

ESTUDO DO COMPORTAMENTO E SISTEMATIZAÇÃO
DO PROJETO DE LIGAÇÕES RÍGIDAS ENTRE
PERFIS I COM ALMAS COPLANARES
GÍLSON QUEIROZ

Este trabalho é dedicado ao Prof. José Cataldo Pinto,
meu "irmão mais velho".

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Ricardo Hallal Fakury, meu orientador, pela sua indispensável colaboração e valioso incentivo.

Ao Prof. Sebastião Salvador Real Pereira e ao Engo. Paulo Telles Horta pelas grandes contribuições na informatização deste trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas, que sempre atenderam prontamente às minhas solicitações.

À minha esposa Heloisa e aos meus filhos André, Bruno e Sara, pela participação na datilografia, nos desenhos e na montagem final.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico, pela ajuda financeira.

RESUMO

Analisam-se os estados limites últimos aplicáveis a dois tipos de ligações rígidas entre perfis I com almas coplanares: ligação totalmente soldada e ligação parafusada com chapa de cabeça estendida. As resistências últimas são determinadas considerando coluna enrijecida ou não.

Avalia-se a rigidez da ligação no regime elástico e propõe-se um modelo de nó onde possam ser consideradas molas equivalentes ao efeito da ligação.

Desenvolve-se um programa de computador para dimensionar os dois tipos de ligação, a partir dos esforços solicitantes de cálculo e dos perfis escolhidos, onde enrijecedores na coluna só são usados se necessário. Com a ligação dimensionada, no mesmo programa são determinadas as constantes de mola para o modelo de nó proposto.

Apresentam-se dois exemplos de aplicação do programa, mostrando a influência da rigidez da ligação nas respostas de uma estrutura.

ABSTRACT

Two types of rigid connections for I sections with coplanar webs are analysed: completely welded and bolted with extended end plate. Their ultimate strengths are determined for stiffened and unstiffened columns. The connection stiffness is estimated in the elastic zone and a joint model is proposed where the connection behavior can be represented by springs.

A computer program for automatic design of the two types of connections - where column stiffeners are used only if necessary - is developed. The input of the program are the factored internal forces in the connected members, as well as the dimensions of the sections. After the connection design, the same program provides the spring constants to be used in the proposed joint model.

Two application examples are presented, showing the influence of the connection stiffness in the structural response.

SUMÁRIO

NOTAÇÕES.....	VII
1-INTRODUÇÃO.....	1
2-ANÁLISE DOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS APLICÁVEIS.....	5
2-1-FLAMBAGEM DA ALMA DA COLUNA DEVIDA À FORÇA CORTANTE..	8
2-2-ESCOAMENTO LOCAL DA ALMA DA COLUNA DEVIDO À FORÇA INTRODUZIDA.....	10
2-3-PLASTIFICAÇÃO LOCAL DA MESA DA COLUNA, POR FLEXÃO, DEVIDA À FORÇA DE TRAÇÃO INTRODUZIDA.....	12
2-4-FLAMBAGEM LOCAL DA ALMA DA COLUNA DEVIDA À FORÇA DE COMPRESSÃO INTRODUZIDA.....	15
2-5-RUPTURA DA MESA TRACIONADA E ESMAGAMENTO DA MESA COMPRIMIDA DA VIGA.....	15
2-6-RUPTURA DA SOLDA DA ALMA DA VIGA COM A COLUNA OU CHAPA DE CABEÇA.....	18
2-7-RUPTURA DA SOLDA DE COMPOSIÇÃO DO PERFIL SOLDADO....	19
2-8-RUPTURA DOS PARAFUSOS POR TRAÇÃO.....	20
2-9-PLASTIFICAÇÃO LOCAL DA CHAPA DE CABEÇA, POR FLEXÃO, DEVIDA À FORÇA DE TRAÇÃO INTRODUZIDA.....	21
2-10-ESTADOS LIMITES APLICÁVEIS AOS ENRIJECEDORES.....	22
2-10-1-RUPTURA POR TRAÇÃO E ESMAGAMENTO POR COMPRESSÃO, DA SEÇÃO LÍQUIDA.....	22
2-10-2-ESCOAMENTO DA SEÇÃO BRUTA POR TRAÇÃO.....	23
2-10-3-FLAMBAGEM POR COMPRESSÃO.....	24
2-10-4-RUPTURA DA SEÇÃO LÍQUIDA (E DA SOLDA COR- RESPONDENTE) E ESCOAMENTO DA SEÇÃO BRUTA,	

POR CISALHAMENTO EM SEÇÕES PARALELAS À AL-	
MA DA COLUNA.....	25
2-10-5-RUPTURA DAS SOLDAS DE LIGAÇÃO DOS ENRIJECE-	
DORES COM AS MESAS DA COLUNA.....	26
3-MODELO DE NÓ PARA CONSIDERAÇÃO DA RIGIDEZ DA LIGAÇÃO....	28
3-1-MODELO PROPOSTO.....	29
3-2-CONSTANTES DE MOLA.....	32
3-2-1-MOLA DE CISALHAMENTO.....	32
3-2-2-MOLA DE LIGAÇÃO.....	33
3-2-3-MOLA DE INTRODUÇÃO.....	35
4-PROGRAMA DE COMPUTADOR.....	38
4-1-DADOS DE ENTRADA.....	41
4-2-SAÍDA DOS RESULTADOS.....	46
4-3-ALGORITMO.....	62
4-3-1-LIGAÇÕES SOLDADAS E PARAFUSADAS.....	62
4-3-2-LIGAÇÕES SOLDADAS.....	69
4-3-3-LIGAÇÕES PARAFUSADAS.....	89
5-EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	114
5-1-EXEMPLO BASEADO NA REF. [18].....	114
5-2-EXEMPLO COM DUAS VIGAS INCLINADAS.....	129
6-COMENTÁRIO FINAL.....	137
APÊNDICE.....	138
A1-EFEITO DE ALAVANCA (PRYING-ACTION).....	138
A2-PLASTIFICAÇÃO LOCAL DA MESA DA COLUNA CAUSADA POR FOR-	
ÇA DE TRAÇÃO INTRODUZIDA.....	141
A3-FLAMBAGEM LOCAL DA ALMA DA COLUNA NÃO ENRIJECIDA, SU-	
JEITA A DUAS FORÇAS DE COMPRESSÃO INTRODUZIDAS POR	

MESAS OPOSTAS DE DUAS VIGAS.....	150
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	152
BIBLIOGRAFIA.....	155

NOTAÇÕES

- LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

A = área da seção transversal

B = largura

C = força de compressão

E = módulo de elasticidade = 205000MPa para o aço

F = força

G = módulo transversal de elasticidade = $E/[2(1+\nu)]$

H = altura (da seção, da chapa de cabeça)

I = momento de inércia da seção transversal

M = momento fletor

Mp = momento de plastificação total

N = força normal

P = carga axial

Pcr = carga de flambagem

Py = carga axial de escoamento

Q = força cortante, efeito de alavanca

R = resistência

T = força de tração

V = força vertical

Vn = resistência nominal à força cortante

Vpl = força cortante de plastificação total

Z = módulo resistente plástico

- LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

a = distância entre enrijecedores

b = largura, distância do parafuso à chapa próxima, sufixo para compressão

b₀ = distância mínima entre o centro de um parafuso e a chapa próxima

b_u = largura útil

c = cateto do filete de solda, constante de mola, sufixo para coluna

c_b = constante de mola

d = diâmetro do parafuso, prefixo para diferença

d_h = diâmetro do furo

e = excentricidade

e₁, e₂, e₃, e₄, s₁ = distâncias em ligações parafusadas

exc = excentricidade

f = sufixo para mesa da seção

flag = indicador

f_u = limite de resistência à tração

f_{up} = limite de resistência à tração do material do parafuso

f_{uw} = limite de resistência à tração do metal da solda

f_y = limite de escoamento

h = altura da alma, sufixo para horizontal, distância entre centros de mesas

k = coeficiente de flambagem, constante de mola, distância da face externa da mesa ao início da parte plana da alma

l = comprimento

ncom = número de combinações de carregamentos

p = sufixo para chapa de cabeça ou parafusos, largura tributária por parafuso

r = recorte, raio de giração, sufixo para resultante

s, i, e, d = sufixos para superior, inferior, esquerda e direita, respectivamente

szm = distância mínima entre centros de parafusos

t = espessura, sufixo para tração

u = sufixo para unidade de comprimento

y, y₁, y₂ = distâncias medidas verticalmente

x_s, x_i = distâncias do nó até as seções extremas superior e inferior, respectivamente, do perfil de coluna considerado

w = sufixo para alma da seção

- LETRAS GREGAS

α = coeficiente relativo a tensões residuais, ângulo de inclinação

ΔM = resultante dos momentos aplicados nas duas faces da coluna

δ = deslocamento

ϕ = coeficiente de resistência

γ = distorção por cisalhamento

λ = parâmetro de esbeltez

λ_r = esbeltez correspondente ao fim do comportamento

elástico

λ_p = esbeltez limite para se obter plastificação total

ν = módulo de Poisson = 0,3 para o aço

θ = rotação

ρ = coeficiente relacionado com a flambagem

σ = tensão normal

τ = tensão de cisalhamento

1-INTRODUÇÃO

As ligações entre vigas e colunas constituem ponto vital para o desempenho de uma estrutura de aço. É muito importante projetar ligações que possam ser executadas sem dificuldade, e analisar seu comportamento da forma mais precisa possível. Nesta análise incluem-se a determinação da resistência última e da rigidez das ligações, bem como, para cálculo no regime plástico, da capacidade de rotação quando o momento de plastificação é atingido na ligação. É comum classificar as ligações entre vigas e colunas de aço em rígidas, semi-rígidas e flexíveis [1]. Nas ligações rígidas o ângulo original entre os eixos da viga e da coluna, no local da ligação, praticamente não varia quando o momento atuante atinge 80% do momento de plastificação M_p da viga, como na curva (1) (fig. 1-1). Nas ligações flexíveis esse ângulo varia consideravelmente, mesmo para momento atuante da ordem de 20% do momento de plastificação da viga (curva (3), fig. 1-1). Nos demais casos a ligação é chamada de semi-rígida (curva (2), fig. 1-1).

É evidente que nenhuma ligação real é totalmente rígida ou totalmente flexível, havendo uma tendência crescente de considerar qualquer ligação como semi-rígida; esta tendência apoia-se na possibilidade de se realizarem análises

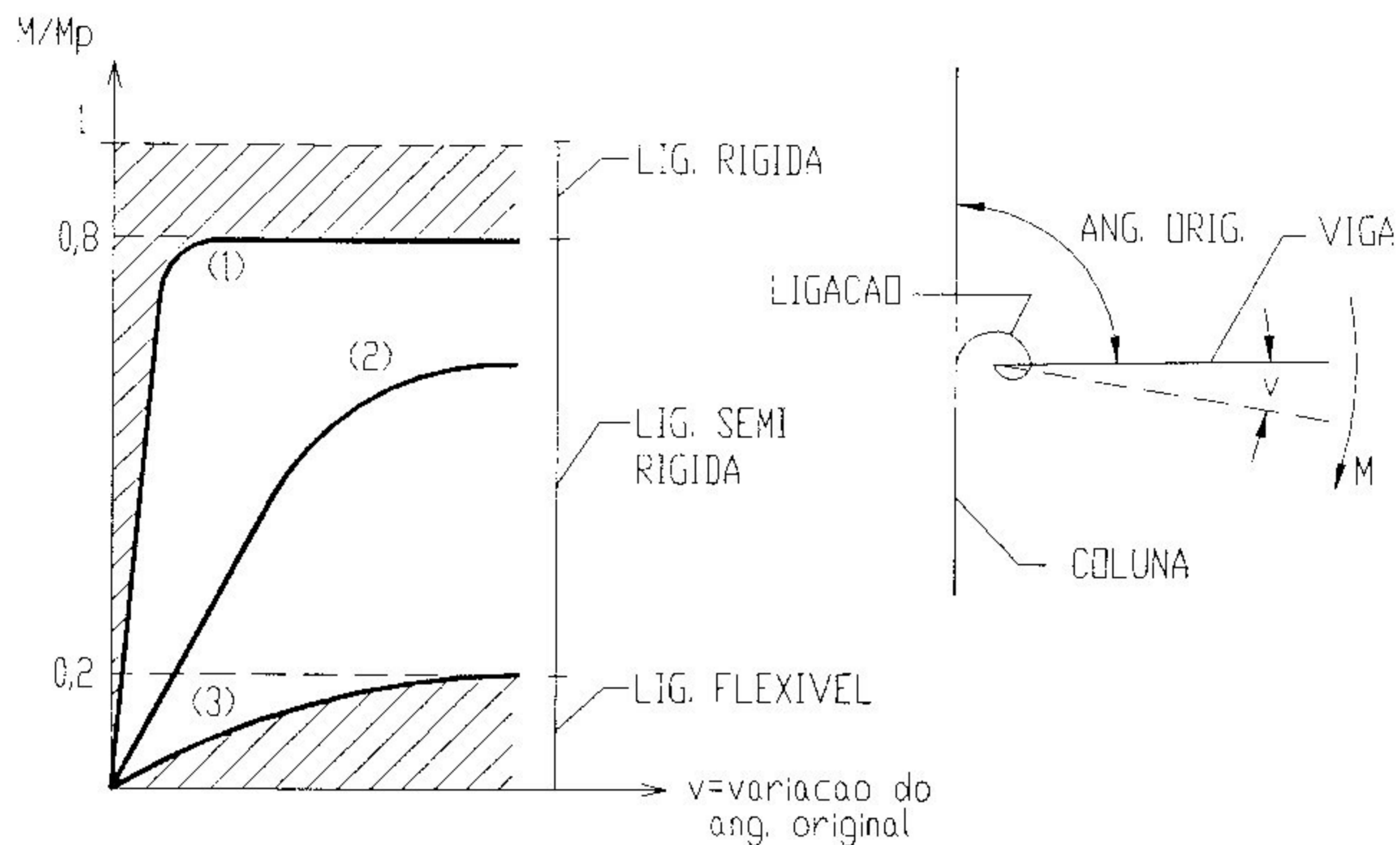


FIG 1-1

estruturais cada vez mais sofisticadas, com a evolução dos computadores e dos programas de análise.

Neste trabalho analisam-se dois tipos de ligação - viga totalmente soldada na coluna (fig. 1-2-a) e viga parafusada através de chapa de cabeça estendida (fig. 1-2-b). Apesar de serem enquadradas na classe de rígidas [2] [3], a rigidez de tais ligações varia em função da geometria das peças ligadas e da presença ou ausência de enrijecedores na coluna, sendo, portanto, tratadas aqui como semi-rígidas.

No capítulo 3 propõe-se um modelo para levar em conta a rigidez da ligação e apresentam-se meios de determinação dos parâmetros necessários .

Os diversos estados limites últimos aplicáveis são analisados no capítulo 2 com base nas referências bibliográficas.

Limitou-se o estudo ao caso em que a análise da

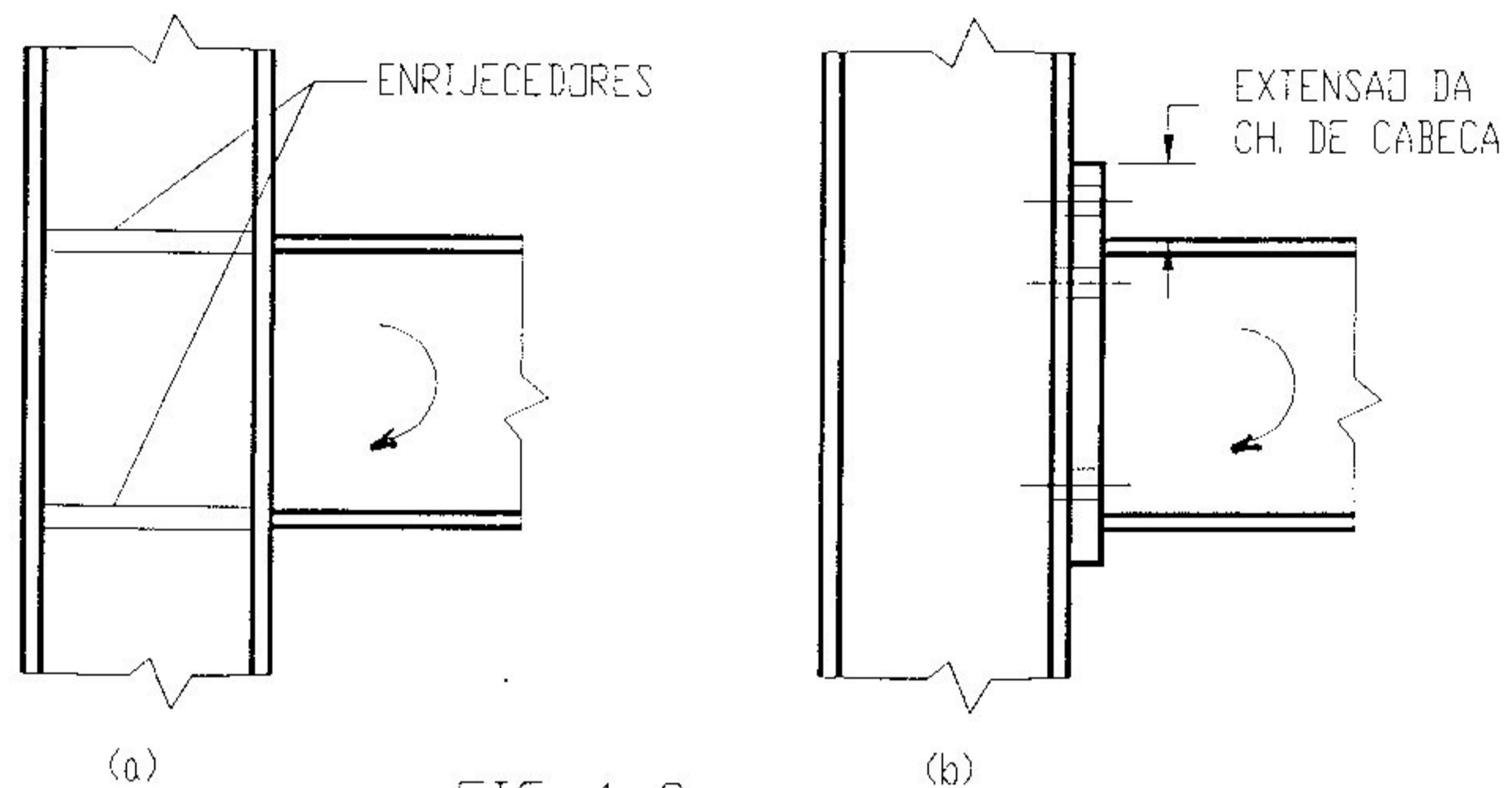


FIG. 1-2

estrutura é elástica, as cargas são predominantemente estáticas e, na ligação parafusada, ao caso em que se usam 4 parafusos para introduzir na coluna a força de tração aplicada pela mesa da viga.

Observa-se que as ligações escolhidas são amplamente utilizadas na construção metálica, fornecem boa contenção lateral das vigas no local da ligação e não produzem concentração de tensões de cisalhamento na alma da viga (tal concentração poderia reduzir a resistência da alma à flambagem).

Foi também elaborado um programa de computador onde se aplica a teoria apresentada para ligações entre vigas e colunas de perfis soldados (em função da realidade brasileira atual). Consideram-se os casos de uma ou duas vigas chegando ao nó, até 20 combinações de ações de cálculo e procura-se obter ligações soldadas ou parafusadas onde os trabalhos de fabricação sejam minimizados. Assim, se possível, procura-se não usar enrijecedores, usar soldas de

filete ao invés de penetração, bem como não reforçar a solda de composição do perfil da coluna. O programa fornece todas as informações necessárias para executar a ligação (com base em figuras de referência), as constantes de mola que permitem levar em conta sua rigidez, bem como, se solicitado pelo usuário, as principais solicitações e resistências de cálculo envolvidas. Os critérios de segurança adotados no programa foram os da NBR8800 [4].

Em trabalhos posteriores, a saída dos detalhes construtivos poderá ser o próprio desenho da ligação; além disso, outras ligações entre perfis I, de utilização frequente, poderão ter tratamento similar, resultando na automatização do detalhamento das estruturas de aço e no aprimoramento da análise estrutural. Com base na frequência de utilização, uma sequência natural deste trabalho seria o estudo de ligações flexíveis entre perfis I com almas coplanares, e de ligações viga/coluna onde a alma da viga é paralela às mesas da coluna (fig. 1-3).

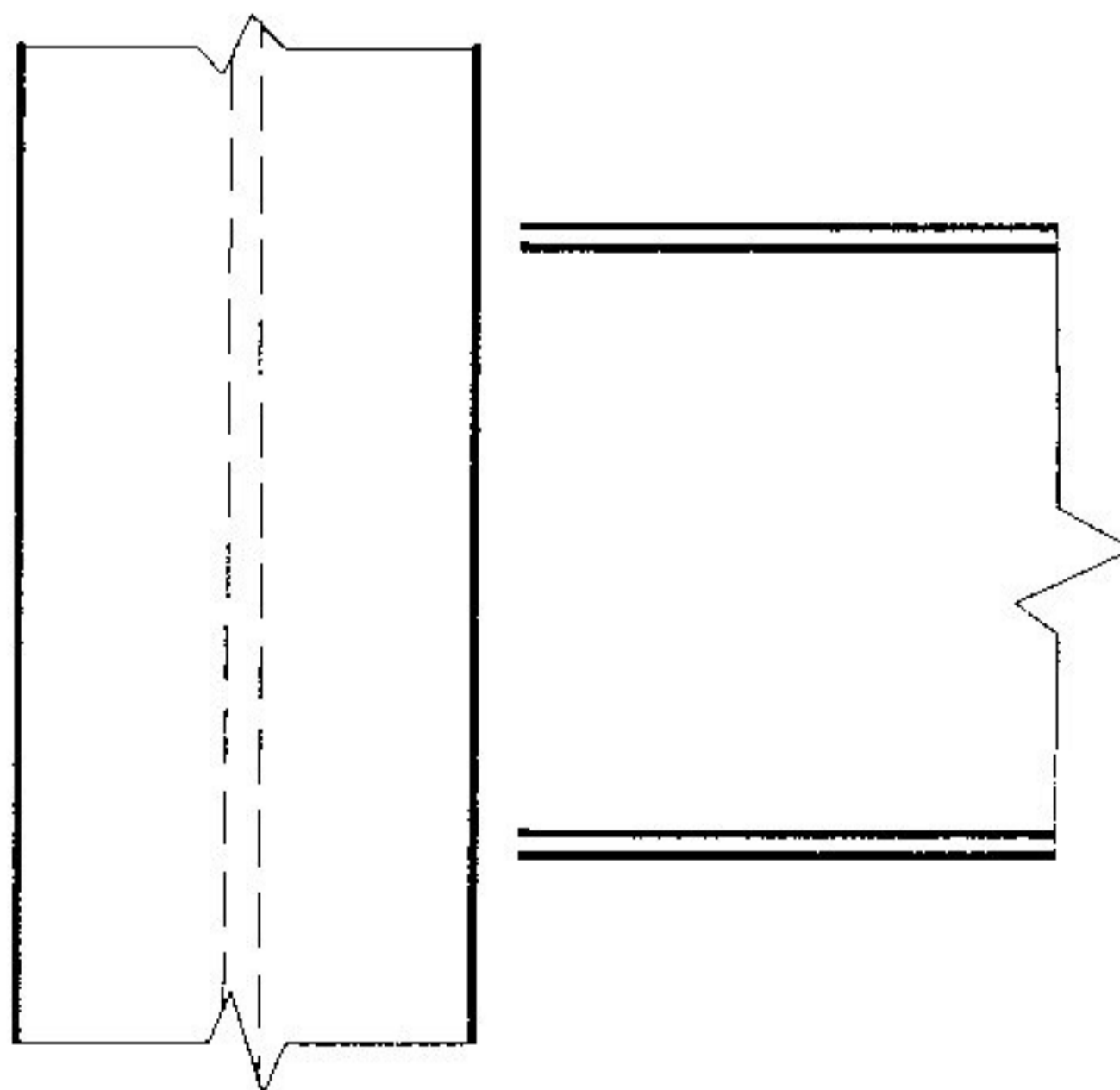


FIG. 1-3

2-ANÁLISE DOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS APLICÁVEIS

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Supõe-se que, em ligações rígidas entre vigas e colunas de perfil I com almas coplanares e cargas no plano, o esforço solicitante mais relevante seja o momento fletor, e que sua introdução na coluna dê-se somente através das mesas das vigas (na linha de centro destas). Supõe-se também que a força cortante na viga seja introduzida na coluna através da alma da viga. Todas as referências bibliográficas citadas, quando tratam da introdução dos esforços solicitantes das vigas nas colunas, utilizam essas hipóteses. Assim, tem-se (fig. 2-1):

$$T_d = C_d = M_d/h_1 \quad T_e = C_e = M_e/h_1 \quad (2.1)$$

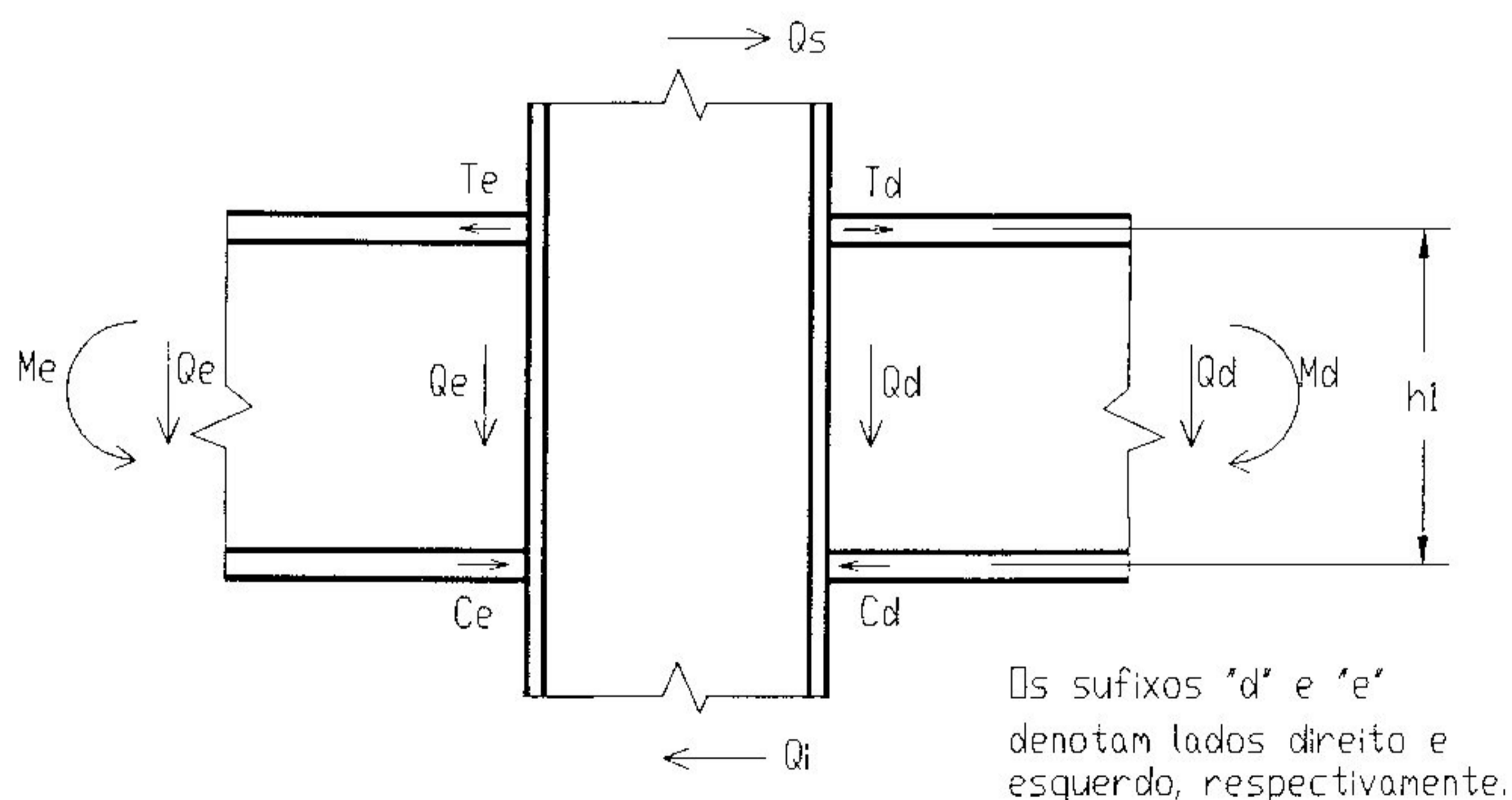


FIG. 2-1

Basicamente, os estados limites últimos devidos ao momento fletor são (além daqueles que já foram verificados durante o dimensionamento das vigas e da coluna):

a)-Flambagem da alma da coluna entre as mesas superior e inferior das vigas devida à força cortante Q_r (fig. 2-1), com

$$Q_r = Q_s + T_d - T_e \quad (2.2)$$

b)-Escoamento local da alma da coluna devido à força de tração ou compressão introduzida por uma mesa de viga;

c)-Plastificação local da mesa da coluna, por flexão, devida à força de tração introduzida por uma mesa de viga;

d)-Flambagem local da alma da coluna, devida à força de compressão introduzida por uma mesa de viga ou a duas forças de compressão introduzidas por mesas opostas de duas vigas;

e)-Ruptura da mesa tracionada (e da solda) e esmagamento da mesa comprimida (e da solda) da viga, devidos à concentração de tensões no local de introdução da carga;

f)-Ruptura da solda da alma da viga com a coluna ou chapa de cabeça, devida à concentração de tensões junto às mesas ou à força cortante da viga;

g)-Ruptura da solda de composição do perfil soldado da coluna, devida ao efeito combinado da força cortante Q_r e de uma das forças introduzidas pelas mesas das vigas;

Adicionalmente, para ligações parafusadas:

h)-Ruptura dos parafusos devida à força de tração introduzida por uma mesa de viga;

i)-Plastificação local da chapa de cabeça por flexão, devida à força de tração introduzida por uma mesa de viga.

