



Everton Roberto Freddi

**ANÁLISE PARCIAL DA ESTRUTURA DO CHASSI DE UMA
CENTRAL MÓVEL DE CONCRETO**

Horizontina

2014

Everton Roberto Freddi

**ANÁLISE PARCIAL DA ESTRUTURA DO CHASSI DE UMA
CENTRAL MÓVEL DE CONCRETO**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Richard Thomas Lermen, Doutor.

Horizontina

2014

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

“Análise parcial da estrutura do chassi de uma central móvel de concreto.”

Elaborada por:

Everton Roberto Freddi

como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 30/10/2014
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Prof. Me. Anderson Dal Molin
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Prof. Dr. Ademar Michels
FAHOR – Faculdade Horizontina**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e minha namorada, que me fizeram crescer acreditando que tudo é possível, que enfrentar dificuldades com honestidade é uma forma de nos tornar fortes, que desistir não seja uma palavra de ação contínua em nossas vidas e que sonhar e concretizar os nossos sonhos depende única e exclusivamente de nossa vontade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à FAHOR que me oportunizou o conhecimento teórico e prático para desenvolver esta monografia, bem como, a empresa Qualitec Indústria e Comércio que me proporcionou a oportunidade de realizar o estágio e o desenvolvimento deste trabalho em suas dependências, prestando todo o suporte necessário e, ao meu orientador, professor Richard, por todo o auxílio e dedicação no decorrer desta etapa.

O futuro a Deus pertence... por isso...
“Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado”.

(Roberto Shinyashiki)

RESUMO

Este estudo apresenta uma análise estrutural parcial do chassi de uma central móvel de concreto com silo erigível, projetada e produzida em uma empresa do ramo metalmeccânico de Santa Rosa RS. O objetivo principal do trabalho foi realizar uma análise parcial na estrutura do chassi que sustenta o silo de cimento, devido a uma deformação apresentada nas vigas onde são fixados os cilindros hidráulicos, com isso, dimensionar um chassi com treliça para suportar as tensões máximas apresentadas na central de concreto. Para certificar que o local da deformação é, de fato, a região de maior concentração de tensão foi realizado uma análise das tensões *Von Mises* através do *SolidWorks - Simulation* na estrutura original. Modelou-se um chassi com treliça plana para substituir a estrutura original deformada. Para dimensionamento deste novo chassi com treliça foi utilizado o *MDSolid 4.0*, o qual serviu para calcular as tensões nos membros da treliça, e através destas tensões dimensionou-se a treliça e realizada outra análise estrutural utilizando o *SolidWorks - Simulation*. A análise estrutural no chassi original apresentou uma tensão superior ao limite de escoamento do aço ASTM A36 que é 250 MPa. A concentração de tensões máximas obtidas pela simulação no *SolidWorks*, ocorreu no mesmo local onde foi evidenciada a deformação na prática. No novo chassi com treliça, foi realizada uma análise estrutural onde a tensão máxima encontrada foi inferior ao limite de escoamento do material. Por fim, concluiu-se que, através de uma análise estrutural com *SolidWorks Simulation* foi possível identificar o local de maior concentração de tensões no chassi original. E através desta análise estrutural também se pode comprovar que o novo chassi com treliças suportou todas as tensões apresentadas pela simulação, aprovando o dimensionamento.

Palavras-chave: Central de Concreto, Dimensionamento Estrutural, Elementos finitos, SolidWorks Simulation.

ABSTRACT

This study presents a partial structural analysis of the chassis of a mobile concrete plant with erigível, designed and produced in a company's metalworking branch of Santa Rosa RS silo. The main objective of the study was to perform a partial analysis on the chassis frame that holds the cement silo due to a deformation presented in which beams are fixed hydraulic cylinders thereby scale a trellis chassis to withstand the maximum stresses shown in concrete plant. Simulation in the original structure - to ensure that local deformation is, in fact, the region of highest stress concentration analysis of Von Mises stress was conducted by SolidWorks. -Shaped chassis with a flat truss to replace the original deformed structure. To design this new trellis chassis with the MDSolid, which served to calculate the stresses in the truss members, and through these tensions was used scaled up the trellis and other structural analysis performed using SolidWorks - Simulation. Structural analysis on the original chassis had a superior yield strength of ASTM A36 steel is 250 MPa. The concentration of maximum stresses obtained by simulation in SolidWorks, occurred at the same location where the deformation was observed in practice. In the new chassis with trellis, a structural analysis where the maximum stress was found below the yield strength of the material was performed. Finally, it is concluded that, through structural analysis using SolidWorks Simulation was possible to identify the location of greatest stress concentration in the original frame. And through this structural analysis can also prove that the new chassis with trusses bore all the tensions presented by simulation, approving the design.

Keywords: Central Concrete, Structural Sizing, Finite Elements, SolidWorks Simulation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Local da deformação na estrutura original. | 11 |
| Figura 2: (A) Chassi, (B) dosador de agregado com moega de recepção e (C) correia transportadora..... | 14 |
| Figura 3: (A) Silo de cimento, (B) dosador de cimento e (C) sistema de dosagem de água/aditivo por vazão. | 14 |
| Figura 4: Figura representando o método da seção | 17 |
| Figura 5: Partes de uma treliça.. | 18 |
| Figura 6: Modelo CAD dividido num número finito de partes..... | 20 |
| Figura 7: Análise Estática de Tensões..... | 21 |
| Figura 8: Tensor de tensão..... | 21 |
| Figura 9: Tensões Principais..... | 22 |
| Figura 10: Central de concreto..... | 24 |
| Figura 11: Diagrama de corpo livre do chassi com o silo de cimento | 25 |
| Figura 12: Forças aplicadas na estrutura original..... | 26 |
| Figura 13: Forças aplicadas na viga da estrutura original. | 26 |
| Figura 14: Esforço na Treliza e dimensões em milímetros. | 27 |
| Figura 15: Treliza plana. | 29 |
| Figura 16: Forças aplicadas na Treliza... | 30 |
| Figura 17: Forças aplicadas na estrutura | 30 |
| Figura 18: Central de concreto na posição de 28,7° | 31 |
| Figura 19: Resultado da análise com os valores de tensão <i>Von Mises</i> na estrutura original. | 32 |
| Figura 20: Comparação do local de deformação..... | 33 |
| Figura 21: Tensões máximas em MPa nos membros da treliça. | 34 |
| Figura 22: Componentes da treliça ((A) banzo, (B) montantes e (C) perfis diagonais)..... | 35 |
| Figura 23: Treliza dimensionada. | 36 |
| Figura 24: Resultado da análise com os valores de tensão <i>Von Mises</i> na treliça..... | 37 |

SUMÁRIO

| | |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1. JUSTIFICATIVA | 12 |
| 1.2. OBJETIVOS | 12 |
| 2. REVISÃO DA LITERATURA | 13 |
| 2.1. CENTRAIS DE CONCRETO | 13 |
| 2.2. MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA. | 15 |
| 2.2.1. TENSÃO, RESISTÊNCIA E COEFICIENTE DE SEGURANÇA. | 15 |
| 2.3. DIMENSIONAMENTO DE VIGAS | 16 |
| 2.4. DIMENSIONAMENTO DE VIGAS TRELIÇADAS. | 17 |
| 2.5. GENERALIDADES SOBRE O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS | 19 |
| 2.5.1. SIMULAÇÃO NUMÉRICA UTILIZANDO O SOLIDWORKS - SIMULATION. | 19 |
| 2.5.2. GENERALIDADES DO MDSOLID. | 23 |
| 3. METODOLOGIA | 24 |
| 3.1. PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DA ESTRUTURA ORIGINAL. | 24 |
| 3.2. DIMENSIONAMENTO DA TRELIÇA. | 27 |
| 3.3. PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL NA TRELIÇA | 29 |
| 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS | 31 |
| 4.1. ANÁLISE ESTRUTURAL NO PROJETO EXISTENTE | 31 |
| 4.2. DIMENSIONAMENTO DA TRELIÇA | 33 |
| 4.3. ANÁLISE ESTRUTURAL NO CHASSI COM A TRELIÇA. | 37 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 38 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 39 |

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia, o computador se tornou uma ferramenta absolutamente obrigatória para o desenvolvimento de projetos associados às engenharias. O método dos elementos finitos é um dos métodos mais difundidos. A sua utilização se deve ao fato de poder ser aplicado em problemas clássicos da mecânica estrutural elástico-linear, tais como: mecânica dos sólidos, mecânica dos fluídos, transmissão de calor, etc.

O trabalho de projetar uma estrutura ou um equipamento mecânico deve estabelecer uma tensão segura como sendo o limite de um material, no entanto, um equipamento em constante uso, pode necessitar uma análise para verificar se as cargas estão de acordo com o estabelecido.

O estudo analisou parte do chassi de uma central móvel dosadora de concreto com silo erigível, que é projetada e fabricada em uma empresa nacional do ramo metalmecânica situada em Santa Rosa (RS). Este modelo de equipamento (central dosadora móvel de concreto com silo erigível) corresponde a uma usina de concreto instalada em um chassi semirreboque semelhante à de uma carreta. Este equipamento apresentou uma deformação na sua estrutura próximo ao ponto de fixação do cilindro hidráulico, que ergue o silo de cimento para a posição de trabalho, ficando a 90° em relação ao solo, esta de formação pode ser identificada na Figura 1.

Figura 1 – Local da deformação na estrutura original



1.1 JUSTIFICATIVA

As empresas buscam a melhoria contínua de seus produtos e processos, uma vez que precisam garantir satisfação aos clientes na hora de adquirir seus produtos. Tendo em vista o bom desempenho do equipamento, foi necessário realizar uma análise estrutural através do método de elementos finitos na região do chassi deformado, a fim de identificar os locais onde se concentram as tensões máximas e dimensionar um chassi com treliça para substituí-lo.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal a realização de uma análise parcial da estrutura deformada do chassi da central de concreto, utilizando o programa *SolidWorks Simulation* e projetar um novo chassi com treliça para suportar a tensão máxima apresentada na análise estrutural.

- Para atendimento ao objetivo geral deste trabalho, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma pesquisa de revisão bibliográfica sobre centrais de concreto, materiais de construção mecânica, dimensionamento de vigas, dimensionamento de vigas treliçadas e elementos finitos.

