

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**INFLUÊNCIA DA FLEXIBILIDADE DAS LIGAÇÕES NO
PROJETO DE ESTRUTURAS METÁLICAS**

Giovana Daltrozo Barbosa

Orientador: Prof.º Ruy Carlos Ramos de Menezes

Porto Alegre
dezembro 2006

GIOVANA DALTROZO BARBOSA

**INFLUÊNCIA DA FLEXIBILIDADE DAS LIGAÇÕES NO
PROJETO DE ESTRUTURAS METÁLICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre
dezembro 2006

GIOVANA DALTROZO BARBOSA

**INFLUÊNCIA DA FLEXIBILIDADE DAS LIGAÇÕES NO
PROJETO DE ESTRUTURAS METÁLICAS**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor
orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 19 de dezembro de 2006

Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes
Dr, *University Innsbruck*, Áustria
Orientador

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Yuri Ivan Maggi (UNICENP)
Dr. Universidade de São Paulo, São Carlos

Prof. Ignacio Iturrióz (UFRGS)
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Ronald José Ellwanger (UFRGS)
Dr. Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Paulo Roberto Marcondes de Carvalho (Stabile Engenharia)
Msc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

B238i Barbosa, Giovana Daltrozo

Influência da flexibilidade das ligações no projeto de estruturas metálicas. – 2006.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Porto Alegre, BR-RS, 2006.

Orientador: Prof. Dr. Ruy Carlos Ramos de Menezes

1. Estruturas metálicas. I. Menezes, Ruy Carlos Ramos de. II. Título.

CDU – 624.014.2(043)

Aos meus pais, José Carlos e Leila e meus irmãos,
Juliano, Guilherme e Jéssica pelo carinho,
compreensão e incentivo ao meu trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Ruy Carlos Ramos de Menezes, orientador deste trabalho pela ajuda e esclarecimento de dúvidas durante o desenvolvimento deste.

Agradeço em especial ao Professor Paulo Roberto Marcondes de Carvalho pela orientação, enriquecimento pessoal e técnico a mim proporcionado. Além do seu incentivo e paciência possibilitando a minha total dedicação aos meus estudos fazendo com que fossem alcançados os objetivos deste trabalho.

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Civil pelos conhecimentos adquiridos durante o curso.

Agradeço aos meus colegas e amigos da Stabile Engenharia pelo incentivo e reconhecimento ao meu trabalho. Em especial ao colega Jonabe Prezzi dos Passos pela valiosa ajuda durante o desenvolvimento do programa computacional apresentado neste trabalho.

Agradeço aos meus colegas do curso pelo companheirismo e ajuda que possibilitaram a conclusão de várias etapas.

Agradeço aos meus amigos que compreenderam muitas vezes a minha ausência e me apoiaram incondicionalmente, contribuindo para que eu alcançasse meus objetivos.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, através de ajuda técnica ou mesmo por acreditar na minha capacidade e torcer por meu sucesso e felicidade.

Agradeço a Deus por permitir tudo isso.

Uma vida gasta cometendo erros não é mais honrada, mas é mais útil do que uma vida gasta fazendo nada.

George Bernard Shaw

RESUMO

Barbosa, Giovana Daltrozo. **Influência da Flexibilidade das Ligações no Projeto de Estruturas Metálicas**. 2006. 163 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

Este trabalho aborda ligações semi-rígidas com o objetivo de verificar a influência da flexibilidade na análise de estruturas metálicas, com o propósito de apresentar um modelo que represente o real comportamento das conexões assumindo uma situação intermediária entre totalmente rígida e totalmente flexível.

Os procedimentos empregados para determinar as propriedades destas conexões estão embasados nos métodos descritos pelo anexo J do Eurocode 3 e recomendações do BCSA/SCI.

Com intuito de automatizar o cálculo das conexões semi-rígidas foi implementado um programa computacional que fornece as propriedades necessárias das ligações entre vigas e pilares através da entrada de dados geométricos e especificações do material empregado. São abordadas ligações soldadas e ligações parafusadas com chapa de extremidade.

O trabalho apresenta, ainda, uma avaliação da redistribuição de solicitações nas estruturas de aço. Fazendo a análise de um pórtico plano empregando molas rotacionais nos nós de encontro entre vigas e pilares inserindo a rigidez rotacional obtida através dos procedimentos numéricos apresentados neste trabalho.

Esta mesma estrutura foi analisada da maneira tradicional, ou seja, considerando nós rígidos no encontro entre vigas e pilares.

Através da analogia entre os resultados obtidos pelas duas análises é possível visualizar a diferença entre a distribuição nas solicitações. Dessa forma, é possível verificar a influência da rigidez das ligações na análise das estruturas metálicas.

Palavras-chave: ligações semi-rígidas; ligações soldadas; ligações parafusadas; chapa de extremidade; estruturas metálicas.

ABSTRACT

Barbosa, Giovana Daltrozo. **Influência da Flexibilidade das Ligações no Projeto de Estruturas Metálicas**. 2006. 163 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

This work approaches semi-rigid connections with the purpose to verify the influence of connections in the analysis of steel structures, with the intention to present a model that represents the real behavior of the connections assuming an intermediate situation between totally rigid and totally pinned.

The used procedures to determine the properties of these connections are based in the described methods for the Annex J of the Eurocode 3 and BCSA/SCI.

With intention to speed the calculations of the semi-rigid connections a computational program was implemented that supplies to the necessary properties of the connections between beams and columns through the geometric data entry and specifications of the employed material. They are boarded welded connections and connections bolted with extend end plate.

The work presents, still, an evaluation of the new distribution of loads in the steel structures. Making the analysis of a plain frame using rotational springs between beams and columns inserting the gotten rotational rigidity through the presented numerical procedures in this work.

This same structure was analyzed in the traditional way, that is, considering rigid we in the meeting between beams and columns. Through the analogy it enters the results gotten for the two analyses is possible to visualize the difference enters the distribution in the requests. Of this form, it is possible to verify the influence of flexibility in the analysis of the metallic structures.

key-words: semi-rigid connections; welded connections; bolted connections; extend end plate; metallic structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: pórtico e respectivo modelo para análise.....	22
Figura 1.2: diagrama de momentos para o nó flexível e detalhe da conexão.....	22
Figura 1.3: diagrama de momentos para o nó rígido e detalhe da conexão.....	23
Figura 1.4: diagrama de momentos para o nó semi-rígido e detalhe da conexão.....	23
Figura 2.1: rotação relativa em ligações viga-coluna.....	26
Figura 2.2: curva bi-linear momento-rotação.....	28
Figura 2.3: modelo e curva $M \times \phi$, conforme Eurocode 3 [1].....	29
Figura 2.4: propriedades características do cálculo momento-rotação.....	30
Figura 2.5: curvas para obtenção da rigidez secante.....	31
Figura 2.6: gráficos para classificação da conexão.....	32
Figura 2.7: zonas críticas de uma conexão ente viga e coluna.....	36
Figura 3.1: modalidades de conexões abordadas pelo Eurocode 3 [1].....	40
Figura 3.2: largura efetiva, b_{eff} , para ligações soldadas.....	42
Figura 3.3: modos de falha para o <i>t-stub</i> conforme Eurocode 3 [1].....	46
Figura 3.4: parâmetros geométricos.....	48
Figura 3.5: relação da geometria do <i>t-stub</i> com os modos de ruptura conforme Eurocode 3 [1].....	49
Figura 3.6: modelos de linhas de ruptura isoladas e combinadas.....	49
Figura 3.7: curvas para obtenção de α segundo Eurocode 3 [1].....	53
Figura 3.8: parâmetros para mesa da coluna enrijecida conforme Eurocode 3 [1].....	58
Figura 4.1: fluxograma do programa LIGFLEX.....	61
Figura 4.2: representação para esforços de tração e compressão.....	63
Figura 4.3: layout do programa LIGFLEX para ligações soldadas.....	66
Figura 4.4: configurações disponíveis para ligações soldadas no programa LIGFLEX..	67
Figura 4.5: método da resistência potencial segundo BCSA [2].....	69
Figura 4.6: parâmetros geométricos.....	71
Figura 4.7: modos de escoamento para mesa da coluna e chapa de extremidade.....	72
Figura 4.8: modos de escoamento para porção estendida da chapa de extremidade...	72
Figura 4.9: linhas de parafusos vistas de forma isolada.....	75
Figura 4.10: linhas de parafusos atuando em grupos.....	75
Figura 4.11: esquema para determinação da resistência potencial das linhas de parafusos, segundo BCSA [2].....	80
Figura 4.12: distribuição plástica e triangular.....	81
Figura 4.13: modelo para cálculo da rigidez rotacional.....	83
Figura 4.14: layout do programa LIGFLEX para ligações parafusadas.....	85

Figura 4.15: ligações viga-pilar com chapa de altura parcial e configurações de parafusos.....	86
Figura 4.16: ligações viga-pilar com chapa de altura total e configurações de parafusos.....	87
Figura 4.17: geometria do ensaio com chapa de altura parcial.....	89
Figura 4.18: janela do programa LIGFLEX com a entrada de dados do ensaio.....	90
Figura 4.19: curva momento versus rotação do ensaio FE1.....	91
Figura 4.20: dados da geometria do ensaio para chapa de extremidade estendida.....	92
Figura 4.21: janela do programa LIGFLEX com a entrada de dados do ensaio.....	92
Figura 4.22: curva momento versus rotação do ensaio EE1.....	94
Figura 5.1: modelo com cargas distribuídas.....	95
Figura 5.2: modelo da estrutura para análise.....	96
Figura 5.3: conexão empregada no modelo.....	97
Figura 5.4: entrada de dados no LIGFLEX.....	98
Figura 5.5: distribuição das resistências na zona tracionada.....	109
Figura 5.6: distribuição das forças resultantes internas na conexão.....	112
Figura 5.7: diagrama de momentos para nós rígidos e semi-rígidos.....	125
Figura 5.8: curvas grau de rigidez x momentos.....	127
Figura A.1: escoamento da linhas de parafusos para uma mesa não enrijecida.....	134
Figura A.2: valores de α para mesa enrijecida.....	138
Figura A.3: comprimentos efetivos para chapa de extremidade.....	141
Figura B.1: configurações para ligações soldadas.....	147
Figura B.2: ligação soldada não enrijecida.....	148
Figura B.3: ligação soldada com enrijecedores horizontais.....	148
Figura B.4: ligação soldada com chapas suplementares soldadas.....	149
Figura B.5: ligação soldada com chapas suplementares parafusadas.....	149
Figura B.6: selecionando perfis.....	150
Figura B.7: declarando as solicitações de cálculo.....	150
Figura B.8: declarando as características das soldas.....	151
Figura B.9: campos habilitados para enrijecedores horizontais.....	152
Figura B.10: campos habilitados para chapa suplementar soldada.....	152
Figura B.11: campos habilitados para chapa suplementar parafusada.....	152
Figura C.1: configurações para ligações parafusadas.....	155
Figura C.2: configurações disponíveis para chapas de altura total.....	156
Figura C.3: configurações disponíveis para chapas de altura parcial.....	156
Figura C.4: entrada de dados dos enrijecedores.....	157
Figura C.5: entrada de dados da chapa de extremidade.....	157

Figura D.1: parâmetros para mesa da coluna enrijecida conforme Eurocode 3 [1].....	159
Figura E.1: pórtico analisado por Monforton e Wu [11].....	162

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: fatores para componentes i da conexão.....	57
Tabela 2: resultados experimentais chapa de altura parcial.....	88
Tabela 3: resultados experimentais chapa de altura total.....	89
Tabela 4: resultados teóricos e experimentais chapa de altura parcial.....	91
Tabela 5: resultados teóricos e experimentais chapa de altura total.....	93
Tabela 6: dados de entrada na conexão.....	98
Tabela 7: parâmetros geométricos.....	99
Tabela 8: parâmetros geométricos da porção estendida da chapa.....	103
Tabela 9: determinação da resistência potencial.....	108
Tabela 10: parâmetros para determinação da rigidez rotacional.....	113
Tabela 11: parâmetros efetivos para cada uma das linhas tracionadas.....	113
Tabela 12: dados do pórtico para análise.....	115
Tabela 13: deslocamentos obtidos pela análise com cargas distribuídas.....	123
Tabela 14: solicitações obtidas pela análise com nós semi-rígidos e cargas distribuídas.....	124
Tabela 15: solicitações obtidas pela análise com nós rígidos e cargas distribuídas.....	124
Tabela 16: reações obtidas pela análise com cargas distribuídas.....	125
Tabela 17: resultados obtidos através da variação da rigidez.....	126
Tabela 18: coeficientes e constantes para determinar os fatores.....	160
Tabela 19: momentos nos extremos das barras.....	163

LISTA DE ABREVIATURAS

A: área da seção bruta do perfil

A_v : área de corte da alma da coluna

b_{eff} : largura efetiva da alma da coluna

b_{ch} : largura da chapa de extremidade

b_{chs} : largura da chapa suplementar

b_{fb} : largura da mesa da viga

b_{fc} : largura da mesa da coluna

b_{fs} : espessura do filete de solda entre o enrijecedor e as mesas da coluna

b_s : largura do enrijecedor

b_{wch} : espessura do filete de solda entre a chapa suplementar e a alma da coluna

b_{wfb} : espessura do filete de solda entre a mesa da viga e o elemento conectado

b_{wsc} : espessura do filete de solda entre o enrijecedor e a alma da coluna

b_{wfb} : espessura do filete de solda entre a alma da viga e o elemento conectado

d_b : altura do perfil metálico da viga

d_c : altura do perfil metálico da coluna

E: módulo de elasticidade longitudinal do aço

e_1 : espaçamento entre furo e borda na direção horizontal

e_2 : espaçamento entre furo e borda na direção vertical

$F_{c,Rd}$: força resistente de cálculo à compressão

$F_{t,Rd}$: força resistente de cálculo à tração

f_{yb} : tensão de escoamento do aço da viga

f_{yc} : tensão de escoamento do aço da coluna

f_{ych} : tensão de escoamento do aço da chapa de extremidade

f_{ychs} : tensão de escoamento do aço da chapa suplementar

f_{ys} : tensão de escoamento do aço dos enrijecedores

f_{ub} : tensão de ruptura do aço da viga

f_{uc} : tensão de ruptura do aço da coluna

f_{uch} : tensão de ruptura do aço da chapa de extremidade
 f_{uchs} : tensão de ruptura do aço da chapa suplementar
 f_{up} : tensão de ruptura do aço dos parafusos
 f_{us} : tensão de ruptura do aço dos enrijecedores
 f_w : tensão de ruptura do metal solda
 g : espaçamentos entre furos na direção horizontal
 I_b : momento de inércia da seção da viga conectada
 I_c : momento de inércia da seção da coluna conectada
 L_b : comprimento da viga conectada
 L_c : comprimento da coluna conectada
 L_{eff} : comprimento efetivo do *t-stub*
 l_s : comprimento da chapa suplementar
 M_{pIRd} : momento de plastificação de cálculo
 M_{Rd} : momento resistente de cálculo
 M_{Sd} : momento fletor de cálculo
 N_{Sd} : solicitação normal de cálculo
 p_1, p_2 e s : espaçamentos entre furos na direção vertical
 P_{Ri} : resistência potencial de cálculo da linha i de parafusos
 R_b : recorte na alma da viga
 R_s : recorte nos enrijecedor
 S_j : rigidez rotacional
 t_{fb} : espessura da mesa da viga
 t_{fc} : espessura da mesa da coluna
 t_{wb} : espessura da alma da viga
 t_{wc} : espessura da alma da coluna
 t_{ch} : espessura da placa de extremidade
 t_{chs} : espessura da chapa suplementar
 t_s : espessura do enrijecedor

$V_{pl,Rd}$: força resistente de cálculo ao cisalhamento

V_{Sd} : solicitação cortante de cálculo

Z_p : módulo de resistência plástico da seção transversal da viga

α : parâmetro geométrico para avaliação do comprimento efetivo

ϕ_{Cd} : capacidade de rotação

ϕ_p : diâmetro nominal dos parafusos

θ_r : rotação relativa

γ_{M0} : fator de segurança parcial do aço, valendo 1,10

γ_{Mb} : fator de segurança parcial para conexões parafusadas, valendo 1,25

LISTA DE SIGLAS

EUROCODE: European Committee for Standardisation

BCSA: British Constructional Steel Association

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 HISTÓRICO	25
2.2 ABORDAGEM SEGUNDO EUROCODE 3	28
2.2.1 Classificação das ligações segundo Eurocode 3.....	29
2.2.1.1 Classificação segundo a rigidez rotacional	31
2.2.1.2 Classificação segundo o momento resistente	34
2.2.2 Determinação das propriedades.....	35
2.3 ABORDAGEM SEGUNDO A REVISÃO DA NBR 8800.....	37
3 ABORDAGEM PRÁTICA DO TEMA.....	39
3.1 ABORDAGEM PRÁTICA SEGUNDO O EUROCODE 3	39
3.1.1 Ligações soldadas.....	40
3.1.1.1 Momento resistente	40
3.1.1.1.1 Resistência da zona tracionada.....	40
3.1.1.1.2 Resistência da zona comprimida.....	43
3.1.1.1.3 Resistência da zona de cisalhamento.....	43
3.1.1.2 Rigidez rotacional.....	44
3.1.1.3 Capacidade de rotação	44
3.1.2 Ligações parafusadas.....	45
3.1.2.1 Momento resistente	45
3.1.2.1.1 Zona tracionada	45
3.1.2.1.2 Zona comprimida	54
3.1.2.1.3 Zona de cisalhamento	55
3.1.2.2 Rigidez rotacional	56
3.1.2.3 Capacidade de rotação.....	58
4 INFLUÊNCIA DA FLEXIBILIDADE NAS LIGAÇÕES.....	60
4.1 O PROGRAMA LIGFLEX	60
4.1.1 Metodologia de cálculo	62
4.1.1.1 Método para ligações soldadas	63
4.1.1.1.1 Resistência da zona tracionada.....	63
4.1.1.1.2 Resistência da zona comprimida.....	64
4.1.1.1.3 Resistência da zona de cisalhamento.....	65
4.1.1.1.4 Rigidez rotacional.....	66
4.1.1.1.5 Capacidade de rotação	66
4.1.1.1.6 Configurações disponíveis para ligações soldadas	66

4.1.1.1.7 Resultados e apresentação dos dados de saída	67
4.1.1.2 Método para ligações parafusadas	68
4.1.1.2.1 Resistência da zona tracionada.....	68
4.1.1.2.2 Resistência da zona comprimida.....	82
4.1.1.2.3 Resistência da zona de cisalhamento.....	82
4.1.1.2.4 Rigidez rotacional.....	82
4.1.1.2.5 Capacidade de rotação	84
4.1.1.2.6 Configurações disponíveis para ligações parafusadas	85
4.1.1.2.7 Resultados e apresentação dos dados de saída	87
4.2 DADOS EXPERIMENTAIS	88
4.2.1 Ensaio da ligação com chapa de altura parcial	89
4.2.2 Ensaio da ligação com chapa estendida	91
5 RESULTADOS E APLICAÇÕES	95
5.1 APRESENTAÇÃO DO MODELO.....	95
5.1.1 Análise considerando a flexibilidade.....	96
5.1.1.1 Determinação das propriedades da ligação.....	97
5.1.1.1.1 Geometria da conexão	98
5.1.1.1.2 Cálculo das resistências potenciais das linhas de parafusos.....	99
5.1.1.1.3 Cálculo da resistência da alma da coluna na zona comprimida.....	109
5.1.1.1.4 Cálculo da resistência da alma da coluna na zona de cisalhamento.....	110
5.1.1.1.5 Cálculo do momento resistente.....	110
5.1.1.1.6 Cálculo da rigidez rotacional.....	112
5.1.1.2 Análise do pórtico com a inserção da rigidez rotacional.....	115
5.1.1.2.1 Montagem da matriz de rigidez local das barras.....	116
5.1.1.2.2 Montagem da matriz de rigidez global das barras.....	119
5.1.1.2.3 Montagem do vetor de cargas.....	120
5.1.1.2.4 Cálculo dos deslocamentos.....	121
5.1.1.2.5 Cálculo das solicitações nos extremos das barras.....	121
5.1.1.2.6 Cálculo das reações.....	122
5.1.2 Resultados obtidos.....	123
5.1.2.1 Resultados encontrados para o pórtico com carga uniformemente distribuída..	123
5.1.2.2 Resultados encontrados para a análise do pórtico variando a rigidez.....	126
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	128
6.1 IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA LIGFLEX	128
6.2 INFLUÊNCIA DA FLEXIBILIDADE.....	129
6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131

ANEXO A - PROCEDIMENTOS PARA DETERMINAR O MOMENTO RESISTENTE SEGUNDO EUROCODE 3 [1].....	133
ANEXO B - LIGAÇÕES SOLDADAS NO PROGRAMA LIGFLEX.....	146
ANEXO C - LIGAÇÕES PARAFUSADAS NO PROGRAMA LIGFLEX.....	154
ANEXO D - EXPRESSÕES PARA DETERMINAR O PARÂMETRO α	158
ANEXO E - EXEMPLO DE ANÁLISE VARIANDO A RIGIDEZ DOS NÓS.....	161

1 INTRODUÇÃO

Uma fase importante do desenvolvimento de um projeto em estrutura metálica é direcionada aos componentes que proporcionam a união entre as peças formadoras da estrutura principal.

Os meios de ligação e o arranjo de como vão ser abordadas as forças devem ser pensados previamente de forma a otimizar o projeto aproveitando ao máximo a capacidade de resistência das conexões. Em geral, elas possuem um peso pouco significativo, mas o elevado custo de fabricação e montagem faz com que seja necessário tratá-las minuciosamente, evitando possíveis desperdícios.

Este trabalho tem por objetivo principal abordar ligações entre vigas e colunas soldadas e parafusadas com chapa de extremidade enfatizando o efeito da flexibilidade. Isto foi feito através da elaboração de um programa computacional com rotinas baseadas nos métodos de cálculo da norma europeia, Eurocode 3 [1], e através das recomendações do BCSA [2] e posteriormente, feita uma comparação entre os resultados obtidos através do programa com dados experimentais coletados de fontes bibliográficas.

O fato de considerar a flexibilidade no dimensionamento das ligações torna o processo de cálculo complexo, comparado ao método tradicional, como o exposto pela NBR 8800:1986 [3], que considera a conexão como flexível ou rígida. Entretanto, proporciona vantagens por partir de um modelo que está mais próximo do real comportamento da conexão.

Para ilustrar este comportamento da flexibilidade, cita-se um exemplo de uma conexão em um pórtico. A figura 1.1 apresenta um pórtico e seu modelo para análise cuja viga está solicitada por uma carga uniformemente distribuída.

No caso de optar por uma conexão flexível no nó destacado então teremos um diagrama de momentos conforme ilustrado na figura 1.2, no qual percebe-se que a decisão de rotular o nó implicará em uma maior solicitação da viga, observa-se o efeito através do momento fletor máximo no meio da viga M_1 .

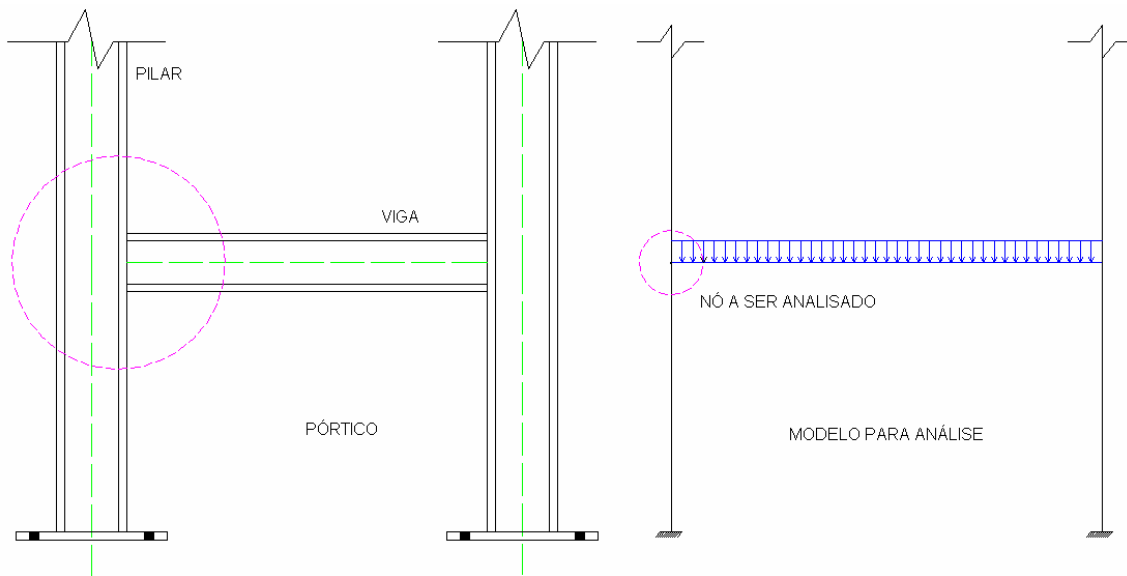


figura 1.1: pórtico e respectivo modelo para análise

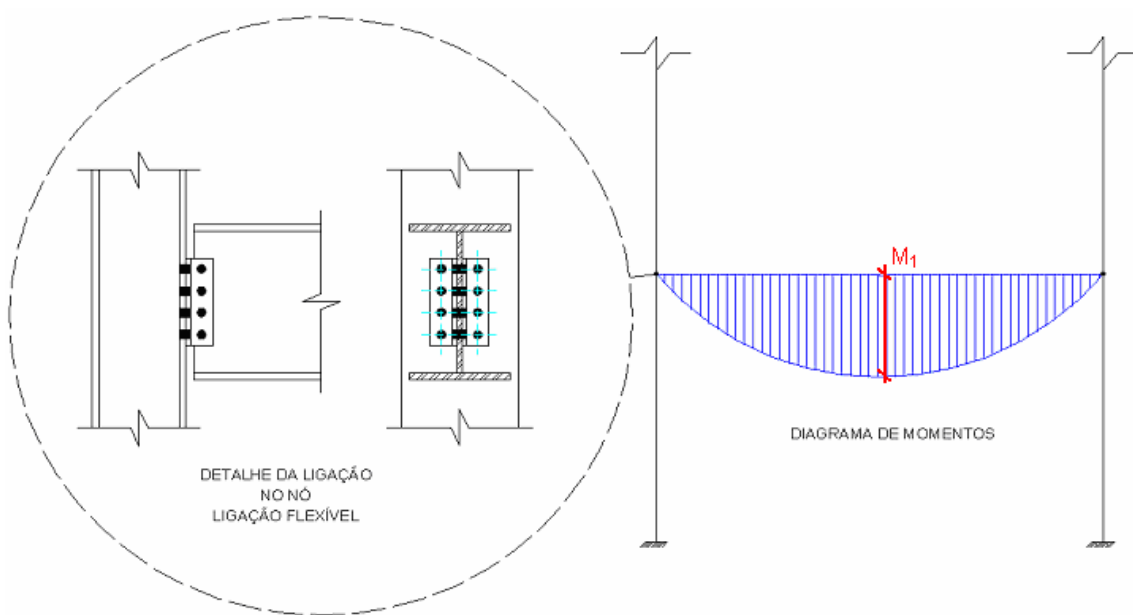


figura 1.2: diagrama de momentos para o nó flexível e detalhe da conexão

Para esta mesma configuração de carregamento e optando por uma conexão rígida haverá um alívio de solicitações nos pilares, entretanto a viga continuará altamente solicitada, no caso o momento fletor máximo no centro da viga é M_2 , conforme observado no diagrama de momentos da figura 1.3. Além disso, nessa forma tem-se um desperdício de material nos pilares.

A alternativa que melhor adapta-se a este tipo de estrutura seria uma conexão que proporcionasse uma distribuição de solicitações mais próximo ao real comportamento da conexão.

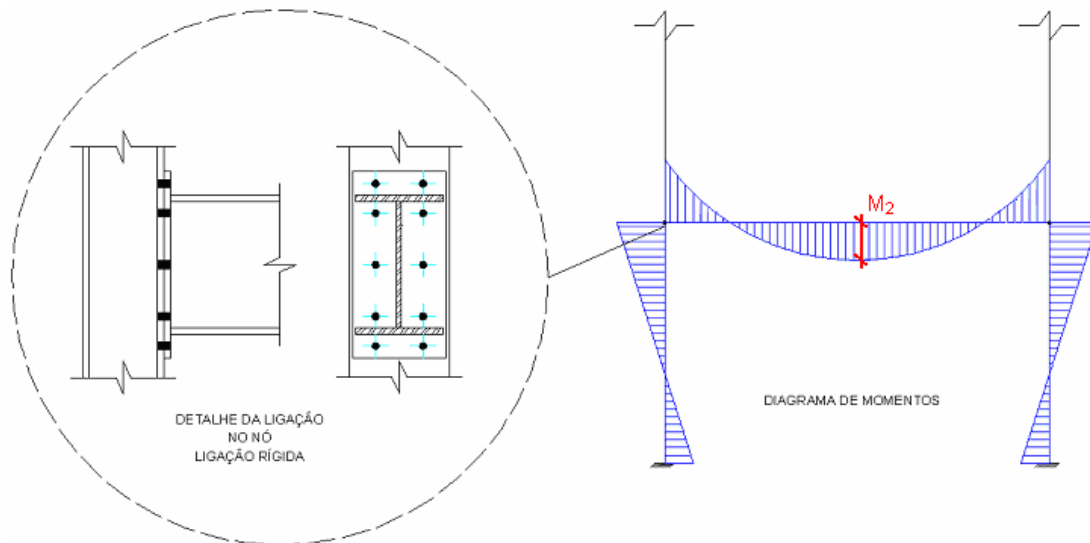


figura 1.3: diagrama de momentos para o nó rígido e detalhe da conexão

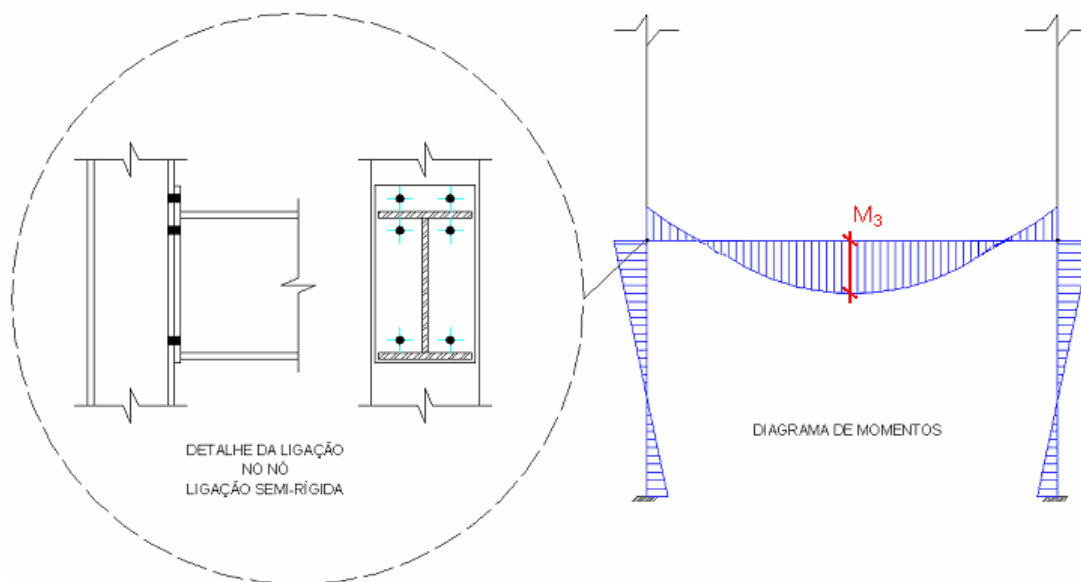


figura 1.4: diagrama de momentos para o nó semi-rígido e detalhe da conexão

Optar por uma ligação semi-rígida modificaria a distribuição dos momentos, resultando em momentos negativos menores em relação aos da ligação rígida, e momentos positivos menores em relação à ligação flexível, M_3 no centro da viga, conforme figura 1.4,

Como ponto de partida deste trabalho, o capítulo 2 trata da revisão bibliográfica na qual será apresentado um breve histórico de como o tema flexibilidade em ligações vem sendo estudado. Também será exposta a abordagem segundo os critérios do anexo J do Eurocode 3 [1] e de acordo com o projeto de revisão da NBR 8800 de setembro de 2006 [4].

No capítulo 3 serão abordados aspectos práticos, procedimentos numéricos para obtenção das propriedades necessárias para avaliar a conexão, tais como a determinação do momento resistente, rigidez rotacional e capacidade de rotação das ligações tipo viga pilar de acordo o Eurocode 3 [1].

O capítulo 4 trata da influência da flexibilidade das ligações no projeto de estruturas metálicas, ou seja, será apresentada a metodologia de cálculo empregada no programa computacional desenvolvido com a finalidade de sistematizar o dimensionamento de ligações considerando o efeito da flexibilidade. Também serão apresentados dados experimentais retirados de referências bibliográficas e comparados com os resultados obtidos pelo programa computacional.

O capítulo 5 apresenta resultados e aplicações sobre o tema. Parte-se da determinação da rigidez rotacional dos nós até a análise de um modelo em estrutura de pórtico.

O trabalho é finalizado com as considerações finais tratadas no capítulo 6 no qual são feitas as conclusões e recomendações finais pertinentes ao tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um dos motivos para elaboração deste trabalho é o fato da norma brasileira de dimensionamento de elementos de aço, NBR 8800:86 [3], não considerar o efeito da flexibilidade no cálculo das conexões. Por isto, neste capítulo serão explanados aspectos importantes de como algumas fontes bibliográficas tratam do assunto da flexibilidade e de como o assunto é abordado no projeto de revisão da NBR 8800 de setembro de 2006 [4].

2.1 HISTÓRICO

A importância de considerar a flexibilidade nas ligações vem sendo estudada há algum tempo. Por volta de 1917, Wilson e Moore [5] iniciaram os estudos em ligações com rebites.

Na década de 30, Young e Jackson [5] (1934) e Rathbun [5] (1936) estabeleceram relações entre o momento e a rotação relativa para o dimensionamento de conexões semi-rígidas tipo viga-coluna.

Em 1947, Hetchman e Johnston [5] desenvolveram vários trabalhos experimentais para determinar o momento-rotação em ligações parafusadas, rebitadas e soldadas. Na década de 50, os rebites foram substituídos por parafusos e as conexões soldadas passaram a ser mais comum.

A partir de então, foram testadas diferentes configurações de ligações semi-rígidas. Estes testes foram avaliados por Jones [5] (1980 – 1983) e por Morris e Packer [5] (1987), neles foram medidas a rotação relativa entre a linha central da coluna e um ponto na viga pertencente ao seu eixo central e que estivesse próximo à face da coluna, conforme figura 2.1.

A flexibilidade é comumente descrita pela relação entre o momento solicitante na conexão e o ângulo de rotação relativo entre os membros conectados. Na prática, as relações momento-rotação não são lineares.

Vários estudos foram feitos a fim de estabelecer modelos analíticos para determinar a relação momento – rotação relativa, $M - \theta_r$. Alguns destes modelos são brevemente descritos a seguir, de acordo com o trabalho de Bermani e Kitipornchai [5].

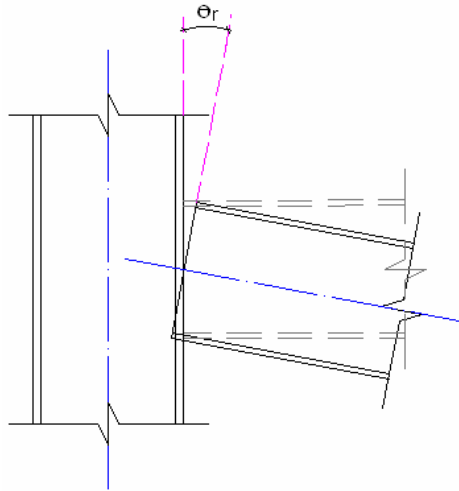


figura 2.1: rotação relativa em ligações viga-coluna

O modelo polinomial para estabelecer a relação $M - \theta_r$ foi proposto por Frye e Morris [5] em 1975. Ele representa razoavelmente bem a relação $M - \theta_r$ mas sua desvantagem é que o modelo apresenta variações para alguns valores de momento, dessa forma produzindo para estes valores rigidez negativas, o que é inaceitável.

Considerado um dos mais precisos, o modelo *B-spline* representa, razoavelmente bem, a relação $M - \theta_r$. Proposto por Jones [5] em 1982, é representado por uma curva cúbica. A grande vantagem é que este modelo evita o problema da rigidez negativa que o modelo polinomial apresenta.

No modelo exponencial, uma função exponencial, sugerida por Lui e Chen em 1986 e por Zhou [5] em 1987, é usada para representar as relações momento-curvatura das conexões. A função representativa é dada através da expressão (2.1).

$$M = \sum_{j=1}^6 C_j \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{|\theta_r|}{2 \cdot j \cdot \alpha}\right) \right] \quad (2.1)$$

Onde:

M: é o momento na conexão;

C_j : é a constante da curva;

θ_r : é a rotação relativa;

α : é um fator de escala.

A rigidez da conexão vai depender se ela estiver carregada ou não, ou seja, se ela está sendo solicitada no instante em que é medida a rigidez ao longo da curva momento – rotação relativa. Caso esteja carregada a rigidez será dada pela expressão (2.2).

