

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

DANIELA DE JESUS LOPES LEMES

**COMPARATIVO ENTRE LIGAÇÕES SOLDADAS E
PARAFUSADAS ATRAVÉS DE ANÁLISE ESTRUTURAL
COMPUTACIONAL**

ANÁPOLIS / GO

2019

DANIELA DE JESUS LOPES LEMES

**COMPARATIVO ENTRE LIGAÇÕES SOLDADAS E
PARAFUSADAS ATRAVÉS DE ANÁLISE ESTRUTURAL
COMPUTACIONAL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

ORIENTADOR: AURELIO CAETANO FELICIANO

ANÁPOLIS / GO: 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

LEMES, DANIELA DE JESUS LOPES

Comparativo entre ligações soldadas e parafusadas através de análise estrutural computacional

77, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2019).

TCC - UniEVANGÉLICA

Curso de Engenharia Civil.

- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| 1. Estruturas Metálicas | 2. Ligações Soldadas |
| 3. Ligações Parafusadas | 4. Dimensionamento em aço |
| I. ENC/UNIII. | II. Título (Série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LEMES, Daniela de Jesus Lopes. Comparativo entre ligações soldadas e parafusadas através de análise estrutural computacional. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO, 88p. 2019.

CESSÃO DE DIREITOS

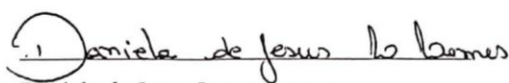
NOME DO AUTOR: Daniela de Jesus Lopes Lemes

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

Comparativo entre ligações soldadas e parafusadas através de análise computacional

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2019

É concedida à UniEVANGÉLICA a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Daniela de Jesus Lopes Lemes

E-mail: danylemesdejesus@hotmail.com

DANIELA DE JESUS LOPES LEMES


**COMPARATIVO ENTRE LIGAÇÕES SOLDADAS E
PARAFUSADAS ATRAVÉS DE ANÁLISE ESTRUTURAL
COMPUTACIONAL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
BACHAREL**

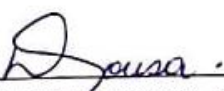
APROVADO POR:



**AURELIO CAETANO FELICIANO, Especialista (UniEVANGÉLICA)
(ORIENTADOR)**



**EDUARDO MARTINS TOLEDO, Mestre (UniEVANGÉLICA)
(EXAMINADOR INTERNO)**



**ELKE DIAS DE SOUSA, Mestra (UniEVANGÉLICA)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: ANÁPOLIS/GO, 05 de DEZEMBRO de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por minha vida, pela oportunidade que me concedeu de frequentar o curso de Engenharia Civil e pelas bênçãos em todos os momentos.

Agradeço aos meus pais que sempre buscaram o melhor pra mim, por todos os esforços no objetivo de me educar. Por terem se dedicado a minha formação profissional, sem eles não estaria concluindo este curso.

Agradeço meu orientador que foi mais uma das bênçãos de Deus em minha vida, pela paciência e dedicação que sempre demonstrou durante a construção do trabalho, por todos os nossos encontros sempre mostrando bastante interesse neste trabalho, assim me fortalecendo e incentivando a buscar novos conhecimentos.

Agradeço meus amigos e professores universitários.

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 seguite 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 atentem 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.

ABSTRACT

Metal structures is a constructive method that offers several advantages, they are economical and resistant solutions, executed in the short term, besides being a sustainable construction method. For this construction model to guarantee such advantages, it must be executed following a well-elaborated and detailed structural design, for the benefit of safety, comfort and economy. Together with the detailing of the structure are the links, they are responsible for ensuring the balance of the structure. Structural joints should be used in order to transmit the acting loads to the structural parts and also restrict their movements, the joints are directly related to the advantages of this construction method. The present work aims to analyze and compare results of structural bonds in a mezzanine, aiming to verify the behavior of the structure regarding the composition of welded and screwed connections, with the intention of raising relevant data to analyze the safety of the structure due to each one. connection type. After sizing the mezzanine for each connection method (welded and screwed) it was found that the two connection methods meet the safety criteria described in ABNT NBR 8800: 2008. Calculations were considered in order to compare the design resistances and required both welded and bolted, based on the solution adopted to promote the continuity of the beam. Comparing the strength calculations of the bonding systems using the CYPE 3D software, the data found that the dimensioned structure with welded connections for this project obtained better results.

KEYWORDS: Structure. Link. Screwed. Soldier Comparison. Safety.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1- Coalbrookdale..... | 19 |
| Figura 2- Ponte sobre o rio Paraíba do Sul..... | 20 |
| Figura 3- Ponte de Garabit (Sul da França)..... | 21 |
| Figura 4- Estação ferroviária Quaid d'Orsay (Paris, 1900) | 21 |
| Figura 5 - Variação de módulo de elasticidade e resistência com a temperatura..... | 26 |
| Figura 6- Detalhes para prevenir a corrosão em estruturas expostas à ação de intempéries | 27 |
| Figura 7- (a) Tração; (b) Compressão | 28 |
| Figura 8- Tensão de cisalhamento | 29 |
| Figura 9- Momento de torção ou torque(T)..... | 29 |
| Figura 10 - (a) Força na extremidade do elemento, (b) Força aplicada no centro do elemento | 29 |
| Figura 11- Diagramas de tensão e de deformação de um aço. | 30 |
| Figura 12- Elementos estruturais..... | 31 |
| Figura 13- Tipos de apoios | 32 |
| Figura 14- Principais tipos de produtos siderúrgicos laminados de utilização estrutural: (a) barras, com diversas seções transversais (quadrada, redonda, chata); (b) chapas; (c) perfis estruturais laminados; (d) trilho; (e) tubo quadrado; (f) tubo redondo..... | 33 |
| Figura 15- Conexão soldada rígida na aba do pilar | 36 |
| Figura 16- Conexão rígida da viga na alma do pilar | 36 |
| Figura 17 - Conexão parafusada flexíveis da viga na aba do pilar..... | 37 |
| Figura 18- Conexões parafusadas flexíveis pelas almas das vigas..... | 37 |
| Figura 19- tipos de soldas..... | 39 |
| Figura 20- solda de tampão, circulara e alongada | 40 |
| Figura 21- parafuso..... | 42 |
| Figura 22- Peças com ligações soldadas sob tração | 50 |
| Figura 23- Diagrama tensões-deformação..... | 50 |
| Figura 24- Peças com ligações parafusadas sob tração axial | 51 |
| Figura 25- Furo padrão | 53 |
| Figura 26 - Flambagem | 55 |
| Figura 27 - Flambagem por flexão | 55 |
| Figura 28 - (a) Flambagem por torção, (b) Flambagem por flexotorção..... | 56 |
| Figura 29- Flambagem lateral de viga biapoiada | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 30- Flambagem lateral de viga em balanço..... | 56 |
| Figura 31- relação X e λ_0 | 61 |
| Figura 32- O efeito do momento fletor..... | 64 |
| Figura 33- Instabilidade local das chapas componentes do perfil | 64 |
| Figura 34- Exemplos de peças sob flexão composta..... | 67 |
| Figura 35- CYPE 3D Nova Obra..... | 70 |
| Figura 36- Escolha por uma obra vazia ou uma existente | 70 |
| Figura 37- Definição dos materiais | 70 |
| Figura 38- Geometria do Mezanino..... | 71 |
| Figura 39- perfil CVC 250X33..... | 71 |
| Figura 40- perfil CVC 300X70..... | 71 |
| Figura 41- Ligações Geradas | 72 |
| Figura 42- Ligações soldadas | 73 |
| Figura 43- Ligações Parafusadas | 75 |
| Figura 45- Deslocamento em Y/ Ligação Parafusada | 78 |
| Figura 46- Deslocamento em Y/ Ligação Soldada | 78 |
| Figura 47- Detalhe das ligações mistas | 81 |

LISTA DE TABELA

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Propriedades Mecânicas de aços-carbono..... | 23 |
| Tabela 2- Propriedades Mecânicas de aço de baixa liga | 24 |
| Tabela 3 - Chapas grossas e chapas finas | 33 |
| Tabela 4- Comparativo entre diferentes perfis. | 34 |
| Tabela 5- Comparativo entre diferentes perfis | 34 |
| Tabela 6- Valores dos coeficientes de ponderação das resistências γm | 45 |
| Tabela 7- Coeficientes de ponderação das ações no estado limite último (ELU) | 48 |
| Tabela 8- Ações variáveis..... | 49 |
| Tabela 9- Distância mínima do centro de um furo-padrão à borda ^a | 53 |
| Tabela 10- Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados | 57 |
| Tabela 11- Valores de $(b/t)_{min}$ | 60 |
| Tabela 12- Valor de X em função de esbeltez λ_0 | 62 |
| Tabela 13- Valores máximos de b/t para evitar instabilidade local..... | 63 |
| Tabela 14- Valores máximos de esbeltez de chapa | 65 |
| Tabela 15- Definição do elemento estrutural | 71 |
| Tabela 16-Quantidade de solda para ligações soldadas..... | 74 |
| Tabela 17- Quantidade de elementos de ligações soldadas..... | 74 |
| Tabela 18- Quantidade de solda para as ligações Parafusadas | 75 |
| Tabela 19- Quantidade de elementos de ligações parafusadas..... | 76 |
| Tabela 20- Quantidade de parafusos | 76 |
| Tabela 21- Deslocamento e rotações estruturais | 77 |
| Tabela 22- Verificação para ligação Parafusada | 80 |
| Tabela 23- verificação para ligação soldada..... | 80 |
| Tabela 24- Deslocamento e rotações estruturais para ligações mista..... | 81 |
| Tabela 25- Coeficiente de aproveitamento | 82 |

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLA

| | |
|-------------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CBCA | Centro Brasileiro da Construção em Aço |
| E: | Módulo de elasticidade |
| ELU | Estados-limites últimos |
| ELS | Estados-limites de serviço |
| F | Força |
| K | Coefficiente de flambagem |
| l | Comprimento |
| Mpa | Mega Pascal |
| Q | Fator de redução associado à flambagem local |
| λ | Índice de esbeltez |
| λ_0 | Índice de esbeltez reduzido |
| γ : | Coefficiente de ponderação das ações |
| ψ : | Fator de redução das ações |
| Rd | Resistência de cálculo |
| Ru | Resistência última |
| Sd | Solicitação de cálculo |
| Ag | Área bruta |
| An | Área líquida |
| Ae | Área líquida efetiva |
| Ct | Coefficiente de redução área líquida |
| F_y | Resistência ao escoamento do aço |
| F_u | Resistência à ruptura do aço à tração |
| σ : | Tensão normal |
| Σ | Somatório |
| X | Fator de redução associado à resistência à compressão |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA..... | 15 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 16 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 16 |
| 1.2 | METODOLOGIA | 17 |
| 1.3 | ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 17 |
| 2 | ESTRUTURAS METÁLICAS | 19 |
| 2.1 | TIPOS DE AÇOS ESTRUTURAIS..... | 22 |
| 2.2 | PROPRIEDADES DOS AÇOS | 25 |
| 2.3 | ELEMENTOS ESTRUTURAIS | 30 |
| 2.4 | SUBESTRUTURAS | 32 |
| 2.5 | TIPOS DE PRODUTOS ESTRUTURAIS | 32 |
| 2.5.1 | Produtos laminados | 33 |
| 2.5.2 | Perfis | 34 |
| 2.6 | LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS | 35 |
| 2.6.1 | Ligações rígidas | 36 |
| 2.6.2 | Ligações flexíveis | 37 |
| 2.6.3 | Ligações semi-rígidas | 37 |
| 2.7 | LIGAÇÕES SOLDADAS..... | 38 |
| 2.7.1 | Tipos de ligações soldadas | 39 |
| 2.7.2 | Vantagens | 40 |
| 2.7.3 | Desvantagens | 41 |
| 2.8 | LIGAÇÕES PARAFUSADAS | 41 |
| 2.8.1 | Tipos de parafusos | 42 |
| 2.8.2 | Vantagens | 42 |
| 2.8.3 | Desvantagens | 43 |
| 3 | MÉTODOS DE CÁLCULO | 44 |
| 3.1 | ESTADOS LIMITES | 44 |
| 3.2 | CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO | 49 |
| 3.2.1 | Tração | 49 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2.2 Compressão..... | 54 |
| 3.2.3 Flexão | 63 |
| 4 ESTUDO DE CASO | 69 |
| 4.1 DADOS PRELIMINARES DO PROJETO | 69 |
| 4.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL | 69 |
| 4.3 CALCULO DO MEZANINO | 70 |
| 4.3.1 Resultado de dimensionamento para ligações soldadas | 73 |
| 4.3.2 Resultado de dimensionamento para ligações parafusadas | 74 |
| 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS | 77 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 81 |
| REFERÊNCIAS | 84 |
| 7 ANEXO | 86 |

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.

O processo para construções em estruturas em aço se destaca, pois o aço tem uma maior resistência mecânica se comparada a outros materiais. É um dos processos construtivos mais velozes e é o que suporta os maiores vãos. Por isso são muito utilizados principalmente em indústrias e supermercados que precisam de grandes vãos e velocidade na execução e também é bastante utilizado em ginásios, pavilhões, telhados, torres, guindastes, escadas, passarelas, pontes, garagens, hangares, depósitos, lojas entre outros (CHAVES, 2007, p.1).

Ainda 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).

Para que o cliente e também os profissionais atuante em um sistema construtivo em aço consigam usufruírem das vantagens que as estruturas em aço oferecem, além da eficiência da fabricação do material e montagem de uma estrutura, é necessário realizar um detalhamento seguro de projeto estrutural. Somente com este arranjo de perfeições, as

estruturas metálicas podem ser consideradas vantajosas. Caso não exista esta harmonia entre os serviços de projeto e execução, este sistema ao contrario do esperado, irá gerar imediatamente ou posteriormente grandes prejuízos, que quando causados por má concepção de projeto são chamados de patologias atávicas.

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 devem ser utilizadas de forma a transmitir as cargas atuantes às peças e restringir as deformações na estrutura a limites admissíveis. Pode-se classificar ligação de dois modos, permanentes ou desmontáveis. As ligações permanentes são executadas com rebites e solda, as removíveis, com parafusos e pinos. (Almeida, 2014, p.13).

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. Por esta razão devem ser analisados os cálculos com cautela e precisão. Segundo o Instituto Aço Brasil (2011), atualmente, os dispositivos mais utilizados para a união de elementos estruturais em aço são os parafusos (de baixo carbono ou de alta resistência) e a solda elétrica. Estes dois tipos de ligações serão analisados neste trabalho com o objetivo de detalhar suas principais características, que são informações indispensáveis para a escolha correta do tipo de ligação a ser utilizada.

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 utilização de software acelera o processo de detalhamento, gerando automaticamente detalhes e croquis, permitindo ao engenheiro e arquiteto ousar mais da criatividade com estruturas sofisticadas e encantadoras. A escolha dos tipos de ligações de estruturas metálicas é primordial para o bom desempenho do comportamento estrutural, além

da garantia á segurança, que é o ponto mais importante, ainda dispõe ao projetista a possibilidade de trabalhar em prol de uma melhor aparência estrutural. Pois, com a utilização do aço permite ligações satisfatórias em materiais com geometrias mais complicadas, por exemplo: em barras com secção transversal redonda e etc.

A escolha dos elementos para a ligação, assim como o tipo de ligação deve se a determinação dos esforços solicitantes nos seus elementos (parafuso e solda), os quais devem ser menores que os respectivos esforços resistentes. Os deslocamentos de ligações comprometem toda a estrutura, neste trabalho serão analisadas as ligações entre os elementos de viga e pilar, que têm grande parcela de influência na resistência e estabilidade dos pilares. As ligações podem se comportar desde seu estado rígido, resistindo à solicitação de flexão, esforços normais e cisalhamento, até o estado flexível, onde somente atuam solicitações de cisalhamento e esforços normais (RAMIRES, 2010).

Além das resistências de esforços solicitantes e a capacidade dos elementos junto aos tipos ligações para alcançar a solicitação, outros aspectos também devem ser avaliados no momento da escolha do tipo de ligação empregada em uma estrutura metálica, tais como: o local de montagem da estrutura, a infraestrutura disponível para a realização destas ligações e o grau de dificuldade de fabricação e montagem da peça. Entretanto este trabalho trará apenas uma breve abordagem sobre tais condições, a dedicação deste será o estudo e análise do dimensionamento de ligações metálicas. Apesar de existir outros tipos de ligações no trabalho serão tratadas apenas as ligações soldadas e parafusadas.

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.

1.1 JUSTIFICATIVA

Optar por estruturas metálicas se tornou uma escolha vantajosa devido aos benefícios do sistema estrutural. Porém ainda há uma grande preocupação em relação aos profissionais qualificados nesta área. A principal causa do desenvolvimento do trabalho é a deficiência de conhecimentos nos profissional na área da construção civil em estruturas metálicas. Hoje uma das desvantagens em trabalhar com estruturas metálicas é o elevado preço de mão de obra, ocasionado pelo trabalho arduo de elaboração de um projeto muito detalhado, onde erros nem sempre poderão ser corrigidos, colocando a responsabilidade e preocupação do profissional em uma situação delicada.

Este cenário talvez seja a razão pelo pouco desejo em trabalhar neta área. Porém, com estudos aprofundados em estruturas metálicas, a situação tende a mudar. Pois, estudos e análises do comportamento estrutural contribuem para o crescimento de conhecimentos neste campo, assim é possível despertar o interesse de profissionais a trabalharem nesta área.

Analisar as ligações de estruturas é a parte do projeto que determina os possíveis descolamentos destas, cabe nesta etapa determinar qual o melhor conectivo para transmissão de esforços, levando em considerações a segurança e a economia.

1.1.1 Objetivo Geral

Apresentar por meio de uma pesquisa computacional o dimensionamento comparativo de ligações soldadas e parafusadas aplicadas em um esquema estrutural genérico de um mezanino através da utilização de ferramenta computacional específica CYPE 3D.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Conceituar estruturas metálicas, seus elementos e propriedades.
- Apresentar uma abordagem aprofundada sobre ligações em estruturas metálicas.
- Propor uma análise sobre as vantagens e desvantagens entre ligações com parafusos e ligações com solda.
- Dimensionar um mezanino para analisar o comportamento estrutural devido ao tipo de ligação (soldada e parafusada).
- Fazer um comparativo entre ligações soldadas e parafusadas.
- Verificar a melhor escolha entre os dois tipos de ligações considerando vantagens e desvantagens em relação aos aspectos econômicos e também a segurança.

1.2 METODOLOGIA

O trabalho apresenta um levantamento bibliográfico sobre estruturas metálicas, a fim de apresentar para o leitor informações minuciosas relacionadas às ligações neste tipo de estrutura.

No trabalho serão analisadas as ligações a partir de uma situação genérica, a modelação de um mezanino, onde será detalhado o dimensionamento das ligações. Será considerado o mesmo material para os exemplos de ligações, considerando o melhor perfil como o “mais leve”, concomitantemente que atente as necessidades de resistência devido aos esforços submetidos de cada perfil, como: tração, compressão, cisalhamento, flexão e torção.

Após a escolha dos perfis, o mezanino será modelado com o software CYPE 3D, onde será avaliado o comportamento estrutural do mezanino em trechos de ligações em duas situações, com ligação soldada e o mesmo exemplo com ligação parafusada, ambas analisadas com a mesma rigidez, ou seja, serão comparados os dois tipos de ligações para um mesmo estado de rigidez, com ambas rígidas, flexíveis ou semi-rígidas.

O software CYPE 3D, gera informações detalhadas de cada procedimento, estes dados serão avaliadas para a discussão entre vantagens e desvantagens que influência no instante da escolha do tipo de ligação para um sistema estrutural metálico. Assim conclui-se o trabalho apresentado a partir destes dados, informações primordiais para um bom dimensionamento de ligações em estruturas metálicas, conseqüentemente contribuindo para o aumento de construções em estruturas metálicas. Visto que informações auxiliando o trabalho dos profissionais, contribui ao interesse em trabalhar com este tipo de estrutura.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O corpo deste trabalho de conclusão de curso está organizado em seis capítulos. O primeiro capítulo descreve a introdução sobre estruturas metálicas, ressaltando as vantagens de seu emprego na construção civil, enfatizando a importância das ligações na estrutura. Ainda nesse capítulo os objetivos e as justificativas são apresentados.

No segundo capítulo, apresentam-se informações sobre o contexto histórico do aço, os tipos de aço e suas propriedades, detalhamento sobre os elementos estruturais. Também neste capítulo é apresentada informações sobre ligações soldadas e parafusada, as vantagens e desvantagens de cada uma, além de detalhamento dos elementos utilizados para cada tipo de ligação.

O capítulo três aborda a teoria do dimensionamento baseada na NBR 8800 (ABNT, 2008), indicando os critérios para calcular esforços de tração, compressão e flexão. O capítulo quatro mostra o exemplo genérico utilizado para o estudo de caso, e apresenta alguns dados básicos referentes ao software CYPE 3D.

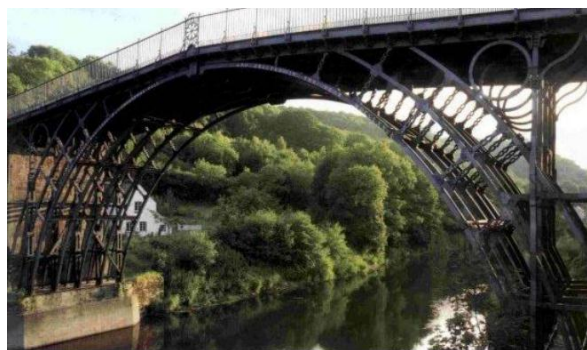
O capítulo cinco discorre sobre os resultados apresentados no capítulo quatro, analisando os resultados e apresentando-os, e logo em seguida, no capítulo seis as considerações obtidas com um texto explicativo sobre os resultados obtidos.

2 ESTRUTURAS METÁLICAS

Diante de uma situação complicada para os profissionais de engenharia civil devido uma economia conturbada, o momento é marcado pela retomada de esforços para aquecimento da economia, e o aço é protagonista ao conquistar espaço e importância nas obras pelo País ABCEM (2016). É notável a contribuição do aço na construção civil desde o século XVIII, possibilitando que construtores ofereçam estruturas modernas e seguras.

Segundo Pfeil e Pfeil (2012), em torno de 1820 construíram-se pontes com arcos ou treliças trabalhando a compressão com ferro fundido, que foi o primeiro material siderúrgico utilizado. O ferro fundido é uma liga de ferro-carbono com alto teor de carbono, acima de 2% e com limite de 3,5%, o teor de silício pode chegar até 3%. O ferro é aquecido até tornar-se líquido, sendo então vazado no interior de um molde para solidificar. Desta forma a peça de ferro fundido poderá apresentar uma série de descontinuidades internas que são chamados de vazios, devidos estas descontinuidades o material resultante é frágil, não resistente a impactos de flexões, deformações e a cargas diversas (NUNES, 2012). A Primeira ponte em ferro fundido foi na Inglaterra em 1779 sobre o rio Severn, um arco com vão de 30 m, conforme a Figura 1.

