

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ANÁLISE E
DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO E AÇO**

**GRÁFICOS DE INTERAÇÃO DAS FORÇAS RESISTENTES DE
CÁLCULO DE LIGAÇÕES FLEXÍVEIS CONSTITUÍDAS POR DUAS
CANTONEIRAS PARAFUSADAS EM AMBAS AS ABAS**

ANDRÉ LUIZ NOGUEIRA

2017

Resumo

Neste trabalho são apresentados gráficos de interação das forças resistentes de cálculo de ligações flexíveis constituídas por duas cantoneiras parafusadas em ambas as abas considerando a atuação de esforços de cisalhamento e normal na ligação. São utilizados os critérios de estados-limites últimos estabelecidos pela ABNT NBR 8800:2008, associados com outras referências. São expostos os critérios utilizados para a elaboração dos gráficos de interação de força resistente. A partir dos resultados obtidos observou-se que este tipo de ligação tem uma força resistente considerável aos esforços de cisalhamento e esforços axiais de compressão. A força resistente para esforços axiais deste tipo de ligação é baixa devido principalmente ao efeito de flexão na cantoneira.

Com base na elaboração destes gráficos de interação verifica-se que algumas práticas de projeto levam a um aumento da resistência como por exemplo, evitar recorte na viga ou realizar reforço na região do recorte. Outra alternativa para o ganho de resistência está relacionada com o aumento da espessura da alma do perfil.

Palavras-chave: ligações metálicas; curvas de interação para ligação flexível.

SUMÁRIO

	LISTA DE SÍMBOLOS	7
	LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	10
1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVO	13
3	REVISÃO DA LITERATURA	14
3.1	Classificação das Ligações	14
3.2	Composição das Ligações.....	17
3.2.1	Ligação parafusada	17
3.2.2	Ligação soldada	19
3.2.3	Ligação soldada e parafusada	21
3.3	Dimensionamento dos Componentes da Ligação.....	22
3.3.1	Elementos tracionados	22
3.3.2	Cisalhamento	23
3.3.3	Flexão da alma do perfil com recorte	23
3.3.4	Compressão.....	25
3.3.5	Efeito combinado.....	25
3.3.6	Tensão de von Mises	25
3.3.7	Contato entre parafuso e elementos de ligação.....	26
3.3.8	Colapso por rasgamento	26
3.3.9	Parafusos.....	28

3.3.10	Flexão da cantoneira	31
4	LIGAÇÃO FLEXÍVEL POR CANTONEIRA DUPLA	32
4.1	Estados-limites Últimos Aplicáveis ao Parafuso	32
4.1.1	Parafusos do perfil suportado (Perfil 1)	32
4.1.2	Parafusos do perfil portante (Perfil 2)	32
4.2	Estados-limites Últimos Aplicáveis ao Perfil Suportado (Perfil 1)	33
4.2.1	Tensão equivalente de von Mises atuante no recorte	33
4.2.2	Tração pura no recorte	35
4.2.3	Compressão pura no recorte	35
4.2.4	Flexão pura	35
4.2.5	Efeito de flexão e esforço axial combinado	35
4.2.6	Cisalhamento puro	36
4.2.7	Rasgamento entre furo e borda	36
4.2.8	Rasgamento entre furos	39
4.2.9	Esmagamento do furo	40
4.2.10	Rasgamento na região da ligação	40
4.3	Estados-limites Últimos Aplicáveis ao Perfil Portante (perfil 2)	42
4.3.1	Pressão de contato	42
4.4	Estados-limites Últimos Aplicáveis à Cantoneira	43
4.4.1	Rasgamento da cantoneira ligação próximo ao perfil suportado (perfil 1)	43
4.4.2	Rasgamento da cantoneira na região de ligação próximo ao perfil portante	44
4.4.3	Rasgamento entre furo e borda	45
4.4.4	Pressão de contato entre parafuso e cantoneira no perfil suportado (viga)	48
4.4.5	Pressão de contato entre parafuso e cantoneira no perfil portante (portante)	48

4.4.6	Escoamento da seção bruta.....	49
4.4.7	Ruptura da seção líquida.....	49
4.4.8	Compressão.....	50
4.4.9	Escoamento devido cisalhamento da seção bruta.....	50
4.4.10	Ruptura devido cisalhamento da seção líquida.....	50
4.4.11	Tensão equivalente de von Mises região 1	51
4.4.12	Tensão equivalente de von Mises região 2	51
5	RESULTADOS	53
5.1	Perfis W150	54
5.1.1	Dados de entrada.....	54
5.1.2	Verificações construtivas.....	56
5.1.3	Curvas de interação da força resistente	56
5.2	Perfis W200	60
5.2.1	Dados de entrada.....	60
5.2.2	Verificações construtivas.....	61
5.2.3	Curvas de interação da força resistente	62
5.3	Perfis W250	63
5.3.1	Dados de entrada.....	63
5.3.2	Verificações construtivas.....	64
5.3.3	Curvas de interação da força resistente	65
5.4	Perfis W310	66
5.4.1	Dados de entrada.....	66
5.4.2	Verificações construtivas.....	67
5.4.3	Curvas de interação da força resistente	68

5.5	Perfis W360	69
5.5.1	Dados de entrada.....	69
5.5.2	Verificações construtivas.....	71
5.5.3	Curvas de interação da força resistente	71
5.6	Perfis W410	72
5.6.1	Dados de entrada.....	72
5.6.2	Verificações construtivas.....	74
5.6.3	Curvas de interação da força resistente	74
5.7	Análise das Diferentes Curvas de Interação Obtidas.....	75
6	CONCLUSÃO	82
7	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICE A – ARQUIVO MATHCAD PARA CÁLCULO DA INTERAÇÃO DE RESISTÊNCIA	85

LISTA DE SÍMBOLOS

Expressões:

- a' - Distância entre borda do furo e aba livre
- b' - Distância entre borda do furo e região de análise
- c_{cor} - Fator de ajuste para correção devido ao efeito alavanca
- C_t - Coeficiente de ajuste da área
- C_{ts} - Coeficiente de ajuste para cálculo de rasgamento
- $F_{x,max.al}$ - Força máxima sem que ocorra efeito alavanca
- f_m - Limite de resistência médio do material
- f_u - Limite de resistência à ruptura
- f_{ub} - Limite de resistência à ruptura do parafuso
- f_y - Limite de resistência ao escoamento
- inc – coeficiente de inclinação de uma reta qualquer
- int – intercepto de uma reta qualquer
- L_b - Comprimento destravado
- $M\alpha$ - Momento resistente da seção de flexão na cantoneira
- Q_s - Fator de redução para flambagem local de elemento apoiado livre
- Var – Variável qualquer

Letras romanas:

- A - Área
- b - Largura
- c - Curva
- d - Diâmetro
- E - Módulo de elasticidade do aço
- F - Força

G - Módulo de elasticidade transversal do aço
h - Altura
I - Momento de inércia
l - Comprimento ou distância
L - Comprimento
M - Momento fletor
N - Esforço axial
n - Número ou quantidade
p - Largura tributária
Q - Esforço de reação na ligação devido efeito alavanca
S - Rigidez
t - Espessura
V - Esforço cortante
W - Módulo elástico da seção
Z - Módulo plástico da seção

Subscrito:

a - altura
a1 - ponderação ao escoamento
a2 - ponderação a ruptura
Agv - área bruta sujeita a cisalhamento
al - alma
Ant - área líquida sujeita a tração
Anv - área líquida sujeita a cisalhamento
b - *bolt* (parafuso)
ba - borda
c - compressão
ca - cantoneira
ch - chapa
ch2 - chapa 2

comb - combinado
cr - crítico
e - efetiva
f - furo
fl – flexão; flange
g - *gross* (bruta)
h - *hole* (furo)
i - número qualquer
lim - limite
m - modo de falha
n - net - líquida
p - limite para seções compactas
pc - pressão de contato
pf - perfil
pf1 - Perfil 1
pf2 - Perfil 2
pl - plástico
r - limite para seções semicompactas; raio de giração ; correspondente ao início do escoamento;
região; raio de giração
ras - rasgamento
Rd - resistente
re - recorte
Rk - resistente característico
rup - ruptura
s - *shear plane* (plano de corte)
Sd - solicitante
t - tração ; *thickness* (espessura)
v - cisalhamento
V - viga
x - na direção x

y - na direção y

z - na direção z

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

AISC – American Institute of Steel Construction

ANSI – American National Standard Institute

RCSC – Research Council Steel Connection

AWS – American Welding Society

ASTM – American Society for Testing and Materials

1 INTRODUÇÃO

O projeto de uma edificação possui distintas etapas, como o projeto arquitetônico, definição dos carregamentos característicos, seleção de elementos estruturais, análise de desempenho e elaboração de desenhos de detalhamento. As ligações são itens importantes no projeto estrutural, uma vez que devido às características de construção possibilitem que nesta região uma resistência menor que os perfis no qual ela conecta.

O dimensionamento completo de uma ligação envolve a verificação dos estados-limites últimos, como escoamento ou ruptura de seções, tensões atuantes em soldas, flambagem, entre outros. Quando comparado ao dimensionamento de um perfil, o dimensionamento da ligação demanda um maior tempo, devido à quantidade de itens a serem verificados, falta de processos que tornem sua análise automatizada e particularidades das ligações. A falta de conhecimento ou de tempo disponível para encontrar uma ligação satisfatória pode levar o projetista a substituição do perfil por um menos econômico.

Por simplificação, algumas ligações não são verificadas para atuação simultânea de esforços significativos em mais de uma direção, ou seja, não são contabilizados os efeitos conjuntos de cisalhamento e força axial na ligação. Em ligações de vigas com contraventamentos, conforme figura 1-1, e vigas com esforços axiais devido à equipamentos, conforme figura 1-2, a ação da força axial é significativa e não pode ser desprezada no dimensionamento das ligações.

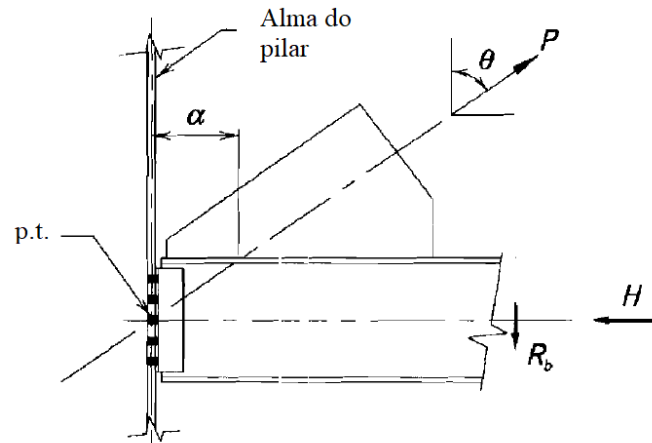


Figura 1-1 - Ligação de viga e contraventamento com coluna. Adaptada (AISC, 2007, p. 13-9)

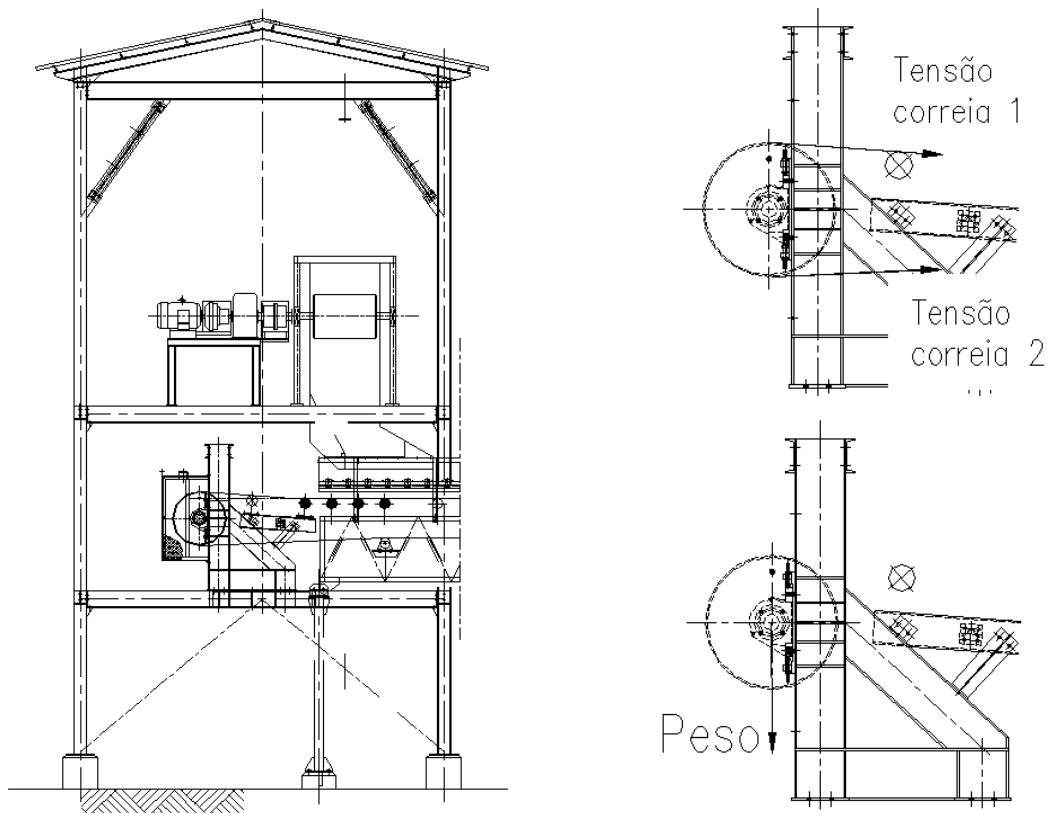


Figura 1-2 – Casa de transferência suportando chassi de um tambor de descarga e forças atuantes no tambor

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo apresentar curvas de interação de força resistente de ligações flexíveis formadas por cantoneiras parafusadas em ambas as abas, considerados esforços de cisalhamento e esforços normais de tração ou compressão, atuando em isolado ou em simultâneo. Através das curvas de interação para cada ligação avaliada será possível verificar rapidamente se a ligação possui resistência a todos os esforços presentes. Para a definição da força resistente das ligações serão considerados os estados-limites últimos prescritos pela ABNT NBR 8800:2008.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A seleção do tipo de ligação é geralmente realizada pela economia, sendo que qualquer decisão particular é primeiramente influenciada pelos equipamentos disponíveis pelo fabricante, mas também é afetada pelas considerações secundárias como velocidade de construção (OWENS e CHEAL, 1989, p. 187). Entretanto a escolha de detalhes pode influenciar também na definição dos perfis da estrutura, ou seja, o detalhe de ligação pode reduzir comprimentos destravados de pilares ou vigas, justificando valores utilizados no cálculo menores que o comprimento total da barra.

3.1 Classificação das Ligações

Para o projeto de vigas e pilares, a capacidade de transferência de esforços e o ângulo de rotação são características fundamentais para o projeto de barras e ligações. Vigas com apoios restritos contra a rotação tendem a ser mais econômicas que vigas bi-apoiadas, uma vez que o valor de momento máximo é menor na primeira configuração, entretanto este esforço deve ser resistido pela coluna que as suportam.

As ligações são classificadas quanto à capacidade de transmissão dos esforços e de rotação da ligação, sendo classificadas como ligação rígida, flexível ou semirrígida. A norma ABNT NBR 8800:2008 em conjunto com o Eurocode 3 Part 1-8(2005) estabelece critérios determinísticos para cada tipo de ligação. A equação (Eq. 3-1) apresenta o limite superior para consideração de uma ligação flexível, e a equação (Eq. 3-2) apresenta o limite inferior para consideração de uma ligação rígida. Para valores intermediários de rigidez, a ligação é classificada como semirrígida.

$$S_i \leq 0.5 \cdot E \cdot \frac{I_V}{L_V} \quad (\text{Eq. 3-1})$$

$$S_i \geq 25 \cdot E \cdot \frac{I_V}{L_V} \quad (\text{Eq. 3-2})$$

Onde:

S_i representa a rigidez da ligação com base em resultados experimentais, ou conforme Eurocode 3 Part 1-8 (2005).

I_v é o momento de inércia da seção transversal no plano da estrutura

L_v é comprimento da viga conectada à ligação

Nas ligações rígidas, o ângulo entre as barras que se interceptam permanece praticamente inalterado após a estrutura ser carregada, mesmo quando atuam momentos fletores elevados. Nesse tipo de ligação, considera-se que há transmissão integral de momento fletor, força cortante e força axial entre os componentes estruturais conectados. A figura 3-1 (a) apresenta o comportamento da ligação rígida. Observa-se que o ângulo formado entre o pilar e a viga antes do esforço, representado por α , pouco difere do ângulo β que representa o ângulo entre a viga e o pilar após aplicação de carregamento na estrutura.

Na ligação flexível, a rotação relativa entre as barras que se interceptam varia consideravelmente, o momento transmitido é muito pequeno, e na prática desprezado, porém com transmissão integral de esforço cortante e esforço axial (FAKURY, CASTRO E SILVA e CALDAS, 2016, p. 244 e 245). Na figura 3-1 (b) observa-se que α difere do ângulo β representando assim uma rotação relativa entre o pilar e a viga conectada. As ligações flexíveis utilizando cantoneiras é muito utilizada entre elementos principalmente devido ao custo e facilidade de fabricação, tendo em vista equipamentos automatizados de corte e furação.

A ligação semirrígida caracteriza-se por apresentar um comportamento intermediário entre o da rígida e da flexível.

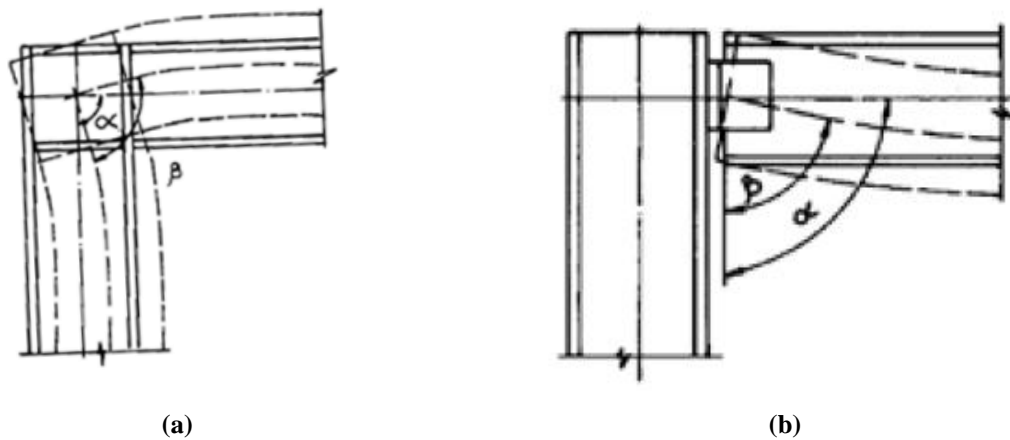


Figura 3-1 – Comportamento da ligação (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2011a, p. 36)

Um resumo da classificação das ligações quanto aos esforços transmitidos e rotação na ligação é apresentada na figura 3-2, onde também são apresentados os detalhes típicos de cada ligação e curva de comportamento. As ligações (a) a (c) são consideradas ligações rígidas, enquanto que a ligação tipo (d) é considerada flexível.

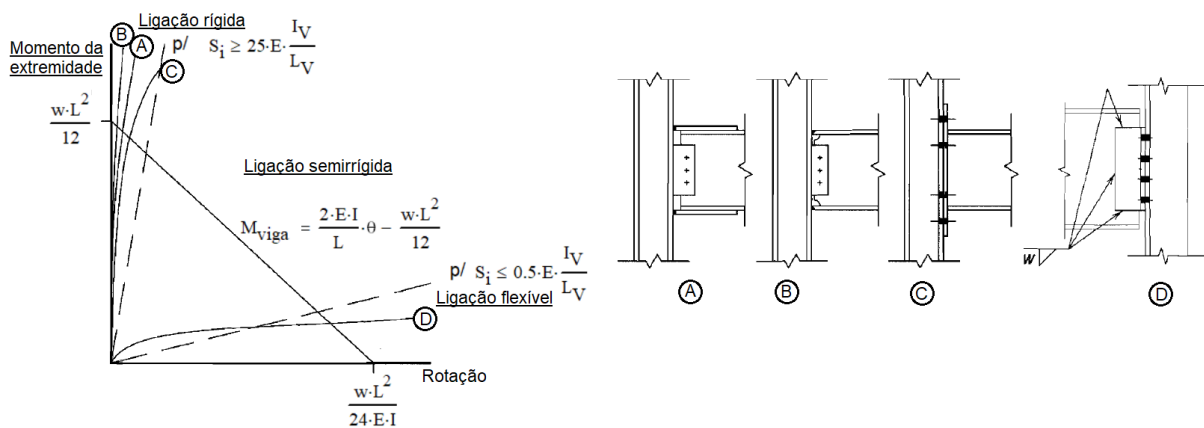


Figura 3-2 – Ilustração da rotação da viga devido ao esforço de momento e ligações típicas. Adaptado (AISC, 2007, p. 10-4 e 12-2)

3.2 Composição das Ligações

Os principais meios de executar uma ligação entre dois perfis comumente empregados na construção civil são solda e parafuso.

Para que as soldas sejam executadas de forma satisfatória devem ser observados diversos parâmetros, como acondicionamento do elemento a ser adicionado, tensão e corrente fornecida para a máquina de solda, posição de montagem, condições do local de soldagem como temperatura e umidade do ar, volume de gás fornecido para processos tipo MIG ou MAG (BLODGETT, FUNDERBURK, *et al.*, 1999). Tendo em vista que a execução de solda em campo tem uma menor taxa de deposição de metal de solda e por envolver principalmente processos manuais de soldagem e limpeza, geralmente as ligações executadas nas fábricas são do tipo soldada e ligações finalizadas no local da obra são realizadas através de parafusos.

3.2.1 Ligação parafusada

Nas ligações parafusadas a transmissão do esforço de cisalhamento nos parafusos pode ocorrer de duas maneiras, a saber: através do contato do parafuso com a chapa ou através de atrito. O tipo de seleção do modo de transmissão do esforço depende da magnitude dos esforços, condição das superfícies de contato, deslocamento permissível da ligação e presença de carregamentos variáveis ou fadiga.

As ligações também são classificadas conforme modo de aperto do parafuso. O aperto pode ser de modo normal e com protensão inicial.

Ligações com aperto normal são comumente empregadas, quando não há nenhuma restrição ao seu uso. O aperto é obtido por alguns impactos de uma chave de impacto ou pelo esforço máximo de um operário usando uma chave padrão sem prolongador. Neste tipo de ligação, o deslocamento entre as chapas constituintes é possível até o contato com o corpo do parafuso. Após o contato, as forças são transmitidas através do corpo do parafuso, sendo que este estará sujeito ao cisalhamento. A figura 3-3 (a) apresenta a transmissão dos esforços.

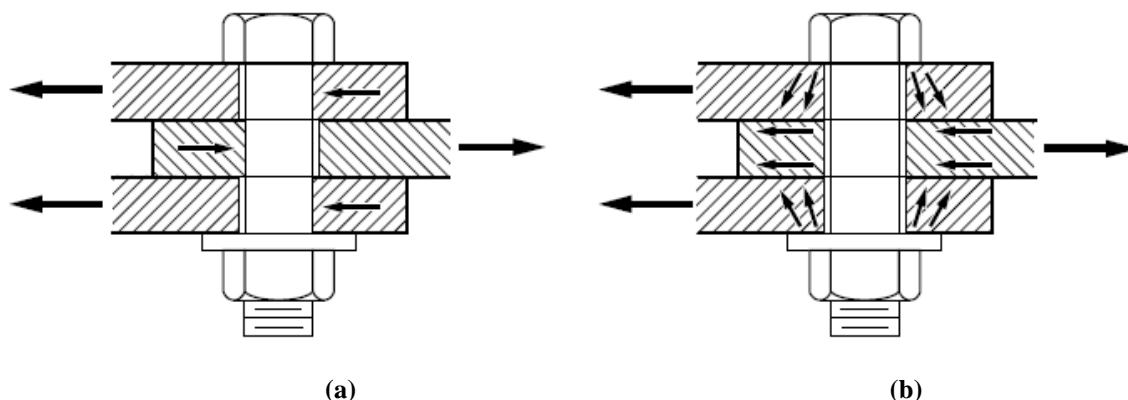


Figura 3-3 – Modos de transferência de esforço em uma ligação parafusada. (a) Através do contato do parafuso com a chapa. (b) Através de atrito entre chapas (Gorenc, Tinyou E Syam, 2005, P. 202)

Ligações com protensão inicial são aquelas que utilizam um aperto inicial do parafuso para que ocorra a transferência inicial do cisalhamento através do atrito entre as chapas. As ligações com protensão inicial devem ser aplicadas nos seguintes casos (ABNT NBR 8800:2008, 2008, p. 65):

- a) Emendas de pilares nas estruturas de múltiplos andares com mais de 40 m de altura;
- b) Ligações de vigas com pilares e com quaisquer outras vigas das quais depende o sistema de contraventamento, nas estruturas com mais de 40 m de altura;
- c) 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;
- d) Ligações de peças sujeitas a ações que produzam impactos ou tensão reversas.

Dentre as ligações que utilizam protensão existem dois tipos, a saber: as ligações por atrito e contato com protensão inicial. No segundo caso a transferência de esforço é inicialmente realizada através do atrito entre as chapas ligantes, entretanto vencido a resistência do atrito existe o escorregamento entre as partes até o contato do corpo do parafuso com a borda do furo. Este tipo de ligação pode ser utilizado nos seguintes casos (RCSC, 2009, p. 16.2-29):

- a) Ligações sujeitas a significativos carregamentos reversíveis;
- b) Ligações sujeitas a carregamentos de fadiga sem reversão a direção dos carregamentos;
- c) Ligações que utilizam parafusos tipo ASTM A325 ou F1852 que estão sujeitas a fadiga devido a tração;
- d) Ligações com parafusos tipo ASTM A490 sujeitas a esforços de tração ou combinação entre cisalhamento e tração, com ou sem fadiga;

As ligações por atrito devem ser utilizadas nos seguintes casos:

- a) Ligações sujeitas a carregamentos de fadiga com reversão da direção do carregamento;
- b) Ligações que utilizam furos alargado;
- c) Ligações que utilizam furos alongados, exceto aqueles com carregamentos aplicados aproximadamente normal a direção de maior dimensão do oblongo;
- d) Ligações no qual o deslizamento das superfícies de contato pode comprometer o desempenho da estrutura.

3.2.2 Ligação soldada

As ligações soldadas transferem o esforço da ligação através das soldas. Os principais tipos de processos utilizados na indústria civil são que utilizam a proteção através de gases fornecidos na tocha GMAW (*gas metal arc welding*) que se subdivide em MIG (*metal inert gas*) e MAG (*metal active gas*), através de eletrodo revestido, da sigla em inglês SMAW (*shielded metal arc welding*), solda arco submerso, ou SAW (*submerged arc welding*) e também através de eletrodo tubular no qual o fluxo é interno ou FCAW (*flux cored arc welding*). Os processos de execução das soldas são semelhantes, o que os difere são custo de produção e capacidade de automação dos processos, enquanto que o processo de soldagem através de eletrodo revestido é de relativa facilidade de execução manual. Este processo de soldagem através de eletrodos revestidos é principalmente utilizado em pequenas soldas, por apresentar também um baixo rendimento.

Existem diferenças construtivas entre as juntas soldadas obtidas por diferentes processos. A AWS D1.1(2004) apresenta as restrições de posição de tipo de soldagem assim como as espessuras limites e aberturas mínimas para execução da soldagem para juntas soldadas pré-qualificadas, ou seja, aquelas que não necessitam de ensaios de resistência de forma a garantir o procedimento de soldagem adotado.

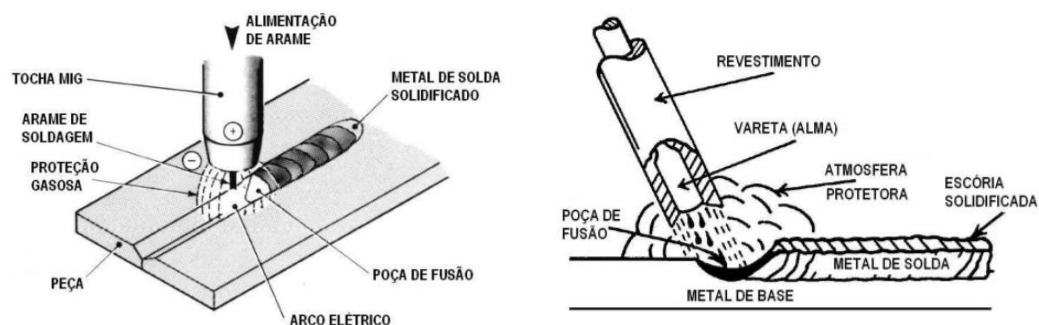


Figura 3-4 – Processos de produção de uma junta soldada através de eletrodo e gás de proteção e através de eletrodo revestido (ESAB, 2005a) e (ESAB, 2005b)

Double-V-groove weld (3)
Butt joint (B)

ALL DIMENSIONS IN mm

Welding Process	Joint Designation	Base Metal Thickness (U = unlimited)		Groove Preparation			Allowed Welding Positions	Total Weld Size (E ₁ + E ₂)	Notes			
		T ₁	T ₂	Root Opening Root Face Groove Angle	Tolerances							
					As Detailed (see 3.12.3)	As Fit-Up (see 3.12.3)						
SMAW	B-P3	12 min	—	R = 0 f = 3 min α = 60°	+2, -0 +U, -0 +10°, -0°	+3, -2 ±2 +10°, -5°	All	S ₁ + S ₂	5, 6, 9, 10			
GMAW FCAW	B-P3-GF	12 min	—	R = 0 f = 3 min α = 60°	+2, -0 +U, -0 +10°, -0°	+3, -2 ±2 +10°, -5°	All	S ₁ + S ₂	1, 6, 9, 10			
SAW	B-P3-S	20 min	—	R = 0 f = 6 min α = 60°	±0 +U, -0 +10°, -0°	+2, -0 ±2 +10°, -5°	F	S ₁ + S ₂	6, 9, 10			

Figura 3-5 – Diferenças construtivas para execução de juntas pré-qualificadas (AWS D1.1/D1.1M, 2004, p. 82)

3.2.3 Ligação soldada e parafusada

Existem ligações que utilizam soldas e parafusos em conjunto na transmissão de esforços concomitantes pelos grupos de parafusos ou soldas, ou que cada elemento desempenhe um papel. A ABNT NBR 8800:2008 expõe as seguintes restrições para o caso de combinações de parafusos e soldas.

- Parafusos não podem ser considerados trabalhando em conjunto com soldas, exceto em ligações à cortante, nas quais parafusos instalados em furos-padrão, ou furos pouco alongados com a maior dimensão transversal a direção da força, podem ser considerados trabalhando em conjunto com filetes longitudinais de solda. No projeto dessas ligações, não deve ser considerada mais que 50 % da força resistente de cálculo no grupo de parafusos.
- Ao se fazerem intervenções em que soldas sejam usadas em estruturas construídas, os rebites e os parafusos de alta resistência (devidamente apartados para atender às exigências das ligações por atrito) já existentes podem ser considerados para resistir às solicitações de cálculo devido às cargas já atuantes. As solicitações devidas aos novos carregamentos devem ser resistidas pelas soldas de reforço que forem acrescentadas à ligação.

