

ESTUDO DE CASO: COMPARAÇÃO ENTRE O DIMENSIONAMENTO DE UMA PASSARELA COM PERFIL FORMADO A FRIO E PERFIL LAMINADO

MATHEUS HENRIQUE MEZZALIRA^{1*}; RICARDO PAGANIN²

¹Discente, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel-PR, mhmezzalira@gmail.com

²Esp. em Engenharia Civil, Prof. Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel-PR, engpaganin@gmail.com

RESUMO: Unindo a velocidade de execução de estruturas metálicas com a urgência em que passarelas urbanas são requisitadas, este tipo de material é a escolha mais comumente utilizada. No dimensionamento de passarelas metálicas, o projetista possui à disposição duas grandes famílias de perfis metálicos: aqueles formados por aços laminados ou aqueles formados a frio, também conhecidos como perfis de aço dobrado. Cada um possui características mecânicas peculiares que influenciam no comportamento da estrutura como um todo, sendo estes, regidos até por normas diferentes. Baseando-se na premissa de que perfis dobrados são mais leves que perfis laminados, mas menos resistentes que o mesmo, o presente trabalho teve como objetivo dimensionar duas passarelas de pedestres geometricamente idênticas, mas constituídas unicamente por perfis laminados ou perfis dobrados, para salientar as características de cada um por meio dos dados coletados do dimensionamento. Foram, portanto, observadas as seguintes características: quantidade de elementos, peso total da estrutura e deslocamentos. Após o desenvolvimento da pesquisa, observou-se que em relação a massa, o modelo formado unicamente por perfis dobrados obteve um melhor resultado, sendo 9 toneladas mais leve, ou seja, 27% mais econômico em quantidade de aço, no entanto o modelo dobrado, por apresentar maiores deslocamentos, necessitou de um número maior de barras para sua aprovação no programa de cálculo, cerca de 20%. Conclui-se, portanto, que apesar das diferenças, o modelo realmente mais eficiente seria aquele formado tanto por perfis laminados quanto perfis dobrados, sendo esta a solução já adotada e difundida no meio técnico.

PALAVRAS-CHAVE: Aço laminado. Aço dobrado. Comparação.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Martins (2014), o aço é um material construtivo de enorme confiabilidade técnica, dado o rigoroso controle de qualidade empregado pelas siderúrgicas. Entre fatores como encurtamento de cronograma e racionalização de material e mão-de-obra, este material representa boa parcela das edificações industriais e offshore. Ainda segundo Martins (2014), a utilização do aço em países desenvolvidos é bem representativa, e explica-se pela velocidade e simplicidade da execução de obras metálicas.

Segundo dados estatísticos do Instituto Aço Brasil (2016), atualmente, o setor siderúrgico nacional possui capacidade de fabricação superior a 50 milhões de toneladas de aço por ano, e conta com trinta usinas de grande porte instaladas por todo o território nacional. O país é, atualmente, o 11º exportador mundial de aço, e consome, anualmente, cerca de 18 milhões de toneladas, sendo a construção civil o setor de maior consumo.

Para a construção civil, existem três metais utilizados: o ferro forjado (não mais fabricado), ferro fundido e o aço. Atualmente o aço é o mais importante e utilizado e pode ser

definido como uma liga metálica entre ferro e carbono (PFEIL, 2009). Comercialmente falando, encontram-se dois tipos de perfis metálicos provenientes de dois métodos de fabricação diferente, os perfis formados a frio e os perfis laminados.

Segundo Silva (2012), a produção de aço consiste basicamente do refinamento de ferro fundido. As principais matérias primas são o carvão mineral e a hematita de ferro, ambos não encontrados puros na natureza. Em outras palavras, a obtenção do aço vem através da remoção progressiva das impurezas presentes no minério de ferro. Já em seu estado líquido, o aço recebe aditivos que lhe conferem as propriedades desejadas e então é solidificado e trabalhado para adquirir a forma necessária.

Os perfis laminados são provenientes dos cilindros de conformação mecânica, presentes no processo de laminação. Estes são mais recomendados na utilização de estruturas de grande porte do que os perfis formados a frio, pois possuem tensões residuais que lhe garantem mais resistência às solicitações mecânicas (PFEIL, 2009). Segundo Lubas (2008), os perfis formados a frio, por possuírem espessura máxima de 8 mm, são mais maleáveis, leves e econômicos e necessitam, para o correto dimensionamento (por possuírem certas peculiaridades), conhecimento detalhado de seu comportamento estrutural.

Entre diversos tipos de estruturas que podem ser projetadas em aço, destacam-se as passarelas de pedestres, muito comuns em meios urbanos. Segundo Fialho (2004), passarelas urbanas podem ser conceituadas como uma ponte para pedestres que liga dois pontos da cidade, separados por obstáculos naturais ou criado pelo homem.

As passarelas urbanas são equipamentos importantes para a solução do trânsito e para a acessibilidade para pedestres. Segundo Branco (2009), em quase todas as rodovias brasileiras a movimentação de veículos coexiste com a circulação de pedestres, sendo que em regiões litorâneas e próximas de centros urbanos, a situação tende a se agravar. Ainda segundo Branco (2009), as passagens em desnível, mesmo encaradas com cautela pelos usuários, é a opção mais comum.

A partir do exposto, pretende-se, com este trabalho, dimensionar uma passarela urbana em aço, primeiramente utilizando-se somente de perfis laminados e em seguida, somente perfis formados a frio, a fim de levantar a solução mais eficiente, tendo em vista que as chapas dobradas são mais econômicas que os perfis laminados, que por sua vez, são mais resistentes que os perfis formados a frio.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PANORAMA HISTÓRICO DO AÇO NO BRASIL

As estruturas metálicas têm sido utilizadas em grande escala na atualidade, porém inicialmente o material utilizado era o ferro fundido, pois era mais facilmente industrializado que o aço. Entre os anos de 1779 e 1820, surgiram as primeiras pontes construídas em ferro fundido, tendo como exemplo histórico a ponte Coalbrookdale na Inglaterra, construída em 1779. No Brasil, a utilização de estruturas metálicas chegou mais tarde, sendo que a primeira ponte em ferro fundido foi construída no estado do Rio de Janeiro, somente em 1857 (PFEIL, 2009).

Segundo Pfeil (2009), o aço começou a ser utilizado em larga escala somente depois do invento dos altos-fornos em 1864, e dos laminadores em 1880. Devido ao crescente consumo deste material nas construções civis mundo afora, e do desenvolvimento da indústria automotiva, surge, após a Segunda Guerra Mundial, a indústria siderúrgica no Brasil, implementada a partir da Usina Presidente Vargas da CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), impulsionando a fabricação nacional do aço e sua consequente utilização nas construções civis e *offshores*. Um exemplo histórico é o primeiro edifício de grande porte nacional construído em estrutura metálica: o edifício Avenida Central no Rio de Janeiro em 1961, pela antiga Fábrica de Estruturas Metálicas (FEM) da CSN.

Atualmente, o setor possui capacidade de fabricação superior a 50 milhões de toneladas de aço por ano e conta com trinta usinas de grande porte instaladas por todo o território nacional. O país é atualmente o 11º exportador mundial de aço, e consome, anualmente, cerca de 18 milhões de toneladas, sendo a construção civil o setor de maior consumo (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016).