Figura 1- Coalbrookdale

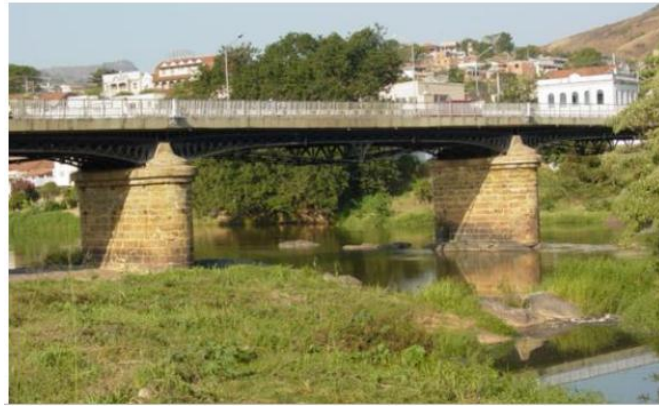


Fonte: PFEIL & PFEIL, 2012 (Adaptado).

O ferro forjado foi utilizado no fim do século XVIII em correntes de barras, formando os elementos de suporte das pontes suspensas. É uma liga de ferro-carbono com baixo teor de carbono. O ferro é aquecido e prensado nas cavidades de uma matriz, estando ainda sólido, sob a ação de martelos e prensas de forjamento. Assim sendo, o fluxo do material é controlado e não ocorrem descontinuidades das fibras internas, o material é dúctil e tenaz, isto é, resistente à impactos, flexões, deformações e a cargas diversas (NUNES, 2012).

No Brasil a ponte sobre o rio Paraíba do Sul (RJ), representada na Figura 2, foi inaugurada em 1857, os vãos de 30 metros são formados por arcos atirantados constituídos de peças de ferro fundido montadas por encaixe e o tirante em ferro forjado. (PFEIL & PFEIL, 2012).

Figura 2- Ponte sobre o rio Paraíba do Sul



Fonte: PFEIL & PFEIL, 2012 (Adaptado).

Segundo Pfeil e Pfeil (2012), as obras mais importantes construídas entre 1850 e 1880 foram pontes ferroviárias em treliça de ferro forjado. Em 1856 o inglês Henry Bessemer inventou um forno que permitiu a produção do aço em larga escala. Em 1864 os irmãos Martin desenvolveram um forno de maior capacidade e rapidamente o aço substituiu o ferro fundido e o forjado na construção. O aço é a mistura de ferro e carbono, com outros elementos de dois tipos: elementos residuais decorrentes do processo de fabricação (Silício, Manganês, Fósforo e Enxofre), e elementos adicionados com o intuito de melhorar as características físicas e mecânicas do material denominados elementos de liga. O carbono aumenta a resistência do aço, porém o torna mais frágil. Os aços com baixo teor de carbono têm menor resistência à tração, porém são mais dúcteis.

Conforme Dias (2002), o aço mais utilizado na década de cinquenta e sessenta foi o ASTM-A7, que foi normatizado pela American Society for Testing Materials, EUA, onde apresentava um limite de escoamento mínimo de 9,1% menor que o aço ASTM-A36, seu sucedâneo. As ligações nesta época eram feitas através de rebites, já se tinha disponível a solda, porém esta preferência se alicerçava no conceito de que mesmo um rebite mal cravado poderia ainda suportar um esforço considerável, ao passo que uma solda mal feita levaria a estrutura ao colapso.

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. Duas obras desta época de grande relevância, são ilustradas nas figuras 3 e 4.

Figura 3- Ponte de Garabit (Sul da França)



Fonte: PFEIL & PFEIL, 2012 (Adaptado).

Figura 4- Estação ferroviária Quaid d'Orsay (Paris, 1900)



Fonte: PFEIL & PFEIL, 2012 (Adaptado).

No Brasil a indústria siderúrgica foi implantada após a Segunda Guerra Mundial, com a construção da Usina Presidente Vargas (CSN), em Volta Redonda – RJ. O parque industrial brasileiro dispõe atualmente de diversas usinas siderúrgicas, com capacidade de fabricar produtos para estruturas de grande porte, em consequência é possível erguer edifícios cada vez mais altos, pontes bem elaboradas e outras aplicações das estruturas metálicas.

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%).

Construções em aço apresentam grandes vantagens, uma delas é em relação a suas formas geométricas, permitindo aos profissionais desta área a ousadia em projetos mais aprimorados.

A utilização de estruturas metálicas na construção civil tem proporcionado aos arquitetos, engenheiros e construtores, soluções arrojadas, eficientes e de alta qualidade. A arquitetura do aço está associada à ideia de sofisticação, inovação e vanguarda, presente em obras de grande expressão arquitetônica, ferramentas

estratégicas no “planejamento” de grandes centros urbanos que buscam uma nova imagem frente ao mundo (GUARNIER, 2009, p.2).

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. Tais patologias não têm sua origem concentrada em fatores isolados, a origem de certa patologia pode estar ligada a uma das etapas da vida útil da estrutura metálica, como: concepção estrutural, fabricação, montagem, utilização e manutenção. 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, por exemplo: o concreto e a madeira. 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.

O aumento do teor de carbono eleva a resistência do aço e diminui a sua ductilidade, ou seja, a capacidade de deformar. É utilizado em estruturas usuais preferencialmente aço com teor de carbono baixo até moderado, que podem ser soldados sem precauções especiais.

Segundo Dias (2002), aço com baixo teor de carbono tem excelente ductilidade e tenacidade, excepcionais soldabilidade e usinabilidade, baixa dureza e fraquíssima resistência a corrosão e erosão, são aplicados em: componentes de carcaças de veículos automotores; perfis de uso geral; chapas para tubos, pontes e edificações; vasos e tanques para baixas pressões; arames e pregos; chapas zincadas para cobertura e fechamentos; chapas estanhadas para embalagens de bebidas e alimentos.

Os aços com médio teor de carbono apresentam boa ductibilidade e tenacidade e boa soldabilidade, são aplicados em: rodas de trilhos ferroviários; engrenagens; chapas para tubos, vasos e tanques; peças para máquinas resistentes à brasão; componentes estruturais de alta resistência e vergalhões para construção civil. Já os aços com alto teor de carbono possuem fraca ductibilidade e são aplicados em: matrizes, ferramentas, lâminas de serras, molas, peças para máquinas altamente resistentes à abrasão e componentes estruturais de alta resistência. A seguir a tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas dos aços-carbono.

Tabela 1 - Propriedades Mecânicas de aços-carbono

| ESPECIFICAÇÃO | TEOR DE CARBONO % | LIMITE DE ESCOAMENTO f_y (MPa) | RESISTÊNCIA À RUPTURA f_u (MPa) |
|----------------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| ABNT MR250 | Baixo | 250 | 400 |
| ASTM A7 | Baixo | 240 | 370-500 |
| ASTM A36 | 0,25-0,29 | 250 (36 Ksi) | 400-500 |
| ASTM A307 (parafuso) | Baixo | — | 415 |
| ASTM A325 (parafuso) | Médio | 635(min) | 825(min) |
| EM S235 | Baixo | 235 | 360 |

Fonte: PFEIL & PFEIL, 2012.

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. A tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas de aço de baixa liga.

Tabela 2- Propriedades Mecânicas de aço de baixa liga

| ESPECIFICAÇÃO | PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA | LIMITE DE ESCOAMENTO f_y (Mpa) | RESISTÊNCIA À RUPTURA f_u (Mpa) |
|---------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| ASTM A242 | C < 0,22% Mn < 1,25% | 290-350 | 435-480 |
| DIM St52 | C < 0,20% Mn < 1,5% | 360 | 520-620 |
| USI-SAC-350 | C < 0,18% Mn < 1,4% | 303-373 | 490-608 |

Fonte: PFEIL & PFEIL, 2012.

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 determinados. 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). Os principais objetivos dos tratamentos térmicos são os seguintes:

- a) Remoção de tensões internas (oriundas de esfriamento desigual, trabalho mecânico ou outra causa);
- b) Aumento ou diminuição da dureza;
- c) Aumento da resistência mecânica;
- d) Melhora da ductilidade;
- e) Melhora da resistência ao desgaste;
- f) Melhora das propriedades de corte;
- g) Melhora da resistência à corrosão;
- h) Melhora da resistência ao calor;
- i) Modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

Os objetivos acima evidência claramente a importância e a necessidade do tratamento térmico no aço. Em geral, a melhora de uma ou mais propriedades, mediante um determinado tratamento térmico, é conseguida com prejuízo de outras.

Os parafusos de alta resistência utilizados como conectores são fabricados com aço de médio carbono sujeito a tratamento térmico (especificação ASTM A325). Os aços de baixa liga com tratamento térmico são empregados na fábrica de barras de aço para a protensão e também de parafusos de alta resistência (especificação ASTM A490).

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).

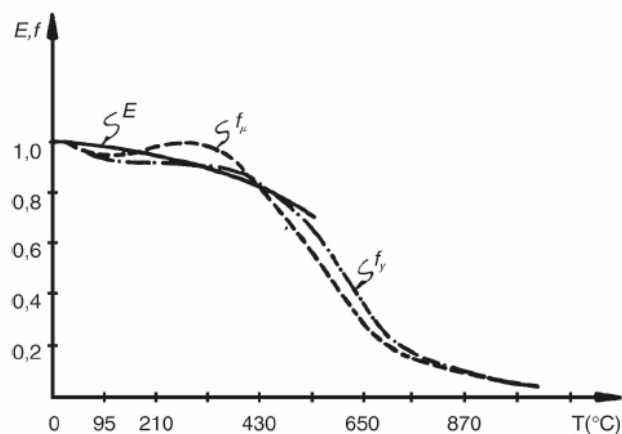
- a) Módulo de elasticidade $E = 200.000 \text{ MPa}$;
- b) Coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$;
- c) Coeficiente de dilatação térmica $\beta = 12 \times 10^{-6}$ por $^{\circ}\text{C}$;
- d) Massa específica $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$.

Cada material possui características próprias, abaixo estão conceituadas as principais propriedades do aço.

- Elasticidade: uma peça de aço sob efeito de tensões de tração ou de compressão sofre deformações que podem ser elásticas ou plásticas. Elasticidade de um material é a sua capacidade de voltar à forma original em ciclo de carregamento e descarregamento. A deformação elástica é reversível, ou seja, desaparece quando a tensão é removida.
- Plasticidade: deformação plástica é a deformação permanente provocada por tensão igual ou superior à f_p - resistência associada ao limite de proporcionalidade. A deformação plástica altera a estrutura interna do metal, tornando mais difícil o escorregamento ulterior e aumentando a dureza do metal.

- Ductilidade: é a capacidade dos materiais de se deformar sem se romper. Pode ser medido por meio do alongamento ou da estrição. A ductilidade tem grande importância nas estruturas metálicas, pois permite a redistribuição de tensões locais elevadas. As barras de aço sofrem grandes deformações antes de se romper, o que na prática constitui um aviso da presença de tensões elevadas.
- Tenacidade: é a capacidade que o aço possui de absorver tanto energia elástica como plástica por unidade de volume até a sua ruptura. Representa a área total do diagrama tensão-deformação.
- Fragilidade: é o oposto de ductilidade. Os aços podem se tornar frágeis pela ação de diversos agentes: baixa temperatura do ambiente, efeito térmico, por exemplo: Solda elétrica e etc.
- Dureza: resistência ao risco abrasão.
- Efeito de temperatura elevada: as temperaturas elevadas modificam as propriedades físicas do aço. Temperaturas superiores a 100° tendem a eliminar o limite de escoamento bem definido, tornando o diagrama σ, ϵ arredondado.
- As temperaturas elevadas reduzem as resistências a escoamento f_y e ruptura f_u , e também o módulo de elasticidade E . E ainda se a temperatura for acima de 250° a 300°C, provocam também a fluência nos aços.

Figura 5 - Variação de módulo de elasticidade e resistência com a temperatura



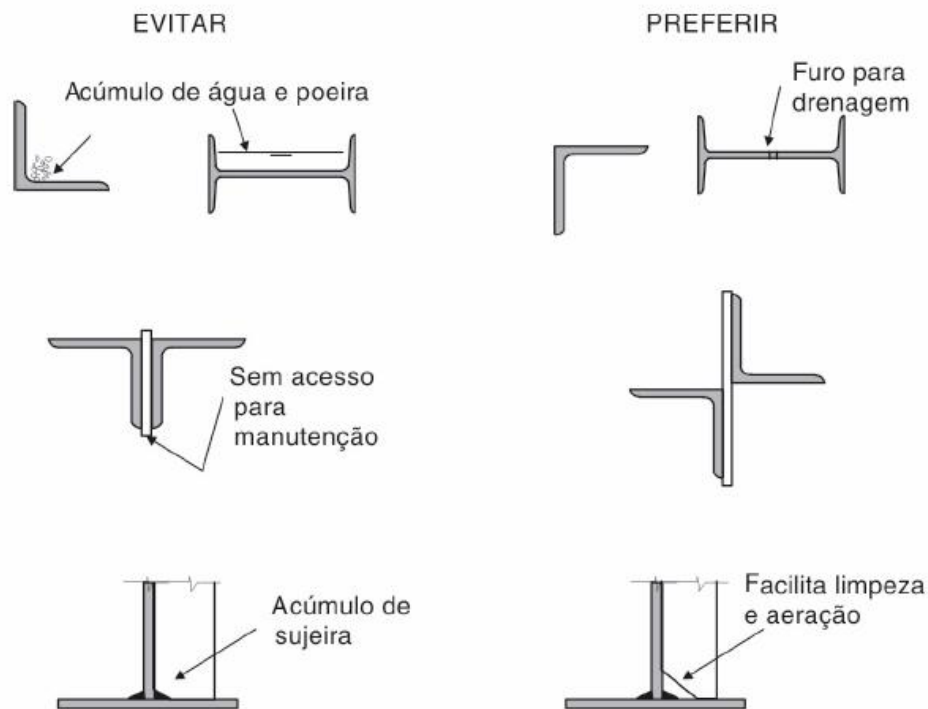
Fonte: PFEIL & PFEIL, 2012.

- Fadiga: a ocorrência de fadiga é caracterizada pelo aparecimento de fraturas que se propagam com a repetição do carregamento.

As uniões por solda provocam modificação na estrutura cristalina do aço junto à solda, bem como concentrações de tensões, com a conseqüente redução da resistência à fadiga nesses pontos (PFEIL & PFEIL, 2012, p.17).

- Corrosão: o processo de reação com o aço de alguns elementos presentes no ambiente em que se encontra exposto, a Figura 6 detalha alguns cuidados para a prevenção de corrosão.

Figura 6- Detalhes para prevenir a corrosão em estruturas expostas à ação de intempéries



Fonte: PFEIL & PFEIL, 2012.

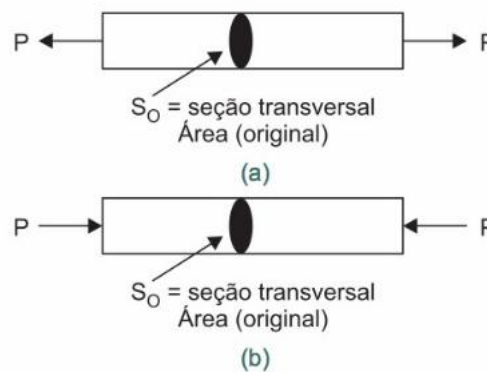
Segundo Dias (2011), as propriedades do aço são modificadas de acordo com os elementos de liga que fazem parte da sua composição química. Por exemplo:

- Carbono (C): aumenta o limite de resistência de maneira mais econômica, e prejudica sensivelmente a ductilidade e a tenacidade;
- Cobre (Cu): aumenta a resistência à corrosão atmosférica e aumenta a resistência à fadiga, e diminui discretamente a ductilidade, a tenacidade e a soldabilidade;
- Cromo (Cr): aumenta a resistência mecânica, à abrasão e à resistência atmosférica, e diminui soldabilidade;
- Manganês (Mn): melhora o limite de escoamento e a resistência à fadiga, prejudica de forma leve a ductilidade e a soldabilidade.

As propriedades mecânicas definem o comportamento do aço quando sujeito a esforços mecânico 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: tração, compressão, cisalhamento, torção e flexão. Tais esforços são conceituados e exemplificados a seguir (DIAS, 2011).

- Tensão normal (σ) é aquela em que a força (P) atua perpendicularmente em relação à seção transversal (S_0), e pode ser de tração ou compressão, conforme ilustrada na figura 5 (a) e (b).

Figura 7- (a) Tração; (b) Compressão



Fonte: SANTOS, 2015.

A tensão normal (tração ou compressão) é dada pela Equação (1)

$$\sigma = \frac{P}{S_0} \quad (1)$$

Onde:

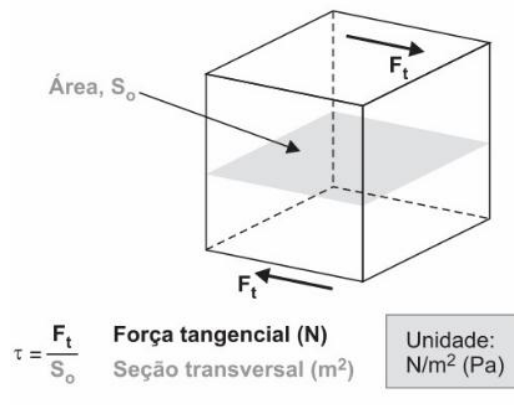
σ = tensão (N/m^2);

P = carga aplicada (N);

S_0 = seção transversal inicial (m^2).

- Tensão cisalhante (τ) é aquela em que a força (P) atua paralelamente em relação à seção transversal (S_0). O esforço de cisalhamento está presente, por exemplo: no corte do material metálico utilizando uma serra manual.

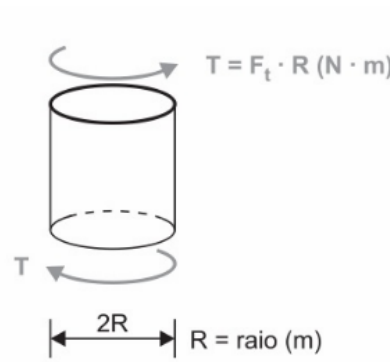
Figura 8- Tensão de cisalhamento



Fonte: SANTOS, 2005.

- Momento de torção ou torque (T): trata-se de esforço mecânico que tende a produzir giro (rotação) é o produto entre força tangencial (F_t) e braço, no caso o raio (R). A torção ocorre quando apertamos ou soltamos elementos como parafusos, porcas, tampas de refrigerantes etc.

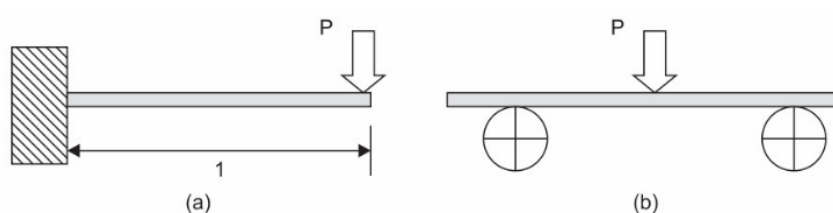
Figura 9- Momento de torção ou torque(T)



Fonte: SANTOS, 2005.

- Flexão (F): trata-se de um esforço que tende a fletir o elemento no qual age. Momento fletor é o produto entre a força (P) e a distância em relação ao apoio do elemento, conforme a Figura 10.

Figura 10 - (a) Força na extremidade do elemento, (b) Força aplicada no centro do elemento

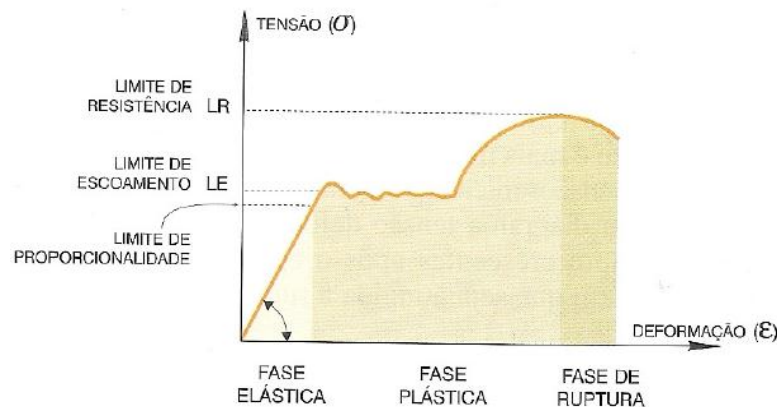


Fonte: SANTOS, 2005.

2.2.1 Diagrama de tensão-deformação

Para compreender as propriedades mecânicas do aço é primordial entender como funciona o diagrama de tensão e deformação conforme a Figura 11. Através de ensaios mecânicos é determinado as propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do aço quando submetido à ação de esforços. Estes são expressos em função de tensões e/ou deformações. Tensão é definida genericamente como a resistência interna de uma força externa aplicada sobre o objeto, por unidade de área. Deformação é definida como a variação de uma dimensão qualquer desse corpo, por unidade da mesma dimensão, quando esse corpo é submetido a um esforço qualquer. Até certo nível de tensão aplicada, o material trabalha no regime elástico-linear, isto é, segue a lei de Hooke e a deformação linear específica é proporcional ao esforço aplicado (PIGNATTA & FRUCHTENGARTEN, 2012).

Figura 11- Diagramas de tensão e de deformação de um aço.



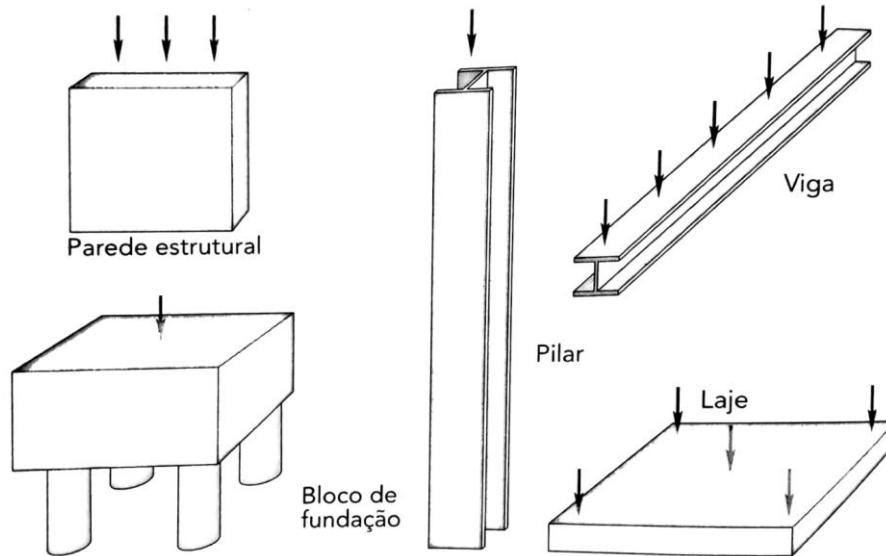
Fonte: DIAS, 2006.

2.3 ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Conforme Silva e Pannoni (2010), conceber uma estrutura é o ato de dimensionar os elementos portantes, ou seja, os elementos capazes de suportar as cargas decorrentes da edificação, é 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. A Figura 12 ilustra os elementos estruturais, os quais são também conceituados.

Figura 12- Elementos estruturais.