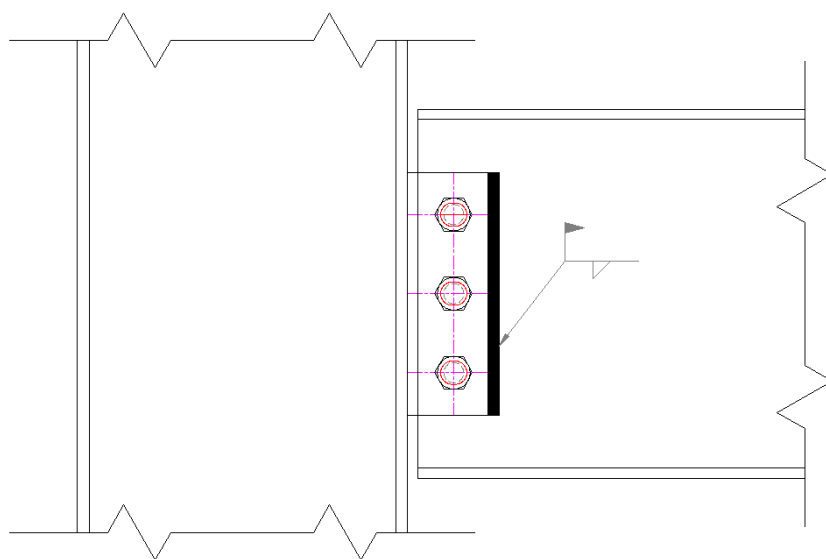


Figura 3-6 – Ligação parafusada e soldada com esforço transmitido simultaneamente por parafuso e solda

3.3 Dimensionamento dos Componentes da Ligação

O dimensionamento da ligação envolve o cálculo das resistências de diversos estados-limites últimos para cada componente da ligação, bem como dos perfis envolvidos. A figura 3-7 apresenta os elementos do tipo de ligação avaliada neste trabalho.

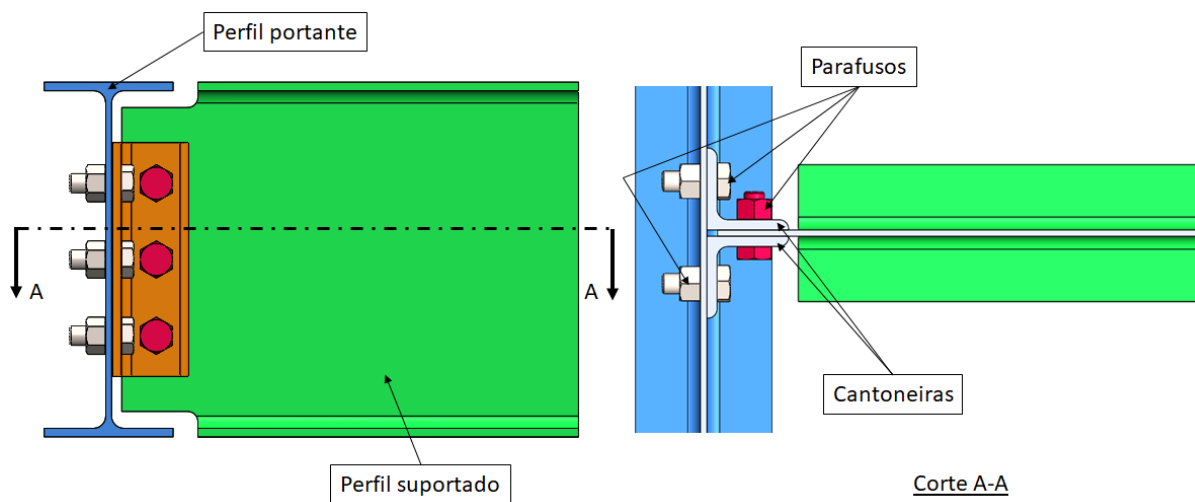


Figura 3-7 – Elementos da ligação

3.3.1 Elementos tracionados

Os seguintes estados-limites são previstos para perfis ou chapas tracionados:

Escoamento da seção bruta:

$$F_{t,esc,Rd} = \frac{f_y \cdot A_g}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Eq. 3-3})$$

Ruptura da seção líquida:

$$F_{t,rupt,Rd} = \frac{f_y \cdot A_e}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Eq. 3-4})$$

Onde:

$$A_e = \min(0.85 \cdot A_g, C_t \cdot A_n) \quad (\text{Eq. 3-5})$$

C_t é o fator de ajuste da área nominal devido à excentricidade da transferência de esforços na região da ligação.

3.3.2 Cisalhamento

A verificação ao cisalhamento deve ser feita com o escoamento da seção líquida e a ruptura da seção bruta, que estão apresentadas nas (Eq. 3-6) e (Eq. 3-7), respectivamente.

$$F_{Rd} = \frac{0.60 \cdot f_y \cdot A_g}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Eq. 3-6})$$

$$F_{Rd} = \frac{0.60 \cdot f_u \cdot A_{nt}}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Eq. 3-7})$$

3.3.3 Flexão da alma do perfil com recorte

A existência de recortes na viga reduz significativamente o esforço resistente ao momento da seção devido à redução da inércia. Os recortes nas vigas são realizados para posicionamento em vigas de mesma altura, ou para facilitar montagem. O recorte pode ser realizado em uma ou ambas as abas. Neste trabalho, foi considerada o recorte de ambas as abas do perfil, de modo a possibilitar a montagem entre vigas com a mesma altura nominal.

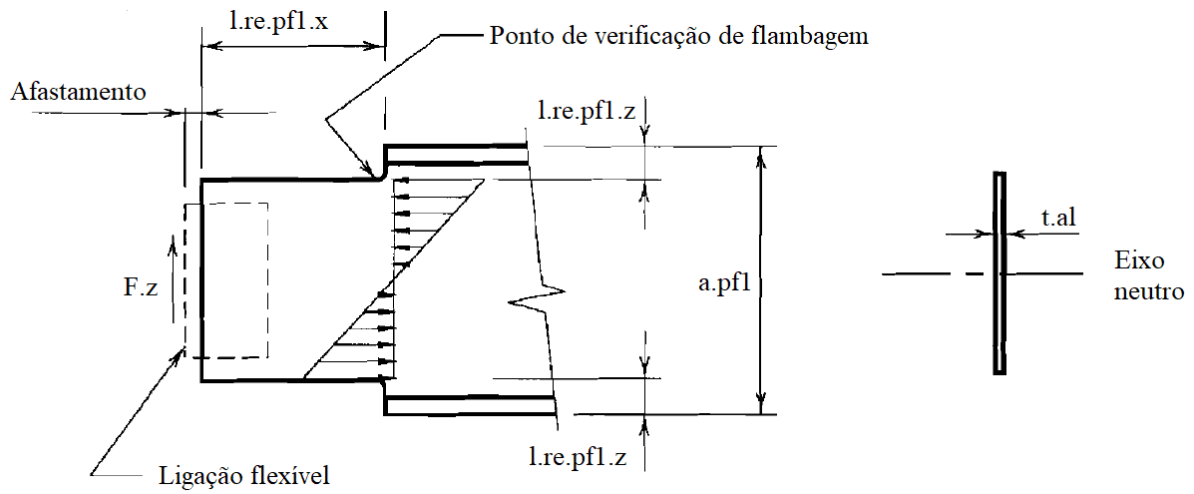


Figura 3-8 – Ponto de verificação de flambagem em uma viga recortada. Adaptado de (AISC, 2007, p. 9-9)

Na região a ser verificada, deve-se avaliar a flambagem lateral com torção da seção, considerando uma seção sólida retangular.

Através do cálculo do índice de esbeltez da região do recorte, e com o cálculo do momento plástico, crítico e momento fletor com início do escoamento da seção considerando tensões residuais é calculado o momento fletor resistente característico da seção. Toda a metodologia deste cálculo é apresentada no anexo G da (ABNT NBR 8800:2008)

$$M_{Rk} = \begin{cases} M_{pl} & \text{if } \lambda < \lambda_p \\ M_{cr} & \text{if } \lambda > \lambda_r \\ \left[C_b \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{Eq. 3-8})$$

$$M_{Rd.re} := \frac{M_{Rk}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Eq. 3-9})$$

3.3.4 Compressão

A análise da compressão da região recortada considera que o comprimento destravado a ser analisado é igual ao comprimento do recorte. A análise da compressão conforme item 4.3 da ABTN NBR 8800:2008.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Eq. 3-10})$$

3.3.5 Efeito combinado

Diante da atuação simultânea de esforços axiais de tração ou de compressão em conjunto com momentos fletores, é necessária verificar a interação destes esforços com a resistência da seção.

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \cdot \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1 \quad \text{if} \quad \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0.2 \quad (\text{Eq. 3-11})$$

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1 \quad \text{if} \quad \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0.2 \quad (\text{Eq. 3-12})$$

3.3.6 Tensão de von Mises

A tensão equivalente de von Mises não pode ultrapassar o valor da resistência ao escoamento do material. Para o estado triaxial a tensão equivalente de von Mises é calculada como:

$$\sqrt{\frac{(\sigma_{x,Sd} - \sigma_{y,Sd})^2 + (\sigma_{x,Sd} - \sigma_{z,Sd})^2 + (\sigma_{y,Sd} - \sigma_{z,Sd})^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}{2}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Eq. 3-13})$$

Para o estado plano de tensão, que é um caso particular do estado triaxial, são anulados os termos fora do plano de análise, e equação pode ser reescrita como:

$$\sqrt{\sigma_{x.Sd}^2 - \sigma_{x.Sd} \cdot \sigma_{y.Sd} + \sigma_{y.Sd}^2 + 3 \cdot \tau_{xy.Sd}^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Eq. 3-14})$$

3.3.7 Contato entre parafuso e elementos de ligação

Este estado corresponde a ruptura que pode ocorrer na região entre furos, região entre furo e borda da chapa, ou então amassamento da região de contato do parafuso em uma chapa. A equação que define a força resistente deste estado-limite é:

$$F_{Rd} = \min \left(\frac{1.2 \cdot l_f \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{a2}}, \frac{2.4 \cdot d_b \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \right) \quad (\text{Eq. 3-15})$$

Onde o primeiro termo da equação representa o rasgamento entre furo e bora, e o segundo termo da equação representa o esmagamento da parede do furo. A equação (Eq. 3-15) fornece a força resistente por parafuso.

3.3.8 Colapso por rasgamento

Neste caso pode ocorrer um rasgamento na região da ligação como um todo, principalmente na região que contém os furos. Para este estado-limite a força resistente é determinada pela soma das forças resistentes na região.

$$F_{r,Rd} = \min \left(\frac{0.6 \cdot A_{nv} \cdot f_u + C_{ts} \cdot A_{nt} \cdot f_u}{\gamma_{a2}}, \frac{0.6 \cdot A_{gv} \cdot f_y + C_{ts} \cdot A_{nt} \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \right) \quad (\text{Eq. 3-16})$$

Onde a primeiro termo da primeira equação representa um colapso por rasgamento da seção líquida em cisalhamento, e o primeiro termo da segunda equação representa o escoamento da seção bruta em cisalhamento. Para ambas as equações o segundo termo representa o colapso por rasgamento da seção líquida por tração. A (Eq. 3-16) considera somente esforço em uma direção. Em uma situação no qual atuam esforço axial e de cisalhamento a equação não pode ser analisada, uma vez que ao mesmo tempo uma mesma área poderá estar sob esforço axial

para uma esforço axial e sob esforço de cisalhamento sob esforço de cisalhamento. A figura 3-9 apresenta este tipo de comportamento nas áreas sujeitas a ruptura na ligação.

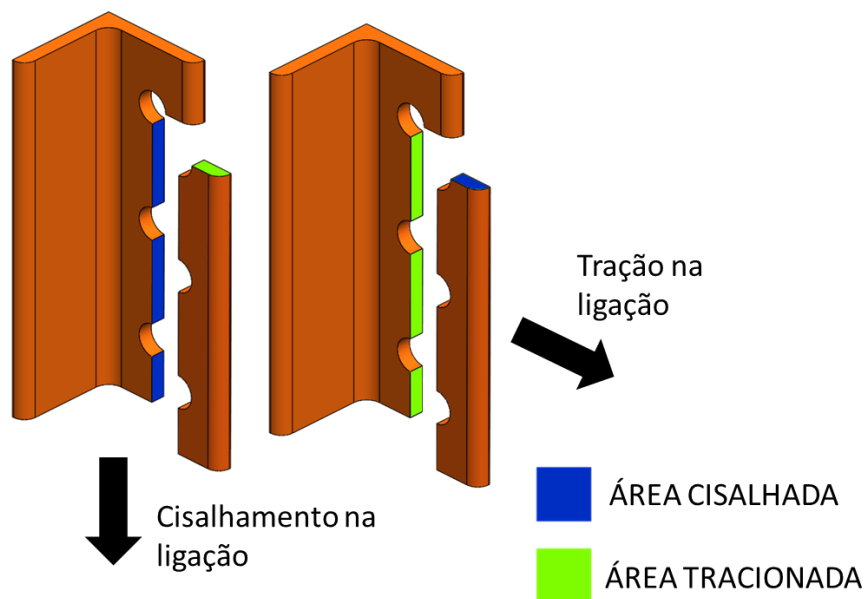


Figura 3-9 – Comportamento das áreas sujeitas a ruptura conforme direção do esforço na ligação

JÖNSSON em seus estudos apresentou uma proposta para considerar a influência de momento, esforço cortante e tração nas ligações. O autor utilizou um método baseado na plasticidade incluindo a influência dos três esforços na ruptura por rasgamento na região da ligação. Devido a variação do trabalho a frio ao longo das linhas de escoamento, a fratura final da região foi calculada com considerando uma resistência ao escoamento do material maior que a indicada no ensaio, que é função tanto do limite de resistência ao escoamento e do limite de resistência a ruptura do material.

$$f_{.m} = \frac{f_{.y} + f_{.u}}{2} \quad (\text{Eq. 3-17})$$

JÖNSSON propõe que a capacidade da ligação para resistir aos esforços que sofra um rasgamento em C pode ser calculada como:

$$N_R = t \cdot f_m \cdot \left(2 \cdot \frac{b_g}{\sqrt{3}} + h_n \right) \quad (\text{Eq. 3-18})$$

$$V_R = t \cdot f_m \cdot \left(2 \cdot b_n + \frac{h_g}{3} \right) \quad (\text{Eq. 3-19})$$

$$M_R = t \cdot h_g \cdot f_m \cdot \left(\frac{b_g}{\sqrt{3}} + \frac{h_n}{4} \right) \quad (\text{Eq. 3-20})$$

Para uma ruptura em L as forças resistentes podem ser calculadas como:

$$N_R = t \cdot f_m \cdot \left(\frac{b_g}{\sqrt{3}} + h_n \right) \quad (\text{Eq. 3-21})$$

$$V_R = t \cdot f_m \cdot \left(b_n + \frac{h_g}{3} \right) \quad (\text{Eq. 3-22})$$

$$M_R = t \cdot h_g \cdot f_m \cdot \left(\frac{b_g}{2\sqrt{3}} - \frac{b_g^2}{12 \cdot h_n} + \frac{h_n}{4} \right) \quad (\text{Eq. 3-23})$$

Onde:

b_g é a largura bruta da ligação;

b_n é a largura líquida da ligação, ou seja, desconsidera-se os furos;

h_g é a altura líquida da ligação;

h_n é a altura líquida da ligação, ou seja, desconsidera-se os furos.

Neste trabalho não será considerada a parcela do momento, tendo em vista seu valor insignificante gerado devido a pequena excentricidade da ligação.

Jönsson também apresentou uma equação para interação dos esforços para a força resistente:

$$\left(\frac{N}{N_R} + \frac{M}{M_R} \right)^2 + \left(\frac{V}{V_R} \right)^2 \leq 1 \quad (\text{Eq. 3-24})$$

3.3.9 Parafusos

Os parafusos da ligação podem estar submetidos a esforços de cisalhamento, tração ou ambos dependendo da posição do parafuso.

A força resistente do parafuso submetido ao esforço de tração pode ser calculada como:

$$F_{t.Rd} = \frac{0.75 \cdot 0.25 \cdot \pi \cdot d_b^2 \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Eq. 3-25})$$

O fator de 0.75 leva em conta o efeito de redução da área do parafuso devido a rosca.

A força resistente ao cisalhamento do parafuso com plano de corte passando pela rosca pode ser calculada conforme a (Eq. 3-26).

$$F_{v.Rd} = \frac{0.4 \cdot A_b \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Eq. 3-26})$$

O fator de 0.4 leva em conta em conjunto a perda de seção devido a rosca e também o efeito de cisalhamento no parafuso.

De modo a levar em conta a interação entre os esforços, a soma da razão entre as esforço solicitante e esforço resistente ao quadrado, não pode ser superior a unidade, ou seja:

$$\left(\frac{F_{t.Sd}}{F_{t.Rd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{v.Sd}}{F_{v.Rd}} \right)^2 \leq 1 \quad (\text{Eq. 3-27})$$

O efeito alavanca ocorre em chapas de pequena espessura onde existe um aumento do esforço atuante de tração no parafuso devido a uma alavanca que é gerada pela chapa. Para chapas de grande espessura ou para cargas muito pequenas este efeito pode ser desprezado. Entretanto como os esforços da ligação não são conhecidos, será considerado a atuação do efeito alavanca a partir de um esforço axial limítrofe na ligação. Também será considerado o aumento do esforço axial no parafuso devido a este fenômeno. O procedimento adotado foi adaptado de (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2011a, p. 38). Inicialmente calcula-se a carga máxima para que o efeito alavanca seja desconsiderado.

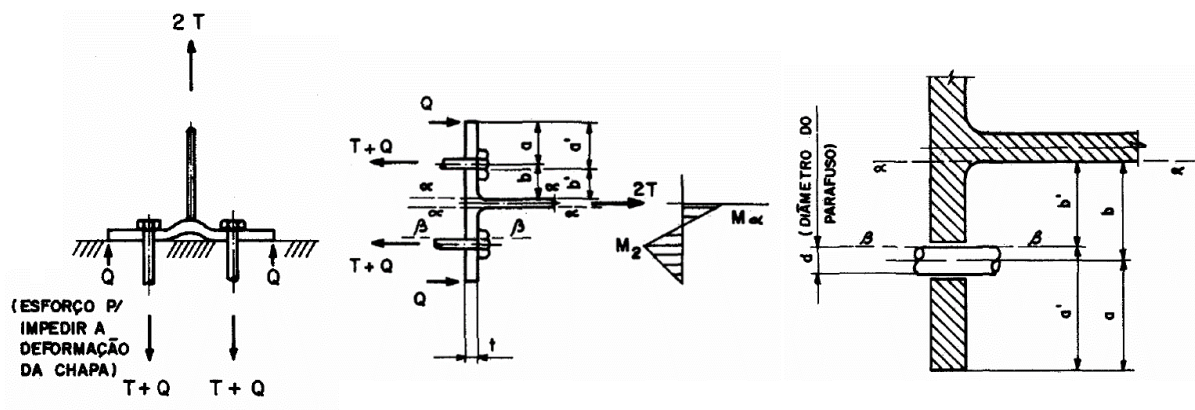


Figura 3-10 – Efeito alavanca, seu efeito na chapa e detalhe geométrico da ligação. Adaptado de (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2011a)

Quando a chapa possui espessura suficiente, a chapa de base não se deforma consideravelmente, o que não gera um aumento no esforço no parafuso. Quando a chapa de base é muito flexível, a sua deformação gera um aumento de esforço no parafuso “Q” da carga inicial. Através de manipulação das equações inicialmente apresentadas na referência, pode-se calcular este aumento de esforço através da (Eq. 3-28).

$$Q = \frac{T \cdot b' - M_{\alpha}}{a'} \quad (\text{Eq. 3-28})$$

Onde M_{α} é o momento resistente da seção contra a plastificação, utilizado o módulo elástico da seção.

O esforço total no parafuso pode ser calculado como:

$$F_b = \left(\frac{Q}{T} + 1 \right) \cdot T \quad (\text{Eq. 3-29})$$

O fator de aumento da força de tração no parafuso devido ao efeito alavanca, pode ser escrito como:

$$c_{cor} := \left(\frac{\frac{Q}{F_{x,max.al}}}{n_{b.pt2}} + 1 \right) \quad (\text{Eq. 3-30})$$

3.3.10 Flexão da cantoneira

A resistência da seção da cantoneira de modo a evitar a plastificação da seção devido a flexão é calculada da seguinte maneira:

$$M_{Rd.ca.al} = \frac{1.5}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{p_{ca.1} \cdot t_{ca}^2}{6} \cdot \sigma_{esc.ca} \quad (\text{Eq. 3-31})$$

A força limite de tração por parafuso para que não seja necessário considerar o efeito alavanca pode ser escrito através de:

$$F_{lim} = \frac{M_{Rd.ca.al}}{(l_{pe.h.ca.1} - 0.5 \cdot d_h)} \quad (\text{Eq. 3-32})$$

4 LIGAÇÃO FLEXÍVEL POR CANTONEIRA DUPLA

Para uma ligação submetida a um esforço em duas direções, as equações inicialmente apresentadas no item 3 devem ser reescritas de modo a contabilizar o esforço em ambas as direções, assim como a sua sobreposição.

Como o objetivo principal deste trabalho é fornecer curvas de interação da ligação, as equações também devem ser reescritas como funções do esforço de cisalhamento máximo resistente, considerando uma carga axial atuante na ligação, ou seja, as equações fornecidas serão em função da carga axial (F_x).

4.1 Estados-limites Últimos Aplicáveis ao Parafuso

4.1.1 Parafusos do perfil suportado (Perfil 1)

Os parafusos que conectam na viga que é suportada na cantoneira estão submetidos apenas ao esforço de cisalhamento. Através da manipulação da (Eq. 3-26), e tendo em vista que o esforço de tração na ligação em conjunto com o esforço de cisalhamento na ligação produzirão em conjunto um esforço resultante de cisalhamento no parafuso, conforme aprestado na (Eq. 4-1) obtém-se o esforço de resistente de cisalhamento na ligação conforme apresentado na (Eq. 4-2):

$$\sqrt{F_{x.Sd}^2 + F_{z.Sd}^2} \leq F_{v.Rd} \quad (\text{Eq. 4-1})$$

$$F_{z.cis.al}(F_x) = \sqrt{\left(\frac{0.4 \cdot n_{s,pf1} \cdot A_b \cdot \sigma_{rup.b}}{\gamma_{a2}} \cdot n_{b,pf1} \right)^2 - F_x^2} \quad (\text{Eq. 4-2})$$

4.1.2 Parafusos do perfil portante (Perfil 2)

Os parafusos entre o perfil portante e a cantoneira estão submetidos a esforço axial e de cisalhamento. Será considerado que o esforço de compressão é transmitido através do contato

entre a cantoneira e o perfil portante. Para o caso do esforço axial de tração na ligação, os parafusos sofrer aumento deste esforço devido ao efeito alavanca a partir de um valor pré-determinado que depende da geométrica da ligação. Este esforço é determinado através da (Eq. 3-32). Assim, são definidas três regiões de resistência do parafuso. Uma no qual não existe tração, a duas com esforço combinado e cisalhamento e tração, uma na qual a valor do esforço de tração está abaixo do valor limite para considerar o efeito alavanca e outra com valores acima. O fator para correção do efeito alavanca é calculado através da (Eq. 3-30). Logo o equacionamento da força resistente do conjunto de parafusos entre a cantoneira e o perfil portante pode ser escrito como:

$$F_{z.co.b.pf2}(F_x) = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{0.4 \cdot n_s \cdot pf2 \cdot A_b \cdot \sigma_{rup.b}}{\gamma_{a2}} \cdot n_{b.pf2}\right)^2} & \text{if } F_x \leq 0 \\ \sqrt{\left(\frac{0.4 \cdot n_s \cdot pf2 \cdot A_b \cdot \sigma_{rup.b}}{\gamma_{a2}} \cdot n_{b.pf2}\right)^2 - \frac{(F_x)^2}{\left(\frac{0.75 \cdot A_b \cdot \sigma_{rup.b} \cdot n_{b.pf2}}{\gamma_{a2}}\right)^2} \cdot \left(\frac{0.4 \cdot n_s \cdot pf2 \cdot A_b \cdot \sigma_{rup.b}}{\gamma_{a2}} \cdot n_{b.pf2}\right)^2} & \text{if } F_x > 0 \wedge F_x \leq F_{lim} \cdot n_{b.pf2} \\ \sqrt{\left(\frac{0.4 \cdot n_s \cdot pf2 \cdot A_b \cdot \sigma_{rup.b}}{\gamma_{a2}} \cdot n_{b.pf2}\right)^2 - \frac{(c_{cor} \cdot F_x)^2}{\left(\frac{0.75 \cdot A_b \cdot \sigma_{rup.b} \cdot n_{b.pf2}}{\gamma_{a2}}\right)^2} \cdot \left(\frac{0.4 \cdot n_s \cdot pf2 \cdot A_b \cdot \sigma_{rup.b}}{\gamma_{a2}} \cdot n_{b.pf2}\right)^2} & \text{if } F_x > F_{lim} \cdot n_{b.pf2} \end{cases} \quad (\text{Eq. 4-3})$$

4.2 Estados-limites Últimos Aplicáveis ao Perfil Suportado (Perfil 1)

4.2.1 Tensão equivalente de von Mises atuante no recorte

A partir da simplificação da (Eq. 3-14) através da retirada dos termos nulos da equação, e substituindo inicialmente os termos da equação pelas tensões atuantes, obtém-se:

$$\sqrt{\left(\frac{F_x}{A_{re}} + \frac{M \cdot c}{I_{re}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{F_z}{A_{re}}\right)^2} \leq \frac{\sigma_{esc}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Eq. 4-4})$$

Substituindo dos termos da (Eq. 4-4).

$$\sqrt{\left[\frac{F_x}{A_{re}} + \frac{F_z \cdot (1_{pf1.ch2} + 1_{re.pf1.x}) \cdot \frac{1_{re.pf1.z}}{2}}{I_{re}}\right]^2 + 3 \cdot \left(\frac{F_z}{A_{re}}\right)^2} \leq \frac{\sigma_{esc}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Eq. 4-5})$$

Isolando os termos para a força cortante F_z , a equação fica da seguinte forma:

$$F_{z1}^2 \left[\frac{(l_{pf1.ch2} + l_{re.pf1.x})^2 \cdot \left(\frac{l_{re.pf1.z}}{2} \right)^2}{I_{re}^2} + \frac{3}{A_{re}^2} \right] \dots \leq 0 \quad (\text{Eq. 4-6})$$

$$+ F_{z1} \left[\frac{2 \cdot F_{x1}}{A_{re}} \cdot \frac{(l_{pf1.ch2} + l_{re.pf1.x}) \cdot \left(\frac{l_{re.pf1.z}}{2} \right)}{I_{re}} \right] + \left[\frac{F_{x1}^2}{A_{re}^2} - \left(\frac{\sigma_{esc.pf1}}{\gamma_{a1}} \right)^2 \right]$$

O que a torna uma inequação de segundo grau. A solução desta inequação gera o par ordenado F_x e F_z das forças resistentes da alma do perfil recortado chapa submetido ao esforço combinado.

$$F_{z.esc.re.pf1}(F_x) = \begin{cases} \frac{-b_2(F_x) + \sqrt{b_2(F_x)^2 - 4 \cdot a_1 \cdot c_1(F_x)}}{2 \cdot a_1} & \text{if } F_x < 0 \\ \frac{-b_1(F_x) + \sqrt{b_1(F_x)^2 - 4 \cdot a_1 \cdot c_1(F_x)}}{2 \cdot a_1} & \text{if } F_x \geq 0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 4-7})$$

A outra raiz da equação (Eq. 4-6) produz um gráfico de interação com valores de resistência maiores do que a raiz apresentada na (Eq. 4-7), devido ao fato de se analisar região na qual o esforço de momento produz um efeito contrário ao esforço axial na ligação..