Para determinar quando a conexão está carregada ou não, o momento ou rotação em cada ponto da viga é monitorado passo a passo, uma diminuição no momento ou rotação significa que a conexão não está carregada.

$$R = \frac{dM}{d\theta_r} = \sum_{j=1}^6 \frac{C_j}{2 \cdot j \cdot \alpha} \cdot \exp\left(-\frac{|\theta_r|}{2 \cdot j \cdot \alpha}\right) \quad (2.2)$$

Quando não estiver carregada a rigidez inicial será dada pela expressão (2.3).

$$R = \frac{dM}{d\theta_r} = \sum_{j=1}^6 \frac{C_j}{2 \cdot j \cdot \alpha} \quad (2.3)$$

Estabelecer a relação momento-rotação de uma conexão considerando-a não linear, na prática pode ser muito complicado, conforme visto pelos modelos propostos. Assumindo este fato, Lionberger e Weaver (1969) e Romstad e Subramanian (1970) desenvolveram um modelo usando uma curva bi-linear, ver figura 2.2.

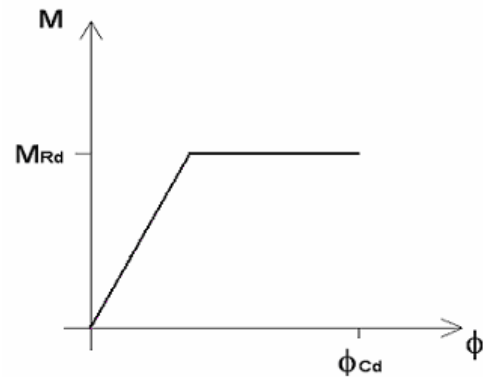


figura 2.2: curva bi-linear momento-rotação

Este critério de simplificação também é adotado pelo Eurocode 3 [1], conforme é descrito a seguir.

2.2 ABORDAGEM SEGUNDO O EUROCODE 3

O Eurocode 3 [1] propõe métodos para determinar a curva momento-rotação. Esta pode ser utilizada na análise da estrutura em função do detalhe da ligação. A abordagem é direcionada as ligações entre vigas e colunas considerando o efeito da flexibilidade, conforme mencionado anteriormente. O método parte de um modelo que funciona como uma mola rotacional conectando os eixos da coluna e da viga, conforme a figura 2.3. Este modelo para dimensionamento busca estabelecer uma relação entre o momento fletor e a rotação relativa da conexão. Esta relação é denominada momento rotação característico da ligação.

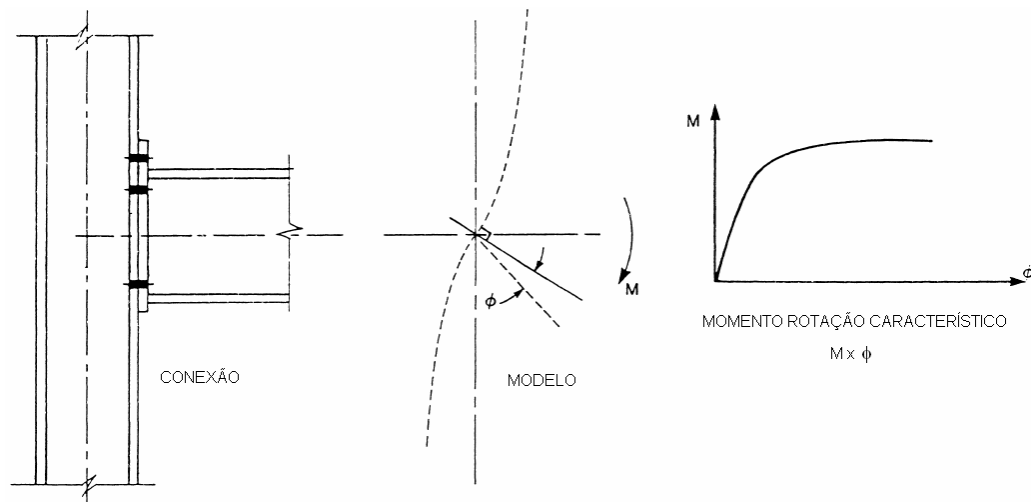


figura 2.3: modelo e curva $M \times \phi$, conforme Eurocode 3 [1]

2.2.1 Classificação das ligações segundo o Eurocode 3

O Eurocode 3 [1] classifica as ligações de acordo com a rigidez ou de acordo com a resistência.

Segundo a rigidez podem-se ter ligações flexíveis, ligações rígidas ou ligações semi-rígidas.

As ligações flexíveis não são capazes de transmitir momentos significativos. Estas ligações devem ser dimensionadas de forma que as forças atuantes nas componentes da conexão não comprometam a resistência do conjunto.

As ligações rígidas são capazes de transmitir forças e momentos devendo ser dimensionadas para que as deformações não tenham influência significativa na distribuição das forças internas e momentos na estrutura.

As conexões que se enquadram numa faixa intermediária são as ligações semi-rígidas. Elas são caracterizadas por suas componentes terem um grau de interação, baseado no dimensionamento da curva momento-rotação característico dos nós. Essa relação entre as componentes é que determina o quão a ligação está mais próxima do comportamento rígido ou totalmente flexível. Estas ligações são capazes de transmitir as forças e parcialmente os momentos.

De acordo com a resistência podem-se ter ligações flexíveis, ligações de resistência total e de resistência parcial.

Nas ligações flexíveis a capacidade de rotação deve ser suficiente para capacitar que todas as rótulas plásticas se desenvolvam com cargas abaixo do carregamento de projeto.

Nas ligações com resistência total, a capacidade de rotação é limitada, devem ser considerados efeitos acima da resistência, dimensionamento em regime plástico.

A rigidez de uma conexão com resistência total deve ser tal que, abaixo das cargas de projeto, as rotações necessárias para as rótulas plásticas não excedam a capacidade de rotação.

Nas ligações com resistência parcial, a resistência de cálculo não deve ser menor que a necessária para transmitir os momentos e forças calculadas, mas deve ser menor que a resistência das barras conectadas.

A capacidade de rotação de uma conexão de resistência parcial, na qual ocorram rótulas plásticas locais, não deve ser menor do que a necessária para que todas as rótulas plásticas se desenvolvam abaixo do carregamento de projeto.

O cálculo das características momento-rotação deve ser definido pelas três propriedades: momento resistente de cálculo M_{Rd} , rigidez rotacional S_j e capacidade de rotação ϕ_{Cd} . Estas propriedades podem ser vislumbradas nos gráficos da figura 2.4.

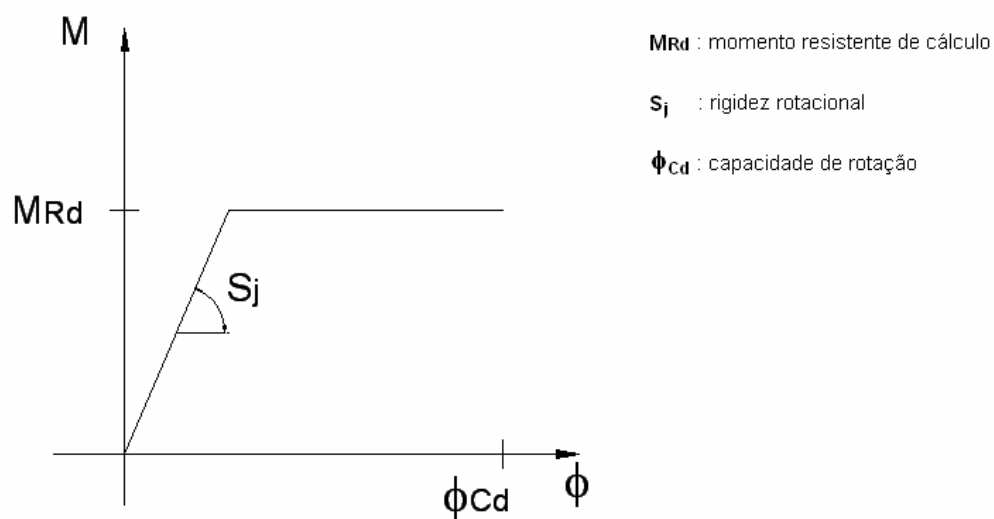


figura 2.4: propriedades características do cálculo momento-rotação

O momento resistente M_{Rd} é igual ao valor de pico do momento-rotação calculado.

Para calcular a rigidez rotacional, S_j , quando o momento-rotação for não-linear, deverá ser usado procedimento incremental de cálculo. Nos demais casos a rigidez rotacional será obtida pela rigidez secante conforme gráfico da figura 2.5.

Diferentes valores de rigidez secante podem ser usados dependendo do momento de projeto M_{Sd} para os casos de carregamento e estado limite considerados.

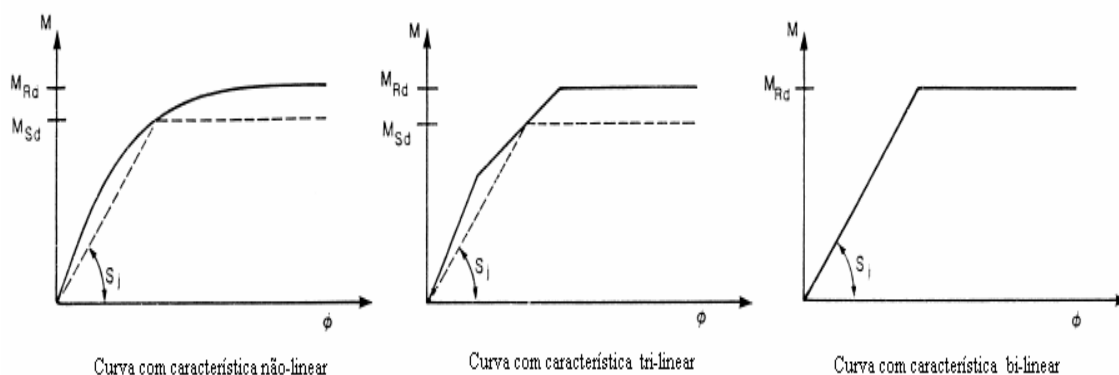


figura 2.5: curvas para obtenção da rigidez secante

O cálculo da capacidade de rotação ϕ_{Cd} de uma ligação viga-coluna deve ser tomada como a rotação alcançada pelo máximo momento resistente da conexão.

2.2.1.1 Classificação segundo a rigidez rotacional

A rigidez rotacional classifica as ligações viga-coluna em três tipos, já comentadas anteriormente: flexíveis, rígidas e semi-rígidas.

A ligação pode ser classificada como flexível se a rigidez rotacional S_j satisfizer a condição apresentada na equação (2.4).

$$S_j \leq \frac{0,5 \cdot E \cdot I_b}{L_b} \quad (2.4)$$

Onde:

S_j : rigidez secante rotacional da conexão, conforme figura 2.5;

E : módulo de elasticidade longitudinal;

I_b : é o momento de inércia da seção da viga conectada;

L_b : é o comprimento da viga conectada.

Uma conexão entre viga e coluna em uma estrutura não contra ventada pode ser considerada rígida, comparada com a viga conectada, se a porção elevada do momento-rotação característico estiver acima da linha sólida nos diagramas apropriados da figura 2.5.

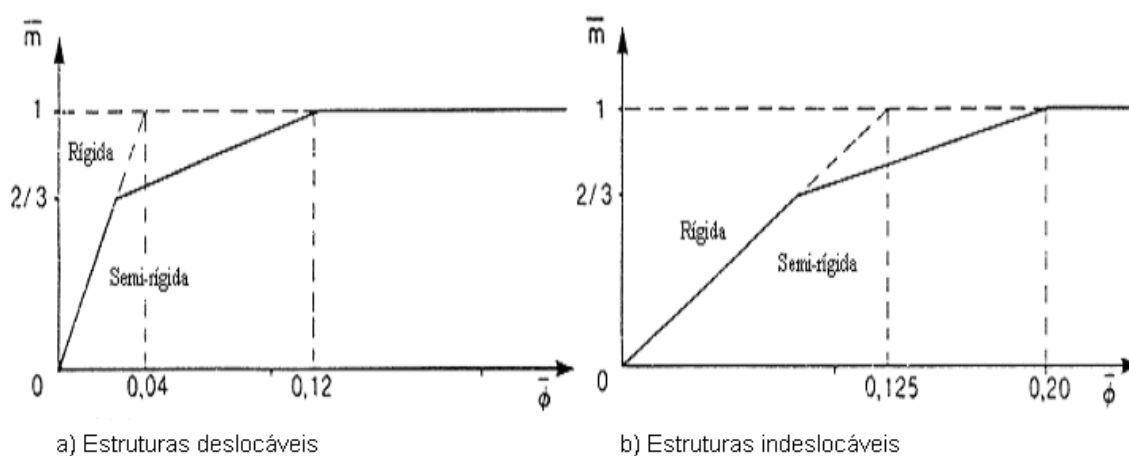


figura 2.6: gráficos para classificação da conexão

a) para estruturas deslocáveis

Quando $\bar{m} \leq \frac{2}{3}$ então $\bar{m} = 25 \cdot \bar{\phi}$

Quando $\frac{2}{3} < \bar{m} \leq 1,0$ então $\bar{m} = \frac{(25 \cdot \bar{\phi} + 4)}{7}$

b) para estruturas indeslocáveis

Quando $\bar{m} \leq \frac{2}{3}$ então $\bar{m} = 8 \cdot \bar{\phi}$

Quando $\frac{2}{3} < \bar{m} \leq 1,0$ então $\bar{m} = \frac{(20 \cdot \bar{\phi} + 3)}{7}$

Sendo \bar{m} e $\bar{\phi}$ obtidos pelas expressões (2.5) e (2.6), respectivamente.

$$\bar{m} = \frac{M}{M_{pl,Rd}} \quad (2.5)$$

$$\bar{\phi} = \frac{E \cdot I_b \cdot \phi}{L_b \cdot M_{pl,Rd}} \quad (2.6)$$

Onde:

M: é o momento solicitante de cálculo;

ϕ : capacidade de rotação da conexão;

$M_{pl,Rd}$: é o momento resistente plástico de cálculo da seção da viga, obtido conforme expressão (2.7).

Sendo:

Z_p : módulo de resistência plástico da seção transversal da viga;

f_{yb} : tensão de escoamento do aço da viga;

γ_{M0} : coeficiente de ponderação igual a 1,10.

$$M_{pl,Rd} = \frac{Z_p \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}} \quad (2.7)$$

A linha dada na figura 2.5(a) para uma estrutura deslocável pode ser usada somente para estruturas em que seja satisfeita a condição dada (2.7):

$$\frac{K_b}{K_c} \geq 0,1 \quad (2.8)$$

Onde:

K_b : é o valor médio de I_b/L_b para todas as vigas do último pavimento;

K_c : é o valor médio de I_c/L_c para todas as colunas naquele pavimento;

I_b : é o momento de inércia da seção da viga;

I_c : é o momento de inércia da seção da coluna;

L_b : é o vão da viga (centro-a-centro das colunas);

L_c : é a altura do pavimento para a coluna.

Se a porção elevada do momento-rotação característico estiver abaixo da linha sólida na curva apropriada, então a ligação é semi-rígida. A menos que também satisfaça as condições para ser classificada como flexível.

2.2.1.2 Classificação segundo o momento resistente

Em relação ao momento resistente, podem-se ter conexões: flexíveis, de resistência total e de resistência parcial.

Uma conexão entre viga e coluna pode ser classificada como flexível se o momento resistente de cálculo M_{Rd} , não for maior que 25% do momento resistente plástico de cálculo da viga conectada $M_{pl,Rd}$, contanto que se tenha a capacidade de rotação suficiente.

Uma ligação entre viga e coluna pode ser classificada como de resistência total se o momento resistente de cálculo M_{Rd} , não for menor ou igual ao momento resistente plástico de cálculo da viga conectada $M_{pl,Rd}$, contanto que se tenha a capacidade de rotação suficiente.

Uma conexão viga-coluna deve ser classificada como de resistência parcial se o momento resistente de cálculo M_{Rd} é menor do que $M_{pl,Rd}$.

2.2.2 Determinação das propriedades

A determinação do momento resistente das ligações baseia-se no método das componentes. Este método, parte da identificação de cada uma das componentes presentes na geometria da ligação e da avaliação de suas resistências individuais para que posteriormente seja feita a associação dessas componentes em série e em paralelo obtendo a curva momento – rotação.

As zonas críticas (ver figura 2.6) e as componentes são relacionadas a seguir:

a) Zona tracionada:

- Contribuição da alma da coluna;
- Contribuição da alma da viga;
- Contribuição da mesa da coluna;
- Contribuição do material conectado (chapa de topo);
- Falha da solda;
- Falha dos parafusos.

b) Zona comprimida:

- Esmagamento da alma da coluna;
- Dobramento da alma da coluna.

c) Zona de corte:

- Corte por falha do painel da alma da coluna.

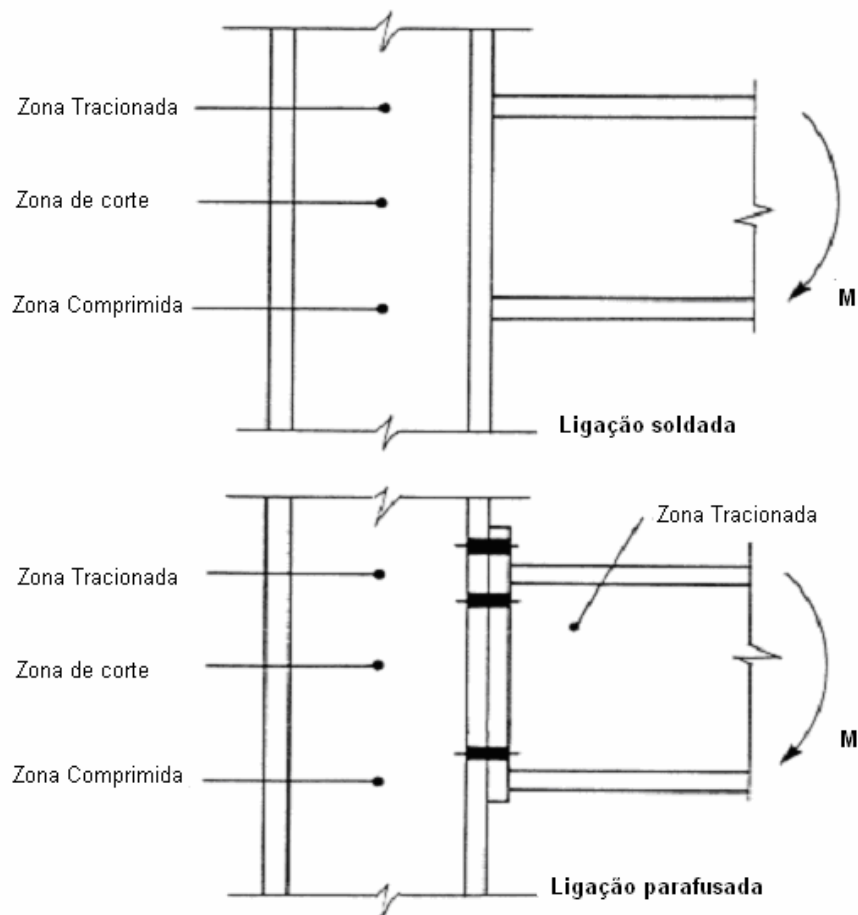


figura 2.7: zonas críticas de uma conexão ente viga e coluna

O cálculo do momento resistente de uma conexão viga-coluna deve ser tomado como a menor das resistências da zona tracionada e a zona comprimida, (reduzida se necessário da resistência ao corte do painel da alma da coluna se esta não é excedente), multiplicada pela distância entre seus centros de resistências.

A rigidez rotacional de uma conexão viga-coluna deve ser calculada baseada na flexibilidade das componentes nas zonas críticas.

A capacidade de rotação calculada de uma conexão viga-coluna deve ser determinada para capacidade de deformação plástica idêntica a da zona crítica que governa no cálculo do momento resistente da conexão.

2.3 ABORDAGEM SEGUNDO A REVISÃO DA NBR 8800

A norma brasileira NBR 8800:1986 [3] não aborda o tema da flexibilidade nas ligações. Entretanto, o projeto de revisão da NBR 8800 de setembro de 2006 [4] já apresenta procedimentos para a consideração do tema.

De acordo com a revisão da NBR 8800 [4], as ligações podem ser classificadas de acordo com sua rigidez secante, correspondente a dois terços do momento fletor resistente de cálculo da ligação, calculada a partir do diagrama momento-rotação.

Caso atenda a condição da expressão (2.9), a ligação pode ser considerada como rotulada. Caso atenda a condição (2.10) e a estrutura for indeslocável pode-se classificá-la como rígida, da mesma forma, caso atenda a condição (2.11) para estruturas deslocáveis.

O limite expresso pela equação (2.11) só é admitido para pórticos que satisfizerem a relação (2.12), caso esta não for atendida, então a ligação deverá ser considerada semi-rígida.

$$S_i \leq \frac{0,5 \cdot E \cdot I_v}{L_v} \quad (2.9)$$

$$S_i \geq \frac{8 \cdot E \cdot I_v}{L_v} \quad (2.10)$$

$$S_i \geq \frac{25 \cdot E \cdot I_v}{L_v} \quad (2.11)$$

Onde:

E: é o módulo de elasticidade longitudinal;

I_v : momento de inércia da seção transversal da viga;

L_v : comprimento da viga.

$$\frac{K_v}{K_p} \geq 0,1 \quad (2.12)$$

O valor de K_v é obtido pela relação entre I_v/L_v para todas as vigas no topo do andar e K_p é o valor médio de I_p/L_p para todos os pilares do andar da ligação analisada. Sabendo que:

I_p : momento de inércia da seção transversal do pilar;

L_p : comprimento do pilar no respectivo andar.

Ressalta-se que estas considerações são válidas para a análise elástica e que em qualquer um dos casos citados a ligação pode ser admitida como semi-rígida.

Fazendo uma analogia entre a classificação das ligações abordada pela revisão da NBR 8800 [4] e o Eurocode 3 [1], segundo a rigidez, é possível visualizar a semelhança entre as duas normas estabelecendo faixas de valores para a rigidez rotacional como critério para classificação das conexões.

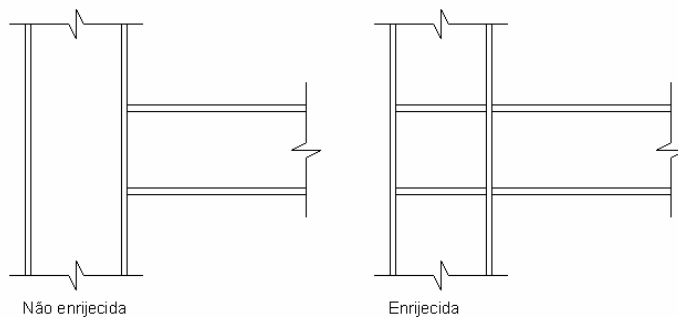
3 ABORDAGEM PRÁTICA DO TEMA

No capítulo anterior foram abordados embasamentos teóricos para tratar da questão da flexibilidade. Neste capítulo, serão retratados aspectos práticos, ou seja, como são feitos, de fato, os procedimentos numéricos para obtenção da capacidade de rotação das ligações entre viga e coluna de acordo com as normas mencionadas anteriormente.

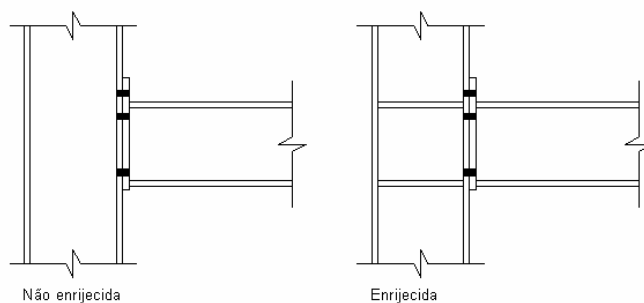
3.1 ABORDAGEM PRÁTICA SEGUNDO O EUROCODE 3

De acordo com o anexo J do Eurocode 3 [1] as ligações entre vigas e colunas podem ser soldadas ou parafusadas. A alma da coluna pode ser enrijecida ou não. Caso a conexão seja parafusada, a chapa de extremidade na união entre a viga e a coluna poderá ser estendida ou de altura parcial. A seguir são apresentadas os tipos de ligações citadas para a análise de acordo com o Eurocode 3 [1].

LIGAÇÕES SOLDADAS



LIGAÇÕES PARAFUSADAS COM PLACA DE EXTREMIDADE ESTENDIDA



LIGAÇÕES PARAFUSADAS COM PLACA DE EXTREMIDADE
COM ALTURA PARCIAL

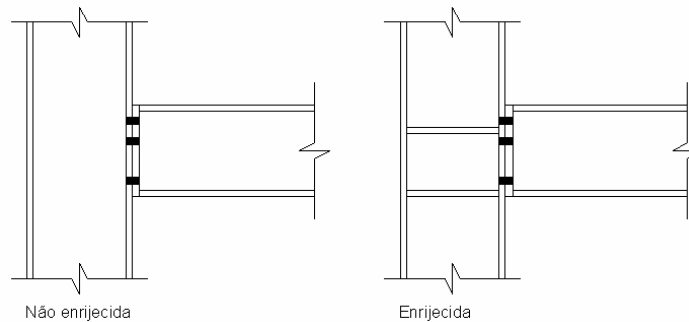


figura 3.1: modalidades de conexões abordadas pelo Eurocode 3 [1]

3.1.1 Ligações soldadas

Para o cálculo das ligações soldadas deverão ser determinados o momento resistente, a rigidez rotacional e a capacidade de rotação da conexão.

3.1.1.1 Momento resistente

Para determinar o momento resistente devem ser consideradas as três zonas críticas da conexão: a zona tracionada, comprimida e a de cisalhamento.

3.1.1.1.1 Resistência da zona tracionada

A resistência da região tracionada da conexão vai depender se a mesa e a alma da coluna são enrijecidas ou não.

Caso a mesa da coluna não seja enrijecida a resistência será obtida pela equação 3.1. para perfis laminados e pela equação 3.2 para perfis soldados.

$$F_{t,Rd} = \frac{f_{yb} \cdot t_{fb} \cdot (t_{wc} + 2 \cdot r_c) + 7 \cdot f_{yc} \cdot t_{fc}^2}{\gamma_{M0}} \quad (3.1)$$

$$F_{t,Rd} = \frac{f_{yb} \cdot t_{fb} \cdot (t_{wc} + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_c) + 7 \cdot f_{yc} \cdot t_{fc}^2}{\gamma_{M0}} \quad (3.2)$$

Caso a resistência obtida por (3.1) ou (3.2) não satisfaça a condição expressa pela equação (3.3), então deve-se enrijecer a mesa da coluna.

$$F_{t,Rd} \geq \frac{0,7 \cdot f_{yb} \cdot t_{fb} \cdot b_{fb}}{\gamma_{M0}} \quad (3.3)$$

Onde:

f_{yb} : tensão de escoamento do aço da viga;

t_{fb} : espessura da mesa da viga;

t_{wc} : espessura da alma da viga;

r_c : raio de concordância do perfil laminado;

f_{yc} : tensão de escoamento do aço da coluna;

t_{fc} : espessura da mesa da coluna;

a_c : garganta de solda da união entre mesas e alma da coluna para perfis soldados;

a_b : garganta de solda da união entre mesas e alma da viga para perfis soldados;

b_{fb} : largura da mesa da viga;

γ_{M0} : coeficiente de ponderação igual a 1,10.

A resistência da alma é dada pela equação (3.4), na qual a largura efetiva b_{eff} será determinada de formas diferentes, dependendo se o perfil for laminado, equação (3.5), ou se for soldado, equação (3.6).

$$F_{t,Rd} = \frac{f_{yc} \cdot t_{wc} \cdot b_{eff}}{\gamma_{M0}} \quad (3.4)$$

$$b_{eff} = t_{fb} + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_b + 5 \cdot (t_{fc} + r_c) \quad (3.5)$$

$$b_{eff} = t_{fb} + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_b + 5 \cdot (t_{fc} + \sqrt{2} \cdot a_c) \quad (3.6)$$

Sendo b_{eff} a largura efetiva dada pelo comprimento referente à dispersão de tensões de 45°, ou seja, na proporção de 1:1 na alma da viga e de 1:2,5 na coluna, conforme a figura (3.2). Esta dispersão de tensões que o Eurocode 3 [1] apresenta está relacionada à região da conexão afetada pela força atuante na mesa da viga através da figura (3.2) visualiza-se o modo como a distribuição é feita nas componentes da ligação.

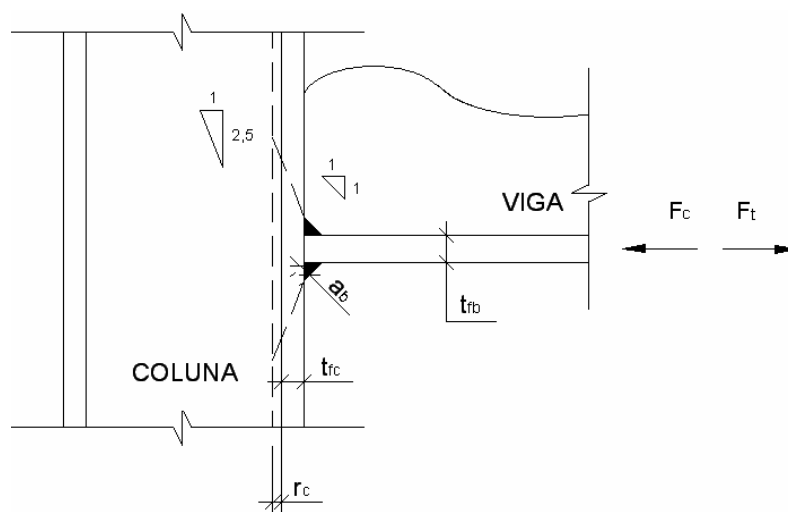


figura 3.2: largura efetiva, b_{eff} , para ligações soldadas

Adicionalmente, podem ser inseridas placas suplementares para enrijecer a alma da coluna, isto implicará na alteração da espessura efetiva da região que será acrescida de acordo com a forma de adesão entre as superfícies e o número de placas adicionadas.

3.1.1.1.2 Resistência da zona comprimida

A resistência da zona comprimida será determinada com base na avaliação da alma da coluna. A resistência é apresentada pela expressão (3.7).

$$F_{c,Rd} = \frac{f_{yc} \cdot t_{wc} \cdot (1,25 - 0,5 \cdot \gamma_{M0} \cdot \sigma_{n,Ed} / f_{yc}) \cdot b_{eff}}{\gamma_{M0}} \quad (3.7)$$

Na equação (3.7), o termo $\sigma_{n,Rd}$ é a máxima tensão normal de compressão na alma da coluna, devido a solicitação axial e ao momento fletor.

Nesta etapa dos cálculos, também deverá ser incluída a verificação da alma da coluna à flambagem, avaliando se é ou não necessário enrijecer a alma com placas suplementares, conforme já comentado no item 3.1.1.1.1.

3.1.1.1.3 Resistência da zona de cisalhamento

A resistência da zona de cisalhamento da alma de uma coluna não enrijecida é dada por (3.8).

$$V_{pl,Rd} = \frac{f_{yc} \cdot A_v / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} \quad (3.8)$$

Sendo A_v a área de corte da alma da coluna.

Para enrijecer a coluna e aliviar a ação do cisalhamento, é possível inserir na alma da coluna enrijecedores diagonais. Estes deverão ser dimensionados para que resistam as forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga.

3.1.1.2 Rigidez rotacional

A rigidez rotacional de uma conexão soldada é obtida pela expressão (3.9).

$$S_j = \frac{E \cdot (h_b - t_{fb})^2 \cdot t_{wc}}{\sum \frac{1}{k_i} \cdot \left(\frac{F_i}{F_{i,Rd}} \right)^2} \quad (3.9)$$

Nesta expressão k_i , F_i e $F_{i,Rd}$ são, respectivamente, o fator de rigidez, a força e a resistência devido ao momento solicitante em cada uma das componentes i que compõem a ligação, apresentadas no item 2.2.2 deste trabalho. h_b é a altura da alma da viga.

De acordo com o Eurocode 3 [1], os fatores k_i são os seguintes:

$k_i = 0,24$ para a alma da coluna na zona de cisalhamento;

$k_i = 0,8$ para a alma da coluna na zona tracionada;

$k_i = 0,8$ para a alma da coluna na zona comprimida;

$k_i = \infty$ para elementos enrijecidos.

3.1.1.3 Capacidade de rotação

O Eurocode 3 [1] considera que para ligações soldadas dimensionadas segundo os critérios já expostos, a capacidade de rotação é sempre $\phi_{Cd} = 0,015$ radianos. Este é um valor adotado como padrão pelo Eurocode [1] para ligações soldadas e não varia com a geometria ou qualquer outro fator da conexão.

3.1.2 Ligações parafusadas

Antes de introduzir os procedimentos práticos para dimensionamento de conexões viga - coluna parafusadas, faz-se necessário salientar as limitações para a aplicabilidade do Eurocode 3 [1] estabelecidas no anexo J . As limitações são as seguintes:

- todas as conexões viga-coluna possuem apenas dois parafusos por linha;
- a porção estendida da chapa de extremidade pode ter apenas uma linha de parafusos;
- é considerado que tratam-se apenas de ligações entre vigas e colunas, com a viga apoiada na mesa coluna.

As propriedades a determinar para o dimensionamento das conexões parafusadas são as mesmas das conexões soldadas, entretanto calculadas de maneira diferente.

3.1.2.1 Momento resistente

Para determinar o momento resistente da conexão também é necessário que se analisem as três zonas críticas já citadas no caso das ligações soldadas. São recomendados pelo Eurocode 3 [1] dois procedimentos de cálculo que indicam passo a passo como determinar o momento resistente. Entretanto, estes procedimentos estão explanados no anexo A deste trabalho.

3.1.2.1.1 Zona tracionada

Para a zona tracionada deverão ser determinadas as resistências da mesa da coluna, chapa de extremidade, alma da coluna, alma e mesa da viga.

Para determinar a resistência da mesa da coluna e da chapa de extremidade utiliza-se o método do *equivalent t-stub*. Este método considera três mecanismos diferentes para o cálculo da resistência na região. Estes mecanismos estão ilustrados na figura (3.3) e são chamados modos 1,2 e 3.

O modelo *t-stub* é um elemento em forma de “T” que é ligado de dois em dois às mesas através da linha média entre uma ou mais linhas de parafusos.

A ruptura da ligação dos t-stubs é associada a três mecanismos de colapso, representados pelos modos 1, 2 e 3. Estes apresentam possíveis formações de rótulas plásticas.

O modo 1 é o que retrata o escoamento completo da mesa, e a resistência é dada pela expressão (3.10). Neste modo de colapso ocorre a formação de quatro rótulas plásticas, duas localizadas no eixo dos parafusos e outras duas no início do raio de concordância do perfil.

O modo 2 trata da ruptura do parafuso com o escoamento da mesa, e a resistência é obtida conforme a expressão (3.11). Ocorre a formação de duas rótulas plásticas correspondentes à ligação entre a mesa e a alma do *t-stub*.

E finalmente, o modo 3 compreende apenas a ruptura do parafuso e a resistência é dada pela expressão (3.12).

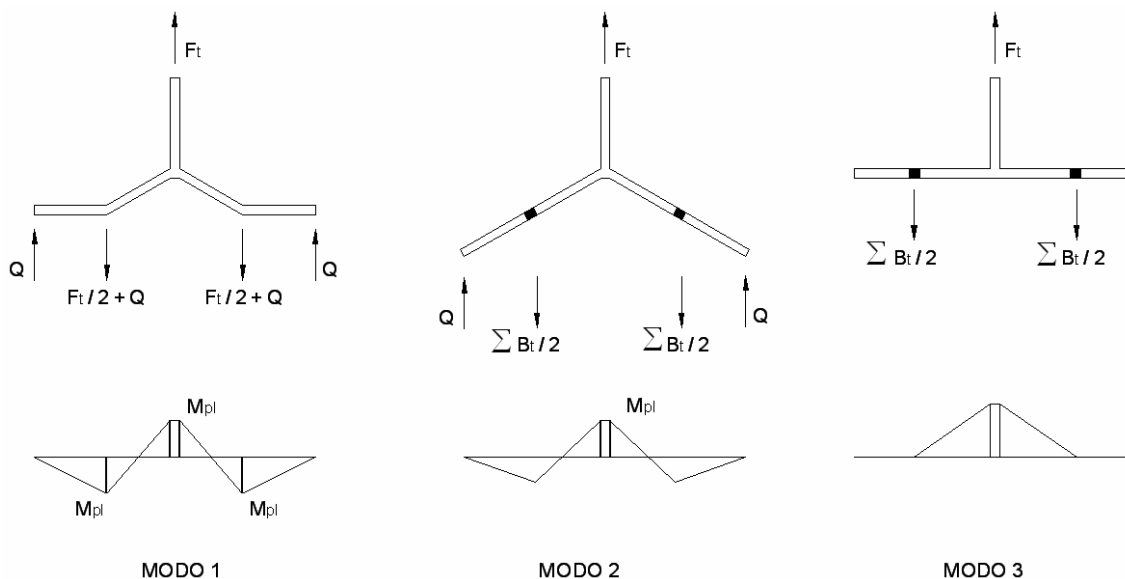


figura 3.3: modos de falha para o *t-stub* conforme Eurocode 3 [1]

$$F_{t,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,Rd}}{m} \quad (3.10)$$

$$F_{t,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,Rd} + n \cdot \sum B_{t,Rd}}{m + n} \quad (3.11)$$

$$F_{t,Rd} = \sum B_{t,Rd} \quad (3.12)$$

Na figura (3.3), Q é a força de alavanca (“*prying action*”) que produz o momento fletor e $M_{pl,Rd}$ é o momento de plastificação da ligação. Esta força é proveniente da flexão dos flanges dos *t-stub*. Dessa forma, para o equilíbrio de forças, os parafusos deverão estar sendo solicitados às forças externas e forças de alavanca.

