



**Carlos Henrique Adiers Vidotte**

**ANÁLISE ESTRUTURAL PARCIAL E DIMENSIONAMENTO  
DE SOLDA DE UM EIXO TANDEM**

**Horizontina**

**2014**

**Carlos Henrique Adiers Vidotte**

**ANÁLISE ESTRUTURAL PARCIAL E DIMENSIONAMENTO  
DE SOLDA DE UM EIXO TANDEM**

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: Valtair de Jesus Alves, Mestre.

**Horizontina**

**2014**

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

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:**

**“Análise estrutural parcial e dimensionamento de solda de um eixo tandem.”**

**Elaborada por:**

**Carlos Henrique Adiers Vidotte**

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

**Aprovado em: 05/11/2014  
Pela Comissão Examinadora**

---

**Prof. Me. Valtair de Jesus Alves  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

---

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen  
FAHOR – Faculdade Horizontina**

---

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

**Horizontina  
2014**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram na trajetória do curso, minha esposa e família, especialmente a minha filha Helena.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha esposa, amigos, família, professores, especialmente ao professor Valtair de Jesus Alves, que com paciência e as orientações devidas, permitiu que esse trabalho fosse concluído com sucesso.

*“Seja um padrão de qualidade. As pessoas não estão acostumadas a um ambiente onde o melhor é o esperado.”*

(Steve Jobs)

## RESUMO

Este estudo relata uma análise estrutural parcial e dimensionamento de solda de um eixo tandem de uma carreta basculante, a qual é projetada para fins agrícolas e produzida em uma empresa do ramo metalmecânico de Tuparendi/RS. O trabalho tem como propósito o estudo do eixo e o dimensionamento de solda através do *software SolidWorks*. Após analisadas as forças e identificados os pontos de maior tensão da estrutura, foi analisado através de *software* o eixo, verificando se o mesmo suporta tais esforços. Neste trabalho foram aplicados os conceitos de mecânica dos sólidos e análise de elementos finitos. Para esta análise, utilizou-se o aplicativo *simulation*, disponível junto ao *software solidworks*. Obteve-se a análise da estrutura do eixo tandem e, segundo o estudo simulado no *software* comprova-se que o mesmo resiste aos esforços submetidos. A partir dos resultados obtidos, resultantes das análises e dos valores das tensões e deformações encontradas, foram dimensionadas as uniões solda, gerando uma redução no volume, sem comprometer as juntas soldadas, para suportar os esforços exigidos pelas forças atuantes. Portanto, a partir do conhecimento do *software SolidWorks Simulation* para a análise e dimensionamento de solda do eixo tandem conclui-se que sua utilização é viável, devido ao fato da redução, em média, de 37% no volume de solda em grande parte do eixo.

**Palavras-chave:** Dimensionamento. Elementos Finitos. Eixo Tandem.

## ABSTRACT

This study reports a partial structural analysis and design of soldering a tandem axle dump a cart, which is designed for agricultural purposes and produced in a branch company Tuparendi metal mechanic / RS. The paper aims to study the scaling of the axis and the weld through the *SolidWorks software*. After analyzed the strengths and identified the points of greatest tension of the structure was analyzed using *software* shaft, checking whether it supports such efforts. In this paper the concepts of solid mechanics and finite element analysis were applied. For this analysis, we used the *simulation* application, available from the *solidworks software*. Was obtained by analysis of the structure of the tandem axle and the second study simulated in the *software* it was proven that it resists efforts undergone. From the results obtained from the analyzes and the values of the stresses and strains encountered were scaled the solder joints, resulting in a decrease in volume, without compromising the welded joints, to support the efforts required by operating forces. Therefore, from a knowledge of *SolidWorks Simulation software* for the analysis and design of tandem welding axis concluded that their use is feasible due to the fact that the average reduction of 37% in volume of solder largely shaft.

**Keywords:** Design of Fillet Welded Joints. Finite Elements. Tandem Axle.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Representação de um eixo simples de rodas simples. ....                | 14 |
| Figura 2 - Representação de um eixo tandem de rodas simples. ....                 | 15 |
| Figura 3 - Representação de um eixo duplo especial. ....                          | 15 |
| Figura 4 - Tipos de junta soldada. ....   | 17 |
| Figura 5 - Geometria do Cordão de Solda. ....                                     | 17 |
| Figura 6 - Tipos de chanfro. ....   | 18 |
| Figura 7 - Junta soldada de filete. ....  | 20 |
| Figura 8 - Diagrama de corpo livre da junta soldada. ....                         | 27 |
| Figura 9 - Vista em 3D do eixo tandem. ....                                       | 29 |
| Figura 10 - Pontos de fixação e aplicação de força. ....                          | 31 |
| Figura 11 - Cordões de solda A. ....  | 32 |
| Figura 12 - Cordões de solda B,C,D e E. ....                                      | 32 |
| Figura 13 - Tensão de Von Mises. ....   | 33 |
| Figura 14 - Deslocamento resultante. ....   | 34 |
| Figura 15 - Deformação equivalente. ....  | 35 |
| Figura 16 - Fator de segurança. ....  | 36 |
| Figura 17 - Solda abaixo do praticável. ....                                      | 37 |
| Figura 18 - Soldas abaixo do praticável e abaixo do especificado de projeto. .... | 37 |
| Figura 19 - Soldas praticável e acima do especificado de projeto. ....            | 39 |
| Figura 20 - Soldas praticável e acima do especificado de projeto. ....            | 40 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço SAE 1020 .....                            | 16 |
| Tabela 2 - Propriedades mecânicas típicas do metal depositado .....                | 19 |
| Tabela 3 - Dados de projeto .....  | 30 |
| Tabela 4 - Fatores de segurança recomendados para juntas .....                     | 31 |
| Tabela 5 - Valor médio dos tamanhos de solda das juntas abaixo do praticável. .... | 38 |
| Tabela 6 - Valor médio dos tamanhos de solda das juntas acima do especificado...   | 40 |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>12</b> |
| 1.1. JUSTIFICATIVA.....   | 12        |
| 1.2. OBJETIVOS.....   | 12        |
| <b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....                                 | <b>14</b> |
| 2.2. TIPOS DE EIXO.....   | 14        |
| 2.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇO.....                              | 16        |
| 2.3. TIPOS DE JUNTA SOLDADA.....                                      | 17        |
| 2.4. PROPRIEDADES DOS METAIS DE SOLDA.....                            | 18        |
| 2.5. DIMENSIONAMENTO DE SOLDA SEGUNDO AWS.....                        | 19        |
| 2.6. MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS.....                                | 22        |
| 2.6.1. TIPOS DE ANÁLISE.....  | 23        |
| 2.6.2. ANÁLISE DINÂMICA OU ESTÁTICA.....                              | 23        |
| 2.6.3. ANÁLISE NÃO LINEAR OU LINEAR.....                              | 23        |
| 2.7. <i>SOLIDWORKS SOFTWARE</i> .....                                 | 24        |
| 2.7.1. <i>SOLIDWORKS SIMULATION</i> .....                             | 24        |
| 2.7.2. <i>SOLIDWORKS CONECTORES DE SOLDA</i> .....                    | 25        |
| 2.7.3. <i>SOLIDWORKS E AWS</i> .....                                  | 25        |
| <b>3. METODOLOGIA</b> .....   | <b>29</b> |
| 3.1. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS.....                               | 29        |
| <b>4. ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....                                | <b>33</b> |
| 4.1. TENSÃO DE <i>VON MISES</i> .....                                 | 33        |
| 4.2. DESLOCAMENTO RESULTANTE.....                                     | 34        |
| 4.3. DEFORMAÇÃO EQUIVALENTE.....                                      | 34        |
| 4.4. FATOR DE SEGURANÇA.....  | 35        |
| 4.5. DIMENSIONAMENTO DE SOLDA.....                                    | 36        |
| <b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....                                  | <b>42</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                            | <b>43</b> |
| <b>7. APÊNDICE A - DESENHO 2D DOS COMPONENTES DO EIXO TANDE</b> ..... | <b>45</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o computador tornou-se uma ferramenta absolutamente obrigatória para o desenvolvimento de projetos associados às engenharias. Para tal, existem inúmeros *softwares* disponíveis no mercado, entre eles, destacam-se: ANSYS, SOLIDWORKS e COSMOS. O uso de tais ferramentas justifica-se pela possibilidade de analisar e calcular numericamente modelos complexos, referentes a estruturas reais, com maior precisão e rapidez. Quando há a necessidade de estudar ou projetar uma estrutura, é normal realizar-se um conjunto de análises e modificações das suas características, com o objetivo de atingir uma solução satisfatória, em termos da verificação de condições funcionais.

O estudo analisou parte do eixo de uma carreta basculante, que é projetada e fabricada em uma empresa nacional do ramo metalmeccânica situada em Tuparendi/RS. Este modelo de equipamento (carreta basculante agrícola) corresponde a um chassi basculante semelhante ao de um caminhão.

### 1.1. JUSTIFICATIVA

As empresas KHOR 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 desempenho do equipamento à proposta de durabilidade e satisfação do cliente foi necessário realizar uma análise estrutural através de elementos finitos, para identificar os pontos de maior concentração de tensão, a fim de dimensionar as uniões soldadas e adequadas à estrutura.

### 1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal a realização de uma análise parcial e dimensionamento de solda em um eixo tandem de uma carreta basculante agrícola, utilizando programa *SolidWorks Simulation*. Através do *software* será possível verificar o deslocamento máximo, fator de segurança e as tensões cisalhamento suportadas pelo referido eixo. Com isso, simular situações reais e identificar as regiões mais solicitadas da estrutura.

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

- Promover uma pesquisa de revisão bibliográfica sobre estruturas e dimensionamento de construção mecânica, dimensionamento de solda, e métodos de elementos finitos;
- Modelar no *SolidWorks* a estrutura do eixo tandem e realizar a análise estrutural com o *SolidWorks Simulation*.
- Conhecer os pontos de maior tensão no eixo, visando certificar-se de que a estrutura suportará a carga e esforços estabelecidos;
- Dimensionar as uniões soldadas de parte do eixo, através do *software SolidWorks Simulation*.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

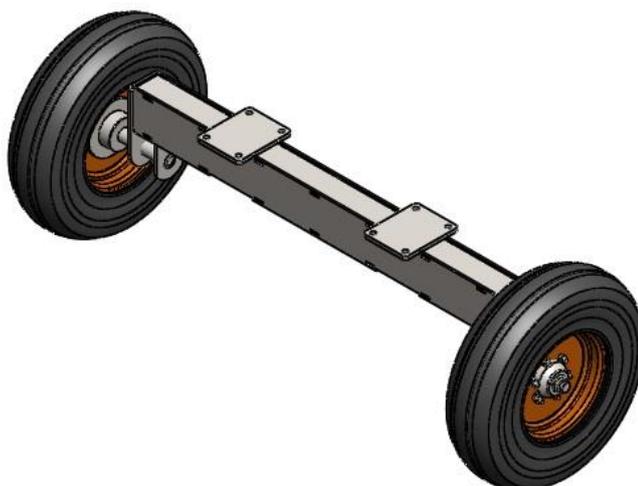
A revisão de literatura a seguir, apresenta inicialmente uma breve descrição sobre os tipos de eixo, fundamentações teóricas gerais sobre dimensionamento de solda e análise de elementos finitos, bem como, todo o embasamento teórico necessário utilizado pelo *software* para calcular o dimensionamento de solda. Por fim, são abordados alguns conceitos de propriedades mecânicas e propriedades dos metais de solda.

### 2.2. TIPOS DE EIXO

Segundo Neves (2002), os eixos se dividem em três grupos: os eixos simples de rodas simples para cargas mais leves, os eixos mistos para cargas elevadas e o eixo tandem empregado tanto em cargas leves como em pesadas, eixo esse, utilizado nesse projeto.

- Eixo simples: é o conjunto de duas ou mais rodas, cujos centros estão em um plano transversal vertical ou podem ser incluídos entre dois planos transversais distantes de 100 cm, que se estendem por toda a largura (NEVES 2002). A Figura 1 ilustra um eixo simples de roda simples.

Figura 1 - Representação de um eixo simples de rodas simples.



**Fonte:** Adaptado de NEVES (2002).

- Eixos tandem: dois ou mais eixos consecutivos, cujos centros estão distantes demais de 100 cm e menos de 200 cm, e ligados a um dispositivo de suspensão que distribui a carga igualmente entre os eixos (balancim). O conjunto

desses eixos constitui um Eixo Tandem (NEVES 2002). A Figura 2 ilustra um eixo tandem de roda simples.

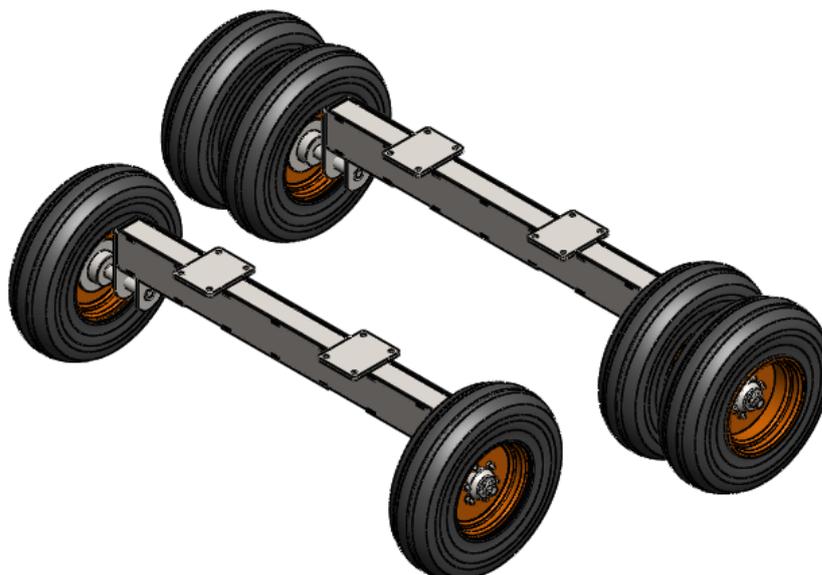
Figura 2 - Representação de um eixo tandem de rodas simples.