2.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Para a construção civil, existem três metais utilizados: o ferro forjado (não mais fabricado), ferro fundido e o aço. Atualmente, o aço é o mais importante e utilizado e pode ser definido como uma liga metálica entre ferro e carbono. Este carbono, adicionado sempre em pequenas quantidades, com teores variando de 0,008% até 2,11% (CHIAVERINI, 1996), confere propriedades específicas à liga e, normalmente, caracteriza o aço em questão. Por exemplo, um aço com alto teor de carbono terá pouca ductilidade, mas alta resistência, já um

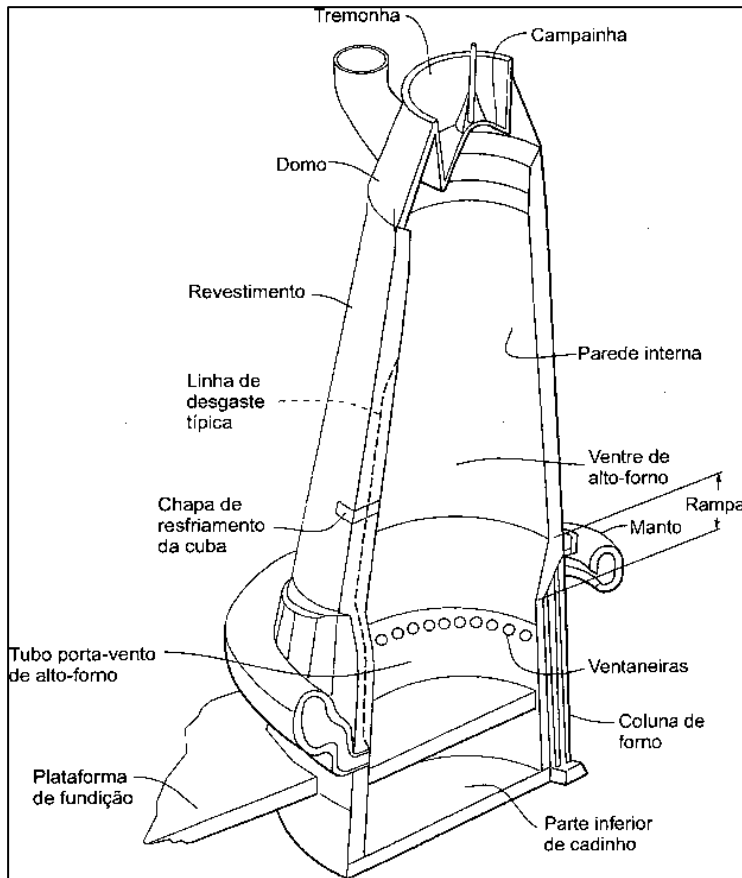
aço com baixo teor de carbono apresentará grande ductilidade, tornando-se mais maleável e pouco resistente a deformações (PFEIL, 2009).

A produção de aço consiste basicamente do refinamento de ferro fundido. As principais matérias primas são o carvão mineral e a hematita de ferro, ambos não encontrados puros na natureza. Em outras palavras, a obtenção do aço vem através da remoção progressiva das impurezas presentes no minério de ferro. Já em seu estado líquido, o aço recebe aditivos que lhe conferem as propriedades desejadas e então é solidificado e trabalhado para adquirir a forma necessária (SILVA, 2012).

A primeira etapa deste processo de fabricação é a preparação das matérias primas. Tal preparação tem como objetivo aumentar a eficácia dos altos-fornos, reduzindo o consumo de energia. Nesta etapa, as matérias primas são preparadas da seguinte maneira: o carvão mineral é transformado em coque pelas Coqueiras e, as partículas finas do minério de ferro são aglutinadas (para adquirirem granulometria adequada) pelo processo de sinterização (SILVA, 2012).

Posteriormente à preparação das matérias primas, tem-se a produção de ferro fundido rico em carbono, chamado também de gusa. A Figura 1 apresenta uma seção transversal de um alto-forno e seus principais componentes. O procedimento se dá da seguinte maneira: pela porção superior do forno, insere-se as matérias primas (minério, calcário e coque) e pela porção inferior insufla-se ar quente. A queima de coque gera calor e monóxido de carbono, que acabam por reduzir o óxido de ferro em ferro líquido rico em carbono. O calcário, por sua vez, transforma o pó de coque em escória fundida. Deste processo têm-se então, um produto principal, a gusa, e um produto secundário, a escória de alto-forno. A gusa ainda passará por etapas de refinamento enquanto a escória poderá ser utilizada em outros processos de fabricação, como o do cimento, por exemplo (PFEIL, 2009).

Figura 1: Alto-forno.



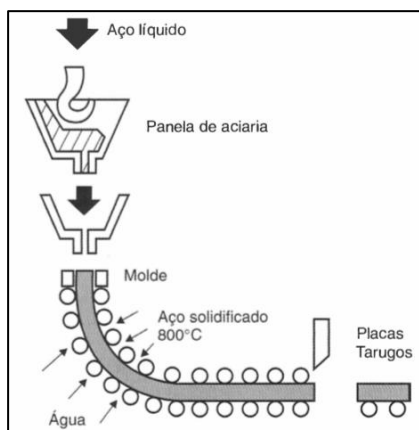
Fonte: PYNE, 2007.

Posteriormente, a gusa é depurada pelo conversor de oxigênio. Nesta etapa, procura-se queimar o excesso de carbono presente no ferro fundido pela injeção direta de oxigênio na massa líquida. É neste procedimento que o aço adquire em sua composição elementos como manganês, silício e fósforo (PFEIL, 2009).

Neste processo, retira-se boa parte das impurezas, e conseqüentemente, gera-se mais escórias. Ao final, o aço de qualidade uniforme, é despejado em uma panela. É nesta panela que ocorre a desgaseificação. O aço superaquecido absorve gases presentes na atmosfera, mas com o passar do tempo o aço esfria, e, próximo de sua temperatura de solidificação, o material ferve e estes gases escapam muito rapidamente. O resultado é a formação de vazios. Para evitar este acontecimento, insere-se alumínio a fim de que os gases sejam absorvidos durante o resfriamento (PFEIL, 2009).

Segundo Silva (2012), em seguida, ainda na aciaria (unidade de uma usina siderúrgica responsável pela conversão do ferro em aço), o aço fundido é transformado em tarugos ou placas por um procedimento denominado de lingotamento (Figura 2).

Figura 2: Lingotamento.



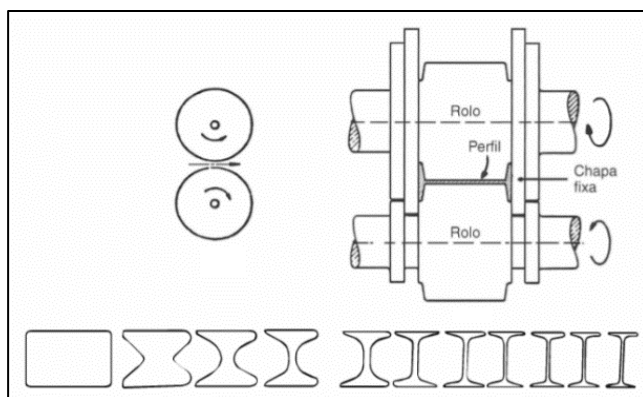
Fonte: PFEIL, 2008.

2.2.1 Laminação

A conformação mecânica dos tarugos e placas provenientes do processo de lingotamento ocorre por meio de diversos tipos de laminadores. Nesta etapa de fabricação, o aço se transforma em chapas ou nos perfis laminados comercialmente conhecidos. Para as chapas, restam os processos de formação a frio, posteriormente comentados (LUBAS, 2008).

A laminação consiste na deformação do aço por meio de cilindros que exercem forças de compressão e alongam o aço (Figura 3). O perfil necessita diversas passagens pelos laminadores, sendo que a distância entre rolos é sempre reduzida. É importante comentar que o aço é aquecido a rubro antes de passar pelos laminadores. O aquecimento do material gera a recristalização dinâmica na deformação plástica e ocorre a temperaturas que a ductilidade do metal é máxima, facilitando o procedimento. A este tipo de laminação, provém a denominação de laminação a quente (PFEIL, 2008).

Figura 3: Laminação.



Fonte: PFEIL, 2008.

2.2.2 Perfis formados a frio

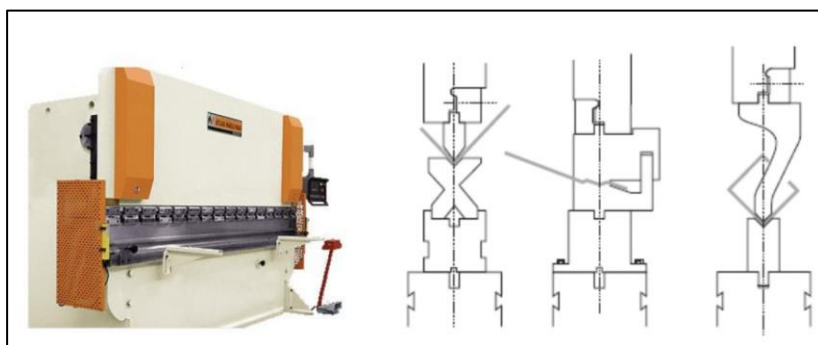
Os perfis formados a partir de dobramentos de chapas finas (provenientes do processo de laminação), recebem o nome de perfis formados a frio pois seu processo de fabricação ocorre praticamente sem calor. É verdade que se gera calor nos roletes das pistas de perfilação por efeito de fricção e movimento, no entanto, não é suficiente para fundir ou deformar o aço sem que haja adição de pressão externa (LUBAS, 2008).

