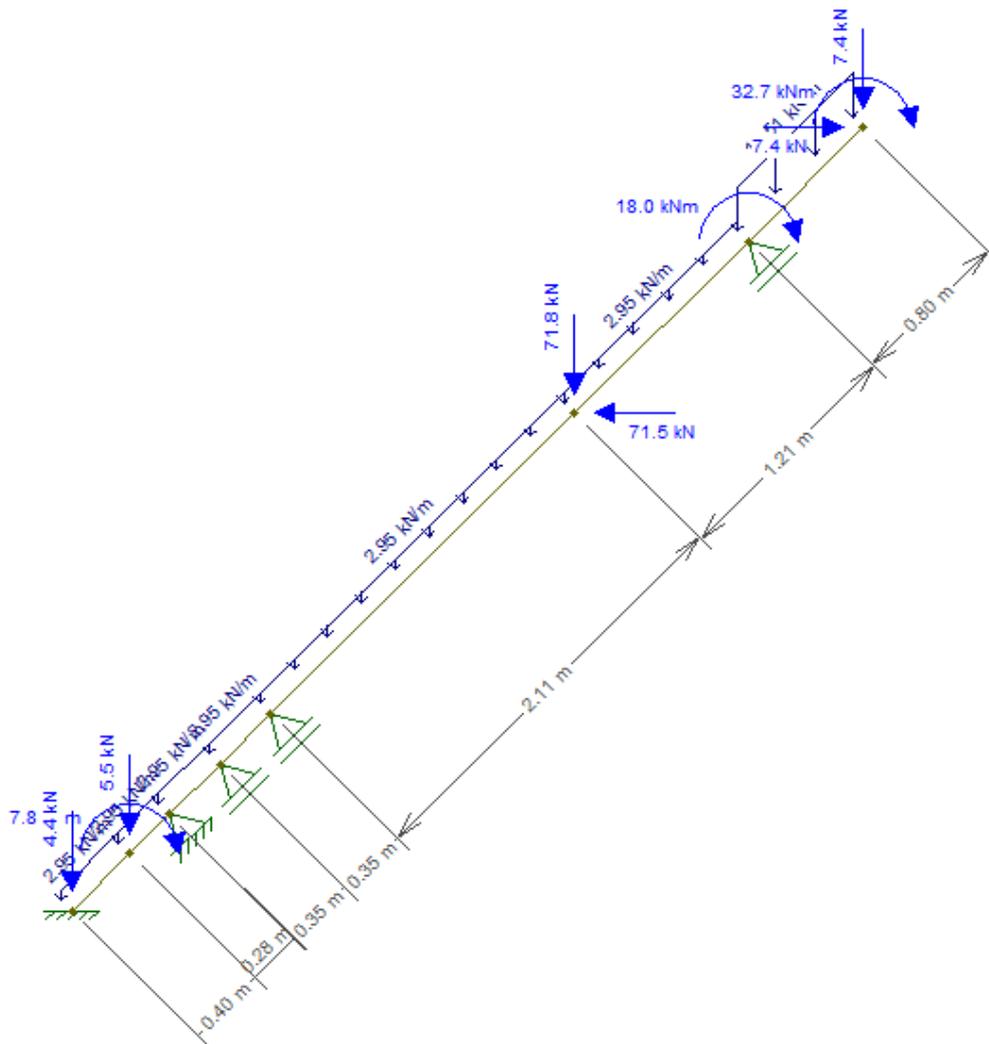


Diagrama de Força Normal

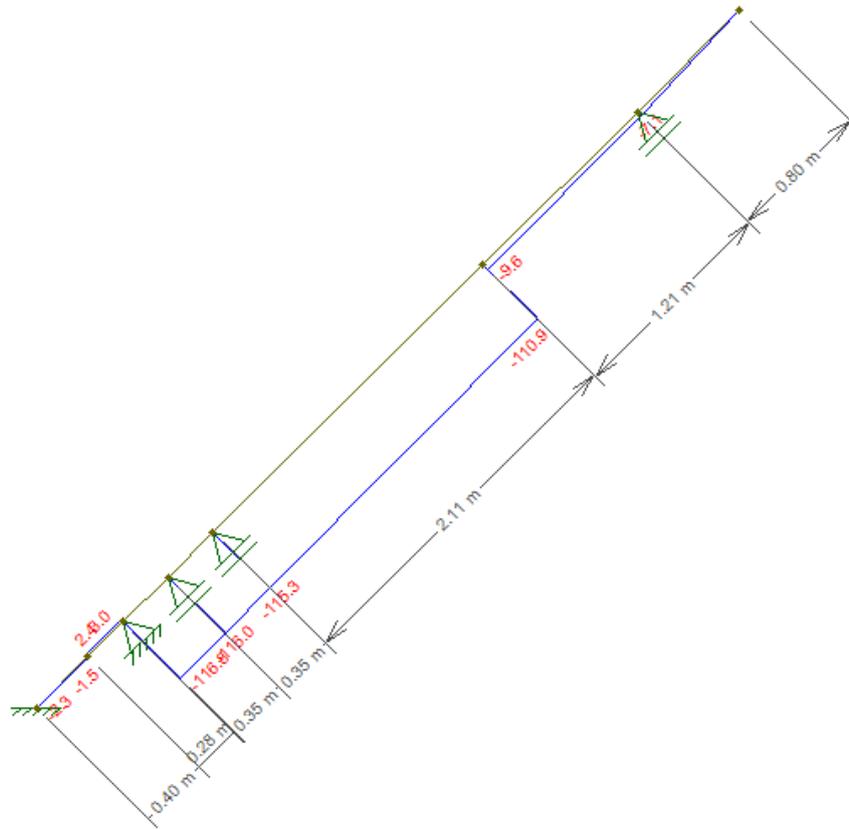
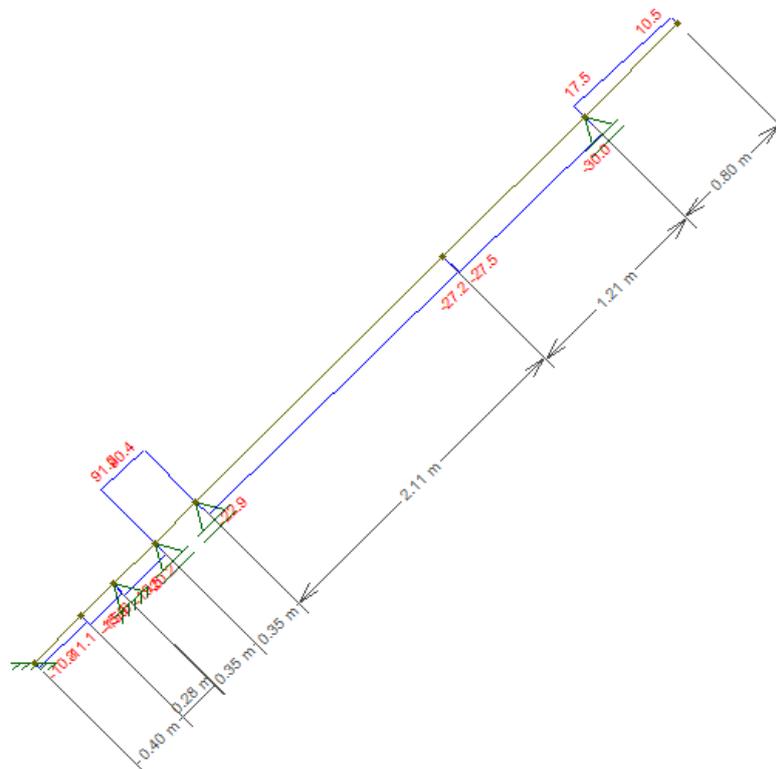
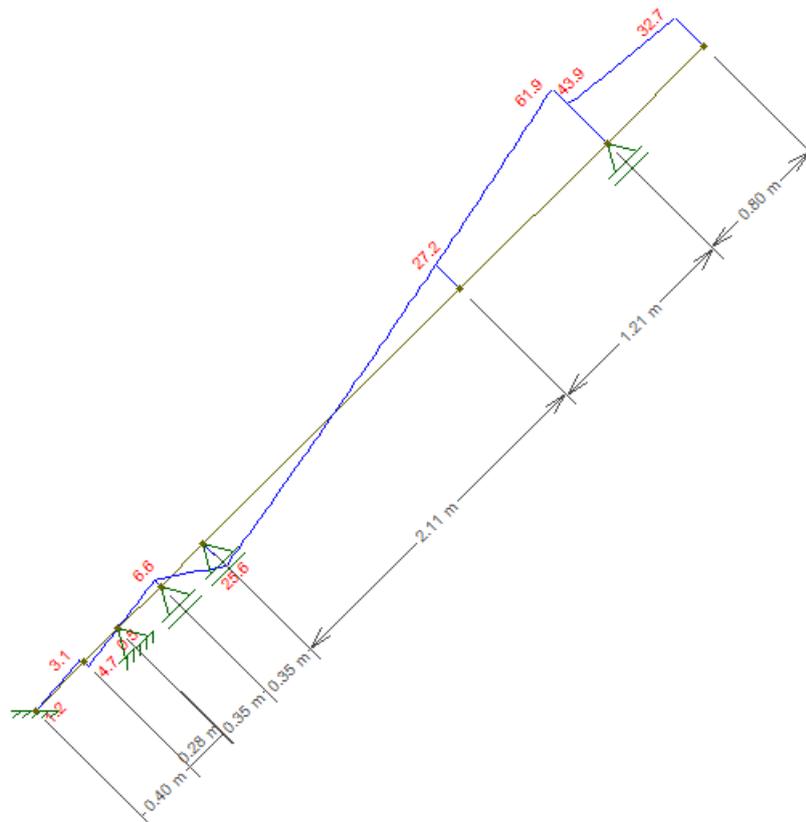


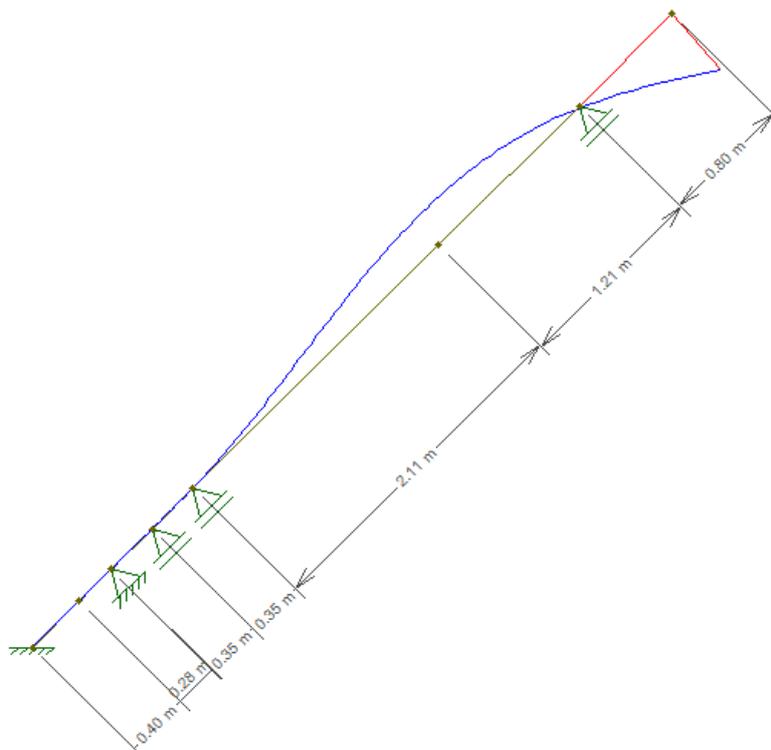
Diagrama de Força Cortante



## Diagrama de Momento Fletor



## Deformação



Displ./rotat. at local pos.: x = 0.80 m L = 0.80 m - Dx: 1.702e+000 mm Dy: -2.014e+000 mm Rz: -3.997e-003 rad