**Fonte:** Adaptado de NEVES (2002).

- Outros eixos: é o conjunto de dois ou mais eixos consecutivos, cujos centros estão distantes em mais de 2 m e ligados ou não entre si, podendo ser também mistos (NEVES 2002). A Figura 3 ilustra um eixo duplo especial.

Figura 3 - Representação de um eixo duplo especial.



**Fonte:** Adaptado de NEVES (2002).

## 2.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇO

As propriedades mecânicas apresentam-se quando o material está sujeito a esforços de natureza mecânica. Ou seja, essas propriedades determinam a maior ou menor capacidade que o material tem para transmitir ou resistir aos esforços que lhe são aplicados. (GONÇALVES E MARTINS 2005).

Segundo Gerda (2013), os aços carbonos são ligas metálicas constituídas basicamente de ferro, carbono, silício e manganês, apresentando também outros elementos inerentes ao processo de fabricação, em percentuais controlados.

Ainda, segundo o mesmo autor, o aço carbono SAE 1020 é um dos aços mais utilizado, devido a sua baixa temperabilidade, excelente forjabilidade e soldabilidade. A microestrutura presente neste aço no seu estado normalizado é perlita fina e ferrita. Este aço é utilizado para eixos em geral, indicado para parafusos, trefilados duros, chassis, discos de roda, peças em geral para máquinas e veículos submetidos a esforços pequenos e médios.

Na Tabela 1 encontram-se as principais propriedades mecânicas do aço SAE 1020, aço esse utilizado no projeto.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço SAE 1020.

| Material     | Tensão de escoamento  |                      | Tensão ruptura        |                       |                      |
|--------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
|              | $\sigma$ tração (Mpa) | $\tau$ cisalh. (Mpa) | $\sigma$ tração (Mpa) | $\tau$ compres. (Mpa) | $\tau$ cisalh. (Mpa) |
| Aço SAE 1020 | 350                   | 210                  | 420                   | 420                   | 250                  |

**Fonte:** Adaptado de SUBSTECH (2012).

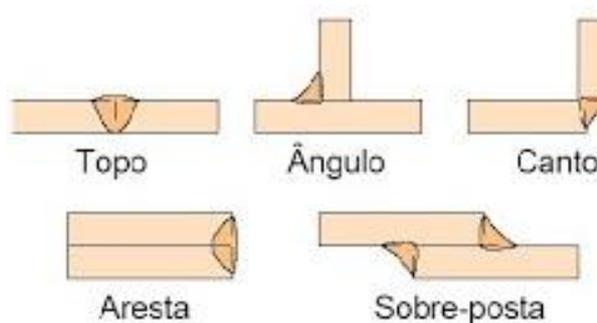
A partir da Tabela 1 foi possível conferir junto ao *software* todas as propriedades do aço SAE 1020 laminado a frio, tais como: tensão de escoamento e cisalhamento.

### 2.3. TIPOS DE JUNTA SOLDADA

Para Marques (2011), o tipo de junta soldada deve ser determinado em projeto, em função das características do equipamento. O autor ressalta que o carregamento em uma estrutura ou equipamento é transmitido entre as partes através da solda.

O posicionamento das peças para união determina os vários tipos de juntas. Entretanto, na maioria das vezes, as dimensões das peças, a facilidade de movê-las e as necessidades do projeto, exigem uma preparação das peças para a soldagem, na forma de cortes ou de conformações especiais de juntas. (MARQUES, 2011). Na Figura 4 apresentam-se os diferentes tipos de juntas soldadas.

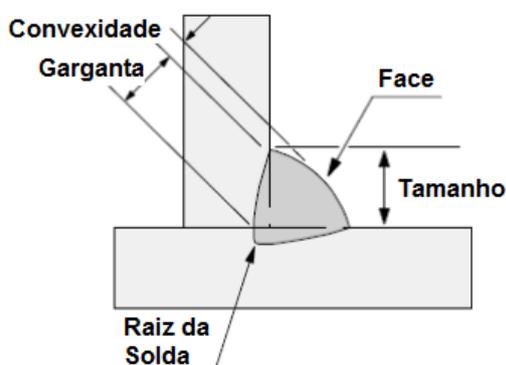
Figura 4 - Tipos de junta soldada.



**Fonte:** Marques (2011).

A junta utilizada no presente trabalho é a junta em ângulo ilustrada na Figura 5, que apresenta a geometria do cordão de solda e algumas características importantes para o entendimento do trabalho.

Figura 5 - Geometria do Cordão de Solda.

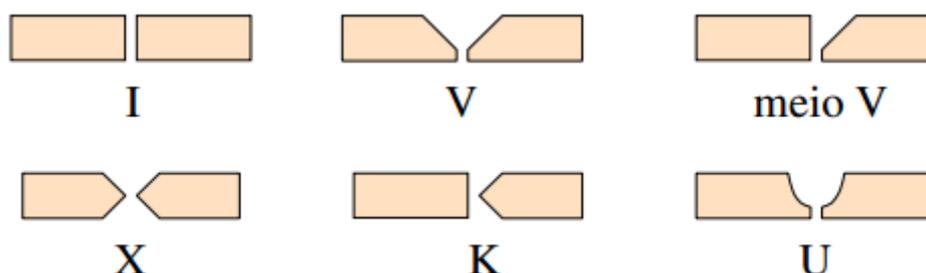


**Fonte:** adaptado de MARQUES (2011).

Para Marques (2011), diversos tipos de chanfros podem ser utilizados para a preparação das peças, chanfros em V, em J em U, simples ou duplos (na soldagem pelos dois lados); e além do tipo de solicitação imposta – em tração, torção, dobramento ou cisalhamento; estático ou cíclico deve-se ainda, minimizar o nível de tensões residuais impostas pela soldagem.

Segundo Marques (2011), a escolha do tipo de chanfro e suas dimensões, representados na Figura 6, dependem de muitos fatores como: o material base, a sua espessura, o tipo de junta, o processo de soldagem, a possibilidade de se acessar nos dois lados da junta, a posição de soldagem e as características desejadas para a junta.

Figura 6 - Tipos de chanfro.



Fonte: Marques (2011).

## 2.4. PROPRIEDADES DOS METAIS DE SOLDA

Fortes (2004) aponta que o ideal seria se o metal de solda propriamente dito, e a zona afetada pelo calor tivessem exatamente as mesmas propriedades e características que as do metal de base. Entretanto, isso não é possível, porque o metal de solda é fundido, enquanto que a maioria dos metais de base é utilizada no estado forjado ou no laminado. Materiais conformados sempre apresentam maior resistência, ductilidade e tenacidade que os materiais comparáveis no estado fundido.

O metal de solda é, no entanto, uma miniatura de um fundido que é rapidamente resfriado, e suas propriedades, frequentemente, assemelham-se às de um material conformado.

Nas especificações AWS D1.1 (2008), têm-se os requerimentos para a classificação de eletrodos sólidos ou compostos (arame tubular com núcleo metálico – metal cored) e varetas para os processos GMAW, GTAW e PAW na soldagem de aço carbono. Os critérios de classificação são; eletrodos e varetas sólidas: análise

química do próprio eletrodo ou vareta e propriedades mecânicas do metal depositado. E os demais são eletrodos compostos: análise química e propriedades mecânicas do metal depositado. O sistema de classificação obrigatório é: ER X Y – X; ER – designa eletrodo na forma de arame ou vareta; X – designa o limite de ruptura no ensaio de tração em Ksi; S – designa eletrodo sólido ou C – designa eletrodo composto. X – designa a faixa de composição química.

O eletrodo utilizado no projeto é o ER70S-6, com resistência à tração de 550MPa e limite de escoamento de 440 MPa, com todas as posições de solda na horizontal e arame de diâmetro de 1,0 mm, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas típicas do metal depositado.

| Eletrodo         | Gás de proteção | Limite de Escoamento (MPa) | Resistência à Tração | Alongamento (%) |
|------------------|-----------------|----------------------------|----------------------|-----------------|
| Especificado AWS | CO <sub>2</sub> | 400                        | 480                  | ≥22             |
| ER70S-6          |                 | 440                        | 550                  | 30              |

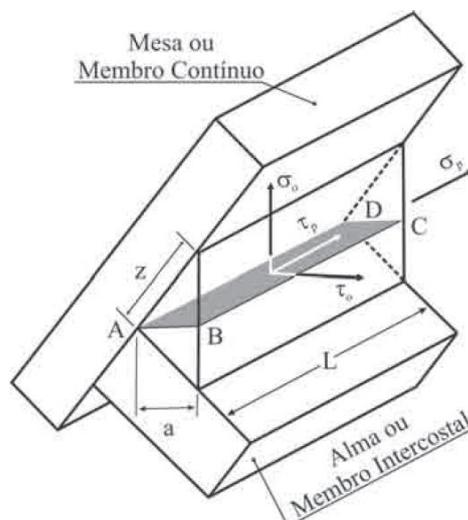
Fonte: Lincoln Electric (2014).

## 2.5. DIMENSIONAMENTO DE SOLDA SEGUNDO AWS

Segundo Machado (2011), o dimensionamento correto de uniões soldadas pode evitar falhas, além de reduzir significativamente custos e distorções. A Figura 7 ilustra onde se encontram algumas importantes características da solda de filete.

Machado (2011) descreve a Figura 7, como um plano ABCD, o qual é determinado pela “a”, tamanho de solda “z”, comprimento (efetivo) de cordão “L”, tensão normal paralela ao eixo da solda “ $\sigma_p$ ”, tensão normal ortogonal à seção da garganta da solda “ $\sigma_o$ ”, tensão de cisalhamento (no plano da garganta) paralela ao eixo da solda; “ $\tau_p$ ” e tensão de cisalhamento (no plano da garganta) ortogonal ao eixo da solda “ $\tau_o$ ”.

Figura 7 - Junta soldada de filete.



Fonte: Machado (2011).

Machado (2011) descreve a Figura 7, como um plano ABCD, o qual é determinado pela “a”, tamanho de solda “z”, comprimento (efetivo) de cordão “L”, tensão normal paralela ao eixo da solda “ $\sigma_p$ ”, tensão normal ortogonal à seção da garganta da solda “ $\sigma_o$ ”, tensão de cisalhamento (no plano da garganta) paralela ao eixo da solda; “ $\tau_p$ ” e tensão de cisalhamento (no plano da garganta) ortogonal ao eixo da solda “ $\tau_o$ ”.

Ainda, segundo o mesmo autor, a área do plano da garganta pode ser definida pela Equação 1. Já para o *software*, a área pode ser determinada pela Equação 7.

$$A_S = a.L = (z/\sqrt{2}).L \quad (1)$$

Segundo Machado (2011), em 1928, considerava-se a  $\tau_{as}=11,3$  ksi (~78 MPa), contudo, neste período ainda era usual a soldagem ao arco elétrico com arame nu (sem proteção). Apenas em 1940, com o uso de eletrodos revestidos, foi possível soldar aço similar ao ASTM A36, com resistência à tração  $f_S=60$  ksi (~430 MPa), para esse fato, foi elevada a tensão de cisalhamento ( $\tau_{as}$ ) de 11,3 ksi para 13,6 ksi (~94 MPa).

De acordo com o mesmo autor, em 1963, iniciou-se a soldagem de aços com resistência ao escoamento  $f_y=50$  ksi (~330 MPa), graças a utilização de consumíveis com  $f_S =70$  ksi (~490 MPa). Após a revisão do AWS *Building Code* em

1963, a tensão de cisalhamento ( $\tau_{as}$ ) passou a ter novos valores de ( $\tau_{as}$ ) 15,8 ksi (~109 MPa).

Para Machado (2011), a primeira opção oferecida pela AWS para determinação da tensão de cisalhamento se resume na Equação 2. Para o *software* tem-se a Equação 12, que descreve a força de cisalhamento  $f_s$ .

$$\tau_{as} = 0,30 \cdot f_s \quad (2)$$

Afirma Machado (2011) que a Equação 2, baseia-se nos menores valores obtidos em filetes longitudinais, e leva-se em consideração fatores de segurança em relação à ruptura. Os valores dos fatores de segurança que atendem essa equação são de 2,2 e 2,7 para juntas, e 3,3 a 4,1 para filetes transversais. Por outro lado, reconhecendo que há diferença na resistência do metal de solda (MS), conforme é alterado o ângulo entre a direção da junta soldada e o carregamento.

Ainda segundo Machado (2011), a tensão que atua no plano da garganta da solda, é de cisalhamento, independentemente da orientação relativa entre ele e a força resultante. Sendo assim, a tensão de cisalhamento na seção líquida ( $v_u$ ) é descrita pela Equação 3. Já para o *software* a equação utilizada transcreve-se conforme a Equação 14.

$$v_u \leq 0,40 \cdot f_y \quad (3)$$

Desta forma, a AWS D1.1 (2008), define a Equação 4 para Tensão admissível de Solda de Filete, que ampara a solda de filete linear única ou grupos de solda de filete, constituindo soldas de filete linear paralelas, todas carregadas no mesmo ângulo em plano, através do centro de gravidade do grupo de solda. O *software* utiliza a Equação 16 para determinar a resistência de cisalhamento aceitável do eletrodo.

$$\tau_{as} = 0,30 \cdot F_{Exx} (1,0 + 0,50 \sin^{1,5} \theta) \quad (4)$$

Onde:  $\tau_{as}$  = unidade de tensão permissível

$F_{EXX}$  = número de classificação de eletrodo, (resistência de eletrodo).  
 $\theta$  = ângulo entre a direção da força e o eixo do elemento de solda.

A Equação 4 pode ser utilizada no caso do consumíveis com  $f_s = 70$  ksi ou  $f_s = 60$  ksi. Tanto na norma AWS, quanto na norma AISC, admite-se que a tensão admissível ( $\tau_{as}$ ), seja calculada através da Equação 4, não restringindo seu emprego para consumíveis com este específico nível de resistência à tração.

