

COMPARATIVO ENTRE LIGAÇÕES SOLDADAS E PARAFUSADAS ATRAVÉS DE ANÁLISE ESTRUTURAL COMPUTACIONAL

Daniela de Jesus Lopes Lemes

*Bacharelanda do Curso de Engenharia Civil da Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA
(danylemesdejesus@hotmail.com)*

Aurelio Caetano Feliciano

*Professor Especialista do Curso de Engenharia Civil da Universidade Evangélica de Goiás –
UniEVANGÉLICA
(aureliocfeng@gmail.com)*

RESUMO

Estruturas metálicas é um método construtivo que oferece várias vantagens: são soluções econômicas e resistentes; sua execução é em curto prazo, além de ser um método de construção sustentável. Para que este modelo de construção garanta tais vantagens, este deve ser executado em seguinte a um projeto estrutural bem elaborado e detalhado, em benefício a segurança, conforto e economia. Em conjunto com o detalhamento da estrutura estão as ligações, são elas responsáveis por garantir o equilíbrio da estrutura. O presente trabalho apresenta uma análise e a comparação dos resultados de ligações estruturais em um mezanino, com o objetivo de verificar o comportamento da estrutura quanto á composição das ligações soldadas e ligações parafusadas, com intenção de levantar dados relevantes para analisar a segurança da estrutura devido cada tipo de ligação. Após o dimensionamento do mezanino para cada método de ligação (soldada e parafusada) verificou-se que os dois métodos de conexão atendem os critérios de segurança descritos na ABNT NBR 8800:2008. Foram considerados cálculos para que fosse realizada a comparação das resistências de cálculo e solicitadas tanto soldada quanto parafusada, com base na solução adotada para promover a continuidade da viga. Comparados os cálculos de resistências dos sistemas de ligações através do software CYPE 3D, os dados constataram que a estrutura dimensionada com ligações soldadas para este projeto obteve melhor resultado.

PALAVRAS-CHAVE: Estrutura. Ligação. Parafusada. Soldada. Comparação. Segurança.

1 INTRODUÇÃO

O uso de estruturas metálicas vem conquistando o mercado na construção civil, tanto para construções comerciais quanto para as residências. A população procura por soluções eficientes, econômicas, duráveis e que sejam executadas preferencialmente em curto prazo. São várias as vantagens na utilização do aço, uma delas e talvez a mais procurada pelos clientes se refere às facilidades construtivas, que aumentam a rapidez da execução do empreendimento, assim satisfazendo as necessidades dos clientes. São estruturas mais leves em relação a outros sistemas construtivos, como por exemplo, o concreto. Com capacidade de vencer maiores vãos e a estrutura da fundação com dimensões bem menores em relação aos outros sistemas estruturais de fundação, as estruturas metálicas levam vantagens para a escolha do material estrutural.

Segundo Chaves (2007), o aço tem alta resistência, é um material homogêneo e tem sua produção controlada, fato que colabora para a garantia de qualidade do aço. As estruturas são produzidas em fábricas por processos industrializados seriados, cujo efeito de escala favorece a menores prazos e menores custos. Os elementos das estruturas metálicas como: parafusos, conexões e membros estruturais podem ser desmontados, substituídos com facilidade e reutilizados, implicando em uma reciclagem de quase 100%, sem perda de resistência mecânica quando a reutilização. Também tem possibilidade de reaproveitamento do material que não seja mais necessário à construção, eles podem ser vendidos sem a necessidade de qualquer tratamento de reaproveitamento. Outro aspecto importante associado à construção em estrutura metálica é seu caráter menos agressivo ao meio ambiente, atualmente 30% do aço produzido no mundo é procedente de reciclagem, o que torna o aço um aliado à sustentabilidade (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2015).

As estruturas metálicas também apresentam vantagens em relação as suas formas geométricas, podendo ser moldadas segundo a sua solicitação. Sobre a modelagem e sua solicitação é importante ressaltar sobre ligações em estruturas metálicas (ALMEIDA, 2014). As ligações precisam ser determinadas levando em consideração a sua principal causa: a união de duas ou mais peças e a transmissão de cargas atuantes para a estrutura. As ligações entre vigas e pilares metálicos influenciam diretamente no comportamento global da estrutura, porque geram descontinuidade geométrica e mecânica na estrutura.

O trabalho traz análises de dimensionamentos de ligações soldadas e parafusadas através do software CYPE 3D, que é um programa para projeto estrutural que engloba as etapas de lançamento do projeto, análise e cálculo estrutural, dimensionamento e detalhamento final dos elementos. O grande desenvolvimento dos softwares para projeto estrutural e a utilização de computadores facilitando e melhorando os trabalhos nos escritórios de engenharia, aumentaram a velocidade e a eficiência dos projetos. Tais ferramentas tecnológicas vieram para auxiliarem na redução de custos com segurança. Soluções racionais que permitem a escolha satisfatória entre as diversas opções estruturais, razões também pela competitividade entre as tantas opções (CHAVES, 2007).

A NBR 8800 (ABNT, 2008) apresenta prescrições para o dimensionamento de seções quaisquer em estruturas metálica submetidas a esforços axiais, torção, cisalhamento e flexão usando tensões que podem ser determinadas pela teoria da elasticidade. Neste trabalho será feito uma análise estrutural numérica computacional, verificando e comparando o comportamento da estrutura com ligações parafusadas e soldadas em um mezanino de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008). Assim será elaborado um resumo com as principais considerações em cada situação, para então o trabalho auxiliar na escolha do tipo de ligações para estruturas metálicas.

2 ESTRUTURAS METÁLICAS

Foi a partir da revolução industrial que o aço passou a ser produzido em escala, com a invenção dos fornos industriais. Esta evolução ficou conhecida como o processo Siemens-Martin. Com este processo foi possível não apenas corrigir as impurezas do ferro, como também adicionar propriedades que o tornariam ainda mais resistente à corrosão e impactos, também foram introduzidos os laminadores para barras, o que permitiu maior facilidade e qualidade para a geometria das barras de aço (PFEIL & PFEIL, 2012).

O aumento de construções com estruturas metálicas deve-se as várias vantagens que serão apresentadas ao longo deste trabalho, segundo César Bilibio presidente da ABCEM, “O aço é um produto 100% reciclável, o que significa uma tecnologia e setor sustentáveis”. Privilégio que além de colaborar com o meio ambiente gera economia devido ao canteiro de obras limpo. Os fabricantes de estruturas de aço estão presentes em todas as regiões do país, com a maioria das empresas localizada na região sudeste (65,5%), seguida pela região sul (18,4%).

Apesar de muitas vantagens na utilização de estruturas metálicas são necessários alguns cuidados, pois, suas desvantagens são bem amplas. Os problemas existentes em estruturas de aço são denominados de patologias, as patologias são decorrentes de diversas causas tais como: movimentação da estrutura provocada por variações térmicas e higroscópicas; sobrecargas excessivas ou concentração de tensões; deformabilidade excessiva; corrosão e incêndio. Outra desvantagem em trabalhar com estruturas metálicas está relacionada à mão de obra, ainda há um déficit de profissionais qualificados no País na área de estruturas metálicas, razão que deixa o preço da mão de obra qualificada mais cara que outros métodos convencionais. O dimensionamento do projeto de estruturas metálicas deve ser preciso, neste sistema construtivo não é permitido erro, a ocorrência da execução da estrutura com um erro de projeto poderá ocasionar a perda total do trabalho.

