



PUC

MÁRCIO RODRIGUES DE SANTI

*UM SISTEMA CONFIGURÁVEL
PARA O PROJETO DE LIGAÇÕES VIGA / COLUNA EM ESTRUTURAS DE AÇO*

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Departamento de Engenharia Civil
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

Rio de Janeiro, Setembro de 1996

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

RUA MARQUÊS DE SÃO VICENTE, 225 - CEP 22453-900

RIO DE JANEIRO - BRASIL

N. Chamada: 624 / S235 / TESE UC

Título: Um sistema configuravel para o projeto d



0 0 9 8 2010/05/20

9428

EX1-CENTRAL

MÁRCIO RODRIGUES DE SANTI

**UM SISTEMA CONFIGURÁVEL
PARA O PROJETO DE LIGAÇÕES VIGA/COLUNA
EM ESTRUTURAS DE AÇO**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da PUC/Rio como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências da Engenharia Civil.

Ênfase: Estruturas.

Orientadores: Sebastião A.L. de Andrade.
Luiz Fernando C.R. Martha.

Departamento de Engenharia Civil
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
Rio de Janeiro, Agosto de 1996

UC69214-6



624
S235
TEFE UC

Aos meus pais, Henrique e Lourdes, pelo amor e pela dedicação ao longo de toda a minha vida.

Agradecimentos

Aos professores Sebastião A. L. De Andrade e Luiz Fernando C. R. Martha pela orientação ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Pedro C. G. Da S. Vellasco pelo interesse, contribuição e pelas idéias de fundamental relevância.

Ao professor Marcelo Gattass pelas idéias e sugestões.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC/Rio pelos conhecimentos transmitidos no decorrer do curso.

À Ana Roxo pelo apoio sempre constante.

Ao amigo Gil, pelo interesse e pelas idéias.

Aos amigos do *Underground* Setton, Nicão, Arlindo e Anselmo Paiva.

Aos amigos do *Sarcófago* Rodacki, Thadeu e Mônica.

Aos amigos *civis* Evandro, Áurea, Ana Marta, Andréia, Cláudia, Sandoval, Valberto, Eduardo Nobre, João Batista, Alexandre e Denyse.

Aos amigos *rubro-negros* Tílio, Willian e Paulão, companheiros em todos os domingos no Maracanã.

Aos *TeCAmigos* Joaquim, Raquel, João Luiz, Cacá, Lula, Ivan e Camilo.

Ao ICAD/TeCGraf - PUC-Rio pelo suporte indispensável no desenvolvimento do trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Resumo

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema gráfico interativo e configurável para a automação do dimensionamento e detalhamento de ligações viga/coluna em estruturas de aço. A sua implementação busca o desenvolvimento de uma filosofia de projeto racional, que considere complexibilidade e variabilidade.

A filosofia adotada para o projeto de ligações se baseia em uma distribuição de forças realista, na descrição de todos os elementos componentes de uma ligação e na forma como cada um desses elementos é solicitado, objetivando a compatibilidade entre o seu comportamento e as premissas de projeto.

O sistema, desenvolvido dentro deste enfoque, possibilita ainda a configuração de novas regras para o dimensionamento de acordo com as necessidades do engenheiro estrutural. A configuração do sistema é feita através do uso de uma linguagem interpretada, ou seja, compilada em tempo de execução.

O programa apresenta também uma interface com alto grau de interatividade, o que possibilita facilidades na manipulação dos dados de entrada e na inserção de novas rotinas para o dimensionamento e detalhamento.

Abstract

This work presents the development of a configurable interactive graphic system for the design automation and detailing of beam/column steel connections. The implementation of this system intends to identify the basic principles involved in a rational design philosophy that considers complexity and variability.

The adopted philosophy for the connection design is based on a realistic force distribution, on a description of each component of the connections and on their individual behavior. Furthermore, the philosophy aims to ensure the compatibility between this behavior and the design requirements.

The system was developed in this context and allows the implementation of new rules for the dimensioning according to the engineer needs. The system configuration is accomplished by the use of an interpreted language.

The implemented system has a highly interactive interface which makes possible the manipulation of input data and the insertion of new procedures for detailing and dimensioning.

Índice

Lista de Figuras.....	VIII
Lista de Tabelas.....	X
Lista de Símbolos.....	XI
Lista de Abreviaturas.....	XIII
1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Apresentação.....	3
2 - ELEMENTOS BÁSICOS PARA O PROJETO DE LIGAÇÕES.....	5
2.1. Parafusos.....	5
2.1.1. Tipos.....	5
2.1.2. Resistência.....	6
2.1.3. Esmagamento.....	7
2.1.4. Efeito de Alavanca.....	9
2.2. Soldas.....	11
2.2.1. Tipos.....	11
2.2.2. Resistência.....	12
2.3. Norma Utilizada.....	14
2.3.1. Parafusos.....	14
2.3.2. Soldas.....	17
2.3.3. Classificação de Seções de membros Comprimidos.....	18
3 - PROJETO DE LIGAÇÕES VIGA/COLUNA.....	20
3.1. Ligações Viga/Coluna.....	20
3.2. Incertezas.....	23
3.3. Filosofia do Projeto.....	24

4. LIGAÇÕES IMPLEMENTADAS.....	28
4.1. Ligação Rígida <i>T</i>	28
4.2. Ligação Flexível.....	43
5 - IMPLEMENTAÇÃO.....	46
5.1. Ferramentas Utilizadas.....	46
5.1.1. Linguagem de Programação Lua.....	46
5.1.2. O <i>Toolkit</i> EDG.....	47
5.1.3. Editor Gráfico TeCDraw.....	47
5.2. Implementação Computacional.....	48
5.2.1. Arquitetura.....	48
5.2.2. Definição dos Dados.....	49
5.2.2.1. Parâmetros.....	49
5.2.2.2. Dialogos de Configuração.....	51
5.2.3. Processamento.....	53
5.2.4. Saída Gráfica.....	54
5.3. Implementação da Configuração.....	55
6 - EXEMPLOS.....	58
6.1. Ligação Flexível.....	58
6.2. Ligação Rígida.....	65
7 - CONCLUSÕES.....	69
7.1. A Dissertação.....	69
7.2. O Steel-C.....	69
7.3. A Configuração Do Sistema.....	70
7.4. Trabalhos Futuros.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

Lista de Figuras

Figura 2.1. - Tipos de solicitação em ligações aparafusadas.....	6
Figura 2.2 - Interação tração/cisalhamento.....	7
Figura 2.3 - Modos de ruína em placas aparafusadas.....	8
Figura 2.4 - Efeito de alavanca.....	9
Figura 2.5 - Modelo de cálculo do efeito de alavanca.....	10
Figura 2.6 - Tipos de solda.....	11
Figura 2.7 - Seções críticas em soldas de filete.....	12
Figura 2.8 - Gráfico <i>tensão x deformação</i> de soldas de filete.....	13
Figura 2.9 - Definição das variáveis de espaçamento.....	15
Figura 2.10 - Características das classes de seções.....	18
Figura 3.1 - Classificação de pórticos.....	20
Figura 3.2 - Gráfico <i>momento x curvatura</i>	21
Figura 3.3 - Classificação de ligações e modos de comportamento.....	22
Figura 3.4 - Sistemas de força em ligações viga/coluna.....	25
Figura 4.1 - Desenho esquemático da ligação rígida <i>T</i>	28
Figura 4.2 - Distribuição dos esforços da ligação rígida.....	29
Figura 4.3 - Fluxo de tração.....	30
Figura 4.4 - Área líquida da seção da mesa.....	31
Figura 4.5 - Modelo de flexão da mesa da coluna.....	32
Figura 4.6 - Modelo de tração na alma da coluna.....	33
Figura 4.7 - Enrijecedores de coluna.....	34
Figura 4.8 - Fluxo de compressão.....	35
Figura 4.9 - Fluxo de compressão - flexão na mesa da coluna.....	36
Figura 4.10 - “ <i>Patch Load</i> ”.....	37
Figura 4.11 - Painel de alma submetido ao cisalhamento.....	39
Figura 4.12 - Enrijecedor painel de alma.....	41
Figura 4.13 - Fluxo de cisalhamento.....	41

Figura 4.14 - Desenho esquemático da ligação flexível.....	43
Figura 4.15 - Componentes de força nos parafusos da ligação flexível.....	44
Figura 5.1 - Arquitetura básica do sistema.....	48
Figura 5.2 - Diálogo principal do programa Steel-C.....	49
Figura 5.3 - Exemplos de objetos gráficos para a captura de dados.....	50
Figura 5.4 - Objetos gráficos para a configuração da resistência dos parafusos.....	51
Figura 5.5 - Objetos gráficos para a configuração de espaçamentos.....	52
Figura 5.6 - Diálogos de configuração para espaçamentos.....	52
Figura 5.7 - Arquitetura básica do processamento.....	54
Figura 5.8 - Representação de objetos implementados.....	56
Figura 6.1 - Objetos gráficos para a captura de dados da ligação flexível.....	58
Figura 6.2 - Escolha da cantoneira e o arranjo dos parafusos na alma da viga.....	59
Figura 6.3 - Opções de cálculo para a ligação flexível.....	60
Figura 6.4 - Diálogo com os possíveis diâmetro dos parafusos.....	60
Figura 6.5 - Exemplo de verificação geométrica realizada pelo programa.....	61
Figura 6.6 - Disposição dos parafusos - duas filas na alma da viga.....	62
Figura 6.7 - Disposição final da ligação flexível.....	62
Figura 6.8 - Objetos gráficos para a configuração da resistência de parafusos.....	63
Figura 6.9 - Código corrente para a resistência ao corte dos parafusos ($\phi = 0.67$).....	64
Figura 6.10 - Novo código para a resistência ao corte dos parafusos($\phi = 0.80$).....	64
Figura 6.11 - Detalhamento da ligação após a configuração.....	65
Figura 6.12 - Captura do momento fletor na extremidade da viga.....	66
Figura 6.13 - Captura de dados - perfil VS da viga.....	67
Figura 6.14 - Vista principal do detalhamento final da ligação rígida.....	67
Figura 6.15 - Detalhamento do perfil <i>T</i>	68

Lista de Tabelas

<i>Tabela 2.1 - Espaçamentos mínimos entre furo e borda</i>	16
<i>Tabela 2.2 - Distâncias mínimas para perna de solda</i>	17
<i>Tabela 2.3 - Dimensões máximas para perna de solda</i>	17
<i>Tabela 2.4 - Classificações das seções dos perfis</i>	19
<i>Tabela 3.1 - Valores de F_s de acordo com a razão (h/w)</i>	40
<i>Tabela 3.2 - Espessura máxima de placas em função da tensão de escoamento</i>	43
<i>Tabela 3.3 - Comp. Mínimo de solda em função da tensão de escoamento</i>	44
<i>Tabela 6.1 - Resultados finais do programa</i>	68

Lista de Símbolos

- A_b - área da seção transversal do parafuso;
- A_g - área bruta da seção tracionada;
- A_m - área crítica para ruína na interface entre a solda e o metal base;
- A_n - área líquida da seção tracionada;
- A_{ne} - área líquida efetiva;
- A_w - área crítica para a ruína da solda;
- b - largura da mesa;
- B_r - resistência ao esmagamento;
- C_y - carga de compressão que leva a seção ao escoamento;
- C_f - carga de compressão atuante na seção;
- D - perna da solda;
- D_{max} - máxima perna de solda;
- d - diâmetro do parafuso;
- e - distância mínima entre furo e borda que garante o não rasgamento da placa;
- F_b - carga axial atuante nas mesas da viga;
- F_c - carga axial atuante nas mesas da coluna;
- F_s - tensão última de cisalhamento;
- F_u - tensão última do parafuso;
- g - garganta de solda;
- h - altura da alma;
- K_v - coeficiente de flambagem por cisalhamento;
- L - comprimento da solda;
- L_{min} - comprimento mínimo de solda;
- L_1 - distância entre os centros dos furos;
- L_2 - distância entre furo e borda da placa (direção normal à atuação da força)
- L_3 - distância entre furo e borda da placa (na linha de atuação da força);
- M - momento atuante na extremidade da viga (esforços de projeto);

M_e - momento elástico da seção;
 m - número de planos de corte;
 n - número de parafusos;
 p_0 - tensão admissível do parafuso;
 P - cortante atuante na extremidade da viga (esforço de projeto);
 Q - força do efeito de alavanca;
 R - resistência de algum membro;
 T_r - resistência a tração;
 t - espessura de placas em geral ou espessura da mesa;
 t_f - espessura da flange;
 V_r - resistência ao corte;
 W - módulo resistente da seção;
 w - largura de mesa;
 X_u - tensão última da solda;
 ϕ_b - coeficiente de minoração da resistência de parafusos;
 σ_y - tensão de escoamento;

Lista de Abreviaturas

EDG - *Entrada de Dados Gráfica*

GKS - *Graphical Kernel System*

IUP - *Interface com o Usuário Portátil*

LED - *Linguagem de Especificação de Diálogos*

1.1. Motivação

O dimensionamento e detalhamento de ligações em estruturas de aço requer do engenheiro uma etapa de pré-dimensionamento, ou seja, estimar valores iniciais, afim de se obter a solução mais adequada. Isso acarreta, muitas vezes, um trabalho bastante estafante e repetitivo, dependendo da experiência do engenheiro estrutural.

No dimensionamento de ligações, muitos cuidados e detalhes não podem passar despercebidos pelo engenheiro. Por exemplo, a verificação de espaçamentos entre parafusos, entre parafuso e borda da placa que o conecta, além de detalhes construtivos, como espaço suficiente para aperto do parafuso devem ser considerados. O conjunto dessas pequenas restrições impostas gera um grande desconforto ao calculista, que invariavelmente corre o risco de se perder ou de esquecer algum detalhe que eventualmente poderá ser importante nas etapas subseqüentes do projeto.

Entretanto, o *software* disponível no mercado, de uma maneira geral, restringe o engenheiro a uma série de procedimentos pré-estabelecidos sem que este tenha a opção de definir os seus próprios parâmetros e regras para o dimensionamento.

Soma-se a isso a necessidade de se visualizarem os resultados obtidos no detalhamento das ligações, bem como a existência de uma interface amigável sob o ponto de vista do usuário.

Partindo-se destas premissas, surgiu a idéia de se desenvolver um programa gráfico interativo e flexível no sentido de possibilitar ao engenheiro usuário a inserção de novas regras e procedimentos para o dimensionamento e detalhamento de ligações viga/coluna em estruturas de aço.

O avanço tecnológico em diferentes áreas de engenharia de *software* permitem o desenvolvimento de sistemas com a filosofia utilizada neste trabalho, tais como:

- Linguagens acopladas para extensões e configurações de aplicações, como Tcl, [OUTS94], ou Lua, [IERU94] e [FIGU94], que permitem com rapidez e facilidade a extensão e configuração de aplicações por serem linguagens interpretadas, ou seja, compiladas em tempo de execução.
- Sistemas gráficos, como o GKS [TeCGraf89] e interfaces gráficas como o IUP [LEVY93], que oferecem portabilidade, permitindo o desenvolvimento de aplicativos nas mais diversas plataformas como DOS, Windows e UNIX/X-Windows.
- Toolkits que possibilitam um fácil desenvolvimento de interfaces gráficas para a captura de dados, entre as quais o Tk[OUST94] e o EDG[CELE95].

1.2. Objetivos

O objetivo desta dissertação é descrever uma filosofia de projeto, bem como a sua implementação dentro do contexto do dimensionamento e detalhamento de ligações vigacoluna em estruturas de aço.

A idéia básica do sistema proposto é criar um ambiente que, além de tornar o projeto menos hostil, permita ao engenheiro estrutural focalizar sua atenção em tarefas mais relevantes, nas quais a sua experiência seja importante. Com isso, detalhes como especificações de normas são a princípio transparentes para o usuário final. Além disso, o que se propõe é permitir ao usuário variar os parâmetros de projeto afim de se obter a solução que mais o satisfaça.

Dentre as características do sistema a ser descrito, cabe salientar os seguintes itens:

Flexibilidade

A idéia de se inserir novas regras no programa em tempo de execução, ou seja, sem a necessidade de recompilação ou religação do sistema, coloca o usuário em uma categoria especial e sugere o conceito de usuário programador. Com isso o engenheiro pode configurar o sistema de acordo com as reais necessidades do projeto.

Interface Gráfica

O grupo TeCGraf da PUC/Rio, dentro do qual este trabalho foi desenvolvido, desenvolve, entre outras coisas, ferramentas que permitem a implementação de programas gráficos interativos para diversas áreas da engenharia. Através destes recursos, pode-se objetivar a construção de uma interface gráfica amigável com alto grau de interatividade entre programa e usuário. A saída gráfica busca basicamente um esquema (*layout*) aproximado da configuração dos desenhos de projeto em escritórios de cálculo.

Concepção Didática

O sistema desenvolvido busca também um enfoque didático através da ilustração dos passos necessários para a execução do projeto de ligações. Além disso, o usuário é sempre informado onde e porque a ligação que se pretende projetar é não satisfatória.

1.3. Apresentação

Neste capítulo, apresentam-se os problemas que motivaram o desenvolvimento deste trabalho, bem como os seus objetivos, além de descrever a estrutura de capítulos desta monografia.

No capítulo 2, são apresentados conceitos básicos, porém fundamentais, para o projeto de ligações em estruturas de aço. Isto é seguido pela descrição dos procedimentos adotados pela norma Canadense [CAN/CSA-S16.1-M89] que serviu de base para a implementação deste trabalho. Também é mostrado o tratamento dado pela referida norma para todos os elementos necessários para o dimensionamento das ligações implementadas.

O capítulo 3 é dedicado à formulação das estratégias adotadas para o projeto de ligações e para a sua implementação. Inicialmente são discutidos os possíveis modos de comportamento de ligações em estruturas de aço. Também são apresentadas algumas das

dificuldades de projeto referentes às suas incertezas e imprecisões. Em seguida, é descrita a filosofia de projeto adotada neste trabalho sob o enfoque do presente tema.

No capítulo 4, são descritas as ligações implementadas bem como as premissas de projeto baseando-se nos conceitos anteriormente apresentados no capítulo 3.

No capítulo 5, são apresentadas as ferramentas utilizadas para a implementação, os recursos que estas ferramentas podem desenvolver na aplicação e a explanação de como é possível, usando estas ferramentas, inserir novas regras de projeto no sistema.

No capítulo 6, são ilustrados alguns exemplos de funcionamento do programa anteriormente apresentado, dimensionando-se algumas ligações e alterando procedimentos de projeto e detalhamento.

O capítulo 7 é destinado às considerações finais e proposição de temas para trabalhos futuros.

Elementos Básicos Para o Projeto de Ligações

Quando se deseja projetar e detalhar ligações entre peças estruturais, há que se atentar para vários elementos de projeto que, embora básicos, são fundamentais. O objetivo do presente capítulo é tratar destes conceitos, pois estes objetivamente facilitarão a compreensão deste trabalho, além de serem imprescindíveis para qualquer tipo de detalhamento em aço estrutural.

Os elementos mais comumente utilizados para se projetar ligações são as soldas e os parafusos. As ligações soldadas em geral apresentam menos elementos de conexão, garantindo uma melhor continuidade do que as ligações aparafusadas. Estas exigem mais peças estruturais tais como placas, cantoneiras e consolos, o que a torna uma ligação menos econômica. Entretanto, as ligações soldadas exigem uma mão de obra mais especializada, além de um controle de qualidade mais apurado. Cabe ao engenheiro estrutural, portanto, avaliar para cada situação qual material e qual tipo de ligação utilizar.

2.1. Parafusos

2.1.1. Tipos

Os parafusos podem ser comuns, constituídos de aços de baixo teor de carbono, ou de alta resistência, compostos por aços de médio teor de carbono temperados ou de liga de aço temperado.

A principal diferença no comportamento de ligações com parafusos comuns e com parafusos de alta resistência é a pré-tensão que estes últimos garantem. Os parafusos comuns são instalados apertando-se a porca contra as partes que estão sendo ligadas sem nenhum controle especial, o que resulta numa tração pequena e variável que não pode ser levada em consideração no cálculo. A ausência desta pré-tensão no parafuso permite um pequeno

movimento das partes ligadas quando na aplicação das cargas. Desta forma, é recomendável a utilização de parafusos comuns para ligações leves e de membros secundários.

2.1.2. Resistência

Os parafusos de uma ligação podem estar solicitados a tração, ao cisalhamento, ou a uma combinação destes dois esforços. Percebe-se na figura 2.1a que o parafuso que liga a aba vertical da cantoneira superior à coluna está solicitado apenas a tração, enquanto os que conectam as mesas superior e inferior da viga estão submetidos ao cisalhamento. Já na figura 2.1b, a normal do tirante pode ser decomposta em duas forças, uma horizontal e outra vertical, impondo respectivamente tração e cisalhamento a toda fileira de parafusos que conectam os perfis.

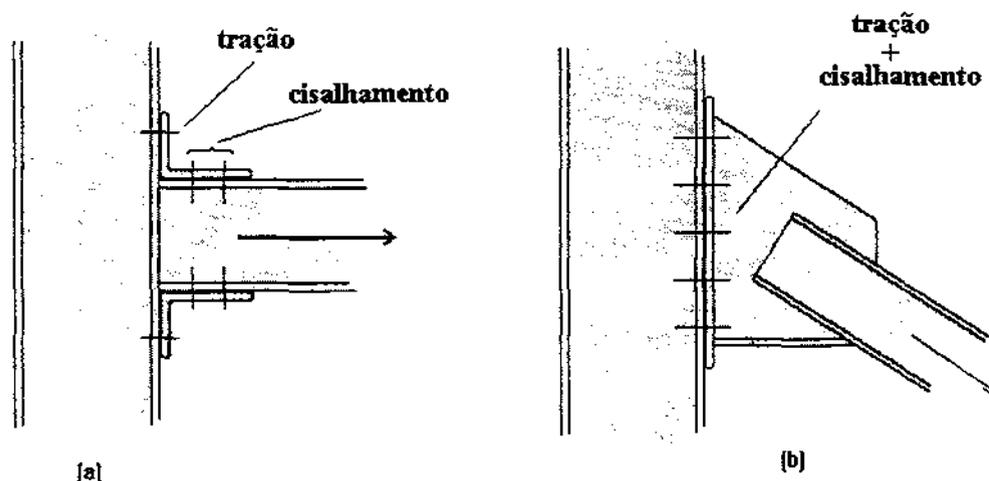


Figura 2.1 - Tipos de solicitação em ligações aparafusadas.

Parafusos podem resistir ao cisalhamento, por atrito ou por corte, porém os comuns, por não garantirem uma pre-tensão mínima, são conseqüentemente dimensionados apenas para o corte. Todavia, a carga de atrito é consideravelmente inferior a carga de colapso da ligação.

A solicitação em um parafuso tracionado é similar ao de uma barra comum tracionada, ou seja, um tirante. Há que se levar em conta, porém, a redução de área

provocada pela rosca do parafuso. Rump [RUMP74] e Christofer [CHRJ66] constataram que a influência da pré-tensão na resistência a tração de ligações aparafusadas é desprezível.

O estado limite de ruína de um parafuso solicitado simultaneamente a tração e cisalhamento ocorre não apenas quando estes esforços isoladamente atingem os valores de ruína específicos para um ou outro esforço atuando individualmente. Em outras palavras, o parafuso submetido ao cisalhamento sofre uma redução em sua capacidade de resistir a tração e vice-versa. O gráfico da figura 2.2 ilustra como a norma Brasileira [NBR8800], trata a interação entre tração e corte.

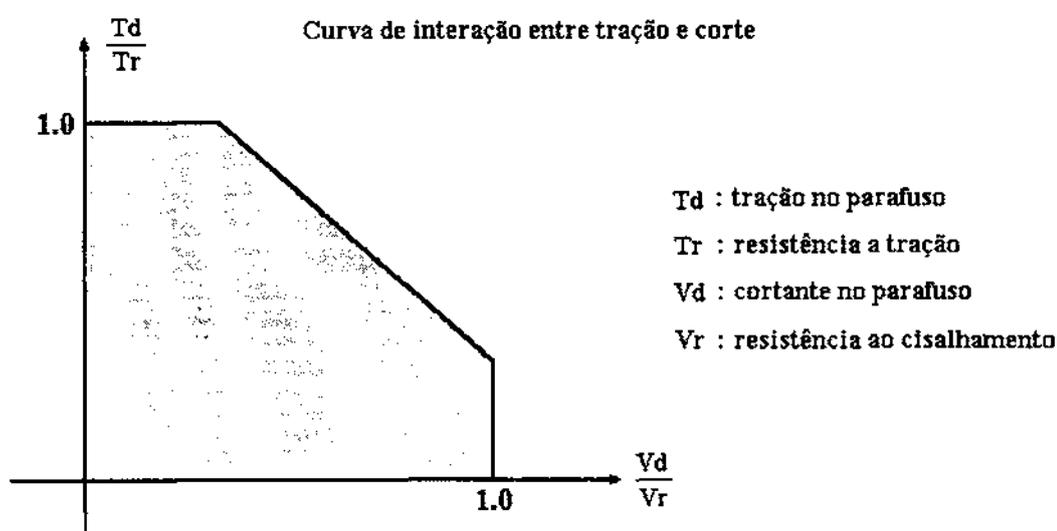


Figura 2.2 - Interação tração/cisalhamento.