A ABNT NBR 14762/2010, que trata do dimensionamento de perfis dobrados, recomenda a utilização de aços que possuam propriedades mecânicas adequadas ao processo de fabricação de perfis formados a frio. A norma estipula que a relação resistência à ruptura e resistência ao escoamento deverá ser maior ou igual a 1,08 e que o alongamento após ruptura deverá ser menor que 10% para perfis de base igual a 50mm ou 7% para bases iguais a 200mm. Embora sejam determinado estes limites, a mesma norma ainda recomenda a não utilização no projeto de valores maiores que 180 MPa para resistência ao escoamento e 300 MPa para resistência à ruptura.

Comercialmente, existem dois tipos de procedimento de fabricação de perfis formados a frio: contínuo (conformação contínua) e descontínuo (prensa dobradeira). No processo contínuo, as chapas são deslocadas longitudinalmente sobre os roletes de perfilação, e por conformação, as chapas vão gradativamente recebendo a forma desejada. Este tipo de fabricação é mais usual e recomendado para a fabricação em série, tornando-se também mais comum (LUBAS, 2008).

O processo alternativo (processo descontínuo) ocorre por meio de prensas dobradeiras (Figura 4) que garantem a geometria desejada por meio de punção localizadas. Aqui, recomenda-se este procedimento para pequenas quantidades de perfis. O comprimento da barra é limitado à largura da prensa (LUBAS, 2008).

Figura 4: Prensa dobradeira.



Fonte: SANTOS, 2014.

2.3 PASSARELAS EM AÇO

Entre diversos tipos de estruturas que podem ser projetadas em aço, destacam-se as passarelas de pedestre (Figura 5), muito comuns em meios urbanos. Segundo Fialho (2004), passarelas urbanas podem ser conceituadas como uma ponte para pedestres que liga dois pontos da cidade, separados por obstáculos naturais ou criado pelo homem. Essas estruturas são caracterizadas e diferenciadas entre si de acordo com os seguintes fatores: acesso, tabuleiro, vedação e sistema estrutural

Figura 5: Passarela Urbana



Fonte: GOVERNO DE GOIÁS, 2018.

Ao que se refere ao acesso, os pontos ligados pela passarela podem se encontrar no mesmo nível dos caminhamentos dos pedestres ou não. Há, portanto, três possíveis situações: duas extremidades no mesmo nível do caminhamento dos pedestres, somente uma extremidade no mesmo nível ou duas extremidades em níveis diferentes (FIALHO, 2004). Tendo em vista a ABNT NBR 9050/2015, os acessos se dão majoritariamente por rampas. Por questões de acessibilidade, a inclinação máxima permitida é de 8,33%, ou seja, a cada 1 metro de desnível a ser vencido, necessita-se de 12 metros de rampa.

Assim como pontes, os tipos de passarelas dividem-se também por meio de seus tabuleiros. A largura é determinada através de fórmulas matemáticas que consideram o fluxo e a densidade de pedestres. A seção transversal, além de atribuir questões estéticas, corresponde ao tipo de esforços solicitantes e define o comportamento estrutural da estrutura (FIALHO, 2004).

Ainda segundo Fialho (2004), os equipamentos ou estruturas de vedação correspondem aos guarda-corpos, corrimões, fechamentos laterais e coberturas. Os guarda-corpos são

essenciais e garantem ao usuário a adequada segurança. São normalizados pela ABNT NBR 14718/2001, que trata justamente de guarda-corpos para edificações, e devem possuir pelo menos 1,10 metros de altura.

Como toda estrutura reticulada, o sistema estrutural das passarelas pode ser classificado em rígido ou flexível, tendo como fator determinante os tipos de ligações. Se as ligações são rígidas, então a estrutura deve resistir aos esforços horizontais sem grandes deslocamentos. As estruturas de ligações flexíveis são também chamadas de contraventadas pois resistem somente aos esforços horizontais por meio de contraventamentos (PFEIL, 2009).

As passarelas urbanas são equipamentos importantes para a solução do trânsito e da acessibilidade para pedestres, no entanto o meio técnico carece de normas específicas. A maior parcela de informação é proveniente de artigos dos diversos periódicos especializados em estruturas metálicas. O interesse em passarelas urbanas é relativamente recente. Para se ter uma ideia, o primeiro congresso específico ocorreu somente em 2002, em Paris, na França (FIALHO, 2004). Segundo Branco (2009), em quase todas as rodovias brasileiras a movimentação de veículos coexiste com a circulação de pedestres, sendo que em regiões litorâneas e próximas de centros urbanas, a situação tende a se agravar. Ainda segundo Branco (2009), as passagens em desnível, mesmo encaradas com cautela pelos usuários, é a opção mais comum.

As passarelas urbanas, construídas em aço, como dito anteriormente, não possuem normas específicas, no entanto, citam-se adiante algumas normas que tornam-se necessárias ao seu projeto: ABNT NBR 7188/2013 que descreve a respeito das cargas móveis, ABNT NBR 8681/2003 que trata sobre as ações e segurança da estrutura, ABNT NBR 8800/2008 e ABNT NBR 14762/2010 que normaliza a respeito dos perfis metálicos e por fim, a ABNT NBR 9050/2015 que cita as disposições sobre acessibilidade das rampas ou escadas da passarela.

2.4 DIMENSIONAMENTO

Neste item serão descritas de forma simplificada, condições gerais de dimensionamento para os perfis formados a frio e para os perfis laminados, tendo em vista as normas ABNT NBR 14762/2010 e a ABNT NBR 8800/2008 que tratam a respeito do projeto de estruturas metálicas em perfis dobrados e laminados, respectivamente.

2.4.1 Propriedades mecânicas

Muito determinante para o dimensionamento, as propriedades mecânicas do aço são definidas logo no início das considerações normativas presente nas normas ABNT NBR 8800/2008 e ABNT NBR 14762/2010, sendo:

- Módulo de elasticidade (E) = 200 GPa;
- Coeficiente de Poisson (ν) = 0,3;
- Módulo de elasticidade transversal (G) = 77 GPa;
- Coeficiente de dilatação térmica (β_a) = $1,2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;
- Massa específica (ρ_a) = 7.850 kg/m³.

2.4.2 Critérios de segurança

Para os critérios de segurança, utiliza-se como referência a ABNT NBR 8681/2003 que trata sobre ações e segurança em estruturas. Para qualquer tipo de perfil, as estruturas metálicas são sempre projetadas tendo em vista os seus limites de ruptura e serviço, denominadas também como ELU (Estado Limite Último) e ELS (Estado Limite de Serviço), respectivamente. O estado-limite de serviço (ELS) é o limite em que a peça, por deslocamentos excessivos, perde sua funcionalidade e o estado-limite último (ELU) é o limite que determina a ruptura da estrutura (PFEIL, 2009).

As normas ABNT NBR 8800/2008 e ABNT NBR 14762/2010 definem como estado-limite último as condições de segurança que consideram as combinações mais desfavoráveis de ações atuantes ao longa da vida útil da estrutura. Já o estado-limite de serviço determina as condições de segurança relativas ao desempenho e funcionalidade da estrutura.

De forma simplificada, todas as verificações referentes aos estado-limite último, ou seja, aos limites de ruptura da estrutura, adotam a seguinte premissa: os esforços solicitantes não devem exceder os esforços resistentes (MARTINS, 2014). As condições de segurança, para todas as verificações, adotam a Equação 1 como premissa.

$$R_d \geq S_d \quad (1)$$

Onde:

R_d é a resistência de cálculo;

S_d é a solicitante de cálculo.

2.4.3 Ações

Para todos os estados-limites, consideram-se todas as ações que possam influenciar de forma significativa o comportamento da estrutura. Segundo a ABNT NBR 8681/2003, que trata do procedimento para o levantamento das cargas e da segurança das estruturas, as ações podem ser permanentes, variáveis ou excepcionais, considerando o tempo de atuação e probabilidade de ocorrência. Peso próprio da estrutura, ação do vento e terremoto são exemplos dessas ações, respectivamente.