Conforme Pinheiro (2005), o tipo de aço para determinada estrutura deve ter conformidade à sua solicitação. A escolha do material é essencial, assim como os elementos utilizados para as emendas entre componentes como viga e pilar também tem um papel crucial no comportamento da estrutura metálica. Para dimensionar uma estrutura cabe ao projetista o aperfeiçoamento de detalhamentos e ajustes em um conjunto de componentes que integram a constituição de uma estrutura metálica como: material, componentes de ligações, tipo de ligação assim também como o acabamento e manutenção.

2.1 TIPOS DE AÇOS ESTRUTURAIS

Os aços são classificados segundo a sua composição química, os aços utilizados em estruturas são divididos em dois grupos: aços carbono e aços de baixa liga. Os dois tipos podem receber tratamentos térmicos que modifiquem suas propriedades mecânicas (PFEIL & PFEIL, 2012).

2.1.1 Aços-carbono

São os mais utilizados, o aumento da resistência em relação ao ferro puro é produzido pelo carbono. Eles contêm as seguintes porcentagens máximas de elementos adicionais: carbono 1,7%, silício 0,60%, manganês 1,65% e cobre 0,60%. Os aços carbono são divididos em três categorias em relação ao teor de carbono. Tem-se o baixo carbono com, $C < 0,15\%$, o moderado com, $0,15\% < C < 0,29\%$, o médio carbono com, $0,3\% < C < 0,59\%$ e o alto carbono com $0,6\% < C < 1,7\%$. Onde C é a quantidade de carbono no aço.

2.1.2 Aços de baixa Liga

São aços-carbono acrescidos de elemento de liga (cromo colúmbio, cobre, manganês, molibdênio, níquel, fósforo, vanádio e zircônio), esses elementos melhoram algumas propriedades mecânicas, aumentando a resistência através da modificação da microestrutura para grãos finos.

2.1.3 Aços com tratamento térmico

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas. O tratamento térmico permite o aumento da resistência do aço. A soldagem dos aços tratados termicamente é mais difícil, o que torna seu emprego pouco usual (PFEIL & PFEIL, 2012).

2.2 PROPRIEDADES DOS AÇOS

O aço possui propriedades físicas que determinam o comportamento do material em todo o processo de fabricação e de utilização, e são divididas em: propriedades mecânicas, propriedades térmicas e propriedades elétricas. As propriedades mecânicas aparecem quando o material está sujeito a esforços de natureza mecânica. Essas propriedades determinam a maior ou menor capacidade que o material tem para transmitir ou resistir aos esforços que lhe são aplicados. Para o cálculo devem ser consideradas as propriedades mecânicas do aço segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008).

- a) Módulo de elasticidade $E = 200.000 \text{ MPa}$;
- b) Coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$;
- c) Coeficiente de dilatação térmica $\beta = 12 \times 10^{-6}$ por $^{\circ}\text{C}$;
- d) Massa específica $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$.

Cada material possui características próprias como elasticidade, plasticidade, ductilidade, tenacidade, fragilidade, dureza, resistência ao risco abrasão, efeito de temperatura elevada, fadiga e corrosão.

As propriedades mecânicas definem o comportamento do aço quando sujeito a esforços mecânicos e determinam sua capacidade de resistir e transmitir estes esforços sem que rompam e sofram deformações excessivas. Os esforços mecânicos que podem ocorrer nos materiais são classificados como: tração, compressão, cisalhamento, torção e flexão.

2.3 ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Conforme Silva e Pannoni (2010), conceber uma estrutura é o ato de posicionar os elementos portantes, ou seja, os elementos capazes de suportar as cargas decorrentes da edificação, e definir suas interações para que eles transmitam os carregamentos para o solo de forma segura e econômica. Diz ainda que uma estrutura é o conjunto de elementos construtivos, concebido para suportar esforços. Dentre os elementos estruturais tem-se: pilares, vigas, bloco de fundação, laje, parede estrutural, apoios.

2.4 SUBESTRUTURAS

A subestrutura é formada pela união entre elementos estruturais, elas podem ser planas ou tridimensionais (SILVA & PANNONI, 2010). São classificadas como: pórtico plano, viga vierendel, treliça plana, treliça tridimensional, pórtico tridimensional e grelha.

2.5 LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS

Ligação é a união entre duas ou mais peças, é de fundamental importância por se responsabilizar pela segurança na construção, tem o objetivo de distribuir de forma equilibrada os esforços na estrutura. Para que o sistema de ligações em uma estrutura metálica contribua para o bom desempenho da mesma, cada ligação deve ser executada mediante um projeto estrutural onde o dimensionamento seja em prol de um sistema econômico e seguro. Segundo Bergamasco (2012), as ligações apresentam grandes influências no comportamento das estruturas metálicas, é através delas que se definem os mecanismos de transmissão de esforços entre os elementos conectados, ou seja, a escolha do tipo de ligação provoca considerações de projeto que influencia no dimensionamento da estrutura como um todo. Fato que favorece escolher sistemas de ligações favorecendo a economia e segurança.

Para a definição do tipo de ligação em uma estrutura, fato que deve ser considerado é a capacidade de executar as ligações. As duas ligações são amplamente utilizadas, tanto em fábrica quanto em campo. Porém, nas ligações de fábrica, o meio de ligação utilizado normalmente é a solda, por causa da dificuldade de garantia de segurança desta ligação feita em campo. E nas ligações a serem montadas no campo utiliza-se preferencialmente, os parafusos (COBRAPI, 1987).

Segundo Bergamasco (2012), a escolha da ligação deve ser baseada nos momentos fletores e na capacidade de deformação. As ligações podem ser classificadas segundo sua rigidez, que é a capacidade de impedir a rotação relativa local das peças ligadas, as ligações são responsáveis pelo comportamento final da estrutura, em termos de rotação e descolamento.

2.5.1 Ligações rígidas

As ligações perfeitamente rígidas são aquelas em que, na presença do carregamento solicitado a estrutura, transmite o momento fletor em sua totalidade entre os elementos conectados, mantendo constante o ângulo relativo formado entre eles. Ou seja, ocorre a rotação do nó da ligação, sem a modificação do ângulo, garantindo assim a transmissão plena do momento fletor entre os elementos. A ligação é mais “robusta”, com elementos e dispositivos de ligações de maiores dimensões.

2.5.2 Ligações flexíveis

São aquelas em que não ocorre a transmissão de momento fletor, permitindo a rotação entre os elementos conectados e alterando o ângulo formado entre eles.

2.5.3 Ligações semi-rígidas

É praticamente impossível garantir que o comportamento idealizado de ligação rígida ou flexível ocorra. A partir deste fato é necessário considerar um comportamento semi-rígido para as ligações. Uma ligação semi-rígida é aquela que apresenta um comportamento intermediário entre a rígida e a flexível, permitindo a transmissão parcial do momento fletor e uma rotação relativa entre os elementos conectados, busca o equilíbrio, aliviando e garantindo um dimensionamento mais econômico para o perfil da viga (MAGGI, 2004).

