

3

Análise e Dimensionamento de Ligações Semi-rígidas

O cálculo de ligações semi-rígidas em aço e mistas, baseado no Eurocode 3 e 4 [1] [2] [3], segundo o método das componentes, depende de inúmeras e cansativas rotinas de cálculo. A melhor forma para agilizar todos estes procedimentos é utilizar um software que execute toda esta gama de procedimentos necessários para a avaliação das ligações.

No intuito de agilizar, padronizar e principalmente reduzir a margem de erro associado ao cálculo das ligações semi-rígidas, foi desenvolvido no presente trabalho o software SRJ Tool, “*Semi-Rigid Joint Tool*”, que é uma ferramenta para modelagem e análise de ligações semi-rígidas em aço e mistas.

O software SRJ Tool além de ser uma ferramenta para o cálculo de ligações, também pode ser usado em sala de aula, devido a sua fácil utilização e clareza, com que todos os procedimentos são executados tanto na interface gráfica quanto nos relatórios de saída.

3.1

Introdução a Análise do Comportamento Semi-rígido

O software SRJ Tool determina a rigidez rotacional e a resistência à flexão entre outros resultados, de ligações viga-pilar em aço e mistas, a partir de dados geométricos e mecânicos nele introduzidos.

O tipo de ligação analisado por este programa se limita a ligações parafusadas com placa de extremidade, tendo a liberdade de poder variá-la, desde sua configuração estendida, mais conhecida como “*extended end plate*”, Figura 3.1, ligações ajustadas, “*flush end plate*”, Figura 3.2, e até mistas com “*composite extended end plate*”, Figura 3.3, ligações ajustadas, “*composite flush end plate*”, Figura 3.4, opção da parte mista, onde pode ser incluída a seção da laje de concreto juntamente com a armadura longitudinal e os conectores de

cisalhamento. Vale ressaltar que estes tipos de ligações são as mais utilizadas em aplicações práticas.

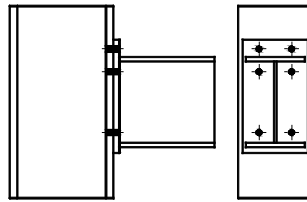


Figura 3.1 – Ligação com placa de extremidade estendida (“*extended end plate em aço*”)

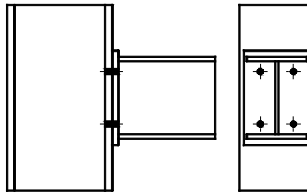


Figura 3.2 - Ligação com placa de extremidade não estendida (“*flush end plate em aço*”)

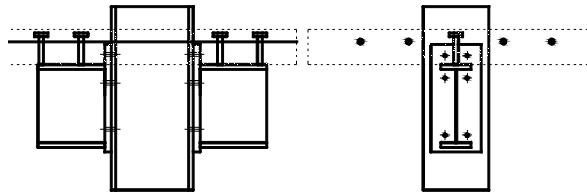


Figura 3.3 – Ligação mista com placa de extremidade estendida (“*composite extended end plate*”)

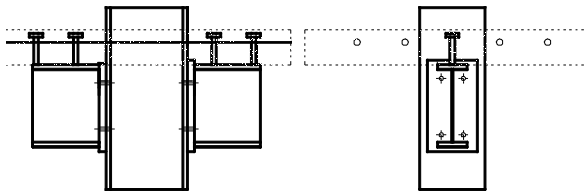


Figura 3.4 - Ligação com placa de extremidade não estendida (“*composite flush end plate*”)

O SRJ Tool pode ser aplicado para ligações com vigas em ambos lados do pilar ou em um lado só, em vigas ligadas à mesa do pilar, ou seja, na maior inércia do pilar. O cálculo das ligações mistas está limitado a ligações em ambos lados do pilar, sem a utilização de pilares mistos, avaliando a contribuição da continuidade da laje e seus componentes.

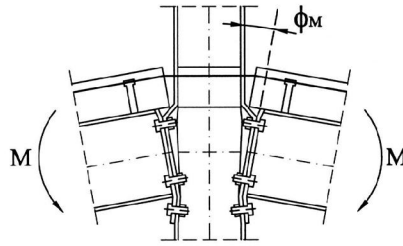


Figura 3.5 - Ligação com placa de extremidade com solicitação bilateral

3.2

Comportamento Estrutural de Ligações

3.2.1

Ligações em Aço

A análise pelo método das componentes propõe que seja usado um elemento em forma de “T”, conhecido como “T-stub”, onde dois “T”, ou “*T-stubs*”, são ligados às mesas através da linha média entre uma ou mais linhas de parafusos.

As componentes de maior importância das ligações aparafusadas são analisadas através do modelo do “T-stub”. Pode se observar na Figura 3.6, a identificação e a orientação do “T-stub”, que é usado para o cálculo da resistência e rigidez, devido à flexão na mesa do pilar e a flexão na parte estendida da placa de extremidade.

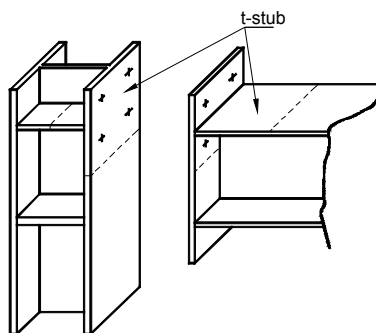


Figura 3.6 - Orientação do “T-stub”

Na análise da ligação, considera-se inicialmente que o “T-stub” aparafusado onde a mesa é ligada na linha média de dois parafusos. É conveniente saber que a ruptura desta simples ligação está associada com um dos três mecanismos de colapso mostrados na Figura 3.7.

Segundo é mostrado na Figura 3.7, consideram-se possíveis formações de rótulas plásticas na intersecção mesa/alma e na linha de parafusos da mesa do “T-stub”.

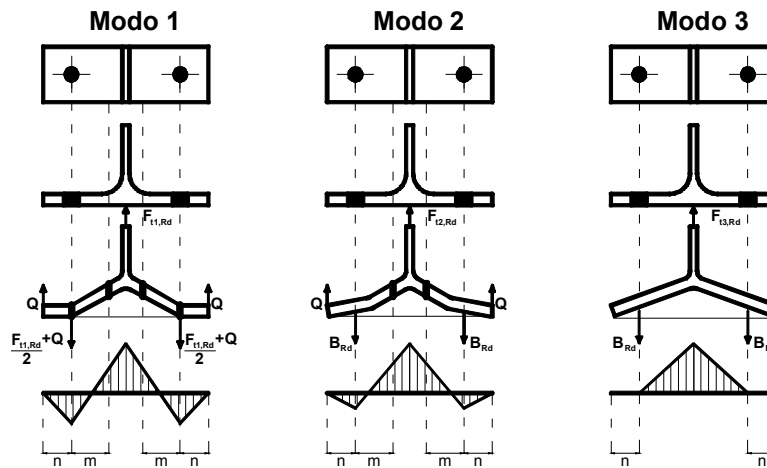


Figura 3.7 - Mecanismos de colapso

O primeiro mecanismo de colapso se caracteriza pela formação de quatro rótulas plásticas. Duas rótulas se localizam no eixo dos parafusos, devido ao momento fletor causado pelo efeito alavanca. As rótulas restantes são localizadas na seção que corresponde ao encontro da mesa com a alma. Neste modo de colapso, a espessura da mesa do “T-stub”, é o fator determinante. Admite-se que a força devido ao efeito de alavanca, Q , atinge seu valor máximo, com a formação da rótula plástica na linha de parafusos.

O segundo mecanismo é caracterizado pela formação de duas rótulas plásticas nas seções que correspondem ao encontro da alma com a mesa do “T-stub” e a ruptura dos parafusos. A força devida ao efeito de alavanca, Q , produz um incremento na ação do parafuso, $F_{t,Rd}$, que leva o parafuso à ruptura antes do escoamento da mesa do “T-stub” no eixo dos parafusos.

Finalmente, o terceiro mecanismo de colapso corresponde à ruptura somente no parafuso. O fator determinante, é a grande rigidez da mesa do “T-stub” em relação à capacidade de resistência à tração dos parafusos. Portanto não existe a formação de rótula plástica no elemento “T-stub”.

Na formação da rótula plástica na mesa do “T-stub” existem duas formas possíveis de mecanismos, ou, charneiras plásticas, como mostrado na Figura 3.8, as possíveis configurações que se formam em torno do parafuso.

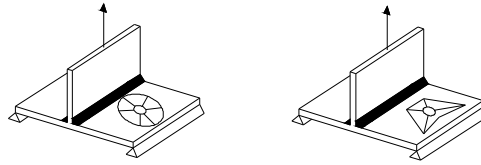


Figura 3.8 - Formação das charneiras plásticas

Estas formas são associadas à largura efetiva, que é o parâmetro mais significativo na determinação da resistência de cada componente.

Por outro lado, as formas de charneiras circulares representam uma simplificação da largura efetiva devido ao efeito de um carregamento concentrado.

A forma de charneira não circular é a representação de carregamentos com maior complexidade.

As variações para estes dois tipos de representações de forma, envolvem a ruptura pela borda lateral, pela borda superior, inferior e entre parafusos.

E como já foram discutidas anteriormente, as linhas de parafusos além de serem analisadas individualmente, são analisadas como um grupo, em diferentes combinações possíveis. Desta maneira podem-se estudar cada uma das formas entre as linhas de parafusos combinadas, como mostra a Figura 3.9 sendo separadas pela sua distância vertical p , ou horizontal p_2 .

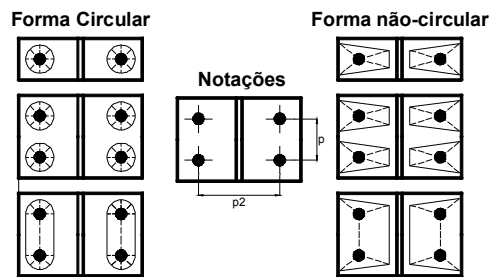


Figura 3.9 – Algumas combinações das charneiras plásticas e notações geométricas

Entretanto, em cada uma das componentes básicas da ligação existe uma forma de consideração, devido ao tipo de comportamento, ou diferente posicionamento para cada um dos mecanismos, componentes estas discutidas a seguir.

3.2.2

Ligações Mistas

De um modo geral, a contribuição da porção mista da ligação está concentrada na armadura longitudinal, a qual fica ancorada através do concreto, que também possui uma ligação com a estrutura metálica através dos conectores de cisalhamento, de forma a impedir o deslizamento relativo entre os dois elementos, como pode ser observado na Figura 3.10. Este sistema é composto por várias componentes que atuam individualmente e em conjunto para resistir aos esforços solicitados, mostrando o princípio da transmissão de esforços da ligação mista.

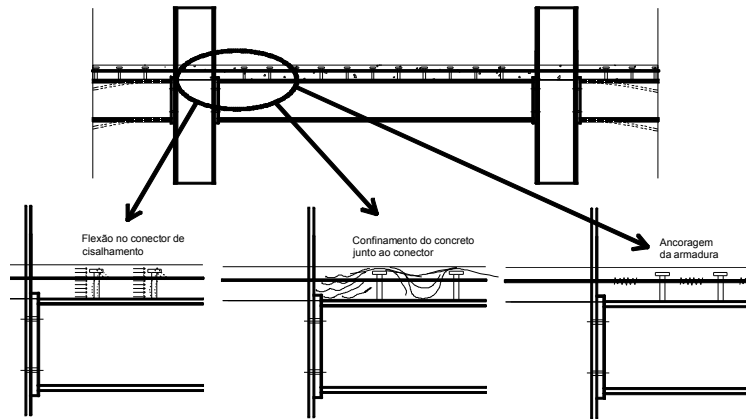


Figura 3.10 - Algumas combinações das charneiras plásticas e notações geométricas

Este princípio de transmissão de esforços pode ser descrito em 4 fases:

Fase 1:

Deslizamento entre viga de aço e laje de concreto

Comportamentos:

Resistência química entre laje de concreto e viga metálica;

Cisalhamento no conector;

Flexão no conector;

Concreto solicitado a tração sem fissuras;

Armadura não solicitada.