As ações permanentes são aquelas que permanecerão praticamente constantes durante toda a vida útil da estrutura. Podem ainda serem subdivididas em diretas e indiretas, para as ações de peso próprio da estrutura e seus acessórios e para as ações provenientes dos efeitos de segunda ordem (deslocamento de apoio e imperfeições geométricas), respectivamente (ABNT NBR 8800/2008).

As ações variáveis, como o próprio nome sugere, são aquelas em que ocorre significativa variação durante a vida útil da estrutura. Citam-se como exemplos de ações variáveis as ações do vento, dos efeitos de variação de temperatura e do uso e ocupação da edificação (ABNT NBR 8800/2008).

Os valores das ações variáveis são retirados das seguintes normas: ABNT NBR 8800/2008 (para perfis laminados e formados a frio), ABNT NBR 6120/1980 que diz respeito às cargas para cálculo em estruturas, ABNT NBR 6123/1988 para ações de vento e a ABNT NBR 7188/2013 que trata sobre cargas móveis em passarelas de pedestre.

O carregamento final da estrutura é o resultado das combinações das ações levantadas que possuem probabilidades significativas de atuarem simultaneamente. Estas combinações são divididas em combinações últimas, para análises dos estados-limites últimos e combinações de serviço para análises dos estados-limites de serviço. A combinação última mais relevante e que engloba as ações atuantes durante a vida útil da edificação é a combinação normal, conforme observa-se na Equação 2.

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (2)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$ descreve os valores nominais para carregamentos permanentes;

$F_{Qi,k}$ descreve o valor nominal para carregamento variável considerado principal;

$F_{Qj,k}$ descreve os valores nominais para carregamentos variáveis.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 TIPO DE ESTUDO E LOCAL DA PESQUISA

Trata-se de um estudo de caso onde foi dimensionado uma passarela para pedestres, utilizando dois tipos de aço diferentes: aço dobrado e aço laminado. Portanto trata-se de um estudo de classificação quantitativa (FONSECA, 2002). Para o levantamento das ações, considerou-se a região industrial da cidade de Cascavel/PR. O foco principal do estudo é a análise comparativa entre os dois resultados obtidos.

O estudo foi realizado através do *software* CYPE 3D e os resultados obtidos foram analisados tendo como base as normas ABNT NBR 8800/2008 e ABNT NBR 14762/2010. O lançamento da estrutura, a aplicação de cargas, a descrição dos perfis e o cálculo de dimensionamento ocorreram através do programa.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

A passarela dimensionada pode ser caracterizada levando em consideração três fatores determinantes: tabuleiro, acesso e sistema estrutural. Ao que se refere ao tabuleiro, a estrutura conta com 2,0 m de largura e sua seção transversal é constante e não varia de acordo com as situações de esforços solicitantes. Este valor é geralmente obtido da Equação 3.

$$B = \frac{Q}{d \cdot v} \quad (3)$$

Onde:

B é a largura do tabuleiro em metros.

Q é o número de pedestres atravessando a passarela por hora.

d é a densidade, ou seja, número de pessoas por m².

v é a velocidade em m/s.

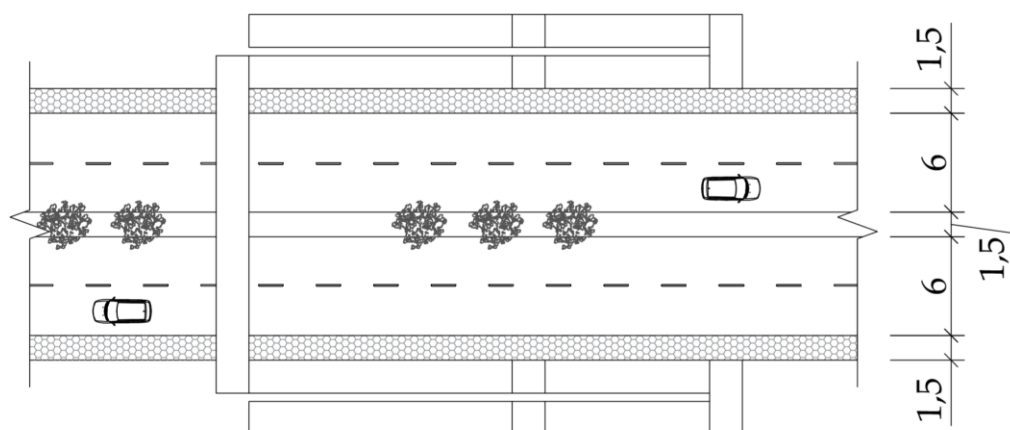
No entanto, como não foi realizado estudo de fluxo de pedestres, adotou-se uma largura pouco acima do mínimo recomendado. Considerou-se então um movimento normal de usuários sobre a passarela, e teve em vista o valor mínimo estipulado pela ISF 219: Projeto de Passarela Para Pedestres, instrução de serviço do DNIT (2015).

O acesso à passarela foi projetado como uma rampa do tipo vai e vem e suas disposições gerais respeitam as recomendações da ABNT NBR 9050/2015 que trata sobre acessibilidade de

pessoas portadoras de deficiências a edificações, espaço mobiliário e equipamentos urbanos. O acesso também pode ser caracterizado como sobrejacente, ou seja, as duas extremidades da passarela encontram-se em níveis diferentes dos caminhamentos dos pedestres.

A extensão total da passarela é de 20,5 metros, pois transpõe duas vias expressas de 6 metros como pode-se observar pela Figura 6.

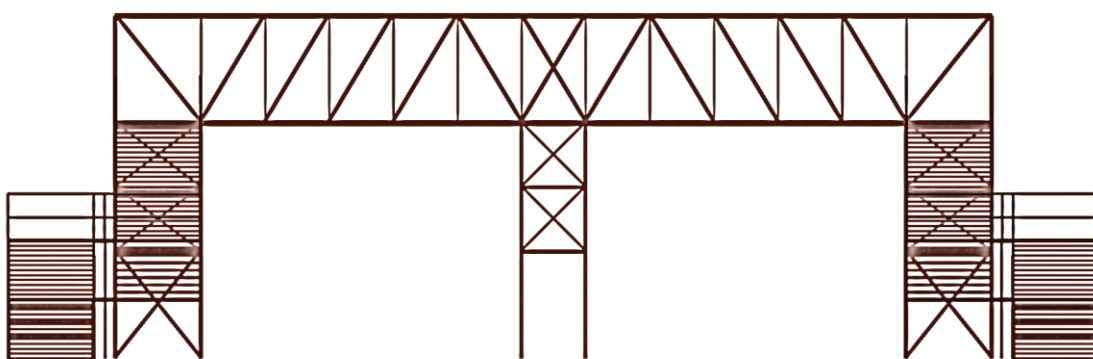
Figura 6: Esboço esquemático da passarela.



Fonte: AUTOR, 2018.

O gabarito vertical adotado é de 5,5 metros e a estrutura é treliçada (Figura 7).

Figura 7: Estrutura final da passarela



Fonte: AUTOR, 2018.

Para o modelo de perfis dobrados utilizou-se aço CF-26 e para o modelo de aço laminado utilizou-se aço A-36, ambos com propriedades físicas semelhantes e indicadas pela Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades físicas

Materiais utilizados							
Material		E	ν	G	f_y	α_t	γ
Aço	Designação	(kgf/cm ²)	coef.	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(m/m°C)	(t/m ³)
Dobrado	CF-26	2.038.736	0,3	784.129,20	2.650,40	0,000012	7.850
Laminado	A-36 250 MPa	2.038.736	0,3	784.913,40	2.548,40	0,000012	7.850
<i>Notação:</i> ν: Módulo de poisson G: Módulo de corte f_y: Limite elástico α_t: Coeficiente de dilatação γ: Peso específico E: Módulo de elasticidade longitudinal							

Fonte: AUTOR, 2018.

3.3 INSTRUMENTOS E PROCEDIMENTOS PARA COLETA E ANÁLISE DE DADOS

O dimensionamento ocorreu por meio do *software* CYPE 3D v.2015, que realizou as verificações normativas de ambos os perfis (formados a frio e laminados). Tais verificações não foram satisfatórias em alguns momentos, sendo necessário o redimensionamento manual dos perfis, tomando como critério o perfil mais resistente e leve possível.

