

## **ANÁLISE ESTRUTURAL COMPARATIVA ENTRE DOIS TIPOS DE PERFIS FORMADOS A FRIO UTILIZADOS EM CARROCERIAS DE TIPO BASCULANTE**

**Lucas da Silva<sup>1</sup>**

**José Luiz Salvador<sup>2</sup>**

**Resumo:** O implemento rodoviário é o meio mais utilizado para o transporte de cargas no Brasil. No ano de 2021, o emplacamento de implementos rodoviários com carroceria do tipo basculante ultrapassou o emplacamento de implementos do tipo graneleiro/carga seca. A carroceria do tipo basculante, permite que o descarregamento da carga seja ágil e seguro, além da possibilidade de transportar uma variedade de produtos de baixa granulometria. A caixa de carga da basculante é fabricada com chapas de pequena espessura e alta resistência, e para que resista aos esforços impostos pela carga, é moldado um perfil por meio de viradeiras, tornando a chapa mais resistente. Uma fabricante de implementos rodoviários, com o intuito de adequar seus produtos ao mercado, alterou o perfil da lateral da caixa de carga de seus produtos basculantes. O perfil da chapa que antes possuía um formato em “V”, agora possui um perfil com formato em “ômega”, seguindo a tendência estética do mercado. A motivação e a justificativa da mudança, foi devido a outras grandes implementadoras terem adotado este perfil, mesmo com a resistência dele não sendo conhecida. Por isso, o objetivo deste artigo é de realizar uma análise estrutural entre os dois tipos de perfis formados a frio, comparando a resistência de ambos, a fim de encontrar, para o perfil em “ômega” uma resistência igual ou superior ao perfil em “V”, validando sua utilização. A análise será feita por meio de (1) cálculos de resistência dos materiais, (2) ensaios mecânicos de flexão e (3) simulações utilizando o método de elementos finitos. Os resultados dos três itens que foram analisados, mostraram que o novo perfil adotado, em “ômega”, possui uma resistência mecânica superior ao perfil anterior. Apesar de uma variação no valor dos resultados de cada método, todos mostraram que o perfil em “ômega” é mais resistente que o perfil em “V”, validando sua utilização nas estruturas.

**Palavras-chave:** Implementos rodoviários. Perfil formado a frio. Resistência mecânica. Simulação. Deformação por flexão.

### **1 INTRODUÇÃO**

Segundo dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021), o Brasil é um país que compreende mais de 4.300 km nos sentidos transversal e longitudinal, sendo o quinto maior país do mundo em extensão. Além disso,

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia mecânica, ano: 2022 E-mail: lucasdasilvagre@gmail.com

<sup>2</sup> Professor do Centro Universitário UniSATC E-mail: jose.salvador@satc.edu.br

conforme dados apresentados pelo CBIE (Centro Brasileiro de Infraestrutura, 2020), trata-se de um país emergente com baixo investimento em ferrovias e hidrovias, sendo a maior parte do transporte de cargas realizado por meio das rodovias. Os implementos rodoviários, são responsáveis por cerca de 60 % de todo o transporte de carga no território nacional.

De acordo com dados da ANFIR (Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários, 2021), nos últimos anos o implemento rodoviário com carroceria tipo basculante vem ganhando espaço no mercado, devido a sua facilidade e diversidade de carga. Além de transportar minérios, como: areia, brita, cal, carvão entre outros, o transporte de grãos com carrocerias tipo basculante aumentou significativamente, o que gerou um aumento nas vendas deste produto.

O projeto de um implemento rodoviário abrange aspectos desafiadores, sendo um deles, a redução na tara do produto, visto que para cada tipo de combinação de veículo de carga (CVC) é permitido um peso bruto total combinado (PBTC), portanto quanto menor a tara do veículo, maior será o peso permitido de carga. Para reduzir a tara de uma carroceria tipo basculante, prioriza-se a utilização de aços de baixa liga e de alta resistência na construção de sua caixa de carga, pois tais aços possuem elevada tensão de escoamento e requerem uma espessura menor, tornando o produto mais leve.

Entretanto, quanto menor a espessura da chapa, maior é a deformação dela quando submetida a esforços. Para diminuir a deformação e aumentar a resistência da chapa, é utilizado o processo de conformação a frio, onde dobras são realizadas na chapa por uma dobradeira/viradeira. Este processo gera um acúmulo de tensões e encruamento no material, na região da dobra, permitindo que uma chapa lisa assumira determinada geometria.

Uma empresa, fabricante de implementos rodoviários, conformava com um vinco em “V”, as chapas utilizadas na lateral de suas caixas de carga basculante, onde eram realizadas 3 dobras na chapa, formando um “V”. Com o intuito de renovar o portfólio e adequar seu produto à estética adotada pelo mercado, optou-se por substituir o perfil em “V” por um novo perfil, em “ômega”, sendo realizado agora 4 dobras na chapa. Esta alteração no modelo do perfil foi realizada sem ser conhecida a resistência mecânica do novo modelo. Porém justificou-se devido a uma tendência

de mercado, onde outras grandes implementadoras adoraram este tipo de perfil, porém com dimensões variadas.

O presente estudo tem como objetivo, comparar a resistência do perfil de vinco em “V” com o perfil de vinco em “ômega”, a fim de validar o segundo perfil na utilização das estruturas de caixas de carga, verificando se ele, terá resistência igual ou superior ao perfil em “V”. Para isso será necessário realizar cálculos de resistência dos materiais, além de ensaios mecânicos e simulações. É esperado que ao final do trabalho, através dos cálculos, se possa ter resultados suficientes que demonstrem a resistência necessária para utilização do perfil de vinco em “ômega” e também que os ensaios mecânicos e simulações computacionais reforcem tais resultados validando os cálculos.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

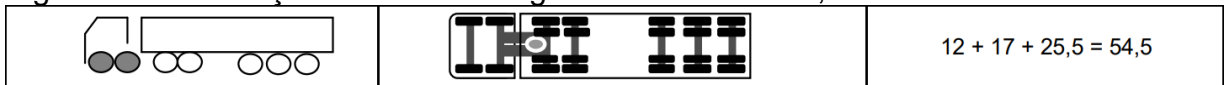
Para fundamentação da análise proposta, serão apresentados conceitos básicos sobre legislação, características do produto, perfil de aço formado a frio, esforços atuantes nas chapas e análise por meio de métodos de elementos finitos.

### **2.1 LEGISLAÇÃO**

Conforme a portaria 268/22 do DENATRAN (Departamento Nacional de Trânsito), existem 115 tipos de combinação de veículo carga homologadas, onde 48 destas combinações necessitam de Autorização Especial de Trânsito (AET). Estas CVC's permitem uma variação no PBTC (Peso Bruto Total Combinado) de 12 a 91 toneladas.

Segundo a Resolução 882 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), que estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres, estas combinações são dependentes do número de eixos, da quantia de pneumáticos, do espaçamento dos dois planos verticais entre os centros das rodas, e comprimento total da combinação de veículo de carga (CVC). A Fig. 1 mostra uma (CVC) com combinações de eixos que permitem transportar um (PBTC) de 54,5 toneladas, tal qual será utilizada neste trabalho.

Figura 1: Combinação veículo de carga com PBTC de 54,5 toneladas.

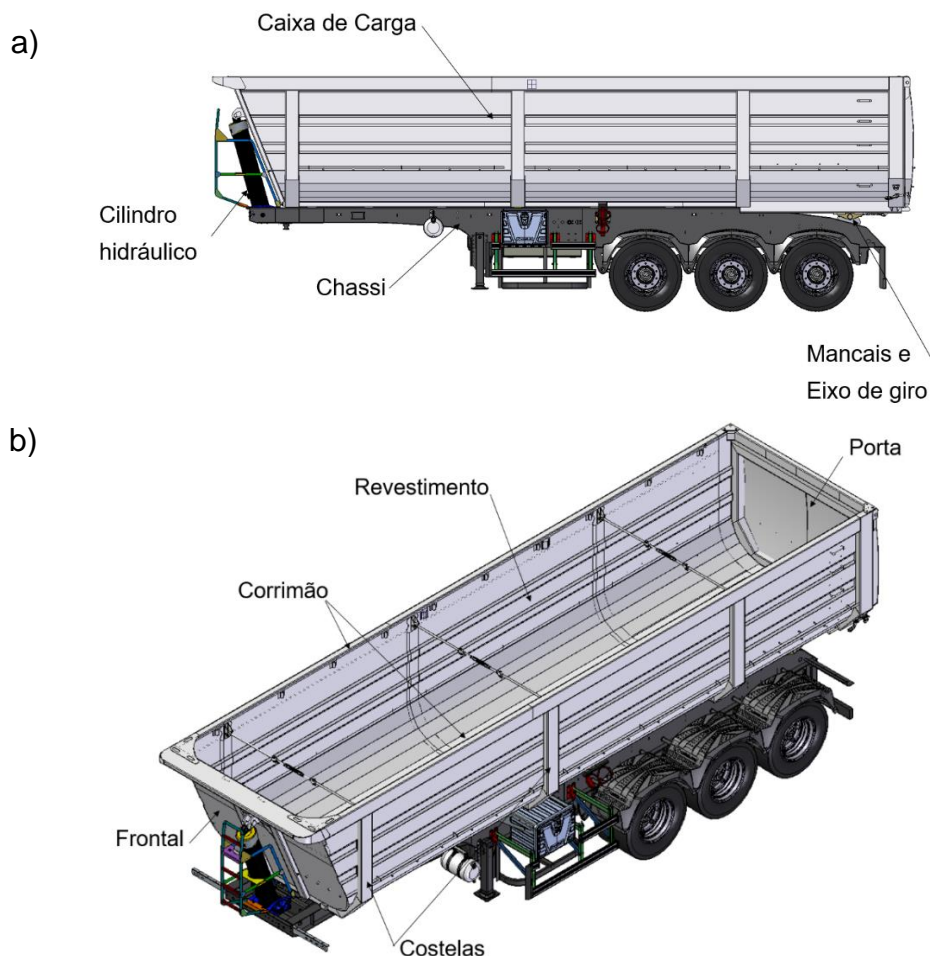


Fonte: adaptado dos anexos da portaria 268/22 do DENATRAN

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DE UM SEMIRREBOQUE BASCULANTE

A carroceria basculante é responsável por armazenar o material a ser transportado, resistindo aos esforços impostos pela carga. Nesse tipo de carroceria o descarregamento da carga é realizado através de um cilindro hidráulico localizado na dianteira do chassi, capaz de bascular a caixa de carga apoiada em mancais de um eixo de giro fixado na traseira do chassi, com o objetivo de escoar o material. Esta configuração de carroceria, conhecida como caixa de carga, é composta pelo revestimento, costelas, corrimão, frontal e porta, conforme apresenta a Fig. 2.

