

FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS
CURSO: ENGENHARIA CIVIL

PEDRO HENRIQUE VASCONCELOS DE ALMEIDA
MATRÍCULA: 21016358

ESTUDO E VERIFICAÇÃO DE LIGAÇÕES METÁLICAS
PARAFUSADAS E SOLDADAS

Brasília
2014

PEDRO HENRIQUE VASCONCELOS DE ALMEIDA

**ESTUDO E VERIFICAÇÃO DE LIGAÇÕES METÁLICAS SOLDADAS E
PARAFUSADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como um dos requisitos para
a conclusão do curso de Engenharia Civil
do UniCEUB - Centro Universitário de
Brasília.

Orientador: Eng.º Civil William Oliveira
Bessa.

**Brasília
2014**

PEDRO HENRIQUE VASCONCELOS DE ALMEIDA

**ESTUDO E VERIFICAÇÃO DE LIGAÇÕES METÁLICAS SOLDADAS E
PARAFUSADAS**

Trabalho de Curso (TC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB - Centro Universitário de Brasília.

Orientador: Eng.º William Oliveira Bessa.

Brasília, 26 de Novembro de 2014.

Banca Examinadora

Prof: Engº William Oliveira Bessa
Orientador

Prof: Engª Nathaly Sarasty Narvaez
Examinador Interno

Prof: Engª Rosanna Duarte Fernandes Dutra
Examinador Interno

Agradecimentos

Após tantos obstáculos enfrentados ao longo desta caminhada, com força de vontade, perseverança e acima de tudo muito comprometimento finalmente consegui realizar este feito, no entanto nada teria conquistado se não fosse à presença de alguns envolvidos que me ajudaram durante esta minha trajetória. Assim deixo meus agradecimentos:

A Deus por ter me dado força e coragem nos momentos mais difíceis.

Aos professores por ensinarem o dom da sabedoria. Em Especial ao meu professor orientador William Bessa, por ter me ajudando bastante na realização deste trabalho.

Aos amigos Vinicius Klier, Pedro Espíndola, Marco Antônio e Rafael Carrijo por toda ajuda com estudos, trabalhos e os bons momentos que vivemos no decorrer destes cinco anos de curso.

Ao meu pai Ezequias Timoteo de Almeida Junior, por acreditar que esse dia chegaria e a minha mãe Joseane Vasconcelos de Almeida, que me deu muita força e bons conselhos para nunca perder o foco e desistir do meu sonho.

A minha noiva Anelise Toncovitch pela compreensão, carinho, companheirismo e apoio quando mais precisei. Por todas as palavras ditas nas horas mais difíceis e principalmente por estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos professores formadores da banca examinadora pela presença e pelo apoio.

RESUMO

As ligações estruturais devem ser utilizadas de forma a transmitir as cargas atuantes às peças estruturais e também restringir seus movimentos. O presente trabalho tem por finalidade apresentar comparações de cálculos de resistência. O escopo principal aborda o tema de ligações metálicas de uma marquise em estrutura metálica, de um edifício comercial que foi inicialmente projetado com ligações parafusadas, porém por conta de problemas “*in loco*”, teve-se que adotar ligação soldada. 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. Para a obtenção dos esforços solicitantes foi utilizado o software Ftool.

Palavras chaves: Ligação, Comparação, Estrutura, Parafusada, Soldada.

ABSTRACT

The structural links should be used in order to transmit the loads acting on structural parts and also restrict their movements. The present work aims at presenting comparisons resistance calculations the deformations in the structure the allowable limits. The primary scope deals with the theme of connections metal a canopy with a metallic structure, of a commercial building that was originally designed with bolted connections, but on account of problems "in situ", had to adopt welded connection. Were considered calculations to be carried out to compare the resistance of calculation and requested both welded and bolted, on the basis of the adopted solution to promote the continuity of the beam. For obtaining the efforts applicants was used the software Ftool.

Key words: Connection, comparison, structure, bolted, welded.

SUMÁRIO

RESUMO	5
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO	14
2.1 OBJETIVO GERAL.....	14
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	14
3. METODOLOGIA	15
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
4.1 LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS.....	16
4.3.1 CLASSIFICAÇÃO DE ACORDO COM A RIGIDEZ	21
4.6 TRANSMISSÃO DOS ESFORÇOS ATRAVÉS DOS PARAFUSOS.....	31
4.7 MÉTODO DE APERTO	35
5 ESTUDO DE CASO	36
6 CONCLUSÕES	47
7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	48
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Força de protensão mínima em parafusos -----	32
Tabela 2 - Rotação da porca a partir da posição de pré-torque -----	35
Tabela 3 - Carregamento da marquise metálica -----	39
Tabela 4 - Propriedades Mecânicas dos Aços para Conectores -----	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1a - Curvas momento-rotação para duas ligações típicas com chapa de topo - -----	16
Figura 1b - Ligação com chapa de topo -----	17
Figura 2a - Curvas momento-rotação para duas ligações típicas, cantoneiras de alma -----	17
Figura 2b - Duas ligações típicas, cantoneiras de alma -----	17
Figura 3 - Curvas momento rotação idealizadas -----	18
Figura 4 - Classificação das ligações consoante a sua rigidez -----	18
Figura 5 - Pórtico com nós rígidos -----	19
Figura 6 - Pórtico com nós articulados -----	20
Figura 7a Ligação Semi-Rígida -----	22
Figura 7b – Ligação Rígida -----	22
Figura 7c – Ligação Flexível -----	23
Figura 8 - Comportamento das Ligações -----	24
Figura 9 - Tipos Principais de Cordões de Solda -----	27
Figura 10 - Soldas de Filete -----	28
Figura 11 - Soldas de Entalhe -----	29
Figura 12 Transmissão dos Esforços em Parafusos Comuns -----	31
Figura 13a : Ligação parafusada por contato -----	33
Figura 13b : Ligação parafusada por atrito -----	33
Figura 14 – Transmissão dos Esforços Através do Parafuso de Alta Resistência ----- -----	34
Figura 15 – Localização da estrutura estudada -----	36
Figura 16 – Planta baixa marquise metálica -----	37

Figura 17 – Perspectiva da marquise metálica -----	38
Figura 18 – Vista lateral marquise metálica -----	38
Figura 19 – Diagrama de esforços marquise metálica -----	39
Figura 20 – Diagrama Momento Fletor -----	39
Figura 21 – Diagrama Esforço Cortante -----	39
Figura 22 - Vista lateral ligação parafusada -----	40
Figura 23 - Vista lateral ligação Soldada -----	43
Figura 24 - Vista frontal Perfil W -----	44
Figura 25 - Garganta da solda -----	44

ÍNDICE DE ABREVIações

CBCA	Centro Brasileiro da Construção em Aço
NBR	Norma Brasileira
SIG	Setor de Indústrias Gráficas

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

α ----- ângulo do chanfro da solda

1. INTRODUÇÃO

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.

As mais utilizadas são as ligações soldadas e parafusadas, pois os rebites estão em desuso e os pinos são restritos a casos especiais.

A soldagem é amplamente usada na junção de materiais, permitindo a execução de uniões com geometrias complicadas e garantia da perfeita continuidade das peças. Tem sua maior aplicabilidade na construção metálica para fabricação de Perfis (Vigas I, H) Soldadas.

Cuidado especial deve ser tomado com construções em que as ligações dos elementos estruturais são feitas através de solda, pois isto gera problemas tais como a falta de garantia na qualidade da solda. Podemos afirmar, sem exagero, que tal procedimento de montagem evidencia a "inexistência" de um profissional competente atuando na obra.

A maioria das ligações soldadas são executadas em fábricas. As ligações soldadas em campo apresentam uma série de necessidades como local apropriado, andaimes, proteção contra vento e chuva, além de dificuldades no controle da qualidade de solda.

Em estruturas metálicas, emprega-se o processo de soldagem por fusão, no qual as peças a serem ligadas são aquecidas até seu ponto de fusão, fazendo-se a união das mesmas diretamente ou acrescentando-se um material adequado ao preenchimento do vazio existente entre elas.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo verificar a resistência de ligações soldadas e parafusadas de uma marquise de estrutura metálica localizada no SIG em Brasília.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Verificar se a resistência de cálculo atente a resistência de solicitação.

3. METODOLOGIA

O assunto abordado neste trabalho também tem o objetivo de aprofundar no estudo das ligações em estruturas metálicas em relação aos programas curriculares existentes na maioria dos cursos de graduação em Engenharia Civil, que abordam o assunto de forma superficial.

As ligações metálicas são uma forma eficiente de unir dois ou mais elementos estruturais, fornecendo um determinado grau de rigidez na estrutura. Foi calculado a resistência de um mesmo detalhe de ligação parafusada e soldada, com o objetivo de demonstrar a viabilidade e compatibilidade e ambos os detalhes de ligações.

Inicialmente a marquise foi projetada para ligações parafusadas, porém as condições da obra inviabilizaram tal ligação e teve-se que usar solda em todas as ligações da estrutura.

Portanto, este trabalho tem por objetivo de calcular de forma simplificada e precisa a resistência de cálculo de ligações parafusadas e soldadas, comparando as respectivas resistências com as solicitações de cálculo.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS

Define-se ligação metálica pela união entre duas ou mais peças. Normalmente o tipo de ligação a ser usado é elaborado levando em conta o tipo de montagem que será realizado, pois a dificuldade de ajuste “in loco” pode gerar atrasos e provocar acidentes durante o processo de ligação das partes.