Onde:

$$a_1 = \frac{(l_{pf1.re})^2 \cdot \left(\frac{a_{re}}{2} \right)^2}{I_{re}^2} + \frac{3}{A_{re}^2} \quad (\text{Eq. 4-8})$$

$$b_1(F_x) = 2 \cdot \frac{F_{x1}}{A_{re}} \cdot \frac{l_{pf1.re} \cdot \frac{a_{re}}{2}}{I_{re}} \quad (\text{Eq. 4-9})$$

$$b_2(F_x) = - \left(2 \cdot \frac{F_{x1}}{A_{re}} \cdot \frac{l_{pf1.re} \cdot \frac{a_{re}}{2}}{I_{re}} \right) \quad (\text{Eq. 4-10})$$

$$c_1(F_x) = \frac{F_{x1}^2}{A_{re}^2} - \frac{\sigma_{esc.pf1}^2}{\gamma_{a1}^2} \quad (\text{Eq. 4-11})$$

4.2.2 Tração pura no recorte

A avaliação de tração pura no recorte considera o escoamento da seção bruta conforme (Eq. 3-3) e ruptura da seção líquida conforme (Eq. 3-4).

$$F_{Rd.t.pf1} = \min \left(\frac{A_{g.t.pf1} \cdot \sigma_{esc.pf1}}{\gamma_{a1}}, \frac{A_{n.t.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1}}{\gamma_{a2}} \right) \quad (\text{Eq. 4-12})$$

4.2.3 Compressão pura no recorte

O dimensionamento da compressão no recorte é tomado a partir da equação básica (Eq. 3-10).

$$F_{Rd.c.pf1} = \frac{A_{g.t.pf1} \cdot \chi \cdot \sigma_{esc.pf1}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Eq. 4-13})$$

4.2.4 Flexão pura

O dimensionamento na região recortada é realizado a partir da (Eq. 3-8), onde também é calculado o índice de esbeltez reduzido para o recorte.

$$M_{Rd.rec} = \frac{M_{Rk}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Eq. 4-14})$$

4.2.5 Efeito de flexão e esforço axial combinado

A partir das (Eq. 3-11) e (Eq. 3-12) se define os valores admissíveis para a ligação. Substituindo os valores dos esforços solicitantes e dos esforços resistentes, anteriormente definidos, obteve-se a (Eq. 4-15).

$$F_{z.fl.comb}(F_{.x}) = \begin{cases} \left[\left(1 - \frac{-F_{.x}}{F_{.Rd.c.pf1}} \right) \cdot \frac{M_{.Rd.re}}{L_{.b}} \cdot \frac{9}{8} \right] & \text{if } \frac{F_{.x}}{F_{.Rd.c.pf1}} \leq -0.2 \\ \left[\left(1 - \frac{-F_{.x}}{F_{.Rd.c.pf1} \cdot 2} \right) \cdot \frac{M_{.Rd.re}}{L_{.b}} \right] & \text{if } \frac{F_{.x}}{F_{.Rd.c.pf1}} \leq 0 \wedge \frac{F_{.x}}{F_{.Rd.c.pf1}} > -0.2 \\ \left[\left(1 - \frac{F_{.x}}{F_{.Rd.t.pf1} \cdot 2} \right) \cdot \frac{M_{.Rd.re}}{L_{.b}} \right] & \text{if } \frac{F_{.x}}{F_{.Rd.t.pf1}} > 0 \wedge \frac{F_{.x}}{F_{.Rd.t.pf1}} < 0.2 \\ \left[\left(1 - \frac{F_{.x}}{F_{.Rd.t.pf1}} \right) \cdot \frac{M_{.Rd.re}}{L_{.b}} \cdot \frac{9}{8} \right] & \text{if } \frac{F_{.x}}{F_{.Rd.t.pf1}} \geq 0.2 \end{cases} \quad (\text{Eq. 4-15})$$

4.2.6 Cisalhamento puro

Para o cisalhamento foram consideradas duas condições, uma na qual existe o escoamento da seção bruta, conforme inicialmente proposto pela (Eq. 3-6) e outra na qual é considerado a ruptura da seção líquida na região de furos.

$$F_{z.cis} = \min \left(\frac{A_{g.t.pf1} \cdot \sigma_{esc.pf1} \cdot 0.6}{\gamma_{.a1}}, \frac{A_{n.t.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1} \cdot 0.6}{\gamma_{.a2}} \right) \quad (\text{Eq. 4-16})$$

4.2.7 Rasgamento entre furo e borda

Foram definidos 6 ângulos nos quais são feitas as análises. Os ângulos de estudo são 30°, 45°, 90°, 150°, 180° e α_4 . Onde é α_4 o ângulo do vértice do perfil no recorte, ver figura 4-1 para exemplo das distâncias entre furo e borda do recorte. A justificativa da escolha destes ângulos será explicada no item 4.4.3. Logo as forças resistentes contra o rasgamento entre furo e borda para cada ângulo analisado podem ser definidos como:

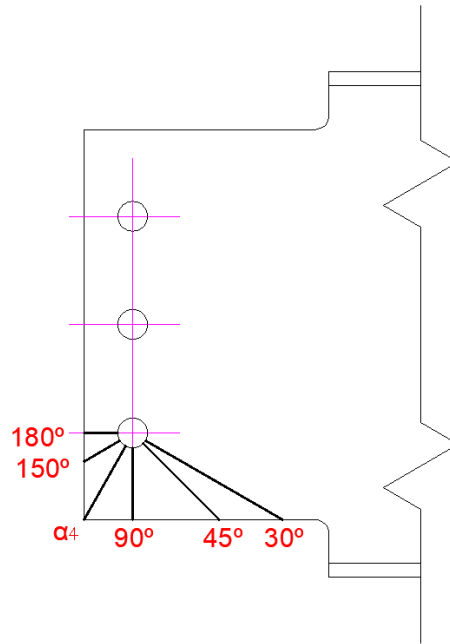


Figura 4-1 – Locais para cálculo da distância entre borda do furo e borda do recorte

Para o ângulo de 30°:

$$F_{pc.30deg} = 1.2 \cdot \left(\frac{l_{ba.h.z.pf1}}{\cos(90deg - 30deg)} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{al.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1}}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Eq. 4-17})$$

$$F_{x.pc.30deg} = \cos(30deg) \cdot F_{pc.30deg} \quad (\text{Eq. 4-18})$$

$$F_{z.pc.30deg} = \sin(30deg) \cdot F_{pc.30deg} \quad (\text{Eq. 4-19})$$

Para o ângulo de 45°:

$$F_{pc.45deg} = 1.2 \cdot \left(\frac{l_{ba.h.z.pf1}}{\cos(90deg - 45deg)} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{al.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1}}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Eq. 4-20})$$

$$F_{x.pc.45deg} = \cos(45deg) \cdot F_{pc.45deg} \quad (\text{Eq. 4-21})$$

$$F_{z.pc.45deg} = \sin(45deg) \cdot F_{pc.45deg} \quad (\text{Eq. 4-22})$$

Para o ângulo de 90°:

$$F_{.pc.90deg} = 1.2 \cdot \left(l_{.ba.h.z.pf1} - \frac{d_{.h}}{2} \right) \cdot \frac{t_{.al.pf1} \cdot \sigma_{.rup.pf1}}{\gamma_{.a2}} \quad (\text{Eq. 4-23})$$

$$F_{.x.pc.90deg} = 0 \quad (\text{Eq. 4-24})$$

$$F_{.z.pc.90deg} = F_{.pc.90deg} \quad (\text{Eq. 4-25})$$

Para o ângulo de α_4 :

$$F_{.pc.\alpha_4.pf1} = 1.2 \cdot \left(\frac{l_{.ba.h.z.pf1}}{\cos(\alpha_4.pf1 - 90deg)} - \frac{d_{.h}}{2} \right) \cdot \frac{t_{.al.pf1} \cdot \sigma_{.rup.pf1}}{\gamma_{.a2}} \quad (\text{Eq. 4-26})$$

$$F_{.x.pc.\alpha_4} = \cos(\alpha_4.pf1) \cdot F_{.pc.\alpha_4.pf1} \quad (\text{Eq. 4-27})$$

$$F_{.z.pc.\alpha_4} = \sin(\alpha_4.pf1) \cdot F_{.pc.\alpha_4.pf1} \quad (\text{Eq. 4-28})$$

Para o ângulo de 150°:

$$F_{.pc.150deg} = 1.2 \cdot \left(\frac{l_{.ba.h.x.pf1}}{\cos(180deg - 150deg)} - \frac{d_{.h}}{2} \right) \cdot \frac{t_{.al.pf1} \cdot \sigma_{.rup.pf1}}{\gamma_{.a2}} \quad (\text{Eq. 4-29})$$

$$F_{.x.pc.150deg} = \cos(150deg) \cdot F_{.pc.150deg} \quad (\text{Eq. 4-30})$$

$$F_{.z.pc.150deg} = \sin(150deg) \cdot F_{.pc.150deg} \quad (\text{Eq. 4-31})$$

Para o ângulo de 180°:

$$F_{.pc.180deg} = 1.2 \cdot \left(l_{.ba.h.x.pf1} - \frac{d_{.h}}{2} \right) \cdot \frac{t_{.al.pf1} \cdot \sigma_{.rup.pf1}}{\gamma_{.a2}} \quad (\text{Eq. 4-32})$$

$$F_{.x.pc.180deg} = -F_{.pc.180deg} \quad (\text{Eq. 4-33})$$

$$F_{.z.pc.180deg} = 0 \quad (\text{Eq. 4-34})$$

Logo a matriz de coordenadas da força resistente total contra o rasgamento do furo até a borda, pode ser definida como:

$$F_{.pc.pf1} = n_{.b.pf1} \cdot \begin{pmatrix} F_{.x.pc.30deg} & F_{.z.pc.30deg} \\ F_{.x.pc.45deg} & F_{.z.pc.45deg} \\ F_{.x.pc.90deg} & F_{.z.pc.90deg} \\ F_{.x.pc.\alpha_4} & F_{.z.pc.\alpha_4} \\ F_{.x.pc.150deg} & F_{.z.pc.150deg} \\ F_{.x.pc.180deg} & F_{.z.pc.180deg} \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 4-35})$$

4.2.8 Rasgamento entre furos

Foram definidos 3 ângulos de cálculo, a saber α_7 , 90° e $(180^\circ - \alpha_7)$. Ver figura 4-2 para definição do ângulo α_7 .

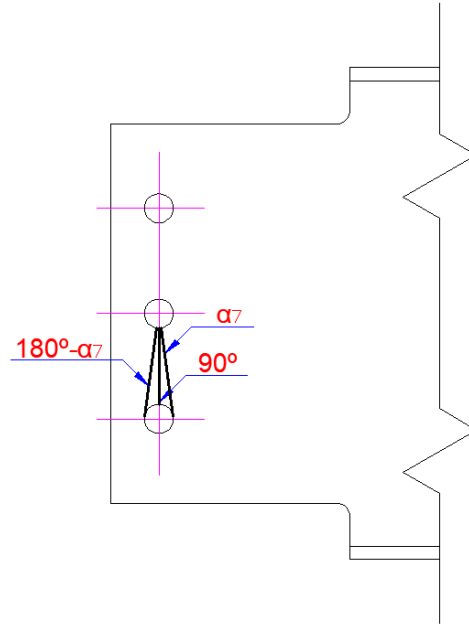


Figura 4-2 – Locais para cálculo da distância entre borda do furo e borda do recorte

Inicialmente é definido o ângulo α_7 que é o ângulo no qual a resultantes das forças tangencia o furo subsequente.

$$\alpha_7 = 90\text{deg} - \text{asin}\left(\frac{\frac{d_h}{2}}{l_{h.h.z}}\right) \quad (\text{Eq. 4-36})$$

Para o ângulo α_7 :

$$F_{pc.h.h.\alpha_7} = \frac{1.2 \cdot (\sigma_{rup.pf1} \cdot t_{al.pf1})}{\gamma_{a2}} \left[(n_{b.pf1} - 1) \cdot l_{h.h.\alpha_7} + \left(\frac{l_{ba.h.z.pf1}}{\cos(90\text{deg} - \alpha_7)} - \frac{d_h}{2} \right) \right] \quad (\text{Eq. 4-37})$$

$$F_{x.pc.h.h.\alpha_7} = \cos(\alpha_7) \cdot F_{pc.h.h.\alpha_7} \quad (\text{Eq. 4-38})$$

$$F_{z.pc.h.h.\alpha_7} = \sin(\alpha_7) \cdot F_{pc.h.h.\alpha_7} \quad (\text{Eq. 4-39})$$

Para o ângulo de 90°:

$$F_{z.pc.h.h.90deg} = \frac{1.2 \cdot (\sigma_{rup.pf1} \cdot t_{al.pf1})}{\gamma_{a2}} \left[(n_{b.pf1} - 1) \cdot (l_{h.h.z} - d_{h}) + \left(l_{ba.h.z.pf1} - \frac{d_{h}}{2} \right) \right] \quad (\text{Eq. 4-40})$$

Logo a força resistente é definida pelas coordenadas:

$$F_{pc.h.h.pf1} = \begin{pmatrix} F_{x.pc.h.h.\alpha7} & F_{z.pc.h.h.\alpha7} \\ 0 & F_{z.pc.h.h.90deg} \\ -F_{x.pc.h.h.\alpha7} & F_{z.pc.h.h.\alpha7} \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 4-41})$$

4.2.9 Esmagamento do furo

$$F_{z.pc.h.pf1}(F_x) = \sqrt{\left(n_{b.pf1} \cdot \frac{2.4 \cdot d_b \cdot \sigma_{rup.pf1} \cdot t_{al.pf1}}{\gamma_{a2}} \right)^2 - F_x^2} \quad (\text{Eq. 4-42})$$

4.2.10 Rasgamento na região da ligação

Para a elaboração dos gráficos de iteração serão utilizadas as equações propostas por Jönsson (2015) e apresentadas anteriormente no item 3.3.8. Será considerada a mesma força resistente para tração e compressão. As regiões nos quais são analisados os tipos de falha estão apresentadas na figura 4-3.

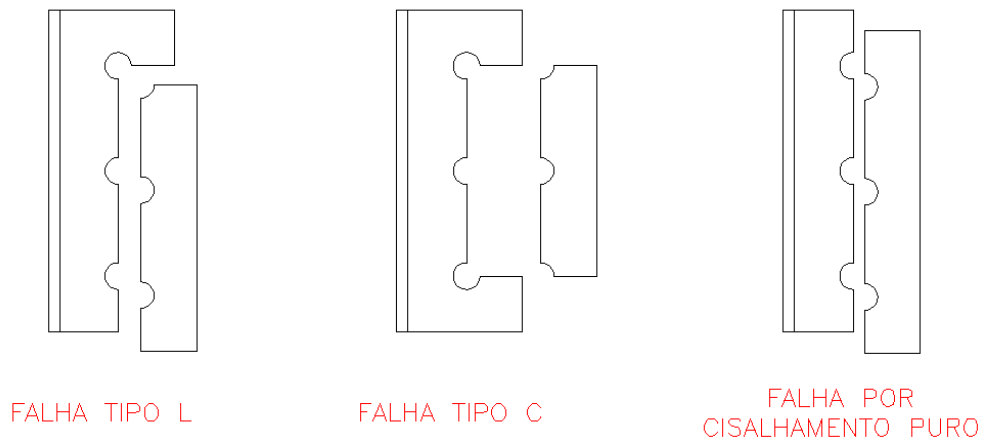


Figura 4-3 – Tipos de falha por rasgamento na região dos furos

Rasgamento em tipo L:

$$N_{R.pf1.1} = (1)t_{al.pf1} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(\frac{b_{g.pf1.1}}{\sqrt{3}} + h_{n.pf1.1} \right) \quad (\text{Eq. 4-43})$$

$$V_{R.pf1.1} = (1)t_{al.pf1} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(b_{n.b.pf1.1} + \frac{h_{g.pf1.1}}{\sqrt{3}} \right) \quad (\text{Eq. 4-44})$$

$$F_{z.ras.pf1.m1}(F_x) = \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.pf1.1}^2} \right)} \cdot V_{R.pf1.1}^2 \quad (\text{Eq. 4-45})$$

Rasgamento em tipo C:

$$N_{R.pf1.2} = (1)t_{al.pf1} \cdot \frac{f_{m.pf1}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(2 \cdot \frac{b_{g.pf1.2}}{\sqrt{3}} + h_{n.pf1.2} \right) \quad (\text{Eq. 4-46})$$

$$V_{R.pf1.2} = (1)t_{al.pf1} \cdot \frac{f_{m.pf1}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(2b_{n.pf1.2} + \frac{h_{g.pf1.2}}{\sqrt{3}} \right) \quad (\text{Eq. 4-47})$$

$$F_{z.ras.pf1.m2}(F_x) = \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.pf1.2}^2} \right)} \cdot V_{R.pf1.2}^2 \quad (\text{Eq. 4-48})$$

Cisalhamento puro:

$$N_{R.pf1.3} = (1)t_{al.pf1} \cdot \frac{f_{m.pf1}}{\gamma_{a2}} \cdot (h_{h.pf1.3}) \quad (\text{Eq. 4-49})$$

$$V_{R.pf1.3} = (1)t_{al.pf1} \cdot \frac{f_{m.pf1}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(\frac{h_{g.pf1.3}}{\sqrt{3}} \right) \quad (\text{Eq. 4-50})$$

$$F_{z.ras.pf1.m3}(F_x) = \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.pf1.3}^2} \right)} \cdot V_{R.pf1.3}^2 \quad (\text{Eq. 4-51})$$

A força resistente contra o rasgamento do perfil suportado é a combinação que provê a menor resistência dos três tipos de corte que pode realizar na região definida pela equação:

$$F_{z.ras.pf1}(F_x) = \begin{cases} F_{z.ras.pf1.m1}(F_x) & \text{if } F_{z.ras.pf1.m1}(F_x) < F_{z.ras.pf1.m2}(F_x) \wedge F_{z.ras.pf1.m1}(F_x) < F_{z.ras.pf1.m3}(F_x) \\ F_{z.ras.pf1.m2}(F_x) & \text{if } F_{z.ras.pf1.m2}(F_x) < F_{z.ras.pf1.m1}(F_x) \wedge F_{z.ras.pf1.m2}(F_x) < F_{z.ras.pf1.m3}(F_x) \\ F_{z.ras.pf1.m3}(F_x) & \text{if } F_{z.ras.pf1.m3}(F_x) < F_{z.ras.pf1.m1}(F_x) \wedge F_{z.ras.pf1.m3}(F_x) < F_{z.ras.pf1.m2}(F_x) \end{cases} \quad (\text{Eq. 4-52})$$

4.3 Estados-limites Últimos Aplicáveis ao Perfil Portante (perfil 2)

4.3.1 Pressão de contato

Foi considerado que a força resistente da pressão de contato é contabilizada pelo menor termo entre o rasgamento entre furos e rasgamento entre furo e borda, apresentados na (Eq. 3-15). Também foi considerado a existência de duas cantoneiras. Somente o esforço de cisalhamento é capaz de provocar uma pressão no perfil portante, tendo em vista a disposição dos parafusos e a direção dos esforços da ligação.

As equações das forças resistentes para cada estado-limite são apresentadas a seguir.

$$F_{z.pc.b.pf2} = \frac{2.4 \cdot d_b \cdot \sigma_{rup.ch2} \cdot t_{ch.2}}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Eq. 4-53})$$

$$F_{z.pc.h.h.pf2} = 1.2 \cdot (l_{h.h.z} - d_h) \cdot \frac{t_{ch.2}}{\gamma_{a2}} \cdot \sigma_{rup.ch2} \quad (\text{Eq. 4-54})$$

$$F_{z.pc.h.ba.pf2} = 1.2 \cdot \left[\frac{l_{ca.z} - (n_{b.pf1} - 1) \cdot l_{h.h.z}}{2} - \frac{d_h}{2} \right] \cdot \frac{t_{ch.2}}{\gamma_{a2}} \cdot \sigma_{rup.ch2} \quad (\text{Eq. 4-55})$$

Logo a força resistente ao rasgamento entre furos e pressão de contato no perfil portante é o valor mínimo entre as três equações. A força resistente total será a resistência unitária por parafuso multiplicada pelo número de cantoneiras e parafusos utilizados na ligação.

$$F_{z.pc.pf2} = (2) \cdot n_{b.pf2} \cdot \min(F_{z.pc.b.pf2}, F_{z.pc.h.h.pf2}, F_{z.pc.h.ba.pf2}) \quad (\text{Eq. 4-56})$$

4.4 Estados-limites Últimos Aplicáveis à Cantoneira

4.4.1 Rasgamento da cantoneira ligação próximo ao perfil suportado (perfil 1)

O equacionamento é semelhante aquele apresentado no item 4.2.10, modificando as espessuras dos elementos ligantes, quantidade de elementos ligantes, assim como a tensão média resistente.

Rasgamento em tipo L:

$$N_{R.ca.1} = (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(\frac{b_{g.ca.1}}{\sqrt{3}} + h_{h.ca.1} \right) \quad (\text{Eq. 4-57})$$

$$V_{R.ca.1} = (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(b_{n.ca.1} + \frac{h_{g.ca.1}}{\sqrt{3}} \right) \quad (\text{Eq. 4-58})$$

$$F_{z.ras.ca.m1}(F_x) = \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.ca.1}^2} \right) \cdot V_{R.ca.1}^2} \quad (\text{Eq. 4-59})$$

Rasgamento em tipo C:

$$N_{R.ca.2} = (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(2 \cdot \frac{b_{g.ca.2}}{\sqrt{3}} + h_{h.ca.2} \right) \quad (\text{Eq. 4-60})$$

$$V_{R.ca.2} = (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(2b_{n.ca.2} + \frac{h_{g.ca.2}}{\sqrt{3}} \right) \quad (\text{Eq. 4-61})$$

$$F_{z.ras.ca.m2}(F_x) = \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.ca.2}^2} \right) \cdot V_{R.ca.2}^2} \quad (\text{Eq. 4-62})$$

Rasgamento completo:

$$N_{R.ca.3} = (2) \cdot t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot (h_{h.ca.3}) \quad (\text{Eq. 4-63})$$

$$V_{R.ca.3} = (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(\frac{h_{g.ca.3}}{\sqrt{3}} \right) \quad (\text{Eq. 4-64})$$

$$F_{z.ras.ca.m3}(F_x) = \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.ca.3}^2} \right) \cdot V_{R.ca.3}^2} \quad (\text{Eq. 4-65})$$

Combinando os três modos de rasgamentos na cantoneira próximo ao perfil suportado através da força resistente na região, tem-se:

$$F_{z.ras.ca}(F_x) = \begin{cases} F_{z.ras.ca.m1}(F_x) & \text{if } F_{z.ras.ca.m1}(F_x) < F_{z.ras.ca.m2}(F_x) \wedge F_{z.ras.ca.m1}(F_x) < F_{z.ras.ca.m3}(F_x) \\ F_{z.ras.ca.m2}(F_x) & \text{if } F_{z.ras.ca.m2}(F_x) < F_{z.ras.ca.m1}(F_x) \wedge F_{z.ras.ca.m2}(F_x) < F_{z.ras.ca.m3}(F_x) \\ F_{z.ras.ca.m3}(F_x) & \text{if } F_{z.ras.ca.m3}(F_x) < F_{z.ras.ca.m1}(F_x) \wedge F_{z.ras.ca.m3}(F_x) < F_{z.ras.ca.m2}(F_x) \end{cases} \quad (\text{Eq. 4-66})$$

4.4.2 Rasgamento da cantoneira na região de ligação próximo ao perfil portante

Novamente, o equacionamento é semelhante aquele apresentado no item 4.2.10, modificando as espessuras dos elementos ligantes, quantidade de elementos ligantes, assim como a tensão média resistente. Faz-se a observação que quando a ligação está submetida ao esforço de tração, a região analisada está apenas submetida ao efeito de cisalhamento.

Rasgamento em tipo L:

$$N_{R.ca.m1.r2} = (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(\frac{b_{g.ca.m1.r2}}{\sqrt{3}} + \frac{h_{n.ca.m1.r2}}{\sqrt{3}} \right) \quad (\text{Eq. 4-67})$$

$$V_{R.ca.m1.r2} = (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(b_{n.ca.m1.r2} + \frac{h_{g.ca.m1.r2}}{\sqrt{3}} \right) \quad (\text{Eq. 4-68})$$

$$F_{z.ras.m1.r2}(F_x) = \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.ca.m1.r2}^2} \right) \cdot V_{R.ca.m1.r2}^2} \quad (\text{Eq. 4-69})$$

Rasgamento em tipo C:

$$N_{R.ca.m2.r2} = (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(\frac{b_{g.ca.m2.r2}}{\sqrt{3}} + \frac{h_{n.ca.m2.r2}}{\sqrt{3}} \right) \quad (\text{Eq. 4-70})$$

$$V_{R.ca.m2.r2} = (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(2b_{n.ca.m2.r2} + \frac{h_{g.ca.m2.r2}}{\sqrt{3}} \right) \quad (\text{Eq. 4-71})$$

$$F_{z.ras.m2.r2}(F_x) = \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.ca.m2.r2}^2} \right) \cdot V_{R.ca.m2.r2}^2} \quad (\text{Eq. 4-72})$$

Rasgamento completo:

$$N_{R.ca.m3.r2} = (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(\frac{h_{n.ca.m3.r2}}{\sqrt{3}} \right) \quad (\text{Eq. 4-73})$$

$$V_{R.ca.m3.r2} = (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(\frac{h_{g.ca.m3.r2}}{\sqrt{3}} \right) \quad (\text{Eq. 4-74})$$

$$F_{z.ras.m3.r2}(F_x) = \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.ca.m3.r2}^2} \right) \cdot V_{R.ca.m3.r2}^2} \quad (\text{Eq. 4-75})$$

Logo a equação que define a força resistente da cantoneira ao rasgamento na linha de furos na região próxima ao perfil portante pode ser definida como:

$$F_{z.ras.r2}(F_x) = \begin{cases} F_{z.ras.m1.r2}(F_x) & \text{if } (F_{z.ras.m1.r2}(F_x) \leq F_{z.ras.m2.r2}(F_x)) \wedge (F_{z.ras.m1.r2}(F_x) \leq F_{z.ras.m3.r2}(F_x)) \\ F_{z.ras.m2.r2}(F_x) & \text{if } (F_{z.ras.m2.r2}(F_x) < F_{z.ras.m1.r2}(F_x)) \wedge (F_{z.ras.m2.r2}(F_x) < F_{z.ras.m3.r2}(F_x)) \\ F_{z.ras.m3.r2}(F_x) & \text{if } (F_{z.ras.m3.r2}(F_x) < F_{z.ras.m1.r2}(F_x)) \wedge (F_{z.ras.m3.r2}(F_x) < F_{z.ras.m2.r2}(F_x)) \end{cases} \quad (\text{Eq. 4-76})$$

4.4.3 Rasgamento entre furo e borda

A equação que define a força resistente entre o rasgamento entre furo e borda foi definida no primeiro termo da (Eq. 3-15). Substituindo os termos da equação considerando o esforço conjunto tem-se:

$$1.2 \cdot (l) \cdot \frac{t_{ca} \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \geq \sqrt{F_x^2 + F_z^2} \quad (\text{Eq. 4-77})$$

Onde “l” representa a distância entre a borda do furo e a borda da cantoneira. Com os pares de força obtidos, a distância “l” varia, logo a força resistente ao rasgamento também varia. Foram definidas regiões para o cálculo da distância entre o furo e a borda.

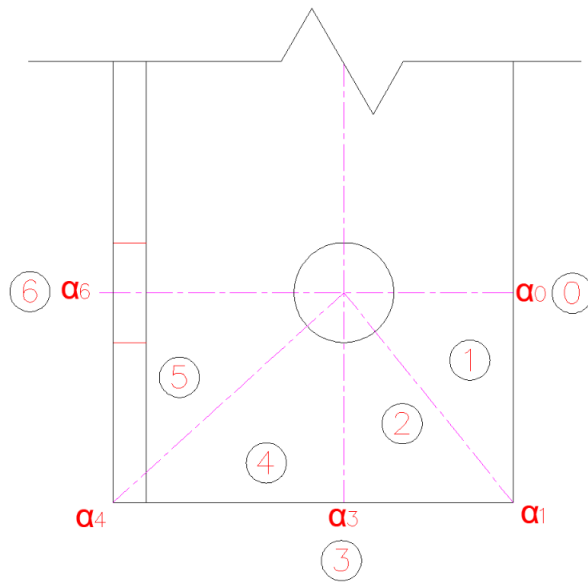


Figura 4-4 – Regiões para equacionamento da resistência a pressão de contato na cantoneira

$$\tan(\theta) = \frac{F_z}{F_x} \quad (\text{Eq. 4-78})$$

Foi observado durante a análise da força resistente que existe considerável aumento da resistência da ligação devido ao aumento da distância entre furo e borda. Será adotada uma metodologia mais direta para a análise da força resistente da ligação, onde são considerados apenas os pontos extremos. A figura 4-5 apresenta comparativo entre a análise exata e o método de interpolação entre os pontos indicados na figura 4-5 para uma cantoneira de 76 mm com 6 mm de espessura.

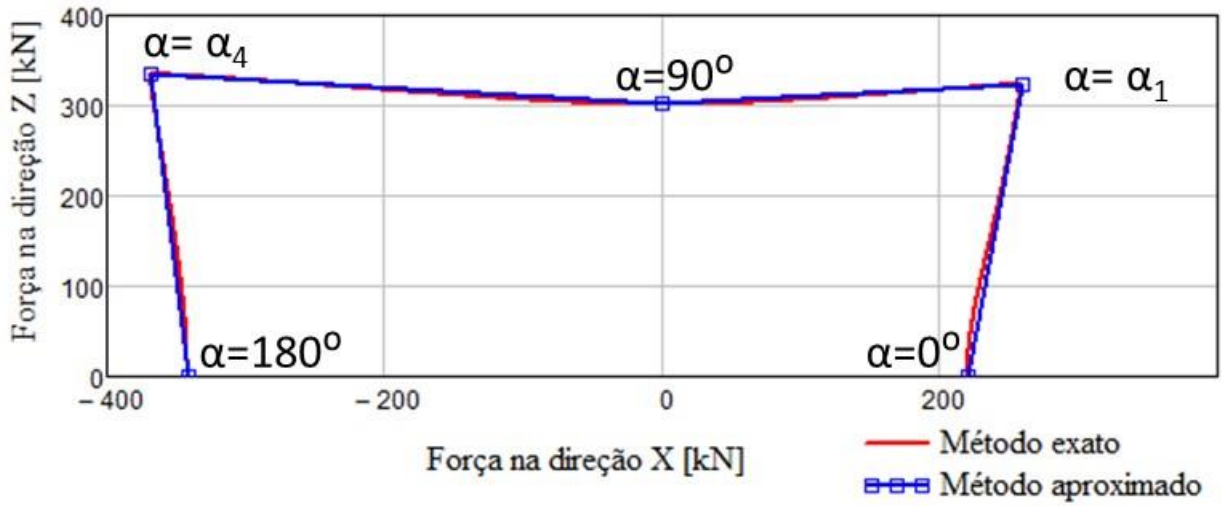


Figura 4-5 – Gráfico comparativo das forças resistentes na cantoneira por método exato e método aproximado

Logo a região de força resistente da cantoneira devido à pressão de contato é definida através dos seguintes pontos:

$$F_{pc.ca} = n_{b.pf1} \cdot \begin{pmatrix} F_{x.pc.6} & 0 \\ F_{x.pc.5}(\alpha_4) & F_{z.pc.5}(\alpha_4) \\ 0 & F_{z.pc.3} \\ F_{x.pc.2}(\alpha_1) & F_{z.pc.2}(\alpha_1) \\ F_{x.pc.0} & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 4-79})$$

Para a direção X:

$$F_{x.pc.0} = 1.2 \cdot \left[(I_{ca.ba.ba} - I_{ca.ba.h.x.1}) - \frac{d_h}{2} \right] \cdot \frac{t_{ca} \cdot \sigma_{rup.ca}}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Eq. 4-80})$$

$$F_{x.pc.2}(\theta) = 1.2 \cdot \left[\frac{\frac{I_{ca.z} - (n_{b.pf1} - 1) \cdot I_{h.h.z}}{2}}{\sin(\theta)} - \frac{d_h}{2} \right] \cdot \frac{t_{ca} \cdot \sigma_{rup.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\tan(\theta))^2 + 1}} \quad (\text{Eq. 4-81})$$

$$F_{x.pc.5}(\theta) = -1.2 \cdot \left(\frac{I_{ca.ba.h.x.1}}{\cos(180\text{deg} - \theta)} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{ca} \cdot \sigma_{rup.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\tan(\theta))^2 + 1}} \quad (\text{Eq. 4-82})$$

Para a direção Z:

$$F_{z.pc.2}(\theta) = \tan(\theta) \cdot F_{x.pc.2}(\theta) \quad (\text{Eq. 4-83})$$

$$F_{z.pc.3} = 1.2 \cdot \left[\frac{l_{ca.z} - (n_{b.pf1} - 1) \cdot l_{h.h.z}}{2} - \frac{d_h}{2} \right] \cdot \frac{t_{ca} \cdot \sigma_{rup.ca}}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Eq. 4-84})$$

$$F_{z.pc.5}(\theta) = \tan(\theta) \cdot F_{x.pc.5}(\theta) \quad (\text{Eq. 4-85})$$

4.4.4 Pressão de contato entre parafuso e cantoneira no perfil suportado (viga)

Tendo como base o segundo termo da (Eq. 3-15), e combinando com a tensão resultante da ação dos esforços na direção X e Z, a força resistente por cantoneira utilizada na ligação é:

$$\frac{2.4 \cdot d_b \cdot t_{ca} \cdot \sigma_{rup.ca}}{\gamma_{a2}} \leq \sqrt{F_{x.2}^2 + F_{z.2}^2} \quad (\text{Eq. 4-86})$$

Isolando o termo F_z da equação e multiplicando pela quantidade de parafusos e planos de cisalhamento, tem-se:

$$F_{z.pc.ca.r1}(F_x) = \sqrt{\left(n_{s.pf1} \cdot n_{b.pf1} \cdot \frac{d_b \cdot \sigma_{rup.ca} \cdot t_{ca}}{\gamma_{a2}} \right)^2 - F_{x.2}^2} \quad (\text{Eq. 4-87})$$

4.4.5 Pressão de contato entre parafuso e cantoneira no perfil portante (portante)

Este estado-limite envolve 3 estados-limites concomitantes. É realizada a verificação da pressão de contato na região do furo, o rasgamento entre furos e o rasgamento entre furo e borda. As equações da força resistente para cada estado-limite são apresentadas a seguir.

$$F_{z.pc.ca.b.2} = \frac{2.4 \cdot d_b \cdot \sigma_{rup.ca} \cdot t_{ca}}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Eq. 4-88})$$

$$F_{z.pc.ca.h.h.2} = 1.2 \cdot (l_{h.h.z} - d_h) \cdot \frac{t_{ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \sigma_{rup.ca} \quad (\text{Eq. 4-89})$$

$$F_{z.pc.ca.h.ba.2} = 1.2 \cdot \left[\frac{l_{ca.z} - (n_{b.pf1} - 1) \cdot l_{h.h.z}}{2} - \frac{d_h}{2} \right] \cdot \frac{t_{ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \sigma_{rup.ca} \quad (\text{Eq. 4-90})$$

Logo a força resistente ao rasgamento entre furos e pressão de contato na região próximo ao perfil portante é o valor mínimo entre as três resistências. A força resistente total será a resistência por parafuso multiplicada pelo número de cantoneiras e parafusos utilizados na ligação.

$$F_{z.pc.ca.2} = (2) \cdot n_{b.pf1} \min(F_{z.pc.ca.b.2}, F_{z.pc.ca.h.2}, F_{z.pc.ca.h.ba.2}) \quad (\text{Eq. 4-91})$$

Tendo em vista a semelhança do comportamento entre a pressão de contato na cantoneira próximo ao perfil portante e no próprio perfil portante, será combinado este estado-limite, com aquele apresentado no item 4.3.1. Logo o par de coordenadas para a resistência devido a pressão de contato tanto na cantoneira quanto no perfil portante será:

$$F_{pc.pf2.ca} = \begin{pmatrix} -\infty & \min(F_{z.pc.ca.2}, F_{z.pc.pf2}) \\ \infty & \min(F_{z.pc.ca.2}, F_{z.pc.pf2}) \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 4-92})$$

4.4.6 Escoamento da seção bruta

O escoamento da seção bruta da cantoneira próximo ao perfil suportado pode ser calculado a partir da (Eq. 3-3), adaptando a quantidade de cantoneiras utilizadas na ligação.

$$F_{R.x.ca.esc} = (2) \cdot \frac{l_{ca.z} \cdot t_{ca} \cdot \sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Eq. 4-93})$$

4.4.7 Ruptura da seção líquida

A ruptura da seção líquida é calculada a partir da (Eq. 3-4), novamente adaptando a quantidade de cantoneiras utilizadas na ligação. A área bruta é calculada a partir da equação (Eq. 3-5), no qual foram substituídos seus termos e exposto na (Eq. 4-95)

$$F_{R.x.ca.rup} = (2) \cdot \frac{A_{ca.rup} \cdot \sigma_{rup.ca}}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Eq. 4-94})$$

$$A_{ca.rup} = \min[0.85 \cdot l_{ca.z} \cdot t_{ca} \cdot (l_{ca.z} - n_{b.pf1} \cdot d_h) \cdot t_{ca}] \quad (\text{Eq. 4-95})$$

4.4.8 Compressão

A força resistente à compressão da aba da cantoneira é calculada a partir da equação (Eq. 3-10). Entretanto, no item 6.5.4 da ABTN NBR 8800:2008 é especificado que, para elementos de ligações comprimidos com índice de esbeltez menor que 25, pode-se calcular a resistência diretamente com a área bruta comprimida. A força resistente da aba a cantoneira pode ser calculada como:

$$F_{R.x.C.ca} = \begin{cases} (2) \cdot \frac{\chi_{ca} \cdot Q_{s.ca} \cdot A_{ca} \cdot \sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}} & \text{if } \lambda_{z.ca} > 25 \\ (2) \cdot \frac{A_{ca} \cdot \sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}} & \text{if } \lambda_{z.ca} \leq 25 \end{cases} \quad (\text{Eq. 4-96})$$

4.4.9 Escoamento devido cisalhamento da seção bruta

A partir da (Eq. 3-6) é calculado o escoamento devido as tensões de cisalhamento na seção bruta da cantoneira, ajustando a quantidade de cantoneiras utilizadas na equação.

$$F_{R.z.ca.esc} = (2) \cdot 0.6 \cdot \frac{l_{ca.z} \cdot t_{ca} \cdot \sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Eq. 4-97})$$

4.4.10 Ruptura devido cisalhamento da seção líquida

A partir da (Eq. 3-7) é calculada ruptura devido ao cisalhamento na seção líquida da cantoneira, ajustando a quantidade de cantoneiras utilizadas na equação.

$$F_{R.z.ca.rup} = (2) \cdot 0.6 \cdot \frac{(l_{ca.z} - n_{b.pf1} \cdot d_h) \cdot t_{ca} \cdot \sigma_{rup.ca}}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Eq. 4-98})$$

4.4.11 Tensão equivalente de von Mises região 1

Será utilizado o critério de escoamento da área bruta próxima à região da ligação. Será desconsiderado o momento fletor atuante devido ao pequeno braço de alavanca até a região de análise. A figura 4-6 identifica as regiões no qual serão feitas a análise de tensão.