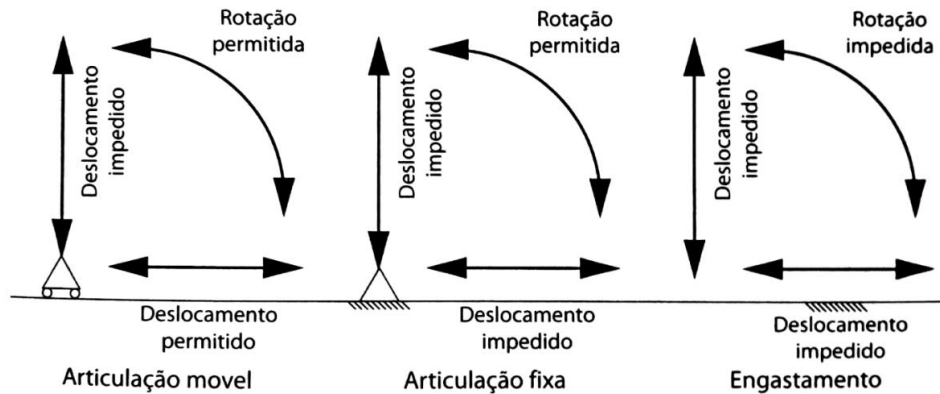


Fonte: SILVA & PANNONI, 2010.

- **Pilares:** são estruturas que transmitem todas as cargas para as fundações estando sujeitos basicamente a esforços axiais de compressão. São conformados a partir de perfis “I”, “H”, de alma cheia, tubulares, barras chatas ou redondas. Os pilares são formados por peças esbeltas, podendo ocorrer o fenômeno da flambagem. Geometricamente similares à viga, porém solicitados por força axial de compressão. Se a força axial for de tração denomina-se *tirantes*.
- **Vigas:** são elementos estruturais sujeitos basicamente por esforços de flexão com objetivo de vencer vãos horizontais e transferir forças verticais para os apoios.
- **Bloco de Fundação:** elementos que possuem as três dimensões com valores da mesma ordem de grandeza.
- **Laje:** uma de suas dimensões é bem inferior as outras duas, são sujeitos a força que atuam perpendicularmente à face formada pelas duas dimensões maiores.
- **Parede estrutural:** geometricamente similares à laje, porém, as forças atuam paralelamente à face formada pelas duas maiores dimensões.
- **Apoios:** para formar a estrutura os elementos de aço (vigas e pilares) são conectados entre si ou a outros elementos como laje e blocos. Ou seja, há elementos que se apoiam em outros que lhe servem como apoio. Observe a Figura

13, os apoios são denominados: Articulação móvel, articulação fixa e engastamento respectivamente.

Figura 13- Tipos de apoios



Fonte: SILVA & PANNONI, 2010.

2.4 SUBESTRUTURAS

A subestrutura é formada pela união entre elementos estruturais, elas podem ser planas ou tridimensionais (SILVA & PANNONI, 2010).

- Pórtico plano: subestrutura formada por pilares e vigas coplanares sujeitas a mesma força no mesmo plano.
- Viga vierendel: um caso particular de pórtico plano, viga vierendel é formada por quatro ligações rígidas para evitar a hipostaticidade.
- Treliça plana: subestrutura formada por barras coplanares articuladas entre si submetidas a forças aplicadas nos nós.
- Treliça tridimensional: formada por barras não coplanares articuladas entre si e sujeita a forças aplicadas nos nós.
- Pórtico tridimensional: as subestruturas se ligam para então formar a estrutura da edificação.
- Grelha: subestrutura formada por barras coplanares a forças ortogonais ao plano.

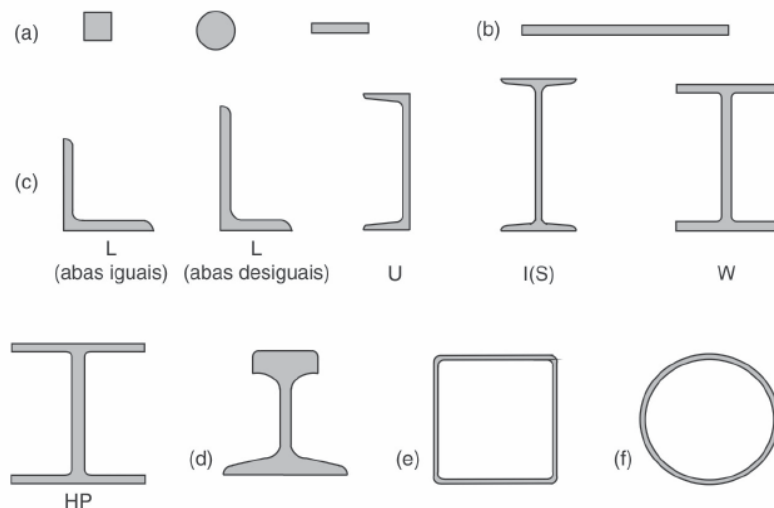
2.5 TIPOS DE PRODUTOS ESTRUTURAIS

De acordo com Pfeil e Pfeil (2012), as usinas produzem aços em forma de: chapas, barras, perfis laminados, fios trefilados, cordoalhas e cabos.

2.5.1 Produtos laminados

- **Barras:** são produtos laminados nos quais duas dimensões (da seção transversal) são pequenas em relação à terceira (comprimento). As barras são laminadas em seção circular, quadrada ou retangular alongada, destaca-se as vigas e os pilares.
- **Chapas:** são produtos laminados, nos quais uma dimensão (a espessura) é muito menor que as outras duas (largura e comprimento). Sofrem carga paralela à face formada pelas duas maiores dimensões.

Figura 14- Principais tipos de produtos siderúrgicos laminados de utilização estrutural: (a) barras, com diversas seções transversais (quadrada, redonda, chata); (b) chapas; (c) perfis estruturais laminados; (d) trilha; (e) tubo quadrado; (f) tubo redondo



Fonte: PFEIL & PFEIL, 2012.

As chapas se dividem nas duas categorias:

Chapas grossas – de espessura superior a 5,0 mm.

Chapas finas – fabricadas a frio e a quente conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Chapas grossas e chapas finas

| CHAPAS | FABRICAÇÃO | ESPESSURAS | UTILIZAÇÃO EM CONSTRUÇÃO |
|---------|------------|---------------|-----------------------------------|
| Grossas | A quente | > 5,0 mm | Estruturas metálicas em geral |
| Finas | A quente | 1,2 – 5,0 mm | Perfis de chapas dobrados |
| | A frio | 0,3 – 2,65 mm | Acessórios de construção: calhas, |

Fonte: PFEIL, & PFEIL, 2012.

2.5.2 Perfis

Os perfis podem ser obtidos diretamente da laminação a quente, ou da operação de conformação a frio ou de soldagem de chapa. São denominados, respectivamente, de perfis laminados, formados a frio e soldados. A Tabela 4 e a Tabela 5 traz um comparativo entre alguns perfis existentes no mercado.

Tabela 4- Comparativo entre diferentes perfis.

| PERFIS E SUAS CARACTERÍSTICAS | LAMINADOS COM MESAS DE FACES PARALELAS | LAMINADOS COM MESAS DE FACES INCLINADAS ENTRE SI | FORMADOS A FRIO |
|------------------------------------|--|--|-------------------|
| Homogeneidade estrutural | Peça única | Peça única | Uma chapa dobrada |
| Número de bitolas/Altura do perfil | 10 bitolas I 150-610 mm | 10 bitolas I 76~152mm | Conforme o pedido |
| Prazo de entrega | Ponta entrega | Pronta entrega | Ponta entrega |
| Comprimento padrão | Para alturas: até 310mm: 6m e 12m; acima 310mm: 12m. | 6m | 6m |
| Comprimento sob medida | De 6 a 24m | Não | De 6m a 12m |
| Necessidade de desempenho | Não | Não | Eventualmente |

Fonte: PFEIL, & PFEIL, 2012.

Tabela 5- Comparativo entre diferentes perfis

| PERFIS E SUAS CARACTERÍSTICAS | ELETROSSOLDADOS | SOLDADOS | TUBOS ESTRUTURAIS |
|------------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Homogeneidade estrutural | Composto três chapas | Composto três chapas | Peça única |
| Número de bitolas/Altura do perfil | 36 bitolas I 150~500mm | Conforme o pedido | 48 bitolas \varnothing 33~355mm |
| Prazo de entrega | Pronta entrega | Entrega em 30 a 60 dias | Ponta entrega |
| Comprimento padrão | 12m | Sob medida | |

| | | | |
|---------------------------|---------------|---------------|-----|
| | | | 12m |
| Comprimento sob medida | De 6m a 18m | De 6m a 24m | Não |
| Necessidade de desempenho | Eventualmente | Eventualmente | Não |

Fonte: PFEIL, & PFEIL, 2012.

Os perfis laminados são peças únicas, obtidas pela laminação de blocos ou tarugos proveniente de lingotamento contínuo.

2.6 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 dimensionado da estrutura como um todo. Fato que favorece escolher sistemas de ligações favorecendo a economia e segurança.

As ligações podem representar um custo elevado dependendo da sua complexidade, uma ligação complexa pode custar mais de três vezes o custo de uma ligação simples. O tipo de ligação deve ser elaborado levando em conta principalmente o tipo de montagem que será realizado, pois a dificuldade de ajuste em obra pode gerar atrasos e provocar acidentes durante o processo de união das partes. Atualmente existem duas maneiras de se tornar as uniões seguras, por meio de solda e pela união por parafusos, ou até mesmo as duas em conjunto. (GOECKS, 2011, p.15).

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. Dentre esta classificação temos as ligações rígidas, semi-rígidas e as flexíveis. As ligações também podem ser classificadas segundo os esforços solicitados, o que depende da posição destes esforços e também dos grupos de parafusos e linhas de soldas e assim as ligações podem ser dos tipos básicos: cisalhamento centrado, cisalhamento excêntrico, tração ou compressão e tração ou compressão por cisalhamento.

2.6.1 Ligações rígidas

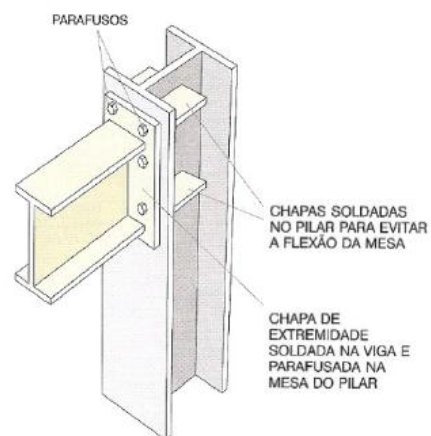
As ligações perfeitamente rígidas são aquelas em que, na presença do carregamento solicitado a estrutura, transmite o momento fletor em sua totalidade entre os elementos conectados, mantendo constante o ângulo relativo formado entre eles. Ou seja, ocorre a rotação do nó da ligação, sem a modificação 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.

Consideradas como aquelas nas quais é garantida a continuidade de estrutura e as rotações relativas são totalmente de, no mínimo, 90% da rotação teórica verificada sob condições de rótula ideal. (MAGGI, 2004, p.32).

Figura 15- Conexão soldada rígida na aba do pilar **Figura 16- Conexão rígida da viga na alma do pilar**



Fonte: ROSSATTO, 2015.



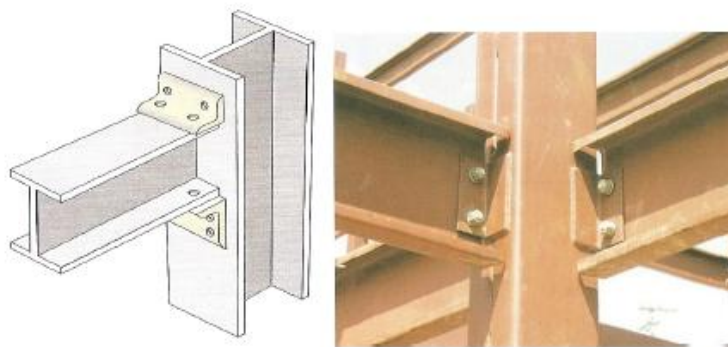
Fonte: ROSSATTO, 2015.

2.6.2 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.

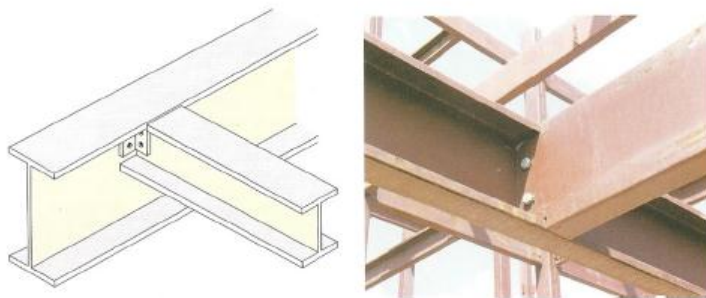
Consideradas como ligações nas quais as rotações relativas entre elementos conectados não são restringidos ou admitem uma restrição no Máximo igual a 20% da rotação ideal teórica, verificada sob condição de rótula ideal. (MAGGI, 2004, p.33).

Figura 17 - Conexão parafusada flexíveis da viga na aba do pilar



Fonte: ROSSATTO, 2015.

Figura 18- Conexões parafusadas flexíveis pelas almas das vigas



Fonte: ROSSATTO, 2015.

2.6.3 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).

Para utilizar as ligações semi-rígidas deverá ser conhecido a relação de dependência entre o momento resistente e a rotação. As ligações semi-rígidas são raramente utilizadas, devido à dificuldade de se estabelecer esta relação, e não serão abordadas nesse trabalho. Então o momento fletor transmitido neste tipo de ligação não é zero como nas ligações flexíveis, mas também não é o máximo como em ligações rígidas (COBRAPI, 1987).

Para calcular o momento em ligações semi-rígidas, é considerando uma carga distribuída P , então o momento real é dado pela Equação (2).

$$M = \frac{Pl^2}{12} - \frac{2EI\theta}{l} \quad (2)$$

Onde: P é a carga distribuída na estrutura;

θ é o ângulo de deformação devido a carga aplicada.

Para ligações teoricamente rígidas $\theta = 0$, o momento é dado pela Equação (3).

$$M = \frac{Pl^2}{12} \quad (3)$$

Para ligações em que permite alguma rotação das seções dos apoios, ou seja, θ . O momento é dado pela Equação (4).

$$M = \frac{2EI\theta}{l} \quad (4)$$

Para ligações teoricamente flexíveis, o $M = 0$, segue a Equação (5).

$$M = \frac{Pl^2}{12} - \frac{2EI\theta}{l} = 0 = \frac{Pl^2}{12} - \frac{2EI\theta}{l} \quad (5)$$

$$\text{Onde: } \frac{Pl^2}{12} = \frac{2EI\theta}{l} \quad \theta = \frac{Pl^3}{24EI}$$

2.7 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 está 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

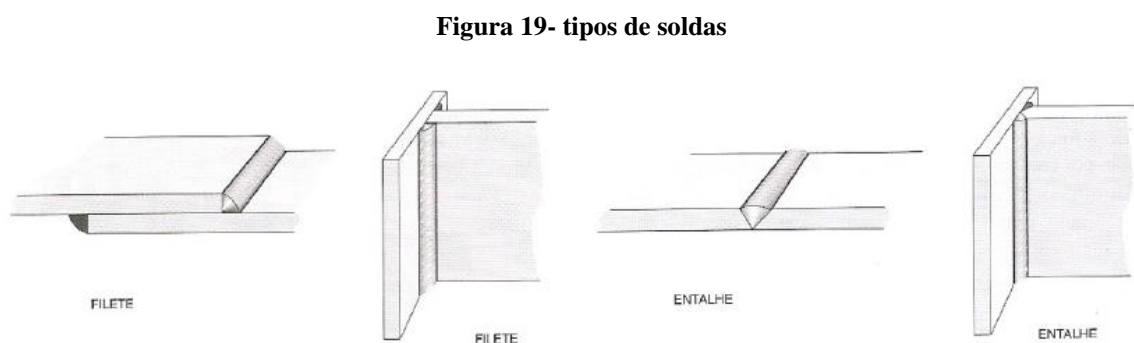
executadas em fábricas, para que união de materiais com geometrias complexas e para que a perfeita continuidade entre estes elementos seja precisa. Quando houver a impossibilidade que todas as soldas sejam feitas em fábrica, as que forem executadas em campo devem ter um maior controle e cuidado no momento de execução, pois, um problema na soldagem é irreversível podendo resultar em desaprumos, falta de alinhamento e perda de qualidade da ligação. Nas soldas realizadas em campo devem-se ter à disposição um local apropriado, andaimes e proteção contra vento e chuva.

A solda é um tipo de união por coalescência do material, obtida por fusão das partes adjacentes. A energia necessária para provocar a fusão pode ser de origem elétrica, química, óptica ou mecânica. As soldas mais empregadas na indústria de construção são as de energia elétrica. Em geral a fusão do aço é provocada pelo calor produzido por arco voltaico. Nos tipos mais usuais, o arco voltaico se dá entre um eletrodo metálico e o aço a soldar, havendo disposição do material do eletrodo, (PFEIL & PFEIL, 2012, p. 90).

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.

2.7.1 Tipos de ligações soldadas

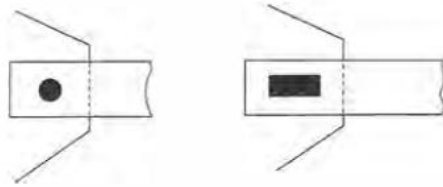
Os tipos de soldagem mais comuns são: entalhe e filete. Entalhe: o metal de solda é colocado entre os elementos a serem conectados. Filete: o metal de solda é colocado externamente aos elementos, Além de ranhura ou tampão, a solda de ranhura ou tampão se aplica somente a casos particulares, onde a solda de filete e entalhe são inadequadas. As posições podem ser horizontais, verticais ou sobre a cabeça, conforme a **Figura 19**.



Fonte: Dias, 2006.

A NBR 8800 (ABNT, 2008), diz que a solda de tampão é feita em furos circulares ou em rasgos, a sua área efetiva deve ser igual a área nominal da seção transversal do furo ou rasgo no plano das superfícies em contato.

Figura 20- solda de tampão, circular e alongada



Fonte: PFEIL & PFEIL, 2012.

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)

Goescks (2011), destaca os seguintes processos para soldagem: Processo a arco submerso (SAW); Processo MIG, MAG, TIG ou soldagem em atmosfera gasosa (GMAW); Processo manual com eletrodo revestido (SMAW); Processo arame tubular (FCAW) e Processo de soldagem eletro-escória.

2.7.2 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.

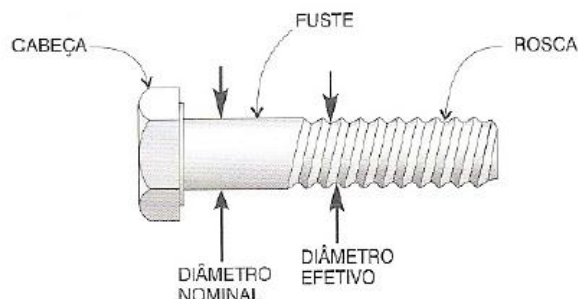
2.7.3 Desvantagens

- 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.

2.8 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. Os parafusos são formados pela cabeça, pelo fuste e pela rosca conforme a Figura 21.

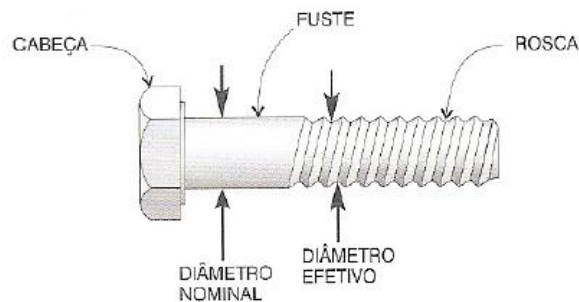
Figura 21- parafuso



Fonte: DIAS, 2006.

São identificados pelo diâmetro nominal, mas a resistência à tração é função do diâmetro efetivo. Suas dimensões são medidas em polegadas.

Figura 21- parafuso



Fonte: DIAS, 2006.

2.8.1 Tipos de parafusos

- Parafusos de alta resistência: podem necessitar de protensão na sua instalação (torque de montagem) e necessitam de cuidados especiais em relação às arruelas e às condições de acabamento das superfícies em contato das partes conectadas. Estes parafusos possuem elevada resistência sendo utilizados em peças de grande importância estrutural sujeitas a cargas estáticas e dinâmicas, resistindo aos esforços de cisalhamento.
- Parafusos usinados: os parafusos usinados são empregados em estruturas sujeitas a cargas dinâmicas;
- Parafusos comuns: são instalados sem necessidade de protensão e não necessitam de cuidados especiais. Entretanto a resistência destes parafusos é bem inferior à resistência dos parafusos de alta resistência. São fabricados em aço-carbono, designados como ASTM A307, ou apenas como A307, são usados para pequenas treliças, plataformas simples, passadiços, terças, vigas de tapamento, estruturas leves e etc. Possuem um baixo custo e baixa resistência. Os parafusos de alta resistência são utilizados em ligações de maior responsabilidade.

2.8.2 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.

2.8.3 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.

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 1986), devem ser usados soldas ou parafusos de alta resistência nos seguintes casos:

- a) Ligações de vigas e treliças das quais depende o sistema de contraventamento, ligações de vigas e treliças com pilares, e emendas de pilares nas estruturas com mais de 30 m de altura;
- b) Ligações e emendas de treliças de cobertura, ligações de treliças com pilares, emendas de pilares, ligações de contraventamentos de pilares, ligações de mãos francesas ou mísulas usadas para reforço de pórticos, e ligações de peças suportes de pontes rolantes, nas estruturas com pontes rolantes de capacidade superior a 50 KN;
- c) Emendas de pilares, nas estruturas com menos de 30 m de altura, caso a menor dimensão horizontal da estrutura seja inferior a 25% da altura;
- d) Ligações de peças suportes de maquinário ou peças sujeitas a impactos ou cargas cíclicas;
- e) Qualquer outra ligação que for especificada nos desenhos da estrutura.

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.

Utiliza-se a seguinte Expressão (6) para verificação da segurança estrutural:

$$R_d \geq S_d \quad (6)$$

Onde:

$$R_d = \frac{R_u}{\gamma_m} \quad (7)$$

R_d é o valor de cálculo dos esforços resistentes.

R_u é a resistência última dos esforços resistentes.

γ_m é o coeficiente de ponderação que leva em conta as incertezas das resistências.

$$S_d = \gamma_f \cdot S$$

S_d é o valor dos esforços atuantes.

S é o fator de carga do esforço atuante.