Existem duas maneiras principais de se tornar as ligações seguras, o uso de solda e o de parafusos, ou até mesmo as duas em conjunto.

4.2 COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES

Para dimensionar uma ligação metálica vários fatores devem ser considerados. O comportamento destas ligações é complexo, pois, as ligações não apresentam um comportamento linear ou multilinear. (Silva, 2005) apresenta o comportamento de dois tipos de ligações viga-pilar, onde se pode observar como estas se comportam com o carregamento. Nas figuras 1 e 2 apresenta-se o comportamento de duas ligações típicas em estruturas metálicas ao carregamento a partir das curvas momento-rotação correspondentes.



Figura 1: a) Curvas momento-rotação para duas ligações típicas com chapa de topo (Silva, 2005).

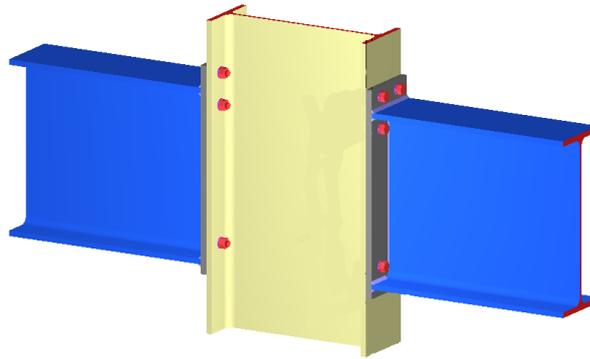


Figura 1: b) Ligação com chapa de topo. (SolidWorks).



Figura 2: a) Curvas momento-rotação para duas ligações típicas, cantoneiras de alma.
(Silva, 2005).

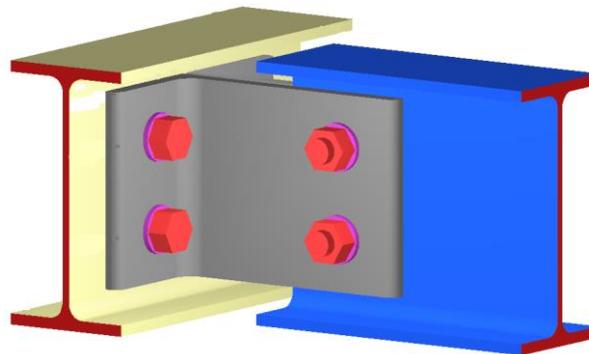


Figura 2: b) Duas ligações típicas, cantoneiras de alma. (SolidWorks).

Analisando as Figuras 1 e 2 observa-se que o comportamento das curvas momento-rotação das ligações não é linear e assim o dimensionamento de ligações adotando as curvas momento-rotação reais, não é prático devido a sua variação. A não linearidade destas curvas, leva a aproximação de valores com modelos bi lineares ou multilineares como os apresentados na figura 3.

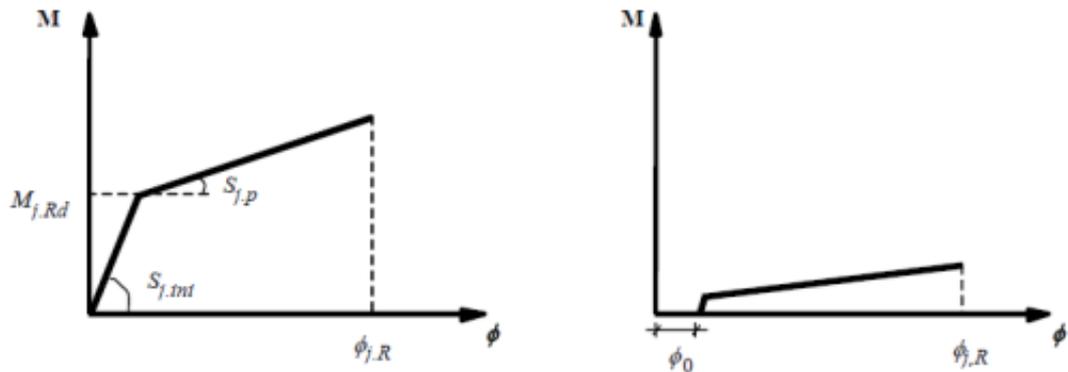


Figura 3 - Curvas momento rotação idealizadas para as ligações apresentadas nas figuras 1 e 2 (Silva, 2005).

A aproximação serve para que se possa analisar o comportamento das ligações metálicas.

4.3 CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES

Pode-se classificar as ligações pela sua rigidez e sua resistência. Quando classificadas segundo a rigidez, estas podem ser definidas como ligações rígidas, articuladas ou semi-rígidas, como apresentado na Figura 3.

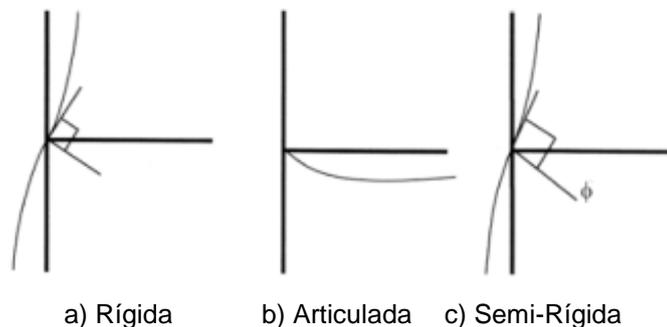


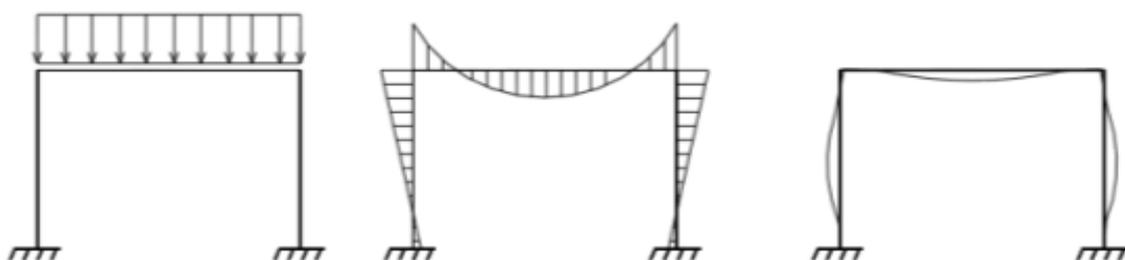
Figura 4 - Classificação das ligações consoante a sua rigidez (Rodrigues, 2007).

Considera-se uma ligação rígida quando é garantida a continuidade da estrutura e as rotações relativas entre as partes ligadas são restringidas ao máximo, logo, pode-se admitir que o ângulo entre os membros ligados permanece constante durante o carregamento (figura 4a).

Já em uma ligação articulada (figura 4b), as rotações relativas entre os membros ligados não são restringidas, portanto, a ligação só vai estar sujeita a esforços de cisalhamento. No caso de uma ligação rígida os esforços no pilar são maiores que no caso de uma ligação articulada, onde os esforços são mais distribuídos entre os dois membros ligados, ou seja, estão mais distribuídos entre a viga e o pilar, como se pode observar nas Figuras 5 e 6.

Usualmente as ligações estão compreendidas entre esses dois casos extremos, ou seja, são ligações semi-rígidas. Se as ligações forem tratadas como rígidas ou articuladas, haverá superdimensionamento dos elementos ligados. Daí a necessidade de se estudar melhor o comportamento das ligações para que estas possam ser tratadas de uma forma mais próxima da realidade.

Considera-se que uma ligação é tratada como semi-rígida quando a rotação entre os membros é restringida entre 20% a 90% (Martins, 2011), quando comparada à rotação que ocorreria no caso de uma ligação perfeitamente rígida. Portanto o momento fletor será transmitido pela ligação vai ser maior que no caso de uma ligação articulada, mas será menor que no caso de uma ligação rígida.



a) Carregamento b) Diagrama de momentos c) Flexão dos membros

Figura 5 - Pórtico com nós rígidos (Figueiredo, 2004).

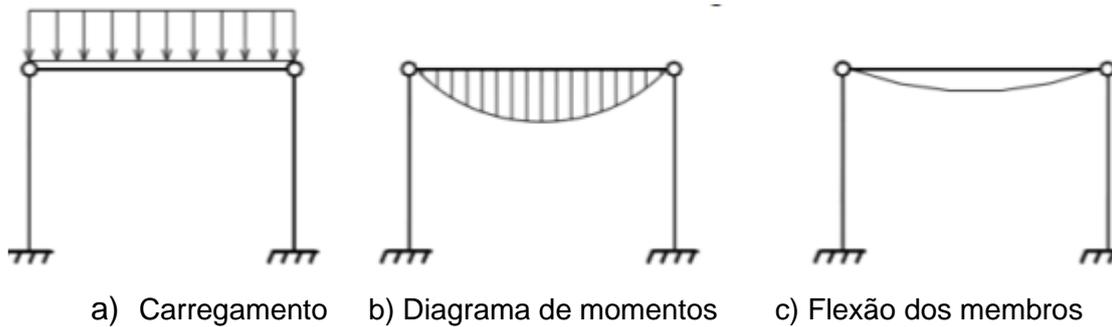


Figura 6 - Pórtico com nós articulados (Figueiredo, 2004).

Quando se trata da classificação das ligações por sua resistência, estas podem ser definidas como: articuladas, de resistência total ou de resistência parcial.