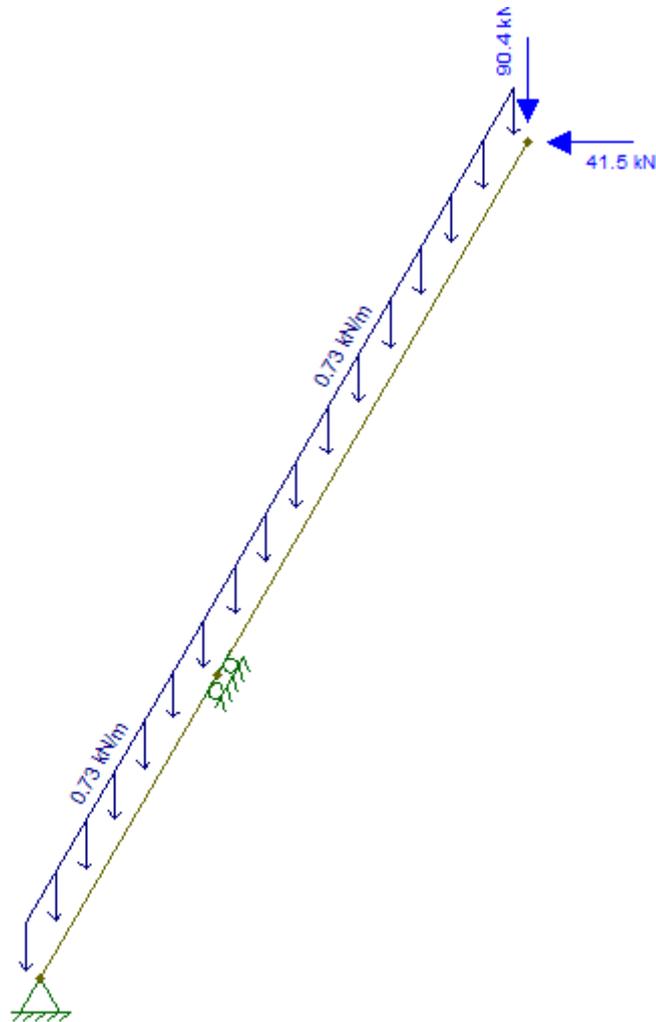
**Posição (60°)**

## A) Segundo Lance

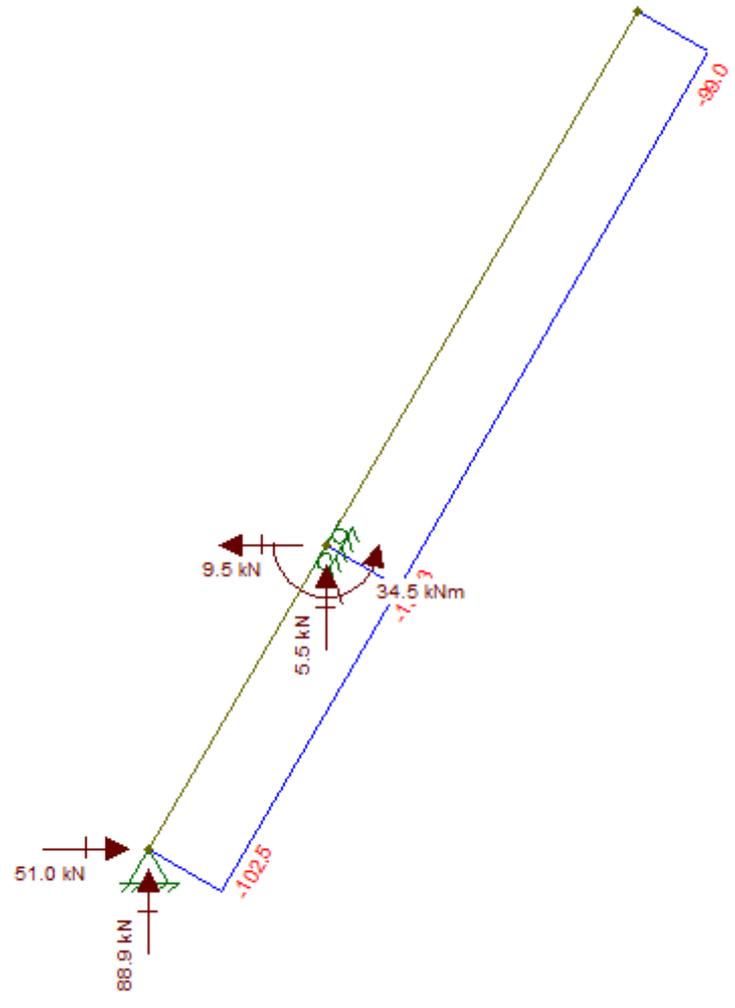
Considerações:

- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura: 0.73 kN/m
- Capacidade do guincho principal: 10 toneladas ( $F_x = 41.5$ ;  $F_y = 88.9$  kN)
- Peso da roldana: 1.5 kN

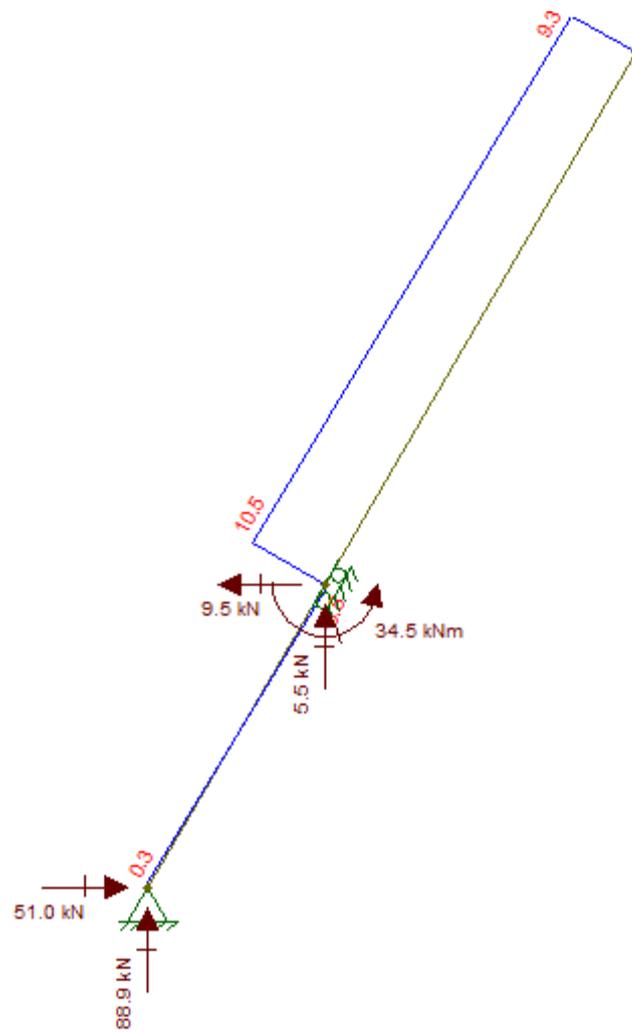
Modelo estrutural



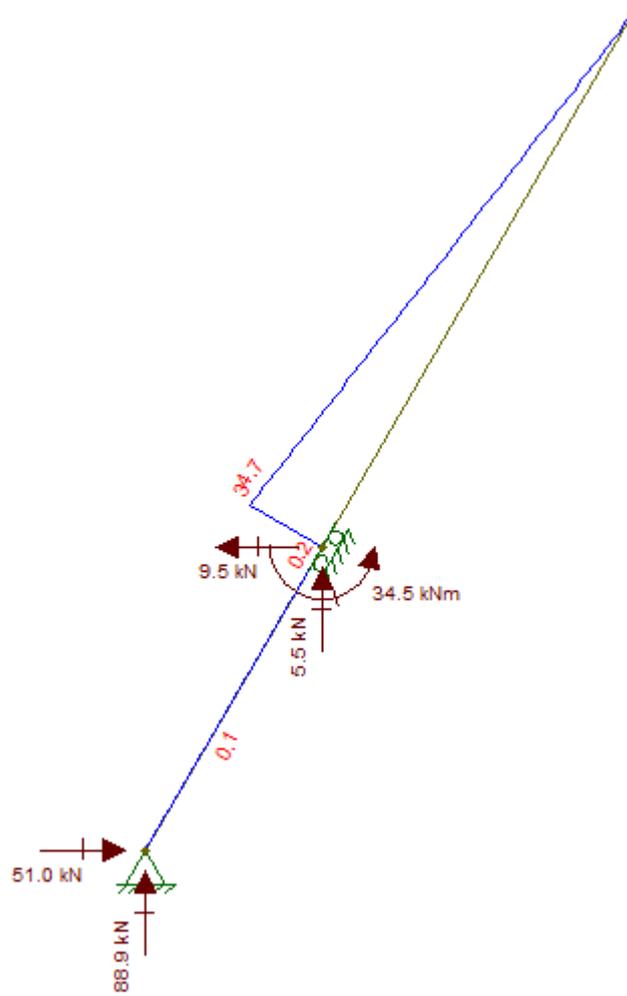
### Diagrama de Esforço Normal



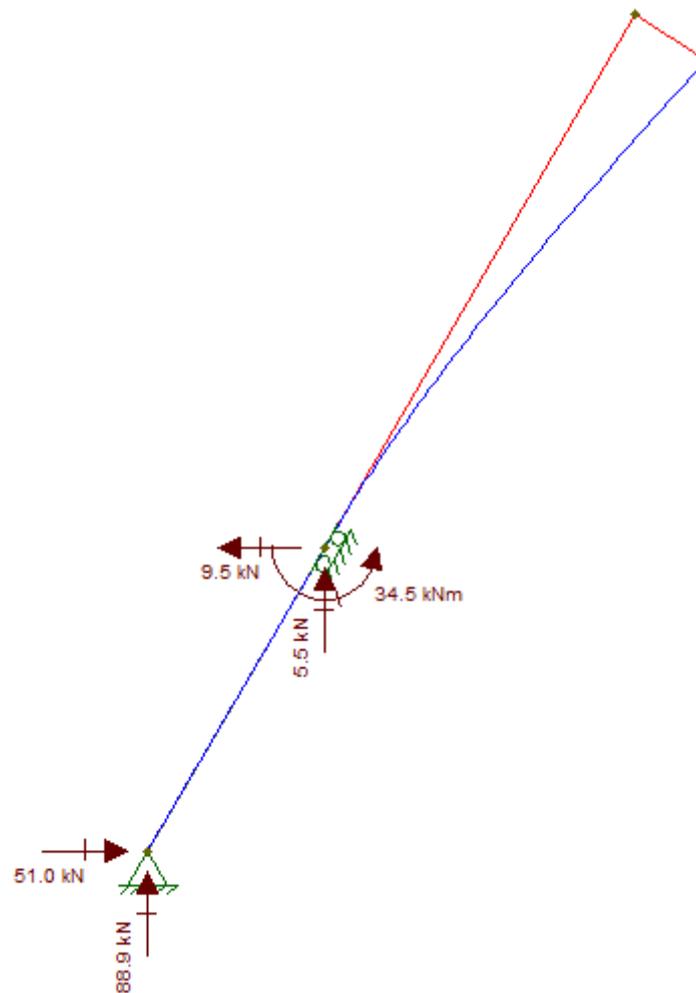
## Diagrama de Esforço Cortante



## Diagrama de Momento Fletor



## Deformação



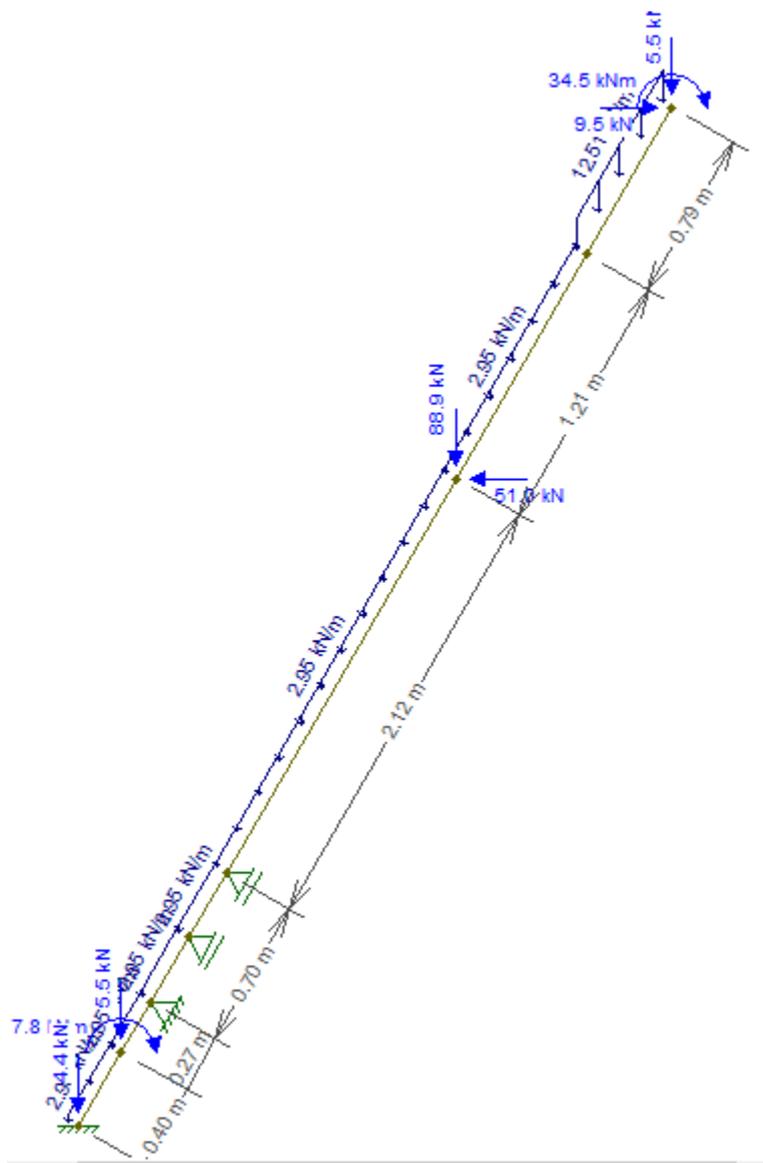
Displ./rotat. at local pos.: x = 3.50 m L = 3.50 m - Dx: 9.620e+000 mm Dy: -6.070e+000 mm Rz: -4.839e-003 rad