γ_f é o coeficiente de ponderação que leva em conta as incertezas das solicitações.

$$\gamma_m = \gamma_{m1} \times \gamma_{m2} \times \gamma_{m3}$$

Tabela 6- Valores dos coeficientes de ponderação das resistências γ_m

| MATERIAL | COMBINAÇÕES DE AÇÕES | | | |
|---|----------------------|---------|----------------------|--------------|
| | γ_m | NORMAIS | ESPECIAIS/CONSTRUÇÃO | EXCEPCIONAIS |
| Aço estrutural, pinos e parafusos – Estado limites de escoamento e flambagem. | γ_{m1} | 1,10 | 1,10 | 1,10 |
| Aço estrutural, pinos e parafusos – Estado limite de ruptura. | γ_{m2} | 1,35 | 1,35 | 1,15 |
| Concreto | γ_c | 1,40 | 1,20 | 1,20 |
| Aço de armadura de concreto armado | γ_s | 1,15 | 1,15 | 1,00 |

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

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;

$$S_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \cdot F_{Gi}) + \gamma_{q1} \cdot F_{Q1} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \cdot \Psi_{0j} \cdot F_{Qj}) \quad (8)$$

- Combinações últimas especiais: decorrem da atuação de ações variáveis de natureza ou intensidade especial;

$$S_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \cdot F_{Gi}) + \gamma_{q1} \cdot F_{Q1} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \cdot \Psi_{bj,ef} \cdot F_{Qj}) \quad (9)$$

- Combinações últimas de construção: decorrem de estados limites últimos já na fase da construção;

$$S_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \cdot F_{Gi}) + \gamma_{q1} \cdot F_{Q1} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \cdot \Psi_{bj,ef} \cdot F_{Qj}) \quad (10)$$

- Combinações últimas excepcionais: decorrem da atuação de ações excepcionais que podem provocar efeitos catastróficos.

$$S_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \cdot F_{Gi}) + F_{Qexc} + \sum_{j=1}^n (\gamma_{qj} \cdot \Psi_{0,jef} \cdot F_{Qj}) \quad (11)$$

Onde:

F_{Gi} são os valores característicos das ações permanentes.

F_{Q1} é o valor característico da ação variável considerada como principal para a combinação, ação variável especial ou ação variável de construção.

F_{Qj} são os valores característicos das ações variáveis das ações variáveis que podem atuar junto com a ação variável principal.

F_{Qexc} é o valor da ação transitória excepcional.

$\Psi_{0,jef}$ são iguais aos fatores Ψ_{0j} das combinações normais, salvo quando a ação variável F_{Q1} tiver um tempo de atuação muito pequeno, caso em que $\Psi_{0,jef}$ podem ser tomados com os correspondentes Ψ_{2j} .

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.

$$S_{ser} = \sum_{i=1}^m (F_{Gi}) + \sum_{j=1}^n (\gamma_{2j} \cdot F_{Qj}) \quad (12)$$

- 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.

$$S_{ser} = \sum_{i=1}^m (F_{Gi}) + \psi_1 \cdot F_{Q1} \sum_{j=2}^n (\gamma_{2j} \cdot F_{Qj}) \quad (13)$$

- 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.

$$S_{ser} = \sum_{i=1}^m (F_{Gi}) + F_{Q1} \sum_{j=2}^n (\gamma_{1j} \cdot F_{Qj}) \quad (14)$$

- 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.
 - Para cargas acidentais (CA) usa-se valores da ABNT (NBR 6120), valores do anexo B da ABNT (NBR 8800). Para cargas em passarelas de

pedestres usa-se a ABNT (NBR 7188). Para esforços causados pelo vento usa-se as cargas determinadas de acordo com a ABNT (NBR 6123).

3.1.1.3 Coeficientes de ponderação das ações

Tabela 7- Coeficientes de ponderação das ações no estado limite último (ELU)

| Combinações | AÇÕES PERMANENTES(γ_q) ^{a c} | | | |
|----------------------------|--|--|--|--------------|
| | Diretas | | | Indiretas |
| | Peso próprio de estruturas de aço | Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i> | Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos | |
| Normais | 1,25 (1,00) | 1,40 (1,00) | 1,50 (1,00) | 1,20 (0) |
| Especiais ou de construção | 1,15 (1,00) | 1,30 (1,00) | 1,40 (1,00) | 1,20 (0) |
| Excepcionais | 1,10 (1,00) | 1,20 (1,00) | 1,30 (1,00) | 0 (0) |
| | AÇÕES VARIÁVEIS (γ_q) ^{a d} | | | |
| | Efeito da Temperatura | Ação do Vento | Ações Truncadas | Demais ações |
| Normais | 1,20 | 1,40 | 1,20 | 1,50 |
| Especiais ou de construção | 1,00 | 1,20 | 1,10 | 1,30 |
| Excepcionais | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

^a Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

^b O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

^c Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 KN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, e nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.

^d Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança foram agrupadas, as ações variáveis que não favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas também todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,50 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 KN/m, ou 1,4 quando isso não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,30 e 1,20 e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

^e Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico, de modo que o valor dessa ação não possa superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado nesta Tabela se aplica a este valor limite.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

Em geral o coeficiente de ponderação das ações para os estados de limite de serviço, γ_f , é igual a 1,0. Nas combinações de serviço são utilizados fatores de redução ψ_1 e ψ_2 , para

obtenção dos valores frequentes e quase permanentes das ações variáveis, conforme a Tabela 8, onde ψ_0 é fator de combinação.

Tabela 8- Ações variáveis

| AÇÕES VARIÁVEIS γ_{f2}^f | | ψ_0 | ψ_0^i | ψ_0^j |
|--|---|----------|------------|------------|
| Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação | Locais que não há predominância de peso e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentração de pessoas ^g | 0,5 | 0,4 | 0,3 |
| | Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ^h | 0,7 | 0,6 | 0,4 |
| | Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em cobertura. | 0,8 | 0,7 | 0,6 |
| Vento | Pressão dinâmica do vento | 0,6 | 0,3 | 0 |
| Temperatura | Variações uniformes em relação à média anual | 0,6 | 0,5 | 0,3 |
| Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos | Passarelas de pedestre | 0,6 | 0,4 | 0,3 |
| | Vigas de rolamento de pontes rolantes | 1,0 | 0,8 | 0,5 |
| | Pilares e outros elementos que suportam vigas de rolamento | 0,7 | 0,6 | 0,4 |

^a Ações são quantificadas por seus valores representativos F_r , que pode ser valores característicos ou característicos nominais (ações permanentes e ações variáveis respectivamente), valores convencionais excepcionais, arbitrados para ações excepcionais e valores reduzidos em determinação da combinação.

^b Edificações residenciais de acesso restrito.

^c Edificações comerciais, de escritórios e de acesso ao público.

^d Para estado de limite de fadiga usar $\psi_1 = 1,0$.

^e Para combinações excepcionais onde a ação principal foi sismo, admite-se adotar para $\psi_2 = 0$

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

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

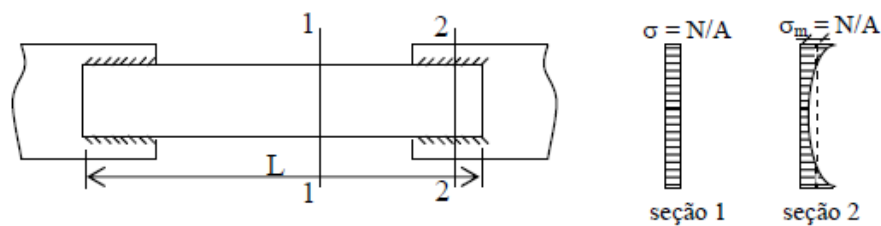
Uma barra de aço sujeita ao esforço normal de tração terá em seu dimensionamento duas regiões distintas, uma região onde não é permitido o escoamento generalizado, por inutilizar a peça devido à ocorrência de muito alongamento e outra região onde não há uniformidade de tensões (área furos), nesta região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

3.2.1.1 Peças sem furos (ligações soldadas)

O estado limite último é atingido quando ocorre o escoamento ao longo de toda a seção transversal, observe a Figura 22.

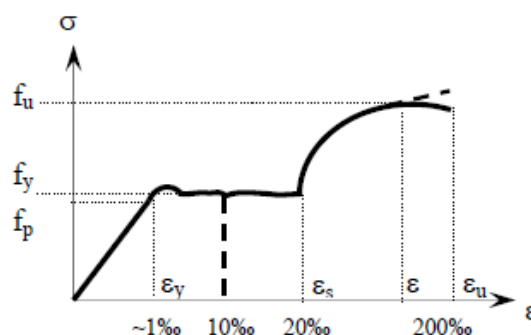
Figura 22- Peças com ligações soldadas sob tração



Fonte: PIGNATTA & FRUCHTENGARTEN, 2012.

Para $N_y = Af_y$ atinge-se a resistência ao escoamento ao longo de toda a seção transversal, tanto na seção 1 quanto na seção 2. Para esse valor de N , obtém-se $\Delta L_1 \cong 0,02L$, conforme o diagrama da Figura 23.

Figura 23- Diagrama tensões-deformação



Fonte: PIGNATTA & FRUCHTENGARTEN, 2012.

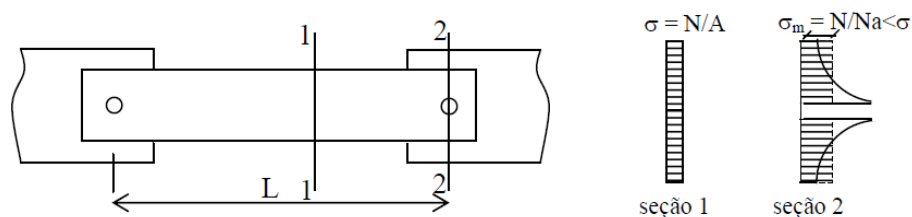
3.2.1.2 Peças com furos (ligações parafusadas)

A Figura 24 mostra ligação parafusada quando submetidas à tração. Nesse caso, quando se atinge a resistência ao escoamento ao longo de toda a seção transversal 2, a tensão média ao longo da seção 1 ainda será inferior a f_y , conforme a Equação (15).

$$\text{Se } \sigma_m = \frac{N}{A_n} = f_y, \text{ então } \sigma = \frac{N}{A} < f_y, \text{ pois } A > A_n. \quad (15)$$

Assim, ocorrem grandes deformações plásticas apenas na região dos furos e, como resultado, $\Delta L_2 \ll 0,02L$, representado na Figura 24.

Figura 24- Peças com ligações parafusadas sob tração axial



Fonte: PIGNATTA & FRUCHTENGARTEN, 2012.

Em edifícios, não se considera como estado limite último o escoamento da seção líquida de peças com ligações parafusadas, supõe-se a ocorrência da redistribuição plástica, podendo se atingir o carregamento correspondente à ruptura da seção líquida. São exceções: peças com furos muito alongado e material que não tem comportamento dúctil (problemas com fadiga).

3.2.1.3 Ruptura da seção com furos, de área A_n (Área líquida).

$$R_{dt} = \frac{A_{n,ef} \times f_u}{\gamma_{m2}} \quad (16)$$

Sendo:

$$A_{n,ef} = C_t \times A_n$$

Onde: $C_t \leq 1,0$ - coeficiente de redução da área líquida efetiva.

Conforme Pinheiro (2005), os valores de C_t são:

- $C_t = 1,0$, quando a transmissão de esforços é feita por todos os elementos.
- $C_t = 0,9$, para perfis I e H onde $b_f \geq \frac{2}{3}d$ e perfis T cortados desses perfis, com ligações nas mesas, tendo, no caso de ligações parafusadas, o número de parafusos ≤ 3 por linha de furação na direção da solicitação. Onde b_f é a largura da mesa e d é a altura do perfil.
- $C_t = 0,85$, para perfis I e H onde $b_f \geq \frac{2}{3}d$ e perfis T cortados desses perfis, e todos os demais perfis, incluindo barras compostas, tendo no caso de ligações parafusadas, o número de parafusos ≥ 3 por linha de furação na direção da solicitação.
- $C_t \leq 0,75$, todos os casos quando houver apenas 2 parafusos por linha de furação na direção da solicitação.

A área líquida é a área bruta excluindo a área de furos, dada pela Equação (17).

$$A_n = A_g - \sum A_f, \text{ em que } A_f = \text{Área de furos} \quad (17)$$

Quando a seção estiver furos em ziguezague, tem-se um aumento da resistência que é expresso com o aumento da área líquida. Então a área líquida é calculada pela Equação (18).

$$A_n = A_g - \sum A_f + \sum \frac{S^2}{4g} t \quad (18)$$

Onde: S é o espaçamento longitudinal entre dois furos consecutivos;

g é o espaçamento transversal entre dois furos consecutivos;

t é a espessura da peça.

3.2.1.4 Escoamento da seção bruta, de Área A_g .

$$R_{dt} = \frac{A_g \times f_y}{\gamma_{m1}} \quad (19)$$

- Peças com extremidades rosqueadas:

$$R_d = \frac{0,75 \times A_g \times f_u}{\gamma_{m2}} \leq \frac{A_g \times f_y}{\gamma_{m1}} \quad (20)$$

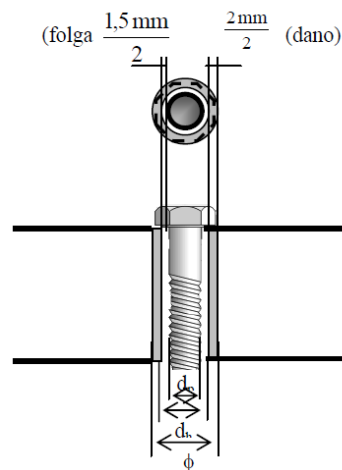
3.2.1.4.1 Limitações das peças tracionadas

O índice de esbeltez em barras tracionadas é calculado utilizando a Equação (21), onde: l é o comprimento e i é o raio de giração. Exceção de tirantes de barras redondas pré-dimensionadas, não pode, em princípio, exceder os seguintes valores limites: 240 para barras principais e 300 para barras secundárias.

$$\lambda = \frac{l}{i} \quad (21)$$

3.2.1.4.2 Diâmetro dos furos dos conectores

Figura 25- Furo padrão



Fonte: PIGNATTA & FRUCHTENGARTEN, 2012.

Para furos padrão usar $\phi = d_h + 3,5\text{mm}$

Onde: ϕ é o diâmetro nominal adotado para o projeto;

d_h é o diâmetro do parafuso mais a folga padrão de 1,5mm.

As dimensões máximas de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas são detalhadas na NBR 8800 (ABNT, 2008) item 6.3.6.

3.2.1.4.3 Distância mínima e máxima de furo a bordas

Tabela 9- Distância mínima do centro de um furo-padrão à borda^a

| DÍAMETRO D_B | BORDA CORTADA | BORDA LAMINADA |
|----------------|---------------|----------------|
|----------------|---------------|----------------|

| POL | MM | COM SERRA OU TESOURA MM | OU CORTADA COM MAÇARICO ^B |
|-------|-----|----------------------------|---|
| 1/2 | | 22 | 19 |
| 5/8 | 16 | 29 | 22 |
| 3/4 | | 32 | 26 |
| | 20 | 35 | 27 |
| 7/8 | 22 | 38 ^c | 29 |
| | 24 | 42 ^c | 31 |
| 1 | | 44 | 32 |
| 11/8 | 27 | 50 | 38 |
| | 30 | 53 | 39 |
| 11/4 | | 57 | 42 |
| | 36 | 64 | 46 |
| >11/4 | >36 | 1,75d _b | 1,25d _b |

^a são permitidas distâncias inferiores desta tabela, desde que esteja de acordo com a NBR 8800:2008 item 6.3.3.3.

^b As distâncias podem ser reduzidas 3mm, quando o furo está em um ponto onde a força solicitante de cálculo não exceda 25% da força resistente de cálculo.

^c Nas extremidades de cantoneiras de ligações de vigas e de chapas de extremidades para ligações flexíveis, esta distância pode ser igual a 32mm.

3.2.1.4.4 *Cisalhamento de Bloco*

Para o caso perfis de chapas finas tracionadas por conectores, além da ruptura da seção líquida o colapso por rasgamento ao longo de uma linha de conectores pode ser determinado no dimensionamento.

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{m2}} (0,60f_u \times A_{nv} + C_{ts} \times f_u \times A_{nt}) \leq (0,60f_u \times A_{gv} + C_{ts} \times f_u \times A_{nt}) \quad (22)$$

Onde: $0,60f_u$ e $0,60f_y$ são respectivamente as tensões da ruptura e escoamento a cisalhamento do aço;

A_{nv} e A_{gv} são respectivamente as áreas líquidas e brutas cisalhadas;

$C_{ts} = 1,0$ quando a tensão de tração na área A_{nt} é uniforme;

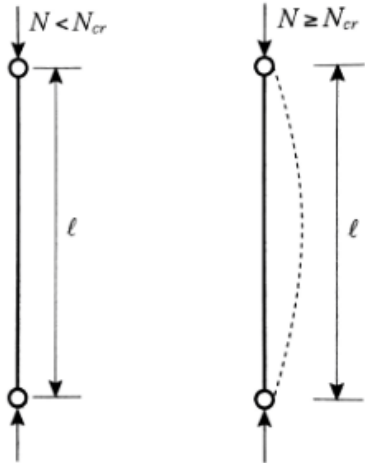
$C_{ts} = 0,5$ para tensão não uniforme.

3.2.2 **Compressão**

Ao contrario 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

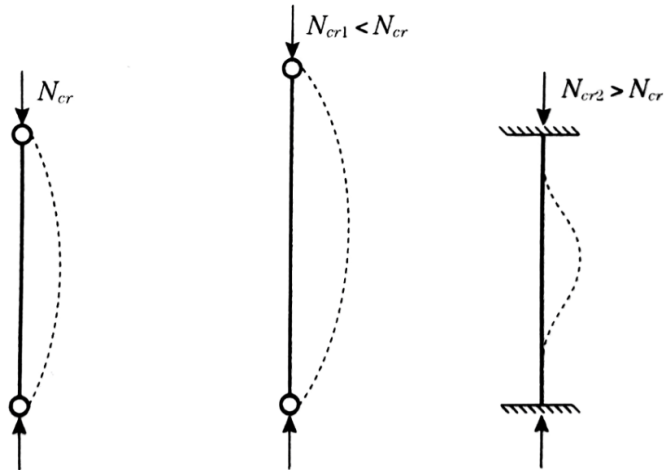
flexão (PFEIL & PFEIL, 2012). A Figura 26 ilustra o efeito de flambagem, assim como a Figura 27 mostra o comportamento de flambagem por flexão.

Figura 26 - Flambagem



Fonte: SILVA & PANNONI, 2010.

Figura 27 - Flambagem por flexão



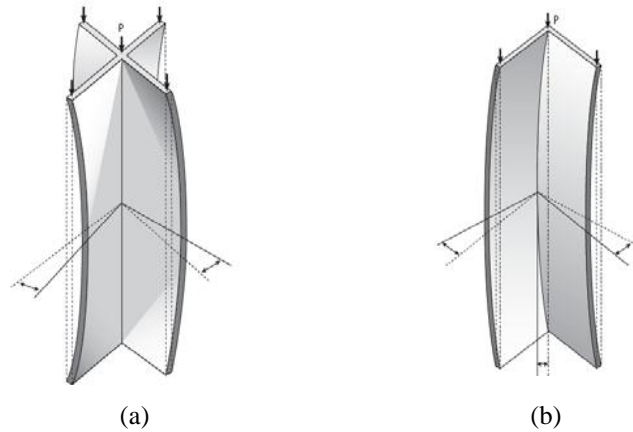
Fonte: SILVA & PANNONI, 2010.

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.

3.2.2.1 Flambagem de pilares

Em pilares de pequeno comprimento, com cruciforme pode ocorrer a *flambagem por torção*, conforme a Figura 28 (a). Em pilares com seção em forma de “L” ou “U”, pode ocorrer uma flambagem mista, a *flambagem por flexotorção*, Figura 28 (b).

Figura 28 - (a) Flambagem por torção, (b) Flambagem por flexotorção

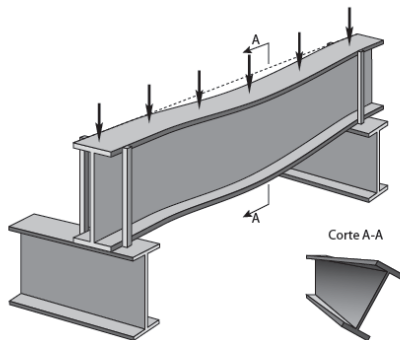


Fonte: SILVA & PANNONI, 2010.

3.2.2.2 Flambagem de vigas

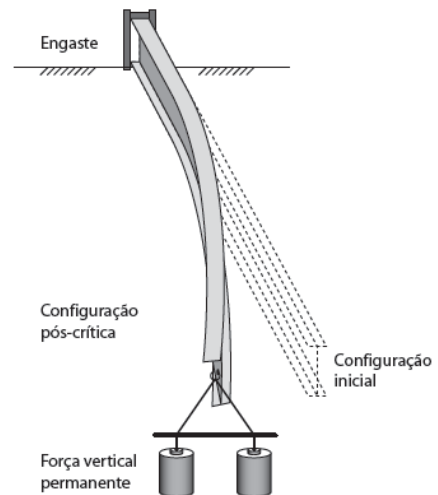
Em vigas com travamento lateral contínuo, não ocorre o fenômeno da flambagem lateral. Para vigas sem travamento contínuo a flambagem ocorre nas seguintes maneiras, ilustradas nas Figuras 29 e 30.

Figura 29- Flambagem lateral de viga biapoiada



Fone: SILVA & PANNONI, 2010.

Figura 30- Flambagem lateral de viga em balanço



Fone: SILVA & PANNONI, 2010.

A resistência causada por uma força axial de compressão R_{dc} em uma barra associada aos estados últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local, deve ser determinada pelo seguinte passo a passo.

3.2.2.3 Instabilidade global

Verificação da instabilidade global NBR 8800 (ABNT 2008) 5.3.4.1, esta verificação deve ser calculada em torno do eixo x e em torno do eixo y. Observando caso esteja travando em alguma dessas dimensões.

$$\lambda = \frac{Kl}{r} \quad (23)$$

Este valor não deve ser superior a 200. K é um coeficiente de flambagem fornecido pela Tabela 10.

Tabela 10- Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados

| | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) |
|--|------|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem | | | | | | |
| Valores teóricos de K_x ou K_y | 0,5 | 0,7 | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 2,0 |
| Valores recomendados | 0,65 | 0,80 | 1,2 | 1,0 | 2,1 | 2,0 |
| Código para condição de apoio | | Rotação e translação impedidas | | | | |
| | | Rotação livre, translação impedida | | | | |
| | | Rotação impedida, translação livre | | | | |
| | | Rotação e translação livres | | | | |

Fonte: NBR 8800, (ABNT 2008).

3.2.2.4 Verificação da instabilidade local (chapa).

Os elementos que fazem parte das seções transversais usuais, exceto as seções circulares para efeito de flambagem local são classificados em AA (duas bordas longitudinais vinculadas) e AL (apenas uma borda longitudinal vinculada). As barras submetidas à força axial de compressão, nas quais todos os elementos componentes da seção transversal possuem

relação entre largura e espessura (b/t) que não supere o valor de $(b/t)_{\text{mín}}$ conforme a Tabela 11, tem o fator de redução total $Q = 1$, ou seja está utilizando 100% da seção de geometria. Caso não o valor de Q será dado pelo produto de Q_s e Q_a . Onde Q_s e Q_a são fatores de redução encontrados através das Equações (24) a (32).