Fase 2:

Interação entre conector e concreto

Comportamentos:

Concreto sob tração, início das fissuras;

Conector solicitado a grandes esforços de cisalhamento;

Fase 3:

Interação entre concreto e armadura

Comportamentos:

Concreto fissurado sob tração, fissuras estabilizadas.

Conector solicitado a grandes esforços de cisalhamento e tração, impedindo que a laje suba (slip).

Armadura sob total aderência no concreto sob tração.

Interação armadura longitudinal e laje de concreto.

Fase 4:

Armadura sob tração individualmente

Comportamentos:

Concreto totalmente fissurado sob tração, após a formação das últimas fissuras

Conector solicitado a grandes esforços de cisalhamento e tração, impedindo que a laje suba.

Armadura longitudinal perde rigidez devido à fissuração do concreto pela perda da aderência ao longo do seu comprimento, influenciando também na sua resistência inicial a tração.

O sistema nas ligações semi-rígidas se subdivide em diversas componentes, estas podem ser exclusivamente relacionadas com o aço ou o concreto, mas também podem interagir mutuamente. A seguir, cada uma destas componentes é descrita detalhadamente.

3.3

Descrição das Componentes

O dimensionamento de uma ligação semi-rígida em aço e mistas, apresentada no Eurocode [1] [2] [3], constitui-se na determinação da resistência das componentes básicas da ligação, que podem ser chamadas de regiões que interligam os elementos de viga e pilar.

Estas componentes básicas, distribuídas nas regiões principais de verificação, mostradas no capítulo dois, Figura 2.21, serão comentadas individualmente a seguir.

3.3.1

Componentes do Aço

3.3.1.1

Alma do Pilar Submetida ao Esforço Cortante (cws)

Um possível sistema de ações internas, que ocorre na zona do painel de alma da ligação viga-pilar é representado pela Figura 3.11. Submetidos a este sistema de forças cortantes ocorrem às deformações devido às forças cortantes.

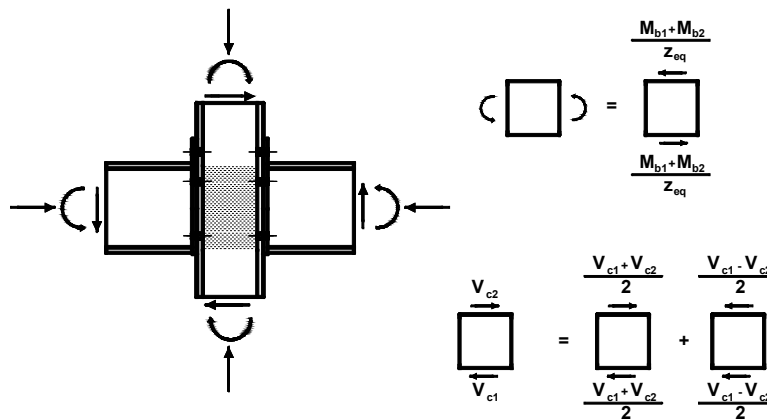


Figura 3.11 – Sistema de forças atuantes no painel de alma, Faella [12]

A resistência do modelo de molas do painel de alma submetido à força cortante, incluindo a distribuição das ações internas, é dada por:

$$F_{cws,Rd} = \frac{M_{b,Sd}}{Z_{eq}} = \frac{V_{cws,Rd}}{\beta} \quad (3.1)$$

Onde $M_{b,Sd}$, é o momento fletor atuante na seção da viga, que é decomposto em duas forças normais, uma de tração na mesa superior da viga, e outra de compressão na mesa inferior, surgindo assim, um sistema de forças cisalhantes no painel de alma do pilar. Estas forças que são separadas pela distância z_{eq} , que representa o ponto desde o centro de compressão até o ponto médio das forças de tração atuantes.

Quando existir somente momento em um dos lados do pilar, ou seja, ligação unilateral:

$$M_{b,Sd} = M_{b1,Sd} \quad \text{ou} \quad M_{b,Sd} = M_{b2,Sd} \quad (3.2)$$

respectivamente temos: $\beta = \beta_1$ ou $\beta = \beta_2$ com $\beta = 1$

Quando existir momento nos dois lados do pilar, ou seja, ligação bilateral:

$$M_{b1,Sd} = M_{b2,Sd} \Rightarrow \beta = 0 \quad \frac{M_{b1,Sd}}{M_{b2,Sd}} > 0 \Rightarrow \beta = 1 \quad (3.3)$$

$$\frac{M_{b1,Sd}}{M_{b2,Sd}} < 0 \Rightarrow \beta = 2 \quad M_{b1,Sd} + M_{b2,Sd} = 0 \Rightarrow \beta = 2 \quad (3.4)$$

A resistência do painel de alma pelo Eurocode 3 [1] [2] [3], é calculada pela eq. (3.5).

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9.A_{vc}.f_{y,cw}}{\sqrt{3}.\gamma_{M0}} \quad (3.5)$$

A resistência do painel de alma é calculada através da área efetiva de alma do pilar, A_{vc} , juntamente com a tensão de escoamento do mesmo, e coeficientes de correção para adequar à precisão de algumas situações particulares.

Na Figura 3.12 está representado o mecanismo de funcionamento do painel de alma da ligação viga-pilar, e seu modo de deformação através da ação de forças horizontais.

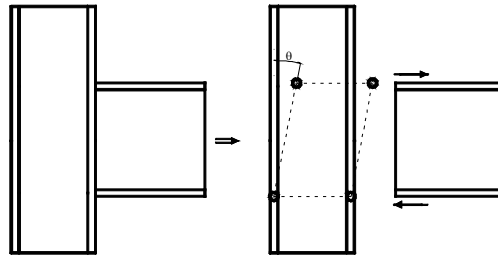


Figura 3.12 – Mecanismo do painel de alma

Quando o painel de alma do pilar não possui resistência ou rigidez suficiente, para resistir às solicitações atuantes, pode-se acrescentar ao painel de alma enrijecedores, como placas suplementares de alma do pilar, enrijecedores transversais e em diagonal, ou ambos combinados respeitando-se as limitações e exigências propostas pelo Eurocode 3 [1] [2] [3].

Os enrijecedores transversais podem ser usados nas zonas comprimidas e tracionadas da alma do pilar, posicionados de tal forma, a apresentar uma continuidade das mesas da viga, podendo se estender ao longo de toda a alma do pilar ou utilizando somente um enrijecedor parcial, como se pode observar na Figura 3.13.

O enrijecedor em diagonal mostrado na Figura 3.14, é considerado somente contribuindo para o aumento da rigidez à rotação, mas sabe-se que este, trabalhando em conjunto com os transversais pode ter uma parcela maior de influência.

A resistência plástica do painel de alma $V_{wp,Rd}$ submetido ao esforço cortante é aumentada de uma parcela de resistência $V_{wp,add,Rd}$ devido aos enrijecedores transversais, que é dada por:

$$V_{wp,add,Rd} = \frac{4.M_{pl,fc,Rd}}{ds} \quad \text{mas} \quad (3.6)$$

$$V_{wp,add,Rd} \leq \frac{2.M_{pl,fc,Rd} + 2.M_{pl,st,Rd}}{ds}$$

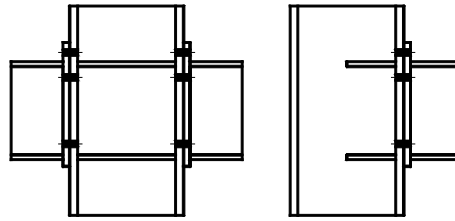


Figura 3.13 – Enrijecedores transversais

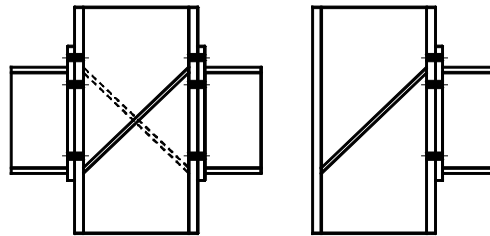


Figura 3.14 – Enrijecedores em diagonal

O coeficiente de rigidez do painel de alma da coluna, não enrijecido, submetido ao esforço cortante é dado pela eq. (3.7).

$$k_1 = \frac{0,38 \cdot A_{vc}}{\beta \cdot z} \quad (3.7)$$

A rigidez da alma do pilar é caracterizada pela área da alma do pilar A_{vc} , dividida pelo braço de alavanca, z_{eq} , já comentado anteriormente, multiplicado pelo coeficiente β , que representa a interação com o esforço cortante, atuando como um fator de redução da força cortante.

Quando são empregados pilares mistos ou lajes com grandes espessuras, de modo a preencher a alma do pilar com concreto, fazendo com que o painel de alma do pilar esteja confinado e fornecendo aumento de rigidez, deve-se multiplicar k_1 por 0,87.

A alma do pilar também pode ser reforçada, ou enrijecida com placas suplementares, podendo ser esta placa soldada dos dois lados da alma do pilar ou somente em um dos lados, conforme apresentado na Figura 3.15. A contribuição destas placas se faz através do aumento da área de absorção do esforço cisalhante, representada por A_{vc} . Com relação à rigidez rotacional, esta componente terá seu valor tendendo para o infinito, sendo portanto desconsiderada, fato este que contribui para o aumento da rigidez.

Eurocode [1] [2] [3] recomenda que o aço da placa suplementar deve ser o mesmo da alma do pilar, evitando problemas de deformação e corrosão. A altura da placa suplementar, l_s , não deve ultrapassar as larguras efetivas dos parafusos de extremidade. A espessura da placa, t_{ws} , não deve ser menor que a espessura da alma do pilar. Estas recomendações podem ser observadas nas figuras apresentadas a seguir.

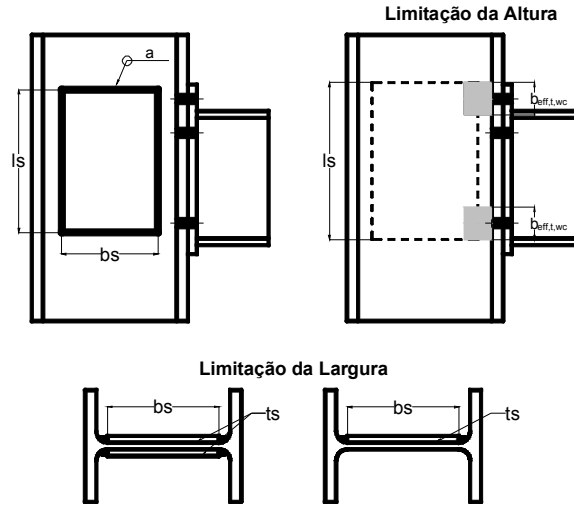


Figura 3.15 - Placa de reforço no painel de alma

No painel de alma do pilar, quando existir a porção mista da ligação, deve se acrescentar uma resistência adicional devido ao preenchimento da alma do pilar por concreto (representa um incremento de resistência no painel da alma).

$$V_{wp,c,Rd} = 0,85 \cdot v \cdot A_c \cdot f_{cd} \cdot \sin(q) \quad (3.8)$$

Onde:

$$A_c = 0,8 \cdot (b_c - t_w) \cdot (h - 2 \cdot t_f) \cdot \cos(q);$$

$$q = \arctan \left[\frac{h - 2 \cdot t_f}{z} \right];$$

b_c = largura da porção de concreto;

h = altura do pilar;

t_f = espessura da mesa do pilar;

t_w = espessura da alma do pilar;

z = braço de alavanca;

$$\nu = \left[1 + 2 \cdot \left[\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \right] \right] \leq 1,1 \quad (3.9)$$

Onde:

N_{Ed} = força normal de cálculo aplicada no pilar;

$N_{pl,Rd}$ = resistência plástica de cálculo da seção do pilar misto.