As resistências últimas correspondentes aos estados limites b, c, d, e, g podem ser aumentadas através do uso de 2 enrijecedores horizontais soldados na coluna, em oposição à mesa de viga responsável pela introdução da força. Excetuando o caso de ligação parafusada, força introduzida de tração, onde nem sempre o uso de enrijecedores garante a possibilidade de introduzir esta força, nos demais casos é sempre possível dimensionar enrijecedores de forma a garantir a introdução da força de tração ou compressão. A solicitação dos enrijecedores é igual à força transmitida pela mesa da viga menos a parcela que a coluna consegue absorver diretamente (sem enrijecedores) em cada caso.

Observações:

- A resistência última correspondente ao estado limite "a" também pode ser aumentada através do uso de enrijecedores conforme se verá adiante;

- Estados limites correspondentes à combinação do momento fletor com a força normal e a força cortante são verificados no capítulo 4.

Aos enrijecedores aplicam-se os seguintes estados limites últimos:

j)-Ruptura da seção líquida devida à força de tração;

k)-Esmagamento da seção líquida devido à força de compressão;

- l) - Escoamento da seção bruta devido à força de tração;
- m) - Flambagem devida à força de compressão;
- n) - Ruptura por cisalhamento junto à alma da coluna (e da solda correspondente), devida à diferença entre as forças introduzidas nas extremidades do enrijecedor;
- o) - Escoamento por cisalhamento da seção bruta do enrijecedor paralela à alma da coluna, devido à diferença entre as forças introduzidas nas extremidades do enrijecedor;
- p) - Ruptura das soldas de ligação dos enrijecedores com as mesas da coluna, devida ao efeito combinado da força introduzida e do momento oriundo das excentricidades das forças introduzidas em relação à alma.

2-1) FLAMBAGEM DA ALMA DA COLUNA DEVIDA À FORÇA CORTANTE

Com base na NBR8800 [4], a resistência de cálculo de um perfil I à força cortante, estado limite flambagem da alma por cisalhamento, sem levar em conta a resistência pós flambagem, é dada por $(\phi_v)(V_n)$, sendo $\phi_v = 0,9$ o coeficiente de resistência e V_n a resistência nominal, dada por:

$$V_n = V_{pl}, \quad \text{para } \lambda \leq \lambda_p \quad (2.3)$$

$$V_n = (\lambda_p/\lambda)V_{pl}, \quad \text{para } \lambda_p < \lambda < \lambda_r \quad (2.4)$$

$$V_n = 1,28(\lambda_p/\lambda)^2 V_{pl}, \quad \text{para } \lambda \geq \lambda_r \quad (2.5)$$

Nestas expressões:

$\lambda = h/t_w =$ esbeltez da alma

$$\lambda_p = 1,08(k.E/f_y)^{1/2}$$

$$\lambda_r = 1,40(k.E/f_y)^{1/2}$$

$$k = 4+5,34/(a/h)^2, \text{ para } a/h < 1$$

$$k = 5,34+4/(a/h)^2, \text{ para } 1 \leq a/h \leq 3$$

$k = 5,34$, para $a/h > 3$ (inclusive na situação sem enrijecedores)

$$V_{pl} = 0,6A_w.f_y \text{ (para análise elástica)}$$

$$A_w = h.t_w$$

$a, h, t_w = \text{conforme fig. 2-2}$

O gráfico da fig. 2-3 ilustra o procedimento descrito.

Para $\lambda \leq \lambda_p$ a alma consegue atingir o escoamento por cisalhamento $V_{pl} = 0,6A_w.f_y$ sem flambar.

Para $\lambda \geq \lambda_r$ a alma flamba elasticamente e para λ entre λ_r e λ_p ocorre flambagem inelástica da alma, sob ação da força cortante.

Para que os enrijecedores sejam eficazes [4] é necessário que $t_1.b^3/12 \geq (h/50)^4$ (fig. 2-2).

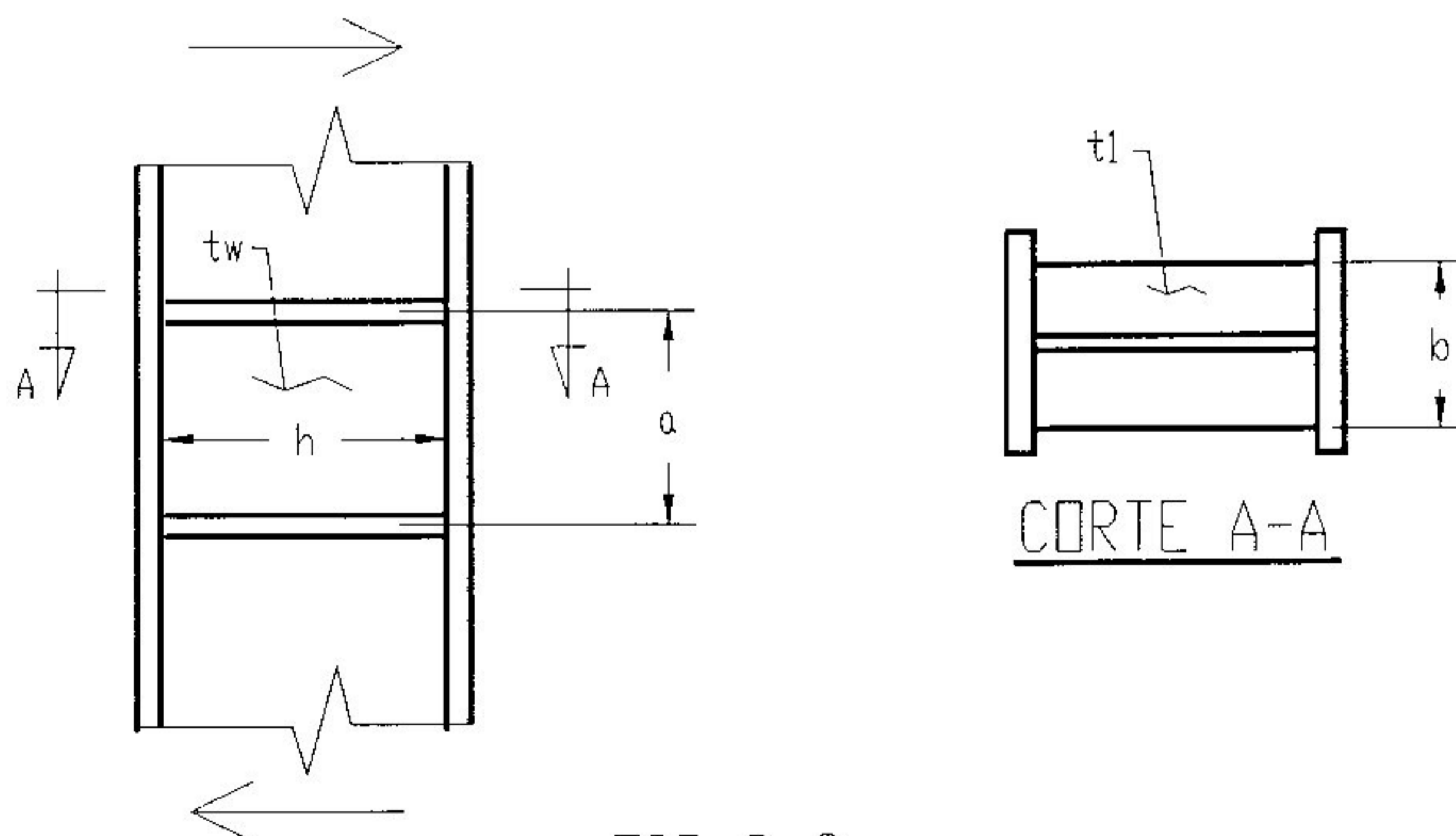


FIG 2-2

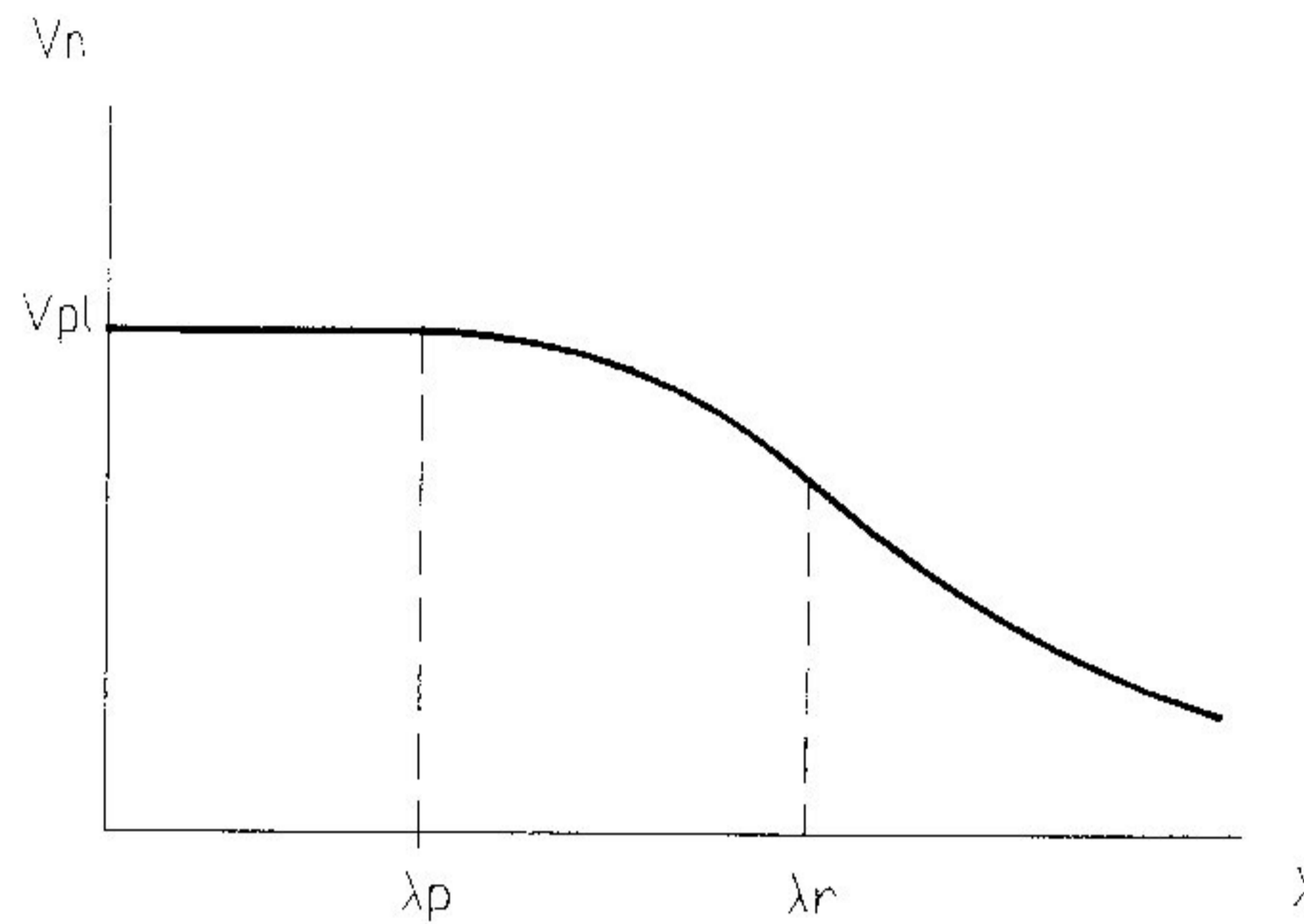


FIG 2-3

Observa-se que, em função das expressões dadas, pode-se escrever (para $\lambda \geq \lambda_r$):

$$\begin{aligned}
 V_n &= 1,28[1,08(k \cdot E/f_y)^{1/2}]^2 0,6A_w \cdot f_y / (h/t_w)^2 = \\
 &= 0,9k \cdot E \cdot A_w / (h/t_w)^2 = \\
 &= A_w \cdot k \cdot \pi^2 \cdot E (t_w/h)^2 / [12(1-\nu^2)] \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

A expressão que multiplica A_w é a usual para flambagem elástica de um painel sujeito a cisalhamento simples [5], sendo $\nu = 0,3$ o coeficiente de Poisson do aço.

2-2) ESCOAMENTO LOCAL DA ALMA DA COLUNA DEVIDO À FORÇA INTRODUZIDA

Com base em [4] e [2], a resistência de cálculo da alma da coluna à força de tração ou compressão introduzida pela mesa da viga é ϕR_{t1} ou ϕR_{b1} , respectivamente (estado limite escoamento local da alma), sendo $\phi = 0,9$ o coeficiente de

resistência da NBR8800 [4], R_{t1} e R_{b1} as resistências nominais.

Para ligações soldadas tem-se [4], [2], [6] (fig. 2-4):

$$R_{b1} = R_{t1} = t_w(t_b + 5k)f_y \quad (2.7)$$

t_w = espessura da alma da coluna

t_b = espessura da mesa da viga

k = espessura da mesa da coluna (t_c), quando for de perfil soldado

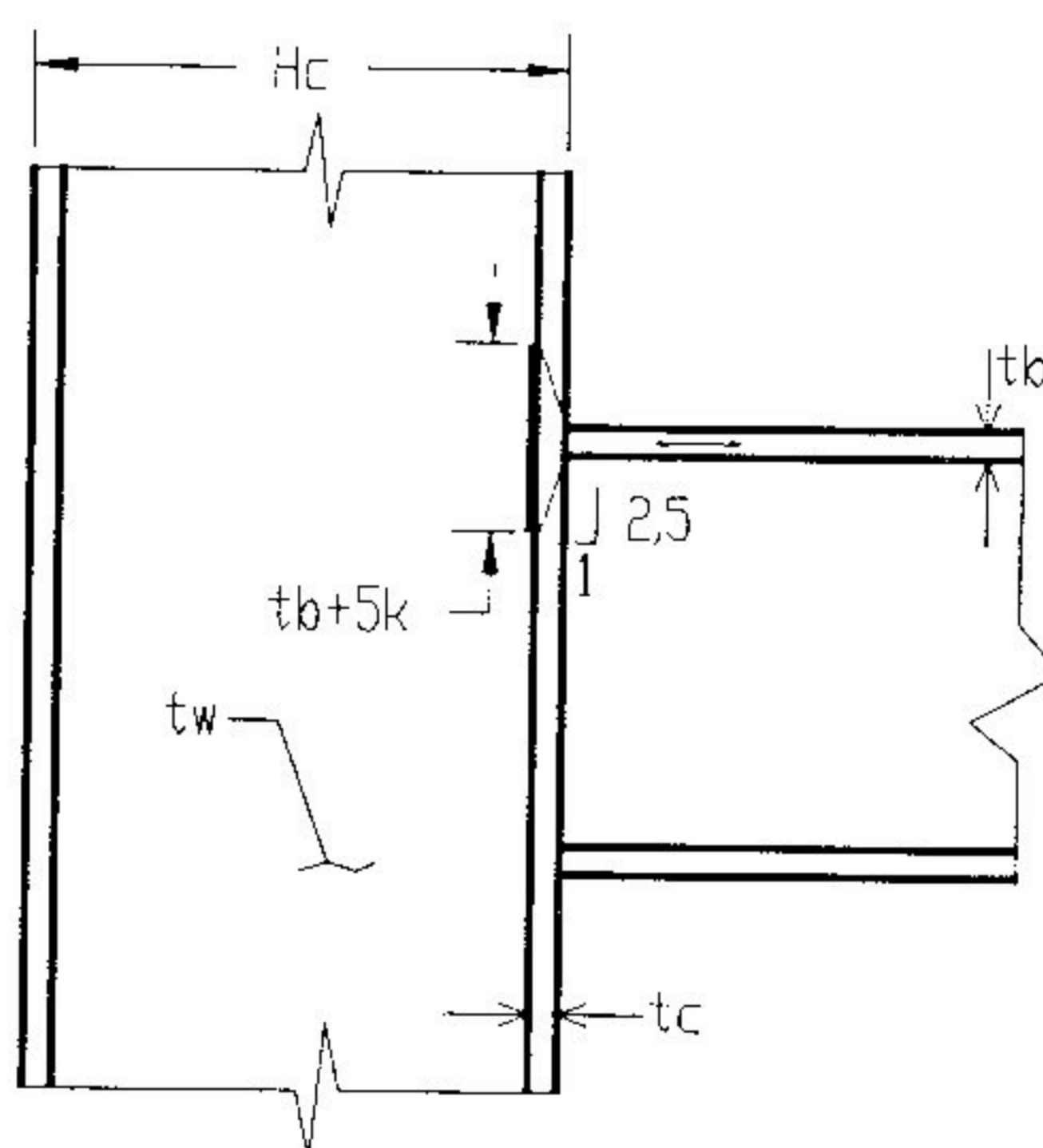


FIG 2-4

Para ligações parafusadas com chapa de cabeça tem-se [7] e [8] (fig. 2-5):

$$R_{b1} = t_w(t_b + 2t_p + 5k)f_y \quad (2.8)$$

$$R_{t1} = t_w \cdot b_m \cdot f_y \quad (2.9)$$

b_m = menor de $2c$, $c + 4m + 1,2nk$, $8m + 2,4nk$

t_w , t_b , k - mesmos significados anteriores

t_p = espessura da chapa de cabeça

c , m , nk - conforme figura 2-5

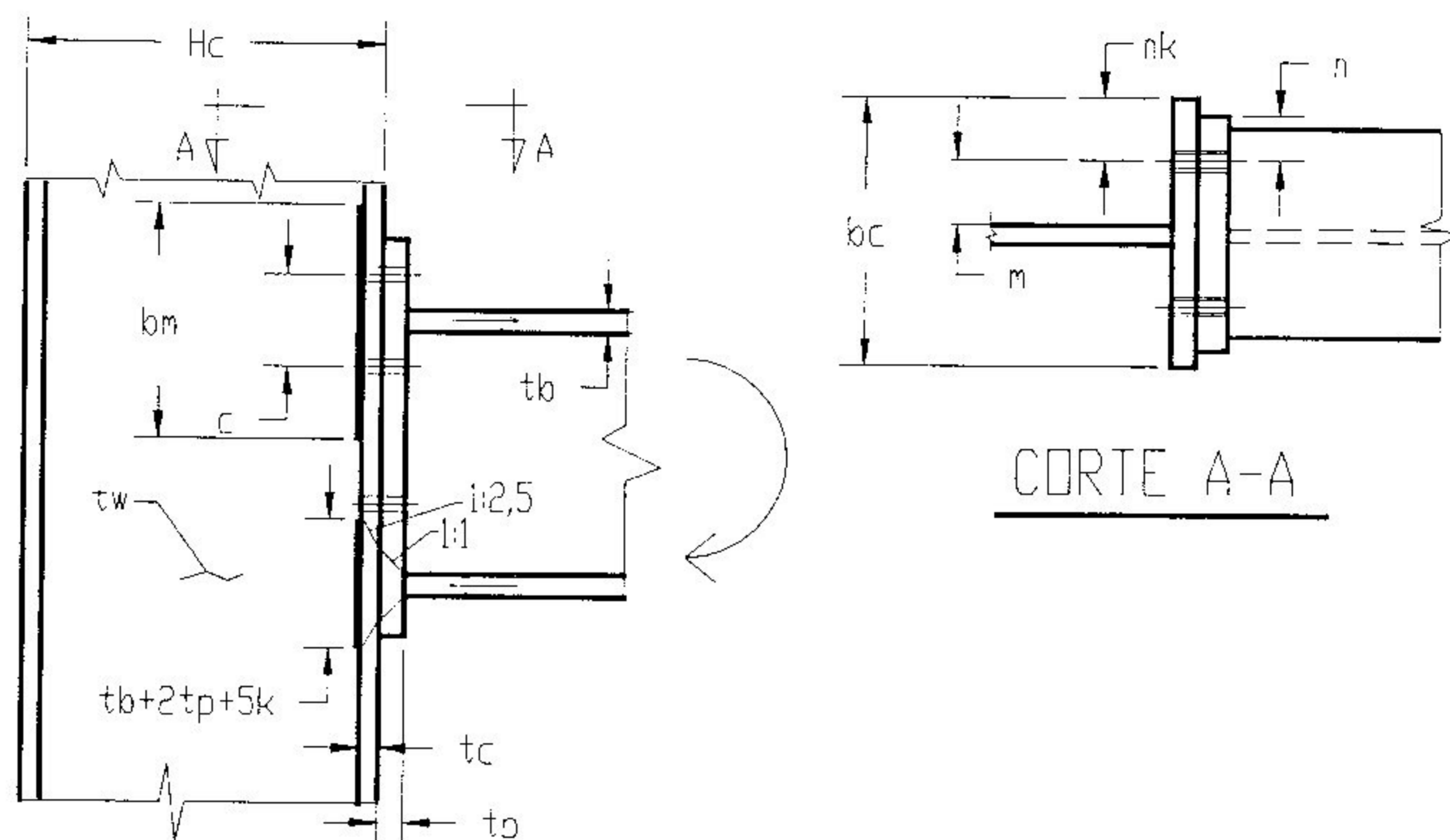


FIG 2-5

Conforme [2], para que as resistências nominais R_{t1} e R_{b1} sejam desenvolvidas (tanto nas ligações soldadas quanto nas parafusadas) é necessário que a distância da mesa da viga até a extremidade mais próxima da coluna seja pelo menos igual à altura da seção da coluna. Evidentemente, as projeções da chapa de cabeça e da coluna além da mesa da viga têm também que ser suficientes para desenvolver os comprimentos solicitados da alma.

2-3) PLASTIFICAÇÃO LOCAL DA MESA DA COLUNA, POR FLEXÃO, DEVIDA À FORÇA DE TRAÇÃO INTRODUZIDA (V. APÊNDICE A2)

Com base em [4] e [2], a resistência de cálculo da mesa da coluna à força de tração introduzida é ϕR_{t2} (estado limite plastificação local por flexão), sendo $\phi = 0,9$ o coeficiente de resistência e R_{t2} a resistência nominal.

Para ligações soldadas tem-se [4], [2], [6]:

$$R_{tz} = 6t_c^2 \cdot f_y \quad (2.10)$$

sendo t_c a espessura da mesa da coluna.

Para ligações parafusadas será utilizada a referência [9] (endossada por [10] e [11]), aplicável ao caso de 4 parafusos introduzindo a força de tração e baseada em geometria especificada da ligação:

R_{tz} = menor de

$$F_{mb} = f_y \cdot t_c^2 [3,14 + 0,5c/(m+n)] + 4(\phi_p/\phi) R_p \cdot n/(m+n) \quad (2.11)$$

$$F_{mc} = f_y \cdot t_c^2 [3,14 + (2n+c-dh)/m] \quad (2.12)$$

quando não há enrijecedor na coluna (fig. 2-5), sendo

dh = diâmetro do furo

$\phi_p \cdot R_p$ = resistência de cálculo de um parafuso à tração, onde

ϕ_p é o coeficiente de resistência ($\phi_p = 0,75$ pela NBR8800

[4]) e R_p é a resistência nominal, dada por $R_p =$

$$= 0,75(\pi d^2/4) f_{up}$$

d = diâmetro do parafuso

f_{up} = limite de resistência do material do parafuso à tração

R_{tza} = menor de

F_{mb} (como anteriormente)

$$F_{ms} = f_y \cdot t_c^2 [(1/v+1/x)(2m+2n-dh) + (2n+2x-dh)/m] \quad (2.13)$$

quando a coluna é enrijecida (fig. 2-6), sendo

$$x = [m(m+n-0,5dh)]^{1/2}$$

dh = diâmetro do furo

Todas as expressões de R_{tz} e R_{tza} apresentadas foram

deduzidas com base em linhas de plastificação da mesa da coluna por flexão ([6], [9]). Na expressão de F_{mb} , a 2ª parcela é a contribuição dos parafusos e a relação ϕ_p/ϕ corrige o coeficiente de resistência global ϕ para o aplicável ao estado limite de ruptura por tração dos parafusos.

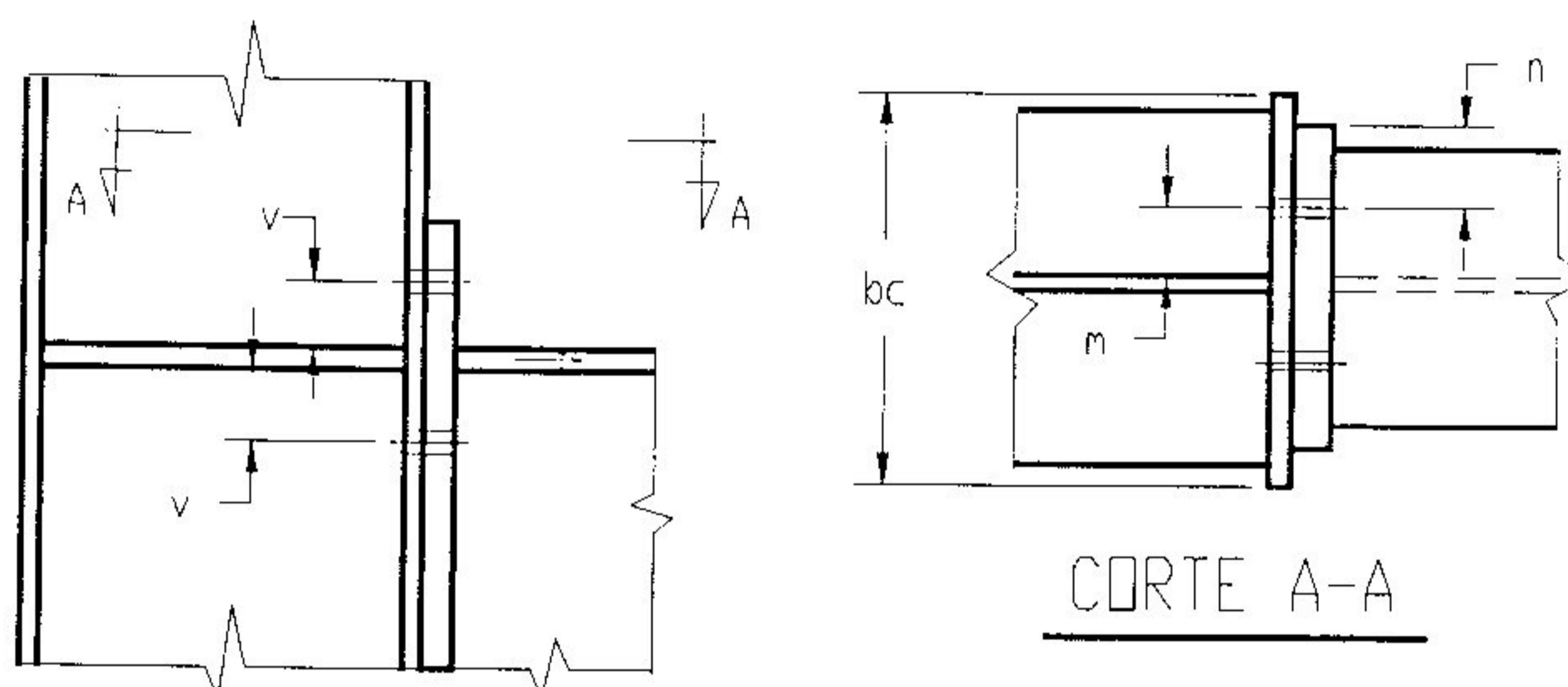


FIG 2-6

Para que as resistências nominais R_{t2} e R_{t2a} sejam atingidas é necessário que a projeção da coluna além da mesa da viga seja suficiente para desenvolver as linhas de escoamento previstas na mesa da coluna. Para ligações soldadas, com base em [6], esta projeção deve ser igual ou superior a $6t_c + bc/2$, sendo bc a largura da mesa da coluna. Para ligações parafusadas, com base em [9], pode-se mostrar que esta projeção deve ser igual ou superior a $12d$, considerando as resistências F_{mb} , F_{ms} e F_{mc} .