## B) Primeiro Lance

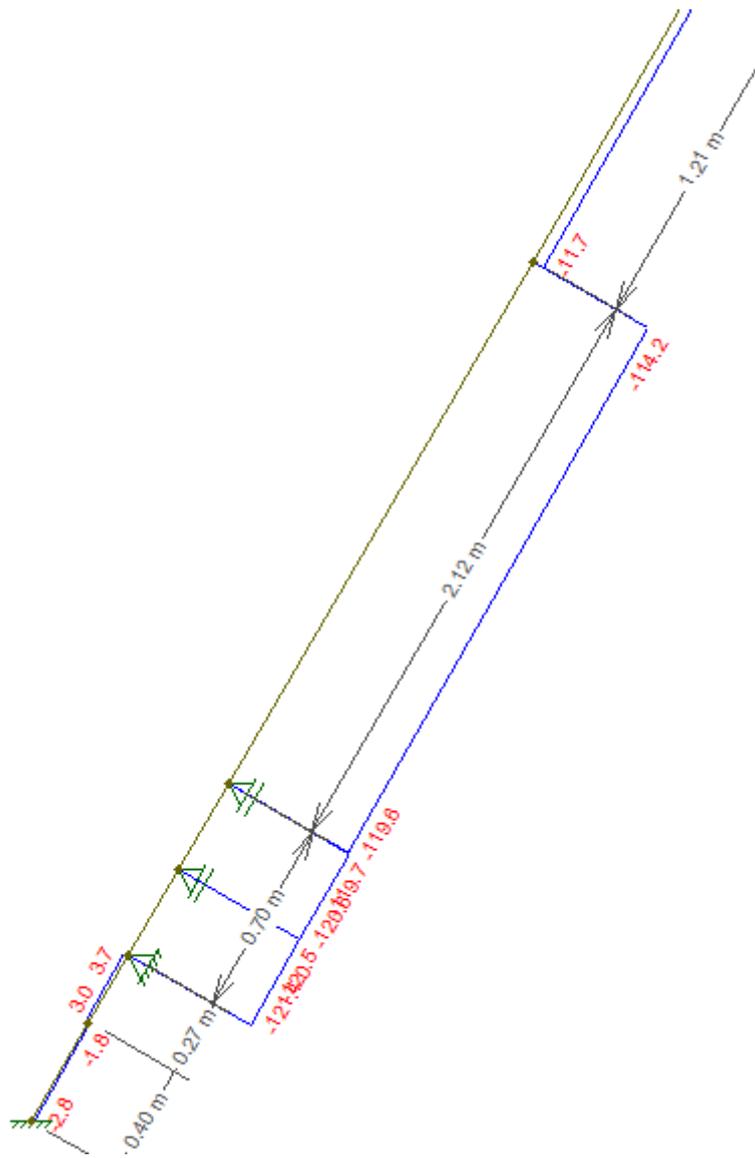
## Considerações:

- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura: 2,95 kN/m
- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura + Carga distribuída devido ao peso do conjunto da unidade de rotação: 12,51 kN/m
- Carga aplicada devido à morsa: 4,4 kN
- Reações do Segundo Lance
- Carga devido ao manipulador de Hastes