3.3.1.2

Alma do Pilar Submetida à Compressão (cwc)

A alma do pilar está sujeita a forças concentradas, transmitidas pela alma e mesa da viga respectivamente. Estas forças horizontais são produzidas por tensões normais, interagindo com tensões de corte na zona do painel da alma do pilar e verticalmente com tensões normais, devido a carregamentos axiais e ação de momentos fletores nas extremidades do pilar.

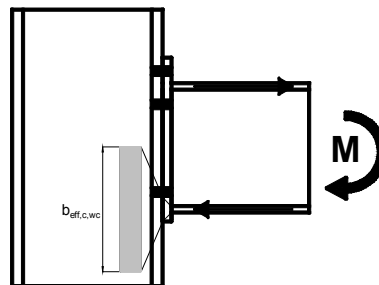


Figura 3.16 - Sistema de compressão na alma do pilar

O cálculo da resistência da alma do pilar submetido à compressão, não depende somente da distribuição de forças devido à compressão da alma e da mesa, mas também com as interações entre tensões locais. Esta distribuição de tensões locais é produzida devido ao esmagamento e a flambagem do painel de alma do pilar.

A resistência da alma do pilar está sujeita à compressão transversal é determinada pela eq. (3.10).

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega \cdot k_{wc} \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad \text{mas} \quad F_{c,wc,Rd} \leq \frac{\omega \cdot k_{wc} \cdot \rho \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad (3.10)$$

Os termos das equações representam dados geométricos e mecânicos como a variável ω , representando os possíveis efeitos da interação com o esforço cortante, k_{wc} é um parâmetro que representa as tensões longitudinais de compressão, t_{wc} é a espessura da alma do pilar, $b_{eff,c,wc}$ é a largura efetiva, Figura 3.16, onde atua a compressão e ρ representa um parâmetro que leva em conta a flambagem na alma do pilar.

Quando se utilizam enrijecedores, os procedimentos de cálculo de resistência e rigidez adotados são os mesmos que no item anterior 3.3.1.1.

O coeficiente da eq. (3.11) representa o coeficiente de rigidez para a alma do pilar submetido à compressão.

$$k_2 = \frac{0,7 \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc}}{d_c} \quad (3.11)$$

Onde d_c é a altura da alma do pilar livre da influência do enrijecimento das soldas no caso de perfis soldados e dos raios da curvatura quando se trata de perfis laminados.

Quando a ligação for mista deve-se acrescentar uma parcela de resistência devido a contribuição da compressão que ocorre na alma do pilar devido ao concreto embutido.

$$F_{c,wc,c,Rd} = 0,85 \cdot k_{wc,c} \cdot t_{eff,c} \cdot (b_c - t_w) \cdot f_{cd} \quad (3.12)$$

$t_{eff,c}$ = espessura da laje de concreto;

$k_{wc,c}$ = usado com valor igual a 1.

Para a rigidez da alma do pilar sob compressão deve ser calculada com a seguinte equação:

$$k_2 = \frac{0,2 \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc}}{d_c} \quad (3.13)$$

Utilizando o d_c da mesma forma como comentado anteriormente.

3.3.1.3

Alma do Pilar Submetida à Tração (cwt)

Na zona tracionada do painel de alma do pilar, onde existe uma força concentrada devido à aplicação de uma força de tração pela mesa da viga, ocorre uma distribuição local de tensões, semelhante à zona de compressão.

No entanto, existe uma diferença com relação à largura efetiva para cada linha de parafusos. Deve ser considerada uma largura efetiva para cada linha de parafusos de acordo com a sua posição na ligação, e também buscando as possíveis combinações entre todas as linhas de parafusos. Para a determinação da largura efetiva de cada linha de parafusos, com a alma do pilar não enrijecida, o Eurocode [1] [2] [3], sugere a utilização da Tabela 3.1. No entanto, quando a alma do pilar estiver reforçada por enrijecedores transversais e em diagonal, adota-se a Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Largura efetiva para elementos não enrijecidos

Linha de parafusos: localização	Linha de parafusos considerada individualmente		Linha de parafusos considerada como parte de um grupo	
	Formas circulares $l_{eff,cp}$	Formas não-circulares $l_{eff,nc}$	Formas circulares $l_{eff,cp}$	Formas não-circulares $l_{eff,nc}$
Linha interna	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Linha externa	$2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	$4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$	$\pi m + p$ $2e_1 + p$	$2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$
Modo 1:	$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$ mas $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,nc}$ mas $\sum l_{eff,1} \leq \sum l_{eff,cp}$	
Modo 2:	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$\sum l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc}$	

Tabela 3.2 - Largura efetiva para elementos enrijecidos

Linha de parafusos: localização	Linha de parafusos considerada individualmente		Linha de parafusos considerada como parte de um grupo	
	Formas circulares $l_{eff,cp}$	Formas não-circulares $l_{eff,nc}$	Formas circulares $l_{eff,cp}$	Formas não-circulares $l_{eff,nc}$
Linha adjacente enrijecedor	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$
Linha externa	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Linha externa	$2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	$4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$	$\pi m + p$ $2e_1 + p$	$2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$
Linha interna	$2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	$e_1 + \alpha m - (2m + 0,625e)$	—	—
Modo 1:	$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$ mas $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$\Sigma l_{eff,1} = \Sigma l_{eff,nc}$ mas $\Sigma l_{eff,1} \leq \Sigma l_{eff,cp}$	
Modo 2:	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$\Sigma l_{eff,2} = \Sigma l_{eff,nc}$	

O coeficiente α representa a influência do enrijecedor na largura efetiva e, conseqüentemente, na resistência de cada componente. Seu valor pode ser determinado através do ábaco mostrado na Figura 3.17, ou através da formulação sugerida pelo BCSA [12].

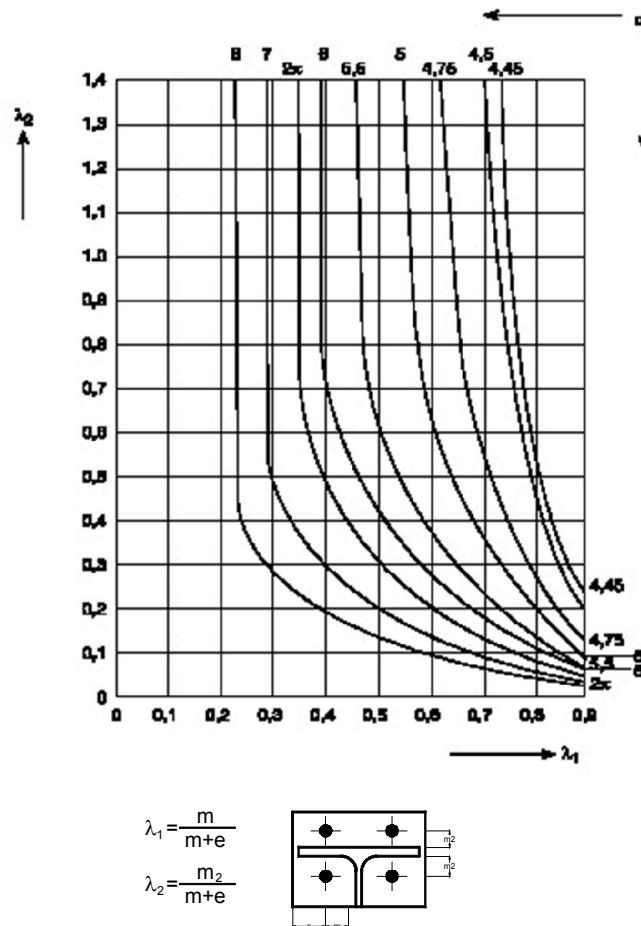


Figura 3.17 - Ábaco e parâmetros geométricos para determinação de α

Uma informação que não pode ser esquecida, é que não é possível fazer a combinação entre parafusos separados por enrijecedores, como é representada pela Figura 3.18.

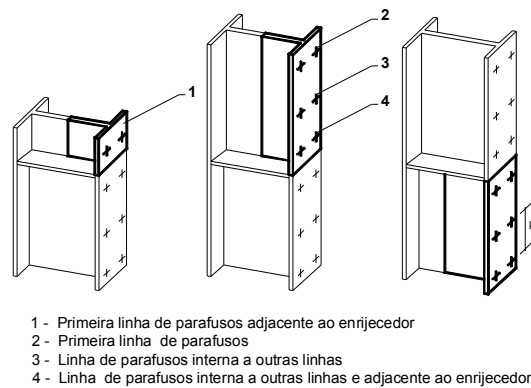


Figura 3.18 - Combinação das linhas de parafusos para a alma e mesa do pilar

Pode ser observado na Figura 3.19, que o posicionamento do “T-stub”, está invertido, pois a alma do T se encontra na alma do pilar.

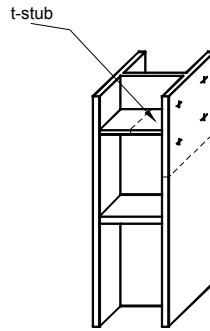


Figura 3.19 – Definição do “T-stub” da alma do pilar

O cálculo da resistência desta componente é feito através da eq. (3.14).

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega \cdot b_{eff,t,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad (3.14)$$

A determinação do coeficiente de rigidez, para a componente alma do pilar submetido à tração se faz pela eq. (3.15).

$$k_3 = \frac{0,7 \cdot b_{eff,t,wc} \cdot t_{wc}}{d_c} \quad (3.15)$$

3.3.1.4

Mesa do Pilar Submetida à Flexão (cfb)

Nesta componente é considerada uma verificação da combinação da menor resistência ou menor rigidez, de uma ou várias linhas de parafusos, de modo a formar um “T-stub” equivalente, como comentado no item 3.2 deste trabalho, resultado da solicitação do momento fletor, Figura 3.6. Será determinado um dos três modos de ruína conforme observado na Figura 3.7, e abaixo, na Figura 3.20, pode-se notar os detalhes para determinação deste “T-stub”.

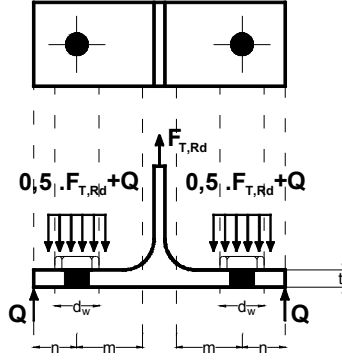


Figura 3.20 - Detalhamento do “T-stub”

Para a determinação da resistência de cada modo de ruína, adotam-se as seguintes equações:

Primeiro Modo:

$$F_{t,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m} \quad (3.16)$$

Onde:

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot \sum I_{eff,1} \cdot t_f^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.17)$$

Segundo Modo:

$$F_{t,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n \cdot \sum F_{t,Rd}}{m + n} \quad (3.18)$$

Onde:

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot \sum I_{eff,2} \cdot t_f^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.19)$$

Terceiro Modo:

$$F_{t,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad (3.20)$$

A variável M_{pl} , representa o momento plástico resistente W_{pl} de cada modo de ruína, é determinado pelos parâmetros geométricos da largura efetiva

l_{eff} , o quadrado da espessura da mesa do “T-stub”, t_f , pela tensão de escoamento e por $F_{t,Rd}$ que representa a força resistente de cada parafuso.

A determinação da largura efetiva de cada linha de parafusos individualmente ou combinadas, é obtida na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2, apresentadas no item de caracterização da alma do pilar submetida à tração. Devem ser utilizados os mesmos critérios para consideração dos enrijecedores transversais e em diagonal.

Quando existir a necessidade de se fazer um incremento na resistência da mesa do pilar, podem ser adicionadas placas de reforço.

Cada placa de reforço se estende desde a borda externa da mesa do pilar, e na parte interna pode ficar afastada no mínimo a 3 milímetros do raio de concordância ou da solda de composição do perfil soldado. Os detalhes da placa de reforço da mesa são mostrados na Figura 3.21.