Nas referências utilizadas não foi feita redução de resistência à flexão da mesa da coluna devida à presença das

tensões normais diretas, correspondentes à solicitação global da coluna. Propõe-se que seja feita uma redução de ϕR_{tz} e ϕR_{tza} , multiplicando os valores obtidos com as expressões anteriores por $1-(P/P_y)^2$ [12], onde P é a resultante das tensões normais diretas na mesa e P_y a força axial que provocaria o escoamento da mesa ($P_y = bc.t_c.f_y$).

2-4) FLAMBAGEM LOCAL DA ALMA DA COLUNA DEVIDA À FORÇA DE COMPRESSÃO INTRODUZIDA (V. APÊNDICE A3)

Prevendo o caso crítico de duas forças opostas de compressão introduzidas, com base em [4], [2], [13], a resistência de cálculo da alma da coluna é ϕR_{bz} , sendo $\phi = 0,9$ o coeficiente de resistência da NBR8800 [4] e R_{bz} a resistência nominal, dada por

$$R_{bz} = [22tw^3(E.f_y)^{1/2}]/h, \quad (2.14)$$

h = distância entre faces internas das mesas da coluna, para perfis soldados

tw = espessura da alma da coluna

Para que a resistência R_{bz} seja atingida, com base em [5], [13] e em protótipos usados na referência [6], conclui-se que a projeção da coluna além da mesa da viga deve ser de 1 a 1,5 vezes a altura da seção da coluna.

2-5) RUPTURA DA MESA TRACIONADA E ESMAGAMENTO DA MESA COMPRIMIDA DA VIGA

Ocorre concentração de tensões normais nas mesas da viga por dois motivos: a) porque, por hipótese, o momento fletor na ligação é todo transmitido pelas mesas da viga, sem a participação da alma; b) porque, nas ligações soldadas, a distribuição de tensões nas mesas da viga não é uniforme na largura, sendo a região central muito mais solicitada do que as regiões próximas às bordas (fig. 2-7), conforme referências [7], [8] e [14].

Com base em [4], a resistência de cálculo da mesa à ruptura por tração uniforme é ϕR_t , sendo $\phi = 0,75$ o coeficiente de resistência e R_t a resistência nominal, dada por

$$R_t = b_f \cdot t_b \cdot f_u \quad (2.15)$$

b_f = largura da mesa

t_b = espessura da mesa

f_u = limite de resistência à tração do aço

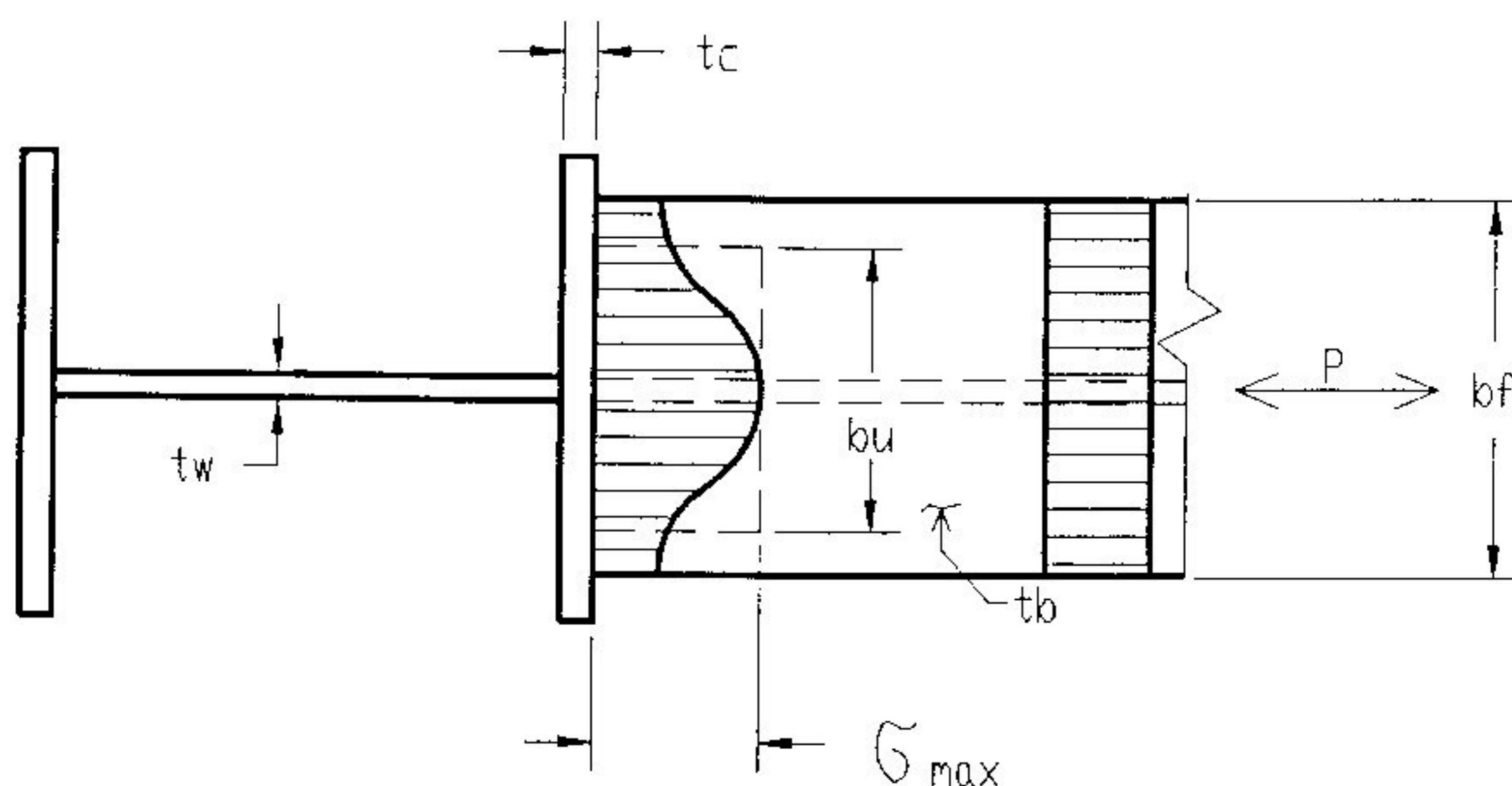


FIG 2-7

Também com base em [4] a resistência de cálculo ao esmagamento por compressão uniforme é ϕR_b , sendo $\phi = 0,75$ o coeficiente de resistência e R_b a resistência nominal, dada por

$$R_b = 1,5 b_f \cdot t_b \cdot f_y \quad (2.16)$$

b_f e t_b têm os mesmos significados anteriores

f_y = limite de escoamento do aço

Para levar em conta a distribuição não uniforme de tensões na largura, no caso de ligações soldadas, limita-se a força que a mesa pode introduzir na coluna sem enrijecedores (com enrijecedores opostos à mesa da viga não há esta limitação) em

$$F_{red} = 0,75 b_u \cdot t_b \cdot f_u \quad \text{para tração} \quad (2.17)$$

$$F_{red} = 0,75 \cdot 1,5 \cdot b_u \cdot t_b \cdot f_y \quad \text{para compressão} \quad (2.18)$$

A limitação baseia-se nos mesmos estados limites anteriores e as larguras úteis b_u , tais que $b_u \cdot t_b \cdot \sigma_{max} = P$ (fig. 2-7), são dadas por [7] :

$$b_u = 7t_c + 2t_w \quad \text{- tração} \quad (\text{para } f_y \leq 240 \text{MPa}) \quad (2.19)$$

$$b_u = 10t_c + 2t_w \quad \text{- compressão} \quad (\text{para } f_y \leq 240 \text{MPa}) \quad (2.20)$$

$$b_u = 5t_c + 2t_w \quad \text{- tração} \quad (\text{para } 240 \text{MPa} < f_y \leq 360 \text{MPa}) \quad (2.21)$$

$$b_u = 7t_c + 2t_w \quad \text{- compressão} \quad (\text{para } 240 \text{MPa} < f_y \leq 360 \text{MPa}) \quad (2.22)$$

Caso se obtenha $b_u > b_f$, faz-se $b_u = b_f$.

As soldas de ligação das mesas da viga com a coluna ou

com a chapa de cabeça devem ter resistência igual ou superior à da mesa, para que não se rompam devido às concentrações de tensões. Assim, para dois filetes de solda, deve-se ter:

$$\phi \cdot 2 \times 0,707 \cdot c \cdot 0,6 \cdot f_{uw} \geq 0,75 f_u \cdot t_b \quad (2.23)$$

$$\phi \cdot 2 \times 0,707 \cdot c \cdot 0,6 \cdot f_{uw} \geq 0,75 \times 1,5 \cdot f_y \cdot t_b \quad (2.24)$$

c = cateto do filete de solda

ϕ = coeficiente de resistência = 0,75 [4]

0,6f_{uw} = limite de resistência do metal da solda ao cisalhamento

f_{uw} = limite de resistência à tração do metal da solda.

2-6) RUPTURA DA SOLDA DA ALMA DA VIGA COM A COLUNA OU CHAPA DE CABEÇA

Esta solda tem por finalidade transmitir a força cortante da viga (como se viu nas considerações iniciais). A resistência de cálculo de dois filetes de solda, conforme [4], é ϕR_n , onde $\phi = 0,75$ é o coeficiente de resistência e R_n é a resistência nominal da solda à ruptura por cisalhamento, dada por (fig. 2-8):

$$R_n = 2 \cdot 0,707 \cdot c \cdot 0,6 \cdot f_{uw} (H_b - 2t_b - 2r) \quad (2.25)$$

Os significados de "c" e "f_{uw}" são os mesmos do item 2-5.

Como condição adicional, uma vez que a alma não está sendo considerada na transmissão de tensões normais, é necessário que a solda tenha resistência suficiente para permitir eventual escoamento da alma da viga, junto à mesa

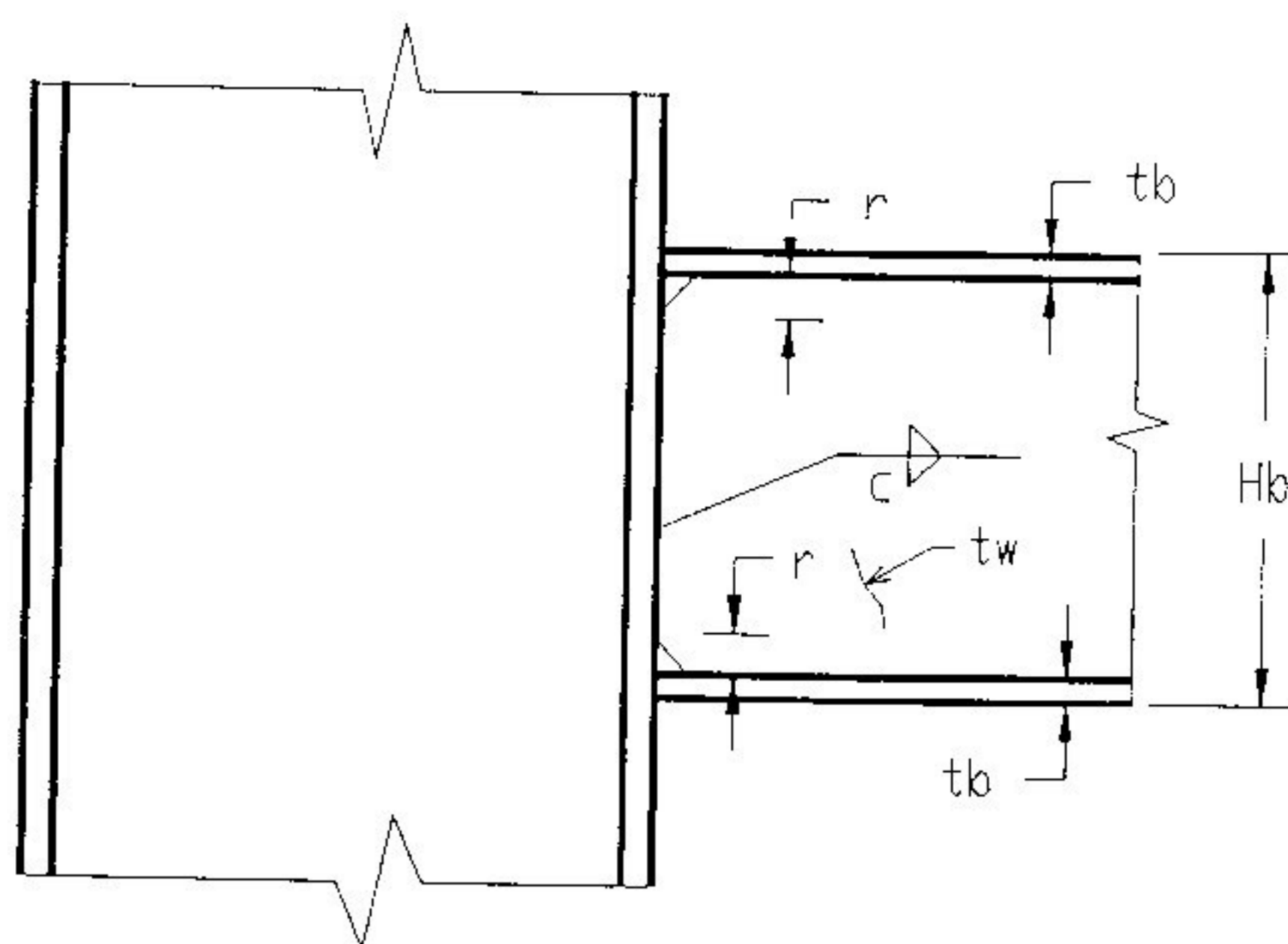


FIG 2-8

(uma vez que esta pode escoar devido à concentração de tensões). Esta condição se traduz por [4] (fig. 2-8):

$$\phi_s \cdot 2 \cdot 0,707 \cdot c \cdot 0,6 \cdot f_{uw} \geq \phi_y \cdot t_w \cdot f_y \quad (2.26)$$

$\phi_s = 0,75$ = coeficiente de resistência para ruptura da solda

$\phi_y = 0,9$ = coeficiente de resistência para escoamento do aço

"c" e "f_{uw}" têm os mesmos significados do item 2-5.

2-7) RUPTURA DA SOLDA DE COMPOSIÇÃO DO PERFIL SOLDADO

Na região da alma da coluna oposta a uma mesa de viga, a solda de composição é sujeita a tensões horizontais r_h , no comprimento definido em 2-2 (que depende da ligação ser soldada ou parafusada e da força introduzida ser de tração ou compressão). Essa solda é também sujeita a tensões verticais r_v causadas pela força cortante na coluna; as tensões r_v têm valores diferentes nas três regiões: entre

as mesas da viga, acima e abaixo delas. Tem-se, para dois filetes de solda:

$$\tau_h = F_b / (l_{at} \cdot 2 \cdot 0,707 \cdot c) \quad (2.27)$$

$$\tau_v \cong Q / (h \cdot 2 \cdot 0,707 \cdot c) \quad (2.28)$$

F_b = força introduzida na alma da coluna pela mesa da viga

l_{at} = comprimento de atuação de F_b na alma da coluna

c = cateto do filete de solda

Q = força cortante na coluna (a de maior valor absoluto dentre Q_s , Q_i , Q_r , conforme item 2-a)

h = distância entre faces internas das mesas da coluna

Com τ_h e τ_v determina-se a tensão resultante:

$$\tau_r = (\tau_h^2 + \tau_v^2)^{1/2}, \quad (2.29)$$

que deve ser igual ou inferior à resistência de cálculo, dada por $\phi \cdot 0,6 \cdot f_{uw}$, onde " ϕ " e " f_{uw} " têm os mesmos significados do item 2-5

2-8) RUPTURA DOS PARAFUSOS POR TRAÇÃO (V. APENDICE A1)

Com base em [9] e [10], o efeito de alavanca nos parafusos pode ser considerado igual a 1/3 da força externa aplicada, no caso em estudo. Assim, sendo T_b a força de tração aplicada pela mesa da viga na chapa de cabeça, a força de tração por parafuso (com 4 por mesa), incluindo efeito de alavanca, é

$$(4/3) T_b / 4 = T_b / 3 \quad (2.30)$$

A resistência de cálculo de um parafuso à tração, conforme [4] é ϕR_{pt} , sendo $\phi = 0,75$ o coeficiente de

resistência e R_{pt} a resistência nominal, dada por

$$R_{pt} = 0,75(\pi d^2/4)f_{up} \quad (2.31)$$

d = diâmetro do parafuso

f_{up} = limite de resistência do material do parafuso à tração.

Neste trabalho considera-se somente o uso de parafusos de alta resistência ASTM A325 e ASTM A490, que são sempre montados com protensão inicial.

2-9) PLASTIFICAÇÃO LOCAL DA CHAPA DE CABEÇA, POR FLEXÃO, DEVIDA À FORÇA DE TRAÇÃO INTRODUZIDA

Com base em [2], para obter uma chapa de cabeça com resistência à flexão independente do efeito de alavanca (chapa rígida), toma-se como momento fletor de cálculo (fig. 2-9):

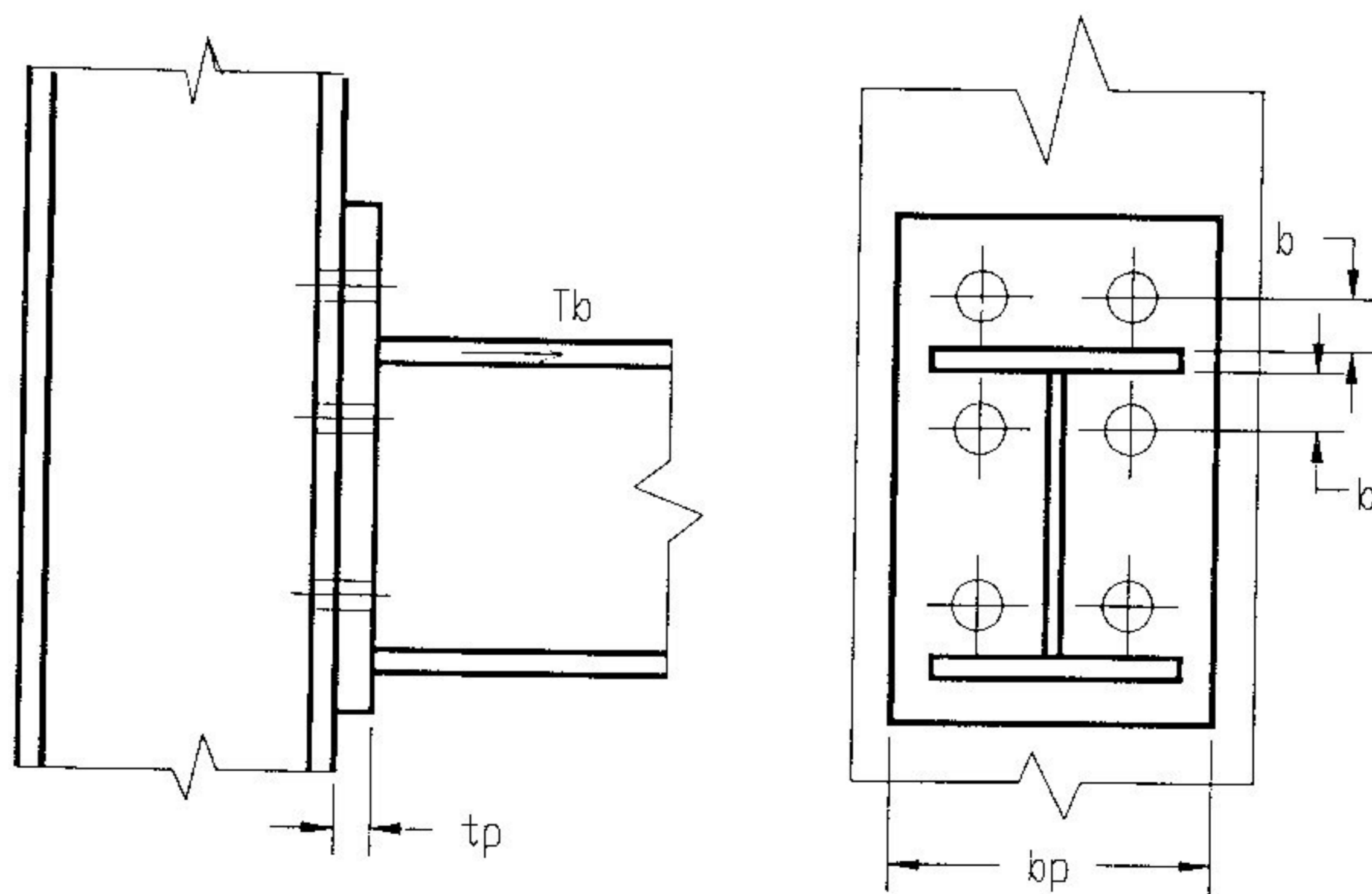


FIG 2-9

$$M_{ch} = (T_b/2)(b-0,5d), \text{ onde} \quad (2.32)$$

d = diâmetro do parafuso

A resistência de cálculo da chapa de cabeça ao momento fletor, conforme [4], é ϕR_n , sendo $\phi = 0,9$ o coeficiente de resistência e R_n a resistência nominal, dada por (estado limite plastificação local):

$$R_n = Z \cdot f_y = (b_p \cdot t_p^2 / 4) f_y \quad (2.33)$$

b_p, t_p - conforme figura 2-9

2-10) ESTADOS LIMITES APLICÁVEIS AOS ENRIJECEDORES

As resistências de cálculo abaixo são baseadas em [4] e a fig. 2-10 complementa a definição dos elementos envolvidos.

2-10-1) RUPTURA POR TRAÇÃO E ESMAGAMENTO POR COMPRESSÃO, DA SEÇÃO LÍQUIDA

A solicitação de cálculo é a parcela de F_b que não pode ser absorvida diretamente pela coluna (sem enrijecedores); a resistência de cálculo é ϕR_{nt} para tração e ϕR_{nb} para compressão, sendo $\phi = 0,75$ o coeficiente de resistência e R_{nt} e R_{nb} as resistências nominais à ruptura por tração e esmagamento por compressão, respectivamente, dadas por:

$$R_{nt} = (l_t) t_1 \cdot f_u \quad (2.34)$$

$$R_{nb} = (l_b) t_1 \cdot 1,5 f_y \quad (2.35)$$

" l_t " e " l_b " são os comprimentos de atuação da força nos

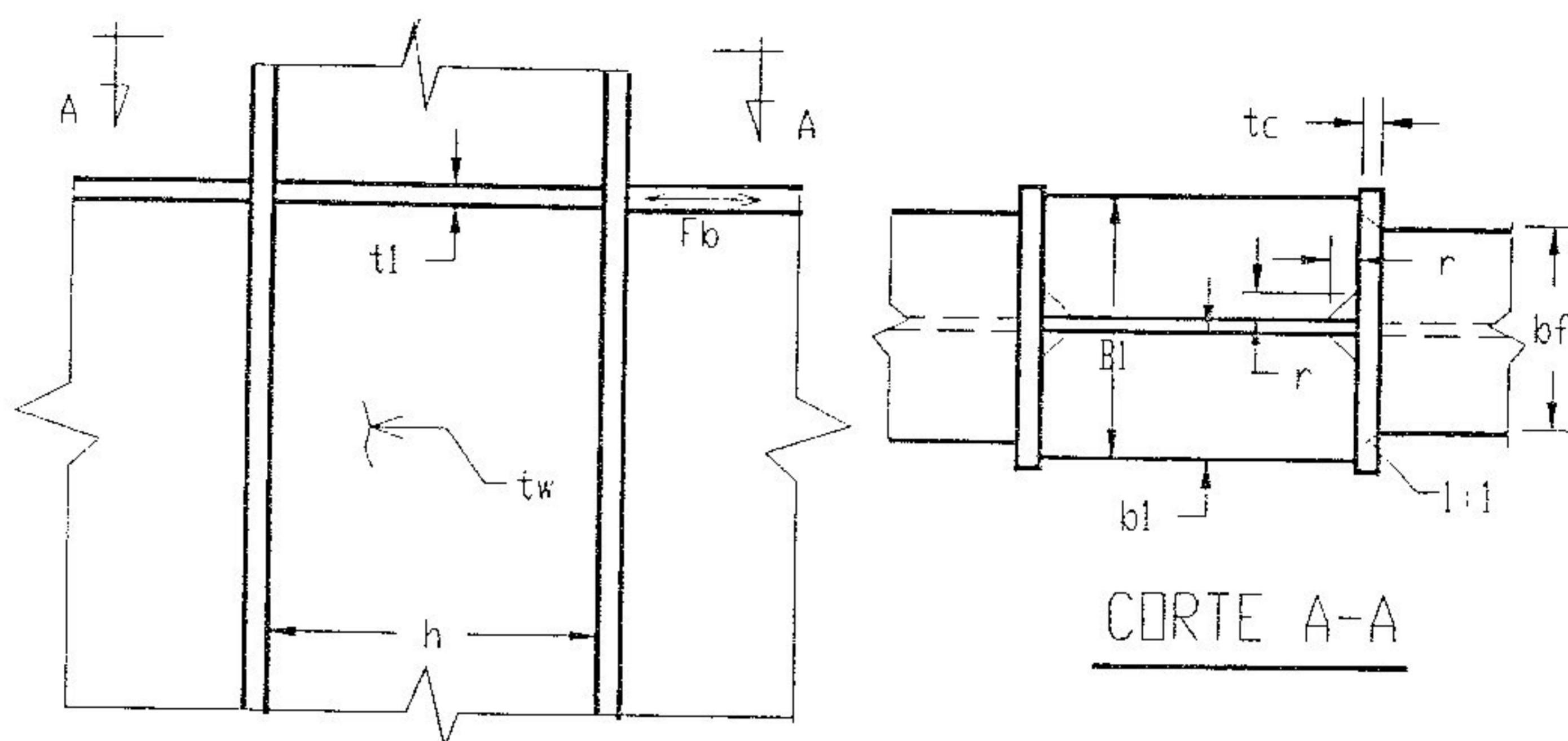


FIG 2-10

enrijecedores, de maneira geral iguais à largura da mesa da viga que introduz a força, subtraída da largura "bu" definida em 2-5 se a ligação for soldada (para explicação mais detalhada ver itens 4-3-2-5 e 4-3-2-6). Pode-se considerar que a largura resultante seja aumentada através de aberturas a 45° até atingir a extremidade dos enrijecedores, porém, descontando os recortes "r" e a espessura "tw".

