

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FÁBIO NOGUEIRA NUCINI  
LEONARDO LENFERS DA SILVA

**OTIMIZAÇÃO DA TRELIÇA DO CARRO DO ELEVADOR DE CARGA  
INDUSTRIAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
(TCC 2)

CURITIBA

2014

FÁBIO NOGUEIRA NUCINI  
LEONARDO LENFERS DA SILVA

## **OTIMIZAÇÃO DA TRELIÇA DO CARRO DO ELEVADOR DE CARGA INDUSTRIAL**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr<sup>a</sup>. Ana Paula Carvalho da Silva  
Ferreira

CURITIBA

2014

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "OTIMIZAÇÃO DA TRELIÇA DO CARRO DO ELEVADOR DE CARGA INDUSTRIAL", realizado pelo alunos FÁBIO NOGUEIRA NUCINI e LEONARDO LENFERS DA SILVA, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr<sup>a</sup> Ana Paula Carvalho da Silva Ferreira

DAMEC – UTFPR

Orientador

Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva

DAMEC – UTFPR

Avaliador

Prof. Dr. Marcos Roberto Rodacoski

DAMEC - UTFPR

Avaliador

Curitiba, 22 de maio de 2014.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por manifestar sua presença nos momentos de alegria e seu amor incondicional nos momentos de aflição.

Aos nossos pais e familiares, companheiros de todas as horas durante a elaboração do trabalho.

À Viviana Michaluz da Silva, Teodoro e Catarina, pela compreensão e amorosidade nos momentos de ausência.

À Euronobre, por disponibilizar os recursos necessários e proporcionar o grande aprendizado que tivemos.

Ao pessoal da Engenharia da Euronobre, pelo conhecimento transmitido e auxílio técnico na compreensão do equipamento.

À Professora Ana Paula Carvalho da Silva Ferreira, pela amizade, orientação, paciência e conhecimento compartilhado durante a realização da monografia.

Ao Professor Carlos Henrique da Silva, pela amizade, participação na banca e pelos valiosos ensinamentos no decorrer do curso.

Ao Professor Marcos Roberto Rodacoski, pela amizade, participação na banca e instruções durante o trabalho.

Ao Bolsista, Jonas Zaduski, pelo auxílio no Laboratório de Materiais.

Ao aluno e amigo, Rodrigo Juchen, pelo auxílio nas medições com extensometria.

Ao Professor Paulo César Borges, pelo conhecimento técnico transmitido.

## RESUMO

NUCINI, Fábio Nogueira; SILVA, Leonardo Lenfers da. **Otimização da Treliça do Carro do Elevador de Carga Industrial**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Programa de Graduação em Engenharia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Elevadores são equipamentos do dia-a-dia das pessoas, porém sua aplicação em escala industrial é muito importante no transporte interno de uma empresa. Com as necessidades das empresas em cortarem custos para manterem-se competitivas, seus produtos devem ser confiáveis, procurando pelo menor custo em sua concepção, considerando desde o projeto até a produção. A otimização de um projeto é sem dúvidas um importante papel da engenharia no desenvolvimento de produtos. A necessidade de uma estrutura mais leve e resistente para este tipo de equipamento é crucial para seu correto funcionamento. Com essa ideia clara realizou-se a otimização da treliça de um Elevador de Carga Industrial em parceria com a empresa Euronobre Equipamentos Industriais. Para a obtenção de um estrutura otimizada para a treliça, fez-se uso da ferramenta de otimização presente no *software* SolidWorks®, juntamente com realização de ensaios de extensometria para validação do modelo virtual. Com o modelo virtual criado, realizou-se a otimização, considerando-se os tubos retangulares superior e inferior que compõe a estrutura, de acordo com os perfis encontrados no mercado. Dessa forma, obteve-se novos perfis, com seção diferente da utilizada no projeto original, com espessura maior para diminuir os efeitos de torção e maior altura de seção para minimizar os efeitos de flexão.

**Palavras-chave:** Elevador Industrial, Otimização, Métodos de Elementos Finitos.

## ABSTRACT

NUCINI, Fábio Nogueira; SILVA, Leonardo Lenfers da. **Optimization of the Industrial Load Lift Car Truss**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Programa de Graduação em Engenharia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Lifts are daily equipments of people's lives, although their application in industrial scale is very important in the internal transport of a company. With the needs of companies to cut costs to remain competitive, their products must be reliable, seeking for the lowest cost in its conception, considering it since its design until the production. Optimizing a design is undoubtedly an important role of engineering in product development. The need for lighter and stronger structure for this type of equipment is crucial to its proper functioning. With this clear idea it was held the optimization of the industrial lift truss in partnership with Euronobre Industrial Equipment's. To obtain an optimized structure for the truss it was made use the optimization tool of the SolidWorks® software, along with the strain gage testing for validation of the virtual model. With the virtual model created, the optimization was performed, considering the lower and upper rectangular tubes that make up the structure, according to the profiles found in the market. Thus, new profiles were obtained with different section used in the original design, with greater thickness to reduce the effects of torsion and greater height of the section to minimize the effects of flexion.

**Keywords:** Industrial lift, Optimization, Finite Element Method.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Elevador EOM Bicoluna.....	15
Figura 2 - Sistema EOM.....	16
Figura 3 - Escova elétrica.....	17
Figura 4 - Obturador.....	18
Figura 5 - Elevador com <i>skid</i> .....	22
Figura 6 - Transelevador com carroceria .....	24
Figura 7 - Sistema EOM com acúmulo de carrocerias .....	26
Figura 8 - Elevador de EOM com carroceria .....	27
Figura 9 – Discretização de um dente de engrenagem.....	28
Figura 10 - Malha para análise por MEF de uma chapa com furo.....	28
Figura 11 – Exemplo Barra Sobre Carregamento Axial .....	29
Figura 12 – Discretização do domínio .....	36
Figura 13 – Elemento típico da malha.....	37
Figura 14 – Funções de interpolação .....	40
Figura 15 – Matriz Global .....	43
Figura 16 - Viga escalonada.....	47
Figura 17 - Modelo geral de um sistema de transformação .....	50
Figura 18 – Criação de um “Estudo de Projeto” no SolidWorks® .....	52
Figura 19 – Fluxograma de operações do “Estudo de Projeto” no SolidWorks® .....	53
Figura 20 – Seleção de variáveis contínuas.....	56
Figura 21 - Seleção de variáveis discretas usando a “Vista de variável” .....	56
Figura 22 - Seleção de variáveis discretas usando a “Vista de tabela” .....	57
Figura 23 – Opções de Restrições .....	58
Figura 24 – Opções de Metas para Sensores .....	59
Figura 25 - Esquema de confecção dos extensômetros .....	63

Figura 26 - Diagrama Tensão X Deformação.....	66
Figura 27 - Tensão de Von Mises .....	70
Figura 28 – Corpo sofrendo Torção .....	71
Figura 29 – Seção Transversal Tubo Parede Delgada .....	71
Figura 30 - Pontos de Carregamento da Treliça .....	77
Figura 31 - Fluxograma de atividades .....	78
Figura 32 – Estrutura do Elevador de Carga.....	82
Figura 33 – Objeto de estudo: Treliça do Elevador de Carga.....	83
Figura 34 – Solicitações na Treliça .....	84
Figura 35 – Exportação Modelo Virtual .....	85
Figura 36 – Modelo Virtual SolidWorks®.....	85
Figura 37 – Regiões de maiores solicitações na Treliça (estudo preliminar Autodesk Inventor®) .....	86
Figura 38 – Preparação da superfície para colagem dos extensômetros. ....	87
Figura 39 – Colagem dos extensômetros.....	87
Figura 40 – Condicionador de Sinal KYOWA CDV-700A.....	88
Figura 41 – Fonte Simétrica .....	89
Figura 42 – Entrada do Gancho no Elevador .....	90
Figura 43 – Gancho posicionado no centro do elevador. ....	90
Figura 44 – Gancho utilizado para experimentos. ....	91
Figura 45 – Estrutura do Obturador Simplificada .....	92
Figura 46 – Braço Elevador (modelamento no SolidWorks®). ....	92
Figura 47 – Pontos de Fixação Trilho de Suporte ao Gancho.....	95
Figura 48 - Diagrama de Corpo Livre .....	95
Figura 49 – Modelo Virtual: pontos relacionados condições de contorno .....	96
Figura 50 – Catálogo de Perfis de Tubos Retangulares Padrões .....	108

Figura 51 – Amostra dos Cenários Utilizados na 1ª Otimização .....	108
Figura 52 – Amostra dos Limites Utilizados na 2ª Otimização .....	109
Figura 53 - Amostra dos Limites Utilizados na 3ª Otimização .....	110
Figura 54 – Amostras coletadas na Euronobre .....	112
Figura 55 – Amostras embutidas.....	112
Figura 56 – Microscópio Laboratório de Materiais UTFPR.....	113
Figura 57 – Equipamento Microdureza .....	114
Figura 58 – Perfil Coletado.....	114
Figura 59 – Estrutura modelada com perfil deformado. ....	115
Figura 60 – Análise Perfil Real da Estrutura da Trelça do Elevador.....	116
Figura 61 – Posição de Medição .....	117
Figura 62 – Microestrutura Material Tubo Inferior .....	121
Figura 63 – Microestrutura Material Tubo Superior .....	122
Figura 64 - Histórico Melhor Resultado Sensor "A" – Entrada .....	125
Figura 65 - Histórico Melhor Resultado Sensor "B" – Entrada .....	125
Figura 66 - Histórico Melhor Resultado Sensor "C" – Entrada .....	125
Figura 67 - Histórico Melhor Resultado Sensor "A" – Centralizado.....	128
Figura 68 - Histórico Melhor Resultado Sensor "B" – Centralizado.....	128
Figura 69 - Histórico Melhor Resultado Sensor "C" – Centralizado.....	128
Figura 70 – Diferença entre projeto e fabricação. ....	130
Figura 71 - Cálculo do Coeficiente de Segurança.....	131
Figura 72 - Estrutura 1ª Otimização .....	132
Figura 73 - Estrutura 2ª Otimização .....	133
Figura 74 - Estrutura 3ª Otimização .....	134
Quadro 1 – Condições para medição com extensômetros .....	146

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Funções de interpolação e aproximação Método dos Resíduos Ponderados.....	35
Tabela 2 - Resultados esperados para combinações de variáveis e de qualidades de estudo .....	60
Tabela 3 – Número de Iterações dos Métodos de Alta Qualidade e Resultados Rápidos.....	61
Tabela 4 – Técnicas de Ensaio de Dureza.....	73
Tabela 5 – Propriedades do AISI 1020 no SolidWorks®.....	93
Tabela 6 – Deformação Ponto A .....	118
Tabela 7 – Deformação Ponto B. ....	119
Tabela 8 – Deformação Ponto C.....	120
Tabela 9 – Resultado Ensaio de Dureza.....	122
Tabela 10 - Histórico dos Estudos de Simulação na Entrada.....	124
Tabela 11 - Histórico dos Estudos de Simulação no Centro .....	127
Tabela 12 - Cenários Pré-formatados .....	132
Tabela 13 - Cenários Interpolados .....	133
Tabela 14 - Cenários Mistos.....	134

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS**

AISI = *American Iron and Steel Institute* (Instituto Americano do Ferro e Aço)

CAD = *Computer Aided Design* (Projeto Auxiliado por Computador)

DoE = *Design of Experiments* (Planejamento de Experimentos)

EOM = *Electric Overhead Monorail* (Monotrilho Elétrico Sobrecabeça)

EMS = *Electric Monorail System* (Sistema Elétrico de Monotrilhos)

FEA = *Finite Elements Analysis* (Análise de Elementos Finitos)

MEF = Método de Elementos Finitos

Skid = Plataforma de Carregamento Deslizante

PPP = Proposta de Pré-Projeto

TCC = Trabalho de Conclusão de Curso

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	Contexto do Tema	14
1.2	Caracterização do Problema	14
1.3	Objetivos	19
1.4	Justificativa	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>20</b>
2.1	Elevadores	20
2.1.1	Normas Regulatórias	20
2.1.2	Tipos de Elevadores de Carga	21
2.2	Método de Elementos Finitos	27
2.3	Métodos de Otimização	44
2.3.1	Objetivo(s)	45
2.3.2	Variáveis	46
2.3.3	Restrições	48
2.3.4	Estratégia Minimax	48
2.3.5	Metodologia Análise de Experimentos / <i>Design of Experiments (DoE)</i>	49
2.3.6	Otimização com o SolidWorks® e o COSMOSWorks®	51
2.4	Extensometria	62
2.5	Mecânica Estrutural	64
2.5.1	Critério de Falha de Von-Mises	65
2.5.2	Torção em Tubos de Parede Delgada	71
2.6	Materiais	72
2.6.1	Dureza	72
2.6.2	Metalografia: Micrografia	73
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>76</b>
3.1	Descrição da Metodologia	78
3.2	Justificativa da Metodologia	79
3.3	Produtos do Projeto	80
<b>4</b>	<b>DETALHAMENTO DOS PROCEDIMENTOS</b>	<b>82</b>
4.1	Formulação do Problema	82
4.2	Obtenção do Modelo Virtual	84
4.3	Aquisição de Dados	86
4.4	Desenvolvimento e Validação Modelo Matemático	91
4.5	Otimização	107
<b>5</b>	<b>TESTES COMPLEMENTARES</b>	<b>111</b>
5.1	Metalografia	111
5.2	Ensaio de Dureza	113

5.3	Simulações com Perfil Modificado	114
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	117
6.1	Aquisição de Dados	117
6.2	Testes complementares	121
6.2.1	Metalografia e Ensaio de Dureza	121
6.2.2	Simulação com perfil deformado	123
6.3	Validação e Desenvolvimento do Modelo Matemático	123
6.3.1	Entrada do Carro	123
6.3.2	Carro Centralizado	127
6.4	Otimização	131
7	CONCLUSÕES	135
	REFERÊNCIAS	137
	APÊNDICE A	143
	ANEXO A	146

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto do Tema

Com a demanda atual por produtos, as empresas buscam em todos os setores melhorias, sejam elas para diminuir custos, diminuir poluição, aumentar produtividade, etc. O transporte interno de materiais e produtos dentro das linhas de montagem é uma parte muito importante dentro da cadeia industrial, que influencia diretamente na capacidade e qualidade da produção das empresas. Para que uma empresa consiga obter um bom sistema de transporte é de fundamental importância que os equipamentos que realizam tal função sejam confiáveis e com um bom desempenho, além dos mesmos estarem dispostos dentro das fábricas de maneira inteligente. Segundo Rudenko (1976, p.2) a produção em uma empresa depende diretamente da boa escolha dos tipos de equipamentos presentes no processo.

Empresas de qualquer porte e qualquer setor estão sujeitas a necessidades de locomoção interna, seja ela feita de maneira manual, automática, terrestre, aérea, etc. “Em toda empresa, operações de manuseio e carga dependem das facilidades disponíveis tanto no transporte interno como externo.” (Rudenko, 1976, p.3) E na necessidade de movimentar os produtos em níveis diferentes vários equipamentos podem ser utilizados, e dentro dessa gama está presente o elevador.

Elevadores são equipamentos conhecidos principalmente para movimentação de pessoas, mas são muito importantes dentro das fábricas. São constituídos basicamente de uma estrutura de apoio fixa, um motor e a parte móvel, responsável efetivamente pelo transporte daquilo que se é desejado. É desejável que características como rigidez, capacidade de carga, velocidade de movimentação, etc., estejam presentes em tais equipamentos, de maneira que sua construção seja feita da melhor forma, com um projeto bem desenvolvido.

## 1.2 Caracterização do Problema

Os elevadores industriais são, normalmente, estruturas bem definidas na maneira de funcionar, no qual um motor gira polias, que movimentam as correias, cabos, etc. e assim a carga é elevada ou abaixada.

Para o projeto de um elevador industrial, normalmente tem-se como dados de entrada o espaço que o elevador deve ocupar, a altura que ele deve movimentar-se, além do tipo e do peso da carga que será movida. A estrutura desenvolvida nem sempre atende de imediato os requisitos iniciais, sendo necessários ajustes não previstos, como adição de reforços na estrutura, ou outros elementos não presentes inicialmente no projeto. Isso se deve muitas vezes a não inclusão de condições de operação durante a fase de projeto, ou mesmo devido à diferença entre os resultados encontrados durante os cálculos e simulações virtuais com as simulações práticas, além de problemas com materiais, métodos de fabricação, etc.

O elevador a ser estudado é o Elevador EOM, do inglês *Electric Overhead Monorail* de Coluna da empresa Euronobre Equipamentos Industriais, que pode ser visto na Figura 1, equipamento responsável pelo transporte de peças de uma linha de montagem de empresa do setor automobilístico.



**Figura 1 - Elevador EOM Bicoluna**

Fonte: Autoria Própria<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> As ilustrações e tabelas sem indicação de fonte foram compiladas pelo próprio aluno ou equipe.

Esse tipo de linha é basicamente formado por trilhos aéreos onde movimentam-se os ganchos de transporte, que aloja as peças que serão movimentadas na linha de montagem, na Figura 2 pode-se ver um exemplo de linha EOM, projetada para o setor automobilístico.



**Figura 2 - Sistema EOM**

Nota-se a estrutura branca que mantém o trilho suspenso por onde o gancho, composto por duas rodas, uma motora e uma movida para dar suporte, circula pelo trilho movimentando então o que estiver sendo carregado na gaiola do gancho.

Os elevadores são posicionados na linha nos setores onde necessita-se de mudança de nível.

É no momento em que o elevador é carregado que as solicitações à estrutura são mais elevadas.

Na estrutura de um elevador, há montado em seu carro uma parte de trilho, responsável por receber o gancho e então elevá-lo ou abaixá-lo. Na intersecção das partes do trilho, entre a estrutura fixa do galpão e a móvel do elevador, há o deslocamento e formação de desnível no momento do carregamento e

descarregamento do elevador. Para que um elevador não prejudique o funcionamento da linha é necessário que no momento de carga e descarga o equipamento mantenha-se rígido, havendo o mínimo deslocamento possível, para que o contato entre trilhos não seja comprometido.

O mau contato entre as seções do trilho durante o movimento do gancho ocasiona a quebra de componentes do sistema. O componente que mais sofre com esse degrau formado entre as seções fixa e móvel (elevador) do trilho é a escova, que está posicionada no gancho, e pode-se ver com detalhes na Figura 3.

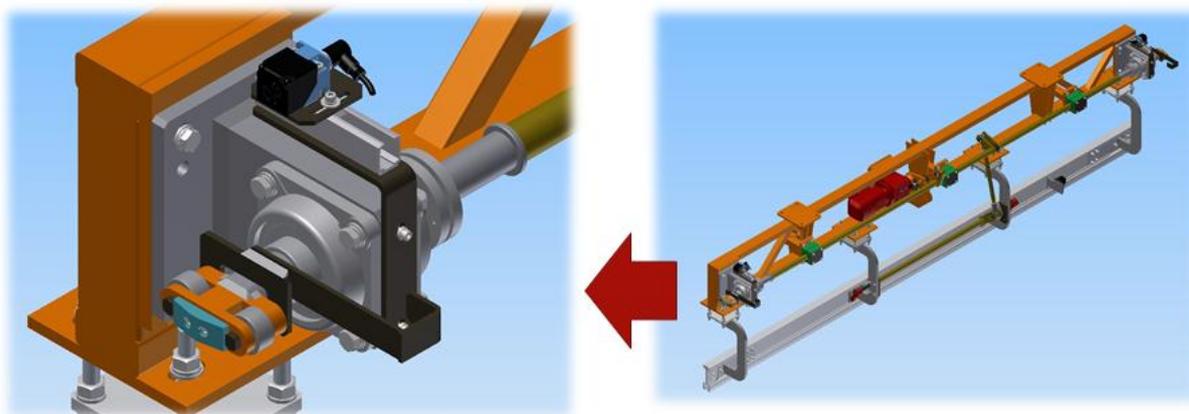


**Figura 3 - Escova elétrica**

Fonte: Catálogo VAHLE Electrification Systems

As escovas servem para energizar o sistema, onde estão em contato com barramento elétrico presente durante todo o trajeto. Na imagem, a escova é o componente preto o qual é fixado em uma das rodas do gancho, enquanto o barramento são os canais em verde fixados no trilho. Os barramentos são alimentados com energia elétrica que por sua vez transmitem a energia para as escovas que energizam o motoredutor e move o gancho.

No projeto deste elevador foi adicionado um componente denominado obturador, que pode ser visto na Figura 4.



**Figura 4 - Obturador**

O obturador é acionado por um motor individual que trava a estrutura móvel do elevador a estrutura fixa. Os roletes presentes nas extremidades do eixo entram em um canal e dessa forma ocorre o travamento.

Com o obturador ativado a deformação da estrutura móvel diminui consideravelmente, porém, mesmo com esse dispositivo auxiliar continua havendo deformação na estrutura e essa deformação resultante ocorre na treliça do elevador.

A utilização do obturador faz-se necessário devido ao grande aumento de peso que ocorreria se toda a estrutura do elevador fosse otimizada a fim de diminuir a deformação. Esse aumento de peso, mesmo sendo ocasionado para evitar a deformação, acarretaria em outros problemas, como na necessidade de um motoredutor maior para acionar o elevador, o que impactaria negativamente no custo do equipamento.

O problema abordado neste caso refere-se principalmente na necessidade de se obter uma estrutura mais leve e que sofra deformação dentro de um valor que não comprometa o funcionamento da linha. Para isso faz-se necessário um estudo mais aprofundado sobre o projeto. Dessa forma, modificações que otimizem a estrutura, tornando-a mais leve e resistente, diminuirão problemas com necessidade contínua de manutenção, além de permitir que o tempo de ciclo seja menor.

### 1.3 Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho é a obtenção de uma estrutura otimizada para a TRELICHA do Elevador Bi coluna EOM, com projeto já utilizado pela empresa, modelado em *software* CAD. Obtendo dessa forma uma estrutura que atenda aos requisitos de projeto, ou seja, uma estrutura que obedeça aos limites de deformação impostos pelos componentes presentes no sistema e que apresente um coeficiente de segurança maior ou igual a dois, segundo o critério de Von-Mises.

### 1.4 Justificativa

Com toda a tecnologia que cerca a Engenharia contemporânea o engenheiro necessita renovar-se diariamente, para que as facilidades da profissão atual não se tornem barreiras na execução de seu trabalho. Tendo isso em mente, quanto mais ferramentas o Engenheiro Mecânico dominar, mais garantida será a resolução de problemas que apareçam no decorrer da carreira.

O convívio com a prática da indústria traz grandes benefícios, principalmente por possibilitar a utilização dos conceitos aprendidos na faculdade. O presente trabalho traz essa possibilidade, onde um caso real da indústria de equipamentos será mesclado com os conhecimentos vistos em sala de aula.

O método de elementos finitos apresenta um grande potencial para a indústria, mas ainda tem sido utilizado na maioria das vezes apenas no meio acadêmico. E este potencial é o principal motivador deste trabalho, onde a oportunidade de aplicação de conhecimento técnico, com tecnologia em softwares e prática do meio industrial formam um excelente conjunto e que se mostra essencial para a formação de um Engenheiro Mecânico.

E por fim, há o interesse da empresa parceira na estrutura obtida neste trabalho, onde será possível utilizar este estudo para melhoramentos em projetos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Elevadores

O objeto de estudo deste projeto será a estrutura de um elevador de carga. Elevadores de carga são subdivididos em elevadores de carga propriamente ditos, de passageiros (com um ascensorista) e elevadores de cargas para trabalhos leves (para indústrias alimentícias e empresas comerciais). O tipo de acionamento empregado classifica-os como: elétrico, hidráulico e manual. Os elevadores eletricamente acionados são os mais difundidos (Rudenko, 1976).

A velocidade de deslocamento dos elevadores de carga varia de 0,1 m/s a 1,5 m/s. Comumente, ascensores para passageiros deslocam-se a velocidades de 0,5 a 3,5 m/s. Os principais dados de elevadores elétricos para passageiros e cargas obedecem às normas de cada país (Rudenko, N., 1976).

Ascensores de passageiros, normalmente, tem capacidade de 0,25 a 1,5 tf; elevadores de carga podem elevar de 0,25 a 15 tf, enquanto que os elevadores para trabalhos leves, de 50 a 100 kgf. Um elevador elétrico de cabina compreende as seguintes partes principais: cabina ou carro, trilhos guias independentes, poço, contrapeso, dispositivo de suspensão, máquina elevadora, dispositivos de segurança e controles elétricos (Rudenko, N., 1976).

#### 2.1.1 Normas Regulatórias

No Brasil é seguida a norma de segurança NR-18 para projeto dos diversos tipos de elevadores. Nela são elencados alguns pontos que devem ser seguidos de maneira a garantir a segurança dos operadores e pessoas transitando no local. Segue trecho da NR-18 relativa a elevadores de transporte de materiais:

18.14.22. Elevadores de Transporte de Materiais

18.14.22.1. É proibido o transporte de pessoas nos elevadores de materiais.

18.14.22.2. Deve ser fixada uma placa no interior do elevador de material, contendo a indicação de carga máxima e a proibição de transporte de pessoas.

18.14.22.3. O posto de trabalho do guincheiro deve ser isolado, dispor de proteção segura contra queda de materiais, e os assentos utilizados devem atender ao disposto na NR 17 - Ergonomia.

18.14.22.4. Os elevadores de materiais devem dispor de:

- a) sistema de frenagem automática;
- b) sistema de segurança eletromecânica no limite superior, instalado a 2,00m (dois metros) abaixo da viga superior da torre;
- c) sistema de trava de segurança para mantê-lo parado em altura, além do freio do motor;
- d) interruptor de corrente para que só se movimente com portas ou painéis fechados.

18.14.22.5. Quando houver irregularidades ao elevador de materiais quanto no funcionamento e manutenção do mesmo, estas serão anotadas pelo operador em livro próprio e comunicadas, por escrito ao responsável da obra.

18.14.22.6. O elevador deve contar com dispositivo de tração na subida e descida da cabina em queda livre (banguela).

18.14.22.7. Os elevadores de materiais devem ser dotados de botão, em cada pavimento, para acionar lâmpada ou campainha junto ao guincheiro, a fim de garantir comunicação única.

18.14.22.8. Os elevadores de materiais devem ser providos, nas laterais, de painéis fixos, de contenção com altura em torno de 1,00m (um metro) e nas demais faces, de portas ou painéis removíveis.

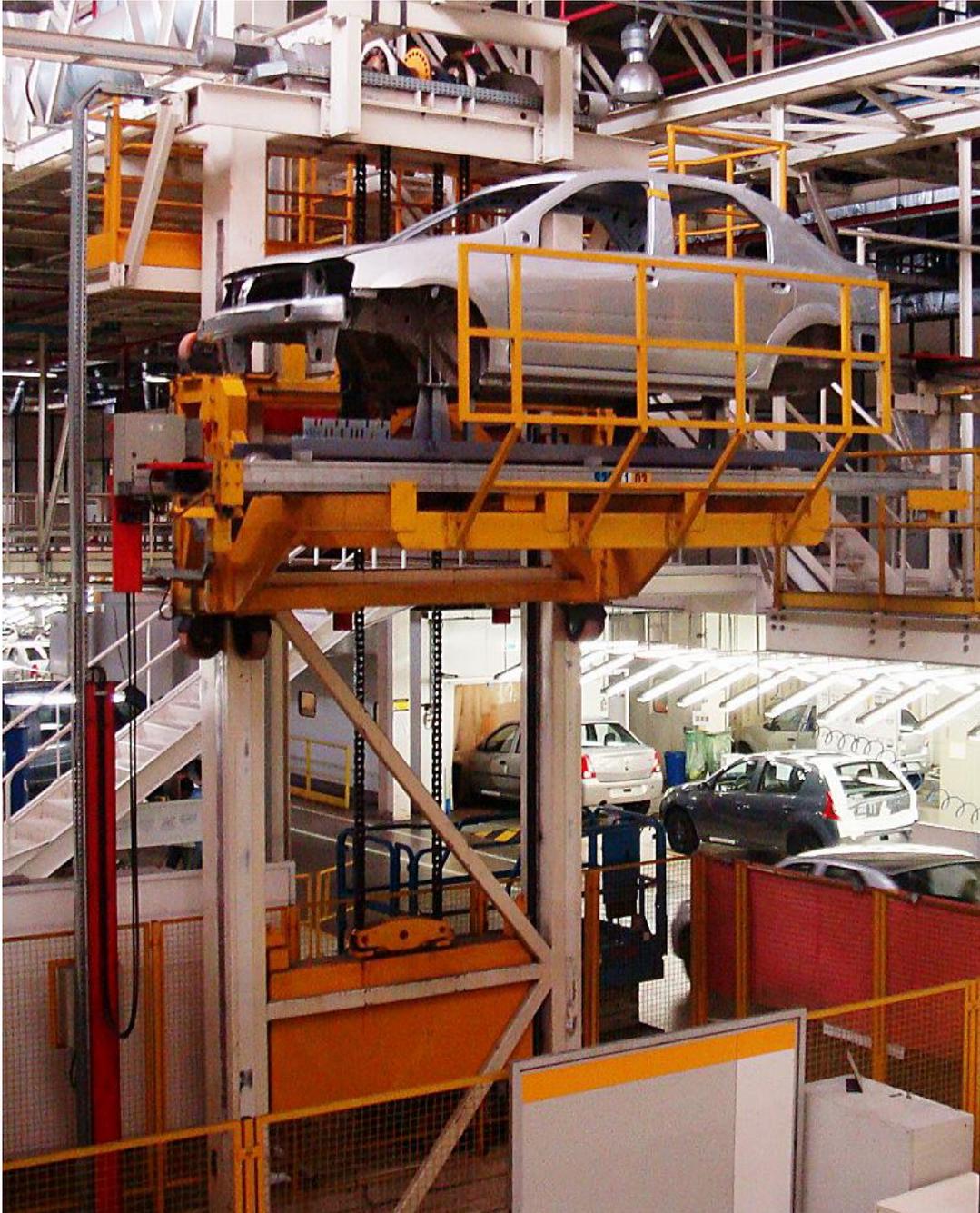
18.14.22.9. Os elevadores de materiais devem ser dotados de cobertura fixa, basculável ou removível.

### **2.1.2 Tipos de Elevadores de Carga**

Atualmente há dois tipos de elevadores que são os mais utilizados na indústria: O elevador de transporte de *skids* e os elevadores EOM.

### 2.1.2.1 Sistema de Transporte por *Skids* / *Skid Conveyor Systems*

Os sistemas de transporte por meio de *skids* oferecem uma solução simples e eficiente para transporte de produtos de médio e grande porte, especialmente carrocerias, em linhas produtivas e/ou sistemas de armazenagem e acúmulo. Na Figura 5 é possível ver o exemplo do sistema de Transporte por *Skids*, onde tem-se um *Skid* sendo movimentando em um elevador.



**Figura 5 - Elevador com *skid***

Fonte: <<http://euronobre.com>>

Neste tipo de sistema, o transporte de *skids* é realizado por mesas de rolos, as quais podem ser customizadas tanto mecanicamente (tamanho, velocidade, capacidade de carga, características construtivas) como eletricamente (comando centralizado ou descentralizado, tipo de acionamento, etc.), de acordo com as necessidades do cliente.

Geralmente estas mesas são montadas sobre pés de apoio e fixadas diretamente ao piso em leiautes industriais mais simples. Leiautes mais complexos consideram também a montagem destas mesas sobre dispositivos de movimentação, criando diversos equipamentos, como por exemplo:

- Elevadores e transelevadores (conforme Figura 6);
- Mesas giratórias e pivotantes;
- Mesas de translação;
- Mesas elevatórias pantográficas ou excêntricas;

A estes sistemas podem ser adicionados ainda:

- Transportadores de acúmulo de *skids* sobre correntes;
- Transportadores transversais (*cross-transfers*) de *skids* sobre correntes.

Toda esta combinação de equipamentos permite a criação dos mais variados projetos de movimentação, abrangendo praticamente todos os processos industriais, desde linhas de solda manuais/robotizadas, linhas de pintura até linhas de montagem final.

Além desta versatilidade, outra vantagem do sistema de transporte por *skids* é a sua flexibilidade em termos de leiautes, permitindo uma rápida expansão da linha produtiva pela adição de mesas e dispositivos ao sistema (EURONOBRE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS, 2011).



**Figura 6 - Transelevador com carroceria**  
Fonte: <<http://euronobre.com>>

### **2.1.2.2 Sistema de Transporte EOM (*Electric Monorail Systems*)**

Os sistemas de transporte tipo EOM (*Electric Overhead Monorail*), também chamado de EMS (*Electric Monorail System*), consistem basicamente em um sistema de trilhos aéreos sobre os quais se movimentam carros motorizados individuais. Cada carro possui sua própria caixa de controle, ou seja, são independentes entre si no que se diz respeito a movimentação, sendo a alimentação e o comando dos carros realizados através de barramentos de indução ou contato, fixados ao sistema de trilhos.

Este sistema foi especialmente desenvolvido para situações onde se necessita de transporte rápido e inteligente, por longas distâncias (inclusive transporte interplantas), sem a obstrução de vias e corredores de acesso.

Ao sistema básico de transporte podem ser adicionados desvios de linha, elevadores, carros de translação, desvios giratórios, entre outros, garantindo extrema versatilidade ao sistema, permitindo a comunização de trajetos e o direcionamento de cargas, o que garante que cada carro esteja presente no processo exatamente e apenas onde ele é necessário.

Dentre as principais aplicações podemos destacar, na indústria automobilística, a movimentação e acúmulo de carrocerias, conforme Figura 7 e Figura 8, e a alimentação e acúmulo de peças e componentes (laterais, portas, rodas, etc.) em linhas de solda e de montagem final (EURONOBRE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS, 2011).