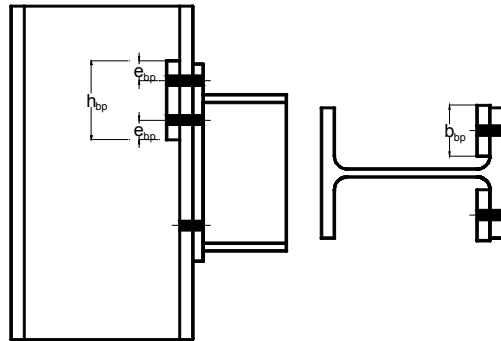


Figura 3.21 - Placas de reforço da mesa do pilar

O acréscimo de resistência, proporcionado pelo reforço é somado à resistência gerada pelo primeiro modo de colapso. Desta forma a resistência é calculada pela eq. (3.21).

$$F_{t,1,Rd} = \frac{4.M_{pl,1,Rd} + 2.M_{bp,Rd}}{m} \quad (3.21)$$

Onde:

$$M_{bp,Rd} = \frac{0,25 \cdot \sum l_{eff,1} \cdot t_{bp}^2 \cdot f_{y,bp}}{\gamma_{M0}} \quad (3.22)$$

Os parâmetros para a determinação de $M_{bp,Rd}$, são os mesmos que os comentados anteriormente, contudo referentes às placas de reforço.

3.3.1.5

Placa de Extremidade Submetida à Flexão (epb)

A resistência da placa de extremidade submetida à flexão é avaliada como na componente anterior, onde uma parte do “T-stub” equivalente é adotada. Contudo vale ressaltar que a espessura da placa de extremidade deve ser utilizada, e a largura efetiva do “T-stub” novamente determinada.

Neste ponto ocorre uma grande possibilidade de equívoco na utilização desta componente ou da anterior. A menor largura da placa de extremidade ou da mesa do pilar, que devem ser consideradas da seguinte forma: a componente da mesa do pilar submetida à flexão deve usar a largura da mesa do pilar, enquanto a placa de extremidade submetida à flexão, deve ser utilizada a largura da placa de extremidade. Por este motivo, são demonstradas duas vezes as notações geométricas, aparentando serem as mesmas, mas em situações completamente diferentes. A principal característica para esta componente surge no momento de analisar a ligação com placa de extremidade estendida. Desta maneira surge uma linha de parafusos acima da mesa superior da viga, que possui várias características, ou formas de geração das charneiras plásticas, como pode ser observado na Figura 3.22.

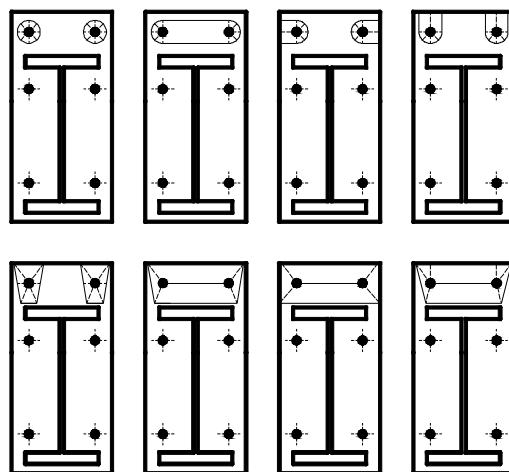


Figura 3.22 - Mecanismos de colapso da linha externa de parafusos acima da mesa superior da viga

A determinação das larguras efetivas para esta componente é feita com base na Tabela 3.3, observando atentamente cada um dos parâmetros geométricos mostrados na Figura 3.23.

Tabela 3.3 – Larguras efetivas para a placa de extremidade

Linha de parafusos: localização	Linha de parafusos considerada individualmente		Linha de parafusos considerada como parte de um grupo	
	Formas circulares $l_{eff,cp}$	Formas não-circulares $l_{eff,nc}$	Formas circulares $l_{eff,cp}$	Formas não-circulares $l_{eff,nc}$
Linha externa as mesas	$2\pi m_x$ $\pi m_x + w$ $\pi m_x + 2e$	$4m_x + 1,25e_x$ $e + 2m_x + 0,625e_x$ $0,5b_p$ $0,5w + 2m_x + 0,625e_x$	----	----
Primeira linha após a mesa tracionada	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$
Linha interna	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Linha externa	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$\pi m + p$	$2m + 0,625e + 0,5p$
Modo 1:	$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$ mas $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$\Sigma l_{eff,1} = \Sigma l_{eff,nc}$ mas $\Sigma l_{eff,1} \leq \Sigma l_{eff,cp}$	
Modo 2:	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$\Sigma l_{eff,2} = \Sigma l_{eff,nc}$	

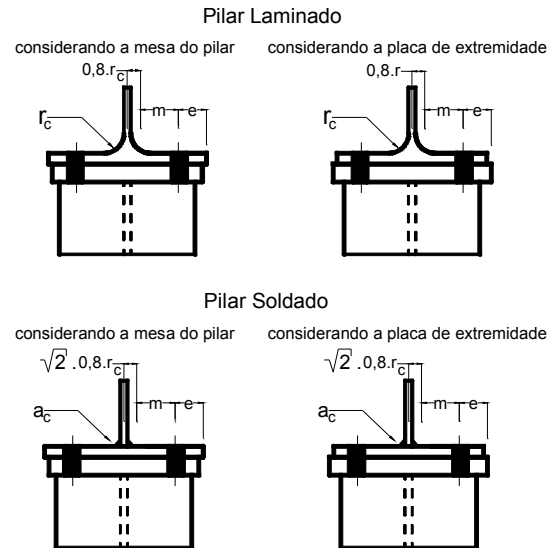


Figura 3.23 - Parâmetros geométricos da mesa do pilar e da placa de extremidade

A determinação do coeficiente de rigidez, é idêntica a da componente anterior, somente utilizando a largura efetiva da componente correspondente.

3.3.1.6

Alma e Mesa da Viga Submetidos à Compressão (bfc)

O modelo mecânico utilizado para determinar a resistência desta componente baseia-se em um ponto de rotação, onde se concentram todas as forças resultantes de compressão, devido à flexão na viga, como pode ser observado na Figura 3.24. A região de compressão da viga que envolve esta componente, é constituída pela mesa inferior e uma parte da alma da viga.

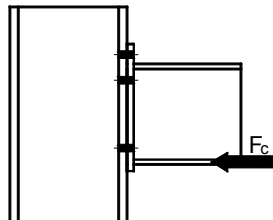


Figura 3.24 - Alma e mesa da viga submetidos à compressão

A determinação da resistência desta componente é feita pela eq. (3.23).

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h - t_{fb}} \quad (3.23)$$

Onde h é a altura da viga, t_{fb} é a espessura da mesa da viga, e $M_{c,Rd}$ representa o momento resistente da viga que pode ser determinado através da eq. (3.24).

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.24)$$

O momento resistente da viga, $M_{c,Rd}$, utiliza o módulo plástico, W_{pl} , para a sua determinação.

Esta componente não contribui para a rigidez da ligação, pois é considerada como rígido-plástica conforme comentado no capítulo anterior.

3.3.1.7

Alma da Viga Submetida à Tração (bwt)

A resistência desta componente é basicamente determinada como na alma do pilar submetido à tração, representada na Figura 3.25, adotando somente as propriedades geométricas da alma da viga.

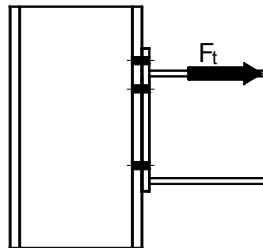


Figura 3.25 - Alma da viga submetida à tração

A determinação da resistência é feita pela eq. (3.25).

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} \quad (3.25)$$

Para a determinação da largura efetiva, $b_{eff,wb}$, pode ser utilizada a mesma tabela da componente placa de extremidade submetida à flexão, devido à proximidade entre componentes.

Entretanto, deve-se ressaltar que na ligação com placa estendida, esta componente não deve ser considerada para a linha acima da mesa superior da viga, pois neste ponto não existe alma tracionada.

3.3.1.8

Parafusos Submetidos à Tração (bt)

A resistência do parafuso submetido à tração, se faz da mesma forma como mostrado no mecanismo de colapso tipo 3 do “T-stub”, através da eq. (3.26).

$$F_{t,Rd} = \frac{0,6.f_{ub}.A_0}{\gamma_{M2}} \quad (3.26)$$

A rigidez desta componente é calculada pela eq. (3.27).

$$k_{t,Rd} = \frac{1,6.A_0}{L_b} \quad (3.27)$$

A variável A_0 , representa a área da rosca do parafuso, e L_b representa o comprimento útil do parafuso, mostrado em detalhe na Figura 3.26.

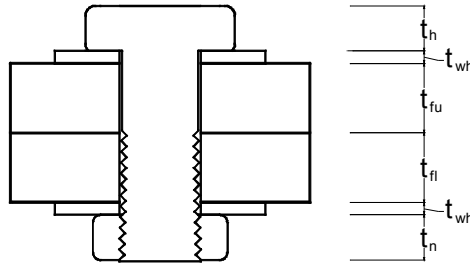


Figura 3.26 - Detalhamento do comprimento útil do parafuso

Na determinação deste comprimento L_b , é feita a soma das placas e arruelas que se encontram entre a cabeça do parafuso e a porca. A eq. (3.28) determina o comprimento que deve ser utilizado.

$$L_b = t_{fu} + t_{fl} + 2.t_{wh} + \frac{t_h + t_n}{2} \quad (3.28)$$

Onde t_{wh} é a espessura da arruela, t_h é a espessura da cabeça do parafuso, t_n é a espessura da porca e, finalmente, as duas últimas variáveis representam as espessuras das placas entre as arruelas, ou seja, t_{fu} é a espessura da mesa na parte superior e t_{fl} é a espessura da mesa inferior.

3.3.2

Componentes do Sistema Misto

3.3.2.1

Armadura Longitudinal Submetida à Tração (rbt)

Na ligação semi-rígida mista acrescenta-se a contribuição da rigidez e resistência da armadura, adicionando neste tipo de ligação um novo componente, que possui um considerável braço de alavanca, com relação ao centro de compressão da ligação, como pode ser observado na Figura 3.27.

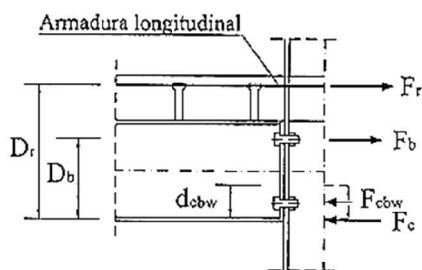


Figura 3.27 - Representação da armadura longitudinal na ligação

A rigidez da armadura sob tração pode ser avaliada através da eq. (3.29):

$$k_{r,s} = \frac{A_{r,s}}{L} \quad (3.29)$$

onde:

$k_{r,s}$ - é a rigidez da armadura longitudinal sob tração

$A_{r,s}$ - é a área transversal da armadura longitudinal que contribui para a rigidez desta ligação, dentro de uma determinada largura efetiva.

L - comprimento contribuinte para o alongamento da armadura na zona de tração da armadura.