- Modelar no *SolidWorks* a estrutura do chassi original e realizar a análise estrutural com o *SolidWorks Simulation*.

- Modelar no *SolidWorks* uma treliça para substituir a viga deformada.

- Calcular através do *MDSolid 4.0* as tensões máximas em cada perfil desta treliça.

- Determinar as áreas das secções mínimas dos componentes da treliça.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A revisão de literatura a seguir, apresenta inicialmente uma breve descrição sobre centrais de concreto, especificadamente a central dosadora móvel de concreto com silo erigível. Em seguida, são apresentados conceitos e definições de materiais de construção mecânica, dimensionamentos de vigas e treliças e, por fim, abordados alguns conceitos e pontos importantes sobre os métodos de elementos finitos com foco direcionado para o *SolidWorks Simulation*.

2.1. CENTRAIS DE CONCRETO

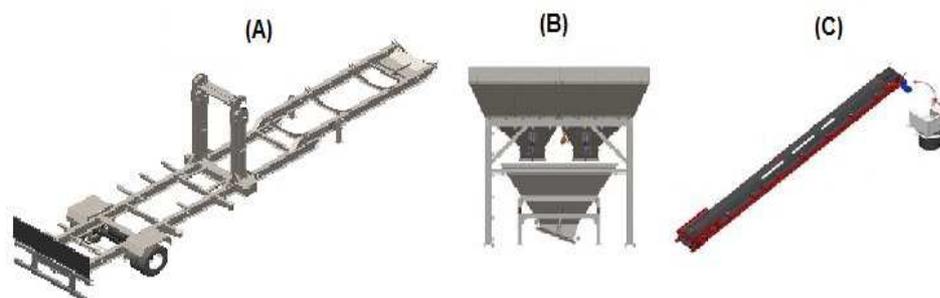
Centrais de concreto é basicamente, um conjunto de equipamentos necessários para desenvolver etapas para produção de concreto. As principais etapas para a produção de concreto é o armazenamento, o manuseio, o proporcionamento dos materiais constituintes, a homogeneização da mistura, o transporte e o lançamento do concreto (MARTINS, 2005).

Uma central de concreto é capaz de preparar grandes quantidades de concreto em um espaço curto de tempo. Além do mais, concretos com propriedades distintas para atender as necessidades de execução de tipos específicos de peças estruturais, alturas e dificuldades de lançamento podem ser preparados por uma central, sem maiores transtornos às obras (IXON, 2012).

A central dosadora móvel de concreto com silo erigível é composta por uma série de equipamentos, os principais são chassi da usina, dosador de agregado, moega de recepção, correia transportadora, silo de armazenamento de cimento, dosador de cimento e dosagem de água e aditivo (IXON, 2012).

O chassi, o dosador de agregado, moega de recepção e a correia transportadora são ilustrados na Figura 2.

Figura 2: (A) Chassi, (B) dosador de agregado com moega de recepção e a (C) correia transportadora.

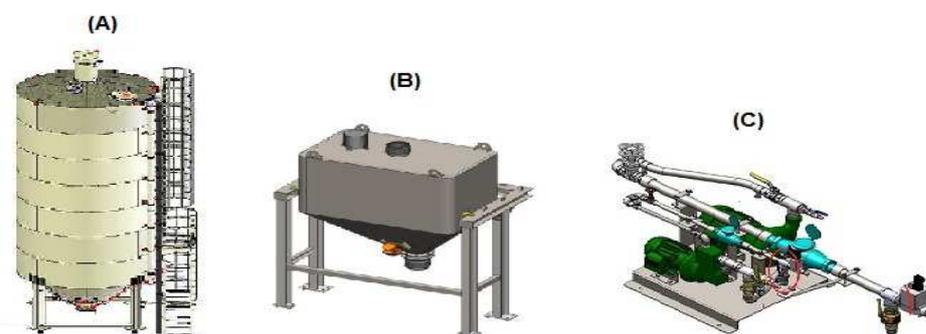


Fonte: Manual de Instruções, IXON, 2012.

Segundo IXON (2012) o chassi da usina que é um semirreboque possui um eixo com rodados e sistema de freios tipo *Spring Brake*. O dosador de agregado com a moega de recepção que são compostos, basicamente, por quatro silos para o armazenamento de material e uma balança para medir o material a ser dosado. A correia transportadora que tem a função de envio dos agregados da moega de pesagem até a bica de carga do caminhão betoneira.

Na Figura 3, pode-se visualizar o silo de armazenamento de cimento, o dosador de cimento e sistema de dosagem de água/aditivo por vazão (IXON, 2012).

Figura 3: (A) Silo de cimento, (B) dosador de cimento e (C) sistema de dosagem de água/aditivo por vazão.



Fonte: Manual de Instruções, IXON, 2012.

O silo de armazenamento de cimento tem a função de armazenar o cimento. O dosador de cimento tem função de receber o cimento do silo e pesar o mesmo. O sistema de dosagem de água/aditivo por vazão é feita por hidrômetro digital, que

envia pulsos elétricos para um totalizador de vazão ou para o CLP fazer o controle de dosagem, que transmitirá os dados, em litros, para o operador (IXON, 2012).

2.2. MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA

Segundo Beer e Johnston (1995) o objetivo principal de estudar a mecânica dos materiais é proporcionar ao engenheiro conhecimento das propriedades mecânicas, estas definem o comportamento do material quando sujeitos a esforços mecânicos, pois estão relacionadas à capacidade do material de resistir ou transmitir estes esforços aplicados, sem romper e sem se deformar de forma incontrolável.

Para Hibbeler (2000) resistência dos materiais é o estudo da relação entre cargas externas que atuam em um corpo e a intensidade das cargas internas que atuam nesse corpo.

Estrutura de construção mecânica designa-se como um conjunto de elementos composto com a finalidade de receber e transmitir esforços. As estruturas são classificadas, na maioria das vezes, de acordo com sua estabilidade como sendo hipostáticas, isostáticas ou hiperestáticas (SENAI, 2004).

Sistemas compostos por elementos submetidos a várias forças são denominados estruturas e máquinas. Elas são projetadas para suportar cargas, na maioria das vezes estacionárias e totalmente vinculadas. Para se conhecer as forças internas que se conservam unidas as várias partes de uma estrutura, devem-se dividi-las e desenhar o diagrama de corpo livre, analisando, primeiramente, as partes submetidas a duas forças e, em seguida, considerando-se as partes submetidas a várias forças. (BEER, JOHNSTON, 1995).

2.2.1. Tensão, Resistência e Coeficiente de segurança

Segundo Hibbeler (2011) tensões ou solicitações são as parcelas de forças interiores de um determinado corpo, sendo dividida em: tensões normais que atuam na direção perpendicular a seção transversal da peça e tensões de cisalhamento ou corte que atuam tangencialmente a seção transversal. Quando se aumenta a força externa que atua em um determinado corpo, gradativamente, ocasionará a destruição ou a ruptura do mesmo. A tensão calculada com a carga máxima que o corpo suporta e a seção transversal original do mesmo denominam tensão de ruptura ou tensão estática.

Segundo Hibbeler (2011) no projeto de um elemento estrutural, a carga limite do material deve ser maior que o carregamento que o mesmo irá suportar em condições normais de utilização. A este carregamento menor dá-se o nome de tensão admissível. Ao aplicar a carga admissível, somente uma parte da capacidade do material é solicitada e a outra parte é preservada para garantir ao material condição segura em seu emprego. A tensão admissível, também chamada de tensão ideal de trabalho do material, deve ser mantida na região de deformação elástica do material. Esta tensão é determinada através da relação tensão de escoamento, coeficiente de segurança para os materiais dúcteis, tensão de ruptura coeficiente de segurança para os materiais frágeis.

Os mesmos autores colocam que um elemento estrutural pode ser levado à ruptura de diversas formas, de modo que se podem distinguir diversas espécies de resistência a serem apresentadas por estes elementos, sendo elas: a resistência à tração, ao cisalhamento ou corte, à compressão, à flexão, à flambagem e à torção.

Hibbeler (2011) também afirma que as resistências dos materiais são determinadas em máquinas universais de ensaios, obedecendo a procedimentos rotineiros que são padronizados em normas específicas para cada processo. O coeficiente de segurança depende de fatores como: a qualidade do material, durabilidade do material, comportamento elástico do material, etc.

2.3. DIMENSIONAMENTO DE VIGAS

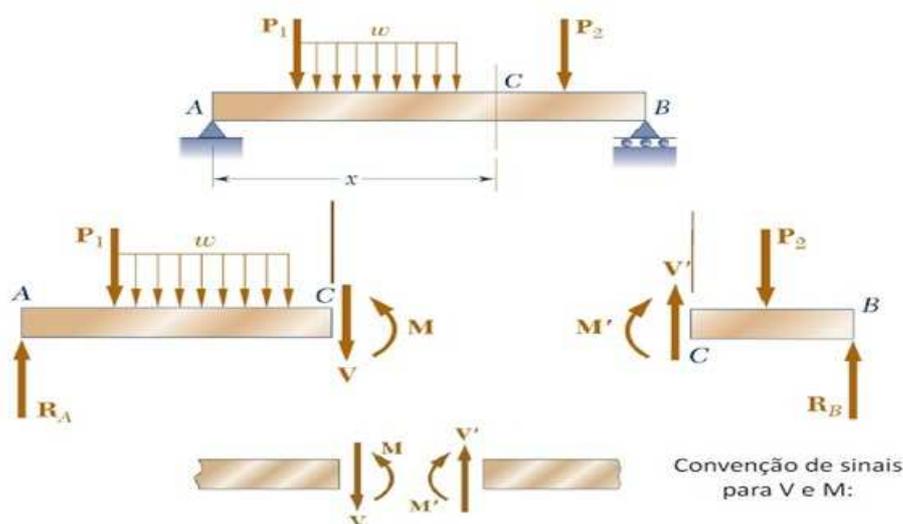
Segundo Beer e Johnston (1995) projetar uma viga é verificar qual o melhor material, forma e dimensões da seção transversal deverão ser empregadas na sua construção para que esta não falhe ao receber algum carregamento. O projeto de uma viga depende, inicialmente, da determinação dos valores máximos de esforço e momento fletor, gerados na viga, devido a um carregamento. As vigas também devem ser projetadas contra a flambagem, no sentido de impedir o movimento lateral.