Figura 2: a) Implemento tipo basculante; b) Partes da caixa de carga



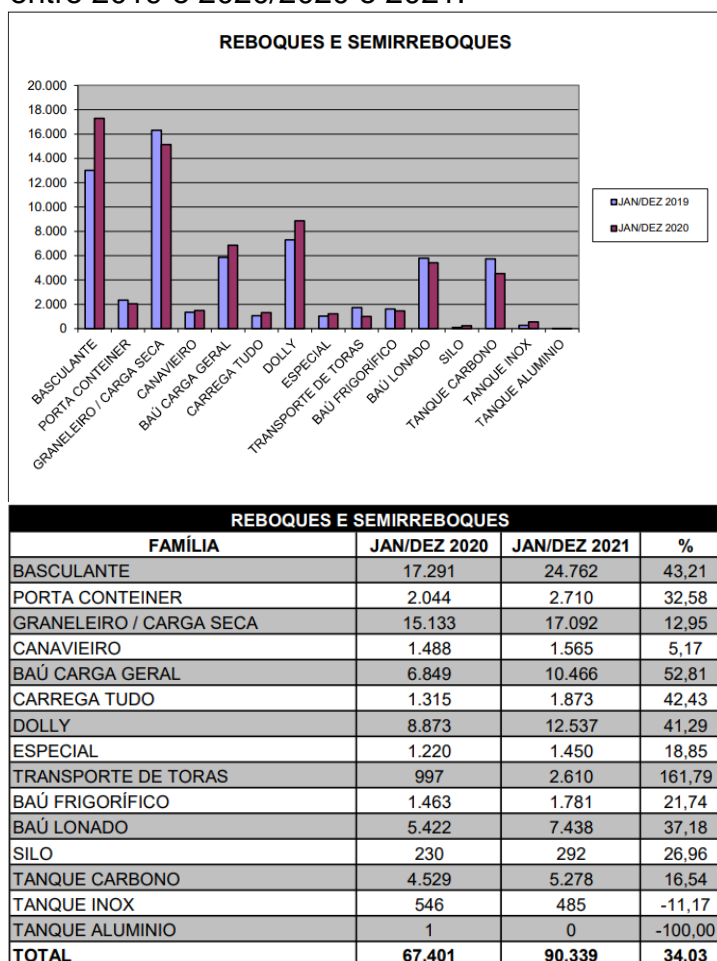
Fonte: do autor (2022)

O revestimento da caixa de carga pode ser dividido em assoalho e lateral. O assoalho irá sofrer a maior parte dos esforços, pois sobre ele estará todo o carregamento de material. Entretanto a lateral irá sofrer esforços reduzidos, devido a carga exercer um carregamento triangular, onde a força aplicada pelo material no topo da chapa é mínima.

O material utilizado no revestimento da caixa de carga, na fabricante de implementos rodoviários em questão, são aços de alta resistência e baixa liga. Estes aços, possibilitam uma redução na tara do produto por consequência de sua baixa espessura.

De acordo com dados da ANFIR, o semirreboque basculante, em 2020, se tornou o implemento rodoviário mais emplacado do Brasil, ultrapassando o semirreboque graneleiro/carga seca.

Figura 3: Comparativo de emplacamento de implementos rodoviários (linha pesada) no Brasil entre 2019 e 2020/2020 e 2021.



Fonte: adaptado de ANFIR (2022)

No ano de 2021, o emplacamento do semirreboque basculante aumentou 43,21 % contra apenas 12,95 % do semirreboque graneleiro/carga seca, sinalizando uma nítida mudança de preferência do mercado.

### 2.3 PERFIL FORMADO A FRIO (PFF)

Segundo Norberto et al (2006), conformação de chapas é o processo de transformação mecânica que consiste em conformar uma chapa à forma de uma matriz, pela aplicação de esforços transmitidos através de um punção. Na operação ocorrem alongamento e contração das dimensões de todos os elementos de volume. A chapa, originalmente plana, adquire uma nova forma geométrica.

Para ETTORE (2011), entende-se o processo de conformação dos corpos metálicos como o processo de modificação da forma desse corpo metálico para outra forma definida.

Conforme a NBR 14762:2010, um PFF é obtido através de uma prensa dobradeira ou por conformação contínua em conjunto de matrizes rotativas, a partir de bobinas laminadas a frio ou a quente, revestidas ou não, sendo ambas as operações realizadas com o aço em temperatura ambiente.

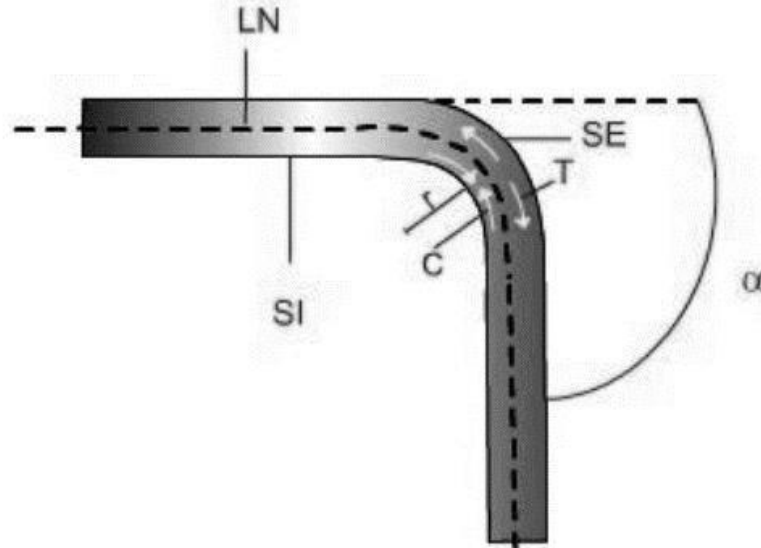
Ainda, de acordo com a NBR 14762:2010, os aços precisam atender alguns padrões de propriedades mecânicas para que sejam formados a frio. Devem apresentar a relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento  $f_u/f_y$  maior ou igual a 1,08 e o alongamento após ruptura não deve ser menor que 10 % para base de medida igual a 50 mm ou 7 % para base de medida igual a 200 mm, tomando-se como referência os ensaios de tração conforme ASTM A370.

No dobramento, a chapa sofre uma deformação por flexão em prensas que fornecem a energia e os movimentos necessários para realizar a operação. A forma é conferida mediante o emprego de punção e matriz específicas até atingir a forma desejada. O dobramento pode ser conseguido em uma ou mais operações, com uma ou mais peças por vez, de forma progressiva ou em operações individuais.

Na operação de dobramento, a chapa é submetida a esforços aplicados em duas direções opostas para provocar a flexão e a deformação plástica, mudando a forma de uma superfície plana para duas superfícies concorrentes, em ângulo, com raio de concordância em sua junção.

A Fig. 4 mostra os esforços de compressão e tração na região da dobra e a forma adquirida por uma tira submetida a dobramento.