**Figura 7 - Sistema EOM com acúmulo de carrocerias**

Fonte: <<http://euronobre.com>>

Como principais vantagens deste sistema, podemos citar:

- Transporte silencioso e isento de vibrações, mesmo em altas velocidades;
- Transporte sem contaminação do ambiente (óleo, graxas, poeira, etc.);
- Alta taxa de disponibilidade do sistema, uma vez que, caso haja falha de algum carro este poderá ser facilmente desviado para as áreas de manutenção, deixando livre o fluxo de materiais;
- Segurança, pois o sistema não interfere com o tráfego de pessoas e cargas ao nível do piso;
- Sistema de Controle Inteligente, que permite rápida alteração nas condições de fluxo de materiais;

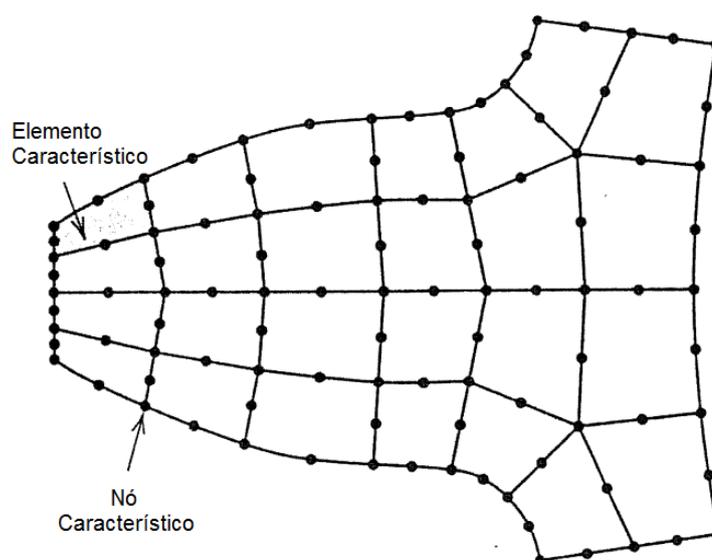


**Figura 8 - Elevador de EOM com carroceria**

Fonte: <<http://euronobre.com>>

## **2.2 Método de Elementos Finitos**

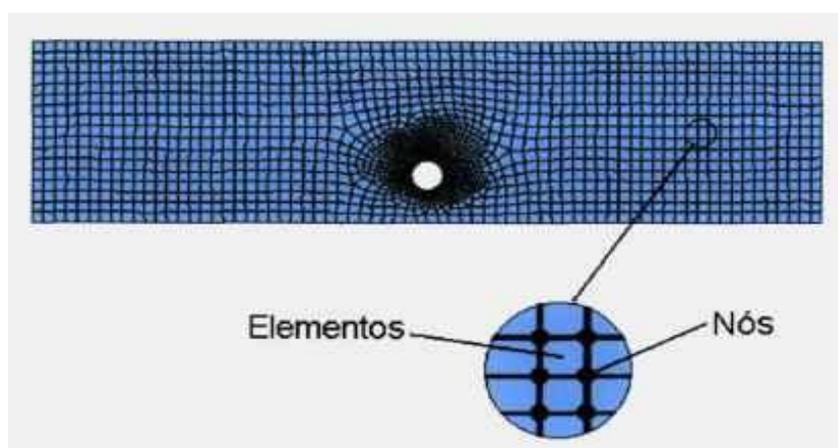
O método de análise por elementos finitos (MEF) é uma técnica de análise numérica utilizada para se obter soluções de equações diferenciais que descrevem uma grande variedade de problemas físicos. O fundamento básico do método é o de que um domínio de grande complexidade pode ser subdividido em uma série de pequenas regiões para as quais as equações diferenciais são resolvidas de maneira aproximada, essa subdivisão pode ser exemplificada pela Figura 9. Montando-se o conjunto de equações diferenciais para cada região, o comportamento de todo o domínio do problema é determinado. Cada região é, então, denominada de elemento e o processo de subdividir o domínio em um número finito de elementos é chamado de discretização. Por sua vez, os elementos são conectados em pontos específicos chamados de nós (Pintur, 1982).



**Figura 9 – Discretização de um dente de engrenagem**

Fonte: Cook, Robert D., 1995

O conjunto de elementos e nós é denominado malha. Na Figura 10 é mostrada, como exemplo, a malha de um modelo de uma chapa com furo. Nota-se que os elementos não possuem a mesma dimensão ao longo do modelo. Nas regiões onde há concentração de tensão, há uma diminuição do tamanho dos elementos de malha. Isto aumenta o número de nós e obtém-se um resultado mais preciso sobre o comportamento do material naquela região.



**Figura 10 - Malha para análise por MEF de uma chapa com furo.**

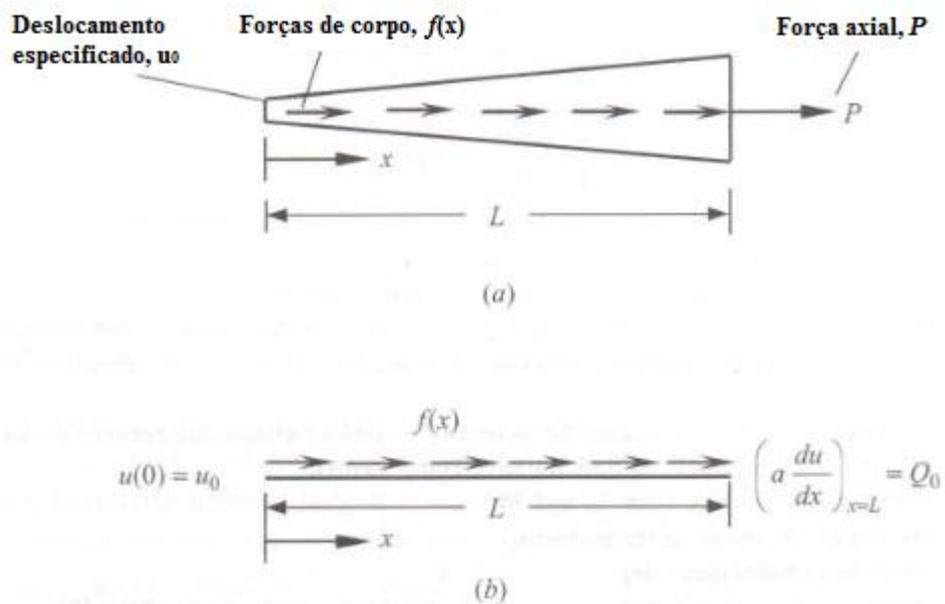
Fonte: Quinan, Marco A. D., 2005.

O MEF pode ser aplicado a qualquer problema físico que possa ser caracterizado por um campo, ou seja, qualquer grandeza que varie com a posição ao longo da região geométrica considerada. Desta maneira, o MEF tem uma grande aplicação na análise de tensões, além de problemas térmicos, de fluidos, elétricos e magnéticos (Quinan, 2005).

A partir da determinação da equação ou equações diferenciais que regem o problema é possível aplicar o MEF.

O MEF busca, como já mencionado, facilitar a solução de um problema dividindo o sistema em elementos de forma a solucionar o todo pela soma das soluções individuais de cada um desses elementos

Para exemplificar, considera-se o problema da barra da Figura 11, que tem a Eq. (1) como função que o governa (Reddy, 2006).



**Figura 11 – Exemplo Barra Sobre Carregamento Axial**

Fonte: Adaptado de REDDY (2006)

$$-\frac{d}{dx}\left(a\frac{du}{dx}\right) + cu - f = 0 \quad (1)$$

onde:

$a$  – módulo de Elasticidade  $E$  multiplicado a área de seção  $A$  transversal

$u$  – deslocamento longitudinal

$c$  – constante conhecida

$f$  – forças axiais

Para a aplicação do MEF devem-se seguir alguns passos descritos segundo Reddy (2006) como sendo:

1. Discretização do domínio dado em um conjunto de elementos finitos.
2. Desenvolvimento das equações para um elemento da malha.
3. Soma das equações de todos os elementos para a obtenção da solução aproximada para o problema.
4. Aplicação das condições de contorno.
5. Solução do conjunto de equações.
6. Processamento e análise dos resultados.

Para o desenvolvimento das equações do elemento finito pode-se usar os métodos variacionais. Os métodos variacionais levam a uma solução aproximada  $U(x)$  da forma:

$$U_N = \sum_{j=1}^N c_j \phi_j(x) + \phi_0(x) \quad (2)$$

Onde  $c_j$  são coeficientes a serem determinados e  $\phi_j(x)$  e  $\phi_0(x)$  são funções de aproximação escolhidas de forma que satisfaçam as condições de contorno. O índice  $j$  varia de 1 até  $N$  número de nós do elemento.

Pode-se obter a solução aproximada que satisfaz a equação diferencial com uma forma integral ponderada, que pode ser representada por:

$$\int_0^L w(x)R dx = 0 \quad (3)$$

Onde  $w(x)$  é a função de ponderação,  $L$  é o comprimento do elemento finito e  $R$  é a equação de resíduo, ou seja, o erro obtido pela solução da equação diferencial por aproximação, que pode ser observada na equação abaixo. O objetivo é encontrar os coeficientes  $c_j$  na Eq. (2) que façam a Eq. (3) ser igual à zero.

$$R = -a \frac{d^2 U_N}{dx^2} + c U_N - f \neq 0 \quad (4)$$

Devem existir  $N$  funções de ponderação.

Utilizando as formas integrais ponderadas, obtém-se um número de equações compatíveis com a quantidade de coeficientes  $c_j$  da solução aproximada.

Os métodos variacionais aplicados as formas integrais, diferem um do outro na escolha da função de ponderação e/ou na forma integral utilizada.

Esses métodos são descritos na sequência de forma resumida com base em Reddy (2006).

### Método de Rayleigh-Ritz

Para a utilização do Método de Ritz, é necessário, antes, ter a forma fraca da equação diferencial. A equação resultante na forma fraca contém dois tipos de expressão, uma que envolve a variável dependente  $u$  e a função de ponderação  $w$  e outra que envolve somente a função de ponderação. A forma fraca tem então a seguinte forma geral:

$$B(w, u) = l(w) \quad (5)$$

Tem-se como objetivo encontrar a solução  $u$  que satisfaça a equação anterior. A solução aproximada para  $u$  é  $U_N$ .

No método de Ritz, considera-se a função de ponderação como sendo igual a função de aproximação, obtendo-se, baseado nas Equações (2) e (5):

$$B(\phi_i, \sum_{j=1}^N c_j \phi_j + \phi_0) = l(\phi_i) \quad (6)$$

Sabendo que a função  $B$  é linear em  $u$ , temos:

$$\sum_{j=1}^N B(\phi_i, \phi_j) c_j = l(\phi_i) - B(\phi_i, \phi_0) \quad (7)$$

A equação anterior pode ser escrita na forma algébrica

$$\sum_{j=1}^N K_{ij} c_j = F_i \quad (8)$$

ou na forma matricial

$$[K]\{c\} = \{F\} \quad (9)$$

onde

$$K_{ij} = B(\phi_i, \phi_j)$$

$$F_i = l(\phi_i) - B(\phi_i, \phi_0).$$

### Método dos Resíduos Ponderados

Este método é uma generalização do Método de Ritz, onde as funções de ponderação são diferentes das de aproximação, e devem ser linearmente independentes uma das outras. Este método utiliza a forma integral ponderada, Eq.(3).

Pode-se escrever o Método dos Resíduos Ponderados de acordo com a equação abaixo

$$A(u) = f \quad (10)$$

Em um domínio  $\Omega$ , onde geralmente,  $A$  é um operador diferencial atuando na variável  $u$  (dependente) e  $f$  uma função conhecida das variáveis independentes.

Busca-se a solução  $u$  de maneira aproximada, de acordo com a Eq. (2). Dessa forma, tem-se  $A(U_N)$  que devido aos erros causados pela aproximação, é diferente de  $A(u)$ , ou seja

$$A(U_N) \neq f \quad (11)$$

A diferença entre  $A(U_N)$  e  $A(u)$  ou  $A(U_N)$  e  $f$  ( $[A(U_N)-f]$ ) é o resíduo  $R$  devido à aproximação. Pode-se definir  $R$  como

$$R \equiv A(U_N) - f = A\left(\sum_{j=1}^N c_j \phi_j + \phi_0\right) - f \neq 0 \quad (12)$$

Para este método, o objetivo é determinar os coeficientes  $c_j$  tornando o resíduo nulo. Assim, tem-se a forma integral ponderada como:

$$\int_{\Omega} \psi_i(x) R(x, c_j) dx dy = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (13)$$

Sendo  $\Omega$  o domínio bidimensional e  $\psi_i$  as funções de ponderação. Substituindo (12) em (13):

$$\int_{\Omega} \psi_i \left[ A \left( \sum_{j=1}^N c_j \phi_j + \phi_0 \right) - f \right] dx = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (14)$$

Realizando a multiplicação dos termos pela função  $\psi_i$  e isolando  $c_j$ , tem-se

$$\sum_{j=1}^N c_j \left[ \int_{\Omega} \psi_i A(\phi_j) dx \right] = \int_{\Omega} \psi_i (f - A(\phi_0)) dx \quad (15)$$

Definindo  $K_{ij}$  e  $F_i$ , como:

$$K_{ij} = \int_{\Omega} \psi_i A(\phi_j) dx \quad (16a)$$

$$F_i = \int_{\Omega} \psi_i (f - A(\phi_0)) dx \quad (16b)$$

Pode-se simplificar a Eq. (15) para

$$\sum_{j=1}^N c_j K_{ij} = F_i \quad (17)$$

Além disso, pode-se representá-la na forma matricial como:

$$[K]\{c\} = \{F\} \quad (18)$$

Existem diversos métodos de resíduos ponderados, que diferem entre si na escolha da função de ponderação, são eles: Petrov-Galerkin, Galerkin, Mínimos Quadrados e Colocação.

Um resumo dos métodos pode ser observado na Tabela 1.

**Tabela 1 – Funções de interpolação e aproximação Método dos Resíduos Ponderados**

<i>Método</i>	<i>Função de Ponderação</i>
<b><i>Petrov-Galerkin</i></b>	$w_i = \psi_i = \phi_i$
<b><i>Galerkin</i></b>	$w_i = \phi$
<b><i>Mínimos Quadrados</i></b>	$w_i = \frac{d}{dx} \left( a(x) \frac{d\phi_i}{dx} \right)$
<b><i>Colocação</i></b>	$w_i = \delta(x - x_i)$

Com tais definições, pode-se agora retomar o exemplo da Figura 11.

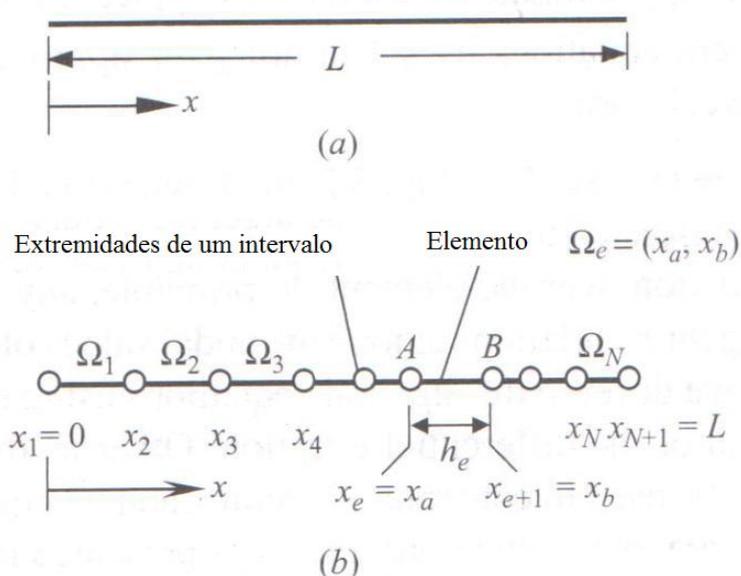
Sabendo que para este caso, tem-se como condições de contorno:

$$u(0) = u_0 \quad (19a)$$

$$\left( a \frac{du}{dx} \right) \Big|_{x=L} = Q_0 \quad (19b)$$

Além disso, define-se  $a=a(x)$ ,  $c=c(x)$  e  $f=f(x)$ .

Seguindo a metodologia descrita por Reddy (2006), o primeiro passo pra a resolução do problema é a discretização do domínio  $\Omega$ , que é a divisão de todo o domínio nos elementos finitos (subdomínios  $\Omega_e$ ). A Figura 12 ilustra a discretização de um domínio.



**Figura 12 – Discretização do domínio**

Fonte: Adaptado de REDDY (2006)

Pode-se observar da Figura 12 que um elemento  $h_e$  possui comprimento  $x_a - x_b$ . O número de elementos presentes na malha depende, principalmente, de dois fatores, a geometria do corpo em estudo e a precisão que se deseja na solução aproximada. É de boa prática, realizar um teste de convergência, que consiste em resolver o problema diversas vezes variando o número de elementos da malha e observando o comportamento da solução.

O segundo passo na resolução do problema é o desenvolvimento de solução aproximada para as equações diferenciais de um elemento da malha. Nesse passo, para a solução pelo método de Ritz deve-se construir a forma fraca da equação, no caso do método de Resíduos Ponderados, desenvolve-se a forma integral ponderada.

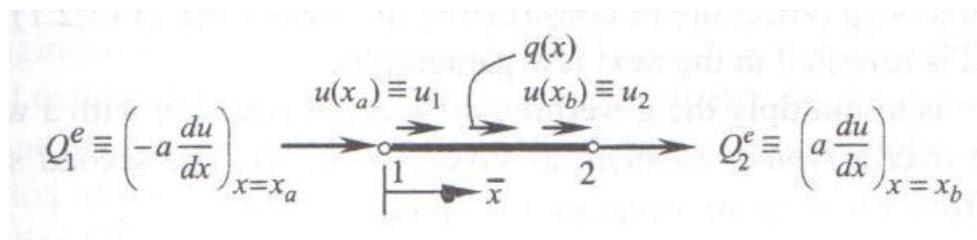
Para o exemplo, é utilizado o método de Ritz, e a forma fraca da equação diferencial está definida na Eq. (20), a seguir:

$$0 = \int_{x_a}^{x_b} \left( a \frac{dw}{dx} \frac{du}{dx} + cwu - wf \right) dx - \left[ wa \frac{du}{dx} \right]_{x_a}^{x_b} \quad (20)$$

Na equação anterior  $w$  é a função de ponderação. No último termo a direita da equação tem-se o coeficiente multiplicando  $w$ , que é denominado variável secundária e sua especificação constitui uma condição de contorno natural. Para este exemplo, tem-se como variável secundária:

$$a \frac{du}{dx} \equiv Q \quad (21)$$

A variável dependente  $u$ , expressa da mesma forma que a função de ponderação aparece no termo de condição de contorno, é denominada variável primária e sua especificação denota uma condição de contorno essencial.



**Figura 13 – Elemento típico da malha**

Fonte: REDDY (2006)

Para um elemento típico, mostrado na Figura 13, tem-se as seguintes condições de contorno.

$$u_h^e(x_a) = u_1^e \quad (22a)$$

$$u_h^e(x_b) = u_2^e \quad (22b)$$

$$\left( -a \frac{du}{dx} \right)_{x=x_a} = Q_1^e \quad (22c)$$

$$\left( -a \frac{du}{dx} \right)_{x=x_b} = Q_2^e \quad (22d)$$

Até o momento nenhuma das condições das Eqs. (22) está especificada. As condições de contorno naturais são tratadas na forma fraca. Dessa maneira, fazendo a substituição das Eqs. (22 – c e d) na forma fraca, Eq.(20), tem-se:

$$0 = \int_{x_a}^{x_b} \left( a \frac{dw}{dx} \frac{du}{dx} + cwu - wf \right) dx - w(x_a)Q_1 - w(x_b)Q_2 \quad (23)$$

Podem-se satisfazer as condições de contorno essenciais pela solução aproximada, definindo corretamente as funções de aproximação. A equação a seguir mostra essa condição

$$u_h^e = \sum_{j=1}^n u_j^e \psi_j^e(x) \quad (24)$$

Isto quer dizer que, devem-se definir as funções de ponderação  $\psi_j^e$ , obedecendo às equações abaixo:

$$u_h^e(x_a) = u_1^e \quad (25a)$$

$$u_h^e(x_b) = u_2^e \quad (25b)$$

Para a forma fraca obtida, deve-se ter, para a solução aproximada, uma função que seja ao menos de primeiro grau, conforme a Eq.(26)

$$u_h^e(x) = c_1^e + c_2^e x \quad (26)$$

Para as condições de contorno mostradas tem-se

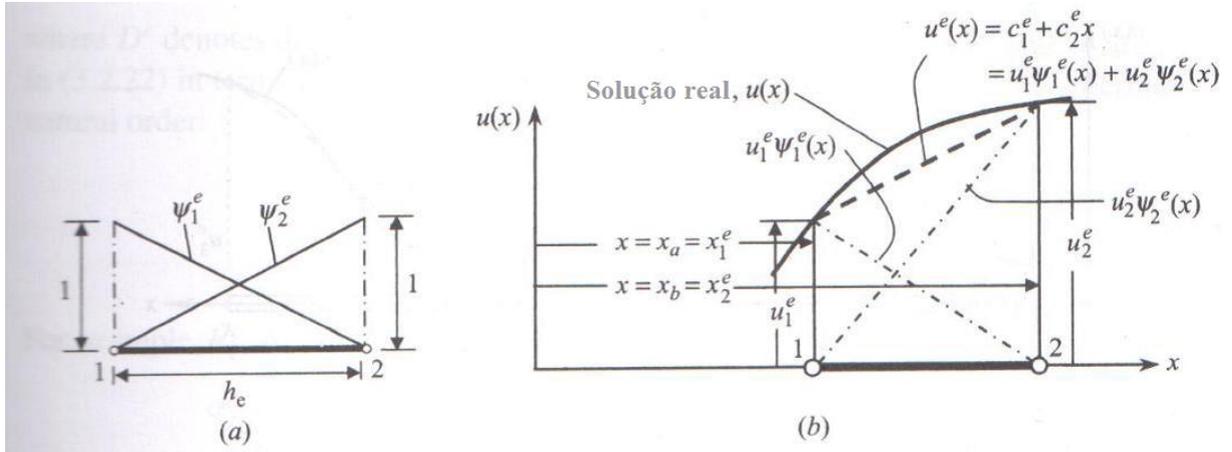
$$u_h^e(x_a) = c_1^e + c_2^e x_a \equiv u_1^e \quad (27a)$$

$$u_h^e(x_b) = c_1^e + c_2^e x_b \equiv u_2^e \quad (27b)$$

Para se obter os valores das constantes presentes na Eq.(26), isola-se as constantes nas Eqs.(27) e substitui-se na Eq.(26) chegando-se a Eq. (28):

$$u_h^e(x) = \left( \frac{x_b - x}{x_b - x_a} \right) u_1^e + \left( \frac{x - x_a}{x_b - x_a} \right) u_2^e \quad (28)$$

Pode-se observar que os termos que multiplicam as variáveis dependentes  $u$ , são as funções de interpolação, cujas propriedades são mostradas na Figura 14 e Eqs. (29)



**Figura 14 – Funções de interpolação**

Fonte: Adaptado de REDDY (2006)

$$\sum_{j=1}^n \psi_j^e(x) = 1 \quad (29a)$$

$$\psi_i^e(x_j^e) = \begin{cases} 0 & \text{se } i \neq j \\ 1 & \text{se } i = j \end{cases} \quad (29b)$$

Considerando como coordenada local  $\bar{x} = x - x_a$  e substituindo nas funções de interpolação temos as Eqs. (30)

$$\psi_1^e(\bar{x}) = 1 - \frac{\bar{x}}{h_e} \quad (30a)$$

$$\psi_2^e(\bar{x}) = \frac{\bar{x}}{h_e} \quad (30b)$$

Após a obtenção das funções de interpolação (Eqs. (30)), pode-se aplicar o método de Ritz. Separa-se a Eq. (23) para obter as Eqs. (31).

$$B^e(w, u) = \int_{x_a}^{x_b} \left( a \frac{dw}{dx} \frac{du}{dx} + cwu \right) dx \quad (31a)$$

$$l^e(w) = \int_{x_a}^{x_b} w f dx - w(x_a)Q_1 - w(x_b)Q_2 \quad (31b)$$

Substituindo as funções de interpolação, obtém-se

$$B^e(\psi_i, \psi_j) = \int_{x_a}^{x_b} \left( a \frac{d\psi_i}{dx} \frac{d\psi_j}{dx} + c\psi_i\psi_j \right) dx \quad (32a)$$

$$l^e(\psi_i) = \int_{x_a}^{x_b} \psi_i f dx - \psi_i(x_a)Q_1 - \psi_i(x_b)Q_2 \quad (32b)$$

A solução para o problema pode ser escrita na forma matricial, levando em conta as Eqs. (8) e (9), resultando na Eq. (33)

$$[K^e]\{u^e\} = \{f^e\} + \{Q^e\} \quad (33)$$

onde

$$[K^e] = \frac{a_e}{h_e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{c_e h_e}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (34a)$$

$$\{f^e\} = \frac{f_e h_e}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (34b)$$

$$\{Q^e\} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{Bmatrix} \quad (34c)$$

Para o problema estrutural, a seria o Módulo de Young multiplicado pela área da seção transversal,  $K^e$  a matriz de rigidez do elemento. As forças de corpo (ex.: peso) são os termos  $f^e$ , e os termos  $Q^e$  representariam as forças que agem externamente ao corpo analisado, como forças de tração e compressão.

Antes de se analisar os resultados obtidos, devem-se somar as equações de cada elemento da malha, a fim de se obter a solução global do problema. Para isso, devem-se obedecer algumas condições impostas.

A deformação nos nós conectados é a mesma, de acordo com a Eq.(35), para elementos  $e, f$  e  $g$  que tenham nós coincidentes  $i, j$  e  $k$ .

$$u_i^e = u_j^f = u_k^g \quad (35)$$

Também considera-se para um mesmo nó, que as forças que atuam nos elementos conectados são somadas, temos

$$Q_i^e = Q_j^f = Q_k^g = Q_l \quad (36)$$

Assim, de maneira geral, temos as equações do problema na forma da Eq.(37), com sua expansão mostrada na Eq. (38)



3. Processar posteriormente a informação contida em  $\{u\}$ . Em análise de tensões isto significa computar tensões e deformações.

A maior restrição do MEF é que não é possível se ter uma resposta exata do comportamento da estrutura ou superfície analisada. Pelo MEF é possível somente se ter uma maior percepção de projeto e conhecimento do comportamento da estrutura sob carregamento. Isto se deve a impossibilidade de se reproduzir com perfeição, mesmo com um método matemático extremamente refinado, o que ocorre na natureza, conforme Bathe, K. J. (1996, pag. 3) informa em seu livro. Desta maneira, deve-se tomar cuidado com os resultados apresentados pelo MEF, e tentar aperfeiçoá-los com resultados experimentais sempre que for necessária uma precisão maior nos resultados.

### 2.3 Métodos de Otimização

Matematicamente, otimização significa buscar o máximo ou o mínimo de uma função. Para um engenheiro isso não é tão simples porque a função em estudo quase sempre apresenta vários objetivos e variáveis. Logo, para fins de engenharia, faz mais sentido descrever otimização como o cálculo de diversos objetivos, como peso, tensão, custo, deflexão, frequências naturais ou temperatura, todos dependentes de variáveis como dimensões, cargas e restrições, materiais e/ou requisitos de fabricação (SolidWorks® Corporation, 2006).

Pode-se verificar, como exemplo, que a qualidade dos produtos obtidos a partir de processos de fabricação como a usinagem, a conformação ou a soldagem, está intrinsecamente relacionada à maneira como as múltiplas características do produto atendem às especificações impostas pelos clientes para as mesmas. Considerando que todo processo pode ser entendido como uma relação entre variáveis de entrada ( $x$ ) – ou variáveis de processo – e as variáveis de saída ou características de qualidade ( $Y$ ), tal que  $Y=f(x)$ , é razoável se admitir que a melhoria da qualidade só possa ser atingida com a definição do melhor conjunto de parâmetros de processo ( $x$ ) capaz de tornar as características de saída ( $Y$ ) compatíveis com as especificações impostas, com médias próximas aos alvos estabelecidos e com mínima variação.

Muitas vezes, estas funções são conflitantes e a otimização individual de cada uma delas raramente conduz a uma solução global ótima que seja adequada para todas. Verifica-se, portanto, que uma solução adequada só pode ser obtida a partir de uma estratégia de otimização multiobjetivo (CH'NG *et al.*, 2005). Uma forma simples de lidar com tais situações é o cálculo de todos os objetivos de forma que o processo de otimização se baseie na condição mais crítica. Essa estratégia é conhecida como minimax (Vanderplaats, 1984) Em alguns casos, no entanto, tem-se um objetivo dominante e o processo é simplificado.

O processo de otimização é composto de três componentes principais:

- Objetivo(s)
- Variáveis
- Restrições

De forma simplificada, o projeto otimizado deve maximizar ou minimizar o objetivo alterando as variáveis, além de manter respostas decisivas dentro das restrições definidas (SolidWorks® Corporation, 2006).

### **2.3.1 Objetivo(s)**

Objetivo se traduz como a finalidade da otimização. Segundo Oliveira (2005, p. 23) “Quando se modela um problema de otimização para um sistema físico, envolvendo uma única função objetivo, encontra-se uma solução ótima que é chamada otimização de um único objetivo”.

Os engenheiros quase sempre precisam lidar com otimizações de objetivos variados. Esse tipo de situação, no entanto, pode exigir mais recursos do que os disponíveis no dia-a-dia. Se o engenheiro de projeto puder reduzir a definição do problema a um único objetivo - ou um objetivo por vez – o processo de otimização torna-se mais fácil (SolidWorks® Corporation, 2006).

Quando um problema de otimização envolve mais de uma função objetivo, a busca de uma ou mais soluções ótimas é conhecida como otimização multiobjetivo, também chamada de multicritério, multi-performance ou otimização de um vetor de funções (Osyczka, 1981). Como a otimização multiobjetivo envolve objetivos

múltiplos, é intuitivo pensar que otimização de um único objetivo é um caso particular da otimização multiobjetivo (Oliveira, 2005, p.23).

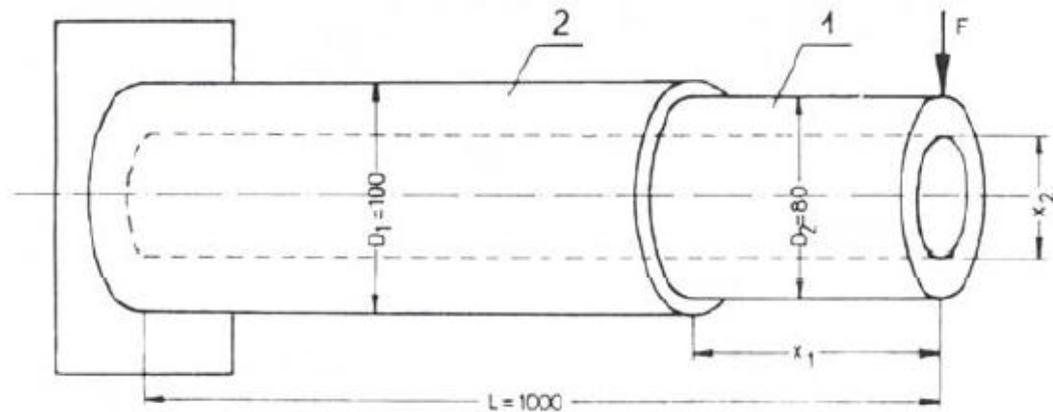
Ainda segundo Oliveira (2005, p. 24) “a maior parte dos problemas de otimização práticos envolvem objetivos múltiplos. Assim, não se pode aplicar a ideia de otimizar somente um dos objetivos, uma vez que os outros objetivos também são importantes. A solução que é ótima em relação a um dos objetivos necessita ser negociada em relação aos outros objetivos. Isto proíbe a escolha de uma solução que é ótima somente em relação a um objetivo”.

### 2.3.2 Variáveis

Em um estudo de otimização, o engenheiro altera os parâmetros do projeto para encontrar a melhor entre as diversas configurações de projeto possíveis. Esses parâmetros são as variáveis do projeto. Elas podem ser dimensões, ou as propriedades do material, ou as cargas, rigidez da mola - ou qualquer outro aspecto de um projeto com uma consideração ou valor que possa ser detectado como "o melhor" (SolidWorks® Corporation, 2006).

Segundo Oliveira (2005, p. 29) “as variáveis de decisão ou variáveis de projeto são as quantidades que modificam o valor da função objetivo. Na programação matemática estas quantidades são representadas como  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , sendo  $x_i$  a variável que representa cada quantidade.”

Seja o projeto de uma viga escalonada onde se deseja determinar suas dimensões, conforme mostra a Figura 16. Neste caso, as variáveis de projeto  $x_1$  e  $x_2$  podem ser:



**Figura 16 - Viga escalonada**

Fonte: Oliveira (2005, p. 30)

$x_1$  = comprimento da seção 1 da viga.

$x_2$  = diâmetro interior da viga.

Em vários modelos de otimização a escolha do número e do tipo da variável de decisão é simples, mas, algumas vezes, esta situação não é clara.

As variáveis podem ser contínuas - o que significa que podem ter qualquer valor entre um mínimo e um máximo especificados. A maioria das variáveis dimensionais se encaixa na categoria de contínuas.

Elas também podem ser discretas - o que significa que possuem um conjunto de valores possíveis. A forma mais simples da variável discreta é uma variável liga-desliga ou sim-não. Por exemplo, a presença ou a falta de uma solda ou componente de fixação se encaixa na categoria de variável discreta. Ou, por exemplo, uma polia ou roda pode ter qualquer número inteiro de braços - mas não 3,2 ou 4,7.

Os calibres de chapas metálicas oferecem um exemplo de variável que pode se encaixar nas duas categorias. Geralmente, a espessura do calibre tem valores predefinidos, mas é comum especificar a espessura como uma variável contínua e depois arredondá-la para cima ou para baixo para a espessura mais próxima.

A seleção de variáveis é um passo muito importante no planejamento de um estudo de otimização. Se o engenheiro selecionar variáveis demais, ou de menos, a eficiência da análise pode ficar comprometida. Variáveis demais, ou uma variedade muito grande, podem dificultar a determinação pelo programa de uma configuração mais apropriada do projeto – especialmente ao considerar mínimo e máximo relativos. Por outro lado, se o projetista fornece muito poucas variáveis, ou uma pequena variedade, o sucesso do estudo pode ser desnecessariamente limitado (SolidWorks® Corporation, 2006).