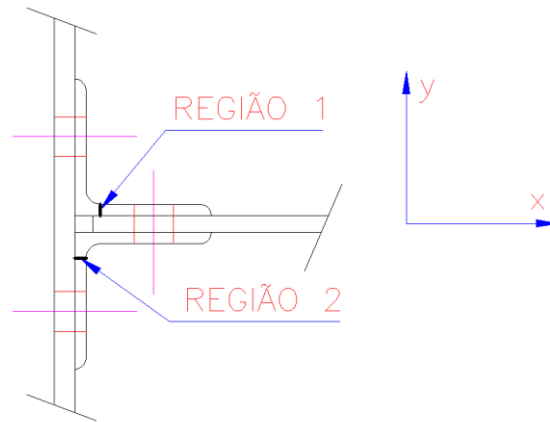


Figura 4-6 – Regiões de análise da tensão na cantoneira

Pelo critério de von Mises, a força cortante máxima que pode atuar na ligação pode ser calculada como:

$$F_{z.ca.esc}(F_x) = \frac{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}}\right)^2 - \left[\frac{F_x}{(2)A_{ca}}\right]^2}}{\sqrt{3}} \cdot (2)A_{ca} \quad (\text{Eq. 4-99})$$

4.4.12 Tensão equivalente de von Mises região 2

A tensão de von Mises atuante na região 2 pode ser escrita basicamente como a (Eq. 4-100), oriunda da equação (Eq. 3-13).

$$\sqrt{\frac{\left[2\left(\frac{M \cdot c}{I}\right)\right]^2 + 6\left[\left(\frac{F_x}{A}\right)^2 + \left(\frac{F_z}{A}\right)^2\right]}{2}} \leq \frac{\sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Eq. 4-100})$$

Reescrevendo os termos com a nomenclatura utilizada tem-se

$$\sqrt{\frac{2 \cdot \left[\frac{\left(\frac{F_x}{n.b.pf2} \cdot c.cor \cdot l_{pe.h.ca.1} \right) \cdot \frac{t.ca}{2}}{\left(\frac{p.ca \cdot t.ca^3}{12} \right)} \right]^2 + 6 \cdot \left[\frac{\frac{F_x \cdot c.cor}{n.b.pf2}}{\left(\frac{l_{ca.z}}{n.b.pf2} \cdot t.ca \right)} \right]^2 + \left[\frac{\frac{F_z}{n.b.pf2}}{\left(\frac{l_{ca.z}}{n.b.pf2} \cdot t.ca \right)} \right]^2}{2}} \leq \frac{\sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Eq. 4-101})$$

No caso de esforços de compressão na viga, a seção 2 não é submetida às tensões normais devido a não ocorrência da flexão da aba da cantoneira.

Caso o esforço na viga seja de tração, a força de tração no parafuso aumenta devido ao efeito alavanca e a cantoneira apresenta esforços de flexão. Assim, são definidas 3 regiões para a verificação da flexão na aba da cantoneira. A equação que define a força resistente da ligação ao escoamento da seção é:

$$F_{z.esc.ca.r2}(F_x) = \begin{cases} p.ca \cdot t.ca \cdot \frac{\sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1} \sqrt{3}} & \text{if } F_x < 0 \\ \frac{p.ca \cdot t.ca}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}} \right)^2 - \left[\frac{[F_x \cdot (l_{pe.h.ca.1} - 0.5 \cdot d_h)]^2}{\left(\frac{p.ca \cdot t.ca^2}{6} \right)} \right] - 3 \cdot \left[\frac{F_x}{p.ca \cdot t.ca} \right]^2} & \text{if } (F_x \geq 0 \wedge F_x < F_{lim}) \end{cases} \quad (\text{Eq. 4-102})$$

A força resistente total contra o escoamento na cantoneira na região 2 é dada por:

$$F_{z.esc.ca.r2}(F_x) = n.b.pf2 \cdot F_{z.esc.ca.r2.b} \left(\frac{F_x}{n.b.pf2} \right) \quad (\text{Eq. 4-103})$$

5 RESULTADOS

A figura 5-1 apresenta as dimensões principais e siglas utilizadas no cálculo da força resistente da ligação flexível formada por duas cantoneiras.

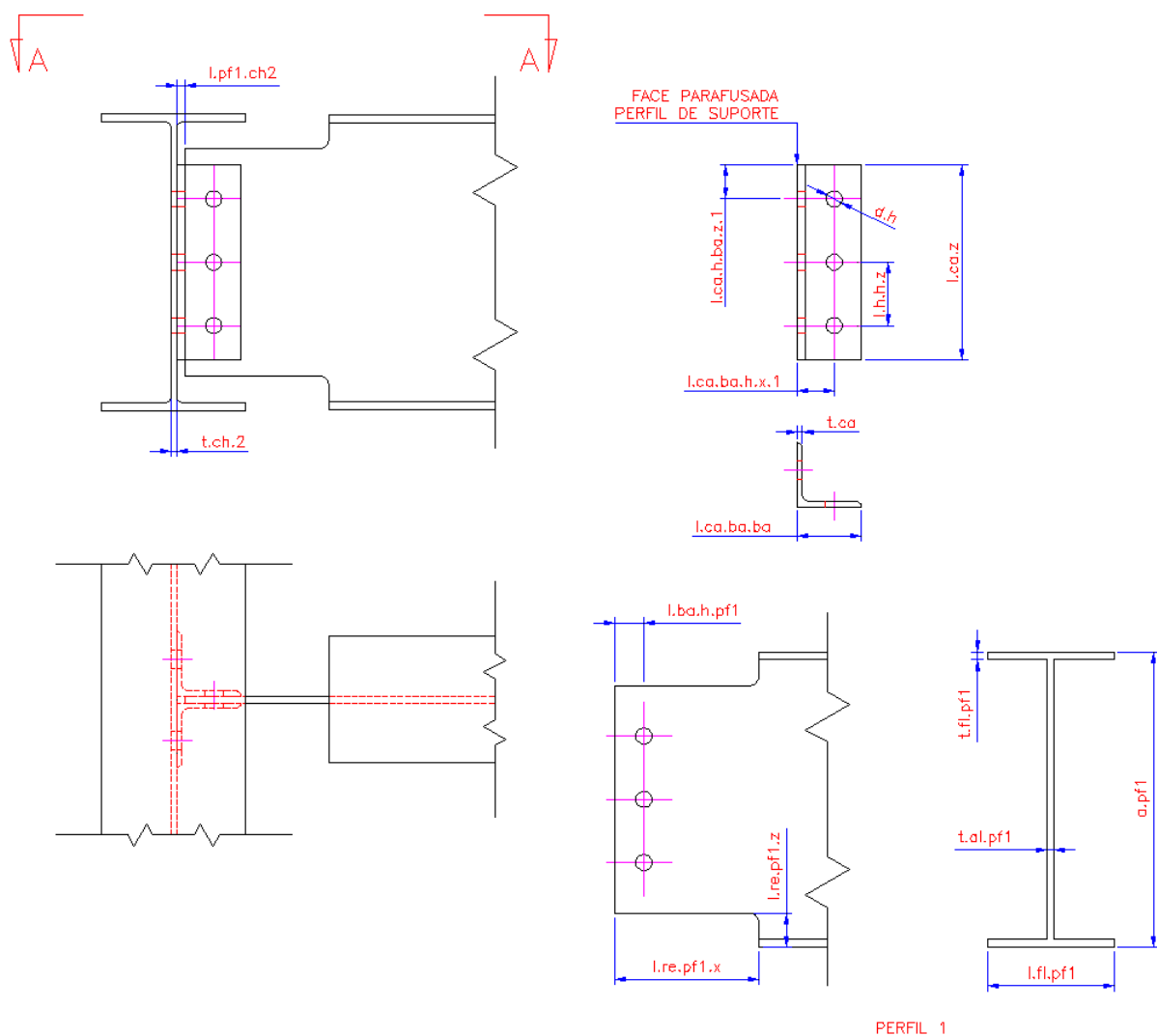


Figura 5-1 – Dimensões principais da ligação

Como premissa de cálculo, serão consideradas cantoneiras em ASTM A36 e perfis em aço ASTM A572 Grau C.

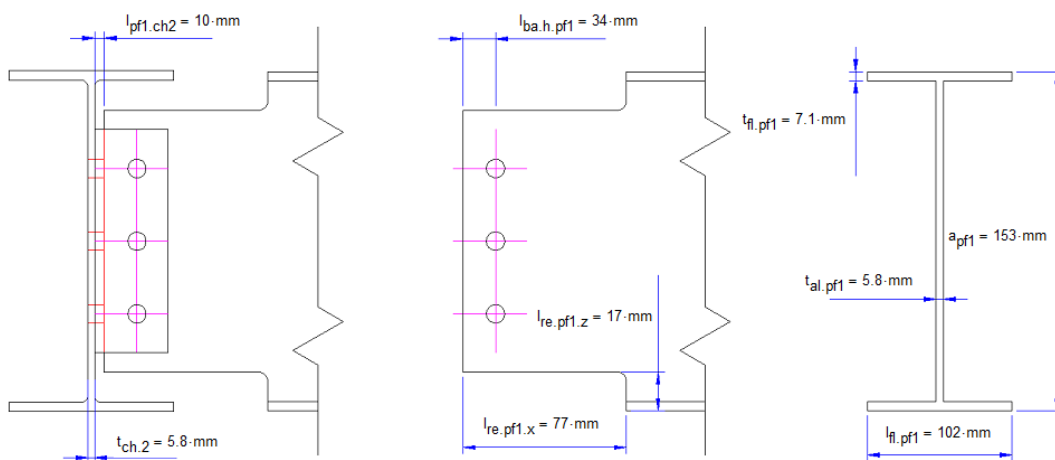
O espaçamento entre furos adotado foi 50mm, 60mm e 75 mm para parafusos de 16 mm, 19mm e 19 mm respectivamente. Os parafusos adotados são em ASTM A325. Dimensões menores para as furações dos perfis de altura nominal de 150 mm a 250 mm tiveram que ser adotadas devido a possibilidade de interferência.

Antes do desenvolvimento dos cálculos são verificadas as disposições construtivas da ligação de modo a evitar interferências e permitir o acesso aos parafusos e porcas.

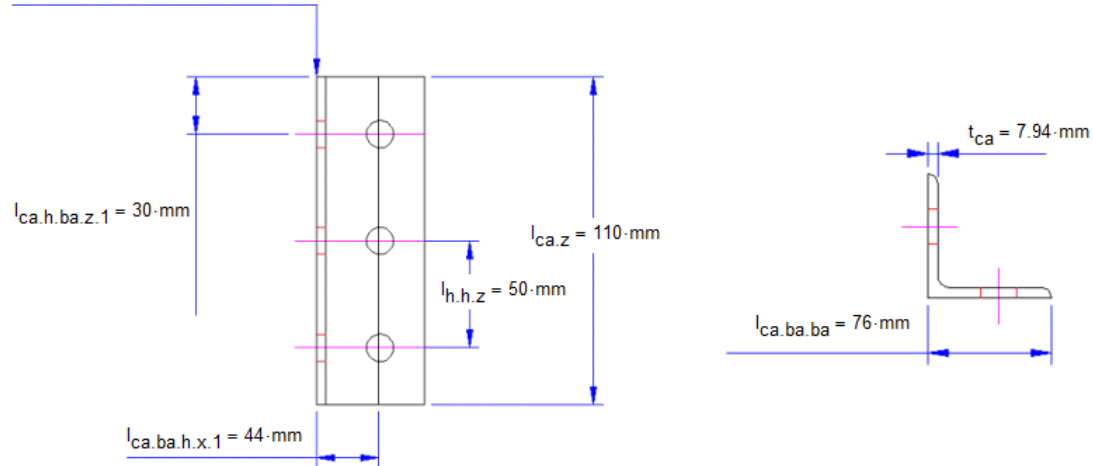
A dimensão do recorte foi definida de modo que o perfil suportado encaixe sem interferências na viga portante de mesma altura nominal com maior largura de aba.

5.1 Perfis W150

5.1.1 Dados de entrada



FACE PARAFUSADA
PERFIL DE SUPORTE



PARAFUSO

Material: A325

$$d_b = 15.875 \text{ mm}$$

Diâmetro do parafuso

$$d_h = 17.375 \text{ mm}$$

Diâmetro do furo - Furo padrão executado com broca

$$n_{b.pf1} = 2$$

Número de parafusos ligados à alma da viga

$$n_{b.pf2} = 4$$

Número total de parafusos ligados ao perfil portante

$$n_{s.pf1} = 2$$

Planos de corte do parafuso na alma da viga

$$n_{s.pf2} = 1$$

Planos de corte do parafuso no perfil portante

$$\sigma_{esc.b} = 635 \text{ MPa}$$

Limite de resistência do parafuso ao escoamento

$$\sigma_{rup.b} = 825 \text{ MPa}$$

Limite de resistência do parafuso à ruptura

CANTONEIRA

Material_{ca} = "ASTM A36"

$$\sigma_{esc.ca} = 250 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{rup.ca} = 400 \text{ MPa}$$

PERFIS

Material_{pf1} = "ASTM A572"

$$\sigma_{esc.pf1} = 350 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{rup.pf1} = 450 \text{ MPa}$$

Material_{ch2} = "ASTM A572"

$$\sigma_{esc.ch2} = 350 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{rup.ch2} = 450 \text{ MPa}$$

5.1.2 Verificações construtivas

<u>Distância entre furos:</u>	$Ver_{c1} = "Ok"$
<u>Distância dos furos às bordas:</u>	$Ver_{c2} = "Ok"$
<u>Distância entre furos e face da chapa:</u>	$Ver_{c3} = "Ok"$
<u>Gabarito da furação:</u>	$Ver_{c4} = "Ok"$
<u>Número de parafusos:</u>	$Ver_{c5} = "Ok"$
<u>Menor espessura entre alma da viga e cantoneira:</u>	$Ver_{c6} = "Ok"$
<u>Altura da ligação:</u>	$Ver_{c7} = "Ok"$
<u>Distância entre furos e face da chapa:</u>	$Ver_{c8} = "Ok"$

5.1.3 Curvas de interação da força resistente

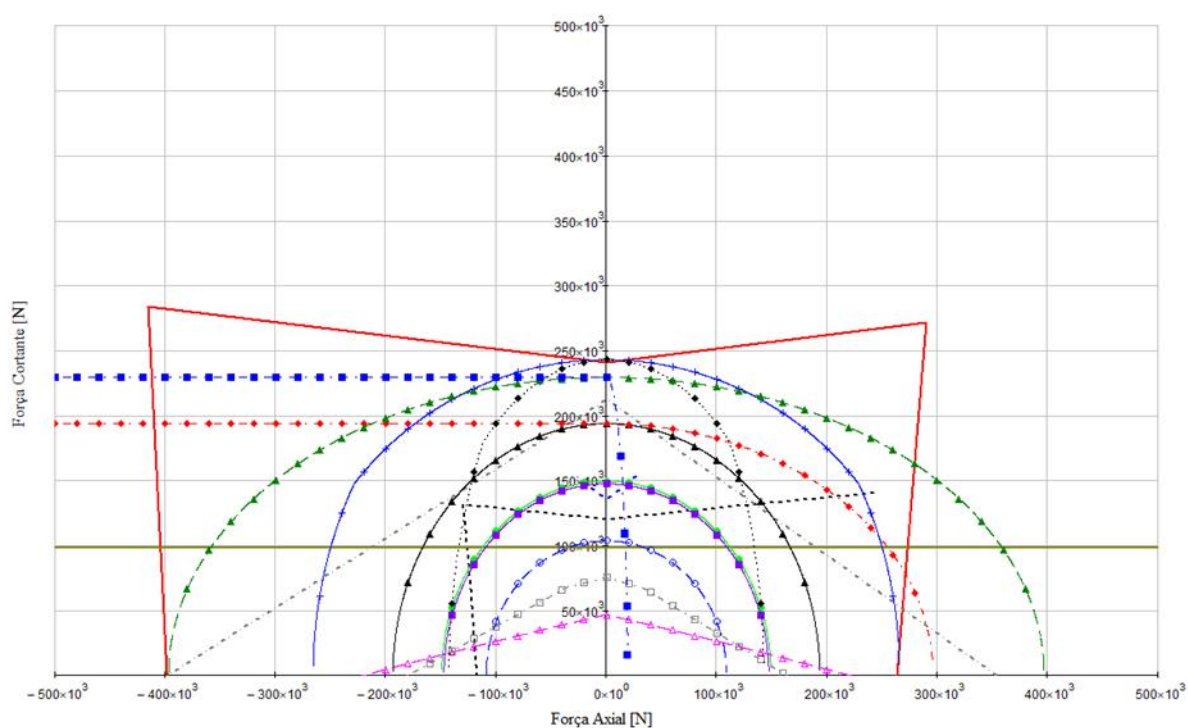


Figura 5-2 – Curva de interação da força resistente para ligação de perfil W 150

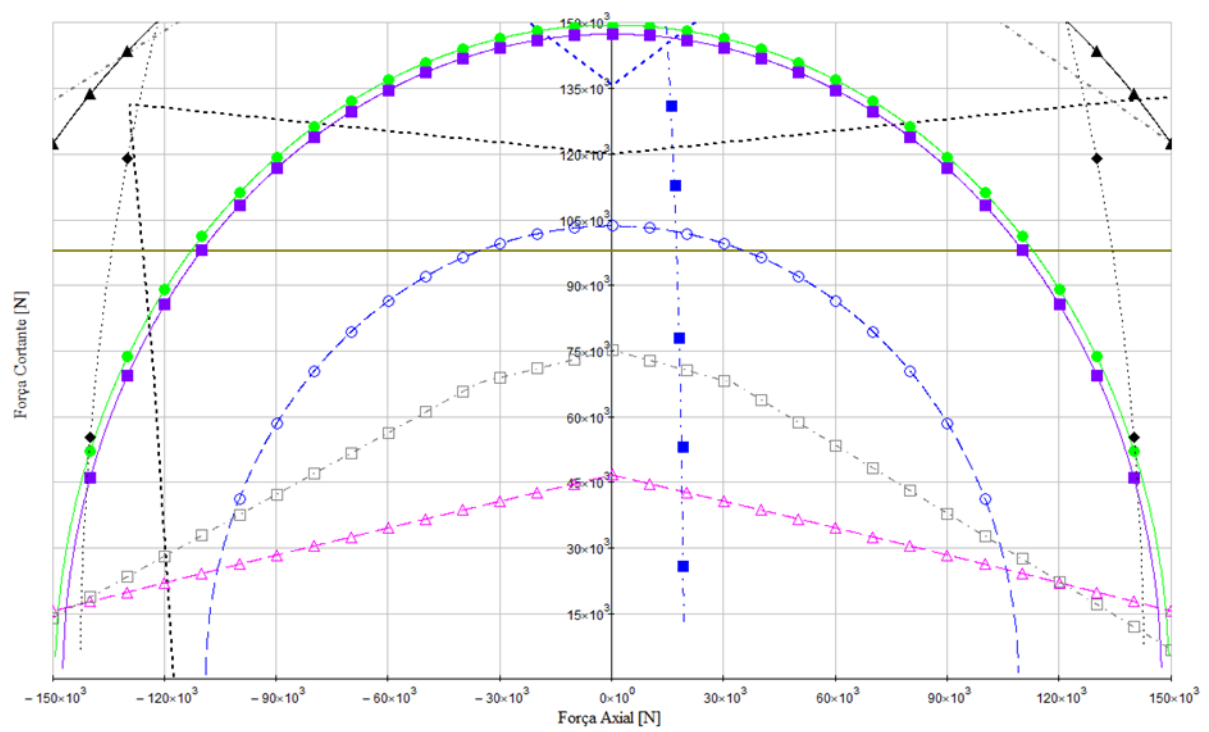















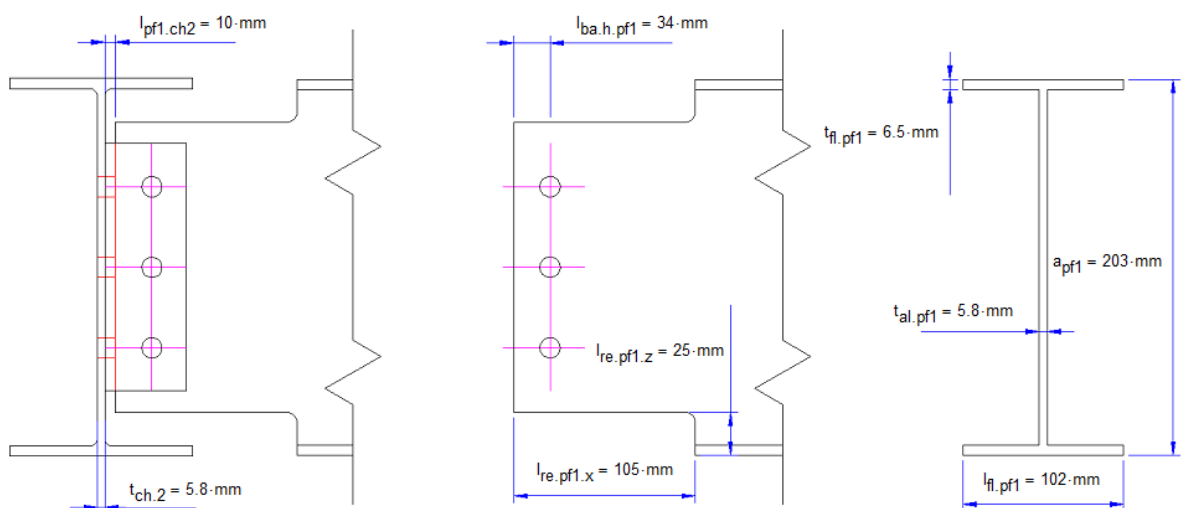
Figura 5-3 – Detalhe para Curva de interação da força resistente para ligação de perfil W 150

Tabela 5-1 – Descrição dos estados-limites, legenda e equação utilizada

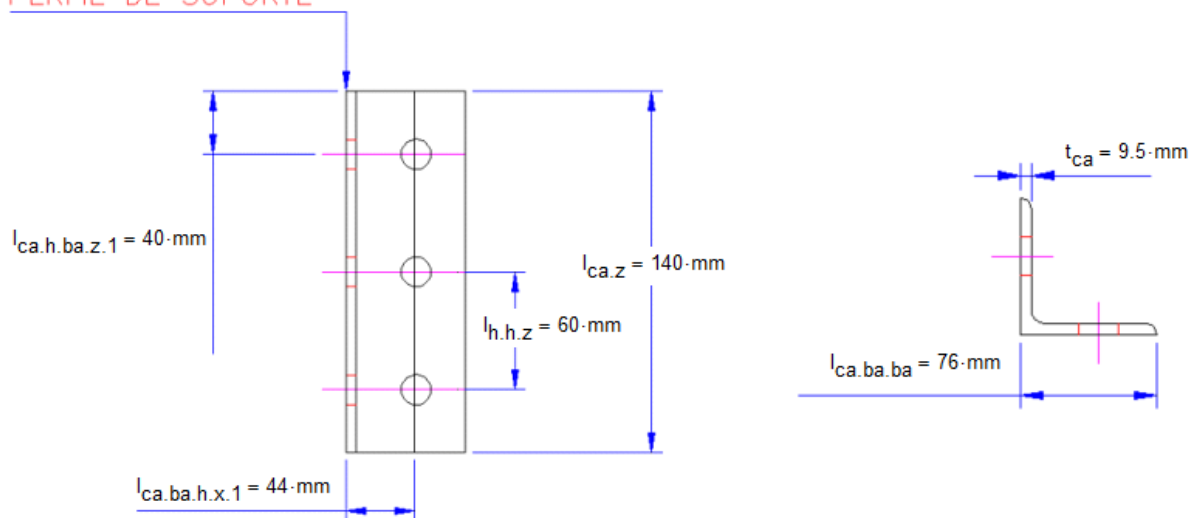
Legenda	Equação	Descrição
	(Eq. 4-79)	Força resistente devido a pressão de contato na cantoneira
	(Eq. 4-35)	Força resistente devido a pressão de contato no perfil 1
	(Eq. 4-41)	Força resistente devido a pressão de contato entre furo e furo no perfil 1
	(Eq. 4-87)	Força resistente na aba da cantoneira comportando como barra
	(Eq. 4-92)	Força resistente devido a pressão de contato na cantoneira na aba em contato com o perfil 2
	(Eq. 4-87)	Força resistente devido a pressão de contato na cantoneira na aba em contato com o perfil 1
	(Eq. 4-2)	Força resistente no parafuso em contato com o perfil 1 considerando o cisalhamento no parafuso
	(Eq. 4-3)	Força resistente no parafuso em contato com o perfil 2 considerando o esforço combinado no parafuso
	(Eq. 4-66)	Força resistente na cantoneira devido ao rasgamento
	(Eq. 4-52)	Força resistente no perfil 1 devido ao rasgamento
	(Eq. 4-7)	Força resistente no perfil 1 considerando a tensão de escoamento no recorte
	(Eq. 4-15)	Força resistente no perfil 1 analisando a região do recorte como barra considerando uma flexão combinada com esforço axial
	(Eq. 4-42)	Força resistente no perfil 1 considerando a pressão de contato no furo do parafuso no perfil 1
	(Eq. 4-76)	Força resistente na cantoneira considerando o rasgamento na aba em contato com o perfil 2
	(Eq. 4-99)	Força resistente na cantoneira considerando o escoamento na região em contato com o perfil 1
	(Eq. 4-103)	Força resistente na cantoneira considerando o escoamento na região em contato com o perfil 2

5.2 Perfis W200

5.2.1 Dados de entrada



FACE PARAFUSADA
PERFIL DE SUPORTE



PARAFUSO

Material: A325

$d_b = 19.05 \cdot \text{mm}$	Diâmetro do parafuso
$d_h = 20.55 \cdot \text{mm}$	Diâmetro do furo - Furo padrão executado com broca
$n_{b.pf1} = 2$	Número de parafusos ligados à alma da viga
$n_{b.pf2} = 4$	Número total de parafusos ligados ao perfil portante
$n_{s.pf1} = 2$	Planos de corte do parafuso na alma da viga
$n_{s.pf2} = 1$	Planos de corte do parafuso no perfil portante
$\sigma_{esc.b} = 635 \cdot \text{MPa}$	Limite de resistência do parafuso ao escoamento
$\sigma_{rup.b} = 825 \cdot \text{MPa}$	Limite de resistência do parafuso à ruptura

CANTONEIRA

PERFIS

Material _{ca} = "ASTM A36"	Material _{pf1} = "ASTM A572"	Material _{ch2} = "ASTM A572"
$\sigma_{esc.ca} = 250 \cdot \text{MPa}$	$\sigma_{esc.pf1} = 350 \cdot \text{MPa}$	$\sigma_{esc.ch2} = 350 \cdot \text{MPa}$
$\sigma_{rup.ca} = 400 \cdot \text{MPa}$	$\sigma_{rup.pf1} = 450 \cdot \text{MPa}$	$\sigma_{rup.ch2} = 450 \cdot \text{MPa}$

5.2.2 Verificações construtivas

<u>Distância entre furos:</u>	$Ver_{c1} = \text{"Ok"}$
<u>Distância dos furos às bordas:</u>	$Ver_{c2} = \text{"Ok"}$
<u>Distância entre furos e face da chapa:</u>	$Ver_{c3} = \text{"Ok"}$
<u>Gabarito da furação:</u>	$Ver_{c4} = \text{"Ok"}$
<u>Número de parafusos:</u>	$Ver_{c5} = \text{"Ok"}$
<u>Menor espessura entre alma da viga e cantoneira:</u>	$Ver_{c6} = \text{"Ok"}$
<u>Altura da ligação:</u>	$Ver_{c7} = \text{"Ok"}$
<u>Distância entre furos e face da chapa:</u>	$Ver_{c8} = \text{"Ok"}$