2-10-2) ESCOAMENTO DA SEÇÃO BRUTA POR TRAÇÃO

Com a mesma solicitação de cálculo definida em 2-10-1, a resistência de cálculo é ϕR_{nt} , sendo $\phi = 0,9$ o coeficiente de resistência e R_{nt} a resistência nominal, dada por:

$$R_{nt} = 2b_1 \cdot t_1 \cdot f_y \quad (2.36)$$

2-10-3) FLAMBAGEM POR COMPRESSÃO

Com a mesma solicitação de cálculo definida em 2-10-1, a resistência de cálculo é ϕR_{nb} , sendo $\phi = 0,9$ o coeficiente de resistência e R_{nb} a resistência nominal, dada por:

$$R_{nb} = Q \cdot \rho \cdot A_g \cdot f_y \quad (2.37)$$

A_g = área bruta do par de enrijecedores = $2b_1 \cdot t_1$

Q = coeficiente relacionado com a flambagem local dos enrijecedores

$$Q = 1,0, \text{ para } b_1/t_1 \leq 0,55(E/f_y)^{1/2}$$

$$Q = 1,42 - 0,76(b_1/t_1)(f_y/E)^{1/2},$$

$$\text{para } 0,55(E/f_y)^{1/2} < b_1/t_1 \leq 1,02(E/f_y)^{1/2}$$

$$Q = 0,67E/[f_y(b/t)^2], \text{ para } b_1/t_1 > 1,02(E/f_y)^{1/2}$$

ρ = coeficiente relacionado com a flambagem do par de enrijecedores em relação a um eixo no plano médio da alma da coluna

$$\rho = 1,0, \text{ para } \lambda \leq 0,20$$

$$\rho \cong \beta - (\beta^2 - 1/\lambda^2)^{1/2}, \text{ para } \lambda > 0,20$$

$$\beta = [1 + \alpha(\lambda^2 - 0,04)^{1/2} + \lambda^2] / (2\lambda^2)$$

$$\lambda = (Q \cdot f_y / F_e)^{1/2}$$

$\alpha = 0,384$ para $t_1 \leq 4\text{cm}$ e $0,572$ para $t_1 > 4\text{cm}$ (por analogia com flambagem de perfis I, relativa ao eixo Y-Y)

F_e = tensão de Euler = $\pi^2 E / (h/r_y)^2$ (considerando cargas de compressão em ambas as extremidades dos enrijecedores - do lado da segurança quando existe viga só de um lado da coluna)

r_y = raio de giração, em relação a um eixo no plano médio da

alma da coluna, da seção em cruz formada pelo par de enrijecedores mais um trecho da alma da coluna com altura de $25t_w$: $r_y \cong [(t_1 \cdot B_1^3 / 12) / (2b_1 \cdot t_1 + 25t_w^2)]^{1/2}$

2-10-4) RUPTURA DA SEÇÃO LÍQUIDA (E DA SOLDA CORRESPONDENTE)
E ESCOAMENTO DA SEÇÃO BRUTA, POR CISALHAMENTO EM
SEÇÕES PARALELAS À ALMA DA COLUNA

A solicitação de cálculo, para estes estados limites, é a resultante das parcelas das forças, nas mesas das vigas à esquerda e à direita, que não podem ser absorvidas diretamente pela coluna.

A resistência de cálculo para o estado limite ruptura por cisalhamento da seção líquida paralela à alma da coluna é ϕR_{vn} , sendo $\phi = 0,75$ o coeficiente de resistência e R_{vn} a resistência nominal, dada por:

$$R_{vn} = 2(h-2r)t_1 \cdot (0,6f_u) \quad (2.38)$$

A resistência de cálculo para o estado limite escoamento por cisalhamento da seção bruta paralela à alma da coluna é ϕR_{vn} , sendo $\phi = 0,9$ o coeficiente de resistência e R_{vn} a resistência nominal, dada por:

$$R_{vn} = 2h \cdot t_1 \cdot (0,6f_y) \quad (2.39)$$

A resistência de cálculo para o estado limite ruptura da solda de ligação do par de enrijecedores com a alma da coluna é ϕR_n , sendo $\phi = 0,75$ o coeficiente de resistência e R_n a resistência nominal, dada por (para soldas de filete duplo):

$$R_n = 4.0,707c(h-2r)(0,6f_{uw}) \quad (2.40)$$

c = cateto do filete de solda

f_{uw} = limite de resistência à tração do metal da solda

2-10-5) RUPTURA DAS SOLDAS DE LIGAÇÃO DOS ENRIJECEDORES COM AS MESAS DA COLUNA

Sejam F_1 e F_2 as parcelas das forças, nas mesas das vigas à direita e à esquerda, respectivamente, que não podem ser absorvidas diretamente pela coluna (fig. 2-11).

A força por unidade de comprimento do cordão de solda, paralela a F_1 (ou F_2), é obtida dividindo F_1 (ou F_2) pelo comprimento de atuação (" l_t " para tração e " l_b " para compressão, conforme item 2-10-1); assim, para F_1 de tração, por exemplo, ter-se-ia:

$$F_{hu1} = F_1/l_t \quad (2.41)$$

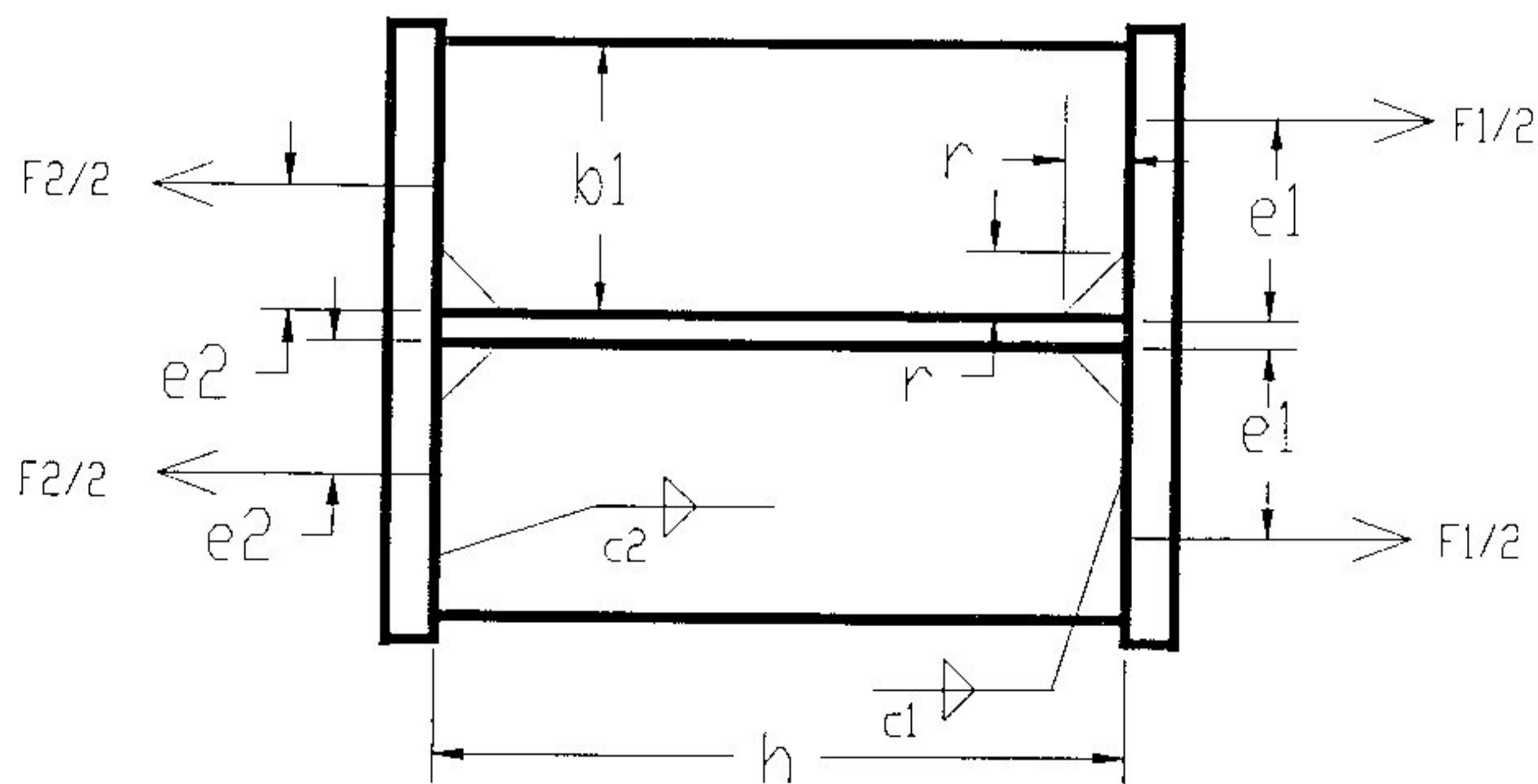


FIG 2-11

F_{hu1} = força por unidade de comprimento do cordão de solda, na extremidade direita do par de enrijecedores, paralela a F_1 , para F_1 de tração.

De maneira análoga seria obtida a força por unidade de comprimento paralela a F_2 , na extremidade esquerda do par de enrijecedores.

Os cordões de solda estão sujeitos também a forças perpendiculares às anteriores, devidas às excentricidades de $F_1/2$ e $F_2/2$ em relação à ligação entre enrijecedores e alma da coluna.

Chamando estas forças, por unidade de comprimento do cordão de solda, de F_{vu} , tem-se (fig. 2-11):

$$F_{vu} = [(F_1/2)e_1 - (F_2/2)e_2] / [h(b_1 - r)] \quad (2.42)$$

Tomando como exemplo a extremidade direita do par de enrijecedores ter-se-ia, por unidade de comprimento, a força resultante

$$F_{ru1} = (F_{hu1}^2 + F_{vu}^2)^{1/2} \quad (2.43)$$

A resistência de cálculo correspondente, considerando o estado limite ruptura da solda, é ϕR_n , sendo $\phi = 0,75$ o coeficiente de resistência e R_n a resistência nominal, dada por (para solda de filete duplo):

$$R_n = 2.0,707.c_1.0,6f_{uw} \quad (2.44)$$

c_1 = cateto do filete de solda

f_{uw} = limite de resistência à tração do metal da solda

3-MODELO DE NÓ PARA CONSIDERAÇÃO DA RIGIDEZ DA LIGAÇÃO

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em trabalhos anteriores [8] procurava-se representar a rigidez de uma ligação através de uma mola entre a viga e a coluna, considerando o nó como um ponto - o de interseção dos eixos da viga e da coluna. Através desta representação não é possível simular corretamente o comportamento da ligação. Com um modelo deste tipo não se pode levar em conta a deformação da alma da coluna por cisalhamento, entre as mesas das vigas (fig. 3-1).

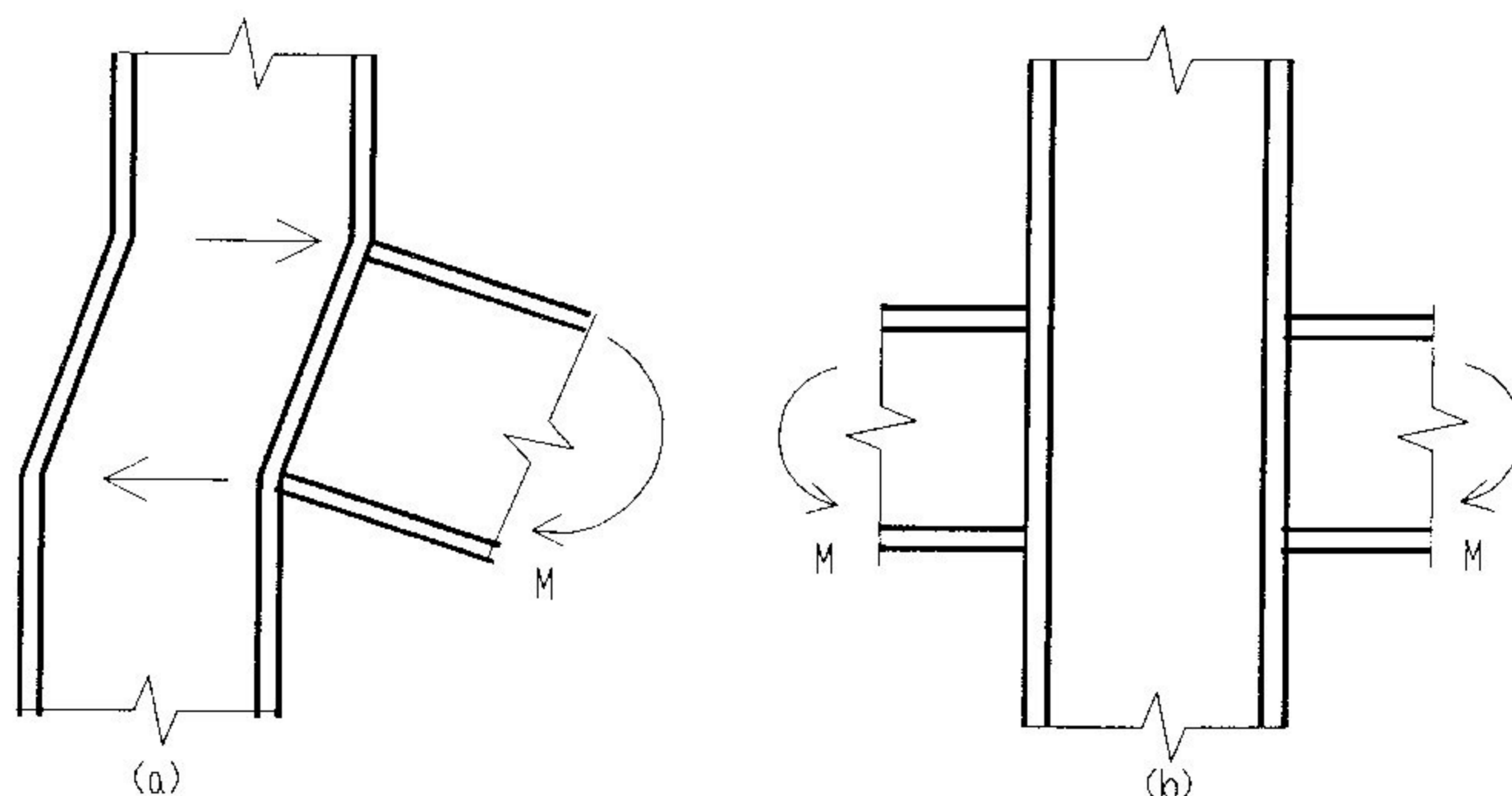


FIG 3-1

Isto porque, caso se colocasse uma mola para cada ligação, para representar tal deformação, como na fig. 3-2,

ter-se-iam deformações das molas independentes de haver momento desequilibrado (fig 3-1-a) ou não (fig. 3-1-b), o que não corresponde à realidade (ver fig. 3-1-b).

Para se contornar esta dificuldade é necessário representar o nó por suas dimensões reais, como se verá a seguir.

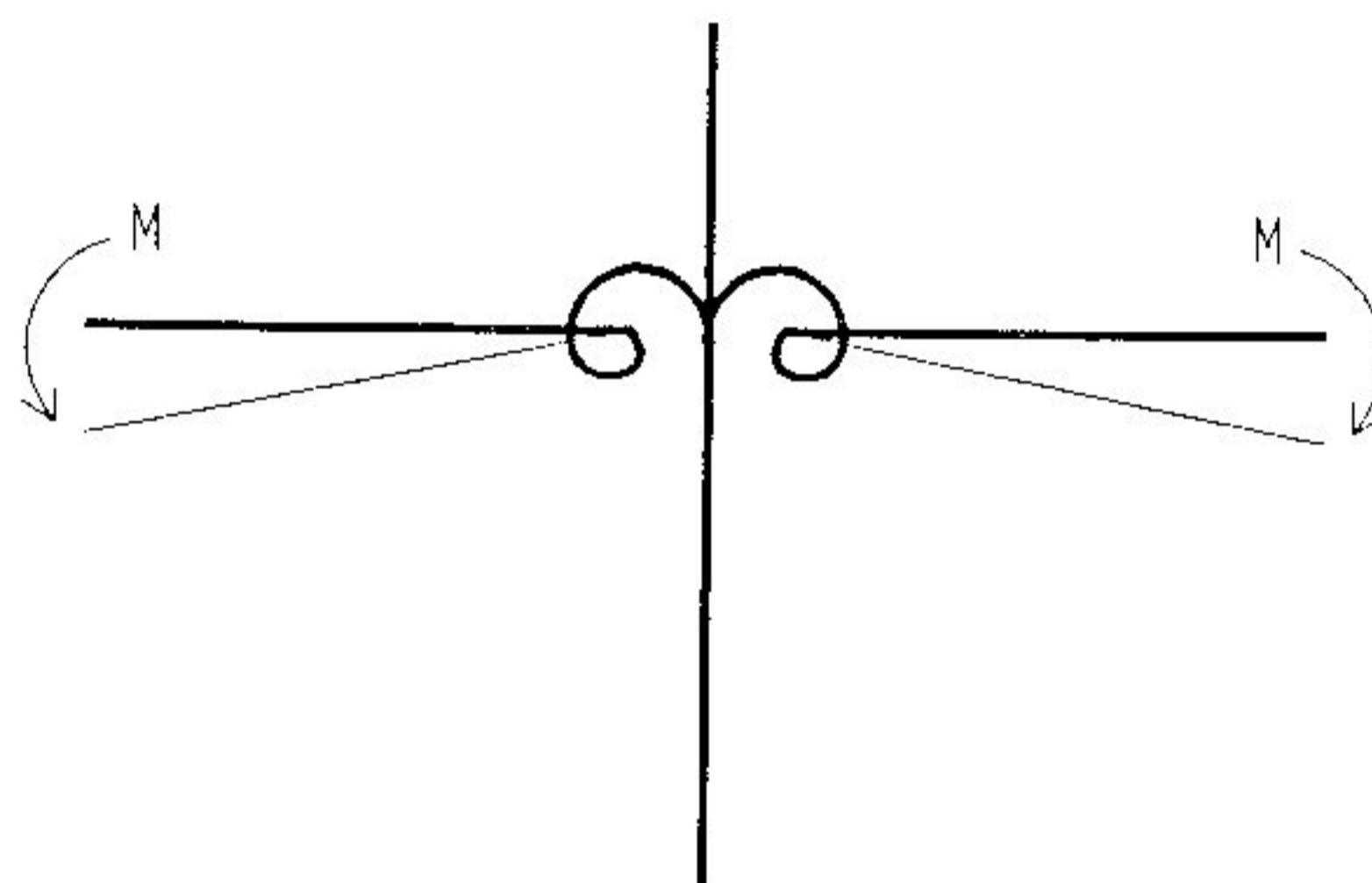


FIG 3-2

3-1) MODELO PROPOSTO

Na referência [1] é utilizado o modelo representado na fig. 3-3.

As molas "a" representam a flexibilidade da ligação entre a viga e a face da coluna e são denominadas em [1] de molas de ligação. As molas "b" representam a flexibilidade da região interna da coluna, oposta a qualquer mesa de viga que introduza força de tração ou de compressão na coluna e são denominadas em [1] de molas de introdução. A moia "c"

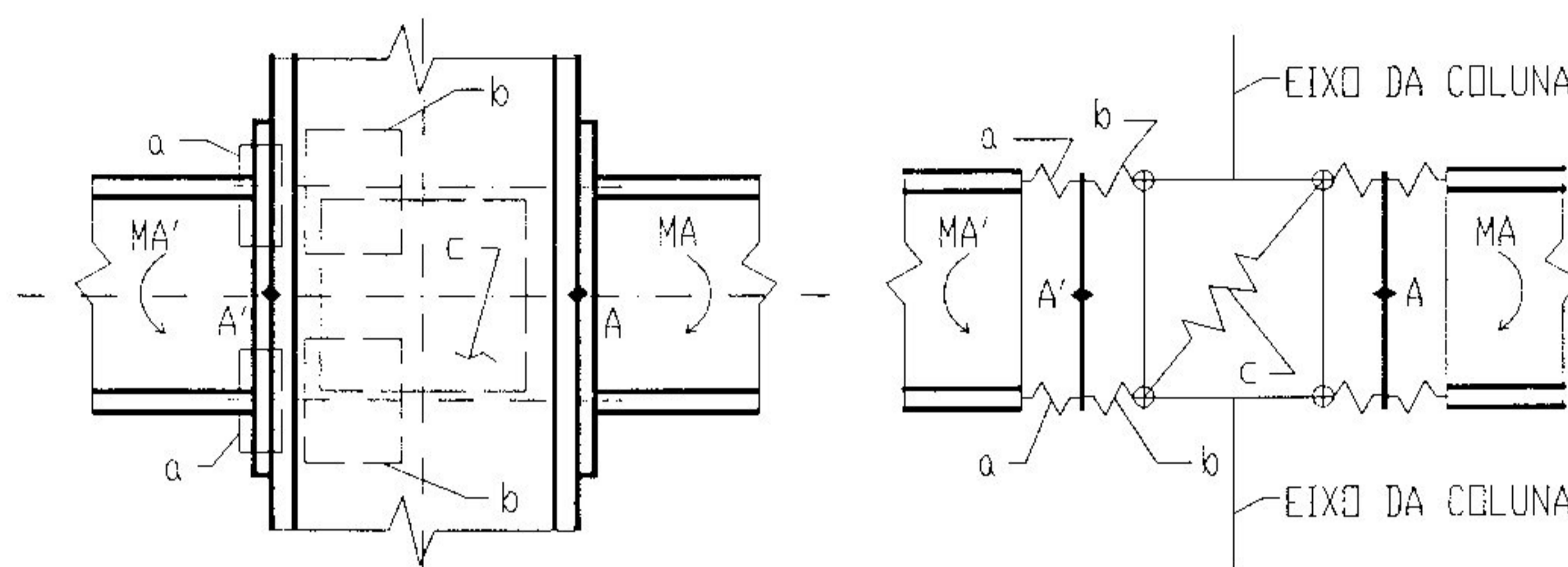


FIG 3-3

representa a flexibilidade da coluna para o cisalhamento resultante entre as mesas das vigas e é denominada em [1] de mola de cisalhamento.

As molas "a" e "b" reagem ao momento MA (lado direito) ou ao momento MA' (lado esquerdo), enquanto a mola "c" reage a $\Delta M = MA - MA'$.

Com base no modelo citado, foram realizados vários trabalhos na Universidade de Innsbruck (Áustria) para determinar constantes de mola dos 3 tipos no regime elástico e analisar o comportamento inelástico do nó, para combinações usuais de vigas e colunas feitas com perfis laminados europeus. Os parâmetros determinados foram organizados em forma de tabelas e o modelo de nó foi utilizado para desenvolver um programa de computador para análise inelástica de pórticos, levando em conta o comportamento dos nós.

Para que possam ser utilizados programas disponíveis de análise elástica de pórticos, propõe-se neste trabalho o modelo representado na fig. 3-4, que é uma adaptação do já descrito [1]. No modelo proposto as molas de ligação e introdução foram associadas em uma só (mola "ab"), com flexibilidade igual à soma das flexibilidades das molas "a" e "b" anteriores (que trabalham em série).

A mola "c" anterior foi substituída pela exigência de se definir a área da seção da coluna que reage à força cortante (área da alma do perfil I), no trecho UL. As barras BC e B'C' são rígidas e rigidamente ligadas aos eixos das vigas correspondentes e permitem introduzir o momento da viga através dos centros das mesas. As barras AO e A'O são também rígidas, rigidamente ligadas ao eixo da coluna e rotuladas com deslizamento horizontal em A e A', respectivamente; sua finalidade é receber as forças cortantes das vigas,

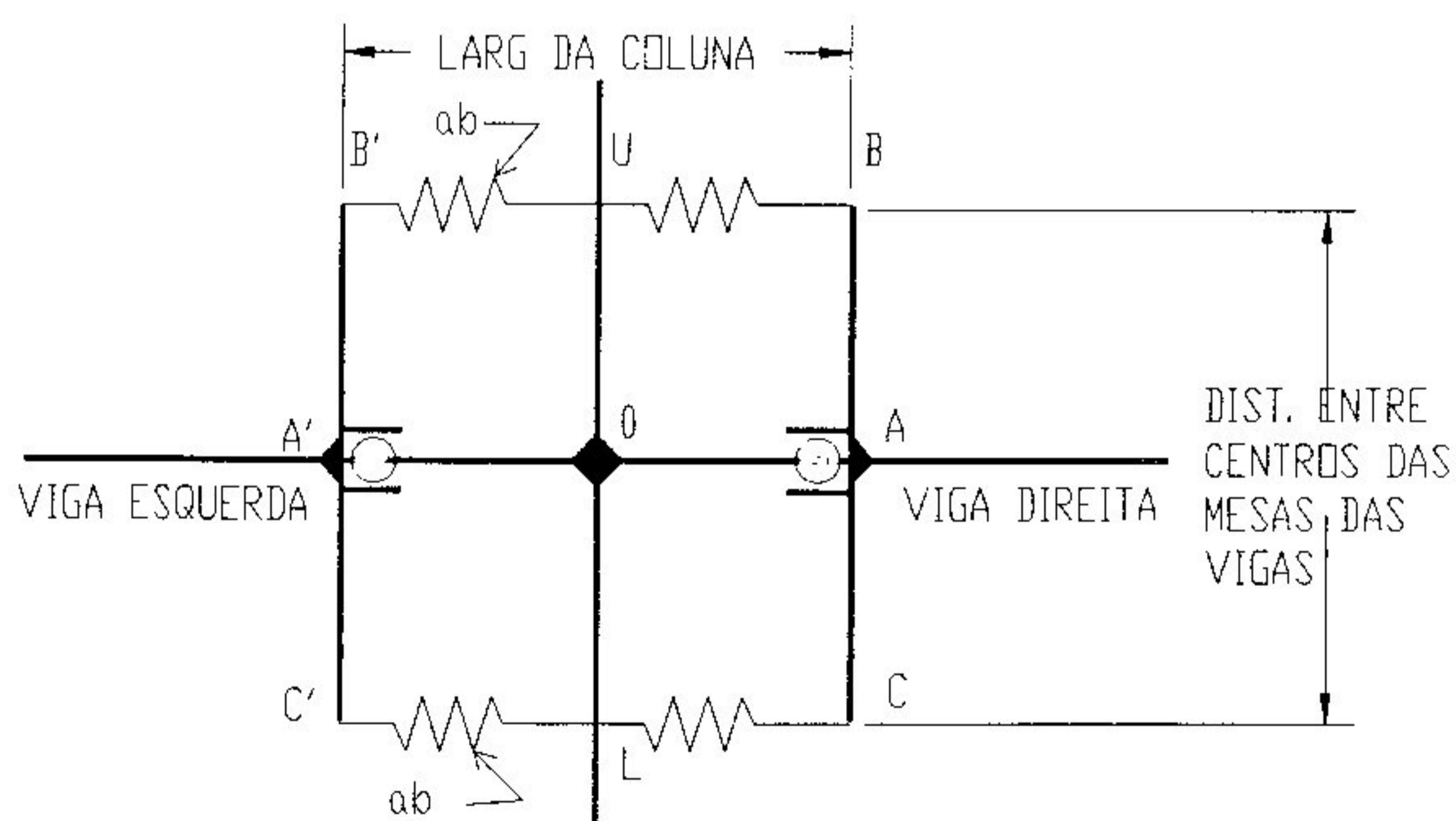


FIG 3-4

aplicadas nas faces da coluna, e transferi-las para o eixo da coluna.

Com este modelo retrata-se fielmente a hipótese de introdução de esforços solicitantes apresentada nas considerações iniciais do capítulo 2 e ilustrada na fig. 2-1. O deslizamento previsto em A e A' faz com que eventuais forças normais nas vigas sejam também introduzidas através das mesas.

3-2) CONSTANTES DE MOLA

3-2-1) MOLA DE CISCALHAMENTO

De acordo com [1] e [15], no campo elástico basta considerar a rigidez da alma da coluna para avaliar deformações causadas pela força cortante (na zona inelástica é considerada a contribuição das mesas). Assim, tem-se (fig. 3-5):

$$\tau = F/(h.twc) \quad (3.1)$$

$$\gamma = \tau/G = F/[G(h.twc)] \quad (3.2)$$

Para $\Delta M = F.hv$

$$c_{eq} = \Delta M/\gamma = hv(h.twc)G, \quad (3.3)$$

expressão similar à eq. (8) da ref. [1].