### **2.3.3 Restrições**

As restrições trazem a realidade para a otimização. Se o problema de otimização fosse definido como um estudo de minimização de peso sem restrições, a otimização selecionaria imediatamente a condição mínima de material permitida pelas variáveis dimensionais. No mundo real, entretanto, a maioria das peças apresenta outros requisitos operacionais como resistência e rigidez. Portanto, é importante que o engenheiro selecione restrições que definam o comportamento aceitável da peça dentro do sistema (SolidWorks® Corporation, 2006).

Em cada problema de otimização, tem-se várias restrições impostas pelo ambiente, processo ou recursos, que devem ser satisfeitas de forma a obter uma solução viável. Assim como nos problemas de otimização de um único objetivo, o problema de otimização multiobjetivo é usualmente sujeito as restrições que devem ser satisfeitas pela solução viável (incluindo a solução ótima).

Estas restrições descrevem a dependência entre as variáveis de decisão e os parâmetros. Estas dependências são escritas em forma de desigualdades matemáticas e algumas vezes de igualdades (Oliveira, 2005, p.30).

### **2.3.4 Estratégia Minimax**

Para os problemas práticos em geral não existe um projeto ótimo que minimiza simultaneamente todas as funções. Entretanto é desejável encontrar um projeto particular que seja melhor que outro projeto (Das, 1999). Caso exista um projeto que

minimize simultaneamente todas as funções, então ele é o único projeto de Pareto que satisfaz todas as múltiplas funções objetivo. Como em geral não existe um único projeto, como já citado, é comum lançar-se mão de um conjunto de projetos de Pareto (Das, 1999). A análise de Pareto consiste numa ferramenta estatística que auxilia no momento da tomada de decisão, selecionando e priorizando um grupo dentro do domínio estudado que representam as melhores oportunidades, isto é, esse grupo priorizado contém os elementos que melhor caracterizam o todo, e alterações nestes surtem maiores efeitos.

Porém, os algoritmos disponíveis na literatura não são capazes de determinar precisamente todos os projetos do conjunto, mas somente um conjunto discreto (Das e Dennis, 1998). O projetista, por ele próprio, deve então eleger um deles para ser efetivamente o projeto ótimo.

Uma alternativa para a otimização multiobjetivo é a minimização do máximo da função para todo intervalo solução. Essa abordagem alternativa simplifica o problema de otimização para somente um único projeto. Isso também é válido para maximizar o mínimo da função. Supondo por exemplo uma otimização que deseja maximizar a carga de flambagem e frequência natural de uma viga de espessura variável. Em cada iteração a decisão de alteração da variável de projeto (espessura) é tomada somente com base na função objetivo (flambagem ou frequência) que apresentou menor valor. Dessa forma é feita uma maximização do valor mínimo.

Cherkaev e Cherkaeva (1999) aplicaram a formulação minimax na otimização estrutural. Eles estudaram a sensibilidade de projetos ótimos quando submetidos a variações dos mesmos carregamentos utilizados na obtenção desses projetos. A estratégia deles consistia em minimizar a energia de deformação devida ao caso de carga mais severo proveniente de um conjunto de carregamentos.

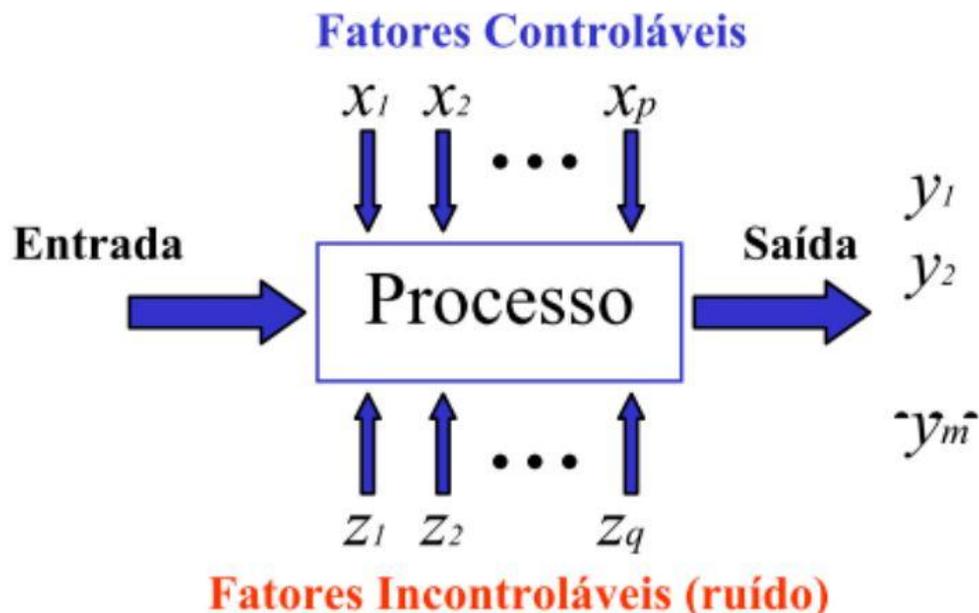
### **2.3.5 Metodologia Análise de Experimentos / *Design of Experiments (DoE)***

O Planejamento de Experimentos (em inglês *Design of Experiments*, DoE) é uma técnica utilizada para se planejar experimentos, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletados durante um

determinado experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo (Amaral, 2013).

Para Montgomery (1991), as técnicas de planejamento e análise de experimentos (*Design of Experiment – DoE*) são utilizadas para melhorar as características de qualidade dos produtos e processos de fabricação, reduzir o número de testes e otimizar o uso de recursos da empresa (material, tempo dos funcionários, disponibilidade de equipamentos, etc.).

Segundo Montgomery (1991), o experimento projetado ou planejado é uma seqüência de testes nos quais se induzem mudanças deliberadas ou estímulos nas variáveis de entrada do processo ou sistema, de tal forma que seja possível observar e identificar os efeitos nas respostas ou nas variáveis de saídas. O processo ou sistema de transformação é representado pela combinação de máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam uma entrada em produtos acabados ou semiacabados, com características ou parâmetros específicos, conforme Figura 17.



**Figura 17 - Modelo geral de um sistema de transformação**

Fonte: Montgomery (1991)

Para Fontana e Balestrassi (2011, p.59) “esse objetivo pode ser dividido em outros objetivos secundários: identificar as variáveis (fatores de controle) do

processo que mais influem nos parâmetros de resposta de interesse; atribuir valores às variáveis influentes do processo de modo que a variabilidade da resposta de interesse seja mínima ou que o valor do resultado (parâmetros de qualidade) seja próximo do valor nominal; atribuir valores às variáveis influentes do processo de modo que o efeito das variáveis não controláveis seja reduzido”.

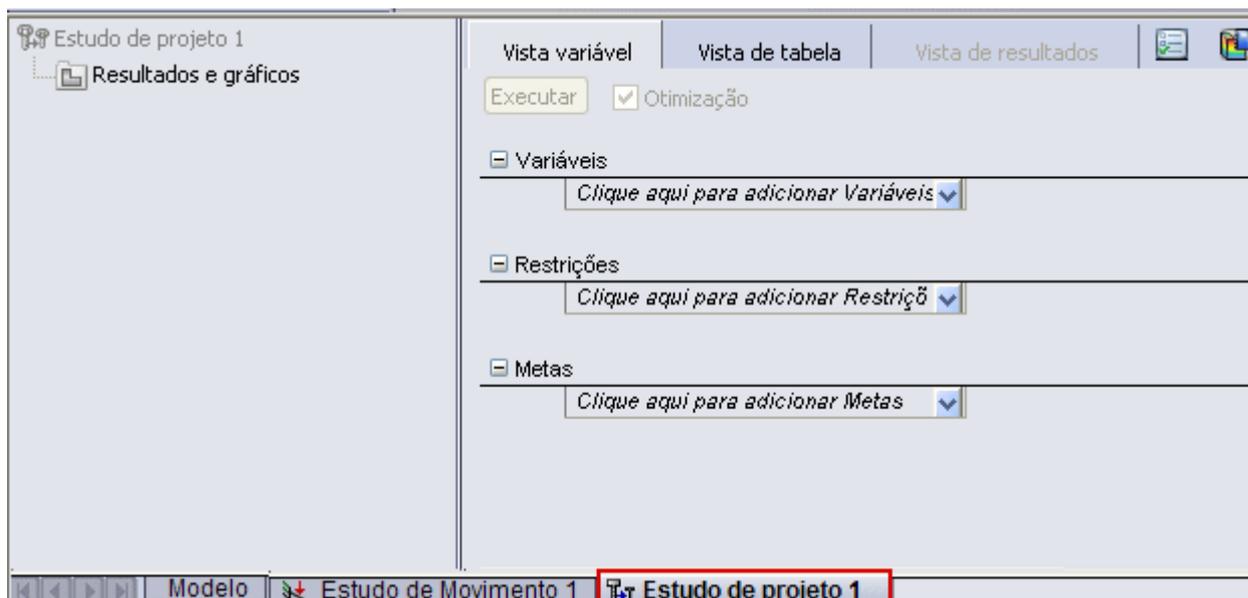
Coleman & Montgomery (1993) propõem as seguintes etapas para o desenvolvimento de um Planejamento de Experimentos na Indústria:

- Caracterização do problema
- Escolha dos fatores de influência e níveis
- Seleção das variáveis de resposta
- Determinação de um modelo de planejamento de experimento
- Condução do experimento
- Análise dos dados
- Conclusões e recomendações

### **2.3.6 Otimização com o SolidWorks® e o COSMOSWorks®**

O programa SolidWorks® usa como base de simulação de MEF o programa COSMOSWorks®. Este programa funciona dentro do SolidWorks®, como a função “SolidWorks *Simulation*”.

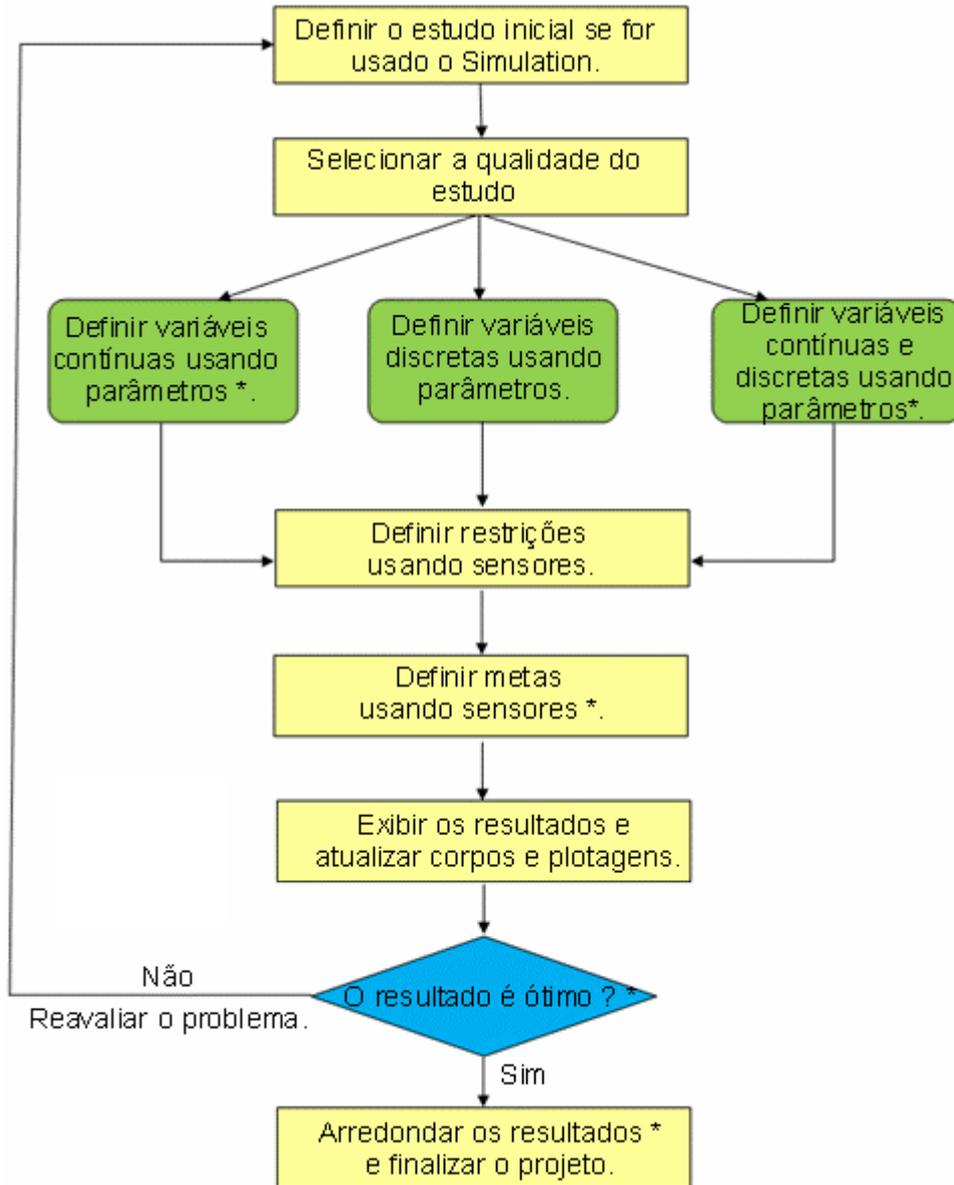
Para realizar um estudo de otimização, deve-se criar um “Estudo de Projeto” para executar uma otimização ou avaliar cenários específicos do projeto, sua janela aparece no programa conforme Figura 18. O “Estudo de Projeto” oferece um fluxo de trabalho uniforme para os estudos de Otimização e Avaliação. Pode-se plotar os corpos atualizados e os resultados calculados para diferentes iterações ou cenários selecionando suas colunas na guia “Vista de resultados”.



**Figura 18 – Criação de um “Estudo de Projeto” no SolidWorks®**

Fonte: SolidWorks® Corporation (2013)

O fluxograma apresentado na Figura 19 explica as operações básicas para configurar e executar um “Estudo de Projeto”. No fluxograma, os itens com asterisco se aplicam somente ao estudo de “Otimização” de projeto.



**Figura 19 – Fluxograma de operações do “Estudo de Projeto” no SolidWorks®**

Fonte: SolidWorks® Corporation (2013)

Cada item do fluxograma é detalhado abaixo:

**i. Definir estudos iniciais de simulação (Definir o estudo inicial se for usado o Simulation)**

Quando se usa sensores de dados, que são os parâmetros ou conjunto de dados que o usuário escolhe para o programa monitorar, no programa de simulação, em um “Estudo de Projeto”, cria-se pelo menos um estudo inicial. Os estudos iniciais representam a base para o processo de otimização ou avaliação. Durante cada iteração, o programa executa esses estudos com variáveis modificadas.

Os estudos iniciais necessários dependem das restrições e metas que se seleciona. Por exemplo, uma meta para minimizar o volume ou o peso não requer um estudo inicial de um tipo específico, mas uma meta para minimizar a frequência requer um estudo inicial de frequência. O estudo de simulação de frequência fornece ao sensor de frequência às informações que serão usadas pelo “Estudo de Projeto”.

A mesma regra se aplica às restrições. Cada restrição especificada deve ser associada a um estudo inicial compatível. Por exemplo, para definir restrições de tensão, frequência e temperatura, devem-se definir os estudos estáticos, de frequência e térmicos, respectivamente.

Todos os estudos referidos na definição de restrições e metas precisam pertencer à mesma configuração. Após criar o modelo e dimensioná-lo da melhor maneira possível, deve-se criar os estudos iniciais definindo suas propriedades, materiais, cargas e restrições. Não é recomendado usar mais de um estudo do mesmo tipo em um problema de otimização.

Se forem utilizados estudos de simulação no “Estudo de Projeto”, avaliar os resultados dos estudos iniciais ajuda a definir o problema do estudo. Em particular, ele é útil para examinar as quantidades que se deseja usar como restrições.

Os resultados dos estudos iniciais fornecem uma boa ideia sobre os valores atuais dos sensores. Não devem ser especificadas restrições ou metas distantes demais dos valores atuais, pois isso torna a otimização impossível. Antes de executar uma otimização, deve-se tentar executar simulações para um intervalo de valores de variáveis, especialmente dimensões, para ter certeza de que o modelo é reconstruído para cada valor.

## **ii. Configurar as propriedades de um estudo de projeto (Selecionar a qualidade do estudo)**

Nas opções do estudo de projeto é possível escolher a qualidade do “Estudo de Projeto”. São duas opções possíveis:

### **a. Alta qualidade (mais lento)**

Para estudos de otimização encontra a solução ótima usando várias iterações (projeto de Box-Behnken). Para estudos de avaliação avalia os resultados de todos os cenários.

### **b. Resultados rápidos**

Para estudos de otimização encontra a solução ótima usando poucas iterações (projeto de Rechtschafner). Para estudos de avaliação seleciona estrategicamente cenários específicos a serem calculados inteiramente e interpola os resultados para o restante dos cenários. Os cenários com resultados interpolados são exibidos em cinza na guia “Vista de resultados”.

## **iii. Definir variáveis**

Para definir uma variável contínua deve-se entrar na guia “Vista de variável” do estudo de projeto, na seção “Variáveis”, e executar uma das seguintes ações:

- Selecionar um parâmetro predefinido na lista.
- Selecionar “Adicionar parâmetro”, definir um parâmetro e então selecioná-lo na lista.

### **a. Definição de variáveis contínuas**

Pode-se definir variáveis contínuas para executar a otimização. Não é possível executar um estudo de avaliação de projeto usando variáveis contínuas.

Para o tipo da variável, seleciona-se “Intervalo”. É preciso selecionar “Intervalo” para definir variáveis contínuas. Não é possível usar as opções “Intervalo com etapa” e “Valores discretos” para esse tipo de variável.

Para Mín., digita-se o valor mínimo para a variável contínua. Para Máx., digita-se o valor máximo para a variável contínua, conforme Figura 20. Podem-se repetir as etapas anteriores para definir variáveis contínuas adicionais.

Variáveis						
AT	Intervalo	▼	Mín.: 40mm	▲▼	Máx.: 100mm	▲▼
LT	Intervalo	▼	Mín.: 40mm	▲▼	Máx.: 200mm	▲▼
ET	Intervalo	▼	Mín.: 0.9mm	▲▼	Máx.: 9.5mm	▲▼
Clique aqui para adicionar Variáveis		▼				

**Figura 20 – Seleção de variáveis contínuas**

### b. Definição de variáveis discretas usando a “Vista de variável”

Pode-se definir variáveis discretas para avaliar cenários ou executar uma otimização. Se for executado a otimização somente com variáveis discretas, o programa selecionará a solução ótima a partir de um dos cenários definidos.

Para o tipo da variável, executa-se uma das seguintes ações:

- Selecionar “Intervalo com etapa”. Para Mín., digite o valor mínimo da variável. Para Máx., digite o valor máximo da variável.
- Selecionar “Valores discretos” e digitar cada valor e suas unidades de medida. Usar vírgulas para separar os valores, por exemplo, 2 mm,3 mm,4 mm.

Para Etapa, digite o valor do tamanho da etapa. Por exemplo, se Mín. é 40 mm, Máx. é 80 mm e Etapa é 10 mm, o programa seleciona 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm e 80 mm como os valores da variável, conforme Figura 21. Podem-se repetir as etapas anteriores para definir variáveis contínuas adicionais.

Variáveis								
AT	Intervalo com eta	▼	Mín.: 40mm	▲▼	Máx.: 80mm	▲▼	Etapa: 10mm	▲▼
LT	Intervalo com eta	▼	Mín.: 40mm	▲▼	Máx.: 80mm	▲▼	Etapa: 10mm	▲▼
ET	Intervalo com eta	▼	Mín.: 3mm	▲▼	Máx.: 4.75mm	▲▼	Etapa: 0.25mm	▲▼
Clique aqui para adicionar Variáveis		▼						

**Figura 21 - Seleção de variáveis discretas usando a “Vista de variável”**

### c. Definição de variáveis discretas usando a Vista de tabela

Podem-se definir variáveis discretas usando a vista de tabela para definir cada cenário manualmente. Se for executado a otimização somente com variáveis

discretas, o programa encontrará o cenário ótimo somente a partir da lista de cenários definidos.

Para o tipo da variável, seleciona-se “Insira o valor” e digita-se o valor para o Cenário 1. Define-se um cenário adicional marcando a caixa de seleção na coluna do cenário anterior. Então se digita os valores das variáveis para o cenário adicional. A Figura 22 mostra exemplos de cenários adicionados ao programa.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	30mm	35mm	40mm	50mm	60mm
	20mm	20mm	20mm	20mm	20mm
	0.9mm	0.9mm	0.9mm	0.9mm	0.9mm

**Figura 22 - Seleção de variáveis discretas usando a “Vista de tabela”**

Podem-se repetir as etapas anteriores para definir variáveis contínuas adicionais.

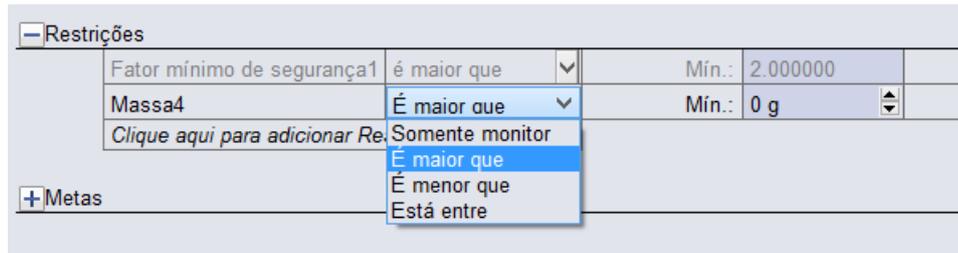
#### iv. Definição restrições

Devem-se definir restrições para especificar as condições que devem ser satisfeitas pelo projeto. As restrições podem ser variáveis globais acionadas ou sensores para propriedades de massa, dimensões e dados da simulação.

Na guia “Vista de variável” ou “Vista de tabela” do estudo de projeto, na seção “Restrições”, executa-se uma das seguintes ações:

- Seleciona-se um sensor predefinido na lista.
- Seleciona-se “Adicionar sensor”, define-se um sensor e então pode selecioná-lo na lista.

O nome do sensor aparece na seção Restrições. Para a restrição, se foram definidos múltiplos estudos do mesmo tipo, seleciona-se o estudo de simulação a ser executado e acompanha-se o valor do sensor. Para a condição, seleciona-se um dos seguintes, conforme ilustrado na Figura 23:



**Figura 23 – Opções de Restrições**

**a. Somente monitor**

Monitora o valor do sensor que está sendo acompanhado sem impor restrições.

**b. É maior que**

Como Mín., digita-se o valor mínimo aceitável do sensor.

**c. É menor que**

Como Máx., digita-se o valor máximo aceitável do sensor.

**d. Está entre**

Digita-se valores Mín. e Máx., o intervalo de valores aceitáveis do sensor. Podem-se repetir as etapas anteriores para definir restrições adicionais.

**v. Definição de metas**

Definem-se metas para especificar as funções objetivas do Estudo de Otimização de Projeto. Na guia “Vista de variável” ou “Vista de tabela” do estudo de projeto, na seção “Metas”, executa-se uma ação igual ao item das restrições.

O nome do sensor aparece na seção “Metas”. Para a meta, se foram definidos múltiplos estudos do mesmo tipo, seleciona-se o estudo de simulação a ser executado e o valor de sensor a ser acompanhado. Então se seleciona uma das seguintes opções, conforme Figura 24:

**a. Minimizar.**

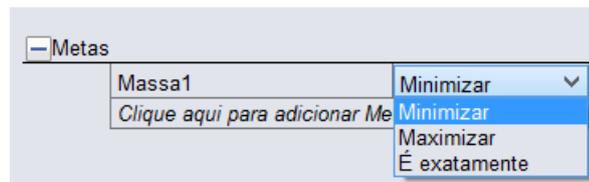
Procura o projeto que causa o mínimo valor para o sensor escolhido.

**b. Maximizar.**

Procura o projeto que causa o máximo valor para o sensor escolhido.

**c. É exatamente.**

Digita-se um valor exato. Por exemplo, para encontrar o projeto ótimo que causa uma deflexão de 1 mm na extremidade de um suporte, digita-se 1 mm. Podem-se repetir as etapas anteriores para definir metas adicionais.



**Figura 24 – Opções de Metas para Sensores**

Para múltiplas metas, digita-se um peso para cada uma, por exemplo, cinco. O peso da meta representa sua importância relativa. Quanto mais alto o peso da meta, maior a sua importância na otimização. O programa modifica o peso final da meta como: (peso da meta que foi digitado) / (soma dos pesos de todas as metas que foram digitados).

**vi. Exibição dos resultados do estudo de projeto.**

Seleciona-se a guia “Vista de resultados” para ver os resultados do estudo que foi executado.

**vii. Resultados do Estudo de Projeto**

A tabela a seguir resume os resultados esperados para combinações de variáveis e de qualidades de estudo:

## Tabela 2 - Resultados esperados para combinações de variáveis e de qualidades de estudo

### Estudo de Otimização de Projeto

Tipo de variável		Qualidade do estudo	
		Alta qualidade	Resultados rápidos
Contínua (Intervalo)	<b>Operação</b>	Encontra a solução ótima usando muitas iterações (projeto Box-Behnken) e exibe o cenário inicial, o cenário ótimo e todas as iterações.	Encontra a solução ótima usando poucas iterações (projeto Rechtschafner) e exibe o cenário inicial e o cenário ótimo.
	<b>Resultados</b>	Você exibe as plotagens e os corpos atualizados para todas as iterações na guia <b>Vista de resultados</b> . Você plota gráficos de tendência local para as variáveis.	Você exibe as plotagens e os corpos atualizados somente para os cenários inicial e ótimo. Você plota gráficos de tendência local para as variáveis.
Discreta (Valores discretos e Intervalo com etapa)	<b>Operação</b>	Calcula inteiramente os resultados de cada cenário. Encontra a solução ótima entre os cenários definidos.  Se você usar variáveis contínuas, o programa calculará inteiramente os resultados de todas as iterações.	Calcula os cenários inicial e ótimo com exatidão, e interpola os resultados para os cenários restantes. Encontra a solução ótima entre os cenários.  A coluna cinza indica resultados interpolados. Para calcular inteiramente um resultado interpolado, clique com o botão direito no cabeçalho da coluna e selecione <b>Executar</b> .
	<b>Resultados</b>	Você exibe as plotagens e os corpos atualizados para todos os cenários. Você plota gráficos históricos de projeto para as variáveis.	Você exibe as plotagens e os corpos atualizados para os cenários inicial e ótimo, e apenas os corpos atualizados para os cenários restantes. Você plota gráficos históricos de projeto e gráficos de tendência local para as variáveis.  As plotagens de gráfico de tendência local incluem os resultados interpolados.
Combinação de contínuas e discretas	<b>Operação</b>	Opera em um espaço contínuo mesmo para as variáveis discretas enquanto encontra a solução ótima, mas a solução volta ao espaço discreto durante a geração do relatório da solução ótima. Encontra a solução ótima usando muitas iterações e exibe o cenário inicial, o cenário ótimo e todas as iterações.	Opera em um espaço contínuo mesmo para as variáveis discretas enquanto encontra a solução ótima, mas a solução volta ao espaço discreto durante a geração do relatório da solução ótima. Encontra a solução ótima usando poucas etapas e exibe os cenários inicial e ótimo.
	<b>Resultados</b>	Você exibe as plotagens e os corpos atualizados para todas as iterações. Você plota gráficos de tendência local para as variáveis.	Você exibe as plotagens e os corpos atualizados somente para os cenários inicial e ótimo. Você plota gráficos de tendência local para as variáveis.

### Estudo de Avaliação de Projeto

Tipo de variável		Qualidade do estudo	
		Alta qualidade	Resultados rápidos
Discreta (Valores discretos e Intervalo com etapa)	<b>Operação</b>	Calcula inteiramente os resultados de cada cenário.	Interpola os resultados para determinados cenários.
	<b>Resultados</b>	Você exibe as plotagens e os corpos atualizados para todos os cenários. Você plota gráficos históricos de projeto para as variáveis.	Você exibe as plotagens e os corpos atualizados para cenários inteiramente calculados. Você exibe apenas os corpos atualizados para os cenários com resultados interpolados. Você plota gráficos históricos de projeto e gráficos de tendência local para as variáveis.  A coluna cinza indica resultados interpolados. Para calcular inteiramente um resultado interpolado, clique com o botão direito no cabeçalho da coluna e selecione <b>Executar</b> .

 Não use variáveis contínuas com o Estudo de Avaliação de Projeto, pois os cenários discretos não podem ser definidos com um intervalo de valores de variável.

**Fonte: SolidWorks® Corporation (2013)**

Um estudo de otimização explora as capacidade de modelagem paramétrica, com base em recursos computacionais, e de regeneração do modelo virtual automática do software, para automatizar o processo de otimização. O software é equipado com uma tecnologia que detecta rapidamente tendências e identifica a solução ideal com o menor número de execuções. O programa usa um método baseado no Projeto de Experimentos.

O software executa várias tentativas com base no nível de qualidade e no número de variáveis. Em cada teste, o programa executa todos os estudos de simulação associados com um conjunto de valores de variáveis determinados estrategicamente. A

Tabela 3 lista o número de iterações dos métodos de alta qualidade e de resultados rápidos para variáveis contínuas (opção Intervalo).

**Tabela 3 – Número de Iterações dos Métodos de Alta Qualidade e Resultados Rápidos**

Número de variáveis do projeto (para variáveis contínuas)	Alta qualidade	Resultados rápidos
1	3	N/A
2	9	N/A
3	13	N/A
4	25	15
5	41	21
6	49	28
7	57	36
8	N/A	45
9	121	55
10	161	66
11	177	78
12	193	91
13	N/A	105
14	N/A	120
15	N/A	136
16	385	153
17	N/A	171
18	N/A	190
19	N/A	210
20	N/A	231

**Fonte: SolidWorks® Corporation (2013)**

Depois de executar os experimentos ou selecionar amostras, o programa calcula a função objetivo para as variáveis de projeto selecionadas formando uma

função de resposta que relaciona os objetivos às variáveis de projeto, minimizando, maximizando ou atendendo exatamente as metas (SolidWorks® Corporation, 2006).

O método de otimização usado pelo programa é uma combinação dos métodos fatoriais e dos métodos de blocos incompletos. Usando o método fatorial exclusivamente criaria um número muito grande de cálculos (pontos de estudo) com 3 ou mais variáveis, por exemplo:

2 variáveis em três valores:  $3^2 = 9$  cálculos (pontos de estudo)

3 variáveis em três valores:  $3^3 = 27$  cálculos

6 variáveis em três valores:  $3^6 = 729$  cálculos

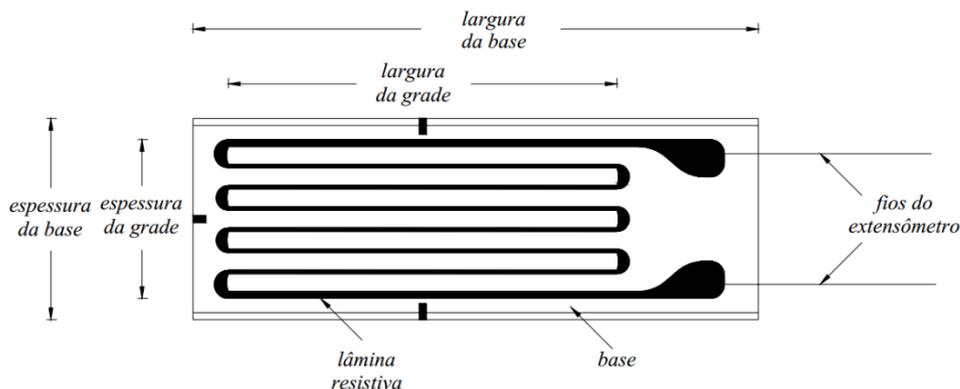
7 variáveis em três valores:  $3^7 = 2187$  cálculos

Ao também implementar os métodos de blocos incompletos, algumas variáveis são fixadas enquanto o projeto fatorial é considerado para o resto. Isto reduz grandemente o número de cálculos.

## 2.4 Extensometria

É um tipo de ensaio mecânico destrutivo muito utilizado quando se deseja medir a deformação que ocorre em uma estrutura submetida a carregamentos. Os extensômetros são sensores que convertem a deformação que estas estruturas sofrem em variação da resistência elétrica que é então captado por um equipamento de medição.

Os extensômetros são compostos basicamente por um material base que é eletricamente isolado, uma lâmina metálica e fios de saída, conforme mostrado na Figura 25.



**Figura 25 - Esquema de confecção dos extensômetros**

Fonte: Hoffmann, Karl, 1989

Seu princípio de funcionamento segue basicamente a Lei de Hooke, onde “o grau no qual uma estrutura se alonga ou se deforma depende da magnitude da tensão que lhe é imposta” (Callister, 2006, p. 102) e segue a relação:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (38)$$

onde:

$\sigma$  - Tensão

$E$  - Módulo de Elasticidade, ou Módulo de Young

$\varepsilon$  - Deformação

Aliado a Lei de Hooke outro princípio que rege o funcionamento de um extensômetro é o fato de que a resistividade elétrica de um material muda conforme este sofre uma deformação, segundo a equação:

$$R = \rho \times \frac{l}{A} \quad (39)$$

onde:

$R$  - Resistência elétrica

$\rho$  - Resistividade do material

$l$  - Comprimento

$A$  - Área

Portanto, ao sofrer uma deformação pela aplicação de um carregamento o material que compõe o extensômetro sofre variação de resistência elétrica, fazendo com que o sinal elétrico emitido seja modificado tornando assim possível a leitura dos dados. E para que seja possível captar a modificação no sinal elétrico, normalmente se utiliza um circuito denominado ponte de *Wheatstone*.

Os extensômetros são classificados de acordo com o tipo de material resistivo, material base e com sua configuração de confecção.

Segundo Hoffmann (1989, p.37) para usar o sistema de medição por extensometria dois principais requisitos devem ser atendidos: o cenário a ser medido deve ser muito bem conhecido, os detalhes, as condições de fronteira e os objetivos devem estar claros; as características do extensômetro selecionado necessitam ser conhecidas. Devem-se seguir os procedimentos conforme Quadro 1 (Anexo A).

Além do cuidado na seleção, é muito importante que a montagem siga as recomendações e seja feita com total controle, devido a sensibilidade destes dispositivos, onde qualquer alteração de montagem pode afetar drasticamente os resultados obtidos.