2.1.3. Esmagamento

Não são somente os parafusos e as soldas os elementos estruturais submetidos a esforços em ligações. Na verdade os elementos de ligação solicitam placas, cantoneiras e perfis.

Se parafusos estão resistindo ao corte, estes fazem pressão na parede dos furos aos quais entram em contato, ou seja, esta região tende a ser esmagada. Quando temos um parafuso com grande diâmetro, se comparado com a espessura de uma chapa, é bastante provável que o estado limite último desta ligação esteja amarrado ao esmagamento do parafuso contra esta chapa.

A maneira mais usual de se prevenir contra o esmagamento das placas ou cantoneiras é verificando a tensão nominal de esmagamento, ou seja, a carga transferida entre o parafuso e a placa dividida pela área nominal de contato entre ambas.

A região de esmagamento das placas é restringida triaxialmente: ao redor do furo, em função da própria placa e na direção de sua espessura, devido ao aperto do parafuso, o que permite a ocorrência de tensões até três vezes superiores à tensão última da placa. Assim, o esmagamento é governado pela distância entre o furo e a extremidade da placa. Haverá então uma distância mínima que garantirá o não rasgamento da placa. Neste caso, a tensão atuante na área de contato entre parafuso e parede do furo atingirá a tensão de escoamento antes da tensão de cisalhamento atuante na área líquida longitudinal da placa. A figura 2.3a mostra como se comporta a placa que sofre esmagamento nesta situação

Caso o espaçamento furo-borda seja menor do que esta distância mínima, a seção líquida longitudinal da chapa submetida ao corte atingirá o colapso (rasgamento) antes do esmagamento do furo, comportando-se como a placa da figura 2.3b.

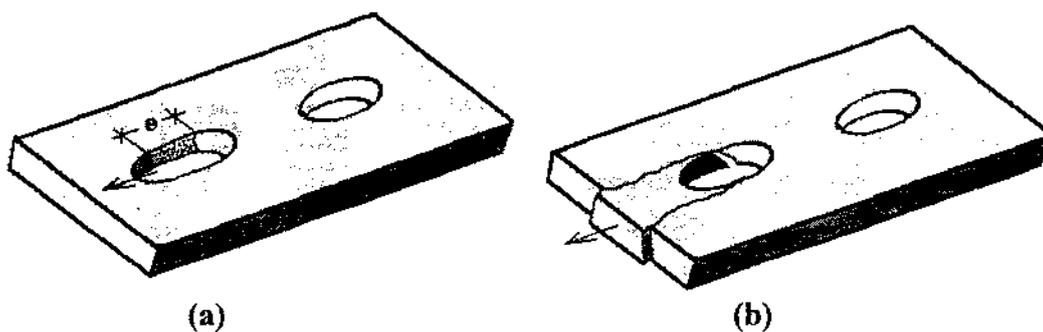


Figura 2.3 - Modos de ruína de placas aparafusadas.

Tal qual as placas, os parafusos estão igualmente sujeitos ao esmagamento, porém é fato que estes apresentam uma mais efetiva restrição tri-axial. Em função disso, a deformação imposta aos parafusos provocada por seu esmagamento é não significativa para o projeto, mesmo quando a placa de contato atinge o colapso.

Na verdade o esmagamento do parafuso só poderia ocorrer se supostamente tivéssemos uma grande espessura da placa ou cantoneira, ou então caso o aço da placa de contato fosse de alta resistência, o que não é usual.

2.1.4. Efeito Alavanca

Da mesma forma como parafusos ao corte puncionam a parede do furo, os parafusos tracionados também podem submeter os perfis aos quais estão conectados a deformações que alteram o comportamento inicialmente previsto. A flexão da chapa horizontal do perfil T na figura 2.4 provoca um considerável acréscimo de carga nos parafusos tracionados.

O estudo do efeito de alavanca requer uma análise elasto-plástica. Na verdade, a ocorrência ou não do *"Prying Action"* ou efeito de alavanca está associado a rigidez da placa sujeita a deformação. Percebe-se, na figura 2.4a, como a placa horizontal do perfil T é rígida o bastante para garantir pequenas deformações, tornando-se razoável ignorar a ação da força provocada pela flexão da chapa. Em outras palavras, o efeito alavanca é desprezado.

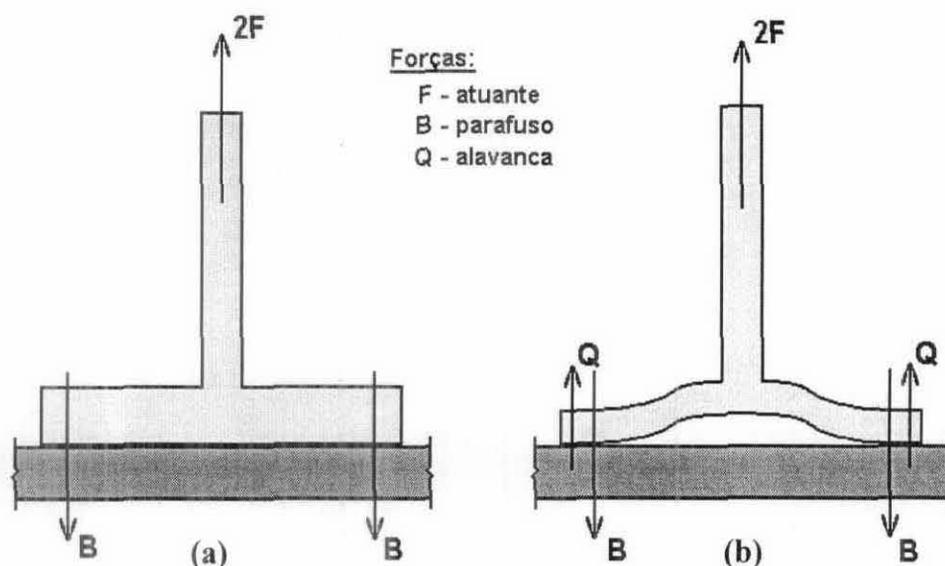


Figura 2.4 - Efeito de Alavanca.

Entretanto, caso a placa horizontal seja flexível, esta irá fletir como mostra o desenho esquemático da figura 2.4b. Surge um momento, no centro das linhas de parafuso, devido a força Q, por sua vez proveniente da flexão da chapa [KULA87]. Assim, o equilíbrio do perfil T passa a ser regido de acordo com a expressão:

$$2B = 2F + 2Q, \quad (2.1)$$

onde B é a soma das resistências dos parafusos, F é a carga de projeto e finalmente Q é a força provocada pelo efeito alavanca. O efeito deste acréscimo de carga Q é a separação precoce dos elementos conectados. Por conseguinte, a rigidez da ligação e a sua resistência diminuem.

A análise do efeito alavanca é não trivial e envolve problemas como a necessidade de uma avaliação elasto-plástica da chapa, além de incertezas como imperfeições e mau alinhamento dos elementos conectados pelo parafuso tracionado, o que efetivamente dificulta a análise de como se distribuem as tensões devido ao efeito de alavanca.

Existem também questões mais particulares, tais como a avaliação da rigidez real do parafuso e incertezas sobre a real distribuição das tensões de esmagamento da cabeça do parafuso na borda da chapa.

O valor da força de alavanca Q , pode ser obtida através da equação da elástica (figura-2.5) do perfil T . Na figura 2.5, $2F$ é a força que atua na haste do T e a expressão 2.2 apresenta o valor da força de alavanca [OWEN89]:

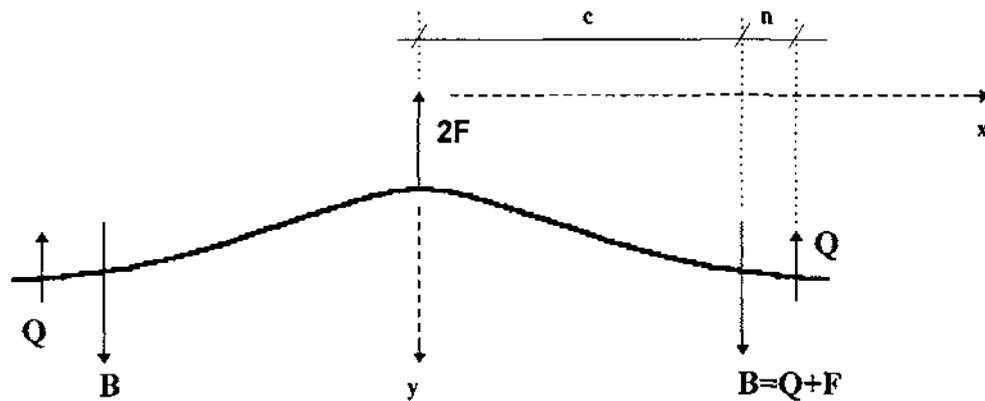


Figura 2.5 - Modelo de cálculo do Efeito de Alavanca.

$$Q = \frac{b}{2n} \left[F - \frac{\beta \gamma p_0 w T^4}{27 n b^2} \right] \quad (2.2)$$

onde:

b : distância da linha de centro da fila de parafusos à extremidade da solda do perfil T ;

w : largura efetiva da mesa do T

t_f : espessura da flange;

p_0 : tensão admissível do parafuso;

β : $\beta = 1$ p/ parafusos pré-tensionados

$\beta = 0$ p/ parafusos não pré-tensionados;

g : $g = 1.0$ p/ carga de serviço;

$g = 1.5$ p/ estado limite último de utilização;

A distância n entre a linha de centro dos parafusos e a força de alavanca é obtida pela expressão 2.3:

$$n = 1.1t_w \sqrt{\frac{\beta p_0}{\sigma_y}} \quad (2.3)$$

sendo σ_y a tensão de escoamento do material da mesa do perfil T .

2.2. Soldas

A solda é um processo de ligação obtido através da fusão de camadas do material das partes a serem ligadas. Normalmente o calor necessário para tal é obtido pela formação de um arco voltaico entre um eletrodo e as partes a serem conectadas.

Em função disso, uma série de cuidados devem ser tomados durante o processo de soldagem afim de se evitar que o material fundido entre em contato com a atmosfera, o que torna a solda mais frágil e menos resistente à corrosão.

2.2.1. Tipos

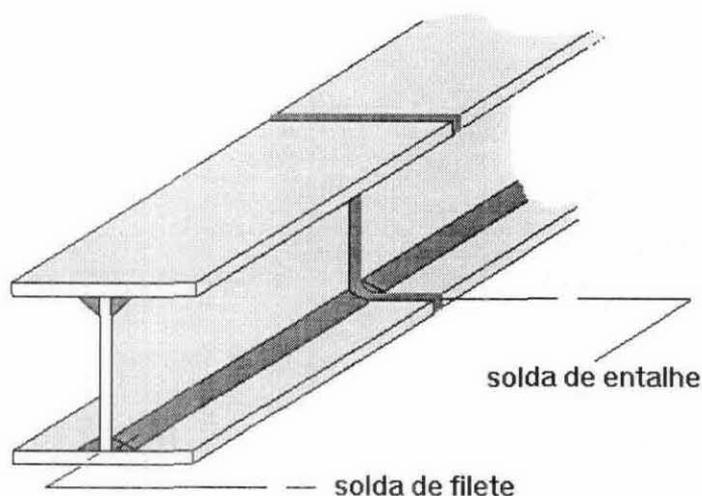


Figura 2.6 - Tipos de solda.

As soldas podem ser de entalhe, filete ou bujão. Na figura 2.6, é fácil identificar dois desse tipos de solda, onde os perfis são compostos por soldas de filete que ligam as suas mesas à alma do perfil. Por sua vez, a ligação é garantida por uma solda de entalhe com penetração total. As ligações implementadas neste trabalho apresentam somente soldas de filete.

2.2.2. Resistência das Soldas

O estado de tensões numa ligação soldada apresenta grande complexidade. Entretanto as normas em geral tratam o cálculo da resistência das soldas de forma simples e por conseguinte bastante conservadora.

As Normas Brasileira e Canadense, por exemplo, consideram a existência de duas importantes formas de colapso em ligações soldadas. Ou ocorre a ruína do metal base, ou do metal da solda propriamente dita (figura 2.7). A área A_m , expressão 2.4, é a seção crítica para a ruína na interface entre a solda e o metal base, enquanto A_w , expressão 2.5, representa a área da seção crítica da solda.

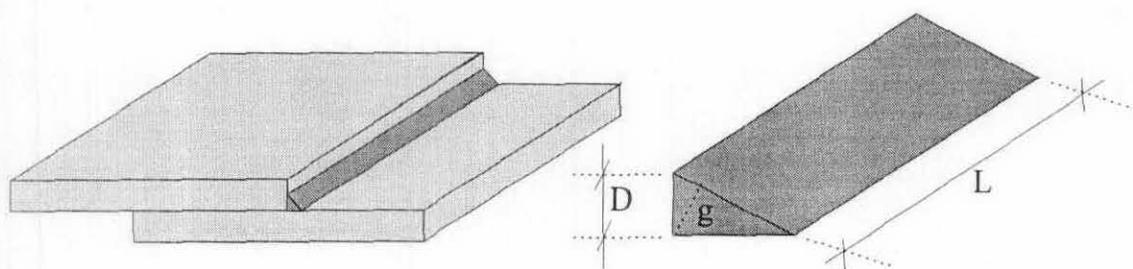


Figura 2.7 - Seções críticas em soldas de filete.

$$A_m = DL \quad (2.4)$$

$$A_w = gL \quad (2.5)$$

Como o eletrodo a ser utilizado numa ligação deve ser escolhido de modo a garantir uma solda de resistência superior ao do metal base, a verificação da solda em si nem sempre é necessária.

O cisalhamento puro é o estado de tensões mais desfavorável sobre o ponto de vista da resistência de soldas. O gráfico tensão x deformação da figura 2.8 mostra as variações no

comportamento das soldas de filete com a direção relativa de atuação da carga no eixo de solda. Quando o valor do ângulo θ é nulo, o eixo da solda é normal a direção da força P e é possível obter altos valores de tensão média atuando no filete de solda. A medida que o ângulo θ cresce, a resistência torna-se cada vez menor.

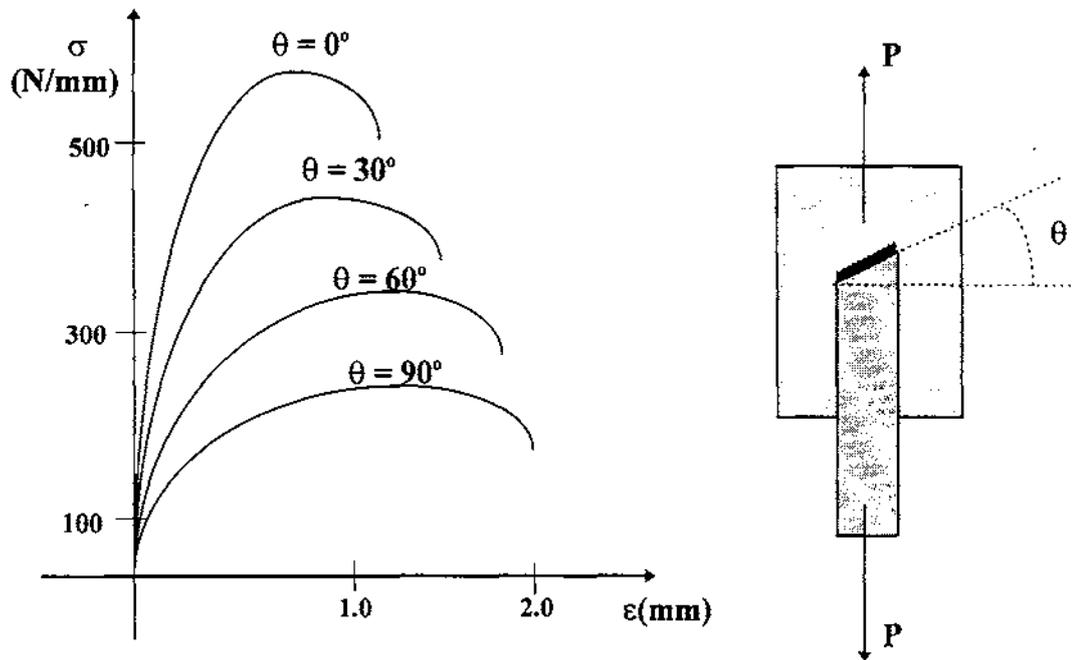


Figura 2.8 - Gráfico tensão x deformação de soldas de filete.

O dimensionamento de uma ligação soldada não envolve somente a resistência dos metais. Soldas de pequena espessura ligando chapas muito espessas podem gerar um metal solda de baixa ductilidade em função de um esfriamento rápido da solda ao entrar em contato com o metal base. Este tipo de situação possibilita a ocorrência de fratura frágil de uma ligação soldada.

As normas em geral afastam o perigo da fratura frágil, determinando uma espessura de solda mínima em função da chapa de maior espessura envolvida na ligação.

O mesmo ocorre para o comprimento mínimo de solda, já que normalmente o início e o final do cordão são imperfeitos. Este comprimento mínimo vem em função da espessura da chapa.

Estas, e outras, especificações adotadas neste trabalho são apresentadas na seção 2.3, a seguir, onde são definidas as regras de cálculo presentes na norma adotada.

2.3 Norma Utilizada

Muito embora seja proposta deste trabalho a configuração de novas regras para o dimensionamento de ligações viga-coluna em aço estrutural, existe a necessidade de se adotar algum padrão básico para o projeto.

Para a implementação deste trabalho, foi utilizada como base a Norma Canadense [CAN/CSA-S16.1-M89] concebida inicialmente em 1974, e que passa atualmente por sua quinta revisão.

A Norma Canadense na verdade foi a primeira a tratar de regras e procedimentos para o projeto de estruturas de aço baseados em estados limites, sendo esta por si só a principal motivação para o seu uso na implementação deste trabalho.

A seguir serão apresentados os procedimentos adotados pela Norma Canadense para o tratamento dos conceitos apresentados nas seções 2.2 e 2.3. Além destes, outros tópicos não tão específicos, porém de igual relevância para o projeto, serão apresentados.

2.3.1. Parafusos

Tração: A resistência a tração fatorada, T_r , desenvolvida por uma ligação aparafusada sujeita à tração poderá ser expressa por:

$$T_r = 0.75\phi_b n m A_b F_u \quad (2.6)$$

onde:

ϕ_b : coeficiente de minoração;

n : número de parafusos;

m : número de planos de corte;

A_b : área da seção transversal do parafuso;

F_u : tensão última do parafuso.

Corte: A resistência ao corte fatorada, V_r , desenvolvida por uma ligação aparafusada sujeita ao cisalhamento pode ser obtida por:

$$V_r = 0.60\phi_b n m A_s F_u \quad (2.7)$$

Quando a rosca dos parafusos intercepta algum plano de corte, a resistência V_r deverá ser minorada em 70%.

Para ligações aparafusadas cujo comprimento seja superior a 1300mm, a resistência V_r obtida nos tópicos acima deverá ser minorada em 80%.

Esmagamento: A resistência ao esmagamento fatorada, B_r , desenvolvida por um membro poderá ser obtida através do menor dos dois valores obtidos nas expressões (2.8) e (2.9) abaixo:

$$B_r = 3\phi t d n F_u \quad (2.8)$$

$$B_r = \phi t n e F_u \quad (2.9)$$

onde:

ϕ : coeficiente de minoração;

t : espessura da placa;

d : diâmetro do parafuso;

n : número de parafusos;

e : distância entre o centro do furo e a extremidade da placa.

Espaçamentos Mínimos e Máximos (figura 2.9):

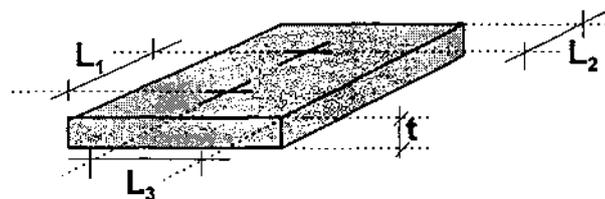


figura 2.9 - Definição das variáveis de espaçamento.

Distância Entre Furos L_1 : A distância mínima entre o centro dos furos de parafusos devem satisfazer as condições expressas em 2.10 e 2.11:

$$L_1 \leq 3d \quad (2.10)$$

$$L_1 \leq 150\text{mm} \quad (2.11)$$

Distância Mínima entre Furo e Borda L_2 : A distância mínima entre o centro do furo do parafuso e as bordas da placa é obtida segundo a norma Canadense através da tabela 2.1 apresentada a seguir:

Tabela 2.1- Espaçamentos mínimos entre furo e borda.

diâmetro		L_2
polegada	milímetro	
5/8	16	28
3/4		32
7/8	20	34
	22	
1	24	38
	27	
1-1/8	30	51
	36	
1-1/4	42	57
	48	
superior	superior	1.75d

Distância máxima de Borda L_2 e L_3 : A distância máxima do centro de um parafuso qualquer das bordas da placa deve obedecer as expressões 2.12 e 2.13:

$$(L_2, L_3) \leq 12t \quad (2.12)$$

$$(L_2, L_3) \leq 150\text{mm} \quad (2.13)$$

2.3.2. Soldas

Cisalhamento: A resistência fatorada V_r ao cisalhamento de uma ligação soldada pode ser obtida como a menor das expressões 2.14 e 2.15:

$$V_r = 0.67 \phi A_m F_y \quad (2.14)$$

$$V_r = 0.67 \phi_w A_w X_u \quad (2.15)$$

Nestas expressões, A_m e A_w foram definidos na figura 2.7, F_y é a tensão de escoamento do metal base e X_u é a tensão última da solda.

Tração e Compressão: As mesmas expressões 2.14 e 2.15, são válidas para ligações soldadas sujeitas a cargas de tração ou compressão na direção normal ao eixo de solda.

Dimensões Mínimas Para a Perna de Solda: São especificadas de acordo com a placa da maior espessura, conforme pode-se observar na tabela 2.2:

Tabela 2.2 - Dimensões mínimas para perna de solda.

Espessura da placa em mm	perna mínima em mm
t até 12 mm	5 mm
t entre 12 mm e 20 mm	6 mm
t superior a 20 mm	8 mm

Dimensões Máximas Para a Perna de Solda: São igualmente especificadas de acordo com a placa de maior espessura através da tabela 2.3:

Tabela 2.3 - Dimensões máximas para perna de solda.

$D_{\max} \leq t$	$t \leq 6\text{mm}$
$D_{\max} = t - 2$	$t > 6\text{mm}$

Dimensões Mínimas Para o Comprimento L do Filete de Solda: São especificadas através da expressão 2.16:

$$L_{\min} \geq \begin{cases} 4D \\ 40\text{mm} \end{cases} \quad (2.16)$$

2.3.3. Classificação de seções de membros comprimidos

O tratamento adotado pela Norma Canadense para elementos estruturais submetidos a esforços axiais de compressão baseia-se na designação de classes (1, 2, 3 e 4), dependendo da razão largura/espessura destes elementos. Conceitualmente, as classes são definidas como segue:

CLASSE 1: *Permitem que se alcance o momento plástico e a subsequente redistribuição de tensões na seção.*

CLASSE 2: *Permitem que se alcance o momento plástico, porém não ocorre redistribuição de tensões.*

CLASSE 3: *A seção é capaz de atingir o momento elástico.*

CLASSE 4: *A seção flamba antes de atingir o seu momento elástico.*

O gráfico da figura 2.10 ilustra o comportamento das classes de perfis acima definidas de acordo com a sua esbelteza, caracterizadas pela razão largura/espessura, enquanto a tabela 2.4 apresenta os valores referentes às esbeltezas da alma e da mesa que caracterizam em qual classe um determinado perfil está enquadrado.

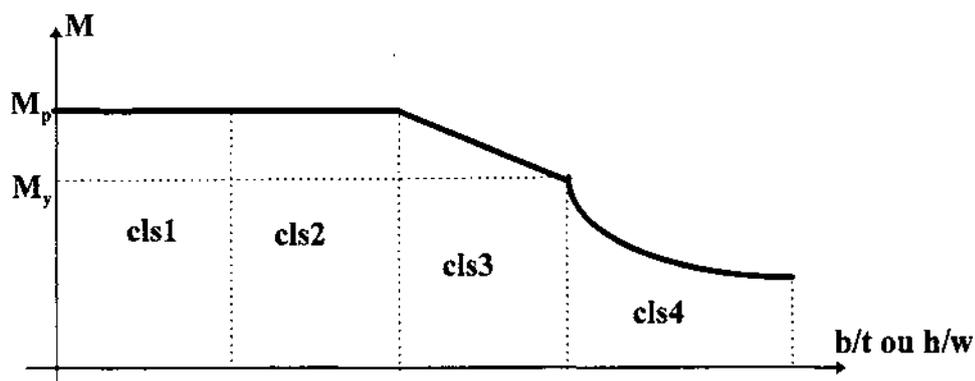


figura 2.10 - Características das classes de seções.