Articulada (segundo a resistência), não deve transmitir momentos significativos que possam prejudicar os restantes elementos da estrutura.

Nas ligações de resistência total, o valor da resistência da ligação deve ser igual ou superior aos membros por ela ligados. Se a capacidade de rotação da ligação for limitada, devem-se ter em conta os efeitos de concentração de tensões inerentes a essa limitação.

Nas ligações de resistência parcial, a ligação pode ter uma resistência inferior aos membros por ela ligados mas tem de ser superior ao esforço que terá de suportar. No entanto a capacidade de rotação deste tipo de ligação, caso coincida com uma rótula plástica, deve ser suficiente para que se formem todas as rótulas plásticas necessárias.

No geral, as ligações só são classificadas consoante a sua rigidez, pois para efeitos de cálculo é a classificação mais usual.

4.3.1 CLASSIFICAÇÃO DE ACORDO COM A RIGIDEZ

A capacidade de impedir a rotação relativa local das peças ligadas (rigidez), é responsável pelo comportamento final da estrutura referente a rotações e deslocamentos. Isto significa que, além das barras que compõem a estrutura, as ligações também deverão estar convenientemente dimensionadas e concebidas, na condição da estrutura não se comportar, em termos de deslocamentos e rotações, conforme desejado.

Dessa forma as ligações deverão ser projetadas conforme as hipóteses feitas para os nós das barras na análise estrutural:

- nos locais onde foram previstas ligações rígidas, deverão ser previstos detalhes que efetivamente impeçam a rotação relativa das partes (Figura 6a).
- nos locais onde a ligação deve permitir a rotação relativa das partes, os detalhes deverão ser tais que propiciem essa rotação com o mínimo de restrição (Figura 7b).

4.3.2 LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA

Nesse caso a restrição à rotação está entre 20% e 90% daquela teoricamente necessária para evitar qualquer rotação. Então o momento transmitido através da conexão não é nem zero (ou próximo de zero) como no caso de ligações flexíveis e nem o momento máximo (ou próximo dele) como no caso de conexões rígidas.

Para que se possa utilizar a ligação semirrígida, deverá ser conhecida primeiro a relação de dependência entre o momento resistente e a rotação.

As ligações semirrígidas são raramente utilizadas, devido à dificuldade de se estabelecer esta relação, e não serão abordadas nesse trabalho (Figura 7a)

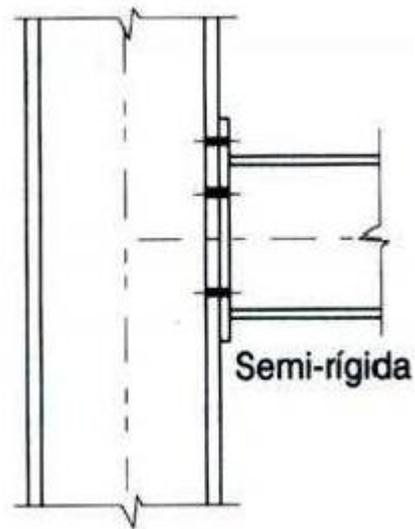
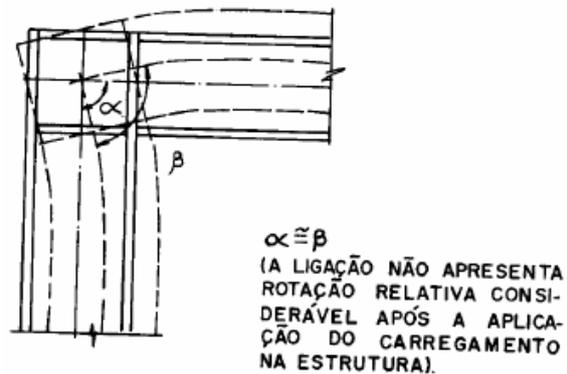


Figura 7ª – Ligação Semi-Rígida (Manual CBCA 2003).

4.3.3 LIGAÇÃO RÍGIDA

A ligação é tal que o ângulo entre os elementos estruturais que se interceptam permanece essencialmente no mesmo após o carregamento da estrutura, com uma restrição à rotação da ordem de 90 por cento ou mais daquela teórica necessária à ocorrência de nenhuma rotação (fig 7b).



(a) LIGAÇÃO RÍGIDA

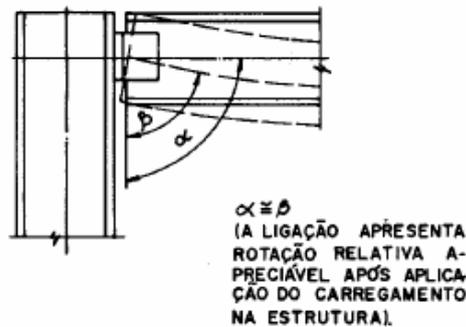
Figura 7b – Ligação Rígida (Manual CBCA 2003).

4.3.4 LIGAÇÃO FLEXÍVEL

Neste caso a restrição à rotação relativa entre os elementos estruturais deve ser tão pequena quanto se consiga obter na prática.

No caso de vigas, sujeitas à flexão simples, por exemplo, a ligação flexível transmite apenas a força cortante.

A ligação é considerada flexível se a rotação relativa entre as partes, após o carregamento, atingir 80 por cento ou mais daquela teoricamente esperada caso a conexão fosse totalmente livre de girar (fig. 7c).



(b) LIGAÇÃO FLEXÍVEL

Figura 7c – Ligação Flexível (Manual CBCA 2003).

Para apresentar graficamente o comportamento dos três tipos de ligação, pode ser traçado o diagrama Momento/Rotação para diversas ligações, conforme figura 8.

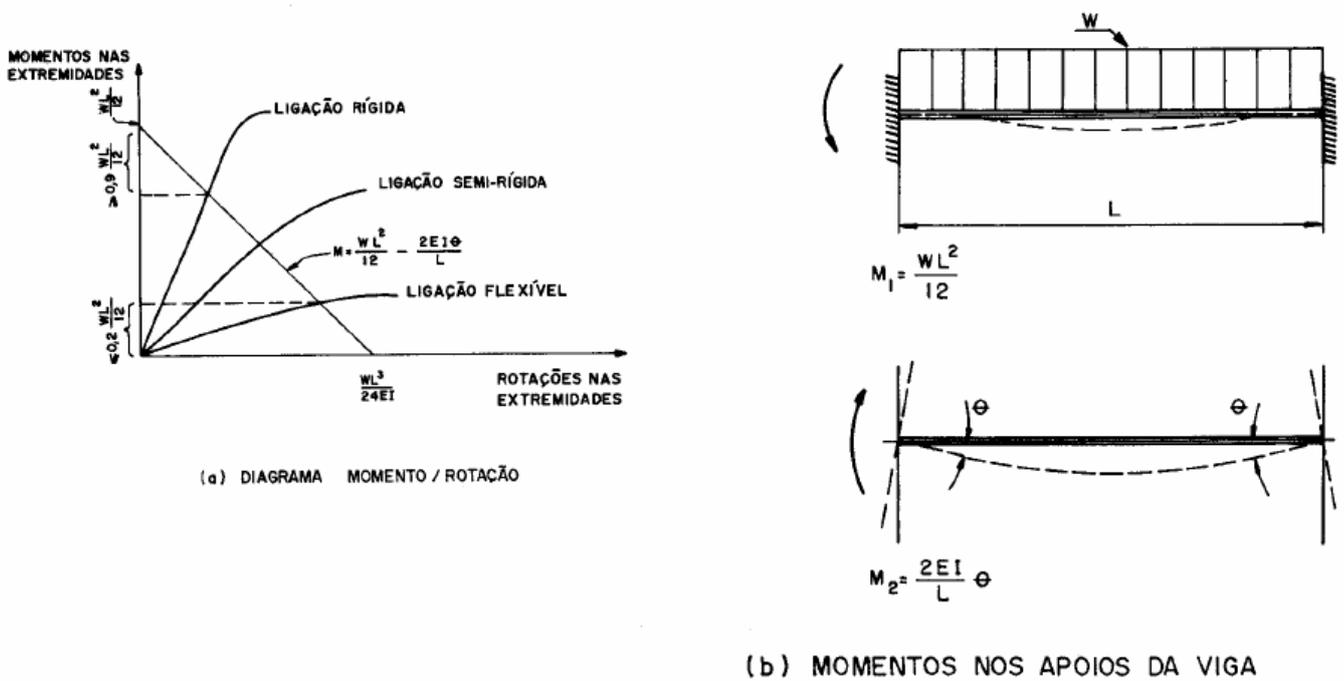


Figura 8: Comportamento das Ligações (Manual CBCA 2003).

Nela estão indicadas as curvas relativas às ligações rígidas, semi-rígidas e flexíveis e também a reta que relaciona momentos e rotações nos apoios para uma viga submetida a carga uniforme. Para esta viga temos:

- considerando as conexões nas extremidades teoricamente rígidas, o momento nos apoios e será (figura 8b):

$$M_1 = \frac{WL^2}{12}$$

Onde:

M_1 = Momento

W = Peso próprio do perfil

L = comprimento do perfil

- considerando que a ligação não é teoricamente rígida e permite alguma rotação das seções dos apoios (θ), o alívio de momento nos apoios será (figura 7b):

$$M_2 = \frac{4EI}{L}\theta - \frac{2EI}{L}\theta = \frac{2EI}{L}\theta$$

Onde:

M_2 = Momento

E = Módulo de elasticidade

I = Inércia da viga

L = comprimento do perfil

θ = ângulo de rotação

- o momento real nos apoios será a diferença dos dois valores:

$$M = M_1 - M_2 = \frac{4EI}{L}\theta - \frac{2EI}{L}\theta = \frac{2EI}{L}\theta$$

4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE SOLDAS

O processo de 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, o que se reflete aos esforços os quais a ligação está sujeita.