Figura 4: Esforços atuantes em material dobrado



Fonte: MORO (2006)

Onde:

LN - Linha neutra

SI - Superfície interna

SE - Superfície externa

Rc - Raio de concordância

C - Força de compressão

T - Força de tração

$\alpha$  - Ângulo de dobra

Quanto menor o raio de dobramento, maior é a tensão desenvolvida na região tracionada. Um excessivo tracionamento provocado por um pequeno raio de dobramento pode vir a romper as fibras externas da chapa dobrada. Define-se o raio interno mínimo de dobra, como o menor valor admissível para o raio para se evitar grande variação na espessura da chapa na região dobrada. Este valor é dado em função do alongamento longitudinal máximo do material e da espessura da chapa que está sendo dobrada. Para a determinação do raio de dobramento, utiliza-se a Equação (1).

$$R_{min} = \frac{50e}{AI\%} - \frac{e}{2} \tag{1}$$

Onde:

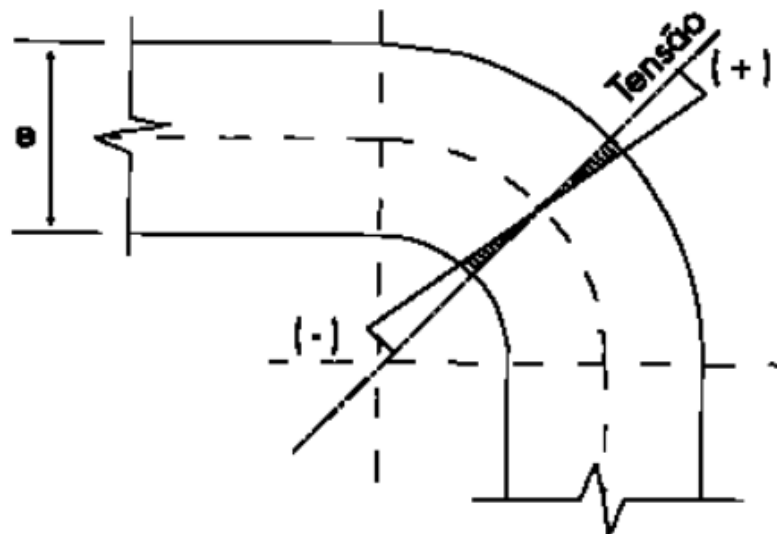
Rmin - Raio mínimo (m);

AI - Alongamento da chapa (%);

e - Espessura da chapa (m).

O dobramento é uma operação onde ocorre uma deformação por flexão. Quando um metal é dobrado, a sua superfície externa fica tracionada e a interna comprimida conforme indicados na Fig. 5. Estas tensões aumentam a partir de uma linha interna neutra, chegando a valores máximos nas camadas externa e interna.

Figura 5: Tensão em dobra.

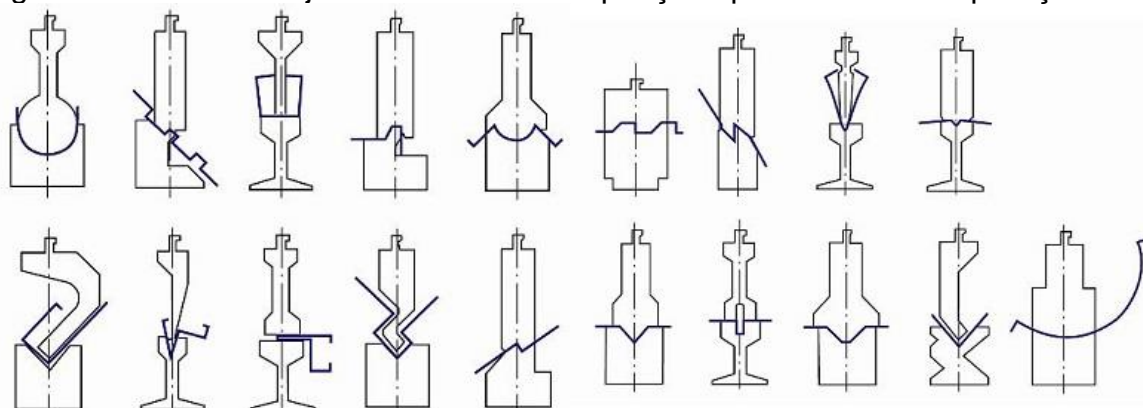


Fonte: MORO (2006)

A operação de dobramento é realizada através de ferramentas denominadas matriz e punção. A Fig. 7 apresenta estas ferramentas, que se compõe de uma parte superior (punção) e uma inferior (matriz) e podem apresentar diferentes formatos para possibilitar a obtenção das características do projeto. As máquinas de conformação podem, nesse caso, ser prensa excêntrica ou prensa hidráulica viradeira.



Figura 7: Perfis de conjuntos de matrizes e punções para diferentes aplicações



Fonte: Adaptado Afigraf (2022)

Durante a operação de dobramento, é necessário que se evite um alongamento excessivo da chapa, para que não ocorra uma variação em sua espessura.

## 2.4 ESFORÇOS ATUANTES NA CHAPA DA LATERAL DA CAIXA DE CARGA

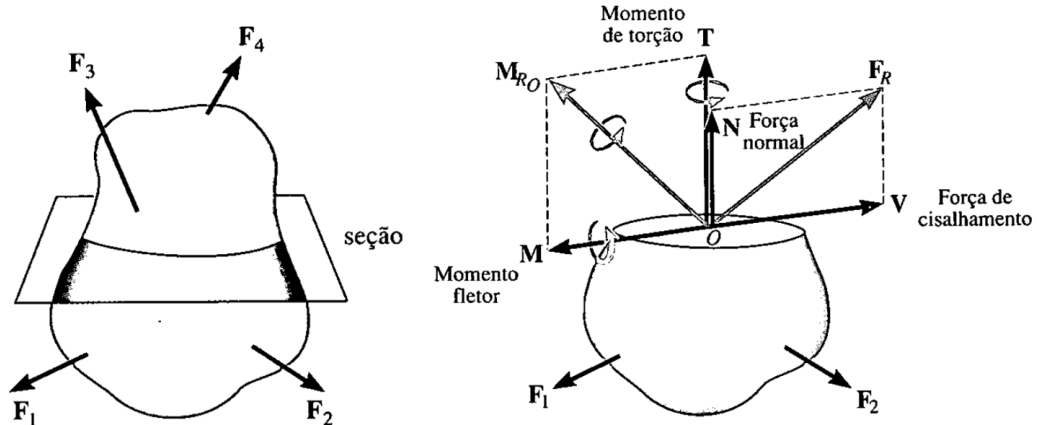
Para conhecer todas as tensões resultantes dos esforços atuantes, se faz necessário realizar cálculos de resistência dos materiais, para encontrar os valores de momentos de área, esforço cortante, tensões de cisalhamento, tensões de flexão e deformação por flexão.

### 2.4.1 Esforços internos

Segundo HIBBLER (2010), em geral é comum representar a carga sobre um corpo como um sistema coplanar de forças. Quando este for o caso e as forças estiverem localizadas no plano x-y, o corpo estará em equilíbrio quando: (1)  $\Sigma F_x = 0$ ; (2)  $\Sigma F_y = 0$ ; (3) e  $\Sigma M_o = 0$ , sendo  $O$  um ponto qualquer tanto sobre o corpo, como fora dele.

A aplicação de forças externas conhecidas, resulta em esforços internos desconhecidos. Para a determinação de tais esforços internos que atuam em um ponto específico do corpo é necessário realizar o método das seções, onde um “corte” é feito no corpo na região onde os esforços internos devem ser determinados (HIBBLER, 2010).

Figura 8: Seção de corpo com esforços internos e externos



Fonte: Adaptado HIBBLER (2010)

A Fig. 8 ilustra um corpo em equilíbrio onde quatro forças são exercidas externamente sobre ele. A seção do corpo, mostra os esforços internos capazes de manterem unidas a parte superior com a parte inferior do corpo. Com os esforços internos, é possível calcular as cargas resultantes de uma seção utilizando as equações de equilíbrio estático. HIBBLER (2010) define quatro tipos de cargas resultantes, sendo elas:

- Força Normal ( $N$ ), é a componente da força resultante ( $F_R$ ) que atua perpendicularmente a área da seção e é criada quando as forças externas tendem a empurrar ou puxar o corpo;
- Força de Cisalhamento ( $V$ ), é localizada no plano da seção e é criada quando as cargas tendem a provocar um deslizamento das faces, uma sobre a outra;
- Momento de Torção ou Torque ( $T$ ), é criado quando as forças tendem a torcer uma parte do corpo em relação a outra;
- Momento Fletor ( $M$ ), é provocado pelas cargas externas onde o corpo tende a fletir em relação ao eixo localizado no plano da área.

#### 2.4.2 Momentos de área

O momento de área de primeira ordem, ou momento estático, mede a distribuição da área de uma seção de viga em relação a um eixo. É calculado multiplicando a área ( $A$ ) de uma seção, onde se deseja conhecer o momento estático,

pela distância ( $y$ ) entre o centroide da área ( $A$ ) e um determinado eixo (HIBBLER, 2010).

$$Q = A \cdot y \quad (2)$$

O momento de inércia de acordo com Botelho (2015), é o produto de um elemento de área pelo quadrado de sua distância a um eixo a ser considerado, e é calculado pela integral:

$$I_y = \int x^2 \cdot ds \quad (3)$$

### 2.4.3 Tensões de flexão e cisalhamento

A tensão de flexão em uma viga, ocorre quando uma carga é aplicada em um corpo, distante dos apoios, fazendo com que o corpo tende a fletir. A tensão de flexão parte da linha neutra do corpo, e se propaga até o ponto mais afastado do eixo, onde a tensão é máxima (HIBBLER, 2010). Quando existe tensão de flexão em um corpo, há uma região comprimida e outra região tracionada, estas regiões são separadas pela linha neutra. A tensão de flexão pode ser calculada pela equação 4 (HIBBLER, 2010), sendo positiva para a região tracionada e negativa para a região comprimida:

$$\sigma_{flexão} = \frac{M \cdot y}{I} \quad (4)$$

Onde:

$y$  - Distância da linha neutra até o ponto onde a tensão é calculada (m).