Tabela 2.4 - Classificação das seções dos perfis.

classe	mesa	alma
1	$\frac{b}{t} \leq \frac{145}{\sqrt{F_y}}$	$\frac{h}{w} \leq \frac{1100}{\sqrt{F_y}} \left(1 - 0.39 \frac{C_f}{C_y} \right)$
2	$\frac{b}{t} \leq \frac{170}{\sqrt{F_y}}$	$\frac{h}{w} \leq \frac{1700}{\sqrt{F_y}} \left(1 - 0.61 \frac{C_f}{C_y} \right)$
3	$\frac{b}{t} \leq \frac{200}{\sqrt{F_y}}$	$\frac{h}{w} \leq \frac{1900}{\sqrt{F_y}} \left(1 - 0.65 \frac{C_f}{C_y} \right)$
4	$\frac{b}{t} > \frac{200}{\sqrt{F_y}}$	$\frac{h}{w} > \frac{1900}{\sqrt{F_y}} \left(1 - 0.65 \frac{C_f}{C_y} \right)$

onde:

C_y : carga de compressão que leva a seção ao escoamento;

C_f : carga de compressão atuante na seção;

b : largura da mesa;

t : espessura da mesa;

h : altura da alma;

w : espessura da alma.

No capítulo anterior foram apresentados, resumidamente, conceitos necessários para o projeto de ligações e para sua implementação computacional.

Afim de se obter uma automatização do projeto de ligações em aço, passa a ser foco desta dissertação a apresentação de uma filosofia de projeto racional no contexto de ligações viga-coluna. O presente capítulo visa, portanto, formalizar uma proposta de projeto que servirá como plataforma para a implementação de um ambiente seguro e flexível no referido contexto.

3.1 Ligações Viga-Coluna

Ao se unirem elementos estruturais, preliminarmente, dois enfoques se fazem presentes. Um deles é o comportamento global da estrutura e o outro, se refere ao comportamento local de suas ligações. Torna-se conveniente, então, a classificação de pórticos estruturais quanto a sua deslocabilidade horizontal externa e ligações quanto a transmissão dos esforços.

De uma forma geral, usa-se chamar de pórticos deslocáveis (figura 3.1b) aqueles cujas forças horizontais são resistidas apenas por ele mesmo, ou seja, não apresentam nenhum tipo de contraventamento que restrinja a sua deslocabilidade horizontal. De forma análoga, pórticos contraventados horizontalmente são ditos indeslocáveis (figura 3.1a).

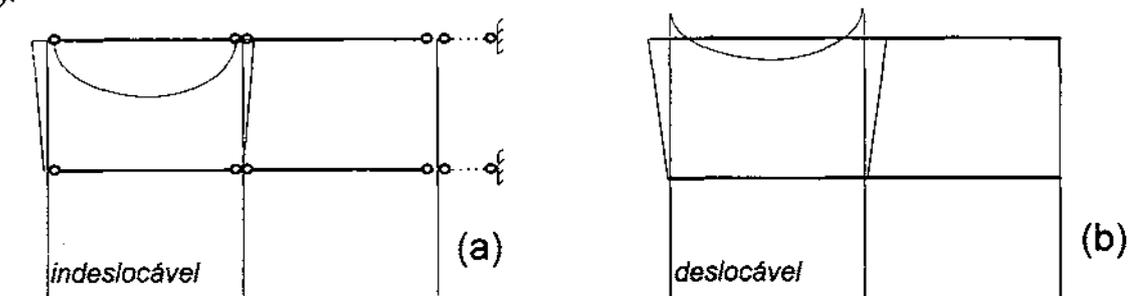


Figura 3.1 - Classificação de pórticos.

É igualmente possível diferenciar os modos de comportamento de ligações em pórticos submetidos a esforços verticais de acordo com a magnitude dos esforços a serem transmitidos na ligação viga-coluna. Três tipos de ligações podem ser classificadas: ligações flexíveis, rígidas e semi-rígidas.

Seria bastante simples definir ligações rígidas como aquelas cujo momento transmitido da viga para a coluna fosse igual ao momento de engastamento perfeito, ou ligações flexíveis como aquelas que não transmitem nenhum momento fletor.

Este modelo, por demais simplista, não exprime corretamente o que ocorre. Na realidade, sempre existe alguma parcela de momento transmitido em ligações flexíveis, bem como a transferência não é total em ligações rígidas.

É mais prudente então associar a capacidade de transmissão do momento à rotação relativa da viga com a coluna, como ilustra o gráfico esquemático da figura 3.2. Uma ligação dita semi-rígida pode comportar-se rigidamente, bastando que o momento atuante na extremidade da viga seja consideravelmente inferior ao momento que a ligação pode resistir e que a rotação de extremidade correspondente seja tolerável.

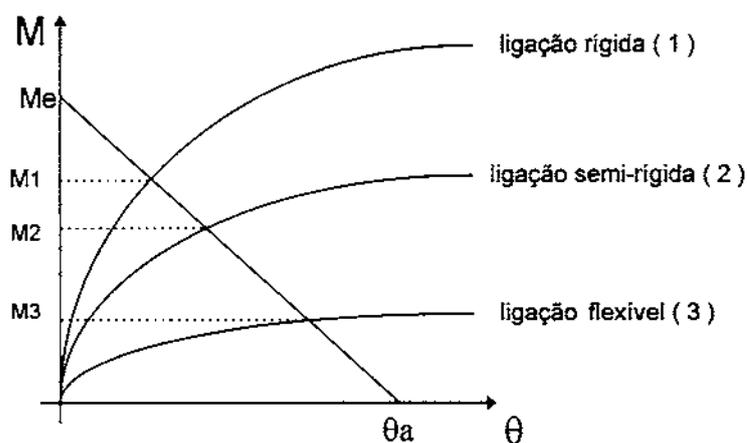


Figura 3.2 - Gráfico momento x curvatura.

M : momento de extremidade;

θ : rotação da viga;

M_e : momento de engastamento perfeito;

θ_a : rotação p/ viga bi-apoiada.

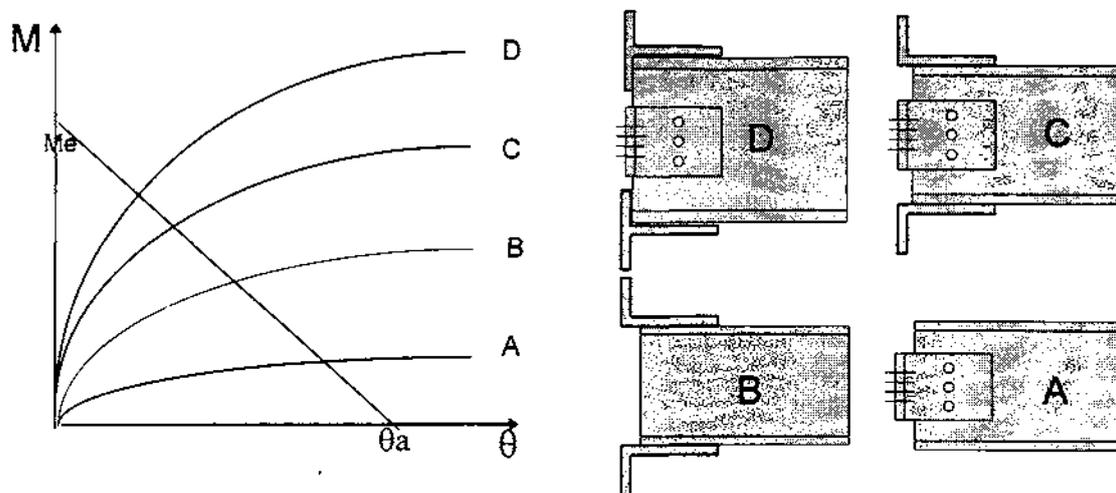


Figura 3.3 - Classificação de ligações e modos de comportamento.

A ligação *A* da figura 3.3, que mais tarde será discutida, é projetada para transmitir apenas o esforço cortante, porque fisicamente é permitida a rotação da viga. O conjunto cantoneira-parafuso se aproxima do comportamento de uma rótula. As ligações flexíveis podem apenas ser utilizadas em pórticos indesejáveis.

As ligações *B* e *C*, consideradas ligações semi-rígidas, encontram-se na faixa de transmissão parcial de momento fletor. Na realidade, ligações semi-rígidas são aquelas onde se reconhece a existência de uma certa rigidez rotacional capaz de não permitir totalmente o giro da viga e conseqüentemente transmitir algum momento. É claro que este momento no final da viga será sempre inferior ao que ocorreria em uma situação idêntica em um pórtico similar, mas constituído por uma ligação rígida.

Para assegurar a transmissão parcial de momento fletor, é necessária uma análise mais profunda das rigezas de determinadas peças que compõem uma ligação.

Por último, a ligação *D* apresenta um comportamento rígido em função do perfil *T*, que efetivamente impede que haja a rotação da viga, em sua seção última, em relação a face externa da mesa da coluna.

Em geral ligações rígidas são projetadas para pórticos deslocáveis. No entanto nada impede que estes também possam ser utilizados em pórticos indesejáveis. De fato, seu uso reduz o tamanho das vigas, se comparado com ligações flexíveis para pórticos

indeslocáveis. Todavia, o custo elevado de ligações rígidas, além da sobrecarga imposta por estas à coluna, torna seu uso desaconselhável para pórticos indeslocáveis.

3.2. Incertezas

Durante a execução de um projeto em engenharia estrutural, sempre existirão variações entre o modelo analítico e o real comportamento da estrutura. Essas incertezas devem ser acomodadas de acordo com o conhecimento e o bom senso do projetista.

Mesmo ensaios realizados minuciosamente em sofisticados laboratórios, por maior que possa ser o grau de precisão, raramente conseguirão atingir resultados idênticos ao do modelo analítico. É evidente que a ordem de grandeza do erro depende também do tipo de estrutura, material ou condições de contorno, bem como do elemento estrutural e do modelo de comportamento assumido.

Quando se pretende unir elementos estruturais metálicos, percebe-se frequentemente que as incertezas são ainda maiores. Vigas e colunas em aço estão sempre sujeitas a imperfeições geométricas, tais como curvaturas, deformações ou empenamento, sempre gerando tensões secundárias que não devem ser desprezadas. O mal assentamento entre os elementos conectados determinam uma transmissão de esforços não compatível com o que se imaginara obter [MORR87]. No caso de placas mal alinhadas, a transmissão dos esforços pode até mesmo em alguns casos não ocorrer. Ligações em aço estrutural caracterizam-se também por uma geometria bastante complexa, já que normalmente são compostas por diversas peças, como parafusos, cantoneiras e chapas furadas. Isto pode gerar concentração de tensões além de dificultar a determinação da distribuição de tensões ao longo da ligação e individualmente em cada peça [PETE53]. Finalmente, tensões e deformações residuais, também alteram o comportamento das peças estruturais quando tracionadas [WELD77].

Os aspectos citados anteriormente não podem ser esquecidos no dimensionamento e detalhamento de estruturas metálicas e especificamente para ligações viga-coluna, afinal, é justamente no projeto de ligações que se pode assegurar determinadas premissas

de cálculo definidas pelo projetista na elaboração do modelo estrutural. Assim, quando se considera que um determinado apoio é engastado, ou quando se deseja que algum esforço seja ou não transmitido, é papel do projetista assegurar que tal comportamento seja compatível com o modelo. Isso é definido no dimensionamento das ligações.

3.3 Filosofia do Projeto

Qualquer filosofia de projeto racional deve considerar a complexidade e variabilidade no comportamento das ligações. A partir daí, duas diferentes tendências tornam-se bastante claras.

Em outras palavras, o projetista pode optar por buscar métodos analíticos mais sofisticados, considerando toda a complexidade que as incertezas provocam, buscando assim um projeto mais econômico e com pequenos fatores de segurança. Alternativamente, uma análise simples pode ser adotada em conjunto com fatores de segurança mais elevados, o que acarreta uma maior flexibilidade no tratamento de possíveis variações entre a análise e o comportamento. Em função desta variabilidade, a primeira opção a princípio econômica, torna-se inviável.

O método proposto por Owens [OWEN89], e que é apresentado a seguir com quatro fases distintas do projeto, busca os princípios caracterizados acima.

FASE I: *Levar em consideração o comportamento da ligação como um todo e buscar uma análise simples e apropriada para determinar uma distribuição de forças realista na ligação.*

Nesta primeira etapa do projeto determina-se o comportamento da ligação como um todo, como foi discutido no item 3.1, e a partir de então pode-se elaborar o modelo analítico compatível. Para as ligações implementadas neste trabalho, esta análise se baseou no conceito de trajetórias de força (“Force Paths”).

“Force Paths”: É uma análise simplificada, onde o conjunto das cargas atuante na ligação é substituído por um sistema de forças equivalentes, que seguem trajetórias de forças específicas através da ligação.

Este fluxo de forças pode ser exemplificado brevemente para a ligação mostrada na figura 3.4 abaixo.

Esta ligação rígida apresenta uma placa de extremidade aparafusada na coluna e soldada na viga. Para esta situação, a maior dificuldade é justamente a determinação da distribuição de forças nos parafusos.

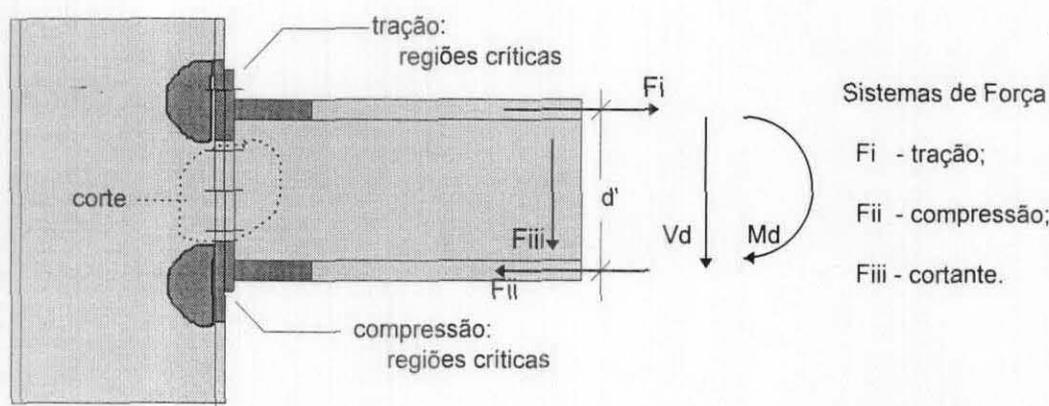


Figura 3.4 - Sistemas de força em ligações viga/coluna.

Para se determinar as *force paths*, o momento fletor atuante na viga é substituído por um binário. Com isso, são estabelecidos três sistemas de força: o de tração, que agirá sobre a coluna através da mesa superior da viga; o de compressão, na qual a mesma trajetória é descrita só que desta feita na mesa inferior e o cortante que se admite sendo transmitido por uma força atuante na alma da viga.

Em muitas situações, e especificamente neste trabalho, tal modelo é bastante satisfatório, desde que se verifique convenientemente cada componente do modelo adotado.

Ao se optar por este tipo de modelo, não é suficiente a obtenção da distribuição de forças nos elementos a serem conectados. É igualmente fundamental considerar a flexibilidade dos componentes da ligação. São estes que irão efetivamente determinar mais realisticamente a distribuição de forças na ligação.

Assim, para a trajetória de tração, presente na ligação da figura 3.4, caso seus parafusos sejam de diâmetro reduzido se comparado com uma placa espessa, serão os primeiros que irão governar a distribuição das forças. Todavia, ocorrendo o inverso, será a ação da flexão da chapa que irá preliminarmente governar a distribuição de forças na ligação, incluindo a própria distribuição de forças nos parafusos.

Para este tipo de análise é muito importante a verificação da consistência ao longo de toda a ligação. Isto é atingido realizando-se uma análise isolada da região mais crítica da ligação para, a partir daí, determinar-se a distribuição de forças nas demais partes.

FASE II: *Garantir que cada componente de cada "Force Path", tenha resistência suficiente para transmitir os esforços convenientemente.*

A maior desvantagem dos métodos analíticos convencionais, é que eles concentram a distribuição das forças nos conectores. Muitas regras práticas são resumidas na verificação da resistência desses elementos. Desta forma, projetistas inexperientes são induzidos a assumir que somente a análise das soldas e parafusos, garantirá um dimensionamento e detalhamento satisfatório para a ligação.

Na realidade, maiores precauções devem ser tomadas em relação aos demais componentes da ligação. Seguindo as trajetórias de forças determinadas na fase anterior, as verificações são feitas seqüencialmente de acordo com as premissas de projeto, ou seja, há que se ter uma clara compreensão, a priori, de como é desejado que se comporte a ligação. A partir daí basta garantir que cada componente e suas seções críticas resistam a distribuição de forças já determinada.

Ao percorrer as trajetórias de força, há que se verificar individualmente a resistência de cada componente da ligação desde as mesas e a alma da viga, passando pelos elementos conectores (soldas, parafusos e placas) até que se alcance a coluna, que também será verificada localmente.

FASE III: *Reconhecer que o procedimento acima pode apenas garantir que a ligação é capaz de atingir o equilíbrio, porém a compatibilidade ainda não foi satisfeita e para tal há que se certificar que os componentes são capazes de se comportar de forma dúctil.*

As duas fases anteriores garantem consistentemente que a ligação apresenta a resistência adequada em função do modelo de comportamento que se deseja obter.

Assim é necessário agora assegurar que a ligação possa atingir as condições já estabelecidas no modelo estrutural adotado, sem que ocorra colapso ou flambagem prematura e isto só pode ser obtido através de uma garantia de comportamento dúctil.

As incompatibilidades podem aparecer tanto em função de simplificações do modelo adotado, quanto por problemas de mau alinhamento entre as placas; suas causas porém não são importantes. Todavia, em função de sua possível presença, é essencial que a ligação seja capaz de se comportar dúctilmente para deformações plásticas, evitando um colapso prematuro e indesejado.

Tomada esta precaução, mesmo que não seja possível prever respostas elásticas precisamente, a ligação irá redistribuir forças até que estas atuem na forma como foram definidas no projeto. Como exemplo, a ligação *A* da figura 3.3, por ser flexível, apresenta uma rotação na extremidade da viga, produzindo assim deformações nos seus elementos como na cantoneira, mesa da coluna e alma da viga, que devem acomodar e redistribuir estes esforços convenientemente sem que haja colapso.

FASE IV: *Reconhecendo que os três passos anteriores apenas se referem a análise estática, garantir que os componentes são resistentes a fadiga.*

Para ligações de projetos de edificações que são projetadas por procedimentos elásticos convencionais, este passo pode normalmente ser omitido. Todavia, em outros casos tais como pontes ou estruturas sujeitas a carregamento cíclico significativo, é necessária uma análise mais precisa de aspectos como a fadiga.

Uma vez definida a filosofia do projeto como um todo e conseqüentemente os métodos e procedimentos que permitem a não violação desta proposta, é possível a partir de então analisar detalhadamente as ligações implementadas.

4.1 Ligação Rígida T

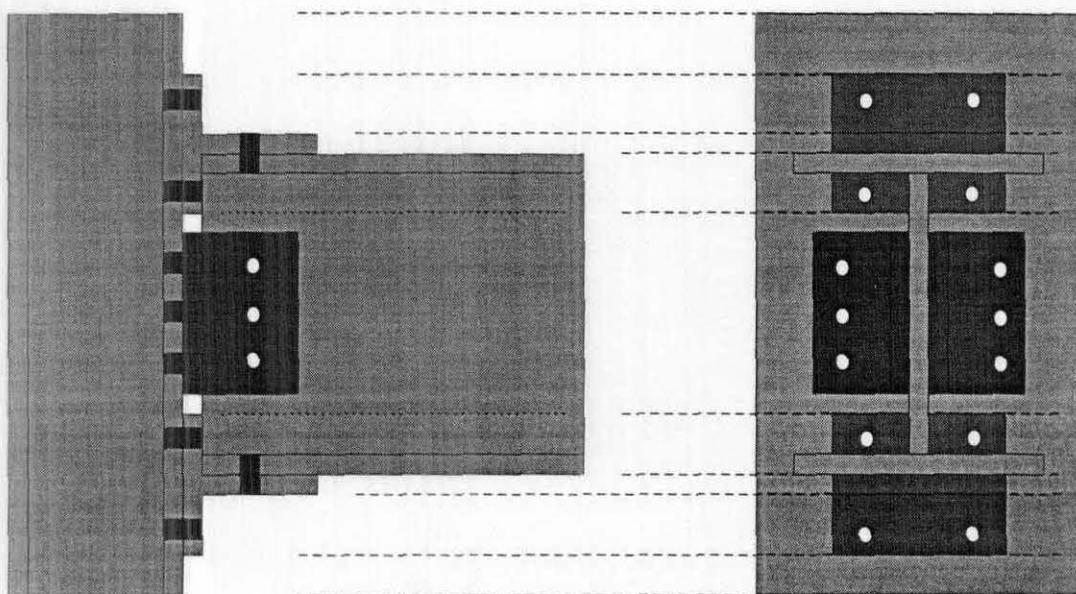


Figura 4.1 - Desenho esquemático da ligação rígida T.

A ligação da figura 4.1 acima, totalmente aparafusada, é composta por dois perfis T , que na verdade são dois perfis soldados I e cortados na alma de acordo com a necessidade do espaçamento dos parafusos. Ligando a alma da viga à coluna, estão presentes duas cantoneiras também aparafusadas tanto na alma da viga, quanto na mesa da coluna. Na verdade, o perfil T é o responsável pela restrição a rotação da viga, garantindo assim a transmissão de momento fletor. O número de parafusos no perfil T é fixo, ou seja, quatro por perfil, o que não ocorre na cantoneira, onde este número poderá variar de acordo com o diâmetro dos parafusos dimensionados. Isto é importante no

sentido de permitir uma maior padronização da ligação utilizando-se em todo o seu conjunto, os mesmos parafusos. Com isso, evidentemente, os furos apresentarão o mesmo diâmetro, tornando assim o processo de fabricação e montagem mais eficiente.

Definida a ligação, e como se deseja que esta se comporte, pode-se empregar toda a filosofia de projeto descrita no capítulo 3. Serão apresentadas as metodologias de cálculo convencionais utilizadas para a sua implementação.

4.1.1 Distribuição dos Esforços

O sistema de forças equivalente pode ser obtido analogamente ao da ligação com chapa de extremidade apresentada na seção anterior, ou seja, isoladamente, as mesas superior e inferior contribuem para a transmissão do momento fletor. Também como já foi citado anteriormente, a alma estará contribuindo com a transmissão do cortante.

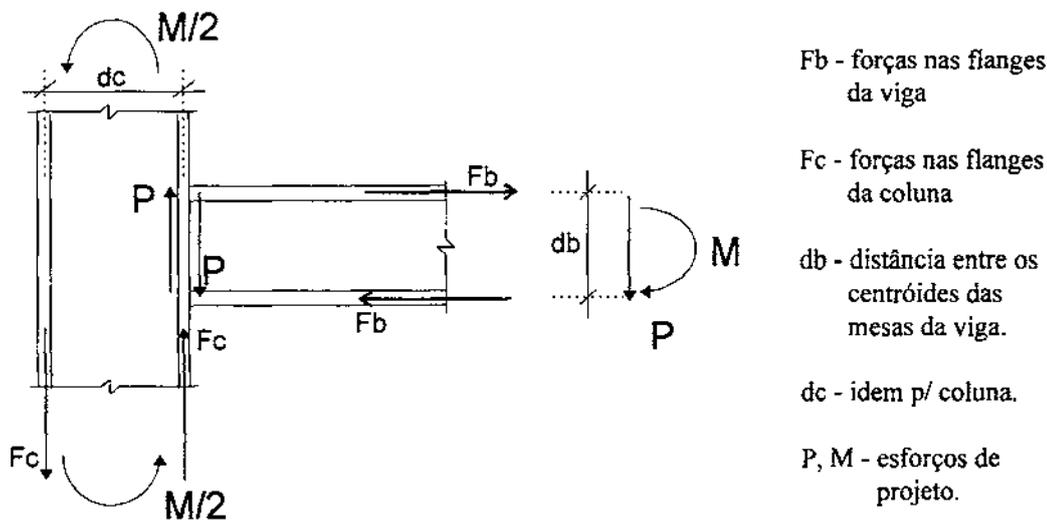


Figura 4.2 - Distribuição dos esforços da ligação rígida T.

Assim, de acordo com a figura 4.2, as forças que atuam na ligação transmitindo momento fletor e cortante podem ser expressas como:

$$F_a = P \quad (\text{força atuando na alma da viga}) \quad (4.1)$$

$$F_b = M/d_b \quad (\text{força atuando nas mesas da viga}) \quad (4.2)$$

$$F_c = M/2d_c \quad (\text{força atuando nas mesas da coluna}) \quad (4.3)$$

Com esta distribuição de forças, pode-se determinar os três fluxos aos quais seqüencialmente serão feitas as verificações necessárias. Assim, a força F_b , de tração, percorre a ligação através da mesa superior da viga, enquanto que a de compressão faz o mesmo percurso, porém na mesa inferior. O cortante é transmitido pela alma da viga. Os tres fluxos são descritos a seguir, detalhando-se cada um dos respectivos elementos estruturais percorridos.