5.2.3 Curvas de interação da força resistente

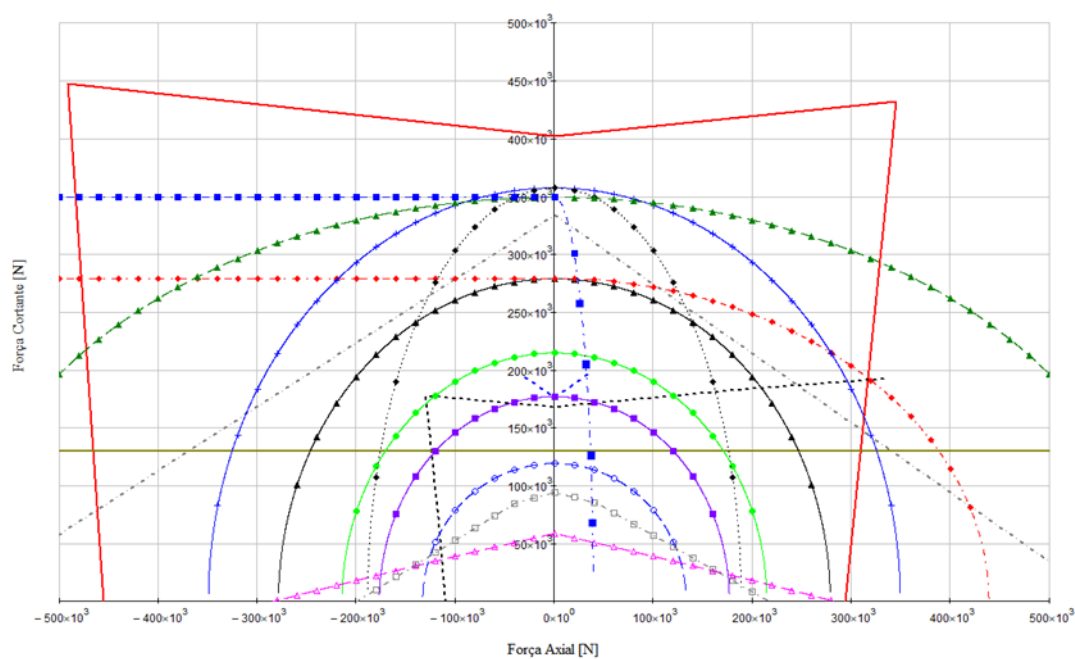


Figura 5-4 – Curva de interação da força resistente para ligação de perfil W 200

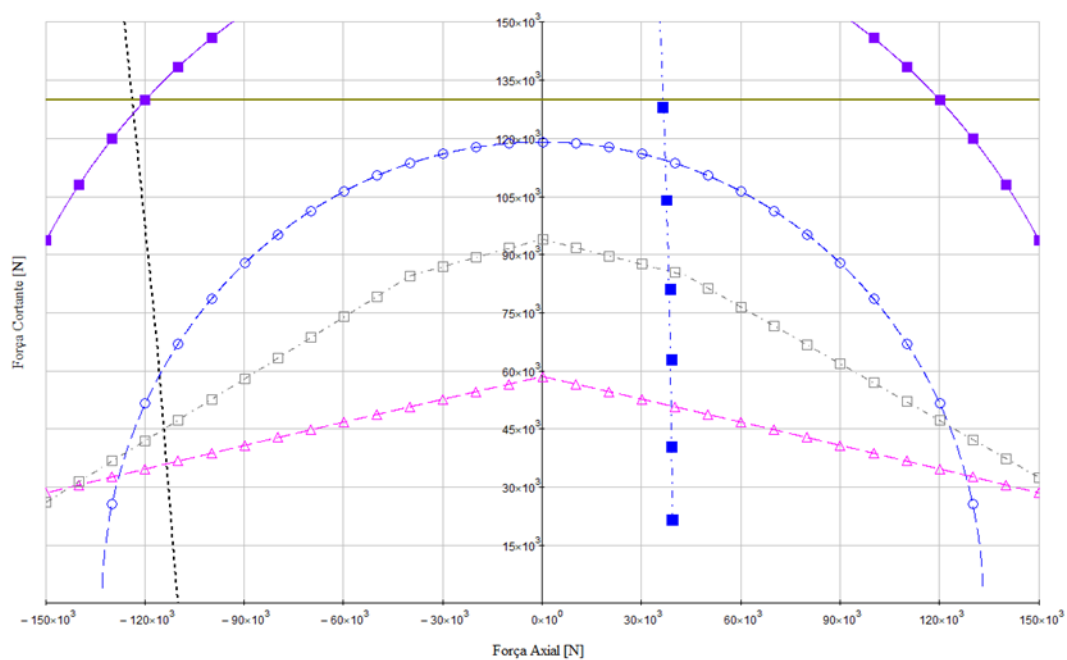
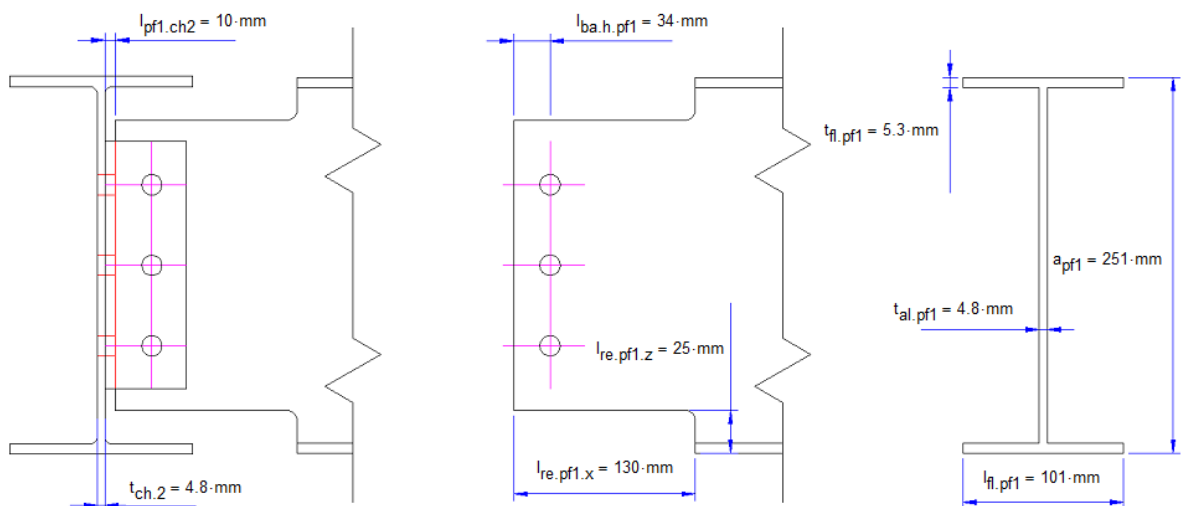


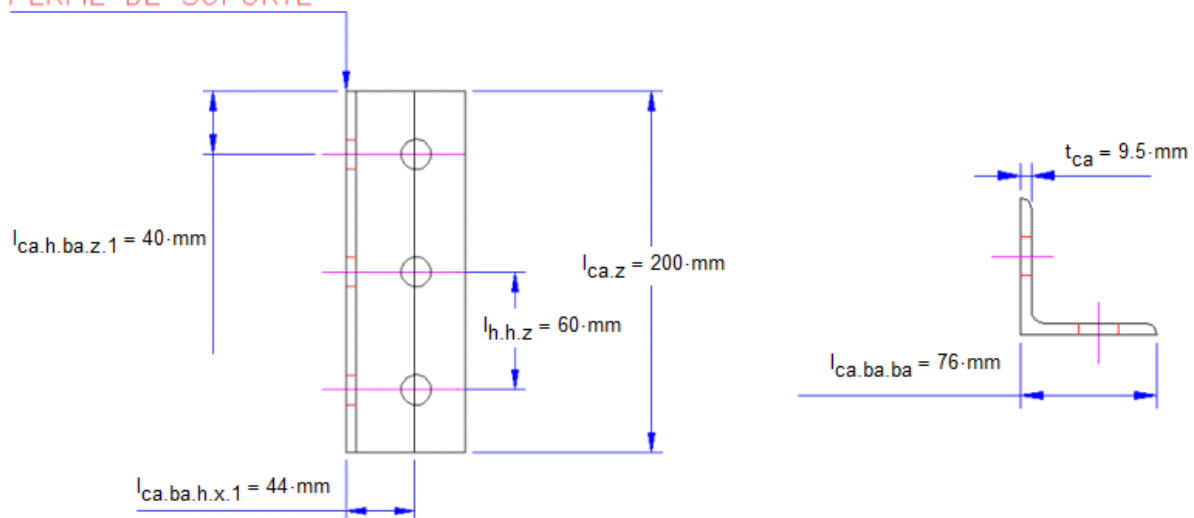
Figura 5-5 – Detalhe para Curva de interação da força resistente para ligação de perfil W 200

5.3 Perfis W250

5.3.1 Dados de entrada



FACE PARAFUSADA
PERFIL DE SUPORTE



PARAFUSO

Material: A325

$d_b = 19.05 \cdot \text{mm}$	Diâmetro do parafuso
$d_h = 20.55 \cdot \text{mm}$	Diâmetro do furo - Furo padrão executado com broca
$n_{b.pf1} = 3$	Número de parafusos ligados à alma da viga
$n_{b.pf2} = 6$	Número total de parafusos ligados ao perfil portante
$n_{s.pf1} = 2$	Planos de corte do parafuso na alma da viga
$n_{s.pf2} = 1$	Planos de corte do parafuso no perfil portante
$\sigma_{esc.b} = 635 \cdot \text{MPa}$	Limite de resistência do parafuso ao escoamento
$\sigma_{rup.b} = 825 \cdot \text{MPa}$	Limite de resistência do parafuso à ruptura

CANTONEIRA

Material_{ca} = "ASTM A36"

$\sigma_{esc.ca} = 250 \cdot \text{MPa}$

$\sigma_{rup.ca} = 400 \cdot \text{MPa}$

PERFIS

Material_{pf1} = "ASTM A572"

$\sigma_{esc.pf1} = 350 \cdot \text{MPa}$

$\sigma_{rup.pf1} = 450 \cdot \text{MPa}$

Material_{ch2} = "ASTM A572"

$\sigma_{esc.ch2} = 350 \cdot \text{MPa}$

$\sigma_{rup.ch2} = 450 \cdot \text{MPa}$

5.3.2 Verificações construtivas

Distância entre furos:

Ver_{c1} = "Ok"

Distância dos furos às bordas:

Ver_{c2} = "Ok"

Distância entre furos e face da chapa:

Ver_{c3} = "Ok"

Gabarito da furação:

Ver_{c4} = "Ok"

Número de parafusos:

Ver_{c5} = "Ok"

Menor espessura entre alma da viga e cantoneira:

Ver_{c6} = "Ok"

Altura da ligação:

Ver_{c7} = "Ok"

Distância entre furos e face da chapa:

Ver_{c8} = "Ok"

5.3.3 Curvas de interação da força resistente

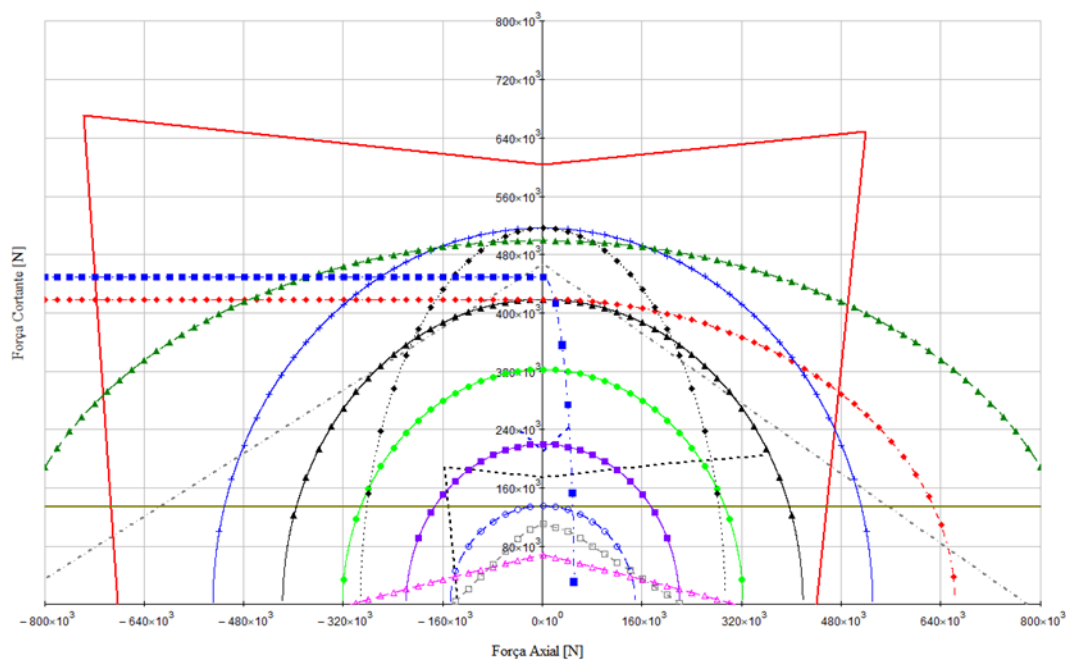


Figura 5-6 – Curva de interação da força resistente para ligação de perfil W 250

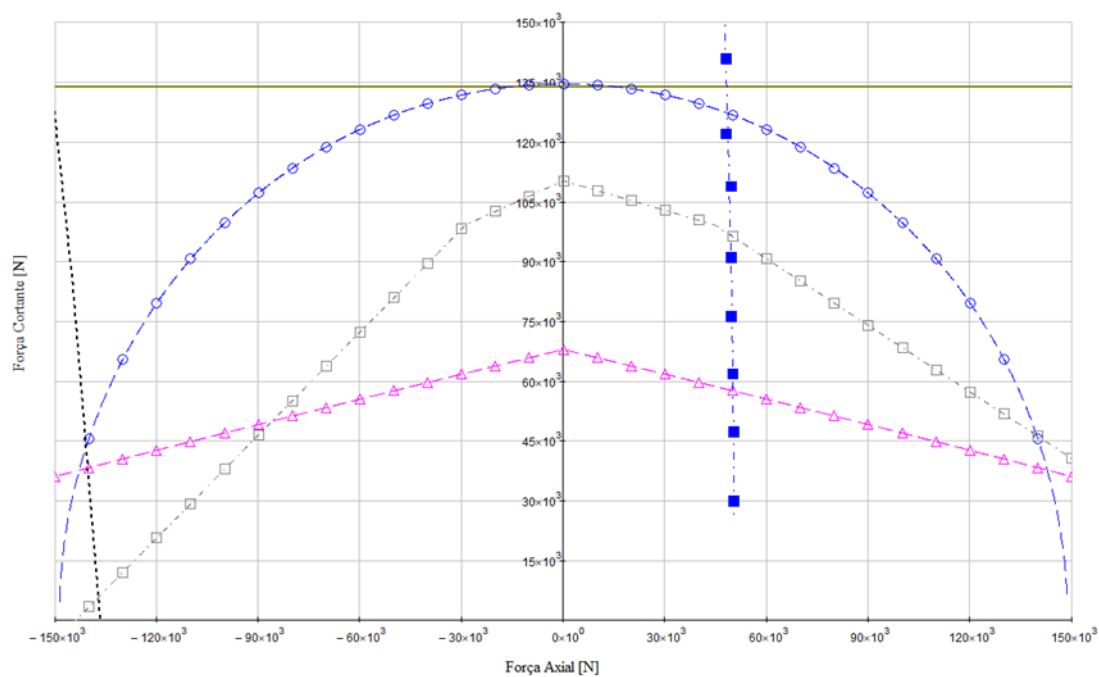
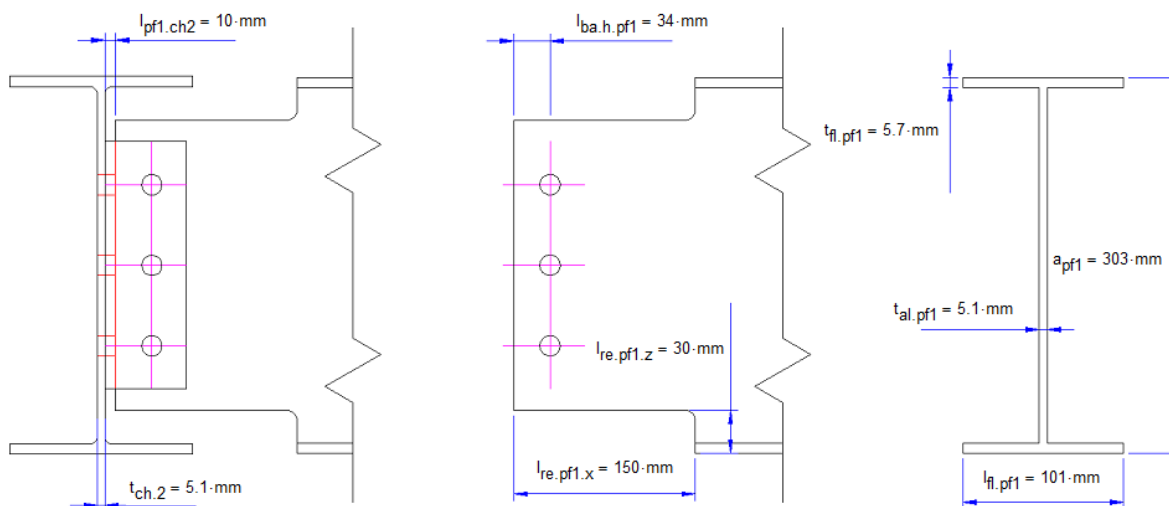


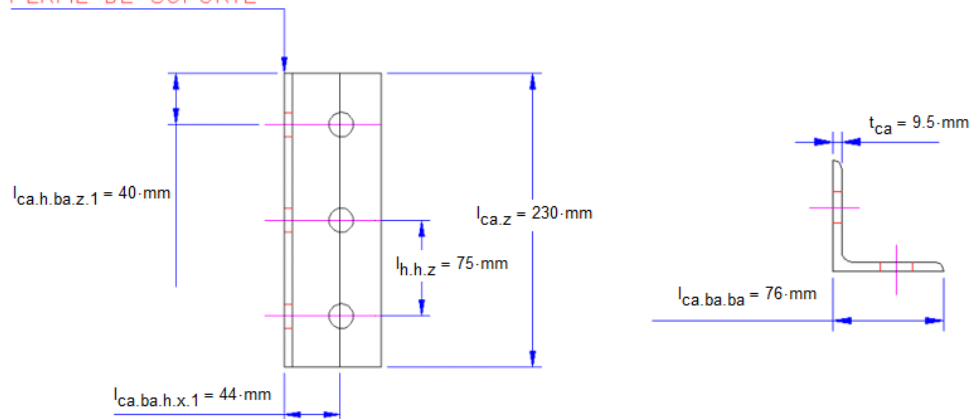
Figura 5-7 – Detalhe para curva de interação da força resistente para ligação de perfil W 200

5.4 Perfis W310

5.4.1 Dados de entrada



FACE PARAFUSADA
PERFIL DE SUPORTE



PARAFUSO

Material: A325

$d_b = 19.05 \cdot \text{mm}$	Diâmetro do parafuso
$d_h = 20.55 \cdot \text{mm}$	Diâmetro do furo - Furo padrão executado com broca
$n_{b.pf1} = 3$	Número de parafusos ligados à alma da viga
$n_{b.pf2} = 6$	Número total de parafusos ligados ao perfil portante
$n_{s.pf1} = 2$	Planos de corte do parafuso na alma da viga
$n_{s.pf2} = 1$	Planos de corte do parafuso no perfil portante
$\sigma_{esc.b} = 635 \cdot \text{MPa}$	Limite de resistência do parafuso ao escoamento
$\sigma_{rup.b} = 825 \cdot \text{MPa}$	Limite de resistência do parafuso à ruptura

CANTONEIRA

Material_{ca} = "ASTM A36"

$\sigma_{esc.ca} = 250 \cdot \text{MPa}$

$\sigma_{rup.ca} = 400 \cdot \text{MPa}$

PERFIS

Material_{pf1} = "ASTM A572"

$\sigma_{esc.pf1} = 350 \cdot \text{MPa}$

$\sigma_{rup.pf1} = 450 \cdot \text{MPa}$

Material_{ch2} = "ASTM A572"

$\sigma_{esc.ch2} = 350 \cdot \text{MPa}$

$\sigma_{rup.ch2} = 450 \cdot \text{MPa}$

5.4.2 Verificações construtivas

<u>Distância entre furos:</u>	$Ver_{c1} = \text{"Ok"}$
<u>Distância dos furos às bordas:</u>	$Ver_{c2} = \text{"Ok"}$
<u>Distância entre furos e face da chapa:</u>	$Ver_{c3} = \text{"Ok"}$
<u>Gabarito da furação:</u>	$Ver_{c4} = \text{"Ok"}$
<u>Número de parafusos:</u>	$Ver_{c5} = \text{"Ok"}$
<u>Menor espessura entre alma da viga e cantoneira:</u>	$Ver_{c6} = \text{"Ok"}$
<u>Altura da ligação:</u>	$Ver_{c7} = \text{"Ok"}$
<u>Distância entre furos e face da chapa:</u>	$Ver_{c8} = \text{"Ok"}$

5.4.3 Curvas de interação da força resistente

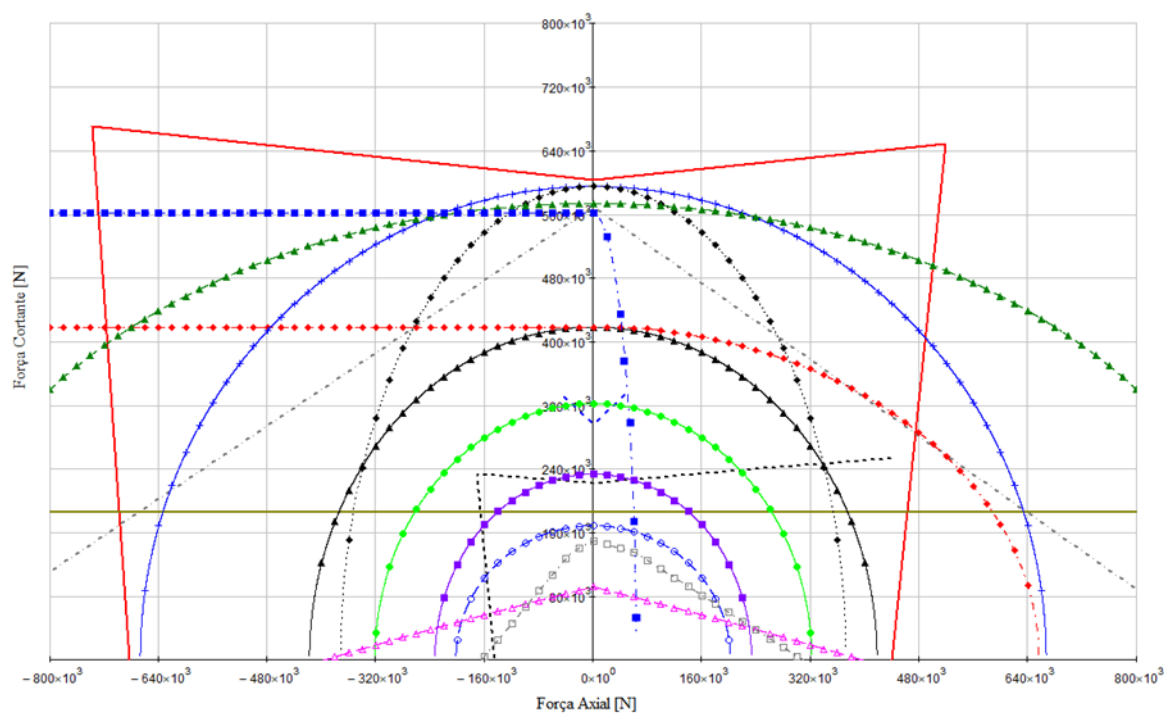


Figura 5-8 – Curva de interação da força resistente para ligação de perfil W 310

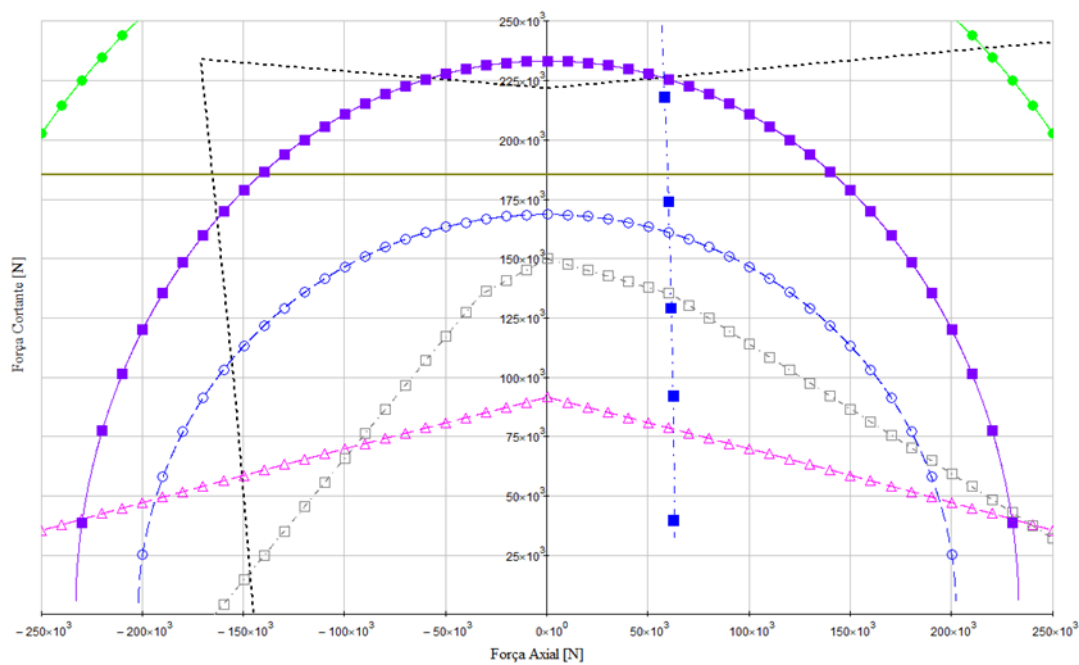
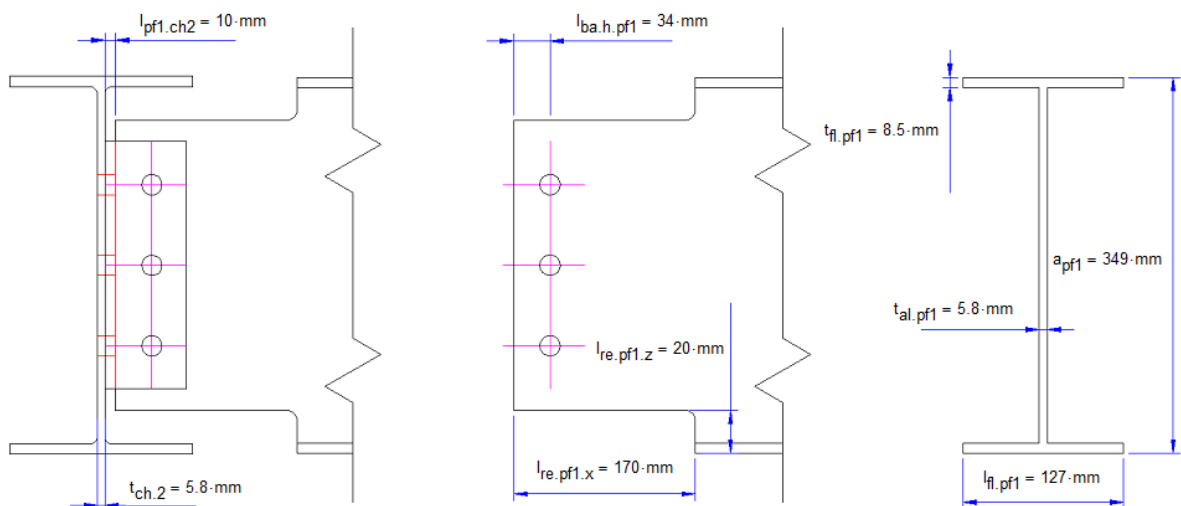


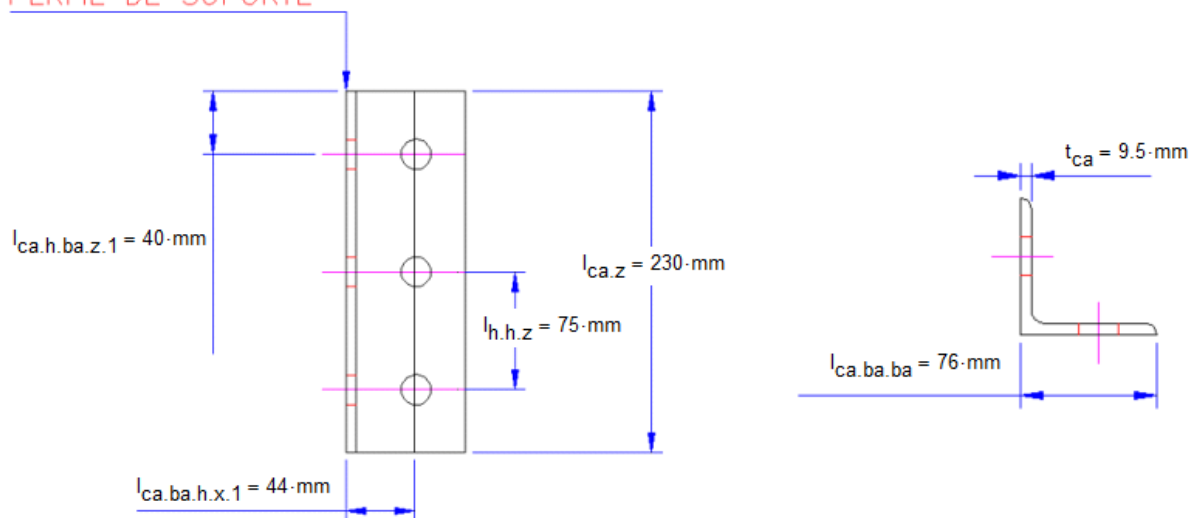
Figura 5-9 – Detalhe para curva de interação da força resistente para ligação de perfil W 310

5.5 Perfis W360

5.5.1 Dados de entrada



FACE PARAFUSADA
PERFIL DE SUPORTE



PARAFUSO

Material: A325

$$d_b = 19.05 \cdot \text{mm}$$

Diâmetro do parafuso

$$d_h = 20.55 \cdot \text{mm}$$

Diâmetro do furo - Furo padrão executado com broca

$$n_{b.pf1} = 3$$

Número de parafusos ligados à alma da viga

$$n_{b.pf2} = 6$$

Número total de parafusos ligados ao perfil portante

$$n_{s.pf1} = 2$$

Planos de corte do parafuso na alma da viga

$$n_{s.pf2} = 1$$

Planos de corte do parafuso no perfil portante

$$\sigma_{esc.b} = 635 \cdot \text{MPa}$$

Limite de resistência do parafuso ao escoamento

$$\sigma_{rup.b} = 825 \cdot \text{MPa}$$

Limite de resistência do parafuso à ruptura

CANTONEIRA

$$\text{Material}_{ca} = \text{"ASTM A36"}$$

$$\sigma_{esc.ca} = 250 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{rup.ca} = 400 \cdot \text{MPa}$$

PERFIS

$$\text{Material}_{pf1} = \text{"ASTM A572"}$$

$$\sigma_{esc.pf1} = 350 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{rup.pf1} = 450 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Material}_{ch2} = \text{"ASTM A572"}$$

$$\sigma_{esc.ch2} = 350 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{rup.ch2} = 450 \cdot \text{MPa}$$