## 2.5 Mecânica Estrutural

O projeto de um elevador ou qualquer outro equipamento basicamente se desenvolve baseado em dados de entrada, tais como: solicitações mecânicas que este irá sofrer, custo e disponibilidade de matérias-primas, etc. Tendo essas informações, o engenheiro ou equipe de engenharia realiza os cálculos e concebe o projeto.

Uma estrutura que sofre qualquer tipo de solicitação mecânica sofrerá deformações.

A estrutura do elevador a ser estudada é composta basicamente de tubos com seção retangular e chapas. Contudo, o estudo será feito sobre o comportamento da estrutura variando somente as seções dos tubos que a compõe. Dessa forma, é necessário conhecer os mecanismos que deformam a estrutura, a fim de manter o projeto dentro de uma faixa aceitável de tensão e deformação.

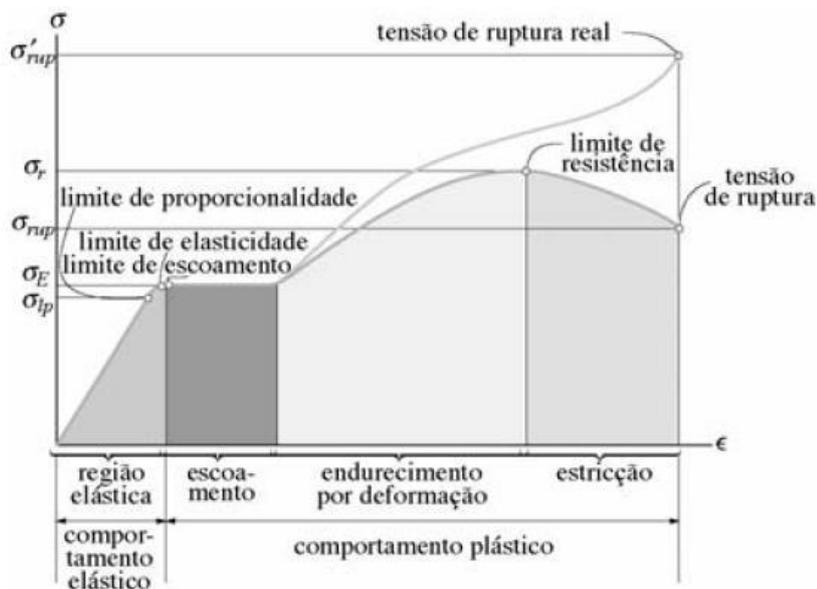
A maneira como o carregamento é aplicado influencia na deformação que irá ocorrer. Um material pode deformar-se por flexão, ação das tensões na direção normal à seção transversal; ou por cisalhamento, causada pelas tensões perpendiculares a seção transversal; ou ainda por torção, que ocorrerá quando o elemento sofre ação de torque, ou seja, um momento que tende a torcê-lo.

### **2.5.1 Critério de Falha de Von-Mises**

Durante o projeto de uma estrutura mecânica, o engenheiro necessita de um critério para que possa validar seus cálculos, ou seja, analisar se o material definido poderá suportar os esforços causados pela ação de torção, flexão e/ou cisalhamento. Para isso, existem algumas teorias que estudam as falhas dos materiais, e a escolha de qual método utilizar depende principalmente do material a ser utilizado.

Segundo Norton (2004, p. 238) materiais considerados dúcteis tem sua aplicação limitada pelos valores de tensão cisalhante que suportam, já os materiais frágeis dependem de sua capacidade em suportar tensão normal.

No presente trabalho a estrutura do elevador em estudo é feita de aço AISI 1020, que é classificado como material dúctil. A Figura 26 a seguir ilustra o Diagrama Tensão x Deformação de um material dúctil.



**Figura 26 - Diagrama Tensão X Deformação**

Fonte: HIBBELER, R.C., 2010.

Note que esse tipo de material apresenta uma grande deformação antes de falhar, o que torna esse tipo de material muito escolhido pelos engenheiros, devido a sua capacidade de demonstrar uma falha iminente (Hibbeler, 2009, p. 60).

Dessa forma, para que seja possível realizar a análise no material utilizado, o Critério utilizado será a Teoria da Energia de Distorção de Von Mises-Hencky.

Esse critério baseia-se no armazenamento de energia, internamente em seu volume, pelo material, quando algum carregamento externo é aplicado. O cálculo da energia armazenada pode ser feito através do produto entre tensão e deformação:

$$U = \frac{1}{2} \sigma \times \varepsilon \quad (40)$$

onde:

$\sigma$  – tensão normal

$\varepsilon$  – deformação

Esta equação é utilizada para o caso de um estado de tensões uniaxial.

Se o sistema apresentar um estado triplo de tensões, tem-se:

$$U = \frac{1}{2}(\sigma_1 \times \varepsilon_1 + \sigma_2 \times \varepsilon_2 + \sigma_3 \times \varepsilon_3) \quad (41)$$

onde:

$\sigma_1$  – tensão principal na direção 1 do sistema ortogonal de coordenadas

$\sigma_2$  – tensão principal na direção 2 do sistema ortogonal de coordenadas

$\sigma_3$  – tensão principal na direção 2 do sistema ortogonal de coordenadas

$\varepsilon_1$  – deformação específica na direção 1 do sistema ortogonal de coordenadas

$\varepsilon_2$  – deformação específica na direção 2 do sistema ortogonal de coordenadas

$\varepsilon_3$  – deformação específica na direção 3 do sistema ortogonal de coordenadas

Levando em consideração que o material apresenta comportamento linear-elástico, e portanto obedece a Lei de Hooke, tem-se:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}[\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (42a)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E}[\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)] \quad (42b)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E}[\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (42c)$$

onde:

$\nu$  - coeficiente de Poisson

$E$  – módulo de elasticidade

Pode-se então substituir as Equações (42) em (41), resultando:

$$U = \frac{1}{2 \times E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (43)$$

Onde as tensões  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  são as tensões principais nas direções ou planos ortogonais, na configuração onde a tensão de cisalhamento é zero, ou seja, arbitrase um sistema de coordenadas que anula os efeitos de cisalhamento, dessa maneira tem-se as tensões e deformações principais. A equação acima corresponde a soma das energias hidrostáticas e de distorção, que são responsáveis pela mudança volumétrica e de formato, respectivamente.

A parcela responsável pela alteração no volume do elemento é, especificamente, a tensão principal média, já que causa deformações iguais no material nas três direções. Assim, temos como parte restante da tensão nas três direções  $(\sigma_1 - \sigma_{med})$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_{med})$ ,  $(\sigma_3 - \sigma_{med})$ , respectivamente para as direções ortogonais do sistema de coordenadas, que causam a energia de distorção.

Testes demonstraram que um material quando submetido somente a carregamento hidrostático, onde as tensões em todas as direções são iguais, sofreram falha bem acima do limite de tensão máxima de compressão do material, sendo responsável por deformação volumétrica, o que mostra que a principal causa de falha num material dúctil é a energia de distorção, ou cisalhante (Norton, 2004, p.240).

Substituindo-se na Eq. (43)  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ , por  $(\sigma_1 - \sigma_{med})$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_{med})$ ,  $(\sigma_3 - \sigma_{med})$  temos a parcela responsável pela energia de distorção, conforme a Eq. (44):

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (44)$$

Para o estudo deste critério, toma-se como base de informações de testes de tração (Norton, 2004, p.242). Esse tipo de teste representa uma situação de carregamento uniaxial, onde  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  e  $\sigma_1$  é a tensão de escoamento do material ( $S_y$ ). Substituindo na Eq.(44):

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} S_y^2 \quad (45)$$

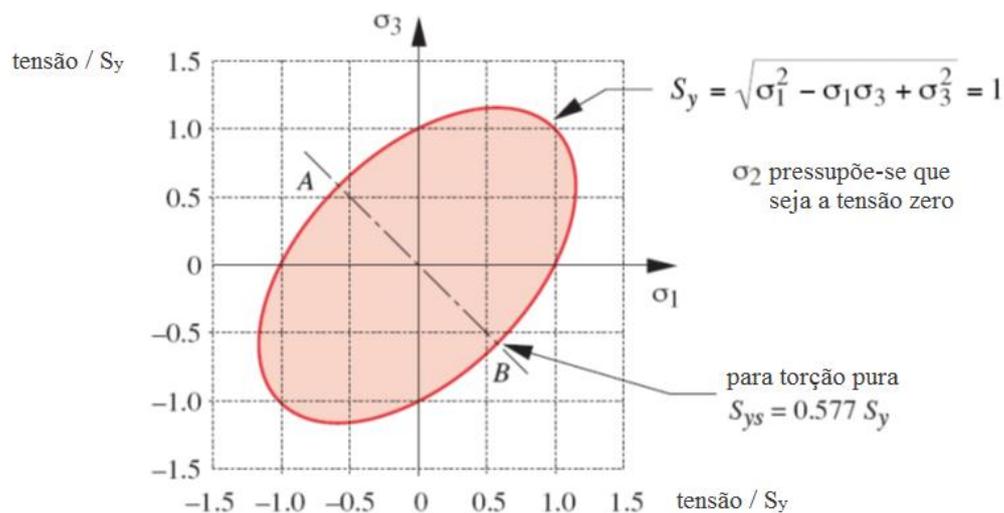
Assim, o critério de falha é obtido igualando-se a Eq. (44) a Eq. (45), obtendo para o estado triplo de tensões:

$$S_y = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)} \quad (46)$$

Para o estado duplo de tensões, faz-se  $\sigma_2 = 0$ , resultando dessa forma na expressão:

$$S_y = \sqrt{\sigma_1^2 + -\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2} \quad (47)$$

A figura a seguir ilustra a Eq. (47), onde o interior da elipse representa a região de combinação biaxial de tensões segura contra escoamento, ou seja, ao calcular as tensões que a estrutura estará sujeita, o engenheiro necessita que seus resultados fiquem dentro da região, do contrário será necessário alguma medida, como mudança no perfil utilizado, ou mesmo troca de material.



**Figura 27 - Tensão de Von Mises**

Fonte: Norton, Robert L., 2004

### Coeficiente de Segurança

Para garantir um bom projeto, com o mínimo de riscos, normalmente é utilizado um coeficiente de segurança que garanta que as tensões que o material irá sofrer fique dentro da elipse mostrada na Figura 27. O coeficiente utilizado depende do tipo de projeto, sendo que na necessidade de estruturas mais leves ou mais baratas utiliza-se coeficientes mais baixos. A equação a seguir mostra como se utilizar o coeficiente de segurança.

$$N = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (48)$$

onde:

$N$  – coeficiente de segurança;

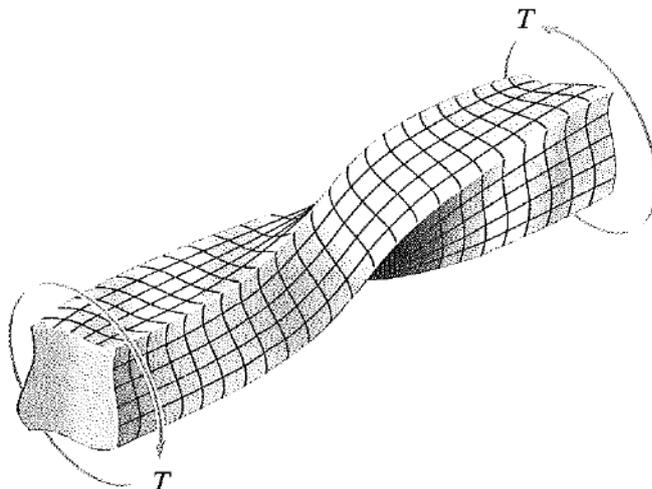
$S_y$  – tensão de escoamento do material;

$\sigma'$  – tensão equivalente de Von Mises.

De maneira geral as tensões que o projeto irá suportar já estão previamente definidas, cabendo então ao engenheiro escolher o material que esta estrutura deverá conter a fim de não falhar.

## 2.5.2 Torção em Tubos de Parede Delgada

A deformação por torção ocorre devido ao torque aplicado no elemento, gerando um ângulo de deformação em sua seção transversal. A Figura 28 ilustra o fenômeno no caso de um elemento de seção não circular sujeita a ação de Torque  $T$ :

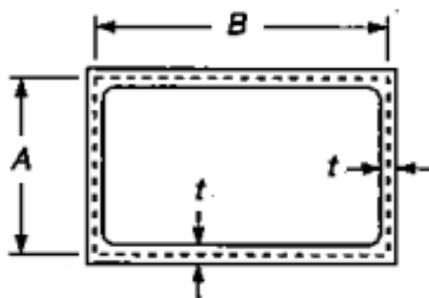


**Figura 28 – Corpo sofrendo Torção**

Fonte: Hibbeler, 2010

Tubos de parede delgadas são aqueles que apresentam espessura de parede pequena em relação as demais dimensões que compõe a seção transversal do mesmo.

Utilizando a seção transversal da Figura 29, como base para formulação dos cálculos para tensão e ângulo de torção numa seção de tubo com parede delgada



**Figura 29 – Seção Transversal Tubo Parede Delgada**

Fonte: Beer, 1995

A tensão média pode ser calculada por:

$$\tau_{méd} = \frac{T}{2 \times t \times A_m} \quad (49)$$

onde:

$t$  – espessura de parede do tubo;

$A_m$  – área limitada pela linha central (para a figura a cima  $A_m = (A-t) \times (B-t)$ ).

O ângulo de torção para um tubo com comprimento  $L$  é obtido pela Eq. (49), note que para este caso é necessário resolver a integral ao longo da linha central da parede.

$$\phi = \frac{TL}{4GA_m^2} \int \frac{ds}{t} \quad (50)$$

onde:

$G$  – módulo de elasticidade ao cisalhamento.

## 2.6 Materiais

### 2.6.1 Dureza

A dureza é uma propriedade mecânica do material relacionada à sua capacidade de resistir a deformação plástica local. Está diretamente ligada a composição do material.

A determinação dos valores de dureza de um material é obtida através de ensaios de penetração como Rockwell, Brinell, Knoop e Vickers.

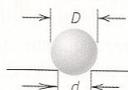
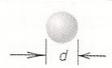
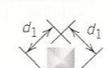
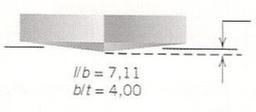
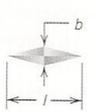
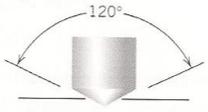
A principal diferença entre os ensaios está no tipo de penetrador que é utilizado em cada caso.

No caso do ensaio Vickers é utilizado um penetrador de diamante com a forma piramidal, que é de tamanho reduzido e causa marcas muito pequenas no corpo-de-

prova devido aos baixos valores de carga que são aplicados. Esse ensaio requer a utilização de um microscópio para analisar as marcas e definir os valores de dureza.

A relação entre a geometria da marca deixada no corpo-de-prova com o valor de dureza do material é mostrada na Tabela 4, que também ilustra a diferença entre os ensaios de dureza citados anteriormente.

**Tabela 4 – Técnicas de Ensaio de Dureza**  
Fonte: Traduzido de Callister, 2008.

Ensaio	Penetrador	Forma da Impressão		Carga	Fórmula para o Número de Dureza <sup>a</sup>
		Vista Lateral	Vista Superior		
Brinell	Esfera de aço com 10 mm ou carbeto de tungstênio			$P$	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Microdureza Vickers	Pirâmide de diamante			$P$	$HV = 1,854P/d_1^2$
Microdureza Knoop	Pirâmide de diamante			$P$	$HK = 14,2P/l^2$
Rockwell e Rockwell Superficial	Cone de diamante; esferas de aço com diâmetros de $\frac{1}{16}$ , $\frac{1}{8}$ , $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ in			60 kg	Rockwell
				100 kg	
	150 kg				
	15 kg	Rockwell Superficial			
	30 kg				
	45 kg				

## 2.6.2 Metalografia: Micrografia

Para saber mais sobre um material, é possível realizar estudos sobre a configuração de sua estrutura cristalina.

Um estudo muito comum é a Micrografia, que permite obter informações de grande valor sobre um material. A grande maioria dos testes apresenta um resultado bidimensional sobre uma estrutura que é tridimensional, dessa maneira, no momento de realizar uma metalografia é necessário seguir um roteiro bem definido pela literatura, para que os erros sejam minimizados. Segundo Colpaert (2008) são necessários cuidados que vão desde a seleção das seções a estudar até a avaliação criteriosa dos resultados obtidos.

Existem várias técnicas dentro da micrografia para realizar a observação da microestrutura dos aços, dentre eles a mais difundida é a microscopia ótica.

A micrografia de um material basicamente é composta por três etapas:

- a) Coleta e preparação das amostras;
- b) Obtenção de imagens;
- c) Avaliação dos resultados, comparando a literatura, sempre que possível.

Colpaert (2008) define as fases necessárias para a preparação de amostras para microscopia ótica como:

- i. Escolha e localização da seção a ser estudada.
- ii. Obtenção de uma superfície plana e polida no local escolhido para estudo.
- iii. Exame ao microscópio para a observação das ocorrências visíveis sem ataque.
- iv. Ataque da superfície por um reagente químico adequado.
- v. Exame ao microscópio para a observação da microestrutura.
- vi. Registro do aspecto observado (fotografia).

As dimensões do corpo-de-prova para a realização de micrografia são pequenas devido, principalmente, ao espaço de alocação das amostras nos microscópios e a dificuldade de preparação da superfície. O local de retirada das amostras é normalmente feito após uma análise macrográfica, que mostra a presença ou não de heterogeneidades, o que torna necessária a retirada de corpos-de-prova de locais diferentes. Outro fator a se considerar no momento de recolher amostras é em relação a possibilidade do material apresentar anisotropia, que ocorre, principalmente, devido ao processo de fabricação (forjamento, laminação, etc.). Durante a escolha da seção da amostra é muito importante que seja feito um registro da direção de coleta.

A preparação da superfície da amostra para micrografia segue alguns passos, como:

- i. Embutimento da amostra em plástico ou resina, para facilitar manuseio;
- ii. Lixamento gradativo com lixas de granulometria alta até as mais finas;
- iii. Polimento com abrasivos, como alumina, por exemplo.

Durante esse processo é uma boa prática verificar a qualidade de acabamento da superfície, analisando a amostra em microscópio sem realizar nenhum ataque químico.

Outra atribuição que pode ser dada a necessidade de se observar a amostra sem ataque está no fato de que algumas características estruturais ficam mais

evidenciadas neste momento, como a presença de trincas, de inclusões não-metálicas, poros, etc.

Finalmente, é feito o ataque químico à superfície. O tipo de reagente deve ser escolhido de acordo com aquilo que se deseja observar. Além disso, a definição do reagente leva em conta o tempo que será feito o ataque. Segundo Colpaert (2008), quando se deseja observar a amostra com aumentos mais elevados é melhor utilizar ataques mais leves.

Após todos esses passos, faz-se a captura de imagens com o microscópio e então é feita a análise da microestrutura do material em questão.

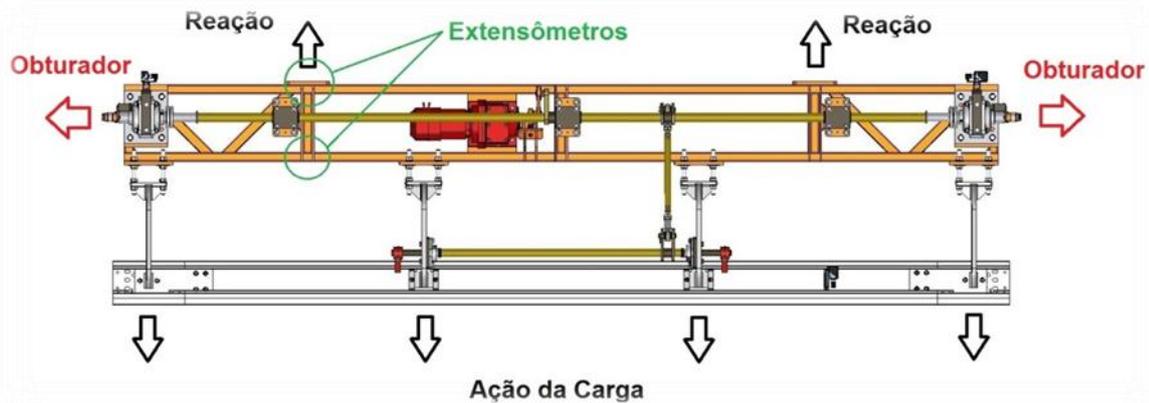
### 3 METODOLOGIA

O objetivo principal do presente trabalho é a obtenção de uma estrutura otimizada para a treliça do carro do elevador EOM Bi coluna da Euronobre. Para isso a metodologia inclui algumas etapas fundamentais:

1. Ensaio experimental da treliça do elevador;
2. Exportação do modelo virtual da treliça do elevador para a simulação usando MEF, com as mesmas características do elevador ensaiado experimentalmente e nas mesmas condições;
3. Validação do modelo de elementos finitos por comparação com os resultados experimentais e;
4. Otimização estrutural usando o modelo validado.

Para realizar a comparação dos resultados do estudo pelo método de elementos finitos, com o estudo por extensometria, é necessária uma série de produtos do projeto: Projeto em CAD da estrutura da treliça do carro do elevador, no software SOLIDWORKS®; resultados dos estudos de extensometria na empresa e de simulação pelo MEF do laboratório de desenho de máquinas da UTFPR. O laboratório de desenho de máquinas é essencial para a execução deste trabalho, na medida em que dispõe das ferramentas para projetar e simular o modelo virtual da estrutura do carro do elevador.

O ensaio experimental consiste em medir deslocamentos em pontos de interesse do elevador sob carregamento de operação.



**Figura 30 - Pontos de Carregamento da Trelça**

Para realizar os experimentos é necessário utilizar extensômetros, além dos equipamentos necessários para fazer a leitura dos dados dos ensaios. Como o elevador já está construído na empresa, e sob testes de fadiga, é preciso somente realizar as medições de interesse. As medições serão feitas nos tubos superior e inferior da treliça, conforme Figura 30. No tubo inferior serão colocados um extensômetro na parede superior e outro na parede inferior. Para o tubo superior será medido somente o deslocamento presente na parede superior do tubo. Não será feita medição na parede inferior devido a presença de outro tubo soldado em 45° para formar a treliça, como pode ser observado na Figura 30.

Para a modelagem do elevador pelo MEF deve-se realizar a exportação do modelamento virtual da estrutura do carro do elevador, do *software* de CAD 3D Autodesk INVENTOR® para o *software* SOLIDWORKS®, que será o *software* utilizado para realizar as simulações por MEF e a otimização. Depois de selecionadas as dimensões, os pontos de fixação e aplicação de carga, segue-se com a simulação pelo método de elementos finitos (MEF) no laboratório de desenho de máquinas.

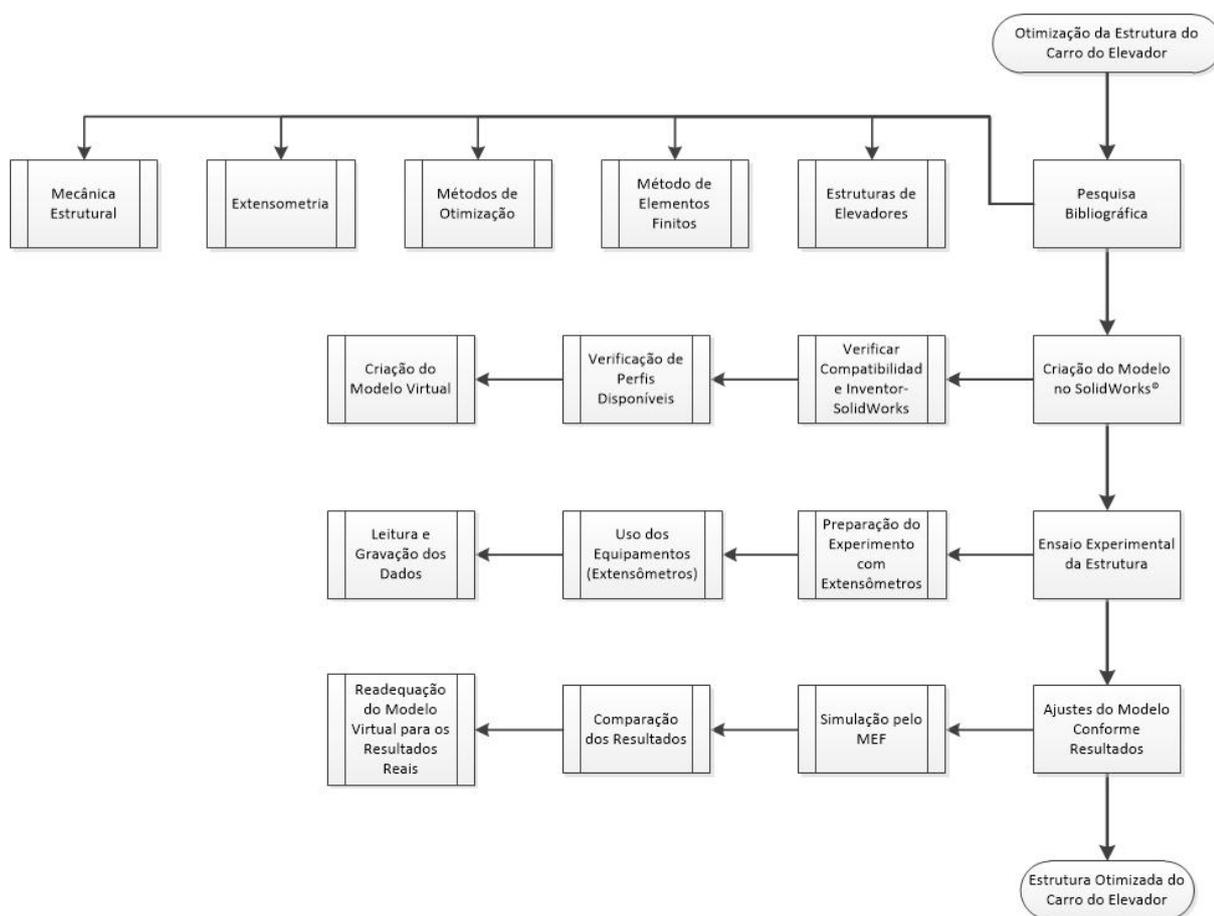
Os ensaios virtuais pelo MEF deverão aplicar a mesma carga do estudo físico, para que haja validação dos resultados apresentados. Após serem analisados os dados dos ensaios mecânicos, deve-se realizar a comparação dos mesmos com os resultados obtidos por meio da simulação pelo MEF. Caso não haja igualdade entre os dados obtidos em campos e os dados resultantes da simulação virtual, algumas medidas deverão ser tomadas para tentar justificar essa diferença. Neste caso,

serão realizados estudos a respeito do material da estrutura, como metalografia e ensaio de dureza. Com o modelo totalmente validado, ou com a necessidade de se justificar a divergência de resultados, a otimização da estrutura será feita baseada no modelo virtual mais próximo do real.

### 3.1 Descrição da Metodologia

Para otimizar a estrutura do carro do elevador, visando a melhor resistência mecânica com o menor peso de material, será utilizado a ferramenta de otimização baseado na programação por simulação do SOLIDWORKS®.

Com base nesta premissa, segue-se um fluxograma de atividades, visando o cumprimento das metas estabelecidas.



**Figura 31 - Fluxograma de atividades**

A primeira parte consistirá da pesquisa bibliográfica referente às áreas de interesse ao projeto. São elas: Estruturas de Elevadores; Método de Elementos Finitos (MEF); Métodos de Otimização; Extensometria e; Mecânica Estrutural.

A segunda parte é a criação do modelo virtual no SolidWorks®. Esta parte consistirá das seguintes etapas:

- i. Exportação entre os programas de modelamento virtual (Autodesk Inventor® e SolidWorks®).
- ii. Verificação dos perfis estruturais disponíveis no mercado, para podermos colocar como restrições à otimização.
- iii. Criação do modelo virtual da estrutura da treliça do carro, de acordo com as especificações do modelo real do elevador, para o estudo de MEF.

A terceira parte é a prática relativa à medição com extensômetros dos esforços na estrutura do carro do elevador. Nesta parte serão utilizados extensômetros colados sobre os perfis que sofrem as principais cargas de entrada e saída do carro da linha. Executar os testes em vazio e com carga. Deve-se gravar sistematicamente os resultados dos testes para posterior avaliação dos resultados com o estudo de simulação pelo MEF.

Com todas estas partes concluídas, realiza-se a simulação pelo MEF no SolidWorks®. Deve-se readequar o modelo virtual, a fim de se atingir um resultado de simulação pelo MEF com mínima diferença do resultado real. A partir daí, o modelo de elementos finitos da estrutura estará validado e pronto para ser usado na otimização. Com a necessidade de se justificar possíveis diferenças entre modelo real e virtual, as análises de material da estrutura serão realizadas no Laboratório de Materiais da Universidade.

### **3.2 Justificativa da Metodologia**

Atualmente, cada vez mais os estudos de tensões são feitos por meio de análises computadorizadas, graças aos computadores mais potentes e ferramentas melhores disponíveis. Mas como todo método de análise, ele é limitado e passível

de erros. Tais erros, às vezes, podem acarretar desde a diminuição da vida útil, até falhas graves dos componentes mecânicos.

As simulações por elementos finitos podem não ser precisas devido há vários fatores, tais como: heterogeneidade dos materiais, fixações ou condições de contorno mal modeladas, escolha inadequada de elementos finitos etc. Quando se tem resultados experimentais, fica mais fácil ajustar o modelo de elementos finitos para as condições reais. A distribuição das tensões no material é medida exatamente como acontece.

A extensometria permite medir deformações na estrutura da treliça do carro do elevador, que podem ser usadas para ajuste do modelo de elementos finitos por comparação. É possível, com a adoção destes dois métodos em conjunto (o MEF e extensometria), obter resultados muito precisos, e com baixo custo. Possibilitando assim peças cada vez mais resistentes e leves.

O mercado competitivo que nos cerca, cria nas empresas a necessidade de oferecer produtos que desempenhem o mínimo de sua função requerida, com confiabilidade para o consumidor e baixo custo para o fabricante. A busca por menor custo faz com que todos os processos que cercam o produto final. Quando se analisa a Engenharia Mecânica por trás de um produto, admite-se que os principais fatores que ela influencia são projeto, produção e, no pós-venda, manutenção.

O projeto otimizado de um equipamento influi diretamente na fabricação e manutenção, fatores que geram altos custos. Dessa forma, a busca por otimização de um projeto é uma prática que acarreta em retornos positivos para uma empresa.

### **3.3 Produtos do Projeto**

O projeto visa obter três produtos principais, são eles: O modelo virtual da estrutura da treliça do carro do elevador possibilitando as simulações pelo MEF; os resultados dos experimentos por extensometria e; uma estrutura do elevador otimizada pelo SOLIDWORKS®. Podendo ainda, ter um detalhamento das características do material que compõe os tubos da treliça.

O modelo virtual é uma modelagem do equipamento real, para *softwares* de projeto em CAD 3D, que poderá ser aberto pelo *software* Autodesk Inventor® ou em outros formatos de CAD 3D. Este modelo virtual é de vital importância para o nosso projeto. Visto que é a partir dele que são feitos os estudos pelo MEF.

Os resultados dos estudos pelo MEF contemplam uma série de informações relevantes ao projeto, tais como: tensão total na estrutura pelo critério de Von-Misses, deslocamento total da estrutura com o carregamento, coeficiente de segurança distribuído e forma da estrutura antes e depois do carregamento. Com estes resultados, após a validação do método, será possível avaliar as mudanças de resistência mecânica na estrutura, de acordo com a variação dos perfis a serem utilizados.

Os resultados do estudo com extensômetros são de grande valia para se verificar as tensões e deslocamentos reais na estrutura, e então compará-los com os resultados apresentados pela simulação pelo MEF. Após esta comparação, estes resultados por extensometria servem como base para validação do modelo numérico, feito posteriormente aos dois estudos (pelo MEF e por extensometria). A otimização estrutural é produto final do projeto.

## 4 DETALHAMENTO DOS PROCEDIMENTOS

O presente capítulo visa detalhar os procedimentos realizados no estudo de otimização da treliça do elevador de carga. Serão explicados todos os passos seguidos de acordo com a metodologia apresentada no capítulo anterior.

### 4.1 Formulação do Problema

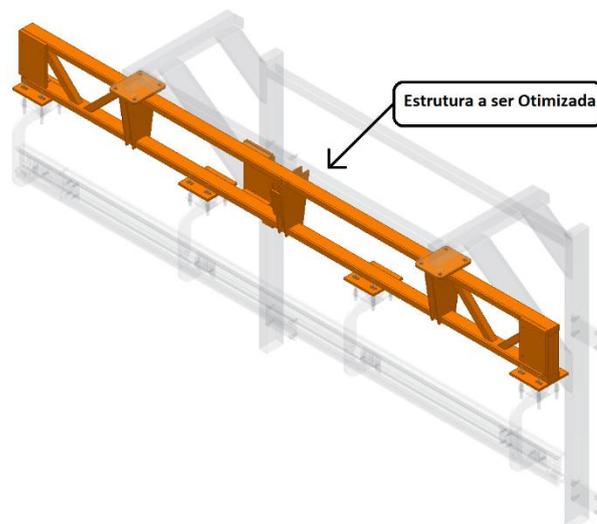
Para a realização deste trabalho, foi utilizada a estrutura de um elevador em fase final de testes, presente na empresa Euronobre. Uma imagem geral do elevador pode ser vista na Figura 32.