Com o emprego dos consumíveis com resistência à tração  $f_s = 70$  ksi (~490 MPa), fez-se necessário uma nova equação, já que a tensão suportada pela solda ( $F_{us}$ ) poderia ser cerca de 2,84 vezes maior do que aquela da Equação 4. A Equação 5 atende as resistências à tração maiores de  $f_s = 70$  ksi.

$$F_{us} = 0,852 \cdot F_{EXX} (1,0 + 0,5 \sin 1,5 \theta) \quad (5)$$

Para o dimensionamento da garganta de solda transversal ou longitudinal, considera-se um projeto baseado em resistência admissível. Segundo Machado (2011), utiliza-se a Equação 6. Para o *software* a resistência admissível é descrita pela Tabela 2.

$$R_a = \frac{f_y \cdot A}{1,67} \quad (6)$$

Machado (2011) enfatiza que a resistência ( $A$ ) admissível da solda, dada pelo produto da sua tensão admissível e área da garganta das duas soldas ( $A_s$ ) deve ser, no mínimo, igual à da alma.

## 2.6. MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS

Para Azevedo (2003), o *software* apresenta o Método dos Elementos Finitos (MEF) num nível de desenvolvimento que permite a sua utilização pela generalidade dos projetistas de estruturas. Para o mesmo autor, hoje em dia, a quase totalidade

dos projetistas de estruturas, tendem o foco para a utilização do correspondente *software* e com a interpretação dos resultados obtidos.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores. Este tipo de cálculo tem a designação genérica de análise de estruturas.

Para Campilho (2012), o MEF pode ser interpretado como uma generalização dos procedimentos adotados em uma análise estrutural convencional de sistemas reticulados.

### **2.6.1. Tipos de análise**

Campilho (2012), define a análise estrutural como a etapa do projeto estrutural onde é feita uma previsão sobre o comportamento da estrutura. Isto é uma simulação de como a estrutura responde a todas as solicitações. Para esta simulação é criado um modelo matemático, denominado Modelo Estrutural.

Conforme Azevedo (2003), para análise de uma estrutura, primeiro classifica-se a geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. Aspectos da análise de uma estrutura.

### **2.6.2. Análise dinâmica ou estática**

As ações sobre as estruturas são em geral dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos seus componentes fica sujeito, como os efeitos dinâmicos. Contudo, em muitas situações é razoável considerar que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezáveis as forças de inércia. Nestes casos, a análise designa-se estática (AZEVEDO 2003).

### **2.6.3. Análise não linear ou linear**

Na análise de uma estrutura sólida, é habitual considerar que os deslocamentos provocados pelas ações exteriores são muito pequenos quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura. Nestas circunstâncias, admite-se que não

existe influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões, todo o estudo é feito com base na geometria inicial indeformada. Se esta hipótese não for considerada, a análise é designada não linear geométrica (AZEVEDO, 2003).

É também frequente considerar que, ao nível do material que constitui a estrutura, a relação entre tensões e deformações é linear. Nos casos em que esta simplificação não é considerada, é necessário recorrer a algoritmos específicos de análise não linear material.

## 2.7. SOLIDWORKS SOFTWARE

Para Amaral (2010), *SolidWorks* é um programa de CAD 3-D, para modelagem de sólidos, geralmente utilizado no projeto de conjuntos mecânicos. O *SolidWorks* pode ser utilizado também como *software* de CAE (*Computed-Aided Engineering*), em conjunto com programas de simulação, tais como o *SolidWorks Simulation* e o *SolidWorks Flow Simulation*.

O *SolidWorks Simulation* é tido como uma importante ferramenta de análise de tensões nas peças projetadas. O programa funciona com base no método numérico dos elementos finitos (ou FEM, do inglês *Finite Element Method*), respondendo à aplicação virtual de forças sobre a peça.

### 2.7.1. *SolidWorks Simulation*

Segundo IST Sistemas (2014), o *SolidWorks Simulation* é uma ferramenta totalmente integrada ao *Solidworks* e destinada ao mundo das análises por elementos finitos (FEA), trabalhando com peças e conjuntos e todas as condições de contorno necessárias como carregamentos, fixações, contato entre componentes, elementos de fixação, etc. Como resultado nos dá informações precisas acerca das tensões, deslocamentos, deformações e fator de segurança.

Para Virtualcae (2009), alguns tipos de análises possíveis no *Solidworks Simulation*: Simulação de montagens, mecanismos e estruturas soldadas, previsão de falhas, otimização paramétrica, frequências naturais, transferência de calor, impacto, fadiga, e vasos de pressão.

### 2.7.2. SolidWorks Conectores de solda

Para Dassault Systemes (2014), o conector de solda de aresta, no software Solidworks, estima o tamanho apropriado da solda necessária para unir dois componentes metálicos.

O programa calcula o tamanho apropriado de solda em cada união soldada. Para os conectores de solda, o sistema disponibiliza dois padrões de cálculos, o padrão americano de soldagem (AWS) e o padrão europeu de soldagem (EUROCODE).

### 2.7.3. SolidWorks e AWS

De acordo com Dassault Systemes (2014), o software, calcula o tamanho da solda e o tamanho da garganta de solda, em todas as uniões soldadas, também é possível determinar todas as espessuras do material de base,  $t_b$ , como a espessura da casca da peça.

Para este procedimento, o software disponibiliza a Equação 7 e 8 para determinar a área da solda  $A_w$ , ( por unidade de comprimento).A Equação 7 é utilizada para soldas de um lado.

$$A_w = t_w^2 \quad (7)$$

Onde:  $t_w$  é a garganta da solda

Já, a Equação 8 é utilizada para soldas de dois lados.

$$A_w = 2.t_w^2 \quad (8)$$

Seguindo para cálculos de solda, determinando o módulo de seção da solda,  $S_w$ , por unidade de comprimento, o software disponibiliza três equações, para soldas de filete de dois lados tem-se a Equação 9.

$$S_w = t_w \cdot t_b \quad (9)$$

Já para soldas de ranhura de dois lados têm-se a Equação 10.

$$S_w = (4/3) \cdot (t_w^3 / t_b) - 2 \cdot t_w^2 + t_w \cdot t_b \quad (10)$$

E para a solda de filete ou de ranhura de um lado, tem-se a Equação 11.

$$S_w = \frac{t_w^2}{6} \quad (11)$$

Após determinado o módulo de seção de solda é necessário informar ao *software* as forças e pontos de fixação. Para soldas de dois lados, dividem-se essas forças por 2 (os cálculos são por unidade de comprimento da solda, e não por unidade de comprimento da junta de solda). O *software* decompõe essas forças em:

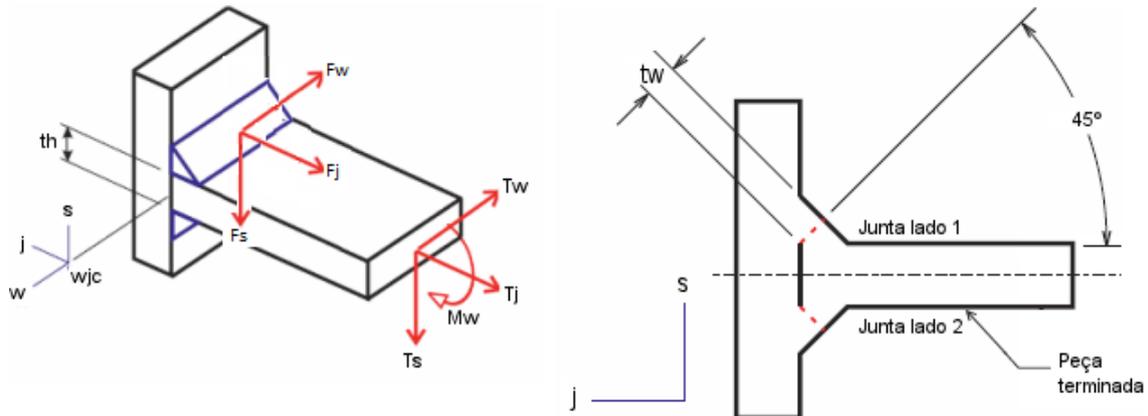
- $F_s$  = Força de cisalhamento ao longo do eixo local  $U_s$ .
- $F_w$  = Força de cisalhamento ao longo do eixo local  $U_w$ .
- $F_j$  = Força normal ao longo do eixo local  $U_j$ .

Valores positivos de  $F_j$  indicam que a face superior da casca terminada está sob compressão.

- $M_w$  = Momento de curvatura nodal em relação ao eixo de solda local  $U_w$ . Valores positivos de  $M_w$ , indicam que a face superior da casca terminada está sob contração.

A Figura 8 ilustra o diagrama de corpo livre da junta solda, o *software* utiliza estas informações para calcular a força e a tensão envolvidas na junta soldada.

Figura 8 - Diagrama de corpo livre da junta soldada.



**Fonte:** adaptado de DASSAULT SYSTEMES (2014).

O *software* calcula os componentes de tensão por unidade de comprimento, com base no comprimento nodal de cada junta soldada. Para este cálculo o *software* utiliza as Equações 12, 13 e 14.

Para a força de cisalhamento ao longo do eixo local,  $U_s$ , tem-se a Equação 12 descrita pelo *software*.

$$f_s = (F_s / L_n) / A_w \quad (12)$$

Já, para a força de cisalhamento ao longo do eixo local,  $U_w$ , tem-se a Equação 13.

$$f_w = (F_w / L_n) / A_w \quad (13)$$

E para a  $F_j$ , força normal, ao longo do eixo local,  $U_j$ , tem-se a Equação 14.

$$f_j = \frac{(F_j / L_n)}{A_w} + \frac{(M_w / L_n)}{S_w} \quad (14)$$

Seguindo para o Cálculo da tensão resultante por unidade de comprimento na solda,  $f_{solda}$ , tem-se a Equação 15 utilizada pelo *software*.

$$f_{solda} = SQRT(f_s^2 + f_w^2 + f_w^2) \quad (15)$$

Onde: A função *SQRT* retorna à raiz quadrada de uma expressão A. A função de raiz quadrada é definida somente para os valores não negativos da expressão A.

Após gerada a solução para a garganta de solda necessária, o *software* calcula a resistência de cisalhamento aceitável do eletrodo conforme a Equação 16.

$$f_{solda} = f_{permitido} \quad (16)$$

A resistência de cisalhamento aceitável para o material do eletrodo é calculado da seguinte maneira: Resistência de cisalhamento máxima/fator de segurança. Projetos de engenharia governados por códigos específicos precisam seguir os padrões e os valores mínimos estipulados.

Para cálculos de tamanho da solda (*S*), em cada união soldada da peça o *software* disponibiliza duas equações. A Equação 17 para soldas de ranhura de um lado ou para solda de ranhura de dois lados.

$$S = t_w \quad (17)$$

E a Equação 18 utilizada para soldas de filete 45° de um lado ou soldas de filete 45° de dois lados.

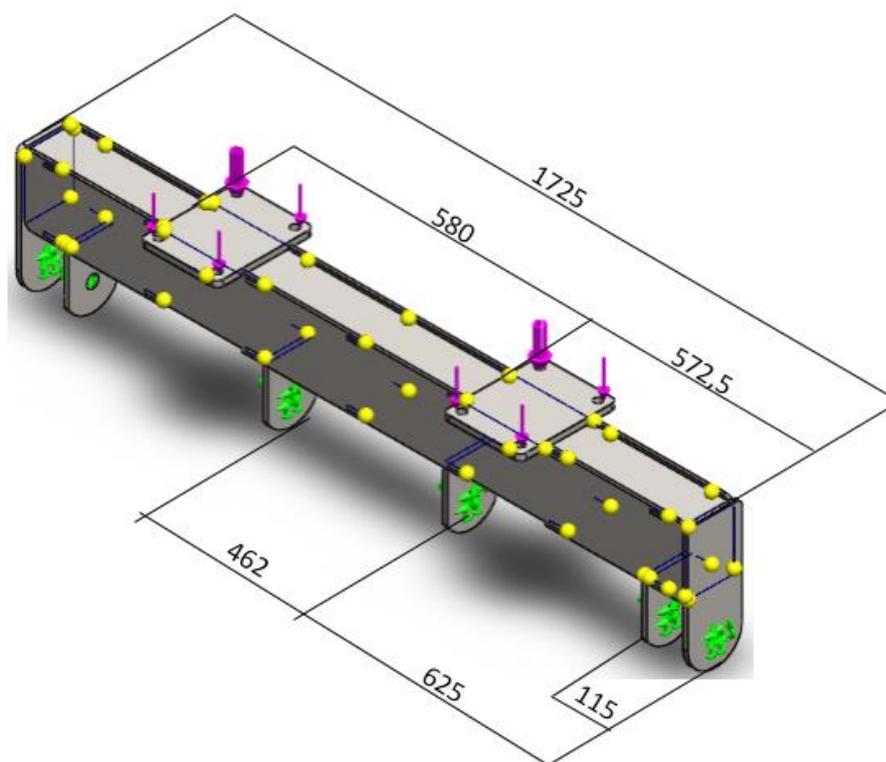
$$S = SQRT.t_w \quad (18)$$

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

A metodologia empregada para realizar a análise estrutural e dimensional da solda foi o método da análise por elementos finitos para mecânica estrutural e o método de plotagem e verificação de solda através do *software*. Para realizar esta análise foi criado um modelo virtual, com todas as características e medidas reais do eixo tandem, no caso deste trabalho, foi utilizado o *software* SolidWorks para o modelamento do eixo, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 - Vista em 3D do eixo tandem.



As formas e medidas do eixo foram determinadas a partir de sua aplicação e funcionalidade. A forma de construção do perfil se justifica pelo fato de ter à disposição as três medidas base: altura, largura e espessura e, a partir destas, pode-se alcançar inúmeras combinações para proporcionar o melhor aproveitamento e a maior resistência ao eixo.

A partir destas informações foi modelado o eixo em 3D com sua respectiva forma. Para a realização da análise estrutural e dimensionamento de solda foi utilizado o aplicativo *Simulation* disponível no *SolidWorks*.