Existem hoje vários processos de soldagem, os quais foram aprimorados e/ou desenvolvidos, entre eles:

- 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);

As soldas são classificadas em posição, planas, horizontais, verticais e sobre cabeça e em relação ao tipo: filete, penetração total, penetração parcial e tampão.

As ligações soldadas possuem, de maneira geral, as seguintes vantagens:

- Economia de material, em algumas estruturas é possível economizar de 15% ou mais de peso do aço (Bellei, 2008);
- Estruturas com ligações soldadas são mais rígidas, pois os membros estão interligados uns aos outros diretamente;
- Facilidade em realizar modificações nos desenhos das peças e de corrigir erros durante o processo de montagem;
- Tem uma maior economia em relação as peças o que se reflete na diminuição do tempo de fabricação;

Por outro lado, tem-se as seguintes desvantagens:

- Redução que a mesma sofre no comprimento devido aos efeitos cumulativos de retração causados pelo calor gerado pela solda;
- Insuficiência de energia elétrica no local da montagem para acionar máquinas de solda o que limita as áreas em que se pode aplicar esta tarefa;
- Exigência de maior análise de fadiga do que as estruturas parafusadas, podendo reduzir as tensões admissíveis a níveis muito baixos;
- Tempo maior de montagem das peças em obra devido aos cordões de solda;

4.4.1 TIPOS DE SOLDA

Os principais tipos de cordões de solda utilizados na ligação são os de filete e os de entalhe de penetração total ou parcial, que estão indicados na Fig. 9.

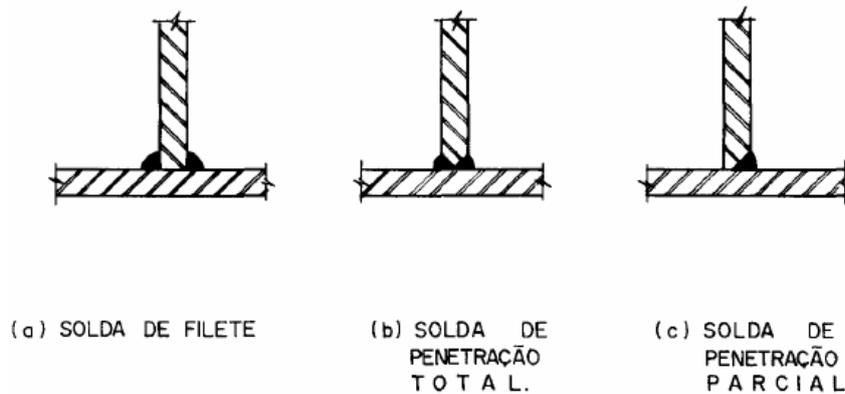


Figura 9: Tipos Principais de Cordões de Solda (Manual CBCA, 2003).

De acordo com a NBR 8800 os processos de soldagem e as técnicas de execução de estruturas soldadas devem ser conforme o “Structural Welding Code” AWS D1.1-82, da American Welding Society.

4.4.1.1 SOLDA FILETE

Para as soldas de filete são feitas as seguintes definições (figura 10):

- Face de fusão: região da superfície original do metal base onde ocorreu a fusão do metal base e do metal da solda (figura 10a).
- Raiz da solda: linha comum às duas faces de fusão (figura 10a).
- Perna do filete: menor dos lados, medidos nas faces de fusão, do maior triângulo inscrito dentro da seção transversal da solda.

Normalmente os dois lados do triângulo são iguais, conforme as figuras 10b e 10c. O filete de solda é especificado através da dimensão de sua perna. Assim na figura 9b é especificado um filete com a perna de 4mm.

- Garganta efetiva: é a distância entre a raiz da solda e o lado externo do triângulo inscrito.
- Comprimento efetivo da solda: é o comprimento da linha que liga os pontos médios das gargantas efetivas ao longo do filete (fig. 10e).
- Área efetiva, A_w : é a área considerada como resistência da solda, igual à garganta efetiva multiplicada pelo comprimento efetivo (fig. 10e).
- Área teórica da face de fusão, A_{MB} : é a área considerada como de resistência no metal base junto à solda, igual à perna do filete multiplicada pelo comprimento efetivo.
- Disposições de projeto: para maiores detalhes quanto às considerações de projeto de soldas de filete, tais como compatibilidade entre o metal da solda e o metal base, resistências de cálculo de soldas, limitações das soldas de filete e outras, a NBR 8800 deverá ser consultada.

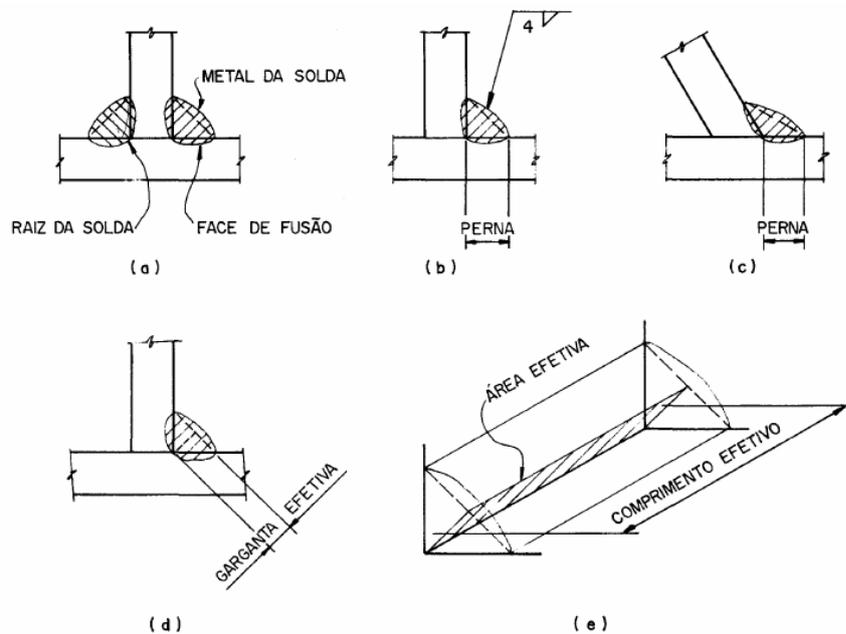


Figura 10: Soldas de Filete (Manual CBCA, 2003).

4.4.1.2 SOLDA DE ENTALHE

As soldas de entalhe de penetração total (ou parcial) são utilizadas quando se deseja manter a continuidade total (ou parcial) da espessura do elemento conectado para a transmissão do esforço através da ligação ou quando, por questões construtivas, a solda de filete não puder ser empregada (figuras 11a e 11b).

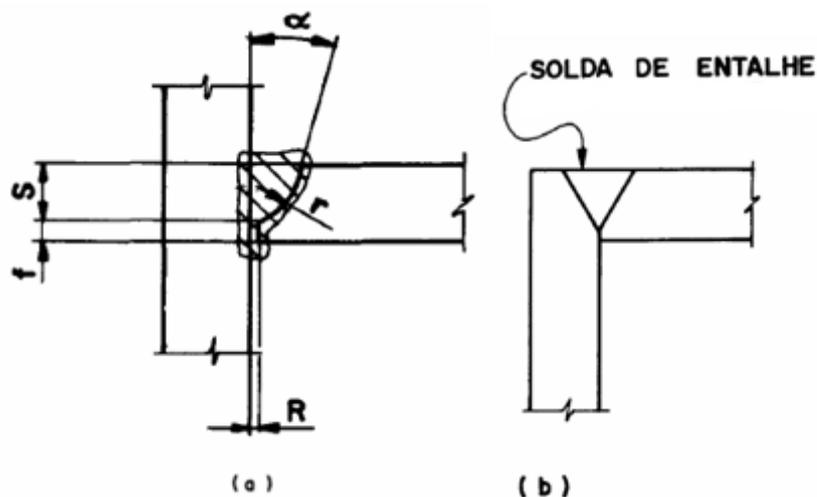


Figura 11: Soldas de Entalhe (Manual CBCA, 2003).

Definições e notações feitas para as soldas de entalhe (figura 11a):

- α = ângulo do chanfro
- S = profundidade do chanfro
- f = nariz do chanfro
- r = raio do chanfro
- R = abertura da raiz
- Garganta efetiva: a garganta efetiva de uma solda de entalhe de penetração total é a menor espessura das chapas conectadas;
- Para soldas de penetração parcial, a NBR 8800 deverá ser consultada.

- Comprimento efetivo: é o comprimento real da solda que, no caso da solda de entalhe, deve coincidir com a largura da peça ligada;
- Área efetiva: é o produto da garganta efetiva pelo comprimento efetivo;
- Disposições de projeto: para demais considerações de projeto, tais como limitações aplicáveis, resistências de cálculo, a NBR 8800 deverá ser consultada.

4.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE PARAFUSOS

4.5.1 LIGAÇÕES PARAFUSADAS

As ligações parafusadas são empregadas em grande escala em uniões de partes de estruturas, nas montagens finais de campo, os parafusos substituíram as ligações rebitadas que foram usadas durante muito tempo na construção civil.