Nas expressões (3.10) a (3.12), são apresentados alguns parâmetros:

$\sum B_{t,Rd}$: é a soma de todas as forças de tração de cálculo para os parafusos de cada *t-stub*;

$M_{pl,Rd}$: é o momento plástico resistente de cálculo dado pela expressão (3.13);

$$M_{pl,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff} \cdot t^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.13)$$

Onde:

t : é a espessura da mesa do *t-stub*;

f_y : tensão de escoamento do aço;

L_{eff} : é o comprimento efetivo referente às linhas de parafusos, que será apresentado adiante neste trabalho;

m e e : são parâmetros geométricos dados conforme a figura (3.4);

n : menor valor de e , referente à chapa de extremidade ou a mesa da coluna;

γ_{M0} : fator de segurança parcial do aço, valendo 1,10.

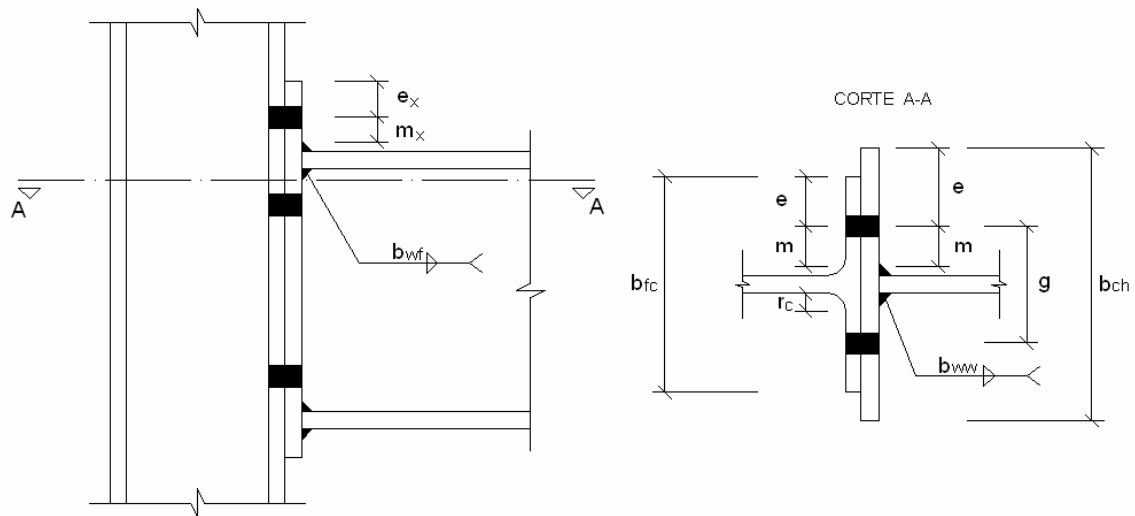


figura 3.4: parâmetros geométricos

Segundo o Eurocode 3 [1], no caso do colapso ser caracterizado pelo modo 1, a largura efetiva é dada pelo menor valor calculado para formas circulares. Já para o modo 2, a largura efetiva a ser adotada corresponde às formas não circulares.

A relação entre a geometria e o modo de falha da conexão é determinada através da figura (3.5), onde o parâmetro β é obtido pela expressão (3.14) e λ pela (3.15).

$$\beta = \frac{4 \cdot M_{pl,Rd}}{m \cdot \sum B_{t,Rd}} \quad (3.14)$$

$$\lambda = \frac{n}{m} \quad (3.15)$$

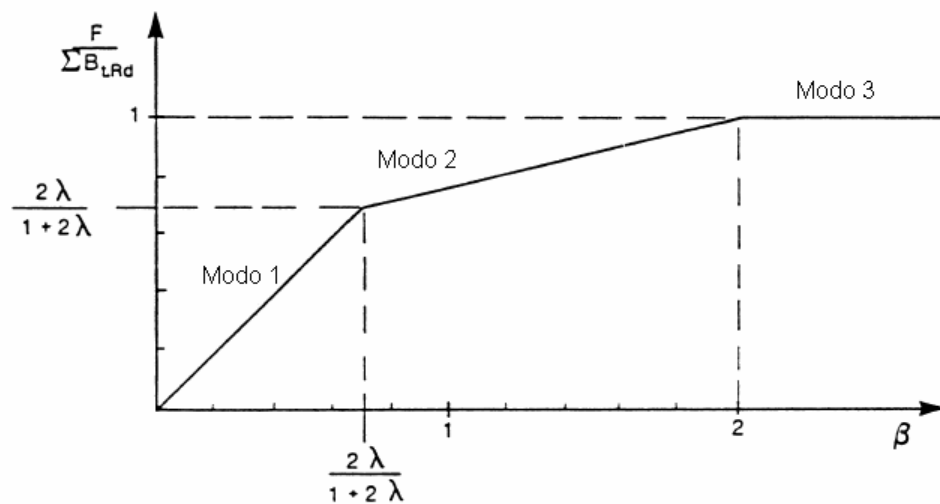


figura 3.5: relação da geometria do *t-stub* com os modos de ruptura conforme Eurocode 3 [1]

O comprimento efetivo, L_{eff} , é determinado considerando várias possibilidades de formação de linhas de plastificação e será sempre obtido pelo menor valor para cada forma de falha, analisadas de forma isolada em cada linha ou pelo efeito das linhas combinadas.

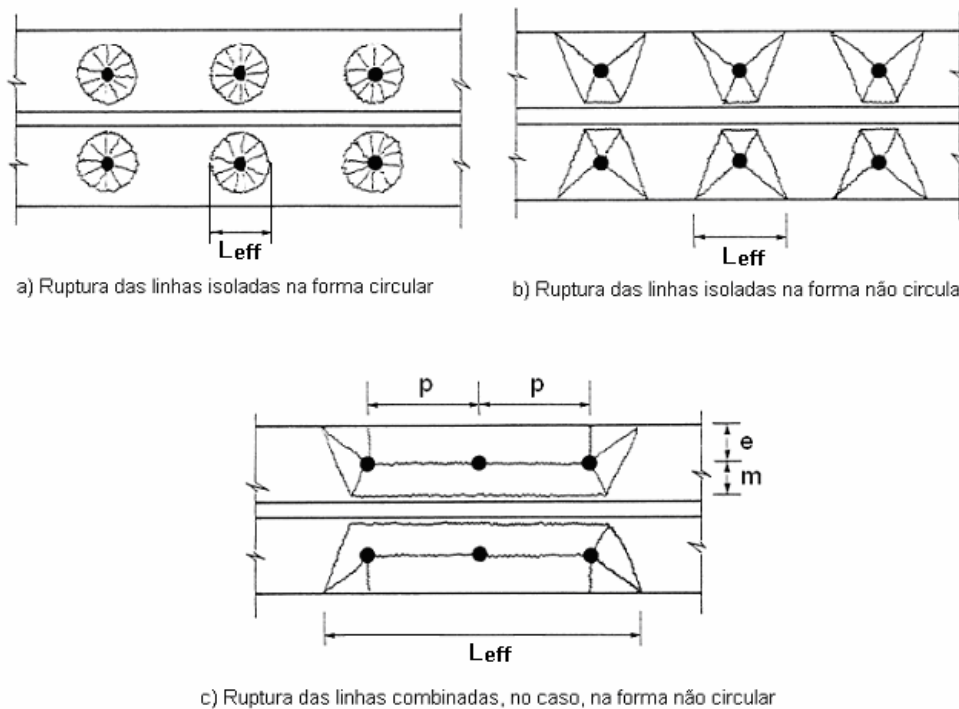


figura 3.6: modelos de linhas de ruptura isoladas e combinadas

Quando houver mais de uma linha de parafusos na região tracionada (sem enrijecimento), conforme figura (3.6).

Quando estiver se referindo a mesa da coluna, então o l_{eff} deverá ser obtido conforme as expressões a seguir:

a) para linhas de parafusos internas

$$L_{eff} = p \quad (3.16)$$

$$L_{eff} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e \quad (3.17)$$

$$L_{eff} = 2 \cdot \pi \cdot m \quad (3.18)$$

b) para linhas de parafusos externas

$$L_{eff} = 0,5 \cdot p + 2 \cdot m + 0.625 \cdot e \quad (3.19)$$

$$L_{eff} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e \quad (3.20)$$

$$L_{eff} = 2 \cdot \pi \cdot m \quad (3.21)$$

Sendo que as expressões (3.16) e (3.19) serão empregadas quando se estiver tratando das linhas de parafusos combinadas.

Os comprimentos efetivos para a chapa de extremidade variam um pouco em relação aos da mesa da coluna, conforme expresso a seguir:

a) para parafusos na extremidade da mesa tracionada da viga

$$L_{\text{eff}} = 0,5 \cdot b_{\text{ch}} \quad (3.22)$$

$$L_{\text{eff}} = 0,5 \cdot g + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x \quad (3.23)$$

$$L_{\text{eff}} = 4 \cdot m_x + 1,25 \cdot e_x \quad (3.24)$$

$$L_{\text{eff}} = 2 \cdot \pi \cdot m_x \quad (3.25)$$

b) para linha de parafusos abaixo da mesa tracionada da viga

$$L_{\text{eff}} = \alpha \cdot m \quad (3.26)$$

$$L_{\text{eff}} = 2 \cdot \pi \cdot m \quad (3.27)$$

c) para linhas de parafusos internas

$$L_{\text{eff}} = p \quad (3.28)$$

$$L_{\text{eff}} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e \quad (3.29)$$

$$L_{\text{eff}} = 2 \cdot \pi \cdot m \quad (3.30)$$

d) para linhas de parafusos internas

$$L_{\text{eff}} = 0,5 \cdot p + 2 \cdot m + 0,625 \cdot e \quad (3.31)$$

$$L_{\text{eff}} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e \quad (3.32)$$

$$L_{\text{eff}} = 2 \cdot \pi \cdot m \quad (3.33)$$

Sendo que as expressões (3.28) e (3.31) serão empregadas quando se estiver tratando das linhas de parafusos combinadas.

Para obter o comprimento efetivo referente a chapa de extremidade faz-se necessário, em alguns casos, empregar o parâmetro α determinado através do ábaco da figura (3.7).

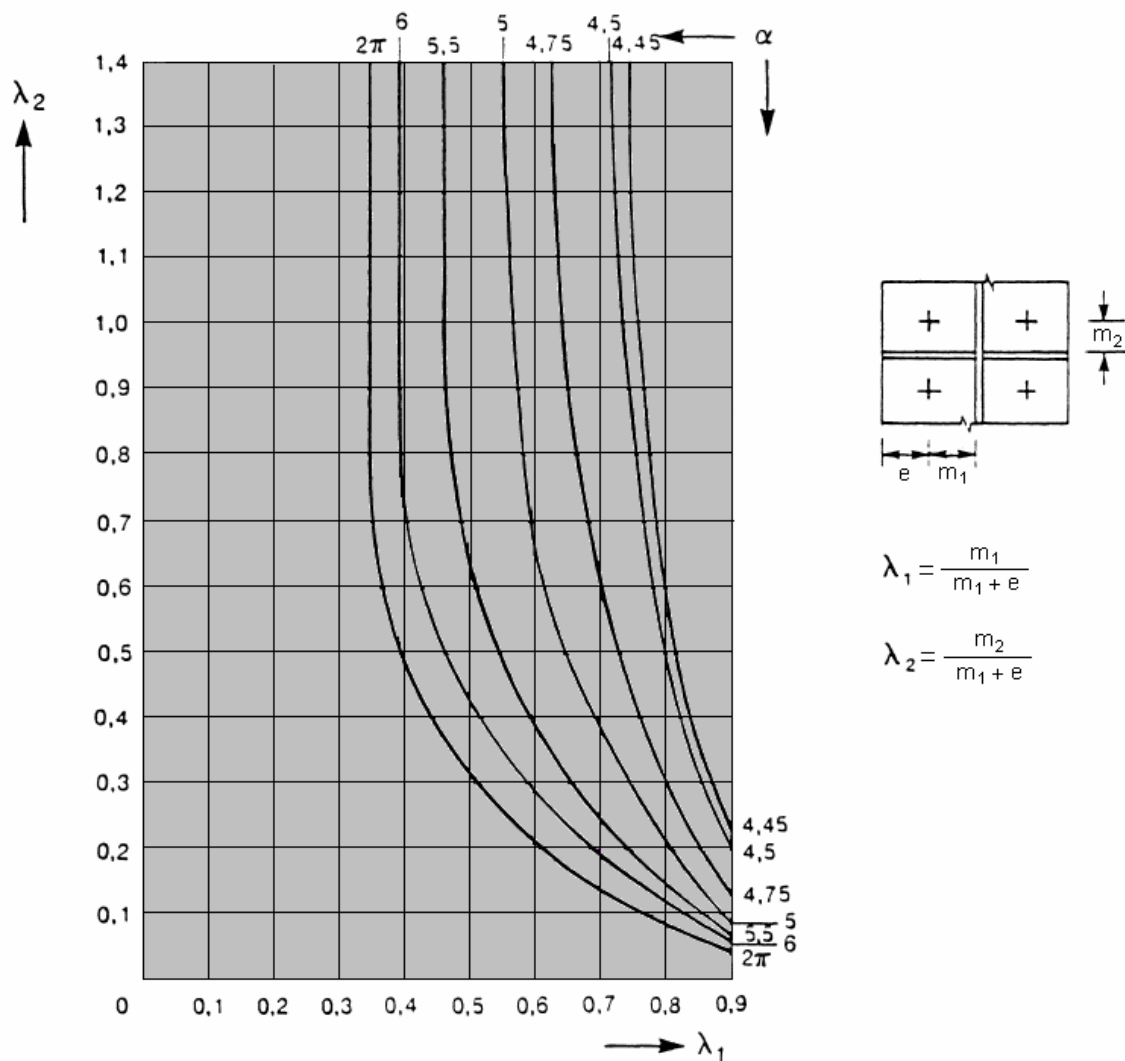


figura 3.7: curvas para obtenção de α segundo Eurocode 3 [1]

A resistência à tração da alma da coluna é obtida através da expressão (3.34).

$$F_{t,Rd} = \frac{f_{yc} \cdot t_{wc} \cdot b_{eff}}{\gamma_{M0}} \quad (3.34)$$

Onde:

t_{wc} : é a espessura da alma da coluna;

f_{yc} : tensão de escoamento do aço da coluna;

b_{eff} : é a largura efetiva da alma da coluna à tração, no caso, deverá ser igual ao comprimento efetivo da componente *t-stub* referente a mesa da coluna.

A resistência à tração da alma da viga é obtida através da expressão (3.35).

$$F_{t,Rd} = \frac{f_{yb} \cdot t_{wb} \cdot b_{eff}}{\gamma_{M0}} \quad (3.35)$$

Onde:

t_{wb} : é a espessura da alma da viga;

f_{yb} : tensão de escoamento do aço da viga;

b_{eff} : é a largura efetiva da alma da viga à tração, no caso, deverá ser igual ao comprimento efetivo da componente *t-stub* referente a chapa de extremidade.

3.1.2.1.2 Zona comprimida

A resistência da zona comprimida será determinada com base na avaliação da alma da coluna. De maneira análoga às ligações soldadas, diferenciando-se apenas no critério de determinação da largura efetiva b_{eff} , a resistência é apresentada na expressão (3.36).

$$F_{c,Rd} = \frac{f_{yc} \cdot t_{wc} \cdot (1,25 - 0,5 \cdot \gamma_{M0} \cdot \sigma_{n,Ed} / f_{yc}) \cdot b_{eff}}{\gamma_{M0}} \quad (3.36)$$

Na expressão (3.36), o termo $\sigma_{n,Ed}$ é a máxima tensão normal de compressão de cálculo na alma da coluna, devido a solicitação axial e ao momento fletor.

Para as ligações parafusadas com chapa de extremidade, a largura efetiva é obtida da mesma forma que para as conexões soldadas, porém deverá ser adicionada a espessura da chapa de extremidade a espessura da placa de extremidade na dispersão de tensões 1:1, conforme as expressões (3.37), para seções laminadas, e (3.38) para seções soldadas.

$$b_{\text{eff}} = t_{\text{fb}} + 2 \cdot t_{\text{ch}} + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_{\text{b}} + 5 \cdot (t_{\text{fc}} + r_{\text{c}}) \quad (3.37)$$

$$b_{\text{eff}} = t_{\text{fb}} + 2 \cdot t_{\text{ch}} + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_{\text{b}} + 5 \cdot (t_{\text{fc}} + \sqrt{2} \cdot a_{\text{c}}) \quad (3.38)$$

Onde:

f_{yb} : tensão de escoamento do aço da viga;

t_{fb} : espessura da mesa da viga;

t_{wc} : espessura da alma da viga;

t_{ch} : espessura da chapa de extremidade;

r_{c} : raio de concordância do perfil laminado;

f_{yc} : tensão de escoamento do aço da coluna;

t_{fc} : espessura da mesa da coluna;

a_{c} : garganta de solda da união entre mesas e alma da coluna para perfis soldados;

a_{b} : garganta de solda da união entre mesas e alma da viga para perfis soldados.

3.1.2.1.3 Zona de cisalhamento

A resistência da zona de cisalhamento será determinada com base na avaliação da alma da coluna. De maneira análoga às ligações soldadas pela expressão (3.39).

$$V_{\text{pl,Rd}} = \frac{f_{\text{yc}} \cdot A_{\text{v}} / \sqrt{3}}{\gamma_{\text{M0}}} \quad (3.39)$$

Sendo A_v a área de corte da alma da coluna, expressão (3.40).

$$A_v = A - 2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc} + (t_{wc} + 2 \cdot r_c) \quad (3.40)$$

Onde:

A: área da seção da coluna;

b_{fc} : largura da mesa da coluna;

t_{fc} : espessura da mesa da coluna;

t_{wc} : espessura da alma da coluna;

r_c : raio de concordância da coluna.

Para enrijecer a coluna e aliviar a ação do cisalhamento, é possível inserir na alma da coluna enrijecedores diagonais. Estes deverão ser dimensionados para que resistam as forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga.

3.1.2.2 Rigidez rotacional

A rigidez rotacional de uma conexão parafusada é obtida através da combinação da rigidez das respectivas componentes associadas como molas em série e em paralelo. E será obtida pela expressão (3.41).

$$S_j = \frac{E \cdot h_1^2 \cdot t_{wc}}{\sum \frac{\mu_i}{k_i} \cdot \left[\frac{F_i}{F_{i,Rd}} \right]^2} \quad (3.41)$$

Onde:

h_1 : é a distância da primeira linha de parafuso abaixo da mesa tracionada da viga até o centro de resistência da zona comprimida (linha média da mesa inferior da viga);

μ_i : é o fator de modificação;

k_i : é o fator de rigidez da componente i;

F_i : é a força na componente i devido ao momento M;

$F_{i,Rd}$: é a resistência de cálculo da componente i.

Os fatores k_i e μ_i são dados conforme a tabela 1.

Tabela 1: fatores para componentes i da conexão

Componente i	k_i	μ_i
1 - Zona de corte alma da coluna	0,24	1,00
2 - Zona tracionada alma da coluna	0,80	1,00
3 - Zona comprimida alma da coluna	0,80	1,00
4 - Zona tracionada mesa da coluna	eq. (3.42)	eq. (3.45)
5 - Zona tracionada parafusos	eq. (3.43)	eq. (3.45)
6 - Zona tracionada chapa de extremidade	eq. (3.44)	eq. (3.45)

$$k_4 = \frac{t_{fc}^3}{4 \cdot m^2 \cdot t_{wc}} \quad (3.42)$$

$$k_5 = \frac{2 \cdot A_s}{\ell_b \cdot t_{wc}} \quad (3.43)$$

$$k_6 = \frac{t_{ch}^3}{12 \cdot \lambda_2 \cdot m^2 \cdot t_{wc}} \quad (3.44)$$

Onde:

A_s : é a área da seção transversal do parafuso;

ℓ_b : é o comprimento total do aperto (espessura do material adicional como arruelas);

t_{ch} : espessura da chapa de extremidade;

λ_2 : parâmetro obtido por $\lambda_2 = \frac{m_2}{m_1 + e}$ conforme figura 3.8.

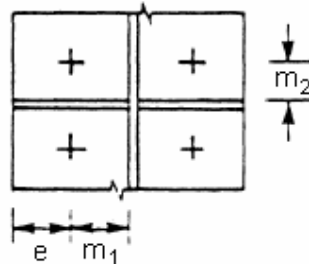


figura 3.8: parâmetros para mesa da coluna enrijecida conforme Eurocode 3 [1]

$$\mu_i = \frac{h_1 \cdot F_{1,Rd}}{M_{Rd}} \quad (3.45)$$

3.1.2.3 Capacidade de rotação

Caso o momento resistente seja governado pela zona de corte, então a conexão terá capacidade de rotação adequada.

Se o momento resistente for governado pela resistência da zona tracionada e pelo modo 1 de falha então cada linha de parafusos deve satisfazer o critério da equação (3.46).

$$\beta \leq \frac{2 \cdot \lambda}{1 + 2 \cdot \lambda} \quad (3.46)$$

Se for o modo 2 de falha que governa, então a condição a ser atendida é a da expressão (3.47).

$$\frac{2 \cdot \lambda}{1 + 2 \cdot \lambda} < \beta < 2 \quad (3.47)$$

Onde, β e λ são os mesmos parâmetros determinados nas expressões (3.14) e (3.15), respectivamente.

E a capacidade de rotação pode ser obtida pela expressão (3.48).

$$\phi_{Cd} = \frac{10,6 - 4 \cdot \beta_{cr}}{1,3 \cdot h_1} \quad (3.48)$$

E β_{cr} é o valor de β para a componente com o menor valor de $\frac{F_{t,Rd}}{\sum B_{t,Rd}}$.

4 INFLUÊNCIA DA FLEXIBILIDADE NAS LIGAÇÕES

Neste capítulo serão apresentadas as considerações relativas ao efeito da flexibilidade nas ligações metálicas. Isto será feito através da apresentação do programa LIGFLEX, elaborado para obter as principais características das conexões. Posteriormente, serão comparados os resultados obtidos pelo programa com os dados experimentais coletados da bibliografia.

4.1 O PROGRAMA LIGFLEX

O programa LIGFLEX foi implementado com interface gráfica para ambiente *Windows* e a ferramenta utilizada para o desenvolvimento foi o Builder 6.0 [7] na linguagem C ++.

O objetivo do programa é avaliar conexões entre vigas e colunas soldadas e parafusadas com variações na chapa de extremidade, chapa de altura total e de altura parcial. Serão determinados o momento resistente, a capacidade de rotação e a rigidez rotacional das conexões. Posteriormente, são feitas as verificações dos elementos individualmente, resistência das soldas, parafusos e enrijecedores.

A metodologia de cálculo empregada no programa LIGFLEX tem suas rotinas baseadas nos critérios do Eurocode 3 [1] e do BCSA [2]. As rotinas foram divididas em dois grandes grupos, ligações soldadas e ligações parafusadas. Essas duas rotinas desenvolvem, praticamente, os mesmos passos, porém com formulações distintas.

O funcionamento do programa pode ser visualizado de forma esquemática através do fluxograma da figura 4.1. O passo inicial consiste em selecionar o tipo de ligação, soldada ou parafusada. Os dados a serem fornecidos ao programa pelo usuário são referentes à geometria da conexão, perfis selecionados para a viga e coluna, tipos de aço empregados, configuração da ligação (com ou sem enrijecimento), dados gerais referentes a parafusos e soldas.

Após serem declarados todos os dados, poderá ser iniciado o processo de cálculo da conexão. Como dados de saída ter-se-ão as resistências das zonas críticas e as propriedades principais da conexão determinadas com influência da flexibilidade. As verificações serão feitas comparando as solicitações de cálculo fornecidas na entrada de

dados com as resistências obtidas pelas rotinas de cálculo, indicando se a ligação está dimensionada de forma segura ou não.

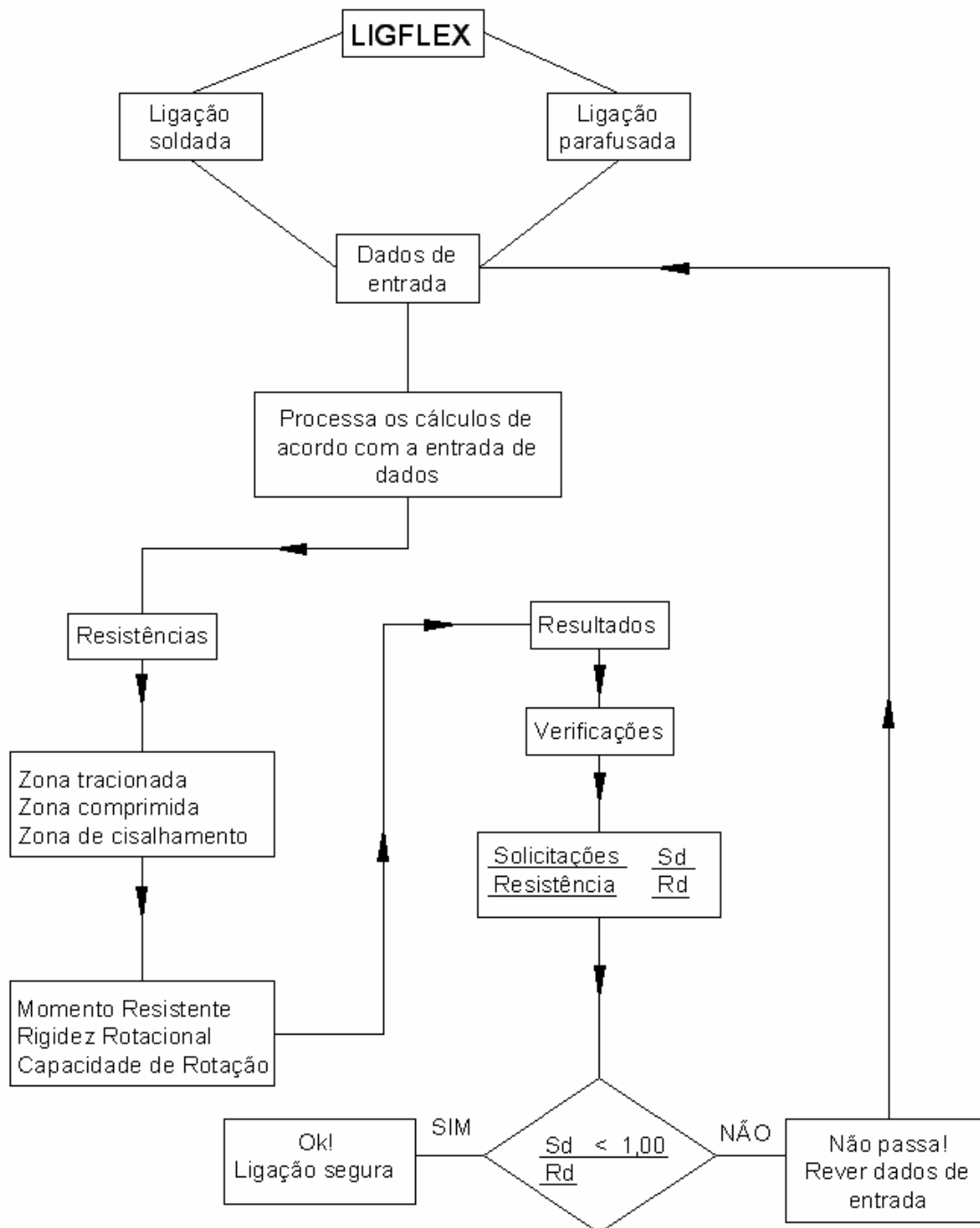


figura 4.1: fluxograma do programa LIGFLEX

4.1.1 Metodologia de cálculo

Após a apresentação esquemática do programa LIGFLEX, faz-se necessário explicitar as rotinas internas de cálculo para apresentar a metodologia empregada.

Em relação às verificações das componentes das conexões, apresentam-se a seguir as solicitações máximas de tração e compressão que serão utilizadas para fazer a analogia solicitação/resistência.

$$T = \frac{M_{Sd}}{d_b - t_{fb}} - \frac{N_{Sd}}{2} \quad (4.1)$$

$$C = \frac{M_{Sd}}{d_b - t_{fb}} + \frac{N_{Sd}}{2} \quad (4.2)$$

Onde:

T: é a máxima força de tração atuante na ligação;

C: é a máxima força de compressão na ligação;

M_{Sd} : momento fletor de cálculo;

N_{Sd} : solicitação normal de cálculo;

d_b : altura da viga;

t_{fb} : espessura da mesa da viga.

As expressões (4.1) e (4.2) são válidas caso o esforço normal seja de compressão, caso contrário, as mesmas deverão ter os sinais invertidos. Ver a orientação na figura 4.2.

Como já mencionado anteriormente, existem duas rotinas distintas, cujos critérios para obter os resultados são apresentados a seguir.

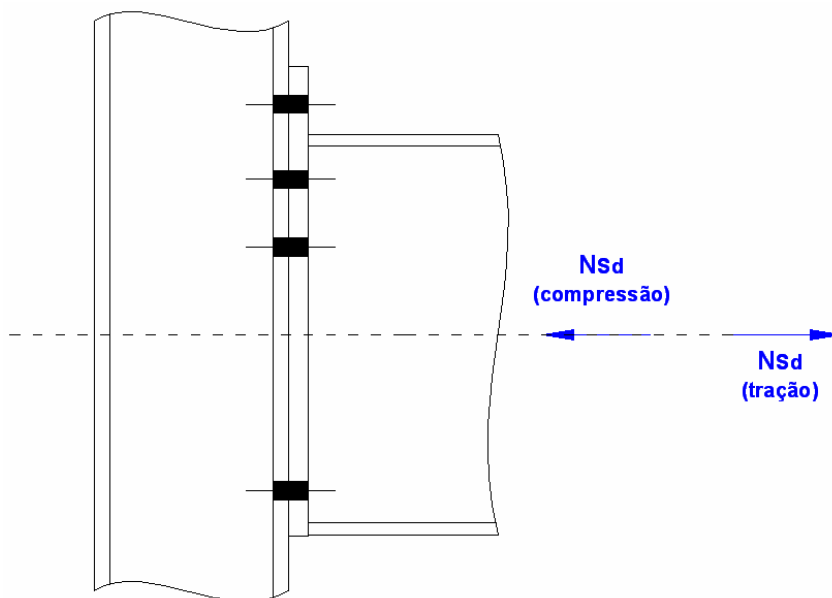


figura 4.2: representação para esforços de tração e compressão

4.1.1.1 Método para ligações soldadas

Após declarados os dados de entrada para a conexão soldada, o procedimento de cálculo do programa será determinar, primeiramente, as resistências das zonas críticas.

4.1.1.1.1 Resistência da zona tracionada

Para a zona tracionada a formulação empregada é a mesma segundo os critérios do Eurocode 3 [1] já apresentados neste trabalho no item 3.1.1.1.1.

Ressalta-se que no caso de haver enrijecimento da alma ou da mesa da coluna na região tracionada, então estas resistências apresentadas neste item serão acrescidas de uma parcela referente à resistência do elemento enrijecedor, chapa suplementar ou enrijecedores horizontais.

4.1.1.1.2 Resistência da zona comprimida

De maneira análoga à zona tracionada, a zona comprimida também terá sua resistência determinada segundo critérios do Eurocode 3 [1], conforme já apresentado neste trabalho no item 3.1.1.1.2.

Adicionalmente, será avaliada a flambagem na alma da coluna, cujo critério é também adotado pelo BCSA [2]. Esse critério leva em consideração a esbeltez da alma da coluna que é determinada pela expressão (4.3), e é comparada com a esbeltez limite dada pela expressão (4.4).

$$\lambda = \frac{h_{wc}}{t_{wc}} \quad (4.3)$$

$$\lambda_{LIM} = 69 \cdot \varepsilon_s \quad (4.4)$$

Onde:

h_{wc} : é a altura da alma da coluna;

t_{wc} : espessura da alma da coluna;

ε_s : parâmetro para avaliação da esbeltez, obtido por:

$$\varepsilon_s = \sqrt{\frac{235}{f_{yc}}} \quad (4.5)$$

Sendo f_{yc} a tensão de escoamento do aço da coluna, devendo ser declarada em MPa.

Após determinados os dois parâmetros, então faz-se o comparativo para verificar se o efeito da flambagem é ou não significativo na alma da coluna. Se a esbeltez determinada for maior que a esbeltez limite, então será necessário avaliar o efeito da flambagem. Caso contrário, poderá ser desprezada.

A resistência a flambagem da alma da coluna é dada pela expressão (4.6).

$$F_{wRd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} \quad (4.6)$$

Onde:

χ : é o fator de redução associado à compressão, obtido através de (4.7);

A_{eff} : área efetiva da alma (calculada com b_{eff} determinada no item 3.1.1.1.2 deste trabalho);

γ_{M0} : fator de segurança parcial do aço, valendo 1,10.

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_o^2}} \quad (4.7)$$

Sendo ϕ e λ_o dados pelas expressões (4.8) e (4.9), respectivamente.

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\lambda_o - 0,2) + \lambda_o^2] \quad (4.8)$$

$$\lambda_o = \frac{\lambda}{93,9 \cdot \epsilon_s} \quad (4.9)$$

O parâmetro α neste caso é adotado como 0,49 referindo-se à curva de flambagem c.

4.1.1.1.3 Resistência da zona de cisalhamento

O método para determinar a resistência da zona de cisalhamento é idêntico ao já apresentado neste trabalho no item 3.1.1.1.3 com base na formulação do Eurocode 3 [1].

Em relação a verificação desta zona, a resistência é comparada com a solicitação de cálculo ao esforço cortante, V_{sd} informada na entrada de dados.

4.1.1.1.4 Rigidez rotacional

A rigidez rotacional das ligações soldadas é determinada segundo os critérios do Eurocode 3 [1], conforme já explicitado neste trabalho no item 3.1.1.2.

4.1.1.1.5 Capacidade de rotação

A capacidade de rotação das ligações soldadas, também, é determinada segundo os critérios do Eurocode 3 [1], conforme já explicitado neste trabalho no item 3.1.1.3.

4.1.1.1.6 Configurações disponíveis para ligações soldadas

O *layout* do programa LIGFLEX quando opta-se por trabalhar com uma ligação tipo soldada é apresentado na figura 4.3.

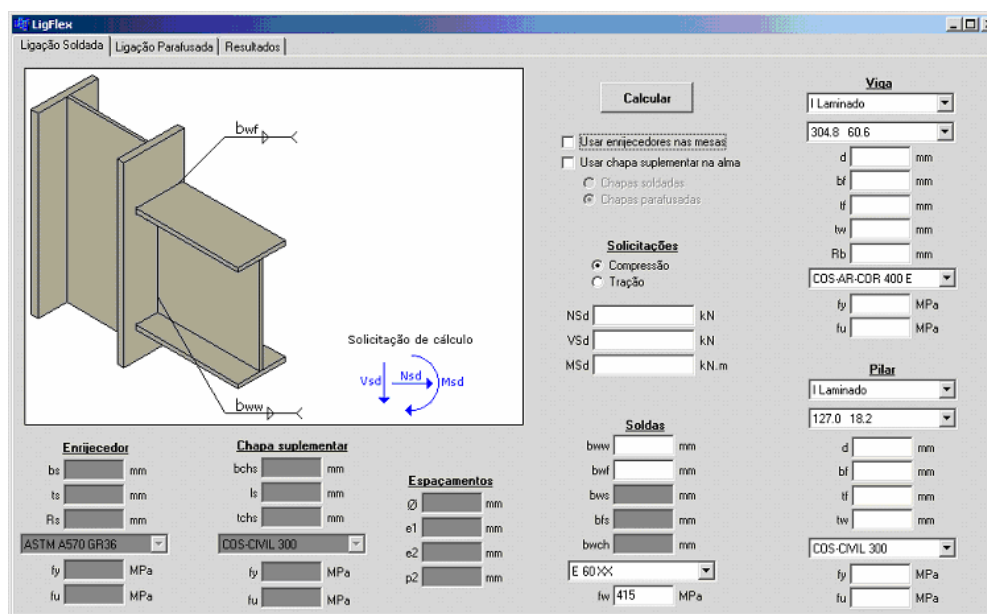


figura 4.3: layout do programa LIGFLEX para ligações soldadas

A figura 4.4 a) apresenta a ligação viga-pilar soldada sem nenhum tipo de enrijecimento.

A figura 4.4 b) apresenta a ligação viga-pilar soldada com enrijecedores horizontais.

A figura 4.4 c) apresenta a ligação viga-pilar soldada com chapa suplementar soldada.

A figura 4.4 d) apresenta a ligação viga-pilar soldada com chapa suplementar parafusada.