2.6 LIGAÇÕES SOLDADAS

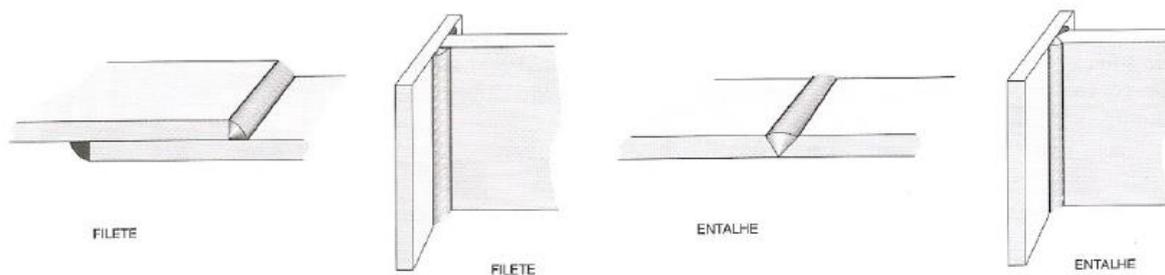
A soldagem trata-se de uma técnica capaz de unir duas ou mais partes constitutivas de uma estrutura, proporcionando entre elas a continuidade do material e conseqüentemente as características mecânicas e químicas, de mesma forma os esforços os quais a ligação esta sujeita. A utilização de solda para ligações metálicas é um processo dentre os outros tipos de ligações, mais simples e leve. Porém essas ligações devem, preferencialmente, serem executadas em fábricas, para que união de materiais com geometrias complexas e para que a perfeita continuidade entre estes elementos seja precisa.

Na montagem de estruturas metálicas as soldas são feitas por fusão, ou seja, as peças que serão unidas são aquecidas até o ponto em que começam a se fundir fazendo a união das mesmas diretamente ou acrescentando um material entre elas. Os processos de soldagem mais empregados na construção civil são a solda a arco elétrico, que pode ser manual ou com eletrodo revestido e automática com arco submerso (PFEIL & PFEIL, 2012).

2.6.1 Tipos de ligações soldadas

Os tipos de soldagem mais comuns são: entalhe e filete. Entalhe: o metal de solda é colocado entre os elementos a serem conectados. Filete: o metal de solda é colocado externamente aos elementos, Além de ranhura ou tampão, a solda de ranhura ou tampão se aplica somente a casos particulares, onde a solda de filete e entalhe são inadequadas. As posições podem ser horizontais, verticais ou sobre a cabeça, conforme a Figura 1.

Figura 1- tipos de soldas



Fonte: Dias, 2006.

A norma brasileira NBR 5884:1980 padronizou três séries de perfis soldados:

- Perfis CS (colunas soldadas)
- Perfis VS (vigas soldadas)
- Perfis CVS (colunas e vigas soldadas)

2.6.2 Vantagens

- a) Economia de material, em algumas estruturas é possível economizar de 15% ou mais de peso do aço.
- b) Estruturas soldadas são mais rígidas, porque os membros estão geralmente soldados diretamente um no outro, ao contrário das ligações parafusadas que são invariavelmente feitas por chapas de ligação ou cantoneiras.

- c) Facilidade de se realizar modificações nos desenhos das peças e de corrigir erros durante a montagem.
- d) Usa uma quantidade menor de peças, e com isso utilizando menor tempo de detalhe e fabricação.

2.6.3 Desvantagens

- a) Redução que a mesma sofre no comprimento devido aos efeitos cumulativos de retração.
- b) Insuficiência de energia elétrica no local da montagem para acionar máquinas de solda.
- c) Exigência de maior análise de fadiga do que as estruturas parafusadas, podendo reduzir as tensões admissíveis a níveis muito baixos.
- d) Tempo maior de montagem das peças em obra.

2.7 LIGAÇÕES PARAFUSADAS

As ligações parafusadas são empregadas em grande escala em uniões de partes de estruturas, principalmente nas montagens finais de campo. Dentre os tipos de conectores para ligações, temos também os rebites, porém, segundo Pfeil e Pfeil (2012), em estruturas fabricadas a partir 1950, as ligações com rebites foram substituídas por ligações por parafusos ou soldas. Esse tipo de ligação tem sua aplicação restrita às ligações de campo, pois dependem de furos nas peças, por este motivo se torna mais caras e complexas.

2.7.1 Vantagens

- a) Economia no consumo de energia, pois, não há a necessidade de equipamentos elétricos.
- b) Rapidez na fabricação das peças.
- c) Necessidade de poucos montadores sem grandes qualificações.
- d) Melhor resposta às tensões de fadiga
- e) Rapidez de execução das ligações de campo.
- f) A mão de obra utilizada para instalação e inspeção dos parafusos não precisa ser especializada como a utilizada em ligações soldadas.

2.7.2 Desvantagens

- a) Os furos enfraquecem as peças conectadas e, algumas vezes, pode ser necessário reforçar as mesmas. Apesar de ser pequena a folga entre um furo e um parafuso estas pequenas folgas acabam-se somando devido á quantidade de número de ligações existentes necessárias para a composição da estrutura e podem acabar acarretando em deslocamentos consideráveis que prejudiquem o bom desempenho da estrutura.
- b) As ligações são mais complexas do que as ligações soldadas e exigem um trabalho maior de cálculo, detalhamento e fabricação.
- c) Necessidade de previsão antecipada para evitar falta de parafusos na obra.

3 MÉTODOS DE CÁLCULO

Para Pfeil e Pfeil (2012), o projeto estrutural é importante para que haja: garantia de segurança estrutural evitando colapso; garantia de bom desempenho da estrutura evitando a ocorrência de grandes deslocamentos, vibrações e danos locais.

3.1 ESTADOS LIMITES

Em estruturas submetidas a todas as combinações de ações, o método de estados limites para o dimensionamento pra estruturas exige que os estados de limites não sejam excedidos para a que haja a garantia do objetivo do projeto, NBR 8800 (ABNT, 2008). Os estados limites podem ser divididos em estado de limites de Serviço e Estado de limites últimos. Pfeil e Pfeil (2012), os classificam da seguinte maneira:

- Estado de limites últimos (ELU)
 - a) Perda de equilíbrio global ou parcial.
 - b) Ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais.
 - c) Transformação da estrutura em um sistema hipostático.
 - d) Instabilidade por deformação.

- Estado de limites de Serviço (ELS)
 - a) Danos que podem comprometer a durabilidade e também a estética da estrutura.
 - b) Deformações excessivas que afetam a utilização da estrutura.
 - c) Vibrações excessivas.

3.1.1 Combinações

3.1.1.1 Combinações de ações.

Conforme Chamberlain *et al.*, (2013), ações em uma estrutura é tudo aquilo que provoca tensões e deformações nos elementos estruturais. Para Goecks (2011), as combinações últimas de ações devem determinar os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura. E classificam-se em:

- Combinações últimas normais: decorrem do uso previsto para a estrutura;
- Combinações últimas especiais: decorrem da atuação de ações variáveis de natureza ou intensidade especial;
- Combinações últimas de construção: decorrem de estados limites últimos já na fase da construção;
- Combinações últimas excepcionais: decorrem da atuação de ações excepcionais que podem provocar efeitos catastróficos.

3.1.1.2 Combinações de serviço

As combinações de serviço classificam-se de acordo com a sua permanência na estrutura:

- Combinações quase permanentes: são as que podem atuar durante grande parte da vida da estrutura, aproximadamente a metade, e são utilizadas para a aparência da construção e efeitos de longa duração.
- Combinações frequentes: são aquelas que se repetem muitas vezes durante a vida da estrutura, aproximadamente 5% e são utilizadas para os estados limites

reversíveis ou que não causem danos permanentes à estrutura ou outros componentes da construção, como conforto dos usuários, tais como vibrações excessivas e abertura de fissuras.

- Combinações raras: são aquelas que podem atuar no máximo em algumas horas durante a vida da estrutura e são utilizadas para os estados limites irreversíveis ou que causam danos permanentes à estrutura ou outros componentes da construção, como funcionamento adequado da estrutura, formação de fissuras e danos aos fechamentos.
- Ações permanentes diretas: constituídas pelo peso próprio da estrutura e pesos próprios dos elementos construtivos fixos das instalações permanentes.
- Ações variáveis: as que ocorrem com valores que apresentam variações significativas durante a vida útil da estrutura, como as cargas acidentais.