4.1.2 Dimensionamento do Fluxo de Tração

O fluxo de tração é definido pela trajetória por onde a componente F_b percorre, desde a mesa superior da viga, até atingir a alma da coluna. Para garantir esta situação, uma série de verificações devem ser realizadas, como ilustra a figura 4.3:

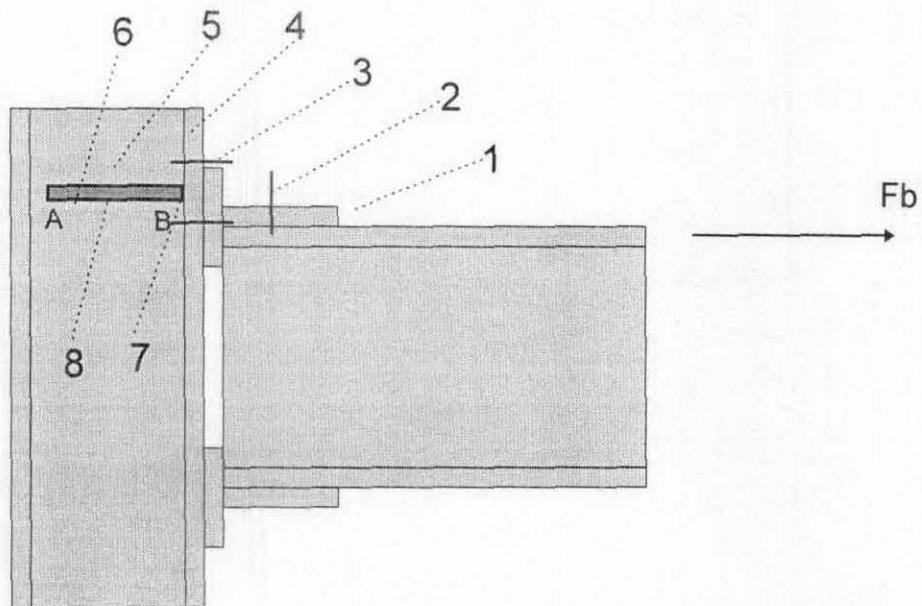
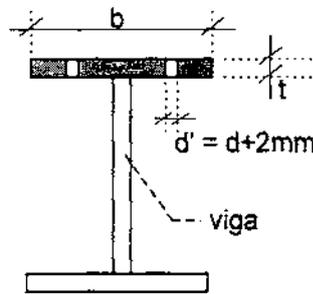


Figura 4.3 - Fluxo de Tração.

1. Mesa Superior da Viga

De acordo com o modelo analítico adotado, a mesa superior é submetida a uma força F_b , de tração, devendo então ser verificada para tal. A largura efetiva da mesa é limitada pela disposição dos parafusos que unem o perfil T a sua mesa como ilustra a figura 4.4. As áreas bruta e líquida podem ser obtidas pelas expressões 4.4 e 4.5:



$$A_g = b \times t \quad (4.4)$$

$$A_n = (w - 2d')t \quad (4.5)$$

Figura 4.4 - Área líquida da seção da mesa.

De acordo com a norma Canadense, a resistência de membros tracionados deverá ser a menor entre o produto da tensão última vezes a área líquida, ou da tensão de escoamento pela área bruta da mesa da viga, de acordo com as expressões 4.6 e 4.7:

$$T_r = A_g F_u \quad (4.6)$$

$$T_r = 0.85 A_n F_u \quad (4.7)$$

2. Parafusos ao Corte

Os parafusos que ligam a mesa superior da viga ao perfil T estão submetidos ao corte. Assim é possível obter o diâmetro dos parafusos ou o seu número total na haste do T através respectivamente das expressões 4.8 e 4.9, que por sua vez são determinadas pela expressão 2.7:

$$A_b = F_b / (0.60 \phi n m F_u) \quad \text{ou} \quad (4.8)$$

$$n = F_b / (0.60 \phi A_b m F_u) \quad (4.9)$$

3. Parafusos Perfil T/Coluna

Os parafusos que unem o perfil T a coluna, estão solicitados a tração e provocam o efeito alavanca na mesa do T. Sendo assim, a carga que traciona os parafusos, deverá ser acrescida da carga provocada pelo efeito alavanca. Os parafusos podem ser dimensionados então, de acordo com a expressão 4.10 proveniente da expressão 2.6:

$$A_b = (Q + F_b) / (0.75 \times \phi_b \times n m F_u) \quad (4.10)$$

onde Q é a força de alavanca obtida através das expressões (2.2) e (2.3).

4. Mesa da coluna

Os parafusos dimensionados no item anterior provocam a flexão da mesa da coluna. Considerando a descrição da ligação, ou seja, duas filas de dois parafusos cada, arranjados simetricamente em relação a alma da coluna, pode-se apresentar a análise adotada. Na figura 4.5 percebe-se as charneiras plásticas, que na verdade são as linhas de deformação plástica da mesa. Adotando-se um ângulo de dispersão nunca superior a 60° , obtém-se, através da expressão 4.11, a largura efetiva da seção fletida. As expressões 4.12 à 4.14 fornecem respectivamente o momento elástico M_e , da seção, e a capacidade total P da mesa para resistir a flexão, que nunca poderá superar F_b .

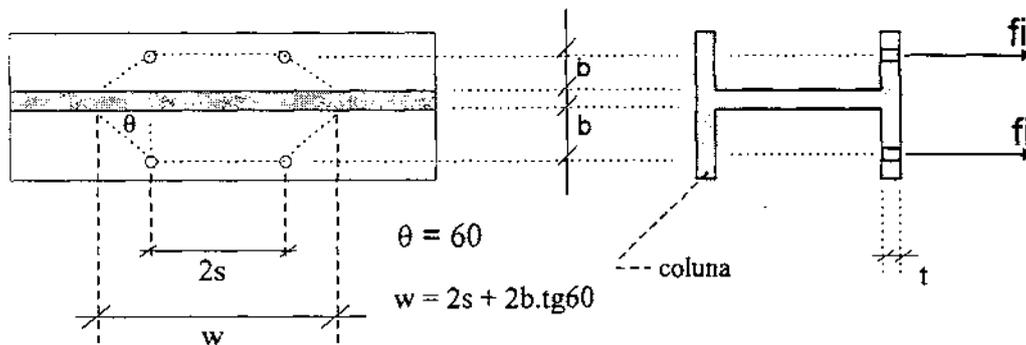


Figura 4.5 - Modelo de flexão da mesa da coluna.

$$M_e = \sigma_y W \quad (4.11)$$

$$M_e = \left(\frac{\sigma_y t^2}{6} \right) (2s + 2b \times \text{tg}(60)) \quad (4.12)$$

$$M_d = \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{b}{2} \right) \quad (4.13)$$

$$M_d = M_e \Rightarrow P = \left(\frac{2}{3b} \right) \left(\sigma_y t^2 (2s + 2b \times \text{tg}(60)) \right) \quad (4.14)$$

5. Alma da Coluna

O último elemento da ligação solicitado pelo fluxo de tração é a alma da coluna. Esta é tracionada pela flexão da mesa da coluna. Assim como no item 1, as verificações são feitas pela consideração da alma como um membro tracionado. Desta feita porém há que se determinar qual a largura efetiva, obtida através de um ângulo θ de dispersão de 45° desde a mesa, conforme mostra a figura 4.6.

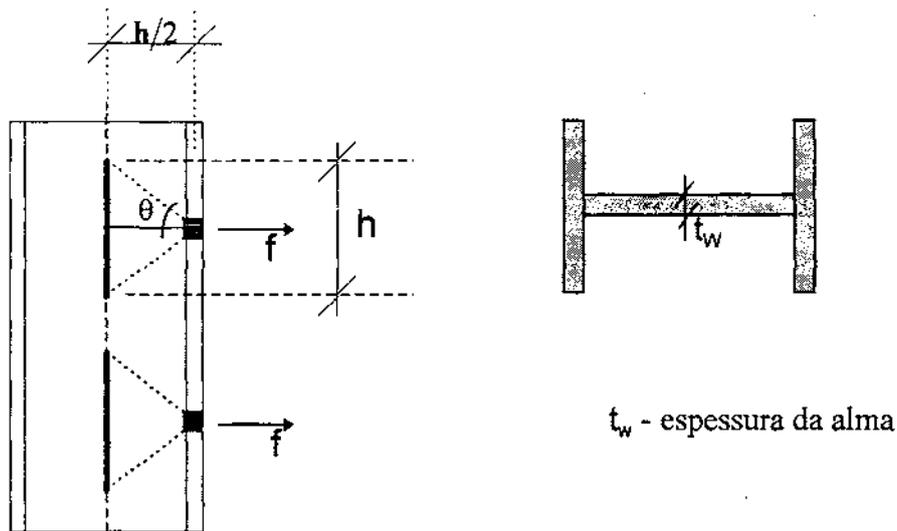


Figura 4.6 - Modelo de tração na alma da coluna.

$$A_{ne} = h \times t_w \quad (4.15)$$

$$F_b < \sigma_y A_{ne} \quad (4.16)$$

Com a área líquida efetiva obtida por 4.15 basta garantir que a expressão 4.16 seja satisfeita. Caso não seja, haverá a necessidade de se reforçar a alma com um enrijecedor.

6. Enrijecedor AB

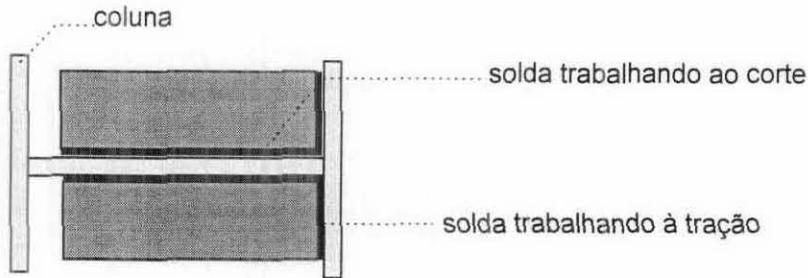


Figura 4.7 - Enrijecedores de coluna.

Caso os itens 4 ou 5 não sejam satisfeitos, haverá a necessidade da utilização de um enrijecedor (figura 4.7). Este será dimensionado a tração, seguindo mais uma vez as regras anteriormente descritas para dimensionamento de membros tracionados. A carga axial atuante no enrijecedor é obtida pela diferença entre F_b e a resistência R dos itens 4 ou 5. A expressão 4.17 apresenta o valor da área A_e necessária para o enrijecedor.

$$A_e = (F_b - R) / 0.85F_u \quad (4.17)$$

7. Solda - Flange/Enrijecedor

A estratégia utilizada para calcular o filete de solda foi adotar inicialmente as dimensões mínimas obtidas na tabela 2.2 e nas expressões 2.16 e 2.17. Com estas dimensões mínimas, foram feitas as verificações através das expressões 2.14 e 2.15. Caso a solda mínima não seja satisfatória, incrementa-se as dimensões da solda, repetindo-se o processo até que a expressão 4.18 seja satisfeita:

$$(F_b - R) < V_r \quad (4.18)$$

onde V_r é a resistência do filete de solda.

8. Solda - Alma/Enrijecedor

Análogo ao item anterior, só que desta feita a ligação a ser garantida é entre o enrijecedor e a alma da coluna. Um filete de solda, localizado longitudinalmente ao enrijecedor, deverá ser dimensionado para resistir ao corte, conforme a figura 4.7. O dimensionamento segue procedimento idêntico ao adotado no item 7 acima.

4.1.3 Dimensionamento do Fluxo de Compressão

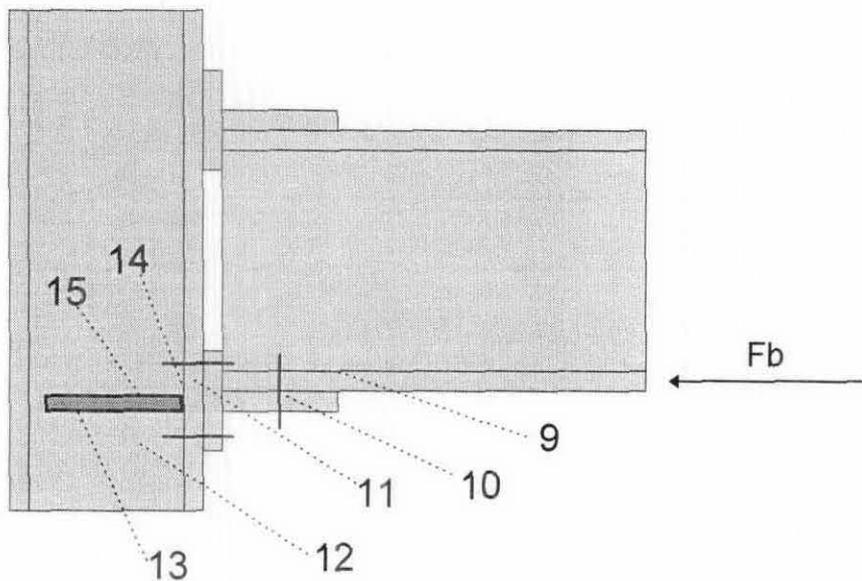


Figura 4.8 - Fluxo de compressão.

Analogamente à trajetória de tração verifica-se agora o fluxo de compressão, que percorre desde a mesa inferior da viga até a alma da coluna. A diferença básica aqui, reside no fato de que alguns componentes da ligação podem estar sujeitos a problemas de instabilidade. Assim sendo, as seguintes verificações são necessárias:

9. Mesa Inferior da Viga

Analogamente ao item 1, a mesa inferior da viga é submetida axialmente pela força F_b , desta feita de compressão. Assim, além da verificação da resistência a compressão da seção, há que se garantir que não haja flambagem local da mesa. Limitando as tensões atuantes à tensão de escoamento, basta certificar-se que o perfil seja ao menos *classe III*, conforme a tabela 2.4. Garantida esta condição, as expressões utilizadas para membros tracionados são válidas para a compressão da mesa inferior.

10. Parafusos ao Corte

Este cheque é idêntico ao cheque do item 2. Apesar da força F_b inverter o seu sentido, ela apresenta o mesmo valor absoluto solicitando os parafusos igualmente ao corte, sendo portanto válidas para este item as verificações realizadas no item 2.

11. Mesa da Coluna

A mesa da coluna é flexionada pela força de compressão transmitida pelos parafusos. Para verificar localmente a resistência da mesa, a análise simplificadora adotada considera as mesas como uma viga em balanço como ilustra a figura 4.9:

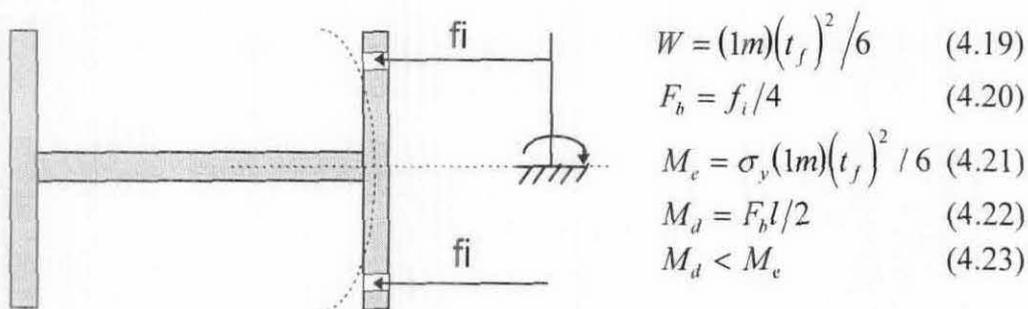


Figura 4.9 - Fluxo de compressão - flexão na mesa da coluna.

Através das expressões 4.19 até 4.23 obtém-se 4.24:

$$F_b < \left(\frac{1}{3l}\right) \left[\sigma_y (1m) (t_f)^2 \right] \quad (4.24)$$

onde l é a distância entre a linha de centro dos parafusos e o centróide da alma, t_f é a espessura da mesa da coluna e $(1m)$ representa a largura efetiva da mesa da coluna, calculada como sendo uma viga em balanço com base igual a 1 metro.

12. Alma da Coluna

A última verificação local a ser realizada é a flambagem local na alma da viga, devido a componente de compressão F_b ao atingir a coluna. Na verdade, esta é uma situação equivalente a vigas submetidas a cargas concentradas, "Patch Load". De acordo com a norma Canadense, para cargas concentradas aplicadas a uma distância do apoio superior a altura do membro, a resistência pode ser obtida pelo menor valor de B_r entre 4.25 e 4.26:

$$B_r = 1.10 \phi w (N + 5k) F_y \quad (4.25)$$

$$B_r = 300 \phi w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{N}{d} \right) \left(\frac{w}{t} \right)^{1.5} \right] \sqrt{F_y t / w} \quad (4.26)$$

com: $B_r < F_b \quad (4.27)$

onde de acordo com a figura 4.10:

w : espessura da alma;

N : comprimento da região de esmagamento;

k : distância entre a face externa da mesa e a solda;

t : espessura da mesa;

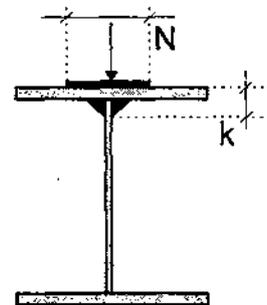


Figura 4.10 - Patch Load.

13. Enrijecedor CD

Caso a expressão 4.27 acima não seja satisfeita, haverá a necessidade da utilização de um enrijecedor de forma similar ao enrijecedor do fluxo de tração. Para tal, pode-se adotar enrijecedores compactos, *classe II* ou *classe III*. A diferença se encontra na carga de projeto adotada para o dimensionamento destes:

$$\text{enrijecedor classe II} \quad P = B_c - F_b \quad (4.28)$$

$$\text{enrijecedor classe III} \quad P = F_b \quad (4.29)$$

Com os esforços determinados nas expressões 4.28 e 4.29, os enrijecedores são projetados para resistirem a compressão.

14. Solda Mesa/Enrijecedor

O procedimento para o dimensionamento da solda que une a mesa da coluna ao enrijecedor submetida a compressão, segue estritamente ao mesmo procedimento adotado no item 7 para o fluxo de tração.

15. Solda Alma/Enrijecedor

O procedimento adotado para o dimensionamento da solda que une a alma da coluna ao enrijecedor, submetida ao corte, segue estritamente ao mesmo procedimento adotado no item 8 para o fluxo de tração.

16. Painel ABCD

Na região de contato com a viga, o conjunto alma e mesa da coluna funciona como um painel de alma submetido ao cisalhamento. Esta verificação pode ser feita como habitualmente se verifica a resistência ao cisalhamento de uma alma enrijecida. Assim,

considera-se as mesas da coluna funcionando como enrijecedores, cuja distância é a altura da coluna, conforme pode-se observar na figura 4.11 abaixo.

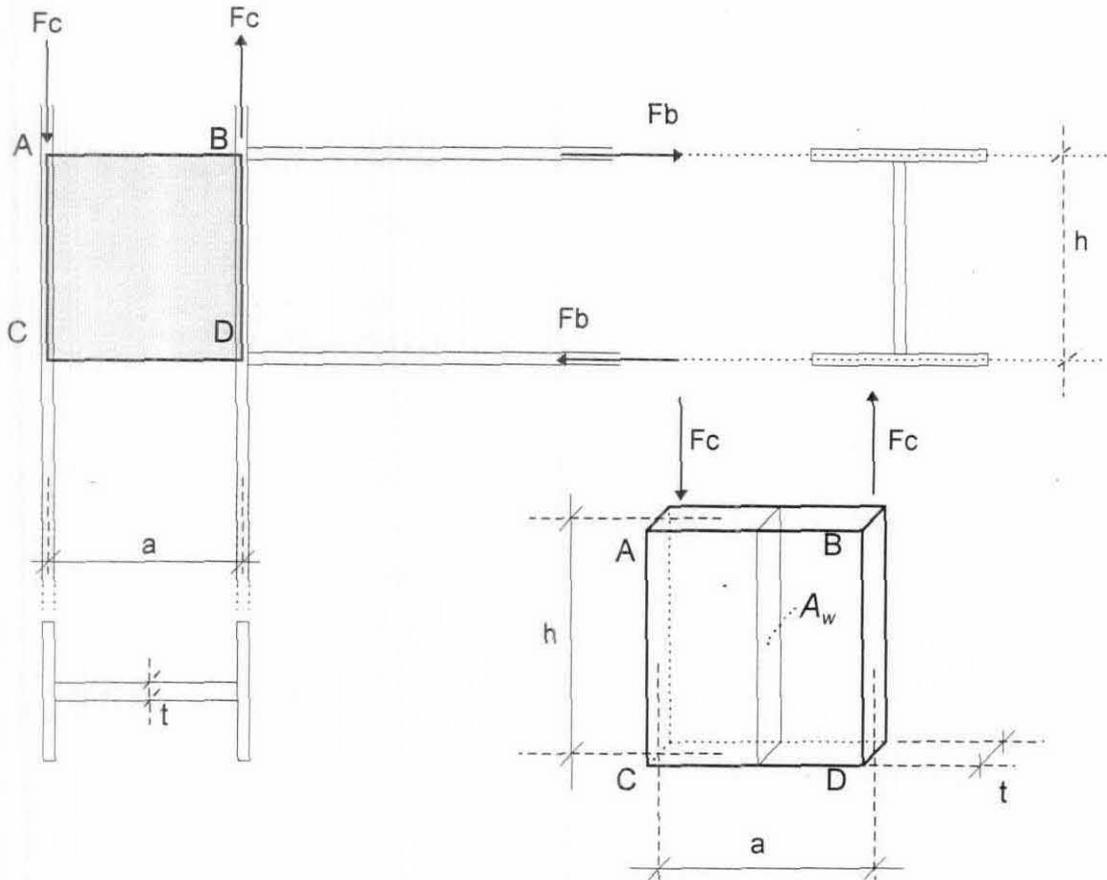


Figura 4.11 - Painel de alma submetido ao cisalhamento.

Da figura 4.11 é possível perceber que a área de cisalhamento do painel A_w pode ser obtida através da expressão 4.30 abaixo:

$$A_w = h \times t \quad (4.30)$$

Pela Norma Canadense, a resistência ao cisalhamento fatorada V_r desenvolvida pela alma de um membro fletido vale:

$$V_r = \phi A_w F_s \quad (4.31)$$

onde F_S é a tensão última de cisalhamento e pode ser obtida de acordo com a tabela 4.1 apresentada abaixo:

Tabela 4.1- Valores de F_S de acordo com a razão (h/w) .

F_S	h/w	F_t
$F_S = 0.66F_y$	$\frac{h}{w} \leq 439 \sqrt{\frac{k_v}{F_y}}$	-
$F_S = F_{cri}$	$439 \sqrt{\frac{k_v}{F_y}} < \frac{h}{w} \leq 502 \sqrt{\frac{k_v}{F_y}}$	-
$F_S = F_{cri} + F_t$	$502 \sqrt{\frac{k_v}{F_y}} < \frac{h}{w} \leq 621 \sqrt{\frac{k_v}{F_y}}$	$F_t = (0.50F_y - 0.866F_{cri}) \left[\frac{1}{\sqrt{1+(a/h)^2}} \right]$
$F_S = F_{cre} + F_t$	$621 \sqrt{\frac{k_v}{F_y}} < \frac{h}{w}$	$F_t = (0.50F_y - 0.866F_{cre}) \left[\frac{1}{\sqrt{1+(a/h)^2}} \right]$

com o coeficiente de flambagem por cisalhamento K_v sendo expresso por:

$$K_v = 4 + \frac{5.34}{(a/h)^2} \rightarrow (a/h) < 1 \quad (4.32)$$

$$K_v = 5.34 + \frac{4}{(a/h)^2} \rightarrow (a/h) \geq 1 \quad (4.33)$$

e com:

F_{CRE} : tensão crítica elástica para flambagem de placas submetidas ao cisalhamento;

F_{CRI} : tensão crítica inelástica para flambagem de placas submetidas ao cisalhamento

obtidas através das expressões:

$$F_{cri} = 290 \frac{\sqrt{F_y k_v}}{(h/w)}, \quad (4.34)$$

$$F_{cre} = \frac{180000 k_v}{(h/w)^2} \quad (4.35)$$

Caso a resistência do painel V_r obtida em 4.31 seja inferior a força F_c , será necessária a utilização de um outro enrijecedor AD em diagonal, conforme ilustra a figura 4.12 abaixo.

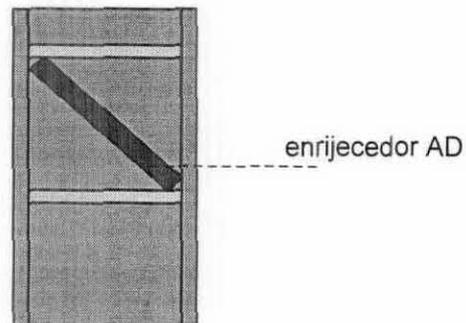


Figura 4.12 - Enrijecedor de painel de alma.