5.5.2 Verificações construtivas

<u>Distância entre furos:</u>	$Ver_{c1} = \text{"Ok"}$
<u>Distância dos furos às bordas:</u>	$Ver_{c2} = \text{"Ok"}$
<u>Distância entre furos e face da chapa:</u>	$Ver_{c3} = \text{"Ok"}$
<u>Gabarito da furação:</u>	$Ver_{c4} = \text{"Ok"}$
<u>Número de parafusos:</u>	$Ver_{c5} = \text{"Ok"}$
<u>Menor espessura entre alma da viga e cantoneira:</u>	$Ver_{c6} = \text{"Ok"}$
<u>Altura da ligação:</u>	$Ver_{c7} = \text{"Ok"}$
<u>Distância entre furos e face da chapa:</u>	$Ver_{c8} = \text{"Ok"}$

5.5.3 Curvas de interação da força resistente

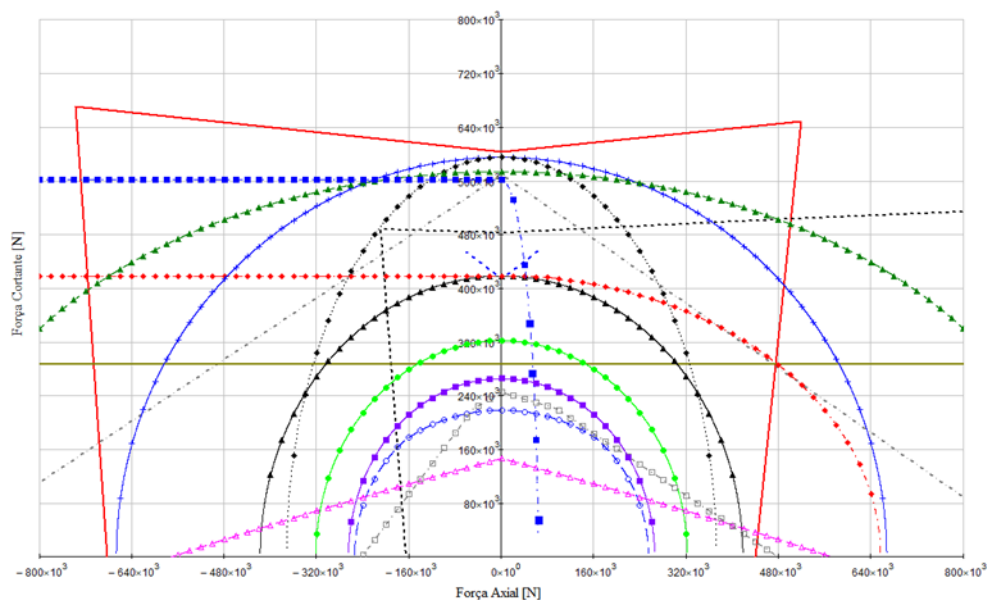


Figura 5-10 – Curva de interação da força resistente para ligação de perfil W 360

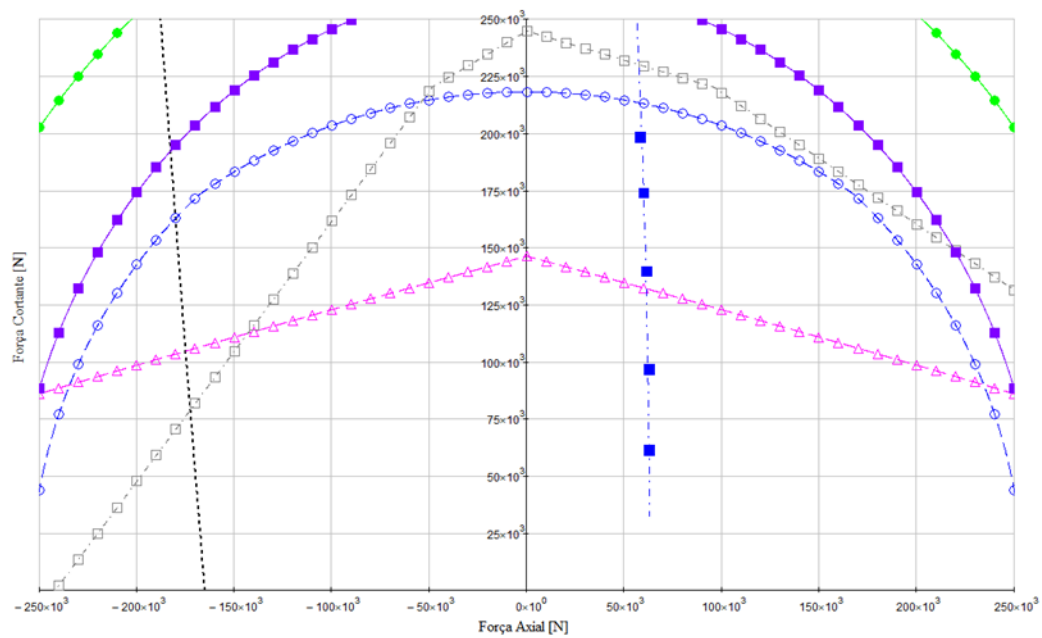
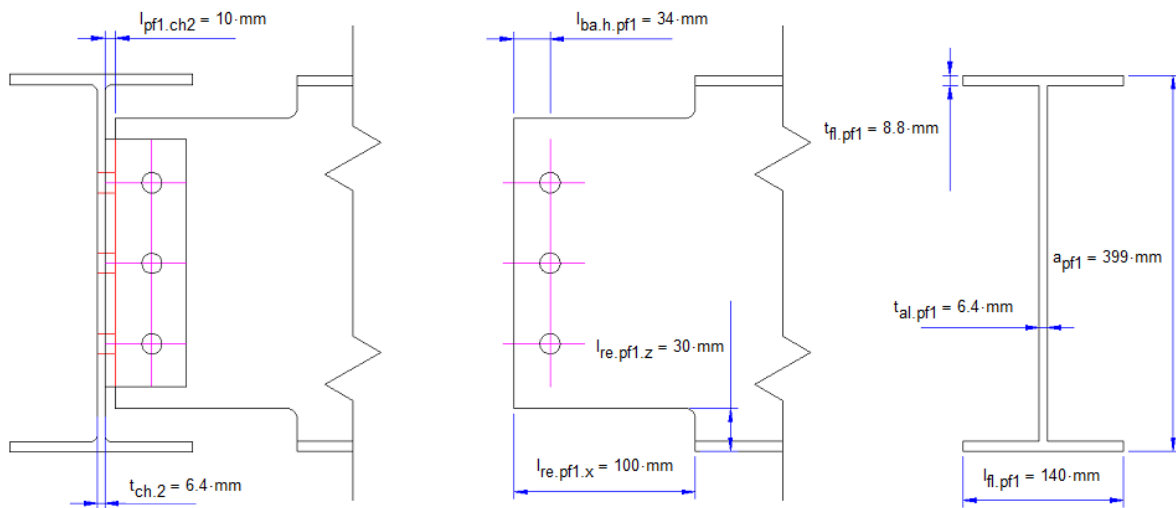


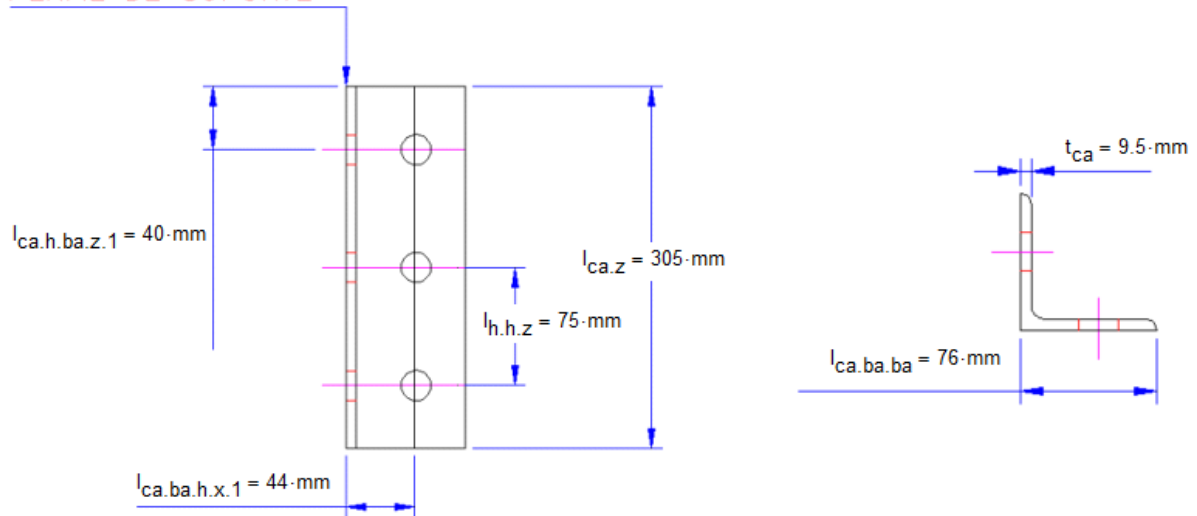
Figura 5-11 – Detalhe para curva de interação da força resistente para ligação de perfil W 360

5.6 Perfis W410

5.6.1 Dados de entrada



FACE PARAFUSADA
PERFIL DE SUPORTE



PARAFUSO

Material: A325

$d_b = 19.05 \cdot \text{mm}$

Diâmetro do parafuso

$d_h = 20.55 \cdot \text{mm}$

Diâmetro do furo - Furo padrão executado com broca

$n_{b.pf1} = 4$

Número de parafusos ligados à alma da viga

$n_{b.pf2} = 8$

Número total de parafusos ligados ao perfil portante

$n_{s.pf1} = 2$

Planos de corte do parafuso na alma da viga

$n_{s.pf2} = 1$

Planos de corte do parafuso no perfil portante

$\sigma_{esc.b} = 635 \cdot \text{MPa}$

Limite de resistência do parafuso ao escoamento

$\sigma_{rup.b} = 825 \cdot \text{MPa}$

Limite de resistência do parafuso à ruptura

CANTONEIRA

Material_{ca} = "ASTM A36"

$\sigma_{esc.ca} = 250 \cdot \text{MPa}$

$\sigma_{rup.ca} = 400 \cdot \text{MPa}$

PERFIS

Material_{pf1} = "ASTM A572"

$\sigma_{esc.pf1} = 350 \cdot \text{MPa}$

$\sigma_{rup.pf1} = 450 \cdot \text{MPa}$

Material_{ch2} = "ASTM A572"

$\sigma_{esc.ch2} = 350 \cdot \text{MPa}$

$\sigma_{rup.ch2} = 450 \cdot \text{MPa}$

5.6.2 Verificações construtivas

Distância entre furos:

Ver_{c1} = "Ok"

Distância dos furos às bordas:

Ver_{c2} = "Ok"

Distância entre furos e face da chapa:

Ver_{c3} = "Ok"

Gabarito da furação:

Ver_{c4} = "Ok"

Número de parafusos:

Ver_{c5} = "Ok"

Menor espessura entre alma da viga e cantoneira:

Ver_{c6} = "Ok"

Altura da ligação:

Ver_{c7} = "Ok"

Distância entre furos e face da chapa:

Ver_{c8} = "Ok"

5.6.3 Curvas de interação da força resistente

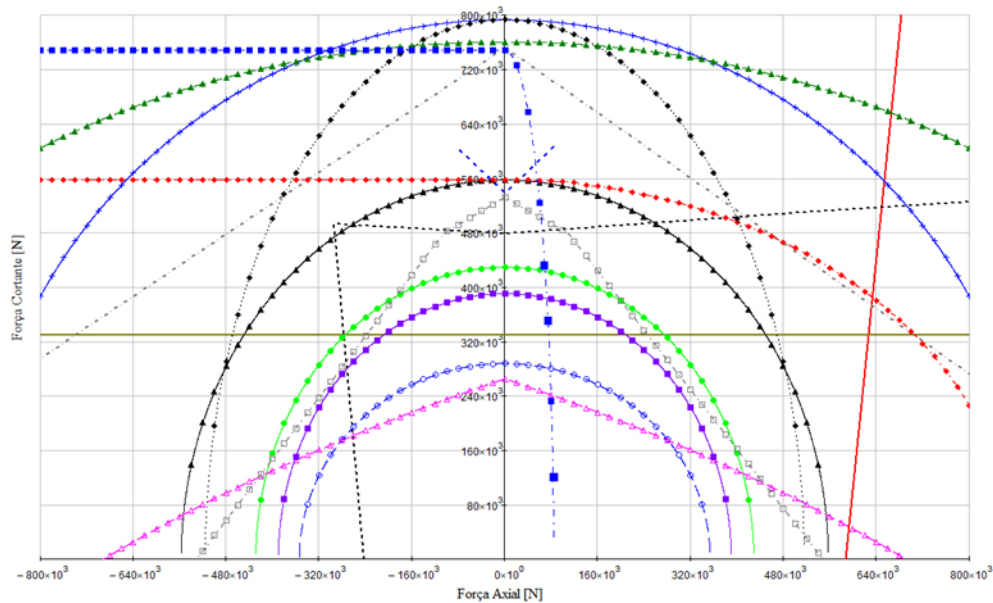


Figura 5-12 – Curva de interação da força resistente para ligação de perfil W 410

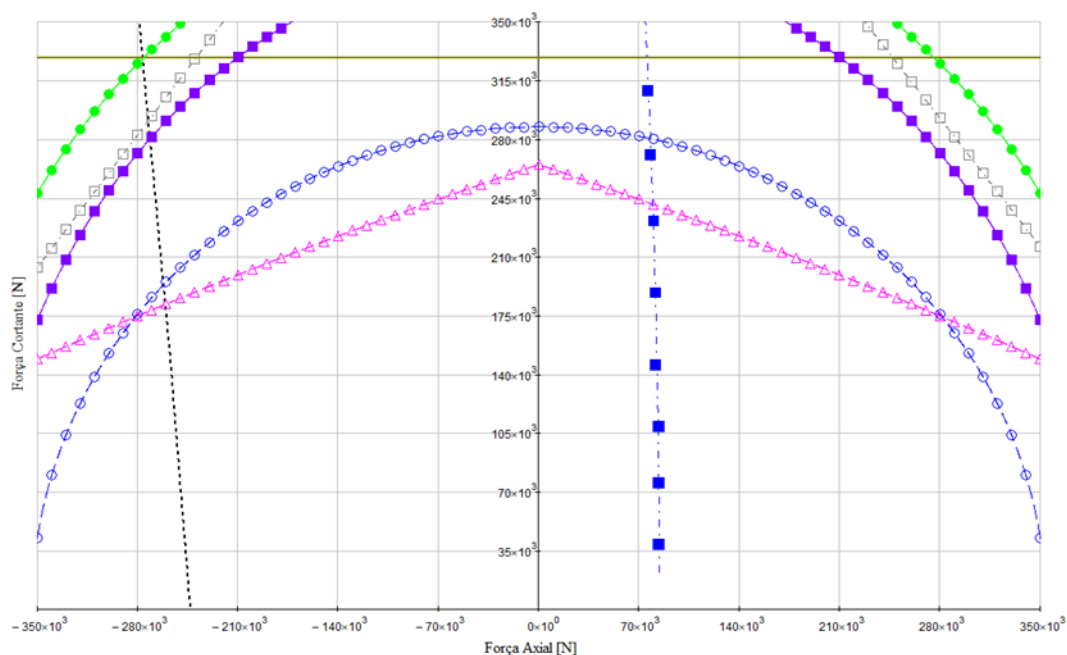


Figura 5-13 – Detalhe para curva de interação da força resistente para ligação de perfil W 410

5.7 Análise das Diferentes Curvas de Interação Obtidas

Foram observados três tipos de formatos de regiões que delimitam a força resistente das ligações. As figura 5-14 a figura 5-16 apresentam estes tipos de formatos.

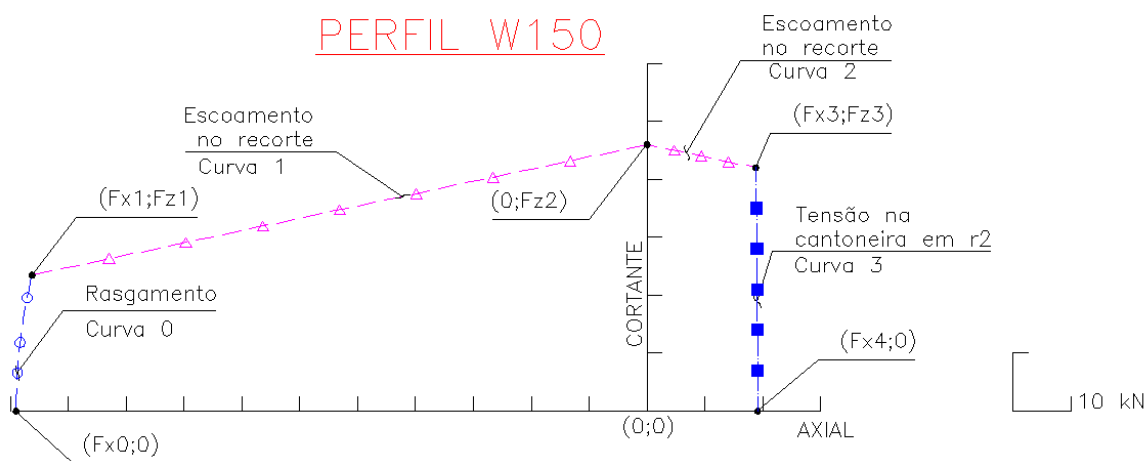


Figura 5-14 – Resumo de interação para perfis W150 – Região tipo 1

Os pontos de coordenada para perfis W150 e as curvas que delimitam esta região tipo são:

$$F_{x0} = (1)t_{a1}pf1 \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(\frac{b_{g,pf1.1}}{\sqrt{3}} + h_{h,pf1.1} \right) \quad (\text{Eq. 5-1})$$

$$F_{x1} := - \frac{N_{R,pf1.1}^2 \cdot Var_3 \cdot Var_2 + N_{R,pf1.1} \cdot V_{R,pf1.1} \cdot \sqrt{N_{R,pf1.1}^2 \cdot inc_1^2 + V_{R,pf1.1}^2 - Var_2^2}}{N_{R,pf1.1}^2 \cdot Var_3^2 + V_{R,pf1.1}^2} \quad (\text{Eq. 5-2})$$

$$F_{z1} = \frac{Var_2}{A_{re} \cdot \sigma_{esc,pf1}} \cdot F_{x1} + Var_2 \quad (\text{Eq. 5-3})$$

$$Var_2 := \sqrt{4 \cdot \left[\frac{(l_{pf1.re})^2 \cdot \left(\frac{a_{re}}{2} \right)^2}{l_{re}^2} + \frac{3}{A_{re}^2} \right] \cdot \frac{\sigma_{esc,pf1}^2}{\gamma_{a1}^2}} \quad (\text{Eq. 5-4})$$

$$Var_3 := \frac{Var_2}{A_{re} \cdot \sigma_{esc,pf1}} \quad (\text{Eq. 5-5})$$

$$F_{z2} := Var_2 \quad (\text{Eq. 5-6})$$

$$F_{x3} = \frac{\sqrt{3} \cdot t_{ca} \cdot \left(\begin{aligned} &Var_3^2 \cdot n_{b,pf2}^2 \cdot p_{ca}^2 \cdot t_{ca}^4 \cdot \sigma_{esc,ca}^2 \dots \\ &+ -3 \cdot Var_2^2 \cdot t_{ca}^2 \cdot \gamma_{a1}^2 - 36 \cdot Var_2^2 \cdot b_{linha}^2 \cdot \gamma_{a1}^2 \dots \\ &+ 12 \cdot b_{linha}^2 \cdot n_{b,pf2}^2 \cdot p_{ca}^2 \cdot t_{ca}^2 \cdot \sigma_{esc,ca}^2 \dots \\ &+ n_{b,pf2}^2 \cdot p_{ca}^2 \cdot t_{ca}^4 \cdot \sigma_{esc,ca}^2 \end{aligned} \right) + 3 \cdot Var_2 \cdot Var_3 \cdot t_{ca}^2 \cdot \gamma_{a1}}{3 \cdot \gamma_{a1} \cdot Var_3^2 \cdot t_{ca}^2 + 36 \cdot \gamma_{a1} \cdot b_{linha}^2 + 3 \cdot \gamma_{a1} \cdot t_{ca}^2} \quad (\text{Eq. 5-7})$$

$$F_{z3} := -Var_3 \cdot F_{x3} + Var_2 \quad (\text{Eq. 5-8})$$

$$F_{x4} = \frac{\sqrt{3} \cdot n_{b,pf2} \cdot p_{ca} \cdot t_{ca}^2 \cdot \sigma_{esc,ca} \cdot \sqrt{12 \cdot b_{linha}^2 + t_{ca}^2}}{36 \cdot \gamma_{a1} \cdot b_{linha}^2 + 3 \cdot \gamma_{a1} \cdot t_{ca}^2} \quad (\text{Eq. 5-9})$$

$$F_{z.c0}(F_x) := \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.pf1.1}^2}\right) \cdot V_{R.pf1.1}^2} \quad (\text{Eq. 5-10})$$

$$F_{z.c1}(F_x) := \text{Var}_3 \cdot F_x + \text{Var}_2 \quad (\text{Eq. 5-11})$$

$$F_{z.c2}(F_x) := -\text{Var}_3 \cdot F_x + \text{Var}_2 \quad (\text{Eq. 5-12})$$

$$F_{z.c3}(F_x) = n_{b.pf2} \left[\frac{p_{ca} \cdot t_{ca}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}}\right)^2 - \left[\frac{\frac{F_x}{n_{b.pf2}} \cdot (1_{pe.h.ca.1} - 0.5 \cdot d_h)}{\left(\frac{p_{ca} \cdot t_{ca}^2}{6}\right)} \right]^2} - 3 \cdot \left[\frac{\frac{F_x}{n_{b.pf2}}}{(p_{ca} \cdot t_{ca})} \right]^2 \right] \quad (\text{Eq. 5-13})$$

$$b_{linha} = l_{ca.ba.h.x.1} - t_{ca} - \frac{d_h}{2} \quad (\text{Eq. 5-14})$$

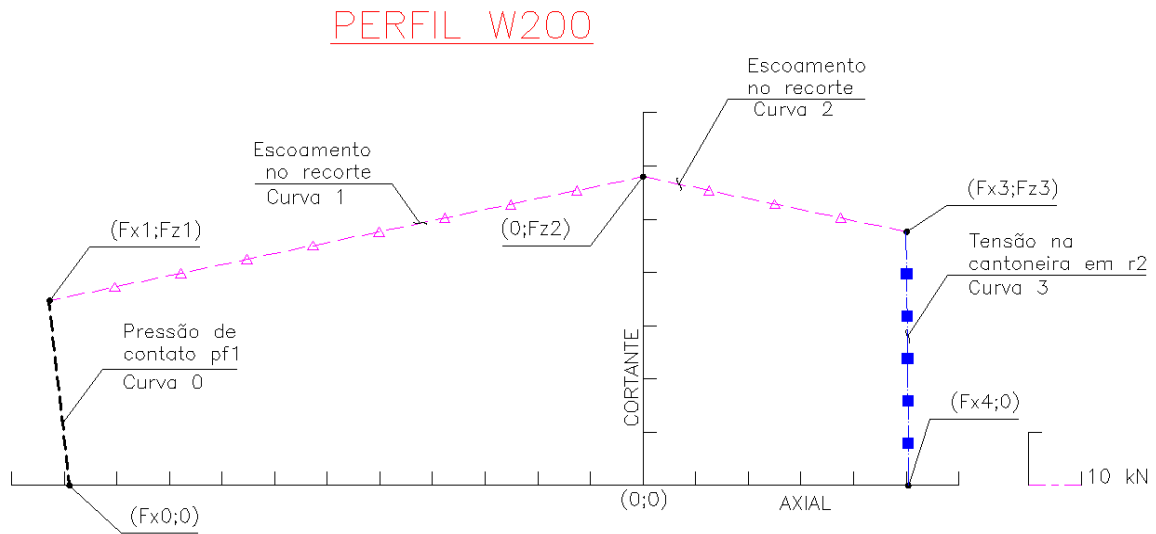


Figura 5-15 – Resumo de interação para perfis W200 – Região tipo 2

O mesmo comportamento deste tipo de ligação também foi observado em perfis com altura nominal de 400 mm. Os pontos de coordenada e as curvas que delimitam esta região do tipo 2 são:

$$F_{x0} := -1.2 \cdot n_{b.pf1} \cdot \left(l_{ba.h.x.pf1} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{al.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1}}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Eq. 5-15})$$

$$F_{x1.c0} := 1.2 \cdot n_{b.pf1} \cdot \left(\frac{l_{ba.h.z.pf1}}{\cos(\alpha_{4.pf1} - 90\text{deg})} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{al.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1}}{\gamma_{a2}} \cdot \cos(\alpha_{4.pf1}) \quad (\text{Eq. 5-16})$$

$$F_{z1.c0} := 1.2 \cdot n_{b.pf1} \cdot \left(\frac{l_{ba.h.z.pf1}}{\cos(\alpha_{4.pf1} - 90\text{deg})} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{al.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1}}{\gamma_{a2}} \cdot \sin(\alpha_{4.pf1}) \quad (\text{Eq. 5-17})$$

$$inc_0 := \frac{-F_{z1.c0}}{F_{x0} - F_{x1.c0}} \quad (\text{Eq. 5-18})$$

$$int_0 := -F_{x0} \cdot inc_0 \quad (\text{Eq. 5-19})$$

$$F_{x1} := \left(\frac{Var_2 - int_0}{Var_3 - inc_0} \right) \quad (\text{Eq. 5-20})$$

$$F_{z1} := Var_3 \cdot F_{x1} + Var_2 \quad (\text{Eq. 5-21})$$

$$Var_2 := \frac{\sqrt{4 \cdot \left[\frac{(l_{pf1.re})^2 \cdot \left(\frac{a_{re}}{2} \right)^2}{l_{re}^2} + \frac{3}{A_{re}^2} \right] \cdot \frac{\sigma_{esc.pf1}^2}{\gamma_{a1}^2}}}{2 \cdot \left[\frac{(l_{pf1.re})^2 \cdot \left(\frac{a_{re}}{2} \right)^2}{l_{re}^2} + \frac{3}{A_{re}^2} \right]} \quad (\text{Eq. 5-22})$$

$$Var_3 := \frac{Var_2}{\frac{A_{re} \cdot \sigma_{esc.pf1}}{\gamma_{a1}}} \quad (\text{Eq. 5-23})$$

$$F_{z2} := Var_2 \quad (\text{Eq. 5-24})$$

$$F_{x3} = \frac{\sqrt{3} \cdot t_{ca} \cdot \left(\frac{Var_3^2 \cdot n_{b.pf2}^2 \cdot p_{ca}^2 \cdot t_{ca}^4 \cdot \sigma_{esc.ca}^2 \dots}{+ 3 \cdot Var_2 \cdot Var_3 \cdot t_{ca}^2 \cdot \gamma_{a1}} \right)}{3 \cdot \gamma_{a1} \cdot Var_3^2 \cdot t_{ca}^2 + 36 \cdot \gamma_{a1} \cdot b_{linha}^2 + 3 \cdot \gamma_{a1} \cdot t_{ca}^2} \quad (\text{Eq. 5-25})$$

$$F_{z3} := -Var_3 \cdot F_{x3} + Var_2 \quad (\text{Eq. 5-26})$$

$$F_{x4} = \frac{\sqrt{3} \cdot n_{b,pf2} \cdot p_{ca} \cdot t_{ca}^2 \cdot \sigma_{esc,ca} \cdot \sqrt{12 \cdot b_{linha}^2 + t_{ca}^2}}{36 \cdot \gamma_{a1} \cdot b_{linha}^2 + 3 \cdot \gamma_{a1} \cdot t_{ca}^2} \quad (\text{Eq. 5-27})$$

$$F_{z,c0}(F_x) = inc_0 \cdot F_x + int_0 \quad (\text{Eq. 5-28})$$

$$F_{z,c1}(F_x) := Var_3 \cdot F_x + Var_2 \quad (\text{Eq. 5-29})$$

$$F_{z,c2}(F_x) := -Var_3 \cdot F_x + Var_2 \quad (\text{Eq. 5-30})$$

$$F_{z,c3}(F_x) = n_{b,pf2} \cdot \frac{p_{ca} \cdot t_{ca}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{esc,ca}}{\gamma_{a1}} \right)^2 - \left[\frac{\frac{F_x}{n_{b,pf2}} \cdot (1 \cdot p_{e,h,ca,1} - 0.5 \cdot d_h)}{\left(\frac{p_{ca} \cdot t_{ca}^2}{6} \right)} \right]^2 - 3 \cdot \left[\frac{\frac{F_x}{n_{b,pf2}}}{\left(\frac{p_{ca} \cdot t_{ca}}{6} \right)} \right]^2} \quad (\text{Eq. 5-31})$$

$$b_{linha} = l_{ca,ba,h,x,1} - t_{ca} - \frac{d_h}{2} \quad (\text{Eq. 5-32})$$

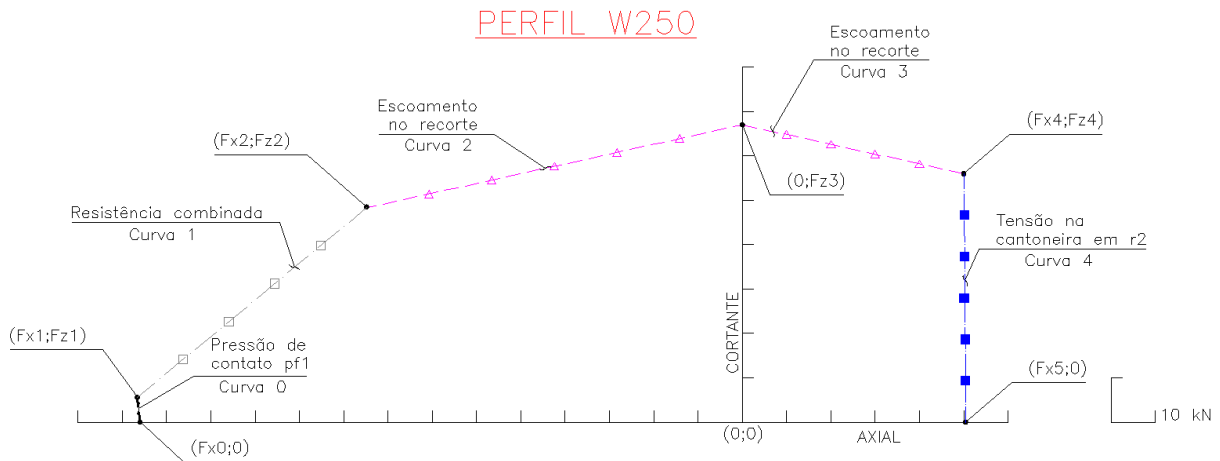


Figura 5-16 – Resumo de interação para perfis W250 – Região tipo 3

O comportamento deste tipo de ligação também foi observado em perfis com altura nominal de 250, 310 e 360 mm. Os pontos de coordenada e as curvas que delimitam esta região tipo 3 são:

$$F_{x0} := -1.2 \cdot n_{b,pf1} \cdot \left(l_{ba,h,x,pf1} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{a1,pf1} \cdot \sigma_{rup,pf1}}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Eq. 5-33})$$

$$F_{x1.c0} := 1.2 \cdot n_{b.pf1} \cdot \left(\frac{l_{ba.h.z.pf1}}{\cos(\alpha_{4.pf1} - 90\text{deg})} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{al.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1}}{\gamma_{a2}} \cdot \cos(\alpha_{4.pf1}) \quad (\text{Eq. 5-34})$$