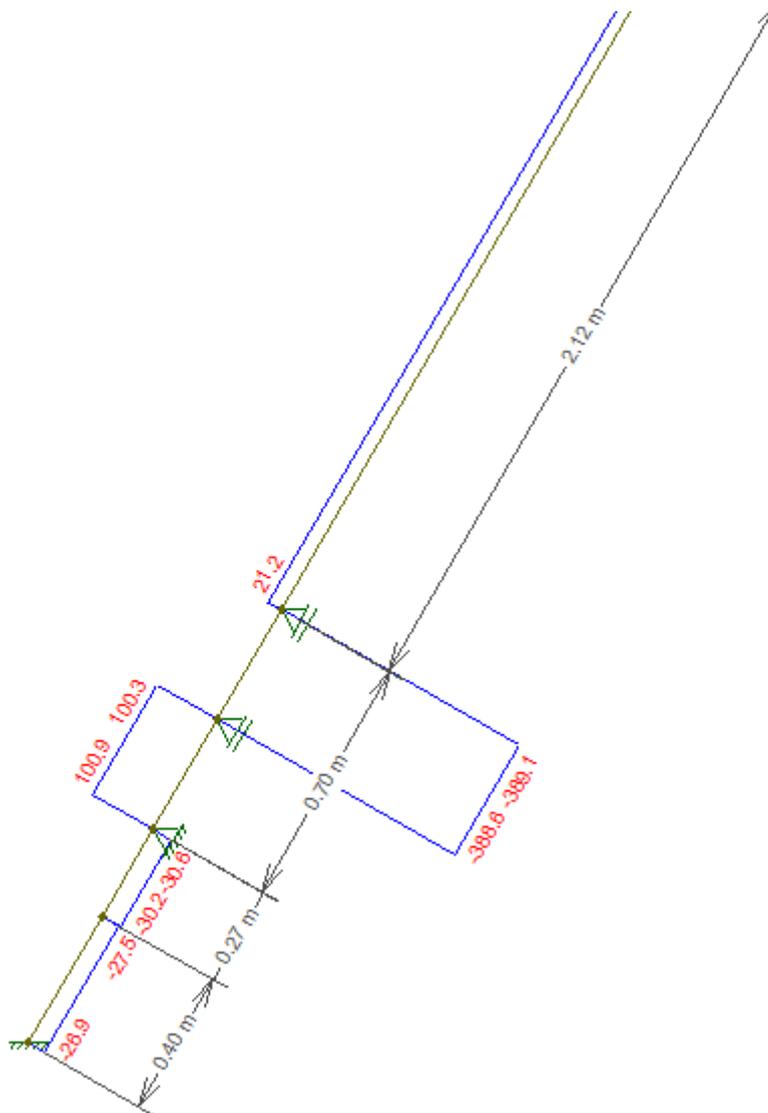
## Modelo Estrutural



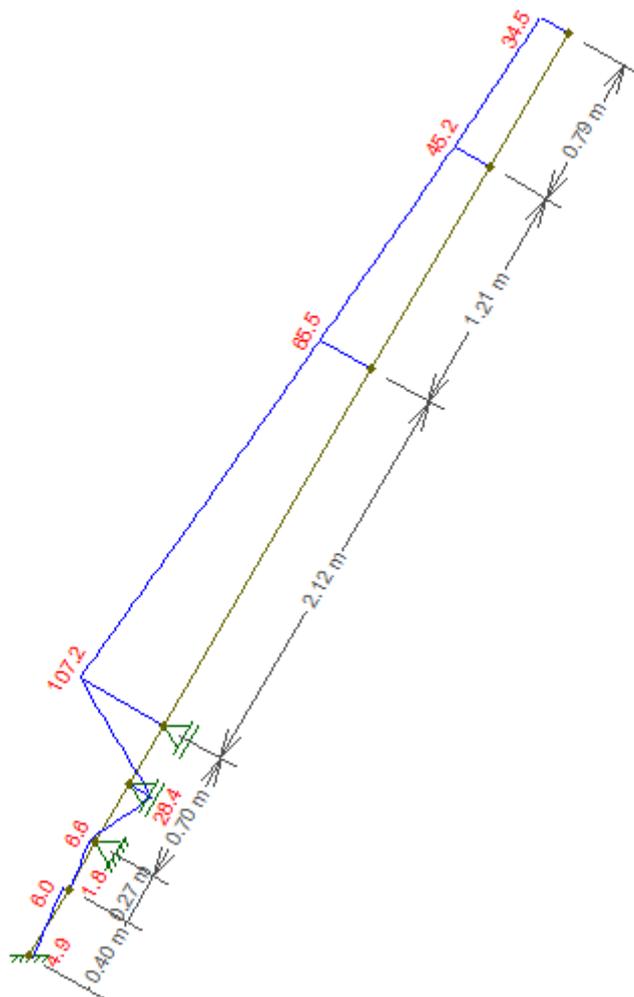
## Diagrama de Força Normal



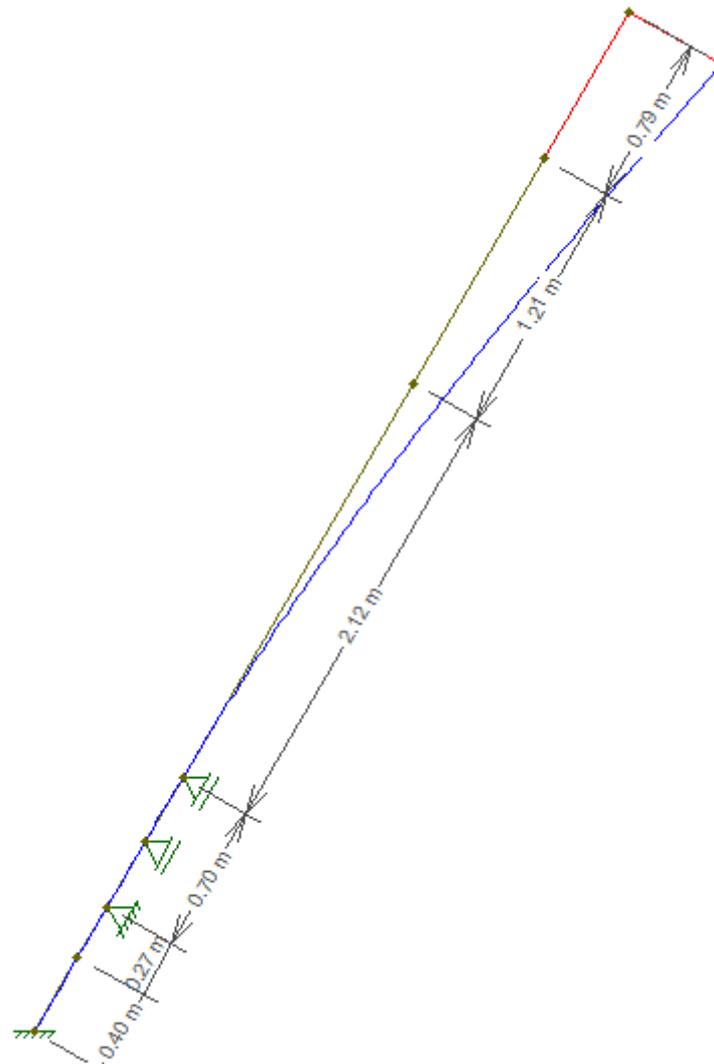
## Diagrama de Força Cortante



## Diagrama de Momento Fletor



## Deformação



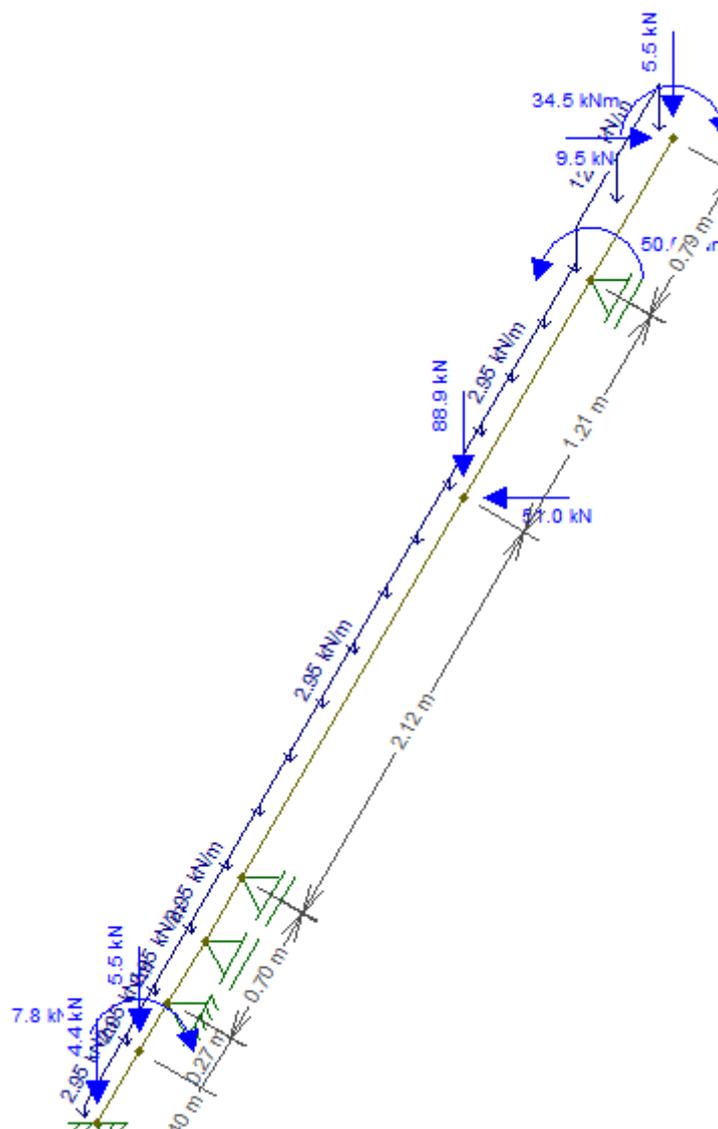
Displ./rotat. at local pos.: x = 0.79 m L = 0.79 m - Dx: 3.164e+001 mm Dy: -1.855e+001 mm Rz: -1.468e-002 rad

## C) Primeiro Lance (Pull Up)

## Considerações:

- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura: 2,95 kN/m
- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura + Carga distribuída devido ao peso do conjunto da unidade de rotação: 12,51 kN/m
- Carga aplicada devido à morsa: 4,4 kN
- Reações do Segundo Lance
- Momento causado pela retirada do ferramental
- Carga devido ao manipulador de Hastes

## Modelo Estrutural



## Diagrama de Esforço Normal

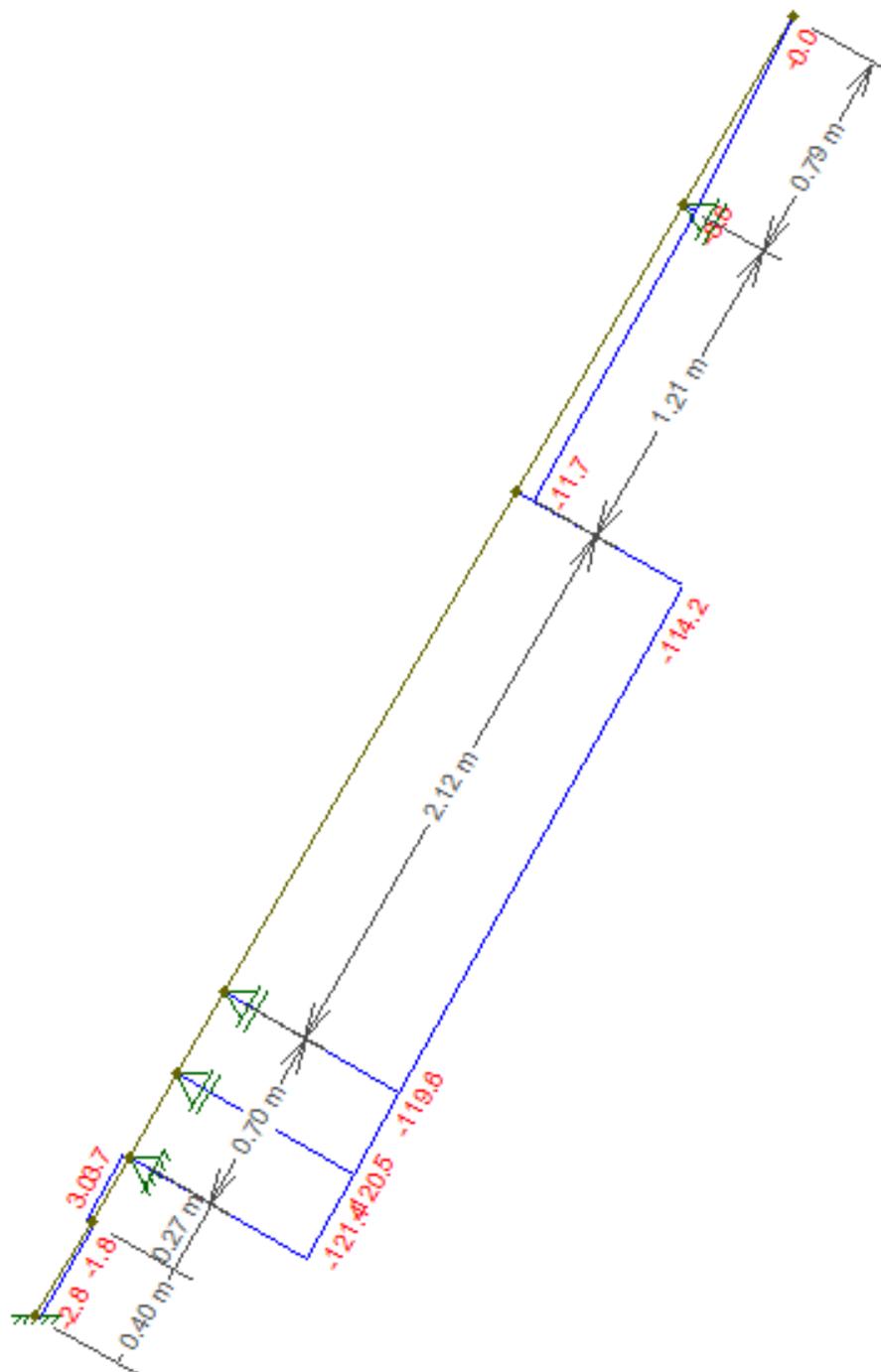


Diagrama de Esforço Cortante

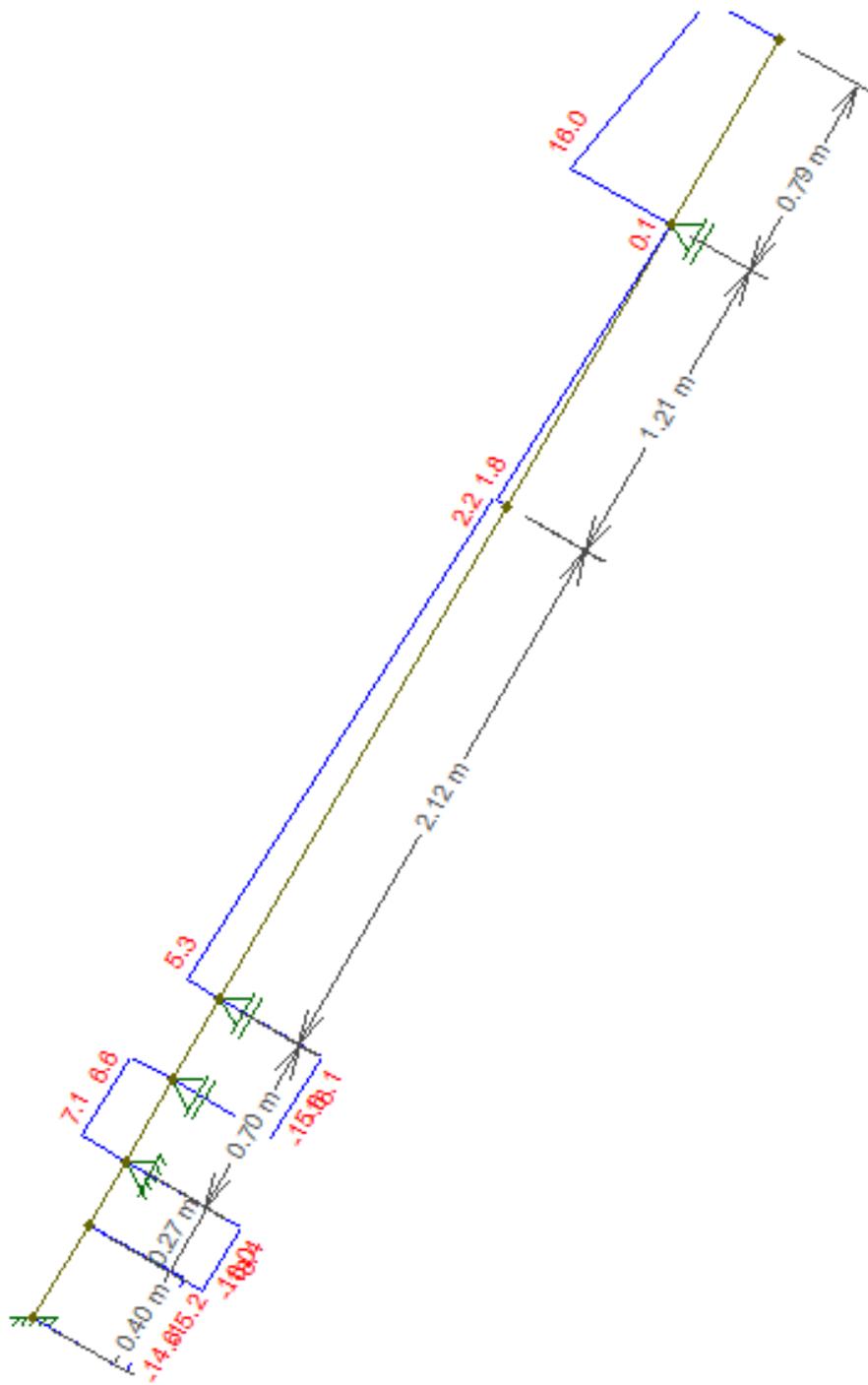
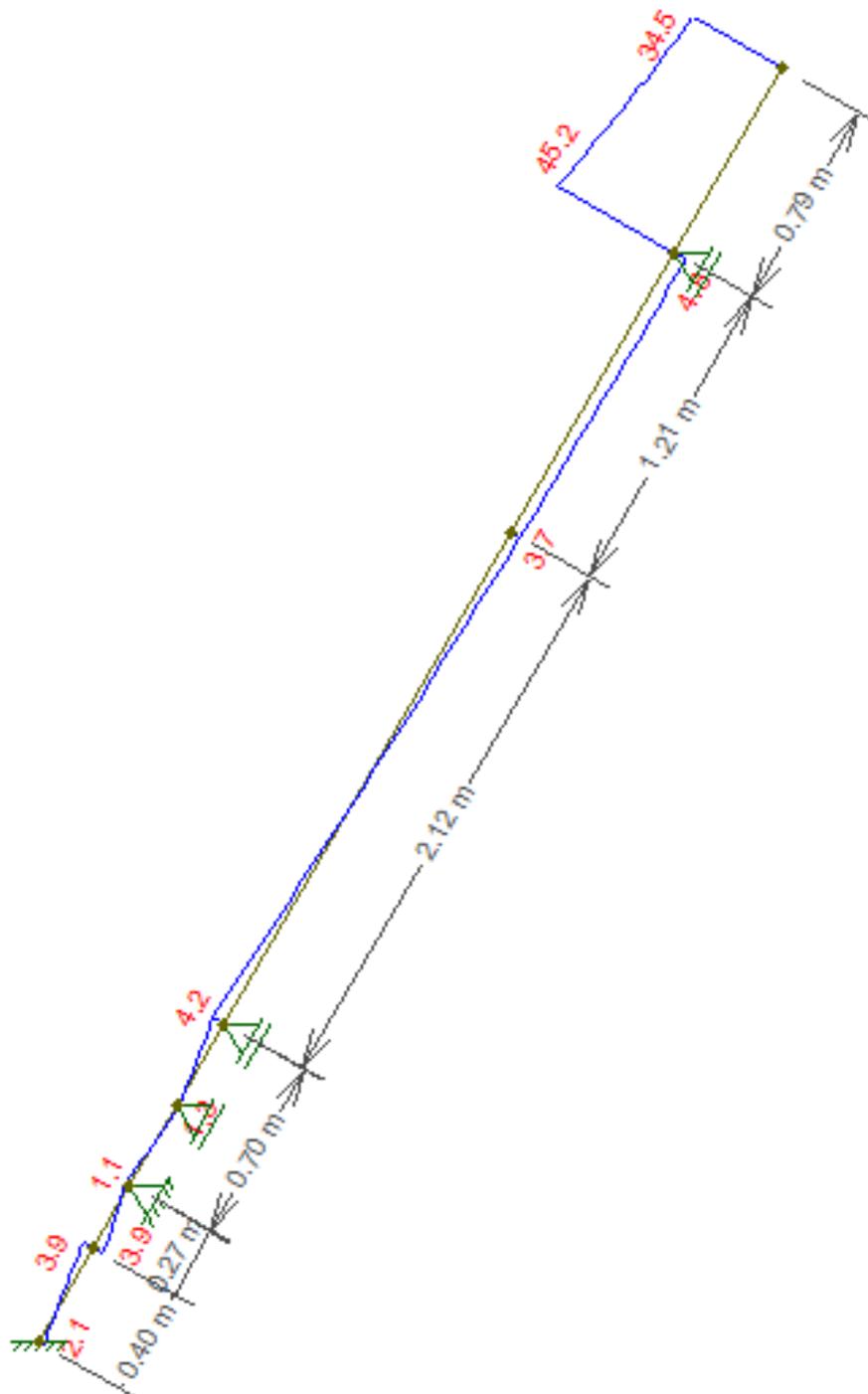
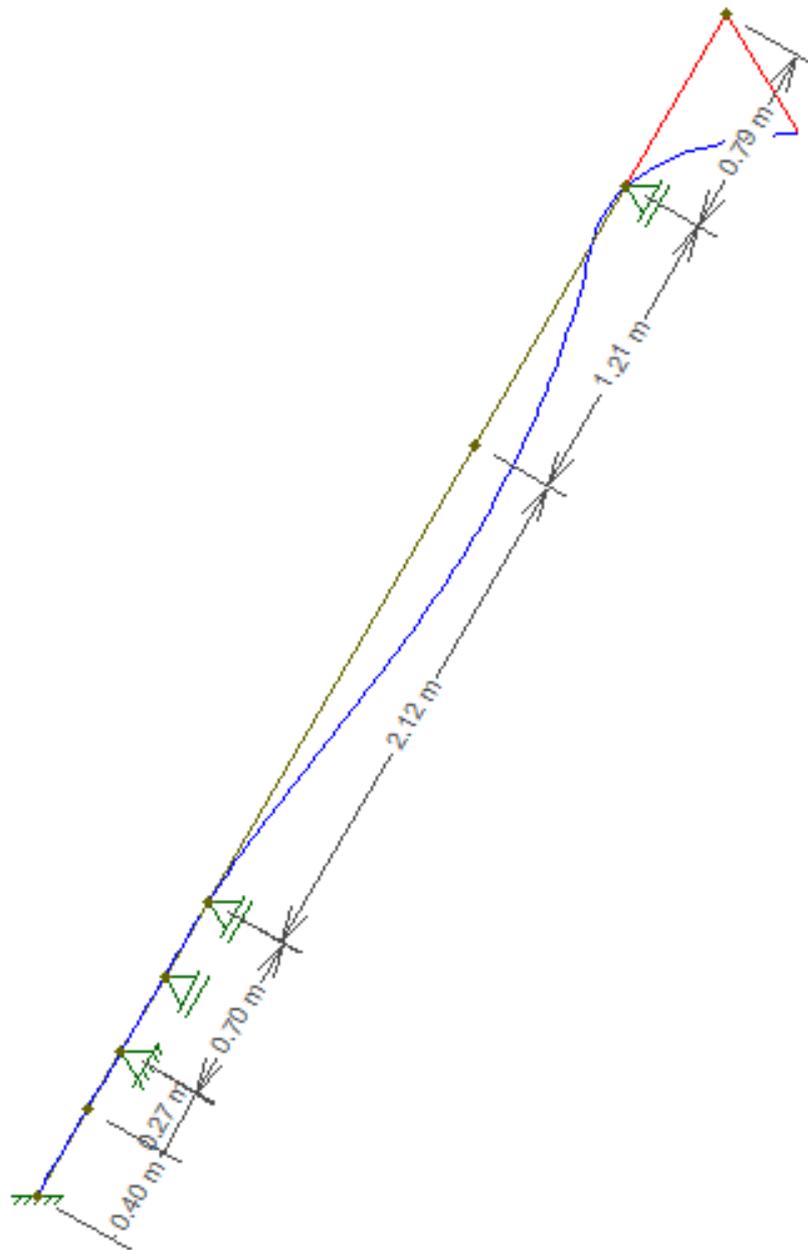