Nas expressões anteriores:

γ = distorção por cisalhamento

τ = tensão de cisalhamento na alma da coluna

G = módulo transversal de elasticidade

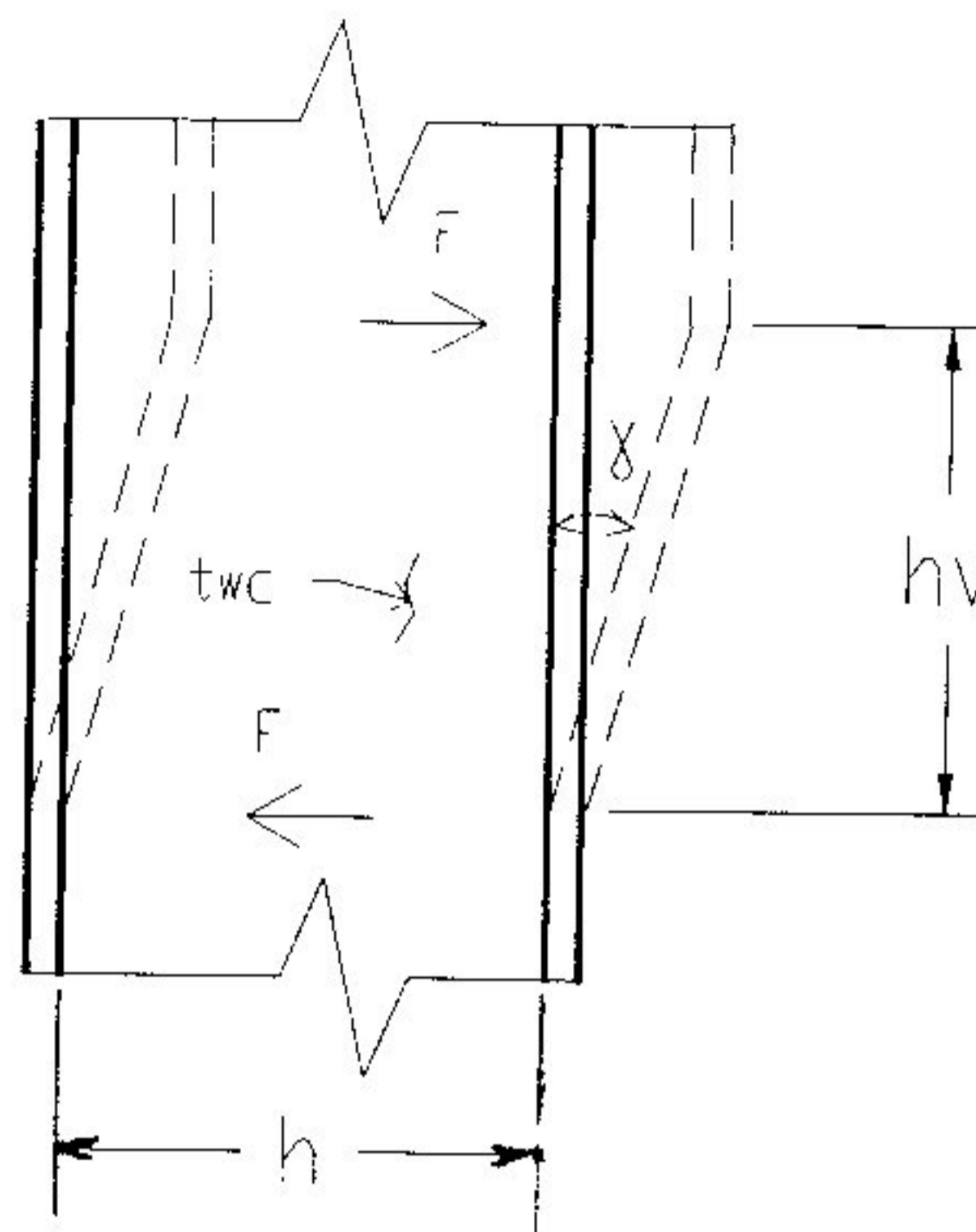


FIG 3-5

ΔM = resultante dos momentos aplicados pelas vigas da direita e da esquerda.

De acordo com o exposto fica claro que, usando para o trecho LU do modelo proposto (fig. 3-4) uma área resistente ao cisalhamento igual a $h \cdot twc$ (área da alma da coluna), o próprio programa de análise elástica de pórticos determinará a deformação correta para força cortante na coluna entre mesas das vigas.

3-2-2) MOLA DE LIGAÇÃO

Esta mola só existe para o caso de força de tração e ligação parafusada com chapa de cabeça, uma vez que para força de compressão ou ligação soldada não existem elementos flexíveis entre a viga e a coluna ([1], [15]).

Foi demonstrado através de vários ensaios realizados por

Humer [16], conforme citado em [1], [15] e [17], que, utilizando chapa de cabeça rígida e quatro parafusos para transmitir a tração, a deformação é praticamente a mesma para força de tração ou de compressão introduzida. Em outras palavras, a soma das flexibilidades das molas de ligação e de introdução de uma ligação parafusada tracionada conforme descrito é praticamente igual à flexibilidade da mola de introdução de uma ligação soldada. A flexibilidade acrescentada pelos parafusos e pela chapa de cabeça é compensada pela maior rigidez da mola de introdução, já que a força introduzida é mais distribuída na coluna (comparar fig. 2-4 e fig. 2-5).

Conforme assinalado em [1], [15] e [16], a resistência à tração da ligação pode ser aumentada através de chapas de reforço colocadas na face interna da mesa da coluna; entretanto, a rigidez da ligação no regime elástico não é afetada de forma considerável por estas chapas.

Para garantir o comportamento descrito é necessário que a chapa de cabeça resista à flexão sem a colaboração do efeito de alavanca [16]. Neste trabalho a chapa de cabeça será dimensionada com base nos coeficientes de segurança da NBR8800 [4], desprezando-se o efeito de alavanca, e considerar-se-á que a distância entre o ponto de atuação da força do parafuso e a mesa da viga pode ser reduzida de $0,5d$, conforme [2], sendo d o diâmetro do parafuso.

Do exposto conclui-se que, tanto para ligações soldadas quanto para ligações parafusadas, a constante da mola "ab"

(fig. 3-4) pode ser tomada igual à constante da mola de introdução de uma ligação soldada.

3-2-3) MOLA DE INTRODUÇÃO

Para diversas combinações usuais de vigas e colunas de perfis laminados europeus, concluiu-se que a constante de mola para a mola de introdução tem um valor médio de 12000kN/cm [1], para tração ou compressão, em ligações soldadas. Para colunas de perfis soldados faltam informações a respeito, mas, dada a grande variedade de proporções possíveis da seção transversal, fica claro que não seria possível utilizar um valor único para essa constante de mola. É necessário estabelecer critério adequado através de pesquisas futuras.

Quando se usa um par de enrijecedores em oposição à mesa da viga, conforme fig. 2-10, a constante de mola passa a ser [1], [15]:

$$cb' = cb(1 + A_{enr}/A_o) \quad (3.4)$$

$cb = 12000\text{kN/cm}$ (para colunas de laminado europeu)

$A_{enr} = 2b_1.t_1$ (fig. 3-6)

$A_o = l_o.t_wc$ (fig. 3-6)

$l_o = t_b + 2b_s + 2t_c$ (fig. 3-6)

Para determinar experimentalmente a constante de mola da mola de introdução, os ensaios [1] foram realizados conforme esquemas da fig. 3-7. Como a solicitação das vigas é simétrica, não existe a componente de deformação por

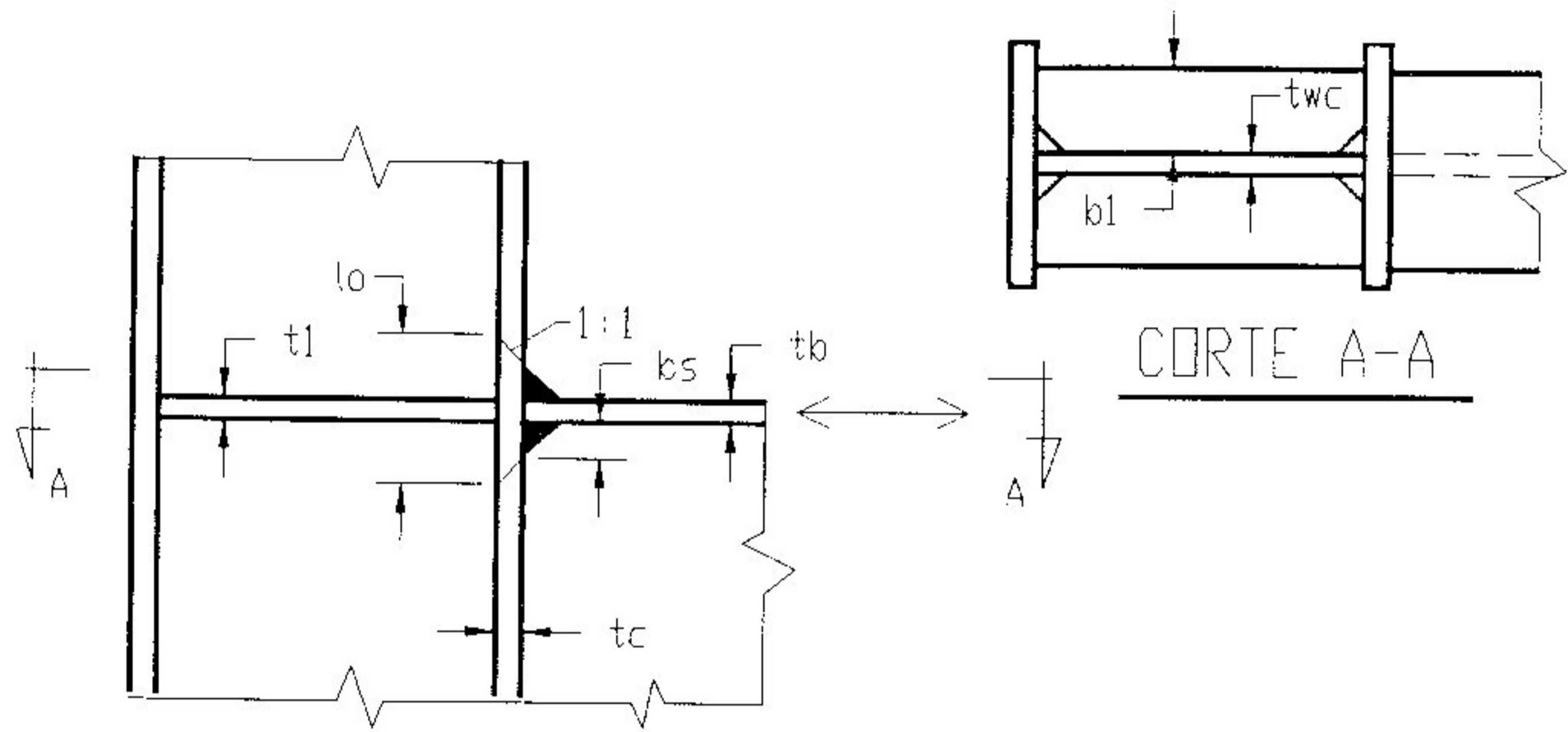


FIG 3-6

cisalhamento da alma da coluna.

Caso se conheça a relação M/θ de uma ligação, na situação da fig. 3-8, determina-se a constante de mola da mola de introdução com:

$$F = M/h \tag{3.5}$$

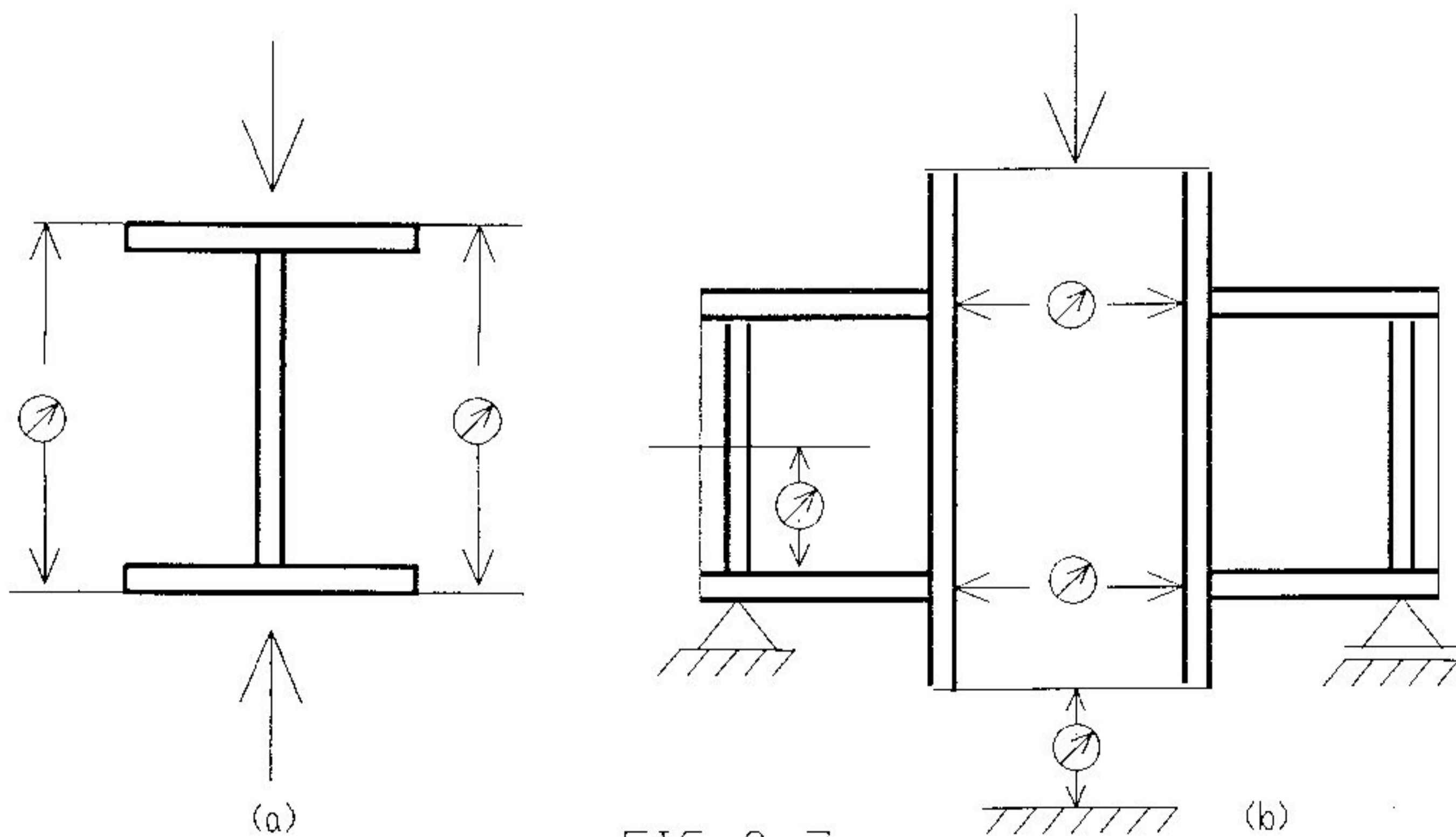


FIG 3-7

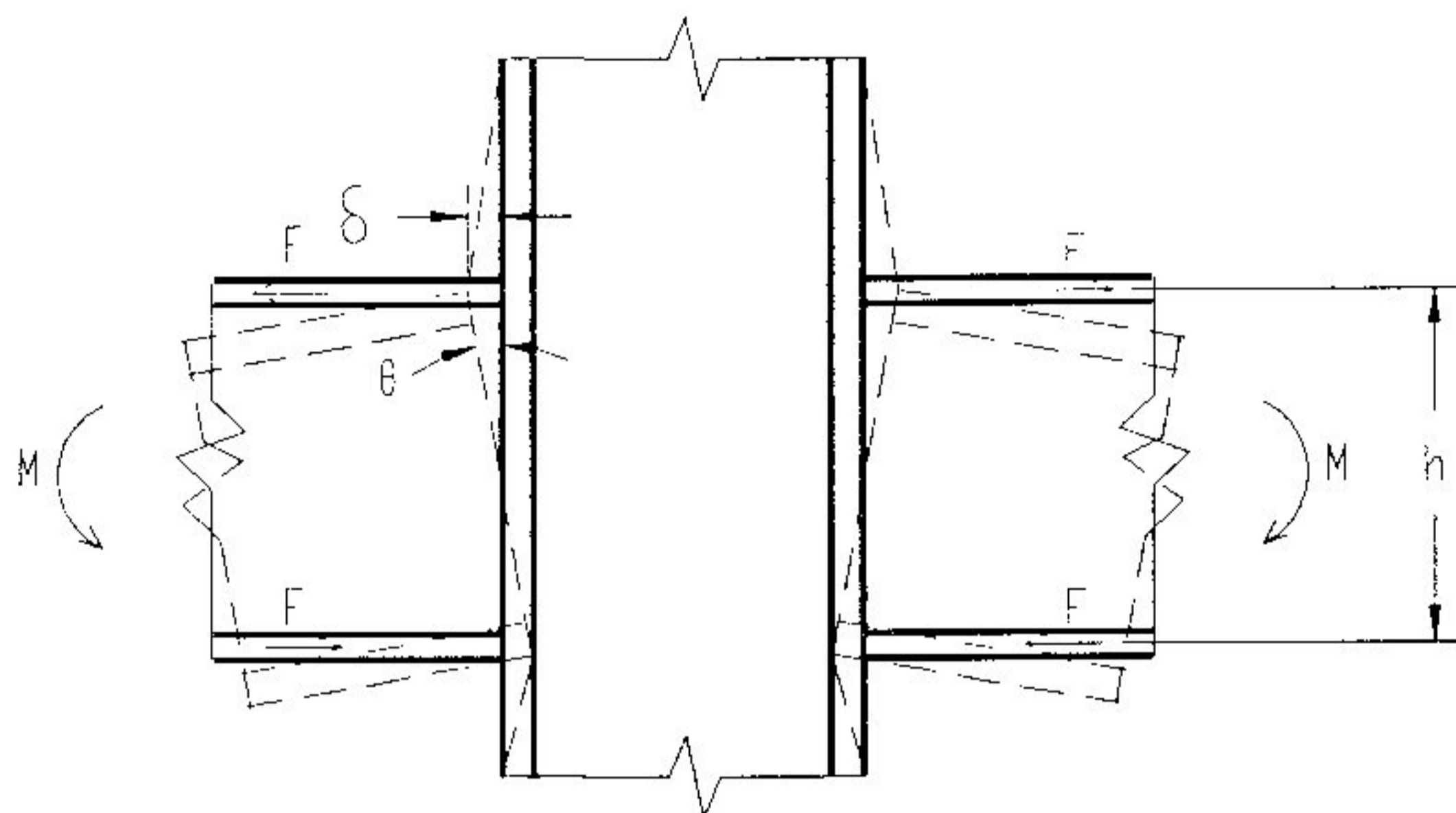


FIG 3-8

$$\delta = (h/2)\theta \quad (3.6)$$

$$c = F/\delta = 2(M/\theta)/h^2 \quad (3.7)$$

É importante observar que, mesmo em ensaios com vigas curtas, a deformação própria das vigas influi consideravelmente na deformação final do sistema testado e deve ser descontada quando somente a última for medida. No sistema da fig.3-7-b, por exemplo, a rotação na extremidade da viga ou o recalque vertical da coluna resultam de deformações da ligação (molas de introdução), e das vigas, entre o apoio e a face da coluna.

4-PROGRAMA DE COMPUTADOR

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa desenvolvido a seguir fornece todas as informações necessárias para a execução de ligações rígidas entre viga e coluna, dos tipos totalmente soldada (fig. 1-2-a) e parafusada com chapa de cabeça estendida (fig. 1-2-b), já descritos no capítulo 1. São previstas vigas de ambos os lados da coluna ou de um só lado, com ângulo entre eixo da coluna e eixo da viga na faixa de 70° a 110° (para atender a telhados com inclinação até 20°). Quando há vigas de ambos os lados da coluna, elas devem ter mesma altura e ser simetricamente inclinadas, com eixos encontrando o eixo da coluna num só ponto (fig. 4-1), evitando, assim, situações muito diferentes das encontradas na bibliografia e revisão das hipóteses feitas neste trabalho.

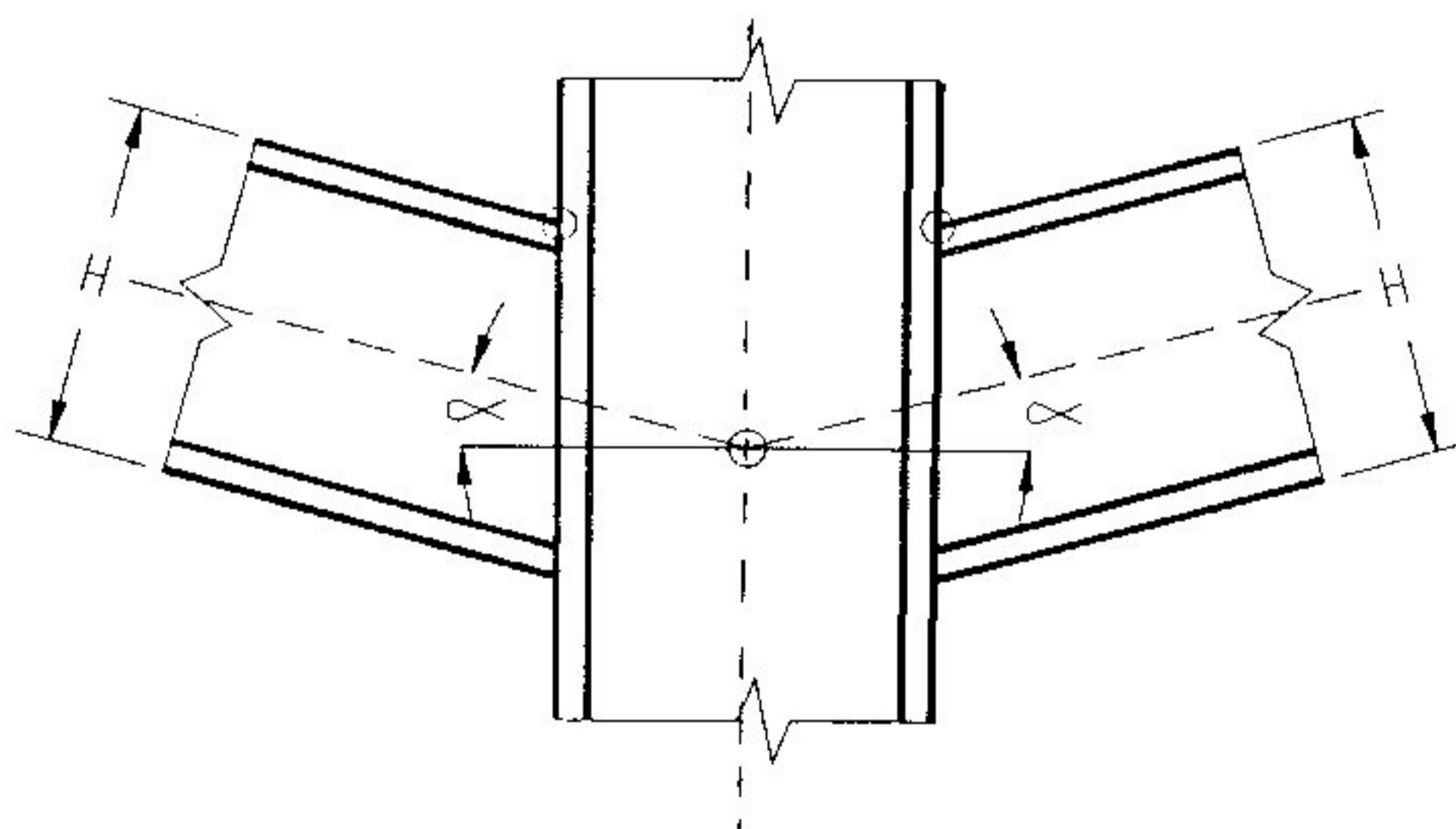


FIG 4-1

O programa fornece também as constantes de mola das molas de introdução, na coluna, das forças atuantes nas mesas da viga (já descritas no cap. 3).

Caso solicitado pelo usuário, são também fornecidas as principais solicitações e resistências de cálculo envolvidas na análise da ligação.

Para ligações parafusadas, quando nenhuma condição de carregamento produz tração em uma mesa de viga, são previstos apenas 2 parafusos junto a esta mesa, lado interno da viga (fig. 4-2); neste caso não é determinada a constante de mola para tração e nem tampouco qualquer resistência de cálculo da ligação para tração na referida mesa.

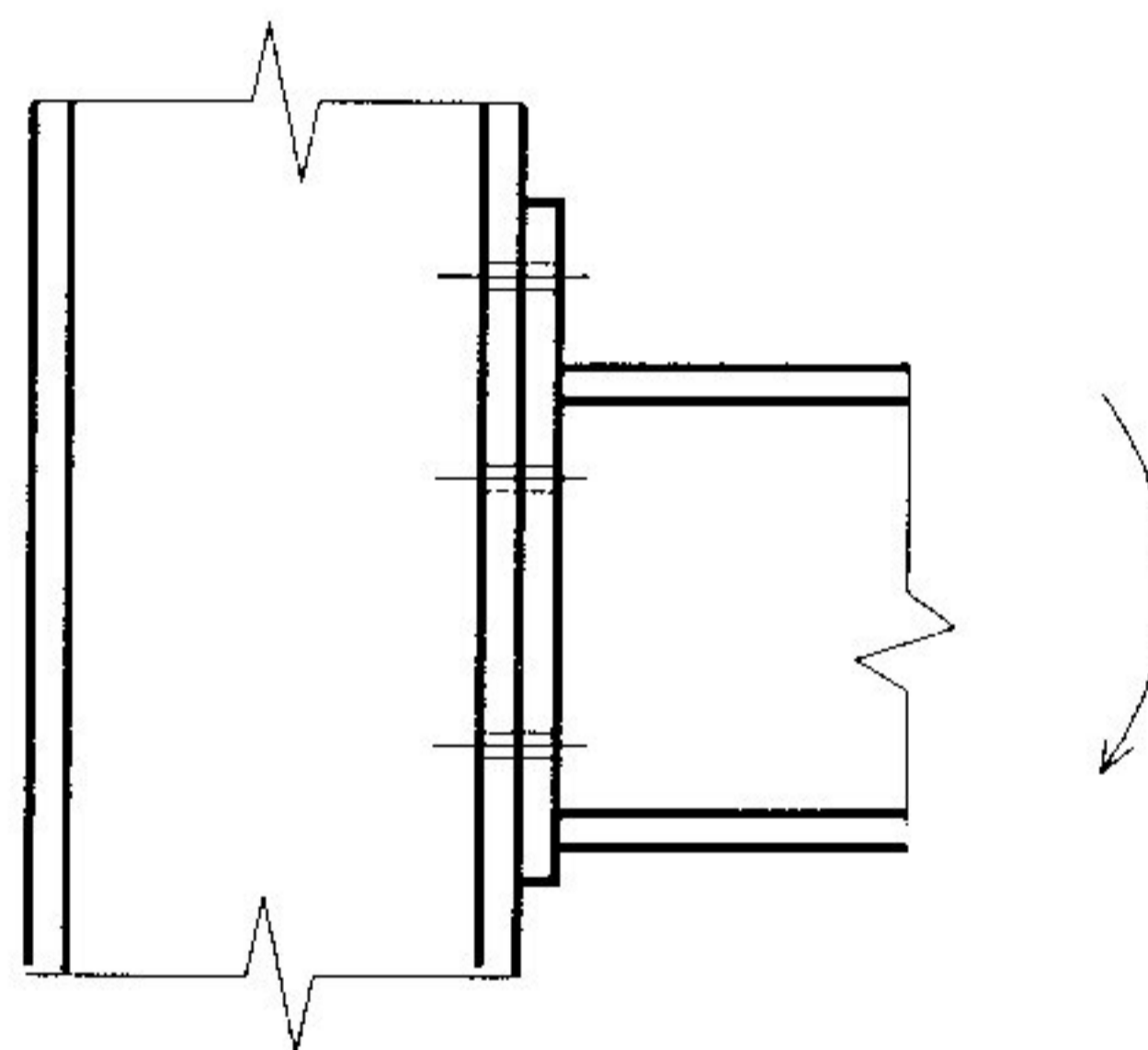


FIG 4-2

Para garantir exequibilidade e/ou para atender à NBR8800 [4] e/ou para assegurar a aplicabilidade de alguns cálculos utilizados, foram estabelecidas as restrições abaixo relacionadas, aplicáveis aos dados de entrada (fig. 4-3) :