Segundo Beer e Johnston (1995) colocam que no diagrama de esforço cortante e momento fletor, as cargas aplicadas em uma determinada viga resultam em forças internas que são nomeadas de esforço cortante e momento fletor. Estas forças geram tensões de cisalhamento e tensões normais. A determinação dos valores máximos de esforço cortante e momento fletor é facilitada quando

desenhada os respectivos diagramas com a variação do esforço cortante e momento fletor ao longo da viga.

Beer e Johnston (1995) também afirmam que o esforço cortante e momento fletor em um determinado ponto de uma viga são determinados pelo método das seções que consiste em cortar a viga em um determinado ponto e aplicar as equações de equilíbrio da estática para o trecho cortado, entrando pela direita ou pela esquerda. A construção de diagramas pode ser facilitada se levando em conta as relações existentes entre carga, esforço cortante e momento fletor. A Figura 4 está mostrando o método das seções.

Figura 4: Figura representando o método da seção

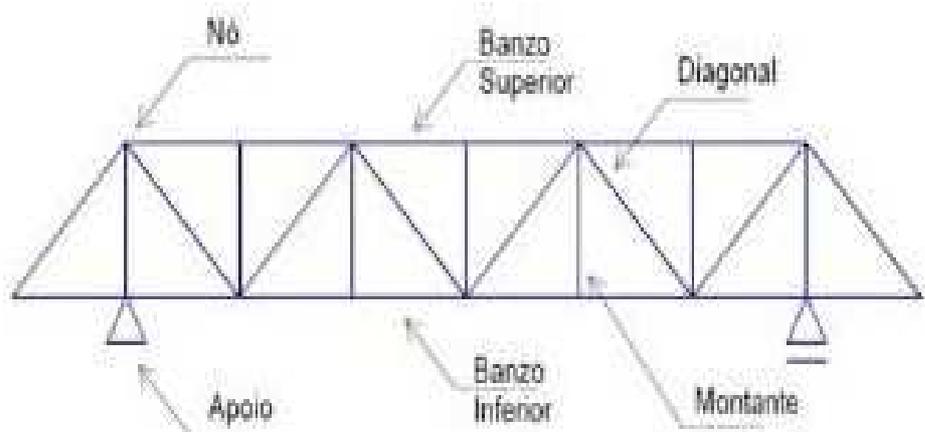


Fonte: BEER, JOHNSTON, 1995.

2.4. DIMENSIONAMENTO DE VIGAS TRELIÇADAS

Hibbeler (2011) afirma que as treliças são estruturas de barras unidas entre si por nós articulados, cujas cargas são aplicadas nos mesmos nós. Após isso, resultam como esforço solicitante nas barras exclusivamente como forças normais. As treliças podem ser utilizadas em diversas áreas, podendo citar como exemplos as estruturas de cobertura, desde vãos pequenos a médios, como nas edificações residenciais e industriais, até grandes vãos, como nas coberturas de estádios, de estações metroviárias; são também usadas nas pontes rodoviárias e ferroviárias e, em construções mecânicas em equipamentos de grande porte. A figura 5 mostra as partes que compõem uma treliça plana.

Figura 5: Partes de uma Treliça



Fonte: Hibbeler, 2011.

As treliças podem ser planas ou espaciais, e são compostas usualmente de madeira ou aço. Designa treliça plana o conjunto de elementos de construção (barras redondas, chatas, cantoneiras, perfiladas, I,U, etc.), conectados entre si, sob forma geométrica triangular, através de pinos, solda, rebites, parafusos, que tendem formar uma estrutura rígida, com intuito de receber e ceder esforços, sendo que, as cargas externas são aplicadas nos nós. A denominação treliça plana deve-se ao fato de todos os elementos do conjunto pertencer a um único plano (Hibbeler, 2011).

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009) os tipos de barras, na maioria dos casos, são compostos por perfis laminados únicos ou agrupados, ou também através de chapas dobradas. Nas treliças mais leves, os perfis formados por cantoneiras predominam, podendo ser ligados por solda ou por parafusos. As treliças médias são compostas por pares de cantoneiras e as treliças pesadas são formadas por perfis I soldado.

Segundo Beer e Johnston (1995) as treliças podem ser dimensionadas através de dois métodos mais utilizados que podem ser chamados de método dos nós ou método de Cremona e o método de Ritter ou Método das Seções. Para efeito de projeto, as cargas são aplicadas nos nós da treliça. As barras de uma treliça são compostas de apenas duas forças e estão sujeitas a tração ou compressão. Os nós são considerados pinos. No entanto, não oferecem nenhuma resistência à flexão. Podem-se considerar as barras da treliça como elementos de apenas duas forças sujeitas a tração ou compressão.

2.5. GENERALIDADES SOBRE O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Os métodos dos elementos finitos, (*FEA, FINITE ELEMENT ANALYSIS*) são usados, frequentemente, para a resolução de problemas encontrados na construção mecânica, obtendo uma perfeição na solução de problemas de engenharia. A aplicação do FEA não é limitada apenas a problemas estruturais sendo utilizado, também, na solução para problemas de transferência de calor, mecânica dos fluidos, eletromagnetismo, etc.

Silva et al (2011), afirmam que a origem do nome deste método numérico o FEA, consiste numa aproximação numérica para a decisão de equações diferenciais por integração. Este processo é aplicado, após a divisão de um sistema ou conjunto, a ser analisado em partes discretas menores (discretização do modelo). As equações diferenciais inerentes ao tipo de análise desenvolvida, correspondentes a cada parte discretizada do sistema, popularmente conhecido como elemento finito, estas se resolveram, a partir de rotinas numéricas.

O princípio básico do método é respaldado pela partição do domínio em elementos sobre os quais as variáveis do problema são aproximadas por combinações lineares de funções de interpolação, ponderadas por parâmetros a determinar. Alcançadas tais funções, o comportamento dos elementos é determinado em termos de uma relação entre valores nodais das variáveis, aproximadas pelas funções de interpolação, e os parâmetros a definir, contanto que estes representam as incógnitas do problema. (SILVA et , 2011).

2.5.1. Simulação Numérica Utilizando o SolidWorks – Simulation

O *SolidWorks* possui uma ferramenta *Simulation* que se trata de uma simulação virtual, esse recurso inclui um conjunto de ferramentas para simulação de respostas não lineares e dinâmicas, além do emprego de materiais compostos (VIRTUALCAE, 2014).

De acordo com Fonseca e Tavares (2012) o *SolidWorks SimulationXpress* utiliza o *Finite Element Method* (FEM) trata-se de uma análise que usa o FEM é chamada de *Finite Element Analysis* (FEA) ou *Design Analysis* que permite resolver problemas simples ou complexos. Este método substitui um problema complexo por um conjunto de problemas simples. Divide o modelo em muitas peças pequenas (por exemplo, tetraedros) de formas simples, chamadas elementos conforme Figura 6.

Figura 6: Modelo CAD dividido num número finito de partes

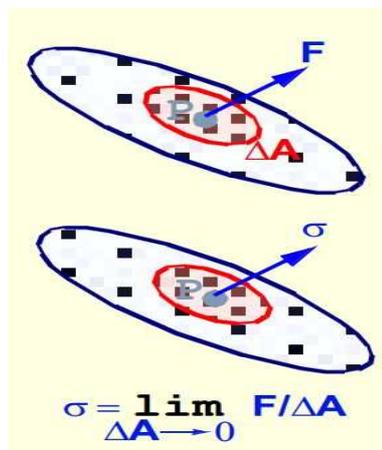


Fonte: Fonseca, Tavares, 2012.

Fonseca e Tavares (2012) colocam que estes elementos utilizam pontos (comuns a vários) chamados nós. Os deslocamentos de cada nó nas direções X, Y, e Z é totalmente descrito. Estes se designam por graus de liberdade (DOF – *degrees of freedom*), em problemas 3D, cada nó tem 3 DOF. Em uma análise estática, a resolução do sistema de equações determina os deslocamentos nas direções X, Y, e Z de cada nó, após o cálculo dos deslocamentos em cada nó, o programa calcula as tensões e as deformações nas várias direções. Estas deformações são a variação de comprimento dividido pelo comprimento original, assumindo um comportamento linear do material e desprezando as forças de inércia, considerado que é retirando o carregamento, o sólido retoma a sua forma original.

Quando uma carga é aplicada a um corpo, este tenta absorver esse efeito através da geração de forças internas, de forma que o seu efeito seja passado a outros pontos, os efeitos destas forças designam-se por tensão (stress). Tensão é a força por unidade de superfície. A Figura 7 mostra que a tensão num ponto é a intensidade da força numa pequena área em volta desse ponto (Fonseca, Tavares, 2012).

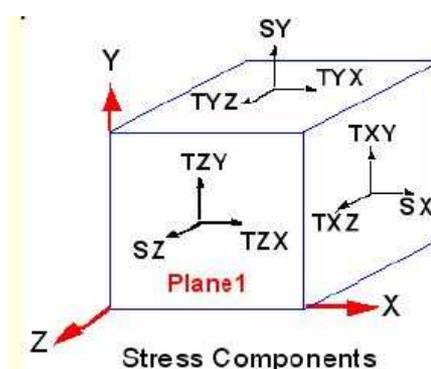
Figura 7: Análise Estática de Tensões



Fonte: Fonseca, Tavares,2012.

Um tensor de tensão descreve a distribuição de tensões e esforços internos num meio contínuo. Um tensor de tensão é totalmente caracterizado por seis componentes, sendo eles S_X tensão normal na direção X , S_Y tensão normal na direção Y , S_Z tensão normal na direção Z , T_{XY} tensão de corte na direção Y no plano YZ , T_{XZ} : tensão de corte na direção Z no plano YZ , T_{YZ} : tensão de corte na direção Z no plano XZ , levando em consideração que uma tensão positiva indica tração e negativa indica compressão, conforme Figura 8 (FONSECA, TAVARES, 2012).