3.2 CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO

Para o dimensionamento de um projeto é necessário cálculos de esforços a tração, compressão flexão simples, flexão composta e concepções das ligações de aço.

3.2.1 Tração

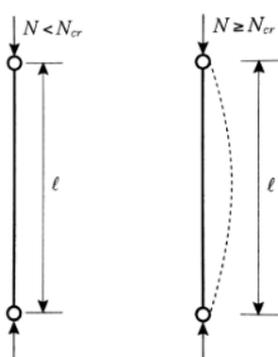
Uma barra de aço sujeita ao esforço normal de tração terá em seu dimensionamento duas regiões distintas, uma região onde não é permitido o escoamento generalizado, por inutilizar a peça devido à ocorrência de muito alongamento e outra região onde não há uniformidade de tensões (área furos), nesta região permite o escoamento localizado, porém não pode haver ruptura última da peça (PINHEIRO, 2005).

Para o dimensionamento da barra tracionada é calculado a resistência na seção de área bruta e na seção de área líquida efetiva, assim será considerado a resistência da peça como o menor valor obtido entre as seções. A distribuição de tensões depende do tipo de ligações entre as peças.

3.2.2 Compressão

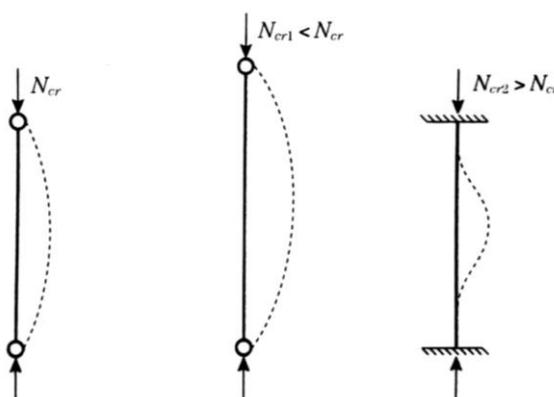
Ao contrário do comportamento de uma peça sujeita a tração, em que é reduzido as possíveis curvaturas iniciais, quando esta for sujeita a compressão este efeito tende ser acentuado, O deslocamento produzido por este esforço é conhecido como flambagem por flexão (PFEIL & PFEIL, 2012). A Figura 2 ilustra o efeito de flambagem, assim como a Figura 3 mostra o comportamento de flambagem por flexão.

Figura 2 - Flambagem



Fonte: SILVA & PANNONI, 2010.

Figura 3 - Flambagem por flexão



Fonte: SILVA & PANNONI, 2010.

Uma barra submetida a uma força centrada de compressão superior a um determinado valor, conhecida como força crítica, deforma-se transversalmente à linha de ação da força aplicada. A força crítica que provoca a flambagem depende das dimensões da seção transversal do pilar, de seu comportamento e do tipo de vínculo. A força atuante no pilar deve ser menor que a força crítica da flambagem por flexão.

3.2.3 Flexão

Para o dimensionamento de barras à flexão, é necessário determinar quais esforços internos solicitantes atuam na barra, além do momento fletor será feita então a classificação da flexão em barras segundo os esforços atuantes. A classificação de flexão em barras é classificada da seguinte maneira:

- a) Flexão pura: tem-se atuante na barra somente o momento fletor, ela pode ser dividida em flexão plana (o plano de atuação do momento fletor coincide com um dos planos principais de inércia) e flexão oblíqua (o plano de atuação do momento fletor é inclinado em relação aos planos principais de inércia).
- b) Flexão simples: tem-se como esforço interno o momento fletor e a força cortante.
- c) Flexão composta: neste caso, o momento fletor atua com, ou sem força cortante, sendo combinado com a força normal, ou o momento torsor, ou ambos.

4 ESTUDO DE CASO

Para as verificações do comportamento das ligações é utilizado um mezanino como modelo genérico, para a comparação entre os tipos de ligações. Neste mezanino não é explorado o dimensionamento e análise da escada, pois a mesma se trata de um elemento estrutural utilizado pré-fabricado. O projeto será analisado no CYPE 3D versão para estudantes, que se trata de uma ferramenta computacional para projetos de estruturas tridimensionais compostas por barras com perfis de aço, alumínio e madeira.

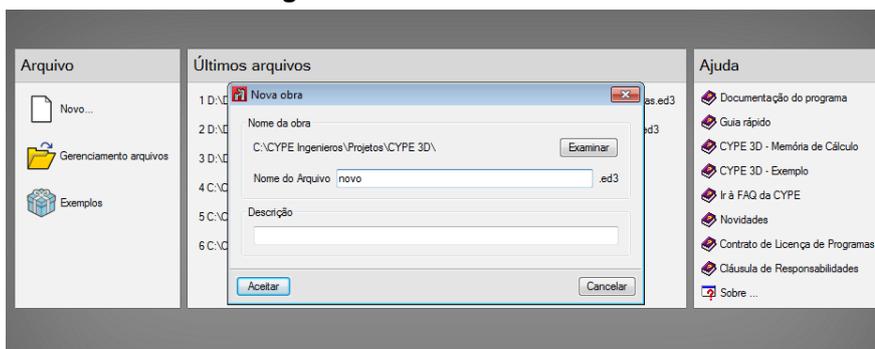
4.1.1 Dados preliminares do projeto

- Mezanino com dimensões 600cm × 500cm com escada de aço para acesso.
- A distância do piso inferior para o piso superior no primeiro e segundo nível será 340cm.
- Perfis I A-572, $f_y = 345MPa$
- Piso em concreto armado com $f_{ck} = 20 MPa$
- Escada pré-fabricada aço estrutural ASTM A36

4.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL

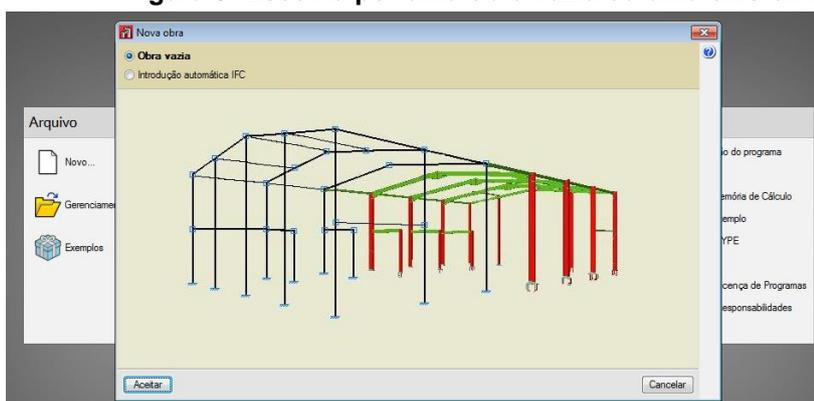
Neste tópico é apresentado o processo de lançamento das estruturas no software, onde estas estruturas serão dimensionadas e comparadas, bem como descrições das hipóteses e cargas adotadas de acordo com as particularidades de cada programa. A Figura 4 apresenta a segunda tela do software, após escolher o CYPE 3D que é o desejado. Neste programa, após realizar a descrição da obra, existe a possibilidade de lançamento automático da estrutura a partir de um projeto realizado em um ambiente CAD de outro programa, sendo extensão dwg ou dxf, conforme mostra a Figura 5.

Figura 4- CYPE 3D Nova Obra



Fonte: CYPE 3D-v2017.