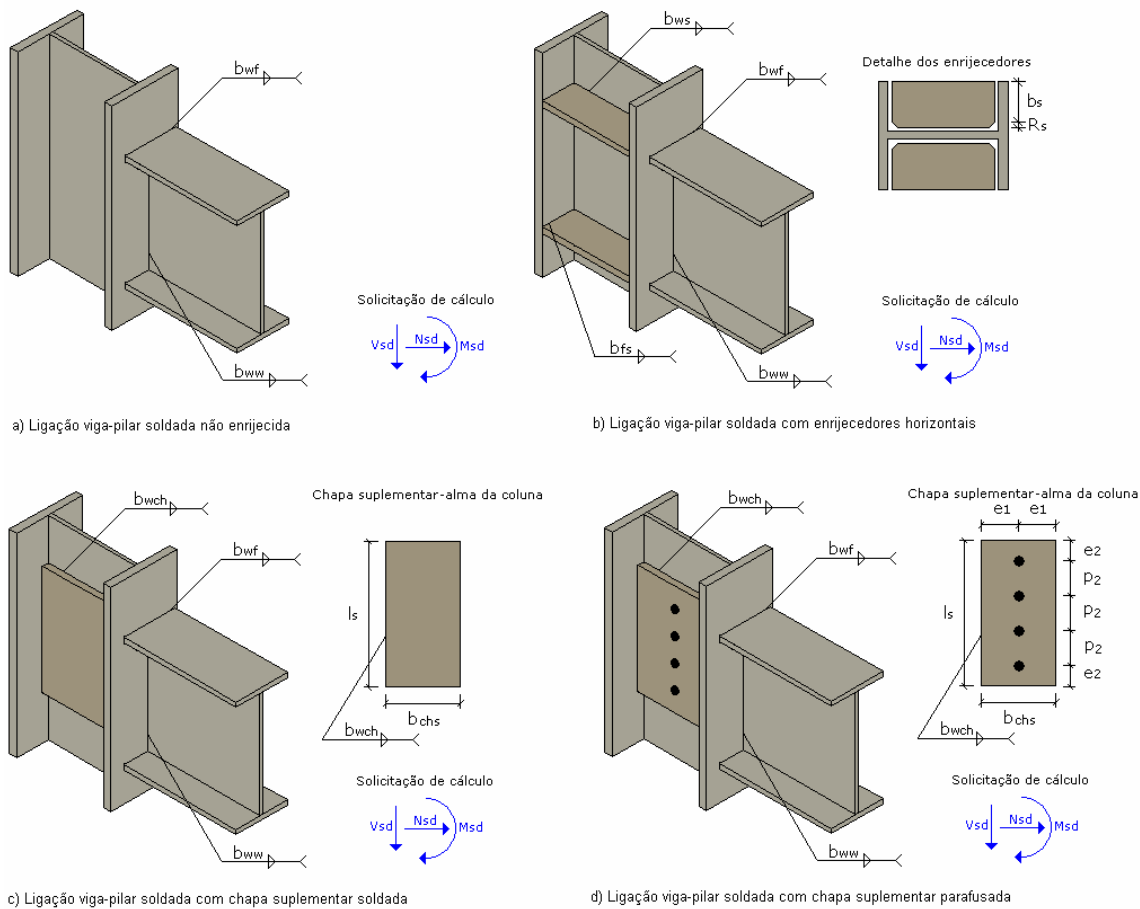


figura 4.4: configurações disponíveis para ligações soldadas no programa LIGFLEX

Os procedimentos para a entrada de dados no programa e alguns exemplos de cada uma das configurações são apresentados no anexo B deste trabalho.

4.1.1.1.7 Resultados e apresentação dos dados de saída

Os resultados são apresentados em três partes, a primeira é um breve resumo dos dados de entrada declarados na janela com a configuração da conexão. A segunda parte consiste na exibição das resistências obtidas para cada zona crítica e as características principais relacionadas à flexibilidade da conexão. E, finalmente, são apresentadas as verificações de cada componente da ligação e os alertas referentes a medidas mínimas e máximas exigidas também exibe a relação solicitação/resistência indicando se a conexão é segura em determinada componente.

4.1.1.2 Método para ligações parafusadas

Após declarados os dados de entrada para a conexão parafusada, o procedimento de cálculo do programa será determinar, primeiramente, as resistências das zonas críticas, da mesma forma que foi feito para as ligações soldadas.

4.1.1.2.1 Resistência da zona tracionada

A metodologia de cálculo adotada pelo programa LIGFLEX para determinar a resistência da zona tracionada está baseada nos critérios do BCSA [2]. Entretanto a teoria empregada e a formulação são praticamente as mesmas do Eurocode 3 [1], já descritas no item 3.1.1.2.1 deste trabalho diferenciando apenas na determinação dos comprimentos efetivos. Decidiu-se empregar a metodologia do BCSA [2], pois ela está fundamentada de uma maneira que melhor caracteriza o método *t-sub*, conforme cita Romano [6]:

[...] existem diversos aspectos insatisfatórios na maneira como são calculados esses comprimentos efetivos. Segundo tal publicação a configuração de charneira plástica circular, claramente, não admite a presença de forças de alavanca e não possibilita a comparação com a teoria de ligações "T-stub", da qual originaram-se as expressões para os modos de colapso 1 e 2.

e também

Outro aspecto insatisfatório diz respeito à determinação do comprimento efetivo de linhas de parafusos adjacentes a enrijecedores, as quais dependem, diretamente, de fatores geométricos caracterizados por um fator α que, segundo o BCSA/SCI (1993), é artificialmente limitado a 2π .

A força de tração em cada linha de parafusos será limitada pela flexão na chapa de extremidade ou na mesa da coluna, pela falha nos parafusos ou ainda pela falha na alma da coluna ou da viga.

O procedimento empregado no LIGFLEX foi calcular a resistência potencial de cada uma das linhas de parafusos. Ou seja, tem-se como base a distribuição plástica das forças de tração nas linhas de parafusos, diferente do modo empregado usualmente que considera apenas o braço de alavanca em relação ao centro de rotação, distribuição triangular. Cada linha foi avaliada isoladamente e combinada entre outras. A primeira linha é avaliada isoladamente. A segunda linha é avaliada isoladamente e combinada com a primeira linha. E este processo continua sucessivamente para as demais linhas da zona tracionada, conforme ilustração da figura 4.5.

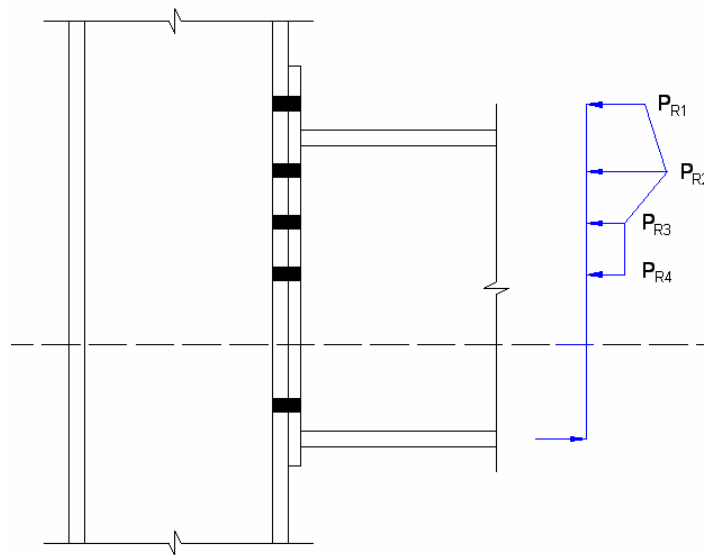


figura 4.5: método da resistência potencial segundo BCSA [2]

Para cada linha de parafusos a resistência será dada pelo menor valor entre as resistências de cada uma das seguintes componentes:

- Mesa da coluna à flexão - ruptura dos parafusos;
- Chapa de extremidade à flexão - ruptura dos parafusos;
- Alma da coluna tracionada;
- Alma da viga tracionada.

Em relação a mesa da coluna e a chapa de extremidade sujeitas à flexão, a resistência será obtida pelo valor mínimo entre os três modos de falha. Estes modos de falhas já foram apresentados no item 3.1.1.1.2 deste trabalho, porém aqui serão repetidas as expressões referentes á resistência em cada um dos modos, para o modo 1 (escoamento completo da mesa) expressão (4.10), para o modo 2 (ruptura do parafuso com o escoamento da mesa) expressão (4.11) e para o modo 3 (ruptura do parafuso) expressão (4.12).

$$F_{t,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,Rd}}{m} \quad (4.10)$$

$$F_{t,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,Rd} + n \cdot \sum B_{t,Rd}}{m + n} \quad (4.11)$$

$$F_{t,Rd} = \sum B_{t,Rd} \quad (4.12)$$

Onde:

m e e : são parâmetros geométricos dados conforme a figura 4.6;

n : menor valor de e , referente à chapa de extremidade ou a mesa da coluna;

$M_{pl,Rd}$: é o momento plástico resistente de cálculo dado pela expressão (4.13);

$\sum B_{t,Rd}$: é a soma de todas as forças de tração para os parafusos de cada linha avaliada isoladamente ou em grupo.

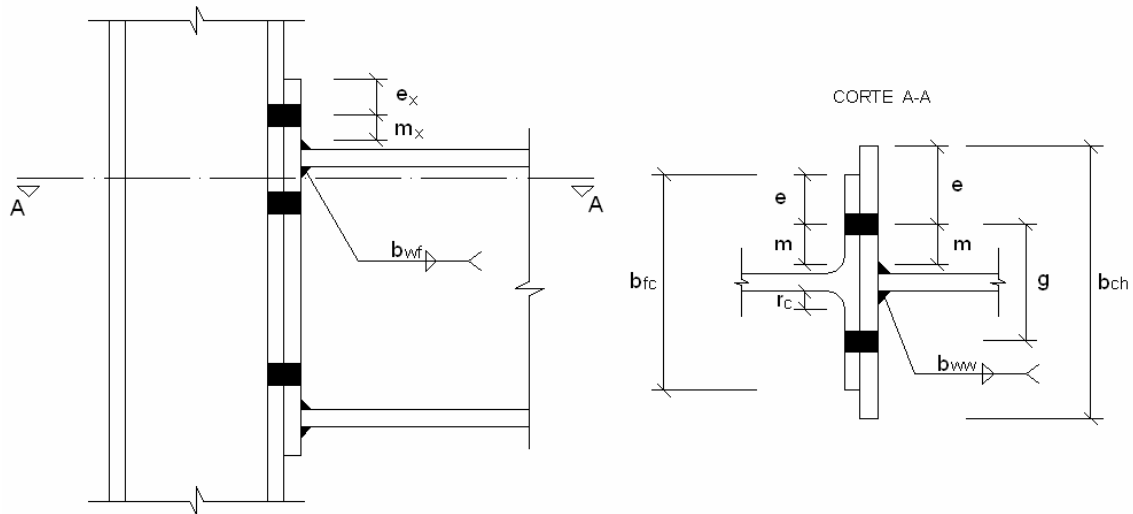


figura 4.6: parâmetros geométricos

$$M_{pl,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff} \cdot t^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.13)$$

Onde:

t : é a espessura do elemento que está sendo calculada a resistência, no caso da mesa da coluna ou da chapa de extremidade;

f_y : tensão de escoamento do aço do perfil da coluna ou da chapa de extremidade;

γ_{M0} : fator de segurança parcial do aço, valendo 1,10.

L_{eff} : é o comprimento efetivo referente as linhas de parafusos.

Para determinar o comprimento efetivo referente às linhas de parafusos deverão ser consideradas as formulações expostas nas figuras 4.7 e 4.8 que apresentam os padrões de escoamento para parafusos na mesa da coluna separados pela alma ou chapa de extremidade.

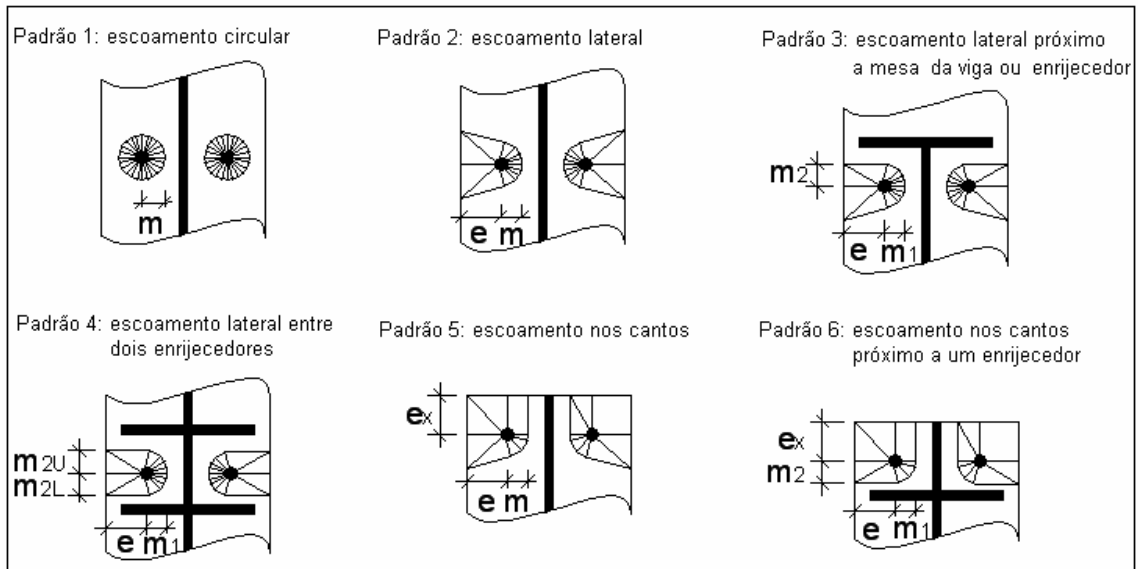


figura 4.7: modos de escoamento para mesa da coluna e chapa de extremidade

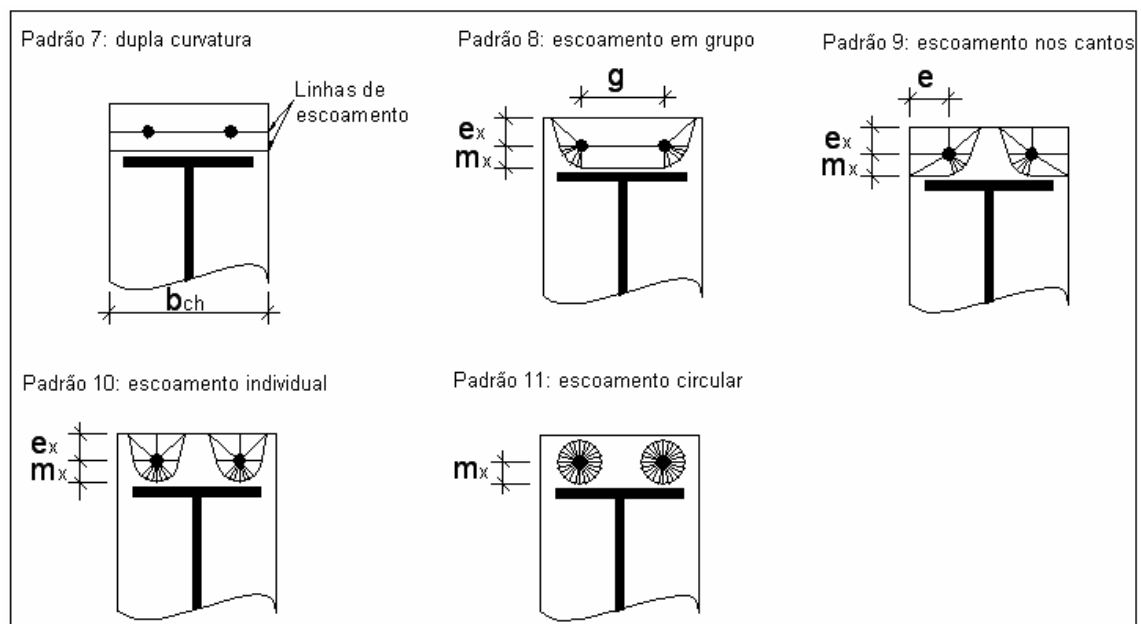


figura 4.8: modos de escoamento para porção estendida da chapa de extremidade

Para cada um dos padrões de escoamento existe uma expressão para o cálculo do comprimento efetivo. Estas serão identificadas a seguir de acordo com o padrão de escoamento das figuras 4.7 e 4.8.

Para o padrão de escoamento 1, expressão (4.14).

$$L_{\text{eff}} = 2 \cdot \pi \cdot m \quad (4.14)$$

Para o padrão de escoamento 2, expressão (4.15).

$$L_{\text{eff}} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e \quad (4.15)$$

Para o padrão de escoamento 3, expressão (4.16).

$$L_{\text{eff}} = \alpha \cdot m_1 \quad (4.16)$$

Para o padrão de escoamento 4, expressão (4.17).

$$L_{\text{eff}} = \alpha \cdot m_1 + \alpha' \cdot m_1 - (4 \cdot m_1 + 1,25 \cdot e) \quad (4.17)$$

Para o padrão de escoamento 5, expressão (4.18).

$$L_{\text{eff}} = 2 \cdot m + 0,625 \cdot e + e_x \quad (4.18)$$

Para o padrão de escoamento 6, expressão (4.19).

$$L_{\text{eff}} = \alpha \cdot m_1 - (2 \cdot m_1 + 0,625 \cdot e) + e_x \quad (4.19)$$

Para o padrão de escoamento 7, expressão (4.20).

$$L_{\text{eff}} = \frac{b_{\text{ch}}}{2} \quad (4.20)$$

Para o padrão de escoamento 8, expressão (4.21).

$$L_{\text{eff}} = 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x + \frac{g}{2} \quad (4.21)$$

Para o padrão de escoamento 9, expressão (4.22).

$$L_{\text{eff}} = 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x + e \quad (4.22)$$

Para o padrão de escoamento 10, expressão (4.23).

$$L_{\text{eff}} = 4 \cdot m_x + 1,25 \cdot e_x \quad (4.23)$$

Para o padrão de escoamento 11, expressão (4.24).

$$L_{\text{eff}} = 2 \cdot \pi \cdot m_x \quad (4.24)$$

Onde:

m , e , m_1 , e_x , g , m_{2L} , m_{2U} , e m_x : são parâmetros geométricos obtidos conforme as figuras 4.6 e 4.7;

α : é o parâmetro para mesas de colunas enrijecidas e chapas de extremidade obtido pelo ábaco da figura 3.7 segundo critério do Eurocode 3 [1], ou através das expressões dadas no anexo D;

α' : é o parâmetro usado para o escoamento padrão 4 sendo calculado com m_{2L} e neste caso α é obtido com m_{2U} .

Para cada caso de posicionamento das linhas de parafusos vai ter uma configuração de comprimentos efetivos a serem avaliados. Os casos são apresentados a seguir na figura 4.9, para linhas de parafusos atuando isoladamente, e na figura 4.10 para linhas de parafusos atuando em grupo.

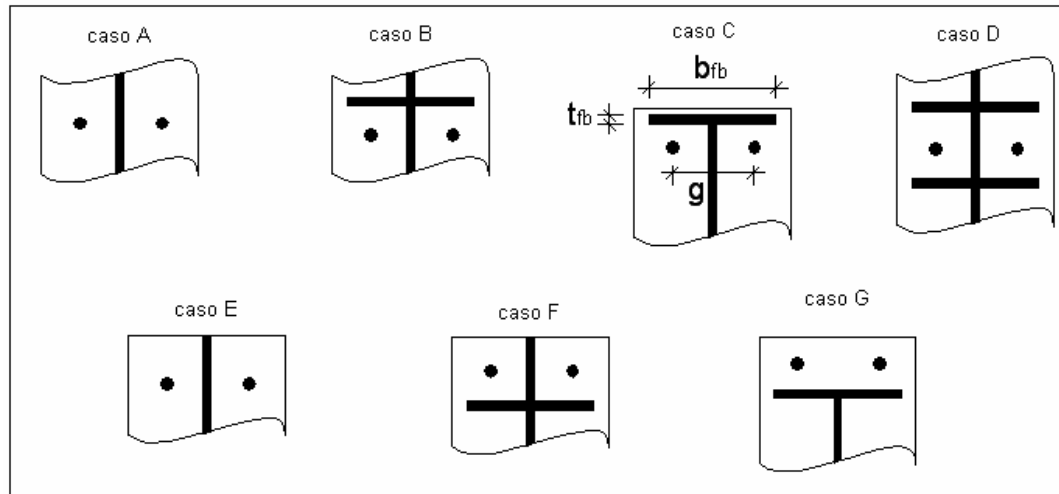


figura 4.9: linhas de parafusos vistas de forma isolada

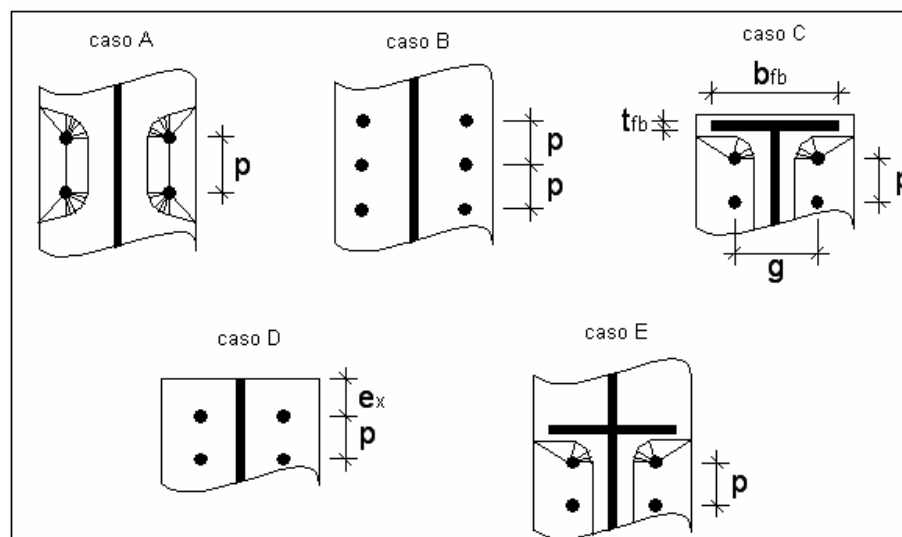


figura 4.10: linhas de parafusos atuando em grupos

Em cada caso deverá ser adotado como comprimento efetivo o menor entre a combinação dos padrões de escoamento destinados à configuração deste caso.

Para o caso A como linhas atuando de forma isolada, expressão (4.25):

$$L_{\text{eff}} = \text{mín} [\text{padrão 1} ; \text{padrão 2}] \quad (4.25)$$

Para o caso B como linhas atuando de forma isolada, expressão (4.26):

$$L_{\text{eff}} = \text{mín} [\text{padrão 1} ; \text{máx}(\text{padrão 2 e padrão 3})] \quad (4.26)$$

Para o caso C como linhas atuando de forma isolada se $g > 0,7 \cdot b_{\text{fb}}$ ou $t_{\text{fb}} < 0,8 \cdot t_{\text{ch}}$, expressão (4.27):

$$L_{\text{eff}} = \text{mín} \left[\text{máx} \left(\left(\frac{\text{padrão 2} + \text{padrão 3}}{2} \right); \text{padrão 2} \right); \text{padrão 1} \right] \quad (4.27)$$

Para o caso C como linhas atuando de forma isolada se $g \leq 0,7 \cdot b_{\text{fb}}$ ou $t_{\text{fb}} \geq 0,8 \cdot t_{\text{ch}}$, expressão (4.28):

$$L_{\text{eff}} = \text{mín} [\text{padrão 1} ; \text{máx}(\text{padrão 2 e padrão 3})] \quad (4.28)$$

Para o caso D como linhas atuando de forma isolada, expressão (4.29):

$$L_{\text{eff}} = \text{mín} [\text{máx}(\text{padrão 4}; \text{padrão 3} (m_{2U}); \text{padrão 3} (m_{2L}); \text{padrão 2}); \text{padrão 1}] \quad (4.29)$$

Para o caso E como linhas atuando de forma isolada, expressão (4.30):

$$L_{\text{eff}} = \text{mín}[\text{padrão 5 ; padrão 2 ; padrão 1}] \quad (4.30)$$

Para o caso F como linhas atuando de forma isolada, expressão (4.31):

$$L_{\text{eff}} = \text{mín}[\text{máx}(\text{padrão 5 ; padrão 6 }) ; \text{máx}(\text{padrão 2 ; padrão 3 }) ; \text{padrão 1}] \quad (4.31)$$

Para o caso G como linhas atuando de forma isolada, expressão (4.32):

$$L_{\text{eff}} = \text{mín}[\text{padrão 7 ; padrão 8 ; padrão 9 ; padrão 10 ; padrão 11}] \quad (4.32)$$

Para o caso A como linhas atuando em grupo, expressão (4.33):

$$L_{\text{eff}} = \frac{\text{padrão 2}}{2} + \frac{p}{2} \quad (4.33)$$

Para o caso B como linhas atuando em grupo, expressão (4.34):

$$L_{\text{eff}} = p \quad (4.34)$$

Para o caso C como linhas atuando em grupo se $g > 0,7 \cdot b_{fb}$ ou $t_{fb} < 0,8 \cdot t_{ch}$, expressão (4.35):

$$L_{\text{eff}} = \text{máx}\left(\frac{\text{padrão 2}}{2}; \frac{\text{padrão 3}}{2}\right) + \frac{p}{2} \quad (4.35)$$

Para o caso C como linhas atuando em grupo se $g \leq 0,7 \cdot b_{fb}$ ou $t_{fb} \geq 0,8 \cdot t_{ch}$, expressão (4.36):

$$L_{eff} = \max \left[\frac{\text{padrão 2}}{2}; \left(\text{padrão 3} - \frac{\text{padrão 2}}{2} \right) \right] + \frac{p}{2} \quad (4.36)$$

Para o caso D como linhas atuando em grupo combinadas, expressão (4.37):

$$L_{eff} = \max \left[\frac{\text{padrão 2}}{2}; \left(\text{padrão 3} - \frac{\text{padrão 2}}{2} \right) \right] + \frac{p}{2} \quad (4.37)$$

Para o caso E como linhas atuando em grupo, expressão (4.38):

$$L_{eff} = \min \left(e_x; \frac{\text{padrão 2}}{2} \right) + \frac{p}{2} \quad (4.38)$$

Calculadas as resistências da mesa da coluna e da chapa de extremidade à flexão, agora deverão ser obtidas as resistências da alma da coluna e da viga à tração.

A resistência à tração da alma da coluna é obtida através da expressão (4.39).

$$F_{t,Rd} = \frac{f_{yc} \cdot t_{wc} \cdot b_{eff}}{\gamma_{M0}} \quad (4.39)$$

Onde:

t_{wc} : é a espessura da alma da coluna;

f_{yc} : tensão de escoamento do aço da coluna;

b_{eff} : é a largura efetiva da alma da coluna à tração, no caso, deverá ser igual ao comprimento efetivo da linha ou grupo de linhas que está sendo analisado referente a mesa da coluna à flexão.

A resistência à tração da alma da viga é obtida através da expressão (4.40).

$$F_{t,Rd} = \frac{f_{yb} \cdot t_{wb} \cdot b_{eff}}{\gamma_{M0}} \quad (4.40)$$

Onde:

t_{wb} : é a espessura da alma da viga;

f_{yb} : tensão de escoamento do aço da viga;

b_{eff} : é a largura efetiva da alma da viga à tração, no caso, deverá ser igual ao comprimento efetivo da linha ou grupo de linhas que está sendo analisado referente a chapa de extremidade à flexão.

Com a resistência das quatro componentes na zona tracionada, é possível determinar a resistência potencial de cada uma das linhas tracionadas. O procedimento para determiná-las está representado de forma esquemática na figura 4.11. No caso específico para o programa LIGFLEX, o número máximo de linhas na zona tracionada é cinco, portanto o esquema da figura 4.10 retrata esta configuração de linhas.

A princípio, o programa sempre fará a distribuição plástica das resistências nas linhas de parafusos. Entretanto, a distribuição triangular será considerada no programa e está associada à capacidade de deformação da ligação. Para isso, foi considerado o critério do BCSA [2] que estabelece uma espessura máxima para a chapa de extremidade e para a mesa da coluna. Os limites para considerar uma distribuição plástica são dados pelas expressões (4.41) para a chapa de extremidade e pela (4.42) para a mesa da coluna. Caso não seja satisfeita qualquer uma dessas limitações, então deverá ser feita uma distribuição triangular das resistências, conforme figura 4.12.

Ressalta-se que essa verificação só será necessária em ligações com mais de duas linhas de parafusos, pois a distribuição só será feita a partir da linha imediatamente inferior à mesa da viga.

ZONA TRACIONADA						
LINHA	MESA DA COLUNA	ALMA DA COLUNA	CHAPA DE EXTREMIDADE	ALMA DA VIGA	DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR	RESISTÊNCIA POTENCIAL
1	1	2	3	4	5	6
2	7	8	9	10	linhas (1+2) - 6	Menor valor entre 1 a 5
	11	12	13	14		linha 2 isolada
	15	16	17	18		linha (1+2)
3	21	22	23	24	linhas (2+3) - 20	Menor valor entre 7 a 10 e 15 a 19
	25	26	27	28		linha 3 isolada
	29	30	31	32		linha (2+3)
	33	34	35	36		linhas (1+2+3) - 6 - 20
	37	38	39	40		linha (1+2+3)
4	43	44	45	46	linhas (3+4) - 42	Menor valor entre 21 a 24 e 29 a 32 e 37 a 41
	47	48	49	50		linha 4 isolada
	51	52	53	54		linha (3+4)
	55	56	57	58		linha (2+3+4)
	59	60	61	62		linhas (2+3+4) - 20 - 42
	63	64	65	66		linhas (1+2+3+4+5) - 6 - 20 - 42
	67	68	69	70		linha (1+2+3+4+5)
5	73	74	75	76	linhas (4+5) - 72	Menor valor entre 43 a 46 e 51 a 54 e 59 a 62 e 67 a 71
	77	78	79	80		linha 5 isolada
	81	82	83	84		linha (4+5)
	85	86	87	88		linha (3+4+5)
	89	90	91	92		linhas (3+4+5) - 42 - 72
	93	94	95	96		linha (2+3+4+5)
	97	98	99	100		linhas (2+3+4+5) - 20 - 42 - 72
	101	102	103	104		linhas (1+2+3+4+5) - 6 - 20 - 42 - 72
105	106	107	108	linha (1+2+3+4+5)		
						Menor valor entre 73 a 76 e 81 a 84 e 89 a 92 e 97 a 100 e 105 a 109

figura 4.11: esquema para determinação da resistência potencial das linhas de parafusos, segundo BCSA [2]

$$t_{ch} < \frac{\phi_p}{1,9} \cdot \sqrt{\frac{f_{up}}{f_{ych}}} \quad (4.41)$$

$$t_{fc} < \frac{\phi_p}{1,9} \cdot \sqrt{\frac{f_{up}}{f_{yc}}} \quad (4.42)$$

Onde:

ϕ_p : diâmetro dos parafusos;

t_{ch} : espessura da chapa de extremidade;

t_{fc} : espessura da mesa da coluna;

f_{up} : tensão de ruptura do aço dos parafusos;

f_{yc} : tensão de escoamento do aço da coluna.

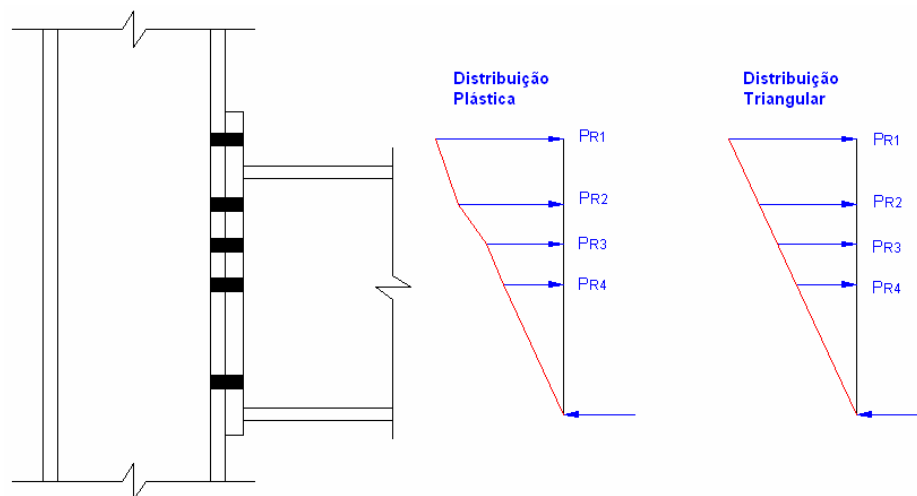


figura 4.12: distribuição plástica e triangular

Com os valores das resistências de cada linha de parafusos na zona tracionada já poderá ser determinado o momento resistente da conexão parafusada. O momento resistente será obtido através da expressão (4.43)

$$M_{Rd} = \sum_{i=1}^n F_{i,Rd} \cdot h_i \quad (4.43)$$

Onde:

$F_{i,Rd}$: é a resistência potencial de cálculo de cada uma das linhas de parafusos na zona tracionada;

h_i : é a distância de cada linha até o centro de compressão da ligação.

4.1.1.2.2 Resistência da zona comprimida

A metodologia de cálculo da resistência da zona comprimida empregada pelo programa LIGFLEX é a mesma prescrita pelo Eurocode 3 [1], já apresentada no item 3.1.1.2.2 deste trabalho.

4.1.1.2.3 Resistência da zona de cisalhamento

A resistência da zona de cisalhamento será determinada com base nos critérios do Eurocode 3 [1], já vistas no item 3.1.1.2.3 deste trabalho.

4.1.1.2.4 Rigidez rotacional

A rigidez rotacional obtida pelo programa LIGFLEX utiliza os mesmos critérios do Eurocode 3 [1], já expostos no item 3.1.2.2 deste trabalho. Entretanto, aqui se faz necessário explicar de forma detalhada o mecanismo de associação em série e em paralelo das componentes das conexões. A figura 4.13 apresenta o modelo utilizado para obter a rigidez rotacional das conexões parafusadas.

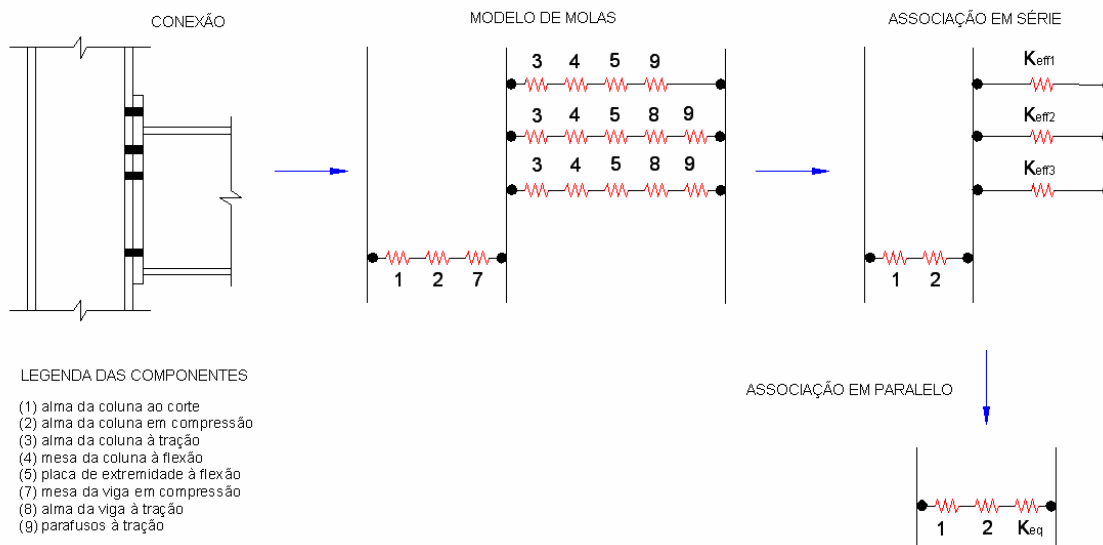


figura 4.13: modelo para cálculo da rigidez rotacional

Conforme exposto na figura 4.13, primeiramente se faz a associação em série das componentes de tração e compressão, individualmente para cada linha de parafusos. Isto é feito através da expressão (4.44) obtendo assim a componente K_{eff} de cada linha de parafusos.

$$K_{eff,n} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{nc} \frac{1}{K_{i,n}}} \quad (4.44)$$

Onde:

n : número da linha na qual está sendo calculada a associação em série;

nc : número de componentes na linha analisada;

i : identifica a numeração de cada componente.

Com os valores das rigidezes efetivas em cada linha deverá ser feita a associação em paralelo através da expressão (4.45).

$$K_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{eff,i} \cdot h_i}{z_{eq}} \quad (4.45)$$

Onde:

h_i : é a distância de cada linha de parafusos até o centro de compressão;

z_{eq} : é o braço de alavanca equivalente, dado pela expressão (4.46).

$$z_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{eff,i} \cdot h_i^2}{\sum_{i=1}^n K_{eff,i} \cdot h_i} \quad (4.46)$$

E finalmente, é possível obter a rigidez rotacional da conexão através da expressão (4.47).

$$S_j = \frac{E \cdot h_1^2}{\mu \cdot \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_{eq}} \right)} \quad (4.47)$$

Sendo que os valores de μ e de K de cada componente já foram apresentadas neste trabalho no item 3.1.2.2.

4.1.1.2.5 Capacidade de rotação

A capacidade de rotação será determinada com base nos critérios do Eurocode 3 [1], já vistas no item 3.1.2.3 deste trabalho.