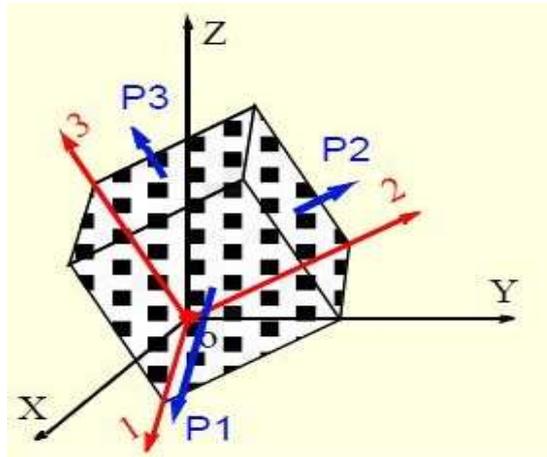
Figura 8: Tensor de tensão



Fonte: Fonseca, Tavares,2012.

As tensões de corte desaparecem em algumas direções. As tensões normais a estas direções designam-se por tensões principais, sendo P_1 : tensão normal na primeira direção principal (maior), P_2 : tensão normal na segunda direção principal (intermédia); P_3 : tensão normal na terceira direção principal (menor). A Figura 9 mostra as tensões principais nos eixos P_1 , P_2 e P_3 (FONSECA, TAVARES, 2012).

Figura 9: Tensões Principais



Fonte: Fonseca, Tavares, 2012.

A tensão de *Von Mises* é um escalar positivo que descreve o estado de tensão, muitos materiais têm colapso quando a tensão de *Von Mises* ultrapassa um determinado valor. Esta tensão é definida em termos das tensões normais e de corte pela Equação 1 (FONSECA, TAVARES, 2012).

$$\sigma_{\text{Vonmises}} = \sqrt{\frac{(S_X - S_Y)^2 + (S_X - S_Z)^2 + (S_Y - S_Z)^2 + 6(T_{XY}^2 + T_{XZ}^2 + T_{YZ}^2)}{2}} \quad (1)$$

Onde:

- Tensão Normal na direção SX;
- Tensão Normal na direção SY;
- Tensão Normal na direção SZ;
- Tensão de corte na direção Y no plano TYZ;
- Tensão de corte na direção Z no plano TYZ;
- Tensão de corte na direção Z no plano TXZ.

Em termos das tensões principais, a tensão de Von Mises é dada pela Equação 2.

$$\sigma_{\text{Vonmises}} = \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)^2 + (P_2 - P_3)^2 + (P_3 - P_1)^2}{2}} \quad (2)$$

Onde:

- P1 – Tensão normal na primeira direção principal (maior);
- P2 – Tensão normal na segunda direção principal (intermédia);

P3 – Tensão normal na terceira direção principal (menor).

A versatilidade é uma notável característica do método dos elementos finitos, pois pode ser aplicado a problemas de natureza diversa, comparando cenários de aplicação de material em diferentes situações, otimizando o processo e evitando os custos associados à experimentação.

2.5.2. Generalidades do *MDsolid*

O *MDsolid* é um *software* utilizado nos cursos de engenharias (mais especificamente nas disciplinas de resistência de materiais) para análise estrutural de vigas, treliças, colunas entre outros elementos. Este *software* tem rotinas que dizem respeito a todos os aspectos ensinados em um curso típico de mecânica dos materiais. Estas rotinas são agrupadas em doze secções, semelhante a capítulos que pertencem a uma ampla gama de problemas de texto comuns atualmente disponíveis. Dentro de módulos, cada rotina resolve os problemas clássicos de tipos de mecânica dos materiais. O escopo de *MDSolids* fornece rotinas para ajudar em todos os níveis de compreensão do conhecimento fundamental, compreensão e do tipo de aplicação a problemas mais complexos que exigem análise e síntese. (MDSolids, 2014).

O *MDSolids* fornece gráficos para orientar os usuários nos sinais de entrada. As ilustrações podem ser facilmente ajustadas às *MDSolids* tela de entrada olhar muito semelhante à ilustração nos livros didáticos. Várias unidades (unidades de comprimento esforço, por exemplo, unidades) estão disponíveis e os fatores de conversão estão presentes para garantir a consistência dimensional. (*MDSolids*, 2014).

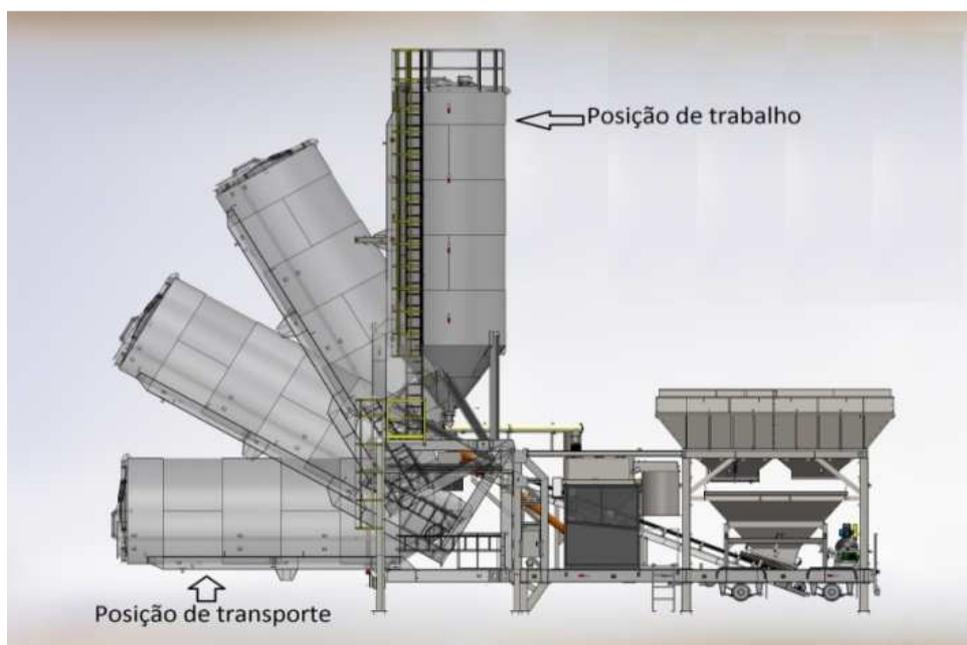
3. METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em três partes: a primeira parte foi certificar através de uma análise estrutural com o *SolidWorks Simulation* que o local da deformação é, de fato, o da região de maior concentração de tensão. A segunda parte foi modelar um chassi com treliça plana para substituir a estrutura original deformada. E a terceira parte foi realizar outra análise estrutural com *SolidWorks Simulation* no chassi com treliça.

3.1. PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DA ESTRUTURA ORIGINAL

Para desenvolver a análise na estrutura original, foi necessário isolar somente a parte de interesse do estudo e, a partir daí, aplicar as forças na viga em que ocorreu a deformação e obter os resultados de maior concentração de tensão *Von Mises*. Após isolar os subconjuntos de interesse, realizou-se a análise estrutural na posição de maior esforço da estrutura no momento em que a central levanta o silo para a posição de trabalho. A Figura 10 mostra o movimento da central móvel de concreto em sua posição de transporte e de trabalho.

Figura 10: Central de concreto



Para realizar esta análise, utilizou-se o módulo estrutural e estudo estático, os contatos entre as superfícies das partes constituintes dele foram considerados fixos

("bonded") entre si. O material utilizado na constituição do chassi foi o ASTM A-36. As propriedades mecânicas deste são mostradas no Quadro 2.

Quadro 2: Propriedade do aço ASTM A36

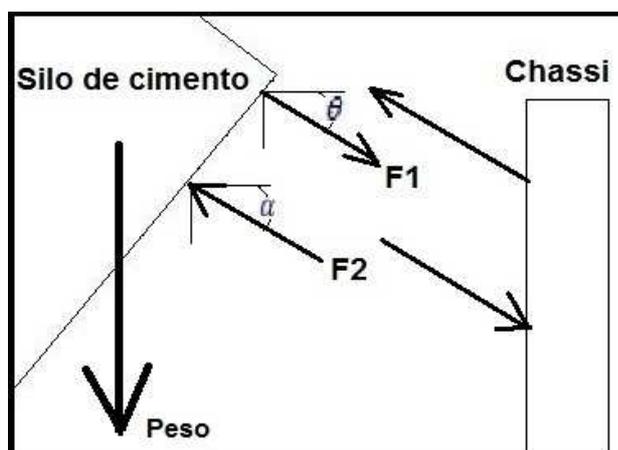
| Material | ASTMA A36 Aço |
|------------------------|-----------------------------------------|
| Espessura da viga | Alma 3/16" ; Mesa 1/4" |
| Limite de Escoamento | 250 MPa |
| Resistência à tração | 400 MPa |
| Módulo elástico | 2000MPa |
| Massa específica | 7850 kg/m ³ |
| Módulo de cisalhamento | 7,93x10 ¹⁰ kg/m ² |

Fonte: Adaptado SolidWorks, 2014.

Para encontrar as forças atuantes nesta estrutura, foi posicionada a parte móvel juntamente com o silo de cimento, na posição onde ele exerceu a maior força na viga da parte fixa do chassi.

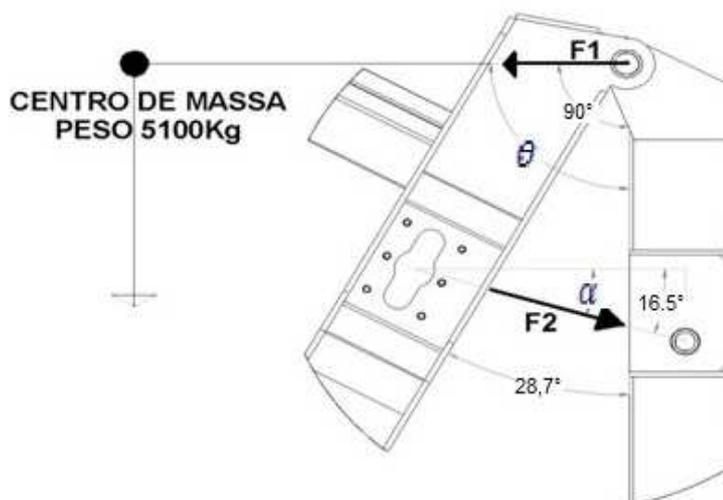
A estrutura móvel com silo de cimento exerce duas forças nas vigas fixas onde são fixados os cilindros hidráulicos. A primeira força foi definida como (F1) que é referente à força exercida pelo silo de cimento na estrutura original de vigas. Outra força aplicada é a força (F2) que o cilindro hidráulico exerce para erguer o silo de cimento da posição de transporte para a posição de trabalho (Figura 10). Para determinar estas forças, foi necessário desmontar o silo de cimento e a estrutura do chassi e desenhar o diagrama de corpo livre de suas duas partes, conforme Figura 11.