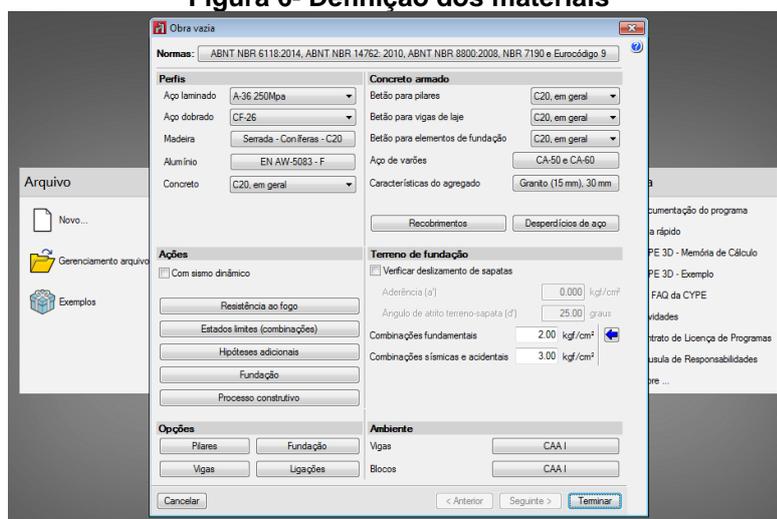
Figura 5- Escolha por uma obra vazia ou uma existente



Fonte: CYPE 3D-v2017.

Após a escolha de um projeto novo ou importação de um arquivo já existente é possível definir os materiais que serão utilizados no ambiente apresentado na Figura 6.

Figura 6- Definição dos materiais

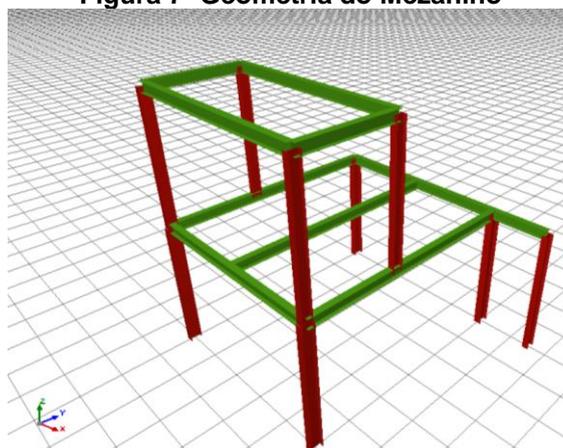


Fonte: CYPE 3D-v2017.

4.3 CALCULO DO MEZANINO

Com todos os materiais definidos é possível montar o projeto estrutural. No ambiente de desenho define-se a quantidade de níveis da estrutura, executa-se a geometria do projeto. A Figura 7, apresenta a geometria da estrutura do mezanino.

Figura 7- Geometria do Mezanino



Fonte: CYPE 3D-v2017.

Após a modelagem o próximo passo é definir os materiais utilizados, para o mezanino é utilizado perfil soldado de chapa de aço laminado, perfil duplo T simétrico soldado CVS, conforme apresenta a Tabela 1. Para os pilares inferiores do mezanino é utilizado CVS 250X33 e para as demais barras o CVS 300X70, esta definição pode ser observada Figura 8.

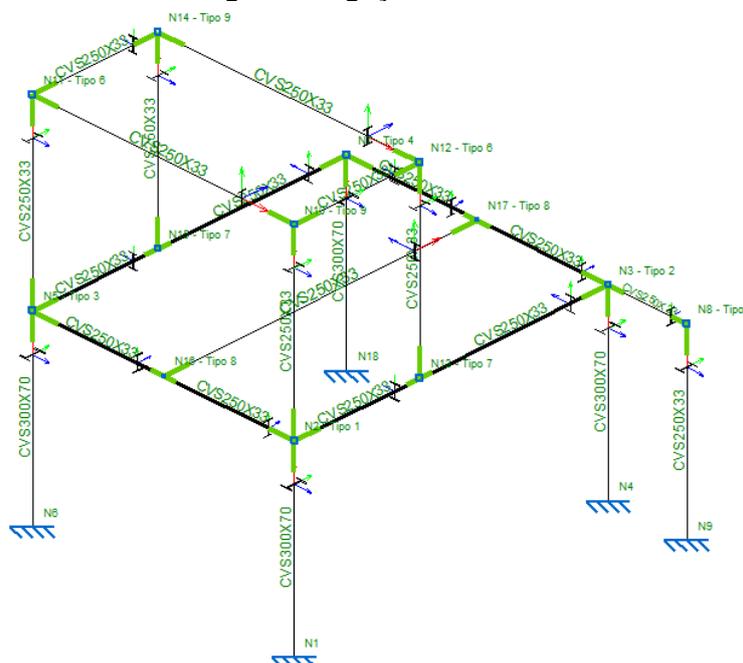
Tabela 1- Definição do elemento estrutural

MATERIAL		SÉRIE	PERFIL
TIPO	DESIGNAÇÃO		
Aço laminado	A-572 345 MPa	CVS	CVS 250X33
			CVS 300X70

Fonte: CYPE 3D-v2017.

Com todos os materiais definidos é possível gerar as ligações, a Figura 8 mostra o nome de cada ligação para então serem analisadas. O mezanino conta com placas de concreto verificadas segundo ABNT NBR 6118:2014.