**Figura 32 – Estrutura do Elevador de Carga**

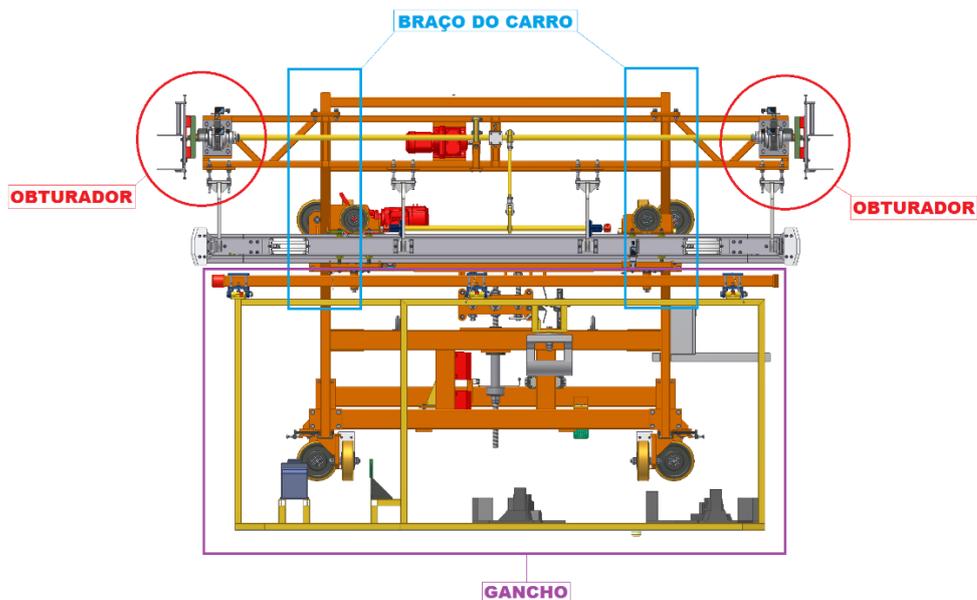
Como se trata de um equipamento de movimentação de carga, com um espaço para instalação, na maioria das vezes, reduzido, sua rigidez estrutural, bem como seu tamanho e peso devem ser obtidos de maneira a garantir seu bom funcionamento.

O estudo apresentado tem como objetivo a otimização da treliça presente no elevador, que liga o carro do elevador a estrutura de trilhos para a movimentação do gancho contendo peças da linha de montagem de uma indústria do ramo automobilístico, conforme já citado anteriormente. A Figura 33 mostra a treliça, objeto de estudo.



**Figura 33 – Objeto de estudo: Treliça do Elevador de Carga**

A estrutura da treliça é responsável por suportar cargas resultantes de vários componentes, como o braço do carro do elevador, os obturadores, e o peso do gancho carregado. A Figura 34, ilustra esta situação.

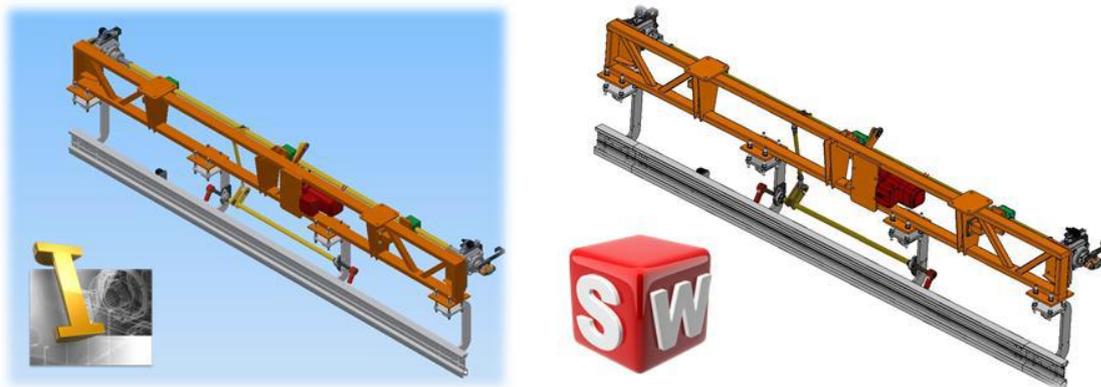


**Figura 34 – Solicitações na Treliça**

O projeto da treliça foi realizado somente com o objetivo de garantir o funcionamento do equipamento, sem nenhum estudo a cerca de um melhor aproveitamento de material. Dessa forma, a otimização desta estrutura visa garantir a melhor utilização dos recursos para a fabricação do equipamento.

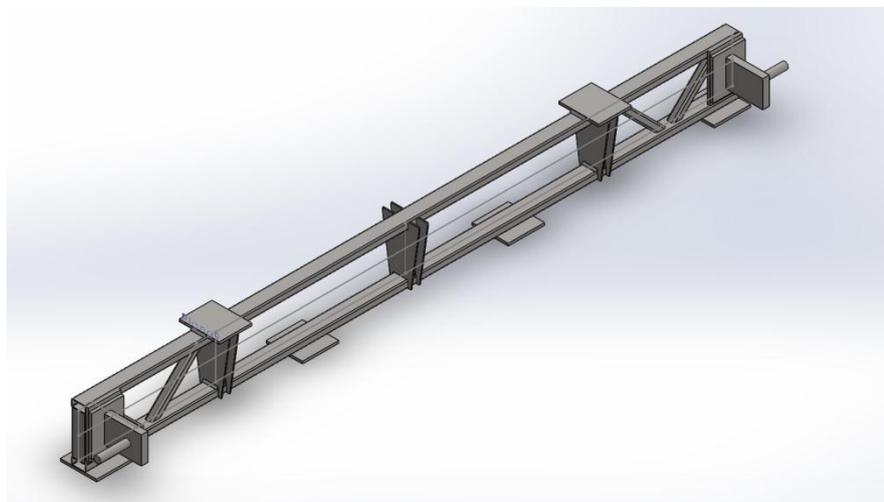
#### **4.2 Obtenção do Modelo Virtual**

De comum acordo com a Euronobre, obtivemos o acesso ao projeto da Treliça do Elevador de carga para fins de estudo da universidade. Para o nosso trabalho foi necessário exportar o modelo que estava no formato do *software* Autodesk INVENTOR®, para o formato do *software* SOLIDWORKS®.



**Figura 35 – Exportação Modelo Virtual**

A Figura 35 mostra como ficaram os modelamentos após a transferência de um *software* para o outro. Durante o desenvolvimento do trabalho verificou-se a necessidade de utilizar os recursos de modelagem do próprio SOLIDWORKS®, como cotas paramétricas de dimensionamento dos tubos, que se perderam na exportação. Devido a estes fatores foi necessário modelar no próprio SOLIDWORKS® a treliça novamente.



**Figura 36 – Modelo Virtual SolidWorks®**

A Figura 36 mostra como ficou a treliça modelada no SOLIDWORKS®. Ela foi modelada como um corpo único para melhorar o tempo de otimização da estrutura. Neste modelamento foi retirada a placa do motorreductor, para deixar a treliça simétrica, e foi adicionado o modelamento do obturador junto à treliça. Sendo um

corpo só, o tempo computacional necessário para realizar a estruturação da malha é significativamente reduzido.

### 4.3 Aquisição de Dados

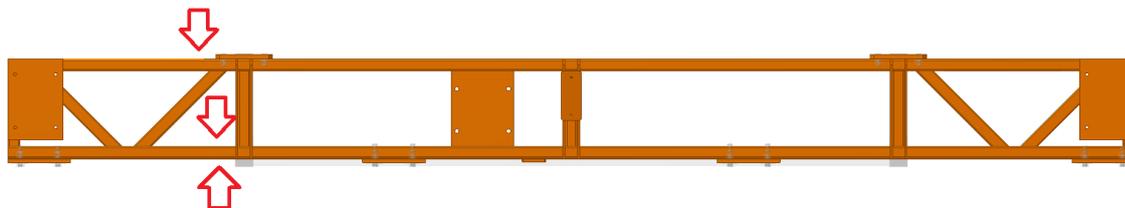
A aquisição experimental de dados foi feita levando-se em conta o princípio de que ao se aplicar tensão a um estrutura esta sofre deformação, baseado nisso podemos adquirir dados referente a deformação do material utilizando-se da extensometria.

O experimento foi feito seguindo as seguintes etapas:

- i. Posicionamento dos extensômetros em locais previamente definidos, foram utilizados três extensômetros.
- ii. Aplicação de carga à estrutura.
- iii. Medição da deformação no momento de entrada da carga no elevador e no instante que a carga estivesse centralizada na estrutura do mesmo.

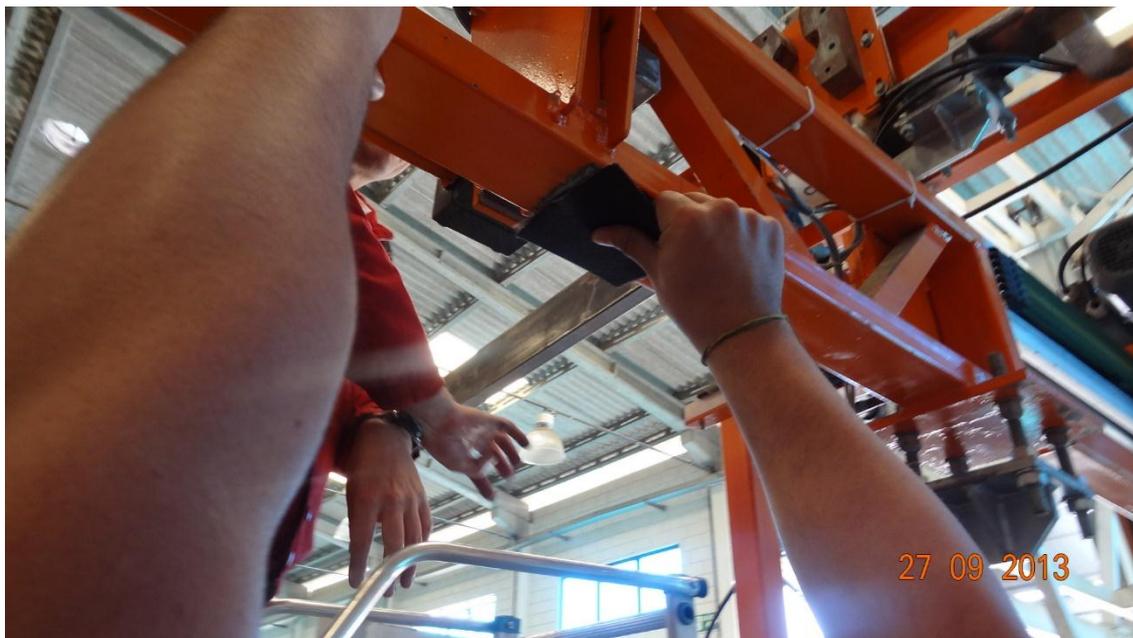
Para a primeira etapa, foi feito um estudo em ambiente virtual, no *software* Autodesk Inventor®, para se ter noção do local onde seriam os pontos, ou regiões, em que as solicitações mecânicas fossem maiores.

Do estudo observou-se que as regiões com maiores solicitações eram as mostradas na Figura 37.



**Figura 37 – Regiões de maiores solicitações na Treliça (estudo preliminar Autodesk Inventor®)**

Definido os locais a serem realizadas as medições, preparou-se a superfície e foi feita a colagem dos extensômetros, conforme Figura 38 e Figura 39.



**Figura 38 – Preparação da superfície para colagem dos extensômetros.**

Para a preparação da superfície, efetuou-se primeiramente a retirada do acabamento no tubo, com posterior lixamento e no fim, para ser possível a colagem dos extensômetros, a superfície foi limpa.



**Figura 39 – Colagem dos extensômetros.**

Para a colagem dos extensômetros, foi utilizado cola do tipo cianoacrilato.

Foram disponibilizados extensômetros da marca KYOWA, modelo KFC-2-350-D16-11, com Resistência de  $350,9 \pm 1\%$ , *Gage factor*  $2,2 \pm 1\%$ ; autocompensado para Aço 10,8 PPM/°C, e comprimento de grade de 2mm. Estes extensômetros são biaxiais, contudo, utilizou-se para a medição somente a direção que estava no sentido axial dos tubos da treliça.

Para a medição dos dados foi utilizado um Condicionador de Sinal da KYOWA, modelo CDV-700A, conforme Figura 40 e uma fonte simétrica, conforme Figura 41.



**Figura 40 – Condicionador de Sinal KYOWA CDV-700A.**



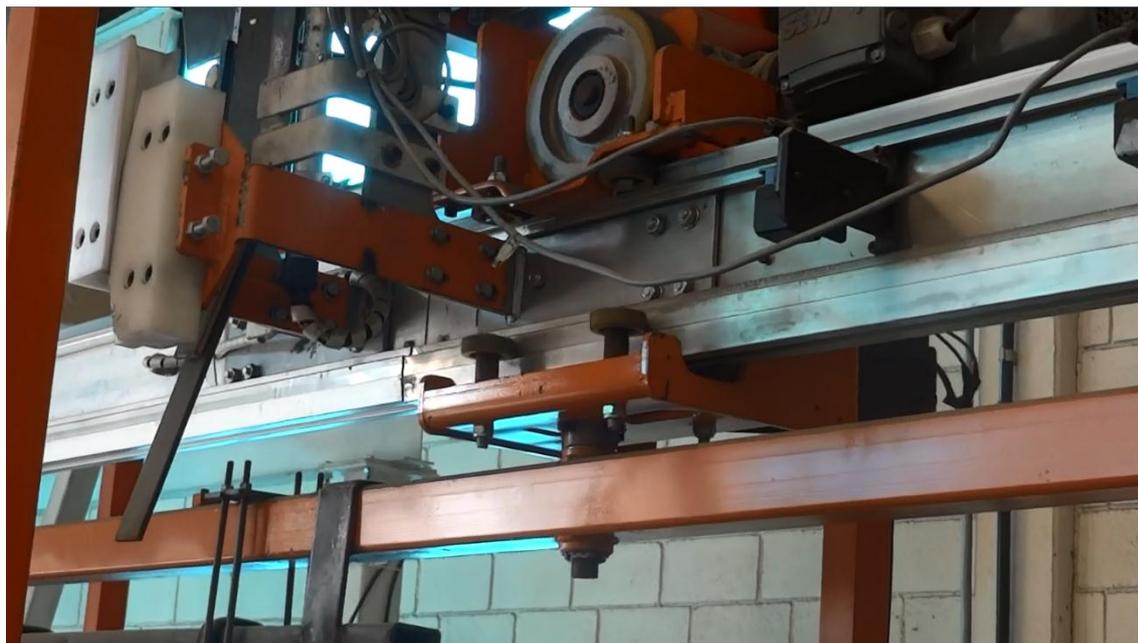
**Figura 41 – Fonte Simétrica**

O condicionador de sinais foi configurado com um filtro de 10Hz, com uma faixa de medição de  $500\mu\text{m/m}$  e um *Range* de  $500\mu\epsilon$ .

Para a aplicação da carga à estrutura, e aquisição de dados, executou-se a sequência abaixo:

- 1) Zerou-se os valores do condicionador de sinais com o obturador do elevador aberto.
- 2) Ativou-se o obturador.
- 3) O gancho foi posicionado na entrada do elevador, Figura 42.
- 4) Mediu-se a deformação.
- 5) O gancho foi movido até o centro do elevador, Figura 43.
- 6) Mediu-se a deformação

Na Figura 42 é mostrada a entrada do gancho no elevador, evidenciando a entrada da roda sobre o trilho de alumínio do elevador. Já a Figura 43 evidencia a posição do gancho quando este está centrado no elevador.



**Figura 42 – Entrada do Gancho no Elevador**



**Figura 43 – Gancho posicionado no centro do elevador.**

Foram realizadas dez medições para cada um dos casos, entrada e centro do elevador. O gancho utilizado para os experimentos pode ser observado apoiado em cima do trilho de alumínio e abaixo da treliça, na Figura 44.



**Figura 44 – Gancho utilizado para experimentos.**

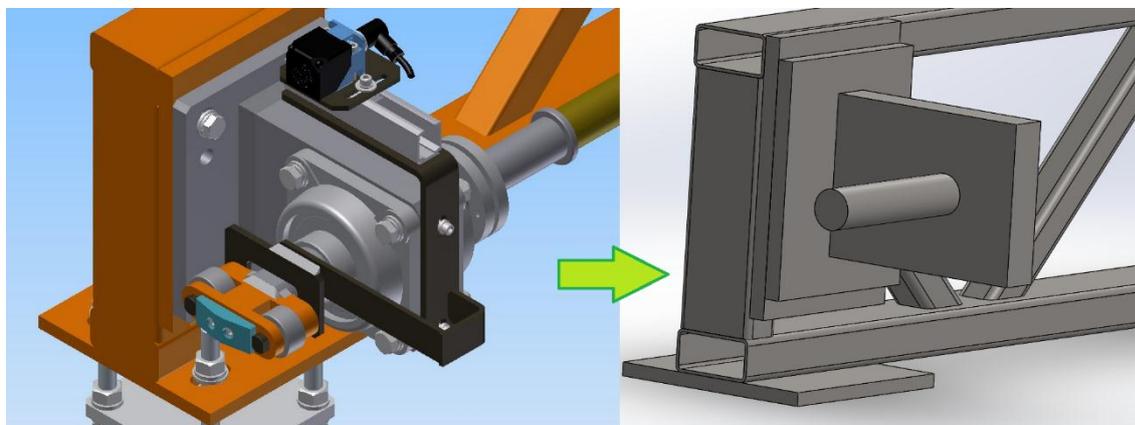
Este equipamento possuía uma massa de aproximadamente 700Kg, o que representa a situação real de funcionamento na linha de montagem onde o elevador é instalado.

#### **4.4 Desenvolvimento e Validação Modelo Matemático**

Para a realização da otimização é necessário primeiramente, se ter um modelo matemático que possua comportamento equivalente ao da realidade. No estudo, um modelo virtual do elevador de carga industrial foi disponibilizado inicialmente em ambiente Autodesk Inventor®, dessa maneira após a exportação para o ambiente SolidWorks®, conforme descrito anteriormente, pode-se iniciar as simulações virtuais.

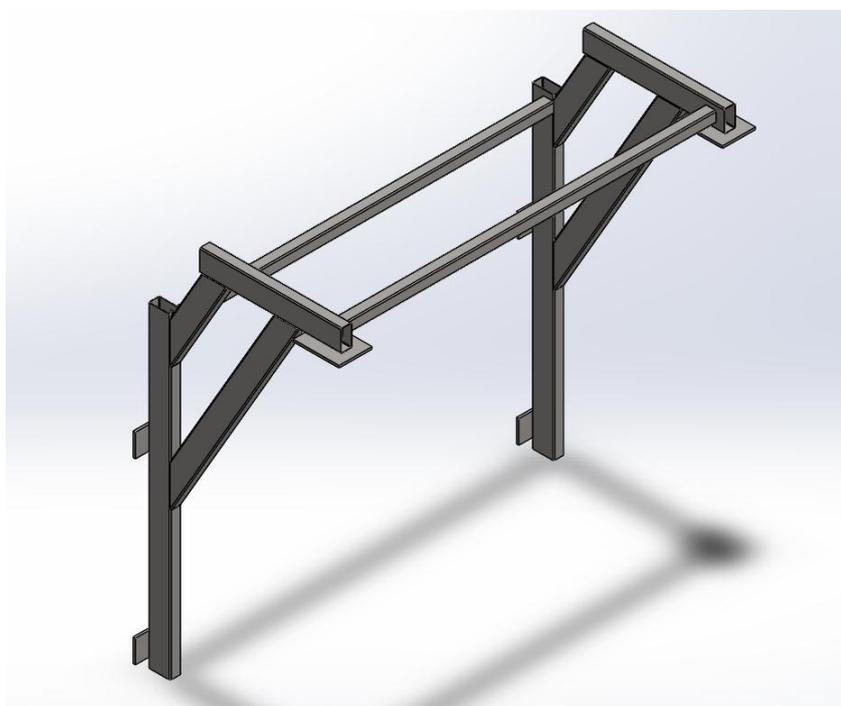
Durante o processo de ajuste do modelamento da treliça, foram adicionados demais componentes presentes na estrutura global do elevador, como o obturador e o braço que liga a treliça ao carro do elevador. Sendo o obturador modelado

simplificadamente apenas para servir de representação da posição de aplicação das cargas, como observado na Figura 45.



**Figura 45 – Estrutura do Obturador Simplificada**

Esta simplificação não influi no comportamento da treliça, porém, acarreta em grandes ganhos de tempo, devido a agilidade na geração da malha, e menor número de cálculos a serem processados pelo computador. O modelamento do braço foi feito diretamente no SolidWorks®, conforme Figura 46.



**Figura 46 – Braço Elevador (modelamento no SolidWorks®).**

Além das modificações no modelamento dos componentes, a disposição de cargas e pontos de fixação foram variados no decorrer das simulações.

O material do modelo virtual foi definido como o aço AISI 1020, com propriedades na Tabela 5 – Propriedades do AISI 1020 no SolidWorks®.

**Tabela 5 – Propriedades do AISI 1020 no SolidWorks®**

<b>Coefficiente de Poisson</b>	<b>0,29</b>
<b>Limite de Escoamento</b>	<b>351,6 MPa</b>
<b>Módulo de Elasticidade</b>	<b>200 GPa</b>
<b>Resistência à Tração</b>	<b>420,5 MPa</b>

Na discretização do domínio o SolidWorks® conta com alguns tipos de malha, como Malha Sólida, de Casca, de Viga e Mista.

Nas simulações realizadas, foram utilizadas as malhas sólidas e a mista. Sendo esta última, composta por malha sólida e de viga.

“A geração de malhas é uma etapa crucial da análise de projetos. O gerador automático de malhas do *software* gera uma malha com base em um tamanho de elemento global, na tolerância e nas especificações de controle de malha local. O controle de malha permite especificar diferentes tamanhos de elemento para componentes, faces, arestas e vértices.” (Help SolidWorks® 2013 acessado em: 9 de abril de 2014).

### Malha Sólida

Na utilização da malha sólida, optou-se pela malha de alta qualidade, através do gerador automático de malhas do *software*, que cria elementos tetraédricos parabólicos. Estes elementos dão maior precisão a resposta devido a representação mais adequada de arestas curvas, além de produzirem melhores aproximações matemáticas (SolidWorks®, 2013).

Os elementos de malha sólida tetraédrica parabólica são definidos por quatro nós de canto, seis intermediários e possuem seis arestas. Cada nó possui três graus de liberdade na direção dos eixos ortogonais X, Y e Z.

### Malha de Viga

Esse tipo de malha é indicada para partes extrudadas, ou revolucionadas com perfis transversais constantes. São elementos 1D, que se ajustam melhor aos componentes estruturais.

### Malha Mista

Utilizada quando se deseja mais de um tipo de elemento na malha. Adequa-se bem nos casos onde existem mais de um tipo de geometria.

Foi utilizada na geração de malha a função Transição Automática, que controla o tamanho dos elementos, dando a elementos próximos de detalhes (furos, filetes, etc.) uma precisão maior, diminuindo o tamanho do elemento e aumentando, conseqüentemente, a quantidade de elementos na região.

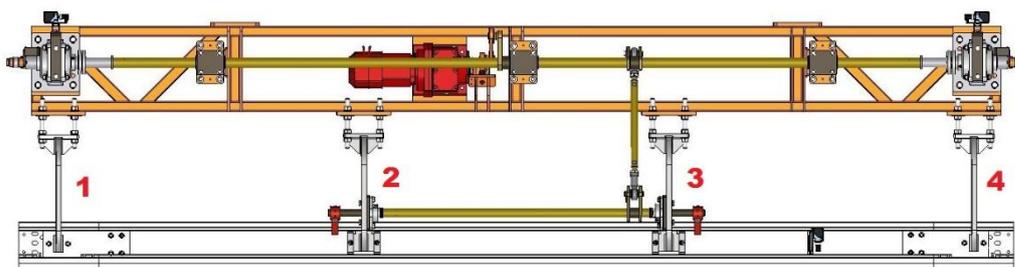
Para a análise de convergência, o SolidWorks® utiliza os métodos adaptativos: o h-adaptativo é um método que utiliza elementos menores em regiões onde o erro é relativamente grande, o *software* executa um estudo preliminar e após analisar os resultados gera malha mais refinada nessas regiões; já o método p-adaptativo aumenta a ordem dos polinômios para os elementos que apresentam erros grandes em relação ao problema global, após a análise inicial do *software* este aumenta a ordem dos elementos nas regiões indicadas sem alterar o tamanho dos elementos. (Help SolidWorks® 2013).

Conforme o estudo foi se desenvolvendo, um melhor entendimento sobre o comportamento do sistema foi adquirido. Dessa maneira, as condições de contorno foram modificadas no decorrer das simulações. Os carregamentos e fixações que iniciaram sendo feitos diretamente na estrutura da treliça foram cada vez mais aproximados da realidade.

As cargas aplicadas pelo obturador foram variadas, respeitando os valores de projeto, com carga máxima suportada de aproximadamente 3500 Kgf. Assim, durante as simulações foram dadas ao obturador cargas que variavam de 0 a 1000 Kgf em cada ponto de aplicação. O obturador é um equipamento auxiliar, que é ativado no momento em que a carga do gancho é aplicada na estrutura do elevador. Este equipamento auxiliar é utilizado para dar a estrutura do elevador maior rigidez,

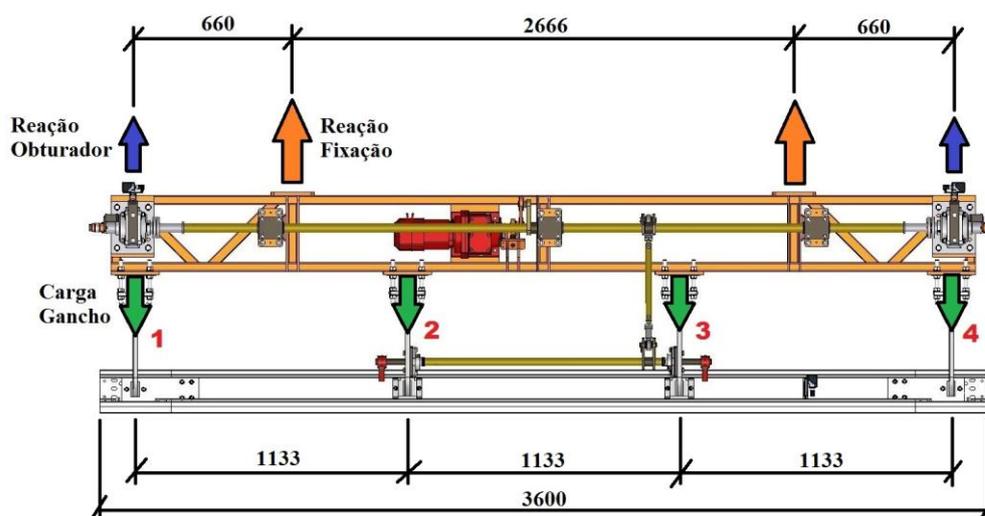
diminuindo as solicitações no braço do elevador, mostrado segurando a treliça na Figura 49.

Os esforços simulados pelo peso do gancho também foram variados em relação aos pontos de aplicação. Como já mencionado, nos testes em campo foi utilizado um gancho com 700 Kg de massa, variando sua posição no elevador. O trilho fixo a treliça é mantido em quatro pontos, conforme Figura 47.



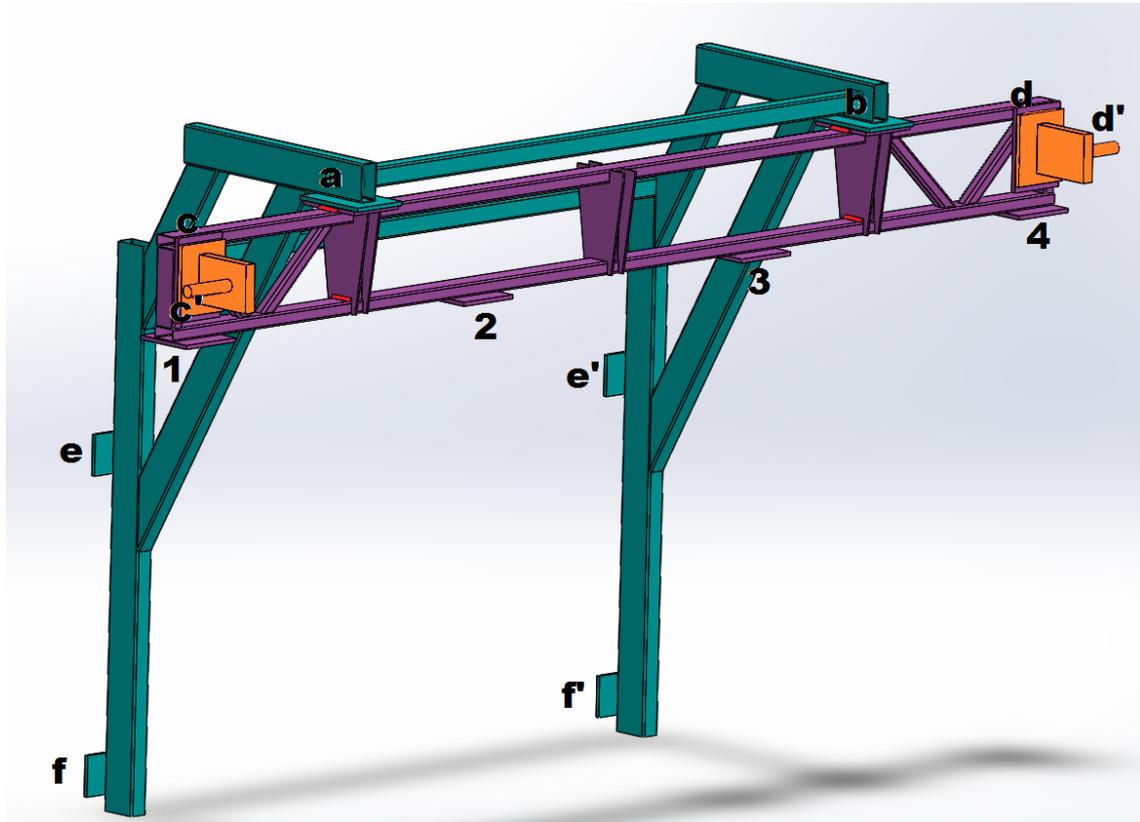
**Figura 47 – Pontos de Fixação Trilho de Suporte ao Gancho**

Dessa forma, nas simulações posicionou-se a carga relativa ao peso do gancho distribuída nos pontos de apoio (1 a 4), variando sua intensidade a fim de ajustar a melhor condição, não ultrapassando os 700 Kgf. A distribuição das cargas e reações pode ser melhor observada na Figura 48.



**Figura 48 - Diagrama de Corpo Livre**

A seguir tem-se uma breve descrição de cada uma das simulações realizadas. No total, foram feitas seis simulações até se encontrar a melhor configuração, baseada em todo entendimento do sistema real. A Figura 49 serve de referência para as condições de contorno aplicadas em cada estudo. Os pontos marcados foram utilizados para aplicação de carga ou fixação da estrutura no espaço.



**Figura 49 – Modelo Virtual: pontos relacionados condições de contorno**

Na Figura 49, os pontos são:

- 1 a 4 → atuação da força Peso do gancho;
- a e b → pontos superiores da treliça, utilizados como ponto de fixação no espaço ou encaixe do braço;
- c e d → pontos frontais da treliça, utilizados como ponto de fixação, de atuação da carga do obturador ou como encaixe do obturador;
- c' e d' → pontos de atuação da carga do obturador (modelamento simplificado);
- e, e', f e f' → pontos de fixação nas chapas do braço do elevador.

## Estudo 1

No Estudo 1 foram realizados seis simulações, duas com carga na entrada e quatro com a carga centralizada. Para esse estudo foi considerado somente a treliça (roxo), sem a presença da estrutura do braço ou do obturador.

Modelo utilizado: exportado diretamente do Autodesk Inventor ®.

### Condições de Contorno

- Entrada

- Fixação: *a e b*.
- Forças
  - Simulação 1 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Simulação 2 → P1: 700 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf

- Centralizada

- Fixação: *a e b*.
- Forças
  - Simulação 3 → P1:175Kgf | P2:175Kgf | P3:175Kgf | P4:175Kgf
  - Simulação 4 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
  - Simulação 5 → P1:50Kgf | P2:300Kgf | P3:300Kgf | P4:50Kgf
  - Simulação 6 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf

## Estudo 2

No Estudo 2 foram realizados dez simulações, seis com carga na entrada e quatro com a carga centralizada. Para esse estudo foi considerado somente a treliça

(roxo), sem a presença da estrutura do braço ou do obturador. Nesse modelo foram adicionados os cordões de solda (vermelho).

Modelo utilizado: sólido modelado diretamente no SolidWorks®.

### Condições de Contorno

- Entrada

- Fixação: *a, b, c e d.*
- Forças
  - Simulação 1 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Simulação 2 → P1: 700 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Simulação 3 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Simulação 4 → P1: 500 Kgf | P2: 200 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Simulação 5 → P1: 200 Kgf | P2: 150 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Simulação 6 → P1: 400 Kgf | P2: 300 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf

- Centralizada

- Fixação: *a, b, c e d.*
- Forças
  - Simulação 7 → P1:175Kgf | P2:175Kgf | P3:175Kgf | P4:175Kgf
  - Simulação 8 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
  - Simulação 9 → P1:50Kgf | P2:300Kgf | P3:300Kgf | P4:50Kgf
  - Simulação 10 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf

### Estudo 3

No Estudo 3 foram realizados 16 simulações, oito com carga na entrada e oito com a carga centralizada. Para esse estudo foi considerado somente a treliça (roxo), sem a presença da estrutura do braço ou do obturador. Nesse modelo foram

adicionados os cordões de solda (vermelho). A diferença do Estudo 3 para o Estudo 2 está no fato de que agora, foi considerado a atuação de carga por parte do obturador, porém, essas forças foram atuadas nos pontos *c* e *d*, ou seja, atuando diretamente na estrutura da treliça.

Modelo utilizado: modelado diretamente no SolidWorks®.

### Condições de Contorno

#### ▪ Entrada

- Fixação: *a* e *b*.
- Forças
  - Simulação 1 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 350 Kgf
  - Simulação 2 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 500 Kgf
  - Simulação 3 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 700 Kgf
  - Simulação 4 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 1000 Kgf
  - Simulação 5 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 350 Kgf
  - Simulação 6 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 500 Kgf
  - Simulação 7 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 700 Kgf
  - Simulação 8 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 1000 Kgf

- Centralizada
  - Fixação: *a* e *b*.
  - Forças
    - Simulação 9 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf
      - Carga do obturador → 350 Kgf
    - Simulação 10 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
      - Carga do obturador → 350 Kgf
    - Simulação 11 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf
      - Carga do obturador → 500 Kgf
    - Simulação 12 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
      - Carga do obturador → 500 Kgf
    - Simulação 13 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf
      - Carga do obturador → 700 Kgf
    - Simulação 14 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
      - Carga do obturador → 700 Kgf
    - Simulação 15 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf
      - Carga do obturador → 1000 Kgf
    - Simulação 16 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
      - Carga do obturador → 1000 Kgf

#### Estudo 4

No Estudo 4 foram realizados 16 simulações, oito com carga na entrada e oito com a carga centralizada. Para esse estudo foram consideradas as estruturas da treliça (roxo) e do obturador (laranja) sem a presença da estrutura do braço. Nesse modelo foram adicionados os cordões de solda (vermelho). Neste estudo, as cargas ocasionadas pela atuação do obturador foram aplicadas nos pontos *c'* e *d'*. A

diferença para este estudo é que agora os obturadores foram modelados diretamente na treliça, considerando os pontos de reação nas pontas deles.