As ligações soldadas possuem, de maneira geral, as seguintes vantagens:

- Economia no consumo de energia.
- Rapidez na fabricação das peças.
- Rapidez nas ligações no campo.
- Necessidade de poucos montadores sem grandes qualificações.
- Melhor resposta às tensões de fadiga.

Por outro lado, tem-se as seguintes desvantagens:

- Necessidade de previsão de parafusos com quantidade correta.
- Em alguns casos, necessidade de pré-montagens em fábrica.
- Maior dificuldade de realizar ajustes e modificações em campo.
- Necessidade de verificação de áreas líquidas e esmagamentos de peças.

4.6 TRANSMISSÃO DOS ESFORÇOS ATRAVÉS DOS PARAFUSOS

Nos parafusos comuns os esforços de tração são transmitidos diretamente através de tração no corpo do parafuso e os esforços de cisalhamento são transmitidos por cisalhamento do corpo do parafuso e o contato de sua superfície lateral com a face do furo, devido ao deslizamento entre as chapas ligadas (Figura 12).

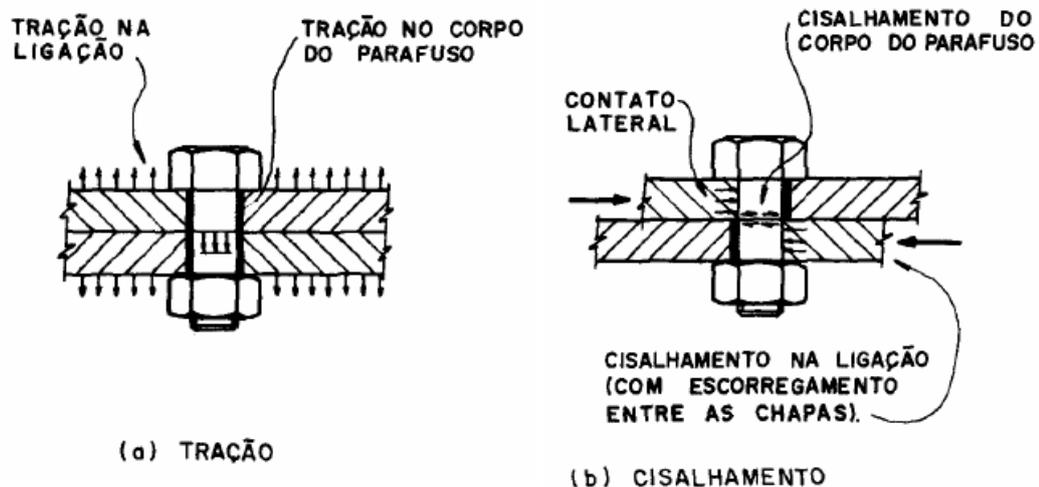


Figura 12 Transmissão dos Esforços em Parafusos Comuns (Manual CBCA, 2003)

Nos parafusos de alta resistência, montados com protensão, as superfícies de contato das chapas ficam firmemente pressionadas umas contra as outras através dos “cones de pressão” (Figura 12a).

Simplificadamente ele pode ser considerado como um cilindro de pressão, constituído por regiões circulares das chapas, altamente comprimidas, com o parafuso no centro, altamente tracionado (Figuras. 12a e 12b). Dessa forma, o mecanismo de transmissão de esforços é tal que, por questões de elasticidade e pela grande área do cilindro de pressão e pequena área do parafuso, o esforço de tração é absorvido no sistema através da diminuição de pressão do cilindro e pequeno aumento de tração no parafuso (Figura 12a).

Sendo α a relação entre a área do parafuso e a área do cilindro de pressão e P o esforço externo de tração aplicado na ligação, é demonstrado que o esforço de

protensão no parafuso é acrescido de $\frac{\alpha}{1+\alpha}$ (P) enquanto o cilindro de pressão tem sua pressão reduzida por uma força igual a $\frac{1}{1+\alpha}$ (P).

Como α é um valor pequeno, o acréscimo de tração no parafuso é bem inferior à força que reduz a pressão no cilindro. Para valores das protensões de montagem dos parafusos ver a tabela 15 da NBR 8800 reproduzida abaixo (Tabela 1).

Tabela 1 - Força de protensão mínima em parafusos ASTM. (NBR 8800)

Diâmetro d_b		F_{Tb} kN	
pol	mm	ASTM A325	ASTM A490
1/2		53	66
5/8		85	106
	16	91	114
3/4		125	156
	20	142	179
	22	176	221
7/8		173	216
	24	205	257
1		227	283
	27	267	334
1 1/8		250	357
	30	326	408
1 1/4		317	453
	36	475	595
1 1/2		460	659

Os esforços de cisalhamento nas ligações com parafusos de alta resistência são transmitidos por atrito, devido à pressão entre as partes ligadas, nas chamadas ligações por atrito, ou por contato do corpo do parafuso com as paredes do furo, com cisalhamento do corpo do parafuso, nas chamadas ligações por contato.

De acordo com a NBR 8800, as duas formas de transmissão de esforço não podem ser superpostas, sendo a resistência última do parafuso independente do atrito entre as partes. A protensão dada quando da montagem dos parafusos é a

mesma para ligações por atrito e por contato. A diferença entre elas está no acabamento exigido para as superfícies de deslizamento das chapas e no desempenho, em função do carregamento, ao longo da vida útil:

- A ligação por contato é indicada para carregamentos predominantemente estáticos, onde o eventual deslizamento entre as partes ligadas não afeta a vida útil dos parafusos e da própria ligação e nem o comportamento global da estrutura (Figura 13a);

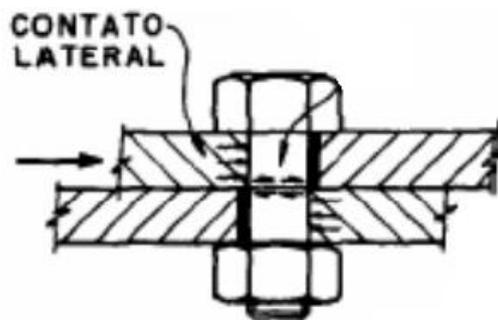


Figura 13a : Ligação parafusada por contato (Manual CBCA, 2003).

- A ligação por atrito é indicada para carregamentos dinâmicos e para os casos em que qualquer deslizamento entre as partes ligadas possa afetar o comportamento previsto para a estrutura (Figura 13b);

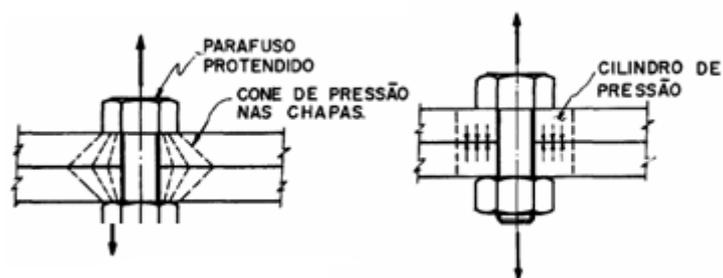


Figura 13b : Ligação parafusada por atrito (Manual CBCA,2003)

A NBR 8800 apresenta as condições das superfícies parafusadas para que a ligação possa ser considerada por atrito bem como apresenta os correspondentes coeficientes de atrito para essa consideração.

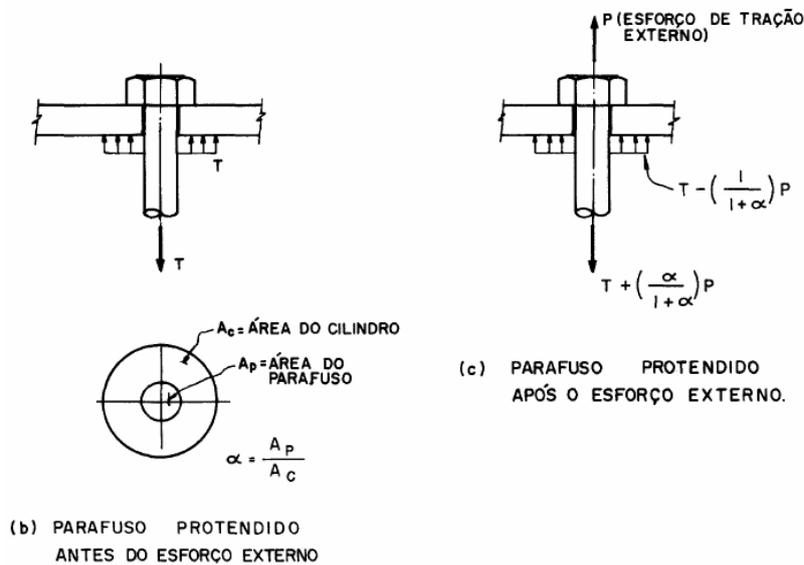


Figura 14 – Transmissão dos Esforços Através do Parafuso de Alta Resistência (Manual CBCA, 2003).

Em ambas as ligações, além dos parafusos, deverão ser verificados o esmagamento do furo, o rasgamento entre os furos e entre o furo e a borda da chapa (Figura 14); tratando-se de ELU (Estados Limites Últimos), todas as verificações deverão ser feitas para as solicitações de cálculo, que são aquelas afetadas do coeficiente γ de ponderação das ações.