- Elementos comprimidos AL

Grupo 3

$$Q_s = 1,340 - 0,76 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \quad \text{para } 0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (24)$$

$$Q_s = \frac{0,53E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \quad \text{para } \frac{b}{t} > 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (25)$$

Grupo 4

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \quad \text{para } 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (26)$$

$$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \quad \text{para } \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (27)$$

Grupo 5

$$Q_s = 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \times \sqrt{\frac{f_y}{K_c E}}, \quad \text{para } 0,64 \sqrt{\frac{E}{\left(\frac{f_y}{K_c}\right)}} < \frac{b}{t} \leq 1,17 \sqrt{\frac{E}{\left(\frac{f_y}{K_c}\right)}} \quad (28)$$

$$Q_s = \frac{0,90E k_c}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \quad \text{para } \frac{b}{t} > 1,17 \sqrt{\frac{E}{\left(\frac{f_y}{K_c}\right)}} \quad (29)$$

Com o coeficiente K_c dado pela Equação ((30).

$$K_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}}, \text{ sendo } 0,35 \leq K_c \leq 0,76. \quad (30)$$

Grupo 6

$$Q_s = 1,908 - 1,22 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \quad \text{para } 0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (31)$$

$$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \quad \text{para } \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (32)$$

Onde:

h é a altura;

t_w é a espessura da alma;

b e t são largura e espessura do elemento, respectivamente.

- Elementos comprimidos AA

O fator de redução Q_a é calculado segundo a Equação (33).

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (33)$$

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef})t \quad (34)$$

$$b_{ef} = 1,92t \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \left[1 - \frac{c_a}{b} \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right] \leq b \quad (35)$$

c_a é um coeficiente igual a 0,38 para mesas ou almas de seção tubulares e 0,34 para todos os outros elementos e σ é a tensão que pode atuar no elemento analisado.

$$\sigma = Xf_y \quad (36)$$

Tabela 11- Valores de $(b/t)_{lim}$

| Elementos | Grupo | Descrição dos elementos | Alguns exemplos com indicação de b e t | $(b/t)_{lim}$ |
|-----------|-------|--|--|-------------------------------------|
| AA | 1 | <ul style="list-style-type: none"> Mesas ou almas de seções tubulares retangulares Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas | | $1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ |
| | 2 | <ul style="list-style-type: none"> Almas de seções I, H ou U Mesas ou almas de seção-caixão Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1 | | $1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ |
| AL | 3 | Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas de travessamento | | $0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ |
| | 4 | <ul style="list-style-type: none"> Mesas de seções I, H, T ou U laminadas Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas | | $0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ |
| | 5 | Mesas de seções I, H, T ou U soldadas ^a | | $0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}}$ |
| | 6 | Almas de seções T | | $0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ |

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

Força resultante

Determinação da força resultante é dada pela Equação (37).

$$R_{dc} = \frac{XQ A_g f_y}{\gamma_{m1}} \quad (37)$$

Onde: X é o fator de redução associado à resistência à compressão dado pelas seguintes equações (38) e (39).

$$\lambda_0 \leq 1,5 \quad X = 0,658\lambda_0^2 \quad (38)$$

$$\lambda_0 > 1,5 \quad X = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (39)$$

X também pode ser obtido na Figura 31 ou Tabela 12 a seguir, para o caso em que λ_0 não supere 3,0.

λ_0 é o índice de esbeltez reduzido é dado pela Equação (40).

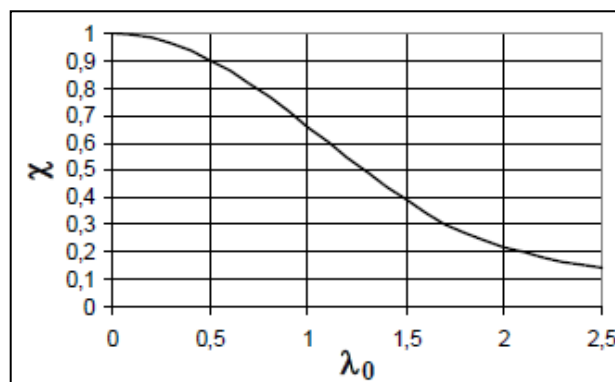
$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} \quad (40)$$

Q é fator de redução total associado à flambagem local.

N_e é a menor força crítica entre as flambagens por flexão, torção e flexotorção. Entretanto, se considerarmos apenas o caso de instabilidade por flexão, que é a principal preocupação nos perfis duplamente simétricos com seção transversal em forma de “I”, ou seja:

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (41)$$

Figura 31- relação X e λ_0



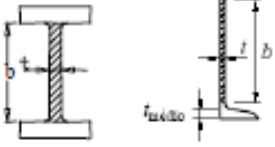

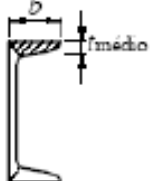
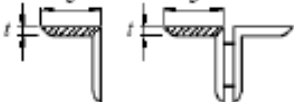
Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

Tabela 12- Valor de X em função de esbeltez λ_0

| λ_0 | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,999 | 0,998 | 0,998 | 0,997 | 0,997 |
| 0,1 | 0,996 | 0,995 | 0,994 | 0,993 | 0,992 | 0,991 | 0,989 | 0,988 | 0,987 | 0,985 |
| 0,2 | 0,983 | 0,982 | 0,980 | 0,978 | 0,976 | 0,974 | 0,972 | 0,970 | 0,968 | 0,965 |
| 0,3 | 0,963 | 0,961 | 0,958 | 0,955 | 0,953 | 0,950 | 0,947 | 0,944 | 0,941 | 0,938 |
| 0,4 | 0,935 | 0,932 | 0,929 | 0,926 | 0,922 | 0,919 | 0,915 | 0,912 | 0,908 | 0,904 |
| 0,5 | 0,901 | 0,897 | 0,893 | 0,889 | 0,885 | 0,881 | 0,877 | 0,873 | 0,869 | 0,864 |
| 0,6 | 0,860 | 0,856 | 0,851 | 0,847 | 0,842 | 0,838 | 0,833 | 0,829 | 0,824 | 0,819 |
| 0,7 | 0,815 | 0,810 | 0,805 | 0,800 | 0,795 | 0,790 | 0,785 | 0,780 | 0,775 | 0,770 |
| 0,8 | 0,765 | 0,760 | 0,755 | 0,750 | 0,744 | 0,739 | 0,734 | 0,728 | 0,723 | 0,718 |
| 0,9 | 0,712 | 0,707 | 0,702 | 0,696 | 0,691 | 0,685 | 0,680 | 0,674 | 0,669 | 0,664 |
| 1 | 0,658 | 0,652 | 0,647 | 0,641 | 0,636 | 0,630 | 0,625 | 0,619 | 0,614 | 0,608 |
| 1,1 | 0,603 | 0,597 | 0,592 | 0,586 | 0,580 | 0,575 | 0,569 | 0,564 | 0,558 | 0,553 |
| 1,2 | 0,547 | 0,542 | 0,536 | 0,531 | 0,525 | 0,520 | 0,515 | 0,509 | 0,504 | 0,498 |
| 1,3 | 0,493 | 0,488 | 0,482 | 0,477 | 0,472 | 0,466 | 0,461 | 0,456 | 0,451 | 0,445 |
| 1,4 | 0,440 | 0,435 | 0,430 | 0,425 | 0,420 | 0,415 | 0,410 | 0,405 | 0,400 | 0,395 |
| 1,5 | 0,390 | 0,385 | 0,380 | 0,375 | 0,370 | 0,365 | 0,360 | 0,356 | 0,351 | 0,347 |
| 1,6 | 0,343 | 0,338 | 0,334 | 0,330 | 0,326 | 0,322 | 0,318 | 0,314 | 0,311 | 0,307 |
| 1,7 | 0,303 | 0,300 | 0,296 | 0,293 | 0,290 | 0,286 | 0,283 | 0,280 | 0,277 | 0,274 |
| 1,8 | 0,271 | 0,268 | 0,265 | 0,262 | 0,259 | 0,256 | 0,253 | 0,251 | 0,248 | 0,246 |
| 1,9 | 0,243 | 0,240 | 0,238 | 0,235 | 0,233 | 0,231 | 0,228 | 0,226 | 0,224 | 0,221 |
| 2 | 0,219 | 0,217 | 0,215 | 0,213 | 0,211 | 0,209 | 0,207 | 0,205 | 0,203 | 0,201 |
| 2,1 | 0,199 | 0,197 | 0,195 | 0,193 | 0,192 | 0,190 | 0,188 | 0,186 | 0,185 | 0,183 |
| 2,2 | 0,181 | 0,180 | 0,178 | 0,176 | 0,175 | 0,173 | 0,172 | 0,170 | 0,169 | 0,167 |
| 2,3 | 0,166 | 0,164 | 0,163 | 0,162 | 0,160 | 0,159 | 0,157 | 0,156 | 0,155 | 0,154 |
| 2,4 | 0,152 | 0,151 | 0,150 | 0,149 | 0,147 | 0,146 | 0,145 | 0,144 | 0,143 | 0,141 |
| 2,5 | 0,140 | | | | | | | | | |

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

Tabela 13- Valores máximos de b/t para evitar instabilidade local

| | $(b/t)_{max}$ | $f_y = 25$ kN/cm ² (ASTM A36) | $f_y = 30$ kN/cm ² | $f_y = 34,5$ kN/cm ² (ASTM A572Gr50) |
|---|---|---|----------------------------------|--|
| Almas de seção I ou U  | $1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ | 42 | 38 | 36 |
| Aba de seção I  | perfil laminado | 16 | 14 | 13,5 |
| | perfil soldado $0,64 \sqrt{\frac{E}{f_y k_c}}$ $0,35 \leq k_c \leq 0,76 - \frac{4}{\sqrt{h/t_w}} \leq 0,76$ | para $k_c = 0,35$ | | |
| | | 11 | 10 | 9 |
| | | para $0,35 \leq k_c \leq 0,76$, usar as expressões a esquerda | | |
| | | para $k_c = 0,76$ | | |
| 16 | 14 | 13,4 | | |
| Aba de seção U  | perfil laminado | 16 | 14 | 13,5 |
| Abas de cantoneiras  | perfil laminado | 13 | 12 | 11 |

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

3.2.3 Flexão

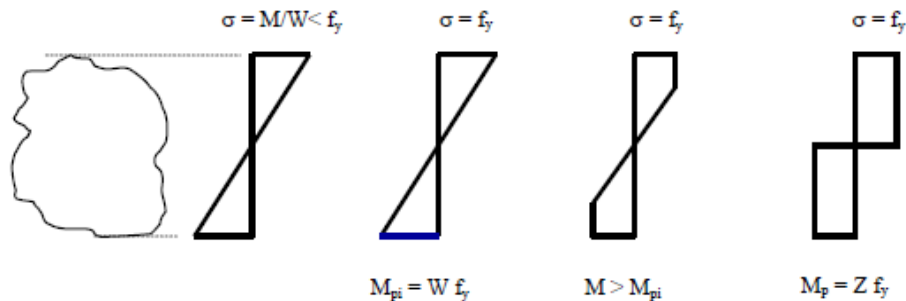
Para o dimensionamento de barras à flexão, é necessário determinar quais esforços internos solicitantes atuam na barra, além do momento fletor será feita então a classificação da flexão em barras segundo os esforços atuantes. A classificação de flexão em barras é classificada da seguinte maneira:

- 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.
- Efeito do momento fletor em vigas contidas lateralmente

Dada uma seção genérica, na figura 32 são apresentados os diagramas de tensão normal em função do momento fletor aplicado. M_p é o momento que causa plastificação total da seção transversal e M_{pi} é o momento de início de plastificação, ou seja, que leva ao escoamento (f_y) apenas a fibra mais solicitada, admitindo-se diagrama tensão-deformação elastoplástico perfeito.

Figura 32-O efeito do momento fletor



Fonte: PIGNATTA & FRUCHTENGARTEN, 2012.

- Instabilidade local
 - Instabilidade lateral de alma

A alma de uma barra solicitada por compressão provocada por uma força localizada que atue na mesa comprimida (Figura 33) deve ser verificada para o estado-limite último de instabilidade lateral conforme formulação da ABNT 8800 (NBR, 2008). Essa verificação é dispensada, caso o deslocamento lateral relativo entre a mesa comprimida carregada e a mesa tracionada seja impedido no ponto de aplicação da força.

Figura 33- Instabilidade local das chapas componentes do perfil



(a) instabilidade lateral de alma

(b) instabilidade local da mesa

(c) instabilidade local da alma


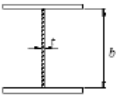
Fonte: PIGNATTA & FRUCHTENGARTEN, 2012.

- Instabilidade local de mesa e alma

Os efeitos da instabilidade local de mesa e alma (casos b e c da Figura 33) devem ser evitados. Para perfis formados por chapas com esbeltezes inferiores aos valores apresentados na tabela 3.1, tais efeitos podem ser desconsiderados, caso contrário, ele deve ser levado em conta na determinação do momento fletor resistente, conforme a formulação apresentada na Tabela 14.

Tabela 14- Valores máximos de esbelteza de chapa

(válidos para seção I bissimétrica e seção U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia)

| | b/t | f_y= 25 kN/cm² | f_y= 30 kN/cm² | ASTM A572Gr50 f_y=34,5kN/cm² |
|--|-----------------------------|--|--|--|
|  | $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ | 11 | 10 | 9,2 |
|  | $3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ | 106 | 98 | 91,6 |

Fonte: PIGNATTA & FRUCHTENGARTEN, 2012.

➤ Intabilidade local da mesa

O calculo do momento fletor resistente para o estado-limite de flambagem de mesa comprimida (FLM) é dado pela Equação (42).

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{1,1} \quad (42)$$

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow M_{RK} = M_p \quad (43)$$

$$\lambda_p \leq \lambda < \lambda_r \rightarrow M_{RK} = M_p - (M_p - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \quad (44)$$

$$\lambda \geq \lambda_r \rightarrow M_{RK} = M_{cr} \quad (45)$$

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} \quad (46)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (47)$$

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{EK_c}{(f_y - \sigma_r)}} \text{ perfis soldados} \quad (48)$$

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{EK_c}{(f_y - \sigma_r)}} \text{ perfis laminados} \quad (49)$$

$$M_p = Z_x F_y \quad (50)$$

$$M_r = W_x (F_y - \sigma_r) \quad (51)$$

$$M_{cr} = K_c \frac{0,90E}{\lambda^2} W \text{ perfis soldados} \quad (52)$$

$$M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W \text{ perfis laminados} \quad (53)$$

$$\sigma_r = 0,3f_y \quad (54)$$

➤ Instabilidade local de alma

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow M_{RK} = M_{pl} \quad (55)$$

$$\lambda_p \leq \lambda < \lambda_r \rightarrow M_{RK} = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \quad (56)$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (57)$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (58)$$

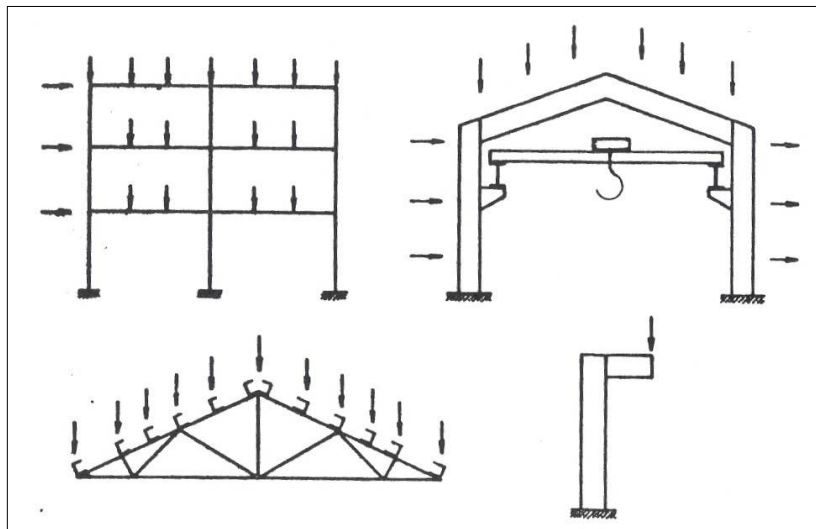
$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (59)$$

$$M_{pl} = Z_x F_y \quad (60)$$

$$M_r = W_x F_y \quad (61)$$

- 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. Na Figura 34 são mostradas algumas peças sob flexão composta.

Figura 34- Exemplos de peças sob flexão composta



Fonte: PIGNATTA & FRUCHTENGARTEN, 2012.

Para a atuação simultânea da força axial de tração ou de compressão e de momentos fletores, deve ser obedecida a limitação fornecida pelas seguintes expressões de interação.

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2 \quad (62)$$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (63)$$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2 \quad (64)$$

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (65)$$

Onde:

N_{Sd} é a força axial solicitante de cálculo solicitante de cálculo de tração ou de compressão, a que for aplicável;

N_{Rd} é a força axial resistente de cálculo de tração ou de compressão, a que for aplicável;

$M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$ são os momentos fletore solicitantes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y da seção transversal;

$M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ são os momentos fletore resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y da seção transversal.

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, a planta baixa do mezanino é apresentada em anexo deste trabalho. 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.

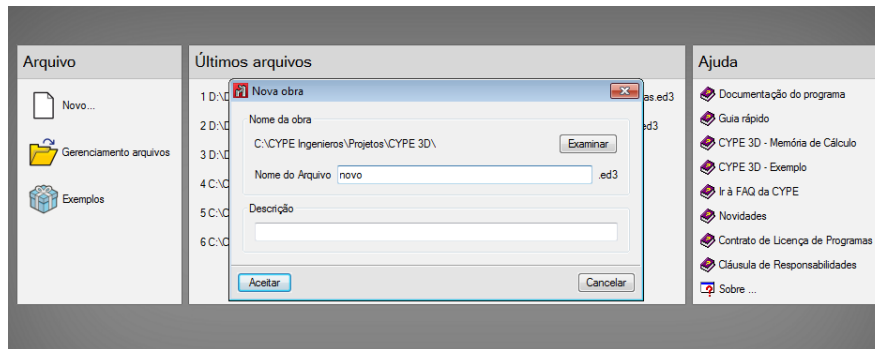
4.1 DADOS PRELIMINARES DO PROJETO

- 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, $f_y = 345 \text{ MPa}$
- Piso em concreto armado com $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$
- Escada pré-fabricada aço estrutural ASTM A36

4.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL

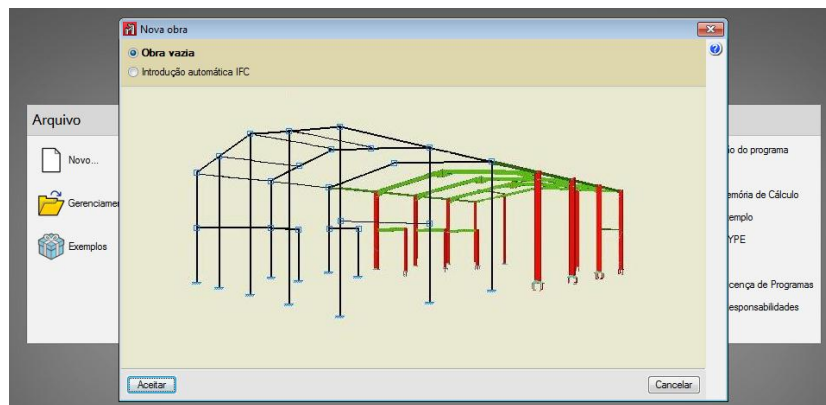
Neste tópico é apresentado o processo de lançamento das estruturas no software, onde estas estruturas serão dimensionadas e comparadas, bem como descrições das hipóteses e cargas adotadas de acordo com as particularidades de cada programa. A Figura 35 apresenta a segunda tela do software, após escolher 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 36.

Figura 35- CYPE 3D Nova Obra



Fonte: CYPE 3D-v2017.

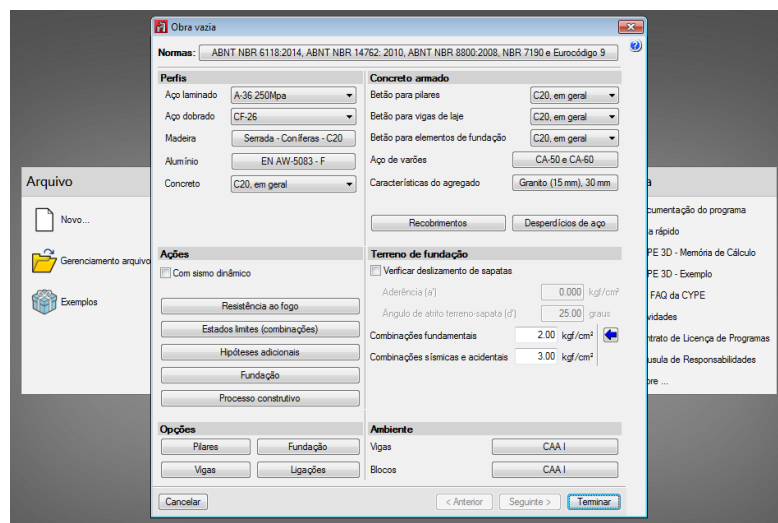
Figura 36- Escolha por uma obra vazia ou uma existente



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 37.

Figura 37- Definição dos materiais

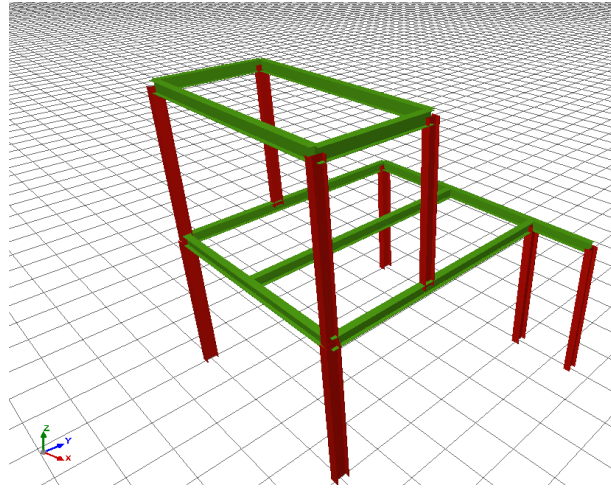


Fonte: CYPE 3D-v2017.

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, define-se os tipos de ligações internas e externas da estrutura, como também se insere todas as placas e barras consideradas. A Figura 38, apresenta a geometria da estrutura do mezanino.

Figura 38- 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 15. Para os pilares inferiores do mezanino é utilizado CVS 250X33 e para as demais barras o CVS 300X70, esta definição pode ser observada Figura 41. O perfil CVS 250X33 é detalhado na Figura 39 e o perfil CVS 300X70 é detalhado na Figura 40.