- a) $b_{fe} \leq b_{fc}$ $b_{fd} \leq b_{fc}$
- b) $b_{fc} \leq H_c$

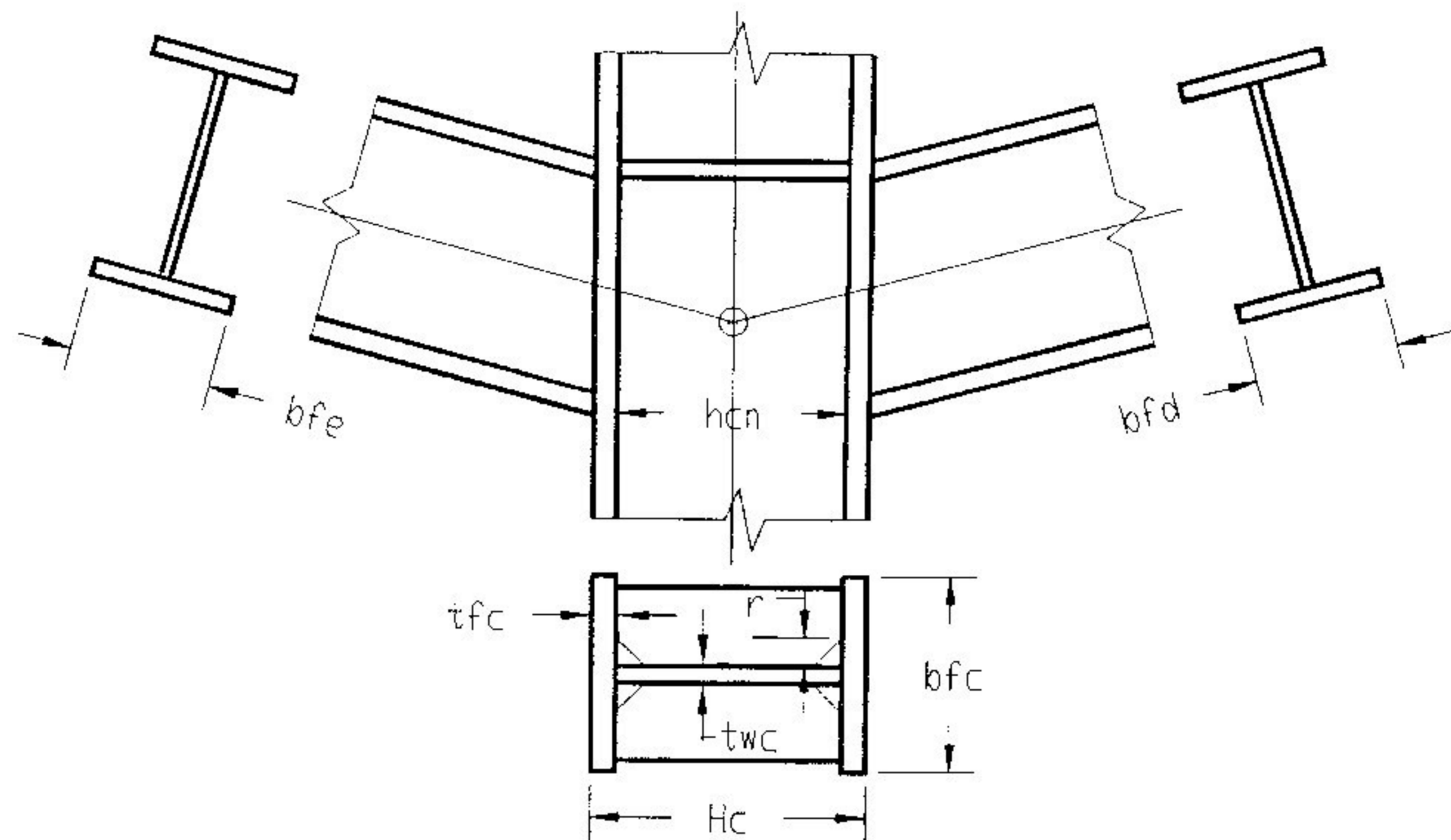


FIG 4-3

c) $bfc / (2tfc) \leq 0,55(E/fy)^{1/2}$

(com esta condição a mesa da coluna não fica sujeita à flambagem local por carga axial [4])

d) $hcn / twc \leq 2\lambda p$

(com esta condição, usando enrijecedores horizontais nos níveis das mesas das vigas e um enrijecedor vertical central entre eles, a alma da coluna não fica sujeita à flambagem por força cortante no painel enrijecido [4])

e) $bfe \geq 2,5(twc + 2r)$ $bfd \geq 2,5(twc + 2r)$

f) $t_{min} = 0,3cm$ $t_{max} = 5cm$

g) $c_{max} = 1,2cm$

h) $fy \leq 360MPa$

i) $fu/fy \geq 1,35$

j) $0,97 \leq fuw/fu \leq 1,3$ (compatibilidade entre metal da solda e metal base [4])

k) $bfe \leq 34cm$ e $bfd \leq 34cm$, no caso de ligações parafusadas

Cisto porque a largura da chapa de cabeça estipulada pela referência [9] é de 9 vezes o diâmetro do parafuso e, como a largura da viga é no máximo igual à da chapa de cabeça e o maior diâmetro previsto é de 3,81cm -ver item 4-3-1-1-, tem-se: $9 \times 3,81 = 34,29\text{cm}$

Nas expressões acima:

λ_p = parâmetro de esbeltez abaixo do qual a alma não enrijecida pode sofrer plastificação total por cisalhamento.

$$\lambda_p = 1,08(k \cdot E / f_y)^{1/2}$$

$k = 5,34$ para alma não enrijecida

r = recorte, fixado em 1,5cm neste trabalho

t_{\min} = menor espessura de chapa prevista

t_{\max} = maior espessura de chapa prevista

c_{\max} = maior cateto previsto para solda de filete (quando necessário valor superior, é usada solda de penetração).

f_y = limite de escoamento do aço

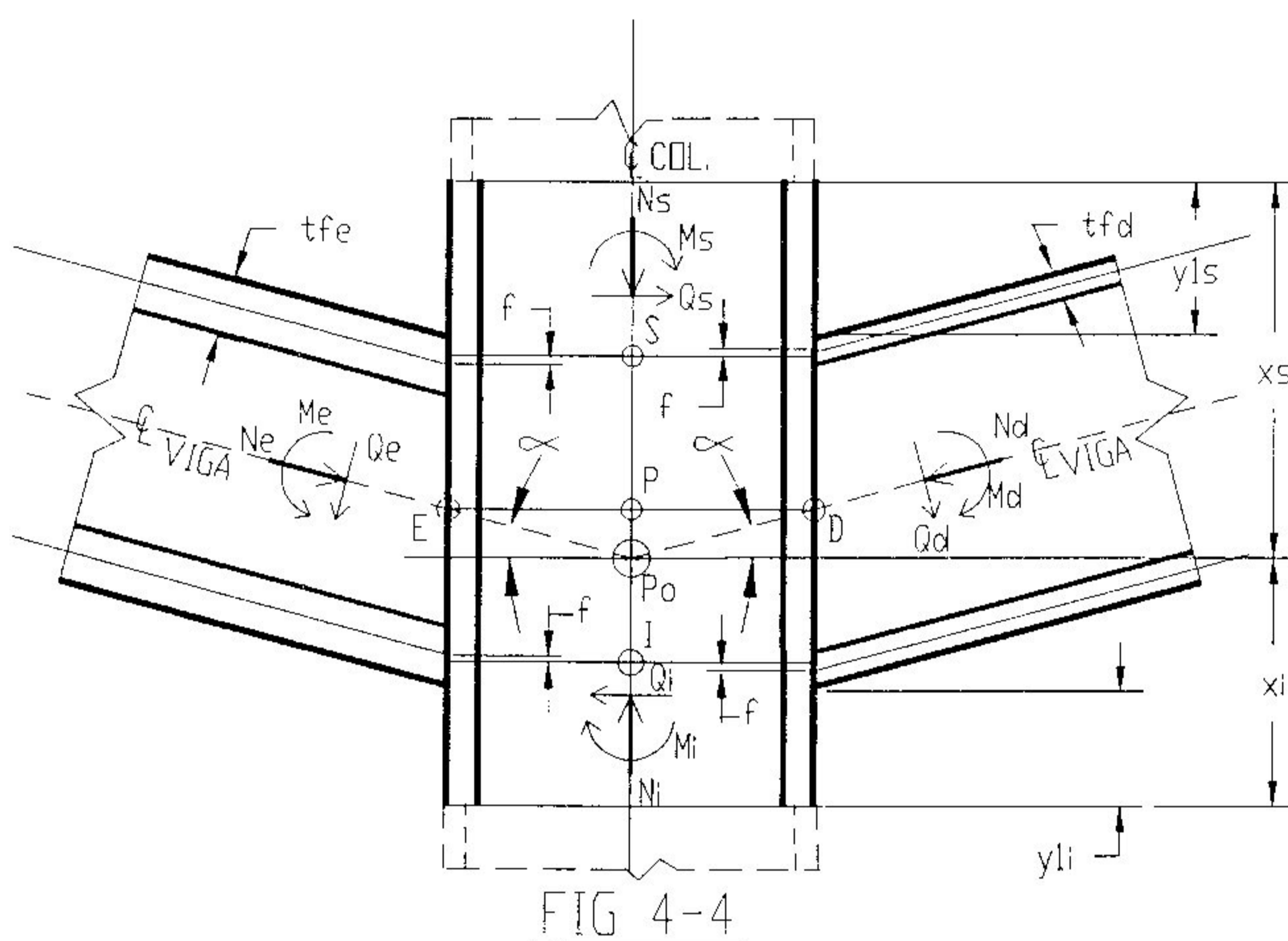
f_u = limite de resistência do aço à tração

f_{uw} = limite de resistência à tração do metal da solda

4-1) DADOS DE ENTRADA

Nas figuras de referência (fig. 4-4 e fig. 4-5) os pontos D e E ficam na face da coluna, o ponto P fica na horizontal que liga D e E, o ponto S (I) e as molas superiores (inferiores) ficam na horizontal equidistante das interseções das linhas de centro das mesas superiores (inferiores) das vigas com as faces da coluna; caso só haja

viga de um lado, o ponto P fica na horizontal que passa pela interseção do eixo da viga com a face da coluna, o ponto S (I) e a mola superior (inferior) ficam na horizontal que passa pela interseção da linha de centro da mesa superior (inferior) da viga com a face da coluna.



Na fig. 4-4 o valor de "f" pode ser determinado por

$$f = |(tfd - tfe) / (4 \cos \alpha)| \text{ quando há duas vigas (4.1)}$$

$$f = 0 \text{ quando só há uma viga (4.2)}$$

Na figura 4-5 tem-se o modelo que deve ser usado para o nó na análise estrutural (descrito no cap. 3, item 3-1). Ao analisar a estrutura pela 1ª. vez, antes de se conhecerem as constantes de mola, há três opções possíveis:

a) considerar as molas como barras bi-rotuladas de seção transversal igual à da mesa da viga correspondente e comprimento igual à metade da altura da seção da coluna

(fig. 4-5);

b) usar o modelo formado só pelas linhas de centro das vigas e da coluna, com os nós adicionais D, E, S, I (fig. 4-6-a);

c) usar o mesmo modelo de b), sem os nós adicionais (fig. 4-6-b);

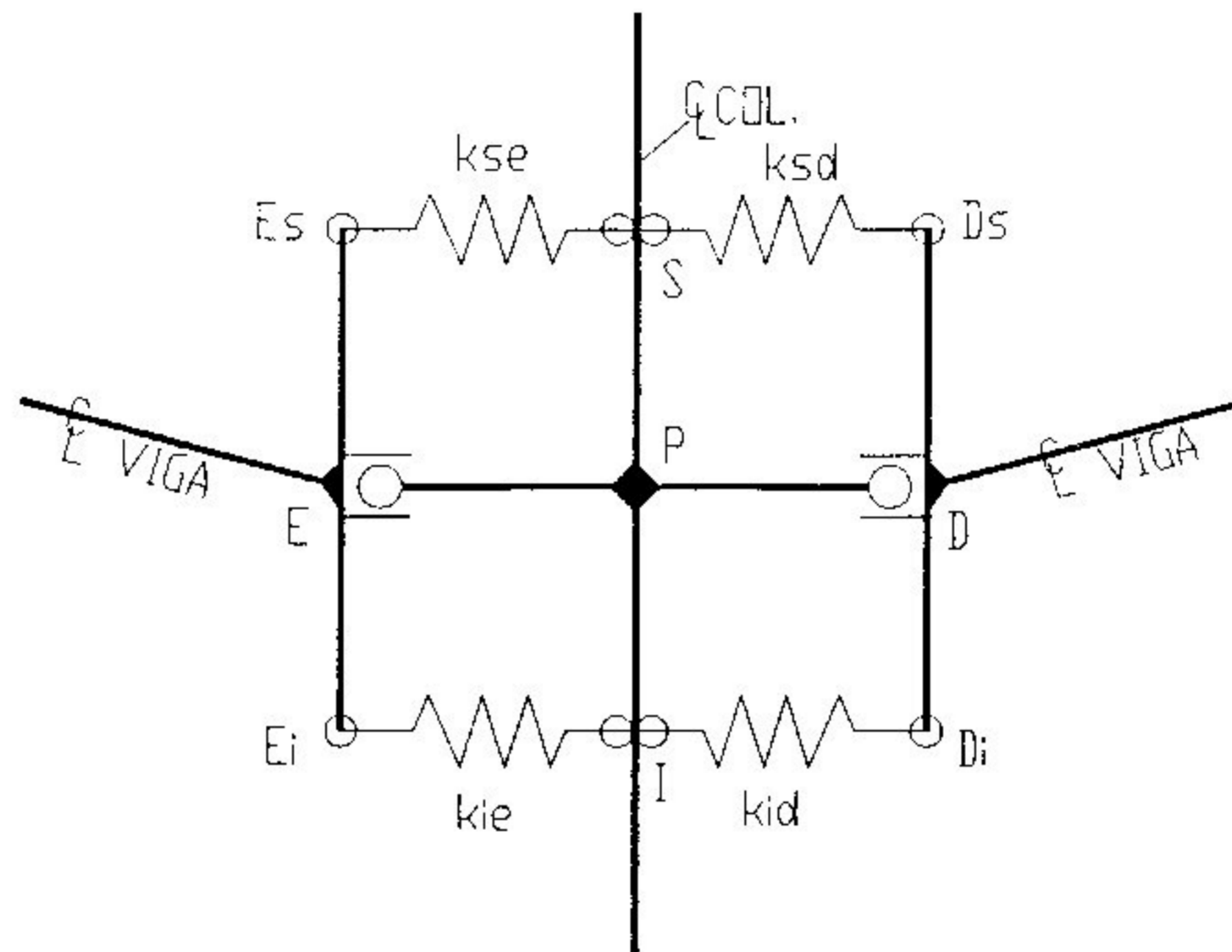


FIG 4-5

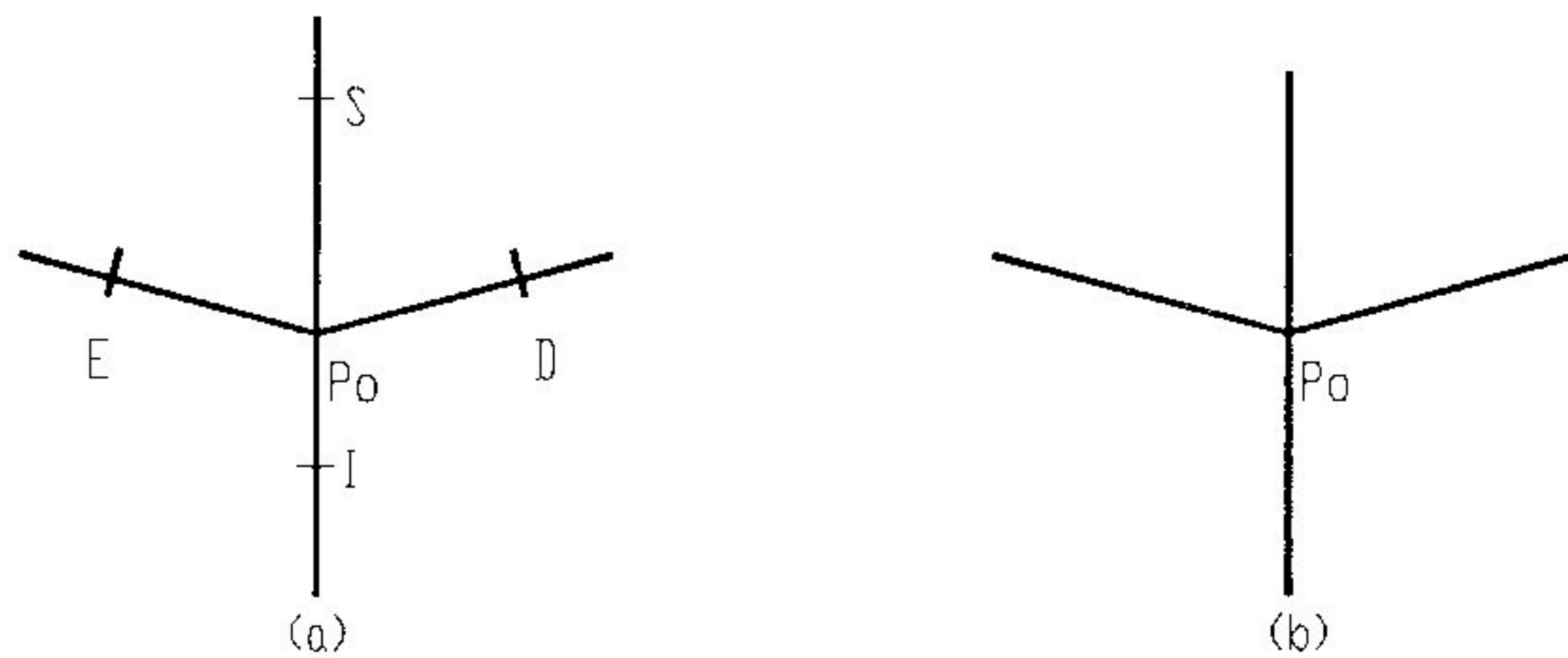


FIG 4-6

No modelo mais simples da opção c), supõe-se que os pontos D, E, S, I coincidam com Po.

Para utilizar o modelo com as molas é necessário que as barras Ei-Es, Di-Ds, P-E e P-D tenham grande rigidez à ação do momento fletor e da força cortante; assim, o momento de inércia da seção transversal destas barras deve ser pelo menos de 10 vezes o da seção da viga correspondente, a área da seção pode ser igual à da viga correspondente (não influi no resultado) e a área resistente à força cortante não deve ser dada (para que as referidas barras não sejam deformadas pela força cortante). Nesse modelo deve ser informada, obrigatoriamente, a área resistente à força cortante (área da alma) para a seção da coluna no trecho SI.

Os dados de entrada para o programa devem ser fornecidos sequencialmente, conforme a tabela seguinte (unidades "kN" e "cm") :

1a. linha:	flag2, flag8, ncom, α , xs, xi	
2a. linha:	fy, fu, fuw, di	
3a. linha:	Hc, bfc, tfc, twc, c	
4a. linha:	He, bfe, tfe, twe	
5a. linha:	Hd, bfd, tfd, twd	
6a. linha:	Ns(1), Qs(1), Ms(1)	(comb.no. 1)
7a. linha:	Ni(1), Qi(1), Mi(1)
8a. linha:	Ne(1), Qe(1), Me(1)
9a. linha:	Nd(1), Qd(1), Md(1)
10a. linha:	Ns(2), Qs(2), Ms(2)	(comb.no. 2)
11a. linha:	Ni(2), Qi(2), Mi(2)

12a. linha:	Ne(2),	Qe(2),	Me(2)
13a. linha:	Nd(2),	Qd(2),	Md(2)
14a. linha:	Ns(3),	Qs(3),	Ms(3)	(comb.no. 3)
::	::	::	::
::	::	::	::

Na tabela de dados (ver também fig. 4-4):

flag2 = 0 para ligação soldada

flag2 = 1 para ligação com parafusos ASTM A325

flag2 = 2 para ligação com parafusos ASTM A490;

flag8 = 0, para não saírem solicitações e resistências de cálculo

flag8 = 1, para saírem solicitações e resistências de cálculo principais

ncom = número de combinações de carregamentos ($ncom \leq 20$);

α = ângulo de inclinação das vigas, positivo conforme fig. 4-4, em graus ($-20^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$);

x_s, x_i = distância do ponto P_o até a seção extrema (ou transição de seção da coluna), superior e inferior, respectivamente;

f_y = limite de escoamento do aço;

f_u = limite de resistência à tração do aço;

f_{uw} = limite de resistência à tração do metal da solda, que deve ser compatível com o aço, conforme NBR8800 [4];

d_i = diâmetro preferencial dos parafusos (cm);

$H_c, b_{fc}, t_{fc}, t_{wc}$ = altura da seção, largura da seção, espessura da mesa e espessura da alma, respectivamente, para a coluna;

$H_e, b_{fe}, t_{fe}, t_{we} = \text{ídem}$, para a viga esquerda;
 $H_d, b_{fd}, t_{fd}, t_{wd} = \text{ídem}$, para a viga direita;
 $c = \text{cateto do filete da solda de composição da coluna}$;
 $N_s(j), Q_s(j), M_s(j) = \text{esforços solicitantes de cálculo que o trecho de coluna acima de } S \text{ aplica em } S \text{ (sentidos conforme fig. 4-4), para a combinação } (j)$;
 $N_i(j), Q_i(j), M_i(j) = \text{esforços solicitantes de cálculo que o trecho de coluna abaixo de } I \text{ aplica em } I \text{ (sentidos conforme fig. 4-4), para a combinação } (j)$;
 $N_e(j), Q_e(j), M_e(j) = \text{esforços solicitantes de cálculo que a viga esquerda aplica no nó } E \text{ (sentidos conforme fig. 4-4), para a combinação } (j)$;
 $N_d(j), Q_d(j), M_d(j) = \text{esforços solicitantes de cálculo que a viga direita aplica no nó } D \text{ (sentidos conforme fig. 4-4), para a combinação } (j)$.

Observação: deve-se entrar com zero no lugar de "di" quando a ligação for soldada, nos lugares das 4 dimensões de uma viga quando ela não existir e nos lugares de esforços solicitantes nulos ou inexistentes (devido à ausência de viga por exemplo).

4-2) SAÍDA DOS RESULTADOS

O programa dará a saída de todos os detalhes construtivos da ligação, mencionando uma das 12 figuras de referência seguintes (fig. 4-7 a fig. 4-18) :

fig. 4-7: ...ligação soldada, vigas ambos os lados, α positivo

fig. 4-8: ...ligação soldada, vigas ambos os lados, α negativo
fig. 4-9: ...ligação soldada, viga lado esquerdo, α positivo
fig. 4-10: ...ligação soldada, viga lado esquerdo, α negativo
fig. 4-11: ...ligação soldada, viga lado direito, α positivo
fig. 4-12: ...ligação soldada, viga lado direito, α negativo
fig. 4-13: ...lig. parafusada, vigas ambos os lados, α positivo
fig. 4-14: ...lig. parafusada, vigas ambos os laods, α negativo
fig. 4-15: ...lig. parafusada, viga lado esquerdo, α positivo
fig. 4-16: ...lig. parafusada, viga lado esquerdo, α negativo
fig. 4-17: ...lig. parafusada, viga lado direito, α positivo
fig. 4-18: ...lig. parafusada, viga lado direito, α negativo

A locação dos enrijecedores horizontais segue as seguintes regras:

- a) figs. 4-7 a 4-12 - determinam-se as interseções das linhas de centro das mesas da(s) viga(s) com a(s) linha(s) de centro da(s) mesa(s) da coluna; nas figuras 4-7 e 4-8 a linha de centro do enrijecedor superior (inferior) interliga as duas interseções superiores (inferiores), enquanto nas figuras 4-9 a 4-12 a linha de centro do enrijecedor superior (inferior) é horizontal e passa pela interseção superior (inferior);
- b) figs. 4-13 a 4-18 - determinam-se as interseções das linhas de centro das mesas da(s) viga(s) com a(s) face(s) da(s) chapa(s) de cabeça e a partir daí traçam-se horizontais até a face interna da mesa adjacente da coluna; nas figuras 4-13 e 4-14 a linha de centro do enrijecedor superior (inferior) interliga os pontos

superiores (inferiores) obtidos nas faces internas das mesas da coluna, enquanto nas figuras 4-15 a 4-18 a linha de centro do enrijecedor superior (inferior) é horizontal e passa pelo ponto superior (inferior) obtido na face interna da mesa da coluna.

Após a saída dos detalhes construtivos o programa fornecerá automaticamente as constantes das molas de introdução (ver cap. 3, item 3-2-3) num total de 4 valores para ligações soldadas (k_{se} , k_{sd} , k_{ie} , k_{id} da fig. 4-5) e 8 valores para ligações parafusadas (4 para tração e 4 para compressão - quando são usados apenas 2 parafusos junto a uma mesa de viga, a constante de mola correspondente, para tração, não é determinada, conforme já exposto nas considerações iniciais).

Caso o usuário tenha entrado com $flag8 = 1$, o programa fornecerá também as seguintes solicitações e resistências de cálculo:

a) Solicitações de cálculo

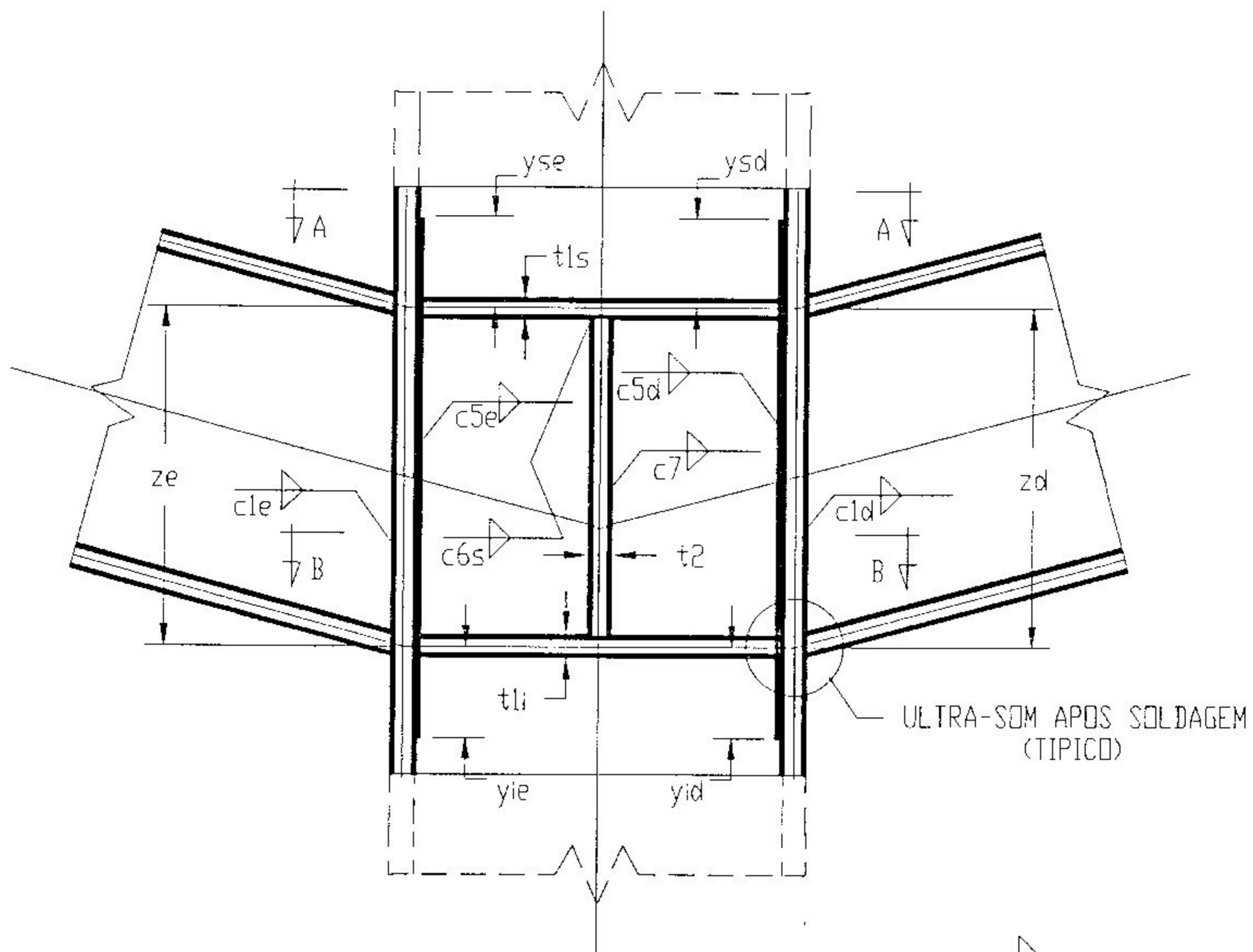
a.1) Forças horizontais máxima e mínima que cada mesa de viga aplica na coluna (sinal negativo indicando tração)

a.2) Força cortante máxima na coluna, entre mesas superior e inferior da(s) viga(s)

b) Resistências de cálculo da coluna, sem enrijecedores (caso na ligação final a coluna tenha sido enrijecida, a solda de composição não foi verificada para a situação sem enrijecedores)

b.1) A força cortante

- b.2) À força horizontal de tração aplicada através de cada mesa de viga, considerando os estados limites de escoamento local da alma da coluna e plastificação local da mesa da coluna por flexão na ausência de tensões normais diretas
- b.3) À força horizontal de compressão aplicada através de cada mesa de viga, considerando os estados limites de escoamento local da alma da coluna e flambagem local da alma da coluna.