Modelo utilizado: modelado diretamente no SolidWorks®.

### Condições de Contorno

- Entrada

- Fixação: *a e b*.

- Forças

- Simulação 1 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Carga do obturador → 350 Kgf
- Simulação 2 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Carga do obturador → 500 Kgf
- Simulação 3 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Carga do obturador → 700 Kgf
- Simulação 4 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Carga do obturador → 1000 Kgf
- Simulação 5 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Carga do obturador → 350 Kgf
- Simulação 6 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Carga do obturador → 500 Kgf
- Simulação 7 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Carga do obturador → 700 Kgf
- Simulação 8 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Carga do obturador → 1000 Kgf

- Centralizada
  - Fixação: *a* e *b*.
  - Forças
    - Simulação 9 → P1: 0 Kgf | P2: 350 Kgf | P3: 350 Kgf | P4: 0 Kgf
      - Carga do obturador → 350 Kgf
    - Simulação 10 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
      - Carga do obturador → 350 Kgf
    - Simulação 11 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf
      - Carga do obturador → 500 Kgf
    - Simulação 12 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
      - Carga do obturador → 500 Kgf
    - Simulação 13 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf
      - Carga do obturador → 700 Kgf
    - Simulação 14 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
      - Carga do obturador → 700 Kgf
    - Simulação 15 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf
      - Carga do obturador → 1000 Kgf
    - Simulação 16 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
      - Carga do obturador → 1000 Kgf

## Estudo 5

No Estudo 5 foram realizados 16 simulações, oito com carga na entrada e oito com a carga centralizada. Para esse estudo foram consideradas as estruturas da treliça (roxo), do obturador (laranja) e do braço (azul). Nesse modelo foram adicionados os cordões de solda (vermelho). Neste estudo, as cargas ocasionadas

pela atuação do obturador foram aplicadas nos pontos  $c'$  e  $d'$ . E as fixações no espaço foram feitas nos pontos  $e$ ,  $e'$ ,  $f$  e  $f'$ .

Modelo utilizado: modelado diretamente no SolidWorks®.

Como o modelo utilizado nesse estudo foi o modelo final, preocupou-se em adicionar informações sobre a malha. Para cada uma das simulações (entrada e centralizada) o SolidWorks® cria uma malha. Nesse caso, para todo o modelo foi utilizada malha sólida. As informações podem ser vistas a seguir.

Malha: Sólida → Entrada: 1451532 nós, 734086 elementos. | Centralizada: 1458697 nós, 738471 elementos.

Condições de Contorno

- Entrada

- Fixação:  $e$ ,  $e'$ ,  $f$  e  $f'$ .
- Forças
  - Simulação 1 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 350 Kgf
  - Simulação 2 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 500 Kgf
  - Simulação 3 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 700 Kgf
  - Simulação 4 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 1000 Kgf
  - Simulação 5 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 350 Kgf
  - Simulação 6 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 500 Kgf

- Simulação 7 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 700 Kgf
  - Simulação 8 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
    - Carga do obturador → 1000 Kgf
- Centralizada
    - Fixação:  $e, e', f$  e  $f'$ .
    - Forças
      - Simulação 9 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf
        - Carga do obturador → 350 Kgf
      - Simulação 10 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
        - Carga do obturador → 350 Kgf
      - Simulação 11 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf
        - Carga do obturador → 500 Kgf
      - Simulação 12 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
        - Carga do obturador → 500 Kgf
      - Simulação 13 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf
        - Carga do obturador → 700 Kgf
      - Simulação 14 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
        - Carga do obturador → 700 Kgf
      - Simulação 15 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf
        - Carga do obturador → 1000 Kgf
      - Simulação 16 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
        - Carga do obturador → 1000 Kgf

## Estudo 6

No Estudo 6 foram realizados 16 simulações, oito com carga na entrada e oito com a carga centralizada. Para esse estudo foram consideradas as estruturas da treliça (roxo), do obturador (laranja) e do braço (azul). Nesse modelo foram adicionados os cordões de solda (vermelho). Neste estudo, as cargas ocasionadas pela atuação do obturador foram aplicadas nos pontos  $c'$  e  $d'$ . E as fixações no espaço foram feitas nos pontos  $e$ ,  $e'$ ,  $f$  e  $f'$ . A diferença entre os Estudo 5 e o Estudos 6, está em relação a malha utilizada na discretização do domínio. Dos Estudos 1 a 5 foram utilizadas somente a malha sólida. Para este Estudo, na estrutura do braço foi utilizado a malha de viga, a fim de se diminuir o tempo de processamento e verificar se haveria algum tipo de modificação entre resultados do Estudo 5 e do Estudo 6.

Modelo utilizado: modelado diretamente no SolidWorks®.

Malha: Mista → Entrada: 82993 nós, 42160 elementos. | Centralizada: 83101 nós, 41973 elementos.

### Condições de Contorno

- Entrada
  - Fixação:  $e$ ,  $e'$ ,  $f$  e  $f'$ .
  - Forças
    - Simulação 1 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
      - Carga do obturador → 350 Kgf
    - Simulação 2 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
      - Carga do obturador → 500 Kgf
    - Simulação 3 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
      - Carga do obturador → 700 Kgf
    - Simulação 4 → P1: 350 Kgf | P2: 0 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
      - Carga do obturador → 1000 Kgf
    - Simulação 5 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
      - Carga do obturador → 350 Kgf

- Simulação 6 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Carga do obturador → 500 Kgf
- Simulação 7 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Carga do obturador → 700 Kgf
- Simulação 8 → P1: 250 Kgf | P2: 100 Kgf | P3: 0 Kgf | P4: 0 Kgf
  - Carga do obturador → 1000 Kgf
- Centralizada
  - Fixação:  $e$ ,  $e'$ ,  $f$  e  $f'$ .
  - Forças
    - Simulação 9 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf
      - Carga do obturador → 350 Kgf
    - Simulação 10 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
      - Carga do obturador → 350 Kgf
    - Simulação 11 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf
      - Carga do obturador → 500 Kgf
    - Simulação 12 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
      - Carga do obturador → 500 Kgf
    - Simulação 13 → P1:0Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf
      - Carga do obturador → 700 Kgf
    - Simulação 14 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
      - Carga do obturador → 700 Kgf
    - Simulação 15 → P1:0 Kgf | P2:350Kgf | P3:350Kgf | P4:0Kgf
      - Carga do obturador → 1000 Kgf
    - Simulação 16 → P1:100Kgf | P2:250Kgf | P3:250Kgf | P4:100Kgf
      - Carga do obturador → 1000 Kgf

## 4.5 Otimização

### 1ª Otimização

Para a primeira otimização fez-se um estudo com configuração de alta qualidade, utilizando variáveis discretas pela “Vista de tabela”, ou seja, com configurações de cenários pré-formatados. Tais cenários foram obtidos através da combinação de todos os perfis possíveis disponíveis no catálogo de tubos industriais padrões, utilizados pela Euronobre (Figura 50).

O objetivo desta configuração foi achar o perfil existente no mercado, que melhor serviria para substituir os perfis existentes. Como foram estudadas todas as combinações possíveis, o resultado desta otimização é o que é possível de ser construído sem ter que ser feito nenhum perfil especial de tubo.

Todas as otimizações foram feitas com o objetivo de minimizar a massa da treliça e manter um coeficiente de segurança para a estrutura acima de 2. Tal coeficiente de segurança foi estipulado pela empresa. Este limite deve ser seguido, pois um peso excessivo na estrutura acarretaria um aumento no custo global do equipamento.

Peso teórico kg/m																						
Bitola mm	Espessura mm																					
	0,90	1,06	1,20	1,50	1,90	2,00	2,25	2,65	3,00	3,35	3,75	4,25	4,50	4,75	5,00	5,40	5,60	6,30	7,30	8,00	9,50	
30 x 20	0,88	0,80	0,90	1,12	1,40	1,47	1,84	1,90	2,13													
35 x 25	0,83	0,97	1,09	1,35	1,70	1,78	1,99	2,32	2,60													
40 x 20	0,83	0,97	1,09	1,35	1,70	1,78	1,99	2,32	2,60	2,87	3,18											
40 x 30	0,97	1,13	1,28	1,59	1,99	2,09	2,34	2,73	3,07	3,40												
50 x 20	0,97	1,13	1,28	1,59	1,99	2,09	2,34	2,73	3,07	3,40												
50 x 30	1,11	1,30	1,47	1,82	2,29	2,41	2,69	3,15	3,54	3,92	4,35	4,88	5,14	5,39								
50 x 40		1,47	1,66	2,06	2,59	2,72	3,05	3,56	4,01	4,44	4,94	5,54	5,84	6,14								
60 x 30		1,47	1,66	2,06	2,59	2,72	3,05	3,56	4,01	4,44												
60 x 40		1,63	1,84	2,29	2,89	3,03	3,40	3,98	4,48	4,97	5,53	6,21	6,55	6,88								
70 x 30		1,63	1,84	2,29	2,89	3,03	3,40	3,98	4,48	4,97	5,53	6,21	6,55	6,88								
70 x 50		1,96	2,22	2,76	3,48	3,66	4,10	4,81	5,42	6,02	6,70	7,54	7,96	8,37	8,78	9,43	9,75	10,86				
80 x 40		1,96	2,22	2,76	3,48	3,66	4,10	4,81	5,42	6,02	6,70	7,54	7,96	8,37	8,78	9,43	9,75	10,86				
80 x 50						3,97	4,48	5,22	5,89	6,54	7,29	8,21	8,66	9,11								
80 x 80				3,23	4,08	4,29	4,81	5,64	6,36	7,07	7,87	8,87	9,37	9,86								
90 x 30			2,22	2,76	3,48	3,66	4,10	4,81	5,42	6,02	6,70	7,54	7,96	8,37								
100 x 40				3,23	4,08	4,29	4,81	5,64	6,36	7,07	7,87	8,87	9,37	9,86								
100 x 50				3,47	4,37	4,60	5,18	6,05	6,83	7,59	8,46	9,54	10,07	10,60	11,13	11,97	12,38	13,82				
100 x 60				3,70	4,67	4,91	5,51	6,47	7,29	8,12	9,05	10,20	10,78	11,35	11,91	12,81	13,28	14,81				
100 x 80				4,17	5,27	5,54	6,22	7,30	8,23	9,17	10,22	11,53	12,19	12,83	13,48	14,50	15,01	16,78				
120 x 40				3,70	4,67	4,91	5,51	6,47	7,29	8,12	9,05	10,20	10,78	11,35	11,91	12,81	13,28	14,81				
120 x 60				4,17	5,27	5,54	6,22	7,30	8,23	9,17	10,22	11,53	12,19	12,83	13,48	14,50	15,01	16,78	19,26	20,97	24,55	
120 x 80					5,86	6,17	6,92	8,13	9,17	10,22	11,40	12,87	13,59	14,32	15,04	16,19	16,77	18,75	21,55	23,48	27,53	
120 x 100						6,79	7,83	8,96	10,11	11,26	12,57	14,20	15,00	15,81	16,61	17,89	18,52	20,73	23,84	26,98	30,50	
140 x 60						6,17	6,92	8,13	9,17	10,22	11,40	12,87	13,59	14,32	15,04	16,19	16,77	18,75				
140 x 80						6,79	7,83	8,96	10,11	11,26	12,57	14,20	15,00	15,81	16,61	17,89	18,52	20,73				
150 x 50						6,17	6,92	8,13	9,17	10,22	11,40	12,87	13,59	14,32	15,04	16,19	16,77	18,75	21,55	23,48	27,53	
150 x 100									10,20	11,52	12,84	14,33	16,19	17,12	18,04	18,96	20,42	21,15	23,69	27,27	29,74	34,97
160 x 80									9,79	11,05	12,31	13,75	15,53	16,41	17,30	18,18	19,58	20,27	22,70	26,12	28,49	33,48
180 x 80									10,62	11,99	13,36	14,92	16,86	17,82	18,78	19,74	21,27	22,03	24,67	28,41	30,99	36,45
200 x 100									12,28	13,87	15,46	17,27	19,52	20,64	21,78	22,87	24,65	25,54	28,62	32,98	36,01	42,41

**Figura 50 – Catálogo de Perfis de Tubos Retangulares Padrões**  
 Fonte: Aços Continente (2014)

Total de cenários ativos: 553													
Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10	Cenário 11	Cenário 12	Cenário 13	Cenário 14
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>									
30mm	35mm	40mm	50mm	60mm	70mm	80mm	90mm	100mm	120mm	140mm	150mm	160mm	180mm
20mm	20mm	20mm	20mm	20mm	20mm	20mm	20mm	20mm	20mm	20mm	20mm	20mm	20mm
0.9mm	0.9mm	0.9mm	0.9mm	0.9mm	0.9mm	0.9mm	0.9mm	0.9mm	0.9mm	0.9mm	0.9mm	0.9mm	0.9mm

**Figura 51 – Amostra dos Cenários Utilizados na 1ª Otimização**

O programa calculou mais de duas mil combinações possíveis para os cenários de otimização, mas então foram selecionados um a um, os cenários que efetivamente representam perfis existentes no mercado. Após esta seleção restaram 553 cenários ativos, ou seja, que o programa iria considerar para as simulações, conforme Figura 51.

Para as simulações de otimização foi utilizado a configuração de entrada do carro na treliça, porque esta foi a situação que o modelo virtual mais se aproximou dos resultados de extensometria, com um erro médio de 17,7%.

## 2ª Otimização

Para a segunda otimização, foi utilizado a configuração de intervalo com variáveis contínuas e alta qualidade, conforme Figura 52. O programa fez 15 interações para chegar num resultado ótimo.

- Variáveis								
AT	Intervalo	▼	Mín.:	40mm	▲▼	Máx.:	100mm	▲▼
LT	Intervalo	▼	Mín.:	40mm	▲▼	Máx.:	200mm	▲▼
ET	Intervalo	▼	Mín.:	0.9mm	▲▼	Máx.:	9.5mm	▲▼
<i>Clique aqui para adicionar Variáveis</i>							▼	

**Figura 52 – Amostra dos Limites Utilizados na 2ª Otimização**

Para esta otimização também foram considerados os limites mínimos e máximos de dimensões disponíveis no catálogo de perfis. Foi utilizado o valor mínimo de largura e altura do tubo de 40 mm, pois valores inferiores a estes resultaram em erros de reconstrução do modelo virtual, ou falha estrutural. Esta opção foi feita também com base nos resultados obtidos na primeira otimização, em que se percebeu que estas dimensões, inferiores a 40 mm, também não alcançariam valores ótimos.

## 3ª Otimização

Para a terceira opção de otimização foi utilizado a opção de Valores discretos e Intervalo com etapa, primeiramente com resultados rápidos, e posteriormente com alta qualidade. O programa calculou 200 cenários ativos para os intervalos de

valores especificados na Figura 53, onde AL, LT e ET significam Altura do Tubo, Largura do Tubo e Espessura do Tubo, respectivamente.

Executar  Otimização Total de cenários ativos: 200

Variáveis

AT	Intervalo com eta <input type="checkbox"/>	Min.: 40mm <input type="checkbox"/>	Máx.: 80mm <input type="checkbox"/>	Etapa: 10mm <input type="checkbox"/>
LT	Intervalo com eta <input type="checkbox"/>	Min.: 40mm <input type="checkbox"/>	Máx.: 80mm <input type="checkbox"/>	Etapa: 10mm <input type="checkbox"/>
ET	Intervalo com eta <input type="checkbox"/>	Min.: 3mm <input type="checkbox"/>	Máx.: 4.75mm <input type="checkbox"/>	Etapa: 0.25mm <input type="checkbox"/>
<a href="#">Clique aqui para adicionar Variáveis</a> <input type="checkbox"/>				

**Figura 53 - Amostra dos Limites Utilizados na 3ª Otimização**

Nesta otimização objetivou-se encontrar configuração de tubo, com as dimensões de largura e altura dentro os limites que mais se sobressaíram nos outros dois estudos, mas com menor espessura.

## 5 TESTES COMPLEMENTARES

Durante a realização do trabalho foi verificada a necessidade de realização de alguns experimentos e simulações auxiliares a validação do modelo numérico.

Dessa forma, foram feitos ensaios de dureza, metalografias e simulações considerando um perfil diferente do especificado do projeto, porém com dimensões próximas das encontradas na estrutura da treliça após coleta de material.

Os ensaios de dureza, bem como as metalografias, foram realizados utilizando os equipamentos presentes no Laboratório de Materiais da UTFPR.

### 5.1 Metalografia

Para a realização da metalografia, seguiram-se os passos descritos pela literatura. Com uma caracterização da microestrutura do material presente no elevador, pode-se verificar se as divergências causadas entre valores obtidos no ensaio em campo, com os obtidos nas simulações, são resultantes devido a utilização de uma material (nas simulações) com propriedades diferentes.

A primeira etapa foi aquisição de amostras. Como a estrutura da treliça foi desmontada, essa etapa foi realizada diretamente na Empresa Euronobre, onde foram adquiridas amostras dos tubos superiores e inferiores da estrutura, no local onde foram realizadas as medições de extensometria. A Figura 54 mostra as amostras adquiridas.



**Figura 54 – Amostras coletadas na Euronobre**

Após se ter em mãos amostras dos tubos da estrutura, foram embutidas duas amostras, conforme Figura 55.



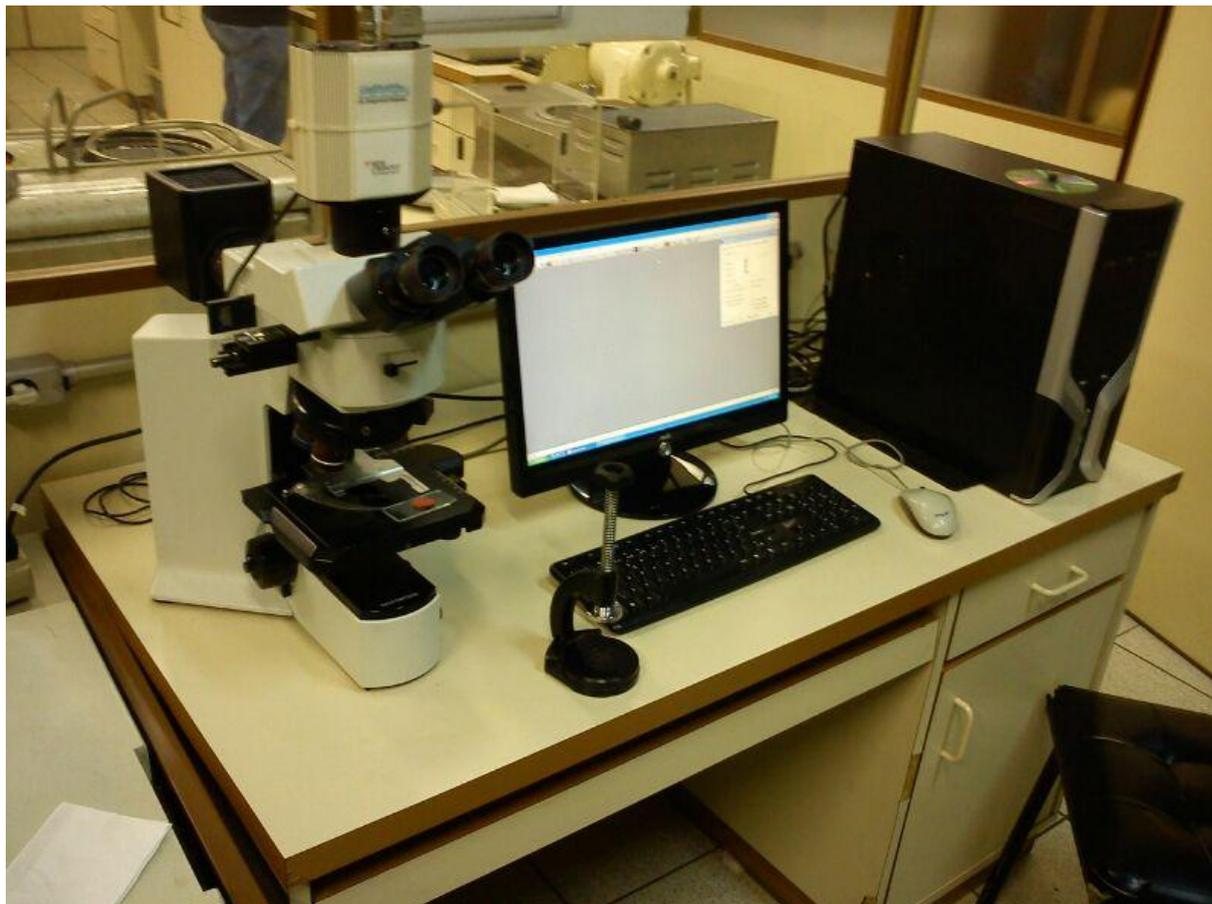
**Figura 55 – Amostras embutidas.**

Com as amostras preparadas, realizou-se a adequação da superfície, realizando lixamento e polimento das mesmas.

O lixamento foi realizado com lixas de granulometria que variaram de 80 a 600. O polimento foi feito em alumina 0,5  $\mu\text{m}$ .

Com as superfícies preparadas realizou-se o ataque químico, com o reagente Nital 0,2%, para que fosse possível verificar a microestrutura no microscópio.

Feito o ataque, pode-se então adquirir imagens utilizando um microscópio modelo U-25LBD Olympus SC30, com lente MPlanFL N UIS2, com aumento de 1000 vezes. A Figura 56 corresponde ao equipamento utilizado, que se encontra no laboratório de materiais da UTFPR.



**Figura 56 – Microscópio Laboratório de Materiais UTFPR**

## **5.2 Ensaio de Dureza**

Na necessidade de se caracterizar melhor o material presente na estrutura da treliça, um ensaio de dureza foi feito. Para isso, as amostras preparadas para a metalografia foram aproveitadas.

Foi feito um ensaio de microdureza, utilizando o equipamento EMCOTEST M4C 025 G3M, mostrado na Figura 57.



**Figura 57 – Equipamento Microdureza**

Para a análise de dureza, o equipamento foi ajustado para uma carga de 10 Kgf, e com o microscópio e *software* presentes no equipamento, foram feitas as análises e cálculos necessários, retornando os valores de dureza em *Vickers* para o material.

### **5.3 Simulações com Perfil Modificado**

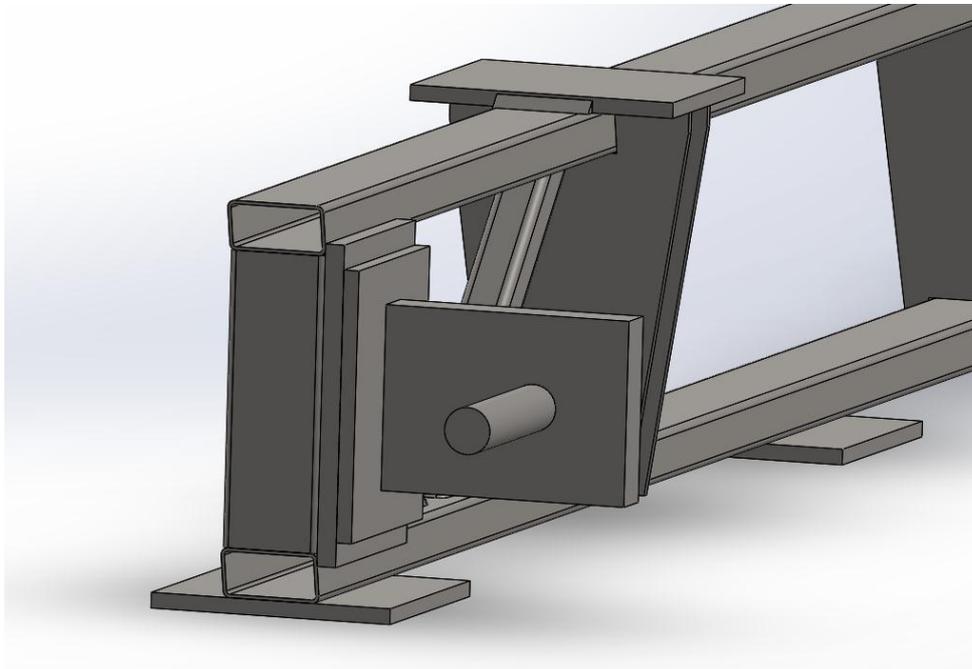
Após a coleta de amostras da estrutura pode-se perceber que o perfil estava deformado. Dessa forma, foi feita a medição do perfil e modelado uma estrutura com perfil para os tubos, similar ao real.

O perfil coletado pode ser observado na Figura 58.



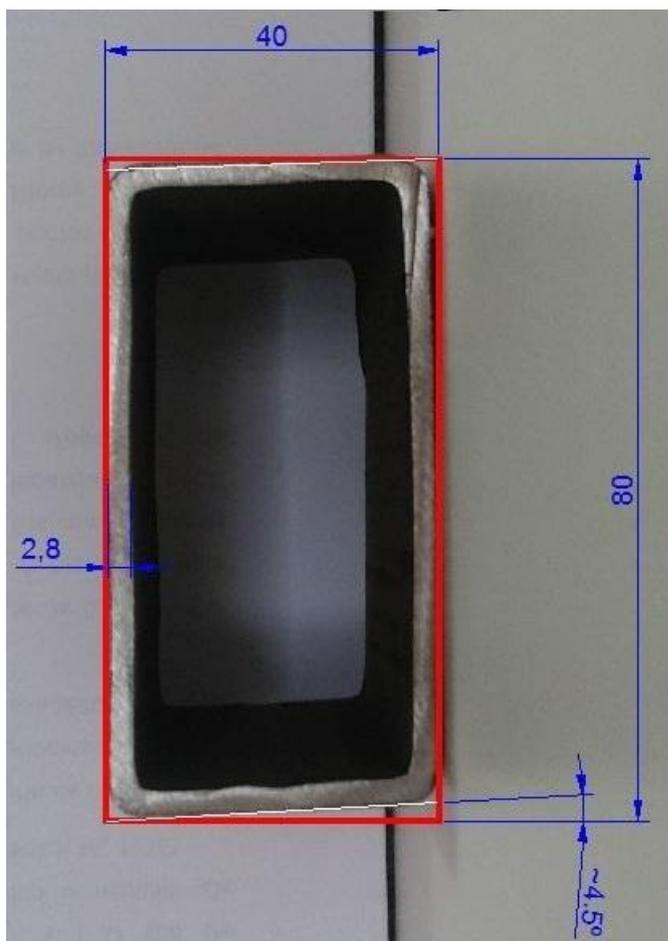
**Figura 58 – Perfil Coletado**

A estrutura modelada pode ser observada na Figura 59.



**Figura 59 – Estrutura modelada com perfil deformado.**

As condições de simulação para esse estudo foram as mesmas feitas para o Estudo 6, mostrado no capítulo anterior. Porém, nesse caso o que houve de diferença foi o fato dos perfis estarem modificados, não possuindo a forma de projeto, Retangular 80x40mm com espessura de 3mm, mas sim as dimensões verificadas na Figura 60.



**Figura 60 – Análise Perfil Real da Estrutura da Trelça do Elevador**

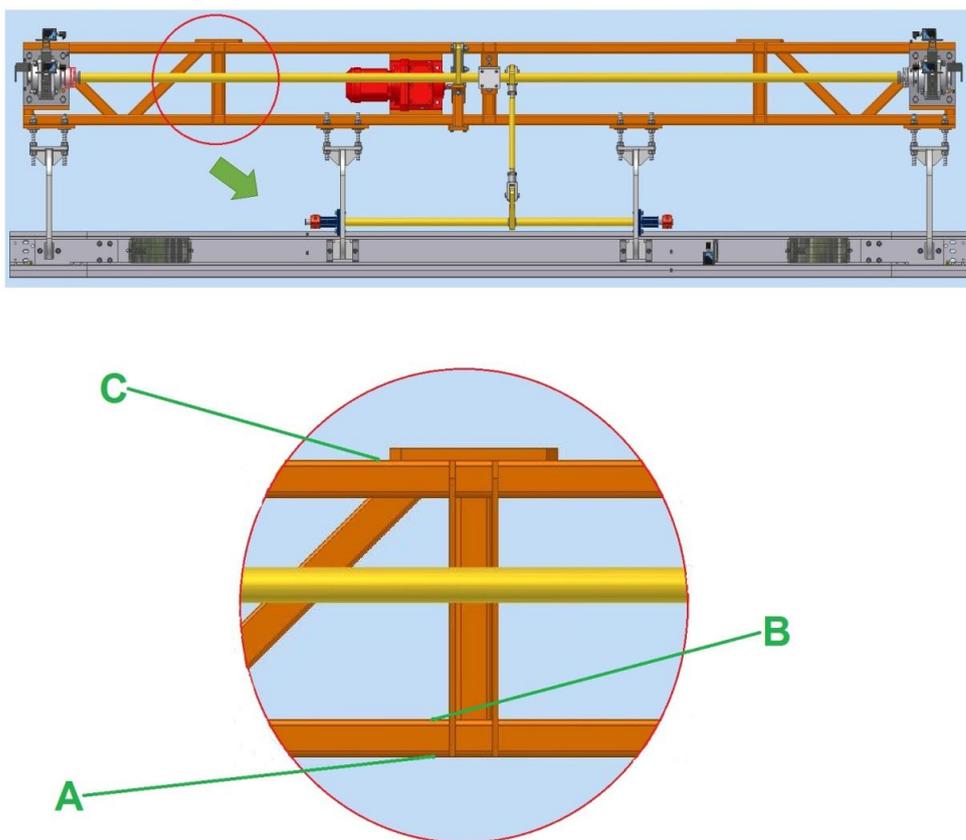
Além das deformações de forma do perfil, viu-se que a espessura variava bastante, chegando a valores de 2,8mm. Assim, no modelamento do perfil deformado, considerou-se como espessura total o valor anterior.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes ao ensaio experimental no qual foram obtidas as deformações ocasionadas pelo carregamento aplicado. É apresentada também a validação do modelo numérico considerando todo o processo de aperfeiçoamento do modelo a partir de dados reais. Finalmente, os resultados de otimização propondo uma estrutura mais eficiente em relação a atual.

### 6.1 Aquisição de Dados

Como descrito anteriormente, foram coletados valores de deformação por extensometria para três pontos previamente definidos. A localização de cada um dos pontos pode ser observada na Figura 61.



**Figura 61 – Posição de Medição**

As Tabelas de 6 a 8 mostram os valores de deformação coletados para os pontos A à C, respectivamente.

**Tabela 6 – Deformação Ponto A**

<b>Nº da medição</b>	<b>Deformação Entrada (V)</b>	<b>Deformação Centro (V)</b>
<b>1</b>	1,13	0,93
<b>2</b>	1,13	0,92
<b>3</b>	1,13	0,92
<b>4</b>	1,13	0,92
<b>5</b>	1,13	0,92
<b>6</b>	1,13	0,92
<b>7</b>	1,13	0,92
<b>8</b>	1,13	0,92
<b>9</b>	1,13	0,93
<b>10</b>	1,13	0,92
<b>Média (V)</b>	1,13	0,922
<b>Média (<math>\mu\text{m/m}</math>)</b>	565	461

Tabela 7 – Deformação Ponto B.

Nº da medição	Deformação Entrada (V)	Deformação Centro (V)
1	-0,48	-0,86
2	-0,48	-0,87
3	-0,48	-0,87
4	-0,48	-0,87
5	-0,48	-0,87
6	-0,48	-0,87
7	-0,48	-0,87
8	-0,48	-0,87
9	-0,48	-0,87
10	-0,48	-0,87
<b>Média (V)</b>	-0,48	-0,869
<b>Média (<math>\mu\text{m/m}</math>)</b>	-240	-434,5

**Tabela 8 – Deformação Ponto C.**

<b>Nº da medição</b>	<b>Deformação Entrada (V)</b>	<b>Deformação Centro (V)</b>
<b>1</b>	-0,66	-0,52
<b>2</b>	-0,66	-0,51
<b>3</b>	-0,66	-0,51
<b>4</b>	-0,66	-0,51
<b>5</b>	-0,66	-0,52
<b>6</b>	-0,66	-0,51
<b>7</b>	-0,66	-0,51
<b>8</b>	-0,66	-0,52
<b>9</b>	-0,66	-0,51
<b>10</b>	-0,66	-0,51
<b>Média (V)</b>	-0,66	-0,513
<b>Média (<math>\mu\text{m/m}</math>)</b>	-330	-256,5

Ao se observar os valores adquiridos, pode-se perceber a pequena ou nenhuma variação de dados entre as dez medições realizadas para cada um dos casos. Houve uma variação máxima de 1,3% entre a média e o valor medido.

Embora alguns fatores como: ruído, interferência elétrica, ambiente agressivo, variação de temperatura e umidade, entre outros, possam gerar erros na medição, é observado que a pequena variação entre valores para as medições, pode ser um indicativo que esses fatores não tenham influenciado nos dados obtidos.

Um fator a ser considerado, além dos citados, é a tensão elétrica onde o equipamento de medição foi ligado, porém, esse fator foi minimizado quando se utilizou uma fonte simétrica, que permitiu regular a tensão do aparelho entre os limites de -24V e 24V.