Figura 11: Diagrama de corpo livre do chassi com o silo de cimento



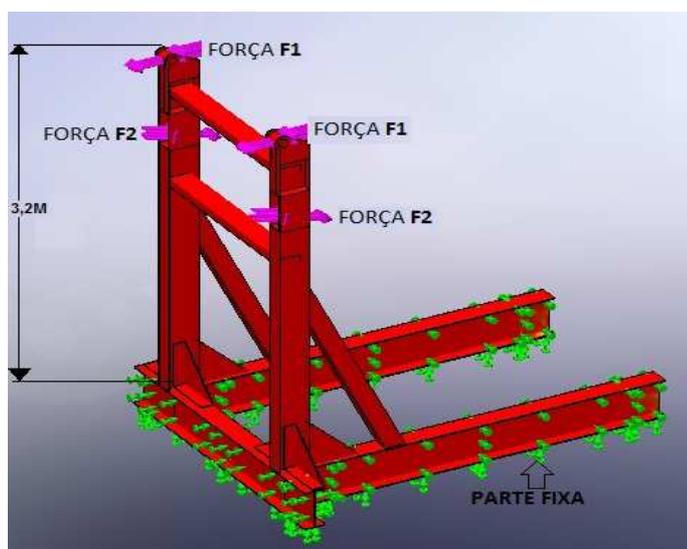
O carregamento foi aplicado nos dois eixos onde é fixado o cilindro hidráulico, e onde é presa a estrutura móvel conforme Figura 12.

Figura 12: Forças aplicadas na estrutura original



A Figura 13 demonstra os locais onde as forças F1 e F2 foram aplicadas e a parte da estrutura do chassi considerada fixa para realizar a análise estrutural com o *SolidWorks Simulation*.

Figura 13: Forças aplicadas na viga da estrutura original



As etapas que foram seguidas para realizar a análise estrutural com o *SolidWorks – Simulation* foram, definir o material ou seja, definir do que é feita a peça, neste caso é aço ASTM A-36; especificar ligações ou seja, onde as faces são fixas e não terão qualquer deslocamento; aplicar carregamento, que se trata das

forças e pressões que atuam sobre o conjunto, estas forças foram denominadas F1 e F2; definir a malha, esta divide o modelo em pequenas partes chamadas elementos, assim podendo ser analisado todas as partes da peça, foi utilizada uma malha mista padrão com 4 pontos; executar a análise e, por último, interpretar os resultados.

Realizada a análise dos resultados e adquiridos os esforços máximos apresentados no equipamento em estudo, realizou-se o dimensionamento de uma treliça plana para substituir a viga deformada pelo esforço sofrido no momento em que o silo é erguido para a posição de trabalho.

3.2. DIMENSIONAMENTO DA TRELIÇA

Para este dimensionamento, foi utilizado o software *MDSolid* para encontrar as tensões máximas em cada membro da treliça. Para isso, foram aplicadas as forças F1 e F2, sendo estes valores divididos pela metade, pois são duas treliças. A força F2 está aplicada na viga em ângulo, por isso foi decomposta em F2x e F2y porque o *MDSolid* só permite colocar força verticais e horizontais.

Utilizando o *MDSolid*, foram aplicadas na treliça, as forças encontradas no diagrama de corpo livre do chassi com o silo de cimento. Esta treliça será fixa na parte inferior conforme demonstrado na Figura14.

Figura 14: Esforço na Treliça e Dimensões em milímetros



Após conhecidos os esforços máximos na treliça, escolheram-se os perfis para suportar estas forças. Para a escolha destes perfis, foi levado em consideração a área de seção mínima para suportar os esforços máximos encontrados através do *MDSolid* na treliça em estudo.

Foi considerado o limite de escoamento do material igual à tensão admissível do aço ASTM A36, que é igual a 250 MPa, e o fator de segurança de acordo com a literatura, para o dimensionamento de vigas e, para levantamento de cargas utilizou-se um coeficiente igual a 18.

Então, através da Equação 3 foi obtida a tensão de trabalho para a treliça.

$$\sigma \text{ trab} = \frac{\sigma \text{ adm}}{cs} \quad (3)$$

Onde:

cs = coeficiente de segurança;

$\sigma \text{ adm}$ = tensão admissível;

$\sigma \text{ trab}$ = tensão de trabalho.

Calculada a tensão de trabalho, o próximo passo foi encontrar a área mínima necessária para suportar o maior esforço nos perfis principais (banzo superior e inferior) da treliça. Calculado o esforço máximo aplicado neste perfil com o *MDSolid*, encontrou-se a área mínima através da Equação 4.

$$\sigma \text{ trab} = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Onde:

$\sigma \text{ trab}$ = tensão trabalho;

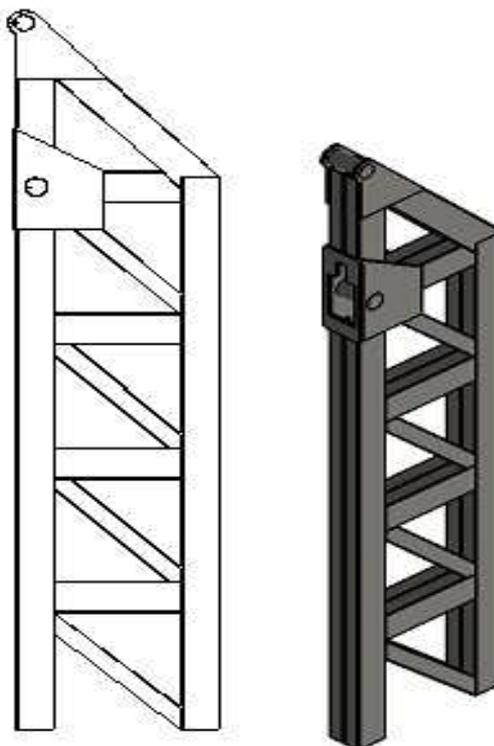
F = Força;

A = área da seção.

Determinada a área dos banzos superior e inferior, o próximo passo foi encontrar a área mínima necessária para suportar o maior esforço nos montantes da treliça. A última área a ser calculada é a dos perfis diagonais da treliça.

Encontradas todas as áreas necessárias, foram determinados os perfis que formaram a treliça, a qual substituirá a viga deformada. Depois de dimensionados todos os perfis modelou-se a treliça. A Figura 15 mostra o modelo de treliça plana que foi utilizado na estrutura.

Figura 15: Treliça plana

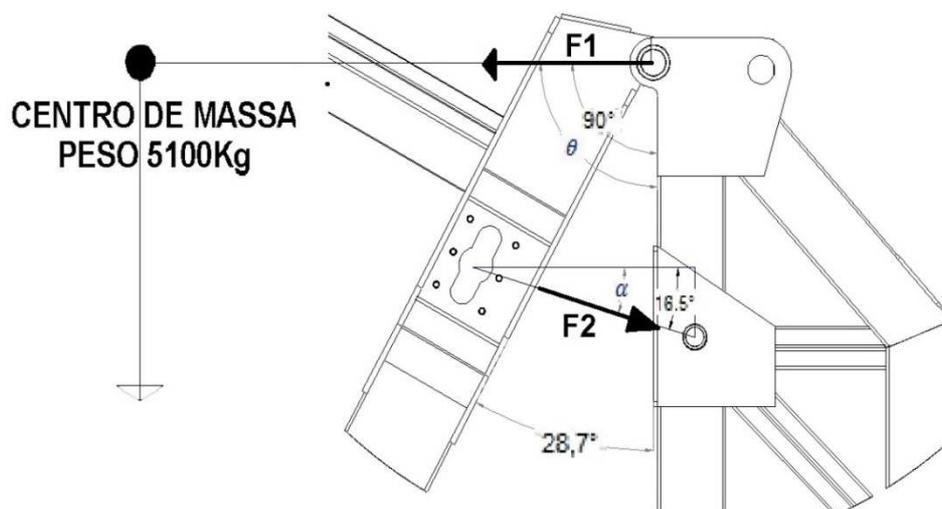


3.3. PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DA TRELIÇA

A próxima etapa foi realizar novamente a análise através do *SolidWorks Simulation* para confirmar que a treliça dimensionada suportará os esforços exigidos pelo equipamento.

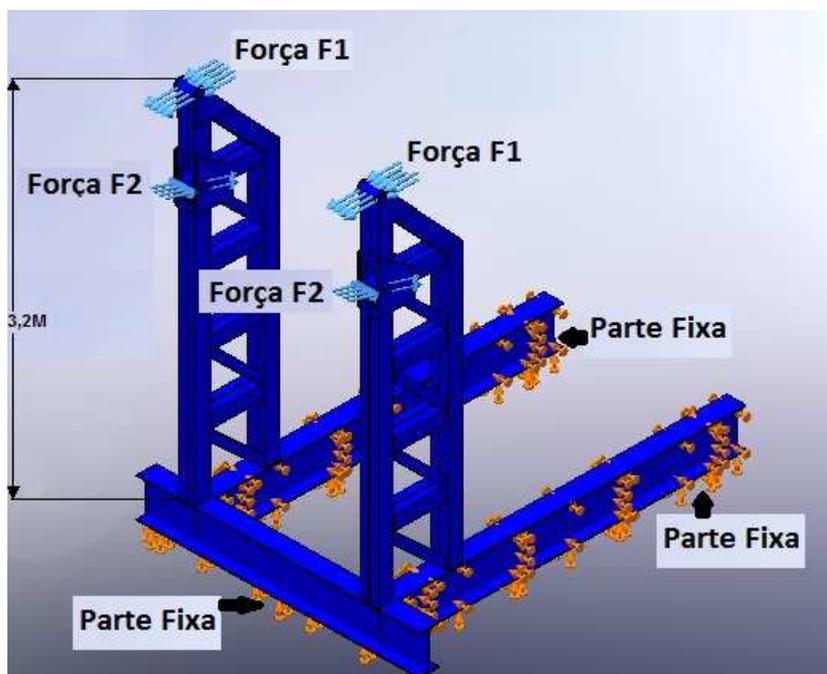
Os procedimentos para realizar esta análise foram os mesmos que os utilizados na análise da estrutura original. Foram aplicadas as forças F1, e F2 encontradas através do diagrama de corpo livre. Estas forças foram aplicadas nos mesmos pontos onde foram aplicadas na viga da estrutura original conforme Figura 16.