Diagrama de Momento Fletor



## Deformação



Displ./rotat. at local pos.: x = 0.79 m L = 0.79 m - Dx: 2.625e-001 mm Dy: -4.236e-001 mm Rz: -1.309e-003 rad

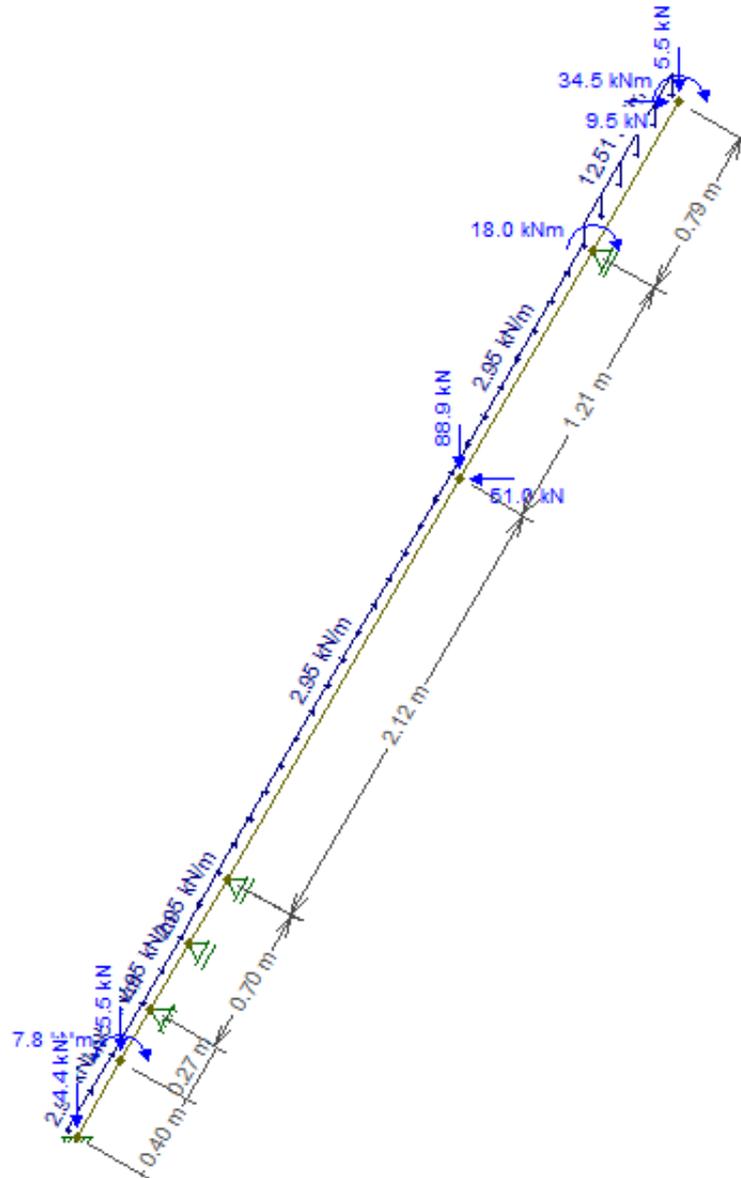
## D) Primeiro Lance (Pull Down)

## Considerações:

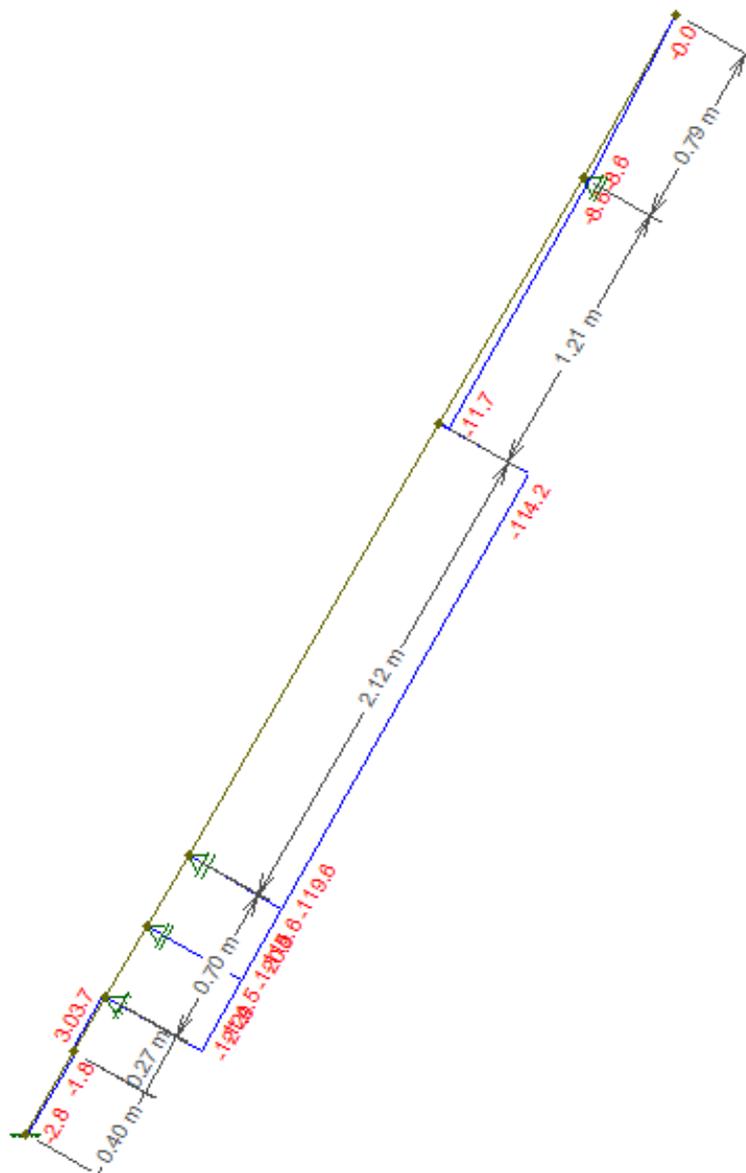
- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura: 2,95 kN/m
- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura + Carga distribuída devido ao peso do conjunto da unidade de rotação: 12,51 kN/m
- Carga aplicada devido à morsa: 4,4 kN
- Reações do Segundo Lance

- Momento causado pelo avanço do ferramental
- Carga devido ao manipulador de Hastes