Devido a um carregamento transversal em um corpo, é criado um esforço cortante internamente no corpo. O esforço cortante irá gerar uma tensão, chamada de tensão de cisalhamento ( $\tau$ ), que está diretamente relacionado ao modelo do corpo. A fórmula para calcular a tensão de cisalhamento, atuante sobre uma seção transversal qualquer, em relação à linha neutra, segundo HIBBLER, (2010) é dada por:

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b} \quad (5)$$

Onde:

V - Força cortante (N);

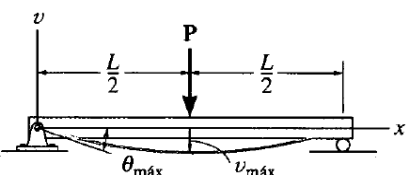
Q - Momento de área de primeira ordem (m<sup>3</sup>);

b - Largura da seção no ponto onde a tensão é calculada (m).

### 2.4.3 Deflexão

A deflexão de uma viga corresponde ao deslocamento em relação ao eixo  $y$  em qualquer ponto do eixo  $x$ . A Fig. 9 ilustra a linha elástica de uma viga sobre dois apoios com uma carga concentrada no ponto médio.

Figura 9: Linha elástica equações para carga concentrada no centro de uma viga

Viga	Deslocamento	Linha elástica
	$v_{\text{máx}} = \frac{-PL^3}{48EI}$	$v = \frac{-Px}{48EI} (3L^2 - 4x^2)$ $0 \leq x \leq L/2$

Fonte: HIBBLER (2010)

O deslocamento máximo, para a configuração representada pela Fig. 9, pode ser calculada por (adaptado HIBBLER, 2010):

$$\delta_{\text{máx}} = -\frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (6)$$

Onde:

F - Força exercida (N);

L - Comprimento da viga (m);

E - Módulo de elasticidade do material (Pa).

## 2.5 MÉTODO POR ELEMENTOS FINITOS (FEM)

Segundo Soriano (2009), o método consiste em simular o comportamento de uma estrutura real por meio de um modelo computacional composto de vários elementos. A solução de um sistema de equações algébricas permite descrever o comportamento provável da estrutura como um todo. Portanto o uso apenas da simulação numérica não garante a segurança nos resultados, sendo importante o uso de outro método de análise que possibilite a comparação dos resultados, no caso do trabalho em questão adotou-se também o cálculo analítico com esse propósito.

A análise matemática baseia-se na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, preservando as mesmas propriedades do meio original. Com o resultado dos deslocamentos nodais, é possível determinar os esforços internos, tensões e finalmente à resistência da estrutura. Este método é dividido em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. No pré-processamento, modela-se o projeto em software CAD 3D (Computer Aided Design), acrescentando propriedades do material, e posteriormente executa-se a geração de malhas, aplicação das forças e condições de contorno. A etapa de processamento é onde o programa resolve as equações diferenciais. Já no pós-processamento, obtêm-se os resultados graficamente e com valores numéricos.

## 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O desenvolvimento da análise se dará a partir: (1) da definição dos perfis formados a frio; (2) da realização dos cálculos de resistência dos materiais; (3) de ensaios mecânicos de flexão; (4) e de simulações comparando os resultados. A carga a ser utilizada na análise para os itens 2, 3 e 4, será de 500 N, por se tratar de uma análise comparativa, onde deve ser considerado os mesmos esforços externos para cada tipo de perfil.

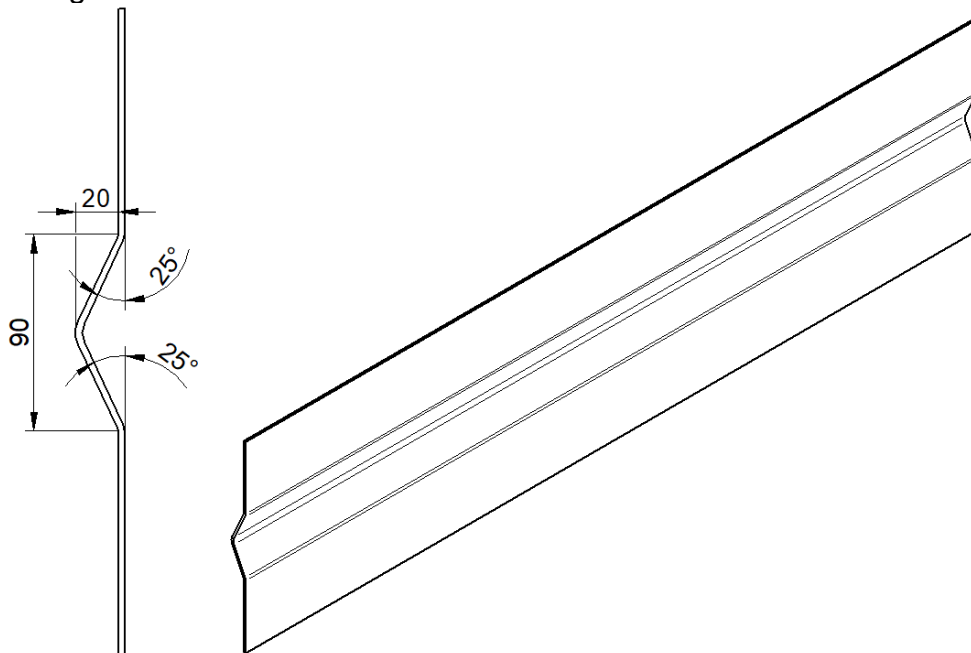
### 3.1 DEFINIÇÃO DOS PERFIS FORMADOS A FRIO (PFF)

Os PFF a serem analisados são os perfis utilizados na lateral da caixa de carga de implementos rodoviários do tipo basculante. A lateral da caixa de carga deve

resistir aos esforços impostos pela carga transportada, sem que ocorra uma deformação plástica na chapa. O aço analisado neste trabalho será o Strenx® 700MC, aço de baixa liga com 700 MPa de limite de escoamento e alongamento de 10 %, com 3 mm de espessura e módulo de elasticidade de 210 GPa. Tais perfis, serão formados a frio por meio de uma dobradeira. Ambos os perfis formados a frio que serão analisados, possuem 3 mm de espessura, e comprimento de 1200 mm e largura de 300 mm após formados a frio.

O primeiro perfil é formado por vincos, em formato de “V”, que são realizados a partir de três dobras. Para realização da análise será adotado um corpo de prova com apenas um vinco, conformado no centro da chapa, e dimensões de vinco conforme Fig. 10.

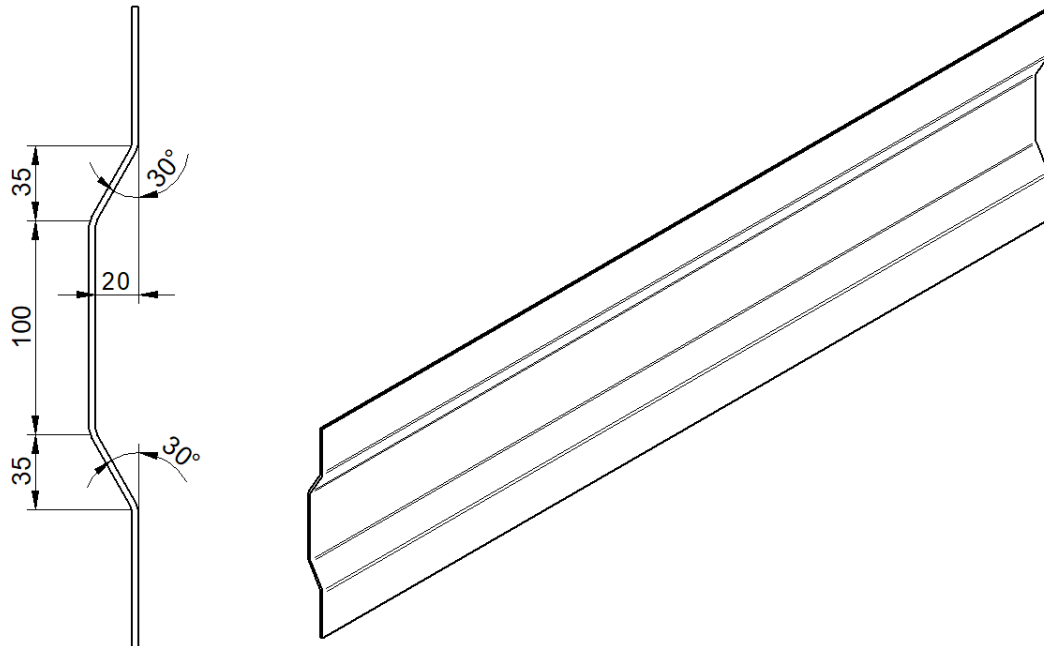
Figura 10: PFF com vinco em “V”.



Fonte: do autor (2022)

Já o segundo perfil, é formado com vincos em formato de “ômega”, onde são realizados a partir de 4 dobras. Para realização da análise, também será adotado um corpo de prova com apenas um vinco localizado no centro da chapa e com dimensões de vinco como ilustra a Fig. 11.

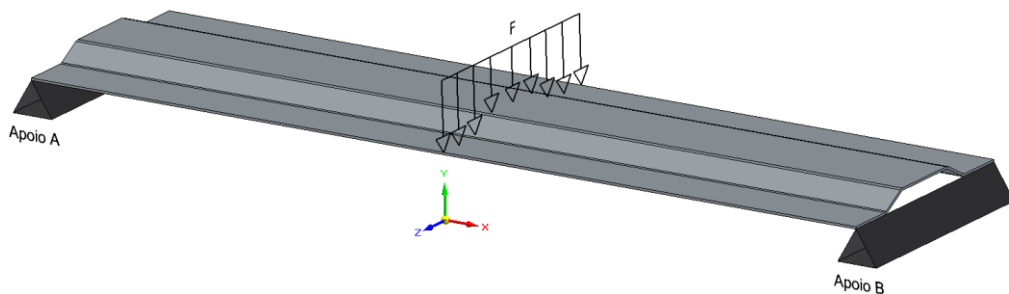
Figura 11: PFF com vinco em “ômega”.