Para desenvolver essas análises, foi necessário isolar somente a parte de interesse do estudo e, a partir daí, aplicar as forças no eixo, para gerar os resultados e valores de tensão e deformação, e gráficos de solda, os quais são as referências para interpretação dos resultados.

Depois de desenhado e isolado os subconjuntos que foram analisados do eixo tandem, é necessário para o dimensionamento de solda e análise de elementos finitos, as informações da Tabela 3. Com base nos resultados nos estudos e pesquisas definiram-se como dados de entrada do projeto, os valores expressos na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados de projeto.

| Propriedades                       | Dados de projeto                      |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| Material a ser soldado             | Aço 1020                              |
| Espessuras de materiais utilizadas | 8 mm, 12,7 mm e 15,87 mm              |
| Tipo de análise                    | Análise estática                      |
| Tipo de modelo                     | Isotrópico linear elástico            |
| Força                              | 80000N                                |
| Sobrecarga                         | 20000N                                |
| Fator de segurança                 | 2                                     |
| Fator de segurança pra solda       | 3                                     |
| Tipo de solda                      | Filete                                |
| Tipo de força                      | Distribuída em 2 pontos               |
| Tipo de malha                      | Malha de casca com superfícies médias |
| Área da aplicação das forças       | 0,11m <sup>2</sup> por área           |
| Métodos para Dimensionamento       | Padrão Americano (AWS)                |
| Tamanho de Solda                   | 6.35mm                                |

No apêndice 1 verificam-se os desenhos técnicos, como é o equipamento e mostram como é realizada a solda dos componentes do eixo tandem.

Já para fatores de segurança solda, foi utilizada a Tabela 4, para determinar os valores. Com os dados da Tabela 4 pode-se verificar a situação da junta, determinada para projeto, como conexões sobre carregamento de fadiga, com fator de segurança 3.

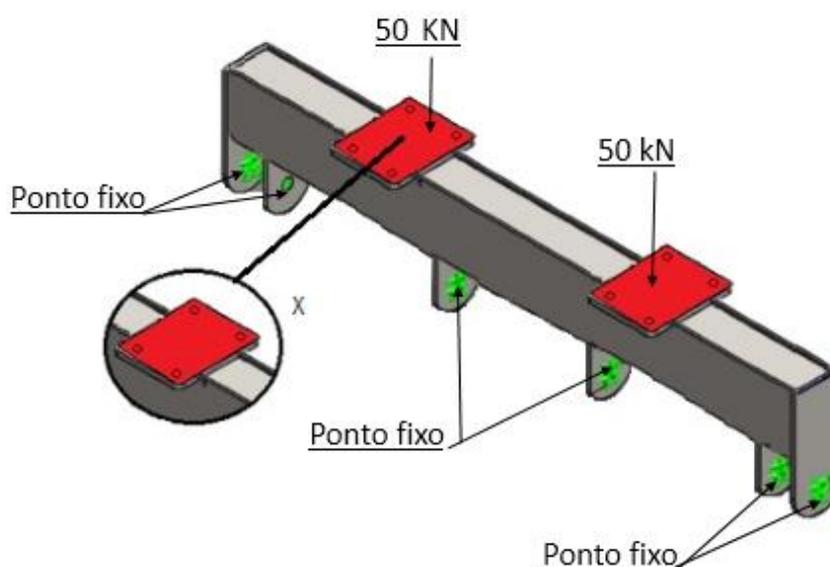
Tabela 4 -Fatores de segurança recomendados para juntas.

| Tipo de Resistência   | Fator de segurança |
|---|--------------------|
| Componentes e seções transversais   | 0,1,2              |
| Parafusos, rebites, pinos, soldas e chapas em mancal                                | 2                  |
| Conexões híbridas, conexões sob carregamento de fadiga, outras situações de projeto | 3                  |
| Mancal de um parafuso de injeção  | 4                  |

Fonte: Dassault Systemes (2014).

A Figura 10 ilustra onde o eixo é fixo e onde são aplicadas as forças, o mesmo é fixo em 6 pontos, os pontos de fixação são furos passantes com diâmetro 32 mm cada. As peças que possuem a furação são de espessura de 12,7 mm.

Figura 10 - Pontos de fixação e aplicação de força.



Na Figura 10 tem-se ilustrado onde ocorre a aplicação das forças de 50 kN, onde a mesma pode ser visualizada no detalhe do x, ambas somadas totalizam em uma força total de 100 kN, que, por sua vez, é composta por 8.000 kg de carga, mais 2.000 kg de sobrecarga. Previsto no projeto, essas forças são distribuídas em duas chapas em forma retangular com as medidas de 250 mm x 200 mm e espessura de 15,87 mm. Cada chapa possui 4 furos com diâmetro de 22 mm, utilizados para a fixação deste eixo no chassi da carreta basculante.

Deste modo, a força peso gerada pela basculante é transmitida para o eixo. Com o auxílio das Figuras 11 e 12, pode ser visualizado onde foram aplicados os cordões de solda no eixo tandem.

Figura 11 - Cordões de solda A.

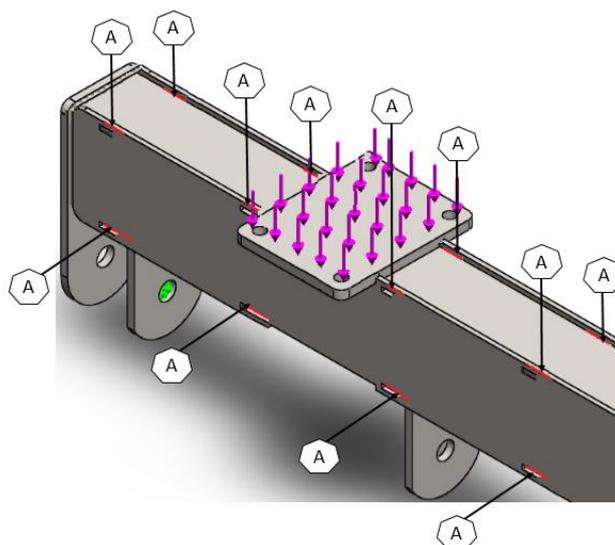
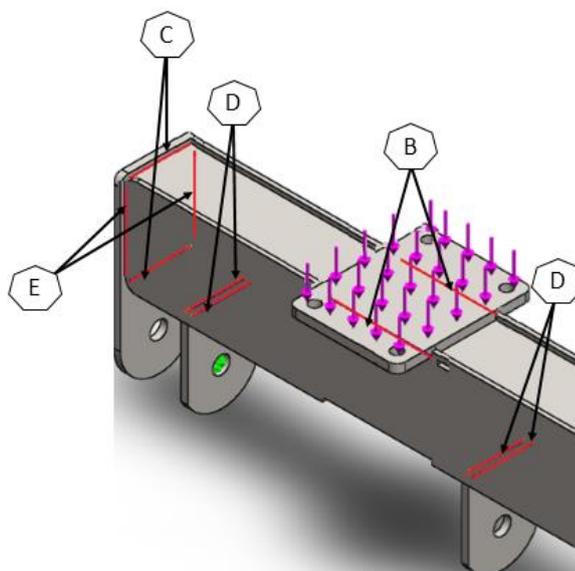


Figura 12 - Cordões de solda B,C,D e E.



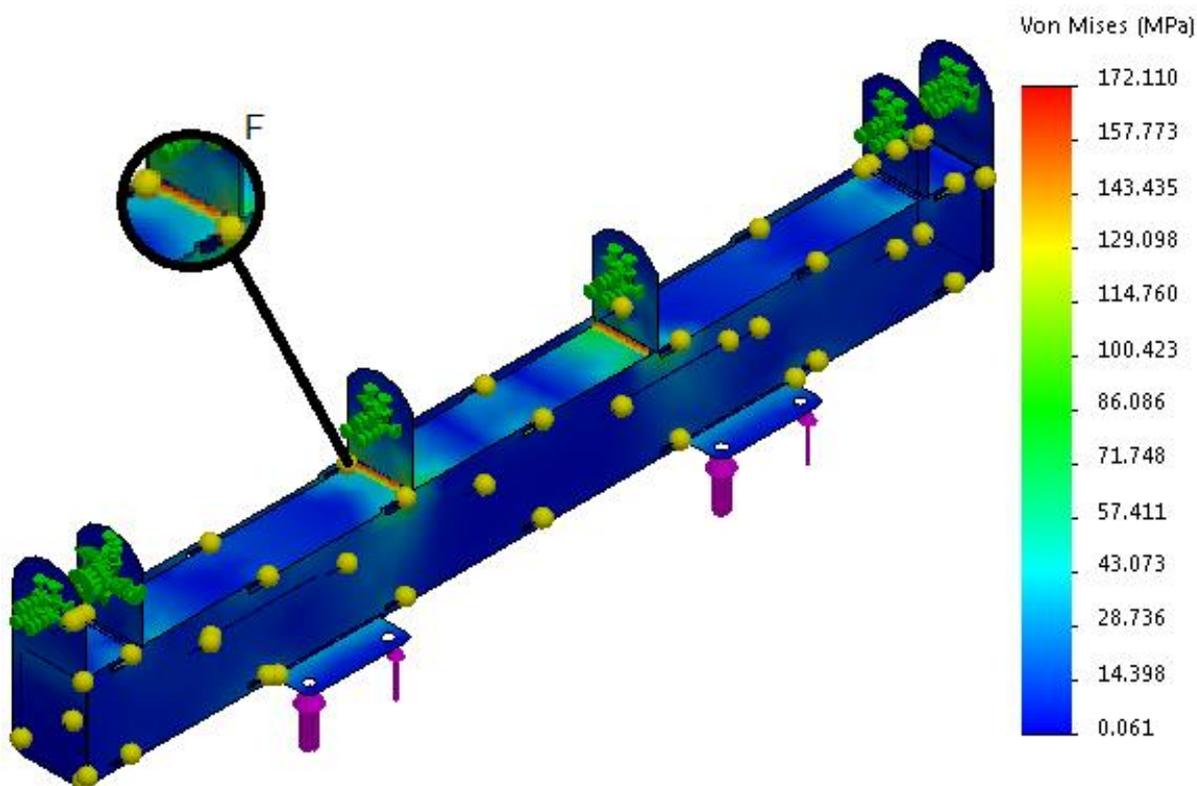
Para todos os cordões ilustrados nas Figuras 11 e 12, tem-se o tamanho de solda determinado para projeto de 6,35 mm. Já para o cordão A tem-se o comprimento de solda de 40 mm, para o cordão B tem-se 200 mm, já para o cordão C o valor do comprimento de solda é de 126 mm e os cordões D e E apresentam respectivamente os comprimentos de solda de 110 mm e 180 mm.

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. TENSÃO DE *VON MISES*

Tem-se como resultado para tensão de *Von Mises* a Figura 13, onde podem ser observados os valores de máximo e mínimo limite de escoamento.

Figura 13 - Tensão de Von Mises.



A partir da Figura 13 pode-se interpretar a tensão sofrida pelo eixo. Para o limite de escoamento do aço SAE 1020, tem-se na Tabela 1, o valor de 350 MPa.

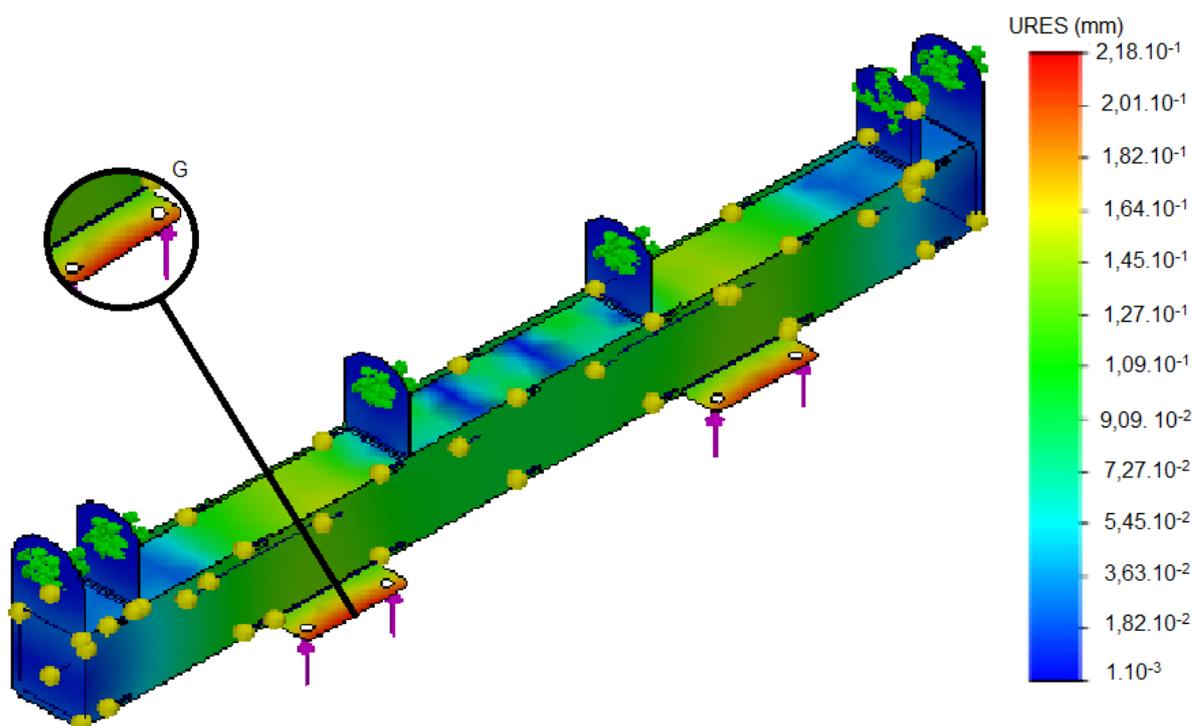
Observando a figura, obtêm-se os valores de 60,7 kPa para limite de escoamento mínimo.

Já, o limite de escoamento máximo, localizado no detalhe F tem-se o valor de 172 MPa. Observando que o limite máximo de escoamento do eixo ficou abaixo do limite de escoamento do aço SAE 1020 descrito na Tabela 1, conclui-se que o eixo suportará a força de 100 kN, sem exceder o limite de escoamento do aço.