No caso da ligação por atrito deverá ser verificada adicionalmente a resistência ao deslizamento para ações nominais nos parafusos (sem o coeficiente γ) por ser este um estado limite de utilização, exceto que, se o efeito da carga permanente for favorável, esta deve ser multiplicada por 0,75. Para efeito de cálculo, as tensões atuantes de tração e cisalhamento nos parafusos são determinadas com base na área nominal do parafuso, $\frac{\pi d^2}{4}$. Nas resistências de cálculo é levada em conta a redução devida à rosca.

4.7 MÉTODO DE APERTO

Segundo a NBR 8800 2008, item 6.7.4.3, deverá ser utilizado aperto pelo método da rotação da porca, quando usado aplica-se a força de proteção mínima especificada na Tabela 2, deve haver número suficiente de parafusos na condição de pré-torque, de forma a garantir que as partes estejam em pleno contato. A condição de pré-torque é definida como o aperto obtido após poucos impactos aplicados por uma chave de impacto, ou pelo esforço máximo aplicado por um operário usando uma chave normal. Após essa operação inicial, devem ser colocados parafusos nos furos restantes e tais parafusos também levados a condição de pré-torque. Todos os parafusos da ligação devem então receber um aperto adicional, através da rotação aplicável da porca, como indicado na Tabela 16, devendo essa operação começar na parte mais rígida da ligação e prosseguir em direção as bordas livres. Durante essa operação a parte oposta aquela em que se aplica a rotação não pode girar.

Tabela 2 - Rotação da porca a partir da posição de pré-torque. (NBR 8800)

Comprimento do parafuso (medido da parte inferior da cabeça à extremidade)	Disposição das faces externas das partes parafusadas		
	Ambas as faces normais ao eixo do parafuso	Uma das faces normal ao eixo do parafuso e a outra face inclinada não mais que 1:20 (sem arruela biselada)	Ambas as faces inclinadas em relação ao plano normal ao eixo do parafuso não mais que 1:20 (sem arruelas biseladas)
Inferior ou igual a 4 diâmetros	1/3 de volta	1/2 volta	2/3 de volta
Acima de 4 diâmetros até no máximo 8 diâmetros, inclusive	1/2 volta	2/3 de volta	5/6 de volta
Acima de 8 diâmetros até no máximo 12 diâmetros ^b	2/3 de volta	5/6 de volta	1 volta

^a A rotação da porca é considerada em relação ao parafuso, sem levar em conta o elemento que está sendo girado (porca ou parafuso). Para parafusos instalados com 1/2 volta ou menos, a tolerância na rotação é de mais ou menos 30°; para parafusos instalados com 2/3 de volta ou mais, a tolerância na rotação é de mais ou menos 45°.

^b Nenhuma pesquisa foi feita para estabelecer o procedimento a ser usado para aperto pelo método da rotação da porca, para comprimentos de parafusos superiores a 12 diâmetros. Portanto, a rotação necessária deve ser determinada por ensaios em um dispositivo adequado que meça a tração, simulando as condições reais.

5 ESTUDO DE CASO

5.1 LOCALIZAÇÃO DA OBRA

A estrutura estudada é uma marquise do edifício Capital Financial Center localizada no setor de indústrias gráficas de Brasília (SIG), em um complexo de prédios comerciais divididos por escritórios de alto padrão.

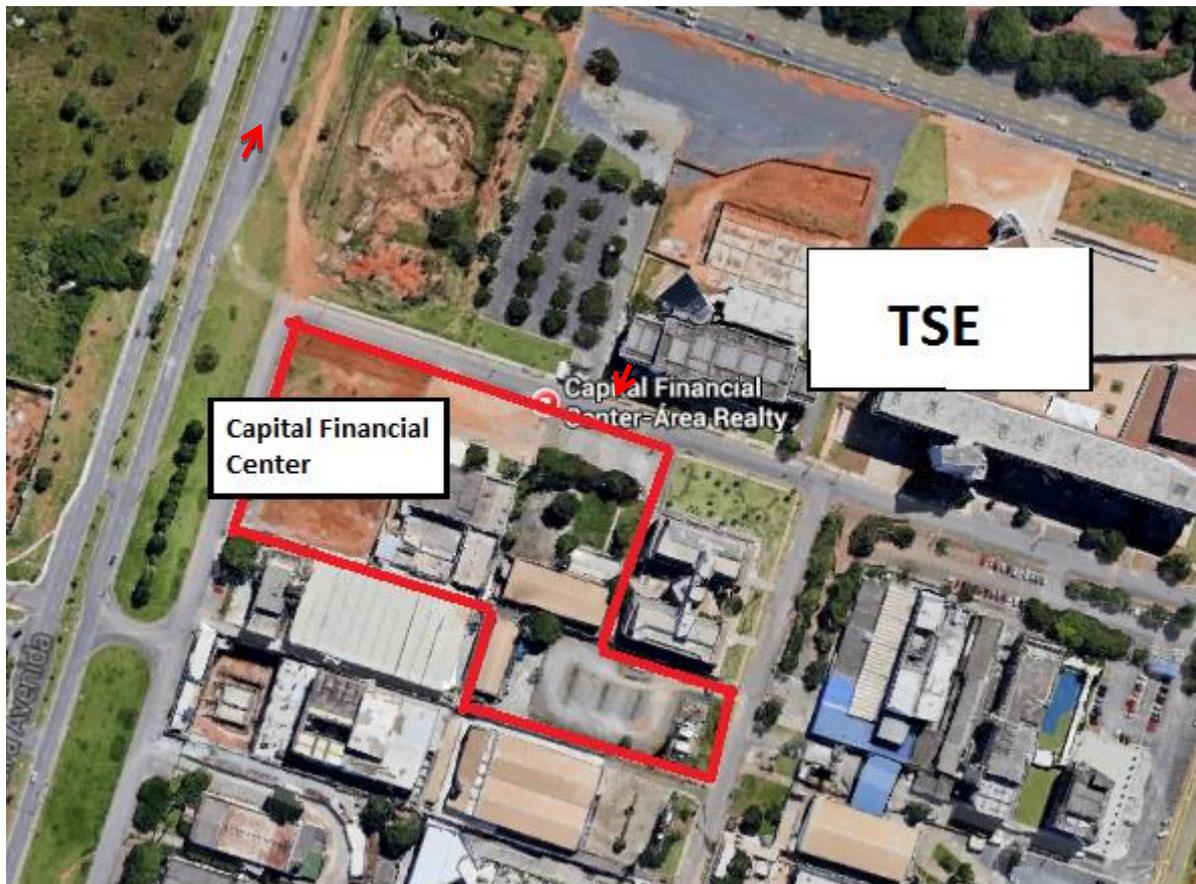


Figura 15 – Localização da estrutura estudada (Google Maps (Modificado)).

5.2 MARQUISE METÁLICA ESTUDADA

A estrutura estudada (Figura 16 e 17) constitui-se numa marquise em estrutura metálica que, cuja emenda da viga principal (perfil W410 x 38,8 kgf/m) foi projetada com ligação parafusada, porém executada com ligação soldada.

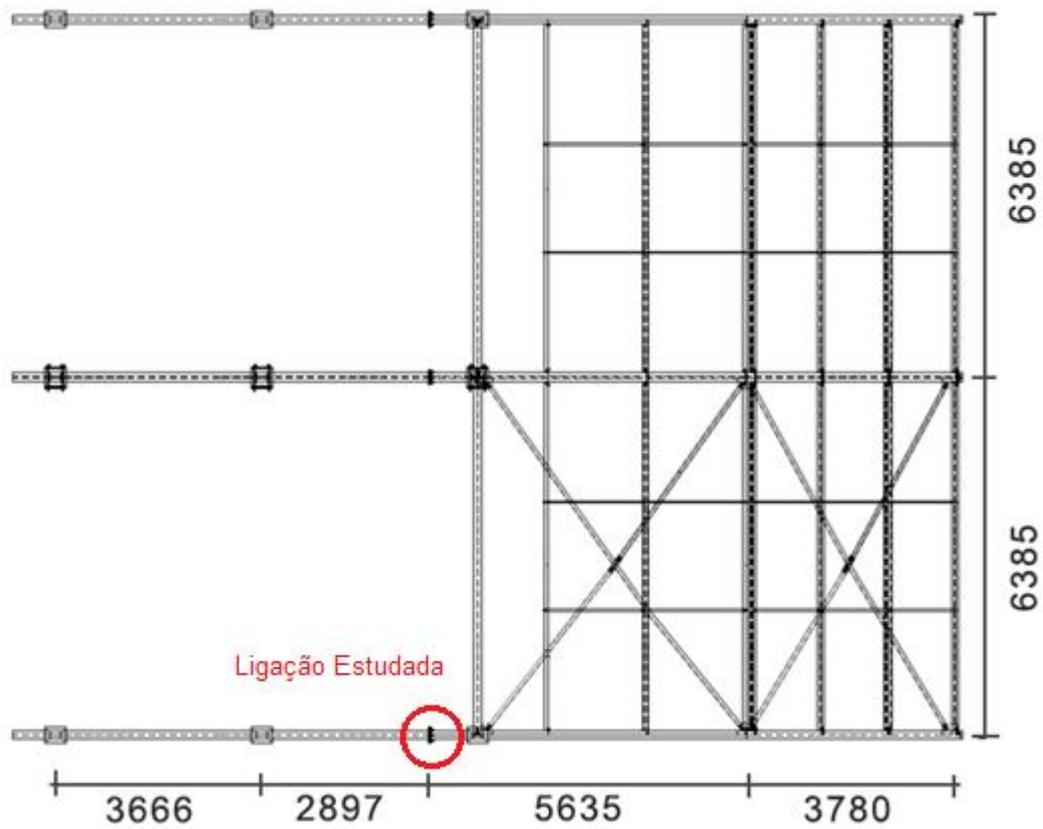


Figura 16 – Planta baixa marquise metálica (Projeto Ferenge Estruturas Metálicas).