Este comprimento de alongamento da armadura, L , detém uma discussão a respeito da sua determinação. Existem várias definições para a determinação de seu valor, que são descritos a seguir, e demonstrados na Figura 3.28:

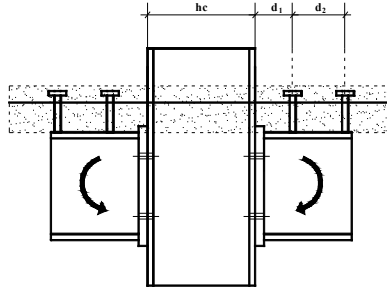


Figura 3.28 – Determinação do comprimento L, alongamento da armadura longitudinal

$$L = \frac{h_c}{2} \quad (\text{Eurocode 3}) \quad (3.30)$$

$$L = \frac{h_c}{2} + 225 \quad (\text{Nethercot}) \quad (3.31)$$

$$L = \frac{h_c}{2} + d_1 \quad (\text{Nethercot}) \quad (3.32)$$

$$L = \frac{h_c}{2} + d_1 + d_2 \quad (\text{Nethercot}) \quad (3.33)$$

$$L = \frac{h_c}{2} + d_1 + 2d_2 \quad (\text{Nethercot}) \quad (3.34)$$

h_c - altura da seção do pilar

d_1 - distância da face externa da mesa do pilar até o primeiro conector de cisalhamento

d_2 - é a distância entre o primeiro e o segundo conector de cisalhamento

A resistência da armadura longitudinal submetida a tração, $F_{tr, Rd}$ é determinada pela eq. (3.35):

$$F_{tr, Rd} = A_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \quad (3.35)$$

$F_{tr, Rd}$ - é a resistência da armadura longitudinal submetida à tração

A_s - é a área da seção transversal da armadura longitudinal com sua respectiva largura efetiva

f_{sk} - é a tensão característica do aço ou também chamada de tensão de escoamento

γ_s - coeficiente de segurança para o aço da armadura ($\gamma_s = 1,15$)

3.3.3

Componentes do Concreto Armado

3.3.3.1

Painel de Alma do Pilar Submetido ao Cisalhamento

$$k_{1,c} = 0,06 \cdot \frac{E_{cm}}{E_a} \cdot \frac{b_c \cdot h_c}{\beta \cdot z} \quad (3.36)$$

Onde:

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8$$

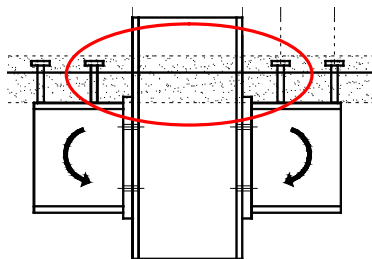


Figura 3.29 – Alma do pilar embutida no concreto

3.3.3.2

Alma do Pilar Submetido a Compressão Transversal

$$k_{2,c} = 0,5 \cdot \frac{E_{cm}}{E_a} \cdot \frac{t_{eff,c} \cdot b_c}{h_c} \quad (3.37)$$

$t_{eff,c}$ = espessura da laje de concreto.

3.4

Distribuição das Solicitações

O modelo para determinação da solicitação, em cada linha de parafuso e na armadura tracionada da laje, é baseado em uma distribuição plástica de esforços.

A ligação com placa de extremidade aparafusada transmite um momento fletor, que é caracterizado pelos componentes tracionados na parte superior, e compressão na região inferior da ligação, de acordo com a solicitação mostrada na Figura 3.30.

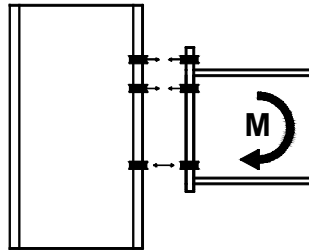


Figura 3.30 - Distribuição das solicitações nos parafusos

Modelos experimentais mostram que o centro de rotação, ou compressão, é localizado na região onde a mesa da viga se encontra comprimida. Portanto, considera-se que o centro de compressão está localizado na linha média da mesa inferior para o caso de momento fletor negativo. Deste modo, forma-se um binário de forças com a média das forças de tração.

Estima-se que a linha de componentes mais distantes da mesa comprimida da viga, atrai a maior solicitação de tração, associada a tradicional distribuição triangular das forças. O método aqui adotado também considera as outras componentes, mas difere daquelas que permitem uma distribuição plástica das forças.

Outro aspecto importante a ser salientado é que as linhas separadas por enrijecedores ou pela mesa tracionada da viga, não devem ser consideradas como um grupo de componentes, como já foi mostrado na Figura 3.18.

Para que se permita o desenvolvimento de forças resistentes plásticas nas componentes é necessário verificar a capacidade da ligação de se deformar.

Por isso estabelece-se um limite máximo para ligação em aço como sendo em função do diâmetro da primeira linha de parafusos e da razão entre a tensão última dos parafusos e a tensão de escoamento do aço, e para ligações mistas considerando como limite a deformação da armadura tracionada da laje, no lugar da primeira linha de parafusos, tanto para a espessura da placa de extremidade quanto para a espessura da mesa do pilar.

$$t \leq 0,36.d \sqrt{\frac{f_{ub}}{f_y}} \quad (3.38)$$

$$t \leq 0,36.\phi \sqrt{\frac{f_{yr}}{f_y}} \quad (3.39)$$

Quando a espessura máxima é excedida, a ligação não possui capacidade de deformação suficiente para garantir a contribuição máxima dos parafusos à distribuição plástica das forças. Nestas situações o potencial de resistência das linhas de parafusos é limitado à distribuição triangular de forças.

Deve ser observado que na Figura 3.31 considera-se uma ligação com placa de extremidade estendida, onde é possível variar a distribuição das forças nas linhas de parafusos, devido à linha que se encontra fora das mesas da viga, alcançando assim, um comportamento de acordo com o desejado pelo projetista. No entanto, nas ligações com placa de extremidade ajustada, “flush end plate”, não é possível obter a distribuição plástica das solicitações, existindo somente a tradicional distribuição triangular das solicitações.

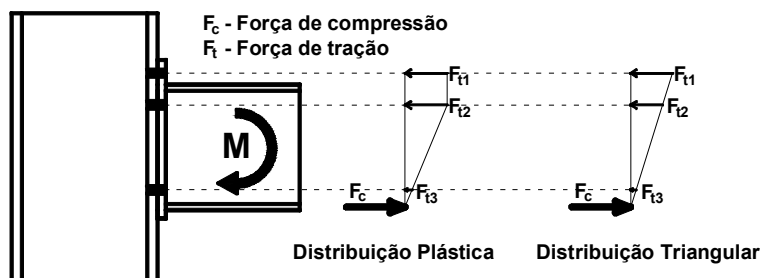


Figura 3.31 - Formas de distribuição das solicitações na ligação em aço

Segundo as observações feitas no parágrafo anterior, para as ligações semi-rígidas mistas, na Figura 3.32 não é necessário considerar uma ligação com placa de extremidade estendida, onde existe uma linha que se encontra fora das mesas da viga. Por questões de economia e praticidade, nas ligações com placa de extremidade ajustada, “flush end plate”, diferente das ligações unicamente em aço é possível obter a distribuição plástica das solicitações, proporcionada devido a existência da linha de componentes por onde passa a armadura da laje de concreto, substituindo a linha de parafuso.

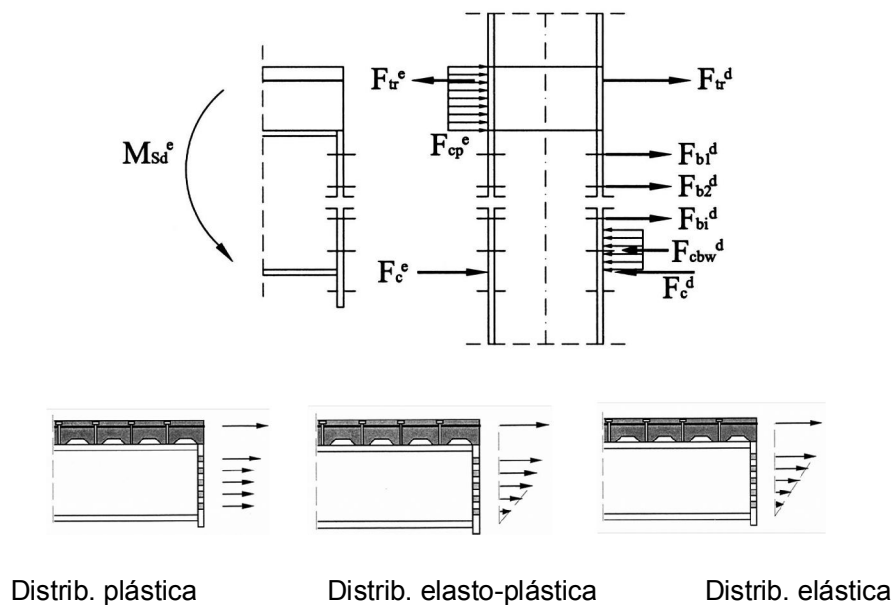


Figura 3.32 - Distribuição das solicitações na ligação mista

3.5

Ligações Semi-rígidas Através do Programa SRJ Tool

Neste capítulo serão mostrados exemplos práticos de dimensionamento de ligações semi-rígidas, através do programa SRJ Tool.

O SRJ Tool é um programa implementado na plataforma Delphi [18], que possibilita o dimensionamento de ligações semi-rígidas de um modo ágil e dinâmico. O sistema implementado possui um grande banco de dados para perfis: metálicos, soldados e laminados, parafusos, entre vários outros itens. Sua metodologia já foi demonstrada nos capítulos anteriores, sempre baseada nas recomendações do Eurocode 3 [1] [2] [3].

3.5.1

Introdução ao uso do programa SRJ Tool

No primeiro exemplo, será demonstrado o dimensionamento de uma ligação semi-rígida, parafusada com placa de extremidade estendida (extended end plate), descrevendo cada passo, desde a entrada de dados e a interpretação dos resultados, tanto da interface do programa, quanto dos relatórios gerados pelo mesmo.

Em seguida será apresentada uma ligação onde a placa de extremidade ajustada (flush end plate), mostrando-se também a sua entrada de dados, gerando-se os resultados para que seja feita uma validação através da comparação com o programa COP [19], que é um programa comercial, largamente utilizado em projetos de ligações semi-rígidas.

Para utilização do SRJ Tool é necessário ter uma familiaridade com programas de ambiente Windows, para as tradicionais funções de arquivo como novo, abrir, salvar, salvar como, exportar, configurar impressão, imprimir e funções de edição como copiar, colar e recortar. O restante das funções será descrito nos itens a seguir.

3.5.2

Exemplo de Ligação com Placa de Extremidade Estendida

Como já foi apresentado, o exemplo da Figura 3.33, trata da geometria da ligação com placa de extremidade estendida, parafusada e os perfis utilizados. Os parafusos utilizados são do tipo M20 ISO 10.9. O aço utilizado tanto para os perfis como para a placa de extremidade é o S235, que possui suas propriedades mecânicas como a tensão de escoamento $f_y = 235\text{MPa}$ e a tensão de ruptura $f_u = 360\text{MPa}$. O vão desta viga é igual à $L_b = 10.000\text{mm}$.

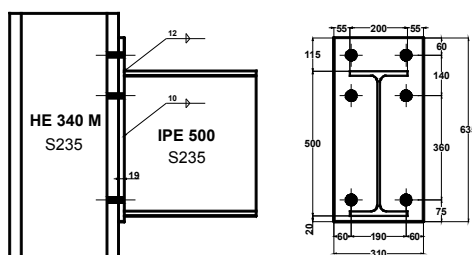


Figura 3.33 - Ligação com placa de extremidade estendida

A entrada de dados do SRJ Tool é iniciada pelos dados gerais de projeto, onde serão identificadas todas informações referentes a ligação em questão, Figura 3.34.

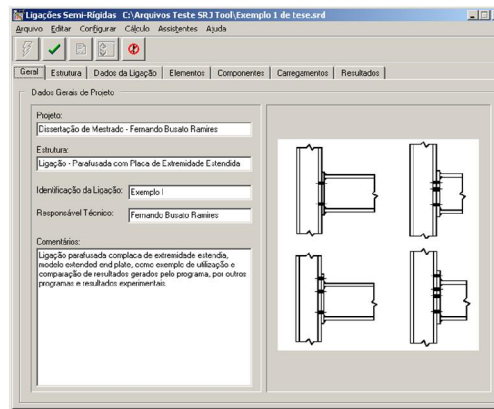


Figura 3.34 - Informações gerais de projeto

No passo seguinte, Figura 3.35, são inseridas algumas informações básicas da estrutura, sobre o travamento da estrutura, ou seja, se é contraventada ou não-contraventada, situações que influenciam na determinação dos limites superior e inferior do gráfico de classificação de ligações semi-rígidas. Também é disponível a opção de ambiente corrosivo, o qual somente afetará a determinação dos espaçamentos máximos, não possibilitando livre distância entre parafusos, protegendo assim que as intempéries se acumulem na estrutura da ligação, gerando prejuízos. Os procedimentos de cálculo disponibilizados por esta opção, são mais utilizados para informação do próprio usuário, a não ser para a ligação tipo “header plate”, que será discutida nos capítulos seguintes.