Fonte: do autor (2022)

Para o desenvolvimento dos cálculos, dos ensaios mecânicos e das simulações computacionais, será considerado que o corpo estará disposto em um plano com coordenadas  $X Y Z$ , simplesmente apoiado nas extremidades e com uma carga aplicada no centro, que estará distribuída no eixo  $Z$ , em toda a largura da face superior, conforme Fig. 12:

Figura 12: Modelo de apoio e esforços externos para análise.



Fonte: do autor (2022)

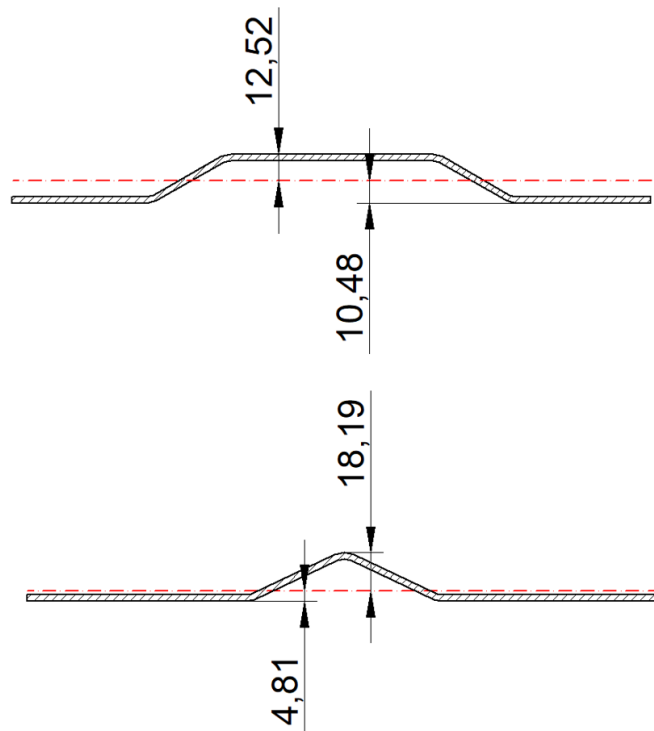
### 3.2 CÁLCULOS DAS TENSÕES E DEFORMAÇÃO PARA CADA PERFIL

Com a definição dos perfis, pode-se dar início nos cálculos de tensão e deformação para cada perfil, utilizando as fórmulas expostas no item 3.1. Os valores

de momento de inércia de cada perfil ( $I_x$ ) e distancias do eixo centroidal ( $y_1$  e  $y_2$ ) foram obtidos diretamente de um *software* CAD. Para obter o momento estático ( $Q_x$ ) de cada perfil, foi utilizado o mesmo *software* para coletar valores de área e distância entre a linha neutra e o centroide da área, para então obter o valor de  $Q_x$ .

A Fig. 13, expõe o eixo centroidal de cada perfil, representado pela linha pontilhada, bem como os valores obtidos de  $y_1$  (medida acima do eixo centroidal), para a região comprimida, e  $y_2$  (medida abaixo do eixo centroidal), para a região tracionada de cada perfil.

Figura 13: Distância entre as extremidades e o eixo centroidal (mm).

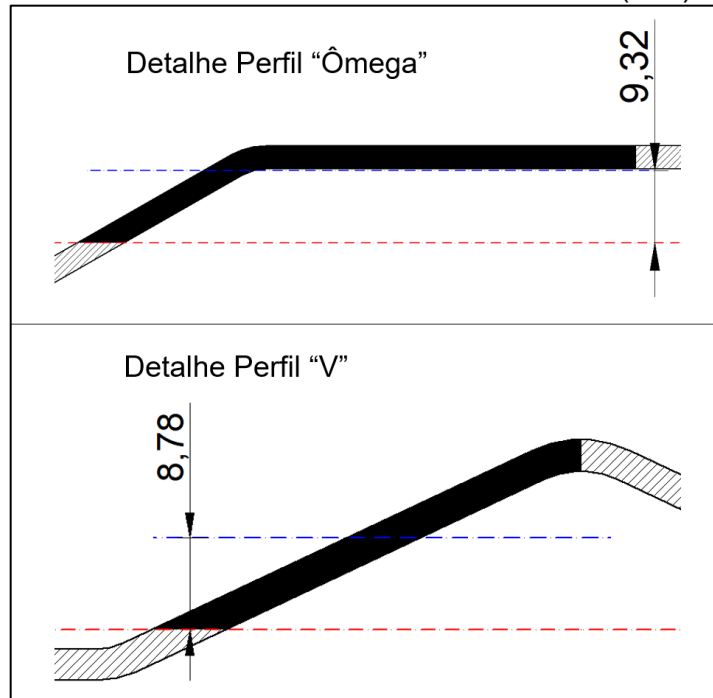


Fonte: do autor (2022)

Para realizar o cálculo do momento estático, utilizando a equação 2, foi considerado a área preenchida em preto ( $A$ ) e a distância ( $y$ ) entre o eixo centroidal do perfil, representado pela linha pontilhada inferior, e o centroide da área, representado pela linha pontilhada superior, conforme apresentado no detalhe de cada perfil, pela Fig. 14:



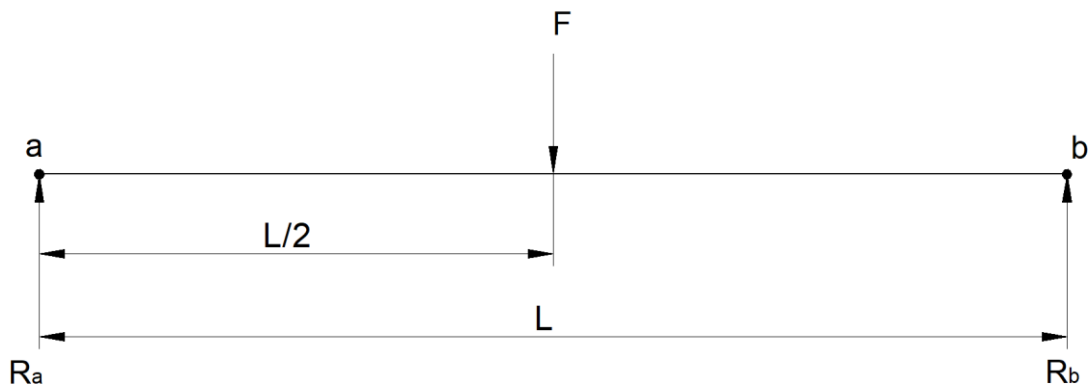
Figura 14: Área considerada para momento estático e distância entre eixos centroidais (mm).



Fonte: do autor (2022)

Os cálculos serão realizados para que sejam conhecidas as tensões atuantes e uma deformação após determinada carga concentrada a ser aplicada no centro da chapa conformada a frio que estará na horizontal, sobre dois apoios nas duas extremidades que irão permitir articulação. A imagem abaixo representa os esforços externos atuantes na chapa.

Figura 15: Diagrama de corpo livre.

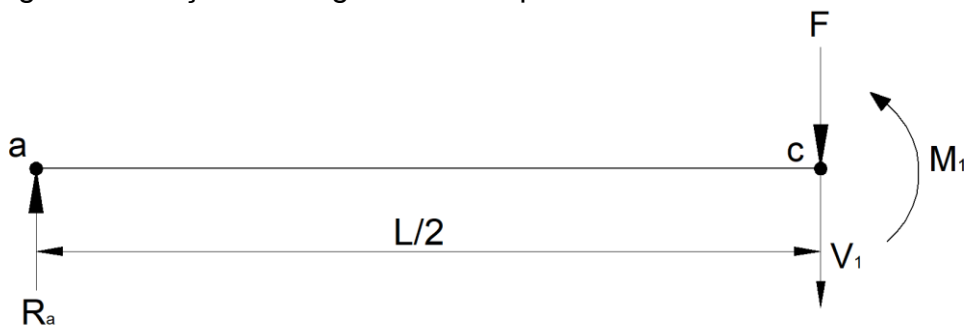


Fonte: do autor (2022)

Observando o diagrama de corpo livre, pode-se concluir que por se tratar de um carregamento simétrico, os valores da força de reação nos apoios,  $R_a$  e  $R_b$ , serão iguais e terão um valor de  $F/2$ .

Para realização do cálculo do momento fletor e esforço cortante causados pela força  $F$ , utilizou-se a equação do somatório de momentos  $\sum M = 0$  e somatório de forças na direção  $y$ ,  $\sum F_y = 0$ . Para isso, realiza-se um corte no corpo e analisa-se todos os esforços de momento no corpo em relação ao ponto de corte. A imagem abaixo apresenta tais esforços após ser realizado o corte.

Figura 16: Seção do diagrama de corpo livre.