Figura 8- Ligações Geradas

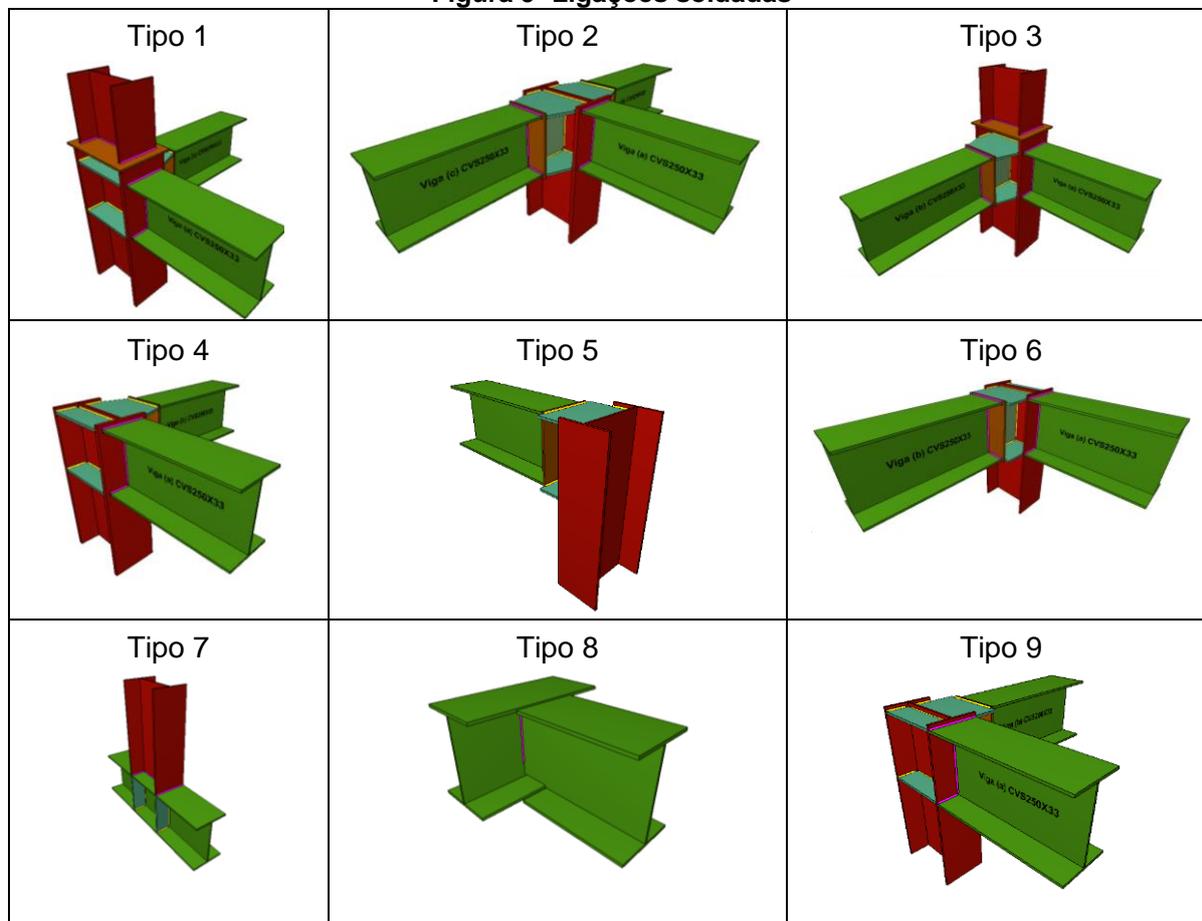


Fonte: CYPE 3D-v2017.

4.3.1 Resultado de dimensionamento para ligações soldadas

A Figura 9 apresenta a geometria de cada ligação soldada, estas foram consideradas todas engastadas com material de adição (soldas): eletrodos da série E70XX, para os materiais utilizados e o procedimento de solda SMAW (Arco elétrico com eletrodo revestido), cumprem-se as condições de compatibilidade entre materiais exigidos pelo item 6.2.4 ABNT NBR 8800:2008. O material necessário para a execução das soldas está detalhado na Tabela 2, já a quantidade de elementos está descrita na Tabela 3.

Figura 9- Ligações soldadas



Fonte: CYPE 3D-v2017

Tabela 2-Quantidade de solda para ligações soldadas

SOLDAS				
Classe de resistência	Execução	Tipo	Lado (mm)	Comprimento de cordões (mm)
E70XX	Em oficina	De filete	3	13168
			5	31590
			6	10246
			10	1614
			3	580
			5	14640
	No local de montagem	De filete	4	9742
			5	14640
			5	14640

Fonte: CYPE 3D-v2017.

Tabela 3- Quantidade de elementos de ligações soldadas

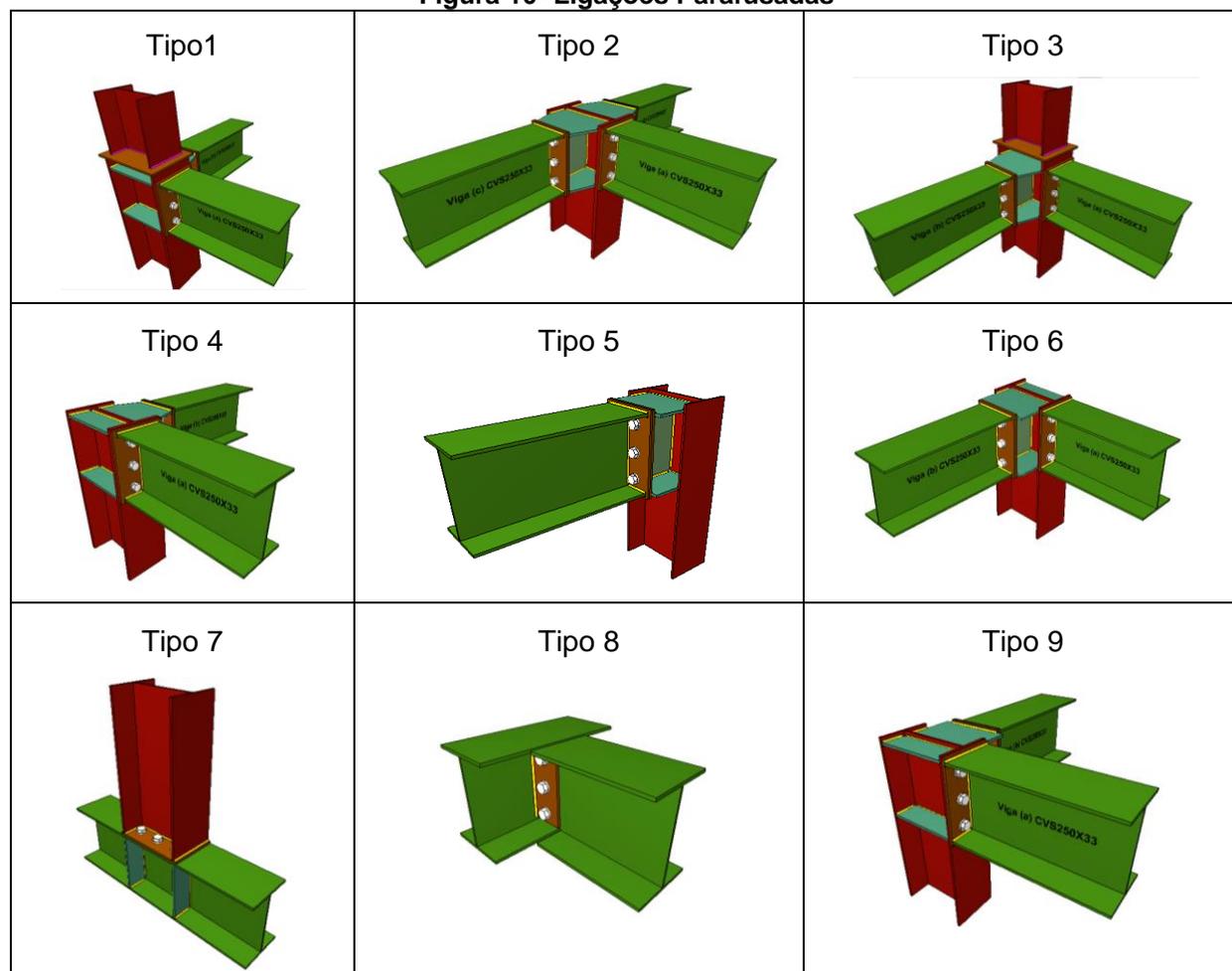
CHAPAS				
Material	Tipo	Quantidade	Dimensões (mm)	Peso (kg)
A-572 345MPa	Enrijecedores	16	234x80x8	18.81
		10	234x175x8	25.72
		10	268x205x9	35.79
			(39+190+39x109+96x9)	
		6	268x95x9	10.79
		5	175x234x7	11.25
	Chapas	5	205x233x7	13.12
		5	190x270x8	16.11
		5	190x260x8	15.51
		2	230x330x10	11.92
		Total		

Fonte: CYPE 3D-v2017.

4.3.2 Resultado de dimensionamento para ligações parafusadas

As ligações parafusadas são apresentadas na Figura 10. Para tais ligações foram utilizados parafusos M16 com comprimento 50mm e 60mm, ambos ASTM A325M com $f_y = 6473.0$ (kgf/cm²) e $f_u = 8460.8$ (kgf/cm²). O material necessário para a execução das soldas está detalhado na Tabela 4, já a quantidade de elementos está descrita na Tabela 5 e a quantidade de parafusos é apresentada na Tabela 6.

Figura 10- Ligações Parafusadas



Fonte: CYPE 3D-v2017.