ULTRA-SOM APÓS SOLDAGEM (TÍPICO)

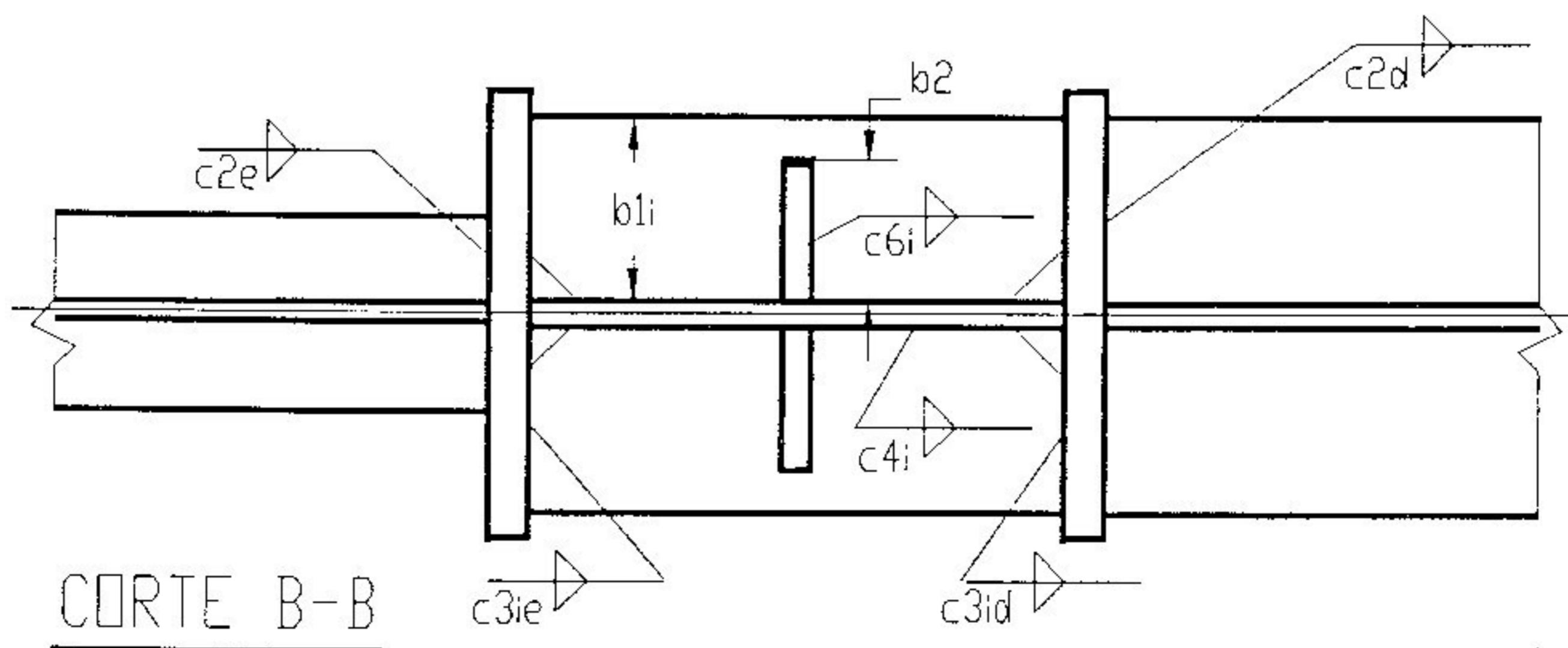
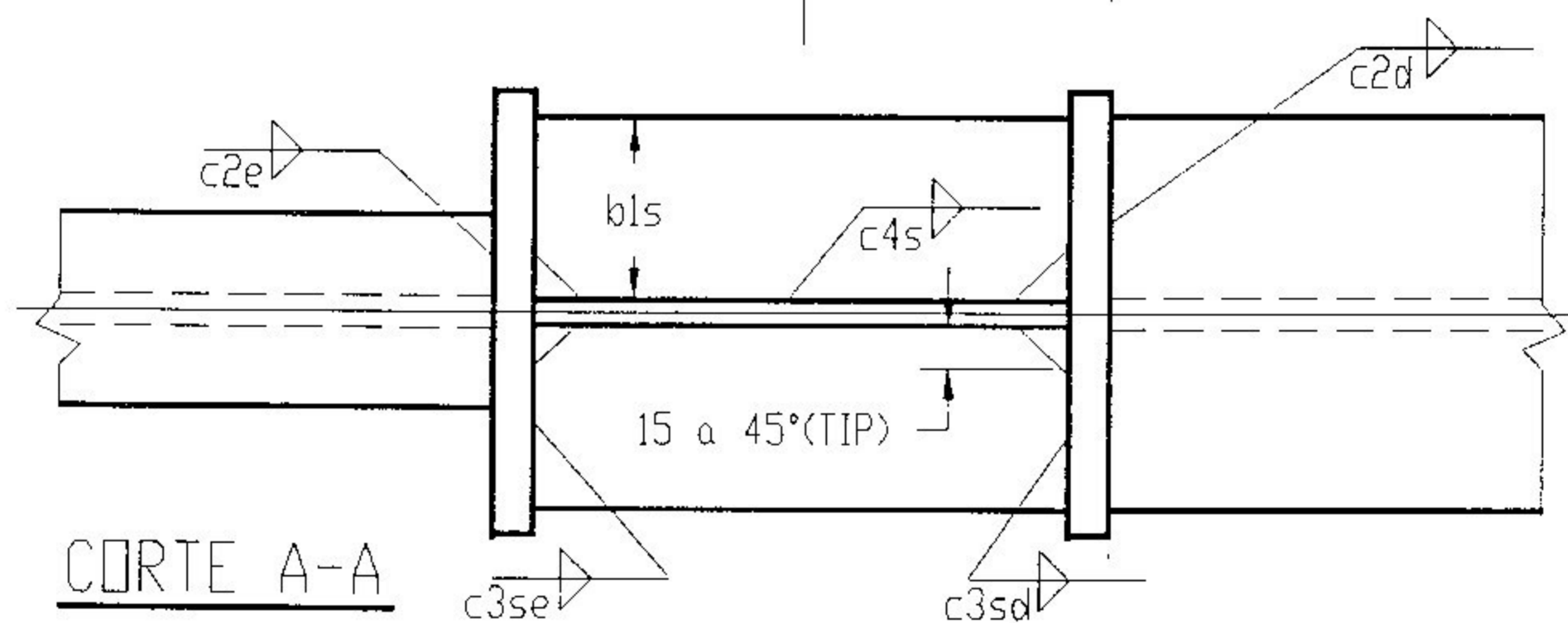
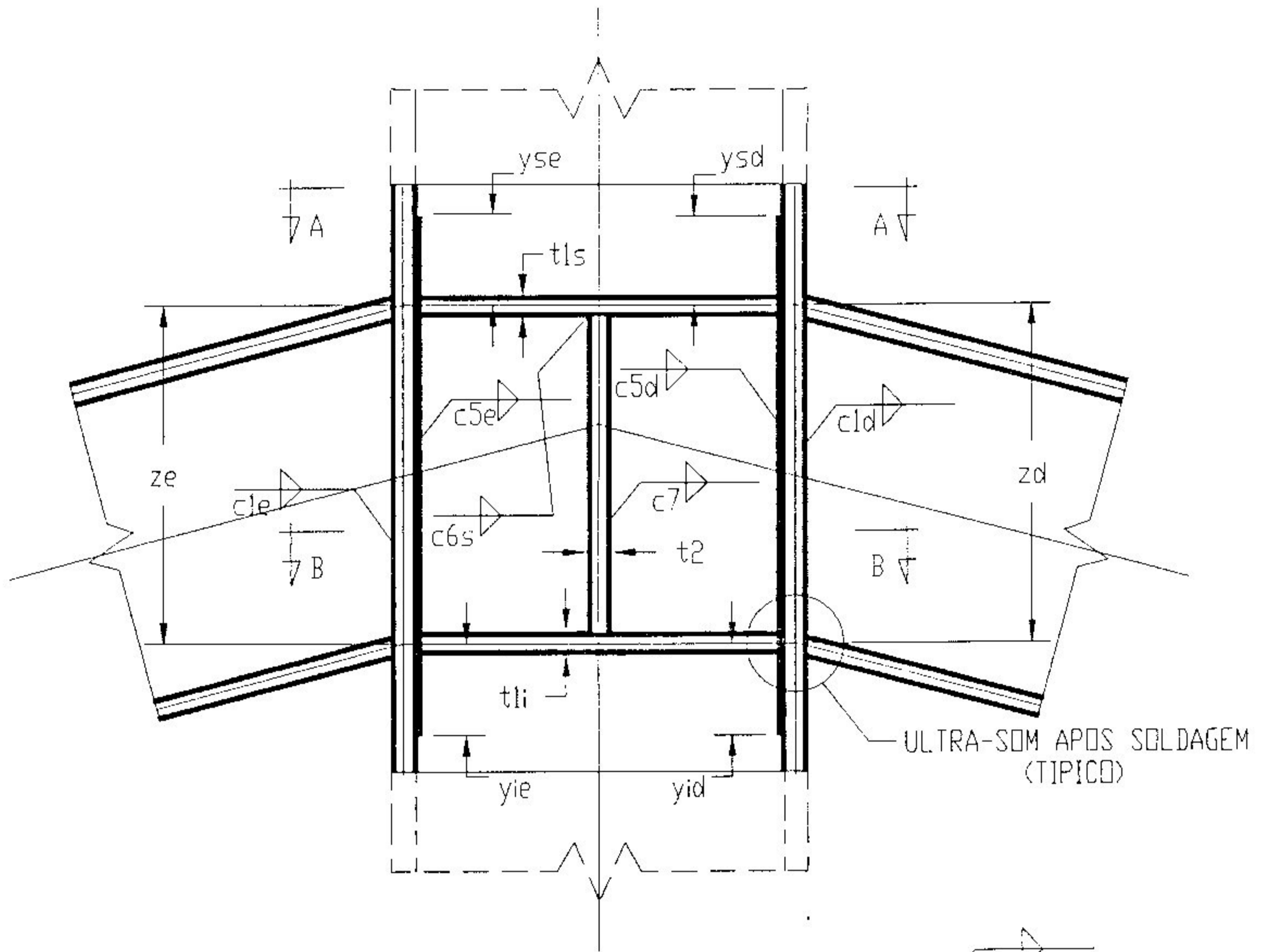


FIG 4-7



ULTRA-SOM APÓS SOLDAGEM (TÍPICO)

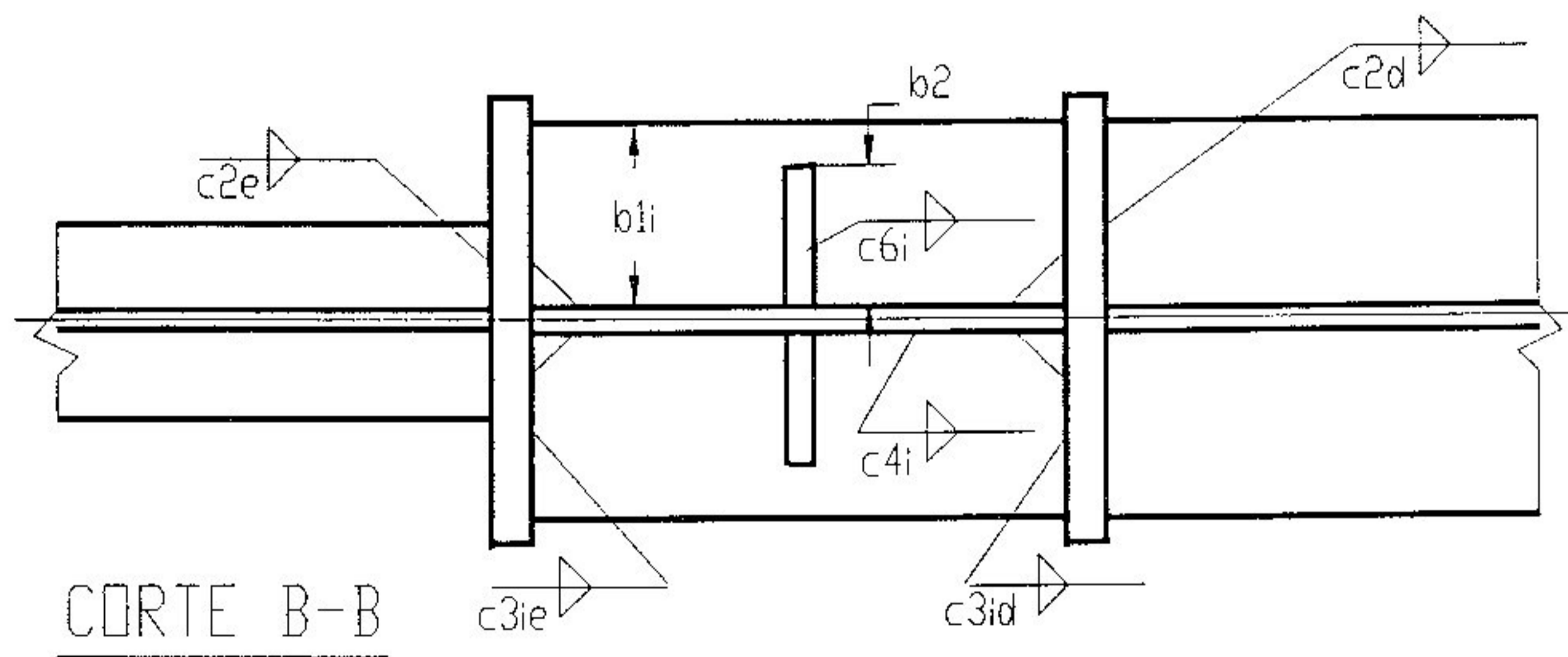
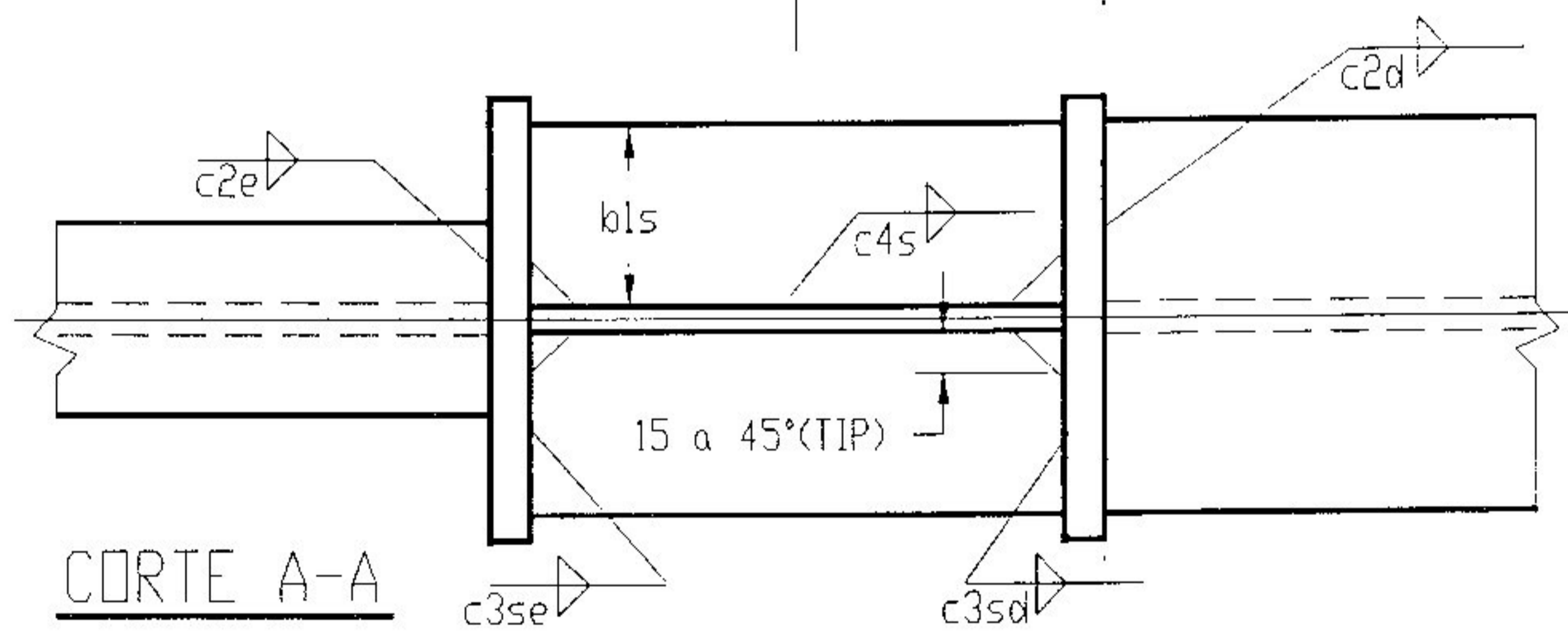
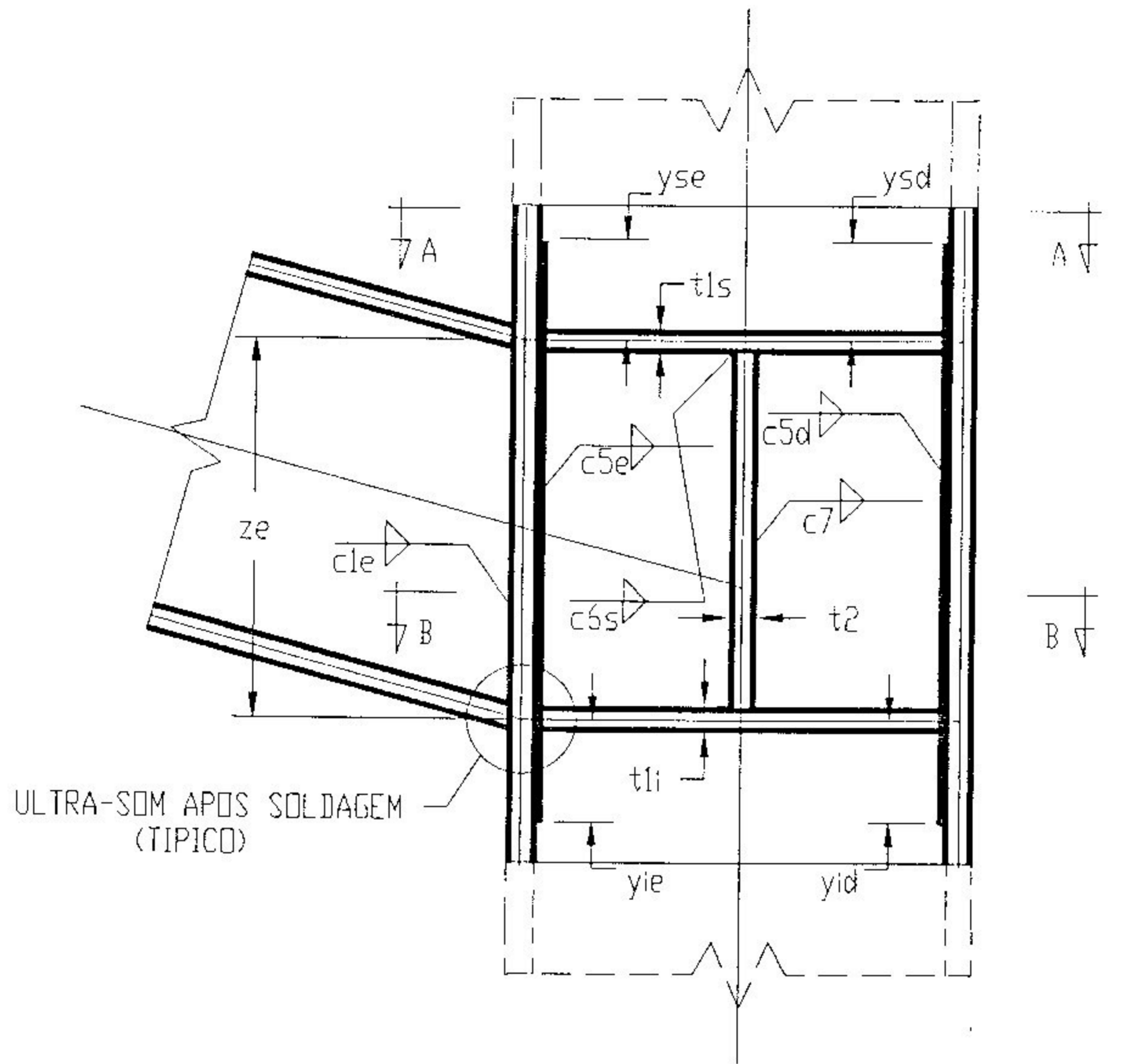


FIG 4-8



ULTRA-SOM APOS SOLDAGEM (TIPICO)

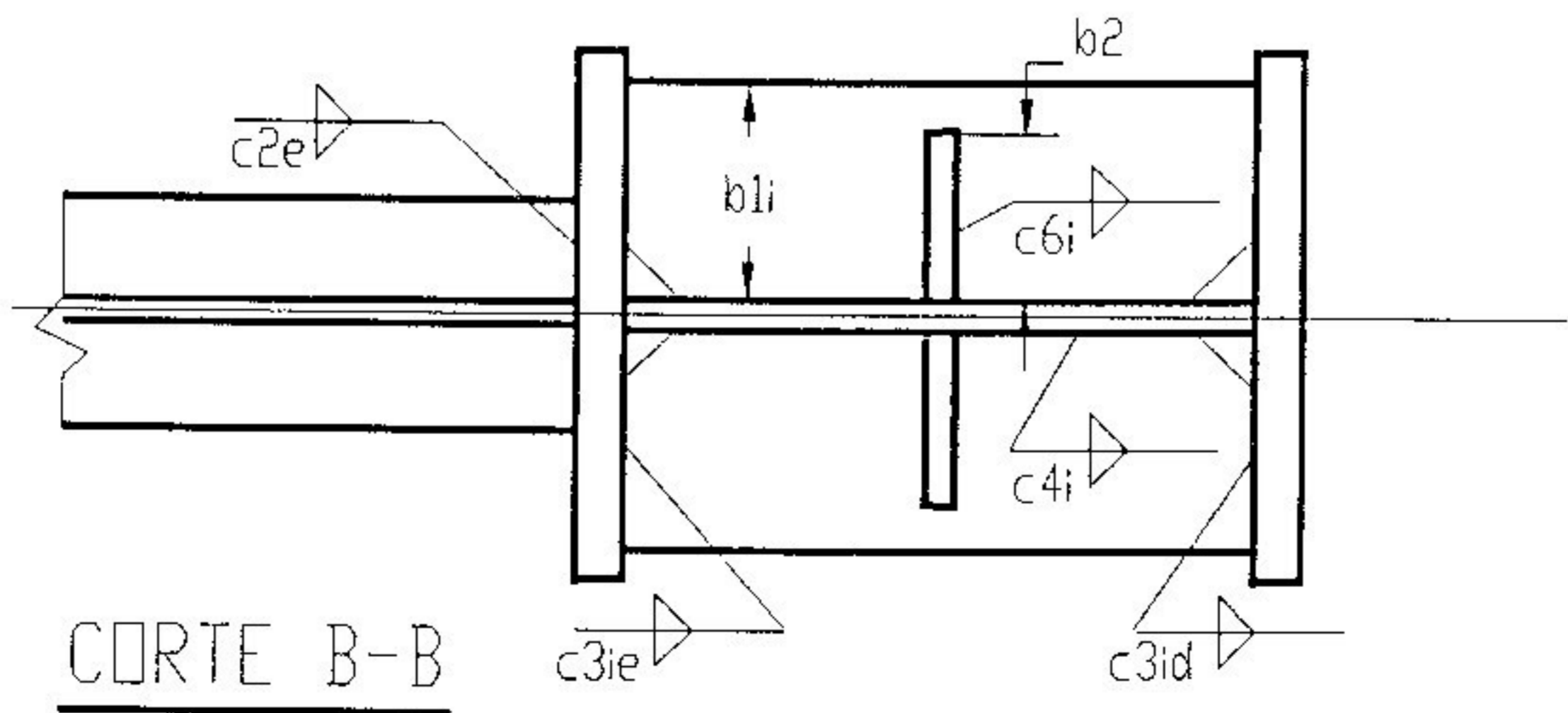
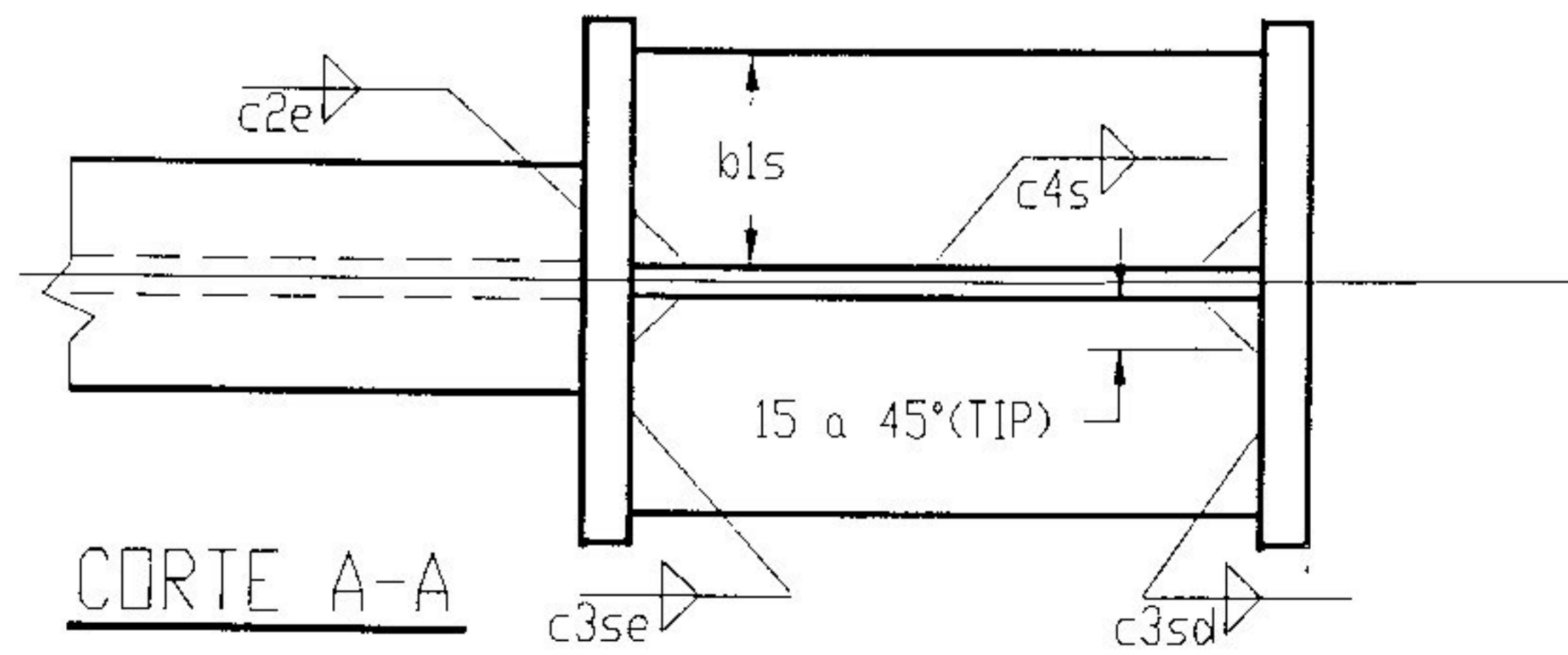
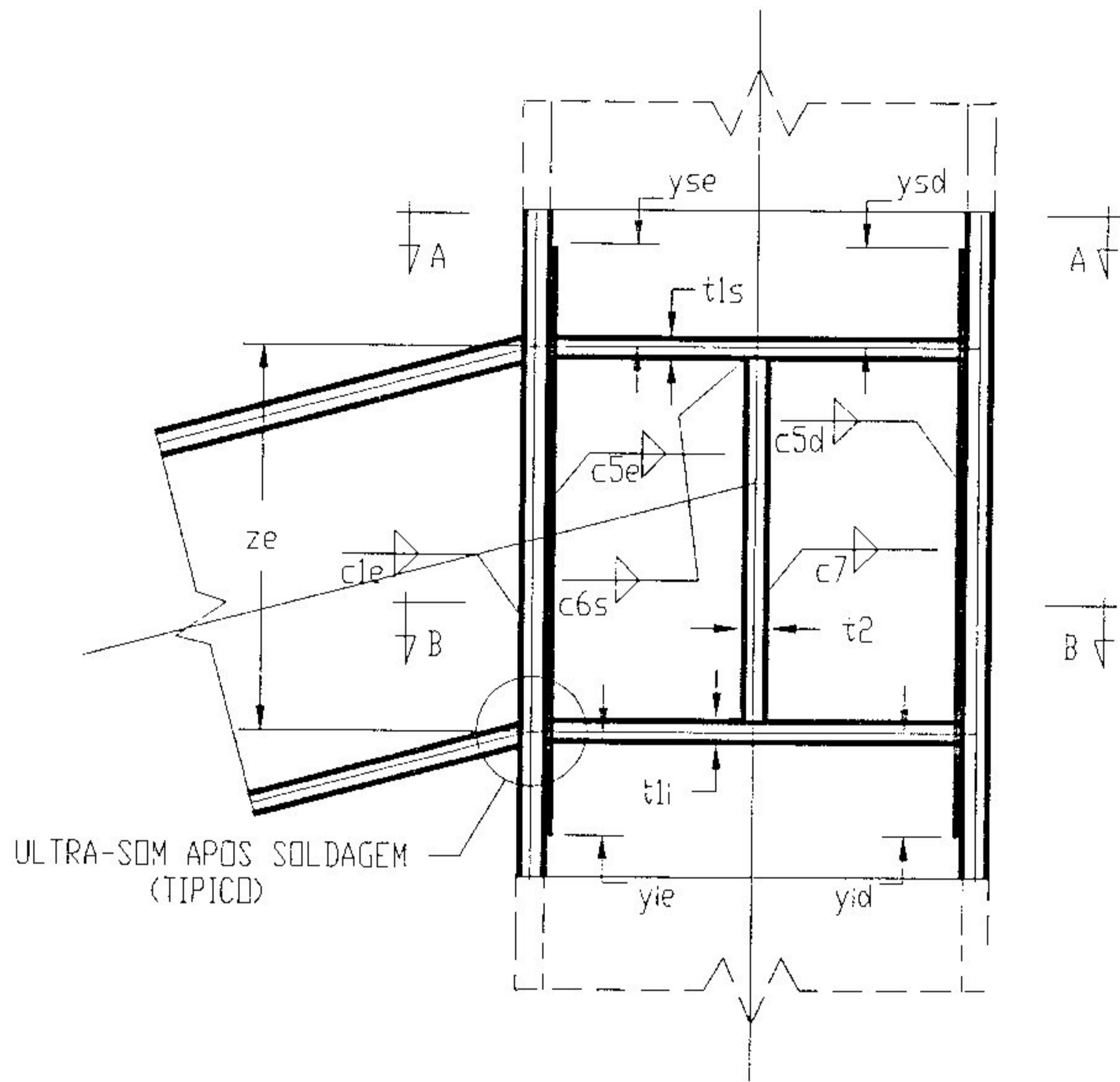