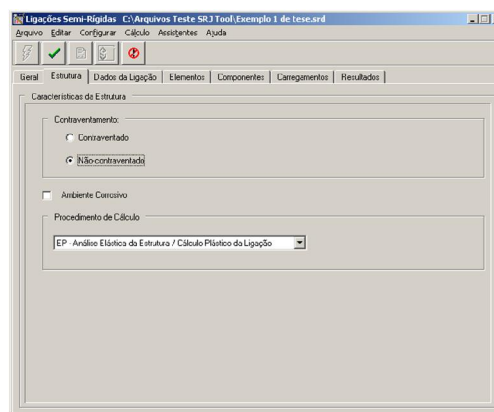


Figura 3.35 - Características da estrutura

Nos dados da ligação, Figura 3.36, será informado o tipo de norma utilizado, que neste caso é o Eurocode 3 [1] [2] [3]. Dentro do tipo de ligação será escolhido o modo que a ligação está disposta, como este trabalho está baseado no Eurocode 3 [1] [2] [3], só é utilizada a opção que a viga é ligada à mesa do pilar. A configuração da ligação está limitada pelo posicionamento da ligação na altura do pilar, sendo posicionada no topo do pilar, como viga de cobertura, ou no meio do pilar, sendo uma viga de um pavimento tipo. Deve-se também ser estabelecido o número de vigas que estão ligadas ao mesmo pilar, podendo se escolher entre unilateral, com somente uma viga de um lado, ou bilateral, possuindo duas vigas, uma de cada lado do pilar. Os componentes de reforço do pilar, ou seja, os enrijecedores, serão demonstrados mais à frente.

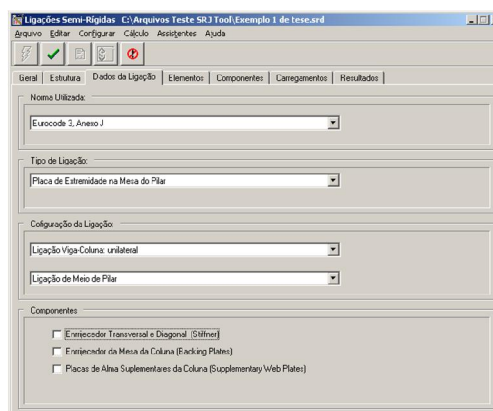


Figura 3.36 - Dados da ligação

O próximo passo, Figura 3.37, é a inserção dos dados referentes aos perfis. O programa permite a escolha do tipo de perfil, tanto da viga como do pilar, podendo estes serem perfis laminados e soldados, dos mais diversos tipos, ou ainda algum outro I perfil fora dos padrões de norma, através da opção de perfil não tabelado. Para cada tipo de perfil pode ser escolhida uma altura que for desejada, e um tipo de aço a ele associado. Logo abaixo destas opções são mostrados os dados de cada perfil escolhido, bem com a notação geométrica utilizada.

O vão da viga é um dado muito importante para o cálculo dos limites superior e inferior do gráfico de classificação de ligações semi-rígidas, e a distância entre pisos é uma complementação dos dados necessários para o dimensionamento final.

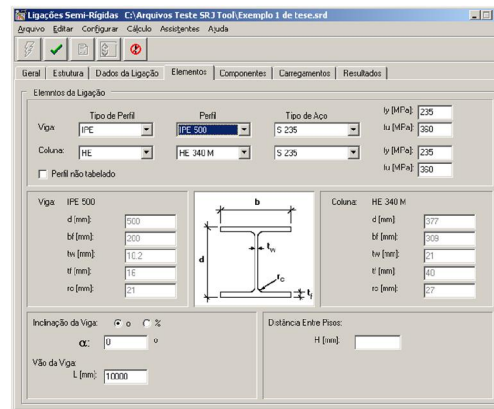


Figura 3.37 - Determinação dos elementos usados

Os dados que devem ser inseridos, como observado na Figura 3.38, se iniciam pela espessura do filete da solda, que liga a mesa da viga e a placa de extremidade, a_f , seguido pela espessura do filete da solda entre a alma da viga e a placa de extremidade, a_w . Também deve ser escolhido o tipo de eletrodo utilizado no processo de soldagem.

É possível ainda escolher uma espessura de filete de solda, que seja limitada pela espessura da placa correspondente, assinalando a opção otimização de solda, o qual é determinado automaticamente, no instante da verificação da consistência de dados.

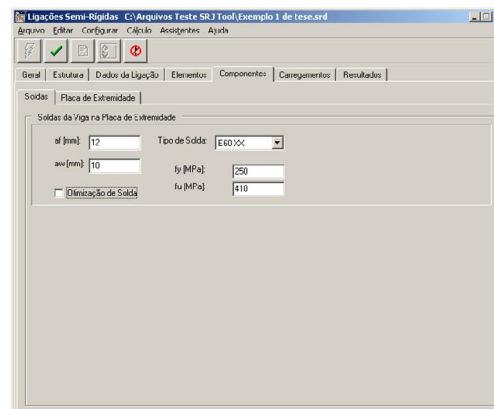


Figura 3.38 - Solda entre viga e placa de extremidade

Dentre os componentes da ligação, os dados mais importantes estão contidos na placa de extremidade, que se descreve a seguir.

A entrada de dados nesta etapa começa pelas dimensões da placa de extremidade, ou seja: altura h , largura b , e espessura da placa de extremidade t . Também deve ser feita a escolha do tipo de aço associado à placa de

extremidade, e por fim deve ser inserida a distância entre a borda superior da placa de extremidade e a borda superior da mesa superior da viga, descrita como dsb.

As informações sobre os parâmetros geométricos dos parafusos são determinadas, pelo seu tipo e diâmetro, sendo que seus dados restantes, como se pode observar são todos padronizados, facilitando a sua manipulação. Ao final pode ser observado que existe a possibilidade do aumento ou diminuição do número de arruelas, pois na prática é muitas vezes necessária esta modificação, para fins de acomodação do parafuso ou correção de alguma falha no projeto da rosca do parafuso. A adição da pré-tensão nos parafusos ainda não está implementada nesta versão do programa.

As linhas de parafusos podem ser modificadas através do contador, com no mínimo duas linhas de parafusos e no máximo 25 linhas, podendo esta limitação futuramente ser ampliada. As colunas de parafusos, funcionam da mesma maneira, sendo diferenciada pela inclusão de pares de colunas de parafusos, com o mínimo de duas colunas e sem limitação máxima.

O espaçamento vertical entre as linhas deve ser inserido na grade correspondente, sendo seu posicionamento é referente ao desenho ao lado, que é atualizado e tempo real após qualquer modificação nestes dados, e automaticamente é recalculada à distância da linha mais afastada até a borda inferior da placa de extremidade. O mesmo ocorre no espaçamento horizontal, entretanto, sempre é calculada uma distância entre parafuso e borda, simetricamente, com relação à distância entre parafusos.

Para que sejam complementados os dados dos relatórios o SRJ Tool disponibiliza a opção para que sejam salvos em diversos formatos o desenho da geometria da ligação implementada, e ainda existindo a possibilidade de transferir a figura para uma área de transferência, agilizando este procedimento.

Exercícios

Arquivo Editor Configurar Cálculo Análises Ajuda

Geral Estutura Dador de Ligação Elementos Componentes Carregamentos Resultados

Esforços Alutantes

☐ Mc1, Vc1, Nc1
 ☐ Mc2, Vc2, Nc2
 ☒ Mb1, Vb1, Nb1
 ☐ Mb2, Vb2, Nb2

Distribuição dos Esforços

Mc2 [kN/m]	Vc2 [N]	Nc2 [N]	

Mb2 [kN/m]		Mb1 [kN/m]

Vb2 [N]		Vv1 [N]

Nb [N]		Nb [N]

Mc1 [kN/m]	Vc1 [N]	Nc1 [N]

No último item da interface, Figura 3.41, são apresentados os resultados mais significativos para as ligações semi-rígidas.

Iniciando pela rigidez rotacional inicial, $S_{j,ini}$, rigidez rotacional idealizada, $S_{j,n}$, rigidez rotacional secante, $S_{j,s}$, que é um item ainda não implementado na atual versão do programa. Os termos referentes à resistência possuem a resistência à flexão, $M_{j,Rd}$, resistência elástica a flexão, $M_{e,Rd}$, resistência da solda, $F_{w,Rd}$, e resistência ao esforço cortante, V_{RD} .

Os gráficos que são mostrados representam o comportamento da ligação, gráfico bilinear e o gráfico trilinear, os quais já foram comentados no capítulo 2.

Após o cálculo dos resultados, diversos relatórios podem ser impressos. O relatório resumido é a primeira opção para uma breve verificação dos resultados, com alguns dados geométricos, desenho da geometria da ligação e os gráficos de comportamento.

Dois botões foram criados, um para que seja configurada a impressora e outro botão, para que seja feita diretamente a impressão dos gráficos de comportamento. A forma de impressão dos gráficos pode ser modificada, na forma escala, onde o gráfico se encaixa proporcionalmente no espaço de impressão, ou na forma original, onde todos os dados se encontram no tamanho original. O item marcas, pode acrescentar os valores da rotação e resistência diretamente no próprio gráfico. Nos gráficos de comportamento ainda se possui possibilidade de aproximação, somente pressionando diretamente o gráfico e arrastando a abertura de uma janela, cercado área que deseja aproximar. Também é possível mover o desenho usando o botão esquerdo do mouse, em qualquer direção.

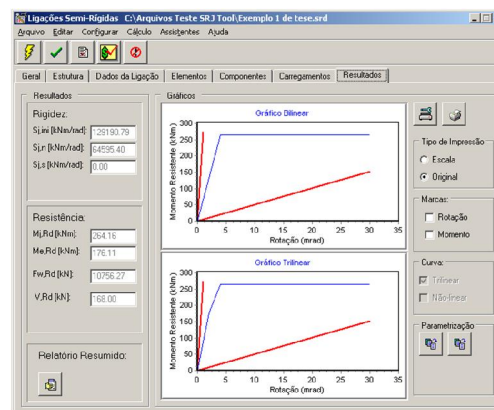


Figura 3.41 - Resultados da análise da ligação

Na Figura 3.41 pode ser observado que o cálculo já foi executado, mas para executá-lo é necessário observar os botões que são mostrados na Figura 3.42.

Neste exemplo os resultados são apresentados de forma resumida, Tabela 3.4, onde são comparados os valores de resistência ao momento fletor,

$M_{j,Rd}$, e a rigidez rotacional inicial, $S_{j,ini}$, com os mesmos valores obtidos pelo programa comercial COP [19].

Tabela 3.4 - Momento resistente e rigidez rotacional inicial

Programa	SRJ Tool	COP	SRJ Tool / COP
$M_{j,Rd}$ [kNm]	264.16	267.90	0.986
$S_{j,ini}$ [kNm/rad]	65595.40	65657.00	0.999

Onde:

$M_{j,Rd}$ → Momento resistente da ligação

$S_{j,ini}$ → Rigidez rotacional inicial

Pode-se observar na relação entre os resultados comparados, a precisão alcançada pelo SRJ Tool, validando inicialmente a utilização deste software para determinação das principais propriedades de ligações semi-rígidas.