Tabela 4- Quantidade de solda para as ligações Parafusadas

SOLDAS				
Classe de resistência	Execução	Tipo	Lado (mm)	Comprimento de cordões (mm)
E70XX	Em oficina	De filete	3	13168
			4	8856
			5	45742
			6	10246
	No local de montagem	De filete	9	1614
			4	886
			5	1348

Fonte: CYPE 3D-v2017.

Tabela 5- Quantidade de elementos de ligações parafusadas

CHAPAS				
Material	Tipo	Quantidade	Dimensões (mm)	Peso (kg)
A-572 345MPa	Enrijecedores	16	234x80x8	18.81
		10	234x175x8	25.72
		10	268x205x9	35.79
			(39+190+39x109+96x9)	
		6	268x95x9	10.79
		5	175x234x7	11.25
	Chapas	5	205x233x7	13.12
		20	190x270x8	64.43
		2	90x215x8	2.43
		6	170x270x8	17.30
		2	230x330x9	10.72
		4	200x270x10	16.96
			Total	227.32

Fonte: CYPE 3D-v2017.

Tabela 6- Quantidade de parafusos

ELEMENTOS PARA APARAFUSAR				
Tipo	Material	Quantidade	Descrição	
Parafusos	ASTM A325M	6	M16x45, Tipo 1, ASTM A325MT	
		96	M16x50, Tipo 1, ASTM A325MT	
		24	M16x60, Tipo 1, ASTM A325MT	
Porcas	Classe 8S	126	M16, ASTM A563M	
Anilhas	Tipo 1	252	M16, ASTM F436M	

Fonte: CYPE 3D-v2017.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisadas as tensões e deformações nos dois modelos, pôde-se observar que, em ambos os casos não foi atingido nenhum modo de falha para o esforço cortante de projeto considerado. De modo que o dimensionamento das ligações nas duas configurações pode ser considerado seguro quanto ao estado de limite último. Com isso, pode-se constatar também que não houve deformações plásticas nas chapas, visto que, em nenhuma delas atingiu-se a tensão de escoamento do aço. A Tabela 7 mostra um comparativo entre os comportamentos máximos e mínimos de deslocamentos de rotação (R) e translação (T) nos eixos x, y e z da estrutura.

Tabela 7- Translações e rotações estruturais

DEFORMAÇÕES		LIGAÇÃO SOLDADA		LIGAÇÃO PARAFUSADA	
	Eixo	Mín	Máx	Mín	Máx
T (mm)	x	0,17	0,32	0,13	0,37
	y	0,05	3,12	0,14	3,72
	z	-6,25	-0,04	-7,12	-0,05
	Total	0,21	6,26	0,22	7,13
R (mRad)	x	-2,21	2,32	-2,46	2,44
	Y	-2,2	2,31	-2,29	2,31
	Z	-0,03	0	-0,06	-0,01

Fonte: CYPE 3D-v2017.

Os deslocamentos decorrem do efeito acumulado das deformações nos pontos de ligações na estrutura. Pode ser entendido como uma translação ou uma rotação de algum ponto, a translação é o deslocamento linear, já a rotação é o descolamento angular.

Através da Tabela 7 verifica-se que a translação máxima no eixo Y para a estrutura em ligações soldadas foi de 16% menor em relação à estrutura dimensionada com ligações parafusadas, levando em consideração que as duas estruturas foram analisadas com o mesmo tipo de perfis. A rotação máxima no eixo X na estrutura com ligações soldadas é menor em aproximadamente 4,92% em relação à rotação máxima da estrutura com ligações parafusadas.

Esta diferença de deslocamento pode ser explicada pelo fato de que o parafuso é utilizado no mezanino principalmente para trabalhar o esforço de cisalhamento, desta forma a resistência depende da área líquida que é a diferença entre a área bruta e a área de parafusos. Já para o cálculo da resistência da solda a área líquida é igual a área bruta da seção. Assim a área de contato da ligação soldada é maior que a área de contato para a ligação parafusada, fato que influencia no deslocamento gerado na estrutura.

A verificação de chapa de transição da ligação tipo 1 será detalhada nos dois modelos de ligações, com o objetivo de análises e verificações associadas a segurança das da estrutura. A chapa de transição é o elemento que promove a transferência de esforços atuantes entre os elementos estruturais, principalmente entre os pilares. As tabelas Tabela 8 e Tabela 9 apresentam a verificação da chapa nos dois tipos de ligações.

Tabela 8- Verificação para ligação Parafusada

VERIFICAÇÃO	UNIDADES	DESFAVORÁVEL	RESISTENTE	APROV. (%)
Interação flexão - esforço cortante	--	--	--	39.94
Deformação admissível	mRad	0.178	2	8.89

Fonte: CYPE 3D-v2017.

Esforço transversal é a resultante das tensões tangenciais ou tensões de cisalhamento, que significa cortar ou causar deformação numa superfície a partir da tensão provocada por forças que atuam em sentidos iguais ou contrários ao elemento analisado.

Tabela 9- verificação para ligação soldada.

VERIFICAÇÃO	UNIDADES	DESFAVORÁVEL	RESISTENTE	APROV. (%)
Interação flexão - esforço cortante	--	--	--	28.81
Deformação admissível	mRad	0.054	2	2.68

Fonte: CYPE 3D-v2017.

Analisando as tabelas Tabela 8 e Tabela 9, verifica-se que a tensão de cisalhamento para a estrutura dimensionada com ligações soldadas é 11,13% menor que a mesma estrutura dimensionada com ligações parafusadas, ou seja, a estrutura

parafusada tem maior tensão de cisalhamento. O que significa uma possibilidade maior de cortar ou causar deformação transversal na estrutura.

Neste trabalho também foi analisada uma estrutura dimensionada com ligações mistas (ligações soldadas e parafusadas), onde os valores referentes aos deslocamentos estão descritos na Tabela 10. O sistema de ligações mistas foi executado com objetivo de encontrar deslocamentos menores em relação aos outros dois exemplos de mezaninos apresentados com ligações soldadas e parafusada.

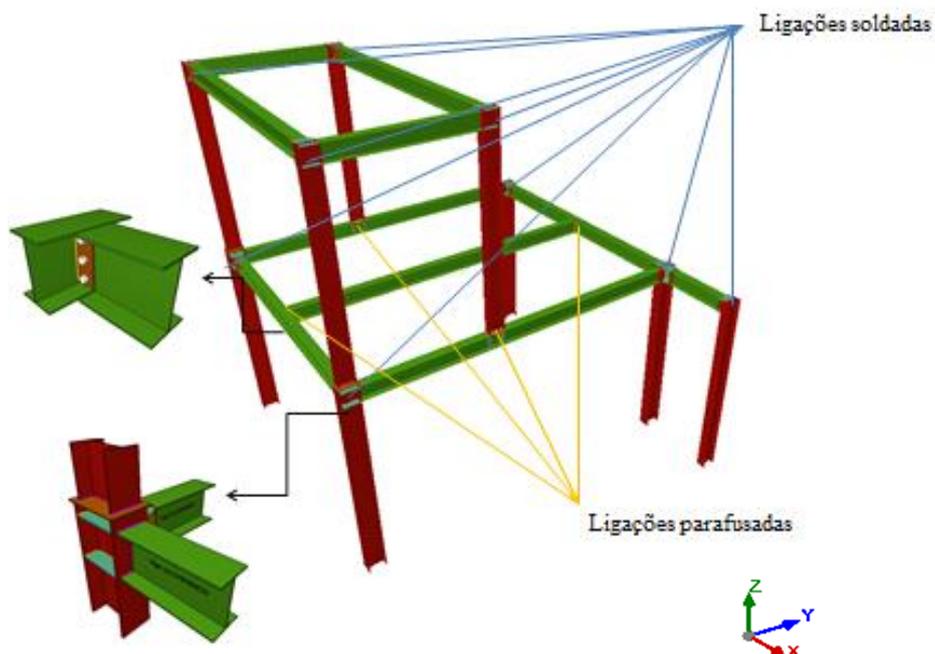
Tabela 10- Translações e rotações estruturais para ligações mista.