Figura 16: Forças aplicadas na Treliça



A Figura 17 demonstra os locais onde as forças F1 e F2 foram aplicadas e a parte da estrutura do chassi considerada fixa para realizar a análise.

Figura 17: Forças aplicadas na estrutura.



Utilizou-se uma malha mista padrão com 4 pontos, executado a análise e interpretados os resultados adquiridos das tensões máximas apresentados no equipamento em estudo.

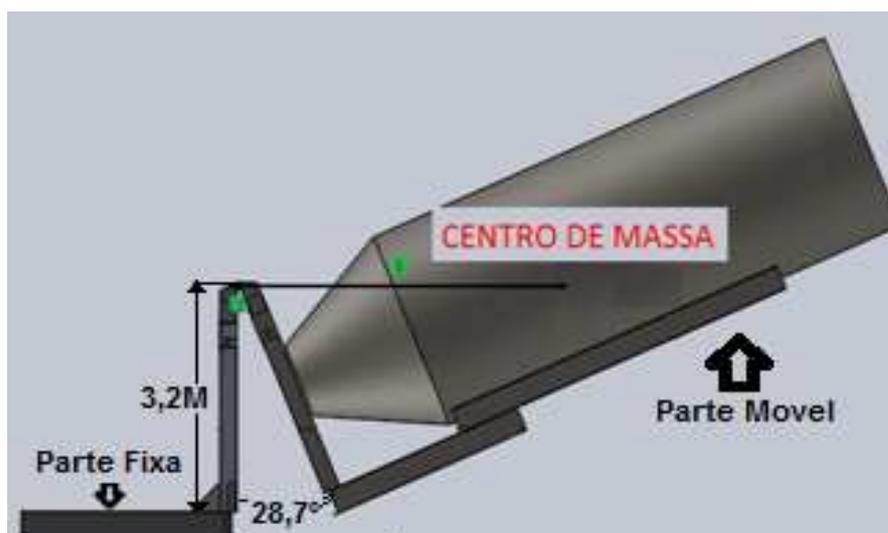
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. ANÁLISE ESTRUTURAL NO PROJETO EXISTENTE

Realizou-se a análise estrutural em parte do chassi que sustenta o silo de cimento e sua estrutura de fixação, com o intuito de comprovar que as tensões máximas aconteceram no mesmo local de deformação da estrutura.

Considerado que o maior esforço absorvido pela estrutura fixa é quando o silo está em um ângulo de $28,7^\circ$ em relação ao solo. Este ângulo foi determinado através da análise do centro de massa do silo de cimento e sua estrutura, pois em $28,7^\circ$ o centro de massa exerce o momento maior nos eixos X e Y do equipamento conforme Figura 18.

Figura 18: Central de concreto na posição de $28,7^\circ$



Determinado o ângulo de $28,7^\circ$ que exerce o momento máximo no chassi foi obtido as forças F_1 e F_2 , estas calculadas através do diagrama de corpo livre, Figura 11, determinando que o somatório das forças no eixo Y são iguais a zero, obteve a Equação 5.

$$F_1 \cdot \text{sen}\theta + F_2 \cdot \text{sen}\alpha = \text{Peso} \quad (5)$$

O somatório das forças no eixo X são iguais a zero, assim obteve a Equação 6.

$$-F_2 \cdot \text{cos}\alpha + F_1 \cdot \text{cos}\theta = 0 \quad (6)$$

Para calcular a força F2 foi determinada a Equação 7.

$$F2 = \frac{F1 \cdot \cos\theta}{\cos\alpha} \quad (7)$$

E para calcular a força F1 foi determinada a Equação 8.

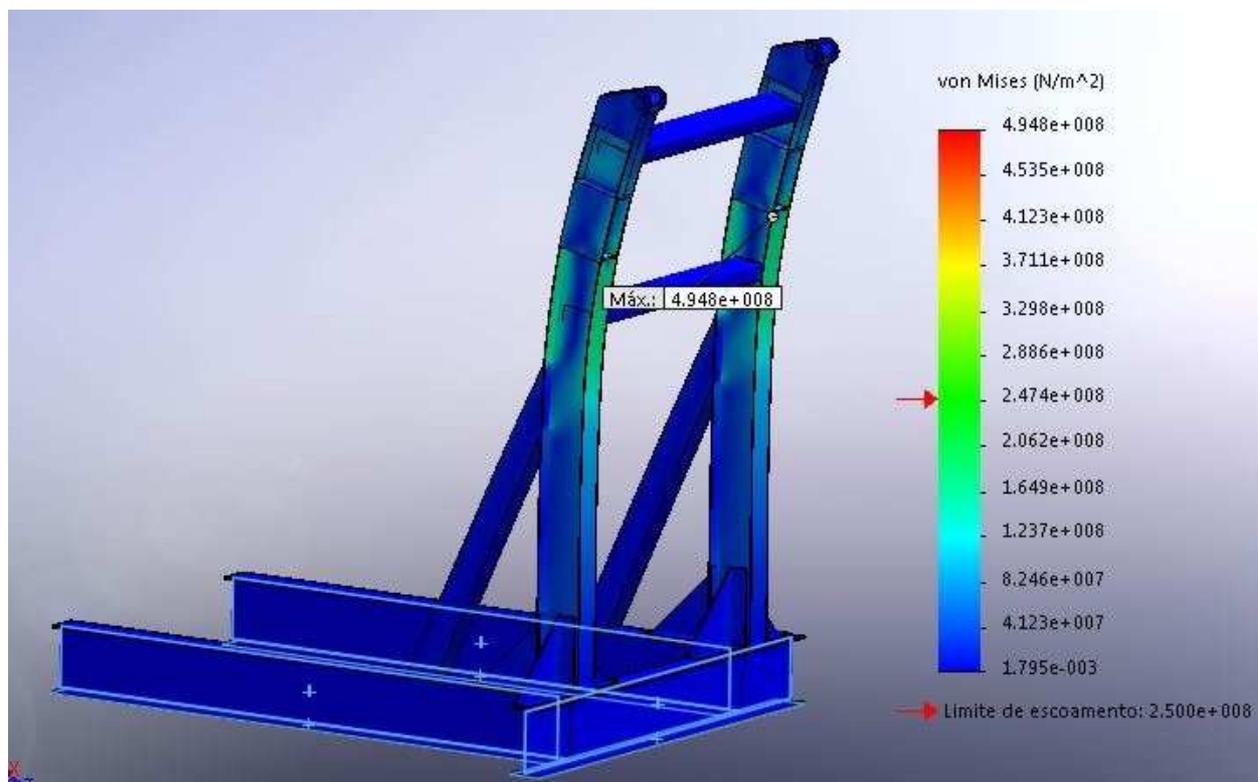
$$F1 = \frac{\text{Peso} \cdot \cos\alpha}{\text{sen}\theta \cdot \cos\alpha + \cos\theta} \quad (8)$$

Com a Equação 8 foi encontrado a força F1 de 48345N e com a Equação 7 foi encontrado a força F2 de 50031N.

Foram aplicadas as forças na viga em estudo e realizada a simulação no *SolidWorks*.

A Figura 19 mostra o resultado da simulação destacando o local onde ocasionou a maior concentração de tensão.

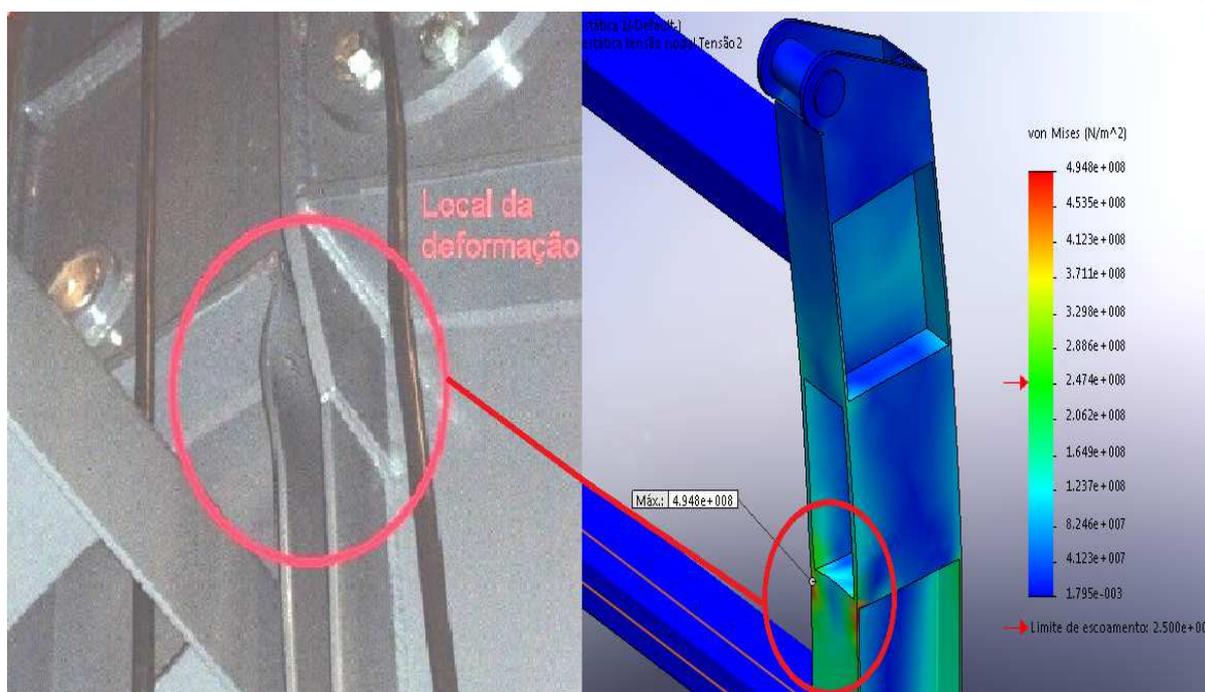
Figura 19: Resultado da análise com os valores de tensão *Von Mises* na estrutura original.