## 4.2. DESLOCAMENTO RESULTANTE

Tem-se como resultado para deslocamento resultante a Figura 14, onde podem ser observados os valores de máximo e mínimo deslocamento resultante.

Figura 14 - Deslocamento resultante.

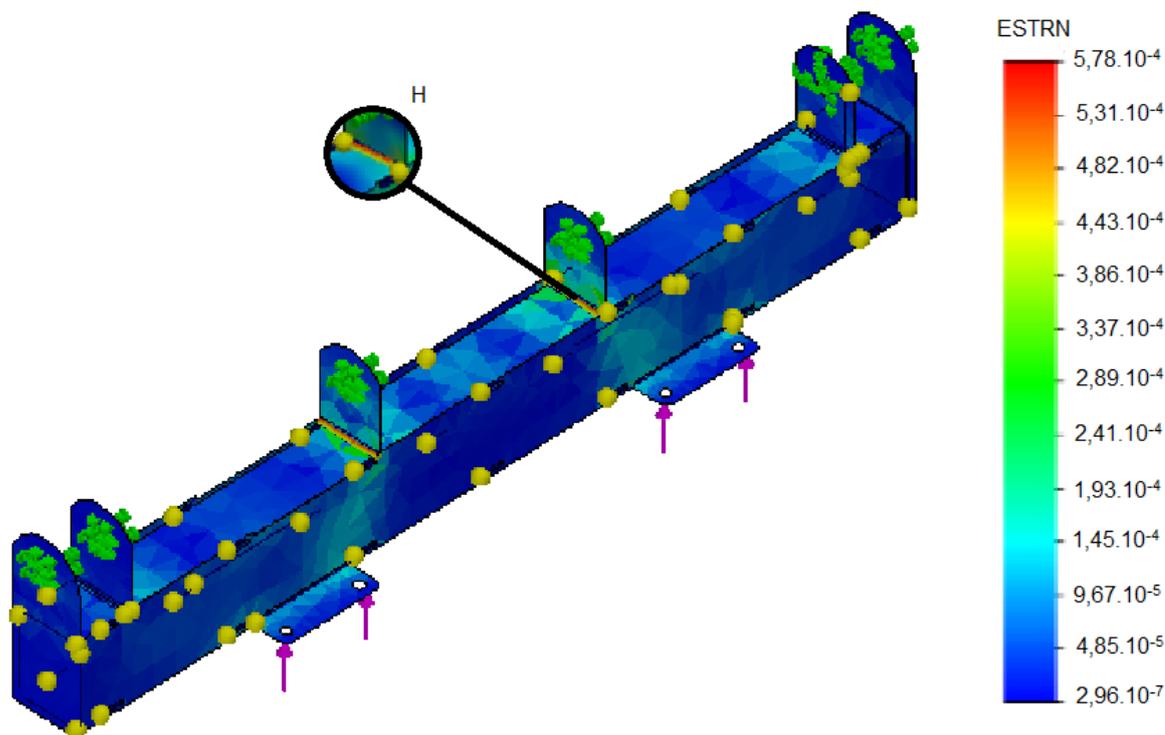


Observando o Detalhe G na Figura 14 percebe-se o local onde ocorreu o máximo deslocamento resultante, ou seja, no detalhe G o valor de máximo deslocamento resultante é 0,218 mm. Analisando este resultado pode-se assim dizer que o eixo tem deslocamento resultante mínimo quando carregado com 100 kN. Desta forma, o eixo se torna aceitável para o uso.

## 4.3. DEFORMAÇÃO EQUIVALENTE

Tem-se como resultado para deformação equivalente a Figura 15, a qual ilustra onde ocorreram os valores máximos e mínimos de deformação.

Figura 15 - Deformação equivalente.



Observando o detalhe H na Figura 15, percebe-se o local onde ocorreu a máxima deformação equivalente, ou seja, o valor de máxima deformação equivalente é  $5,78 \times 10^{-4}$  mm.

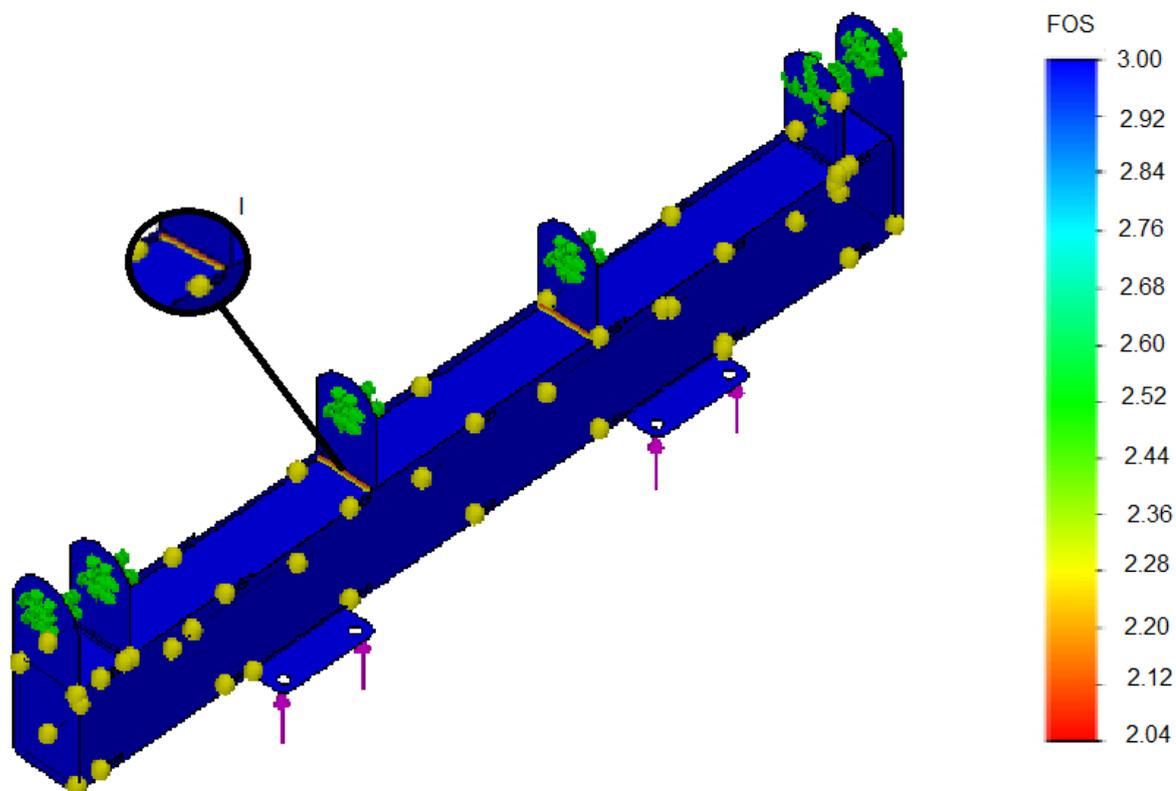
Na análise do resultado, pode-se observar que o eixo tem um valor de deformação equivalente muito baixo, quando carregado com 100kN, consequentemente, nesses valores o eixo se torna aceitável para o uso.

#### 4.4. FATOR DE SEGURANÇA

Tem-se como resultado para fator de segurança a Figura 16, que ilustra os valores máximos e mínimos do fator de segurança.

O fator de segurança determinado como mínimo nesse projeto é de 2, no detalhe I pode-se observar onde ocorreu o valor de 2,043. Já para fator de segurança máximo temos como resultado o valor de fator 3.

Figura 16 - Fator de segurança.



Analisando os resultados tem-se um valor mínimo acima do valor determinado de projeto. Assim, pode-se dizer que o eixo não tem nenhum ponto do fator de segurança abaixo do determinado, quando carregado com 100 KN. Desta forma, o eixo se torna aceitável para o uso.

#### 4.5. DIMENSIONAMENTO DE SOLDA

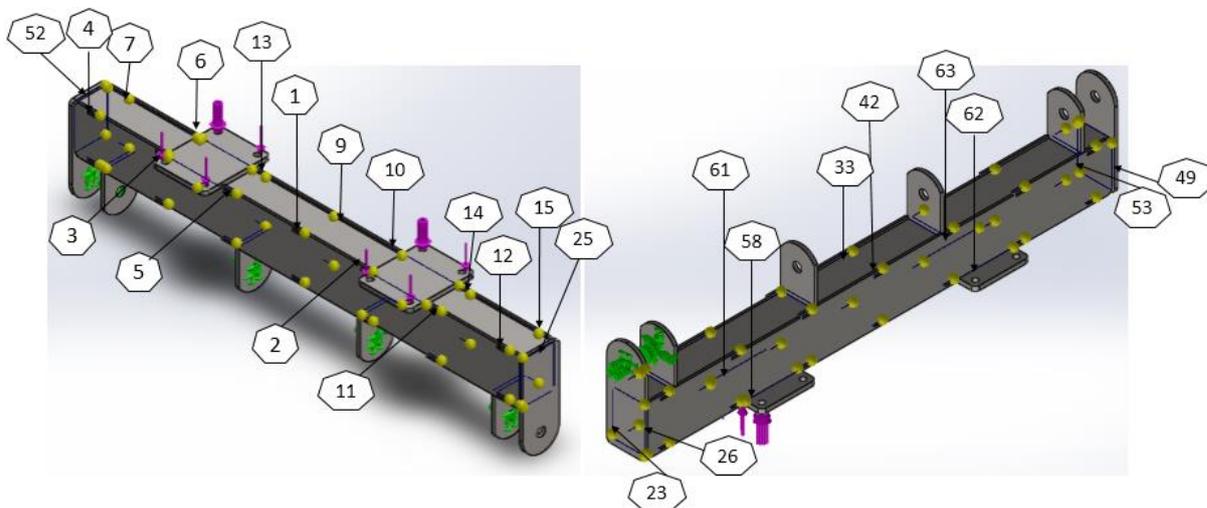
Tendo em vista a apresentação dos resultados, foi determinado para tamanho de solda praticável o valor de 6,35 mm, deste modo, os valores que ficarem abaixo desse será considerado solda abaixo do praticável e os valores que ficarem acima serão consideradas soldas praticável e acima do especificado de projeto, o resultado foram divididos em dois grupos:

- Abaixo do praticável e abaixo do especificado de projeto.
- Praticável e acima do especificado de projeto.

Para ilustrar onde ocorreram as soldas abaixo do praticável e abaixo de especificações de projeto tem-se a Figura 17, que mostram todos os cordões, onde o resultado do dimensionamento gerado pelo *software* ficou abaixo do praticável.

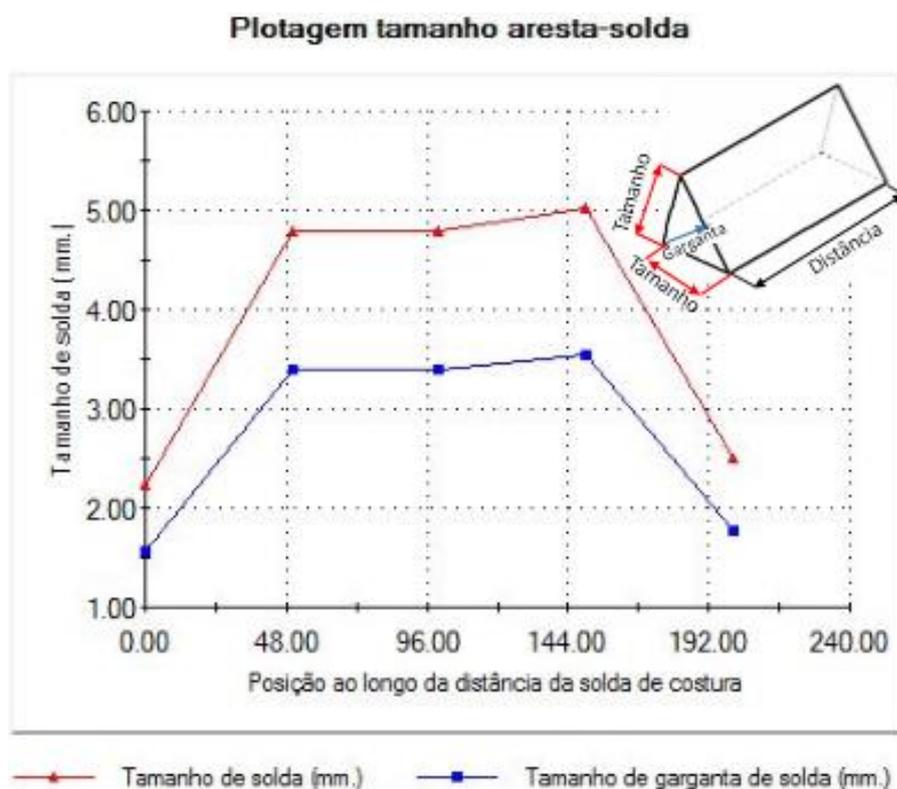
Segundo a norma AWS D1.1 (2008), o valor mínimo de solda para estruturas ciclicamente carregadas deve ser 5 mm.

Figura 17 - Solda abaixo do praticável.



Os resultados gerados para todos os cordões ilustrados na Figura 17, são descritos resumidamente pela Figura 18, que ilustram, de forma gráfica, os valores do tamanho de solda x posição ao longo da distância de solda de costura.

Figura 18 - Soldas abaixo do praticável e abaixo do especificado de projeto.



Na Figura 18 pode-se observar que o valor mínimo de tamanho de solda é de 2,2 mm e o valor máximo de 5 mm, descritos na linha do tamanho de solda. Pode-se verificar que os valores gerados pelo *software* para tamanho de solda e para garganta de solda, variam ao longo da posição de solda de costura, essa variação ocorre devido ao fato da variação das forças que atuam sobre a distância da solda.

Analisando a linha do tamanho de garganta de solda, pode-se verificar que se tem como valor mínimo de 1,5 mm.

Já para o valor máximo da garganta de solda, ao longo de sua distância, tem-se o valor de 3,5 mm. Para todos os pontos de solda analisados, tem-se como resultado a Tabela 5, gerada pelo *software*.