4.1.1.2.6 Configurações disponíveis para ligações parafusadas

O *layout* do programa LIGFLEX, quando opta-se por trabalhar com uma ligação tipo parafusada, é apresentado na figura 4.14.

Estão disponíveis dezesseis configurações de ligações tipo viga-pilar parafusadas. A variação está relacionada a chapa de extremidade se é de altura parcial ou altura total, e, também em relação ao número de parafusos em cada ligação.

Na figura 4.15 aparecem as opções de ligações viga-pilar parafusadas com enrijecedores ou não enrijecidas e chapa de altura parcial, juntamente com todas as opções de configurações de número de parafusos.

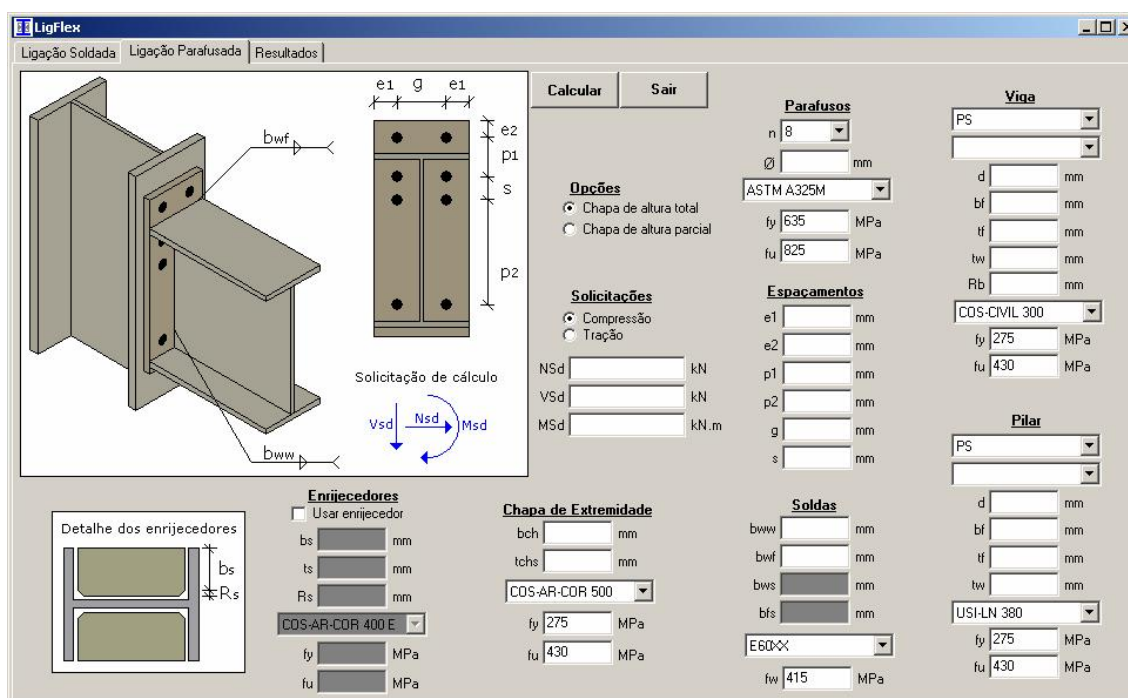


figura 4.14: layout do programa LIGFLEX para ligações parafusadas

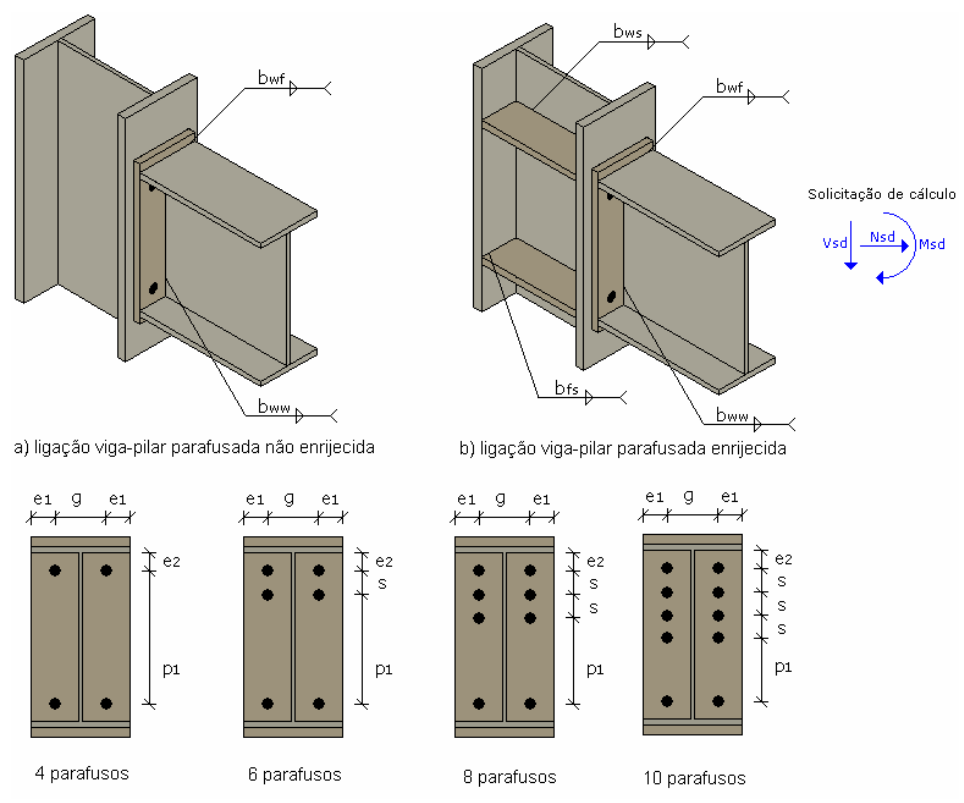


figura 4.15: ligações viga-pilar com chapa de altura parcial e configurações de parafusos

Na figura 4.16 aparecem as opções de ligações viga-pilar parafusadas com enrijecedores ou não enrijecidas e chapa de altura total, juntamente com todas as opções de configurações de número de parafusos.

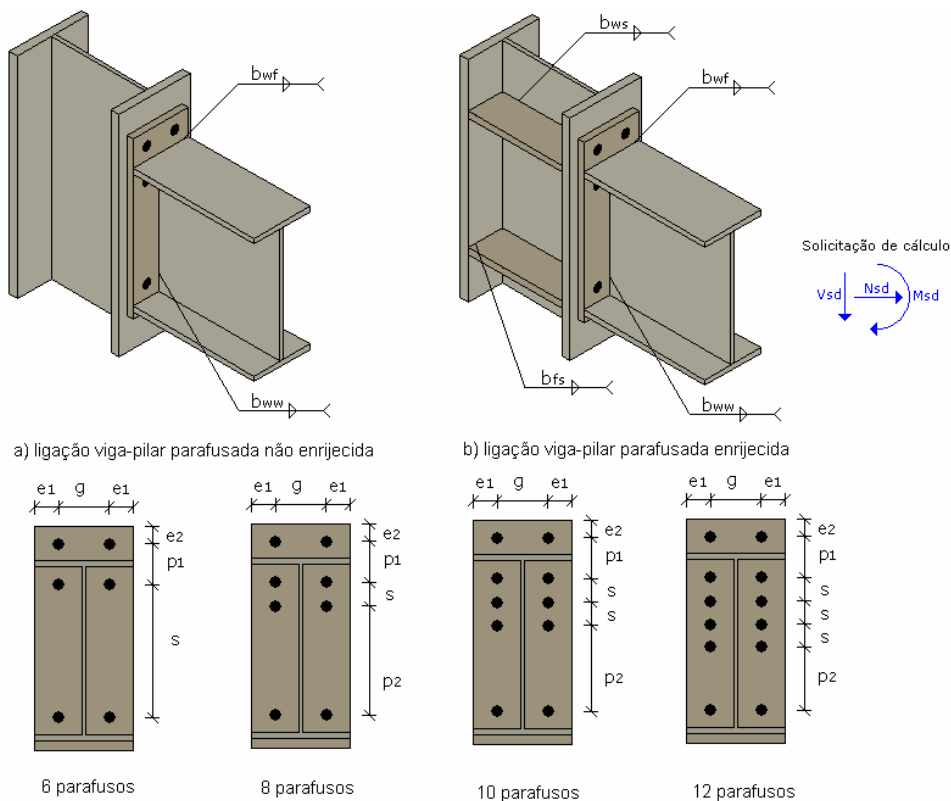


figura 4.16: ligações viga-pilar com chapa de altura total e configurações de parafusos

Os procedimentos para a entrada de dados no programa e alguns exemplos de cada umas das configurações são apresentados no anexo C deste trabalho.

4.1.1.2.7 Resultados e apresentação dos dados de saída

Os resultados são apresentados em três partes, a primeira é um breve resumo dos dados de entrada, declarados na janela, com a configuração da conexão. A segunda parte consiste na exibição das resistências obtidas para cada zona crítica e as características principais relacionadas à flexibilidade da conexão. E, finalmente, são apresentadas as verificações de cada componente da ligação e os alertas referentes a medidas mínimas e máximas exigidas também exibe a relação solicitação/resistência indicando se a conexão é segura em determinada componente.

Os dados de saída são apresentados da mesma forma que nas ligações soldadas.

4.2 DADOS EXPERIMENTAIS

Com a finalidade de comparar os resultados obtidos através do programa computacional desenvolvido, foram coletados dados experimentais da literatura. Desta forma, também, poderá ser verificada a validade da formulação empregada.

Os dados experimentais foram extraídos da tese de doutoramento de Lima [8], na qual foram ensaiadas ligações entre vigas e pilares parafusadas com chapa de extremidade. Foram ensaiados dois modelos, um com chapa de extremidade de altura parcial e outro com chapa de extremidade estendida.

Estes modelos foram submetidos a três tipos de carregamentos, momento fletor, esforço axial de compressão e esforço axial de tração. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica Estrutural da Universidade de Coimbra.

Os resultados obtidos nos ensaios apresentados por Lima [8] estão nas tabelas 2 e 3. Sendo na tabela 2 os resultados obtidos para uma ligação viga-pilar parafusada com chapa de altura parcial e na tabela 3 uma ligação viga-pilar parafusada com chapa estendida.

Tabela 2: resultados experimentais chapa de altura parcial

Ensaio	N (kN)	M (kN.m)	Sj (kN.m/rad)
FE1 (somente M)	-	72,2	8564
FE3 (- 4% Npl)	-52,7	77,2	9713
FE4 (- 8% Npl)	-105,6	74,7	11262
FE5 (- 20% Npl)	-265,0	80,5	10763
FE6 (- 27% Npl)	-345,0	72,3	9379
FE7 (- 20% Npl)	-265,0	80,7	7326
FE8 (+ 10% Npl)	130,6	61,7	7185
FE9 (+ 20% Npl)	264,9	51,3	5315

(fonte: Lima [8], 2003, p.90)

Tabela 3: resultados experimentais chapa de altura total

Ensaio	N (kN)	M (kN.m)	Sj (kN.m/rad)
EE1 (somente M)	-	118,7	26933
EE2 (- 10% Npl)	-135,94	125,4	14923
EE5 (- 15% Npl)	-193,3	118,1	12077
EE3 (- 20% Npl)	-259,2	113,2	11260
EE4 (- 27% Npl)	-363,5	111,9	12032
EE6 (+ 10% Npl)	127,2	111,5	10275
EE7 (+ 20% Npl)	257,9	101,0	10611

(fonte: Lima [8], 2003, p.127)

Os ensaios utilizados para fazer a analogia entre resultados experimentais e o programa LIGFLEX foram àqueles feitos somente considerando o efeito da flexão, ou seja, para a ligação com chapa de altura parcial foi utilizado como parâmetro o modelo FE1 da tabela 2; já para a ligação com chapa de extremidade estendida o modelo a ser considerado é o EE1 da tabela 3.

4.2.1 Ensaio da ligação com chapa de extremidade de altura parcial

O ensaio realizado por Lima [8] em ligações parafusadas com chapa de extremidade de altura parcial foi feito com os dados apresentados na figura 4.17.

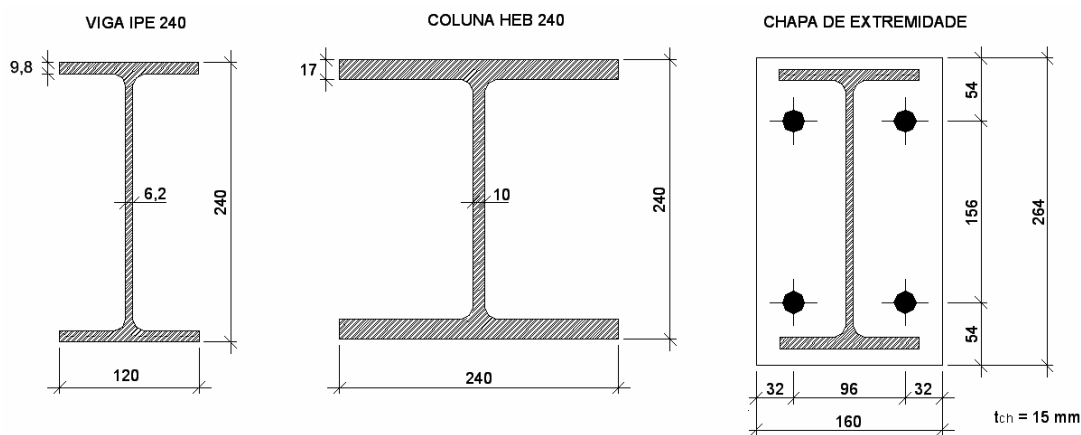


figura 4.17: geometria do ensaio com chapa de altura parcial

O aço empregado nos perfis da viga e da coluna e na chapa de extremidade foi do tipo S275, com tensão de escoamento de 275 MPa e tensão de ruptura de 430 MPa. Os parafusos utilizados são do tipo M20 classe 10.9 com diâmetro de 19,05 mm. A solda de ligação entre a viga e a chapa de extremidade é solda de filete com espessura 8 mm.

Esta mesma configuração de conexão foi entrada no programa LIGFLEX, conforme a figura 4.18, para fazer a comparação entre os resultados obtidos pelos dois métodos.

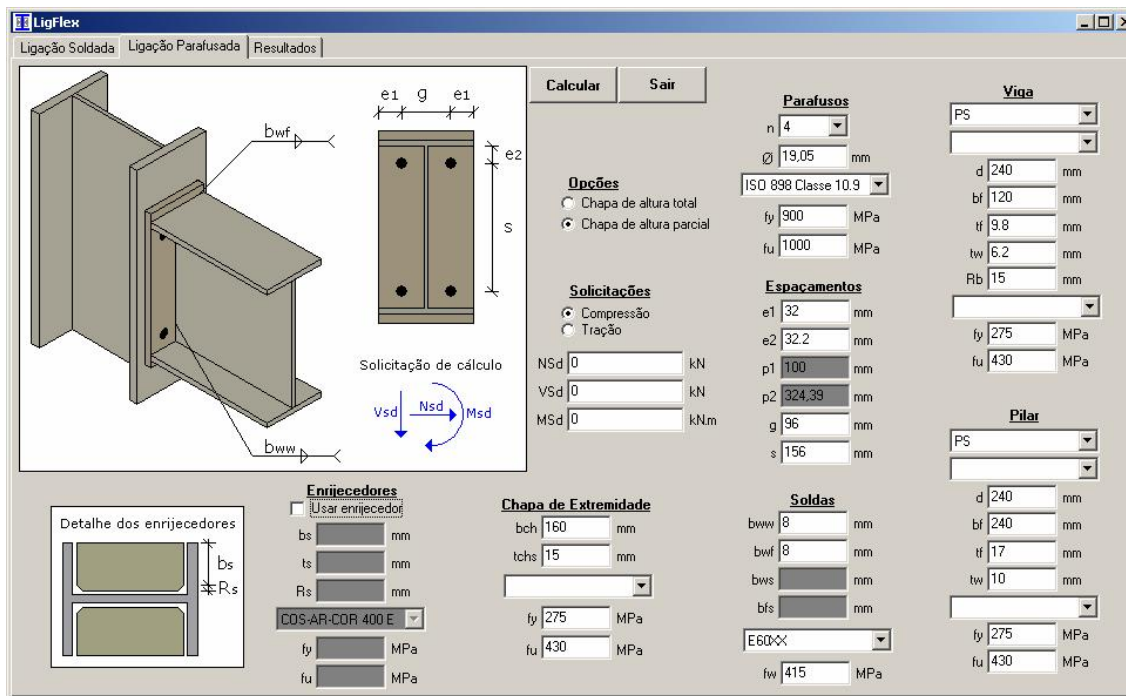


figura 4.18: janela do programa LIGFLEX com a entrada de dados do ensaio

Os resultados obtidos pelo programa LIGFLEX para esta configuração de conexão ensaiada foram um momento fletor de cálculo de $M_{Rd} = 59,67$ kN.m e uma rigidez rotacional de $S_j = 6162,04$ kN.m/rad.

Como o programa realiza os cálculos considerando o efeito das forças de cálculo das componentes, para efeito de comparação com os dados experimentais, foram calculados o momento resistente e a rigidez rotacional com base nos valores nominais das resistências das componentes. Dessa forma, obteve-se um momento fletor resistente de $M_{Rd} = 71,0$ kN.m e uma rigidez rotacional de $S_j = 12324$ kN.m/rad.

Na tabela 4 constam os valores teóricos (nominais) obtidos pela formulação empregada pelo programa LIGFLEX e a determinada por Lima [8] em seu trabalho. Além dos dados encontrados no ensaio.

Tabela 4: resultados teóricos e experimentais chapa de altura parcial

Fonte	M (kN.m)	S _j (kN.m/rad)
LIGFLEX	71,0	12324,1
Teórico Lima [8]	73,05	11831,4
Ensaio FE1	72,2	8564,0

A variação na rigidez rotacional encontrada pode estar associada à forma como ela foi determinada a partir dos resultados do ensaio. A rigidez foi obtida através da inclinação da curva momento *versus* rotação, conforme figura 4.19 extraída do trabalho de Lima [8].

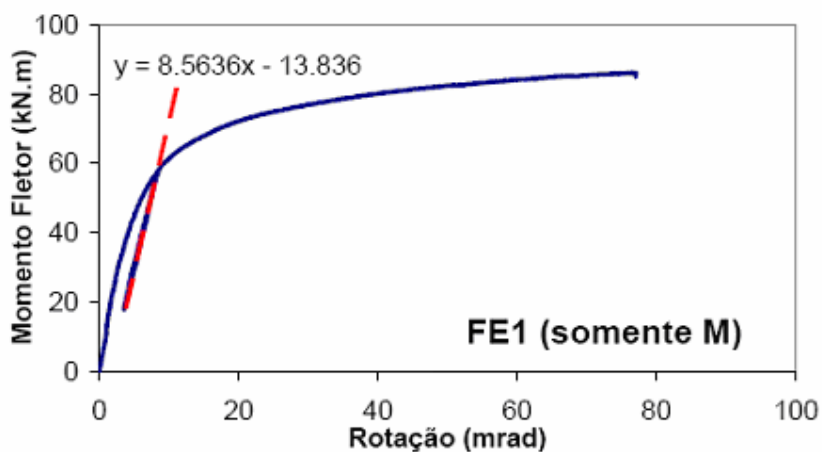


figura 4.19: curva momento versus rotação do ensaio FE1

4.2.2 Ensaio da ligação com chapa de extremidade estendida

O ensaio realizado por Lima [8] em ligações parafusadas com chapa de extremidade estendida foi feito com os dados apresentados na figura 4.20.

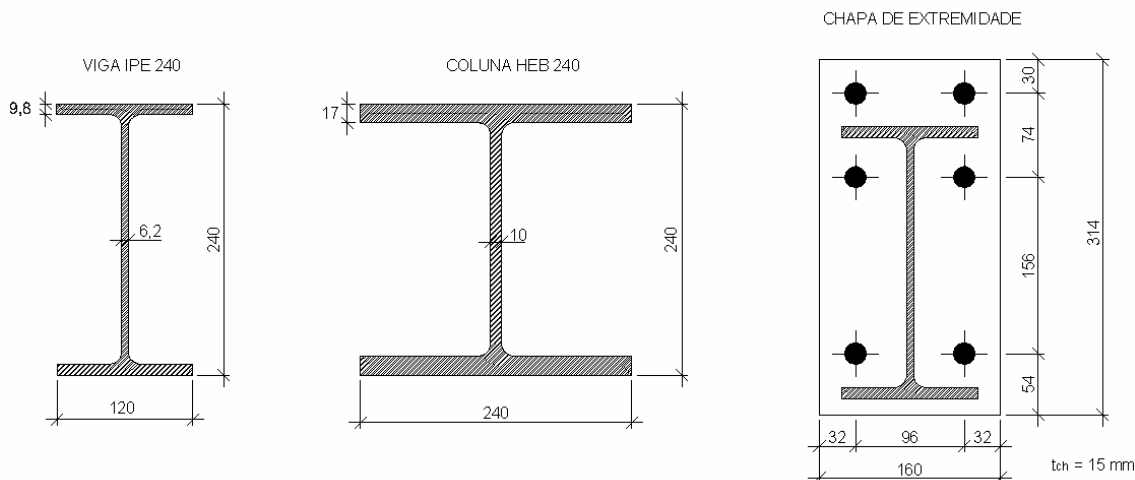


figura 4.20: dados da geometria do ensaio para chapa de extremidade estendida

As propriedades dos aços, perfis, soldas e parafusos empregados são as mesmas da conexão com chapa de extremidade de altura parcial, mudando apenas a geometria da chapa de extremidade.

A janela com os dados de entrada no programa LIGFLEX é apresentada na figura 4.21.

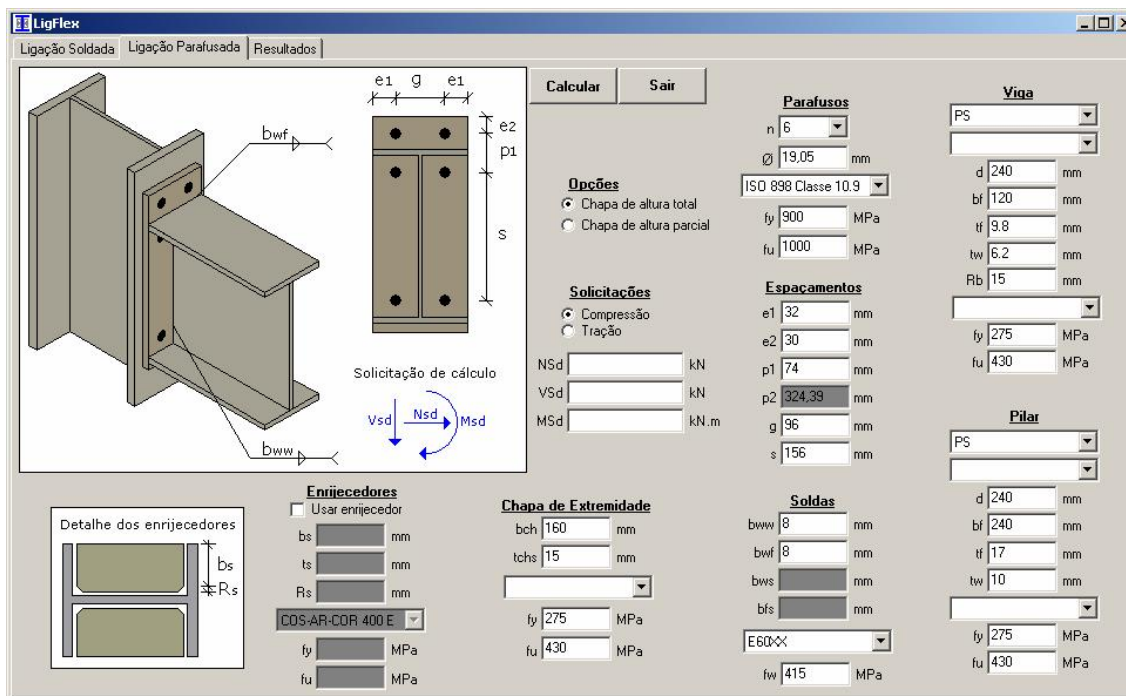


figura 4.21: janela do programa LIGFLEX com a entrada de dados do ensaio

Da mesma forma que foi feita a comparação de dados no item 4.2.1 para a chapa de extremidade de altura parcial, foram obtidos valores teóricos de cálculo e valores nominais para fazer a analogia entre os resultados do ensaio.

Os valores teóricos de cálculo obtidos através da rotina de cálculo do programa LIGFLEX foram $M_{Rd} = 104,3$ kN.m e uma rigidez rotacional de $S_j = 13167,91$ kN.m/rad.

Como o programa realiza os cálculos considerando o efeito das forças de cálculo das componentes, para efeito de comparação com os dados experimentais, foram calculados o momento resistente e a rigidez rotacional com base nos valores nominais das resistências das componentes. Dessa forma, obteve-se um momento fletor resistente de $M_{Rd} = 118,25$ kN.m e uma rigidez rotacional de $S_j = 26335,83$ kN.m/rad.

Na tabela 5 constam os valores teóricos (nominais) obtidos pela formulação empregada pelo programa LIGFLEX e a determinada por Lima [8] em seu trabalho. Além dos dados encontrados no ensaio.

Tabela 5: resultados teóricos e experimentais chapa de altura total

Fonte	M (kN.m)	S_j (kN.m/rad)
LIGFLEX	118,25	26335,83
Teórico Lima [8]	125,0	22849,8
Ensaio EE1	118,7	26933

O procedimento para determinar a rigidez rotacional nos ensaios para chapa de extremidade estendida foi o mesmo do ensaio para as chapas de altura parcial, ou seja, ela foi obtida através da inclinação da curva momento versus rotação, conforme figura 4.22 extraída do trabalho de Lima [8].

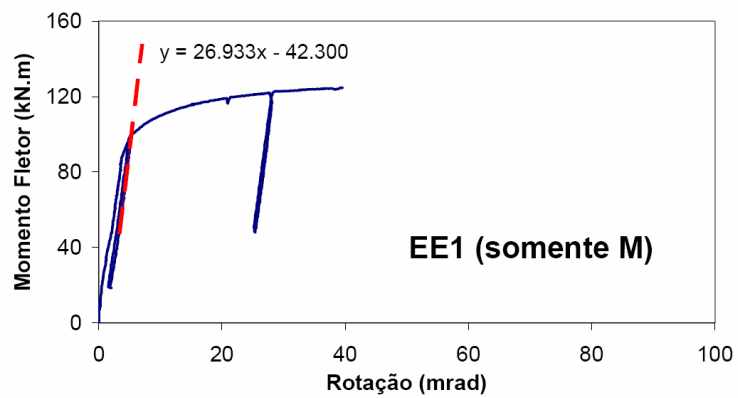


figura 4.22: curva momento versus rotação do ensaio EE1

5 RESULTADOS E APLICAÇÕES

Neste capítulo serão apresentadas às considerações relativas ao efeito da flexibilidade nas ligações metálicas. Isto será feito trabalhando com um modelo através da análise tradicional, considerando nós totalmente rígidos, e através da análise incluindo elementos de rigidez intermediária, nós semi-rígidos.

5.1 APRESENTAÇÃO DO MODELO

Com o fim de verificar a influência da flexibilidade das ligações na análise das estruturas será modelado um pórtico, figura 5.1, no qual, serão avaliados os resultados obtidos através da análise considerando a flexibilidade em alguns nós da estrutura.

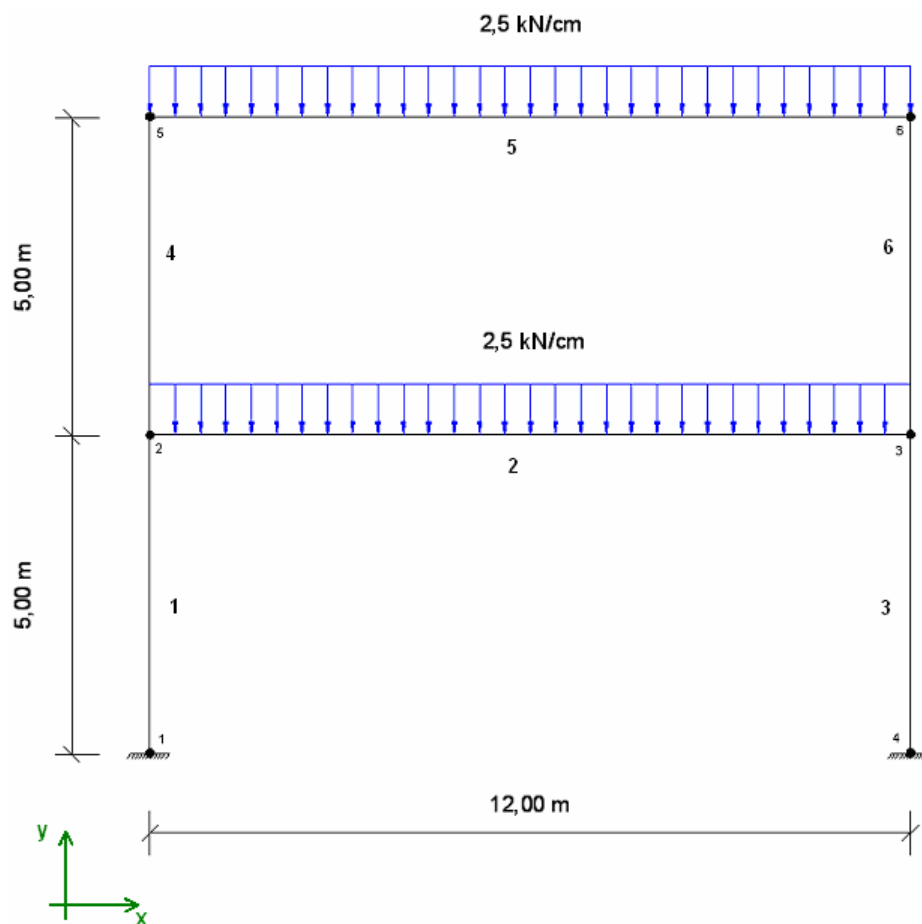


figura 5.1: modelo com cargas distribuídas

Posteriormente, o mesmo pórtico será analisado considerando ligações rígidas nesses mesmos nós, para que assim possa ser feita uma analogia entre os resultados obtidos.

Trata-se de um pórtico plano, com vão de 12 metros e altura total de 10 metros. Para os pilares foi adotado o perfil tipo I com as seguintes dimensões: 258,3 X 258,3 X 20,5 X 13. E para as vigas um perfil do tipo açomina W 533 X 92. O pórtico será submetido a cargas uniformemente distribuídas de valor 2,5 kN/m.

5.1.1 Análise considerando a flexibilidade

Para fazer a análise considerando a flexibilidade, simulando conexões semi-rígidas, as vigas da estrutura da figura 5.1 será modelada com molas rotacionais nos nós 2 e 3 na barra 2; e nós 5 e 6 na barra 5. A figura 5.2 mostra a barra 2 da estrutura no estado não deformado a) e deformado b), nos extremos das barras estão os elementos de mola com as respectivas rigidez rotacional S_j . Na condição deformada surgem os momentos nos extremos 2 e 3 dados por M_2 e M_3 , respectivamente. E, da mesma forma, surgem os giros θ_2 e θ_3 .

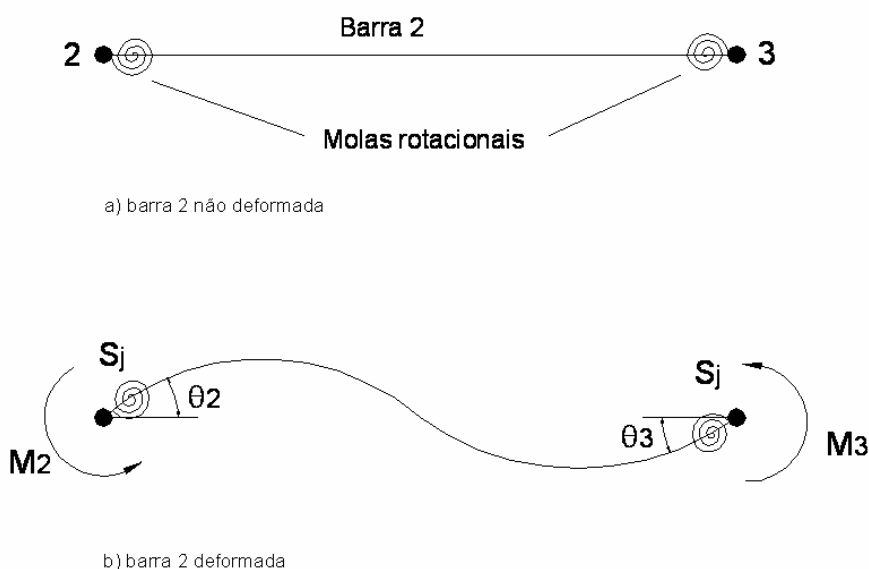


figura 5.2: modelo da estrutura para análise

A análise das estruturas considerando nós rígidos foi feita no programa computacional SAP 2000 [9]. Para considerar nós semi-rígidos foram utilizadas na análise, matrizes de rigidez

modificadas das barras. Estas matrizes foram apresentadas por Mello e Requena [10] e também por Monforton e Wu [11] em suas publicações e serão abordadas com maiores detalhes no item 5.1.1.2 deste trabalho.

O valor da rigidez rotacional, S_j , foi obtido através do programa desenvolvido LIGFLEX.

5.1.1.1 Determinação das propriedades da conexão

O momento resistente e a rigidez rotacional para as conexões da estrutura em estudo, figura 5.1, foram determinados através do programa LIGFLEX. O tipo de conexão escolhida está apresentada na figura 5.3. Trata-se de uma ligação com chapa de extremidade estendida com 8 parafusos. Optou-se por não utilizar enrijecedores. Os dados de entrada estão na tabela 6 e a figura 5.4 exibe a janela com os dados no programa LIGFLEX.

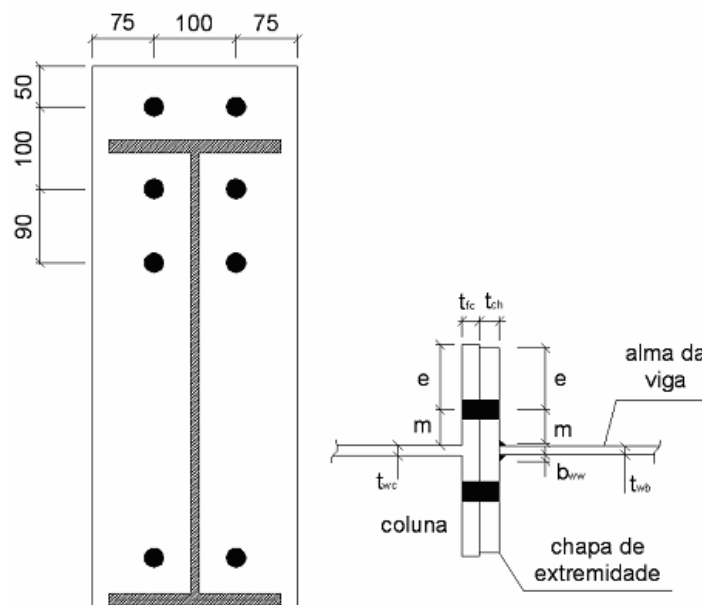


figura 5.3: conexão empregada no modelo

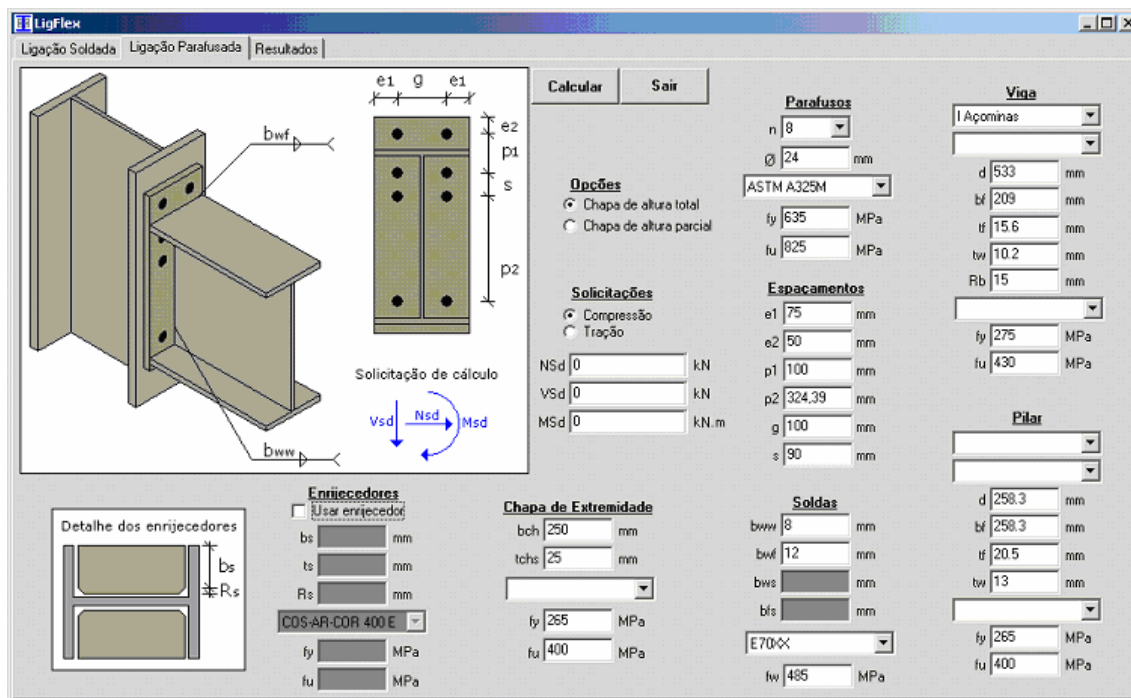


figura 5.4: entrada de dados no LIGFLEX

Tabela 6: dados de entrada na conexão

	f_y (Mpa)	f_u (Mpa)	d (mm)	b_r (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	R (mm)
VIGA	275	430	533	209	15,6	10,2	15
COLUNA	265	400	258,3	258,3	20,5	13	-
PARAFUSOS	$n = 8$	$\phi = 24$ mm	$f_{up} = 825$ Mpa	$f_{yp} = 635$ Mpa			
SOLDAS	$b_{wf} = 12$ mm	$b_{wv} = 8$ mm	$f_w = 485$ Mpa				
CHAPA DE EXTREMIDADE	$b_{ch} = 250$ mm	$t_{ch} = 25$ mm	$f_y = 265$ Mpa	$f_u = 400$ Mpa			
ESPAÇAMENTOS (mm)	e_1	e_2	p_1	p_2	g	s	
	75	50	100	324,39	100	90	

5.1.1.1 Geometria da conexão

Os parâmetros geométricos foram calculados no programa LIGFLEX conforme constam na tabela 7.