Modelo Estrutural



## Diagrama de Força Normal



## Diagrama de Força Cortante

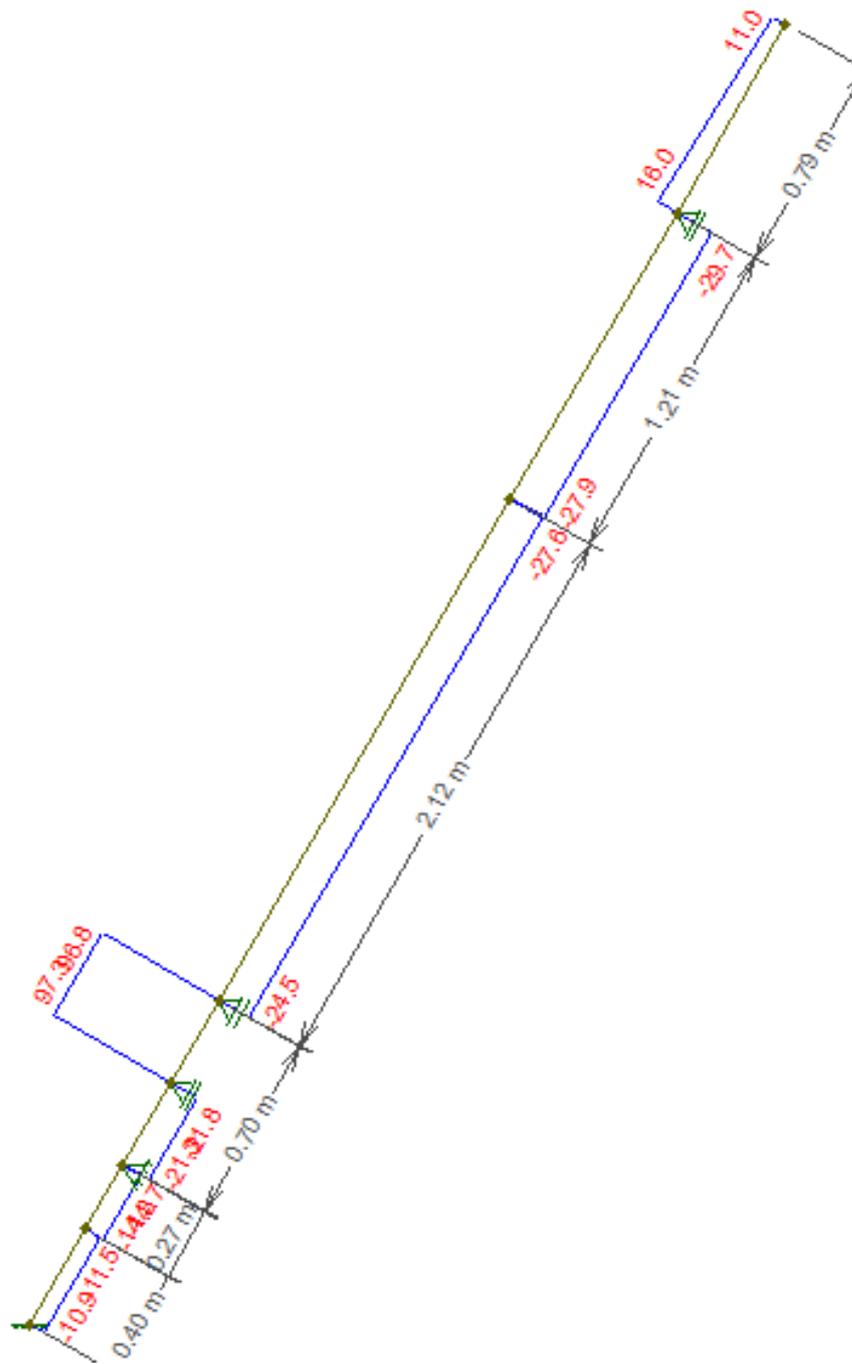
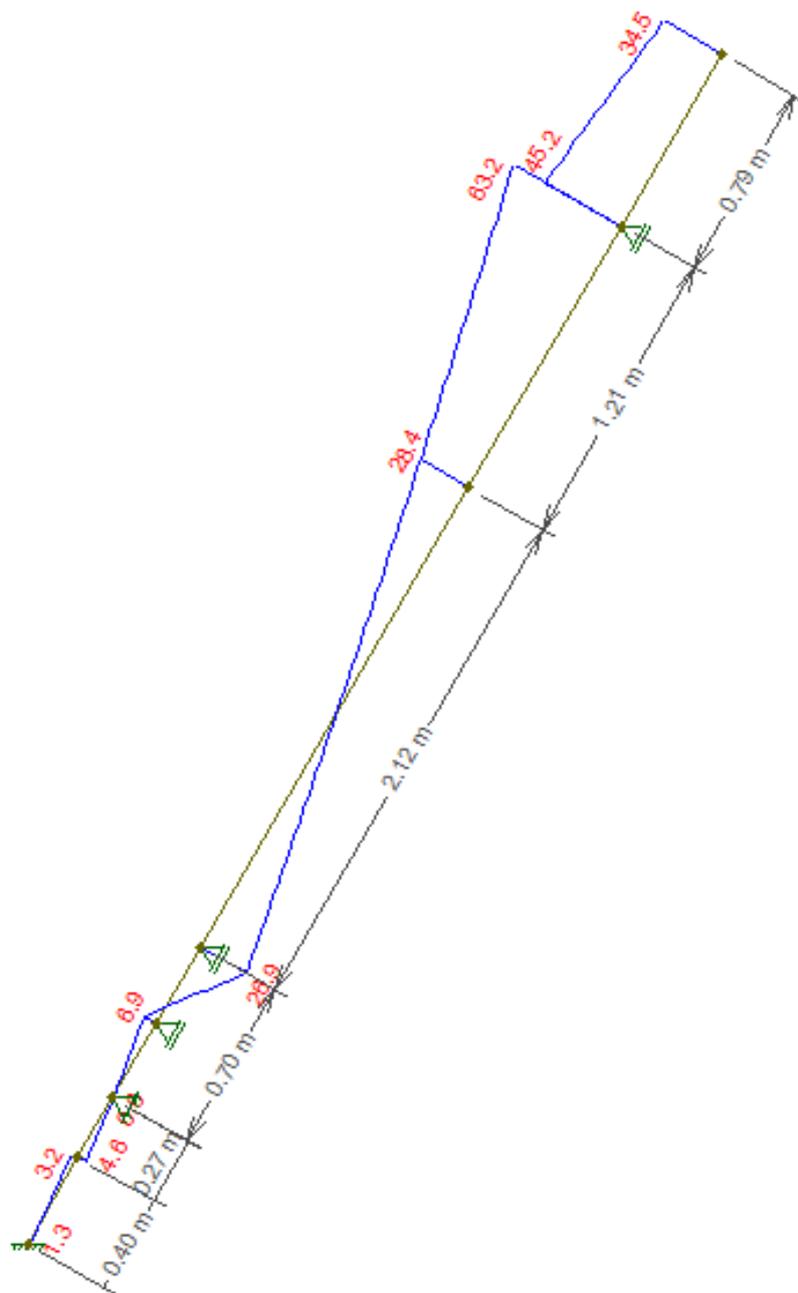
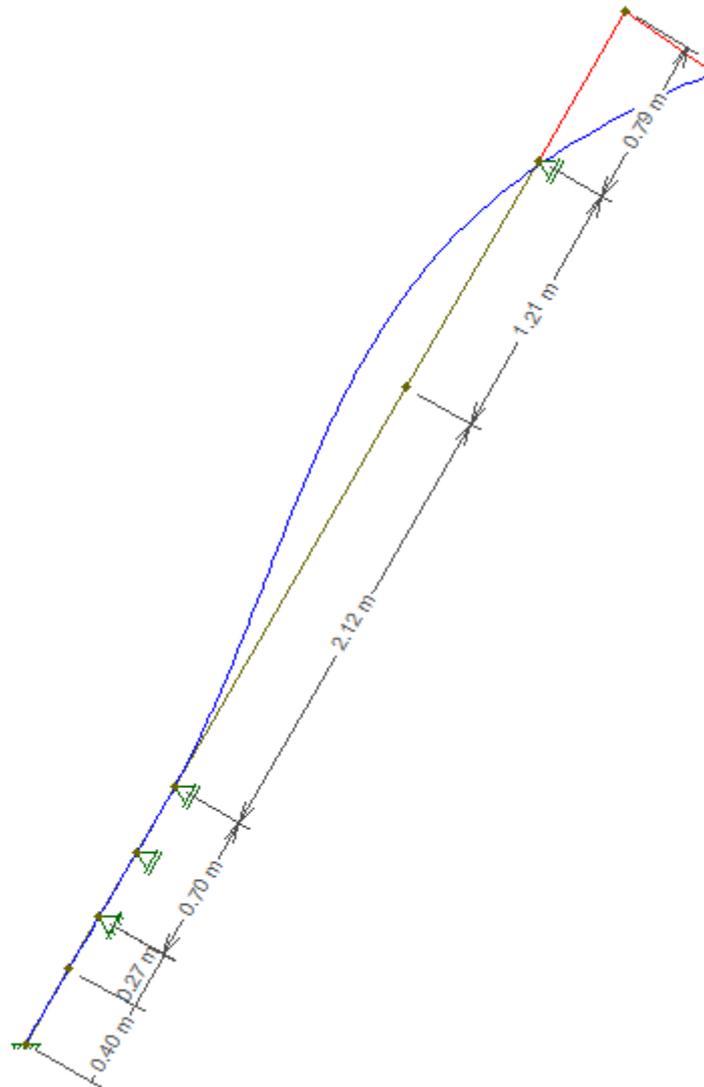


Diagrama de Momento Fletor



## Deformação



Displ./rotat. at local pos.:  $x = 0.79$  m  $L = 0.79$  m -  $D_x: 2.270e+000$  mm  $D_y: -1.583e+000$  mm  $R_z: -4.239e-003$  rad

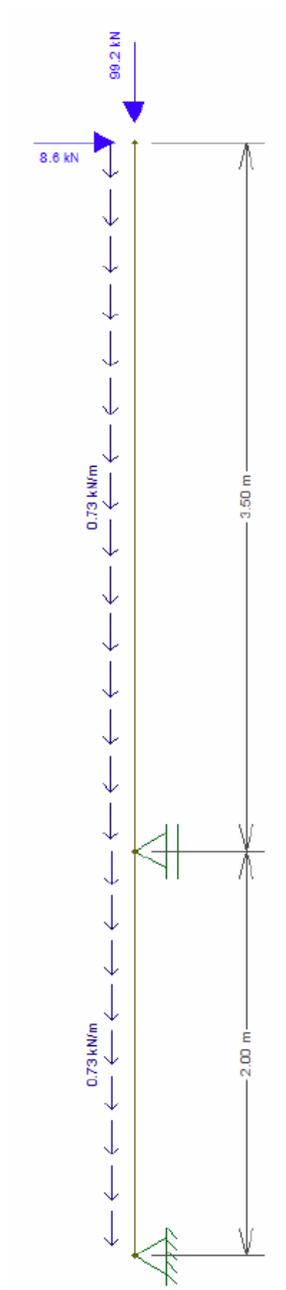
**Posição (90°)**

## A) Segundo Lance

Considerações:

- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura: 0.50 kN/m
- Capacidade do guincho principal: 10 toneladas ( $F_x = 8.55$ ;  $F_y = 97.73$  kN)
- Peso da roldana: 1.5 kN

Modelo Estrutural



## Diagrama de Força Normal

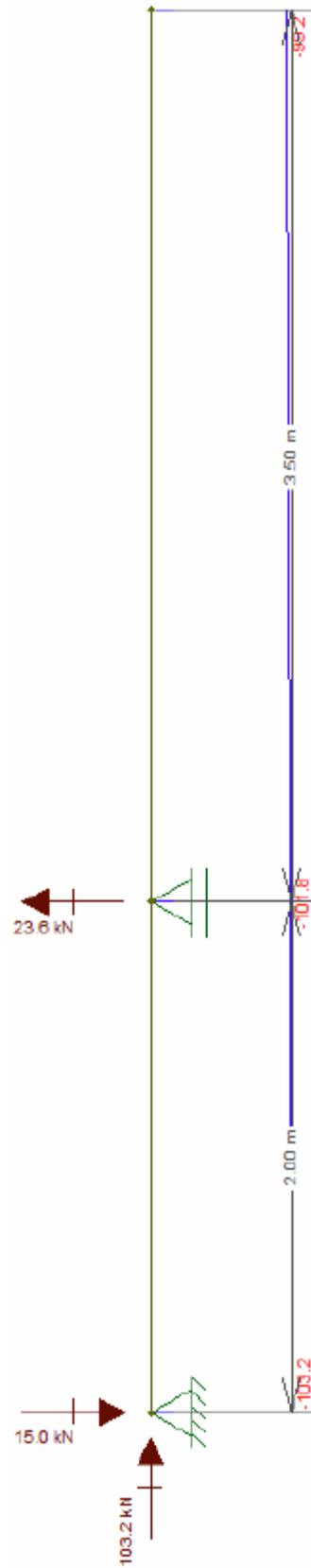
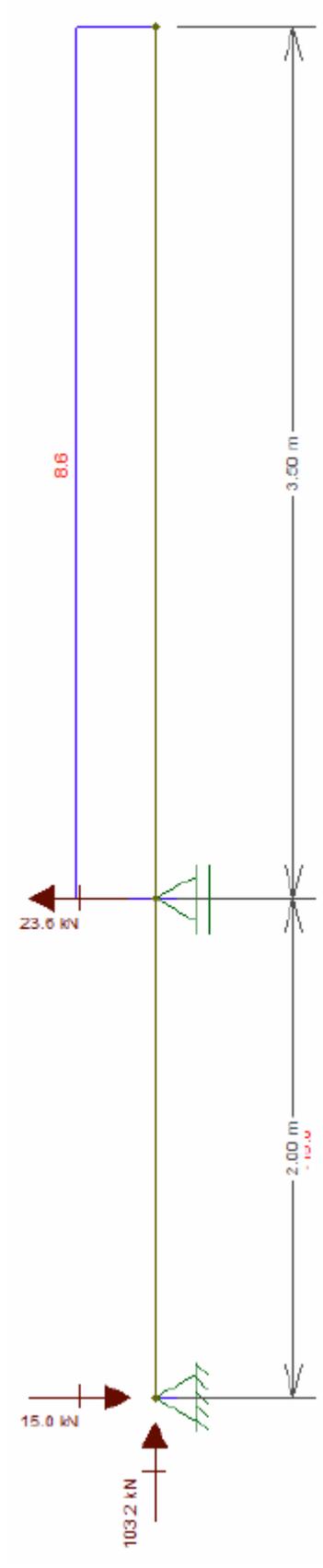
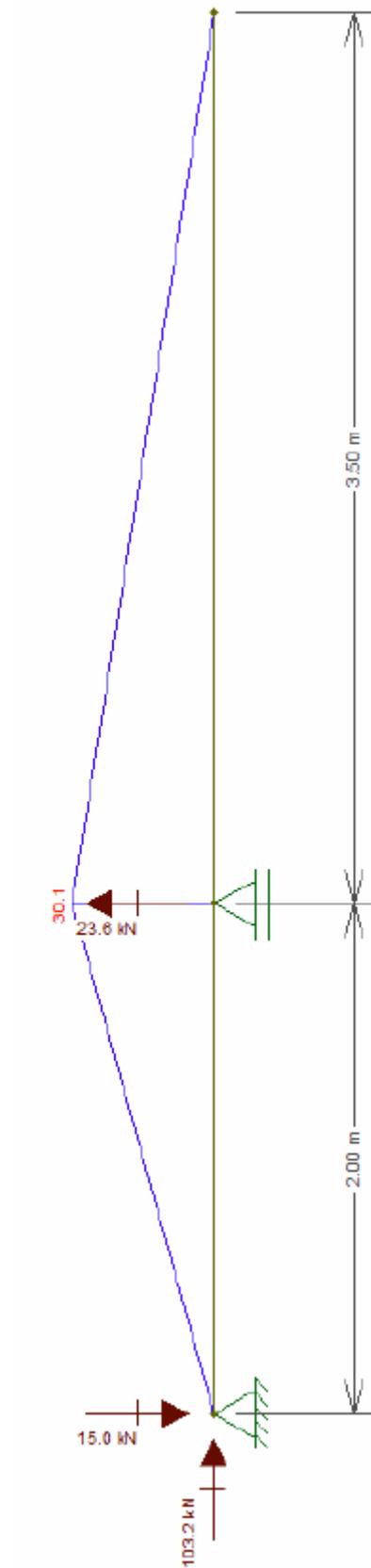