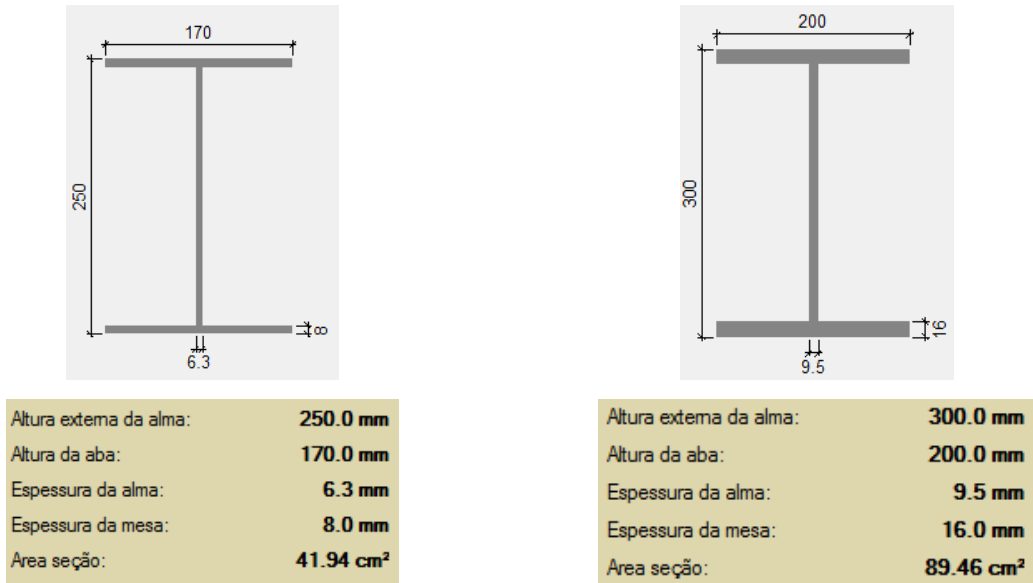
Tabela 15- Definição do elemento estrutural

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

Fonte: CYPE 3D-v2017.

Figura 39- perfil CVS 250X33

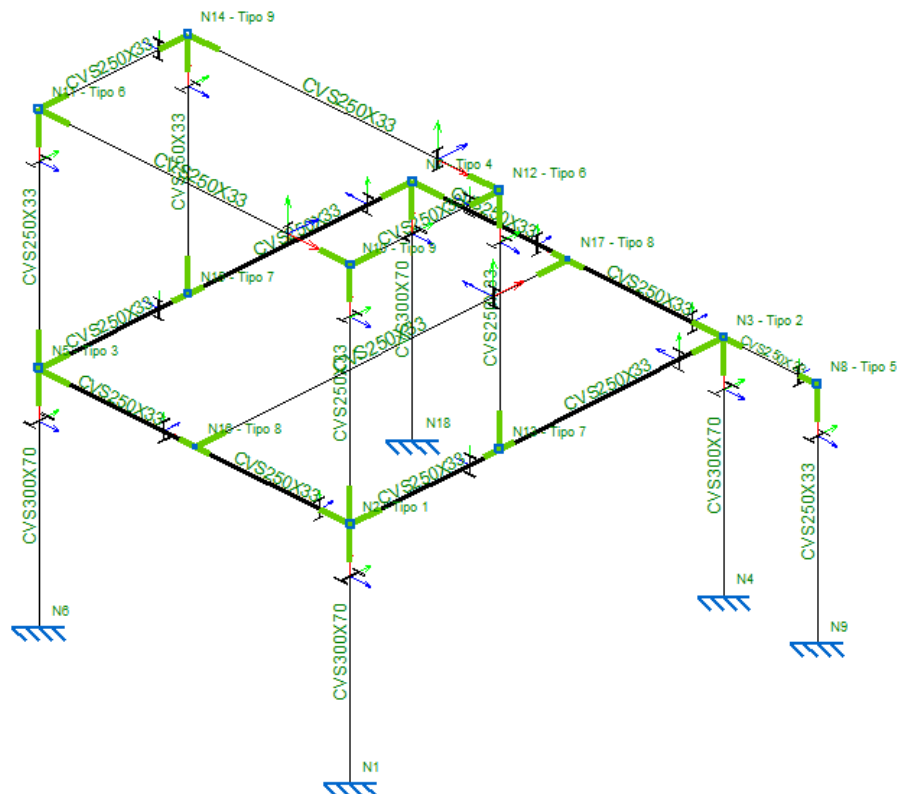
Figura 40- perfil CVS 300X70



Fonte: CYPE 3D-v2017

Com todos os materiais definidos é possível gerar as ligações, a Figura 41 mostra o nome de cada ligação para então serem analisadas. O mezanino conta com placas de concreto verificadas segundo ABNT NBR 6118:2014.

Figura 41- Ligações Geradas



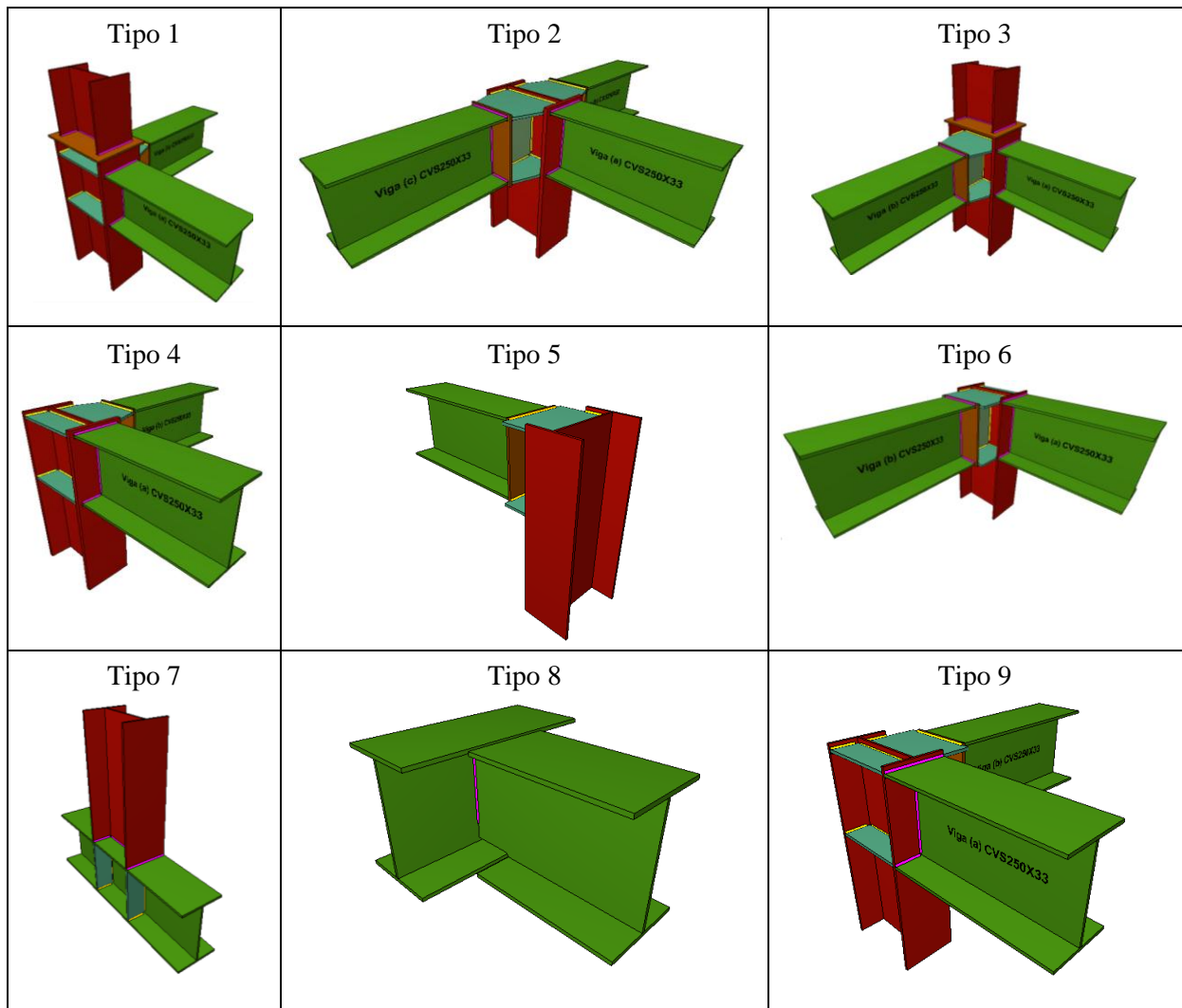
Fonte: CYPE 3D-v2017.

Com todas as ligações geradas, estas foram calculadas em duas situações citadas nos tópicos 4.3.1 e 4.3.2.

4.3.1 Resultado de dimensionamento para ligações soldadas

A Figura 42 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 16, já a quantidade de elementos está descrita na Tabela 17.

Figura 42- Ligações soldadas



Fonte: CYPE 3D-v2017

Tabela 16-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 |
| | No local de montagem | De filete | 3 | 580 |
| | | | 4 | 9742 |
| | | | 5 | 14640 |
| | | | | |

Fonte: CYPE 3D-v2017.

4.3.2 Resultado de dimensionamento para ligações parafusadas

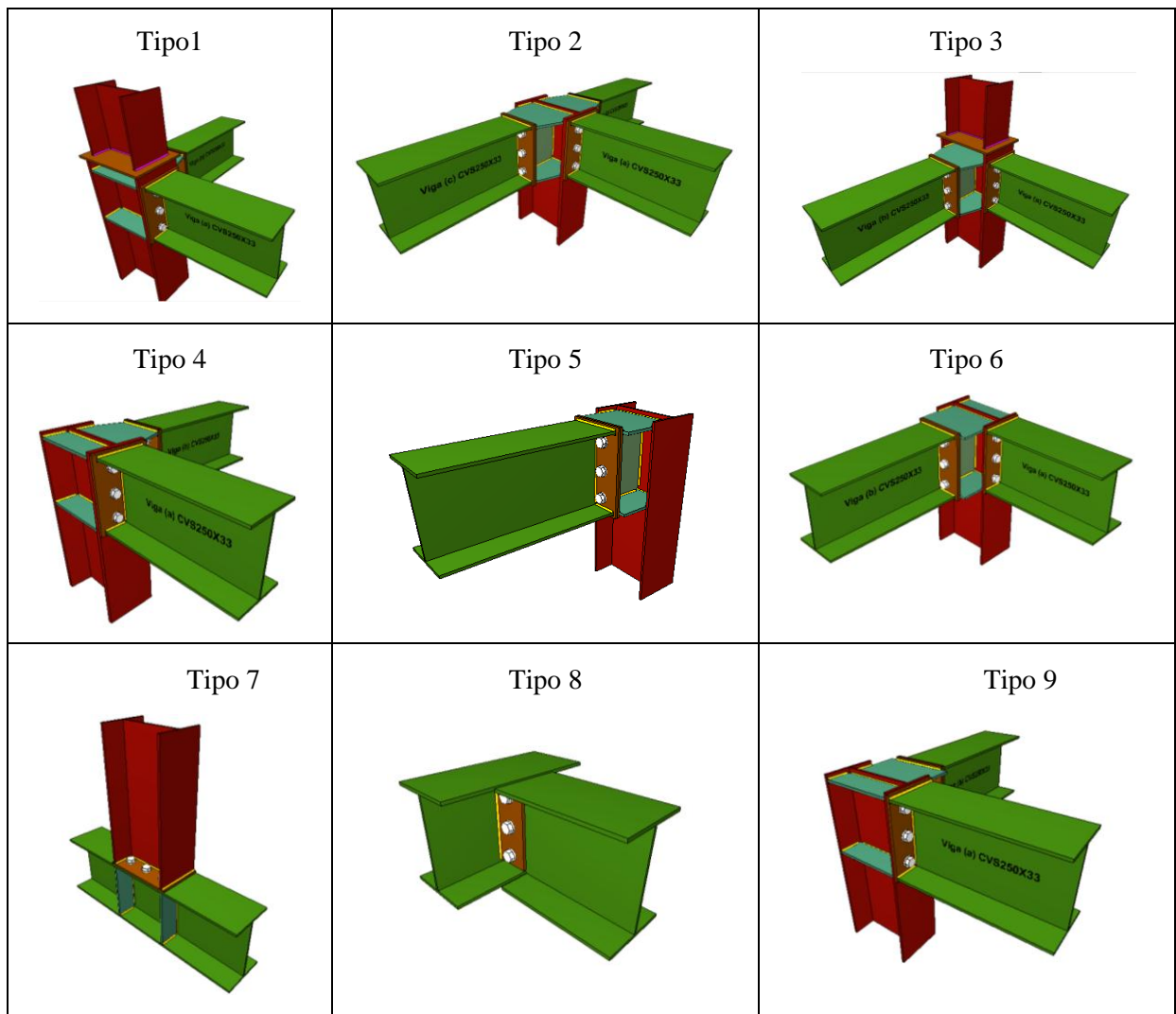
Tabela 17- Quantidade de elementos de ligações soldadas

| 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 |
| | Chapas | 5 | 175x234x7 | 11.25 |
| | | 5 | 205x233x7 | 13.12 |
| | | 5 | 190x270x8 | 16.11 |
| | | 5 | 190x260x8 | 15.51 |
| | | 2 | 230x330x10 | 11.92 |
| | Total | | | 159.02 |

Fonte: CYPE 3D-v2017.

As ligações parafusadas são apresentadas na Figura 43. 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 18, já a quantidade de elementos está descrita na Tabela 19 e a quantidade de parafusos é apresentada na Tabela 20.

Figura 43- Ligações Parafusadas



Fonte: CYPE 3D-v2017.

Tabela 18- 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 |
| | No local de montagem | De filete | 6 | 10246 |
| | | | 9 | 1614 |
| | | | 4 | 886 |
| | | | 5 | 1348 |

Fonte: CYPE 3D-v2017.

Tabela 19- 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 | |
| | Chapas | 5 | 175x234x7 | 11.25 | |
| | | 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 20- 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 21 mostra um comparativo entre os comportamentos máximos e mínimos de deslocamentos e rotação nos eixos x, y e z da estrutura.

Tabela 21- Deslocamento e rotações estruturais

| DEFORMAÇÕES | | LIGAÇÃO SOLDADA | | LIGAÇÃO PARAFUSADA | |
|-----------------|-------|-----------------|-------|--------------------|-------|
| | Eixo | Mín | Máx | Mín | Máx |
| Translação (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 |
| Rotação (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.

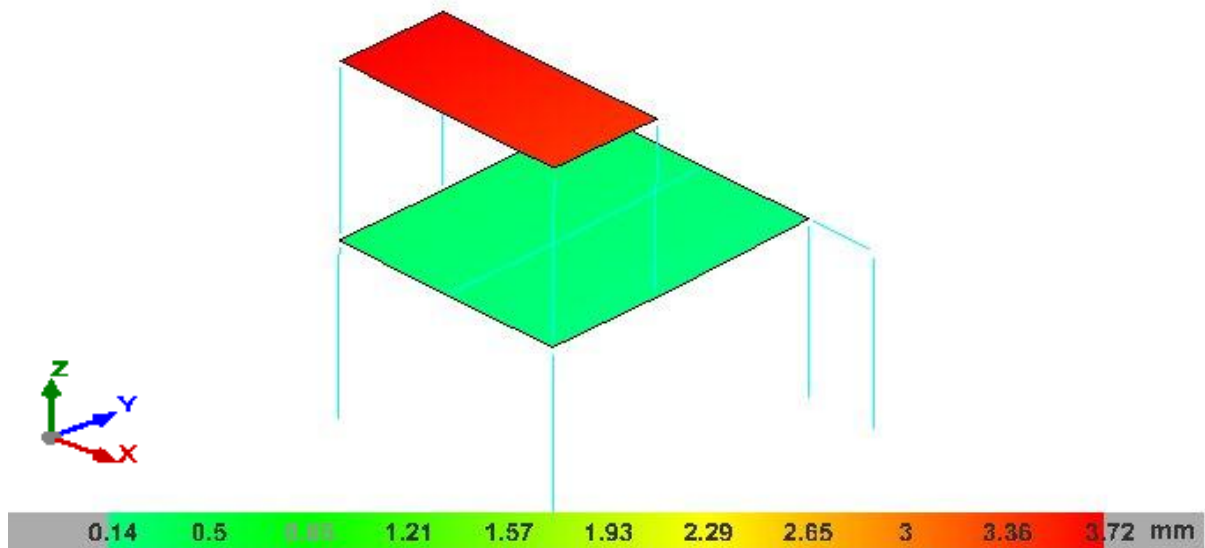
Os deslocamentos decorrem do efeito acumulado das deformações nos pontos de ligações na estrutura. Pode ser entendido como uma translação ou uma rotação de algum ponto, a translação é o deslocamento linear, já a rotação é o descolamento angular.

Através da Tabela 21 verifica-se que a translação máxima no eixo Y para a estrutura em ligações soldadas foi de 16% menor em relação á estrutura dimensionada com ligações parafusadas, levando em consideração que as duas estruturas foram analisadas com o mesmo tipo de perfis. Estes dados são verificados na Figura 44 e Figura 45. A rotação máxima no eixo X na estrutura com ligações soldadas é menor em aproximadamente 4,92% em relação á 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

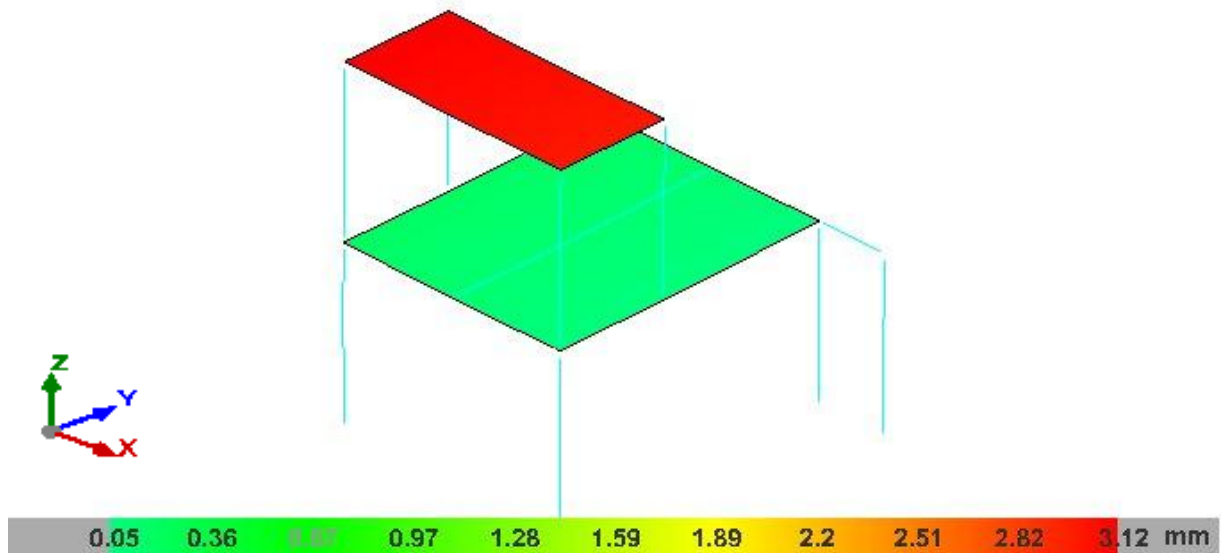
área de contato da ligação soldada é maior que a área de contato para a ligação parafusada, fato que influencia no deslocamento gerado na estrutura.

Figura 44- Deslocamento em Y/ Ligação Parafusada.



Fonte: CYPE 3D-v2017.

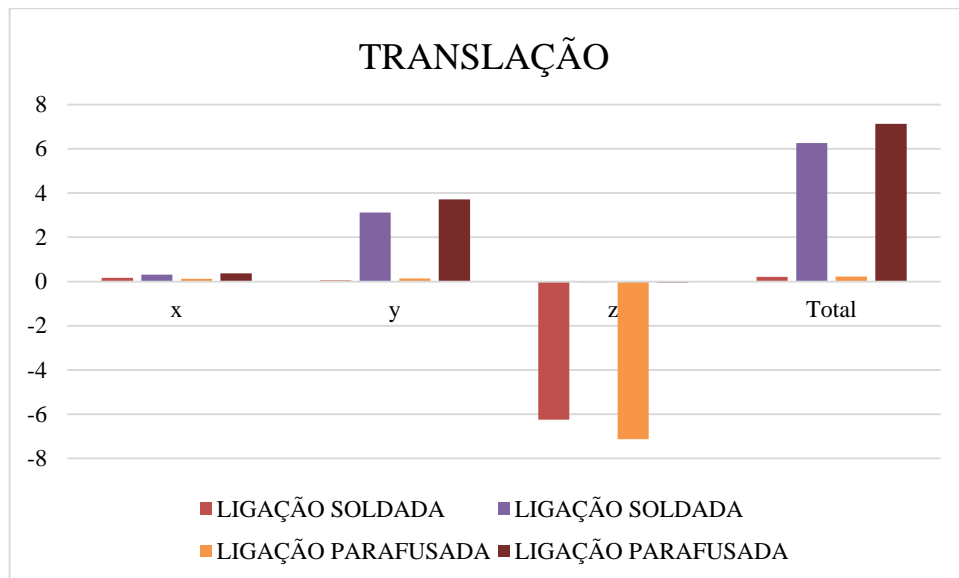
Figura 45- Deslocamento em Y/ Ligação Soldada.



Fonte: CYPE 3D-v2017.

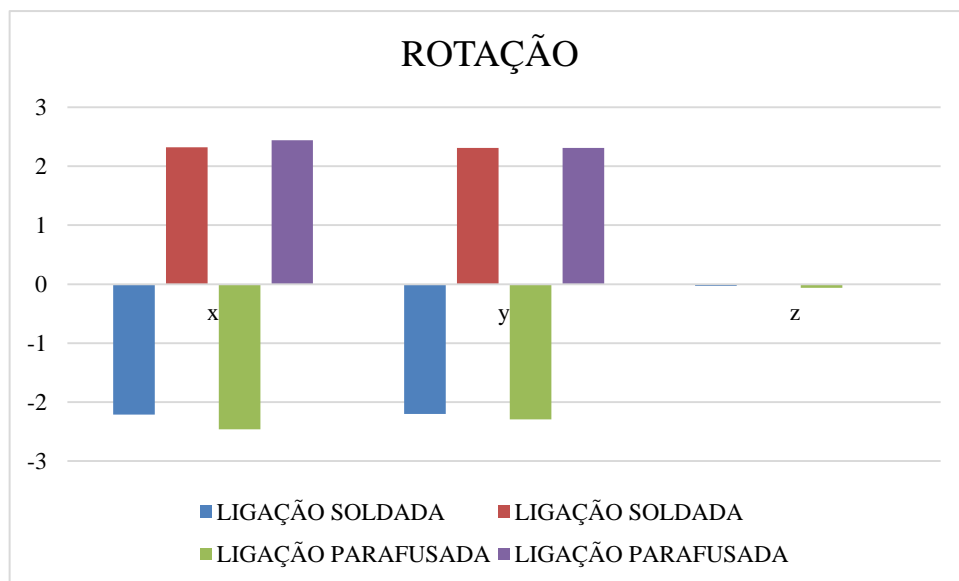
O Gráfico 1 apresenta o comparativo entre os valores máximos e mínimos de deslocamentos de translação encontrados nos dois modelos de ligações.

Gráfico 1- Deslocamento devido a translação da estrutura.



O Gráfico 2 apresenta os valores de deformações devido a rotação da estrutura, comparados nos dois modelos de ligações.

Gráfico 2- Deslocamento devido a rotação.



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 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 22 e Tabela

23 apresentam a verificação da chapa nos dois tipos de ligações. O detalhamento das ligações tipo 1 se encontra em anexo deste trabalho.