Fonte: do autor (2022)

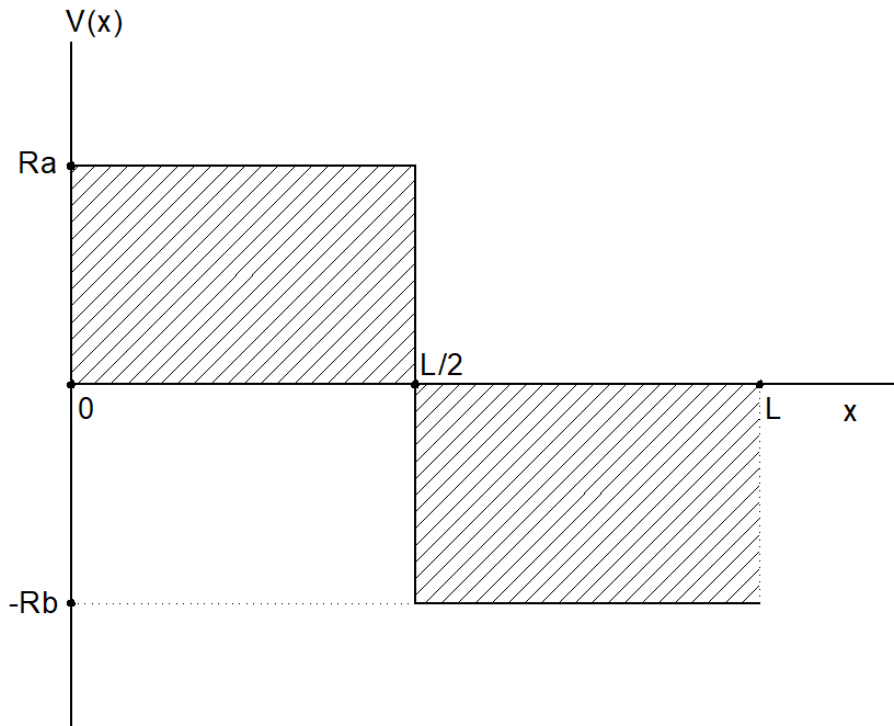
Utilizando a equação de somatório de momentos em relação ao ponto “c” e os dados do diagrama de corpo livre, obtém-se a seguinte equação:

$$\sum M = 0 \quad \therefore \quad -R_a \cdot L/2 + M_1 \quad \therefore \quad -F/2 \cdot L/2 + M_1 = 0$$

$$M_1 = \frac{F \cdot L}{4} \tag{7}$$

Pode-se realizar um diagrama para o esforço cortante na forma de gráfico, utilizando os dados de cargas atuantes no corpo, tendo como eixos cartesianos o esforço cortante ( $V(x)$ ) associado ao eixo  $y$  e a distância ( $x$ ), partindo de um apoio a outro. O diagrama do esforço cortante é exposto pela Fig. 17.

Figura 17: Diagrama esforço cortante.



Fonte: do autor (2022)

Analisando o digrama do esforço cortante, é possível inferir que o valor do esforço cortante máximo é:

$$V_1 = R_a \quad \therefore \quad V_1 = F/2$$

$$V_1 = F/2 \tag{8}$$

Conhecendo os valores de momento de inércia, distancias do eixo centroidal e momento fletor da seção, pode-se calcular a tensão de flexão para as faixas de compressão e tração das chapas. Utilizando como base a equação 4 apresentada anteriormente, uma nova equação é adaptada para o cálculo:

$$\sigma_{flexão} = \frac{M \cdot y}{I} \quad \therefore \quad \sigma_{flexão} = \frac{M_1 \cdot y}{I_z} \quad \therefore \quad M_1 = \frac{F \cdot L}{4} \quad \therefore \quad \sigma_{flexão} = \pm \frac{F \cdot L \cdot y}{4 \cdot I_z}$$

O valor da tensão de flexão será diferente para a região comprimida e a região tracionada, pois o valor de  $y$  terá um valor para cada região, além de o sinal

adotado para o resultado serem opostos, sendo positivo para tração e negativo para compressão. Visto isso, será utilizada a seguinte equação para o cálculo da tensão máxima de flexão na região comprimida:

$$\sigma_{flexão} = -\frac{F \cdot L \cdot y_1}{4 \cdot I_z} \quad (9)$$

Para o cálculo da tensão máxima de flexão na região tracionada, será utilizada a equação abaixo:

$$\sigma_{flexão} = \frac{F \cdot L \cdot y_2}{4 \cdot I_z} \quad (10)$$

A tensão de cisalhamento gerada pela carga aplicada, poderá ser calculada com a equação 11, tomando como base a equação 5:

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b} \quad \therefore \quad \tau = \frac{V_1 \cdot Q_z}{I_z \cdot b} \quad \therefore \quad V_1 = \frac{F}{2}$$

$$\tau = \frac{F \cdot Q_z}{2 \cdot I_z \cdot b} \quad (11)$$

A deformação da chapa após a aplicação de determinada carga, é calculada aplicando os valores conhecidos à equação 6, utilizando o momento de inercia  $I_z$ .

### 3.3 ENSAIOS MÊCANICOS DE FLEXÃO

Os ensaios mecânicos foram realizados de forma experimental com base na norma ABNT NBR 7581-2, adaptando-a para que o ensaio pudesse ser conduzido em um laboratório de ensaios disponível, e fosse possível extrair resultados concretos.

Utilizou-se, para realizar os ensaios mecânicos, uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL30000N, com capacidade de 300 kN, tendo sua

célula calibrada em 29/09/2022. Os ensaios foram executados ao ar e em temperatura de 25°C.

As medidas gerais de cada perfil foram aferidas após a conformação, obtendo 1200 mm de comprimento e 301 mm de largura para a chapa com perfil em “ômega”. Para a chapa com perfil em “V”, se obteve uma chapa com 1200 mm de comprimento e 300 mm de largura.

Os apoios foram construídos com madeira, onde foi garantido o nivelamento das faces e utilizado reforços para que não houvesse deslocamento no instante em que a força fosse aplicada à chapa. Conforme norma ABNT NBR 7581-2, os apoios foram posicionados com um vão livre de 1100 mm entre eles, e possuíam faces de apoio para as chapas de 50 mm.

Para que a força fosse aplicada em toda a largura da chapa, inclusive na área conformada, foi utilizado um perfil “U”, que possuía nas suas faces inferiores, o recorte exato no formato dos vincos de cada chapa.

Após o posicionamento das chapas sobre os apoios, com o auxílio de um nível industrial, foi conferido o nivelamento das chapas, obtendo um nivelamento satisfatório, que não causasse influência nos ensaios. O perfil “U” foi posicionado exatamente no centro das chapas.

Figura 18: Disposição das chapas e apoios para realizar o ensaio.



Fonte: autor (2022)

Com a chapa e o perfil “U” posicionados, deu-se início ao ensaio. A base do atuador da máquina que exerce a força, foi aproximada do perfil “U” manualmente, até o momento em que a máquina identificasse uma força de reação, que significaria que a base já estaria exercendo uma força sobre o perfil.

Após isso foi retornado 0,1 mm do atuador, e zerado os dados para iniciar o ensaio. Todo o avanço e retorno do atuador, foi realizado de forma manual, utilizando os botões de avanço lento controlado, sendo que para cada pulso no botão, o atuador avança 0,1 mm.

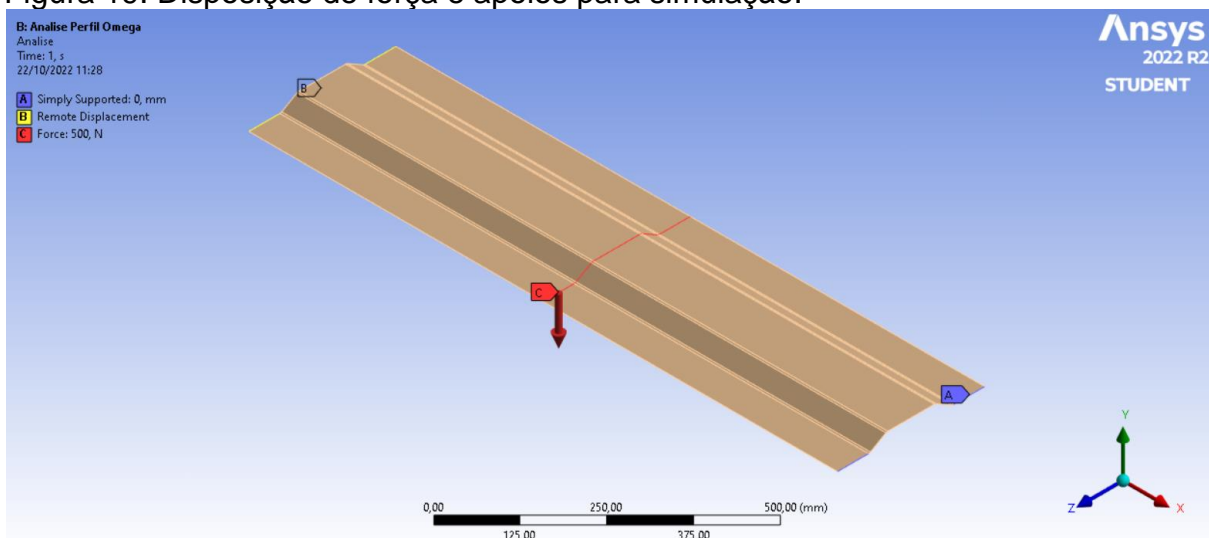
Com os valores zerados, iniciou-se o ensaio avançando o atuador, até que se chegasse no valor da força desejada, de 500 N.

### 3.4 ANÁLISE PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Para a realização da análise através do método de elementos finitos, foi utilizado o *software* Ansys®, para discretização do modelo matemático e comparação dos resultados obtidos com os ensaios mecânicos e cálculos realizados.