Tabela 7: parâmetros geométricos

Lado referente à coluna	Lado referente à viga
$m = \frac{g}{2} - \frac{t_{wc}}{2} = \frac{100}{2} - \frac{13}{2} = 43,5 \text{ mm}$	$m_p = \frac{g}{2} - \frac{t_{wb}}{2} - 0,8 \cdot b_{ww} = \frac{100}{2} - \frac{10,2}{2} - 0,8 \cdot 8 = 38,5 \text{ mm}$
$e = \frac{b_p}{2} - \frac{g}{2} = \frac{258,3}{2} - \frac{100}{2} = 79,15 \text{ mm}$	$e_p = \frac{b_{ch}}{2} - \frac{g}{2} = \frac{250}{2} - \frac{100}{2} = 75 \text{ mm}$
$n = \text{menor entre } e, 1,25 \cdot m \text{ e } e_p =$	$n_p = \text{menor entre } e, 1,25 \cdot m_p \text{ e } e_p$
$n = \min(79,12; 54,375; 75) = 54,375 \text{ mm}$	$n_p = \min(79,12; 48,125; 75) = 48,125 \text{ mm}$
Referente à porção estendida da chapa	
$m_x = x - 0,8 \cdot b_{wf} = 40 - 0,8 \cdot 12 = 30,4 \text{ mm}$	
$e_x = 50 \text{ mm}$	
$n_x = \text{menor entre } 1,25 \cdot m_x \text{ e } e_x = \min(38; 50) = 38 \text{ mm}$	

5.1.1.1.2 Cálculo das resistências potenciais das linhas de parafusos

A seguir serão exibidos os cálculos para obter as resistências potenciais das linhas de parafusos.

Para a linha 1 deverá ser avaliada a sua contribuição isolada apenas.

O primeiro passo é determinar a resistência da mesa da coluna à flexão. Para isso, inicialmente, será necessário obter o comprimento efetivo, dado pelo menor valor entre as expressões (5.1) e (5.2).

$$L_{\text{eff}} = 2 \cdot \pi \cdot m = 0,273 \text{ m} \quad (5.1)$$

$$L_{\text{eff}} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e = 0,272 \text{ m} \quad (5.2)$$

O comprimento efetivo é 0,272 m. Com esse valor entra-se na expressão (5.3) para obter o momento de plastificação.

$$M_p = \frac{0,25 \cdot L_{\text{eff}} \cdot t_{\text{fc}}^2 \cdot f_{\text{yc}}}{\gamma_{\text{M0}}} = 6,91 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (5.3)$$

Sendo $\gamma_{\text{M0}} = 1,10$.

É necessário, também, obter a força nos parafusos, dada pela expressão (5.4).

$$B_t = \frac{0,9 \cdot A_b \cdot f_{\text{up}}}{\gamma_{\text{M1}}} = 268,72 \text{ kN} \quad (5.4)$$

Sendo a área da seção transversal do parafuso, $A_b = 4,52 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. E $\gamma_{\text{M1}} = 1,25$.

Com estes valores é possível determinar a resistência da mesa da coluna para os três modos de falha. O modo 1 pela expressão (5.5), o modo 2 pela expressão (5.6) e o modo 3 pela expressão (5.7).

$$P_r = \frac{4 \cdot M_p}{m} = 635,4 \text{ kN} \quad (5.5)$$

$$P_r = \frac{2 \cdot M_p + n \cdot \sum B_t}{m + n} = 439,74 \text{ kN} \quad (5.6)$$

$$P_r = \sum B_t = 537,44 \text{ kN} \quad (5.7)$$

A resistência da mesa da coluna é dada pela resistência referente ao modo de falha 2. Ou seja: $P_r = 439,74 \text{ kN}$.

O segundo passo é determinar a resistência da alma da coluna à tração, através da expressão (5.8).

$$P_t = \frac{L_{\text{eff}} \cdot t_{\text{wc}} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} = 854,8 \text{ kN} \quad (5.8)$$

O terceiro passo é determinar a resistência da chapa de extremidade à flexão. Esta será obtida de forma análoga à mesa da coluna, variando apenas os comprimentos efetivos e alguns parâmetros geométricos.

O comprimento efetivo será tomado como o menor valor entre as expressões (5.9) a (5.13).

$$L_{\text{eff}} = \frac{b_{\text{ch}}}{2} = 0,125 \text{ m} \quad (5.9)$$

$$L_{\text{eff}} = 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x + \frac{g}{2} = 0,142 \text{ m} \quad (5.10)$$

$$L_{\text{eff}} = 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x + e_p = 0,167 \text{ m} \quad (5.11)$$

$$L_{\text{eff}} = 4 \cdot m_x + 1,25 \cdot e_x = 0,184 \text{ m} \quad (5.12)$$

$$L_{\text{eff}} = 2 \cdot \pi \cdot m_x = 0,191 \text{ m} \quad (5.13)$$

O comprimento efetivo é 0,125 m. Com esse valor entra-se na expressão (5.14) para obter o momento de plastificação.

$$M_p = \frac{0,25 \cdot L_{\text{eff}} \cdot t_{\text{ch}}^2 \cdot f_{\text{ych}}}{\gamma_{M0}} = 4,71 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (5.14)$$

Os modos de falha são dados pelas expressões (5.15) a (5.17).

$$P_r = \frac{4 \cdot M_p}{m_x} = 619,11 \text{ kN} \quad (5.15)$$

$$P_r = \frac{2 \cdot M_p + n_x \cdot \sum B_t}{m_x + n_x} = 436,16 \text{ kN} \quad (5.16)$$

$$P_r = \sum B_t = 537,44 \text{ kN} \quad (5.17)$$

A resistência da chapa de extremidade à flexão é dada pela resistência referente ao modo de falha 2. Ou seja: $P_r = 436,16 \text{ kN}$.

O quarto passo seria determinar a resistência da alma da viga à tração, mas como a linha 1 da conexão está situada na porção estendida da chapa de extremidade, então não é aplicável, pois está acima da alma da viga.

Para a linha 2 deverá ser avaliada a sua contribuição isolada e combinada com a linha 1.

A linha 2 isolada na região da mesa e alma da coluna terá as mesmas resistências obtidas para a linha 1 isolada.

A resistência da chapa de extremidade será determinada da mesma forma que na linha 1 para a mesa da coluna, entretanto, os parâmetros geométricos deverão ser substituídos. E os comprimentos efetivos também serão diferentes.

$$L_{\text{eff}} = 2 \cdot \pi \cdot m_p = 0,242 \text{ m} \quad (5.18)$$

$$L_{\text{eff}} = 4 \cdot m_p + 1,25 \cdot e_p = 0,248 \text{ m} \quad (5.19)$$

O comprimento efetivo da expressão (5.20), vai depender do parâmetro α que também necessita de outros parâmetros para ser obtido. Estes estão apresentados na tabela 8.

Com posse dos parâmetros λ_1 e λ_2 , para determinar α basta entrar no ábaco da figura 3.7 segundo critério do Eurocode 3 [1] ou através das expressões dadas no anexo D.

No caso do programa LIGFLEX, as expressões do anexo D foram implementadas nas rotinas de cálculo e o valor obtido para α foi de 2π .

Tabela 8: parâmetros geométricos da porção estendida da chapa

$m_1 = m_p = 38,5 \text{ mm}$	
$m_2 = p_1 - x - t_{\text{fb}} - 0,8 \cdot b_{\text{wf}} = 100 - 40 - 15,6 - 0,8 \cdot 12 = 34,8 \text{ mm}$	
$\lambda_1 = \frac{m_1}{m_1 + e} = \frac{38,5}{38,5 + 75} = 0,34$	
$\lambda_2 = \frac{m_2}{m_1 + e} = \frac{34,8}{38,5 + 75} = 0,31$	

$$L_{\text{eff}} = \alpha \cdot m_1 = 0,242 \text{ m} \quad (5.20)$$

O comprimento efetivo é o mínimo valor entre a expressão (5.18) e o máximo entre a (5.19) e (5.20). Portanto, $L_{\text{eff}} = 0,242 \text{ m}$.

Com o valor do comprimento efetivo é possível calcular o momento de plastificação utilizando a mesma expressão (5.14) alterando o valor do comprimento efetivo. Dessa forma, obtém-se: $M_p = 9,11 \text{ kN.m}$.

As resistências correspondentes aos modos de falha para a chapa de extremidade são obtidas pelas mesmas expressões que foram utilizadas no caso da mesa da coluna à flexão, porém trocando os valores dos parâmetros geométricos, substitui-se a variável m por m_p , e por e_p e n por n_p (as variáveis com sub índice p referem-se à geometria da chapa de extremidade). Fazendo essas modificações obtém-se:

Modo de falha 1: $P_r = 946,04$ kN.

Modo de falha 2: $P_r = 508,81$ kN.

Modo de falha 3: $P_r = 537,44$ kN.

A resistência da chapa de extremidade à flexão é dada pela resistência referente ao modo de falha 2. Ou seja: $P_r = 508,81$ kN.

Após avaliar a linha 1 e 2 isoladamente, deve-se analisar o efeito combinado delas.

A partir desse ponto, a formulação para cada componente, mesa e alma da coluna, chapa de extremidade e alma da viga, será exatamente igual à das linhas de parafusos isoladas. As únicas diferenças estão nos comprimentos efetivos e no número de parafusos considerados.

Para a resistência da mesa da coluna o comprimento efetivo será dado pelo padrão de escoamento 2 (rever figura 4.6 no item 4.1.1.2.1) adicionado da distância entre as linhas de parafusos 1 e 2, conforme expresso em (5.21).

$$L_{eff} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e + p_1 = 0,373 \text{ m} \quad (5.21)$$

Com esse comprimento efetivo o momento de plastificação obtido foi $M_p = 9,44$ kN.m.

Modo de falha 1: $P_r = 867,98$ kN.

Modo de falha 2: $P_r = 790,04$ kN.

Modo de falha 3: $P_r = 1074,88$ kN.

A resistência da mesa da coluna à flexão é dada pela resistência referente ao modo de falha 2. Ou seja: $P_r = 790,04$ kN.

A resistência da alma da coluna à tração, calculada com o mesmo L_{eff} da mesa da coluna será: $P_t = 1167,98$ kN.

Como se está combinando a linha 1 com a 2 e existe um enrijecedor entre elas, no caso a mesa da viga, então não é aplicável determinar a resistência da chapa de extremidade e nem a resistência da alma da coluna à tração.

A resistência da linha 3 isolada, assim como a linha 2 isolada, terá o mesmo valor de resistência para a mesa da coluna à flexão e alma da coluna à tração.

Para a chapa de extremidade, o comprimento efetivo será dado pelo menor valor entre os obtidos pelas expressões (5.22) e (5.23).

$$L_{eff} = 2 \cdot \pi \cdot m = 0,273 \text{ m} \quad (5.22)$$

$$L_{eff} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e = 0,272 \text{ m} \quad (5.23)$$

Com o comprimento efetivo, $L_{eff} = 0,272$ m, obteve-se um momento de plastificação de $M_p = 10,27$ kN.m e as resistências de cada modo de falha a seguir:

Modo de falha 1: $P_r = 1067,42$ kN.

Modo de falha 2: $P_r = 535,78$ kN.

Modo de falha 3: $P_r = 537,44$ kN.

A resistência da chapa de extremidade à flexão é dada pela resistência referente ao modo de falha 2. Ou seja: $P_r = 535,78$ kN.

A resistência da alma da viga à tração, calculada com o mesmo L_{eff} da chapa de extremidade será: $P_t = 696,0$ kN.

Após analisar a linha 3 isolada, esta deverá ser combinada com a linha 2.

Novamente, assim como quando foram combinadas as linhas 1 e 2, a formulação para cada componente, mesa e alma da coluna, chapa de extremidade e alma da viga, será

exatamente igual à das linhas de parafusos isoladas. As únicas diferenças estão nos comprimentos efetivos e no número de parafusos considerados.

Para a resistência da mesa da coluna o comprimento efetivo será dado pelo padrão de escoamento 2 adicionado da distância entre as linhas de parafusos 2 e 3, conforme expresso em (5.24).

$$L_{\text{eff}} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e + s = 0,363 \text{ m} \quad (5.24)$$

Com esse comprimento efetivo o momento de plastificação obtido foi $M_p = 9,19 \text{ kN.m}$.

Modo de falha 1: $P_r = 844,71 \text{ kN}$.

Modo de falha 2: $P_r = 784,87 \text{ kN}$.

Modo de falha 3: $P_r = 1074,88 \text{ kN}$.

A resistência da mesa da coluna à flexão é dada pela resistência referente ao modo de falha 2. Ou seja: $P_r = 784,87 \text{ kN}$.

A resistência da alma da coluna à tração, calculada com o mesmo L_{eff} da mesa da coluna será: $P_t = 1136,66 \text{ kN}$.

O comprimento efetivo para a chapa de extremidade com o efeito combinado das linhas 2 e 3 é dado pelo máximo valor entre as expressões (5.25) e (5.26).

$$L_{\text{eff}} = 4 \cdot m_p + 1,25 \cdot e_p + s = 0,338 \text{ m} \quad (5.25)$$

$$L_{\text{eff}} = \alpha \cdot m_p + s = 0,332 \text{ m} \quad (5.26)$$

O valor do comprimento efetivo é $L_{\text{eff}} = 0,338 \text{ m}$ e o momento de plastificação obtido foi $M_p = 12,71 \text{ kN.m}$.

Modo de falha 1: $P_r = 1320,89 \text{ kN}$.

Modo de falha 2: $P_r = 890,69 \text{ kN}$.

Modo de falha 3: $P_r = 1074,88 \text{ kN}$.

A resistência da chapa de extremidade à flexão é dada pela resistência referente ao modo de falha 2. Ou seja: $P_r = 890,69 \text{ kN}$.

Finalizando as combinações, deve-se associar o efeito entre as linhas 1, 2 e 3.

Para a resistência da mesa da coluna o comprimento efetivo será dado pelo padrão de escoamento 2 adicionado da distância entre as linhas de parafusos 1 e 2; e 2 e 3, conforme expresso em (5.27).

$$L_{\text{eff}} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e + p_1 + s = 0,463 \text{ m} \quad (5.27)$$

Com esse comprimento efetivo, $L_{\text{eff}} = 0,463 \text{ m}$, o momento de plastificação obtido foi igual a: $M_p = 11,72 \text{ kN.m}$.

Modo de falha 1: $P_r = 1077,44 \text{ kN}$.

Modo de falha 2: $P_r = 1135,16 \text{ kN}$.

Modo de falha 3: $P_r = 1612,31 \text{ kN}$.

A resistência da mesa da coluna à flexão é dada pela resistência referente ao modo de falha 1. Ou seja: $P_r = 1077,44 \text{ kN}$.

A resistência da alma da coluna à tração, calculada com o mesmo L_{eff} da mesa da coluna será: $P_t = 1449,84 \text{ kN}$.

Com esses valores das resistências de cada linha contribuindo de forma isolada e combinada, determina-se a resistência potencial de cada linha. Este procedimento é apresentado na tabela 9, seguindo as mesmas recomendações do esquema para determinação da resistência potencial das linhas de parafusos apresentado na figura 4.10 deste trabalho.

Tabela 9: determinação da resistência potencial

LINHA	Mesa da coluna (kN)	Alma da coluna (kN)	Chapa de extremidade (kN)	Alma da viga (kN)	Distrib. triangular	Resistência Potencial (kN)
1	439,74	854,80	436,16	N/A	N/A	436,16
2	439,74	854,80	508,81	N/A		
	790,04	1167,98	N/A	N/A		
	353,88	731,82	N/A	N/A	N/A	353,88
3	439,74	854,80	535,78	696,0		
	784,87	1136,66	890,69	N/A		
	430,99	782,78	536,80	N/A		
	1077,45	1449,84	N/A	N/A		
	287,41	659,80	N/A	N/A	N/A	287,41

A distribuição triangular deverá ser feita se uma das condições das expressões (5.28) e (5.29) não for atendida.

$$t_{ch} < \frac{\phi_p}{1,9} \cdot \sqrt{\frac{f_{up}}{f_{ych}}} \longrightarrow \frac{24}{1,9} \cdot \sqrt{\frac{825}{265}} = 22,3 \longrightarrow 25 > 22,3 \text{ Excede o limite} \quad (5.28)$$

$$t_{fc} < \frac{\phi_p}{1,9} \cdot \sqrt{\frac{f_{up}}{f_{yc}}} \longrightarrow \frac{24}{1,9} \cdot \sqrt{\frac{825}{265}} = 22,3 \longrightarrow 20,5 < 22,3 \text{ Ok!} \quad (5.29)$$

Como o limite foi excedido pela espessura da chapa de extremidade, então deverá ser feita a distribuição triangular. Isto será feito através da redução da resistência da linha 3 (última linha da zona tracionada), através da expressão (5.30).

$$P_{r3} = P_{r2} \cdot \frac{h_3}{h_2} = 353,88 \cdot \frac{0,375}{0,465} = 285,42 \text{ kN} \quad (5.30)$$

Sendo h_2 e h_3 as distâncias das linhas de parafusos até o centro de compressão da conexão, conforme figura 5.5, valendo respectivamente 465,2 mm e 375,2 mm.

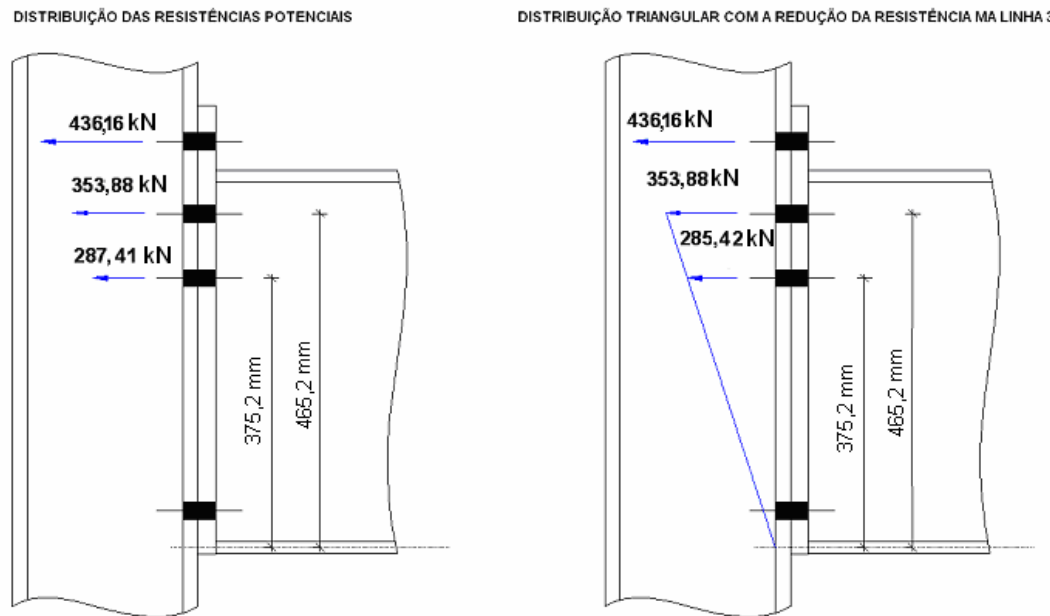


figura 5.5: distribuição das resistências na zona tracionada

5.1.1.1.3 Cálculo da resistência da alma da coluna na zona comprimida

A resistência da zona comprimida foi obtida conforme formulação apresentada no item 3.1.2.1.2 deste trabalho, sendo a largura efetiva dada pela expressão (5.31).

$$b_{\text{eff}} = t_{\text{fb}} + 2 \cdot (t_{\text{ch}} + b_{\text{wf}}) + 5 \cdot t_{\text{fc}} = 0,192 \text{ m} \quad (5.31)$$

E a resistência da alma da coluna dada pela expressão (5.32).

$$F_{\text{c,Rd}} = \frac{f_{\text{yc}} \cdot t_{\text{wc}} \cdot (1,25 - 0,5 \cdot \gamma_{\text{M0}} \cdot \sigma_{\text{n,Rd}} / f_{\text{yc}}) \cdot b_{\text{eff}}}{\gamma_{\text{M0}}} = 752,03 \text{ kN} \quad (5.32)$$

Sendo que o termo $\sigma_{n,Rd}$ é a máxima tensão normal de compressão na alma da coluna, foi tomado como zero devido a solicitação axial e ao momento fletor na entrada de dados para este exemplo terem sido nulos também.

5.1.1.1.4 Cálculo da resistência da alma da coluna na zona de cisalhamento

Da mesma forma que no cálculo da zona comprimida, a resistência ao cisalhamento têm a formulação já apresentada nesse trabalho, no caso item 3.1.2.1.3. A área sob influência do cisalhamento é dada pela expressão (5.33) e a resistência dada por (5.34).

$$A_v = (d_c - 2 \cdot t_{fc}) \cdot t_{wc} = 0,002825 \text{ m}^2 \quad (5.33)$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{f_{yc} \cdot A_v / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 392,91 \text{ kN} \quad (5.34)$$

5.1.1.1.5 Cálculo do momento resistente

Para determinar o momento resistente será necessário fazer o equilíbrio de forças na conexão. Ou seja, deverá ser atendida a condição da expressão (5.35).

$$\sum F_{Ri} + N_{Sd} = F_c \quad (5.35)$$

Sendo $\sum F_{Ri}$ o somatório das forças resultantes nas linhas de parafusos na zona tracionada da conexão, N_{Sd} é o esforço normal e F_c é a força atuante na zona comprimida. Então, primeiramente, deverá ser feito o somatório das resistências das linhas potenciais, ver a expressão (5.36).

$$\sum P_{Ri} = P_{r1} + P_{r2} + P_{r3} = 1075,46 \text{ kN} \quad (5.36)$$

Na conexão em estudo, o esforço normal é nulo, portanto para estabelecer o equilíbrio basta reduzir do somatório $\sum P_{Ri}$ o valor da resistência crítica na zona comprimida, que já foi obtida através da expressão (5.32), e vale $P_c = 752,03 \text{ kN}$, conforme expressão (5.37).

$$\sum P_{Ri} - P_c = 1075,46 - 752,03 = 323,43 \text{ kN} \quad (5.37)$$

Este valor obtido na expressão (5.37) deverá ser reduzido das linhas potenciais da conexão, de forma que obtenha-se o equilíbrio entre as resistências. Este procedimento deve ser iniciado pela linha de menor resistência potencial, no caso da conexão em estudo inicia-se reduzindo este valor, 323,43 kN, da resistência potencial da linha 3, conforme a expressão (5.38).

$$P_{R3} - 323,43 = -38,01 \text{ kN} \quad (5.38)$$

Este valor que restou além da resistência potencial da linha 3, deverá ser descontado da linha acima da 3, no caso a linha 2, conforme expressão (5.39).

$$P_{R2} - 38,01 = 315,87 \text{ kN} \quad (5.39)$$

Dessa forma, obtém-se o equilíbrio entre as resistências à tração e a resistência da zona comprimida, conforme figura 5.6.

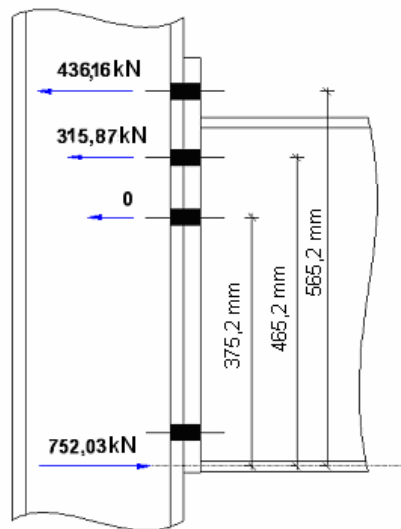


figura 5.6: distribuição das forças resultantes internas na conexão

O momento resistente será determinado a partir dessa distribuição de forças em equilíbrio no centro de compressão da ligação, conforme expressão (5.40).

$$M_{Rd} = \sum F_{Ri} \cdot h_i = 436,16 \cdot 0,565 + 315,87 \cdot 0,465 = 393,46 \text{ kN.m} \quad (5.40)$$

5.1.1.1.6 Cálculo da rigidez rotacional

Para determinar a rigidez rotacional o programa LIGFLEX obteve parâmetros individuais de cada uma das componentes formadoras da conexão. Estes parâmetros já foram apresentados no item 3.1.2.2 deste trabalho, conforme critérios do Eurocode 3 [1]. Na tabela 10 são apresentados estes parâmetros.

Tabela 10: parâmetros para determinação da rigidez rotacional

$k_1 = 0,210$ cm - alma do pilar ao cisalhamento
$k_2 = 0,704$ cm - alma do pilar sob compressão
$k_{31} = 0,572$ cm - alma do pilar tracionada linha 1
$k_{32} = 0,398$ cm - alma do pilar tracionada linha 2
$k_{33} = 0,551$ cm - alma do pilar tracionada linha 3
$k_{41} = 1,659$ cm - mesa do pilar sob flexão linha 1
$k_{42} = 0,845$ cm - mesa do pilar sob flexão linha 2
$k_{43} = 1,614$ cm - mesa do pilar sob flexão linha 3
$k_{51} = 2,909$ cm - chapa de extremidade sob flexão linha 1
$k_{52} = 3,930$ cm - chapa de extremidade sob flexão linha 2
$k_{53} = 3,930$ cm - chapa de extremidade sob flexão linha 3
$k_6 = 1,127$ cm - parafusos tracionados

Para as linhas de parafusos tracionadas deve-se determinar um parâmetro efetivo simulando a associação em série dessas componentes, feito através da expressão (5.41) e os resultados para as linhas são apresentados na tabela 11.

$$k_{\text{effi}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{3i}} + \frac{1}{k_{4i}} + \frac{1}{k_{5i}} + \frac{1}{k_6}} \quad (5.41)$$

Tabela 11: parâmetros efetivos para cada uma das linhas tracionadas

$K_{\text{eff1}} = 0,279$ cm	$K_{\text{eff2}} = 0,207$ cm	$K_{\text{eff3}} = 0,280$ cm
------------------------------	------------------------------	------------------------------

O braço de alavanca equivalente da conexão foi determinado pela expressão (5.42).

$$z_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{eff,i} \cdot h_i^2}{\sum_{i=1}^n K_{eff,i} \cdot h_i} = \frac{0,279 \cdot 56,52^2 + 0,207 \cdot 46,52^2 + 0,280 \cdot 37,52^2}{0,279 \cdot 56,52 + 0,207 \cdot 46,52 + 0,280 \cdot 37,52} = 48,28 \text{ cm} \quad (5.42)$$

O parâmetro resultante da associação em paralelo das linhas de parafusos é dado pela expressão (5.43).

$$K_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{eff,i} \cdot h_i}{z_{eq}} = \frac{0,279 \cdot 56,52 + 0,207 \cdot 46,52 + 0,280 \cdot 37,52}{48,28} = 0,744 \text{ cm} \quad (5.43)$$

O braço de alavanca da conexão, z , é dado pela expressão (5.44) e o parâmetro μ , associado à relação entre momento fletor solicitante e resistente de cálculo, foi tomado como unitário.

$$z = d_b - t_{fb} = 53,3 - 1,56 = 51,74 \text{ cm} \quad (5.44)$$

Finalmente, a rigidez rotacional é determinada através da expressão (5.45).

$$S_j = \frac{E \cdot z^2}{\mu \cdot \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{K_{eq}} \right)} = 72914,99 \frac{\text{kN.m}}{\text{rad}} \quad (5.45)$$

Com o valor da rigidez rotacional da conexão é possível estabelecer o fator para avaliar o grau de rigidez.

Segundo Pinheiro e Silveira [12], este fator chamado de γ , varia de zero, para ligações flexíveis, a um para totalmente rígidas. Ele poderá ser obtido através da expressão (5.46).

$$S_j = \frac{\gamma}{1-\gamma} \cdot \frac{3 \cdot E \cdot I}{L} \quad (5.46)$$

Substituindo os valores da rigidez rotacional (S_j), do módulo de elasticidade (E), do momento de inércia (I) e o comprimento da barra (L), obtém-se $\gamma = 0,723$. Isto significa que a conexão está entre os extremos, flexível e rígida, e pode ser considerada semi-rígida.

5.1.1.2 Análise do pórtico com a inserção da rigidez rotacional

Os dados necessários para a análise do pórtico da figura 5.1 são apresentados na tabela 12.

Tabela 12: dados do pórtico para análise

BARRA	CONETIVIDADES		COORD. DOS NÓS		PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS			
	Nó inicial	Nó final	x (m)	z (m)	Área (cm ²)	Inércia (cm ⁴)	E (kN/m ²)	Seção
1	1	2	0	0	134,15	16120,4	205000000	2
2	2	3	0	5,00	116,39	54394,29	205000000	1
3	3	4	12,00	5,00	134,15	16120,4	205000000	2
4	2	5	12,00	0	134,15	16120,4	205000000	2
5	5	6	0	10,00	116,39	54394,29	205000000	1
6	6	3	12,00	10,00	134,15	16120,4	205000000	2

Os nós 1 e 4 possuem restrição a translação em x e z e ao giro.

A seção 1 na tabela 12 refere-se aos perfis empregados nas vigas, ou seja, do tipo I da açominas W 533 X 92. Da mesma forma que a seção 2 refere-se aos pilares, tipo I 258,3 X 258,3 X 20,5 X 13.

A ferramenta utilizada para analisar as estruturas, considerando os nós 2, 3, 5 e 6 como sendo rígidos, foi o programa computacional SAP 2000 [9]. Para isso, foram informados ao programa todos os dados da tabela 12 e as condições de carregamento estabelecidas, conforme apresentado na figura 5.1.

Para fazer a análise considerando nós semi-rígidos, deverá ser empregada uma matriz de rigidez corrigida, ou seja, a matriz é montada a partir da original com a inserção de fatores dados em função da rigidez rotacional no nó inicial e final da barra.

A análise do pórtico com nós semi-rígidos foi feita manualmente, apenas com o auxílio de ferramentas matemáticas dos programas computacionais Excel [13] e Maple [14]. A seguir serão explicitados cada passo desta análise.

5.1.1.2.1 Montagem da matriz de rigidez local das barras

Nas estruturas em estudo, as barras 1, 3, 4 e 6 serão consideradas como barras de pórtico plano com nós totalmente rígidos e a matriz de rigidez local destas barras é dada conforme (5.47).

$$S^L = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & 0 & -S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & S_3 & 0 & -S_2 & S_3 \\ 0 & S_3 & S_4 & 0 & -S_3 & S_5 \\ -S_1 & 0 & 0 & -S_1 & 0 & 0 \\ 0 & -S_2 & -S_3 & 0 & S_2 & -S_3 \\ 0 & S_3 & S_5 & 0 & -S_3 & S_4 \end{bmatrix} \quad (5.47)$$

Sendo que os termos S_1 , S_2 , S_3 , S_4 e S_5 são dados respectivamente, através das expressões (5.48), (5.49), (5.50), (5.51) e (5.52).

$$S_1 = \frac{E \cdot A}{L} \quad (5.48)$$

$$S_2 = \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} \quad (5.49)$$

$$S_3 = \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \quad (5.50)$$

$$S_4 = \frac{4 \cdot E \cdot I}{L} \quad (5.51)$$

$$S_5 = \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} \quad (5.52)$$

Onde:

E: módulo de elasticidade longitudinal;

A: área da seção transversal da barra;

L: comprimento da barra;

I: momento de inércia da seção.

Para as barras 2 e 5, cujas extremidades serão considerados nós semi-rígidos, a matriz de rigidez local é dada por (5.53). Esta matriz de rigidez pode ser encontrada no trabalho de Mello e Requena [10].

$$K^L = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 & -K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & K_3 & 0 & -K_2 & K_4 \\ 0 & K_3 & K_5 & 0 & -K_3 & K_6 \\ -K_1 & 0 & 0 & -K_1 & 0 & 0 \\ 0 & -K_2 & -K_3 & 0 & K_2 & -K_4 \\ 0 & K_4 & K_6 & 0 & -K_4 & K_7 \end{bmatrix} \quad (5.53)$$

Os termos K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 , K_6 , e K_7 são dados respectivamente, através das expressões (5.54), (5.55), (5.56), (5.57), (5.58), (5.59) e (5.60).

$$K_1 = S_1 \quad (5.54)$$

$$K_2 = S_2 - \frac{S_3^2 \cdot (2 \cdot S_4 - 2 \cdot S_5 + S_{ji} + S_{jj})}{S_{ji} \cdot S_{jj} + S_4 \cdot S_{ji} + S_4 \cdot S_{jj} + S_4^2 - S_5^2} \quad (5.55)$$

$$K_3 = \frac{S_3 \cdot S_{jj} \cdot (S_4 - S_5 + S_{ji})}{S_{ji} \cdot S_{jj} + S_4 \cdot S_{ji} + S_4 \cdot S_{jj} + S_4^2 - S_5^2} \quad (5.56)$$

$$K_4 = \frac{S_3 \cdot S_{ji} \cdot (S_4 - S_5 + S_{ji})}{S_{ji} \cdot S_{jj} + S_4 \cdot S_{ji} + S_4 \cdot S_{jj} + S_4^2 - S_5^2} \quad (5.57)$$

$$K_5 = \frac{S_{ji} \cdot (S_4^2 + S_4 \cdot S_{ji} - S_5^2)}{S_{ji} \cdot S_{jj} + S_4 \cdot S_{ji} + S_4 \cdot S_{jj} + S_4^2 - S_5^2} \quad (5.58)$$

$$K_6 = \frac{S_5 \cdot S_{ji} \cdot S_{jj}}{S_{ji} \cdot S_{jj} + S_4 \cdot S_{ji} + S_4 \cdot S_{jj} + S_4^2 - S_5^2} \quad (5.59)$$

$$K_7 = \frac{S_{jj} \cdot (S_4^2 + S_4 \cdot S_{ji} - S_5^2)}{S_{ji} \cdot S_{jj} + S_4 \cdot S_{ji} + S_4 \cdot S_{jj} + S_4^2 - S_5^2} \quad (5.60)$$

Sendo S_{ji} e S_{ij} os valores da rigidez rotacional no nó inicial e final da barra, respectivamente. No caso da estrutura em estudo, estes valores são iguais, pois foi adotada a mesma ligação nos extremos das barra 2 e 5.

Estes valores de rigidez foram obtidos segundo o procedimento do item 5.1.1.1.6 deste trabalho através do qual obteve-se um valor de 72914,99 kN.m/rad.

5.1.1.2.2 Montagem da matriz de rigidez global das barras

Prosseguindo com a análise dos pórticos e com posse das matrizes de rigidez locais das barras, faz-se necessário encontrar a matriz de rigidez global. Dessa forma, foi aplicada a expressão (5.61) para as barras com nós totalmente rígidos e (5.62) no caso das barras com nós semi-rígidos.

A matriz de rotação do pórtico plano, R , é dada conforme (5.63).

$$S^G = R^T \cdot S^L \cdot R \quad (5.61)$$

$$K^G = R^T \cdot K^L \cdot R \quad (5.62)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \text{sen}\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.63)$$

Onde:

R^T : matriz de rotação transposta;

θ : é o ângulo de inclinação da barra no plano.

As operações com estas matrizes foram efetuadas no programa Excel [13], da mesma forma que a obtenção da matriz de rigidez global da estrutura, esta a partir de agora será chamada de K_{EST} .

5.1.1.2.3 Montagem do vetor de cargas

O vetor de cargas da estrutura é obtido pela soma do vetor de cargas aplicadas nos nós (\bar{P}) com o vetor de cargas nodais equivalentes (P_{eq}), conforme expressão (5.64).

$$P = \bar{P} + P_{eq} \quad (5.64)$$

No caso específico da estrutura que está sendo avaliadas, com cargas distribuídas (figura 5.1) o vetor de cargas aplicadas nos nós é nulo.