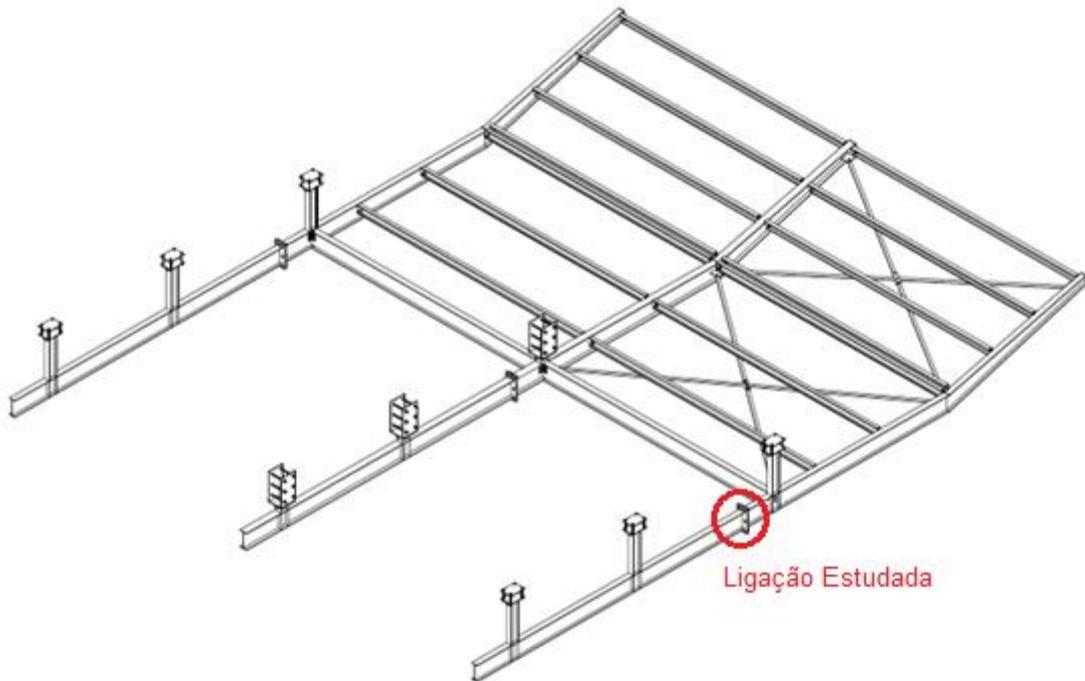


Figura 17 – Perspectiva da marquise metálica (Projeto Feringe Estruturas Metálicas).

5.3 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA

5.3.1 ESFORÇOS E DEFORMAÇÕES DA ESTRUTURA

O carregamento considerado na verificação estrutural está indicado na Tabela 3 e representado ao longo da viga principal na Figura 18.



Figura 18 – Vista lateral marquise metálica (Projeto Feringe Estruturas Metálicas).

Tabela 3 - Carregamento da marquise metálica.

Peso próprio estrutura metálica com revestimento.	30 kgF / m²
Carga de vento	80 kgF / m²

Com o auxílio do software Ftool pode-se desenhar o diagrama de carregamento da marquise (Figura 19) e traçar seus respectivos diagramas de momento fletor (Figura 20) e força cortante (Figura 21).

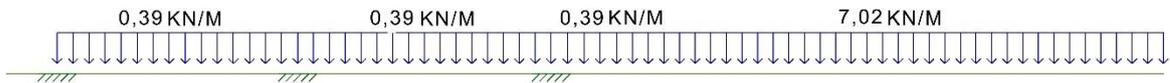


Figura 19 – Diagrama de carregamento marquise metálica (Ftool).

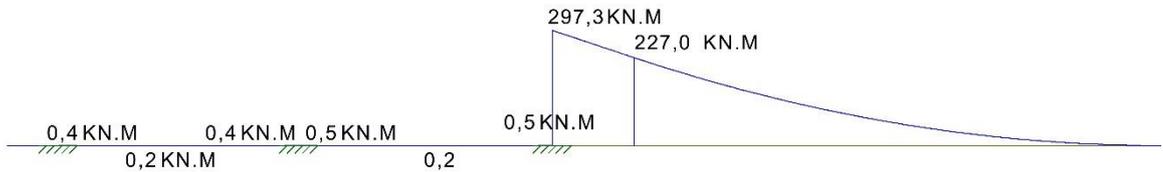


Figura 20 – Diagrama Momento Fletor (Ftool).

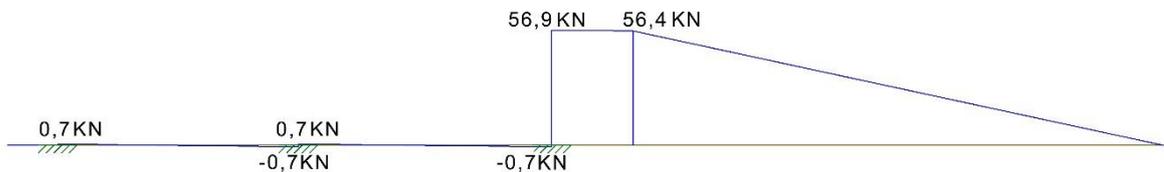


Figura 21 – Diagrama Esforço Cortante (Ftool).

O diagrama de esforço cortante da estrutura estudada demonstra que a força máxima atuante na mesma é de 56,9 kN. A resistência de ligação tanto de solda quanto de parafuso, deve atender esta solicitação de cisalhamento.

5.4 CÁLCULO DO MOMENTO RESISTENTE DA LIGAÇÃO PARAFUSADA

A ligação parafusada de emenda da viga principal é constituída por chapa de topo de espessura 2,54 cm e parafusos de 22mm de diâmetro (Figura 22).

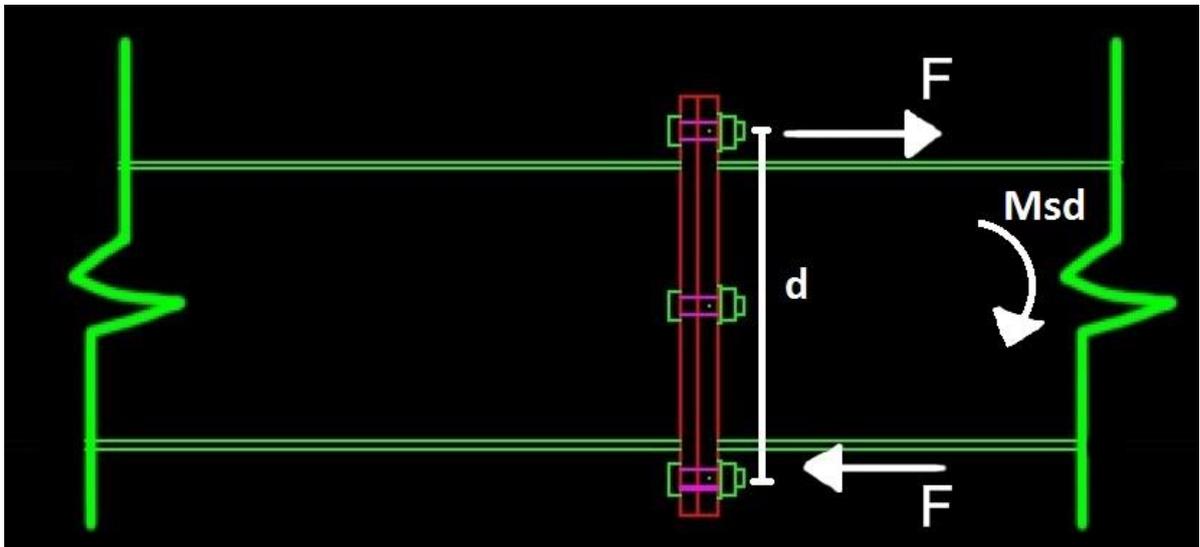


Figura 22: Vista lateral ligação parafusada (Projeto Ferenge Estruturas Metálicas).

As propriedades dos materiais utilizados no projeto está indicado na Tabela 4. Considerando o momento fletor solicitante e o binário de forças resultante nas linhas de parafusos, foi obtido a solicitação de tração em cada parafuso.