Tabela 22- Verificação para ligação Parafusada

| VERIFICAÇÃO | UNIDADES | DESAVORÁVEL | 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 23- verificação para ligação soldada

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

Fonte: CYPE 3D-v2017.

Analisando as tabelas Tabela 22 e Tabela 23, 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 analisou-se também uma estrutura dimensionada com ligações mistas (ligações soldadas e parafusadas), onde os valores referentes aos deslocamentos estão descritos na Tabela 24. 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.

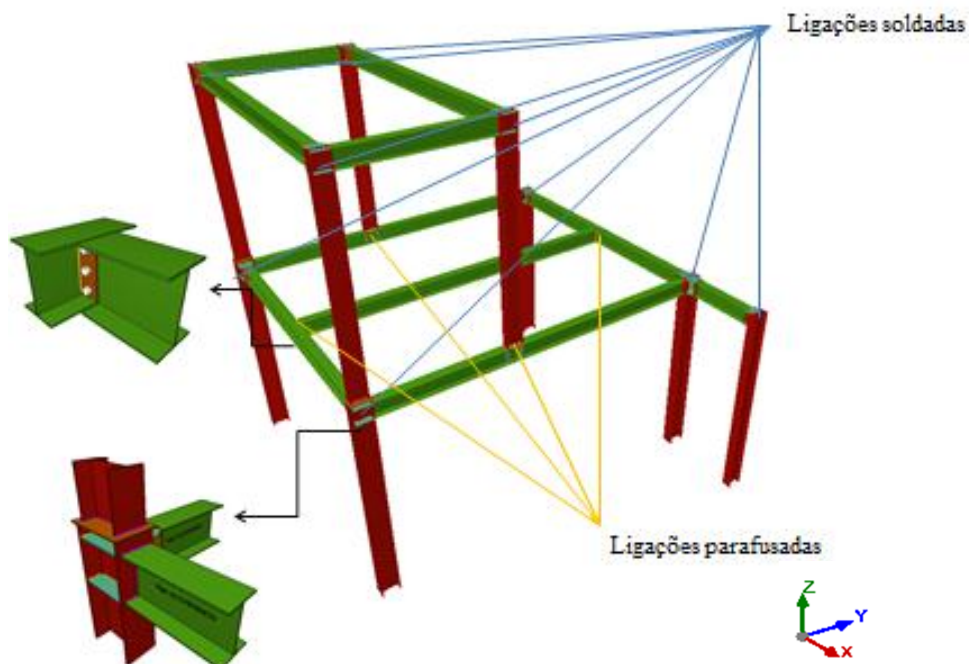
Tabela 24- Deslocamento e rotações estruturais para ligações mista

| DEFORMAÇÕES | | LIGAÇÃO SOLDADA E PARAFUSADA | |
|----------------------|-------|------------------------------|-------|
| | | Mín | Máx |
| Deslocamento (mm) | Eixo | | |
| | x | 0,13 | 0,37 |
| | y | 0,14 | 3,72 |
| | z | -6,25 | -0,04 |
| | Total | 0,21 | 6,26 |
| Rotação (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 46, 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 46- 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 à 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 25.

Tabela 25- 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 25 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 16, Tabela 17, Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20 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. **Edificação de aço no Brasil**. 3ª ed. São Paulo: Zigurate, 2002.

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

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/>>. Acesso em: 20/02/2019.

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.

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.

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.pdf

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.

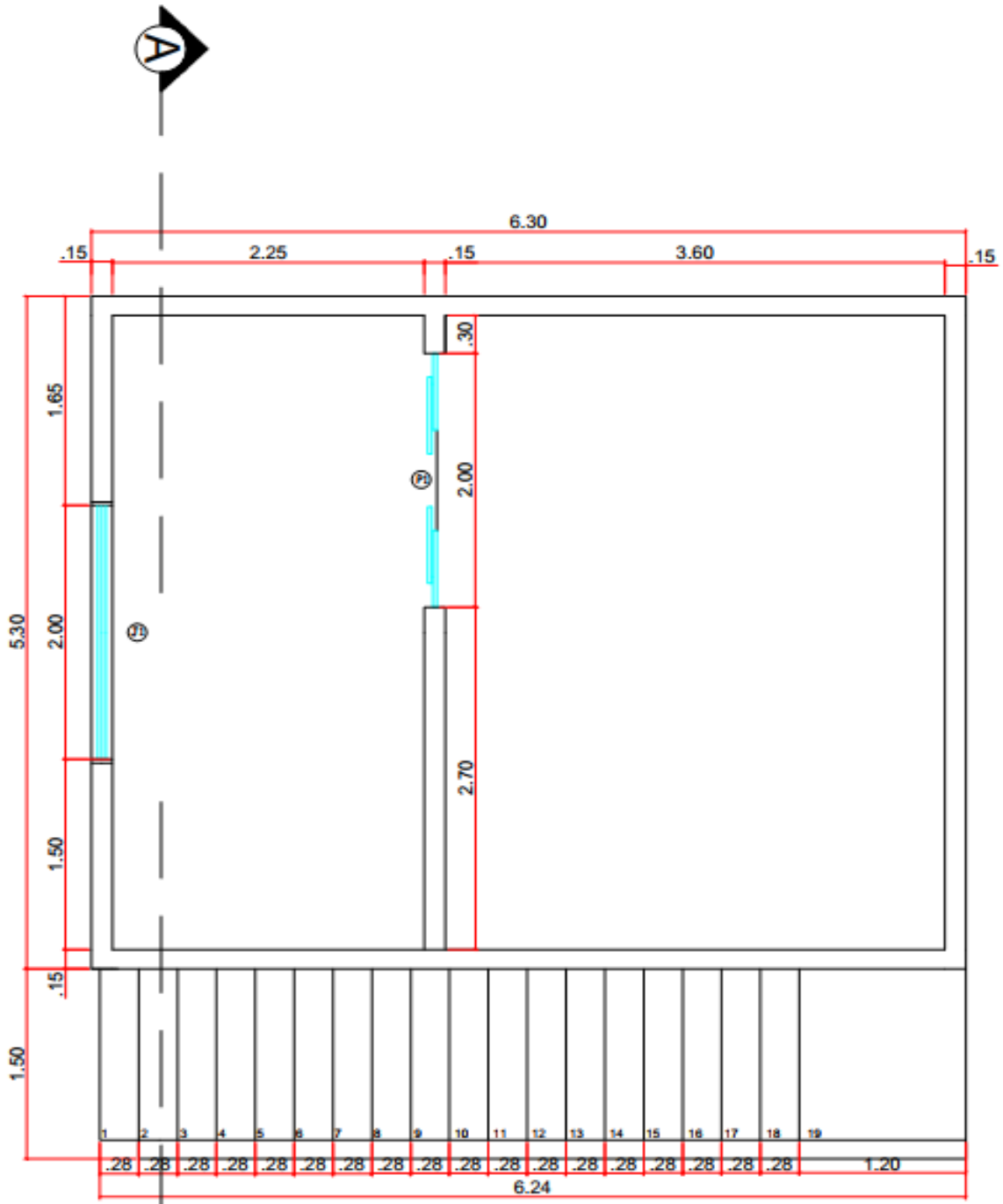
SILVA, Valdir Pignatta; PANNONI Fabio Domingos. **Estruturas de aço para edifícios**: aspectos tecnológicos e de concepção. São Paulo: Blucher, 2010.

7 ANEXO

- PLANTA BAIXA DO MEZANINO
- MEZANINO EM 3D
- DETALHAMENTO DAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS TIPO 1
- DETALHAMENTO DAS LIGAÇÕES SOLDADAS TIPO 1

PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

PROJETO ARQUITETÔNICO DO MEZANINO



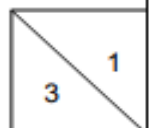
PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

PLANTA BAIXA - Nivel 0,00

ESCALA 1:50

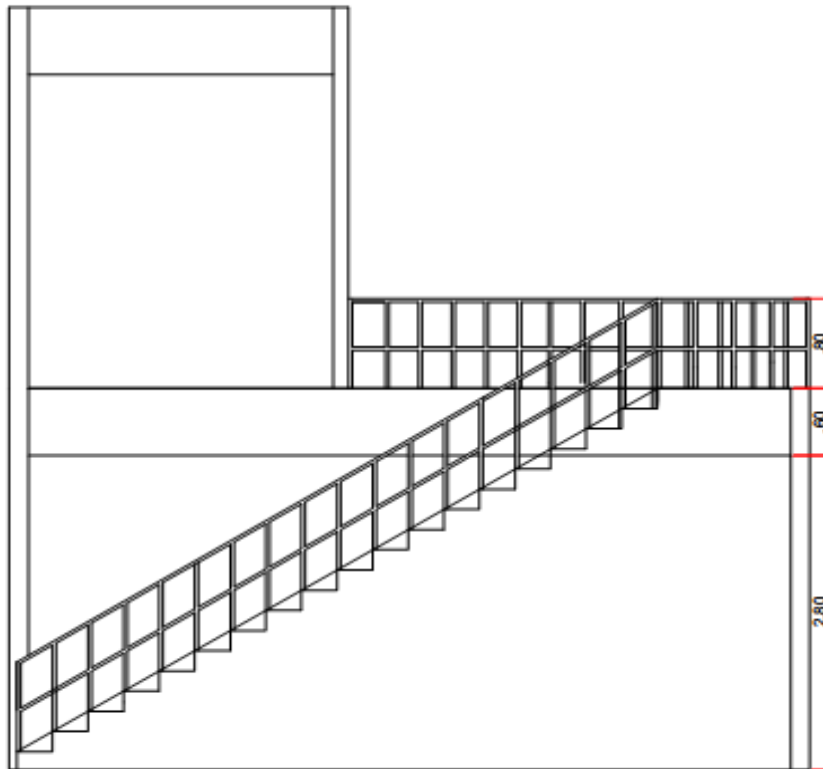
VISTA 3D



PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

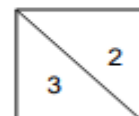
PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

PROJETO ARQUITETÔNICO DO MEZANINO



CORTE A - A
ESCALA 1:50

VISTA 3D



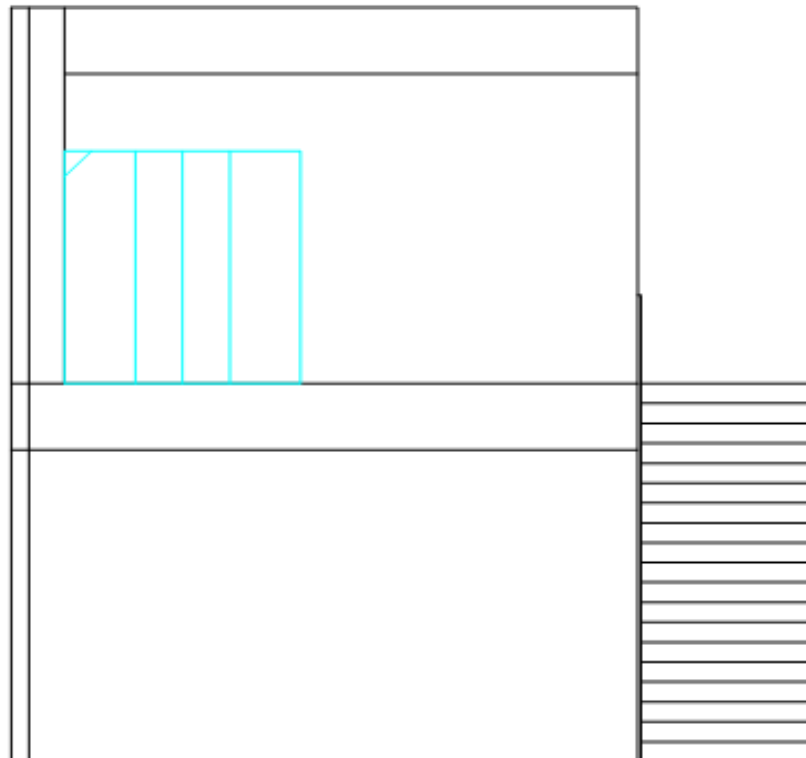
PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

PROJETO ARQUITETÔNICO DO MEZANINO



QUADRO DE ABERTURAS

PORTAS E JANELAS

| DES. | TAMANHO (lxh) | TIPO | FECHAMENTO | QUANT. |
|------|---------------|-------|------------|--------|
| P1 | 2,00 x 2,10 | ABRIR | VIDRO | 01 |
| J1 | 2,00 x 1,00 | ABRIR | VIDRO | 01 |

VISTA 3D

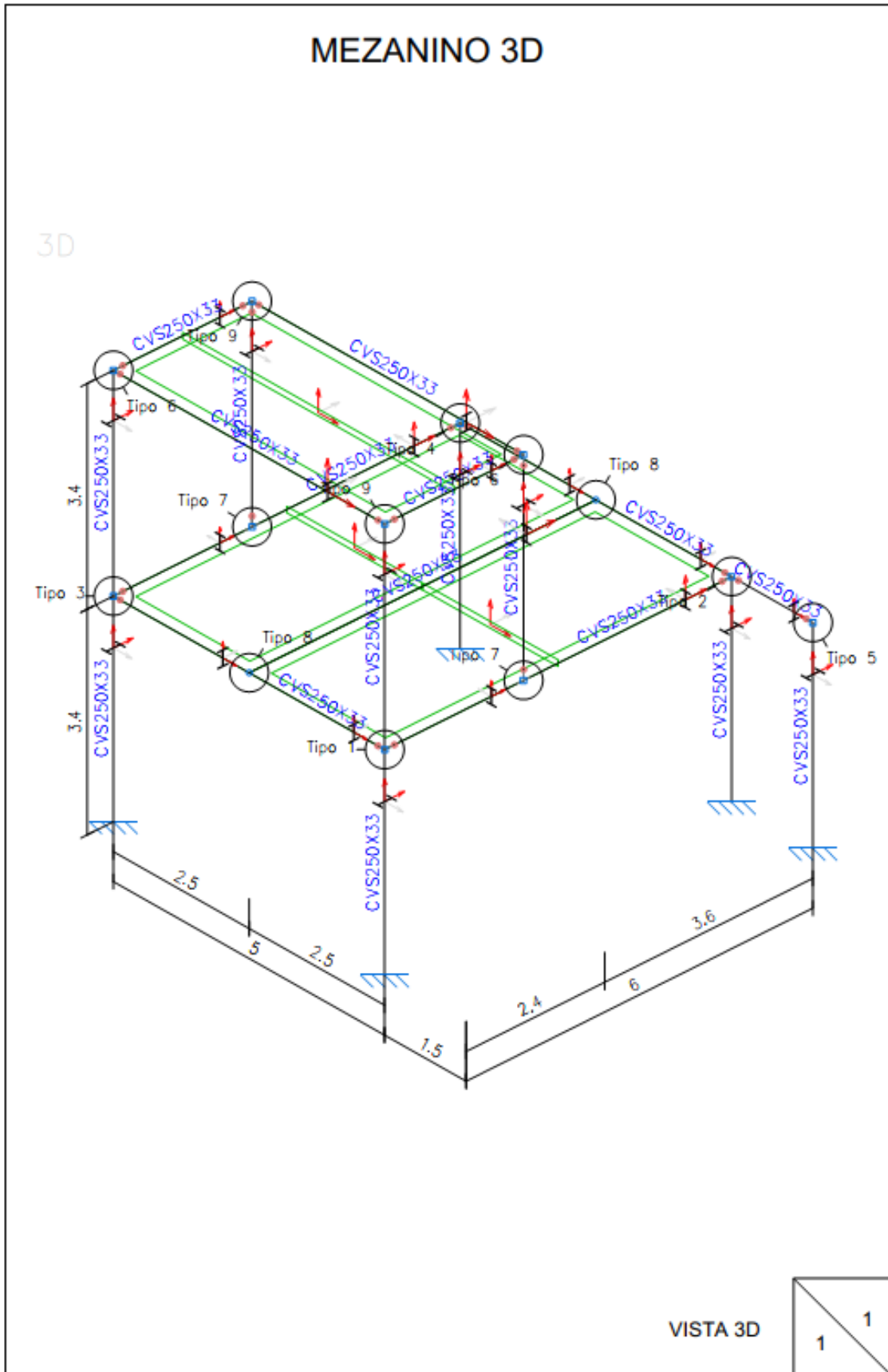


PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES



PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

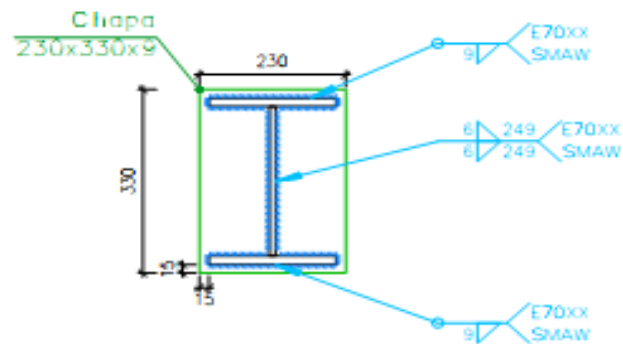
PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

PRODUZIDO POR UMA VERSÃO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

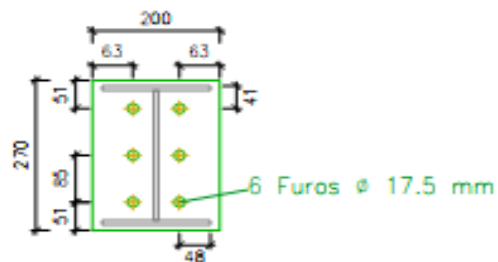
VISTA 3D

1 1

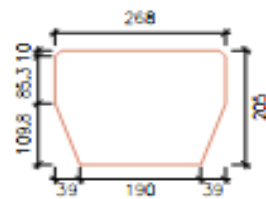
DETALHAMENTO DAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS



Detalhe de soldas: Pilar inferior
CVS300X70 a chapa de transição



Chapa frontal da viga (a) CVS250X33
($e = 10$ mm)

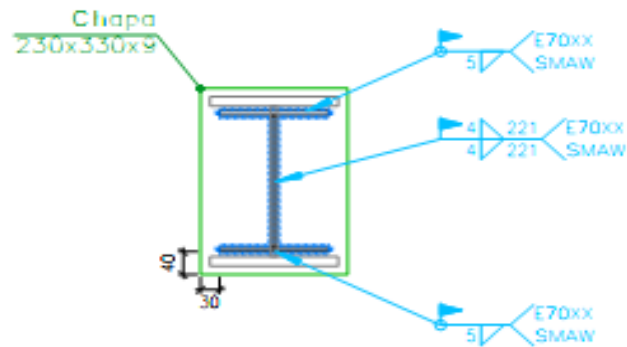


Enrijecedor 268x205x9
(39+190+39x109+96x9)

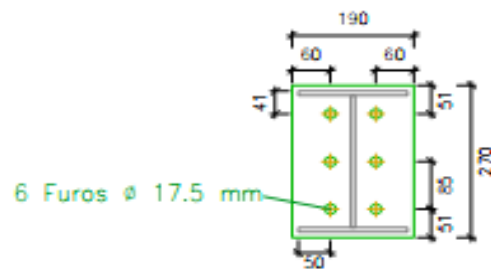
LIGAÇÃO TIPO 1

1
5

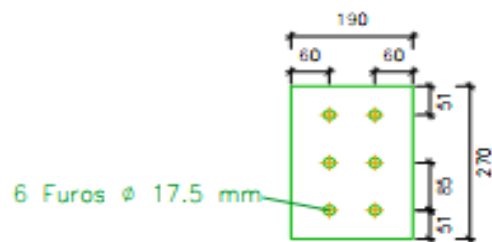
DETALHAMENTO DAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS



Detalhe de soldas: Pilar superior
CVS250X33 a chapa de transição

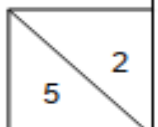


Chapa frontal da viga (b) CVS250X33
(e = 8 mm)

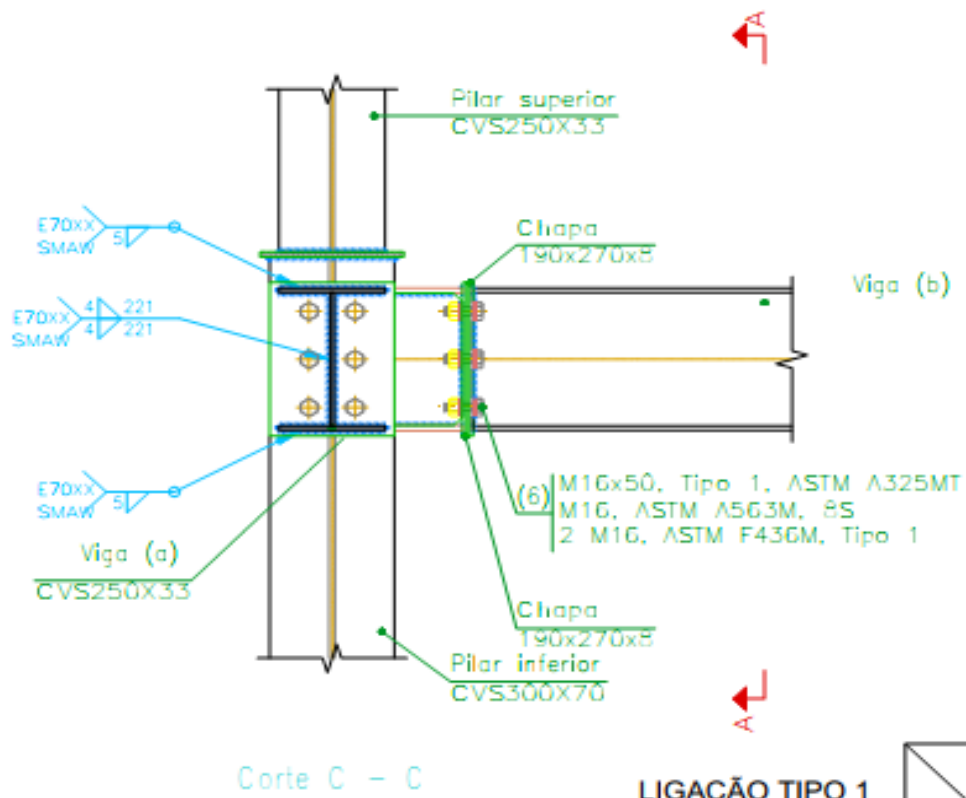
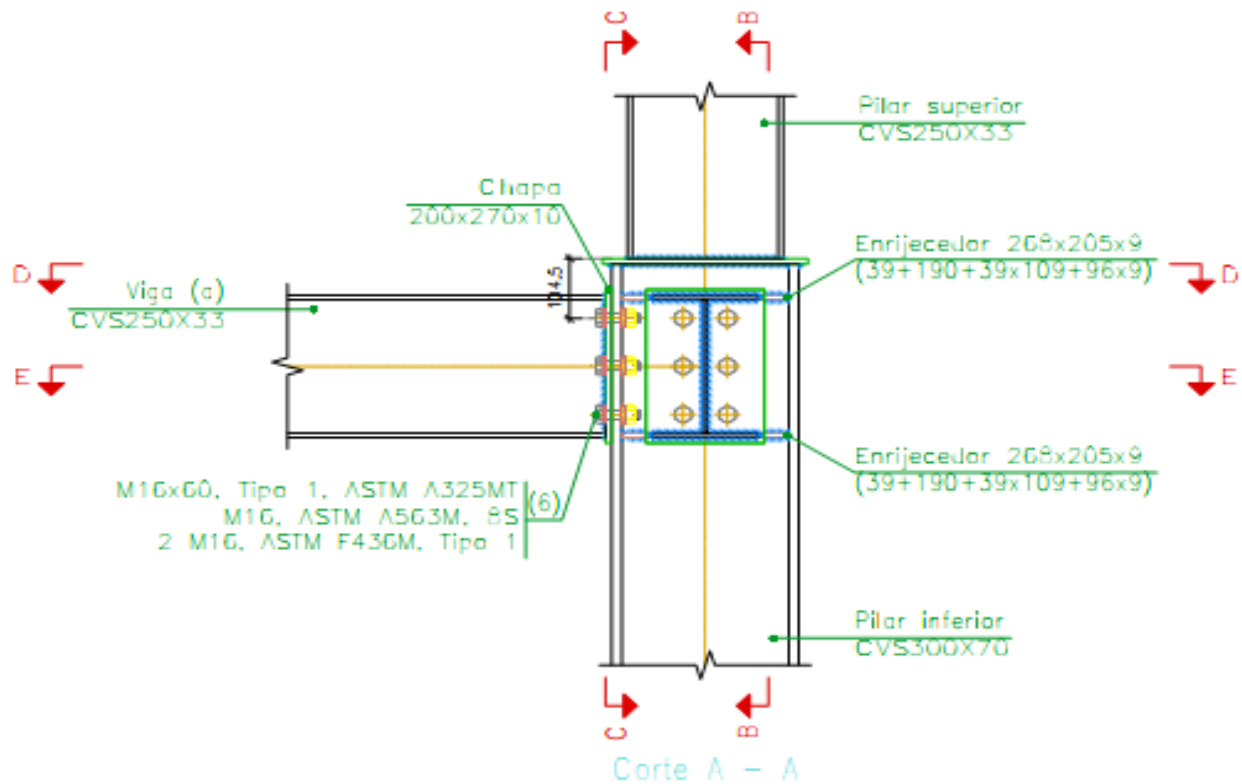