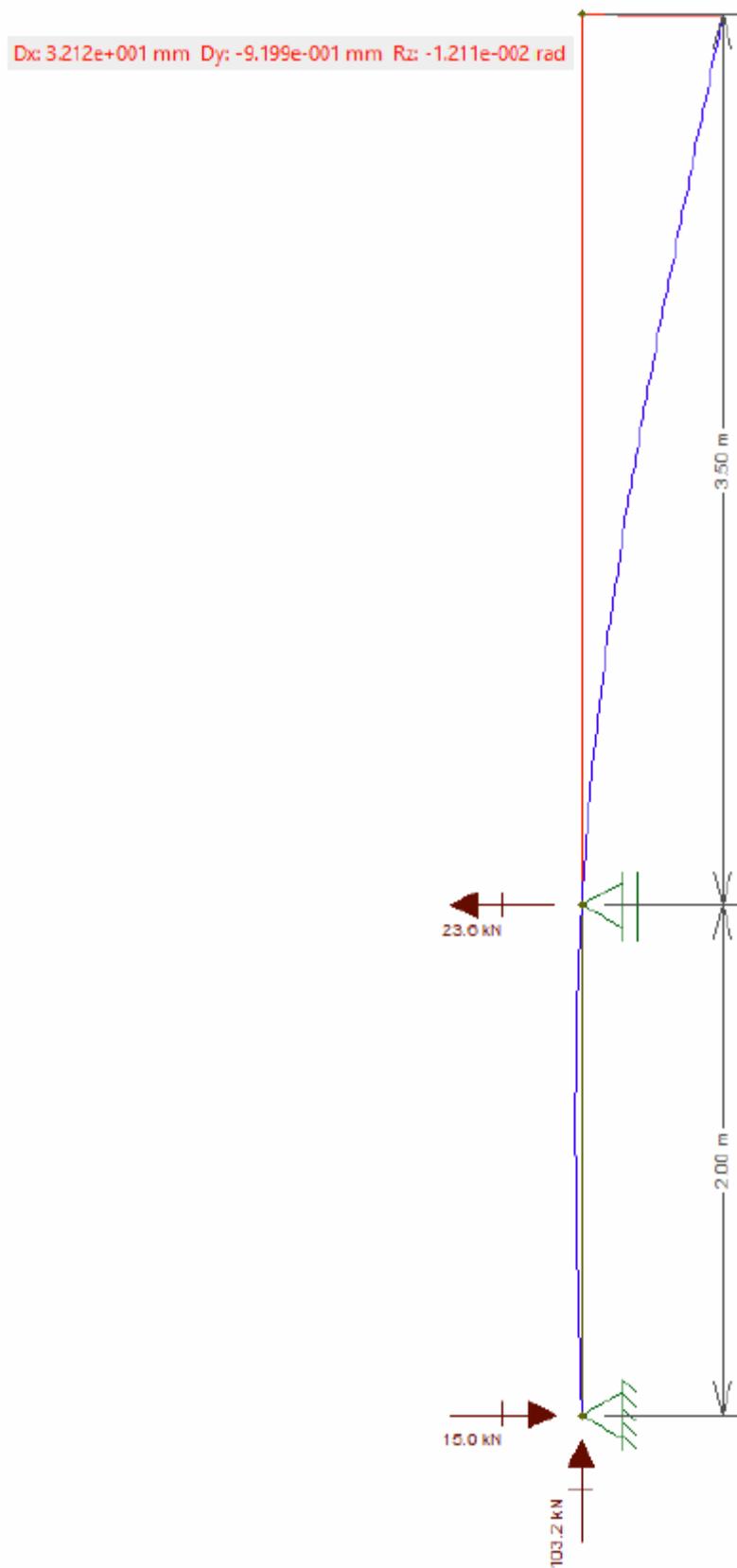
Diagrama de Força Cortante



## Diagrama de Momento Fletor



## Deformação

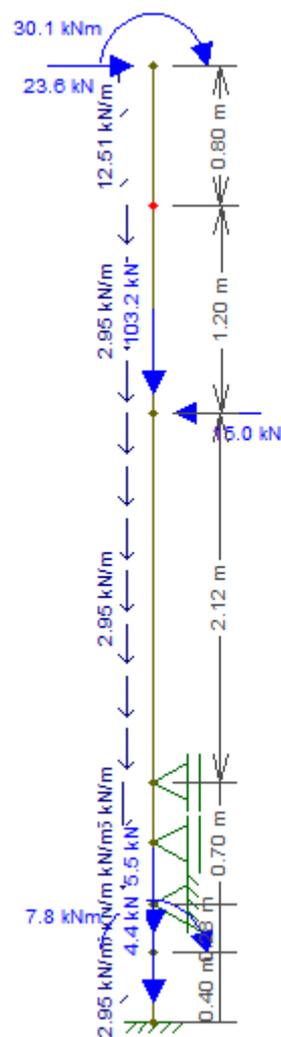


## B) Primeiro Lance

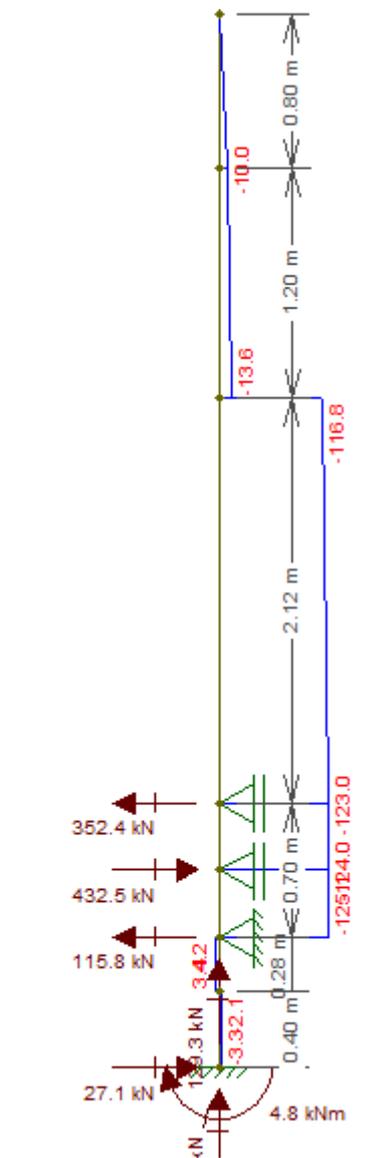
Considerações:

- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura: 2,95 kN/m
- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura + Carga distribuída devido ao peso do conjunto da unidade de rotação: 12,51 kN/m
- Carga aplicada devido à morsa: 4,4 kN
- Reações do Segundo Lance

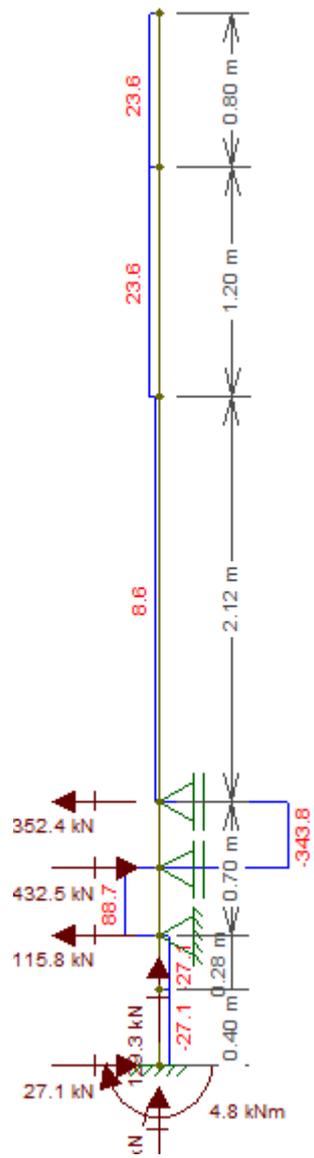
Modelo Estrutural



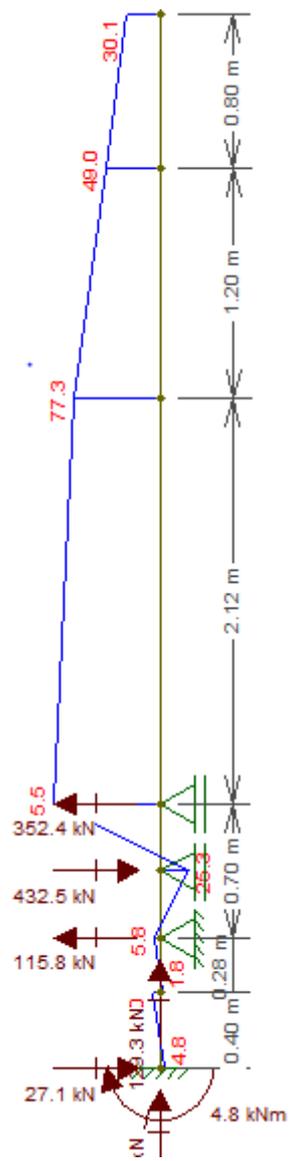
## Diagrama de Força Normal



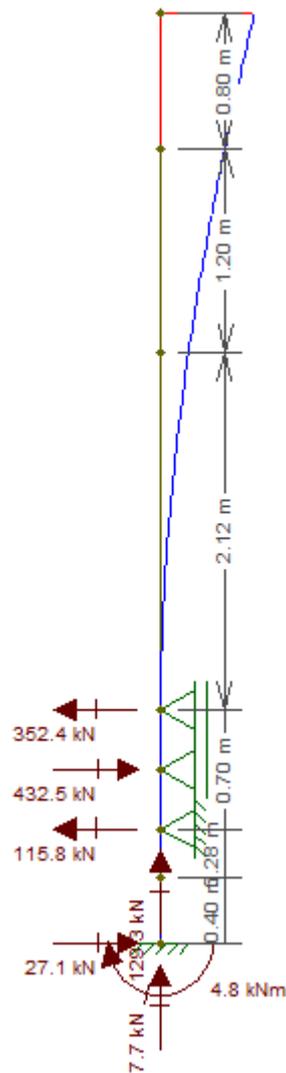
## Diagrama de Força Cortante



## Diagrama de Momento Fletor



## Deformação



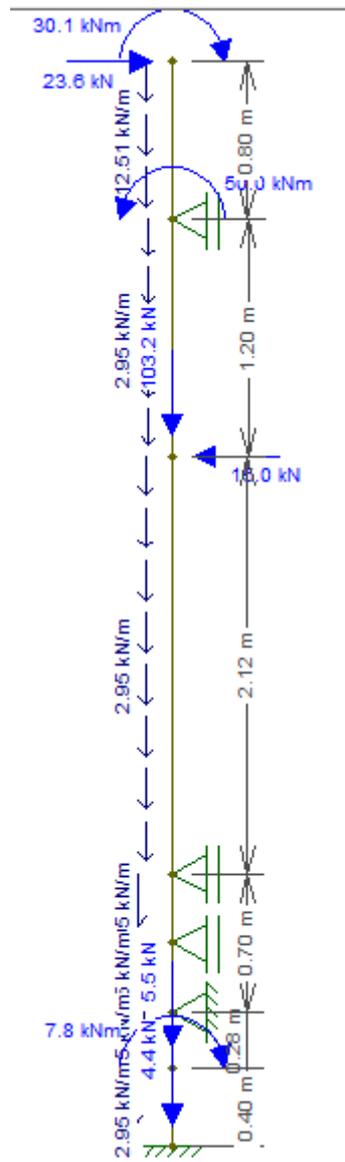
Displ./rotat. at local pos.: x = 0.80 m L = 0.80 m - Dx: 3.681e+001 mm Dy: -2.432e-001 mm Rz: -1.514e-002 rad