Os resultados encontrados na análise mostram que a tensão máxima atingiu os 494 MPa que significa que as tensões superaram o limite de escoamento do material, que segundo a literatura é de 250 MPa. Pode-se analisar também que o local onde atingiu a maior tensão foi o mesmo lugar onde a viga deformou na prática.

A Figura 20 está mostrando o local da deformação real e o local de maior tensão encontrado na simulação. Esta análise demonstrou, que foi no local onde surgiu a deformação na viga, sendo ele situado logo abaixo do ponto de fixação do cilindro hidráulico, é realmente o ponto de maior concentração de tensões Von Mises porque na simulação com o *Solidworks Simulation*, a maior concentração de tensão foi localizada no mesmo ponto onde deformou a viga na prática.

Figura 20: Comparação do local de deformação



4.2. DIMENSIONAMENTO DA TRELIÇA

Para este dimensionamento, primeiramente foi escolhido manter o mesmo material, o aço ASTM A-36 porque é o material mais utilizado nesta metalúrgica, devido as suas propriedades mecânicas atenderem os requisitos do projeto, com um custo relativamente baixo.

Com o *MDSolid* foi determinado os esforços máximos em cada membro da treliça. A Figura 21 mostra as forças máximas na treliça, quando submetida às forças

F1 de 48345N encontrada na Equação 8, mas dividida por dois, porque foi utilizado duas treliças e a força F2 de 50031N encontrada na Equação 7, está também dividida por 2 e decomposta em F2x e F2y conforme Equação 9 e Equação 10.

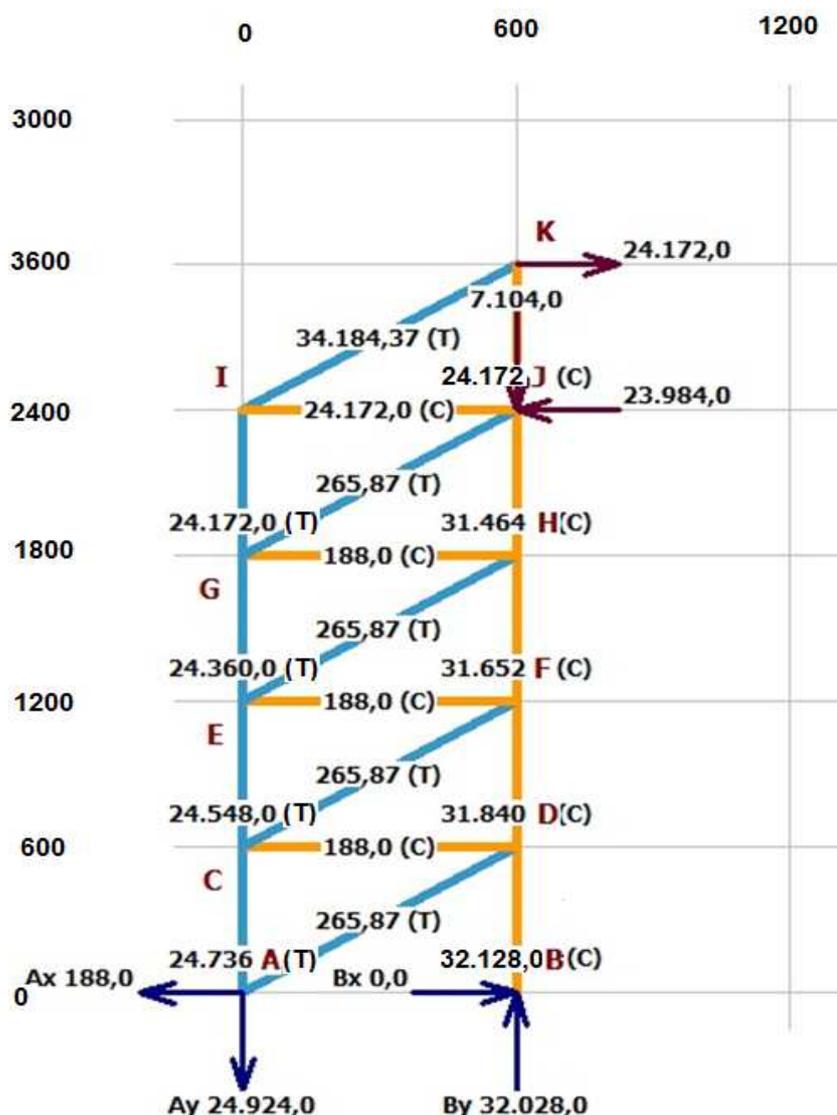
Força em F2x (Equação 9):

$$\cos 16,5^\circ = \frac{F_x}{25015N} \quad (9)$$

Força em F2y (Equação 10):

$$\sin 16,5^\circ = \frac{F_y}{25015N} \quad (10)$$

Figura 21: Forças máximas em Newton nos membros da treliça

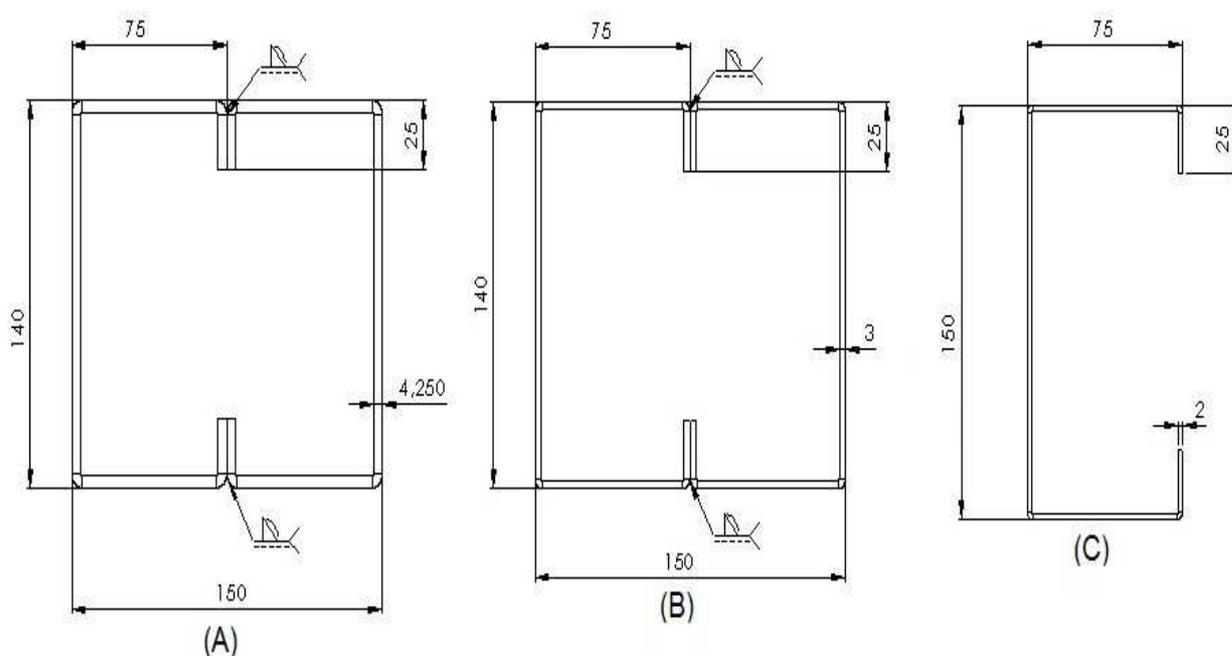


Encontradas as forças máximas, e utilizado segundo a literatura, o limite de escoamento do material sendo igual à tensão admissível do aço A36 que é de 250 MPa, e o fator de segurança sendo igual a 18, foi obtida a tensão de trabalho que é de 14 MPa, conforme calculado na Equação 3.

Foram determinados os perfis da treliça (banzo, montantes e os perfis diagonais) através da área mínima necessária para suportar a maior tensão encontrada na Figura 21.

A Figura 22 mostra os componentes dimensionados para a treliça, sendo eles o banzo, montantes e os perfis diagonais.

FIGURA 22: Componentes da treliça ((A) banzo, (B) montantes e (C) perfis diagonais)



O Banzo superior e inferior da treliça, trata-se de dois perfis U enrijecido com área de secção igual a 1352 mm² cada um, os dois totalizando 2704 mm², a força máxima nestes perfis é de 34184 N, e a área mínima da secção transversal para suportar a força encontrada tem que ser igual ou superior a 2442 mm², esta área mínima foi determinada através da Equação 10.