Tabela 5 - Valor médio dos tamanhos de solda das juntas abaixo do praticável.

| Tipo                              | Conector (3, 6, 11, 14) | Conector (25 e 52) | Conector (58,61,62,63) | Conector (23,26,53,49) | Conector (4,7,12,15) | Conector (1,9) | Conector (2,5,10,13) | Conector (33,42) |
|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------------|------------------|
|                                   | Média                   | Média              | Média                  | Média                  | Média                | Média          | Média                | Média            |
| Tamanho de solda (mm)             | 0.9                     | 1.7                | 3.9                    | 4.3                    | 3.0                  | 2.9            | 2.5                  | 3.3              |
| Tamanho de garganta de solda (mm) | 0.7                     | 1.2                | 2.7                    | 3.1                    | 2.1                  | 1.9            | 1.8                  | 2.3              |
| Força normal de junta (N)         | 8146                    | 3288               | -12987                 | -27470                 | -19693               | -18023         | 24292                | 5705             |
| Força cisalhamento-solda (N)      | -17055                  | -17237             | -34593                 | 3178                   | -25545               | 23617          | -14121               | 4377             |
| Momento de curvatura (N.m)        | -7386                   | 1843               | -86                    | 151                    | 1506                 | 2835           | 4322                 | 9342             |

A Tabela 5 traz como resultado o valor médio dos tamanhos de solda a serem aplicados em cada ponto, além de mostrar os valores das forças aplicadas em cada ponto da união soldada.

Para os pontos de solda descritos na Tabela 5, que ficam com a média abaixo do praticável, segundo a norma AWS D1.1 (2008), torna-se necessário o redimensionamento destes pontos de solda, onde o tamanho mínimo deve estar em 5 mm.

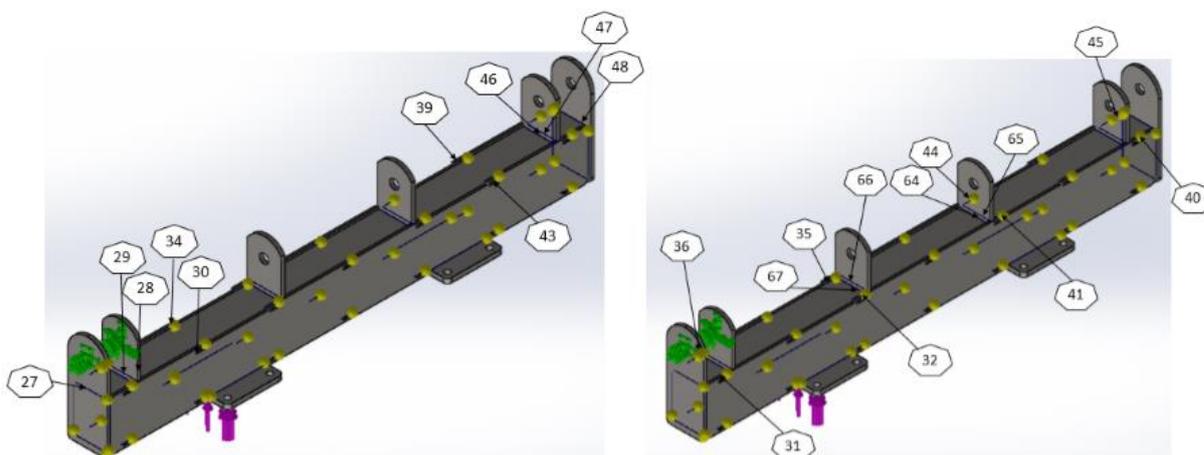
Analisando como o projeto foi desenvolvido inicialmente, com tamanhos de solda de 6,35 mm e analisado o valor determinado após a análise do *software* e

determinado pela norma o valor de 5 mm, pode-se notar que houve uma redução no volume da solda de 38,8 %.

Deste modo, pode-se dizer que após redimensionadas as soldas do eixo, o mesmo se torna adequado a sua aplicação, quando carregado com 100 kN. Desta forma, o eixo se torna aceitável para o uso.

Para ilustrar onde ocorreram as soldas praticáveis e acima do especificado de projeto, tem-se a Figura 19, que ilustra todos os pontos determinados em projeto, onde o resultado do dimensionamento gerado pelo *software* ficou acima do praticável.

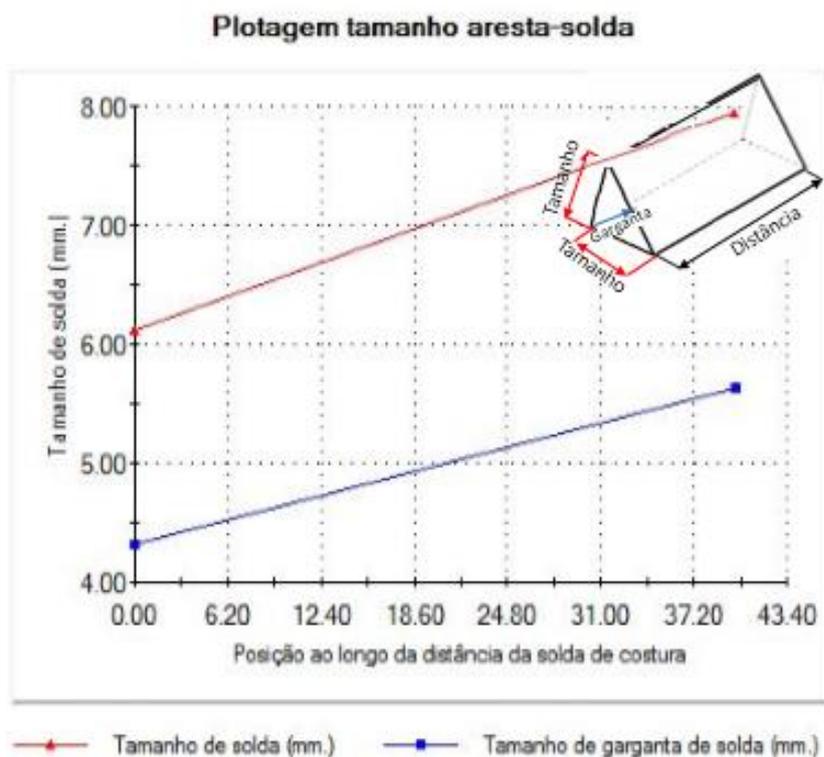
Figura 19 - Soldas praticável e acima do especificado de projeto.



Os resultados gerados para todos os *pontos* ilustrados na Figura 19 são descritos, resumidamente, pela Figura 20, que ilustram de forma gráfica os valores do tamanho de solda x posição ao longo da distância de solda de costura.

Na Figura 20 pode-se observar os valores gerados pelo *software*, como resultado para valores mínimo de tamanho de solda tem-se 6,1 mm e o valor máximo de 8 mm, descritos na linha do tamanho de solda.

Figura 20 - Soldas praticável e acima do especificado de projeto.



Analisando a linha do tamanho de garganta de solda, pode-se verificar que se tem como valor mínimo de 4,3 mm e o valor máximo para garganta de solda, ao longo de sua distância, tem-se o valor de 5,8 mm. Para todos os pontos de solda analisados, tem-se como resultado a Tabela 6, gerada pelo *software*.

Tabela 6 - Valor médio dos tamanhos de solda das juntas acima do especificado.

| Tipo                               | Conector (31,36,40, 45) | Conector (32,35,41, 44) | Conector (27,28,29,46,47 ,48) | Conector (64,65,66,67) | Conector (30,34,39,43) |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|
|                                    | Média                   | Média                   | Média                         | Média                  | Média                  |
| Tamanho de solda (mm.)             | 7.0                     | 7.6                     | 6.0                           | 5.8                    | 7.0                    |
| Tamanho de garganta de solda (mm.) | 4.9                     | 5.4                     | 4.7                           | 4.1                    | 5.0                    |
| Força normal de junta (N)          | -28361                  | -30612                  | -17264                        | -25552                 | -29111                 |
| Força cisalhamento-solda (N)       | 5919                    | 6538                    | 0                             | 0                      | -6731                  |
| Momento de curvatura (N.m)         | -111                    | 5785                    | -110                          | 5785                   | 117                    |

A Tabela 6 traz como resultado o valor médio dos tamanhos de solda a serem aplicados em cada ponto, além de mostrar os valores das forças aplicadas em cada ponto da união soldada.

Para os pontos de solda, que ficarão acima da média determinada em projeto, torna-se necessário o redimensionamento destes pontos de solda, observando que o tamanho de solda máximo encontrado pelo *software* foi de 7,6 mm, visando a excelência do equipamento, faz-se necessário o redimensionamento, para não superdimensionar o projeto foi determinado o valor de 8 mm para tamanho de solda. Vale ressaltar que, inicialmente, para o dimensionamento dos pontos de solda foi adotado um fator de segurança 3.

Analisando como é executado o projeto na empresa KHOR inicialmente, os tamanhos de solda executados são de 10 mm e analisado o valor determinado após a análise do *software*, valor de 8 mm, pode-se notar que houve uma redução no volume da solda de 36 %.

Assim, pode-se dizer que depois de redimensionadas as soldas do eixo, o mesmo se torna adequado a sua aplicação, quando carregado com 100 kN. Desta forma, o eixo se torna aceitável para o uso

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, verificou-se a complexidade do dimensionamento das juntas soldadas, mesmo com o auxílio do *software SolidWorks Simulation*. Uma vez que inúmeras dimensões e parâmetros devem ser analisados antes de serem carregados no *software*. Com o auxílio de orientações bibliográficas obtiveram-se os valores para a determinação das variáveis.

Com o auxílio de ferramentas de análise virtual, torna-se possível a modelagem 3D dos componentes do eixo tandem, a simulação computacional do conjunto e dimensionamento de solda através do *software*, obtendo assim um eixo que atende os requisitos impostos inicialmente. Quanto à questão estrutural e dimensionamento de solda, após a análise, com o auxílio do *SolidWorks*, entende-se que o eixo tandem, após as alterações propostas, está adequado estruturalmente para todas as aplicações atualmente utilizadas, atendendo a carga aplicada de 10000 kg sobre a sua estrutura.

Desta forma, conclui-se que apesar da complexidade do projeto, este atendeu os objetivos propostos, e mostrou-se viável à utilização do *software* para dimensionamento de solda, devido ao fato da redução em média 37% no volume de solda em grande parte do eixo.

Por fim, destaca-se que este estudo originou-se como um desafio de dimensionar a solda com utilização do *software* e tornou-se uma grande oportunidade, proporcionando a transformação de conhecimento empírico em prático junto à utilização do *software*.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, R, D, C; PINA FILHO, A, C.. **A evolução do CAD e sua aplicação em projetos engenharia**. In: Nono Simpósio de Mecânica Computacional. Associação Brasileira de Métodos Computacionais em Engenharia. Minas Gerais: Universidade Federal de São João Del-Rei, 26 a 28 de maio de 2010.

AWS D1.1. **Structural Welding Code – Steel**. American Welding Society. Miami, FLA, USA, 2008.

AZEVEDO, A. F.M. **Métodos dos elementos finitos**. 1. Ed. Portugal: Ed. Abril, 2003.

CAMPILHO, R. D. S. G. **Método de Elementos Finitos**. 1 Ed. Portugal: Ed. Publindústria, 2012.

DASSAULT Systemes. **Ajuda on-line do SolidWorks**. Brasil: Dassault Systemes, 2014. Disponível em: [http://help.solidworks.com/2014/portuguese-brazilian/SolidWorks/sldworks/c\\_introduction\\_toplevel\\_topic.htm?id=d7426bb8d3264ed7bda02d5d46869af9#Pg0](http://help.solidworks.com/2014/portuguese-brazilian/SolidWorks/sldworks/c_introduction_toplevel_topic.htm?id=d7426bb8d3264ed7bda02d5d46869af9#Pg0). Acesso em: 20 de janeiro de 2014.

FORTES, C. **Metalurgia da Soldagem**. 2004.

GONÇALVES, F, J, F; MARTINS, F. **Tecnologia dos Materiais I**. Santa Catarina: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Unidade de Araranguá, Curso Técnico em Eletroeletrônica, julho de 2005.

GERDAU S.A. Catálogo Barras e Perfis. **Linha de aços SAE**. 2013.

IST Sistemas. **Solidworks Simulation Premium**. Disponível em: <http://istsistemas.com.br/solidworks-simulation-premium>. Acesso em: 20 maio de 2014.

LINCOLN Electric China. **Arame sólido GMAW**. Guarulhos: Companhia Lincoln Electric do Brasil, 2014. Disponível em: <http://www.lincolnelectric.com.br/upload/MERIT%20S-6.pdf>. Acesso em: 24 de setembro de 2014.