De forma bastante simplificada, o programa funciona da seguinte maneira: após lançamento da estrutura unifilar, escolhem-se os perfis correspondentes a cada linha e às vinculações de cada nó. Com os carregamentos já apurados, aplicam-se as ações nas barras da estrutura da forma que melhor representem a realidade e os cálculos são, então, realizados por meio de várias interações. Ao final do processo de cálculo, o *software* gera um relatório com todas as verificações recomendadas pelas normas pré-estabelecidas.

A fim de comparar os resultados, os seguintes dados foram coletados: quantidade total de aço em toneladas, quantidade de barras necessárias para resistir aos esforços solicitantes (quantificado por meio do comprimento da série de perfis), e deslocamentos máximos de cada conjunto. Para a análise dos dados obtidos através do *software* mencionado anteriormente, foram utilizadas diversas referências bibliográficas que tratam do assunto em questão e, utilizando-se de tabelas e gráficos, foram apresentadas as diferenças entre os resultados obtidos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. AÇÕES

As ações aplicadas à estrutura nos dois modelos (perfis laminados e perfis dobrados) são as apresentadas na Tabela 2.

O peso próprio da estrutura é calculado automaticamente pelo *software* e considerada como carga permanente. Para o piso da passarela e da rampa, consideraram-se tábuas de madeira de 3 cm de espessura e peso específico de 700 kg/m³, resultando em 20 kgf/m² aplicada em toda a rampa e passarela. Considerou-se ainda, conforme ABNT NBR 7188/2013, que trata das cargas móveis em passarela, a carga de 5 kN/m² que representa o fluxo de pedestres.

Tabela 2: Ações aplicadas a estrutura.

AÇÕES CONSIDERADAS				
Item	Descrição	Sigla	Valor	Unidade
1	Peso próprio	PP	Automático	
2	Piso	CP1	20,00	kgf/m ²
3	Pessoas	CA	500,00	kgf/m ²
4	Vento, arrasto na Passarela, Y	VT	3.622,70	kgf
5	Vento, arrasto na Passarela, X	VT	2.067,38	kgf
CP	Carga permanente			
CA	Carga acidental			
VT	Vento (48 m/s)			

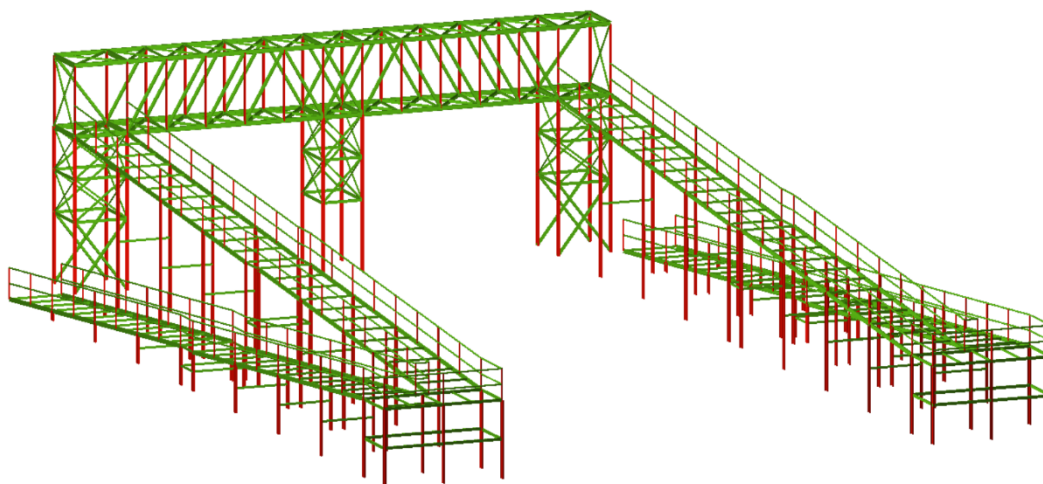
Fonte: AUTOR, 2018.

Para as ações de vento, considerou-se 48 m/s como velocidade básica, coeficiente 1,00 para fator topográfico (S_1), 0,81 para fator de rugosidade do terreno (S_2) e 1,00 para fator estatístico (S_3). A pressão dinâmica encontrada foi de 83,49 kg/m², resultando nas forças de arrasto mostradas na Tabela 2. A norma ABNT NBR 6123/1988 trata das forças devidas ao vento e foi utilizada nesta pesquisa para levantar as ações mencionadas anteriormente.

4.2. MODELO COMPUTACIONAL

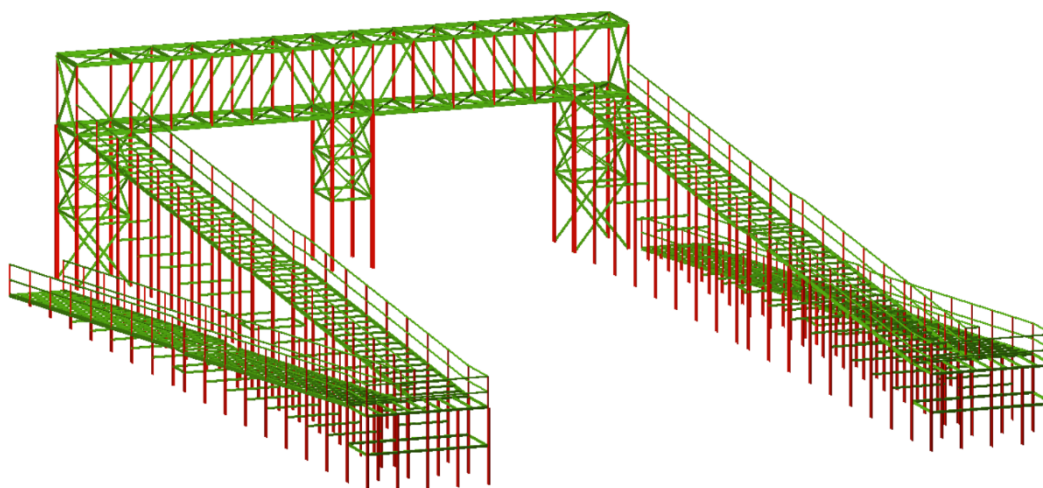
O lançamento da estrutura ocorreu por meio da exportação do modelo unifilar, realizado no programa AutoCAD, para o CYPE 3D. Neste *software*, ocorreu a determinação das seções e disposições dos perfis, comprimento de peças, vinculação interna e externa dos nós e da estrutura. O resultado é apresentado pelas Figuras 8 e 9.

Figura 8: Modelo computacional de perfis laminados.



Fonte: AUTOR, 2018.

Figura 9: Modelo computacional de perfis formados a frio.



Fonte: AUTOR, 2018.

4.3. DIMENSIONAMENTO

Neste item, será descrita a seção adotada para alguns conjuntos notáveis da estrutura, como as colunas, montantes e diagonais, banzos e transversinas. Como mencionado na metodologia, tentou-se manter seções similares para os dois modelos, aumentando somente o número de barras para capacidade resistente do modelo mais frágil.

Será apresentada, também, a capacidade resistente da peça mais solicitada de cada conjunto. Esta capacidade é calculada pelo *software* e provém do critério de segurança que parte a maioria das verificações, para o qual o esforço solicitante (S) deve ser igual ou inferior ao

esforço resistente (R). Esta premissa é apresentada pela Equação 04. Ou seja, uma barra com 90% de capacidade resistente possui 10% a mais de resistência do que solicitação.

$$S/R \leq 1,00 \quad (4)$$

Na Tabela 3, pode-se observar um resumo da verificação da capacidade resistente dos conjuntos analisados.

Tabela 3: Resumo de aprovação dos conjuntos analisados

Capacidade Resistente				
Material			Perfil	CR
Aço	Conjunto	Estrutura		(%)
Laminado	Banzos	Rampa	U 152,4 x 5,1	71
		Passarela	W 150 x 13	9
Dobrado		Passarela	U 150x 50x 4,76	12
		Rampa	U 150x 50x 4,76	22
Laminado	Transversinas	Rampa	U 76,2 x 4,3	75
		Passarela	L 100x 100x 6	43
Dobrado		Passarela	L 10 x 8,96	33
		Rampa	U 75x 40x 4,76	28
Laminado	Colunas	Rampa	U 203,2 x 5,6	38
		Passarela	W 150 x 13	20
Dobrado		Passarela	U150x 50x 4,76	16
		Rampa	U 200x 50x 4,76	41
Laminado	Montantes	Passarela	U 152,4 x 5,1	18
Dobrado		Passarela	U150x 50x 4,76	22
Laminado	Diagonais	Passarela	L 100x 100x 6	37
Dobrado		Passarela	L 10 x 8,96	37

Fonte: AUTOR, 2018.