O vetor de cargas nodais equivalentes é dado pelo vetor de forças de engastamento perfeito com o sinal trocado. No caso da estrutura da figura 5.1, o vetor de forças de engastamento perfeito em coordenadas locais (F_{ep}^L) das barras carregadas (barras 2 e 5) é obtido conforme (5.65).

$$F_{ep}^L = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{q \cdot L}{2} \\ \frac{q \cdot L^2}{2} \\ 0 \\ \frac{q \cdot L}{2} \\ \frac{q \cdot L^2}{2} \\ -\frac{q \cdot L^2}{2} \end{bmatrix} \quad (5.65)$$

Onde:

q : é o valor da carga distribuída;

L: comprimento da barra.

Para obter o vetor de forças de engastamento perfeito em coordenadas globais, basta fazer a operação (5.66).

$$F_{ep}^G = R^T \cdot F_{ep}^L \quad (5.66)$$

Com os vetores de forças nodais equivalentes de cada barra e com o vetor de cargas aplicadas nos nós, obtém-se o vetor de cargas da estrutura.

5.1.1.2.4 Cálculo dos deslocamentos

O vetor de deslocamentos (U) foi obtido através da solução do sistema dado em (5.67).

$$P = K_{EST} \cdot U \quad (5.67)$$

Entretanto, para resolver este sistema deverão ser introduzidas as condições de contorno referentes às restrições nos nós 1 e 4 da estrutura em estudo.

A solução deste sistema foi obtida através do programa Maple 7 [14].

5.1.1.2.5 Cálculo das solicitações nos extremos das barras

Para cada uma das barras (m), supondo o sub-índice i referente ao nó inicial e j ao nó final, as solicitações, em coordenadas globais, serão obtidas através das expressões (5.68) e (5.69).

$$F_{mi} = k_{mii} \cdot U_i + k_{mij} \cdot U_j + F_{epmi} \quad (5.68)$$

$$F_{mj} = k_{mji} \cdot U_i + k_{mjj} \cdot U_j + F_{epmj} \quad (5.69)$$

Sendo U_i e U_j os deslocamentos nos nós inicial e final de cada barra, obtidos através da solução do sistema (5.67). E k_{mii} , k_{mij} , k_{mji} e k_{mjj} são as partições da matriz de rigidez da barra m . E, também, F_{epmi} e F_{epmj} são os vetores de engastamento perfeito referentes às parcelas nos nós inicial e final da barra.

As solicitações deverão ser indicadas em relação aos eixos locais das barras, por isso deverá ser feita a multiplicação da matriz de rotação pelas solicitações encontradas. Dessa forma, elas estarão expressas em coordenadas locais.

5.1.1.2.6 Cálculo das reações

Para os nós que são apoios, nós 1 e 4 da estrutura que está sendo analisada, deverão ser determinadas as reações. Estas serão determinadas conforme a expressão (5.70).

$$\bar{R} = -\bar{P} + \sum_{m=1}^p F_{mi} \quad (5.70)$$

Onde:

p : numero de barras ligadas ao nó i ;

\bar{R} : é o vetor que contém as reações do nó i .

É importante salientar que o vetor de solicitações, F_{mi} , na expressão (5.70) deverá ser utilizado em coordenadas globais.

5.1.2 Resultados obtidos

A partir da análise feita conforme descrita no item 5.1.1.2 deste trabalho, são apresentados os resultados obtidos para as duas situações de carregamento do pórtico em estudo.

5.1.2.1 Resultados encontrados para o pórtico com carga uniformemente distribuída

Neste item serão apresentados os resultados obtidos através na análise da estrutura representada na figura 5.1.

A tabela 13 apresenta os deslocamentos obtidos para a estrutura com nós rígidos e semi-rígidos.

Tabela 13: deslocamentos obtidos pela análise com cargas distribuídas

Análise com nós semi-rígidos			
Nó	dx (cm)	dy (cm)	giro
1	0	0	0
2	-1,04E-3	-5,45E-03	0,27E-03
3	1,04E-3	-5,45E-03	-0,27E-03
4	0	0	0
5	1,59E-3	-8,18E-03	0,53E-03
6	-1,59E-3	-8,18E-03	-0,53E-03
Análise com nós rígidos – resultados via SAP 2000 [9]			
Nó	dx (cm)	dy (cm)	giro
1	0	0	0
2	-1,09E-03	-5,45E-03	0,31E-03
3	1,09E-03	-5,45E-03	-0,31E-03
4	0	0	0
5	1,73E-03	-8,18E-03	0,597E-03
6	-1,73E-03	-8,18E-03	-0,597E-03

A tabela 14 mostra as solicitações obtidas para a análise com nós semi-rígidos.

Tabela 14: solicitações obtidas pela análise com nós semi-rígidos e cargas distribuídas

Análise com nós semi-rígidos				
Barra	Nó	N (kN)	V (kN)	M (kN.m)
1	1	- 30	- 2,20	- 3,69
	2	- 30	- 2,20	7,31
2	2	4,11	- 15	- 21,38
	Vão/2	4,11	0	23,62
	3	4,11	15	- 21,38
3	3	- 30	2,20	- 7,31
	4	- 30	- 2,20	3,69
4	2	- 15	- 6,32	- 14,08
	5	- 15	6,32	17,52
5	5	- 6,32	15	- 17,52
	Vão/2	- 6,32	0	27,48
	6	- 6,32	15	- 17,52
6	6	- 15	6,32	- 17,52
	3	-15	- 6,32	14,08

A tabela 15 mostra as solicitações obtidas para a análise com nós rígidos.

Tabela 15: solicitações obtidas pela análise com nós rígidos e cargas distribuídas

Análise com nós rígidos – resultados via SAP 2000 [9]				
Barra	Nó	N (kN)	V (kN)	M (kN.m)
1	1	-30	- 2,51	- 4,09
	2	-30	- 2,51	8,46
2	2	4,35	- 15	-23,85
	Vão/2	4,35	0	21,15
	3	4,35	15	-23,85
3	3	- 30	-2,51	- 8,46
	4	- 30	- 2,51	4,09
4	2	-15	- 6,86	- 15,39
	5	-15	-6,86	18,91
5	5	- 6,86	-15	-18,91
	Vão/2	- 6,86	0	26,09
	6	- 6,86	15	-18,91
6	6	-15	-6,86	-18,91
	3	-15	-6,86	15,39

A tabela 16 apresenta as reações para as duas condições de rigidez nos nós.

Tabela 16: reações obtidas pela análise com cargas distribuídas

Análise com nós semi-rígidos			
Nó	Fx (kN)	Fy (kN)	Mz (kN.m)
1	2,20	30	3,69
4	-2,20	30	-3,69
Análise com nós rígidos – resultados via SAP 2000 [9]			
Nó	Fx (kN)	Fy (kN)	Mz (kN.m)
1	2,50	30	4,09
4	-2,50	30	-4,09

Observando os resultados e fazendo uma analogia entre as duas formas de análise empregadas, percebe-se que em relação aos deslocamentos a diferença máxima ocorreu nos nós 5 e 6 sendo os deslocamentos na direção x obtidos na análise com nós semi-rígidos menores 8% que os da análise com nós rígidos.

Em relação às solicitações percebe-se uma sensível diferença na distribuição dos momentos, figura 5.7.

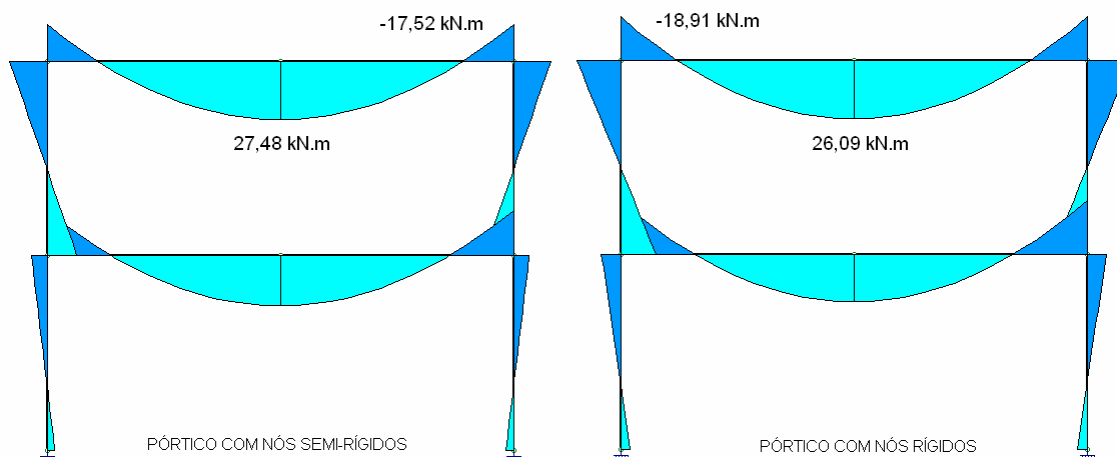


figura 5.7: diagrama de momentos para nós rígidos e semi-rígidos

Observa-se que os nós dos pilares não são rotacionados com o valor do nó rígido, dessa forma perde-se momento com a rotação relativa, inserção de nós semi-rígidos.

A estrutura comportou-se conforme o esperado, ou seja, a inserção dos nós semi-rígidos promoveu uma redução dos momentos negativos nos extremos das barras e aumento do

momento positivo no meio do vão. De forma que, ficou caracterizado o comportamento intermediário da estrutura quando é considerada a flexibilidade na análise. Este comportamento salientou-se na barra 5 da estrutura em estudo, comparando os resultados das análises com nós semi-rígidos obteve-se um momento máximo positivo 5,3% maior e máximos negativos 7,9% menores que os da análise com nós rígidos.

5.1.2.2 Resultados encontrados para a análise do pórtico variando a rigidez

Neste item serão apresentados os resultados obtidos através na análise da estrutura representada na figura 4.22 variando a rigidez nos extremos das vigas.

Foram analisadas dez configurações diferentes para o pórtico da figura 5.1. A metodologia usada para a análise foi a mesma explicitada no item 5.1.1.2 deste trabalho.

Além dos momentos máximos positivos e negativos, também foram obtidos os fatores para avaliar o grau de rigidez (γ). Estes resultados são apresentados na tabela 17.

Tabela 17: resultados obtidos através da variação da rigidez

RIGIDEZ ROTACIONAL (Sj) [kN.m/rad]	GRAU DE RIGIDEZ (γ)	MOMENTO MÁXIMO NEGATIVO [kN.m]	MOMENTO MÁXIMO POSITIVO [kN.m]
50	1,79E-03	- 7,55	37,45
100	3,57E-03	- 7,60	37,40
500	1,76E-02	- 7,96	37,03
1000	3,46E-02	- 8,39	36,61
2500	8,23E-02	- 9,49	35,51
5000	0,152	- 10,90	34,10
10000	0,264	- 12,75	32,25
50000	0,642	- 16,89	28,11
100000	0,782	- 17,93	27,07
500000	0,947	-18,95	26,05

Complementando este estudo foram traçadas duas curvas em função do grau de rigidez, uma com momentos máximos positivos e outra com momentos máximos negativos, conforme o gráfico da figura 5.8.

Os dados utilizados para traçar as curvas e expostos na tabela 17 referem-se aos nós mais solicitados da estrutura, nós 5 e 6 da viga 5.

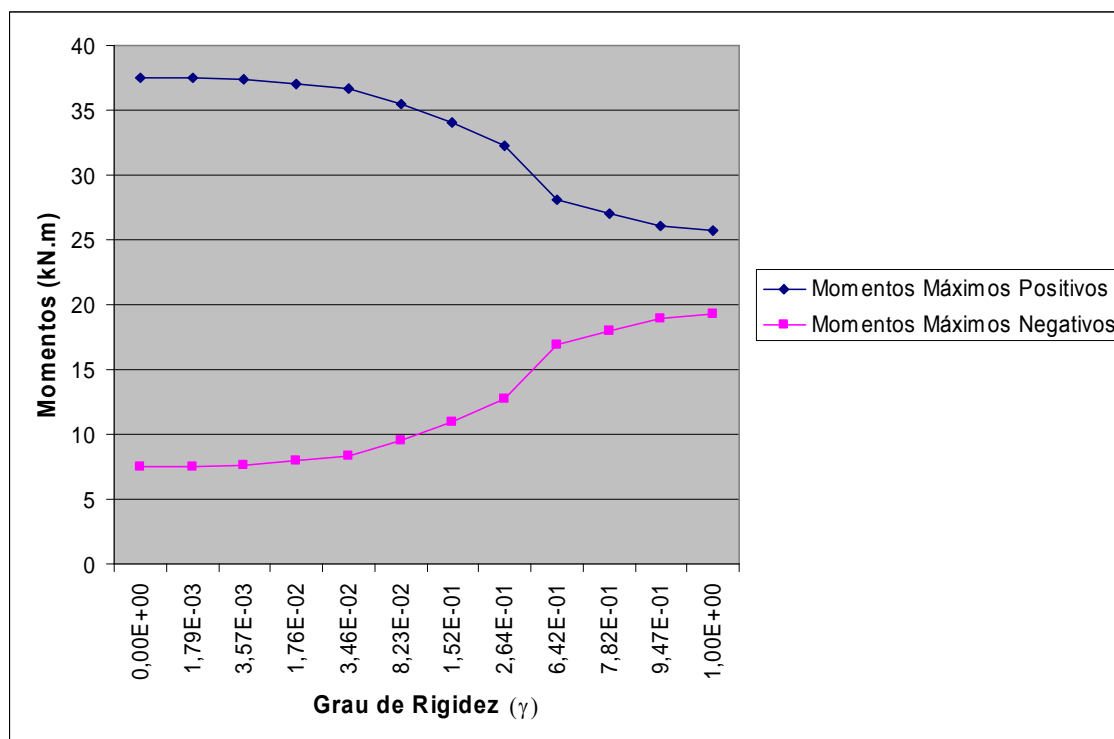


figura 5.8: curvas grau de rigidez x momentos

Através das curvas traçadas percebe-se que a medida que aumenta a rigidez da conexão tem-se um aumento dos momentos negativos e redução dos momentos máximos positivos.

Dessa forma, nota-se uma acentuada diferença na distribuição dos momentos. A estrutura comportou-se conforme o esperado, ou seja, a inserção dos nós semi-rígidos promoveu uma redução dos momentos negativos nos extremos das barras e um aumento do momento positivo no meio do vão comparando com a análise com nós totalmente rígidos. Ficando caracterizado o comportamento intermediário da estrutura quando é considerada a flexibilidade na análise.

No anexo E deste trabalho são apresentados resultados, retirados do trabalho de Monforton e Wu [11], da análise de uma estrutura com o fator de rigidez γ , variando de zero a um.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram abordadas as ligações semi-rígidas, conforme critérios do Eurocode 3 [1] e BCSA [2]. Foram apresentados o embasamento teórico do tema e também a metodologia de cálculo empregada por estas fontes bibliográficas. Foram tratadas, especificamente, conexões entre vigas e pilares soldadas e parafusadas com chapa de extremidade.

Aplicando a metodologia de cálculo pesquisada foi desenvolvido um programa computacional, o LIGFLEX, de forma a agilizar o processo de cálculo de ligações considerando o efeito da flexibilidade.

Também foi realizada a análise de uma estrutura considerando nós semi-rígidos com o intuito de visualizar a nova distribuição de solicitações e comparar com a distribuição na mesma estrutura, porém, empregando apenas nós rígidos. Com os resultados obtidos foi possível estabelecer o efeito da flexibilidade nas solicitações e deslocamentos das estruturas.

6.1 IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA LIGFLEX

O programa LIGFLEX foi desenvolvido de forma que fosse possível avaliar as conexões semi-rígidas entre vigas e pilares de maneira simples ao usuário e eficiente na determinação da resistência e rigidez da ligação.

A validade da formulação empregada pelo programa foi verificada através da comparação dos resultados obtidos com dados experimentais e teóricos pesquisados na literatura. Através destes resultados pode-se detectar que o programa atende de forma satisfatória ao cálculo das propriedades das conexões por ele abordadas.

O programa LIGFLEX pode ser utilizado como uma ferramenta rápida e segura ao usuário não só para a verificação das componentes da ligação entre vigas e pilares soldadas e parafusadas com chapa de extremidade, mas principalmente, na determinação da rigidez tornando possível a análise de estruturas com o efeito da flexibilidade. Dessa forma, estaria sendo feita a análise de um modelo com um comportamento mais próximo da realidade e não idealizado.

6.2 INFLUÊNCIA DA FLEXIBILIDADE

A influência da flexibilidade na análise de estruturas em aço foi verificada neste trabalho através da inserção de molas rotacionais em nós de um pórtico. Verificou-se uma nova distribuição de solicitações devido à rigidez rotacional imposta nesses nós. Observaram-se alterações nos deslocamentos e, conseqüentemente, nas reações nos apoios.

Um dos objetivos principais deste trabalho foi verificar o comportamento da estrutura assumindo propriedades intermediárias das conexões em relação a sua rigidez, entre os extremos totalmente rígido e totalmente flexível. Esta verificação foi motivada pelo fato de saber-se que o comportamento real das estruturas sugere um certo grau de flexibilidade que não é considerado na análise convencional. As vantagens de adotar esta propriedade na análise das estruturas foram comprovadas através do exemplo sugerido neste trabalho.

Comprovou-se que a presença dos nós semi-rígidos resultou numa redução dos momentos negativos no encontro de vigas e pilares, e também um decréscimo dos deslocamentos horizontais em relação à mesma estrutura com nós rígidos, de forma mais acentuada em certos tipos de carregamento.

Em relação ao dimensionamento considerar nós rígidos faz com que o momento máximo positivo atuante nas vigas do pórtico seja maior do que o calculado. Isto implica em um alívio de solicitações nas colunas podendo levar ao colapso em casos extremos. Isto ocorre porque o momento de engastamento perfeito existente na viga não é totalmente absorvido pela ligação. Se as vigas estão superdimensionadas poderá ocorrer um colapso das colunas, dessa forma, comprometendo a segurança estrutural.

6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seguindo nesta linha de pesquisa poderiam ser implementadas outras configurações de conexões e avaliada a variação de suas propriedades em relação às ligações já existentes no programa desenvolvido.

Sugerem-se ligações entre vigas e variações na forma de conexão entre vigas e pilares e entre vigas, ou seja, possibilitar não só chapas de extremidades, mas também utilizar como meio de conexão cantoneiras na alma das vigas e também cantoneiras de topo e de assento.

Ainda tratando-se de aprimorar ferramentas de cálculo que considerem a flexibilidade na análise de estruturas metálicas, sugere-se a implementação da matriz de rigidez com o fator de correção, conforme abordado no item 5.1.1.2 deste trabalho, em um programa de análise de estruturas. Isto poderá ser feito exigindo ao usuário apenas a declaração da constante de rigidez rotacional do nó semi-rígido. Esta seria uma ferramenta importante a ser considerada tratando-se do tema flexibilidade em ligações.

REFERÊNCIAS

[1] Eurocode 3. ENV – 1993-1-1:1992, Annex J, Design of Steel Structures. CEN, European Committee for Standardisation, p. 215 – 247.

[2] BCSA - British Constructional Steel Association – 1995, Joints in Steel Construction, Moment Connections.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios. Rio de Janeiro, 1986.

[4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto e execução de estruturas de aço e estruturas mistas aço-concreto. Projeto de Revisão da NBR 8800, versão de setembro de 2006.

[5] Bermiani, Faris G. A. e Kitipornchai, Stritawat. (1992): Elastoplastic Nonlinear Analysis of Flexibly Jointed Space Frames. Journal of Structural Engineering, vol 118.

[6] Romano, Victor Pereira. (2001): Dimensionamento de Ligações Viga-Coluna com chapa de topo: Modelo do Eurocode 3, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas, Brasil, p. 38.

[7] Borland C ++ Builder, Version 6.0 (Build 10.161), Copyright 1983 – 2002 – Inprise Corporation

[8] Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de. (2003): Comportamento de Ligações com Placa de Extremidade em Estruturas de Aço Submetidas ao Momento Fletor e Força Axial, Dissertação de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio, Brasil, p. 67 – 72, p. 90 – 91, p. 127 - 128.

[9] SAP 2000, NonLinear Version 7.12 – Structural Analysis Program, Copyright 1984 – 1999 – Computers and Structures Incorporation.

[10] Mello, Wagner Luiz de; Requena, João Alberto Venegas. (1999): Análise de instabilidade de barras planas considerando as ligações semi-rígidas. Faculdade de Engenharia Civil - Departamento de Estruturas - Unicamp, Brasil.

[11] Monforton, G. R.; Wu, T. S.. Matrix Analysis of semi-rigidly Connected Frames. In: Journal of the Structural Division – Proceedings of the American Society of Civil Engineers, p. 12 -42, 1963.

[12] Pinheiro, Leonardo; Silveira, Ricardo A. M.. Computational Procedures for Nonlinear Analysis of Frames with Semi-Rigid Connections. Civil Engineering Program. Federal University of Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ – Brazil. Civil Engineering Graduate Program – PROPEC – Department of Civil Engineering - Federal University of Ouro Preto – Brazil.

[13] MICROSOFT, Excel for Windows XP, Copyright 1985 – 1999 – Microsoft Corporation, 2002.

[14] Maple 7, Copyright 1981 – 2001 – Waterloo Maple Incorporation.

**ANEXO A – PROCEDIMENTOS PARA DETERMINAR O MOMENTO
RESISTENTE SEGUNDO EUROCODE 3 [1]**

De acordo com o Eurocode 3 [1], as ligações parafusadas devem ser dimensionadas segundo os procedimentos que constam no anexo J desta norma.

O procedimento J.3.1 pode ser usado para determinar o momento resistente de qualquer tipo de ligação e é baseado na distribuição plástica das forças nos parafusos. Ele é composto por 17 passos indicados a seguir.

Passo 1: determinar a resistência das mesas da coluna na zona tracionada.

Se a mesa da coluna não for enrijecida, deverá ser considerada uma série de equivalentes *t-stubs* com comprimento total ΣL_{eff} de parafusos padrão na zona tracionada da conexão (ver figura A.1).

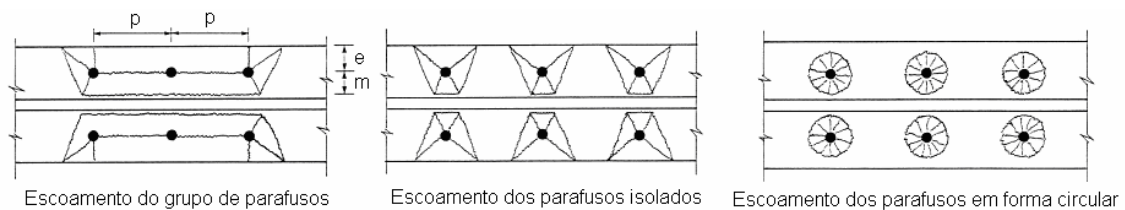


figura A.1: escoamento da linhas de parafusos para uma mesa não enrijecida

A largura efetiva deverá ser tomada como o menor valor entre:

a) parafusos internos ver expressões (A.1) a (A.3):

$$L_{effa} = p \quad (A.1)$$

$$L_{effa} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e \quad (A.2)$$

$$L_{\text{effa}} = 2 \cdot \pi \cdot m \quad (\text{A.3})$$

b) parafusos externos ver expressões (A.4) a (A.6):

$$L_{\text{effb}} = 0,5 \cdot p + 2 \cdot m + 0,625 \cdot e \quad (\text{A.4})$$

$$L_{\text{effb}} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e \quad (\text{A.5})$$

$$L_{\text{effb}} = 2 \cdot \pi \cdot m \quad (\text{A.6})$$

Caso a mesa da coluna tenha contra-chapa, a resistência de cálculo à tração deve ser tomada como a menor entre os três modos de falha:

- a) Modo 1 – Escoamento completo da mesa e da contra-chapa, equação (A.7)
- b) Modo 2 – Falha dos parafusos com escoamento da mesa, equação (A.8)
- c) Modo 3 – Falha apenas dos parafusos, equação (A.9)

$$F_{t,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,Rd} + 2 \cdot M_{bp,Rd}}{m} \quad (\text{A.7})$$

$$F_{t,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,Rd} + n \cdot \sum B_{t,Rd}}{m + n} \quad (\text{A.8})$$

$$F_{t,Rd} = \sum B_{t,Rd} \quad (\text{A.9})$$

Onde:

$$M_{bp,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff} \cdot t_{bp}^2 \cdot f_{ybp}}{\gamma_{M0}} \quad (\text{A.10})$$

Caso a mesa da coluna seja enrijecida, então o somatório dos L_{eff} vai mudar de acordo com as considerações a seguir.

A largura efetiva deverá ser tomada como o menor valor entre:

a) parafusos adjacentes ao enrijecedor ver expressões (A.11) e (A.12):

$$L_{effa} = m \cdot \alpha \quad (\text{A.11})$$

$$L_{effa} = 2 \cdot \pi \cdot m \quad (\text{A.12})$$

b) parafusos internos ver expressões (A.13) a (A.15):

$$L_{effb} = p \quad (\text{A.13})$$

$$L_{effb} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e \quad (\text{A.14})$$

$$L_{\text{effb}} = 2 \cdot \pi \cdot m \quad (\text{A.15})$$

c) para parafusos finais ver expressões (A.16) a (A.18):

$$L_{\text{effc}} = 0,5 \cdot p + 2 \cdot m + 0,625 \quad (\text{A.16})$$

$$L_{\text{effc}} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e \quad (\text{A.17})$$

$$L_{\text{effc}} = 2 \cdot \pi \cdot m \quad (\text{A.18})$$

Os valores de α são obtidos do gráfico da figura A.2.

Passo 2: determinar a resistência da chapa de extremidade na zona tracionada

O comprimento efetivo para cada linha de parafusos deve ser tomado como o menor valor entre os caso descritos a seguir.

a) parafusos na extremidade da mesa tracionada da viga ver expressões (A.19) a (A.22):

$$L_{\text{effa}} = 0,5 \cdot b_e \quad (\text{A.19})$$

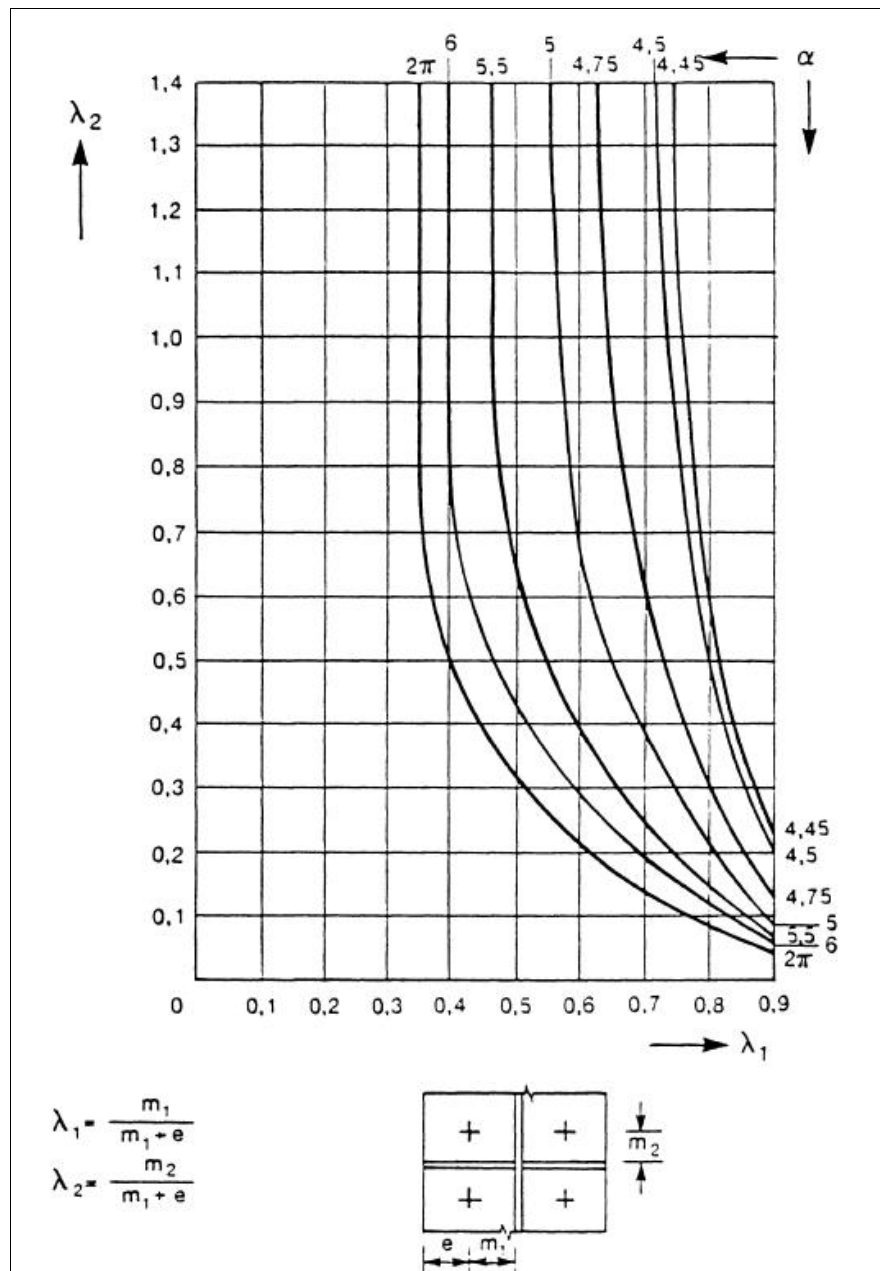


figura A.2: valores de α para mesa enrijecida

$$L_{\text{effa}} = 0,5 \cdot w + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x \quad (\text{A.20})$$

$$L_{\text{effa}} = 4 \cdot m_x + 1,25 \cdot e_x \quad (\text{A.21})$$

$$L_{\text{effa}} = 2 \cdot \pi \cdot m \quad (\text{A.22})$$

b) primeira linha de parafusos abaixo da mesa tracionada da viga ver expressões (A.23) e (A.24):

$$L_{\text{effb}} = \alpha \cdot m \quad (\text{A.23})$$

$$L_{\text{effb}} = 2 \cdot \pi \cdot m \quad (\text{A.24})$$

c) para parafusos internos ver expressões (A.25) a (A.27):

$$L_{\text{effc}} = p \quad (\text{A.25})$$

$$L_{\text{effc}} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e \quad (\text{A.26})$$

$$L_{\text{effc}} = 2 \cdot \pi \cdot m \quad (\text{A.27})$$

d) para parafusos finais ver expressões (A.28) a (A.30):

$$L_{\text{effd}} = 0,5 \cdot p + 2 \cdot m + 0,625 \quad (\text{A.28})$$

$$L_{\text{effd}} = 4 \cdot m + 1,25 \cdot e \quad (\text{A.29})$$

$$L_{\text{effd}} = 2 \cdot \pi \cdot m \quad (\text{A.30})$$

Onde as variáveis geométricas são ilustradas na figura A.3.

Passo 3: usando os valores obtidos nos passos (1) e (2), obter a resistência efetiva para cada linha de parafusos individualmente na zona tracionada.

Passo 4: exceto nos casos de conexão de resistência total, se o valor da resistência efetiva de cálculo para as linhas de parafusos individualmente exceder $1,8 \cdot B_{t,Rd}$, então o dimensionamento da conexão mudará, a menos que possa ser mostrado que a resistência daquela linha de parafusos será omitida (ou reduzida) no passo (10).

Passo 5: para o passo (3), determinar a resistência efetiva total de todas as linhas de parafusos na zona tracionada.

Passo 6: determinar a resistência da alma da coluna na zona tracionada.

Se a alma não for enrijecida, então a resistência de cálculo será dada pela equação (A.31).

$$F_{t,Rd} = \frac{f_{yc} \cdot t_{wc} \cdot b_{eff}}{\gamma_{M0}} \quad (A.31)$$

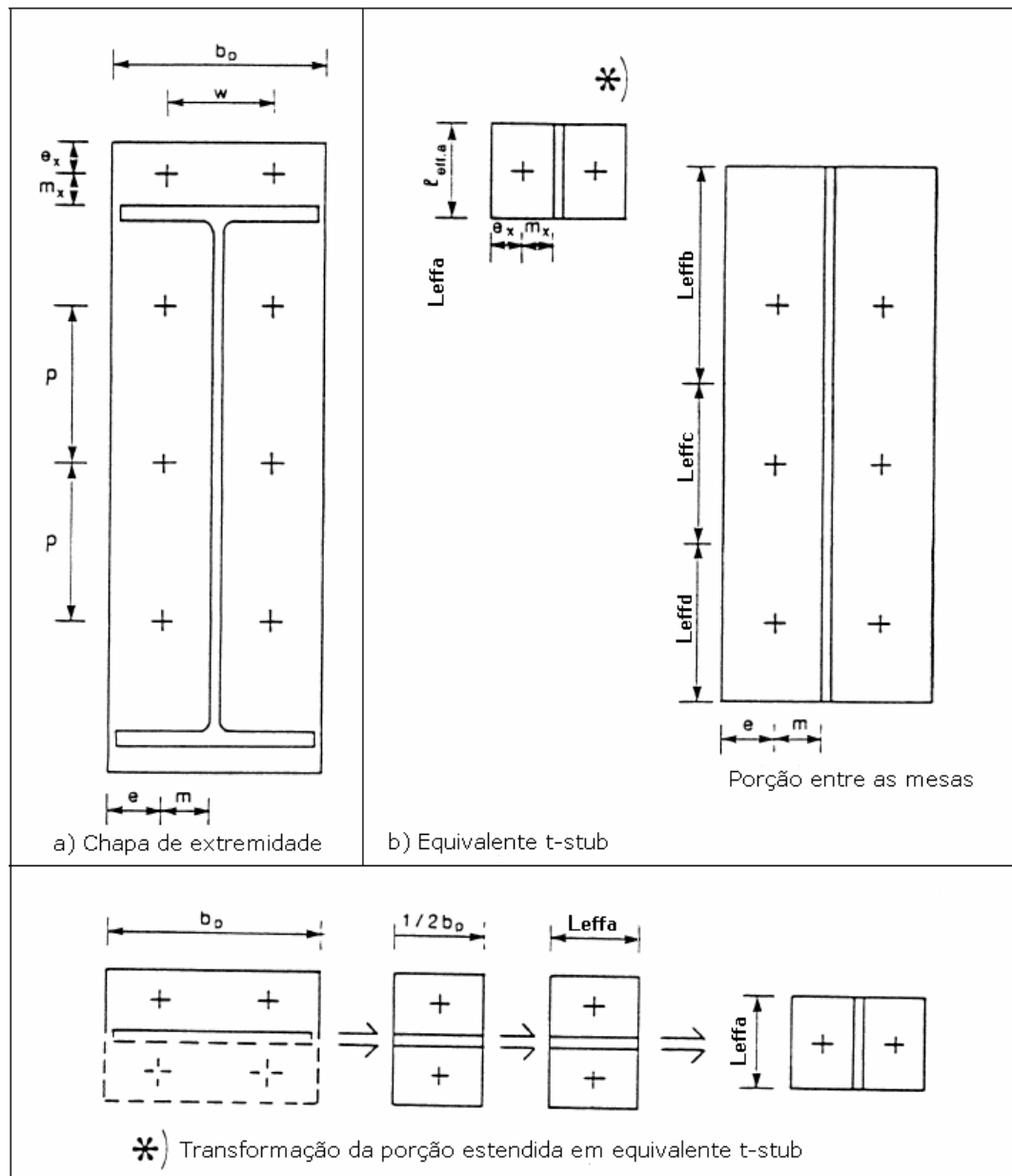


figura A.3: comprimentos efetivos para chapa de extremidade

Caso a alma seja enrijecida, a resistência de cálculo será menor ou igual à resistência da mesa da viga, desde que os enrijecedores atendam os requisitos de segurança.

Passo 7: determinar a resistência da alma da coluna na zona comprimida.

Passo 8: determinar a resistência da alma da coluna na zona de corte.

Passo 9: adotar o menor valor dos cálculos obtidos nos passos (5) a (8) como a resistência da zona mais frágil.

Passo 10: se a resistência total efetiva das linhas de parafuso na zona tracionada obtida no passo (5) é maior que a resistência da zona frágil obtida no passo (9), reduzir as resistências efetivas de sucessivas linhas de parafusos, partindo da linha mais próxima do centro, até que a resistência efetiva das linhas de parafusos restantes seja igual a resistência da zona frágil.

Passo 11: adotar uma redução da zona tracionada incluindo somente aquelas linhas de parafusos que restaram após completar o passo (10).

Passo 12: revisar a resistência da alma da coluna na zona tracionada reduzida.

Passo 13: se o valor obtido no passo (12) é menor que a resistência total efetiva das linhas de parafuso na zona tracionada reduzida, adotar este valor como a nova resistência da zona frágil e retornar ao passo (10).

Passo 14: checar a resistência da zona tracionada da alma da viga adjacente a placa de extremidade do mesmo modo como para a alma da coluna no passo (12).

Passo 15: se o valor obtido no passo (14) é menor que a resistência total efetiva das linhas de parafuso na zona tracionada reduzida, adotar este valor como a nova resistência da zona frágil e retornar ao passo (10).

Passo 16: determinar o valor do momento resistente de cálculo da conexão baseado nas linhas de parafusos na zona tracionada reduzida através da equação (A.32).

$$M_{Rd} = \sum F_{i,Rd} \cdot h_i \quad (A.32)$$

Onde:

$F_{i,Rd}$: é a resistência de cálculo de uma linha individual de parafusos.

h_i : é a distância de cada linha de parafuso ao centro de resistência da zona comprimida.

Passo 17: checar a resistência das soldas entre as mesas da viga e a chapa de extremidade.