4.1.4 Dimensionamento do Fluxo de Cisalhamento

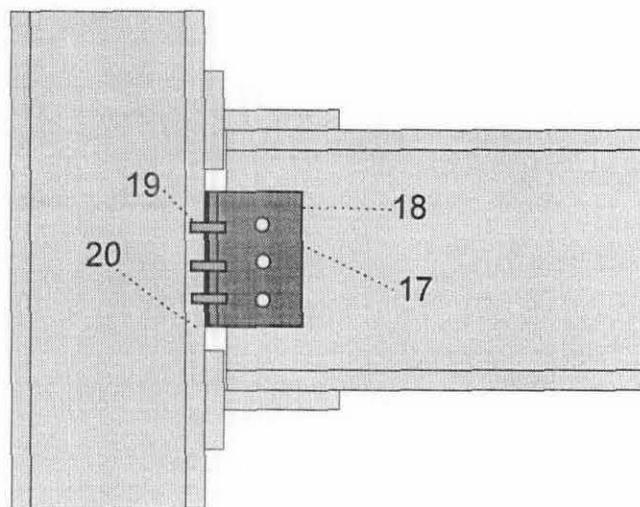


Figura 4.13 - Fluxo de cisalhamento.

O fluxo de cisalhamento é definido pelo próprio cortante que atua na viga e que é transmitido da alma da viga para a coluna. Sendo assim, as seguintes verificações são necessárias:

17. Parafusos Cantoneira/Viga

Os parafusos que unem a cantoneira à alma da viga estão submetidos ao corte. Assim, de acordo com o diâmetro dos parafusos dimensionados no item 2, pode-se calcular a quantidade de parafusos necessários para resistir ao cortante P , através da expressão 4.36, por sua vez obtida da expressão 2.7:

$$n = P / (0.60 \phi m A_n F_u) \quad (4.36)$$

18. Cantoneira

A cantoneira e a alma da viga podem ser esmagados pelos parafusos dimensionados no item 17. Como ambos estão submetidos ao mesmo esforço, basta verificar entre eles, qual contém menor espessura para fazer a verificação já descrita no capítulo 2, nas expressões 2.8 e 2.9.

19. Parafusos Cantoneira/Coluna

Esta verificação na verdade apresenta os mesmos resultados do item 17, já que a carga P é dividida por duas filas de parafusos, mas a resistência de uma fila isoladamente também passa a ser a metade pelo fato desses parafusos terem apenas um plano de corte, enquanto que os parafusos que conectam a alma da viga à cantoneira apresentam dois planos de corte. Em outras palavras, basta utilizar a mesma fila dimensionada no item 17 nas duas filas que unem a coluna a cantoneira.

20. Mesa da Coluna

A única verificação aqui necessária é o esmagamento da mesa da coluna, já que o esmagamento da cantoneira já foi verificada no item 18.

4.2 Ligação Flexível com Cantoneira na Alma da Viga

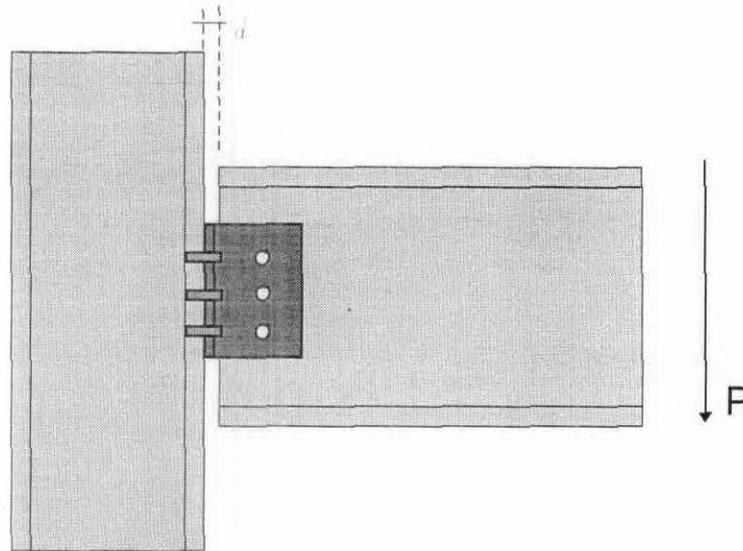


Figura 4.14 - Desenho esquemático da ligação flexível.

O desenho esquemático da figura 4.14 ilustra uma ligação flexível, simétrica em relação ao eixo da alma da viga e que apresenta uma cantoneira aparafusada à viga e à mesa da coluna.

Como se deseja permitir a rotação da viga na sua extremidade de contato com a coluna, não se considera a transmissão de momento fletor. A única *force path* presente nesta ligação, é o fluxo de cisalhamento. Assim, todas as verificações necessárias para este fluxo na ligação rígida, procedem igualmente para esta situação.

Porém para este tipo de ligação, é fundamental certificar-se da capacidade de rotação da viga em relação a coluna, [PATR86]. Para tal, algumas considerações deverão ser feitas como segue:

- garantir uma significativa deformação ao esmagamento antes do colapso, o que pode ser feito com o auxílio da tabela 4.2:

Tabela 4.2 - Espessura máxima de placas em função de sua tensão de escoamento.

tensão de escoamento da placa em MPa	espessura da placa em mm
$F_y = [245, 275]$	0.5d
$F_y = [325, 375]$	0.4d

obs: d representa o diâmetro do parafuso.

- garantir que as distâncias furo-borda não sejam superiores a duas vezes o diâmetro do parafuso;
- certificar-se que a resistência das soldas que ligam a cantoneira ao seu suporte seja superior ao momento que pode ser suportado pelos parafusos. Em outras palavras, esta condição só será atingida usando soldas que tenham uma capacidade mínima de comportar-se ductilmente, o que pode ser garantido com a tabela 4.3 abaixo:

Tabela 4.3 - Comprimento mínimo de solda em função da tensão de escoamento da placa

tensão de escoamento da placa em MPa	comprimento total da solda em mm
$F_y = [245, 275]$	$1.2t$
$F_y = [325, 375]$	$1.4t$

obs: t equivale a espessura da placa.

Como já foi comentado na seção 2.2, adota-se aproximadamente em 20% do momento de engastamento perfeito, o limite para que se considere a ligação com um comportamento flexível. Esta parcela de momento ocorre pela impossibilidade da fila de parafusos representar uma rótula perfeita. Para que tal comportamento pudesse ser obtido, seria necessário que se utilizasse apenas um parafuso na alma da viga, o que seria certamente anti-econômico.

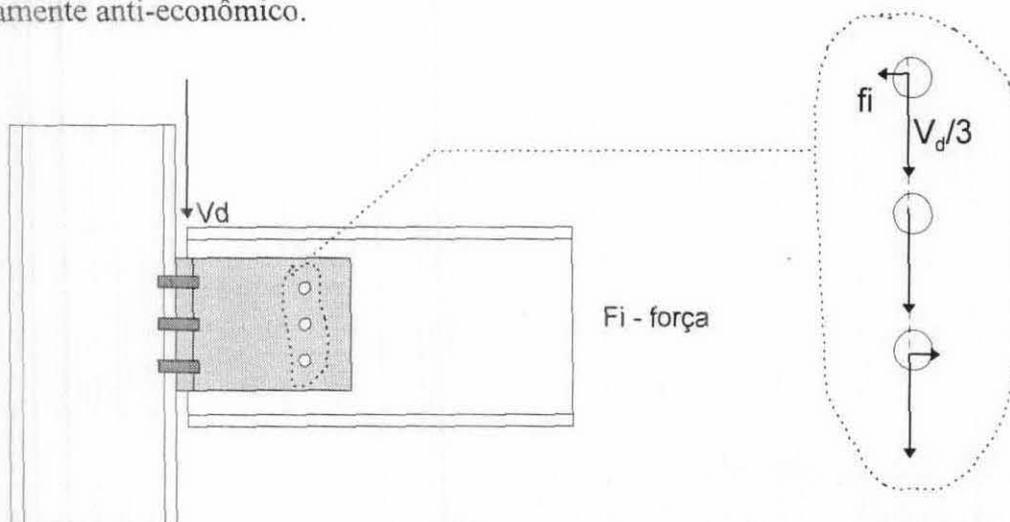


Figura 4.15 - Componentes de força nos parafusos da ligação flexível.

Esta excentricidade em geral pode ser desconsiderada, pois a componente horizontal f_i , figura 4.15, do parafuso mais solicitado é bastante pequena se comparado com a força atuante em cada parafuso devido ao cortante.

Em função da simetria desta ligação, as excentricidades entre as linhas de parafuso que unem a mesa da coluna a cantoneira podem ser desprezadas.

Ensaio em laboratórios e posteriormente a própria utilização desta ligação comprovam ser esta ductil o suficiente para acomodar um possível mal alinhamento entre os componentes da ligação e também assegurar a capacidade de rotação.

Tomadas estas precauções, o procedimento para o dimensionamento desta ligação pode ser efetuado de forma análoga ao procedimento descrito para o fluxo de cisalhamento da ligação rígida T.

Este capítulo é destinado a descrição do modelo computacional proposto para o dimensionamento e detalhamento de ligações viga-coluna em estruturas de aço. Antes porém, serão citadas as ferramentas utilizadas e como elas permitiram o desenvolvimento do sistema computacional implementado, denominado **Steel-C** (*Steel Connections*).

5.1 Ferramentas Utilizadas

5.1.1 Linguagem de Programação Lua

Lua, [IERU96] [FIGU94], é uma linguagem de extensão projetada para ser usada como linguagem de configuração, acoplada a um programa hospedeiro escrito na linguagem de programação C. Aplicações em geral podem acoplar códigos em Lua, permitindo prototipagem rápida e acesso programável pelo usuário à tecnologia implementada pela aplicação.

Lua é implementada como uma biblioteca, escrita em C, podendo ser acoplada a diferentes aplicações. Em Lua, não existe o conceito de programa principal: a linguagem depende de um programa hospedeiro, que pode chamar funções de Lua para serem executadas, ler e atribuir variáveis de Lua, e ainda registrar novas funções de C para serem chamadas de Lua.

Lua provê as construções fundamentais para definição de funções e controle de fluxo, além de um poderoso mecanismo para descrição de objetos. Além destes, outros importantes recursos são oferecidos pela linguagem, tais como o paradigma da programação orientada a objetos e mecanismos de *fallbacks*, que permitem implementar mecanismos de herança entre objetos. Por ser uma linguagem interpretada, proporciona facilidade e rapidez na configuração das aplicações. Maiores detalhes da linguagem Lua podem ser encontrados em [CELE95][†].

5.1.2 O *Toolkit* EDG

O *toolkit* EDG [CELE95]² é uma ferramenta para desenvolvimento de aplicações e para captura de dados, permitindo a associação e manipulação de desenhos. O sistema EDG é composto basicamente por dois conjuntos de objetos: objetos de interface e objetos gráficos. Os objetos de interface (listas, entrada de textos, menus, botões, etc.) implementam abstrações sobre os objetos do sistema de interface com o usuário IUP [LEVY93]. Através de uma sintaxe simples, o sistema permite a criação de diálogos com alto grau de interatividade a partir da composição de objetos simples.

O sistema provê ainda recursos para a instanciação e manipulação de representações gráficas. Com isso, é possível a construção de desenhos através de primitivas gráficas, tais como linha, elipse e texto. Estas primitivas podem ser instanciadas diretamente a partir de uma linguagem descritiva dos objetos e seus atributos (coordenadas, cor, estilo, etc.) ou através do uso do programa desenhador TeCDraw [TeCGraf94]. É possível construir desenhos no TeCDraw, identificar entidades e manipulá-las dentro da programação com EDG.

A manipulação de representações gráficas cria recursos para associação de desenhos às capturas de dados. Este mecanismo atende especificamente para o Steel-C, onde os desenhos esquemáticos das ligações implementadas funcionam como um conjunto de objetos gráficos ativos que disparam diálogos para a captura dos dados referentes à ligação que o usuário deseja dimensionar. Assim representações gráficas, como por exemplo perfis, cantoneiras e vetores de carga, instanciadas do desenhador TeCDraw ou manipuladas dentro do próprio sistema EDG, coletam as informações necessárias para o processamento e posterior visualização das ligações.

5.1.3 Editor Gráfico TeCDraw

O TeCDraw é um editor gráfico vetorial de desenhos que funciona como editor de telas de programas que se utilizam de esquemas gráficos para pré-processamento, análise e pós-processamento. Estes esquemas gráficos são na realidade *metafiles* compostos por objetos gráficos que possuem determinados agrupamentos que indicam chamadas de funções

para captura de dados. O arquivo gerado pelo TeCDraw (*metafile gráfico*) contém a imagem descrita em Linguagem Lua.

O TeCDraw usa como sistema gráfico o GKS-PUC[TeCGraf89], o que permite a sua portabilidade nas mais diversas plataformas, como DOS, Windows e UNIX/X-Window. Maiores informações sobre o editor TeCDraw podem ser encontradas em [TeCGraf94].

5.2 Implementação Computacional

5.2.1 Arquitetura

De uma forma geral, o sistema é constituído por três fases distintas que se relacionam e interagem com o usuário: o módulo de definição dos dados a serem processados, o de processamento dos dados coletados e finalmente o de visualização dos resultados.

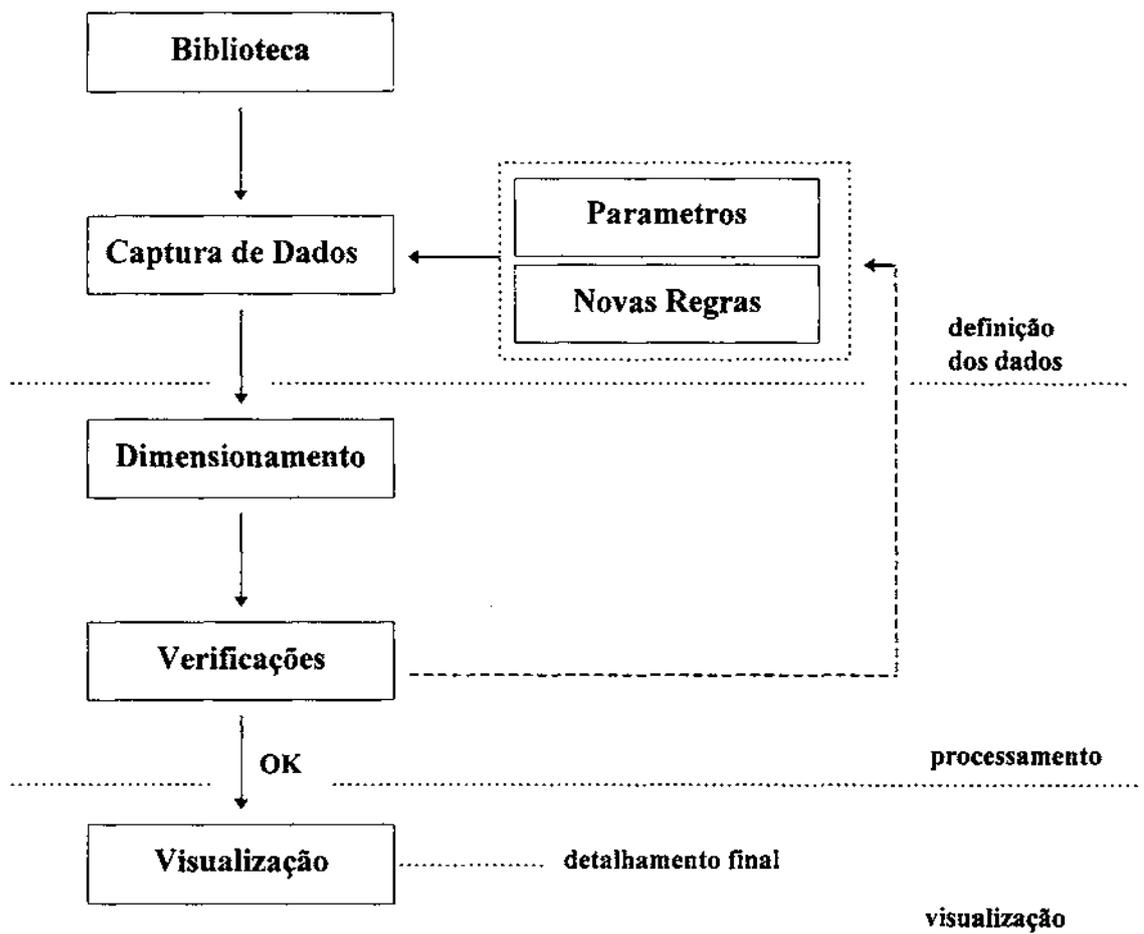


Figura 5.1 - Arquitetura básica do sistema.

5.2.2 Definição dos Dados

A descrição da definição dos dados de entrada se confunde com a própria descrição da interface gráfica do Steel-C. A manipulação das informações que determinam o dimensionamento das ligações pode ser subdividida em dois módulos: a captura dos parâmetros e a reconfiguração do sistema através da inserção de novas regras.

5.2.2.1 Parâmetros

Ao ser executado, o programa inicialmente armazena na memória do computador as bibliotecas de perfis soldados (VS, CS, CVS), bem como cantoneiras parafusos e tipos de aço [GATT85] [ANDR85].

Afigura 5.2 ilustra o dialogo principal do programa. O tipo de ligação que se deseja dimensionar pode então ser escolhida através dos botões localizados a direita da área de desenho, o canvas.

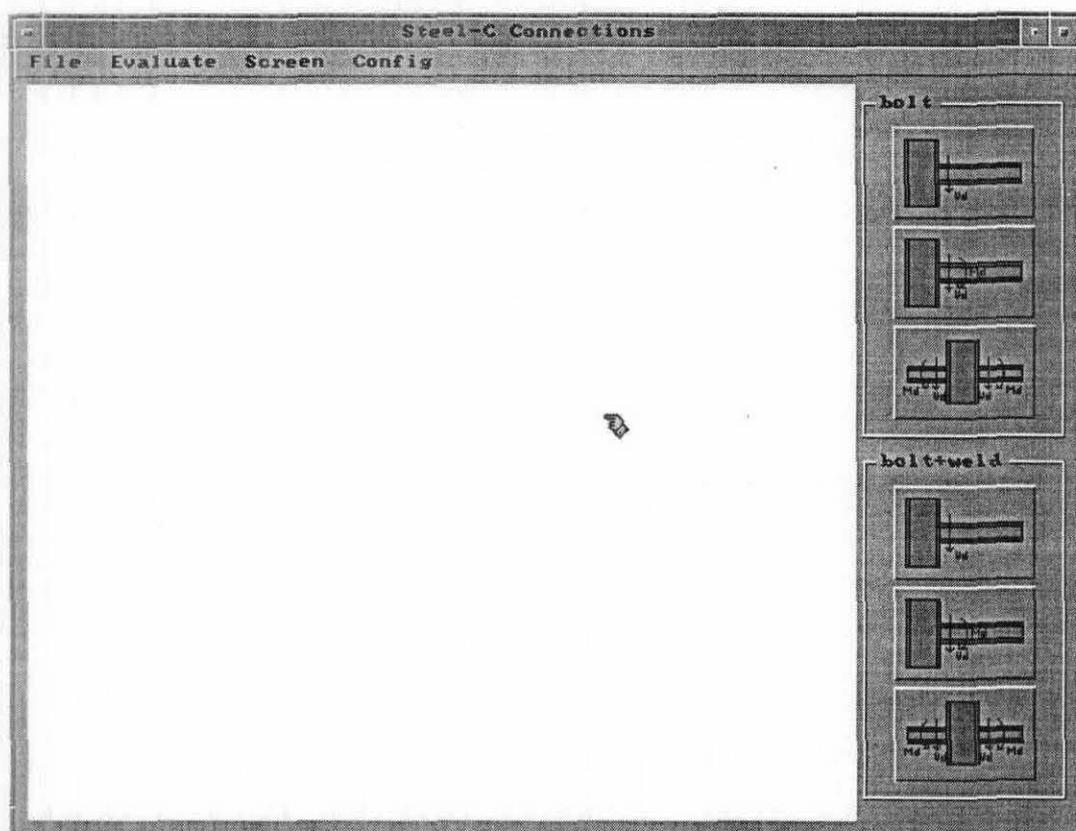


Figura 5.2 - Dialogo principal do programa Steel-C.

Ao ser acionado um tipo de ligação, é desenhado no canvas a sua representação gráfica. Na realidade são instanciados, pelo *toolkit* EDG, os objetos gráficos ativos construídos no editor TeCDraw, conforme ilustra a figura 5.3. Estas entidades gráficas por sua vez ao serem acionadas, disparam os diálogos contendo os objetos de interface EDG, responsáveis pela captura dos dados definidos pelo usuário. Assim, por exemplo, a coluna da ligação rígida visualizada na figura 5.3 é uma representação gráfica que, quando ativada, dispara um diálogo onde o usuário escolhe o perfil da ligação viga-coluna. Todos os dados indispensáveis para se projetar a ligação são capturados desta forma. O programa informa ainda as opções de montagem das ligações determinadas pelo usuário, tais como perfis, esforços e parafusos, e ainda verifica a consistência destes dados antes de efetivamente processá-los.

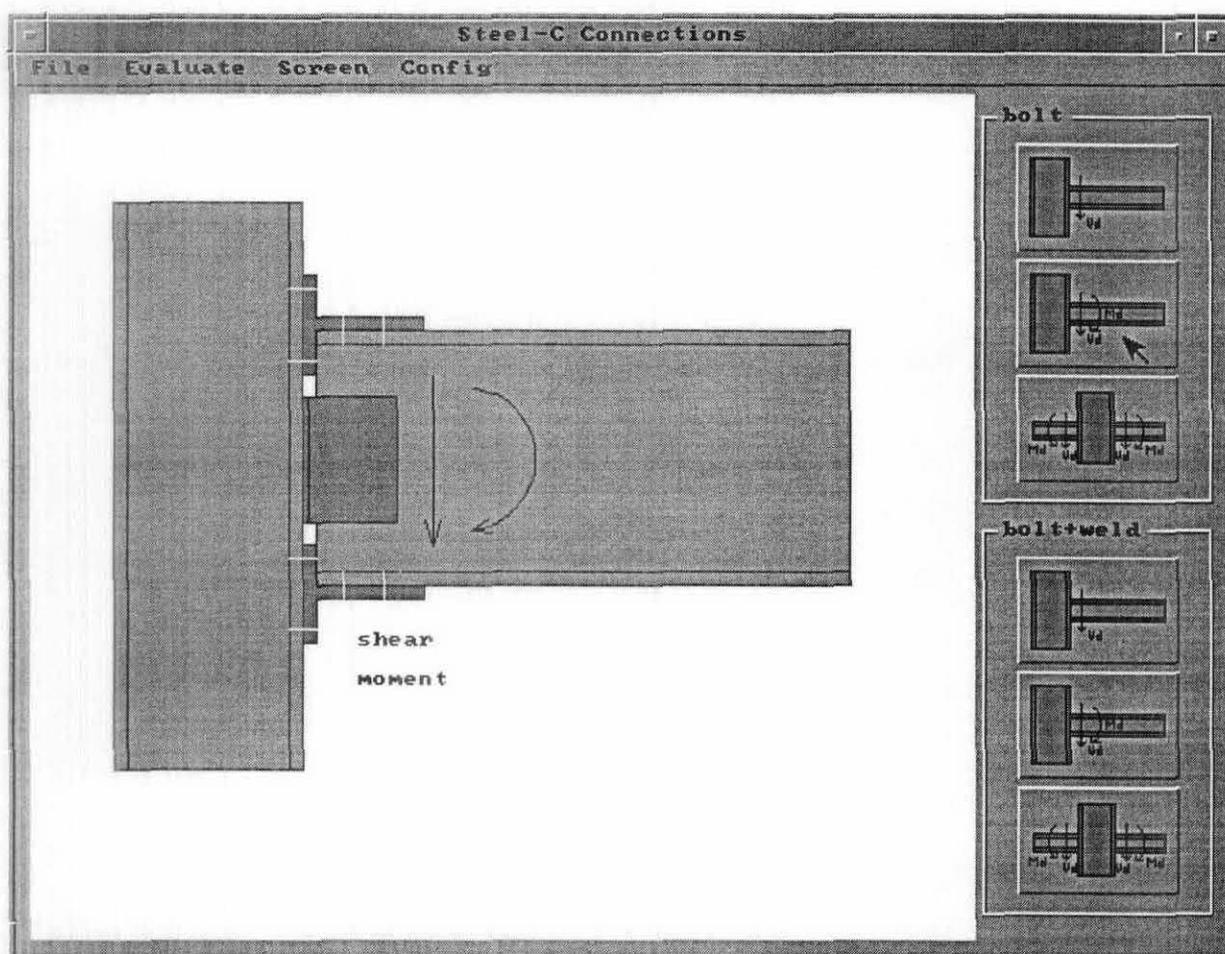


Figura 5.3 - Exemplo de objetos gráficos para captura de dados.