4.3.1. Colunas

Todas as barras das colunas passaram nas verificações, tendo 41% e 16% de capacidade resistente a coluna mais solicitada da rampa e da passarela, respectivamente, para o modelo de perfis de aço dobrado. Já o modelo de aço laminado teve de capacidade resistente, 38% para a rampa e 20% para a passarela.

Adotou-se perfil U 200x50x4,76 para colunas da rampa e perfil U 150x50x4,76 para colunas da passarela no modelo de perfis formados a frio, e perfil U 203x5,6 para colunas da rampa e perfil W 150x13 kg/m para colunas da passarela para o modelo de aço laminado.

4.3.2. Banzos e transversinas

Para os banzos do modelo de aço dobrado, a seção utilizada foi perfil U 150x50x4,76 para rampa e passarela. Neste modelo a capacidade resistente é de 22% e 12% para rampa e passarela, respectivamente. Para o modelo laminado, utilizou-se perfil U 152x5,1 e a passarela com perfil W 150x13 kg/m sendo a capacidade resistente de 71% e 12% para rampa e passarela, respectivamente.

Para as barras transversais do piso, denominadas como transversinas, os perfis utilizados para o modelo de aço dobrado foram perfil U 75x40x4,76 para a rampa e perfil L 10x8,96 para a passarela, tendo 28% e 33% de capacidade resistente, respectivamente. Já o modelo de aço laminado possui perfil U 76,2x4,3 com 75% de capacidade resistente para a rampa e perfil L 100x100x6 com 43% de capacidade resistente para a passarela.

4.3.3. Montantes e diagonais

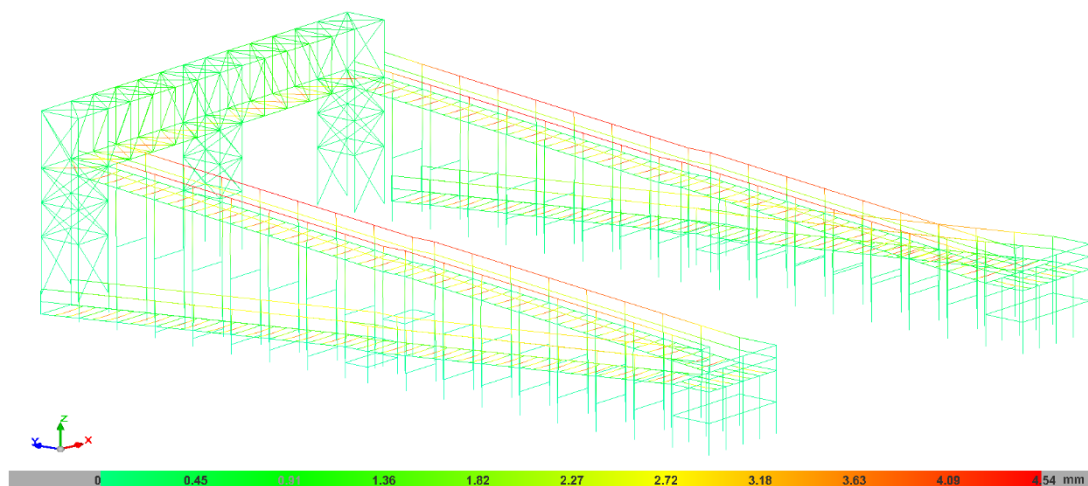
No caso de aço dobrado, utilizou-se para os montantes os perfis U 150x50x4,76 com 22% de capacidade resistente. Para o modelo de aço laminado, o perfil utilizado foi o U 152,4x5,1 kg/m com 18% de capacidade resistente para a barra mais solicitada.

Para as diagonais do modelo de aço dobrado, o perfil utilizado foi o L 100x100x6 com 37% de capacidade resistente. O modelo de aço laminado, devido às mesmas dimensões da cantoneira de aço dobrado, L 100x100x6, alcançou 37% de capacidade resistente, também.

4.3.4. Deslocamentos

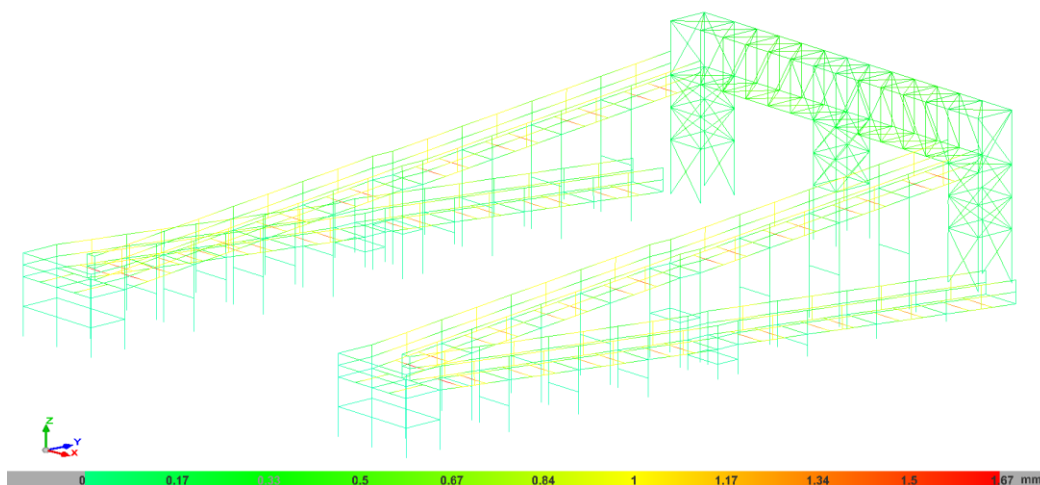
Os deslocamentos máximos permitidos são os mesmos para os dois tipos de aço. O limite mais crítico foi para as vigas de piso no modelo de aço dobrado. Segundo ABNT NBR 14762/2010, o limite para este elemento estrutural é $L/350$. O deslocamento máximo para este elemento, em certo momento, foi de 23 mm, sendo $L/350$ de aproximadamente 5,71 mm. A solução adotada foi a de aumentar o número de transversinas e pórticos de sustentação, como observa-se pela Figura 09. O deslocamento máximo obtido foi de 4,54 mm para o modelo de aço dobrado e 1,67 mm para o modelo de aço laminado, como indica as Figuras 10 e 11.

Figura 10: Deformada, modelo de aço dobrado.



Fonte: AUTOR, 2018.

Figura 11: Deformada, modelo de aço laminado



Fonte: AUTOR, 2018.

4.3.5. Propriedades físicas

Neste item, são apresentados os dados coletados do dimensionamento dos dois modelos computacionais. Foram comparados comprimento de barra e massa de aço de todos os elementos constituintes da estrutura. A Tabela 03 apresenta um resumo destas características.

Tabela 03: Propriedades físicas para os dois modelos.