Chapa de apoio da viga (b) CVS250X33
(e = 8 mm)

LIGAÇÃO TIPO 1



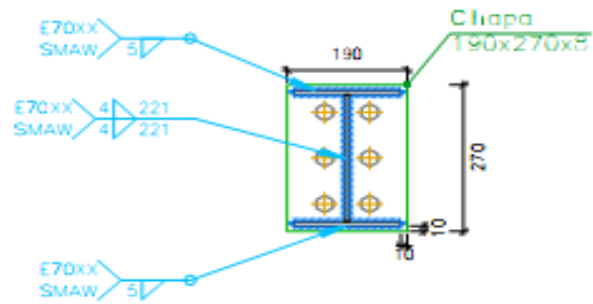
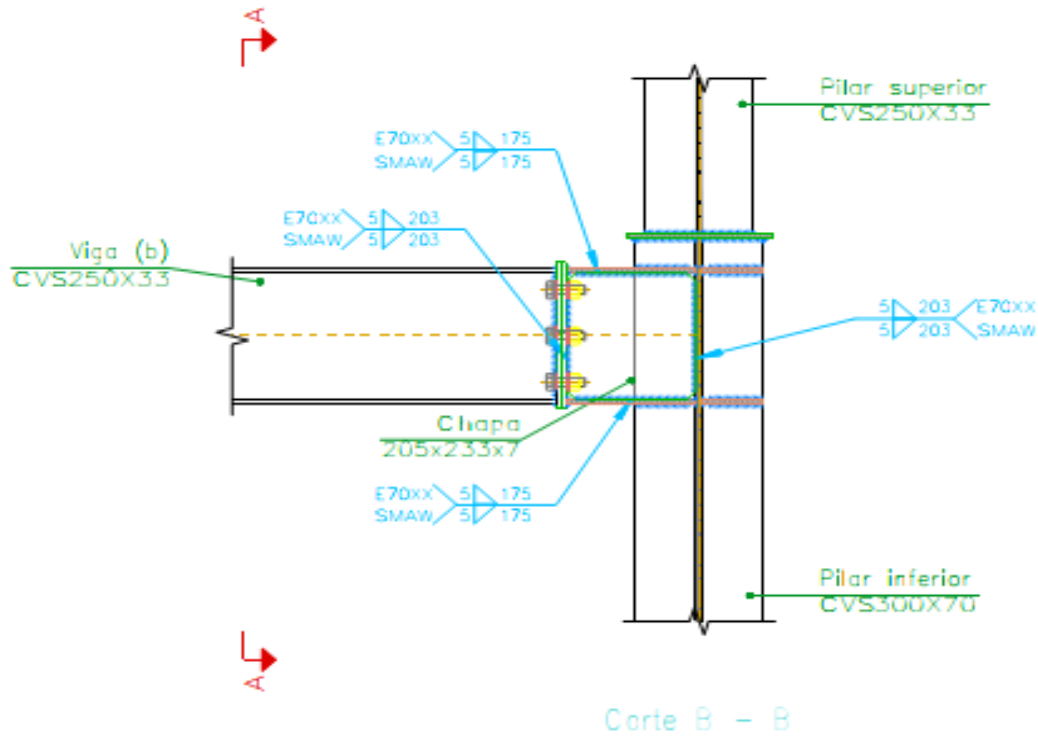
DETALHAMENTO DAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS



LIGAÇÃO TIPO 1

| |
|---|
| 3 |
| 5 |

DETALHAMENTO DAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS

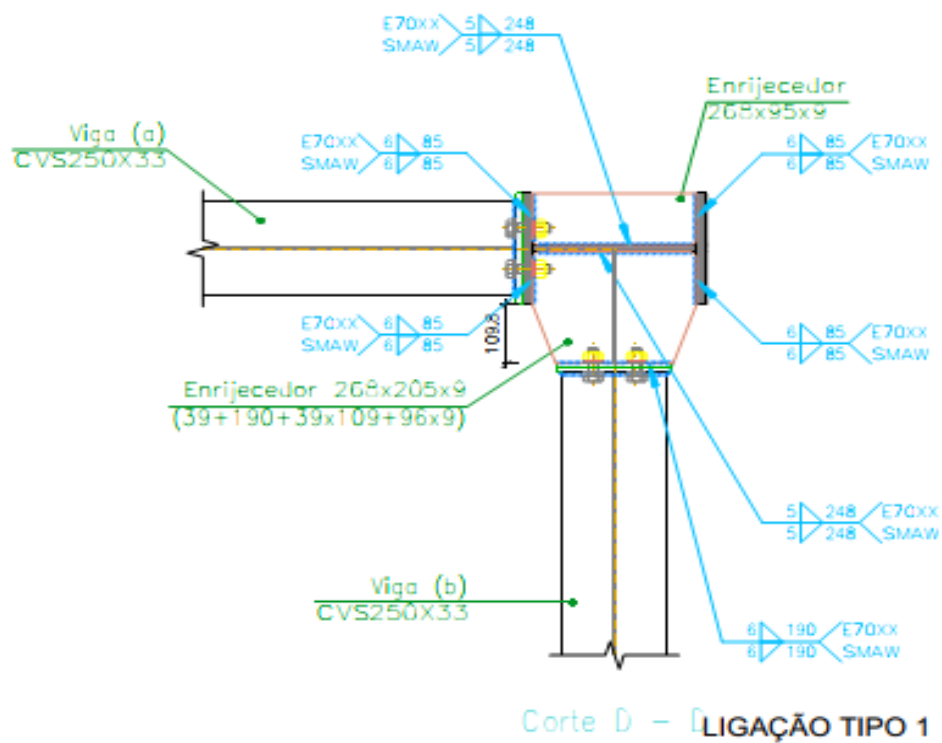
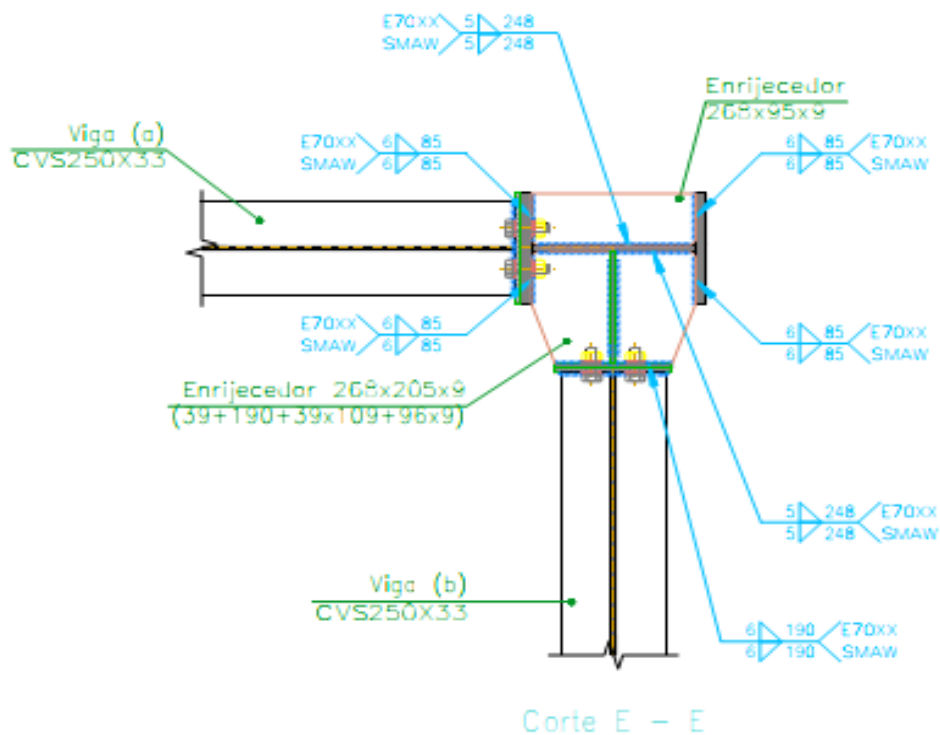


Detalhe de soldas: Viga (b) CVS250X33 a chapa frontal

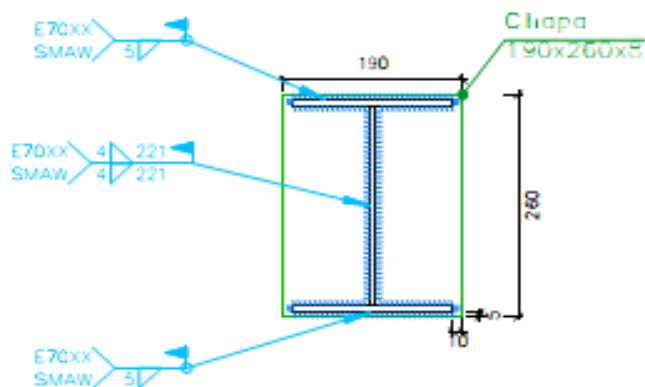
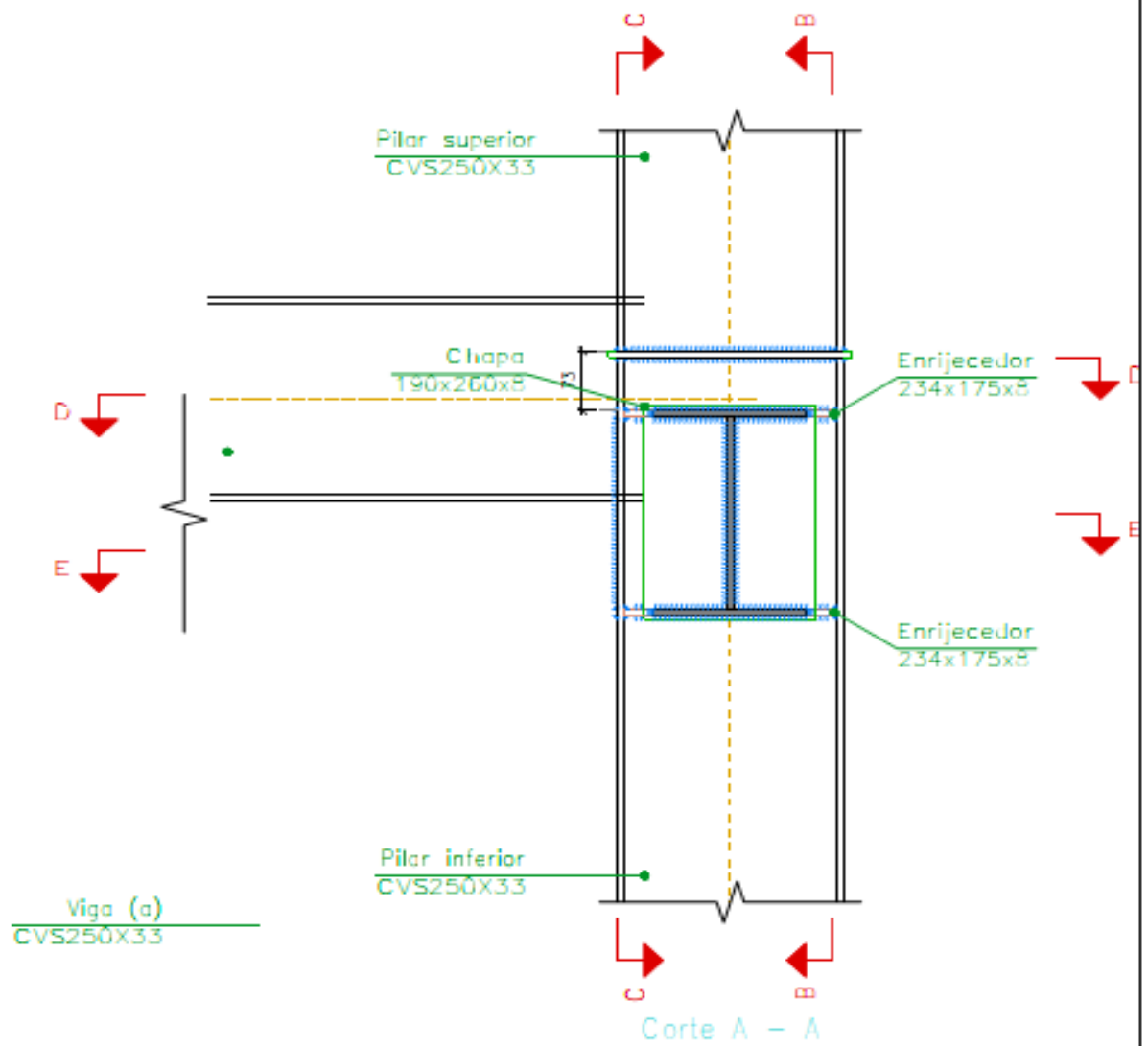
LIGAÇÃO TIPO 1

| | |
|---|---|
| | 4 |
| 5 | |

DETALHAMENTO DAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS

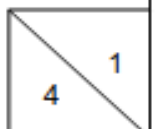


DETALHAMENTO DAS LIGAÇÕES SOLDADAS

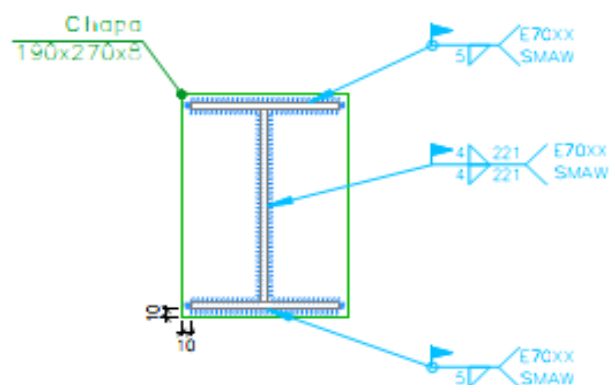


Detalhe de soldas: Viga (b) CVS250X33
a chapa frontal

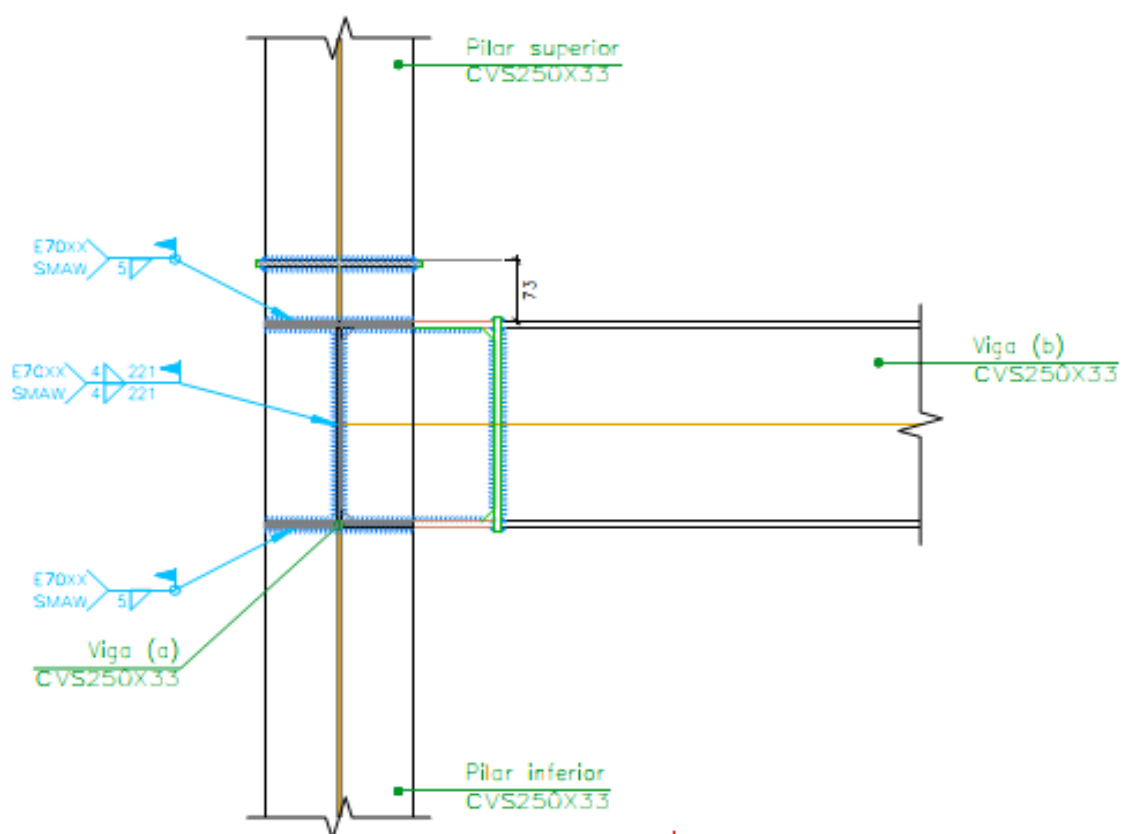
LIGAÇÃO TIPO 1



DETALHAMENTO DAS LIGAÇÕES SOLDADAS

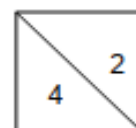


Detalhe de soldas: Pilar superior
CVS250X33 a chapa de transição

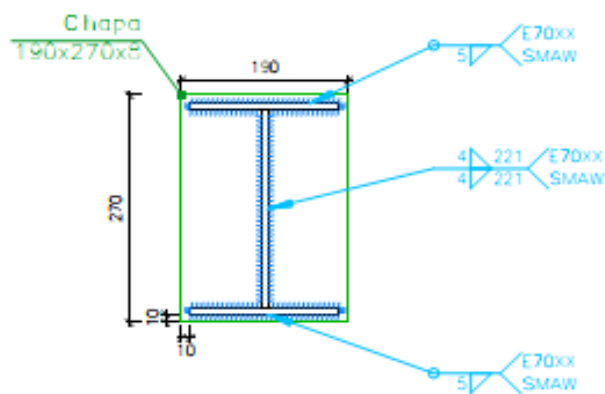
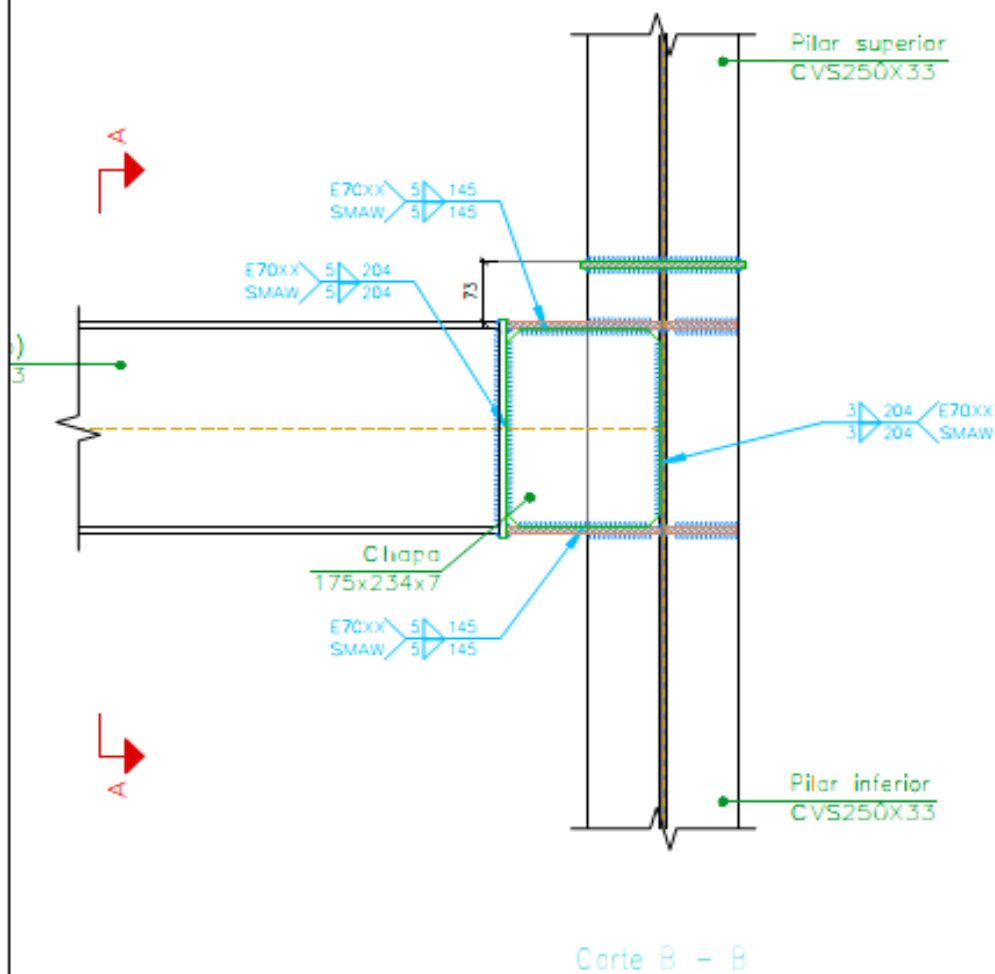


Corte C - C

LIGAÇÃO TIPO 1



DETALHAMENTO DAS LIGAÇÕES SOLDADAS



Detalhe de soldas: Pilar inferior
CVS250X33 a chapa de transição

LIGAÇÃO TIPO 1

3
4

DETALHAMENTO DAS LIGAÇÕES SOLDADAS