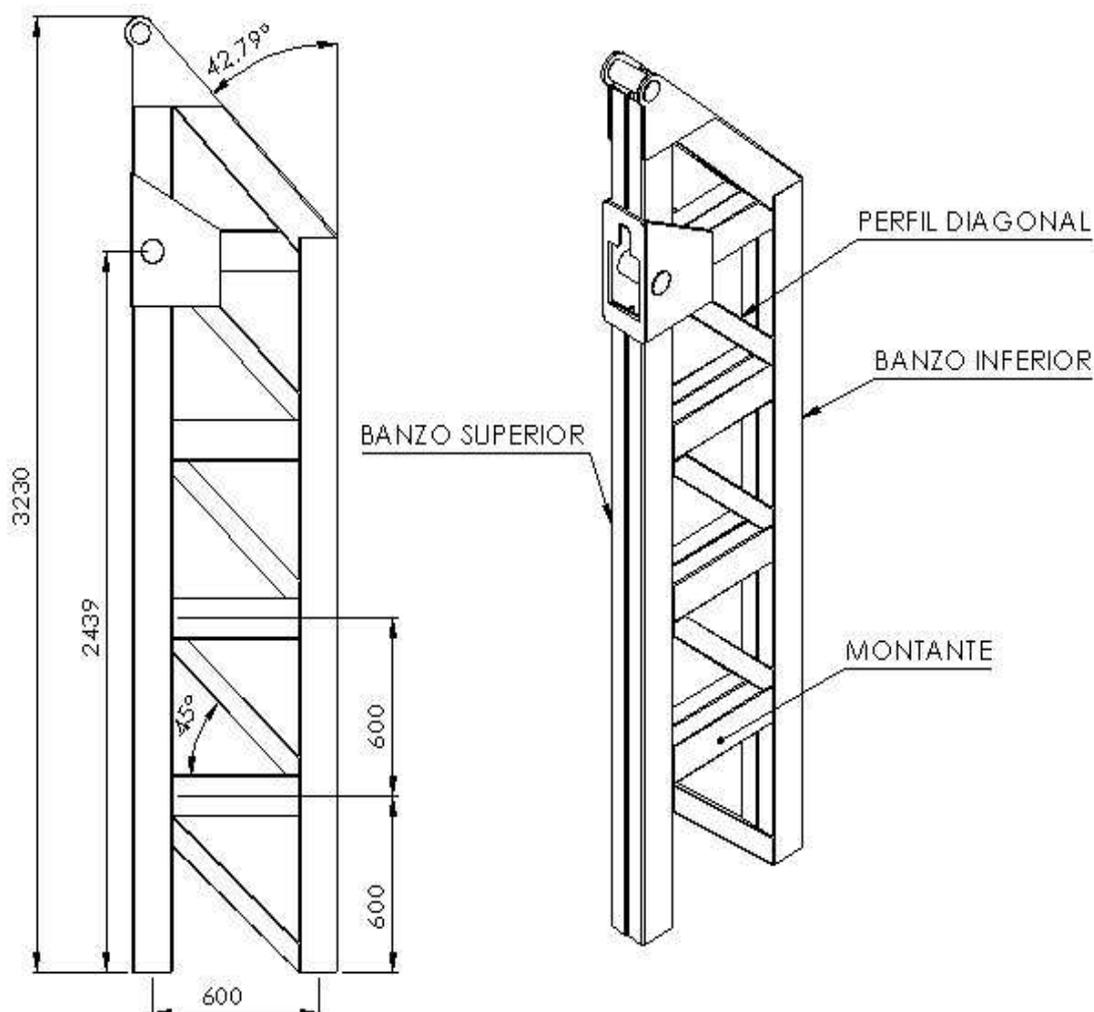
Os montantes da treliça também são dois perfis U enrijecidos com área de secção igual a 972 mm² cada um, os dois totalizando 1944 mm², nestes montantes a força máxima é de 24172 N, e a área mínima da secção transversal para suportar a

tensão encontrada tem que ser igual ou superior a 1726 mm^2 , esta área mínima foi determinada através da Equação 10.

Os perfis diagonais da treliça, sendo um perfil U enrijecido com área de secção igual a 678 mm^2 , nestes perfis, a força máxima é de 266 N, e a área mínima da secção transversal para suportar a tensão encontrada tem que ser igual ou superior a 19 mm^2 , esta área mínima foi determinada através da Equação 10. Neste caso, a área da secção ficou bem maior do que necessitaria, isto foi necessário para conseguir montar este perfil com o banzo e os montantes.

Concluindo o dimensionamento de todos os perfis, a treliça foi modelada no *SolidWorks*, conforme representada na Figura 23.

FIGURA 23: Treliça dimensionada

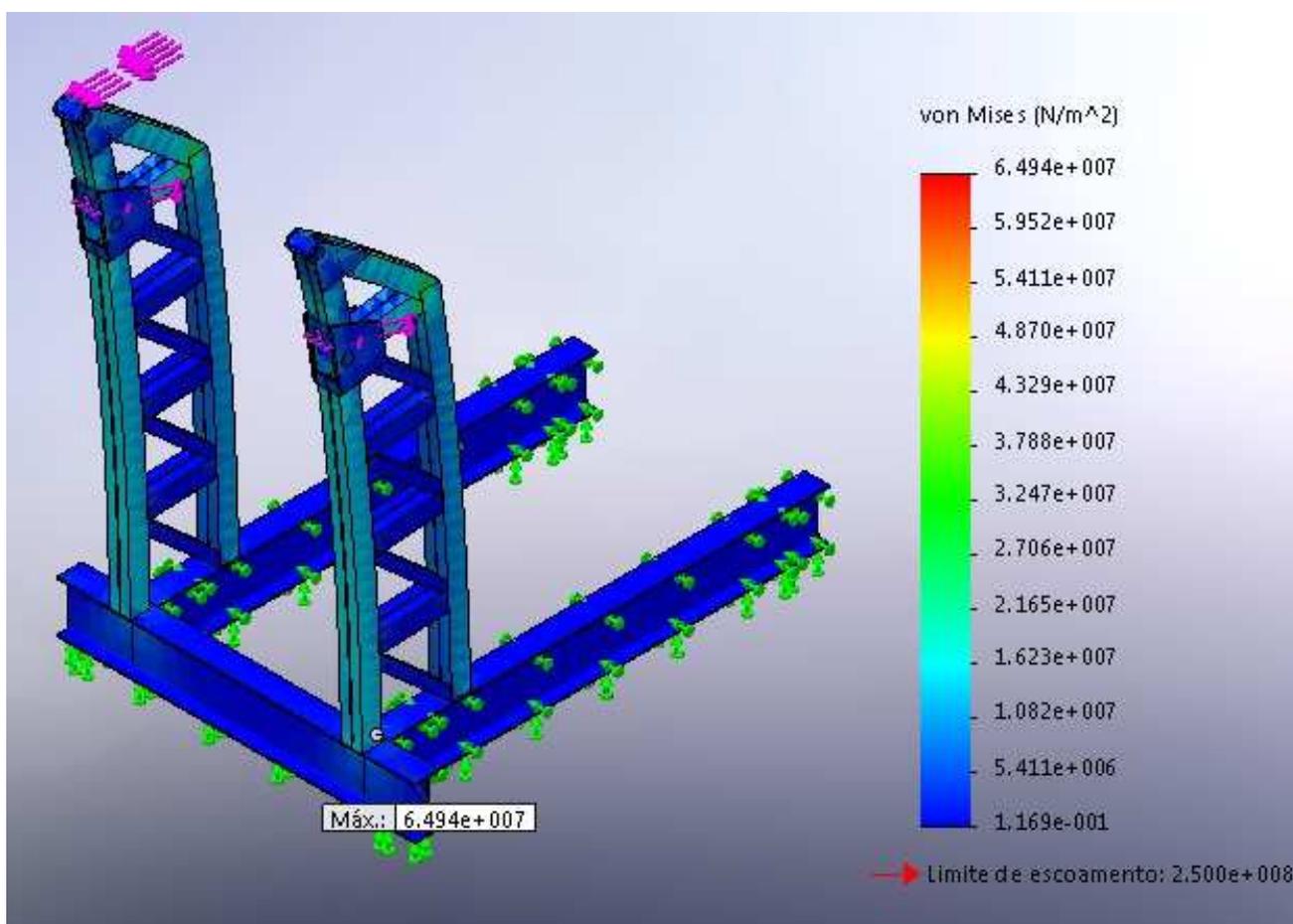


4.3. ANÁLISE ESTRUTURAL NO CHASSI COM A TRELIÇA

Para a segunda análise estrutural, foram aplicadas as forças máximas atuantes, F1 igual a 48345N encontrada na Equação 8 e F2 igual a 50031N encontrada através da Equação 7.

A Figura 24 mostra o resultado da simulação destacando o local onde ocasionou a maior concentração de tensão na treliça.

Figura 24: Resultado da análise com os valores de tensão *Von Mises* na treliça



Os resultados encontrados nesta análise mostram que a tensão máxima atingiu 64,94 MPa que significa que as tensões não superaram o limite de escoamento do material, que segundo a literatura, é de 250 MPa. Pode-se afirmar que a treliça suportou os esforços máximos sem deformar, tornando o projeto válido para a fabricação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi realizada a revisão bibliográfica a respeito das centrais de concreto, materiais de construção mecânica, dimensionamento de vigas e treliças e, por fim, elementos finitos. A partir desta revisão, tornou-se possível adquirir um embasamento teórico para realização deste estudo.

A partir dos resultados da análise estrutural com o *SolidWorks - Simulation* no chassi original, constatou-se que o local da deformação na estrutura foi a região de maior concentração de tensões *Von Mises*, superando o limite de escoamento do material ASTM A36 que é 250 MPa.

Utilizando o *MDSolid*, obtiveram-se as tensões máximas na treliça que substituiu a estrutura original deformada. Através destas tensões foi possível dimensionar as áreas mínimas dos perfis da treliça para suportar essas tensões.

Modelada a treliça e realizada a análise estrutural com o *SolidWorks - Simulation*, determinou-se o resultado de tensão máxima de *Von Mises* que é inferior ao limite de escoamento do material utilizado. Assim, pode-se comprovar que esta treliça suporta as tensões máximas geradas pelo movimento do silo de cimento da central móvel de concreto, garantido a segurança e durabilidade do chassi.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. J. **Resistência dos materiais**. 3. ed. São Paulo, 1995.

FONSECA, J. O.; TAVARES, J. M. **Introdução ao SolidWorks : Análise de Tensões de Peças – SimulationXpress**. Faculdade de Engenharia FEUP. Portugal, 2012.

IXON | QUALITEC IND.COM.LTD. **Central de Concreto Móvel IX TGM COM SILO ERIGÍVEL / CMP SMART**. Manual de Instruções 2. ed. Santa Rosa, 2012.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

HIBBELER, R. C. **Estática: Mecânica para Engenharia**. 12. ed. São Paulo, 2011.

MARTINS, V. C. **Otimização dos processos de dosagem e proporcionamento do concreto dosado em central com utilização de aditivos: estudo de caso**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

MDSolids. **Educational software for mechanics of materials**. Disponível em: <<http://www.mdsolids.com/>> Acessado em: 30outubro 2014.

PFEIL, W. ; PFEIL, M. **Estruturas de aços. Dimensionamento Pratico**. 8. ed. Rio de Janeiro, 2009.

SENAI. SC. **Resistência dos materiais**. Florianópolis, FIESC/SENAI 2004.

SILVA, J. G. S. et al. **Análise Estrutural de Chassis de Veículos Pesados com Base no Emprego do Programa ANSYS**. Dissertação. Universidade do estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

VIRTUALCAE. **SOLIDWORKS SIMULATION PROFESSIONAL**. Disponível em: <<http://www.virtualcae.com.br/solidworks-simulation-professional.html>> Acessado em: 13março 2014.