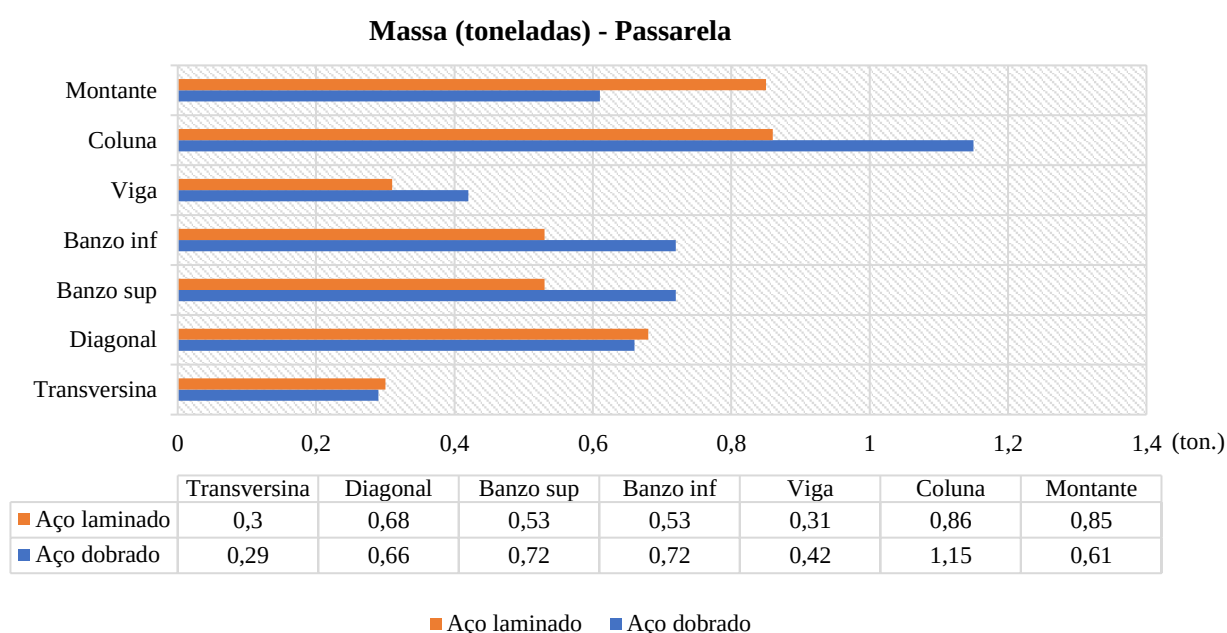
Modelo formado por perfis laminados			
Perfil	Comprimento	Volume	Peso
	Perfil	Perfil	Perfil
2,5/16"	745,85	2,02	15.866,49
Sub-total	745,85	2,02	15.866,49
U 152,4 x 5,1	335,03	0,52	4.076,44
U 76,2 x 4,3	283,20	0,22	1.729,59
U 101,6 x 4,6	98,00	0,10	776,99
U 203,2 x 5,6	209,00	0,45	3.556,93
L 100 x 100 x 6	108,38	0,13	1.003,87
L 65 x 65 x 5	111,97	0,07	557,27
L 90 x 90 x 5	25,61	0,02	178,54
L 75 x 75 x 4	79,12	0,05	368,31
L 100 x 100 x 16	66,31	0,20	1.540,87
W 150 x 13	172,00	0,29	2.241,33
Total	2.234,47	4,06	31.896,63
Modelo formado por perfis formados a frio			
Perfil	Comprimento	Volume	Peso
	(m)	(m³)	(kg)
O 2+1/2x4,48	745,85	0,43	3.338,49
U150X50X4,76	335,03	0,37	2.931,95
U75X40X4,76 (Caixa)	559,20	0,74	5.817,48
U100X40X4,76	98,00	0,08	601,30
U200X50X4,76	407,00	0,55	4.322,21
U150X50X4,76 (I)	172,00	0,38	3.010,48
U75X40X4,76	4,00	0,01	41,61
L 10x8,96	200,30	0,23	1.792,93
L 6,5x4,78	116,97	0,07	558,76
L 8x4,82	79,12	0,05	381,01
Total	2.717,47	2,90	22.796,22

Fonte: AUTOR, 2018.

Em relação a massa, verificou-se que a estrutura composta por perfis de aço laminado atingiu aproximadamente 32 toneladas, e a estrutura composta por perfis de aço dobrado atingiu 23 toneladas, tendo, portanto, uma diferença de 27% em quantidade total de aço.

Nota-se pelos Gráficos 01 e 02 que a maior diferença se encontra no guarda-corpo. Para o modelo em aço laminado, as barras do corrimão são maciças e possuem, portanto, muito mais peso por metro linear que as barras ocas de chapas dobradas. A diferença entre os modelos para esta estrutura é de quase 12 toneladas.

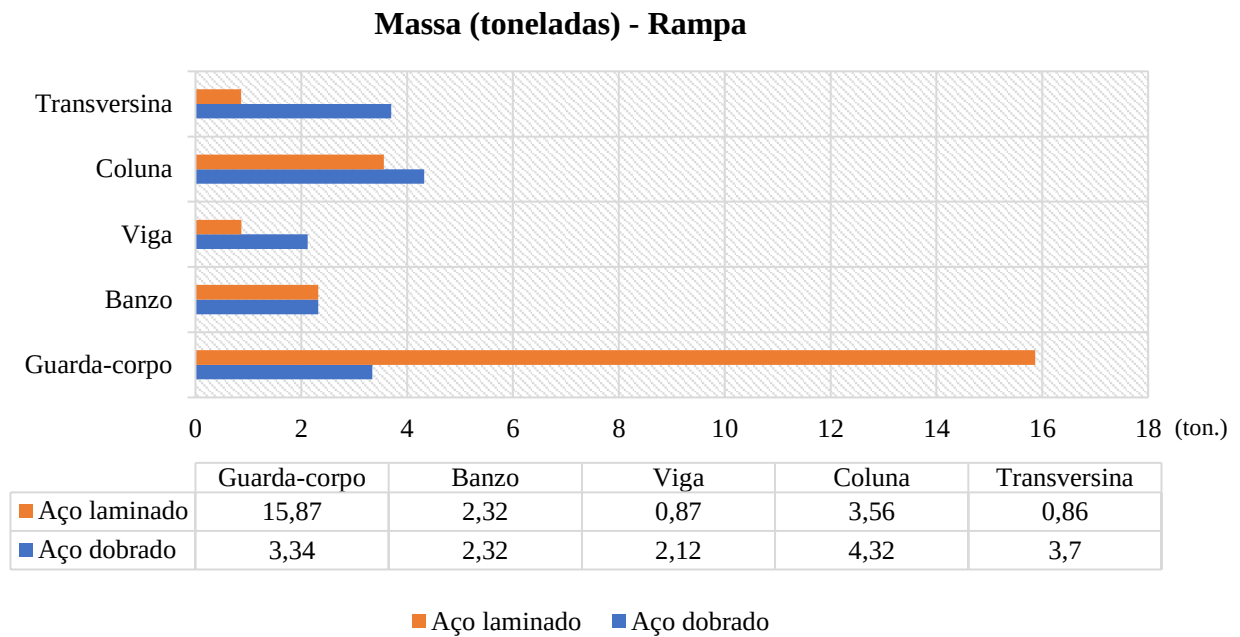
Gráfico 01: Quantidade de aço da passarela.



Fonte: AUTOR, 2018.

Poderia utilizar-se de barras laminadas ocas para os guarda-corpos, para diminuir a grande diferença entre os modelos (Gráfico 02), no entanto, a biblioteca destes perfis não está disponível na versão do *software* utilizado nesta pesquisa e por isso utilizou-se as barras maciças comentadas anteriormente.

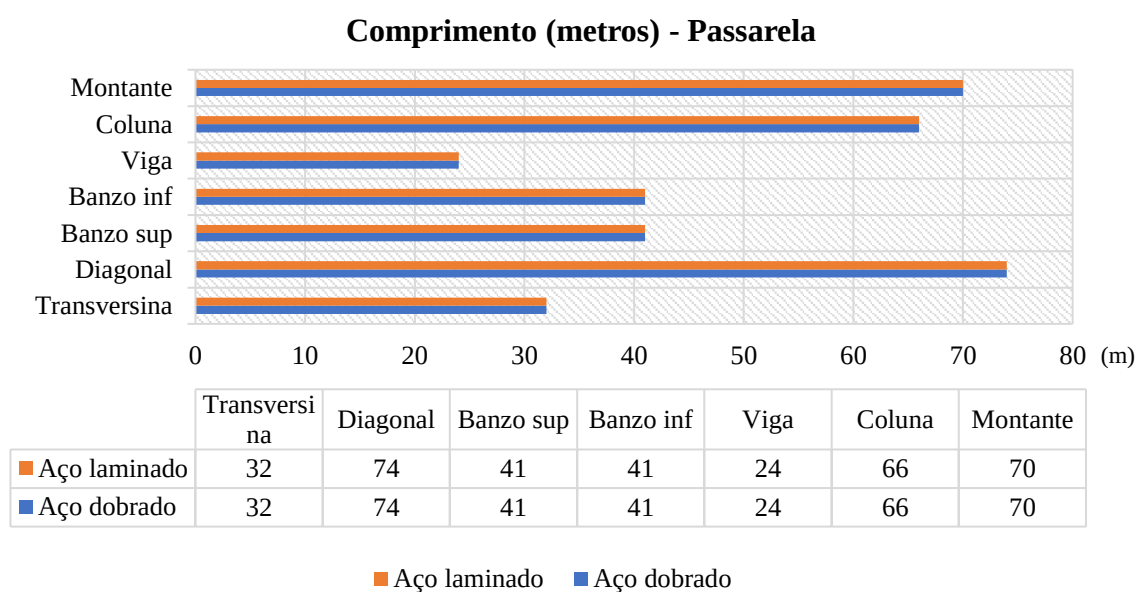
Gráfico 02: Quantidade de aço da rampa.