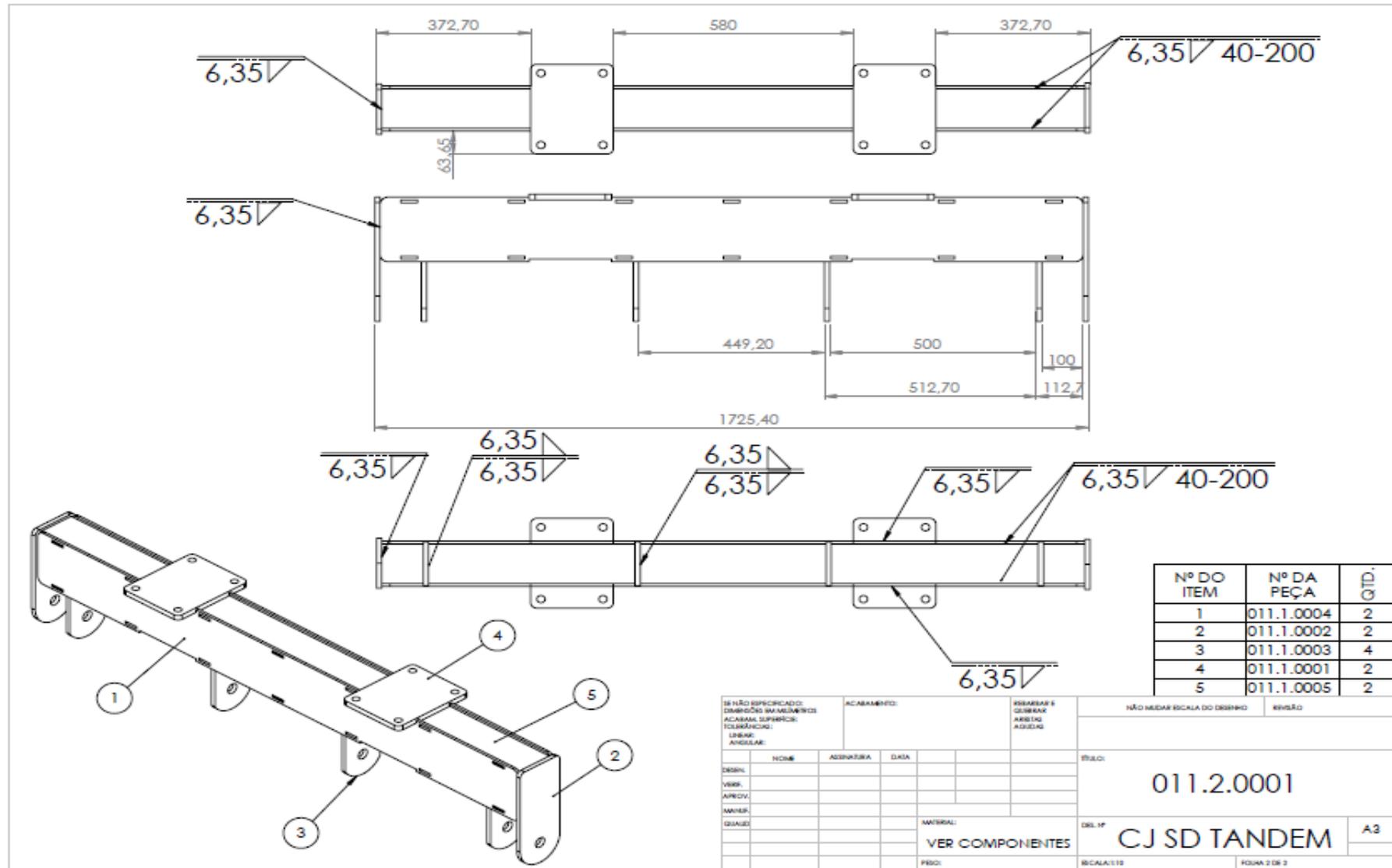
MACHADO, I. G. **Dimensionamento de juntas soldadas de filete: uma revisão crítica**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. (Boletim Técnico).

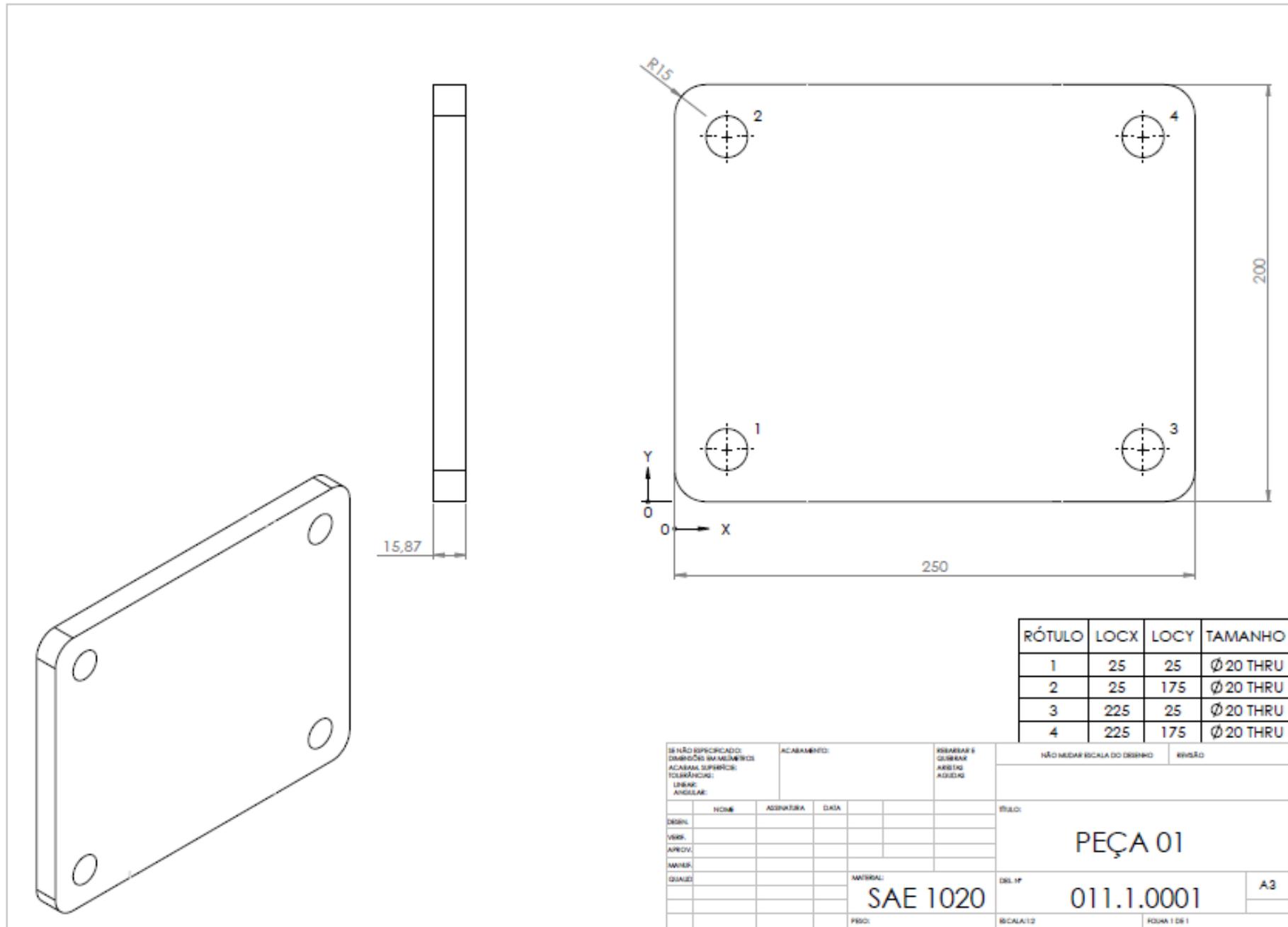
NEVES, M. A. **Cálculo do Número N para Dimensionamento de Pavimentos**. São Paulo: Escola de Engenharia Mackenzie e Universidade Presbiteriana Mackenzie, Setembro de 2002. (Boletim Técnico).

SUBSTECH Substances and Technologies. Catalog: Carbon steel SAE 1020. USA, junho de 2012.

VIRTUALCAE. **SolidWorks Simulation Professional**. São Caetano do Sul- São Paulo: Virtualcae, 2009. Disponível em: <http://www.virtualcae.com.br/solidworks-simulation-professional.html>. Acesso em: 20 maio de 2014.

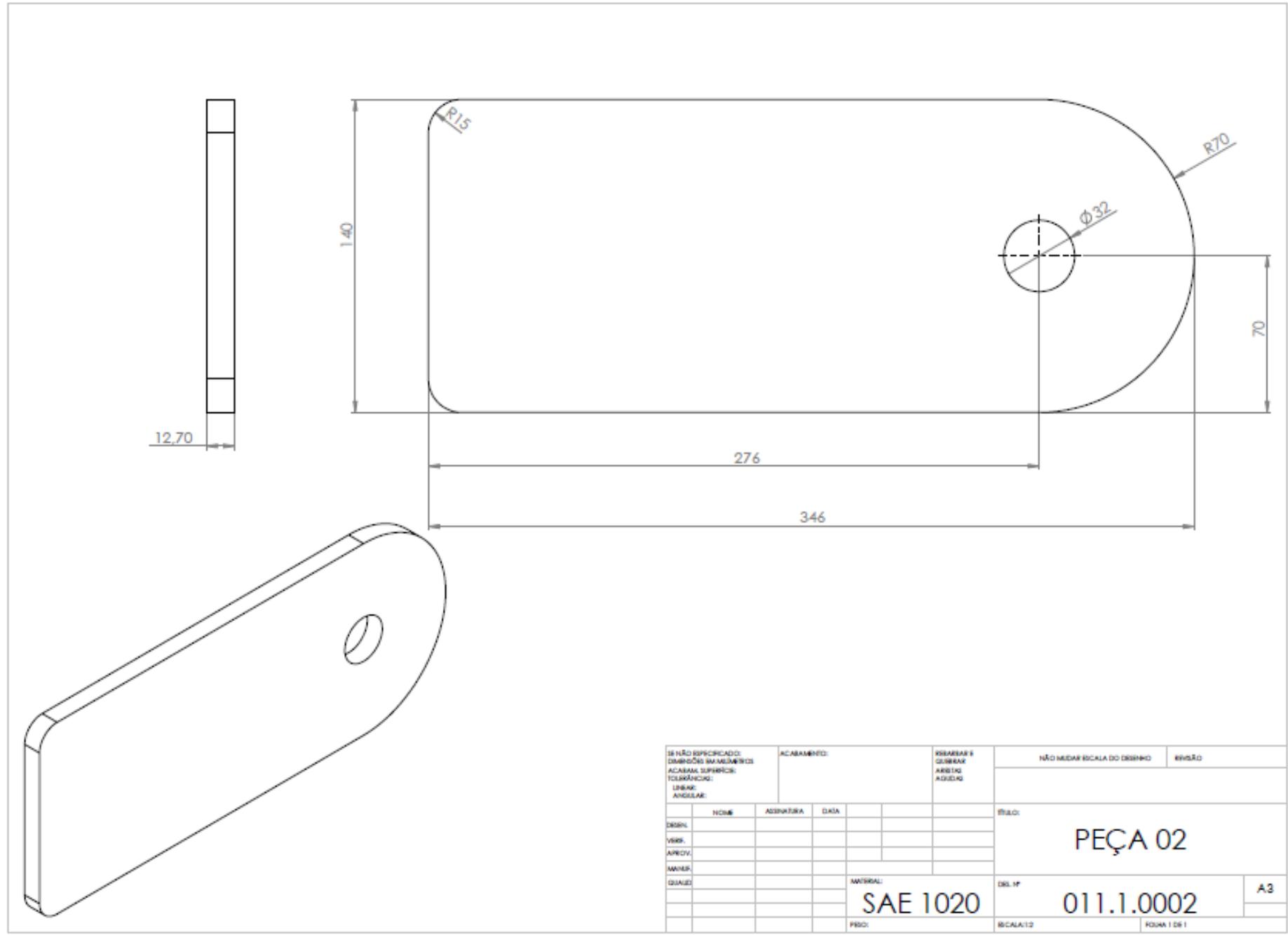
7. APÊNDICE A - DESENHO 2D DOS COMPONENTES DO EIXO TANDE



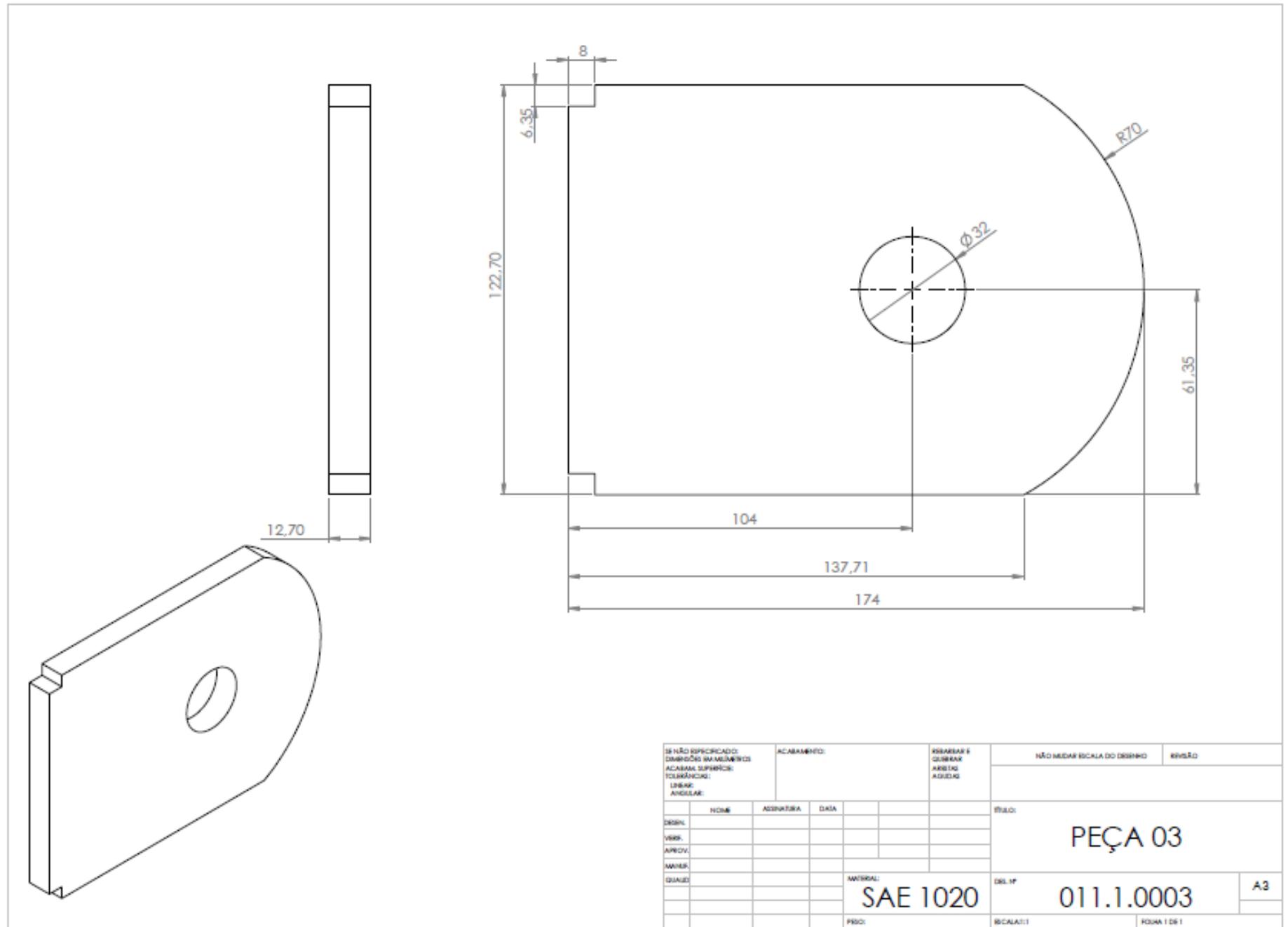


| RÓTULO | LOCX | LOCY | TAMANHO   |
|--------|------|------|-----------|
| 1      | 25   | 25   | Ø 20 THRU |
| 2      | 25   | 175  | Ø 20 THRU |
| 3      | 225  | 25   | Ø 20 THRU |
| 4      | 225  | 175  | Ø 20 THRU |