5.2.2.2 Dialogos de Configuração

A forma de se inserir novas regras no programa é similar a escolha de perfis e esforços de projeto ilustrada no item anterior. O item *Config* no menu instancia novamente representações gráficas que por sua vez disparam diálogos. Presente nestes diálogos está o objeto de interface *multiline*, responsável pela captura dos códigos em Lua para a inserção de novas funções.

O *multiline* é um objeto de interface para captura de texto em várias linhas. A este objeto pode-se associar a sua área visível e um valor inicial que, neste contexto, sempre será o código corrente que implementa a regra que o usuário deseja alterar. Este objeto sempre tem associado *scrollbars* que permitem visualizar os textos fora da área inicialmente visível. As figuras 5.4, 5.5 e 5.6 ilustram como funciona a interface gráfica para a configuração dos espaçamentos e da resistência dos parafusos e o diálogo de configuração para espaçamentos.

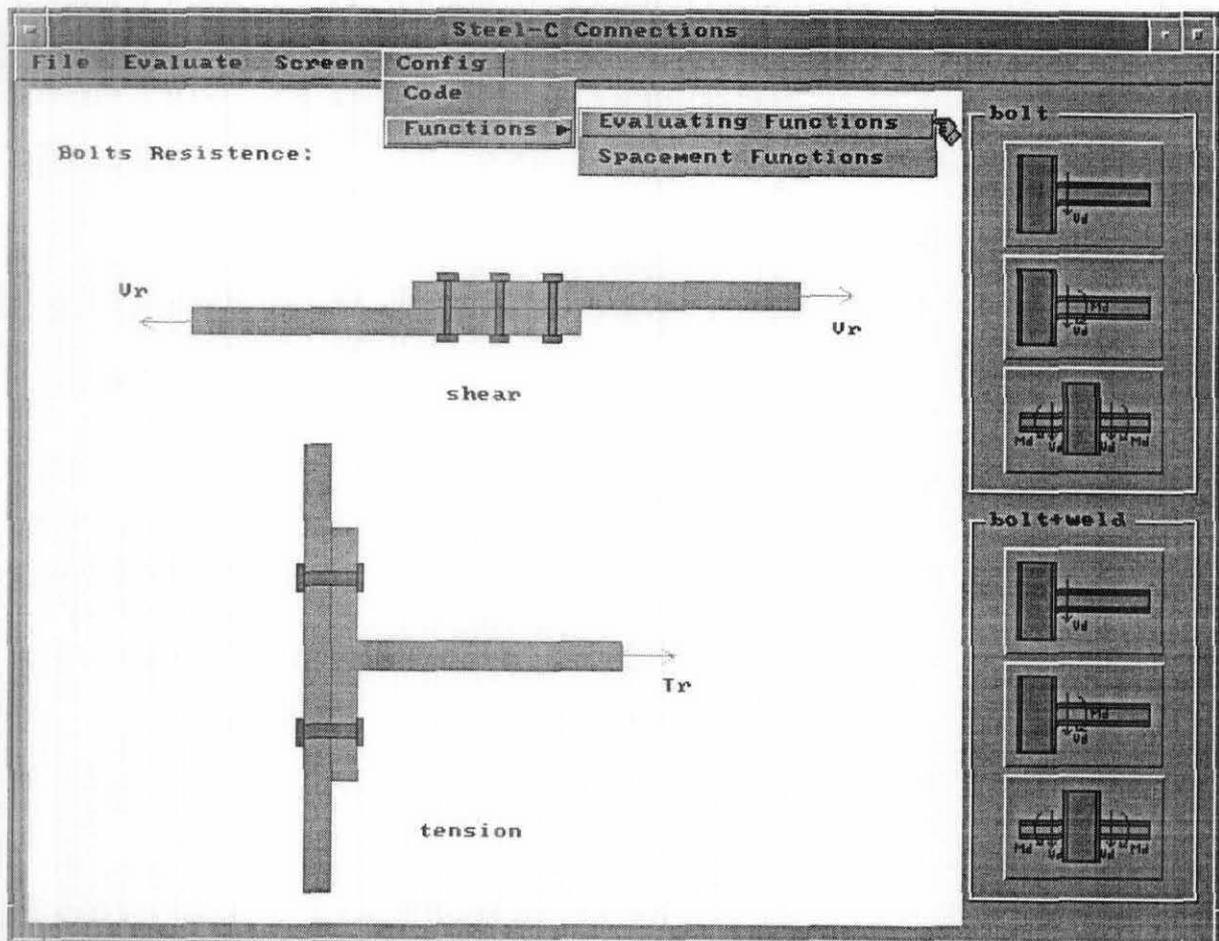


Figura 5.4 -Objetos gráficos para a configuração da resistência de parafusos.

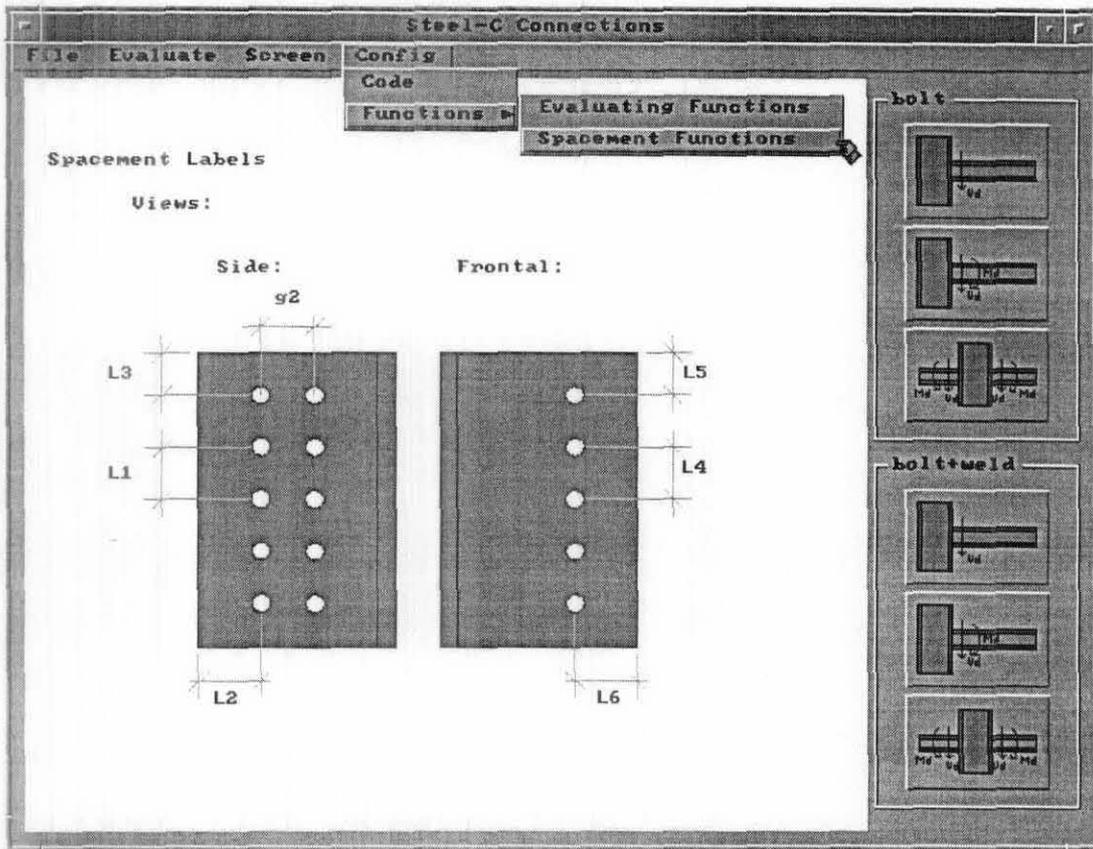


Figura 5.5 - Objetos gráficos para a configuração dos espaçamentos.

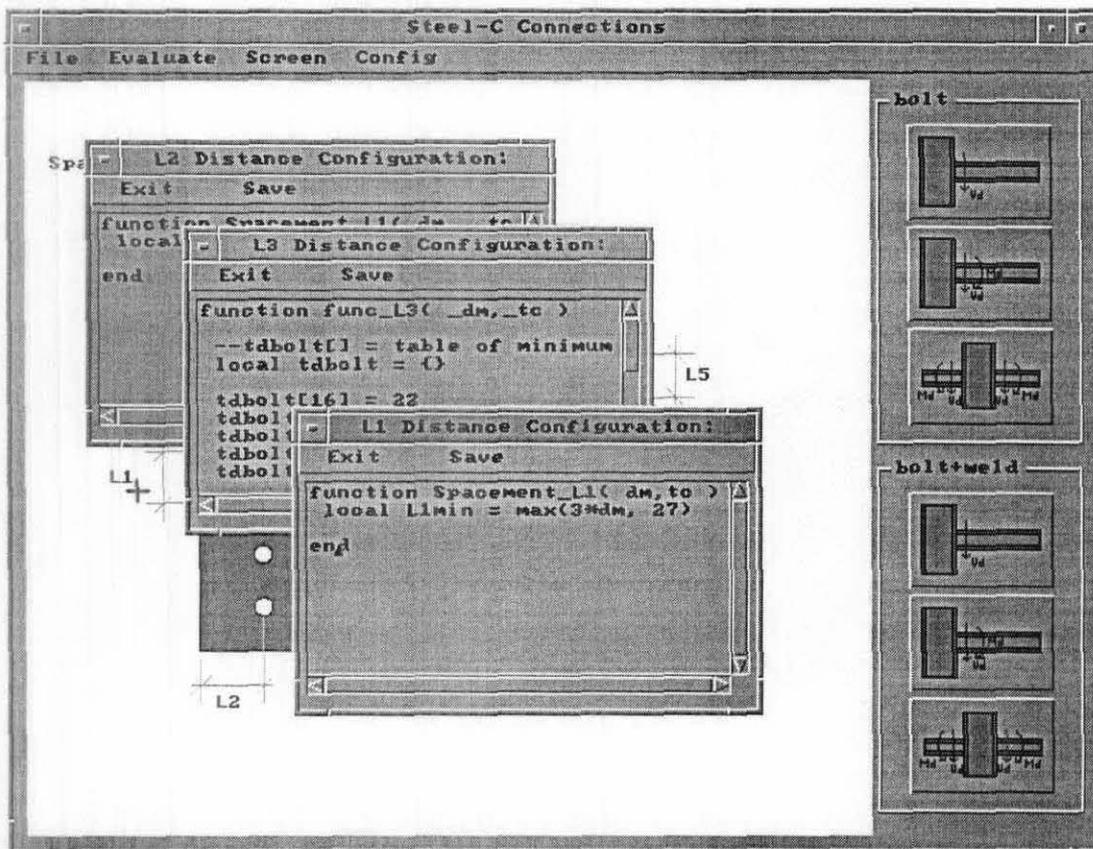


Figura 5.6 - Dialogos de configuração para espaçamentos.

5.2.3 Processamento

O módulo de processamento pode ser na realidade subdividido em dois: o módulo de dimensionamento e o módulo de verificação.

A estratégia adotada para o dimensionamento foi basicamente calcular o diâmetro mínimo de parafuso necessário para que a ligação resistisse aos esforços de projeto e a partir de então dimensionar as espessuras mínimas tabeladas para os perfis. Só se utiliza um diâmetro de parafuso em uma ligação, objetivando-se com isso a sua padronização.

No caso específico da ligação rígida, inicialmente calculou-se o diâmetro necessário para que os parafusos que unem o “T” a coluna resistissem a tração. Para tal, sempre foi adotado um valor inicial de espessura da mesa do “T”, para que se pudesse levar em consideração o efeito alavanca. Uma vez obtido este diâmetro, são dimensionados os perfis (cantoneira e “T”), sempre de acordo com as suas espessuras mínimas necessárias para que não haja esmagamento ou força de alavanca superior a 25% do valor da carga atuante nos parafusos tracionados.

O processo é repetido, incrementando-se as dimensões dos perfis até que o resultado seja satisfatório ou até que se percorra totalmente os elementos das tabelas contendo as bibliotecas de perfis e parafusos do programa.

Uma vez obtidos os valores tabelados, o programa passa automaticamente para o módulo de verificação. Há claramente duas classes distintas de verificações envolvidas neste módulo: as verificações que dizem respeito a resistência localizada nos membros componentes da ligação e as verificações de ordem geométrica.

As primeiras seguem os procedimentos descritos detalhadamente na seção 3.4, enquanto que as verificações de caráter geométrico cuidam do arranjo físico da ligação, ou seja, visam por exemplo, acomodar as dimensões dos perfis T e do corte da cantoneira, para que estas tenham espaço suficiente na alma da viga sem prejudicar a montagem da ligação. O processo acima descrito pode ser melhor compreendido na figura 5.7.

Caso alguma das verificações não seja satisfeita, o programa informa qual o motivo da não validade da ligação, retornando a seguir para o diálogo principal do programa, onde o usuário novamente pode alterar as informações para um novo processamento, desta feita com outras regras ou novos parâmetros, conforme ilustrou a figura 5.1.

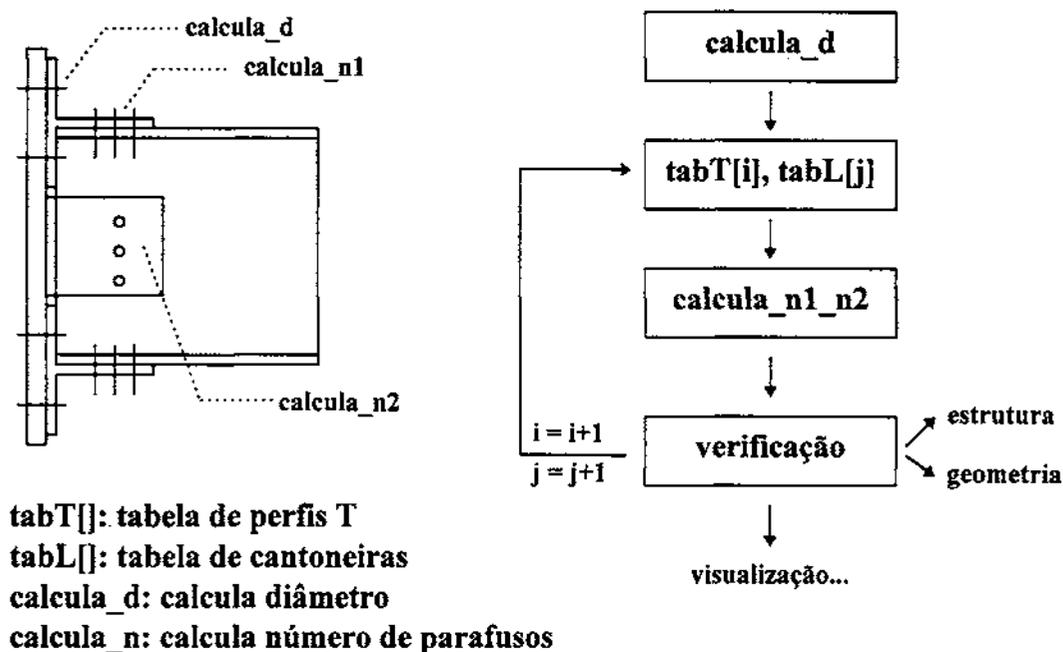


Figura 5.7 - Arquitetura básica do processamento.

Alternativamente, existe a opção dentro do programa de verificação direta da ligação. Neste caso, o usuário escolhe todos os elementos da ligação e o programa calcula a quantidade de parafusos, fazendo em seguida as verificações necessárias.

5.2.4 Saída Gráfica

A maior potencialidade do sistema EDG é a de permitir a associação de representações gráficas, tratando-as como objetos ativos de interação. Existem vários objetos gráficos que podem ser instanciados e manipulados, tais como o *canvas*, e primitivas como por exemplo o *objeto line*, que representa uma poligonal.

Uma vez validada a ligação determinada pelo usuário, todas as informações importantes para a visualização do detalhamento são armazenadas em tabelas e variáveis globais. Estas na verdade funcionam como parâmetros para a instanciação dos objetos gráficos EDG no *canvas*. Com isso a visualização final do esquema (*lay-out*) da ligação é fornecida pelo programa em escala, facilitando a visualização final.

5.3 Implementação da configuração

A configuração do sistema em tempo de execução pode ser realizada em função dos recursos oferecidos pela linguagem de extensão Lua, descrita na seção 4.1. Para uma melhor compreensão dos códigos que serão mostrados a seguir, faz-se necessária a apresentação de alguns recursos da linguagem.

- DEFINIÇÃO E EXECUÇÃO DE MÉTODOS: A linguagem Lua suporta o paradigma de programação orientada a objetos. Está presente em Lua a possibilidade de se definir métodos associados a um determinado objeto. Conceitualmente, objeto pode ser definido como uma instância de uma determinada classe. Especificamente para a linguagem Lua, um objeto é uma tabela. Um método associado a um objeto pode ser definido como uma função que manipula os dados deste objeto. Portanto a diferença entre método e outras funções é que o próprio objeto é passado implicitamente como o primeiro parâmetro de seus próprios métodos. No corpo da função, o objeto é acessado, em Lua, através do parâmetro *self*.
- FUNÇÃO *dostring*: É uma função pré-definida de Lua que recebe como parâmetro uma variável que armazena um tipo *string*, compila e executa seu conteúdo como um módulo da linguagem Lua.
- FUNÇÃO *getglobal*: É uma função pré-definida de Lua que retorna o valor armazenado na variável global que lhe é atribuída como parâmetro.

Para que seja possível configurar o sistema, é necessário capturar, armazenar e executar as funções implementadas pelo usuário. O primeiro passo já foi ilustrado na seção 5.2.2.2, quando foram apresentados os diálogos contendo o objeto de interface *multiline*.

O armazenamento destas funções pode ser efetuado atribuindo-se a objetos genéricos os nomes e códigos de funções definidas pelo usuário. Antes porém é necessário compilar este código Lua, o que é realizado através da função *dostring* apresentada acima.

Uma vez armazenado e compilado o código Lua, é suficiente acessar os objetos que passam a conter estas funções. Estes podem ser representados pela figura 5.8, onde vê-se o

objeto *predlist* que contém os nomes das funções e que servem para indexar o objeto *preddeflist*, que armazena efetivamente os códigos Lua compilados

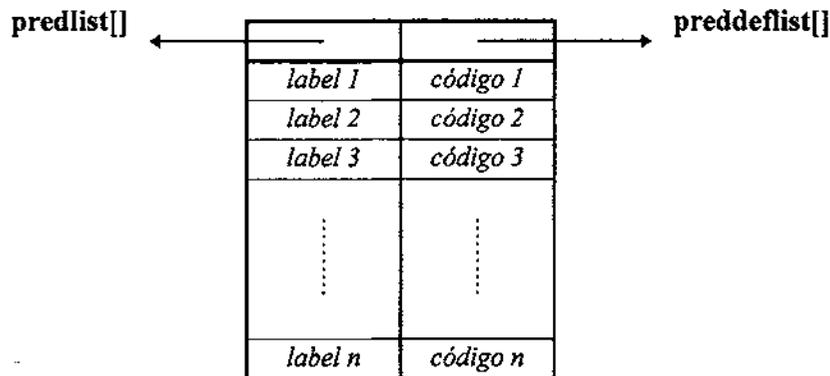


Figura 5.8 - Representação de objetos implementados.

A seguir são apresentados alguns trechos de códigos utilizados para a implementação das idéias desenvolvidas acima, utilizando os recursos de Lua apresentados:

```
--
-- Trechos de Código que Implementam a Configuração.
--
-----
LIST = { cont = 0 }                -- define um objeto genérico

-- Métodos Associados a Este Objeto Genérico:

----- new -----

function LIST:new()                -- cria um novo objeto

    local a = { parent = self }
    return a
end

----- delete -----

function LIST:delete()             -- deleta um objeto

    self = nil
    return 1
end
```

```

function LIST:addtable( index, newtable )           -- cria um campo novo no objeto

if not self[index] then
  self.cont = self.cont + 1
  self[index] = newtable
end
end

```

-- Manipulação dos Métodos Definidos Acima:

```

if not predlist then predlist = LIST:new() end      -- cria os objetos da figura 5.8
if not preddeflist then preddeflist = LIST:new() end

```

```

function add_function( label, def )                -- adiciona o nome de uma
                                                    -- função em um campo de
                                                    -- um objeto e o código em
                                                    -- Lua desta função em um
                                                    -- outro objeto

dostring( def )

predlist[label] = getglobal( label )
preddeflist[label] = def
end

```

```

function get_function( label )                    -- recebe o nome de uma
                                                    -- função e retorna o seu
                                                    -- corpo codificado em Lua

return preddeflist[label]

end

```

```

function do_function( label, vi, vj, vn, vm, vp ) -- recebe o nome da função
                                                    -- e respectivos argumentos
                                                    -- e executa esta função

return predlist[label]( vi, vj, vn, vm, vp )

end

```

A seguir, no capítulo 6, são apresentados alguns exemplos mostrando os recursos do sistema Steel-C baseado no que foi descrito nos capítulos anteriores desta dissertação.

Neste capítulo serão apresentados exemplos de uso do programa Steel-C para demonstrar suas principais características, procedimentos e a visualização final de algumas ligações.

Inicialmente será projetada uma ligação flexível, ilustrando alguns dos recursos disponíveis para o seu dimensionamento, incluindo um exemplo de configuração do sistema. A seguir, será apresentado um dimensionamento da ligação rígida discutida na seção 4.1. Para este exemplo, as cantoneiras, os perfis T e os parafusos são dimensionados pelo sistema.

6.1 Ligação Flexível

Ao pressionar o botão referente a ligação flexível, são instanciadas no canvas as representações gráficas responsáveis pela captura dos dados referentes a este tipo de ligação, conforme ilustra a figura 6.1.

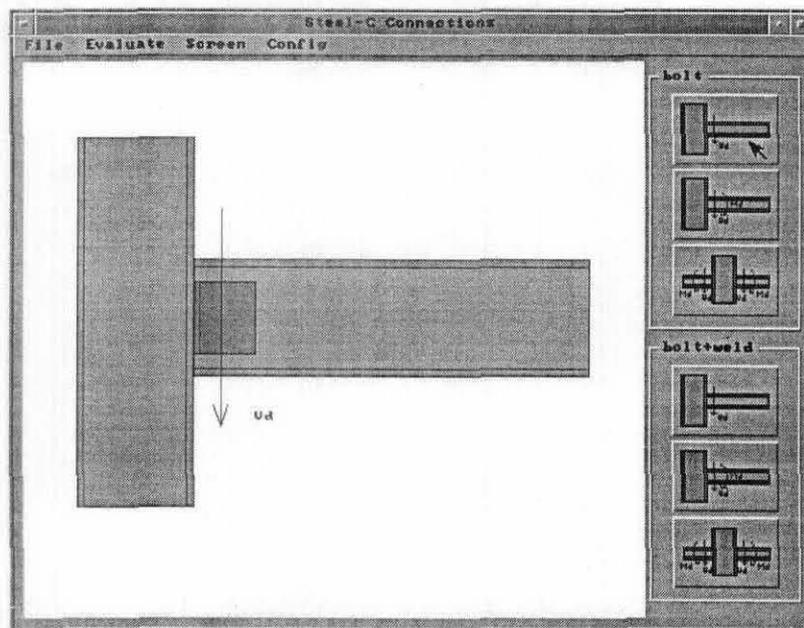


Figura 6.1 - Objetos gráficos para a captura de dados da ligação flexível.

Com isso, os dados que determinam a ligação a ser verificada já podem ser introduzidos e são apresentados abaixo:

viga	:	VS450x80.0	(perfil soldado)
coluna	:	CS600x402	(perfil soldado)
cantoneira	:	LS150x150x16	(perfil soldado)
parafuso	:	M16	(aço ASTM A325)
cortante	:	Vd = 500KN	(na extremidade da viga)

A figura 6.2 ilustra o diálogo que define as opções de perfil para a cantoneira e o arranjo dos parafusos na alma da viga, no caso opção de uma fila de parafuso.