Fonte: AUTOR, 2018.

As demais diferenças em massa ocorrem, pois, as seções dos perfis de cada estrutura são similares e não totalmente idênticas e algumas delas possuem maior comprimento de barra, como pode-se observar pelos Gráficos 03 e 04.

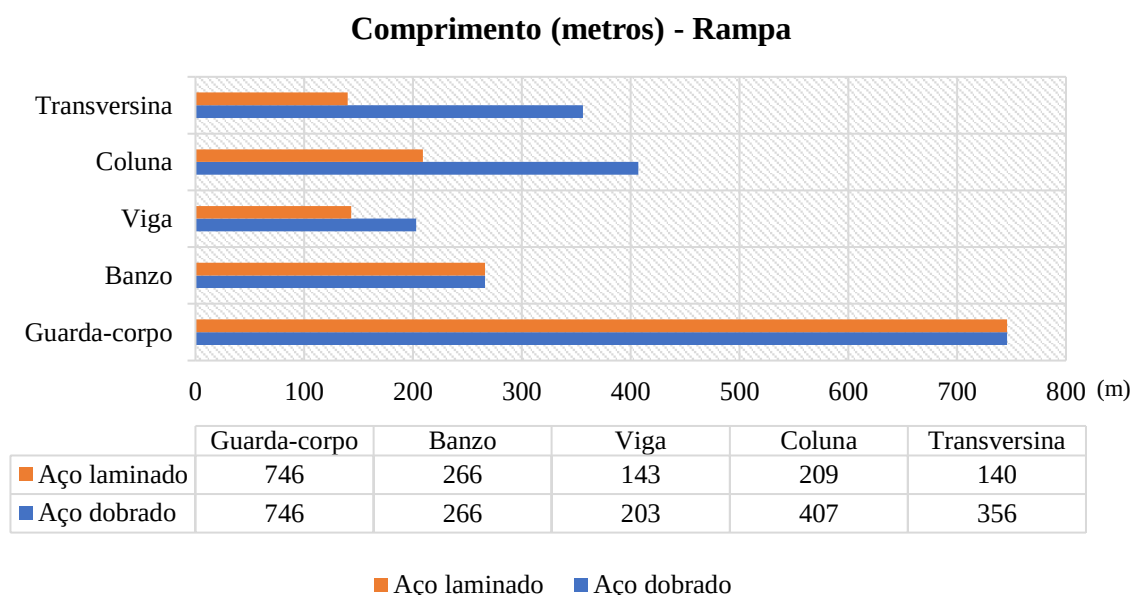
Gráfico 03: Comprimento de barras da passarela



Fonte: AUTOR, 2018.

Esta diferença de comprimento ocorreu, já que foi preciso diminuir os deslocamentos acrescentando-se um número maior de elementos. Por exemplo, o número total de transversinas acrescentadas na rampa foi de 108 barras (Gráfico 04), representado 60% de diferença entre o modelo laminado e dobrado. A diferença total de comprimento de barra para toda a estrutura entre os dois modelos alcançou aproximadamente 18%, tendo, portanto, 483 metros a mais no modelo composto por perfis dobrados.

Gráfico 04: Comprimento de barras da rampa



Fonte: AUTOR, 2018.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os perfis de aço dobrado possuem baixa rigidez à torção e seções abertas, sendo mais suscetíveis a grandes deslocamentos do que os perfis de aço laminado. No entanto, são perfis mais leves que resultam normalmente em estruturas mais econômicas. Esta economia está ligada, também, a questões executivas, uma vez que os custos de içar barras pesadas e maiores é maior do que o custo de içar barras leves de aço dobrado. Outros fatores como área a pintar, quantidade de ligações e parafusos e quantidade total de barras a serem montadas também influenciam no custo da obra, porém o foco principal desta pesquisa não é levantar a alternativa mais econômica, mas apresentar indicadores que podem levar a esta conclusão ao apontar fatores que demonstram as principais características que são peculiares a cada tipo de perfil.

A escolha dos tipos de perfis engloba diversos fatores determinantes. O porte da obra, o tipo de estrutura e o comportamento mecânico requisitado são alguns exemplos que norteiam a determinação do tipo de perfil a se utilizar. O estudo aprofundado das características de cada opção proporciona maior capacidade de realizar a escolha mais eficiente. Os processos licitatórios que normalmente fazem parte das obras de passarelas urbanas exigem das partes interessadas soluções eficientes que desempenhem suas funções estruturais e não acarretem grandes prejuízos aos cofres públicos.

A presente pesquisa buscou, através do desenvolvimento de modelos constituídos unicamente por perfis dobrados ou laminados, expor as características de cada tipo de material. No entanto, é claro que o dimensionamento ainda pode contar com a opção de estruturas compostas tanto de perfis formados a frio como perfis de aço laminado.

Por fim, os resultados esperados corresponderam aos resultados obtidos. A diferença em quantidade de aço encontrada do modelo mais pesado (aço laminado) para o modelo mais leve (aço dobrado), foi de 27%, cerca de 9 toneladas de aço, mesmo utilizando-se mais elementos, cerca de 20% a mais de barras, para aprovar o modelo composto por perfis de aço dobrado. Esperava-se uma estrutura mais leve formada somente por perfis formados a frio, mesmo ela necessitando de mais barras para diminuir os efeitos de deslocamento, mais problemáticos neste modelo devido a sua baixa rigidez e estabilidade. Ao interpretar os dados coletados, entende-se que o modelo realmente mais leve seria aquele composto tanto por perfis dobrados quanto laminados, obtendo-se então uma estrutura mista, por assim dizer. Esta solução garante utilizar barras de aço dobrado para elementos estruturais menos solicitados ou esforços solicitantes propícios ao seu uso. Cita-se como exemplo as terças de cobertura, normalmente projetadas com este tipo de material.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1. **ABNT ABNT NBR 6123:** Forças devidas ao vento em edificações. [S.l.: s.n.], 1988. 66 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1. **ABNT ABNT NBR 7188:** Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. [S.l.: s.n.], 2013. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1. **ABNT ABNT NBR 8800:** Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. [S.l.: s.n.], 2008. 247 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1. **ABNT ABNT NBR 8681:** Ações e segurança nas estruturas - procedimentos. [S.l.: s.n.], 2003. 15 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1. **ABNT ABNT NBR 9050:** Acessibilidade a edificações, mobiliários, espaços e equipamentos urbanos. [S.l.: s.n.], 2015. 162 p.

BRANCO, Adriano Murgel. Segurança Rodoviária. São Paulo: CL-A Cultura Ltda, 1999. 109 p.

FIALHO, Antônio de Pádua Felga. **Passarelas Urbanas em Estruturas de Aço**. 2004. 136 p. Dissertação (Mestrado)- Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Rio de Janeiro, 2004.

MARTINS, Vinícius Alves. **Análise Plástica de Vigas Metálicas de Prédios Industriais Estruturados em Aço como Alternativa Econômica ao Dimensionamento**. Especialize, Campo Grande, v. 1, n. 10, p.1-15, jul. 2015.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático de Acordo com a ABNT NBR 8800:2008**. 8°. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 382 p.

SILVA, Edson Lubas. **Dimensionamento de Perfis Formados a Frio Conforme ABNT NBR 14762 e ABNT NBR 6355**. Rio de Janeiro: IBS, 2008. 121 p.

SILVA, Valdir Pignatta. **Dimensionamento de Estruturas de Aço**. São Paulo: [s.n.], 2012. 150 p.