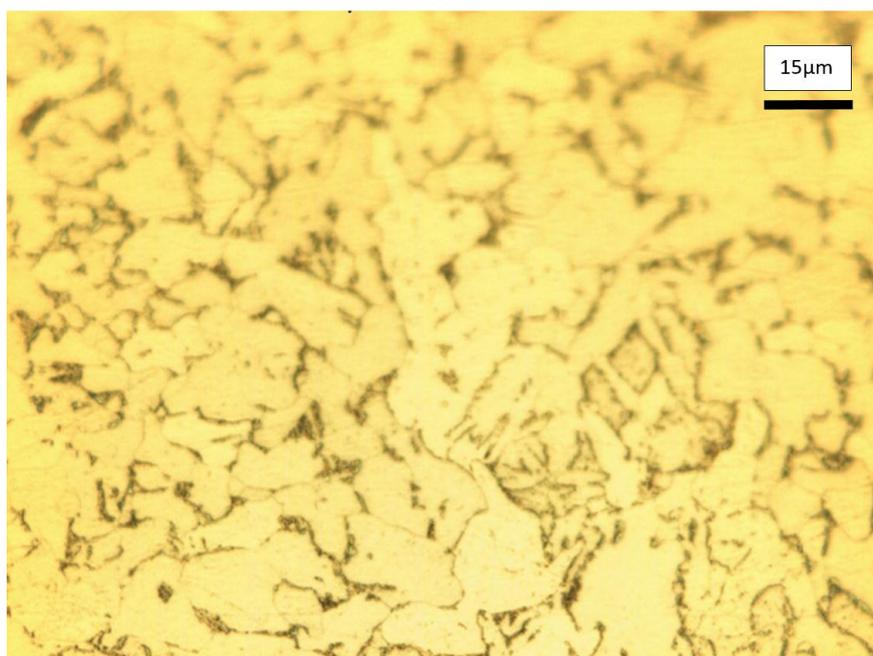
Com esses dados relacionados, o próximo passo é a obtenção de valores nas simulações virtuais para a validação do modelo matemático. Durante as simulações verificou-se a necessidade de se realizar testes complementares.

## 6.2 Testes complementares

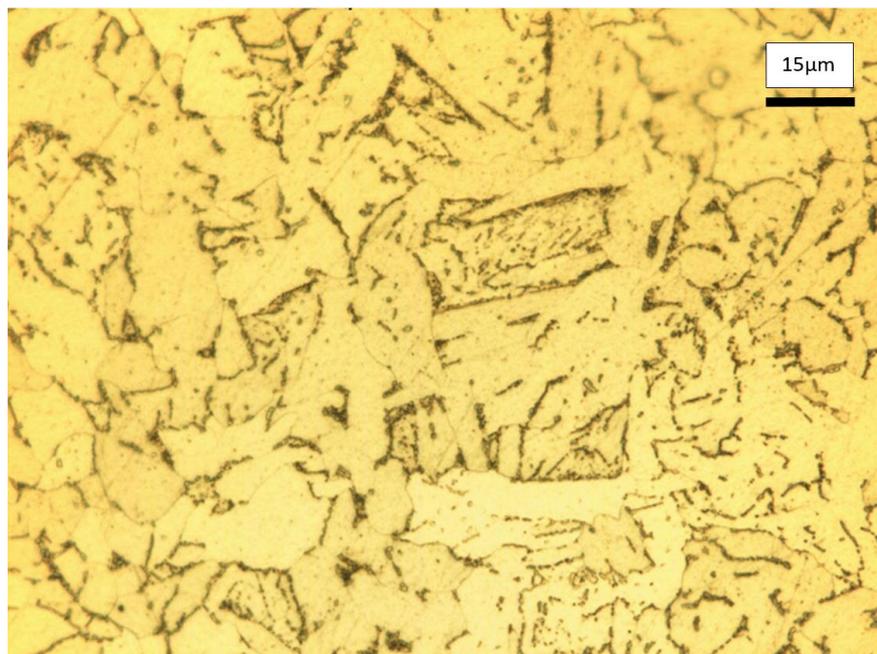
Na busca de justificativas para a divergência durante a validação do modelo matemático, algumas análises rápidas foram feitas sobre a estrutura. Apresentamos esta seção antes dos resultados de validação devido a necessidade de se expor na próxima seção dados verificados nos testes complementares.

### 6.2.1 Metalografia e Ensaio de Dureza

Com as partes coletadas da estrutura, pode-se realizar metalografia e ensaio de dureza no material. Na Figura 62 e na Figura 63 são apresentadas as microestruturas dos aços presentes no tubo inferior e superior da treliça, respectivamente.



**Figura 62 – Microestrutura Material Tubo Inferior**



**Figura 63 – Microestrutura Material Tubo Superior**

Sabe-se que para uma composição detalhada do material presente nos tubos das treliças seria necessário realizar uma análise química da composição, ensaio que não pode ser realizado durante a realização do presente trabalho, porém, realizando uma análise visual das imagens obtidas, juntamente com especialista da área, pode-se concluir que o material é um aço baixo carbono. E a configuração da estrutura, com o carbono nos contornos de grão, evidencia o processo de fabricação dos tubos, que foi por processo de laminação a quente, onde o resfriamento do material é lento.

Outro fator que se levou em consideração para caracterizar o material como um aço baixo carbono foram os resultados de dureza. A Tabela 9 mostra os valores médios obtidos para o material de cada um dos tubos.

**Tabela 9 – Resultado Ensaio de Dureza**

<b>Tubo</b>	<b>Dureza (Vickers)</b>
<b>Inferior</b>	170,5 HV
<b>Superior</b>	162,5 HV

De acordo com a literatura, para um aço baixo carbono, do tipo AISI 1020, a dureza varia entre aproximadamente 158 e 264 Vickers, o que mostra que a hipótese de se ter um material muito diferente do especificado no projeto não ser válida.

### **6.2.2 Simulação com perfil deformado**

Além dos ensaios com o material, uma simulação considerando o tubo com perfil deformado, conforme Figura 59 foi realizada. Com esse estudo, pode-se notar uma melhor aproximação entre os dados obtidos em campo e o modelo numérico. Acredita-se que o perfil do tubo deformado não se manteve constante por toda estrutura o que tornaria necessário. Mapear por completo o perfil ao longo do comprimento a treliça para um ajuste numérico x experimental ainda melhor.

### **6.3 Validação e Desenvolvimento do Modelo Matemático**

Nesta seção são mostrados os resultados obtidos nas simulações, que apresentaram melhor configuração de convergência para as condições de entrada e de carga centralizada. Estes resultados, em destaque no apêndice, foram selecionados analisando-se os resultados de todos os casos descritos na Seção 4.4. Os resultados de todas as simulações estão no APÊNDICE A – RESULTADOS ESTUDOS .

Os resultados a seguir referem-se as simulações realizadas, conforme explicado na Seção 4.4, entenda-se por Estudo 7 as simulações realizadas com o tubo deformado conforme descrito na seção 5.3. Tal estudo foi feito exclusivamente para a validação do modelo matemático, sendo a posterior otimização realizada com o modelo virtual do Estudo 6 (tubo não deformado). Na Figura 64 até a Figura 69 a linha denominada “Média” corresponde ao resultado médio obtido na extensometria, e a linha denominada “Deformação Média” corresponde ao resultado obtido na simulação.

#### **6.3.1 Entrada do Carro**

Para a entrada do gancho a configuração que mais se aproximou do resultado da extensometria foi com 350 Kgf aplicados no Ponto 1, e mais nenhuma carga



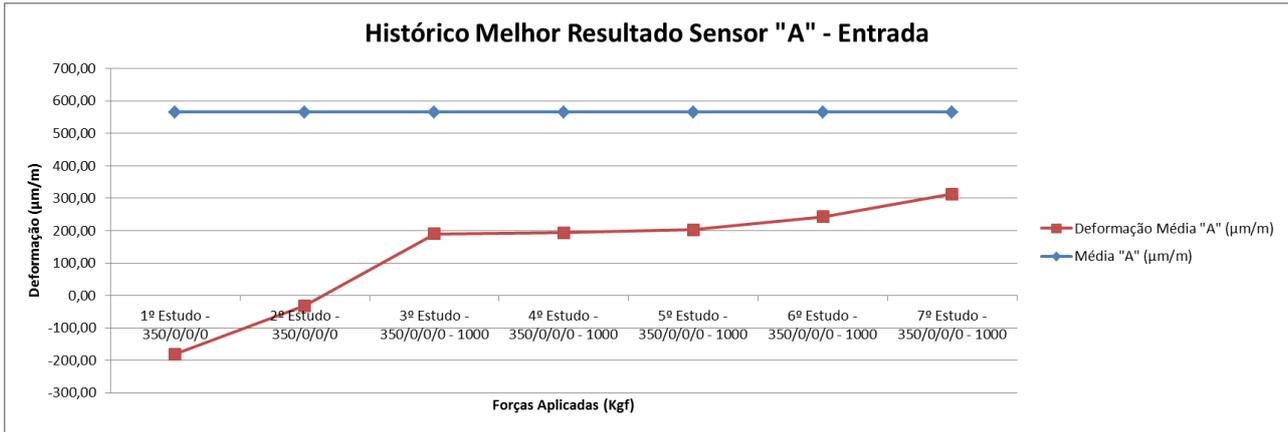


Figura 64 - Histórico Melhor Resultado Sensor "A" – Entrada

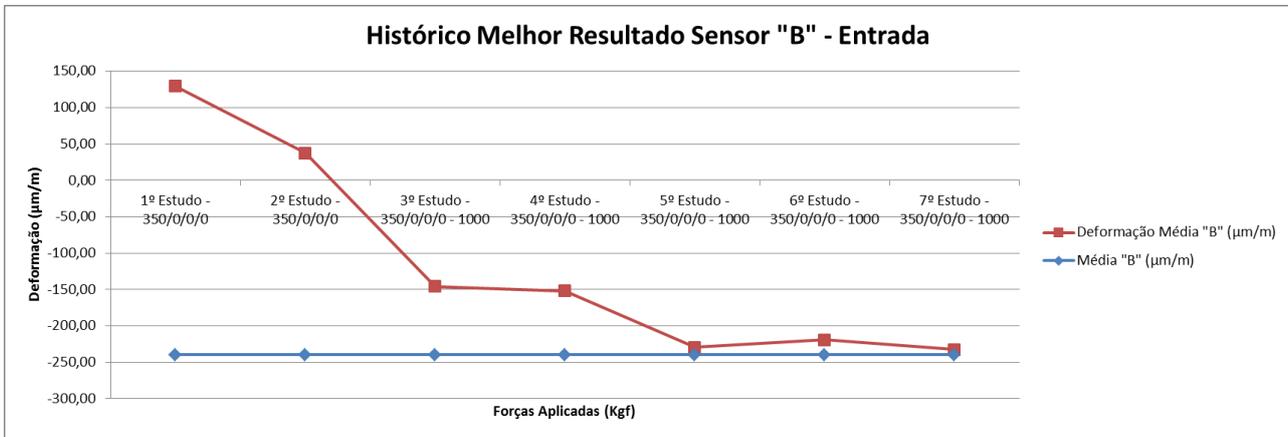


Figura 65 - Histórico Melhor Resultado Sensor "B" – Entrada

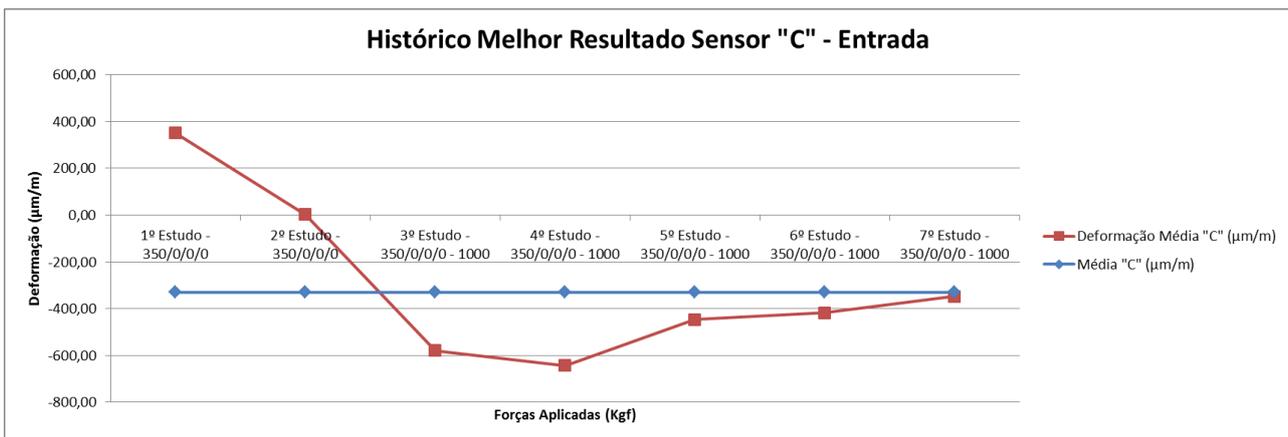


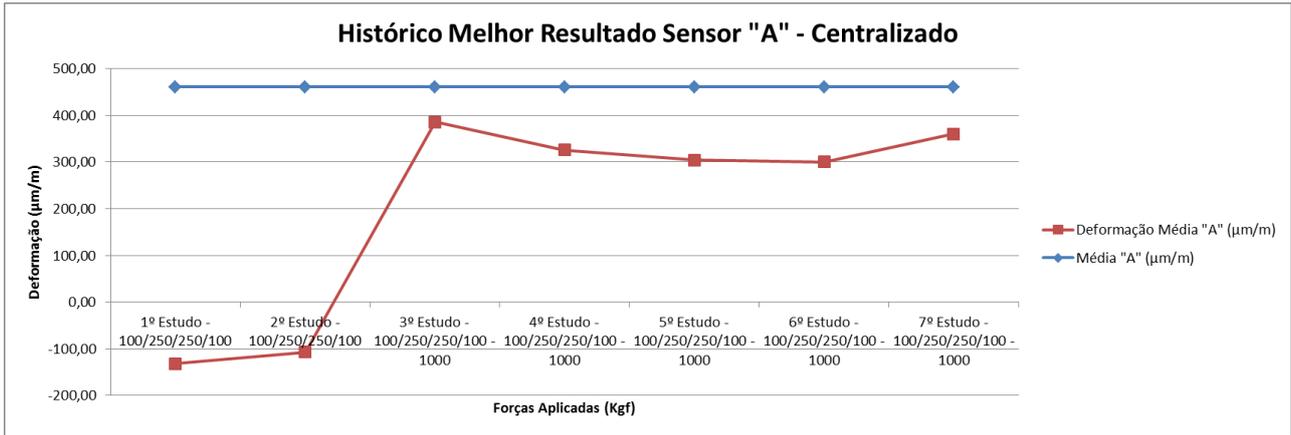
Figura 66 - Histórico Melhor Resultado Sensor "C" – Entrada

No gráfico da Figura 64, pode-se perceber que a diferença entre dados reais com os virtuais diminuiu no decorrer dos estudos. A partir do terceiro estudo, tanto para o Ponto A, quanto para os demais, há uma melhor aproximação dos valores, bem como do comportamento da estrutura, que estava sendo comprimida e passou a ser tracionada, neste ponto. Isso mostra que a carga atuante do obturador tem grande influência na estrutura da treliça. Para o Ponto A, mesmo no avanço dos Estudos, pode-se notar que a diferença continuou sendo significativa. Na média, o valor de deformação para a estrutura real neste ponto foi de  $565 \mu\text{m/m}$ , e para a simulação com maior aproximação foi de  $312,67 \mu\text{m/m}$ . O fato de este ponto conter uma maior diferença pode ser explicado analisando-se a configuração da treliça. Pode-se observar que a localização do Ponto A é na superfície inferior do tubo de baixo, ou seja, é uma superfície livre, que conta somente com as paredes do tubo para dá-la rigidez. Dessa forma, como foi observado no tubo coletado, esta superfície tendeu a ir em direção à superfície superior do tubo devido a torção causada na estrutura, ou seja, como foi dito, por se tratar de uma superfície livre, com a aplicação de carga a superfície que continha o Ponto A, por possuir menor rigidez, sofreu mais deformação, o que agravou-se com o tempo devido a distorção que ocorreu na seção transversal do tubo, tornando as paredes do tubo que mantinham essa superfície rígida, menos atuantes. A Figura 60 mostra como o tubo estava deformado. Esse fato pode ser utilizado para justificar a deformação maior no caso real do que no virtual.

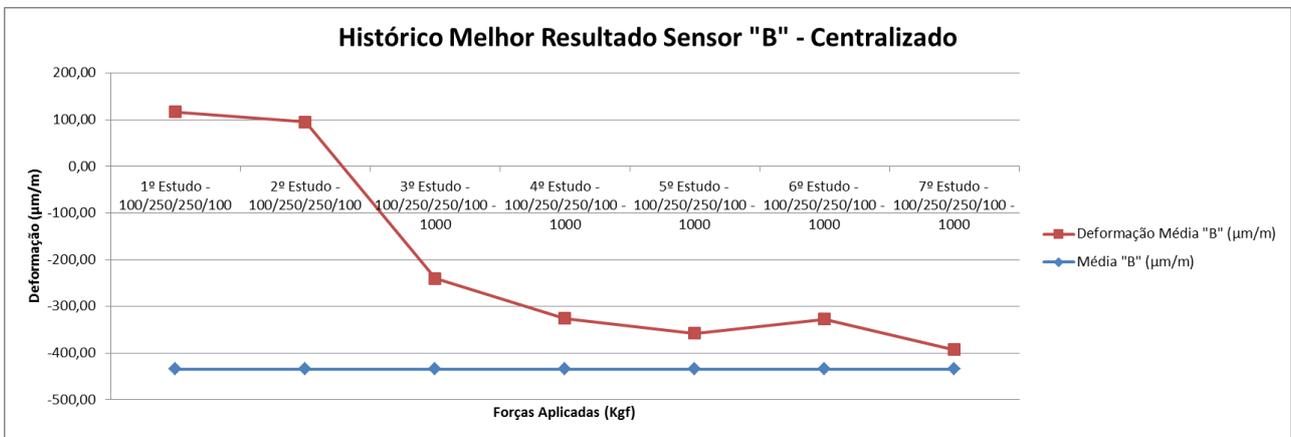
Para o gráfico do Ponto B, Figura 65, pode-se observar o mesmo comportamento das simulações para os estudos no Ponto A, havendo grande aproximação no momento que se considerou a atuação do obturador, fazendo com que o comportamento que antes era de tração, passa-se para compressão, como na realidade, porém, a diferença final entre o caso real e virtual foi bem menor, sendo de  $-240 \mu\text{m/m}$  no real, para um valor médio de  $-232,67 \mu\text{m/m}$  nas simulações.

O Ponto C, que pode ter o gráfico observado na Figura 66, possuía um comportamento contrário até o momento que se considerou a atuação do obturador. Até o Estudo 2, pode-se observar que há tração neste ponto. Com a atuação do obturador, este ponto passou a sofrer compressão, como observado na medição

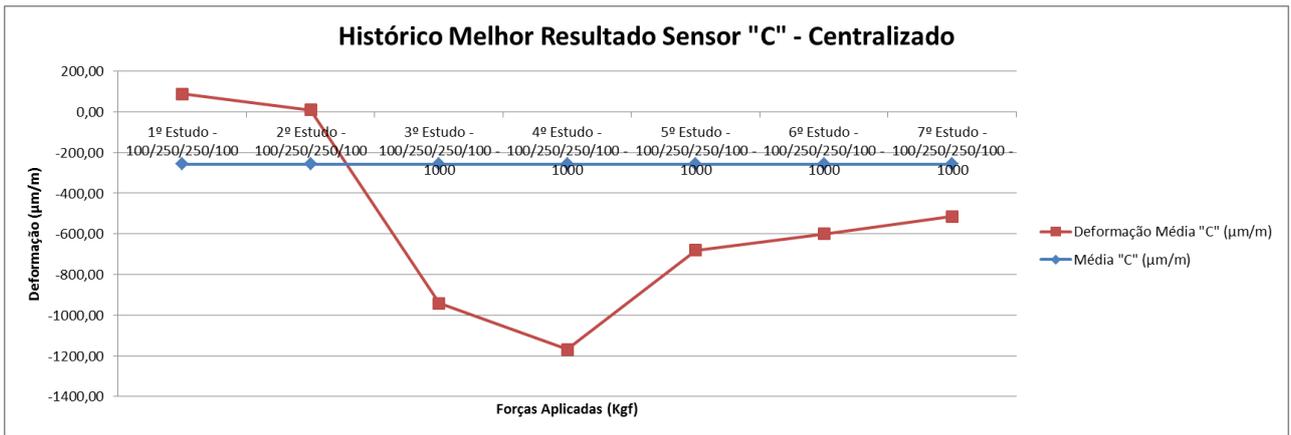




**Figura 67 - Histórico Melhor Resultado Sensor "A" – Centralizado**



**Figura 68 - Histórico Melhor Resultado Sensor "B" – Centralizado**



**Figura 69 - Histórico Melhor Resultado Sensor "C" – Centralizado**

Nos estudos realizados para a condição de gancho centralizado na estrutura do elevador, pode-se verificar que para os três pontos a diferença entre os valores coletados nos ensaios com extensometria e os obtidos nas simulações apresentaram uma diferença maior se comparados aos dados com gancho na entrada do elevador. Contudo, o Ponto B apresenta uma diferença muito pequena. a análise feita para a divergência do Ponto A no caso anterior pode ser utilizada para justificar as divergências nos Pontos A e C. Pode-se julgar a diferença em C ter aumentado devido ao aumento de torção que este passa a ter, já que com o gancho centralizado, os braços do elevador passam a atuar mais na estrutura, devido a maior carga que a treliça passa a receber.

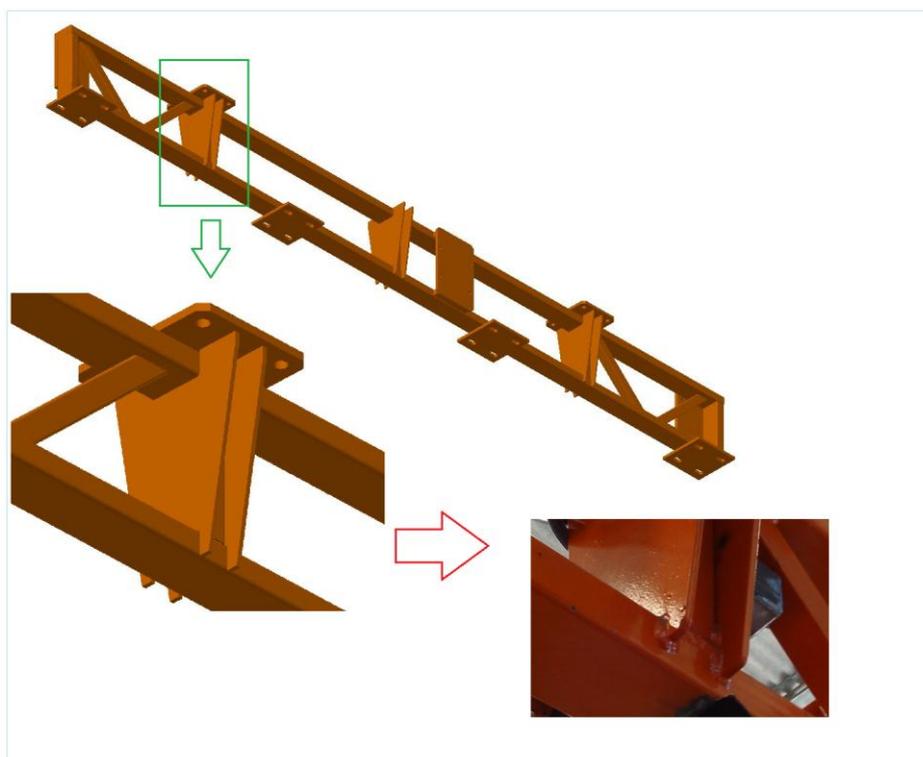
Na Figura 67, pode-se observar o gráfico resultante dos estudos para o Ponto A. A tendência de comportamento das retas em vermelho, acompanham o que foi observado nos estudos de gancho na entrada. Os valores médios obtidos para este ponto foram na extensometria  $461\mu\text{m}/\text{m}$  e no estudo com tubo torto, Estudo 7,  $360\mu\text{m}/\text{m}$ .

O gráfico obtido das simulações para o Ponto B é apresentado na Figura 68. Como descrito anteriormente, este foi o ponto que mais convergiu em todas as simulações. Os dados obtidos para este ponto, na média, foram  $-434,5\mu\text{m}/\text{m}$  nos ensaios e  $-392,67\mu\text{m}/\text{m}$  nas simulações. Como no caso de gancho na entrada, pode-se observar que até o momento de aplicação de carga do obturador, este ponto apresentou além de divergência de valores, comportamento diferente do que foi observado na realidade, onde primeiramente, pode-se observar tração ao invés de compressão.

Para o Ponto C, tem-se a Figura 69 representando o gráfico obtido como resultado das simulações. Neste ponto o valor médio coletado no estudo de campo foi  $-256,5\mu\text{m}/\text{m}$  e das simulações obteve-se para o melhor estudo uma deformação média de  $-514\mu\text{m}/\text{m}$ . Como dito anteriormente, pode-se verificar uma maior atuação de ambos os braços do elevador na estrutura com o gancho centralizado, o que na simulação aumentou a diferença entre deformações por compressão comparada à realidade. Além disso, a estrutura real apresentava folgas, nos componentes atrás do braço, ou seja, o carro do elevador. Este fato faz com que a deformação na treliça seja “absorvida” pelas folgas. Esse tipo de comportamento torna-se muito

complicado de ser inserido nas simulações, fazendo com que as condições de fixação do modelo virtual e do real fossem diferentes.

Tanto para os estudos com gancho na entrada ou centralizado, alguns fatores que ocorrem na realidade não puderam ser transferidos às simulações. Pode-se citar além dos já mencionados, como folgas e perfil distorcido do tubo, o fato de a estrutura analisada não ser uma estrutura nova, ou seja, a estrutura de onde se baseou os estudos de simulação apresentava comportamento único, devido ao grande tempo de trabalho que esta foi submetida. Outro fator a ser analisado, é o modo de fabricação e montagem da treliça. Como exemplo, tem-se a Figura 70, onde se pode observar a diferença entre o que foi projetado e o que foi fabricado. Pode-se observar que as chapas utilizadas na treliça não estão soldadas como o projeto exigia. Esta diferença foi observada pelas imagens, em um momento no qual não era mais possível verificar outras diferenças, devido ao fato de a estrutura do elevador na Empresa Euronobre já ter sido desmontada.



**Figura 70 – Diferença entre projeto e fabricação.**

## 6.4 Otimização

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos nas otimizações, que apresentaram melhor configuração de segurança e minimização de massa para as condições de entrada. Estes resultados, em destaque nas seguintes tabelas: **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, foram selecionados analisando-se os resultados de todos os casos descritos na seção 4.5.

Os coeficientes de segurança das novas estruturas foram calculados segundo o critério de falha de Von Mises, no qual foram calculadas as tensões resultantes por este critério, e avaliadas com a tensão de escoamento do material. Um exemplo disto pode ser visto na Figura 71.

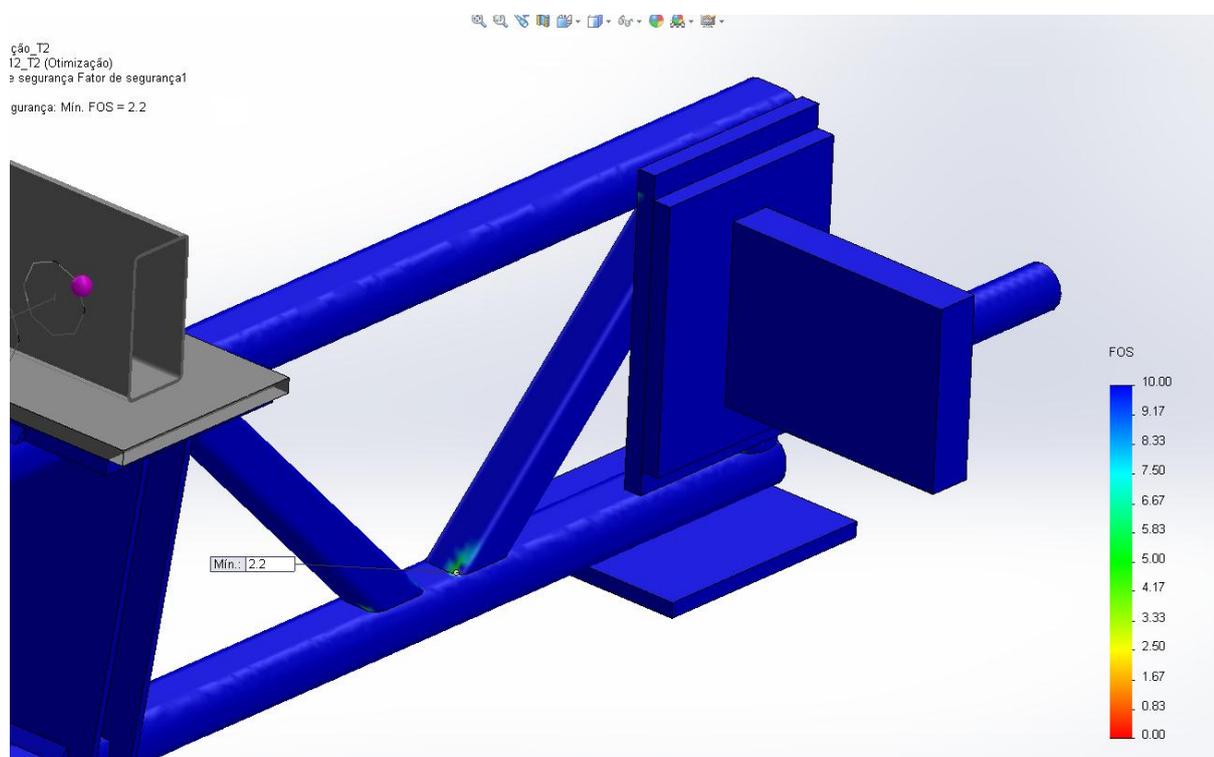


Figura 71 - Cálculo do Coeficiente de Segurança

### 1ª Otimização

O resultado da primeira otimização está na Tabela 12. Nele é possível verificar as condições resultantes do perfil ótimo. A partir do estudo de otimização chegou-se

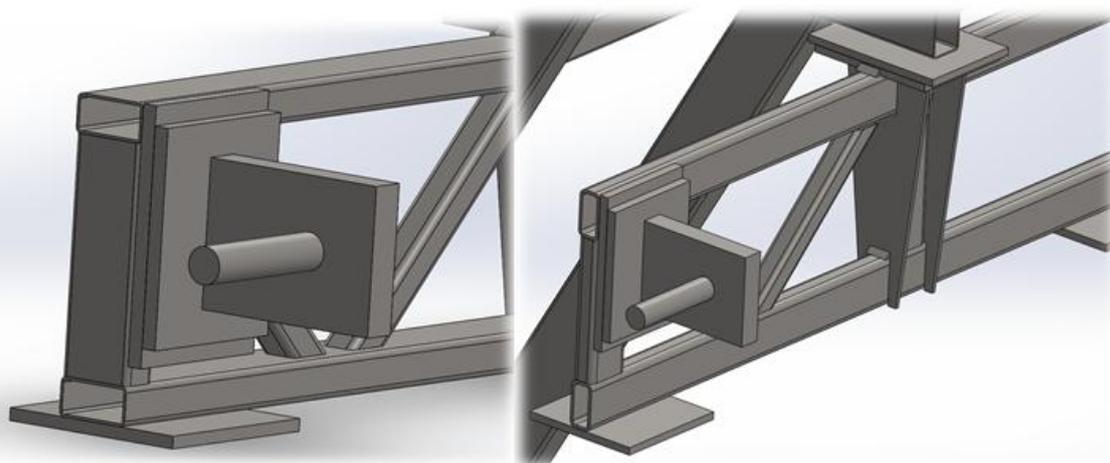
a conclusão que o melhor perfil disponível foi um perfil de 80 mm de altura, 40 mm de largura e 5,4 mm de espessura. Lembrando que este é o melhor perfil disponível no mercado. A estrutura ótima resultante ficou com 154,4 Kg, contra os 126,2 Kg atuais. Isto pode demonstrar que o perfil utilizado atualmente foi subdimensionado. Tal fato pode ser evidenciado pelos reforços que foram acrescentados à estrutura durante a sua ciclagem.

A estrutura resultante alcançou um coeficiente de segurança de 2,2. Acima do limite de 2, estipulados para a otimização. Foram calculadas também as deformações nos mesmos pontos em que foram medidas por extensometria.

A Figura 72 apresenta a estrutura original à esquerda, e a estrutura otimizada à direita para comparação.

**Tabela 12 - Cenários Pré-formatados**

1ª Otimização - Cenários Pré-formatados						
Estrutura	Estrutura Real			Estrutura Otimizada		
Medidas Tubo (mm)	LT=80	AT=40	ET=3,0	LT=40	AT=80	ET=5,4
Peso Resultante da Estrutura	P=126,2 Kg			P=154,4 Kg		
Coeficiente de Segurança	Projeto Euronobre			CS = 2,2		



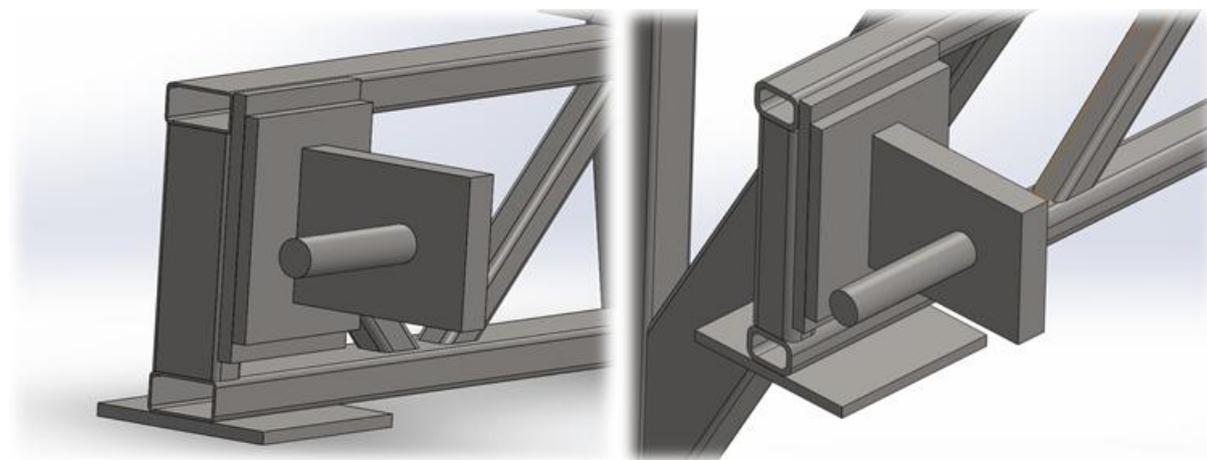
**Figura 72 - Estrutura 1ª Otimização**

## 2ª Otimização

O resultado da segunda otimização está na Tabela 13. Nela é possível verificar as condições resultantes do perfil ótimo, como este seria se existisse tal perfil no mercado. A partir do estudo de otimização chegou-se a conclusão que o melhor perfil disponível foi um perfil de 40 mm de altura, 60 mm de largura e 6,5 mm de espessura. Lembrando que este perfil não está disponível no mercado. A estrutura ótima resultante ficou com 148,6 Kg. A estrutura resultante alcançou um coeficiente de segurança de 2,0. Exatamente no valor limite estipulado para a otimização. Foram calculadas também as deformações nos mesmos pontos em que foram medidas por extensometria. A Figura 73 apresenta a estrutura original à esquerda, e a estrutura otimizada à direita para comparação.