## C) Primeiro Lance (Pull Up)

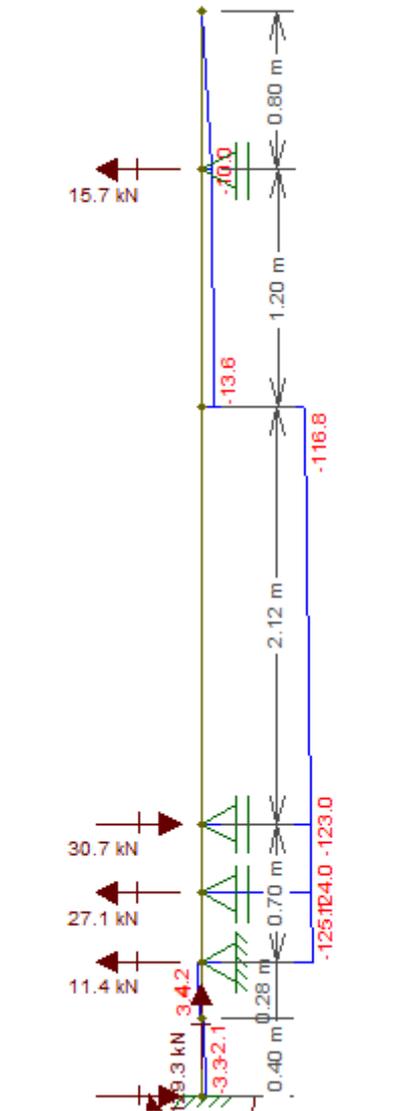
## Considerações:

- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura: 2,95 kN/m
- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura + Carga distribuída devido ao peso do conjunto da unidade de rotação: 12,51 kN/m
- Carga aplicada devido à morsa: 4,4 kN
- Reações do Segundo Lance
- Momento causado pela retirada do ferramental

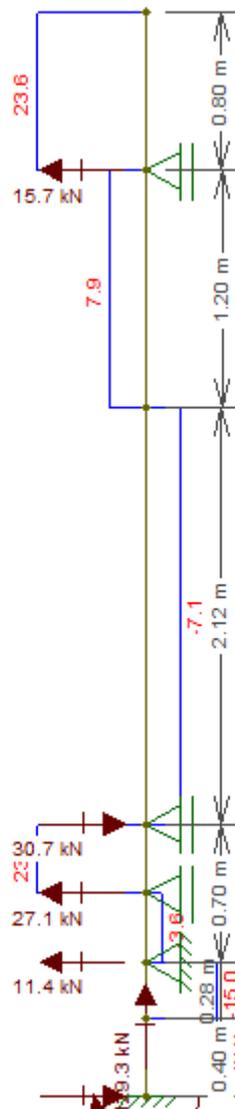
## Modelo Estrutural



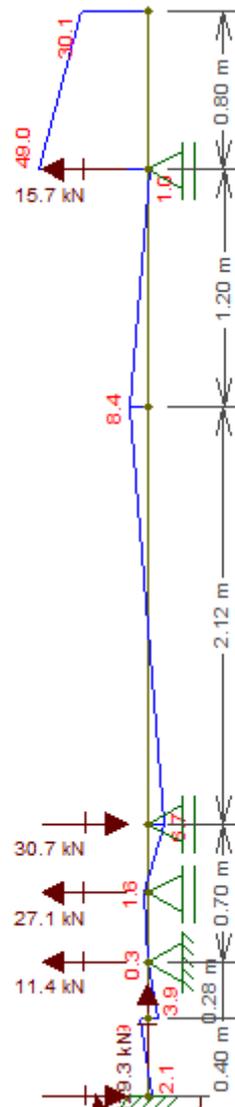
## Diagrama de Força Normal



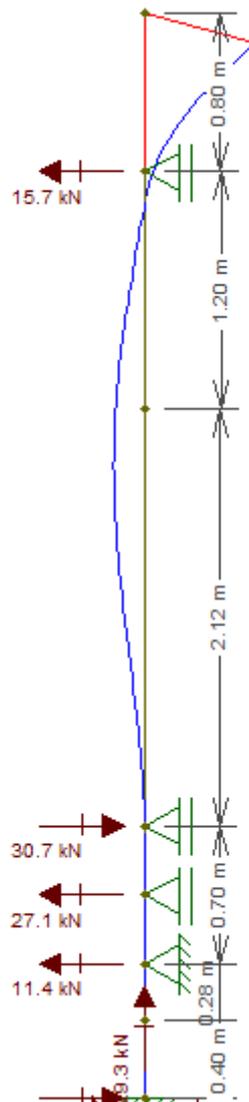
## Diagrama de Força Cortante



## Diagrama de Momento Fletor



## Deformação



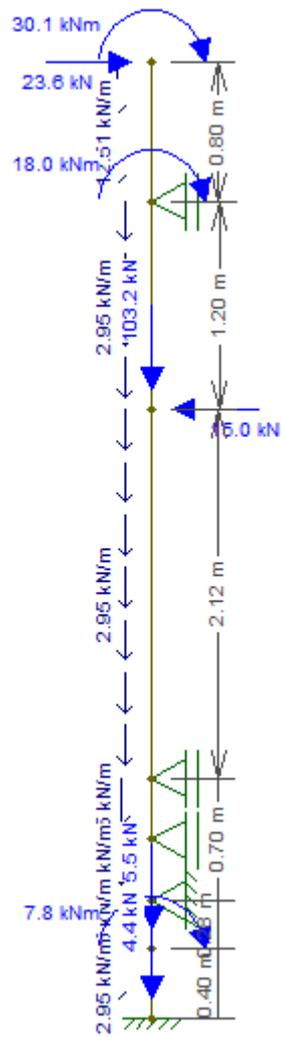
Displ./rotat. at local pos.: x = 0,80 m L = 0,80 m - Dx: 9,164e-001 mm Dy: -2,432e-001 mm Rz: -1,880e-003 rad

## D) Primeiro Lance (Pull Down)

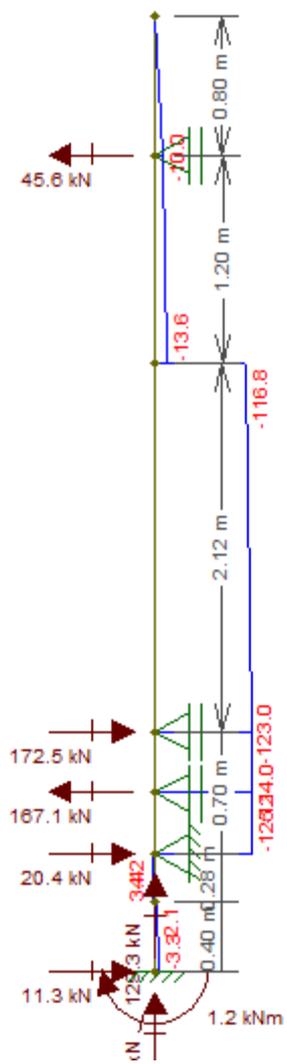
## Considerações:

- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura: 2,95 kN/m
- Carga distribuída devido ao peso próprio da estrutura + Carga distribuída devido ao peso do conjunto da unidade de rotação: 12,51 kN/m
- Carga aplicada devido à morsa: 4,4 kN
- Reações do Segundo Lance
- Momento causado pelo avanço do ferramental

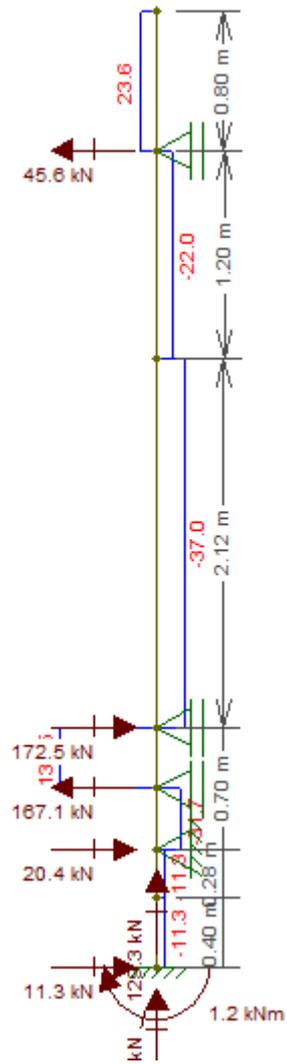
## Modelo estrutural



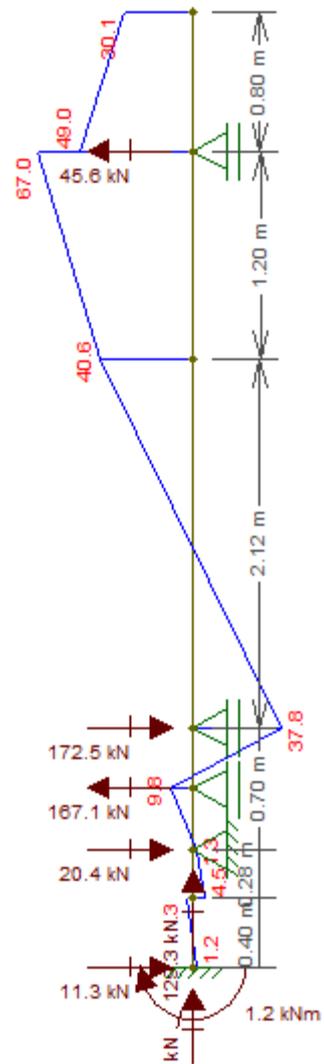
## Diagrama de Força Normal



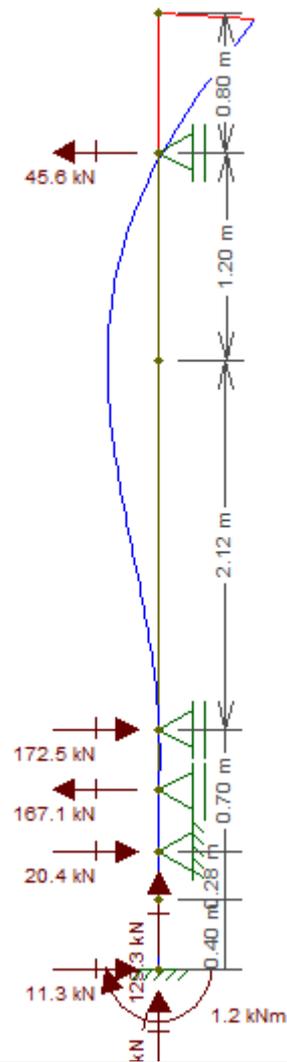
## Diagrama de Força Cortante



## Diagrama de Momento Fletor



## Deformação



Displ./rotat. at local pos.: x = 0.80 m L = 0.80 m - Dx: 3.258e+000 mm Dy: -2.432e-001 mm Rz: -4.805e-003 rad

Através dessa análise foi possível verificar qual seria a pior condição de trabalho para o primeiro e segundo lance da estrutura.