Tabela 4 - Propriedades Mecânicas dos Aços para Conectores (NBR 8800)

Tipos de Conector		f_y (Mpa)	f_u (Mpa)
Rebites ASTM A502 ou EB-49	Grau 1		415
	Grau 2		525
Parafusos comuns ASTM A307	$d \leq 102 \text{ mm (4")}$		415
Parafusos de alta resistência ASTM A325	$12,7 \text{ mm (1/2")} \leq d \leq 25,4 \text{ mm (1")}$	635	825
	$25,4 \text{ mm (1/2")} \leq d \leq 38,1 \text{ mm (1 1/2")}$	560	725
Parafusos de alta resistência ASTM A490	$12,7 \text{ mm (1")} \leq d \leq 38,1 \text{ mm (1 1/2")}$	895	1035
Barras rosqueadas	ASTM A36	250	400
	ASTM A588	345	485

Para calcular a resistência da ligação utiliza-se a equação 07

$$F_{sd} \cdot d = M_{sd} \quad (07)$$

Onde:

F_{sd} : Força resultante da linha de parafusos (kN);

d: Distância entre centro de parafusos (48,4 cm);

M_{sd} : Momento de solicitação (29.730 kN.cm);

Então temos:

$$F_{sd} \cdot 48,4 = 29730$$

$$F_{sd} = \frac{29730}{48,4}$$

Logo a força resultante parafusada será:

$$F_{sd} = 614,25 \text{ kN}$$

Porém existem três parafusos na linha, então:

$$F_{sd} = \frac{614,25}{3}$$

Logo a força solicitante de cada parafuso será de:

$$F_{sd} = 204,75 \text{ kN}$$

O dimensionamento dos parafusos é feito através da equação 8:

$$F_{rd} = 0,75 \cdot A_g \cdot f_u \tag{8}$$

Onde:

F_{rd} = Força resultante de projeto da linha de parafusos;

A_g = Área do parafuso;

f_u = resistência à ruptura por tração do aço da chapa;

Como $\varnothing = 22 \text{ mm}$

$$A_g = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 3,80$$

$f_u = 82,5 \text{ kN / cm}^2$ - (A 325) Tabela 4

Com isto pode-se concluir que a força resultante de projeto será de:

$$F_{rd} = 0,75 \cdot (3,80) \cdot 82,5$$

$$F_{rd} = 235,21 \text{ kN}$$

$$F_{rd} = 235,21 \text{ kN} > F_{sd} = 204,75 \text{ kN} \quad OK$$

5.5 CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DE LIGAÇÃO SOLDADA

Foi utilizado solda com filete em todo o perímetro do perfil laminado da viga principal (Figura 23).

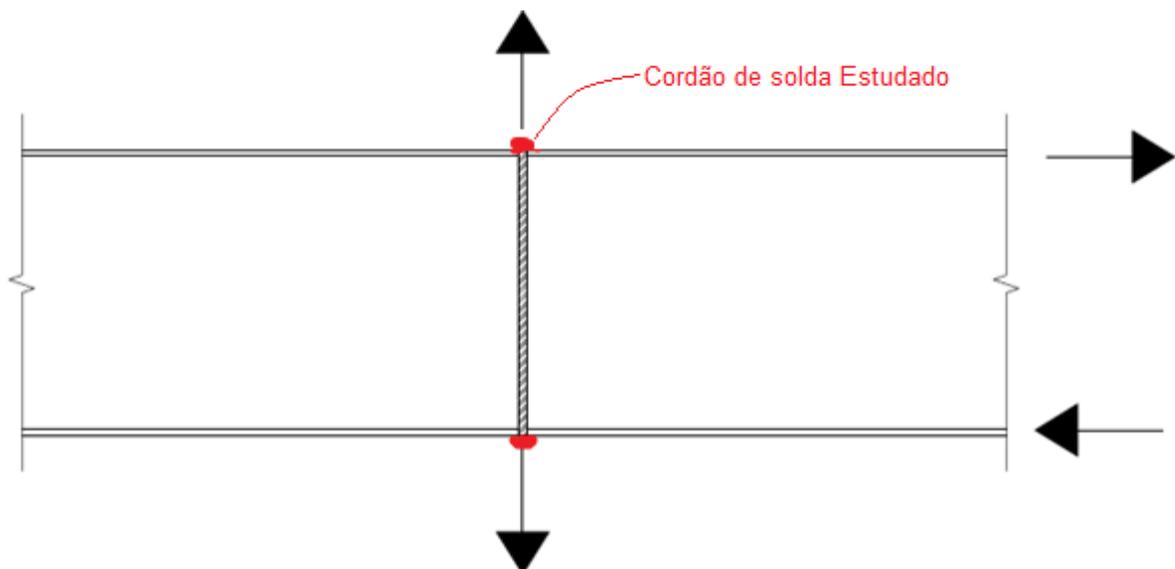


Figura 23: Vista lateral ligação Soldada (Projeto Ferenge Estruturas Metálicas).

As resistências das soldas de filete são dadas segundo a NBR 8800 em função da área da solda indicada na Figura 24 (Equação 1).

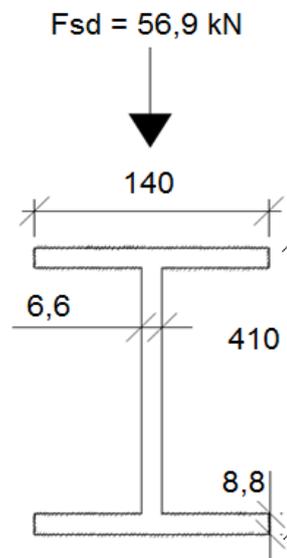


Figura 24: Vista frontal Perfil W (Projeto Ferenge Estruturas Metálicas)

$$A_w = \text{área da solda} = tl \quad (01)$$

Onde $t = 6\text{mm}$ (espessura da garganta da solda (Figura 25))

Então:

$$A_w = 0,6 \cdot [14 \cdot 2 + 2 \cdot 0,88 - 0,66] \cdot 2$$

$$A_w = 34,92 \text{ cm}^2$$

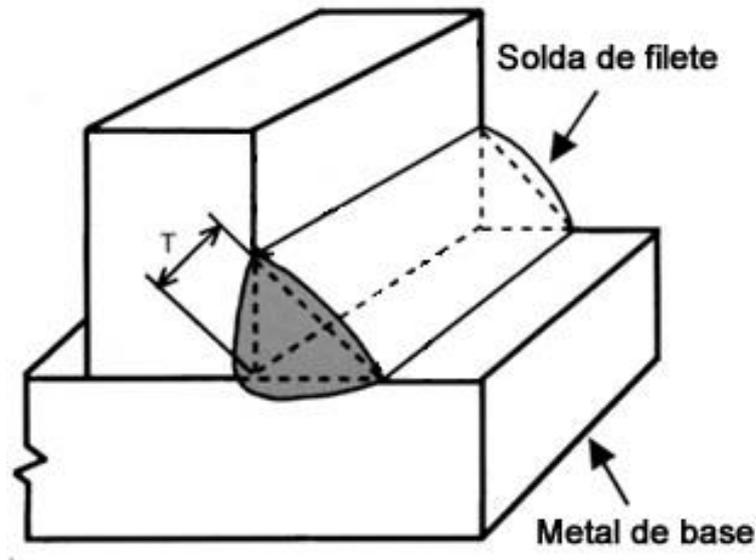


Figura 25: Garganta da solda (Manual CBCA, 2003)

Na resistência de cálculo das soldas de filete não são considerados esforços solicitantes na direção paralela ao eixo longitudinal da solda. Estas solicitações ocorrem em soldas de filete que ligam as chapas componentes de perfis soldados submetidos ao momento fletor.

Entretanto, deve ser considerada a transferência de esforços de uma chapa à outra por cisalhamento através da garganta de solda; o estado limite é o de ruptura do metal da solda.

A resistência de cálculo pode ser obtida com a equação 2:

$$Rd = \frac{A_w \cdot [(0,60) \cdot (f_w)]}{\gamma_{w2}} \quad (2)$$

Onde:

f_w = tensão resistente do metal da solda;

γ_{w2} = 1,35 para combinações normais, especiais ou de construção;

γ_{w2} = 1.15 para combinações excepcionais de ações;

Na Equação 2 o fator 0.60 reduz a resistência para levar em conta incertezas na qualidade da solda na raiz e outros efeitos.

Portanto:

$$R_d = \frac{A_w \cdot [(0,60) \cdot (f_w)]}{\gamma_{w2}}$$

$$R_d = \frac{34,92 \cdot [(0,60) \cdot (41,5)]}{1,35}$$

$$R_d = 644,08 \text{ kN}$$

Portanto, a resistência de solda da estrutura é de 644,08 kN, que atende o esforço solicitante que é de 56,9 kN.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo verificar a resistência de ligações soldadas e parafusadas de uma emenda de viga em estrutura metálica, visando aprofundar no estudo das ligações em estruturas metálicas em relação aos programas curriculares existentes na maioria dos cursos de graduação em Engenharia Civil, que abordam o tema de forma superficial.

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que a alteração do tipo de ligação, de parafusada para soldada, garantiu a continuidade dos elementos conectados, com resistência e rigidez compatíveis com os objetivos adotados no projeto.

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Comparação de segurança entre ligação soldada e parafusada.
- Resistencia de ligação mista.
- Comparativo de tempo de produção da ligação parafusada e ligação soldada.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELLEI, Ildony H. EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS ANDARES EM AÇO. São Paulo: Pini, 2008

Silva, L. S. (2005). LIGAÇÕES METÁLICAS: MÉTODOS AVANÇADOS DE ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO. Coimbra: Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.

Rodrigues, M. C. (2007). AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE "T-STUBS" EM LIGAÇÕES VIGA-COLUNA EM ESTRUTURAS DE AÇO. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Martins, J. G. (2011). ESTRUTURAS METÁLICAS - EC3 (versão 1993). Série ESTRUTURAS.

Figueiredo, L. M. (2004). LIGAÇÕES MISTAS VIGA-PILAR – ANALISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL. São Carlos: Universidade de São Paulo.

CBCA (Centro Brasileiro da Construção em Aço). LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS. 2. Ed. Rio de Janeiro, RJ. IBS/CBCA. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. - elaboração. Rio de Janeiro, 2008.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D1.1-82: Structural Welding Code, 2002