Para a simulação, foi utilizado o recurso *Static Structural*, pois se tratava de uma estrutura estática. Os modelos 3D utilizados, foram os modelos desenhados em *software* CAD apresentados nas Fig. 10 e 11.

Figura 19: Disposição de força e apoios para simulação.



Fonte: do autor (2022)

A disposição para os apoios e esforços foi realizada da maneira que foi apresentada na Fig. 12, onde a força de 500 N foi aplicada no meio da chapa, e ela estava simplesmente apoiada nas extremidades, sem engastes.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Abaixo, serão apresentados os resultados obtidos com a execução dos cálculos de resistência dos materiais, ensaios mecânicos e simulações de ambos os tipos de perfis.

### 4.1 RESULTADOS DOS CÁLCULOS

A apresentação dos resultados obtidos nos cálculos realizados, utilizando as equações expostas no item 3.2, será feita através das tabelas abaixo.

Os valores de área obtidos através do *software* CAD, assim como o resultado de momento estático, para cada perfil, estão descritos na tabela abaixo:

Tabela 1: Valores para cálculo e resultado dos momentos estáticos.

Tipo do perfil	Área correspondente ao	Distância entre eixos centroidais	Momento estático
	Momento estático (mm <sup>2</sup> )	do perfil e da área (mm)	$Q_z$ (mm <sup>3</sup> )
Em "ômega"	215,16	9,32	2005,29
Em "V"	123,84	8,78	1087,32

Fonte: Do autor (2022)

O momento de inércia de cada perfil, extraído diretamente do *software*, assim como os valores de área total, referente a seção apresentada na Fig. 13, são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2: Valores de área e momentos de inércia.

Tipo do perfil	Área total da seção (mm <sup>2</sup> )	Momento de Inércia $I_z$ (mm <sup>4</sup> )
Em "ômega"	930,79	76657,65
Em "V"	926,06	33041,98

Fonte: Do autor (2022)

Conhecendo os valores de momento de inércia, utilizou-se as equações 9 e 10, tendo como resultado as tensões máximas de flexão na região comprimida e região tracionada para cada perfil, quando aplicada a força adotada  $F = 500$  N. Os resultados para a tensão máxima de flexão para compressão referente à equação 9 podem ser encontrados na Tab. 3.

Tabela 3: Valores de tensões de flexão máximas da região comprimida.

Tipo do perfil	$y_1$ (mm)	Comprimento $L$ (mm)	Momento de Inércia $I_z$ (mm <sup>4</sup> )	$\sigma$ flexão compressão (MPa)
Em "ômega"	12,52	1200	76657,65	-24,50
Em "V"	18,19	1200	33041,98	-82,58

Fonte: Do autor (2022)

Os resultados para a tensão máxima de flexão para tração, referente à equação 10, estão expostos na Tab. 4.

Tabela 4: Valores de tensões de flexão máximas da região tracionada.

Tipo do perfil	$y_2$ (mm)	Comprimento $L$ (mm)	Momento de Inércia $I_z$ (mm <sup>4</sup> )	$\sigma$ flexão tração (MPa)
Em "ômega"	10,48	1200	76657,65	20,51
Em "V"	4,81	1200	33041,98	21,84

Fonte: Do autor (2022)

Para a tensão de cisalhamento no ponto onde seu valor é máximo, aplicou-se os valores a equação 11, obtendo os valores apresentados na Tab. 5:

Tabela 5: Valores de tensões de cisalhamento.

Tipo do perfil	Espessura $b$ (mm)	Momento estático $Q_z$ (mm <sup>3</sup> )	Momento de Inércia $I_z$ (mm <sup>4</sup> )	$\tau_{máx}$ (MPa)
Em "ômega"	3,00	2005,29	76657,65	2,18
Em "V"	3,00	1087,32	33041,98	2,74

Fonte: Do autor (2022)



O deslocamento máximo de flexão no eixo  $Y$  causado pela força aplicada no centro da chapa, para cada perfil, foi calculado pela equação 6, tendo como resultados os valores expostos na Tab. 6:

Tabela 6: Deslocamento máximo de flexão.

<b>Tipo do perfil</b>	<b>Força Aplicada <math>F</math> (N)</b>	<b>Módulo de elasticidade <math>E</math> (GPa)</b>	<b>Momento de Inércia <math>I_z</math> (mm<sup>4</sup>)</b>	<b>Deslocamento <math>\delta</math> (mm)</b>
Em “ômega”	500	210	76657,65	-1,11
Em "V"	500	210	33041,98	-2,59

Fonte: Do autor (2022)

Todos os resultados atingidos através dos cálculos, mostram que o perfil em “ômega” possui uma resistência à flexão superior à do perfil em “V”. Comparando os valores calculados, para o perfil em “ômega”, obteve-se um valor 70 % menor para a tensão de flexão máxima e 20 % menor para a tensão de cisalhamento máxima, aplicando uma força de mesma intensidade. Já para o deslocamento, foi obtido um resultado 57 % menor para o perfil em “ômega” em relação ao perfil em “V”.

## 4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Como informado no item 3.3, o ensaio mecânico de flexão foi realizado através de uma máquina de ensaio, onde o avanço era realizado de forma manual pulsando um botão, de avanço lento controlado. Devido ser possível controlar apenas o avanço, não se obteve uma força aplicada de 500 N, como desejado. A força que mais se aproximou foi a de 510 N.

A Tab. 7 apresenta os resultados de deslocamento de cada perfil, que foram obtidos através da realização dos ensaios.

Tabela 7: Deslocamento obtido através do ensaio.

<b>Tipo do perfil</b>	<b>Força Aplicada <math>F</math> (N)</b>	<b>Deslocamento <math>\delta</math> (mm)</b>
Em “ômega”	510	-2,30
Em "V"	510	-3,60

Fonte: Do autor (2022)

Os valores de deslocamento e força aplicada foram extraídos diretamente do indicador digital da máquina, que estava conectada à um computador.

Houve uma grande disparidade dos valores obtidos nos ensaios quando comparado aos resultados dos cálculos, que pode ser justificado por alguns motivos como: apoios terem sido confeccionados em madeira, variação na espessura da chapa e variação na precisão da carga exercida pela máquina de ensaio devido sua capacidade máxima. Apesar destes fatores, os resultados dos ensaios mostram que o perfil em “ômega” possui uma resistência superior à do perfil em “V”, assim como nos cálculos, onde para a mesma força aplicada, foi obtido um deslocamento 36 % menor para o perfil em “ômega”.

#### 4.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Diferente dos ensaios mecânicos, nas simulações além do valor de deslocamento máximo, foi possível extrair também os valores de tensões normais máximas. Da mesma forma que nos itens 4.1 e 4.2, os resultados apresentaram uma resistência superior para o perfil em “ômega” em relação à do perfil em “V”. Para a tensão de flexão máxima, foi extraído um valor 60 % menor e para o deslocamento um valor 51,6 % menor para o perfil em “ômega”.

Tabela 8: Resultados simulações.

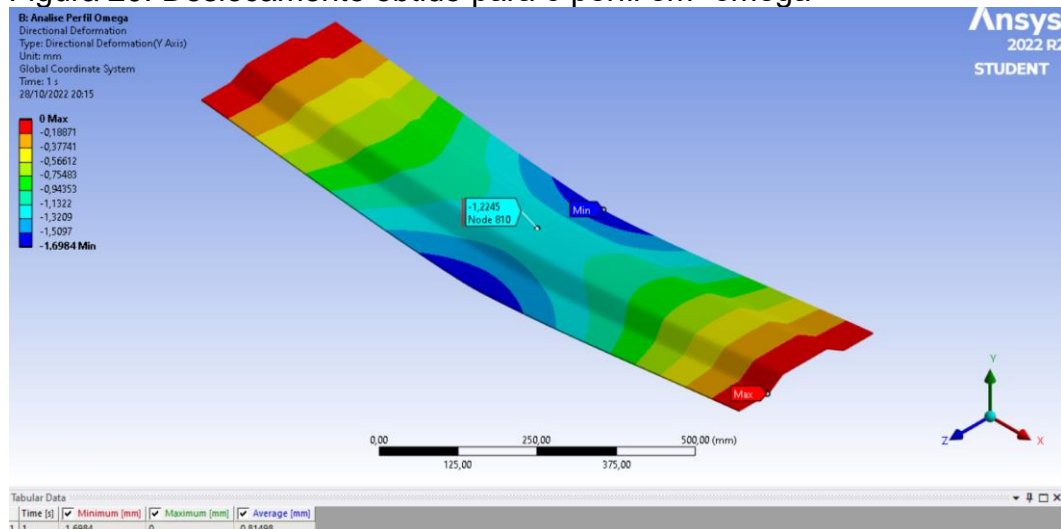
<b>Tipo do perfil</b>	<b><math>\sigma</math> flexão máx. (MPa)</b>	<b>Deslocamento <math>\delta</math> (mm)</b>
Em “ômega”	-31,73	-1,69
Em “V”	-79,70	-3,49

Fonte: Do autor (2022)

Vale ressaltar ainda, que o valor máximo aferido para o deslocamento na simulação realizada, considerou que as “abas” externas da chapa tiveram um deslocamento extra, devido a geometria dos perfis.