São feitas inicialmente verificações de consistência dos dados inseridos no programa, que posteriormente são revisados de acordo com alguns itens de norma para que se tenha maior segurança no momento de executar os cálculos. Esta verificação é feita pressionando-se o botão indicado pela Figura 3.42, e na ocorrência de algum problema, ou incompatibilidade de dados, irá surgir alguma informação na tela, instruindo o usuário como resolver o problema.

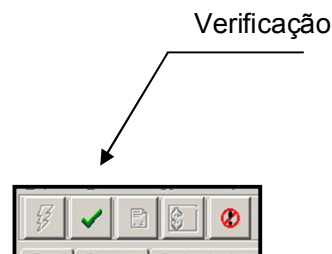


Figura 3.42 - Verificação da consistência de dados da ligação

Após a execução da verificação, pode se perceber que os outros botões tornam-se ativos, Figura 3.43, isso ocorre por que a consistência dos dados está correta, e não foi encontrado nenhum problema.

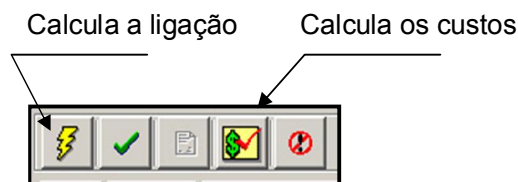


Figura 3.43 - Botões de cálculo da ligação e custos

Para execução do cálculo da ligação deve ser pressionado o botão de cálculo como mostra a Figura 3.43, ou fazer uma análise dos custos e do material da ligação.

Executando o cálculo das ligações, surgirão os resultados mais significativos do modelo em estudo, ou somente atualizando uma modificação em uma análise já executada.

O botão do gerador do relatório geral ficará disponível, Figura 3.44, fazendo com que se possa escolher o tipo mais adequado de informações.

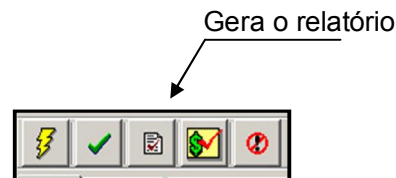


Figura 3.44 - Liberação do botão do gerador de relatório

O relatório geral é formado a partir da seleção dos itens mostrados na Figura 3.45, sendo gerado pelo botão indicado.

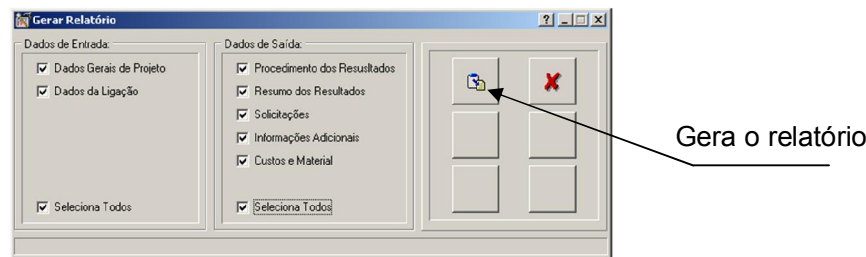


Figura 3.45 - Opções do relatório geral

Neste instante irá surgir um editor com relatório do SRJ Tool, Figura 3.46, com possibilidade de gerar arquivos de extensão .rtf, para ser editado em programas da preferência do usuário, arquivar este documento, ou também editá-lo no próprio programa.

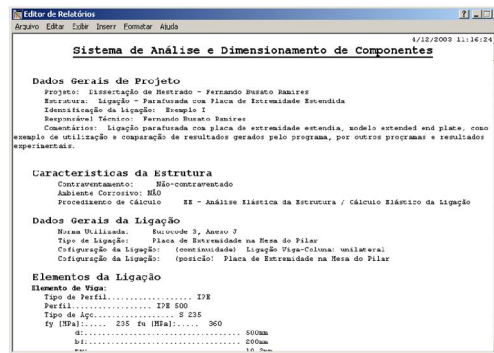


Figura 3.46 - Editor do SRJ Tool

Dentro da determinação dos custos da ligação, Figura 3.47, deve ser determinada as formas de preparação para todo o material da ligação.

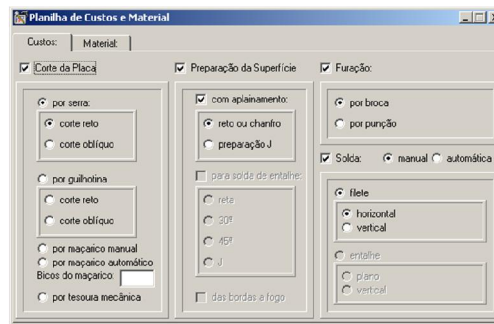


Figura 3.47 - Opções dos custos da ligação

Na Figura 3.48, são apresentados alguns itens e índices que podem ser editados de acordo com a necessidade do usuário, e que serão utilizados para determinar o custo total da ligação

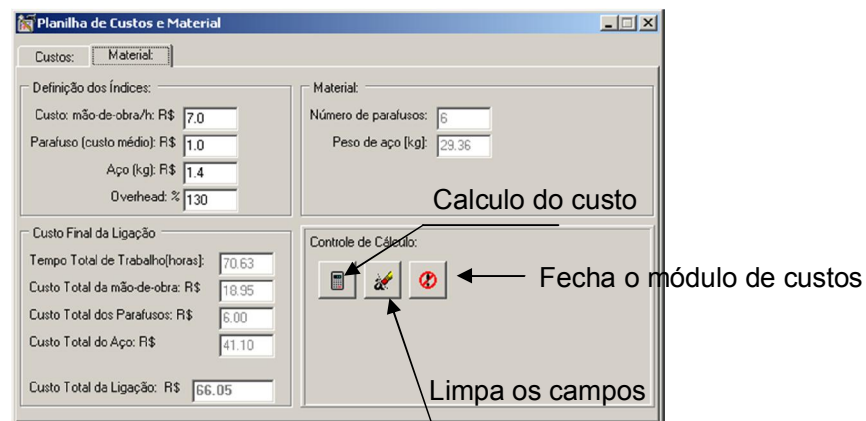


Figura 3.48 - Cálculo dos custos e do material da ligação

Neste exemplo foram apresentados os procedimentos mais importantes para o calculo de ligações semi-rígidas, não levando em conta os resultados, no

entanto, o exemplo a seguir será mostrado a avaliação de cada componente e uma comparação minuciosa dos seus resultados com os obtidos com o uso do programa comercial COP [19], para validar os resultados do SRJ Tool Steel e apresentará os resultados do mesmo exemplo com a versão mista.

3.5.3

Exemplo de Ligação com Placa de Extremidade Ajustada

A Figura 3.49, mostra a geometria da ligação com placa de extremidade ajustada a ser dimensionada assim como os perfis utilizados. Os parafusos utilizados são do tipo M16 ISO 10.9. O aço utilizado tanto para os perfis como para a placa de extremidade é o S235, com a tensão de escoamento, $f_y = 235\text{MPa}$ e tensão de ruptura, $f_u = 360\text{MPa}$. O vão desta viga adotado foi igual à $L_b = 7,000\text{mm}$.

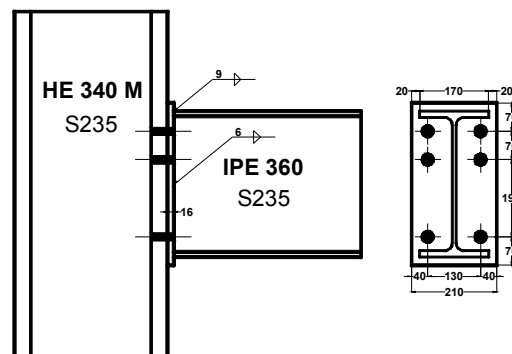


Figura 3.49 - Ligação parafusada com placa de extremidade não estendida

A porção mista deste exemplo contará com uma laje de concreto de espessura de $t_c = 200\text{mm}$, um cobrimento de 40mm , uma resistência característica, F_{kc} de 20MPa , uma largura efetiva colaborante de 2200mm , armadura consideradas com 8 barras de 10mm , totalizando uma área de aço igual a $628,30\text{cm}^2$, os conectores de cisalhamento de diâmetro de $19,1\text{mm}$ e altura de 125mm e por fim a utilização do comprimento de deformação igual a altura do perfil do pilar.

Neste exemplo será feita uma comparação detalhada entre os programas COP [19] e SRJ Tool, de modo a validar seus resultados. A comparação será feita através dos resultados de cada uma das componentes, com seus mais significativos resultados, justificando as diferenças. Os resultados relativos às combinações de linhas de parafusos, não serão apresentados por não influenciarem de forma significativa comportamento da ligação em questão. No entanto, na utilização prática se faz necessário que sejam apresentadas estas combinações de linhas de parafusos, ao menos para que seja verificada a sua importância.

Programa	SRJ Tool	COP	SRJ Tool / COP
Fwp,Rd [kN]	1151.00	1094.85	1.051
k1 [mm]	15.40	14.65	1.051

F_{wpRd} → Resistência plástica do painel de alma do pilar

Na comparação apresentada na Tabela 3.5, pode-se observar uma diferença significativa na resistência plástica do painel de alma e também na rigidez deste componente, devido a diferença na determinação da área que absorve o esforço cisalhante no perfil, pois no programa COP [19] isso é realizado por meio de tabelas, e no SRJ Tool sua determinação é feita através de formulações que buscam uma padronização entre todos tipos de perfil laminados, devido aos diferentes raios de concordância. Deve-se ressaltar que os resultados para os perfis soldados são mais precisos por não possuírem os

raios de concordância, e sim, soldas de composição de perfil, que são de fácil determinação.

Tabela 3.6 - Alma do pilar submetido a compressão

Programa	SRJ Tool	COP	SRJ Tool / COP
F _{cwc,Rd} [kN]	1295.14	1281.46	1.011
k ₂ [mm]	23.43	23.98	0.977

Onde:

F_{cwcRd} → Resistência da alma do pilar submetido à compressão

K₂ → Coeficiente de rigidez

Na Tabela 3.6, são apresentados valores comparativos pouco significativos, pois não inserem alterações diretas no resultado final da resistência ou rigidez desta ligação, no entanto as diferenças existentes se fazem através do número de casas decimais utilizadas.

Tabela 3.7 - Alma do pilar submetido a tração

Programa		SRJ Tool	COP	SRJ Tool / COP
Linha 1	Fwct,Rd [kN]	836.94	940.33	0.890
	k3 [mm]	9.48	9.48	1.000
Linha 2	Fwct,Rd [kN]	836.94	940.33	0.890
	k3 [mm]	7.86	7.86	1.000
Linha 3	Fwct,Rd [kN]	836.94	940.33	0.890
	k3 [mm]	12.51	12.51	1.000

Onde:

F_{wctRd} → Resistência da alma do pilar submetido à tração

K₃ → Coeficiente de rigidez

As diferenças na resistência como mostrado na Tabela 3.7, ocorrem pelo fato da utilização de diferentes considerações para largura efetiva desta componente, que, mesmo assim, não produzem mudanças significativas na determinação da resistência a flexão. Na rigidez inicial foi encontrada uma similaridade de resultados.