DEFORMAÇÕES		LIGAÇÃO SOLDADA E PARAFUSADA	
		Mín	Máx
T (mm)	Eixo		
	x	0,13	0,37
	y	0,14	3,72
	z	-6,25	-0,04
	Total	0,21	6,26
R (mRad)	x	-2,21	2,32
	y	-2,2	2,31
	z	-0,03	0

Fonte: CYPE 3D-v2017.

Os resultados apresentados concluíram que o comportamento de translação no eixo x e y, foram iguais aos resultados para as ligações parafusadas, enquanto a translação em z e o comportamento rotacional foram iguais aos resultados adquiridos nas ligações soldadas. Este sistema de ligações é detalhado na Figura 11, O uso dos dois tipos de ligações foi satisfatório em relação ao sistema de ligações parafusadas. O mesmo comparado com os deslocamentos devido o sistema de ligações soldadas apresenta valores maiores.

Figura 11- Detalhe das ligações mistas.



Fonte: CYPE 3D-v2017.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo verificar e comparar a resistência de ligações soldadas e parafusadas de um mezanino, visando aprofundar no estudo das ligações em estruturas metálicas. O estudo gerou oportunidade de uma análise mais apurada sobre o comportamento destas ligações.

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que a alteração do tipo de ligação, de parafusada para soldada ou mesmo os dois sistemas em uma só estrutura, garantiu a continuidade dos elementos conectados, com resistência e rigidez compatíveis com os objetivos adotados no projeto. Porém, com algumas considerações que podem ser utilizadas para a escolha da ligação de um projeto.

A estrutura que sofreu maior deslocamento foi o mezanino dimensionado somente com ligações parafusadas, já o mezanino dimensionado somente com ligações soldadas obteve um valor menor de deslocamentos, ficando entre estes dois modelos o valor dos deslocamentos do mezanino com ligações mistas. O fato de uma estrutura sofrer um deslocamento maior em relação a outra não significa que é melhor ou mais segura, desde que este deslocamento esteja dentro dos limites do ELU, outros fatores também devem ser considerados.

O coeficiente de aproveitamento da estrutura é um resultado obtido da razão entre os esforços solicitantes e os esforços resistentes, é dado por $\eta \leq 100\%$, então quanto menor este valor mais resistente é a estrutura em relação a sua solicitação de resistência. Para a estrutura todos os esforços foram verificados através do CYPE 3D, como resistência a tração, compressão, flexão, cortante e resistência a torção. Em todos os exemplos considerados das ligações, os resultados de η foram satisfatórios, estes valores são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11- Coeficiente de aproveitamento

TIPO DE LIGAÇÃO DA ESTRUTURA	η (%)
Ligação soldada	37.8
Ligação parafusada	38.5
Ligação mista	38.3

Fonte: CYPE 3D-v2017.

Analisado os valores de aproveitamento de resistência da estrutura, na Tabela 11 consta a pior situação, ou seja, o maior valor. O que significa que este é o ponto da estrutura em que se tem o menor valor de aproveitamento. É perceptível no trabalho que, o melhor comportamento se trata da estrutura com ligações soldadas, esta é a estrutura com o maior índice de aproveitamento, fato que está diretamente relacionado a segurança da estrutura, podendo também verificar este resultado para trabalhar com um sistema mais econômico, quando relacionado a outro em que o coeficiente de aproveitamento seja maior. Se tratando de economia, outro fator que contribui para a escolha do sistema de ligações é o quantitativo de materiais necessários para execução das ligações. As Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6 apresentam a quantidade de material necessária para as ligações soldadas e para as ligações parafusadas, é notório ao analisar tais tabelas que a situação em que tem uma quantidade menor de materiais é a estrutura dimensionada com ligações soldadas.

REFERÊNCIAS

ABCEM (Associação Brasileira da Construção Metálica). Edição 122 outubro 2016 ISSN 1414-6517.

ALMEIDA, Pedro Henrique Vasconcelos de. **Estudo e verificação de ligações metálicas soldadas e parafusadas**. Dissertação apresentada ao programa de graduação do curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Brasília, Uni CEUB, Brasília, 2014.

BERGAMASCO, Pedro Diego Almeida. **Estudo do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo estendida: Análise numérica**. São Paulo, 2012.

CBCA (Centro Brasileiro da Construção em Aço). **Ligações em estruturas metálicas**. 2ª ed, RJ. IBS/CBCA Rio de Janeiro, 2003.

CHAVES, M. R. **Avaliação do desempenho de soluções estruturais para galpões industriais leves**. Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

COBRAPI (Companhia Brasileira de Projetos Industriais) **Ligações em estruturas metálicas**, bibliografia técnica para o desenvolvimento da construção metálica, volume 2, 1987.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de Aço: Conceitos, Técnicas e Linguagem**. 5ª ed. São Paulo: Ziguarte, 2006.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Edificação de aço no Brasil**. 3ª ed. São Paulo: Ziguarte, 2002.

GOECKS, Cristiano. **Análise de ligações parafusadas em estruturas metálicas**. Dissertação apresentada ao programa de graduação do curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI, Rio Grande do Sul, 2011.

GUARNIER, Christiane Roberta Fernandes. **Metodologias de detalhamento de estruturas metálicas**. Dissertação apresentada ao programa de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, 2009.

INSTITUTO AÇO BRASIL, DF, 2019. Disponível em: <
<https://institutoacobrasil.net.br/site/>>.

RAMIRES, Fernando Busato. **Contribuição das componentes mistas em ligações semi-rígidas**. Tese de doutorado apresentada ao Programa de pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2010.

NUNES, Laerce de Paula. **Materiais: aplicações de engenharia, seleção de integridade**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço: Dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008**. 8ª ed, Rio de Janeiro: LTC, 2012.

PIGNATTA, Valdir; FRUCHTENGARTEN, Silva Julio. Colaboração: Barreto, Eduardo M. Campello **Dimensionamento de estruturas de aço** Apostila para a disciplina PEF 2402 – estruturas metálicas e de madeira. São Paulo, 2012.

PINHEIRO, Antônio Carlos da Fonseca Bragança. **Estruturas metálicas: cálculos, detalhes, exercícios e projetos**. 2ª ed, São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

ROSSATTO, Bárbara Maier. **Estudo comparativo de uma edificação em Estrutura metálica/concreto armado**: estudo de caso. Dissertação apresentada para conclusão do curso de engenharia civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil Julho, 2015.

SARDÁ, Alexandre Augusto Pescador. **Estruturas Metálicas Ligações – Apoios**. Universidade Federal do Paraná. Notas de aulas disponível em: ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec.../EstruturasMetálicas_LigaçõesApoios.pd

SANTOS, Givanildo Alves dos. Tecnologia dos materiais metálicos: propriedades, estruturas e processos de obtenção. 1ª ed, São Paulo: Érica, 2015.

SILVA, L. S. **Ligações metálicas: métodos avançados de análise e dimensionamento**. Dissertação apresentada ao programa de graduação de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2005.

SILVA, Valdir Pignatta; PANNONI Fabio Domingos. **Estruturas de aço para edifícios**: aspectos tecnológicos e de concepção. São Paulo: Blucher, 2010.