$$F_{z1.c0} := 1.2 \cdot n_{b.pf1} \cdot \left(\frac{l_{ba.h.z.pf1}}{\cos(\alpha_{4.pf1} - 90\text{deg})} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{al.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1}}{\gamma_{a2}} \cdot \sin(\alpha_{4.pf1}) \quad (\text{Eq. 5-35})$$

$$inc_{.0} := \frac{-F_{z1.c0}}{F_{x0} - F_{x1.c0}} \quad (\text{Eq. 5-36})$$

$$int_{.0} := -F_{x0} \cdot inc_{.0} \quad (\text{Eq. 5-37})$$

$$F_{x1} = \frac{int_{.1} - int_{.0}}{inc_{.0} - inc_{.1}} \quad (\text{Eq. 5-38})$$

$$F_{z1} = inc_{.0} \cdot F_{x1} + int_{.0} \quad (\text{Eq. 5-39})$$

$$Var_{.2} = \frac{\sqrt{4 \cdot \left[\frac{(l_{pf1.re})^2 \cdot \left(\frac{a_{re}}{2}\right)^2}{l_{re}^2} + \frac{3}{A_{re}^2} \right] \cdot \frac{\sigma_{esc.pf1}^2}{\gamma_{a1}^2}}}{2 \cdot \left[\frac{(l_{pf1.re})^2 \cdot \left(\frac{a_{re}}{2}\right)^2}{l_{re}^2} + \frac{3}{A_{re}^2} \right]} \quad (\text{Eq. 5-40})$$

$$Var_{.3} = \frac{Var_{.2}}{\frac{A_{re} \cdot \sigma_{esc.pf1}}{\gamma_{a1}}} \quad (\text{Eq. 5-41})$$

$$inc_{.1} = \frac{M_{Rd.re}}{L_b \cdot F_{Rd.c.pf1}} \cdot \frac{9}{8} \quad (\text{Eq. 5-42})$$

$$int_{.1} = \frac{M_{Rd.re}}{L_b} \cdot \frac{9}{8} \quad (\text{Eq. 5-43})$$

$$F_{x2} = \frac{Var_{.2} - int_{.1}}{inc_{.1} - Var_{.3}} \quad (\text{Eq. 5-44})$$

$$F_{z2} = Var_{.3} \cdot F_{x2} + Var_{.2} \quad (\text{Eq. 5-45})$$

$$F_{z3} = Var_{.2} \quad (\text{Eq. 5-46})$$

$$F_{x4} = \frac{\sqrt{3} \cdot t_{ca} \cdot \left(\begin{aligned} &Var_{.3}^2 \cdot n_{b.pf2}^2 \cdot p_{ca}^2 \cdot t_{ca}^4 \cdot \sigma_{esc.ca}^2 \dots \\ &+ -3 \cdot Var_{.2}^2 \cdot t_{ca}^2 \cdot \gamma_{a1}^2 - 36 \cdot Var_{.2}^2 \cdot b_{linha}^2 \cdot \gamma_{a1}^2 \dots \\ &+ 12 \cdot b_{linha}^2 \cdot n_{b.pf2}^2 \cdot p_{ca}^2 \cdot t_{ca}^2 \cdot \sigma_{esc.ca}^2 \dots \\ &+ n_{b.pf2}^2 \cdot p_{ca}^2 \cdot t_{ca}^4 \cdot \sigma_{esc.ca}^2 \end{aligned} \right) + 3 \cdot Var_{.2} \cdot Var_{.3} \cdot t_{ca}^2 \cdot \gamma_{a1}}{3 \cdot \gamma_{a1} \cdot Var_{.3}^2 \cdot t_{ca}^2 + 36 \cdot \gamma_{a1} \cdot b_{linha}^2 + 3 \cdot \gamma_{a1} \cdot t_{ca}^2} \quad (\text{Eq. 5-47})$$

$$F_{z4} = -Var_3 \cdot F_{x4} + Var_2 \quad (\text{Eq. 5-48})$$

$$F_{x5} = \frac{\sqrt{3} \cdot n_{b.pf2} \cdot p_{ca} \cdot t_{ca}^2 \cdot \sigma_{esc.ca} \cdot \sqrt{12 \cdot b_{linha}^2 + t_{ca}^2}}{36 \cdot \gamma_{a1} \cdot b_{linha}^2 + 3 \cdot \gamma_{a1} \cdot t_{ca}^2} \quad (\text{Eq. 5-49})$$

$$F_{z.c0}(F_x) = inc_0 \cdot F_x + int_0 \quad (\text{Eq. 5-50})$$

$$F_{z.c1}(F_x) = F_x \cdot \left(\frac{M_{Rd.re}}{L_b \cdot F_{Rd.c.pf1}} \cdot \frac{9}{8} \right) + \frac{M_{Rd.re}}{L_b} \cdot \frac{9}{8} \quad (\text{Eq. 5-51})$$

$$F_{z.c2}(F_x) = Var_3 \cdot F_x + Var_2 \quad (\text{Eq. 5-52})$$

$$F_{z.c3}(F_x) = -Var_3 \cdot F_x + Var_2 \quad (\text{Eq. 5-53})$$

$$F_{z.c4}(F_x) = n_{b.pf2} \cdot \left[\frac{p_{ca} \cdot t_{ca}}{\sqrt{3}} \cdot \left(\left(\frac{\sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}} \right)^2 - \left[\frac{\frac{F_x}{n_{b.pf2}} \cdot (b_{linha})}{\left(\frac{p_{ca} \cdot t_{ca}^2}{6} \right)} \right]^2 - 3 \cdot \left[\frac{\frac{F_x}{n_{b.pf2}}}{(p_{ca} \cdot t_{ca})} \right]^2 \right) \right] \quad (\text{Eq. 5-54})$$

$$b_{linha} = l_{ca} \cdot b_{a.h.x.1} - t_{ca} - \frac{d_h}{2} \quad (\text{Eq. 5-55})$$

A definição do tipo de região é definida pela força resistente em alguns pontos do gráfico, ou seja, a dimensão da ligação influi diretamente na forma da região. De forma simplificada, a forma do gráfico das forças resistentes da ligação pode ser definida de forma simplificada pelo fluxograma a seguir apresentado:

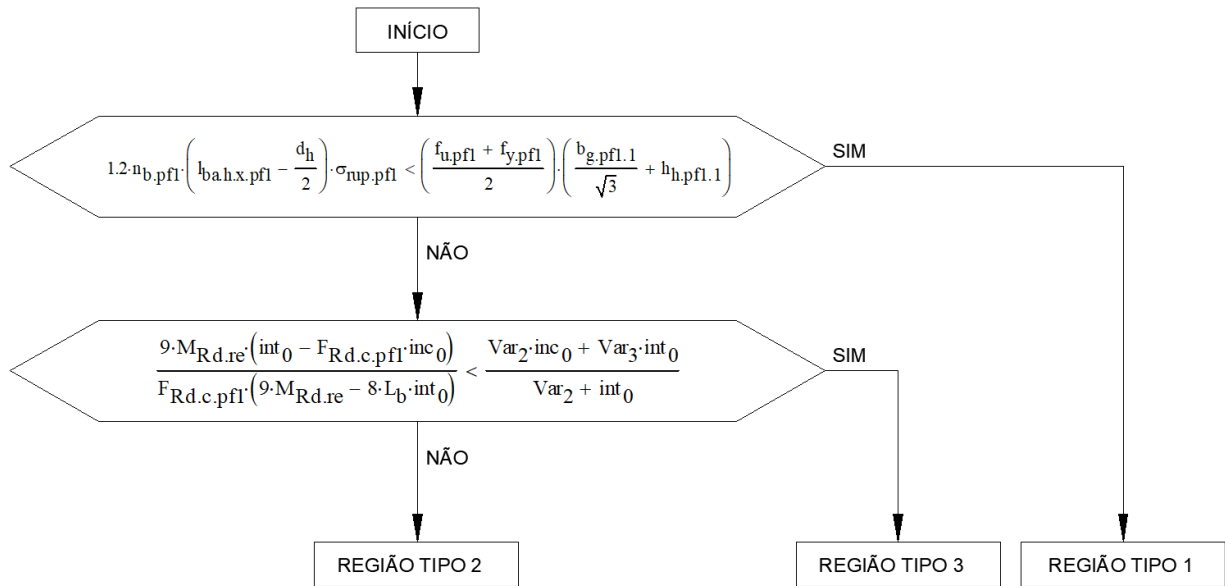


Figura 5-17 – Fluxograma de decisão de tipo de região da força resistente da ligação

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os critérios para o dimensionamento de ligações flexíveis com cantoneiras parafusadas, submetidas à esforços de axiais e de cisalhamento. A partir da geometria e dimensões de ligações utilizadas na prática de projeto, foram determinadas as curvas de iteração da força resistente para de perfis laminados com altura nominal variando de 150 a 410 mm, possibilitando assim o rápido dimensionamento desta ligação.

Alguns estados-limites são governados por segmentos de retas e outros por curvas. Dentre os primeiros tipos estão: rasgamento entre furo e borda, entre furo e furo, pela pressão de contato, escoamento na seção do recorte e da análise da região do recorte comportando-se como um perfil prismático. Demais estados-limites analisados têm formato elíptico.

A força resistente da ligação é fortemente afetada pelo recorte presente na extremidade da viga e pela espessura da alma do perfil, tendo em vista que todos os estados-limites de menor resistência tem o termo da espessura da alma do perfil envolvido no dimensionamento.

Para esforços de tração o principal fenômeno que limita a força resistente é a tensão atuante na cantoneira, principalmente devido à flexão próxima ao perfil portante.

7 REFERÊNCIAS

ABNT NBR 8800:2008. **Projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2008.

AISC. **Steel construction manual**. 13^a. ed. [S.l.]: [s.n.], 2007.

ANSI/AISC 360-10. **Specification for structural steel buildings**. Chigago: [s.n.], 2010.

AWS D1.1/D1.1M. **Strutural Welding Code**. Miami: [s.n.], 2004.

BAIÃO FILHO, O. T.; SILVA, A. C. V.; QUEIROZ, G. **Ligações para estruturas de aço - Guia prático para estruturas com perfis laminados**. [S.l.].

BLODGETT, O. W. et al. **Fabricators' and erectors' guide to weldes steel construction**. [S.l.]: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1999.

ESAB. Apostila de eletrodos revestidos, 03 Fevereiro 2005a. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf>. Acesso em: 13 Setembro 2017. Tradutor: Cleber Fortes.

ESAB. Apostila de soldagem MIG/MAG, 25 Janeiro 2005b. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev1_apostilasoldagemmig_mag_nova.pdf>. Acesso em: 13 set. 2017. Tradutor: Cleber Fortes.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints**. Brussels: [s.n.], 2005.

FAKURY, R. H.; CASTRO E SILVA, A. L. R.; CALDAS, R. B. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Pearson, 2016.

GORENC, B.; TINYOU, R.; SYAM, A. **Steel designers' handbook**. 7^a. ed. Sydney: UNSW, 2005.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Ligações em estruturas metálicas**. 4^a. ed. Rio de Janeiro: CBCA, v. 1, 2011a.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Ligações em Estruturas metálicas**. 4^a. ed. Rio de Janeiro: CBCA, v. 2, 2011b.

JÖNSSON, J. Generalized block failure. **Nordic Steel Construction Conference 2015**, 23 Setembro 2015.

OWENS, G. W.; CHEAL, B. D. **Structural Steelwork Connection**. [S.l.]: Butterworths, 1989.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço**: Dimensionamento prático. 6^a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

RCSC. **Specification for structural joints using high-strength bolts**. Illinois: [s.n.], 2009.

TAMBOLI, A. R. **Handbook of structural steel connection design and details**. 2^a. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2010.

APÊNDICE A – ARQUIVO MATHCAD PARA CÁLCULO DA INTERAÇÃO DE RESISTÊNCIA

$$F_x := (-1500\text{kN}, -1499.9\text{kN}.. 1500\text{kN})$$

DADOS DE ENTRADA

Fatores de segurança:

$$\gamma_{a1} := 1.1$$

$$\gamma_{a2} := 1.35$$

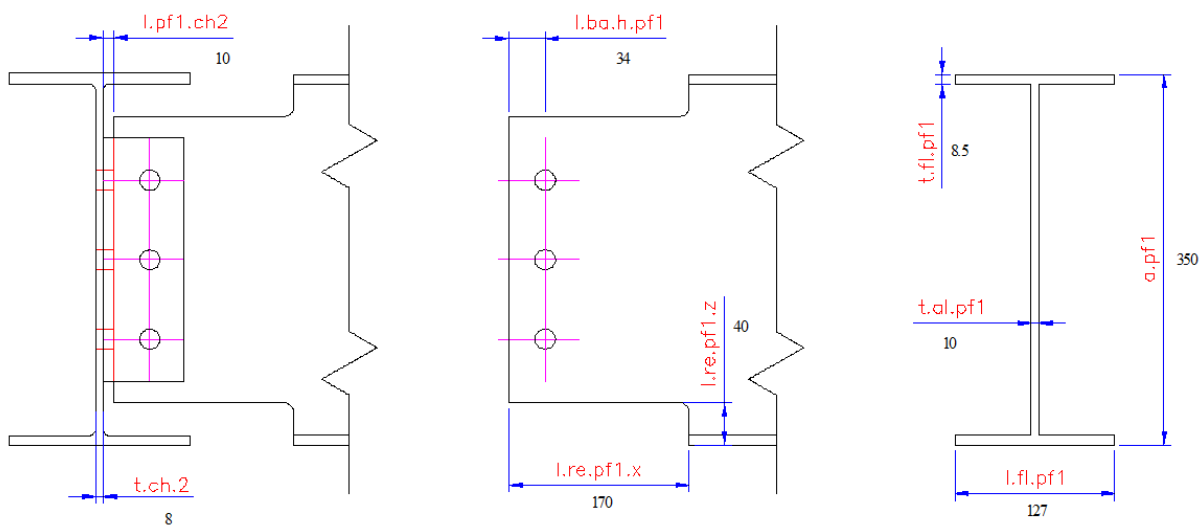
$$\gamma_{w2} := 1.35$$

Propriedades gerais do aço:

$$E := 200\text{GPa}$$

$$\nu := 0.3$$

$$G := \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$



Converter texto em número com unidades

$$t_{ch.2} := \text{str2num}(t_{ch.2}) \cdot \text{mm}$$

$$l_{pf1.ch2} := \text{str2num}(l_{pf1.ch2}) \cdot \text{mm}$$

$$l_{re.pf1.x} := \text{str2num}(l_{re.pf1.x}) \cdot \text{mm}$$

$$l_{re.pf1.z} := \text{str2num}(l_{re.pf1.z}) \cdot \text{mm}$$

PARAFUSO

Material: A325

$$d_b := \frac{3}{4} \text{ in}$$

Diâmetro do parafuso

$$d_h := d_b + 1.5 \text{ mm} = 20.55 \cdot \text{mm}$$

Diâmetro do furo - Furo padrão executado com broca

$$n_{b.pf1} := 3$$

Número de parafusos ligados à alma da viga

$$n_{b.pf2} := 6$$

Número total de parafusos ligados ao perfil portante

$$n_{s.pf1} := 2$$

Planos de corte do parafuso na alma da viga

$$n_{s.pf2} := 1$$

Planos de corte do parafuso no perfil portante

$$\sigma_{esc.b} := 635 \text{ MPa}$$

Limite de resistência do parafuso ao escoamento

$$\sigma_{rup.b} := 825 \text{ MPa}$$

Limite de resistência do parafuso à ruptura

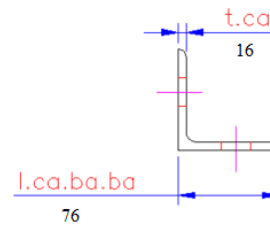
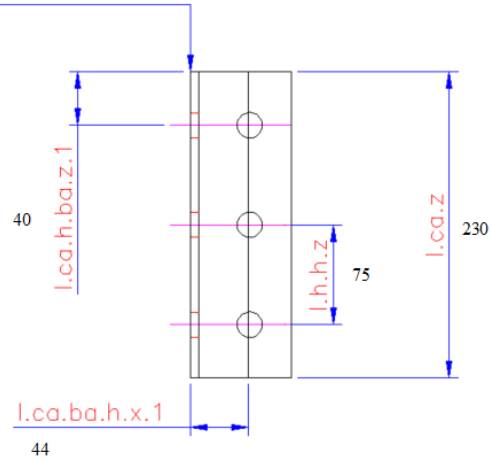
CANTONEIRA

$$\text{Material}_{ca} := \text{"ASTM A36"}$$

$$\sigma_{esc.ca} := 250 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{rup.ca} := 400 \text{ MPa}$$

FACE PARAFUSADA
PERFIL DE SUPORTE



--> Converte caixas de texto em números com unidades

$$l_{ca.h.ba.z.1} := \text{str2num}(l_{ca.h.ba.z.1}) \cdot \text{mm}$$

$$l_{ca.z} := \text{str2num}(l_{ca.z}) \cdot \text{mm}$$

$$l_{h.h.z} := \text{str2num}(l_{h.h.z}) \cdot \text{mm}$$

$$l_{ca.ba.h.x.1} := \text{str2num}(l_{ca.ba.h.x.1}) \cdot \text{mm}$$

$$l_{ca.ba.ba} := \text{str2num}(l_{ca.ba.ba}) \cdot \text{mm}$$

$$t_{ca} := \text{str2num}(t_{ca}) \cdot \text{mm}$$

PERFIL 1

$$\text{Material}_{pf1} := \text{"ASTM A572"}$$

$$\sigma_{esc.pf1} := 350 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{rup.pf1} := 450 \text{ MPa}$$

Converter texto em unidades

$$t_{fl.pf1} := \text{str2num}(t_{fl.pf1}) \cdot \text{mm}$$

$$a_{pf1} := \text{str2num}(a_{pf1}) \cdot \text{mm}$$

$$t_{al.pf1} := \text{str2num}(t_{al.pf1}) \cdot \text{mm}$$

$$l_{ba.h.pf1} := \text{str2num}(l_{ba.h.pf1}) \cdot \text{mm}$$

$$l_{fl.pf1} := \text{str2num}(l_{fl.pf1}) \cdot \text{mm}$$

CHAPA 2 - PERFIL PORTANTE

$$\text{Material}_{ch2} := \text{"ASTM A572"}$$

$$\sigma_{esc.ch2} := 350 \text{MPa}$$

$$\sigma_{rup.ch2} := 450 \text{MPa}$$

1) Disposições construtivas:

Distância entre furos:

$$t_{min.1} := \min(t_{al.pf1}, t_{ca})$$

$$\text{Ver}_{c1} := \begin{cases} \text{"Ok"} & \text{if } l_{h.h.z} \leq 24 \cdot t_{min.1} \wedge l_{h.h.z} \leq 300 \text{mm} \wedge l_{h.h.z} \geq 3 \cdot d_b \\ \text{"Falha"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{c1} = \text{"Ok"}$$

Distância dos furos às bordas:

$$l_{h.ba.min} := \min(l_{ca.ba.ba} - l_{ca.ba.h.x.1}, l_{ca.h.ba.z.1}, l_{ba.h.pf1}) = 32 \cdot \text{mm}$$

Para elementos pintados $efb < 24t$ e $efb < 300\text{mm}$

$$Ver_{c2} := \begin{cases} \text{"Ok"} & \text{if } l_{h.ba.min} \leq 12 \cdot t_{min.1} \wedge l_{h.ba.min} \leq 150\text{mm} \wedge l_{h.ba.min} \geq 1.25 \cdot d_b \\ \text{"Falha"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ver_{c2} = \text{"Ok"}$$

Distância entre furos e face da chapa:

$$l_{v.fl.pf1} := \left(\frac{a_{pf1}}{2} - t_{fl.pf1} \right) - \left(\frac{n_{b.pf1} - 1}{2} \right) \cdot l_{h.h.z}$$

$$Ver_{c3} := \begin{cases} \text{"Ok"} & \text{if } l_{v.fl.pf1} \geq 1.5 \cdot d_b \\ \text{"Falha"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ver_{c3} = \text{"Ok"}$$

Gabarito da furação:

$$Ver_{c4} := \begin{cases} \text{"Ok"} & \text{if } \left[l_{ca.ba.h.x.1} + \frac{1}{2} \cdot t_{al.pf1} \leq (65\text{mm}) \right] \\ \text{"Falha"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ver_{c4} = \text{"Ok"}$$

Número de parafusos:

$$Ver_{c5} := \begin{cases} \text{"Ok"} & \text{if } n_{b.pf1} \leq 9 \wedge n_{b.pf1} \geq 2 \\ \text{"Falha"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ver_{c5} = \text{"Ok"}$$

Menor espessura entre alma da viga e cantoneira:

$$t_{\max} := \max(t_{\text{al.pf1}}, t_{\text{ca}})$$

$$\text{Ver}_{\text{c6}} := \begin{cases} \text{"Ok"} & \text{if } t_{\max} \leq \frac{d_b}{2} + 1.5\text{mm} \\ \text{"Falha"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{c6}} = \text{"Ok"}$$

Altura da ligação:

$$l_{\text{ca.z}} = 230 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Ver}_{\text{c7}} := \begin{cases} \text{"Ok"} & \text{if } l_{\text{ca.z}} \geq 0.5 \cdot a_{\text{pf1}} \\ \text{"Falha"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{c7}} = \text{"Ok"}$$

Distância entre furos e face da chapa:

$$l_{\text{x.h.ca}} := l_{\text{ca.ba.h.x.1}} - t_{\text{ca}}$$

$$\text{Ver}_{\text{c8}} := \begin{cases} \text{"Ok"} & \text{if } l_{\text{x.h.ca}} \geq 1.5 \cdot d_b \\ \text{"Falha"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{c8}} = \text{"Ok"}$$

Modo de falha 1 - Cisalhamento dos parafusos da alma da viga suportada:

$$A_b := \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} = 2.85 \cdot \text{cm}^2$$

Cisalhamento dos parafusos:

$$F_{\text{z.cis.al}}(F_x) := \sqrt{\left(\frac{0.4 \cdot n_{\text{s.pf1}} \cdot A_b \cdot \sigma_{\text{rup.b}}}{\gamma_{\text{a2}}} \cdot n_{\text{b.pf1}} \right)^2 - F_x^2}$$

Modo de falha 2 - Efeito alavanca na cantoneira

$$d_{ln} := d_h \quad l_{ca.ba.h.}$$

$$\text{Dimensão b:} \quad l_{pe.h.ca.1} := l_{ca.ba.h.x.1} - t_{ca}$$

$$\text{Dimensão a:} \quad l_{ba.h.ca.2} := \begin{cases} (l_{ca.ba.ba} - l_{ca.ba.h.x.1}) & \text{if } l_{ca.ba.ba} - l_{ca.ba.h.x.1} \leq 1.25 \cdot l_{pe.h.ca.1} \\ (1.25 \cdot l_{pe.h.ca.1}) & \text{if } l_{ca.ba.ba} - l_{ca.ba.h.x.1} > 1.25 \cdot l_{pe.h.ca.1} \end{cases}$$

$$e_1 := l_{h.h.z}$$

$$e_2 := \frac{l_{ca.z} - (n_{b.pf1} - 1) \cdot l_{h.h.z}}{2}$$

Largura efetiva:

$$p_{ca.1} := \min(e_2, l_{pe.h.ca.1} + 0.5 \cdot d_h) + \min\left(\frac{e_1}{2}, l_{pe.h.ca.1} + 0.5 \cdot d_h\right) \quad \text{Da borda da}$$

$$p_{ca.2} := 2 \cdot \min\left(\frac{e_1}{2}, l_{pe.h.ca.1} + 0.5 \cdot d_h\right)$$

$$p_{ca} := \begin{cases} p_{ca.1} & \text{if } n_{b.pf1} \leq 2 \\ \min(p_{ca.1}, p_{ca.2}) & \text{if } n_{b.pf1} > 2 \end{cases}$$

$$M_{Rd.ca.al} := \frac{1.5}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{p_{ca} \cdot t_{ca}^2}{6} \cdot \sigma_{esc.ca}$$

$$\delta_1 := \frac{p_{ca} - d_h}{p_{ca}}$$

$$F_{x.max.al} := \frac{\delta_1 \cdot M_{Rd.ca.al} + M_{Rd.ca.al}}{l_{pe.h.ca.1} - 0.5 \cdot d_h} \cdot n_{b.pf2}$$

Força adicional para efeito alavanca:

$$Q := \frac{\frac{F_{x,max.al}}{n_{b,pf2}} \cdot (l_{pe,h.ca.1} - 0.5 \cdot d_h) - M_{Rd.ca.al}}{l_{ba,h.ca.2} + d_h}$$

Força limite para evitar efeito alavanca:

$$F_{lim} := \frac{M_{Rd.ca.al}}{(l_{pe,h.ca.1} - 0.5 \cdot d_h)}$$

Força total no parafuso:

$$F_b := \left(\frac{Q}{\frac{F_{x,max.al}}{n_{b,pf2}}} + 1 \right) \cdot \frac{F_{x,max.al}}{n_{b,pf2}}$$

Fator de correção para esforço normal:

$$c_{cor} := \left(\frac{Q}{\frac{F_{x,max.al}}{n_{b,pf2}}} + 1 \right)$$

Modo de falha 3 - Efeito combinado nos parafusos entre cantoneira e perfil portante:

Fator de correção da força axial devido a efeito alavanca $c_{cor} = 1.194$

Força limite para não ocorrência de efeito alavanca $F_{lim} = 13.671 \cdot kN$

$$F_{z.co.b,pf2}(F_x) := \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{0.4 \cdot n_{s,pf2} \cdot A_b \cdot \sigma_{rup.b}}{\gamma_{a2}} \cdot n_{b,pf2} \right)^2} & \text{if } F_x \leq 0 \\ \sqrt{\left(\frac{0.4 \cdot n_{s,pf2} \cdot A_b \cdot \sigma_{rup.b}}{\gamma_{a2}} \cdot n_{b,pf2} \right)^2 - \frac{(F_x)^2}{\left(\frac{0.75 \cdot A_b \cdot \sigma_{rup.b} \cdot n_{b,pf2}}{\gamma_{a2}} \right)^2} \cdot \left(\frac{0.4 \cdot n_{s,pf2} \cdot A_b \cdot \sigma_{rup.b}}{\gamma_{a2}} \cdot n_{b,pf2} \right)^2} & \text{if } F_x > 0 \wedge F_x \leq F_{lim} \cdot n_{b,pf2} \\ \sqrt{\left(\frac{0.4 \cdot n_{s,pf2} \cdot A_b \cdot \sigma_{rup.b}}{\gamma_{a2}} \cdot n_{b,pf2} \right)^2 - \frac{(c_{cor} \cdot F_x)^2}{\left(\frac{0.75 \cdot A_b \cdot \sigma_{rup.b} \cdot n_{b,pf2}}{\gamma_{a2}} \right)^2} \cdot \left(\frac{0.4 \cdot n_{s,pf2} \cdot A_b \cdot \sigma_{rup.b}}{\gamma_{a2}} \cdot n_{b,pf2} \right)^2} & \text{if } F_x > F_{lim} \cdot n_{b,pf2} \end{cases}$$

Modo de falha 4 - Rasgamento na cantoneira

4.1 - Rasgamento do tipo 1 - Formação em L

$$f_{m.ca} := \frac{\sigma_{esc.ca} + \sigma_{rup.ca}}{2} \quad \text{Tensão de escoamento médio}$$

Área líquida para ruptura da região 1

$$b_{g.ca.1} := l_{ca.ba.ba} - l_{ca.ba.h.x.1} \quad \text{Largura bruta}$$

$$b_{n.ca.1} := l_{ca.ba.ba} - l_{ca.ba.h.x.1} - \frac{d_h}{2} \quad \text{Largura líquida}$$

$$h_{g.ca.1} := l_{h.h.z} \cdot (n_{b.pf1} - 1) + \frac{l_{ca.z} - l_{h.h.z} \cdot (n_{b.pf1} - 1)}{2} \quad \text{Altura bruta}$$

$$h_{h.ca.1} := l_{h.h.z} \cdot (n_{b.pf1} - 1) + \frac{l_{ca.z} - l_{h.h.z} \cdot (n_{b.pf1} - 1)}{2} - (n_{b.pf1} - 0.5) \cdot d_h \quad \text{Altura líquida}$$

$$N_{R.ca.1} := (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(\frac{b_{g.ca.1}}{\sqrt{3}} + h_{h.ca.1} \right) \quad \text{Resistência a força normal}$$

$$V_{R.ca.1} := (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(b_{n.ca.1} + \frac{h_{g.ca.1}}{\sqrt{3}} \right)$$

Baseado em duas cantoneiras

$$F_{z.ras.ca.m1}(F_x) := \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.ca.1}^2} \right) \cdot V_{R.ca.1}^2} \quad \text{Interação entre forças}$$

4.2 - Rasgamento tipo 2 - Formação do C

Área líquida para ruptura da região 2

$$b_{g.ca.2} := l_{ca.ba.ba} - l_{ca.ba.h.x.1}$$

Largura bruta

$$b_{n.ca.2} := l_{ca.ba.ba} - l_{ca.ba.h.x.1} - \frac{d_h}{2}$$

Largura líquida

$$h_{g.ca.2} := l_{h.h.z} \cdot (n_{b.pf1} - 1)$$

Altura bruta

$$h_{h.ca.2} := l_{h.h.z} \cdot (n_{b.pf1} - 1) - (n_{b.pf1} - 1) \cdot d_h$$

Altura líquida

$$N_{R.ca.2} := (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(2 \cdot \frac{b_{g.ca.2}}{\sqrt{3}} + h_{h.ca.2} \right)$$

Resistência a força normal

$$V_{R.ca.2} := (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(2b_{n.ca.2} + \frac{h_{g.ca.2}}{\sqrt{3}} \right)$$

Resistência a força cortante

Baseado em duas cantoneiras

$$F_{z.ras.ca.m2}(F_x) := \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.ca.2}^2} \right) \cdot V_{R.ca.2}^2}$$

Interação entre forças

4.3 - Rasgamento tipo 3 - Rasgamento completo

$$b_{g.ca.3} := 0 \text{ mm}$$

Largura bruta

$$b_{n.ca.3} := 0 \text{ mm}$$

Largura líquida

$$h_{g.ca.3} := l_{ca.z}$$

Altura bruta

$$h_{h.ca.3} := l_{ca.z} - (n_{b.pf1}) \cdot d_h$$

Altura líquida

$$N_{R.ca.3} := (2) \cdot t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot (h_{h.ca.3})$$

Resistência a força normal

$$V_{R.ca.3} := (2) \cdot t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(\frac{h_{g.ca.3}}{\sqrt{3}} \right)$$

Resistência a força cortante

Baseado em duas cantoneiras

$$F_{z.ras.ca.m3}(F_x) := \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.ca.3}^2} \right) \cdot V_{R.ca.3}^2}$$

Interação entre forças

Resistência mínima a ligação devido ao rasgamento na cantoneira na região 1.

$$F_{z.ras.ca}(F_x) := \begin{cases} F_{z.ras.ca.m1}(F_x) & \text{if } F_{z.ras.ca.m1}(F_x) < F_{z.ras.ca.m2}(F_x) \wedge F_{z.ras.ca.m1}(F_x) < F_{z.ras.ca.m3}(F_x) \\ F_{z.ras.ca.m2}(F_x) & \text{if } F_{z.ras.ca.m2}(F_x) < F_{z.ras.ca.m1}(F_x) \wedge F_{z.ras.ca.m2}(F_x) < F_{z.ras.ca.m3}(F_x) \\ F_{z.ras.ca.m3}(F_x) & \text{if } F_{z.ras.ca.m3}(F_x) < F_{z.ras.ca.m1}(F_x) \wedge F_{z.ras.ca.m3}(F_x) < F_{z.ras.ca.m2}(F_x) \end{cases}$$