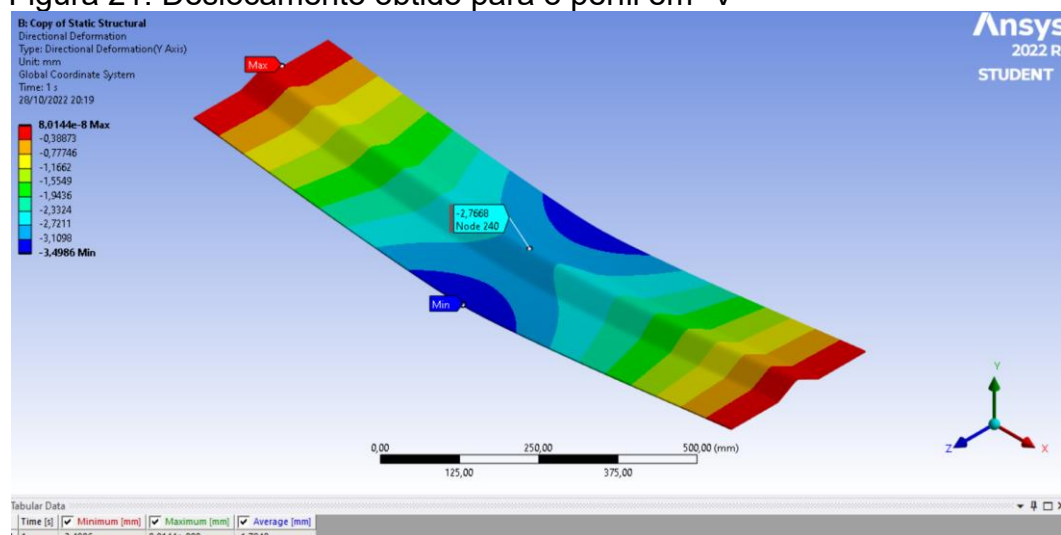
Quando considerando apenas o ponto central na face superior da chapa, da mesma forma que foi considerado para os cálculos, os valores de deslocamento da simulação se aproximam muito dos resultados obtidos nos cálculos, conforme apresentado nas figuras abaixo.

Figura 20: Deslocamento obtido para o perfil em “ômega”



Fonte: do autor (2022)

Figura 21: Deslocamento obtido para o perfil em “V”



Fonte: do autor (2022)

A Tab. 9 expõe o deslocamento máximo atingido no ponto central da face superior de cada perfil, extraído da simulação, onde o valor para o deslocamento do perfil em “ômega” foi 56 % menor.

Tabela 9: Deslocamento do ponto central da face superior.

Tipo do perfil	Deslocamento $\delta$ (mm)
Em “ômega”	-1,22
Em “V”	-2,77

Fonte: Do autor (2022)

#### 4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Todos os resultados apresentados no item 4, apontam para uma resistência do perfil em “ômega” superior à do perfil em “V”. As Tab. 10 e 11 trazem um compilado dos resultados de deslocamento ( $\delta$ ) e tensão de flexão máxima ( $\sigma$  flexão máx) respectivamente, expostos nos itens 4.1, 4.2 e 4.3.

Tabela 10: Resultados de deslocamento.

Tipo do perfil	$\delta$ obtido nos cálculos Tab. 6 (mm)	$\delta$ obtido nos ensaios Tab. 7 (mm)	$\delta$ obtido nas simulações Tab. 8 (mm)	$\delta$ obtido nas simulações Tab. 9 (mm)
Em “ômega”	-1,11	-2,30	-1,69	-1,22
Em “V”	-2,59	-3,60	-3,49	-2,77

Fonte: Do autor (2022)

Embora a variação nos valores de deslocamento nos ensaios terem apresentado uma variação de 107 % para o perfil em “ômega” e 39 % para o perfil em “V”, houve uma baixa variação entre os cálculos e simulações.

Quando comparado os resultados da Tab. 9, onde se alterou o ponto de aferição do deslocamento, com os resultados dos cálculos apresentados na Tab. 6 no item 4.1, a diferença entre os valores de deslocamento ficou próxima de 10 % para o perfil em “ômega” e 7 % para o perfil em “V”. Comparando os valores apresentados nas Tab. 6 e 8, a variação ficou em 52 % para o perfil em “ômega” e 34 % para o perfil em “V”.

Tabela 11: Resultados de tensão de flexão máxima.

Tipo do perfil	$\sigma$ flexão máx. obtida nos cálculos Tab. 3 (MPa)	$\sigma$ flexão máx. obtida nas simulações Tab. 6 (MPa)
Em “ômega”	-24,50	-31,73
Em “V”	-82,58	-79,70

Fonte: Do autor (2022)

Conforme apresentado na Tab. 11, a variação entre os valores de tensões de flexão máxima obtidos nos cálculos e nas simulações, ficou em 29,5 % para o perfil em “ômega” e em 3 % para o perfil em “V”.

## 5 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento deste trabalho, podem-se chegar as seguintes conclusões:

- Com a alteração do formato do perfil da chapa utilizada na lateral de carrocerias basculante, para um perfil com vinco em forma de “ômega”, foi obtido uma chapa com resistência mecânica superior a chapa que era conformada com vinco em forma de “V”, comprovada pelos cálculos, ensaios e simulações;
- Os cálculos de resistência dos materiais mostraram que, quando aplicada uma carga concentrada no centro da chapa, o deslocamento por flexão é 57 % menor para o perfil em “ômega”, em comparação ao deslocamento da chapa com perfil em “V”.
- Com a realização dos cálculos de resistência dos materiais, ensaios mecânicos e simulações numéricas, obteve-se resultados satisfatórios suficientes para validar a utilização do novo perfil na fabricação de carrocerias basculante, onde todos os resultados apontaram para uma resistência do perfil em “ômega” superior à do perfil em “V”;
- A geometria de um perfil de chapa influencia diretamente em sua resistência mecânica, tratando de tensões e deslocamento, devido a alteração dos momentos de área de primeira e segunda ordem.
- Como os ensaios mecânicos foram realizados de forma experimental baseados na norma ABNT NBR 7581-2, sendo realizados de forma manual e extraído os dados diretamente da máquina, houve uma variação nos valores quando comparados aos cálculos e simulações. Entretanto foram válidos para que fosse feito a análise e comparação dos resultados;
- Como sugestão para trabalhos futuros, realizar um estudo com o objetivo de encontrar um perfil no qual possua a mesmas propriedades mecânicas do perfil em “ômega” apresentado neste arquivo, porém reduzindo material e consequentemente reduzindo seu peso.

## REFERÊNCIAS

AISI – American Iron and Steel Institute. **AISI Manual Cold-Formed Steel Design 2002 Edition**. Disponível em: <<https://scholarsmine.mst.edu/ccfss-aisi-spec/130>> Acesso em novembro de 2022.

ANFIR - Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários. **Emplacamento do setor período JAN a DEZ 2021**. Disponível em: <[https://anfir.org.br/ADM/VIEW/ARQUIVO/ESTATISTICA/1647632070-Desempenho\\_Jan\\_Dez\\_2021.pdf](https://anfir.org.br/ADM/VIEW/ARQUIVO/ESTATISTICA/1647632070-Desempenho_Jan_Dez_2021.pdf)>. Acesso em novembro de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7581-2** – Telha ondulada de fibrocimento Parte 2: Ensaios. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9762** – Veículo rodoviário de carga – Terminologia. 2012.

BOTELHO, M. H. C. **Resistência dos Materiais para entender e gostar**. São Paulo: Studio Nobel, 1998.

CBIE – Centro Brasileiro de Infraestrutura. **Como é feito o transporte de cargas no Brasil?** Disponível em: <<https://cbie.com.br/artigos/como-e-feito-o-transporte-de-cargas-no-brasil/>>. Acesso em novembro de 2022.

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito. **Resolução 882 de 13/12/21**. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-contran-n-882-de-13-de-dezembro-de-2021-370017699>>. Acesso em novembro de 2022.

DENATRAN – Departamento Nacional dos Transportes. **Portaria 268 de 14/03/22**. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-268-de-14-de-marco-de-2022-385802759>>. Acesso em novembro de 2022.

DESIGN HANDBOOK. **Structure design and manufacturing in high-strength steel**. Edition 1: SSAB, 2017.

Hibbeler, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7ª Edição. São Paulo: Person Prentice Hall, 2010.

IBGE, **Áreas Territoriais**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/dafaul.shtm>>. Acesso em novembro de 2022.

JAVARONI, Carlos Eduardo. **Perfis de aço formados a frio submetidos à flexão: Análise teórico-experimental**. São Carlos, 1999.

MORO, Norberto; AURAS, André Paegle. **PROCESSOS DE FABRICAÇÃO, CONFORMAÇÃO MECÂNICA II – Extrusão, Trefilação e Conformação de Chapas**, CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE SANTA CATARINA GERÊNCIA EDUCACIONAL DE METAL MECÂNICA, Florianópolis, 2006.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. 4ª ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 1028p. 2013.

Soriano, H. L. **Elementos finitos: formulação e aplicação na estática e dinâmica das estruturas**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.

### **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me dado saúde e força permitindo que eu pudesse finalizar este artigo.

A minha família por ser a minha base de tudo, sem eles não estaria aqui hoje.

A minha namorada Isadora Aparecida Roden que sempre me apoiou e me incentivou durante todo o processo de formação.

Aos colegas da universidade SATC pela troca de conhecimento e apoio.

Aos colegas do trabalho por toda ajuda desprovida direta e indiretamente.

E ao meu orientador José Luiz Salvador que sempre esteve presente tirando todas as minhas dúvidas e compartilhando muito conhecimento para que eu pudesse concluir este artigo da melhor maneira.