**Tabela 13 - Cenários Interpolados**

2ª Otimização - Cenários Interpolados						
Esturture	Estrutura Real			Estrutura Otimizada		
Medidas Tubo (mm)	LT=80	AT=40	ET=3,0	LT=60	AT=40	ET=6,5
Peso Resultante da Estrutura	P=126,2 Kg			P=148,6 Kg		
Coefficiente de Segurança	Projeto Euronobre			CS = 2,0		



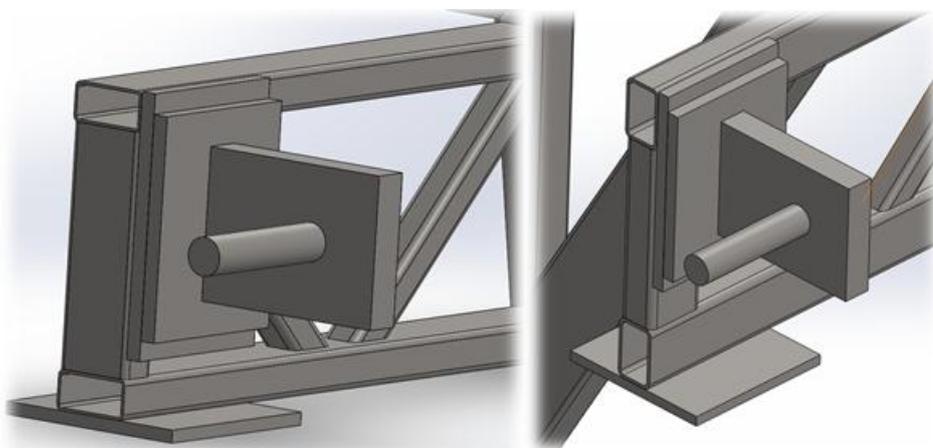
**Figura 73 - Estrutura 2ª Otimização**

### 3ª Otimização

O resultado da terceira otimização está na Tabela 14. Nela é possível verificar que não foram alcançadas as condições resultantes do perfil ótimo, pois o resultado com o maior coeficiente de segurança não foi o suficiente para se chegar no limite estipulado. A partir do estudo de otimização chegou-se a conclusão que o melhor perfil disponível nesta faixa foi de 80 mm de altura, 50 mm de largura e 4,5 mm de espessura. A melhor estrutura desta faixa ficou com 150,6 Kg. A estrutura resultante alcançou um coeficiente de segurança de 1,88. Abaixo do limite de 2, estipulados para a otimização. Foram calculadas também as deformações nos mesmos pontos em que foram medidas por extensometria. A Figura 74 apresenta a estrutura original à esquerda, e a estrutura otimizada à direita para comparação.

**Tabela 14 - Cenários Mistos**

3ª Otimização - Cenários Mistos						
Estrutura	Estrutura Real			Estrutura Otimizada		
Medidas Tubo (mm)	LT=80	AT=40	ET=3,0	LT=50	AT=80	ET=4,5
Peso Resultante da Estrutura	P=126,2 Kg			P=150,6 Kg		
Coeficiente de Segurança	Projeto Euronobre			CS = 1,88		



**Figura 74 - Estrutura 3ª Otimização**

## 7 CONCLUSÕES

Após a realização de todas as etapas do trabalho, conclui-se primeiramente que a atuação de um engenheiro na realização de um projeto é muito importante, e que este possui responsabilidade sobre todas as variáveis que cercam um problema.

A fase de concepção de um projeto deve atender muitos requisitos, e sua completa compreensão torna, além de bem executado, o projeto confiável.

Na realização de captura de dados na estrutura presente na Euronobre, pôde-se perceber a dificuldade de realizar experimentos em campo, porém, os dados obtidos mostraram valores constantes durante a medição, dessa forma a adequação do modelo virtual em relação aos valores retornados pela extensometria, para este trabalho, tornou-se de suma importância, visto que esta etapa do trabalho foi considerada confiável.

A validação do modelo matemático, buscando atingir os valores obtidos em campo, mostrou-se exaustiva, e observou-se que muitos parâmetros e condições bruscas do meio onde o elevador estava instalado eram difíceis, ou até mesmo impossíveis, de serem inseridas no modelo virtual. Com o desenrolar das simulações, o correto comportamento da estrutura pode ser entendido, e a diferença entre os valores real e virtual diminuiu relevantemente, mostrando a tendência de convergência entre os valores, porém, chegou-se a um limite onde não se conseguiu mais inserir condições de contorno que alterassem de maneira significativa os resultados de simulação.

Mesmo com as divergências de valores, após todos os estudos e testes realizados a validação do modelo virtual foi considerada aceitável.

Com o modelo virtual validado, realizou-se a otimização, utilizando das ferramentas contidas no SolidWorks®. Com o aumento da altura do perfil, pode-se verificar a necessidade em diminuir os efeitos de flexão, assim como, para um tubo com espessura de parede maior, os efeitos de torção são minimizados.

Contudo, observou-se um aumento na massa da treliça, de 126,2Kg para 154,4Kg, o que corresponde um aumento de 22%, assim, conclui-se que a estrutura

projetada estava subdimensionada, algo que foi evidenciado pelo acréscimo de reforços, não previstos no projeto inicial.

Como conclusão final, a realização do trabalho mostrou-se muito proveitosa para a Empresa Euronobre, que pode utilizar este trabalho na concepção de novos projetos.

O fato da estrutura analisada já ter sido testada continuamente na empresa traz muitas incertezas para a simulação, assim, como sugestão inicial, deve-se realizar todos os ensaios de extensometria numa estrutura nova.

Outra sugestão é a realização de um estudo mais aprofundado sobre a influência do obturador no comportamento da estrutura, buscando até, uma otimização desse equipamento auxiliar.

Outra ideia para a estrutura da treliça seria uma completa transformação da configuração atual, com um único perfil de viga, como por exemplo um perfil "I".

Por último, uma boa prática seria rever o projeto, a fim de diminuir os efeitos de torção causados na estrutura.

## REFERÊNCIAS

AÇOS CONTINENTE. **Catálogo Tubo Industrial Retangular**. Disponível em: <http://www.acoscontinente.com.br/secao/32/tubo-industrial-retangular>. Acesso em: 29 de março, 2014.

AMARAL, D. **Design of Experiments**. Disponível em: [http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos\\_port/pag\\_conhec/DOE.html#Tipos de Planejamento](http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/DOE.html#Tipos%20de%20Planejamento). Acesso: 10 de Agosto. 2013.

ANDOLFATO, Rodrigo P.; CAMACHO, Jefferson S.; BRITO, Gilberto A. de. **Extensometria Básica**. Ilha Solteira: UNESP, 2004.

BACK, N; OGLIARI, A.; DIAS, A; SILVA, J. C. da. **Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, Concepção e Modelagem**. São Paulo, Manole, 2008.

BATHE, Klaus-Jürgen. **Finite Element Procedures**. Prentice-Hall, 1996.

BEER, Ferdinand P.; JOHNTON, E. Russel, Jr. **Resistência dos Materiais**. 3 ed. São Paulo, SP, Pearson Makron Books, 1995.

BRASIL. Ministério do Trabalho. Portaria n 644, de 09 de maio de 2013 – NR 18. Altera **Norma Regulamentadora NR-87 – Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção**.

BRASIL. Ministério do Trabalho. Portaria n 13, de 21 de junho de 2007 – NR 17. Altera **Norma Regulamentadora NR-17 – Ergonomia**.

BUFFONI, Salete de S. O. **Tensões de Flexão nas Vigas**. Disponível em: <<http://www.professores.uff.br/salete/res1/aula3.pdf>>. Acesso em: 03 de agosto, 2013.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro, RJ, LTC, 2008.

CH'NG, C. K.; QUAH, S. H.; LOW, H. C. **Index Cpm in Multiple Response Optimization**. *Quality Engineering*, n. 17, p. 165-171, 2005.

CHERKAEV, A; CHERKAEVA, E. **Stable optimal design for uncertain loading conditions**. Singapore: *Homogenization, World Scientific*, p. 193-213, 1999.

COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D. C. **A systematic approach to planning for a designed industrial experiment**. *Technometrics*, v. 35, n. 1, p. 1-12, 1993.

COLPAERT, H. **Metalografia do Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4<sup>a</sup> ed. Edgard Blucher, 2008.

COOK, Robert D. **Finite Element Modeling fot Stress Analysis**. John Wiley & Sons, INC., 1995.

DAS, I.; DENNIS, J. E. **Normal – boundary intersection: a new method for generating the Pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems**. *SIAM Journal of Optmization*, n. 8, p.631 – 657, 1998.

DAS, P. **Concurrent Optimization of Multi-respondo Product Performance**. *Quality Engineering*, Vol. 11, No. 3, p. 365-368, 1999.

EURONOBRE Equipamentos Industriais. **Euronobre Equipamentos Industriais**. São José dos Pinhais, PR, 2011. Disponível em: [www.euronobre.com](http://www.euronobre.com). Acesso em: 27 julho. 2013.

FEODOSIEV, V. I. **Resistencia de Materiales**. Moscou: Editora Mir, 1980.

FONTANA, C. E.; BALESTRASSI, P. P. **Uma abordagem experimental para a otimização da rentabilidade de extração de proteína de soja na produção de bebidas**. P&D em Engenharia de Produção, Itajubá, v 9, n.1, p. 58-66, 2011.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS C. A. **Ensaio dos Materiais**. 2ª ed. LTC, 2012.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7 ed. São Paulo, SP, Pearson Prentice Hall, 2010.

HOFFMANN, Karl. **Na Introduction to Measurements using Strain Gages**. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989.

MERIAM, J. L.; KRAIGE, L. G. **Mecânica para Engenharia: Estática**. 6ª ed. LTC, 2008.

MILFONT, G. **Notas de Aula**. Disponível em: [http://www.poli.br/~gilfran.milfont/NOTAS\\_AULAS/3\\_Torca.pdf](http://www.poli.br/~gilfran.milfont/NOTAS_AULAS/3_Torca.pdf). Acesso em: 03 de agosto, 2013.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley and Sons, 1991.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem Integrada**. 2 ed. Bookman, 2004.

OLIVEIRA, A. J.; DINIZ, A. E.; URSOLINO, D. J. **Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, p. 5262-5270, 2009.

OSYCZKA, A. **An Approach to Multicriterion Optimization for Structural Design**: Proceedings of International Symposium on Optimum Structural Design, University of Arizona, 1981.

PINTUR, D. **Finite Element Beginnings**. (Electronic Book for MathCAD), MathSoft Inc., 1982.

QUINAN, Marco A. D. **Uma metodologia para a determinação do fator de intensidade de tensões causado por tensões térmicas utilizando a fotoelasticidade**. São Paulo, SP, 2005. Dissertação (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) – IPEN, Autarquia associada a Universidade de São Paulo, 2005.

RUDENKO, N. **Máquinas de Elevação e Transporte**. Rio de Janeiro, RJ, 1976.

SOLIDWORKS®. Versão 2013 SP03. Vélizy, França: Dassault Systèmes S.A., 1997. CD-ROM.

SOLIDWORKS® 2013 Help. **Ajuda online SolidWorks®**. Disponível em: <http://help.SolidWorks.com>. Acesso em: 09 de abril, 2014.

SOLIDWORKS® CORPORATION. **Otimização com o COSMOSWorks**, 2006.

TIMOSHENKO, Stephen; GODIER, J. N. **Theory of elasticity**. McGraw-Hill, 1951.

VAHLE, Electrification Systems Catalog No. 2a/E2010, 2010.

VANDERPLAATS, G. N. **Numerical optimization techniques for engineering design**: with applications. New York: McGraw- Hill, 1984.



## APÊNDICE A – RESULTADOS ESTUDOS SIMULAÇÕES

Estudo 1 Entrada - Sem Obturador - Trelça Sem Soldas						
Força (Kgf)(F1,F2,F3,F4)	350/0/0/0			700/0/0/0		
Sensor (A,B,C)	A	B	C	A	B	C
Deformação 1 (µm/m)	-184,49	115,13	349,71	-358,24	214,24	708,8
Deformação 2 (µm/m)	-169,02	129,01	341,07	-365,05	305,9	672,61
Deformação 3 (µm/m)	-189,51	144,28	361,71	-386,63	287,03	714,71
Deformação Média (µm/m)	-181,01	129,47	350,83	-369,97	269,06	698,71

Estudo 1 Centralizado - Sem Obturador - Trelça Sem Soldas													
Força (Kgf)(F1,F2,F3,F4)	175/175/175/175			100/250/250/100			50/300/300/50			0/350/350/0			
Sensor (A,B,C)	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	C
Deformação 1 (µm/m)	-148	119	165	-133	119	83,4	-123	119	31,1	-114	119	-21,1	
Deformação 2 (µm/m)	-148	99,1	182	-139	113	94	-133	122	35,5	-127	131	-23,1	
Deformação 3 (µm/m)	-146	128	162	-124	118	86	-109	111	33	-94,8	104	-20	
Deformação Média (µm/m)	-147,33	115,37	169,67	-132,00	116,67	87,80	-121,67	117,33	33,20	-111,93	118,00	-21,40	

Estudo 2 Entrada - Com Obturador Fixo - Trelça Sem Soldas																		
Força (Kgf)(F1,F2,F3,F4)	350/0/0/0			700/0/0/0			250/100/0/0			500/200/0/0			200/150/0/0			400/300/0/0		
Sensor (A,B,C)	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Deformação 1 (µm/m)	-33,66	36,46	2,078	-57,34	66,05	1,391	-54,24	51,75	3,478	-98,62	96,67	5,643	-64,55	59,43	5,34	-119,21	111,96	7,769
Deformação 2 (µm/m)	-29,3	36,51	1,476	-46,78	66,59	1,582	-60,17	49,11	3,463	-108,69	91,67	5,553	-75,59	55,39	4,454	-139,59	104,26	7,541
Deformação 3 (µm/m)	-32,36	39,83	1,351	-56,08	72,93	2,413	-51,06	49,66	4,25	-93,5	92,72	6,759	-60,43	54,6	4,544	-112,23	102,56	8,928
Deformação Média (µm/m)	-31,77	37,60	1,64	-53,40	68,52	1,80	-55,16	50,17	3,73	-100,27	93,69	5,99	-66,86	56,47	4,78	-123,68	106,26	8,08

Estudo 2 Centralizado - Com Obturador Fixo - Trelça Sem Soldas													
Força (Kgf)(F1,F2,F3,F4)	175/175/175/175			100/250/250/100			50/300/300/50			0/350/350/0			
Sensor (A,B,C)	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	C
Deformação 1 (µm/m)	-84,87	77,44	7,3	-108,9	95,49	9,85	-124,93	107,52	11,55	-140,95	119,55	13,25	
Deformação 2 (µm/m)	-89,65	78,96	7,85	-117,2	102,11	10,59	-135,54	117,55	12,42	-153,89	132,98	14,25	
Deformação 3 (µm/m)	-76,1	74,57	7,9	-96,06	89,15	10,82	-109,37	98,86	12,76	-122,67	108,59	14,71	
Deformação Média (µm/m)	-83,54	76,99	7,68	-107,39	95,58	10,42	-123,28	107,98	12,24	-139,17	120,37	14,07	

Estudo 3 Entrada - Com Obturador Variável - Trelça Com Soldas																								
Força (Kgf)(F1,F2,F3,F4)	350/0/0/0						350/0/0/0						250/100/0/0						350/0/0/0			250/100/0/0		
Força Obturador (Kgf)	350						500						700						1000			1000		
Sensor (A,B,C)	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Deformação 1 (µm/m)	-27,9	1,82	-34,4	48,4	-59,7	-161	150	-141	-364	9,75	-22,1	-141	85,9	-83,6	-261	187	-166	-464	210	-197,4	-509,6	261,8	-232,4	-649,6
Deformação 2 (µm/m)	-30,1	52	-22,9	35,4	-22,1	-200	123	-121	-436	-0,2	0,3	-135	65,6	-73,7	-312	153	-172	-548	172,2	-169,4	-610,4	214,2	-240,8	-767,2
Deformação 3 (µm/m)	-39	73,2	-85,7	35	20,2	-208	134	-51	-440	1,22	32,2	-109	75,7	-21	-315	175	-91,9	-547	187,6	-71,4	-616	245	-128,66	-765,8
Deformação Média (µm/m)	-32,33	42,34	-47,67	39,60	-20,53	-189,67	135,67	-104,33	-413,33	3,59	3,47	-128,33	75,73	-59,43	-296,00	171,67	-143,30	-519,67	189,93	-146,07	-578,67	240,33	-200,62	-727,53

Estudo 3 Centralizado - Com Obturador Variável - Trelça Com Soldas																								
Força (Kgf)(F1,F2,F3,F4)	0/350/350/0						100/250/250/100						0/350/350/0						0/350/350/0			100/250/250/100		
Força Obturador (Kgf)	350						350						500						700			1000		
Sensor (A,B,C)	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Deformação 1 (µm/m)	114,46	-60,67	-377,51	75,31	-45	-279,82	192,88	-126,54	-534,26	153,63	-110,68	-436,64	297,38	-214,2	-743,9	258,08	-198,26	-645,71	453,9	-345,46	-1057,1	414,74	-329,69	-959,35
Deformação 2 (µm/m)	65	-14,29	-349,65	37,72	-25,43	-254,63	132	-58,92	-495,04	104,75	-47,32	-400	221,35	-118,55	-688,91	194,11	-106,99	-593,96	355,4	-208,2	-979,77	328,13	-196,49	-884,79
Deformação 3 (µm/m)	115,3	-35,21	-388,77	69,79	-49,53	-279,57	195,15	-79,39	-550,72	149,52	-48,95	-441,49	301,49	-138,1	-766,6	255,82	-107,63	-657,37	460,77	-225,87	-1090,4	415,27	-195,63	-981,2
Deformação Média (µm/m)	98,25	-36,72	-371,98	60,94	-39,99	-271,34	173,34	-88,28	-526,67	135,97	-68,98	-426,04	273,41	-156,95	-733,14	236,00	-137,63	-632,35	423,36	-259,84	-1042,42	386,05	-240,60	-941,78

Estudo 4 Entrada - Com Obturador Modelado - Trelça Com Soldas																								
Força (Kgf)(F1,F2,F3,F4)	350/0/0/0						350/0/0/0						250/100/0/0						350/0/0/0			250/100/0/0		
Força Obturador (Kgf)	350						500						700						1000			1000		
Sensor (A,B,C)	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Deformação 1 (µm/m)	-55,9	124,06	-87,21	23,8	-196,73	-246,14	184,77	131,65	-553	18,76	98,91	-200	134,14	111,05	-368,53	235,89	98,8	-667	258,678	184,31	-774,2	330,246	138,32	-933,8
Deformação 2 (µm/m)	-24,3	12,79	-27,7	35,33	-19,97	-198,8	125,4	-127,09	-512,5	-29,27	-12,79	-170,6	71,29	-60,48	-323,48	158,15	-206,63	-643	175,56	-177,926	-717,5	221,41	-289,282	-900,2
Deformação 3 (µm/m)	-37,02	-105,97	13,36	63,93	130,84	-137,8	104,2	-330,7	-312,8	-15,95	-91,19	-88,56	54,95	-212,77	-266,33	124,53	-332,2	-476	145,88	-462,98	-437,92	174,342	-465,08	-666,4
Deformação Média (µm/m)	-39,07	10,29	-33,85	41,02	-28,62	-194,25	138,12	-108,71	-459,43	-8,82	-1,69	-153,05	86,79	-54,07	-319,45	172,86	-146,68	-595,33	193,37	-152,20	-643,21	242,00	-205,35	-833,47

Estudo 4 Centralizado - Com Obturador Modelado - Trelça Com Soldas																								
Força (Kgf)(F1,F2,F3,F4)	0/350/350/0						100/250/250/100						0/350/350/0						0/350/350/0			100/250/250/100		
Força Obturador (Kgf)	350						350						500						700			1000		
Sensor (A,B,C)	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	300,00	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Deformação 1 (µm/m)	73,83	17,01	-459,4	42,88	65,68	-350,4	133,6	19,5	-644	108,4	31,3	-566,2	211,3	31,2	-859	176,2	23,6	-781	331,8	-69,6	-1204	428,7	-35,6	-1363
Deformação 2 (µm/m)	86,64	-80,3	-492,2	47,01	7,32	-346,8	173,7	-143,5	-688,9	127,3	-152,2	-559,8	281	-192,3	-658	223	-196,7	-787	406,4	-354,3	-1344	264,7	-385,3	-1287
Deformação 3 (µm/m)	131,9	-111,5	-387,1	105,96	-107,2	-240,2	244,9	-222,7	-478,2	186,9	-254,5	-433,7	353,2	-410,9	-660	310,8	-359,2	-561	538,5	-530,2	-936	283,8	-557,2	-855,5
Deformação Média (µm/m)	97,46	-58,26	-446,23	65,28	-11,40	-312,47	184,07	-115,57	-603,70	140,87	-125,13	-519,90	281,83	-190,67	-725,67	236,67	-177,43	-709,67	425,57	-318,03	-1161,33	325,73	-326,03	-1168,50

Estudo 5 Entrada - Com Braço Modelado - Treliça Com Soldas																								
Força (Kgf)(F1,F2,F3,F4)	350/0/0/0			350/0/0/0			350/0/0/0			250/100/0/0			250/100/0/0			250/100/0/0			350/0/0/0			250/100/0/0		
Força Obturador (Kgf)	350			500			700			350			500			700			1000			1000		
Sensor (A,B,C)	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Deformação 1 (µm/m)	-14,4	47,0	-27,3	46,6	-65,0	-192,5	144,2	-148,8	-282,5	15,6	-23,9	-87,5	90,6	-72,8	-251,7	166,3	-275,0	-322,8	201,8	-158,3	-445,5	232,8	-385,0	-502,0
Deformação 2 (µm/m)	-16,3	3,7	-25,8	49,3	-93,3	-222,5	146,7	-256,7	-297,9	23,6	-40,6	-84,2	80,9	-81,8	-288,3	149,5	-142,1	-345,4	205,3	-309,3	-467,1	209,3	-198,9	-533,6
Deformação 3 (µm/m)	-15,7	18,2	-34,6	51,3	-70,8	-136,6	145,0	-193,3	-269,8	26,3	-52,8	-154,2	74,9	-85,6	-195,2	154,6	-137,9	-337,3	203,0	-220,7	-427,7	216,4	-193,1	-522,2
Deformação Média (µm/m)	-15,5	22,9	-29,2	49,0	-76,4	-183,9	145,3	-199,6	-283,4	21,8	-39,1	-108,6	82,1	-80,1	-245,1	156,8	-185,0	-335,2	203,4	-229,4	-446,7	219,5	-259,0	-519,2

Estudo 5 Centralizado - Com Braço Modelado - Treliça Com Soldas																								
Força (Kgf)(F1,F2,F3,F4)	0/350/350/0			100/250/250/100			0/350/350/0			100/250/250/100			0/350/350/0			100/250/250/100			0/350/350/0			100/250/250/100		
Força Obturador (Kgf)	350,0			350,0			500,0			500,0			700,0			700,0			1000,0			1000,0		
Sensor (A,B,C)	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Deformação 1 (µm/m)	61,5	-92,5	-437,1	34,1	-83,3	-275,0	98,8	-204,2	-394,7	87,8	-210,8	-292,5	161,0	-232,4	-660,0	144,0	-297,3	-416,7	259,1	-523,3	-685,8	281,7	-453,1	-634,2
Deformação 2 (µm/m)	72,2	-134,2	-281,3	54,3	-90,0	-247,5	128,3	-272,5	-397,7	97,3	-159,2	-316,7	168,8	-290,6	-480,0	162,0	-255,2	-453,1	327,2	-281,7	-710,8	314,2	-320,0	-665,0
Deformação 3 (µm/m)	109,9	-162,5	-275,0	44,2	-70,8	-201,7	133,3	-110,8	-439,9	112,0	-228,3	-324,2	218,8	-298,1	-610,0	183,2	-202,5	-574,2	276,6	-438,1	-701,3	317,2	-300,2	-741,7
Deformação Média (µm/m)	81,2	-129,7	-331,1	44,2	-81,4	-241,4	120,1	-195,8	-410,8	99,0	-199,4	-311,1	182,8	-273,7	-583,3	163,1	-251,6	-481,3	287,6	-414,4	-699,3	304,3	-357,8	-680,3

Estudo 6 Entrada - Com Braço Modelado - Treliça Com Soldas - Malha Mista																								
Força (Kgf)(F1,F2,F3,F4)	350/0/0/0			350/0/0/0			350/0/0/0			350/0/0/0			250/100/0/0			250/100/0/0			250/100/0/0			250/100/0/0		
Força Obturador (Kgf)	350			500			700			1000			350			500			700			1000		
Sensor (A,B,C)	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Deformação 1 (µm/m)	27,3	3,4	-65,38	81,3	-76	-170,8	131	-151	-310,8	242	-249	-445,6	31,6	-33,6	-103,04	82,9	-95,5	-217	142	-130	-343	240	-182	-482
Deformação 2 (µm/m)	18,5	13,8	-73,22	79	-84,2	-166,6	131	-154	-320,6	238	-205	-379,8	32,8	-36,4	-114,94	73,3	-92	-187,6	133	-116	-331,8	222	-181	-466,6
Deformação 3 (µm/m)	17,5	-11	-65,1	74,3	-51,5	-183,4	125	-124	-303,8	250	-204	-426	27,4	-20	-97,3	73,9	-84,7	-175	127	-127	-330,4	217	-175	-462,4
Deformação Média (µm/m)	21,10	2,07	-67,90	78,20	-70,57	-173,60	129,00	-143,00	-311,73	243,33	-219,33	-417,13	30,60	-30,00	-105,09	76,70	-90,73	-193,20	134,00	-124,33	-335,07	226,33	-179,33	-470,33

Estudo 6 Centralizado - Com Braço Modelado - Treliça Com Soldas - Malha Mista																								
Força (Kgf)(F1,F2,F3,F4)	0/350/350/0			100/250/250/100			0/350/350/0			100/250/250/100			0/350/350/0			100/250/250/100			0/350/350/0			100/250/250/100		
Força Obturador (Kgf)	350			350			500			500			700			700			1000			1000		
Sensor (A,B,C)	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Deformação 1 (µm/m)	19,7	-65,3	-289,3	50,8	-85,8	-204,9	108,3	-125,8	-291,7	104,2	-110,0	-282,3	177,5	-148,3	-371,0	184,2	-226,7	-473,7	279,2	-319,2	-595,0	310,8	-311,7	-574,0
Deformação 2 (µm/m)	23,2	-28,8	-280,0	41,4	-66,4	-202,1	94,2	-117,5	-422,3	100,8	-137,5	-247,3	174,2	-187,5	-513,3	214,2	-207,5	-469,0	283,3	-291,7	-672,0	298,3	-342,5	-555,3
Deformação 3 (µm/m)	8,0	-46,1	-252,0	25,6	-57,1	-180,4	100,8	-90,0	-392,0	104,2	-98,3	-340,7	173,3	-187,5	-613,7	173,3	-168,3	-464,3	275,8	-215,0	-749,0	290,8	-327,5	-669,7
Deformação Média (µm/m)	16,93	-46,72	-273,78	39,28	-69,78	-195,77	101,11	-111,11	-368,67	103,06	-115,28	-290,11	175,00	-174,44	-499,33	190,56	-200,83	-469,00	279,44	-275,28	-672,00	300,00	-327,22	-599,67

Estudo 7 Entrada - Com Braço Modelado - Treliça Com Soldas - Malha Mista - Tubo Perfil Deformado																								
Força (Kgf)(F1,F2,F3,F4)	350/0/0/0			350/0/0/0			350/0/0/0			350/0/0/0			250/100/0/0			250/100/0/0			250/100/0/0			250/100/0/0		
Força Obturador (Kgf)	350			500			700			1000			350			500			700			1000		
Sensor (A,B,C)	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Deformação 1 (µm/m)	31,6	-51,6	-31,6	97,2	-98,3	-98,5	217	-186	-246	326	-295	-399	35,6	-76,4	-93,5	85,4	-74,9	-129	197,4	-112	-278	293	-189	-404
Deformação 2 (µm/m)	31,9	-75,4	-43,5	94,8	-134	-135	217	-135	-231	321	-213	-374	37,7	-51,4	-70,9	95	-114	-129	203	-127	-239	288	-272	-371
Deformação 3 (µm/m)	28,5	-79,9	-38,9	99,4	-70,1	-126	214,2	-152	-216	291	-190	-270	48,4	-55,6	-86,6	109	-86,4	-148	214,2	-187	-206	276	-259	-431
Deformação Média (µm/m)	30,67	-68,97	-38,00	97,13	-100,80	-119,83	216,07	-157,67	-231,00	312,67	-232,67	-347,67	40,57	-61,13	-83,67	96,47	-91,77	-135,33	204,87	-142,00	-241,00	285,67	-240,00	-402,00

Estudo 7 Centralizado - Com Braço Modelado - Treliça Com Soldas - Malha Mista - Tubo Perfil Deformado																								
Força (Kgf)(F1,F2,F3,F4)	0/350/350/0			100/250/250/100			0/350/350/0			100/250/250/100			0/350/350/0			100/250/250/100			0/350/350/0			100/250/250/100		
Força Obturador (Kgf)	350			350			500			500			700			700			1000			1000		
Sensor (A,B,C)	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Deformação 1 (µm/m)	23,6	-78,4	-248	61	-103	-175,6	130	-151	-250	125	-132	-242	213	-178	-318	221	-272	-406	335	-383	-510	373	-374	-492
Deformação 2 (µm/m)	27,8	-34,5	-240	49,7	-79,7	-173,2	113	-141	-362	121	-165	-212	209	-225	-440	257	-249	-402	340	-350	-576	358	-411	-476
Deformação 3 (µm/m)	9,54	-55,3	-216	30,7	-68,5	-154,6	121	-108	-336	125	-118	-292	208	-225	-526	208	-202	-398	331	-258	-642	349	-393	-574
Deformação Média (µm/m)	20,31	-56,07	-234,67	47,13	-83,73	-167,80	121,33	-133,33	-316,00	123,67	-138,33	-248,67	210,00	-209,33	-428,00	228,67	-241,00	-402,00	335,33	-330,33	-576,00	360,00	-392,67	-514,00

## ANEXO A – PROCEDIMENTOS EXTENSOMETRIA

1.	<p><b>Measurement problem</b>          Primary: strain measurement          Secondary: experimental analysis - transducer design - plant monitoring - safety systems.</p>
2.	<p><b>Mechanical conditions at the point of measurement</b></p> <p>2.1 Stress state          uniaxial - biaxial - principal direction known - unknown</p> <p>2.2 Stress field topography          homogeneous - inhomogeneous - steep variations (stress around notches) determination of average or peak value</p> <p>2.3 Type of loading          static: amplitude - direction (positive, negative) - number of loadings          dynamic: impulse - stochastic - cyclic - changing load - expansion loading          (positive, negative) - amplitude - number of load cycles -          measurements referred to zero - non-zero referenced</p> <p>2.4 Ratio of the useful portion of the measurement to the disturbance portion          e.g. normal force as the useful portion with superimposed bending moment as disturbance</p>
3.	<p><b>Environmental conditions</b></p> <p>3.1 Duration of the measurement          once only - short term - repeated short term - long term - required operational duration - required service life of the bonding system</p> <p>3.2 Temperature          level - range (before, during and between measurements) - rate of change - one-sided radiation - thermal expansion coefficient of the component material</p> <p>3.3 Disturbance effects          intensity - effective duration</p> <p>3.3.1 humidity - water - pressurized water - steam - ice</p> <p>3.3.2 oil (transformer oil, paraffin, machine oil, hydraulic oil)</p> <p>3.3.3 chemicals (solid, liquid, gaseous, reactive, inert)</p> <p>3.3.4 pressure - vacuum</p> <p>3.3.5 electrical fields - magnetic fields - energy transfer (e.g. welding current, lightning strike)</p> <p>3.3.6 high energy radiation</p> <p>3.3.7 external forces (shock, impact, soil pressure)</p>
4.	<p><b>Electrical conditions at the point of measurement</b></p> <p>4.1 Measurement circuit          Quarter bridge - three-wire circuit - half bridge - double quarter bridge - full bridge</p> <p>4.2 Strain gage supply          direct voltage - alternating voltage (carrier frequency) - voltage with respect to ground - continuous/pulse supply (time - duty ratio)</p> <p>4.3 Cable          length - resistance - insulation - capacitance - resistance to environment effects (mechanical, thermal, chemical) - connecting elements (plugs, cable entry)</p>
5.	<p><b>Application conditions</b></p> <p>5.1 Component material          machinability - bonding and welding properties</p> <p>5.2 Application access          Access - use of sand blasting or other surface treatments - resistance to solvent and temperature</p> <p>5.3 Cable routing</p> <p>5.4 Spatial conditions          strain gage - cable - covering agent - protective caps</p>

Table 3.0-1: Chart for the analysis of conditions which must be fulfilled by a strain gage measurement point.

### Quadro 1 – Condições para medição com extensômetros

Fonte: HOFFMANN, Karl, 1989