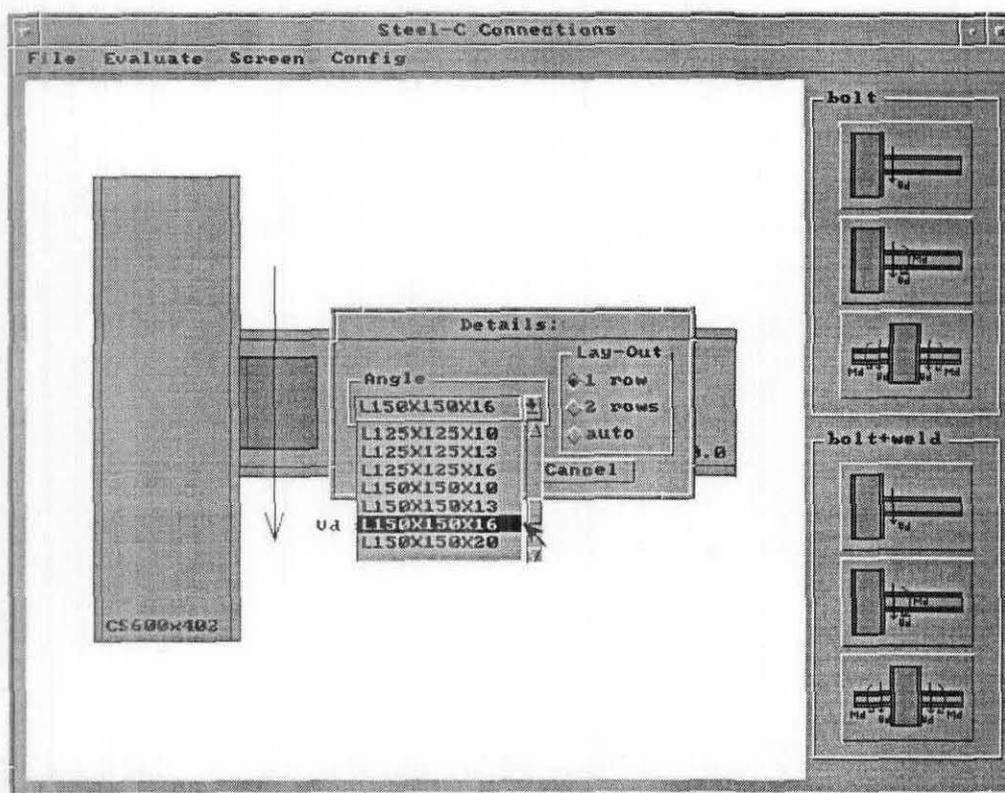


Figura 6.2 - Escolha da cantoneira e o arranjo dos parafusos na alma da viga.

Uma vez definidas todas as seções de perfis que compõem a ligação, o usuário pode optar por definir o diâmetro dos parafusos ou o número de parafusos na alma da

viga. A figura 6.3 ilustra o canvas contendo as informações referentes aos dados determinados anteriormente bem como as opções de cálculo no *menu*.

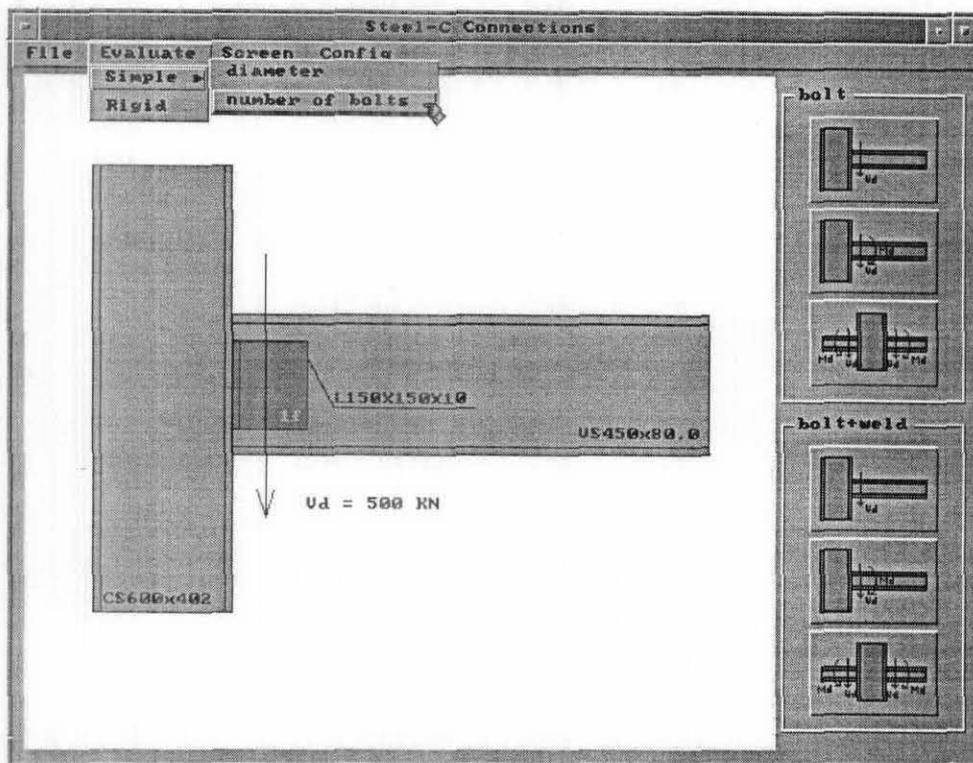


Figura 6.3 - Opções de cálculo para a ligação flexível.

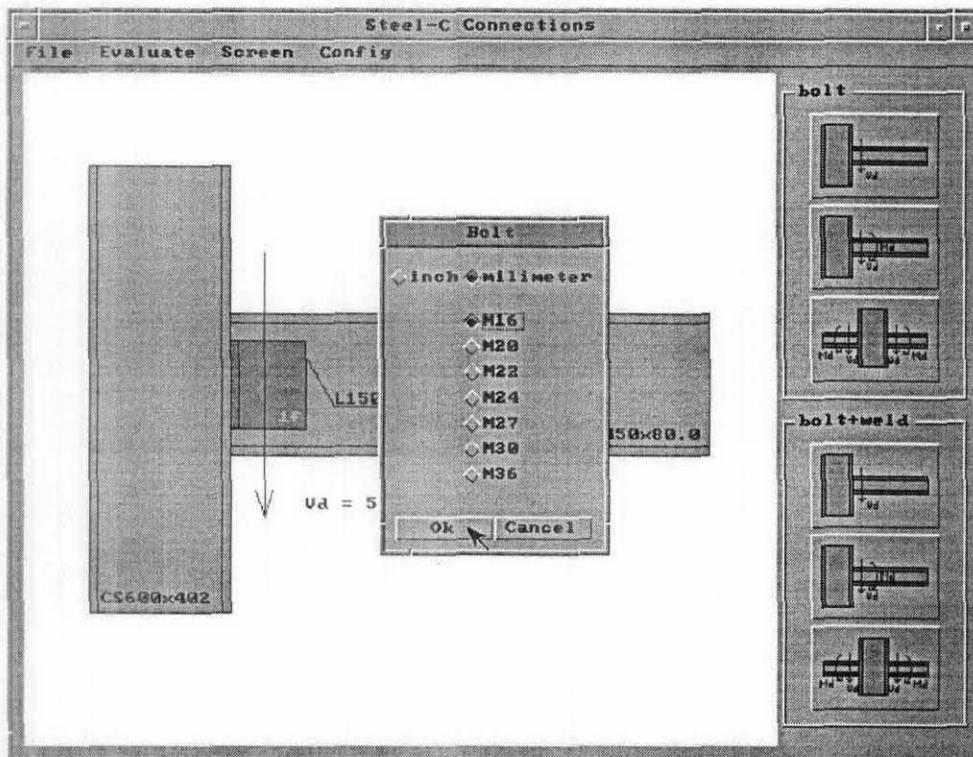


Figura 6.4 - Diálogo com, os possíveis diâmetros dos parafusos.

Ao optar pelo cálculo do número de parafusos, surge na tela o diálogo com as opções de diâmetros de parafusos presentes na biblioteca do programa. Estes diâmetros estão disponíveis no diálogo em milímetro ou polegada, conforme ilustra a figura 6.4 acima.

Uma vez definidos todos os dados, o programa passa a executar o módulo de dimensionamento e detalhamento da ligação. Para os dados definidos acima constata-se ser impossível projetar esta ligação já que é necessária uma fila de 8 parafusos M16 ligando a alma da viga à cantoneira, para que a ligação resista a um cortante de 500 KN. Esta fila, com os espaçamentos padrões mínimos descritos pela norma Canadense na seção 2.4, apresenta um comprimento superior à altura da própria viga, tornando-a inviável. Esta verificação geométrica é feita pelo Steel-C e pode ser ilustrada na figura 6.5 abaixo.

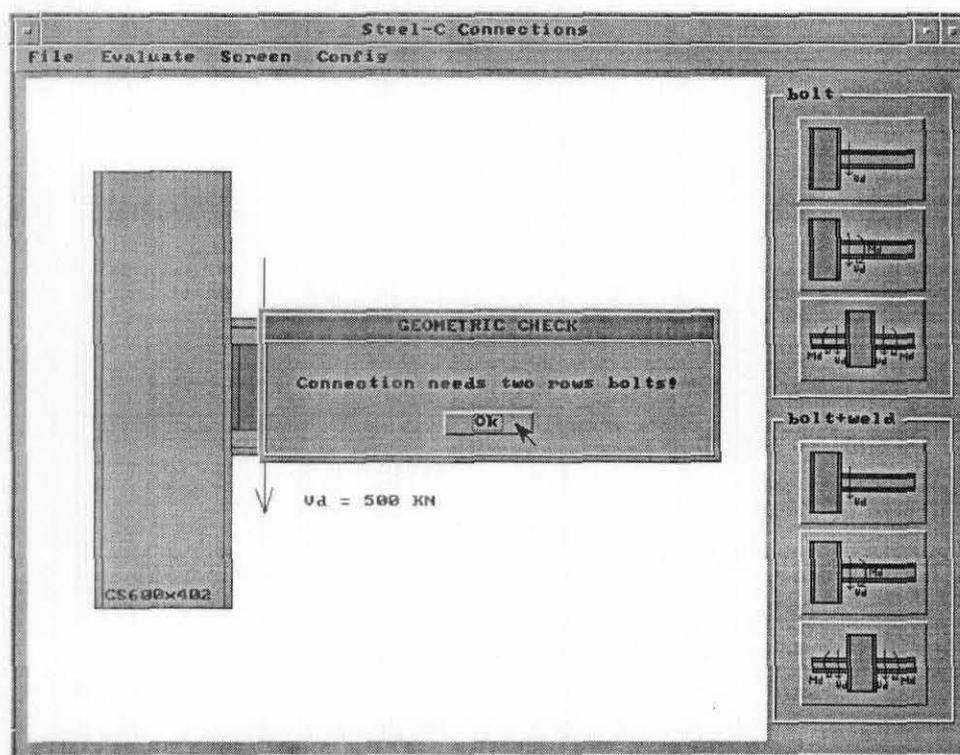


Figura 6.5 - Exemplo de verificação geométrica realizada pelo programa.

A sugestão apresentada pelo programa é então adotada e com isso voltamos ao diálogo da figura 6.2, para desta feita alterarmos o arranjo dos parafusos, dispostos na alma da viga, para duas filas, figura 6.6.

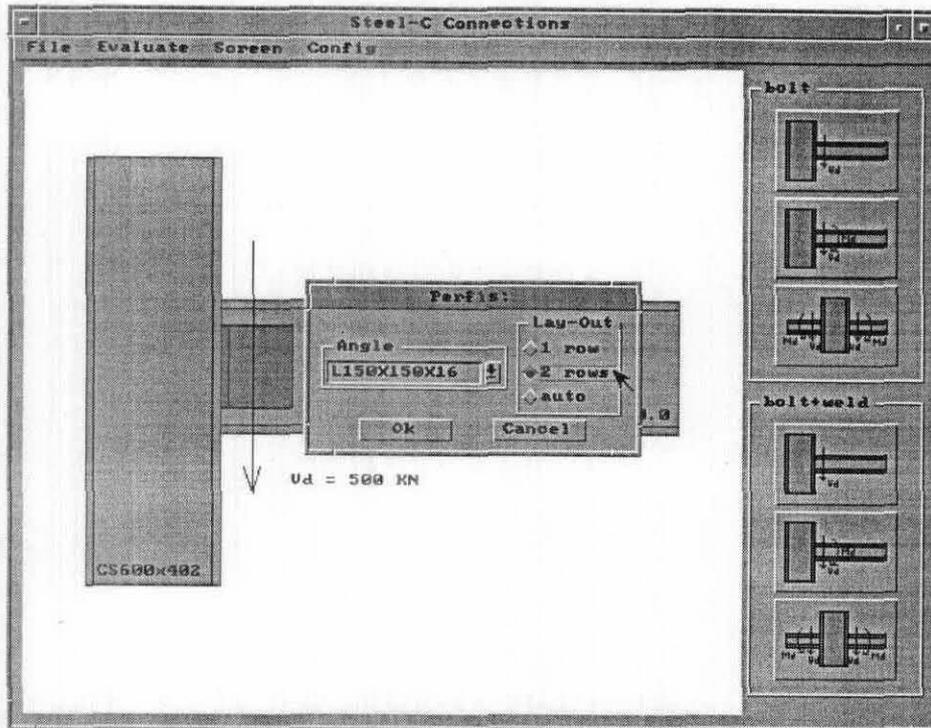


Figura 6.6 - Disposição dos parafusos: duas filas na alma da viga.

Com isso a ligação é novamente processada e desta feita é possível obter-se um resultado satisfatório para estes dados, conforme ilustra a figura 6.7 abaixo.

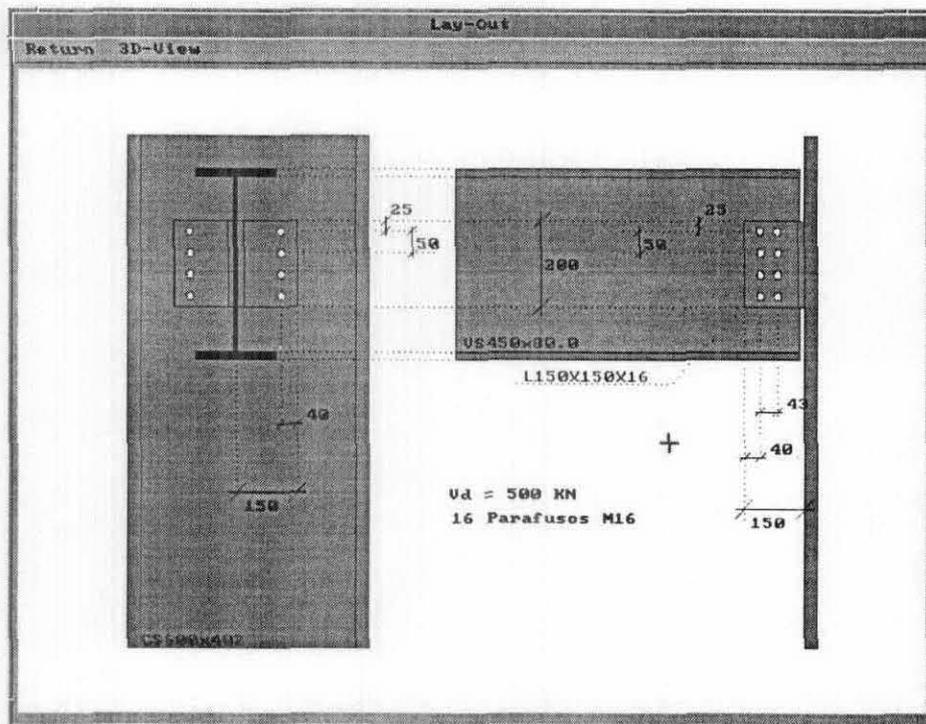


Figura 6.7 - Disposição final da ligação flexível.

Na figura 6.7 pode-se perceber todos os espaçamentos dos furos dos parafusos que obedecem as regras de espaçamentos mínimos apresentadas na seção 2.4. O número total de parafusos ligando a alma da viga a cantoneira é de 8, dispostos em duas filas de 4 parafusos, conforme foi determinado no diálogo da figura 6.6.

Para ilustrar um exemplo de configuração de novas regras de cálculo é apresentada a seqüência de figuras 6.8 a 6.11. A figura 6.8 apresenta o *canvas* com os objetos gráficos ativos para a configuração da resistência dos parafusos. Os símbolos V_r e T_r , representam respectivamente a resistência de parafusos ao corte e a tração. Ao acionar o *objeto text Vr*, é instanciado no *canvas* o diálogo da figura 6.9, que apresenta inicialmente o código corrente que dimensionou a ligação para que seus parafusos resistissem ao corte e cujo detalhamento final pode ser visto na figura 6.7. A figura 6.10 ilustra a edição do código desta função, quando é alterado o coeficiente de minoração da resistência ao corte. O valor de ϕ_b (variável f_i no código Lua), que era inicialmente de 0.67, de acordo com a norma Canadense é modificado para 0.80. Finalmente a figura 6.11 determina o detalhamento da ligação para esta configuração.

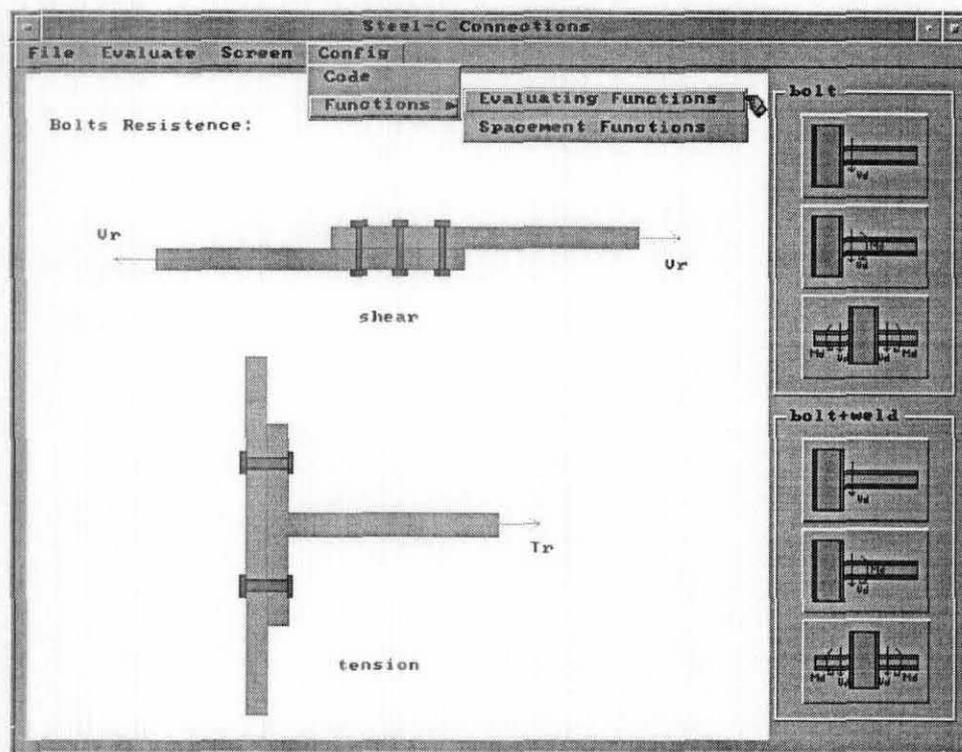


Figura 6.8 - Objetos gráficos para a configuração da resistência dos parafusos.

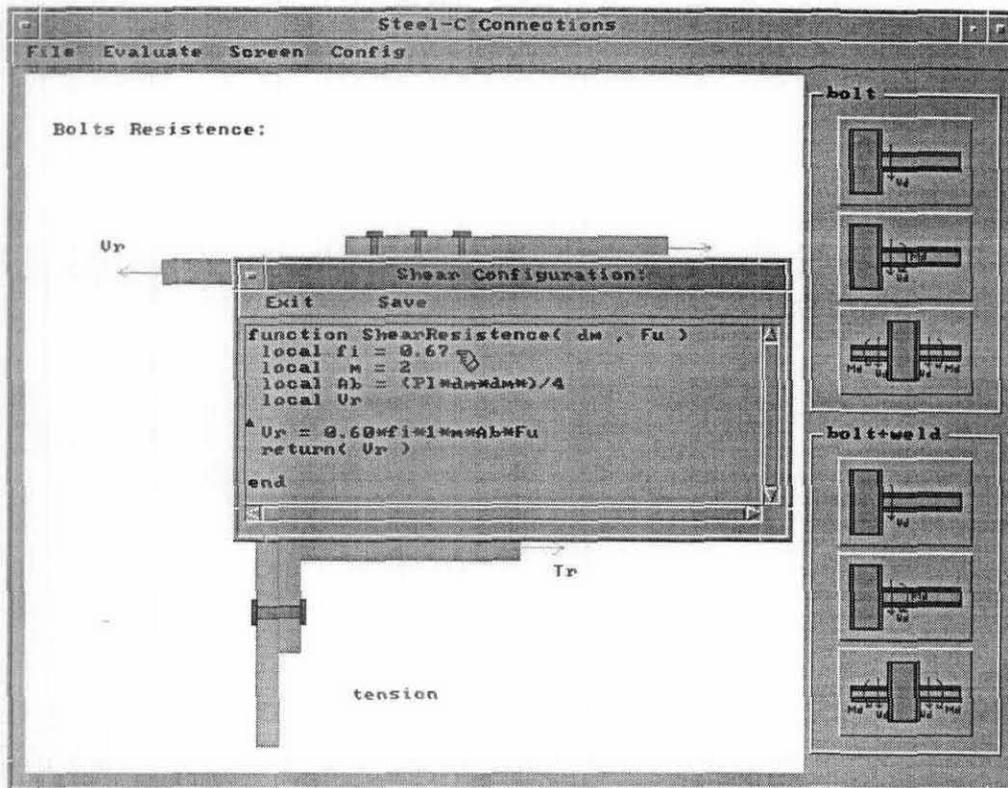


Figura 6.8 - Código corrente para resistência ao corte dos parafusos ($\phi = 0.67$).

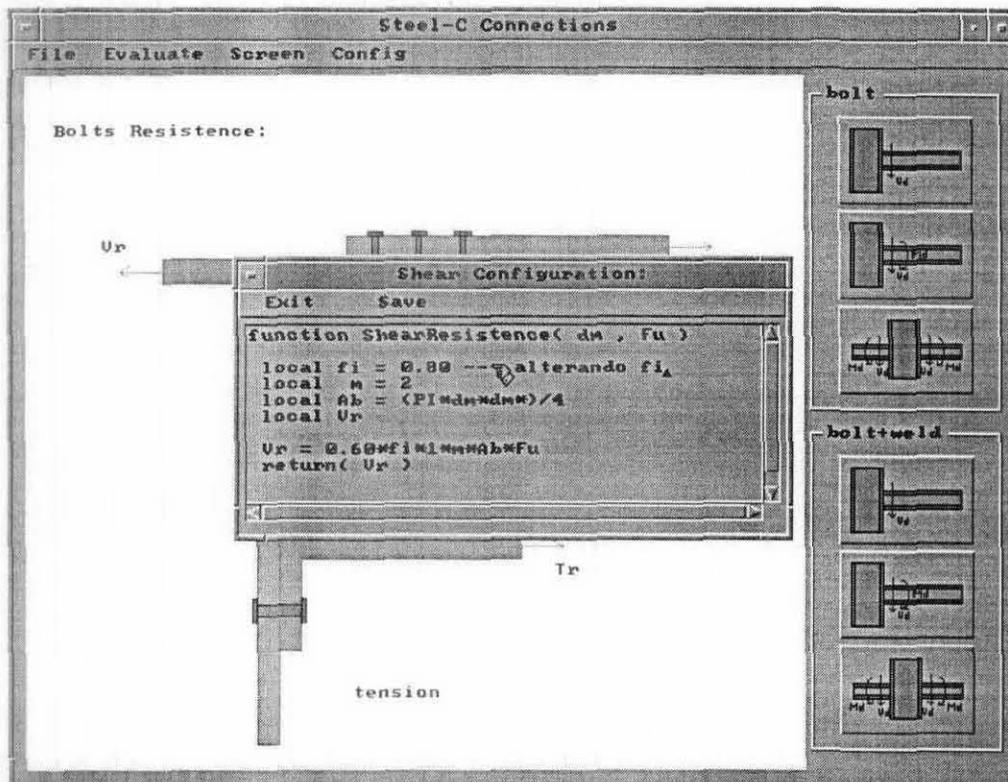


Figura 6.10 - Novo código para a resistência ao corte dos parafusos ($\phi = 0.80$).