Tabela 3.8 - Mesa do pilar submetido a flexão

Programa		SRJ Tool	COP	SRJ Tool / COP
Linha 1	Mpl1,Rd [kNm]	17664.89	17664.89	1.000
	Mpl2,Rd [kNm]	20808.05	20806.05	1.000
	F1,Rd [kN]	2147.71	2147.71	1.000
	F2,Rd [kN]	694.86	694.86	1.000
	F3,Rd [kN]	226.08	226.08	1.000
	k4 [mm]	253.52	239.43	1.059
Linha 2	Mpl1,Rd [kNm]	17664.89	17664.89	1.000
	Mpl2,Rd [kNm]	20808.05	20806.05	1.000
	F1,Rd [kN]	2147.71	2147.71	1.000
	F2,Rd [kN]	694.86	694.86	1.000
	F3,Rd [kN]	226.08	226.08	1.000
	k4 [mm]	210.27	198.59	1.059
Linha 3	Mpl1,Rd [kNm]	17664.89	17664.89	1.000
	Mpl2,Rd [kNm]	20808.05	20806.05	1.000
	F1,Rd [kN]	2147.71	2147.71	1.000
	F2,Rd [kN]	694.86	694.86	1.000
	F3,Rd [kN]	226.08	226.08	1.000
	k4 [mm]	334.36	315.78	1.059

Onde:

$M_{pl1,Rd}$ → Momento resistente plástico do primeiro modo de colapso

$M_{pl2,Rd}$ → Momento resistente plástico do segundo modo de colapso

$F_{1,Rd}$ → Resistência do primeiro modo de colapso

$F_{2,Rd}$ → Resistência do segundo modo de colapso

$F_{3,Rd}$ → Resistência do terceiro modo de colapso

K_4 → Coeficiente de rigidez

Pode ser observado na Tabela 3.8, que para cada um dos resultados dos modos de ruína, não há diferenças significativas nos valores finais, afirmando mais uma vez a correta avaliação de mais uma das principais componentes que compõe propriedades de uma ligação semi-rígida.

Tabela 3.9 - Placa de extremidade submetida a flexão

Programa		SRJ Tool	COP	SRJ Tool / COP
Linha 1	Mpl1,Rd [kNm]	4387.01	4418.45	0.993
	Mpl2,Rd [kNm]	4387.01	4418.45	0.993
	F1,Rd [kN]	323.69	326.01	0.993
	F2,Rd [kN]	189.12	189.79	0.996
	F3,Rd [kN]	226.08	226.08	1.000
	k5 [mm]	5.15	4.91	1.049
Linha 2	Mpl1,Rd [kNm]	3648.53	3648.53	1.000
	Mpl2,Rd [kNm]	3648.53	3648.53	1.000
	F1,Rd [kN]	269.21	269.21	1.000
	F2,Rd [kN]	173.44	173.44	1.000
	F3,Rd [kN]	226.08	226.08	1.000
	k5 [mm]	3.01	2.84	1.060
Linha 3	Mpl1,Rd [kNm]	4387.01	4418.45	0.993
	Mpl2,Rd [kNm]	4387.01	4418.45	0.993
	F1,Rd [kN]	323.69	326.01	0.993
	F2,Rd [kN]	189.12	189.79	0.996
	F3,Rd [kN]	226.08	226.08	1.000
	k5 [mm]	6.53	6.22	1.050

Onde:

$M_{pl1,Rd}$ → Momento resistente plástico do primeiro modo de colapso

$M_{pl2,Rd}$ → Momento resistente plástico do segundo modo de colapso

$F_{1,Rd}$ → Resistência do primeiro modo de colapso

$F_{2,Rd}$ → Resistência do segundo modo de colapso

$F_{3,Rd}$ → Resistência do terceiro modo de colapso

K_5 → Coeficiente de rigidez

Nos resultados das componentes placa de extremidade submetida à flexão, Tabela 3.9, pode se notar que existe uma pequena diferença com relação a primeira e terceira linhas de parafusos, devido ao enrijecimento que as mesas da viga produzem, influenciando diretamente na largura efetiva desta componente,. Pode se notar também que praticamente não existem diferenças em relação à segunda linha de parafusos, confirmando a maior facilidade na avaliação da largura efetiva desta situação, ao contrário das outras linhas de parafusos, mas, mesmo assim, gerando resultados satisfatórios.

Tabela 3.10 - Parafusos tracionados

Programa	SRJ Tool	COP	SRJ Tool / COP
Bt,Rd [kN]	113.04	113.04	1.000
k10 [mm]	3.33	3.51	0.949

Onde:

$B_{t,Rd}$ → Resistência do parafuso submetido à tração

K_{10} → Coeficiente de rigidez

Na avaliação dos parafusos tracionados, Tabela 3.10, é gerada uma pequena diferença devido a padronização dos elementos que compõe o comprimento L_b , mais especificamente na arruela e na porca, pois para cada um deles existem vários modelos diferentes sendo utilizados.

Tabela 3.11 - Mesa da viga submetida a compressão

Programa	SRJ Tool	COP	SRJ Tool / COP
Mc,Rd [kNm]	217.77	217.73	1.000
Fcfb,Rd [kN]	627.03	626.91	1.000

Onde:

$M_{c,Rd}$ → Momento resistente da viga

$F_{cfb,Rd}$ → Resistência da mesa da viga submetida à compressão

Os resultados apresentados na Tabela 3.11, são idênticos, devido a forma de avaliação, onde somente da geometria da ligação contribui, não sendo necessário buscar uma determinada largura efetiva para região de atuação da componente.

Tabela 3.12 - Alma da viga submetida a tração

Programa	SRJ Tool	COP	SRJ Tool / COP
Linha 1: $F_{twb,Rd}$ [kN]	548.38	552.31	0.993
Linha 2: $F_{twb,Rd}$ [kN]	456.07	456.31	0.999
Linha 3: $F_{twb,Rd}$ [Kn]	548.38	552.31	0.993

Onde:

$F_{twb,Rd}$ → Resistência da alma da viga submetida à tração

Para a determinação da resistência da componente alma da viga tracionada, Tabela 3.12, pode ser obtida um a boa aproximação, tanto como na componente placa de extremidade submetida a flexão, pois são comuns para as duas componentes o valor das larguras efetivas. No entanto pequenas diferenças ainda existem, mas como pode ser observado na relação entre os programas comparados, se tornam insignificantes mais uma vez.

Tabela 3.13 - Distribuição plástica das forças internas

Programa	SRJ Tool	COP	SRJ Tool / COP
Linha 1 $F_{,Rd}$ [kN]	189.12	189.79	0.996
Linha 2 $F_{,Rd}$ [kN]	120.95	116.31	1.040
Linha 3 $F_{,Rd}$ [kN]	151.14	167.48	0.902

Onde:

$F_{,Rd}$ → Resistência da linha de parafuso submetido à tração

Na Tabela 3.13 pode ser observada a semelhança no valor das resistências finais de cada uma das linhas de parafuso, mostrando que o valor das resistências estão corretos. Também deve ser lembrado que para os dois programas comparados, as componentes que controlam a resistência também são as mesmas, sendo que, a componente determinante é a placa de extremidade submetida à flexão, assim reforçando cada vez mais a validação do SRJ Tool.

Tabela 3.14 - Momento resistente e momento resistente elástico

Programa	SRJ Tool	COP	SRJ Tool / COP
$M_{j,Rd}$ [kNm]	92.28	92.11	1.002
$M_{e,Rd}$ [kNm]	61.52	61.41	1.002

Tabela 3.15 - Momento resistente e momento resistente elástico da ligação em aço e mista

Programa	SRJ Tool Steel	SRJ Tool Composite
$M_{j,Rd}$ [kNm]	92,28	232,75
$M_{e,Rd}$ [kNm]	62,52	155,17

Onde:

$M_{j,Rd}$ → Momento resistente da ligação

$M_{e,Rd}$ → Momento resistente elástico da ligação

Na apresentação do momento resistente e momento resistente elástico, Tabela 3.14, é confirmado que os resultados do programa SRJ Tool são válidos para análise das propriedades geométricas das ligações semi-rígidas, alcançando uma ótima precisão em relação ao software comparado, que é amplamente usado na Europa nos projetos destas ligações.

Tabela 3.16 – Rigidez rotacional efetiva

Programa		SRJ Tool	COP	SRJ Tool / COP
Linha 1	k_{eff} [mm]	1.65	1.67	0.988
Linha 2	k_{eff} [mm]	1.31	1.30	1.008
Linha 3	k_{eff} [mm]	1.86	1.89	0.984

Onde:

k_{eff} → Rigidez rotacional efetiva

Na Tabela 3.16, estão apresentados os resultados da rigidez efetiva de cada linha de parafusos, e como pode ser observado, são resultados seguros com relação ao software de comparação. Pode ser justificada a sua precisão devido menor complexidade da determinação da rigidez, comparados com o processo de cálculo da resistência.

Tabela 3.17 – Braço de alavanca e rigidez rotacional equivalente

Programa	SRJ Tool	COP	SRJ Tool / COP
z [mm]	255.82	255.85	1.000
k_{eq} [mm]	3.48	3.50	0.994

Onde:

$z \rightarrow$ Braço de alavanca médio dos parafusos

$k_{eq} \rightarrow$ Rigidez rotacional equivalente

Na Tabela 3.17 são apresentados os valores dos braços de alavanca dos parafusos, os quais proporcionam um valor de relação entre os programas aproximadamente idênticos ao do software em comparação. Já a rigidez rotacional equivalente possui um valor com um pouco menor precisão com relação ao anteriormente comentado, mas este resultado, é um refinamento dos valores obtidos na rigidez rotacional efetiva.

Tabela 3.18 – Rigidez rotacional inicial e idealizada

Programa	SRJ Tool	COP	SRJ Tool / COP
Sj,ini [kNm/rad]	34769.59	34710.34	1.002
Sj,n [kNm/rad]	17384.80	17355.17	1.002

Tabela 3.19 – Rigidez rotacional inicial e idealizada das ligações em aço e mistas

Programa	SRJ Tool Steel	SRJ Tool Composite
Sj,ini [kNm/rad]	34769,59	121382,33
Sj,n [kNm/rad]	17384,80	60691,16

Onde:

$S_{j,ini} \rightarrow$ Rigidez rotacional inicial

$S_{j,n} \rightarrow$ Rigidez rotacional idealizada

Os resultados finais da rigidez rotacional, Tabela 3.18, sendo, inicial e idealizada, demonstram uma boa precisão, validando também a utilização desta parte da avaliação das propriedades de ligações semi-rígidas.

Tabela 3.20 - Resistência ao cisalhamento dos parafusos

Programa	SRJ Tool	COP	SRJ Tool / COP
Linha1 V_{Rd} [kN]	35.89	35.89	1.000
Linha 2 V_{Rd} [kN]	35.89	35.89	1.000
Linha 3 V_{Rd} [kN]	35.89	35.89	1.000

Onde:

$V_{Rd} \rightarrow$ Resistência da linha de parafuso submetido ao cisalhamento

Os valores que são comparados na Tabela 3.20, são idênticos, não possuindo nenhuma diferença entre seus resultados apresentados.

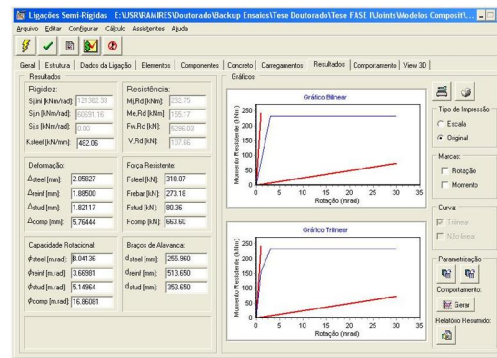


Figura 3.51 – Janela de resultados do exemplo misto

Como pode se observar nas tabelas apresentadas, os resultados comparados possuem confiabilidade suficiente para que sejam aceitos. Com isso, a utilização do SRJ Tool pode ser feita tanto na área de pesquisa, para estudos sobre as ligações semi-rígidas, ou até mesmo na prática, atuando em projetos reais, avaliando as ligações de uma forma mais detalhada, ou seja, apresentado as verdadeiras propriedades geométricas, proporcionando ao projetista maior confiabilidade no momento de elaborar um projeto estrutural. E além destas possibilidades, pode ser usado o módulo de avaliação dos custos e do material, ou mesmo assim ter um parâmetro de comparação entre muitas opções. Outra vantagem a ser ressaltada é a agilidade com que se pode trabalhar neste programa, a sua flexibilidade, a disponibilidade de recursos, sem limitações, com possibilidade de serem inseridos novos elementos em seu banco de dados.

Assim, com a certeza da confiabilidade dos resultados, e comprovada a sua versatilidade, pode-se partir para uma nova etapa, relativa a otimização de cada uma dos elementos que compõe uma ligação, assunto que será tratado no capítulo seguinte.