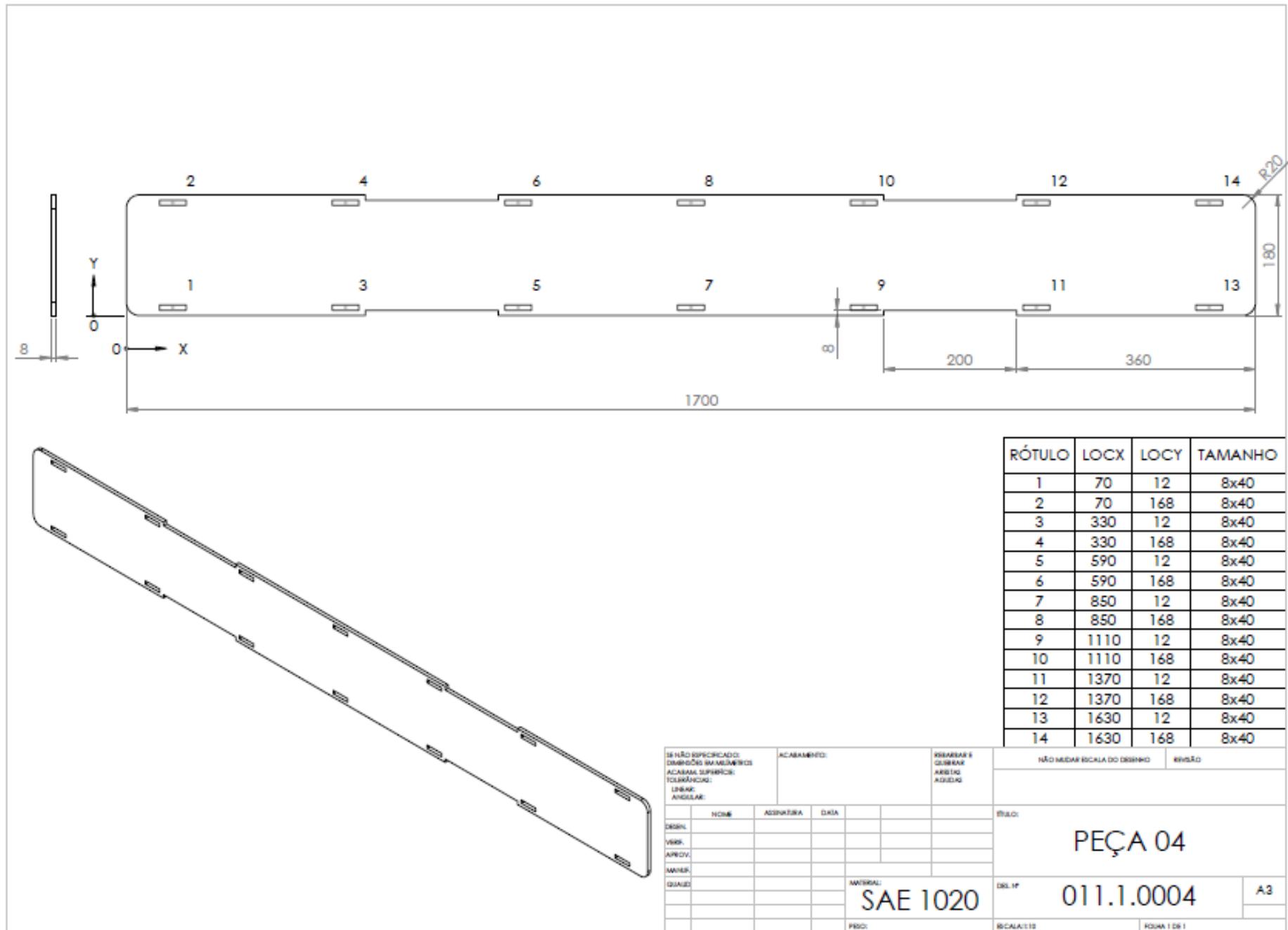
|   |      |           |      |             |                                    |                             |  |              |
|---|------|-----------|------|-------------|------------------------------------|-----------------------------|--|--------------|
| SE NÃO ESPECIFICADO:<br>DIMENSÕES EM MILÍMETROS<br>ACABAMENTO:<br>TOLERÂNCIAS:<br>LINHAS:<br>ÂNGULOS: |      |           |      | ACABAMENTO: | REBARFAS E<br>QUEBRAS<br>ARREDORES | NÃO MEDAR ESCALA DO DESENHO |  | REVISO       |
| DESIN.  | NOME | ADMISSORA | DATA |             |                                    | TÍTULO:                     |  |              |
| VERB.   |      |           |      |             |                                    | PEÇA 01                     |  |              |
| APROV.  |      |           |      |             |                                    | MATERIAL:                   |  | DEL. 1ª      |
| MADEI.  |      |           |      |             |                                    | SAE 1020                    |  | 011.1.0001   |
| QUANT.  |      |           |      |             |                                    | DEL. 1ª                     |  | A3           |
|   |      |           |      |             |                                    | ESCALA: 1:1                 |  | FOLHA 1 DE 1 |

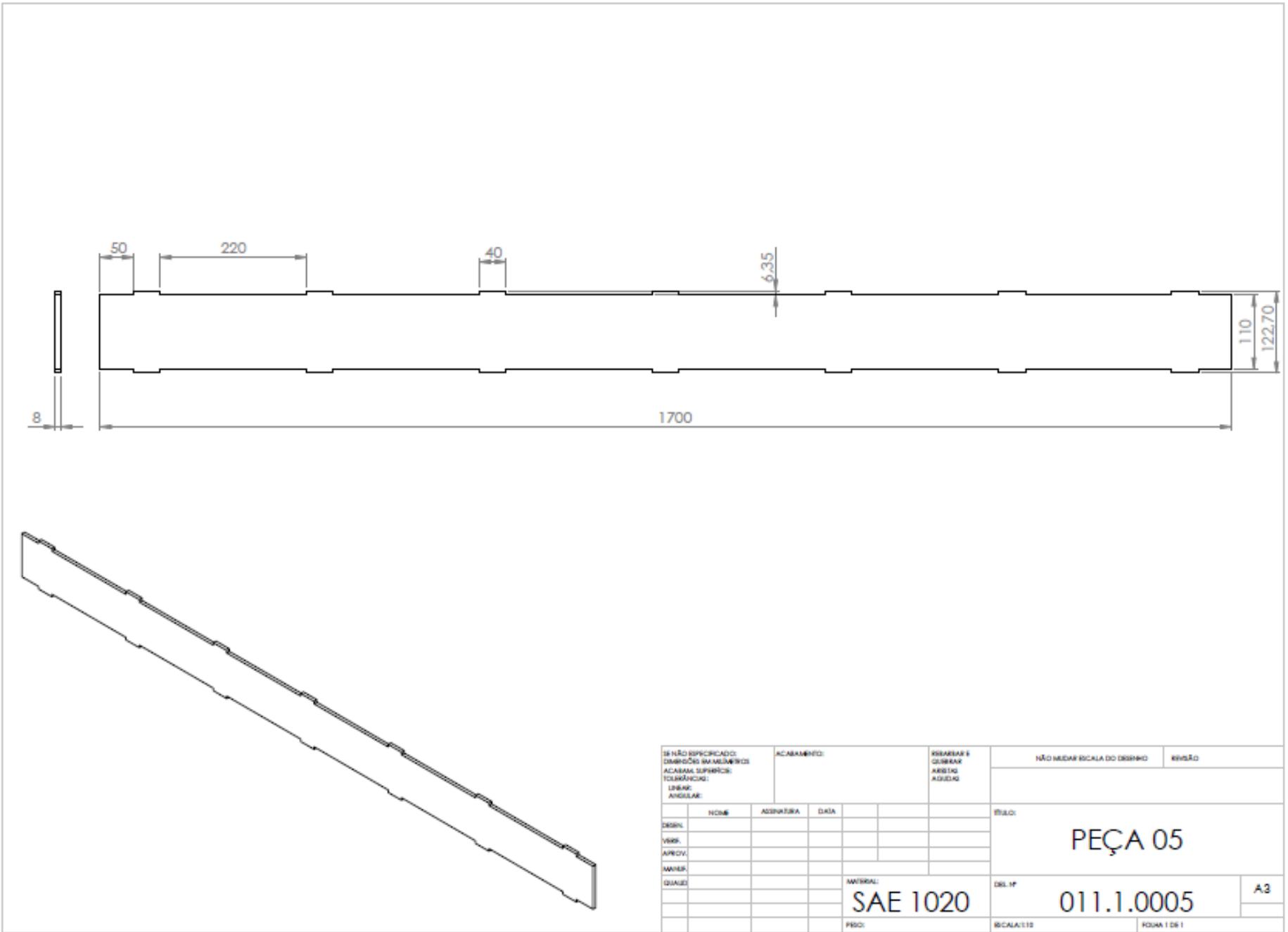


|   |  |  |  |             |  |  |  |                             |  |                   |  |
|---|--|--|--|-------------|--|--|--|-----------------------------|--|-------------------|--|
| SE NÃO ESPECIFICADO:<br>DIREÇÃO DE MONTAGEM<br>ACABAMENTO SUPERFÍCIE<br>TOLERÂNCIAS:<br>LINEAR:<br>ANGULAR: |  |  |  | ACABAMENTO: |  | REBARFAR E<br>QUEBRAR<br>ARISTAS<br>AGUDAS |  | NÃO MEDIR ESCALA DO DESENHO |  | REVISÃO           |  |
| DESENHADO:  |  |  |  | NOME        |  | ADMISSÃO                                   |  | DATA                        |  | TÍTULO:           |  |
| VERIFICADO:   |  |  |  |             |  |  |  | <b>PEÇA 02</b>              |  |                   |  |
| APROVADO:   |  |  |  |             |  |  |  |                             |  |                   |  |
| MATERIA:  |  |  |  |             |  |  |  | DESENHO Nº:                 |  | <b>011.1.0002</b> |  |
|   |  |  |  |             |  |  |  | A3                          |  |                   |  |
| ESCALA:   |  |  |  |             |  |  |  | MATERIAL:                   |  | <b>SAE 1020</b>   |  |
|   |  |  |  |             |  |  |  | ESCALA: 1:1                 |  |                   |  |
|   |  |  |  |             |  |  |  | FOLHA 1 DE 1                |  |                   |  |



|   |  |             |  |                                  |  |                             |  |              |  |
|---|--|-------------|--|----------------------------------|--|-----------------------------|--|--------------|--|
| SE NÃO ESPECIFICADO:<br>DIMENSÕES EM MILÍMETROS |  | ACABAMENTO: |  | ESBARRAR E<br>CORREIA<br>ARRÉDIO |  | NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO |  | REVISÃO      |  |
| TOLERÂNCIAS:                                    |  |             |  |                                  |  |                             |  |              |  |
| LINHAS:   |  |             |  |                                  |  |                             |  |              |  |
| ANGULOS:  |  |             |  |                                  |  |                             |  |              |  |
| DESEN.  |  | NOME        |  | ADOTADA                          |  | DATA                        |  | TÍTULO:      |  |
| REVIS.  |  |             |  |                                  |  |                             |  | PEÇA 03      |  |
| APROV.  |  |             |  |                                  |  |                             |  |              |  |
| MATER.  |  |             |  |                                  |  |                             |  | MATERIAL:    |  |
| QUANT.  |  |             |  |                                  |  |                             |  | SAE 1020     |  |
|   |  |             |  |                                  |  |                             |  | DEL. Nº      |  |
|   |  |             |  |                                  |  |                             |  | 011.1.0003   |  |
|   |  |             |  |                                  |  |                             |  | A3           |  |
|   |  |             |  |                                  |  |                             |  | ESCALA: 1    |  |
|   |  |             |  |                                  |  |                             |  | FOLHA 1 DE 1 |  |





|   |      |              |      |   |  |                             |  |              |  |
|---|------|--------------|------|---|--|-----------------------------|--|--------------|--|
| SE NÃO ESPECIFICADO:<br>DIMENSÕES EM MILÍMETROS |      | ACABAMENTO:  |      | REBARBAR &<br>QUEBRAR<br>ARREDO<br>AGUDAS |  | NÃO MEDAR ESCALA DO DESENHO |  | REVISÃO      |  |
| ACABAM. SUPERFICIE:                             |      | TOLERÂNCIAS: |      | LINHAS:                                   |  | ANGULARES:                  |  |              |  |
| DESIGN.   | NOME | ADONATA      | DATA |   |  | TÍTULO:                     |  |              |  |
| VISÃO   |      |              |      |   |  | PEÇA 05                     |  |              |  |
| ARCOV.  |      |              |      |   |  |                             |  |              |  |
| MATER.  |      |              |      |   |  | DEL. Nº                     |  | A3           |  |
| QUANT.  |      |              |      |   |  | 011.1.0005                  |  |              |  |
|   |      |              |      |   |  | MATERIAL:                   |  | ESCALA: 1:10 |  |
|   |      |              |      |   |  | SAE 1020                    |  | FOLHA 1 DE 1 |  |
|   |      |              |      |   |  | PESO:                       |  |              |  |