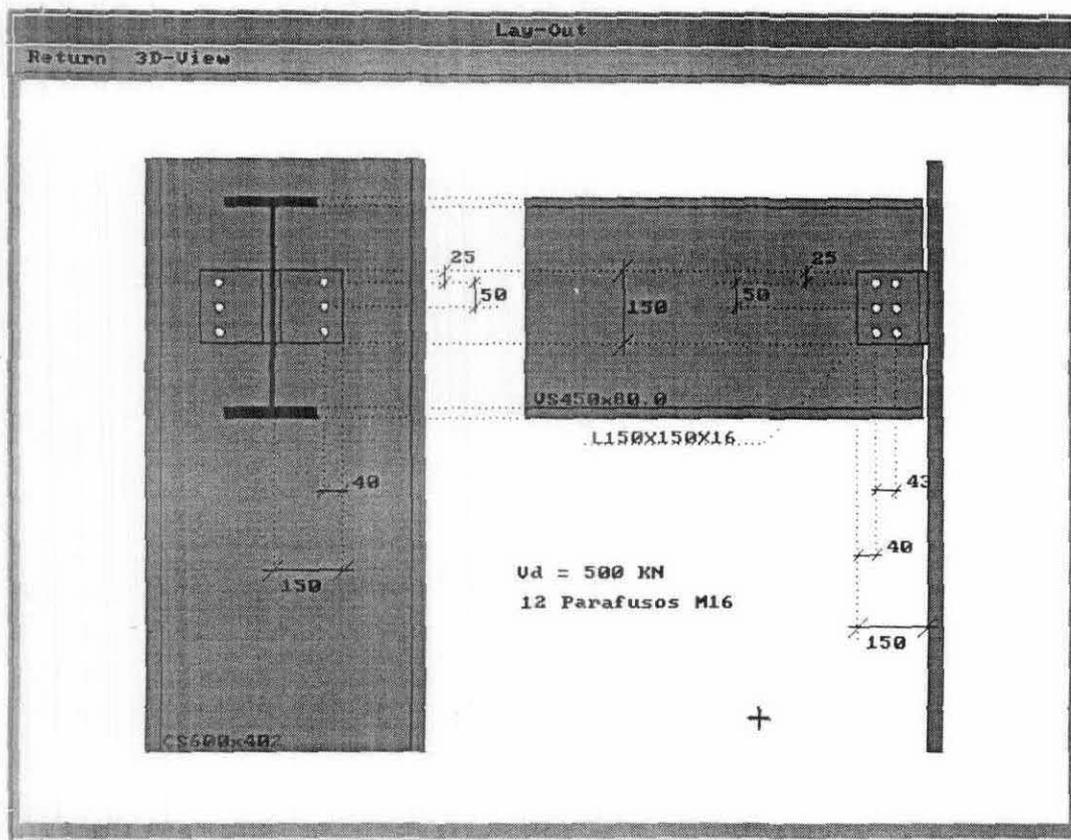


figura 6.11 - Detalhamento da ligação após a configuração

Com a elevação do valor do coeficiente ϕ_b de 0.67 para 0.80, a resistência ao corte de um parafuso aumentou. Com isso, o número de parafusos necessários para o dimensionamento da ligação que era de 16, passou a ser de 12, conforme ilustra a figura 6.11. Porém, a alteração desta função não acarretaria necessariamente na redução do número dos parafusos. Caso a resistência ao esmagamento das placas que estão em contato com o parafuso governassem a resistência da ligação, em nada adiantaria esta alteração.

6.2 Ligação Rígida

Para finalizar este capítulo de exemplos é apresentado o dimensionamento e detalhamento de uma ligação rígida. Para esta ligação não será necessária a especificação de nenhum perfil além da viga e da coluna. A ligação a ser dimensionada é apresentada abaixo:

viga	:	VS550x99.9	(perfil soldado)
coluna	:	CS600x402	(perfil soldado)
cortante	:	$V_d = 400\text{KN}$	(na extremidade da viga)
momento	:	$M_d = 130\text{ KN.m}$	(na extremidade da viga)

As figuras 6.12 a 6.15 ilustram a seqüência para o dimensionamento desta ligação, onde não só o parafuso mas as cantoneiras e perfil *T*, também podem ser obtidos no processo de dimensionamento. Nas figuras 6.12 e 6.13 são capturados os valores de momento fletor e o perfil soldado VS da viga. A figura 6.14 mostra o detalhamento da ligação de uma forma geral. Para a visualização mais detalhada da disposição final obtida, é possível abrir novas janelas com detalhes específicos, como as cotas de corte do perfil *T* e seus espaçamentos em relação aos furos dos parafusos, conforme ilustra a figura 6.15.

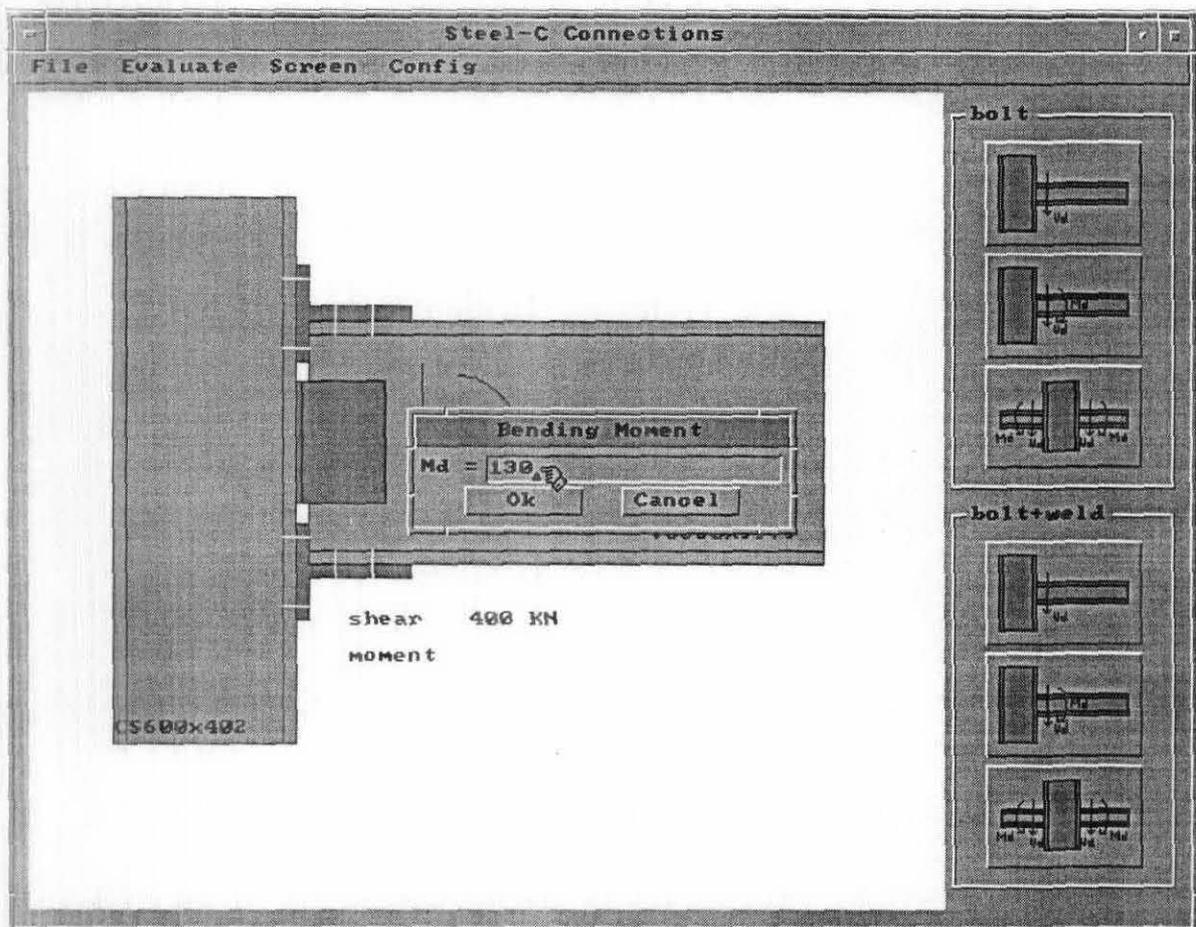


Figura 6.12 - Captura do valor do momento fletor na extremidade da viga.

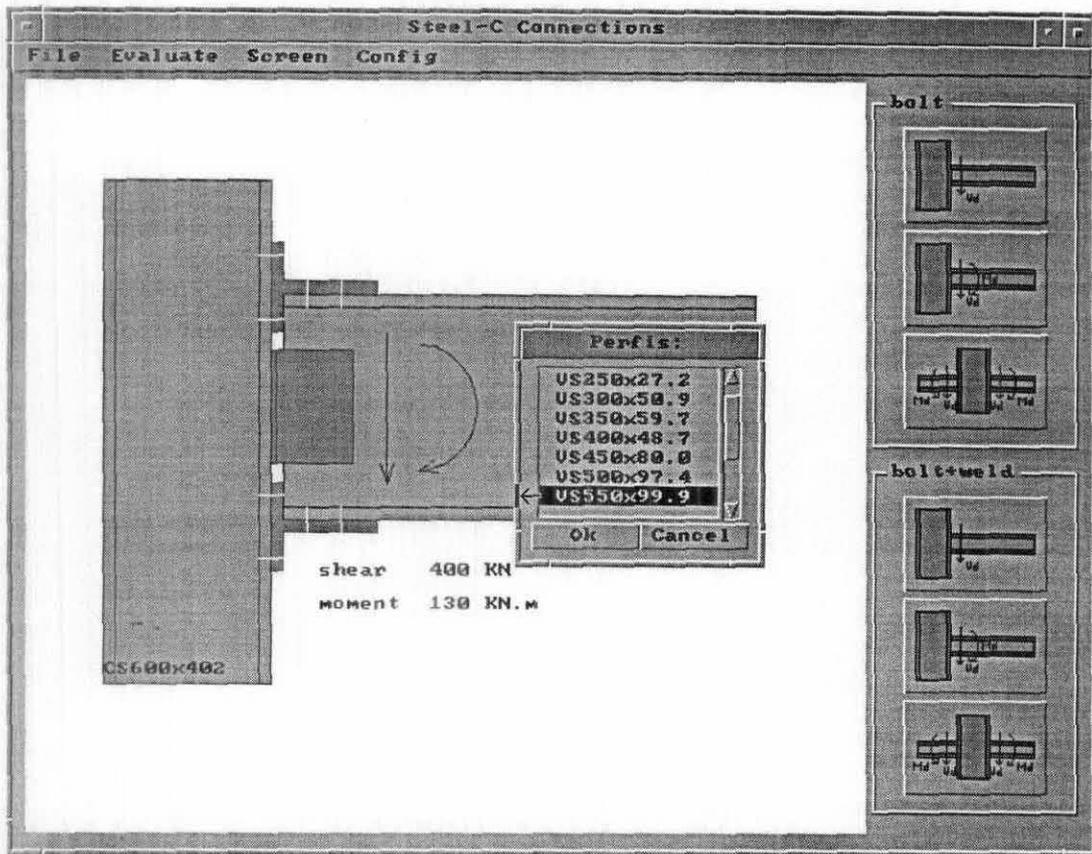


Figura 6.13 - Captura do perfil VS corresponde a viga da ligação.

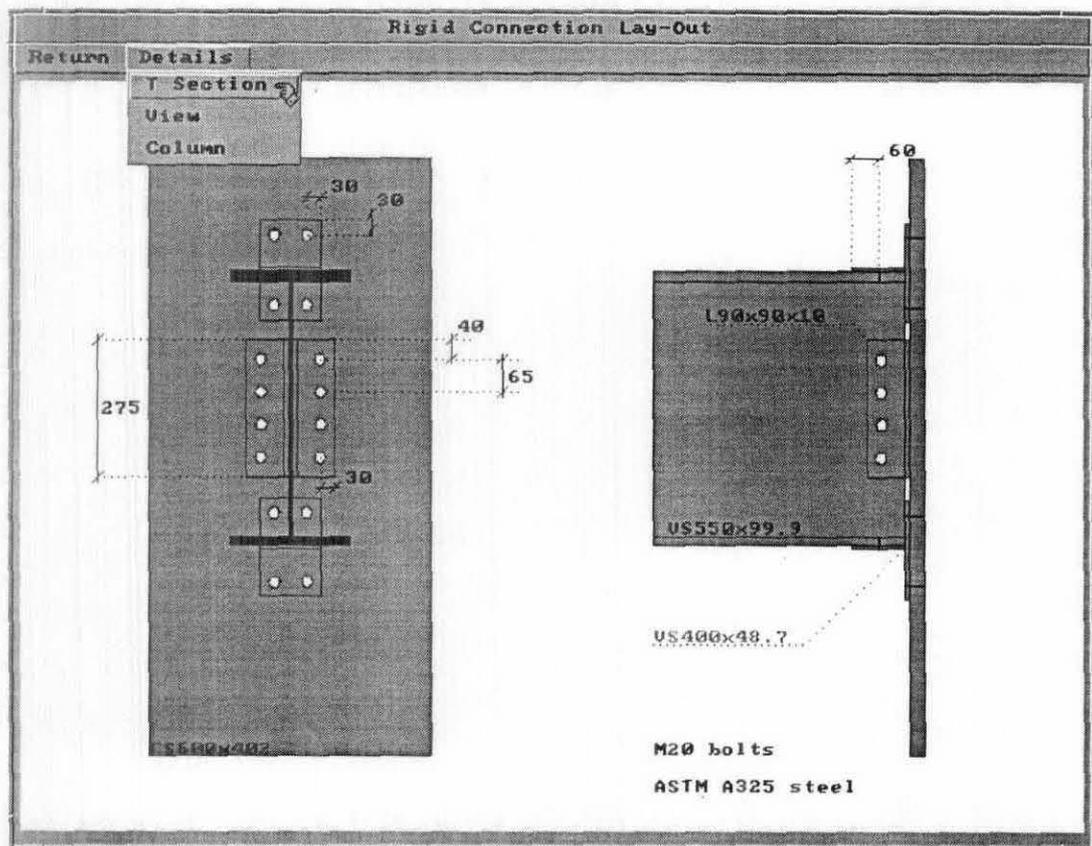


Figura 6.14 - Vista principal do detalhamento da ligação rígida.

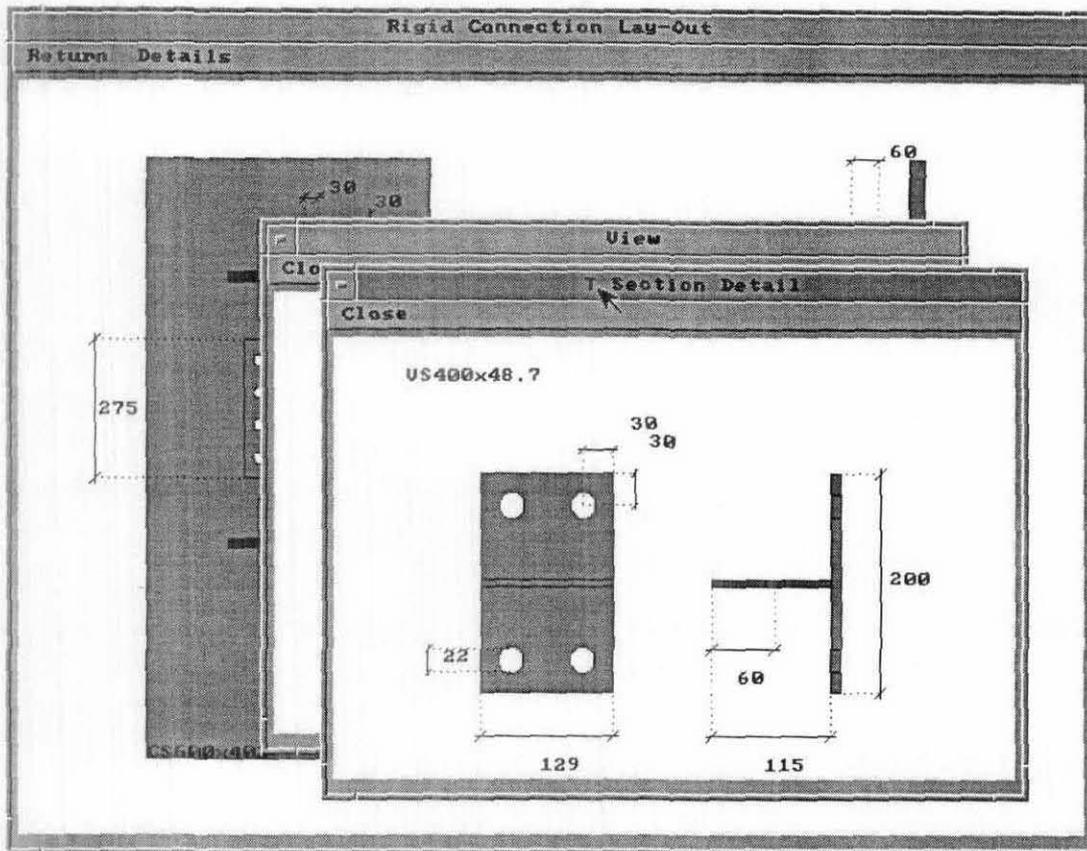


Figura 6.15 - Detalhamento do perfil T dimensionado pelo programa.

Nas figuras 6.13 e 6.14 é possível visualizar o detalhamento final adotado pelo programa quando foram dimensionados os perfis T e a cantoneira com os seus respectivos cortes. Além destes, também foram determinados os parafusos e seus espaçamentos, com os seguintes resultados finais da tabela 5.1:

Tabela 5.1 - Resultados finais do programa.

perfil T	VS400x40.7	corte na alma:	115mm
		corte longitudinal:	129mm
cantoneira	LS90x90x10	corte longitudinal:	275mm
parafusos	M20	4 por fila e 4 por perfil T total: 20 parafusos.	

7.1 A Dissertação

Buscou-se preliminarmente no desenvolvimento desta dissertação, a apresentação de aspectos conceituais fundamentais para o projeto de ligações em estruturas de aço em geral. Uma vez descritos estes tópicos, foi apresentada uma filosofia de projeto racional para o dimensionamento e detalhamento específico de ligações viga/coluna baseado nas concepções propostas por Owens.

Para que se pudesse descrever a implementação do sistema proposto, foram descritas as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho, bem como alguns de seus recursos. Com isto, foi possível apresentar a arquitetura do *Steel-C* através da aplicação das ferramentas mencionadas.

O capítulo de exemplos ilustrou as potencialidades do sistema proposto, de acordo com os objetivos a que este trabalho se propos.

Finalmente, o presente capítulo é destinado as considerações finais e sugestões para futuros trabalhos.

7.2 O Steel-C

O sistema proposto, *Steel-C*, representa um primeiro passo para o desenvolvimento de uma ferramenta poderosa na automação do projeto de ligações em estruturas de aço. A implementação seguiu a filosofia de projeto racional apresentada no capítulo 3 desta dissertação. A necessidade da automação deste processo vêm da quantidade de detalhes necessários para o cálculo de ligações em estruturas de aço, conforme pôde-se observar nesta monografia.

A utilização de recursos da computação gráfica para a visualização do detalhamento de uma ligação também pôde ser comprovada no capítulo 5, onde foram apresentados alguns exemplos de ligações processadas pelo programa.

7.3 A Configuração do Sistema

A idéia de se configurar o sistema pôde ser desenvolvida em função dos poderosos recursos oferecidos pela linguagem de programação Lua.

O conceito de usuário programador, a princípio pode parecer de difícil assimilação, em função da cultura de que o usuário não teria capacidade ou ao menos motivação para se propor a estudar uma linguagem de programação até então desconhecida como Lua. Porém no desenvolvimento deste trabalho ficou evidente a viabilidade desta idéia em virtude das facilidades apresentadas pela linguagem. Soma-se a isso, a contribuição que este tipo de desenvolvimento pode trazer no sentido de estreitar a distância entre o engenheiro usuário e as ferramentas de que este dispõe.

Uma das críticas mais usuais a profissionais da área de cálculo estrutural, geralmente recém-formados, é a de que estes por muitas vezes são meros digitadores de dados de entrada para programas, cujos resultados nem sempre são capazes de avaliar.

Uma vez desenvolvido e difundido este novo conceito de usuário programador, haverá uma efetiva contribuição para a formação de profissionais neste mercado.

7.4 Trabalhos Futuros

Existem ainda muitas etapas a serem percorridas até que os objetivos finais aos quais este trabalho se propôs possam ser alcançados. Varias sugestões podem ser feitas, portanto, para a continuação deste trabalho, principalmente em razão deste ser um primeiro passo dentro deste enfoque.

Os resultados obtidos no capítulo de exemplos, não garantem um dimensionamento ótimo para estas ligações. Assim, não é possível determinar neste estágio, qual seria a solução mais econômica para uma determinada ligação. Otimizar

número de parafusos, seus diâmetros e espessura de chapas, de acordo com os custos que estes representam, poderia ser implementado seguindo a idéia de configuração do sistema.

A integração do sistema *Steel-C* com algum programa de análise de estruturas de reticulados bidimensionais como por exemplo o *FTOOL*, desenvolvido pelo TeCGraf/PUC-Rio.

Um estudo detalhado das diversas normas de cálculo existentes em vários países poderia conduzir este ambiente a ser extensível e configurável para distintas normas, o que o tornaria muito mais flexível.

A implementação de ligações semi-rígidas dentro deste ambiente, poderia ser de grande utilidade, já que no momento são desenvolvidas duas teses experimentais, uma de mestrado e outra de doutorado, no Departamento de Engenharia Civil da PUC-RJ.

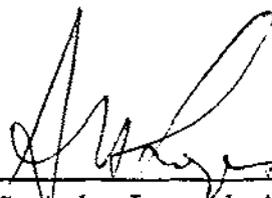
Referências Bibliográficas

- [ANDR85] Andrade, S.A.L., M. Gattass, “Notas de Aula - NA.02/85”, Rio 1985.
- [CAN/CSA-S16.1-M89] “Limit States Design of Steel Structures”, A National Standard of Canada, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, 1989.
- [CELE95]¹ Celes Filho, W., L.H. de Figueiredo, M. Gattass, “Sistema EDG - Manual de Programação”, TeCGraf, PUC-Rio, 1995.
- [CELE95]² Celes Filho, W., L.H. de Figueiredo, R. Ierusalimschy, “Programando em Lua - Teoria e Prática”, TeCGraf, PUC-Rio, 1995.
- [CRHI66] Christofer, S.F., G.L. Kulak, J.W. Fisher, “Calibration of Alloy Steel Bolts”, Journal of Structural Division, ASCE, vol. 92, 1966.
- [FIGU94] Figueiredo L.H. de , R. Ierusalimschy e W. Celes Filho, “The Design and implementation of a language for extending applications”, Anais do XXI Semish, 273-283, 1994.

- [GATT85] Gattass, M., S.A.L. de Andrade, "Estruturas de Aço - Formulários e Tabelas", Rio 1985.
- [IERU94] Ierusalimschy R., L.H. de Figueiredo, W. Celes Filho, "Reference manual of the programming language Lua", Monografias em Ciência da Computação 4/94, PUC-Rio, Departamento de Informática, 1994.
- [KULA87] Kulak G.L., J.W. Fisher e J.H.A. Struik, "Guide to design criteria for bolted end rivetted joints", Wiley, New York - NY, 1987.
- [LEVY93] Levy, C.H., IUP/LED: uma ferramenta portátil de interface com o usuário", Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Departamento de Informática, 1993.
- [MORR87] Morris L.J., A.P. Mann, "Lack of fit in steel structures", Ciria Report 87, London 1981.
- [OWEN89] Owens G.W., B.D. Cheal, "Structural Steelwork Connections", Butterworth & Co, London 1989.
- [OUTS94] Ousterhout, J.K., Tcl and Tk toolkit, Addison-Wesley, 1994.

- [PATR86] Patrick M., I.R. Thomas, e I.D. Bennets, "Testing of web side plate connection", Pacific Structural Steel Conference, Auckland, New Zealand, 1986.
- [PETE53] Peterson R.E., "Stress Concentration Design Factors", Wiley, New York, NY, 1953.
- [RUMP74] Rumpf, J.L., J.M. Fisher, "Calibration of A325 Bolts", Jornal of the Structural Division", ASCE, vol. 89, 1974
- [TeCGraf89] Manual de Referência do GKS/PUC, TeCGraf, PUC-Rio,1995.
- [TeCGraf94] "Manual do Usuário", TeCGraf, PUC-Rio, 1994.
- [WELD77] "Conference on Residual Stresses in Welded Connections and their Effects", The Weldind Institute, London 1977.

“Um Sistema Adaptativo Configurável para o Projeto de Ligações Viga/Coluna em Estruturas de Aço”. Dissertação de Mestrado apresentada por MÁRCIO RODRIGUES DE SANTI em 13 de Setembro de 1996 ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio e aprovada pela Comissão Julgadora, formada pelos seguintes professores:



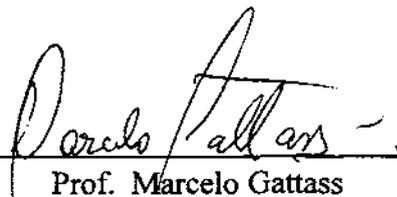
Prof. Sebastião Arthur Lopes de Andrade (Orientador)
Depto. de Engenharia Civil / PUC-Rio



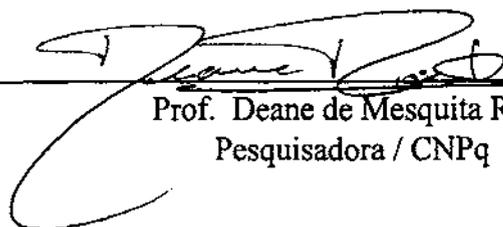
Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha
Depto. de Engenharia Civil / PUC-Rio



Prof. Pedro Colmar G. da S. Vellasco
UERJ



Prof. Marcelo Gattass
Depto. de Informática / PUC-Rio



Prof. Deane de Mesquita Roehl
Pesquisadora / CNPq

Visto e permitida a impressão,

Rio de Janeiro, 12/03/97



p/ Profa. Maria Augusta M. Davidovich
Coordenadora dos Programas de Pós-Graduação
do Centro Técnico Científico