Modo de falha 5 - Rasgamento entre furo e borda na cantoneira - Região 1

Limitado pelo parafuso mais extremo

Ângulo limitrofe para canto na cantoneira entre região 1 e 2

$$\alpha_1 := \operatorname{atan}\left[\frac{\frac{l_{ca.z} - (n_{b.pf1} - 1) \cdot l_{h.h.z}}{2}}{l_{ca.ba.ba} - l_{ca.ba.h.x.1}}\right]$$

$$\alpha_1 = 51.34 \cdot \text{deg}$$

Ângulo limitrofe para canto na cantoneira para região 2 e 3

$$\alpha_4 := \operatorname{atan}\left[\frac{l_{ca.ba.h.x.1}}{\frac{l_{ca.z} - (n_{b.pf1} - 1) \cdot l_{h.h.z}}{2}}\right] + 90\text{deg}$$

$$\alpha_4 = 137.726 \cdot \text{deg}$$

Região 0 - $\alpha=0\text{deg}$: Para força totalmente de tração

$$F_{x.pc.0} := 1.2 \cdot \left[(l_{ca.ba.ba} - l_{ca.ba.h.x.1}) - \frac{d_h}{2} \right] \cdot \frac{t_{ca} \cdot \sigma_{rup.ca}}{\gamma_{a2}}$$

$$F_{z.pc.0} := 0\text{kN}$$

Região 1 - $\theta > 0\text{deg}$ e $\theta \leq \alpha_1$:

$$F_{x.pc.1}(\theta) := 1.2 \cdot \left(\frac{l_{ca.ba.ba} - l_{ca.ba.h.x.1}}{\cos(\theta)} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{ca} \cdot \sigma_{rup.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\tan(\theta))^2 + 1}}$$

$$F_{z.pc.1}(\theta) := \tan(\theta) \cdot F_{x.pc.1}(\theta)$$

Região 2 - $\theta > \alpha_1$ e $\theta < 90\text{deg}$:

$$F_{x,pc.2}(\theta) := 1.2 \cdot \left[\frac{\frac{l_{ca,z} - (n_{b,pf1} - 1) \cdot l_{h,h,z}}{2}}{\sin(\theta)} - \frac{d_h}{2} \right] \cdot \frac{t_{ca} \cdot \sigma_{rup,ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\tan(\theta))^2 + 1}}$$

$$F_{z,pc.2}(\theta) := \tan(\theta) \cdot F_{x,pc.2}(\theta)$$

Região 3 - $\theta = 90\text{deg}$:

$$F_{x,pc.3} := 0 \text{ kN}$$

$$F_{z,pc.3} := 1.2 \cdot \left[\frac{l_{ca,z} - (n_{b,pf1} - 1) \cdot l_{h,h,z}}{2} - \frac{d_h}{2} \right] \cdot \frac{t_{ca} \cdot \sigma_{rup,ca}}{\gamma_{a2}}$$

Região 4 - $\theta > 90\text{deg}$ e $\theta < \alpha_2$:

$$F_{x,pc.4}(\theta) := -1.2 \cdot \left[\frac{\frac{l_{ca,z} - (n_{b,pf1} - 1) \cdot l_{h,h,z}}{2}}{\sin(\theta)} - \frac{d_h}{2} \right] \cdot \frac{t_{ca} \cdot \sigma_{rup,ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\tan(\theta))^2 + 1}}$$

$$F_{z,pc.4}(\theta) := \tan(\theta) \cdot F_{x,pc.4}(\theta)$$

Região 5 - $\theta > \alpha_2$ e $\theta < 180$:

$$F_{x,pc.5}(\theta) := -1.2 \cdot \left(\frac{l_{ca,ba,h,x,1}}{\cos(180\text{deg} - \theta)} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{ca} \cdot \sigma_{rup,ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\tan(\theta))^2 + 1}}$$

$$F_{z,pc.5}(\theta) := \tan(\theta) \cdot F_{x,pc.5}(\theta)$$

Região 6 - $\theta=180\text{deg}$:

$$F_{x,pc.6} := -1.2 \cdot \left(l_{ca.ba.h.x.1} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{ca} \cdot \sigma_{rup.ca}}{\gamma_{a2}}$$

$$F_{z,pc.6} := 0 \text{ kN}$$

Agrupando as equações:

$$F_{x,pc.ca}(\theta) := n_{s,pf1} \cdot n_{b,pf1} \cdot \begin{cases} F_{x,pc.0} & \text{if } \theta = 0 \\ F_{x,pc.1}(\theta) & \text{if } (\theta > 0 \wedge \theta \leq \alpha_1) \\ F_{x,pc.2}(\theta) & \text{if } \left(\theta > \alpha_1 \wedge \theta < \frac{\pi}{2} \right) \\ F_{x,pc.3} & \text{if } \left(\theta = \frac{\pi}{2} \right) \\ F_{x,pc.4}(\theta) & \text{if } \theta > \frac{\pi}{2} \wedge \theta < \alpha_4 \\ F_{x,pc.5}(\theta) & \text{if } \theta > \alpha_4 \wedge \theta < \pi \\ F_{x,pc.6} & \text{if } \theta = \pi \end{cases}$$

$$F_{z,pc.ca}(\theta) := n_{s,pf1} \cdot n_{b,pf1} \cdot \begin{cases} 0 & \text{if } \theta = 0 \\ F_{z,pc.1}(\theta) & \text{if } (\theta > 0 \wedge \theta \leq \alpha_1) \\ F_{z,pc.2}(\theta) & \text{if } \left(\theta > \alpha_1 \wedge \theta < \frac{\pi}{2} \right) \\ F_{z,pc.3} & \text{if } \left(\theta = \frac{\pi}{2} \right) \\ |F_{z,pc.4}(\theta)| & \text{if } \theta > \frac{\pi}{2} \wedge \theta < \alpha_4 \\ F_{z,pc.5}(\theta) & \text{if } \theta > \alpha_4 \wedge \theta < \pi \\ 0 & \text{if } \theta = \pi \end{cases}$$

Método simplificado do cálculo da resistência da pressão de contato na cantoneira

$$F_{pc.ca} := n_{b.pf1} \cdot n_{s.pf1} \cdot \begin{pmatrix} F_{x.pc.6} & 0 \\ F_{x.pc.5}(\alpha_4) & F_{z.pc.5}(\alpha_4) \\ 0 & F_{z.pc.3} \\ F_{x.pc.2}(\alpha_1) & F_{z.pc.2}(\alpha_1) \\ F_{x.pc.0} & 0 \end{pmatrix}$$

Modo de falha 5.1 - Pressão de contato na Região 1

$$F_{z.pc.ca.r1}(F_x) := \sqrt{\left(n_{s.pf1} \cdot n_{b.pf1} \cdot \frac{d_b \cdot \sigma_{rup.ca} \cdot t_{ca}}{\gamma_{a2}} \right)^2 - F_x^2}$$

Modo de falha 6 - Pressão de contato na viga

Limitado pelo parafuso mais extremo

Ângulo limitrofe para canto na cantoneira para região 2 e 3

$$l_{ba.h.z.pf1} := \frac{a_{pf1} - l_{h.h.z} \cdot (n_{b.pf1} - 1) - 2 \cdot l_{re.pf1.z}}{2} = 60 \cdot \text{mm}$$

$$l_{ba.h.x.pf1} := l_{ca.ba.h.x.1} - l_{pf1.ch2} = 34 \cdot \text{mm}$$

$$\alpha_{4.pf1} := 180\text{deg} - \text{atan}\left(\frac{l_{ba.h.z.pf1}}{l_{ba.h.x.pf1}}\right) \quad \alpha_{4.pf1} = 119.539\text{-deg}$$

Utilizando os resultados anteriores, serão calculados somente os pontos 30 deg , 45 deg, 90 deg, α_4 , 150 deg e 180 deg

Para 30deg

$$F_{pc.30deg} := 1.2 \cdot \left(\frac{l_{ba.h.z.pf1}}{\cos(90deg - 30deg)} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{al.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1}}{\gamma_{a2}}$$

$$F_{x.pc.30deg} := \cos(30deg) \cdot F_{pc.30deg}$$

$$F_{z.pc.30deg} := \sin(30deg) \cdot F_{pc.30deg}$$

Para 45deg

$$F_{pc.45deg} := 1.2 \cdot \left(\frac{l_{ba.h.z.pf1}}{\cos(90deg - 45deg)} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{al.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1}}{\gamma_{a2}}$$

$$F_{x.pc.45deg} := \cos(45deg) \cdot F_{pc.45deg}$$

$$F_{z.pc.45deg} := \sin(45deg) \cdot F_{pc.45deg}$$

Para 90deg

$$F_{pc.90deg} := 1.2 \cdot \left(l_{ba.h.z.pf1} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{al.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1}}{\gamma_{a2}}$$

$$F_{x.pc.90deg} := 0$$

$$F_{z.pc.90deg} := F_{pc.90deg}$$

Para α_4

$$F_{pc.\alpha_4.pf1} := 1.2 \cdot \left(\frac{l_{ba.h.z.pf1}}{\cos(\alpha_{4.pf1} - 90deg)} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{al.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1}}{\gamma_{a2}}$$

$$F_{x.pc.\alpha_4} := \cos(\alpha_{4.pf1}) \cdot F_{pc.\alpha_4.pf1}$$

$$F_{z.pc.\alpha_4} := \sin(\alpha_{4.pf1}) \cdot F_{pc.\alpha_4.pf1}$$

Para 150deg

$$F_{pc.150deg} := 1.2 \cdot \left(\frac{l_{ba.h.x.pf1}}{\cos(180deg - 150deg)} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{al.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1}}{\gamma_{a2}}$$

$$F_{x.pc.150deg} := \cos(150deg) \cdot F_{pc.150deg}$$

$$F_{z.pc.150deg} := \sin(150deg) \cdot F_{pc.150deg}$$

Para 180deg

$$F_{pc.180deg} := 1.2 \cdot \left(l_{ba.h.x.pf1} - \frac{d_h}{2} \right) \cdot \frac{t_{al.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1}}{\gamma_{a2}}$$

$$F_{x.pc.180deg} := -F_{pc.180deg}$$

$$F_{z.pc.180deg} := 0$$

$$F_{pc.pf1} := n_{b.pf1} \cdot \begin{pmatrix} F_{x.pc.30deg} & F_{z.pc.30deg} \\ F_{x.pc.45deg} & F_{z.pc.45deg} \\ F_{x.pc.90deg} & F_{z.pc.90deg} \\ F_{x.pc.\alpha 4} & F_{z.pc.\alpha 4} \\ F_{x.pc.150deg} & F_{z.pc.150deg} \\ F_{x.pc.180deg} & F_{z.pc.180deg} \end{pmatrix}$$

Modo de falha 6.2 - Pressão de contato na viga - esmagamento do furo

$$F_{z.pc.h.pf1}(F_x) := \sqrt{\left(n_{b.pf1} \cdot \frac{2.4 \cdot d_b \cdot \sigma_{rup.pf1} \cdot t_{al.pf1}}{\gamma_{a2}} \right)^2 - F_x^2}$$

Modo de falha 7 - Pressão de contato na chapa 2

$$F_{Z.pc.b.pf2} := \frac{2.4 \cdot d_b \cdot \sigma_{rup.ch2} \cdot t_{ch.2}}{\gamma_{a2}}$$

$$F_{Z.pc.h.h.pf2} := 1.2 \cdot (l_{h.h.z} - d_h) \cdot \frac{t_{ch.2}}{\gamma_{a2}} \cdot \sigma_{rup.ch2}$$

$$F_{Z.pc.h.ba.pf2} := 1.2 \cdot \left[\frac{l_{ca.z} - (n_{b.pf1} - 1) \cdot l_{h.h.z}}{2} - \frac{d_h}{2} \right] \cdot \frac{t_{ch.2}}{\gamma_{a2}} \cdot \sigma_{rup.ch2}$$

$$F_{Z.pc.pf2} := (2) \cdot n_{b.pf2} \min(F_{Z.pc.b.pf2}, F_{Z.pc.h.h.pf2}, F_{Z.pc.h.ba.pf2})$$

Modo de falha 8 - Pressão de contato na cantoneira em 2

$$F_{Z.pc.ca.b.2} := \frac{2.4 \cdot d_b \cdot \sigma_{rup.ca} \cdot t_{ca}}{\gamma_{a2}}$$

$$F_{Z.pc.ca.h.h.2} := 1.2 \cdot (l_{h.h.z} - d_h) \cdot \frac{t_{ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \sigma_{rup.ca}$$

$$F_{Z.pc.ca.h.ba.2} := 1.2 \cdot \left[\frac{l_{ca.z} - (n_{b.pf1} - 1) \cdot l_{h.h.z}}{2} - \frac{d_h}{2} \right] \cdot \frac{t_{ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \sigma_{rup.ca}$$

$$F_{Z.pc.ca.2} := (2) \cdot n_{b.pf1} \min(F_{Z.pc.ca.b.2}, F_{Z.pc.ca.h.h.2}, F_{Z.pc.ca.h.ba.2})$$

$$F_{Z.pc.ca.2} = 602.427 \cdot \text{kN}$$

Modo de falha 7 e 8 associados

$$F_{pc.pf2.ca} := \begin{pmatrix} -1500\text{kN} & \min(F_{Z.pc.ca.2}, F_{Z.pc.pf2}) \\ 1500\text{kN} & \min(F_{Z.pc.ca.2}, F_{Z.pc.pf2}) \end{pmatrix}$$

Modo de falha 9 - Rasgamento na região na cantoneira próximo a chapa 2

9.1 - Rasgamento do tipo 1 - em L

$$b_{g.ca.m1.r2} := l_{ca.ba.ba} - l_{ca.ba.h.x.1} \quad \text{Largura bruta}$$

$$b_{n.ca.m1.r2} := l_{ca.ba.ba} - l_{ca.ba.h.x.1} - \frac{d_h}{2} \quad \text{Largura líquida}$$

$$h_{g.ca.m1.r2} := l_{h.h.z} \cdot (n_{b.pf1} - 1) + \frac{l_{ca.z} - l_{h.h.z} \cdot (n_{b.pf1} - 1)}{2} \quad \text{Altura bruta}$$

$$h_{n.ca.m1.r2} := l_{h.h.z} \cdot (n_{b.pf1} - 1) + \frac{l_{ca.z} - l_{h.h.z} \cdot (n_{b.pf1} - 1)}{2} - (n_{b.pf1} - 0.5) \cdot d_h \quad \text{Altura líquida}$$

Resistência a força normal

Ambas as áreas estão sob cisalhamento devido a força normal

$$N_{R.ca.m1.r2} := (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(\frac{b_{g.ca.m1.r2}}{\sqrt{3}} + \frac{h_{n.ca.m1.r2}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$V_{R.ca.m1.r2} := (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(b_{n.ca.m1.r2} + \frac{h_{g.ca.m1.r2}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$F_{z.ras.m1.r2}(F_x) := \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.ca.m1.r2}^2} \right) \cdot V_{R.ca.m1.r2}^2}$$

Modo de falha 10 - Rasgamento na alma do perfil 1

9.2 - Rasgamento tipo 2 - em C

$$b_{g.ca.m2.r2} := l_{ca.ba.ba} - l_{ca.ba.h.x.1}$$

Largura bruta

$$b_{n.ca.m2.r2} := l_{ca.ba.ba} - l_{ca.ba.h.x.1} - \frac{d_h}{2}$$

Largura líquida

$$h_{g.ca.m2.r2} := l_{h.h.z} \cdot (n_{b.pf1} - 1)$$

Altura bruta

$$h_{n.ca.m2.r2} := l_{h.h.z} \cdot (n_{b.pf1} - 1) - (n_{b.pf1} - 1) \cdot d_h$$

Altura líquida

Resistência a força normal

Ambas as áreas estão sob cisalhamento devido a força normal

$$N_{R.ca.m2.r2} := (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(\frac{b_{g.ca.m2.r2}}{\sqrt{3}} + \frac{h_{n.ca.m2.r2}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$V_{R.ca.m2.r2} := (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(2b_{n.ca.m2.r2} + \frac{h_{g.ca.m2.r2}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$F_{z.ras.m2.r2}(F_x) := \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.ca.m2.r2}^2} \right) \cdot V_{R.ca.m2.r2}^2}$$

9.3 - Rasgamento tipo 3 - total

$$b_{g.ca.m3.r2} := 0$$

Largura bruta

$$b_{n.ca.m3.r2} := 0$$

Largura líquida

$$h_{g.ca.m3.r2} := l_{ca.z}$$

Altura bruta

$$h_{n.ca.m3.r2} := l_{ca.z} - (n_{b.pf1}) \cdot d_h$$

Altura líquida

Resistência a força normal

Ambas as áreas estão sob cisalhamento devido a força normal

$$N_{R.ca.m3.r2} := (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(\frac{h_{n.ca.m3.r2}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$V_{R.ca.m3.r2} := (2)t_{ca} \cdot \frac{f_{m.ca}}{\gamma_{a2}} \cdot \left(\frac{h_{g.ca.m3.r2}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$F_{z.ras.m3.r2}(F_x) := \sqrt{\left(1 - \frac{F_x^2}{N_{R.ca.m3.r2}^2} \right) \cdot V_{R.ca.m3.r2}^2}$$

Resistência mínima a ligação devido ao rasgamento na cantoneira na região 2.

$$F_{z.ras.r2}(F_x) := \begin{cases} F_{z.ras.m1.r2}(F_x) & \text{if } (F_{z.ras.m1.r2}(F_x) \leq F_{z.ras.m2.r2}(F_x)) \wedge (F_{z.ras.m1.r2}(F_x) \leq F_{z.ras.m3.r2}(F_x)) \\ F_{z.ras.m2.r2}(F_x) & \text{if } (F_{z.ras.m2.r2}(F_x) < F_{z.ras.m1.r2}(F_x)) \wedge (F_{z.ras.m2.r2}(F_x) < F_{z.ras.m3.r2}(F_x)) \\ F_{z.ras.m3.r2}(F_x) & \text{if } (F_{z.ras.m3.r2}(F_x) < F_{z.ras.m1.r2}(F_x)) \wedge (F_{z.ras.m3.r2}(F_x) < F_{z.ras.m2.r2}(F_x)) \end{cases}$$

Modo de falha 11 - Falhas relativos a cantoneira próximo ao perfil 1

Modo 1: Escoamento da seção bruta em tração

$$F_{R.x.ca.esc} := (2) \cdot \frac{l_{ca.z} \cdot t_{ca} \cdot \sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}}$$

Modo 2: Ruptura da seção líquida em tração

$$A_{ca.rup} := \min \left[0.85 \cdot l_{ca.z} \cdot t_{ca} \cdot (l_{ca.z} - n_{b.pf1} \cdot d_h) \cdot t_{ca} \right]$$

$$F_{R.x.ca.rup} := (2) \cdot \frac{A_{ca.rup} \cdot \sigma_{rup.ca}}{\gamma_{a2}}$$

Modo 2: Compressão do elemento de ligação

$$A_{ca} := t_{ca} \cdot l_{ca.z}$$

$$I_{z.ca} := \frac{t_{ca}^3 \cdot l_{ca.z}}{12}$$

$$r_z := \sqrt{\frac{I_{z.ca}}{A_{ca}}}$$

$$\lambda_{z.ca} := \frac{1 \cdot l_{ca.ba.h.x.1}}{r_z}$$

$$N_{e.z.ca} := \frac{\pi \cdot E \cdot I_{z.ca}}{(1 \cdot l_{ca.ba.h.x.1})^2}$$

$$\lambda_{0.ca} := \sqrt{\frac{A_{ca} \cdot \sigma_{esc.ca}}{N_{e.z.ca}}}$$

$$bt_{ca} := \frac{l_{ca,z}}{t_{ca}}$$

$$bt_{lim.ca} := 0.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{esc.ca}}}$$

$$bt_{sup.ca} := 0.91 \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{esc.ca}}}$$

$$Q_{s.ca} := \begin{cases} 1 & \text{if } bt_{ca} < bt_{lim.ca} \\ \frac{0.52 \cdot E}{\sigma_{esc.ca} \cdot \left(\frac{l_{ca,z}}{t_{ca}}\right)^2} & \text{if } bt_{ca} > bt_{sup.ca} \\ \left[1.340 - 0.746 \cdot \left(\frac{l_{ca,z}}{t_{ca}}\right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{esc.ca}}{E}} \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\chi_{ca} := \begin{cases} 0.658 \cdot \lambda_{0.ca}^2 & \text{if } \lambda_{0.ca} \leq 1.5 \\ \frac{0.877}{\lambda_{0.ca}} & \text{if } \lambda_{0.ca} > 1.5 \end{cases}$$

$$F_{R.x.C.ca} := \begin{cases} (2) \cdot \frac{\chi_{ca} \cdot Q_{s.ca} \cdot A_{ca} \cdot \sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}} & \text{if } \lambda_{z.ca} > 25 \\ (2) \cdot \frac{A_{ca} \cdot \sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}} & \text{if } \lambda_{z.ca} \leq 25 \end{cases}$$

Modo 4: Escoamento da seção bruta em cisalhamento

$$F_{R.z.ca.esc} := (2) \cdot 0.6 \cdot \frac{l_{ca,z} \cdot t_{ca} \cdot \sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}}$$

Modo 5: Ruptura da seção líquida em cisalhamento

$$F_{R.z.ca.rup} := (2) \cdot 0.6 \cdot \frac{(l_{ca.z} - n_{b.pf1} \cdot d_h) \cdot t_{ca} \cdot \sigma_{rup.ca}}{\gamma_{a2}}$$

$$F_{ca.r.1} := \begin{pmatrix} \min(F_{R.x.ca.esc}, F_{R.x.ca.rup}) & 0 \\ 0 & \min(F_{R.z.ca.esc}, F_{R.z.ca.rup}) \\ -F_{R.x.C.ca} & 0 \end{pmatrix}$$

Modo 6: Tensão de von Mises na região 1

$$F_{z.ca.esc}(F_x) := \frac{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}}\right)^2 - \left[\frac{F_x}{(2)A_{ca}}\right]^2}}{\sqrt{3}} \cdot (2)A_{ca}$$

Modo de falha 12 - Tensão de von Mises na região 2

$$F_{z,esc.ca.r2.b}(F_x) := \begin{cases} \sqrt{2 \cdot \left(\frac{\sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}} \right)^2 \cdot \frac{(p_{ca} \cdot t_{ca})^2}{6}} & \text{if } F_x < 0 \\ \sqrt{2 \cdot \left(\frac{\sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}} \right)^2 - 2 \cdot \left[\frac{(F_x \cdot l_{pe.h.ca.1}) \cdot \frac{t_{ca}}{2}}{\left(\frac{p_{ca} \cdot t_{ca}^3}{12} \right)} \right]^2 - 6 \cdot \left[\frac{F_x}{(p_{ca} \cdot t_{ca})} \right]^2 \cdot \frac{(p_{ca} \cdot t_{ca})^2}{6}} & \text{if } (F_x \geq 0 \wedge F_x < F_{lim}) \\ \sqrt{2 \cdot \left(\frac{\sigma_{esc.ca}}{\gamma_{a1}} \right)^2 - 2 \cdot \left[\frac{(F_x \cdot c_{cor} \cdot l_{pe.h.ca.1}) \cdot \frac{t_{ca}}{2}}{\left(\frac{p_{ca} \cdot t_{ca}^3}{12} \right)} \right]^2 - 6 \cdot \left[\frac{F_x}{(p_{ca} \cdot t_{ca})} \right]^2 \cdot \frac{(p_{ca} \cdot t_{ca})^2}{6}} & \text{if } (F_x \geq F_{lim}) \end{cases}$$

$$F_{z,esc.ca.r2}(F_x) := n_{b,pf2} \cdot F_{z,esc.ca.r2.b} \left(\frac{F_x}{n_{b,pf2}} \right)$$

Modo de falha 13 - Falhas relativos a alma do perfil 1

Modo 1: Tensão atuante na seção final do recorte / Transcrito

Escoamento da seção do recorte considerando esforço cortante, axial e flexão.

$$l_{pf1.re} := l_{pf1.ch2} + l_{re.pf1.x} \quad d$$

$$a_{re} := a_{pf1} - l_{re.pf1.z}^2 \quad 2^{\circ}c$$

$$l_{re} := \frac{t_{al.pf1} \cdot a_{re}^3}{12} \quad I$$

$$A_{re} := a_{re} \cdot t_{al.pf1} \quad \text{Área}$$

$$a_1 := \frac{(l_{pf1.re})^2 \cdot \left(\frac{a_{re}}{2}\right)^2}{l_{re}^2} + \frac{3}{A_{re}^2}$$

$$b_1(F_x) := 2 \cdot \frac{F_x}{A_{re}} \cdot \frac{l_{pf1.re} \cdot \frac{a_{re}}{2}}{l_{re}} \quad b_2(F_x) := - \left(2 \cdot \frac{F_x}{A_{re}} \cdot \frac{l_{pf1.re} \cdot \frac{a_{re}}{2}}{l_{re}} \right)$$

$$c_1(F_x) := \frac{F_x^2}{A_{re}^2} - \frac{\sigma_{esc.pf1}^2}{\gamma_{a1}^2}$$

$$F_{z.esc.re.pf1}(F_x) := \begin{cases} \frac{-b_2(F_x) + \sqrt{b_2(F_x)^2 - 4 \cdot a_1 \cdot c_1(F_x)}}{2 \cdot a_1} & \text{if } F_x < 0 \\ \frac{-b_1(F_x) + \sqrt{b_1(F_x)^2 - 4 \cdot a_1 \cdot c_1(F_x)}}{2 \cdot a_1} & \text{if } F_x \geq 0 \end{cases}$$

Modo 2: Tração pura para a barra / Transcrito

$$A_{g.t.pf1} := (a_{pf1} - 2 \cdot l_{re.pf1.z}) \cdot t_{al.pf1}$$

$$A_{n.t.pf1} := (a_{pf1} - 2 \cdot l_{re.pf1.z}) \cdot t_{al.pf1} - n_{b.pf1} \cdot d_h \cdot t_{al.pf1}$$

$$F_{Rd.t.pf1} := \min \left(\frac{A_{g.t.pf1} \cdot \sigma_{esc.pf1}}{\gamma_{a1}}, \frac{A_{n.t.pf1} \cdot \sigma_{rup.pf1}}{\gamma_{a2}} \right)$$

Modo 3: Compressão pura para a barra

$$a_{al.re} := a_{pf1} - 2 \cdot l_{re.pf1.z}$$

$$I_{y.re.pf1} := \frac{t_{al.pf1}^3 \cdot a_{al.re}}{12}$$

$$I_{z.re.pf1} := \frac{t_{al.pf1} \cdot a_{al.re}^3}{12}$$

$$K_y := 1$$

$$K_z := 1$$

$$L_y := l_{pf1.ch2} + l_{re.pf1.x}$$

$$L_z := l_{pf1.ch2} + l_{re.pf1.x}$$

$$N_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{y.re.pf1}}{(K_y \cdot L_y)^2}$$

$$N_{ez} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{z.re.pf1}}{(K_z \cdot L_z)^2}$$

Seção duplamente simétrica

$$J_{re.pf1} := \frac{1}{3} \cdot a_{al.re} \cdot t_{al.pf1}^3$$

$$C_{w.re} := \frac{t_{al.pf1}^3 \cdot a_{al.re}^3}{36}$$

$$r_{y.re} := \sqrt{\frac{I_{y.re.pf1}}{A_{g.t.pf1}}}$$

$$r_{z.re} := \sqrt{\frac{I_{z.re.pf1}}{A_{g.t.pf1}}}$$

$$y_{0.re} := 0\text{mm}$$

$$z_{0.re} := 0\text{mm}$$

$$r_{0.re.pf1} := \sqrt{r_{y.re}^2 + r_{z.re}^2 + y_{0.re}^2 + z_{0.re}^2}$$

$$K_x := 1$$

$$L_x := l_{pf1.ch2} + l_{re.pf1.x}$$

$$N_{ex} := \frac{1}{r_{0.re.pf1}^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_{w.re}}{(K_x \cdot L_x)^2} + G \cdot J_{re.pf1} \right]$$

$$N_{e.pf1} := \min(N_{ey}, N_{ez}, N_{ex})$$

$$\lambda_0 := \sqrt{\frac{1A_{g.t.pf1} \cdot \sigma_{esc.pf1}}{N_{e.pf1}}}$$

$$\chi := \begin{cases} 0.658 \lambda_0^2 & \text{if } \lambda_0 \leq 1.5 \\ \frac{0.877}{\lambda_0^2} & \text{if } \lambda_0 > 1.5 \end{cases}$$

$$F_{Rd.c.pf1} := \frac{A_{g.t.pf1} \cdot \chi \cdot \sigma_{esc.pf1}}{\gamma_{a1}}$$

Modo 4: Flexão pura

Será verificada a flambagem lateral com torção da alma no recorte.

$$L_b := l_{re.pf1.x} + l_{pf1.ch2}$$

$$\lambda := \frac{L_b}{r_{z.re}}$$

$$\lambda_p := 1.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{esc.pf1}}}$$

$$W_{re.pf1} := \frac{l_{z.re.pf1}}{\frac{(a_{pf1} - 2 \cdot l_{re.pf1.z})}{2}}$$

$$M_{pl} := 1.5 \cdot \frac{l_{z.re.pf1}}{\frac{(a_{pf1} - 2 \cdot l_{re.pf1.z})}{2}} \cdot \sigma_{esc.pf1}$$

$$M_r := \min(M_{pl}, 0.7 \cdot \sigma_{esc.pf1} \cdot W_{re.pf1})$$

$$\lambda_r := 2 \cdot \frac{E}{M_r} \cdot \sqrt{J_{re.pf1} \cdot A_{re}}$$

Assumindo a condição de viga engastada para a posição :

$$C_b := 1.67$$

$$M_{cr} := \min\left(M_{pl}, \frac{2 \cdot C_b \cdot E}{\lambda} \cdot \sqrt{J_{re.pf1} \cdot A_{re}}\right)$$

$$M_{Rk} := \begin{cases} M_{pl} & \text{if } \lambda < \lambda_p \\ M_{cr} & \text{if } \lambda > \lambda_r \\ \left[C_b \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{Rd.re} := \frac{M_{Rk}}{\gamma_{a1}}$$

Modo 5: Efeito combinado

$$F_{z.fl.comb}(F_x) := \begin{cases} \left[\left(1 - \frac{-F_x}{F_{Rd.c.pf1}} \right) \cdot \frac{M_{Rd.re}}{L_b} \cdot \frac{9}{8} \right] & \text{if } \frac{F_x}{F_{Rd.c.pf1}} \leq -0.2 \\ \left[\left(1 - \frac{-F_x}{F_{Rd.c.pf1} \cdot 2} \right) \cdot \frac{M_{Rd.re}}{L_b} \right] & \text{if } \frac{F_x}{F_{Rd.c.pf1}} \leq 0 \wedge \frac{F_x}{F_{Rd.c.pf1}} > -0.2 \\ \left[\left(1 - \frac{F_x}{F_{Rd.t.pf1} \cdot 2} \right) \cdot \frac{M_{Rd.re}}{L_b} \right] & \text{if } \frac{F_x}{F_{Rd.t.pf1}} > 0 \wedge \frac{F_x}{F_{Rd.t.pf1}} < 0.2 \\ \left[\left(1 - \frac{F_x}{F_{Rd.t.pf1}} \right) \cdot \frac{M_{Rd.re}}{L_b} \cdot \frac{9}{8} \right] & \text{if } \frac{F_x}{F_{Rd.t.pf1}} \geq 0.2 \end{cases}$$