O procedimento J.3.2 do Eurocode 3 [1] para determinar o momento resistente de cálculo é baseado na distribuição de forças nos parafusos proporcional à distância ao centro de compressão.

Passo 1: adotar uma distribuição de forças nos parafusos em que a resistência de cada linha de parafusos individualmente na zona tracionada, na zona comprimida e na zona de corte não ultrapasse $2 \cdot B_{t,Rd}$.

Passo 2: usando os valores do passo (1), determinar a resistência total efetiva de todas as linhas de parafusos na zona tracionada.

Passo 3: determinar a resistência da alma da coluna na zona tracionada.

Passo 4: determinar a resistência da alma da coluna na zona comprimida.

Passo 5: determinar a resistência da alma da coluna na zona de corte.

Passo 6: adotar o menor valor calculado nos passos (2) a (5) como o valor da resistência da zona frágil.

Passo 7: se a resistência total efetiva de todas as linhas de parafusos na zona tracionada obtida no passo (2) é maior do que a resistência da zona frágil obtida no passo (6), reduzir a força em cada linha de parafuso proporcionalmente de forma que a força total para todas as linhas de parafusos seja igual a resistência da zona frágil.

Passo 8: para a mesa da coluna, garantir que a soma das forças das linhas de parafusos do passo (7) para cada grupo de linhas (ou para todas as linhas no caso de mesa não enrijecida) não exceda $2 \cdot \frac{M_{pl,Rd}}{m}$ para o comprimento efetivo da mesa da coluna.

Passo 9: se necessário, para satisfazer o passo (8), reduzir a força em cada linha de parafuso proporcionalmente.

Passo 10: para a mesa da coluna, garantir que a máxima força na linha de parafuso do passo (9) em alguma linha de parafuso adjacente a um enrijecedor da coluna não exceda $2 \cdot \frac{M_{pl,Rd}}{m}$ para um comprimento efetivo da mesa da coluna menor ou igual a $4 \cdot m + 1,25 \cdot e$ ou $2 \cdot \pi \cdot m$.

Passo 11: se necessário, para satisfazer o passo (10), reduzir a força em cada linha de parafuso proporcionalmente.

Passo 12: para a chapa de extremidade, garantir que a soma das forças nas linhas de parafusos do passo (11) para cada grupo de linhas não exceda $2 \cdot \frac{M_{pl,Rd}}{m}$ para o comprimento efetivo relevante da chapa de extremidade.

Passo 13: se necessário, para satisfazer o passo (12), reduzir a força em cada linha de parafuso proporcionalmente.

Passo 14: para a chapa de extremidade, garantir que a força máxima na linha de parafusos do passo (13) em alguma linha de parafuso adjacente a um enrijecedor da mesa conectada a chapa de extremidade não exceda $2 \cdot \frac{M_{pl,Rd}}{m}$ para um comprimento efetivo de chapa menor ou igual a $4 \cdot m + 1,25 \cdot e$ ou $2 \cdot \pi \cdot m$.

Passo 15: se necessário, para satisfazer o passo (14), reduzir a força em cada linha de parafuso proporcionalmente.

Passo 16: para alma da coluna, garantir que a força máxima na linha de parafusos do passo (15) em alguma linha de parafuso adjacente a um enrijecedor da coluna não exceda a resistência de cálculo da alma da coluna na zona tracionada, para uma largura efetiva da alma da coluna igual ao comprimento efetivo da mesa da coluna.

Passo 17: se necessário, para satisfazer o passo (16), reduzir a força em cada linha de parafuso proporcionalmente.

Passo 18: checar a resistência da zona tracionada da alma da viga adjacente a chapa de extremidade, do mesmo modo como para a alma da coluna, considerando completamente as linhas de parafusos e individualmente a linha de parafusos crítica do passo (14).

Passo 19: se necessário, para satisfazer o passo (18), reduzir a força em cada linha de parafuso proporcionalmente.

Passo 20: determinar o valor do momento resistente de cálculo da conexão através da equação (A.33).

$$M_{Rd} = \frac{F_{t1,Rd}}{h_1} \cdot \sum h_i^2 \quad (A.33)$$

Onde:

$F_{t1,Rd}$: é a resistência efetiva de cálculo da linha de parafusos mais distante do centro de resistência da zona comprimida.

h_i : é a distância de cada linha de parafuso ao centro de resistência da zona comprimida.

h_1 : é a distância da mais distante linha de parafuso ao centro de resistência da zona comprimida.

ANEXO B – LIGAÇÕES SOLDADAS NO PROGRAMA LIGFLEX

Para iniciar os cálculos das ligações soldadas no programa LIGFLEX, o primeiro passo é estabelecer a configuração desta conexão, ou seja, declarar se haverá algum tipo de enrijecimento ou não. Caso trate-se de uma ligação enrijecida, então deverá ser estabelecido o meio de enrijecimento, através de enrijecedores horizontais ou através de chapas suplementares na alma da coluna. Em relação a estas chapas, ainda, deverá ser escolhido o meio de ligação entre elas e a alma da coluna, podendo ser por intermédio de soldas ou parafusos.

Os botões utilizados para selecionar a configuração da ligação estão circulados na figura B.1.

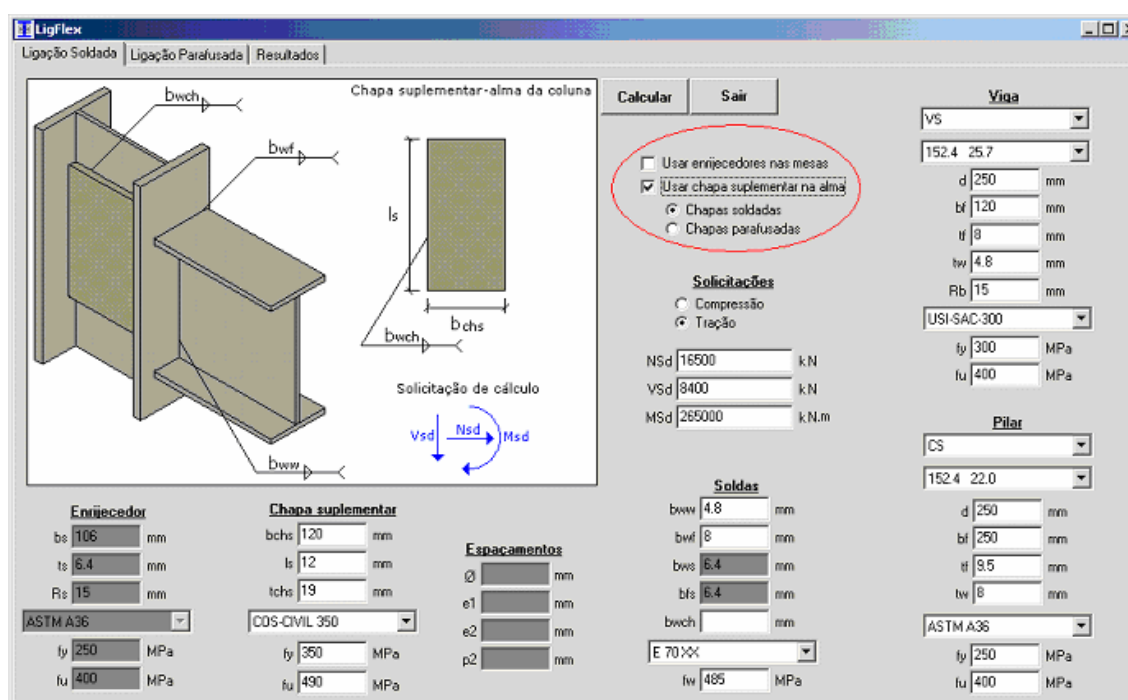


figura B.1: configurações para ligações soldadas

Caso nenhum destes botões esteja selecionado, então a ligação não terá nenhum tipo de enrijecimento e aparecerá a ilustração da figura B.2.

Se estiver marcado o primeiro item, onde aparece “*Usar enrijecedores nas mesas*”, então a ilustração que aparecerá será a referente a uma ligação soldada com enrijecedores horizontais na alma da coluna, conforme figura B.3. É importante salientar que marcando esta opção, os botões referentes a chapa soldada e parafusada estarão desabilitados, já que eles são uma característica do enrijecimento por chapas suplementares.

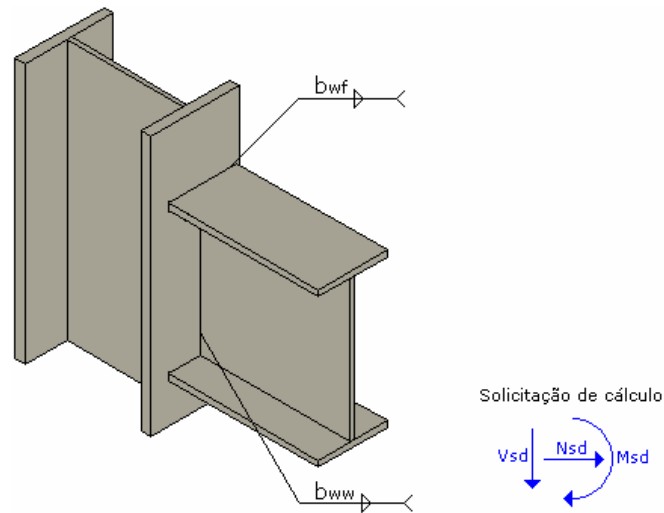


figura B.2: ligação soldada não enrijecida

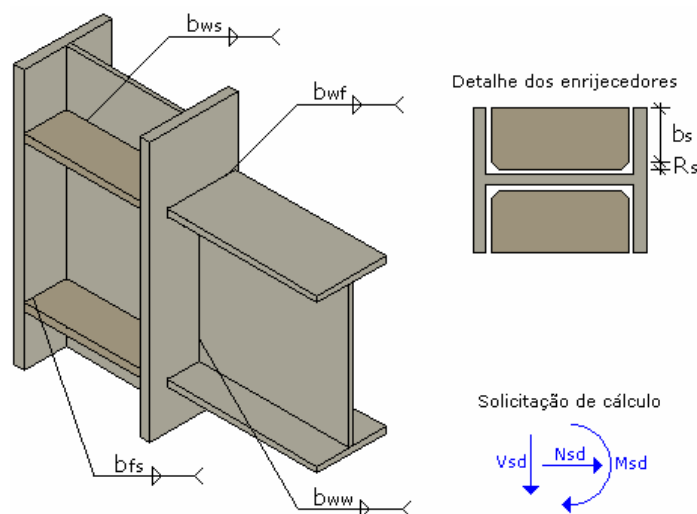


figura B.3: ligação soldada com enrijecedores horizontais

Caso seja seleccionada a segunda opção “*Usar chapa suplementar na alma*”, então deverá ser declarada ainda a forma de fixação destas chapas na alma da coluna, podendo ser por intermédio de soldas ou parafusos. Esta configuração de ligação está apresentada na figura B.4 para o caso de optar-se por chapas suplementares soldadas na alma da coluna, e é representada na figura B.5 a configuração com chapas suplementares parafusadas na alma da coluna.

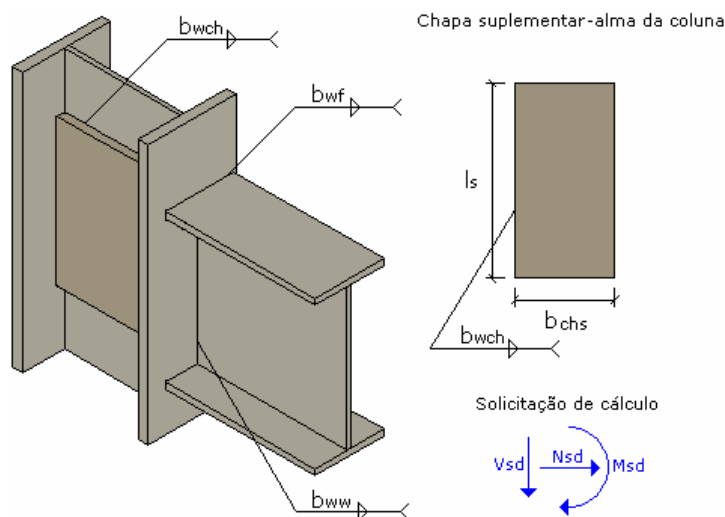


figura B.4: ligação soldada com chapas suplementares soldadas

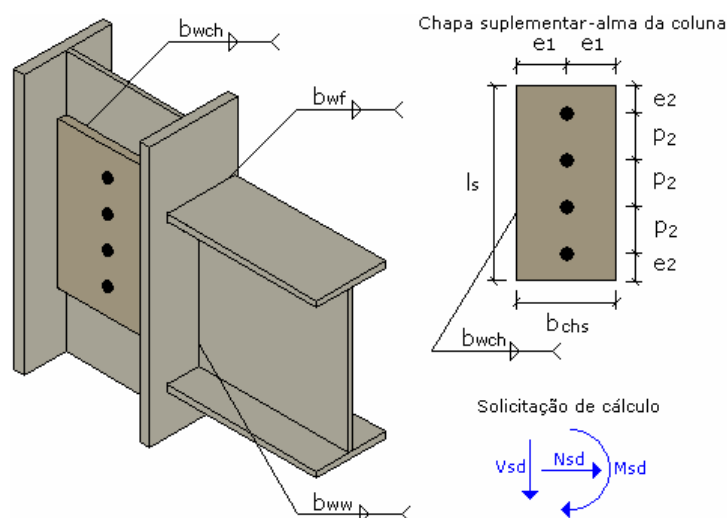


figura B.5: ligação soldada com chapas suplementares parafusadas

Após determinar a configuração da conexão o próximo passo é selecionar os perfis da viga e da coluna. Estão disponíveis no banco de perfis cinco tipos de perfis: perfil I soldado (PS), perfil I laminado, coluna soldada (CS), viga soldada (VS) e perfil I da Açoaminas.

Para selecionar o tipo de perfil clica-se sobre na seta referente a este campo e abrirá uma lista de perfis, conforme figura B.6 a). E para selecionar as dimensões do perfil procede-se da mesma forma, porém, deverá ser acionado o campo abaixo daquele que apresenta o tipo de perfil, conforme indicado na figura B.6 b).

a) Selecionando tipo de perfil

b) Selecionando dimensões do perfil

figura B.6: selecionando perfis

Após selecionar o perfil, as caixas referentes às dimensões são automaticamente preenchidas. Este procedimento de seleção de perfil é idêntico para vigas e colunas. É importante salientar que para a viga terá sempre um campo R_b que não consta para a coluna. Este dado refere-se à dimensão do recorte na alma da viga.

Outro dado importante a ser declarado é o tipo de aço escolhido. Estão disponíveis doze tipos de aço no programa LIGFLEX. Para selecionar um tipo de aço procede-se da mesma forma como foi descrita para a seleção do perfil. Após declarado o tipo de aço, os valores da tensão de escoamento e de ruptura são automaticamente preenchidos nos campos referentes a eles.

As solicitações deverão ser declaradas com a finalidade de verificação em relação as resistências de cálculo encontradas. É necessário que seja informado se o esforço normal de cálculo é de compressão ou tração, indicando conforme a figura B.7. Os esforços de cálculo que devem ser declarados são: esforço normal (N_{sd}), esforço cortante (V_{sd}) e momento fletor (M_{sd})

figura B.7: declarando as solicitações de cálculo

Para declarar as características das soldas, primeiramente deverão ser informadas as espessuras dos filetes de soldas. No total são cinco filetes que deverão ser declarados, porém nunca estarão habilitados todos ao mesmo tempo, pois irá depender da configuração escolhida da ligação. Os únicos filetes que sempre deverão ser declarados são os referentes à união entre a viga e o pilar, ou seja, a espessura do filete na conexão entre a alma da viga e a coluna (b_{ww}) e entre a mesa da viga e a coluna (b_{wf}).

Caso a ligação configurada possua enrijecedores horizontais, então deverão ser informadas as espessuras dos filetes na união entre a alma da coluna e os enrijecedores (b_{ws}) e entre as mesas da coluna e os enrijecedores (b_{fs}).

Caso esteja-se trabalhando com uma ligação com chapa suplementar na alma da coluna, então deverá ser declarada a espessura do filete entre a chapa e a alma da coluna (b_{wch}).

Para selecionar o eletrodo, o procedimento é o mesmo da seleção dos perfis e do tipo de aço. Depois de informado o tipo de eletrodo, o valor da tensão de ruptura do metal solda é informado no seu campo, conforme figura B.8.

Soldas	
b _{ww}	4.8 mm
b _{wf}	8 mm
b _{ws}	6.4 mm
b _{fs}	6.4 mm
b _{wch}	7.8 mm
E 70 X X E 60 X X E 70 X X E 80 X X	

figura B.8: declarando as características das soldas

Os espaçamentos e características dos elementos enrijecedores da conexão não estarão sempre habilitados, da mesma forma que já foi vista para os filetes de solda. No caso de tratar-se de uma ligação com enrijecedores horizontais, os campos habilitados são apenas referentes aos enrijecedores, conforme figura B.9.

Quando opta-se por enrijecer a alma da coluna com chapas suplementares soldadas, apenas os campos destinados a geometria da chapa estarão habilitados, conforme a figura B.10. Já se a chapa selecionada for parafusada, então deverão ser declarados, além da geometria das chapas, o diâmetro dos parafusos (f), os espaçamentos entre furos e borda na direção horizontal (e_1) e na vertical (e_2) e entre furos (p_2), conforme figura B.11.

Enrijecedor		Chapa suplementar		Espaçamentos	
bs	106 mm	bchs	120 mm	Ø	mm
ts	6.4 mm	ls	12 mm	e1	mm
Rs	15 mm	tchs	19 mm	e2	mm
	ASTM A36		COS-CIVIL 350	p2	mm
fy	250 MPa	fy	350 MPa		
fu	400 MPa	fu	490 MPa		

figura B.9: campos habilitados para enrijecedores horizontais

Enrijecedor		Chapa suplementar		Espaçamentos	
bs	106 mm	bchs	120 mm	Ø	mm
ts	6.4 mm	ls	360 mm	e1	mm
Rs	15 mm	tchs	19 mm	e2	mm
	ASTM A36		COS-CIVIL 350	p2	mm
fy	250 MPa	fy	350 MPa		
fu	400 MPa	fu	490 MPa		

figura B.10: campos habilitados para chapa suplementar soldada

Enrijecedor		Chapa suplementar		Espaçamentos	
bs	106 mm	bchs	120 mm	Ø	19,05 mm
ts	6.4 mm	ls	360 mm	e1	60 mm
Rs	15 mm	tchs	19 mm	e2	32 mm
	ASTM A36		COS-CIVIL 350	p2	90 mm
fy	250 MPa	fy	350 MPa		
fu	400 MPa	fu	490 MPa		

figura B.11: campos habilitados para chapa suplementar parafusada

Após declarados todos os dados na janela principal do programa LIGFLEX aciona-se o botão "CALCULAR" para que sejam realizados os cálculos e exibidos os resultados e as verificações.

O relatório apresentado contém um cabeçalho com os principais dados de entrada da conexão, as resistências obtidas e as verificações.

Como resultados são apresentadas as resistências de cada uma das zonas críticas da ligação: zona tracionada, zona comprimida e zona de cisalhamento.

Serão verificados os enrijecedores e as chapas suplementares em relação as suas geometrias e também a solda entre estas peças e alma da coluna.

Em relação à resistência a tração serão verificadas a alma e a mesa da coluna. Sendo que a alma também será verificada à compressão e ao corte.

Em relação à verificação das soldas, também é checada a resistência da alma e mesas da viga na união entre esta e a mesa da coluna.

As verificações são realizadas através da avaliação entre as forças máximas de tração, compressão e esforço cortante e as resistências de cada zona crítica. O programa analisa se a resistência é maior ou menor que a solicitação e faz testes e indicando se a conexão está apta ou não. Dessa forma, alerta qual componente deve ser reforçada, ou até mesmo reduzida, com o propósito de dimensionar da melhor forma as componentes da ligação.

ANEXO C – LIGAÇÕES PARAFUSADAS NO PROGRAMA LIGFLEX

Da mesma forma que nas ligações soldadas, o processo de entrada de dados para conexões parafusadas no programa LIGFLEX parte da definição da configuração da ligação.

Deverá ser indicada se a ligação será feita através de uma chapa de extremidade de altura parcial ou total. Isto deverá ser declarado selecionando uma das opções na janela principal, conforme destacado na figura C.1.

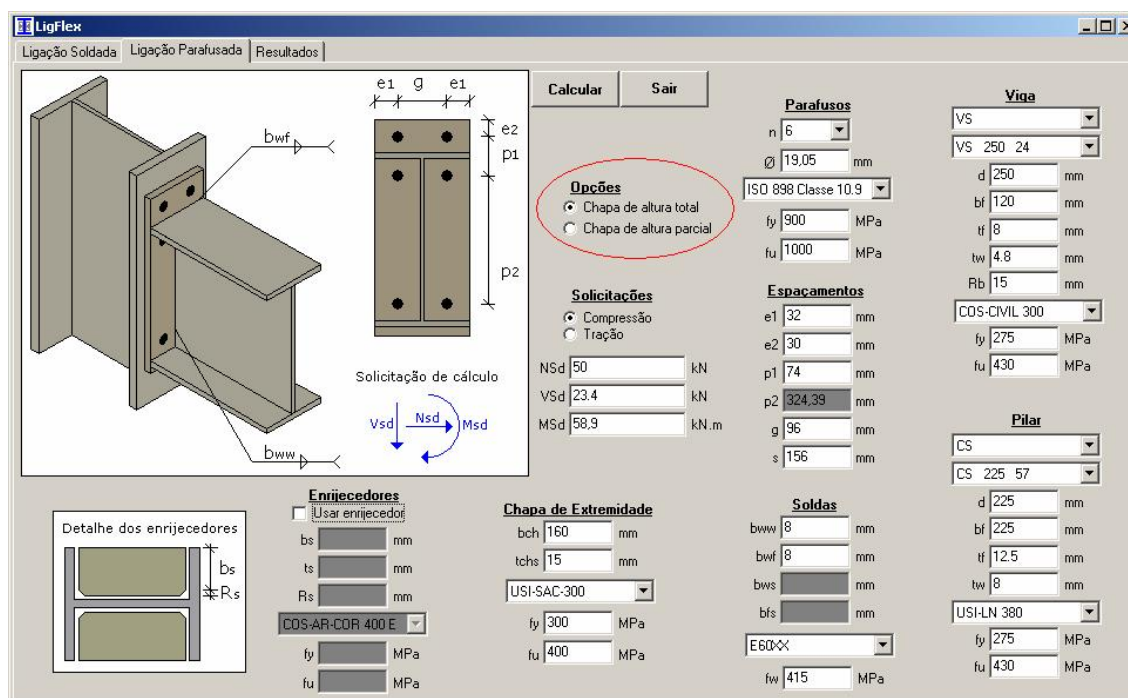


figura C.1: configurações para ligações parafusadas

Caso nenhum destes botões esteja selecionado, então a ligação não terá nenhum tipo de enrijecimento e aparecerá a ilustração da figura B.2.

Se estiver marcado o primeiro item, onde aparece “*Chapa de altura total*”, então a ilustração que aparecerá será a referente a uma ligação parafusada com uma porção estendida, conforme figura C.2, na qual aparecem todas as possibilidades de variação do número de parafusos para este tipo de união entre viga e coluna.

Já se for marcada a segunda opção “*Chapa de altura parcial*”, as configurações disponíveis estão ilustradas na figura C.3.

Em relação à seleção de perfis para vigas e pilares e dos tipos de aço para estes elementos, o procedimento é idêntico ao já apresentado para ligações soldadas no anexo B deste trabalho. Da mesma forma que para a entrada de dados das solicitações.

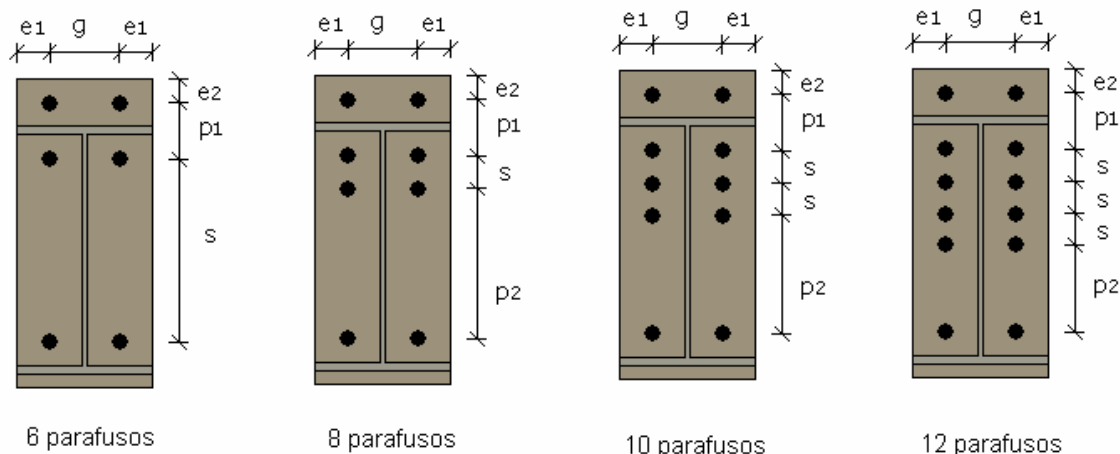


figura C.2: configurações disponíveis para chapas de altura total

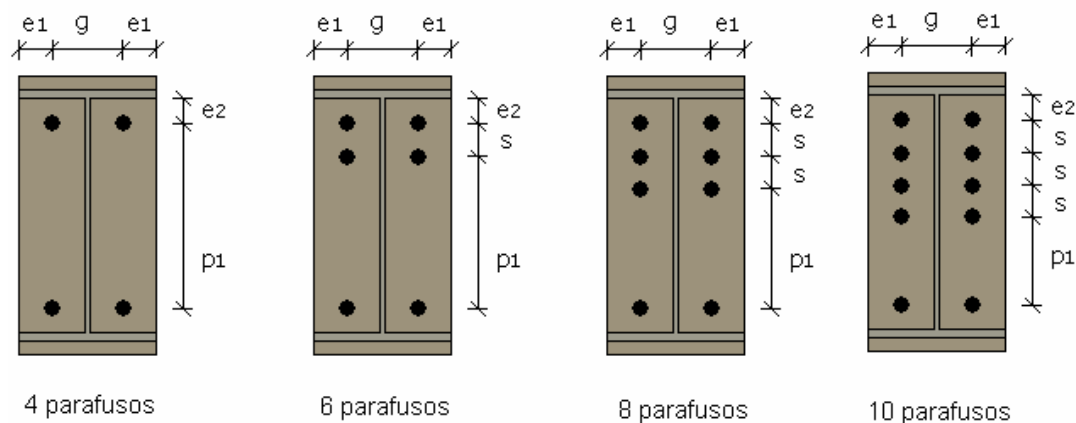


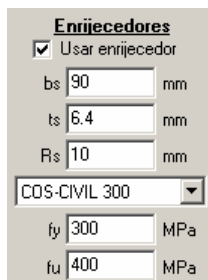
figura C.3: configurações disponíveis para chapas de altura parcial

Para as ligações parafusadas, ainda tem-se a opção de usar enrijecedores horizontais. Caso decida-se utilizar esta componente, então estarão habilitados os campos para serem declaradas as suas propriedades, tais como a largura (b_s), espessura (t_s) e dimensão dos recortes (R_s), além do tipo de aço empregado, conforme figura C.4.

Deverão ser declarados os dados da chapa de extremidade, a largura (b_{ch}), espessura (t_{ch}) e o tipo de aço utilizado. Os campos destinados a entrada destes dados estão apresentados na figura C.5. Observa-se que não é necessário informar o comprimento da chapa, pois este será obtido através dos espaçamentos e da altura da viga.

Os espaçamentos que estarão habilitados para serem declarados irão variar com o número de parafusos e se a chapa de extremidade é de altura total ou parcial. O programa adota como critério, independentemente das variações na configuração, que e_1 seja o

espaçamento entre furo e borda na horizontal, e_2 seja o espaçamento entre furo e borda (ou entre furo e mesa da viga) na vertical, g será sempre o espaçamento entre furos na horizontal e p_1 , p_2 e s sejam espaçamentos entre furos na vertical.



Enrijecedores

Usar enrijecedor

bs 90 mm

ts 6.4 mm

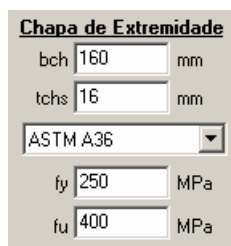
Rs 10 mm

CDS-CIVIL 300

fy 300 MPa

fu 400 MPa

figura C.4: entrada de dados dos enrijecedores



Chapa de Extremidade

bch 160 mm

tchs 16 mm

ASTM A36

fy 250 MPa

fu 400 MPa

figura C.5: entrada de dados da chapa de extremidade

A entrada de dados referente as soldas procede da mesma forma que nas ligações soldadas, conforme visto no anexo B deste trabalho. Entretanto, sempre estarão habilitados os campos referentes a declaração das espessuras dos filetes de solda entre a mesa (b_{wf}) e alma (b_{ww}) da viga na chapa de extremidade. A espessura do filete entre as mesas da coluna e os enrijecedores (b_{fs}) e do filete entre a alma da coluna e enrijecedores (b_{ws}) só estarão habilitados se estiver configurada uma ligação enrijecida.

Após declarados todos os dados de entrada, clica-se no botão “CALCULAR” para que sejam efetuados os cálculos e o relatório seja exibido. O relatório apresentado para as ligações parafusadas contém basicamente os mesmos itens do que o exibido nas conexões soldadas.

ANEXO D – EXPRESSÕES PARA DETERMINAR O PARÂMETRO α

Para determinar o parâmetro α utilizado na obtenção do comprimento efetivo para linhas adjacentes a enrijecedores podem ser utilizados dois métodos. Um destes métodos é obter o parâmetro através de um ábaco. O outro procedimento, e que será apresentada a formulação neste anexo, emprega várias expressões que dependem dos parâmetros λ_1 e λ_2 , dados conforme expressões (D.1) e (D.2), respectivamente.

$$\lambda_1 = \frac{m_1}{m_1 + e} \quad (D.1)$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m_1 + e} \quad (D.2)$$

Sendo m_1 e m_2 , parâmetros geométricos, conforme figura D.1.

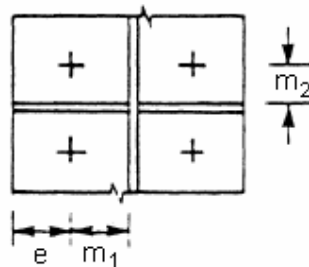


figura D.1: parâmetros para mesa da coluna enrijecida conforme Eurocode 3 [1]

A seguir é apresentada a formulação para obter o parâmetro α , são seis fatores obtidos a partir de λ_1 e λ_2 e de seus coeficientes.

Os fatores F_1 e F_2 são apresentados nas expressões (D.3) e (D.4), respectivamente.

$$F_1 = 0,99477448 - 2,45848503 \cdot \lambda_2 + 3,15497168 \cdot \lambda_2^2 - 2,23017434 \cdot \lambda_2^3 + 0,528502121 \cdot \lambda_2^4 \quad (D.3)$$

$$F_2 = 1,04213142 - 0,85759182 \cdot \lambda_2 + 1,15828063 \cdot \lambda_2^2 - 0,79910192 \cdot \lambda_2^3 + 0,21398139 \cdot \lambda_2^4 \quad (D.4)$$

Os fatores F_3 a F_6 são obtidos através da soma de suas constantes e seus coeficientes. As constantes e os coeficientes são apresentados na tabela 18.

Tabela 18: coeficientes e constantes para determinar os fatores

	F_3	F_4	F_5	F_6
Constantes	8,130283	1,245666	-86,5052	-226,979097
λ_1	4,488295	39,333003	478,58887	1095,760732
λ_2	-3,441231	-3,580332	79,430092	-12,1186777
λ_1^2	-16,699661	-55,940605	-935,102794	-1848,467314
λ_2^2	4,657641	40,544586	-329,854733	717,104423
$\lambda_1 \cdot \lambda_2$	-6,802532	-55,34357	-68,228567	-264,307024
λ_1^3	8,747474	21,049463	809,056164	1369,007748
λ_2^3	-1,197675	-33,001768	531,672952	-2120,516058
$\lambda_1 \cdot \lambda_2^2$	-1,227359	2,79241	252,193252	-69,105002
$\lambda_1^2 \cdot \lambda_2$	8,318217	44,062493	-44,242644	195,697905
λ_1^4	-	-	-254,659837	-381,685783
λ_2^4	-	-	-605,622885	2562,146768

ANEXO E – EXEMPLO DE ANÁLISE VARIANDO A RIGIDEZ DOS NÓS

Neste anexo serão apresentados os momentos obtidos pela análise variando a rigidez dos nós. Este exemplo foi extraído do trabalho de Monforton e Wu [11].

A estrutura analisada é ilustrada na figura E.1.

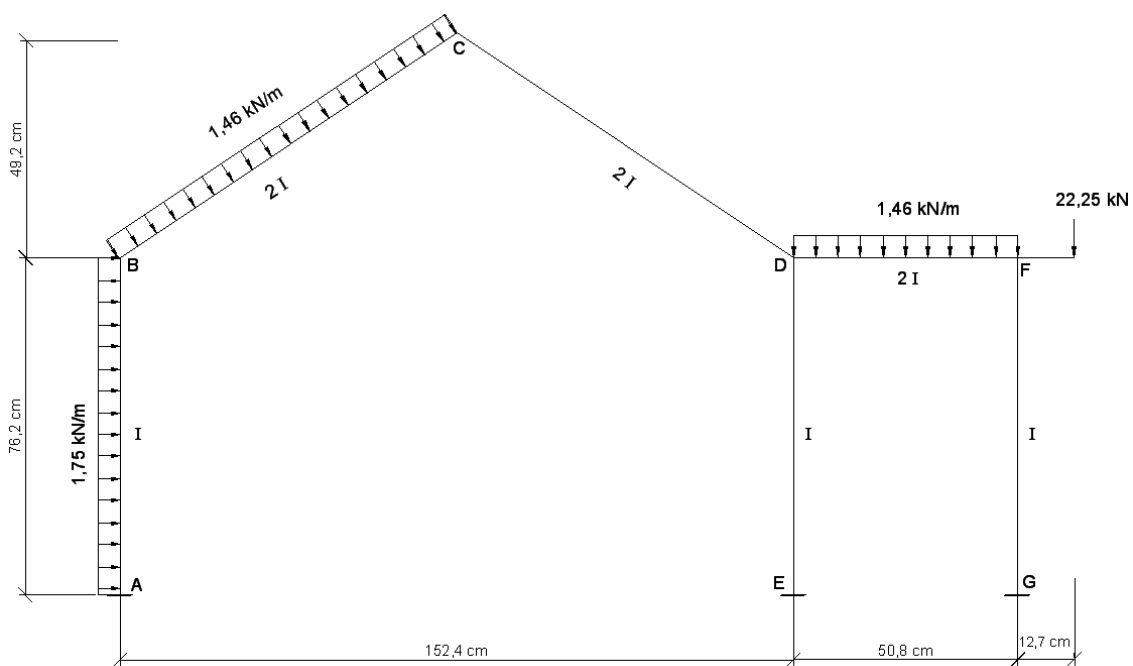


figura E.1: pórtico analisado por Monforton e Wu [11]

Em cima deste exemplo foram realizadas cinco análises. A primeira análise foi feita considerando um fator de correção γ como sendo zero, ou seja, foi calculado como se os nós fossem flexíveis. Já numa situação intermediária, nós semi-rígidos, foram feitas mais três análises com fatores γ iguais a 0,25; 0,50 e 0,75. E finalmente a estrutura foi avaliada com um fator γ igual a um, considerando nós totalmente rígidos.

Os valores obtidos estão apresentados na tabela 19, onde constam os momentos nos extremos das barras para cada uma das cinco análises com diferentes valores de γ .

Tabela 19: momentos nos extremos das barras

Barra	Momento (kN.m)				
	$\gamma = 0$	$\gamma = 0,25$	$\gamma = 0,50$	$\gamma = 0,75$	$\gamma = 1,0$
AB	-47,42109348	-45,79022188	-44,33077095	-43,02034608	-41,835874
BA	-11,33721783	-10,79779239	-10,31490999	-9,881458625	-9,489471253
BC	11,33721783	10,79779239	10,31490999	9,881458625	9,489471253
CB	12,53321296	13,99284033	15,2978362	16,4699573	17,52942665
CD	-12,53321296	-13,99284033	-15,2978362	-16,4699573	-17,52942665
DC	-3,045601138	-3,562034763	-4,025969958	-4,441668488	-4,818278218
DE	-24,45737355	-25,32017738	-26,0841734	-26,77379213	-27,39405538
ED	0	-8,79416565	-16,66689428	-23,7334164	-30,1238923
DF	27,50304255	28,88214428	30,11004835	31,21539275	32,21229288
FD	64,59654933	61,29598878	58,34424148	55,69326078	53,2970359
FG	-30,66529933	-27,36473878	-24,41299148	-21,76201078	-19,3657859
GF	-40,4324775	-36,24658278	-32,5875725	-29,14382208	-26,10629658

Observando os valores obtidos verifica-se que o comportamento intermediário dos nós semi-rígidos. Para os nós referentes aos apoios a solicitação diminuía conforme aumentava a rigidez. Para os nós intermediários das vigas os momentos aumentavam junto com a rigidez do nó.