FIG 4-9



ULTRA-SOM APOS SOLDAGEM (TIPICO)

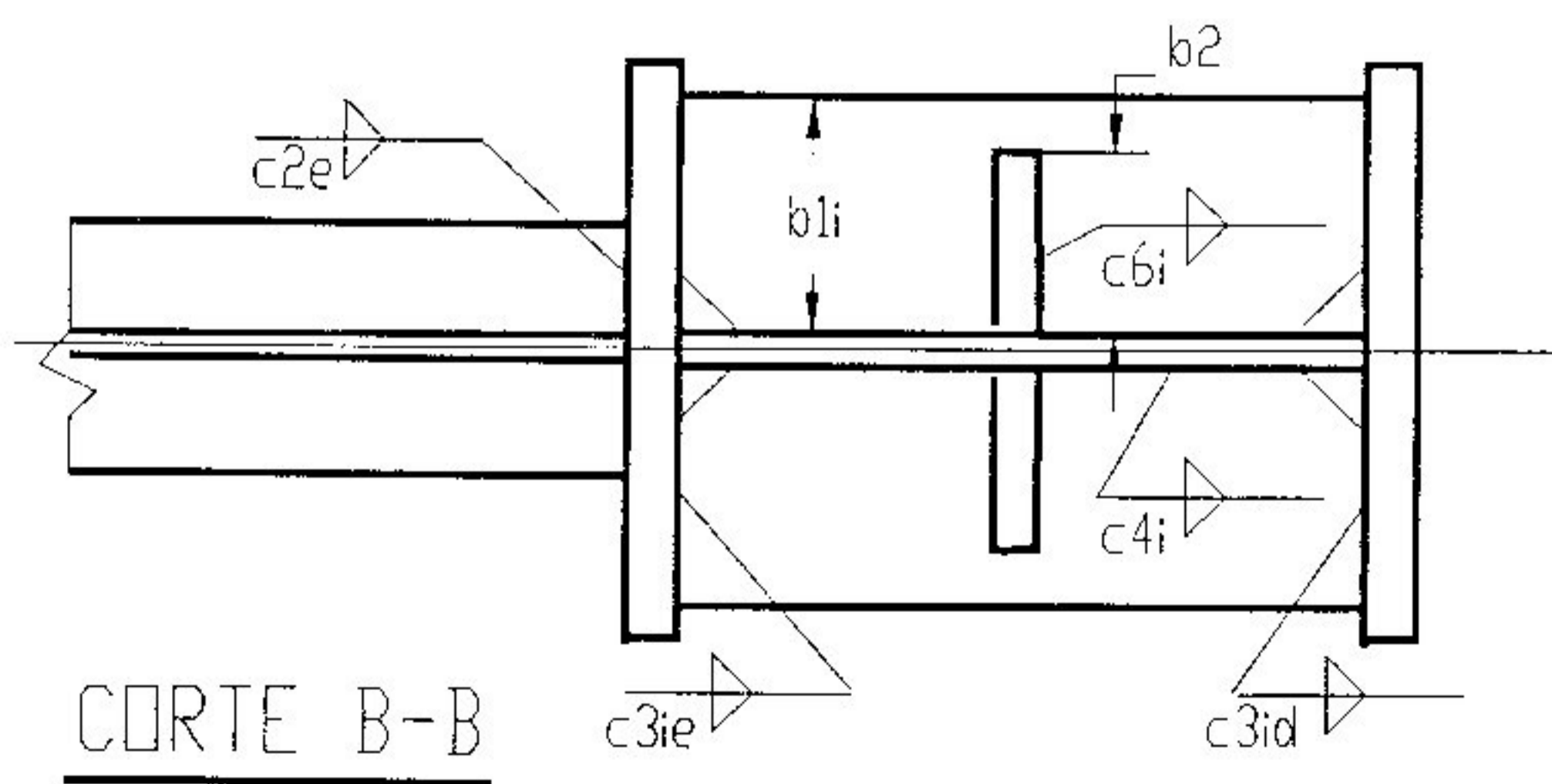
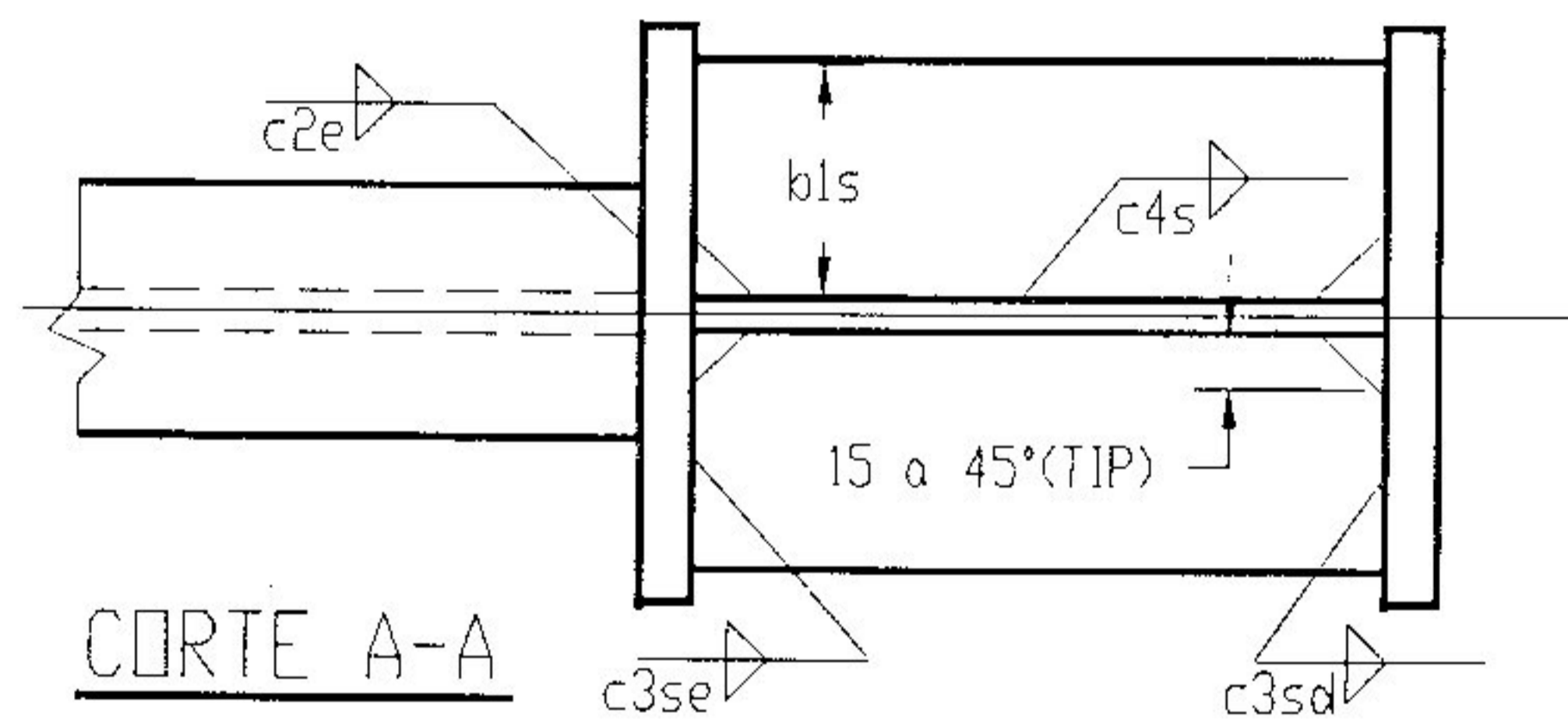


FIG 4-10

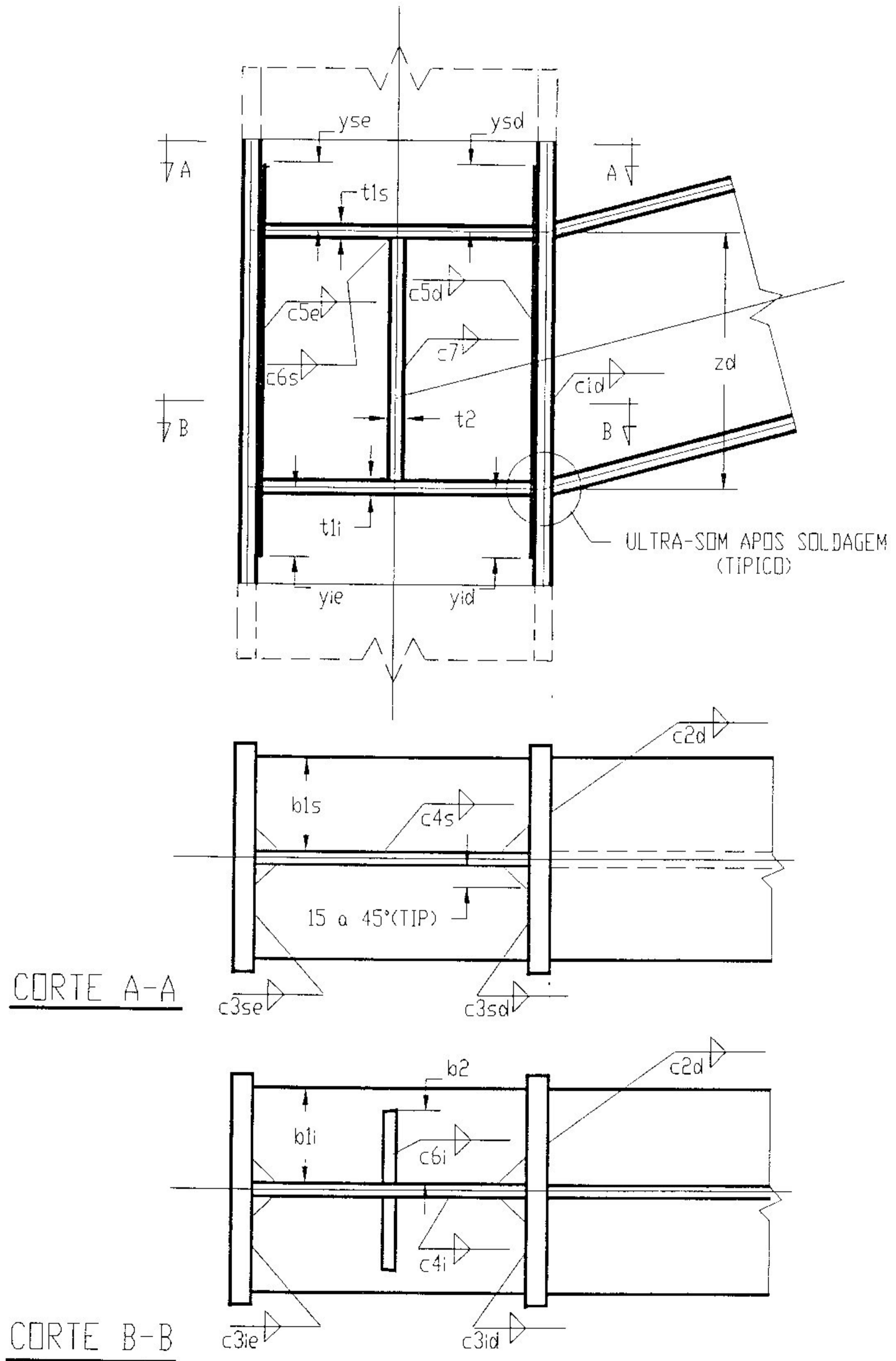
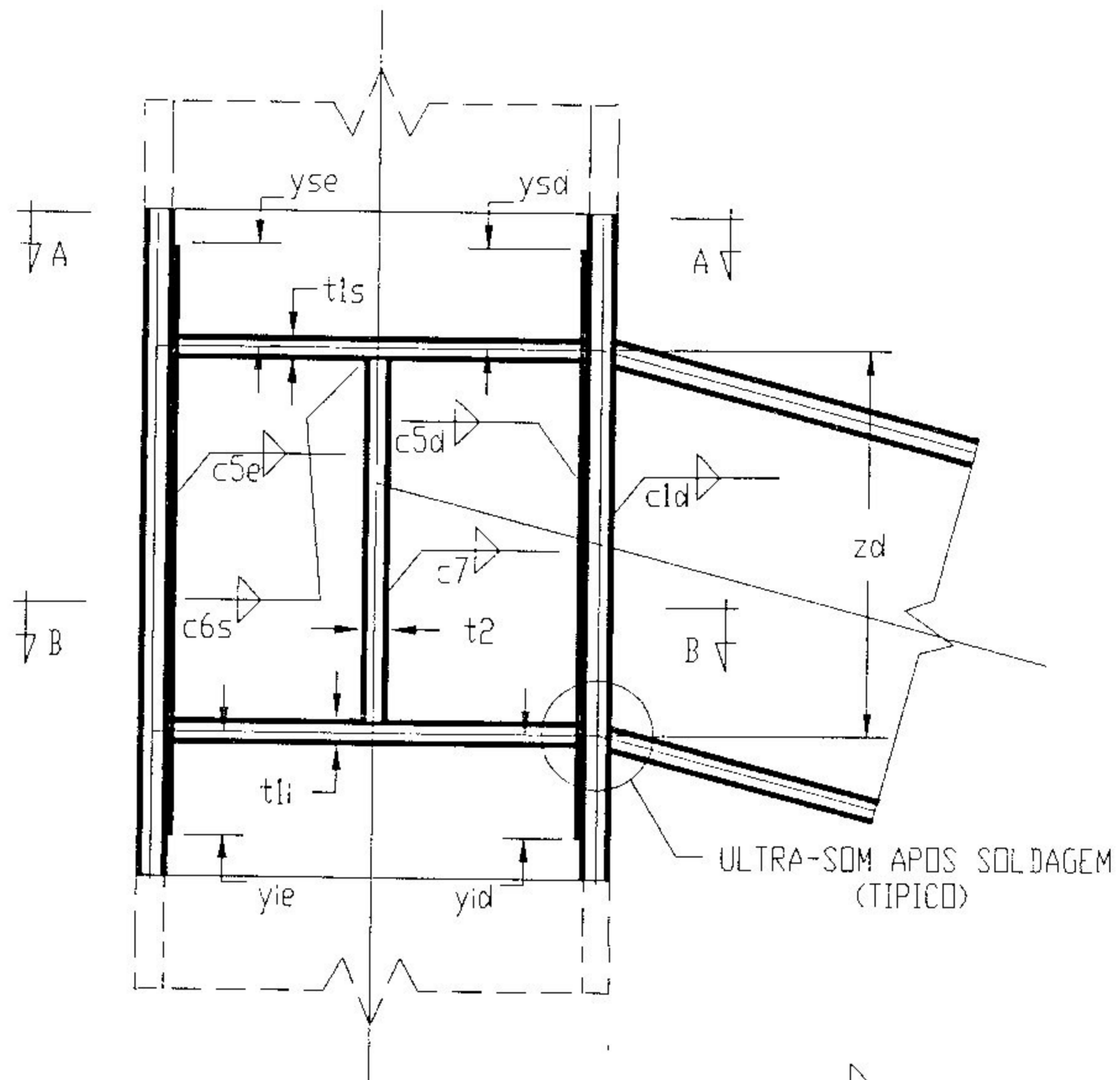
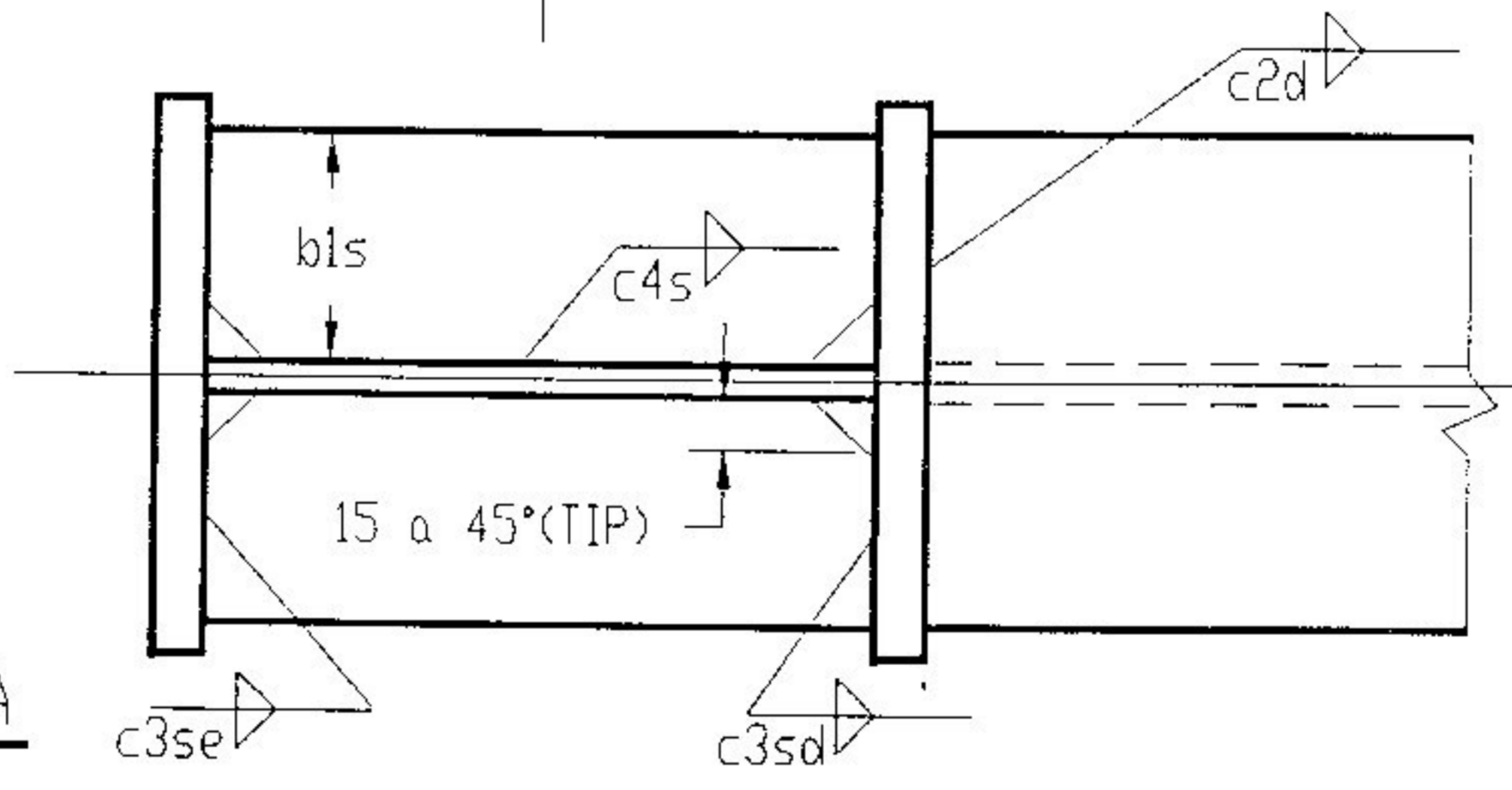


FIG 4-11



CORTE A-A



CORTE B-B

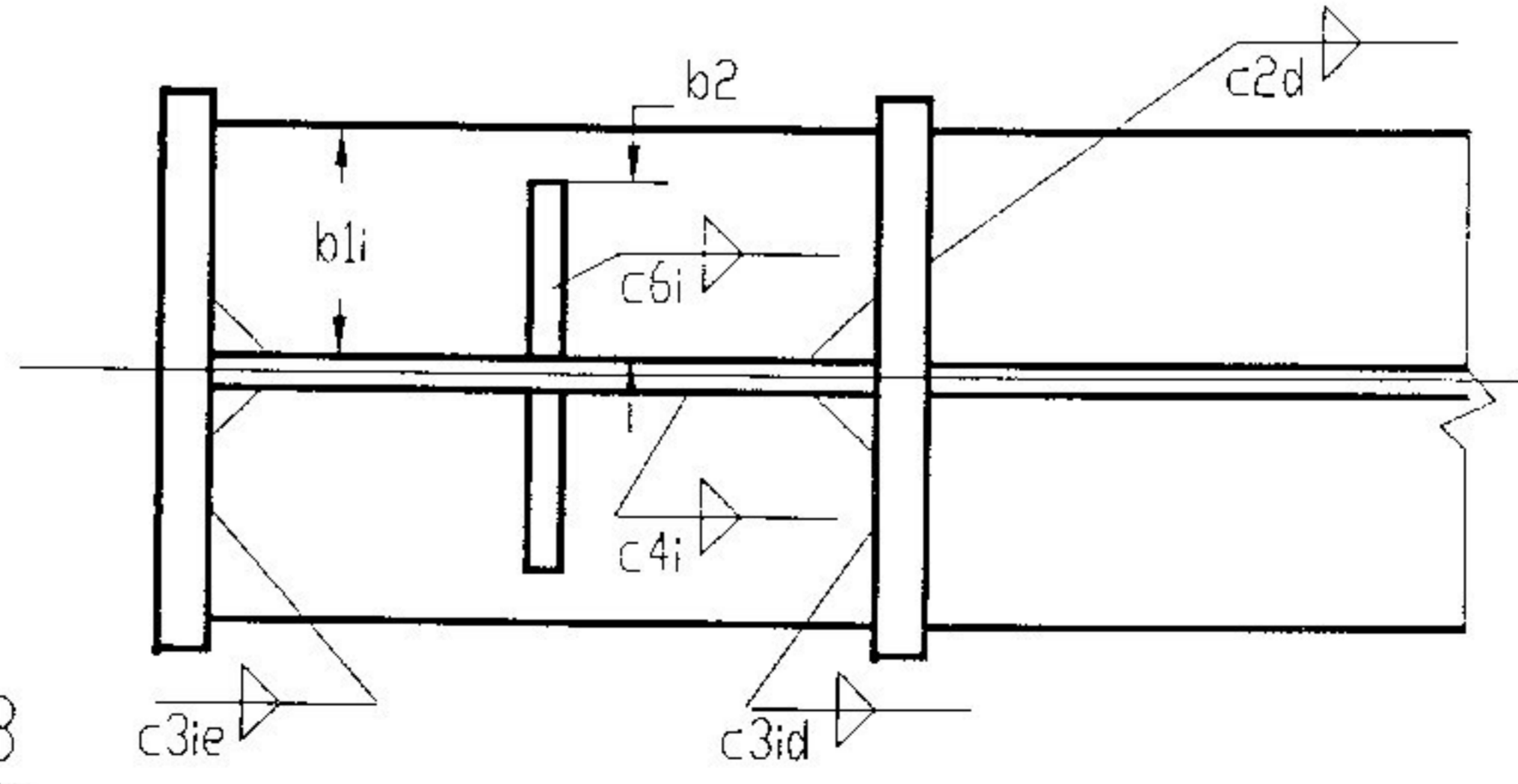


FIG 4-12

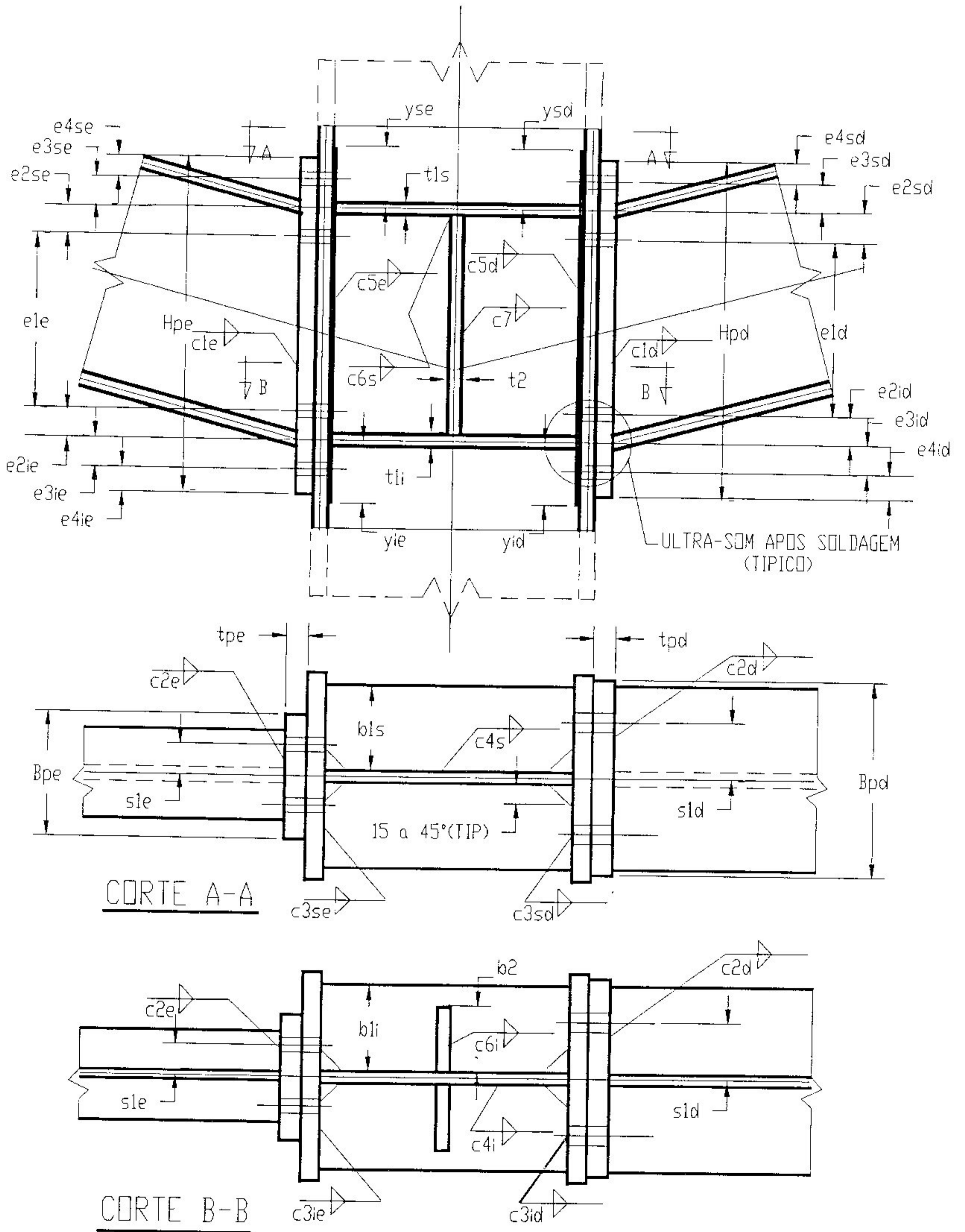


FIG 4-13

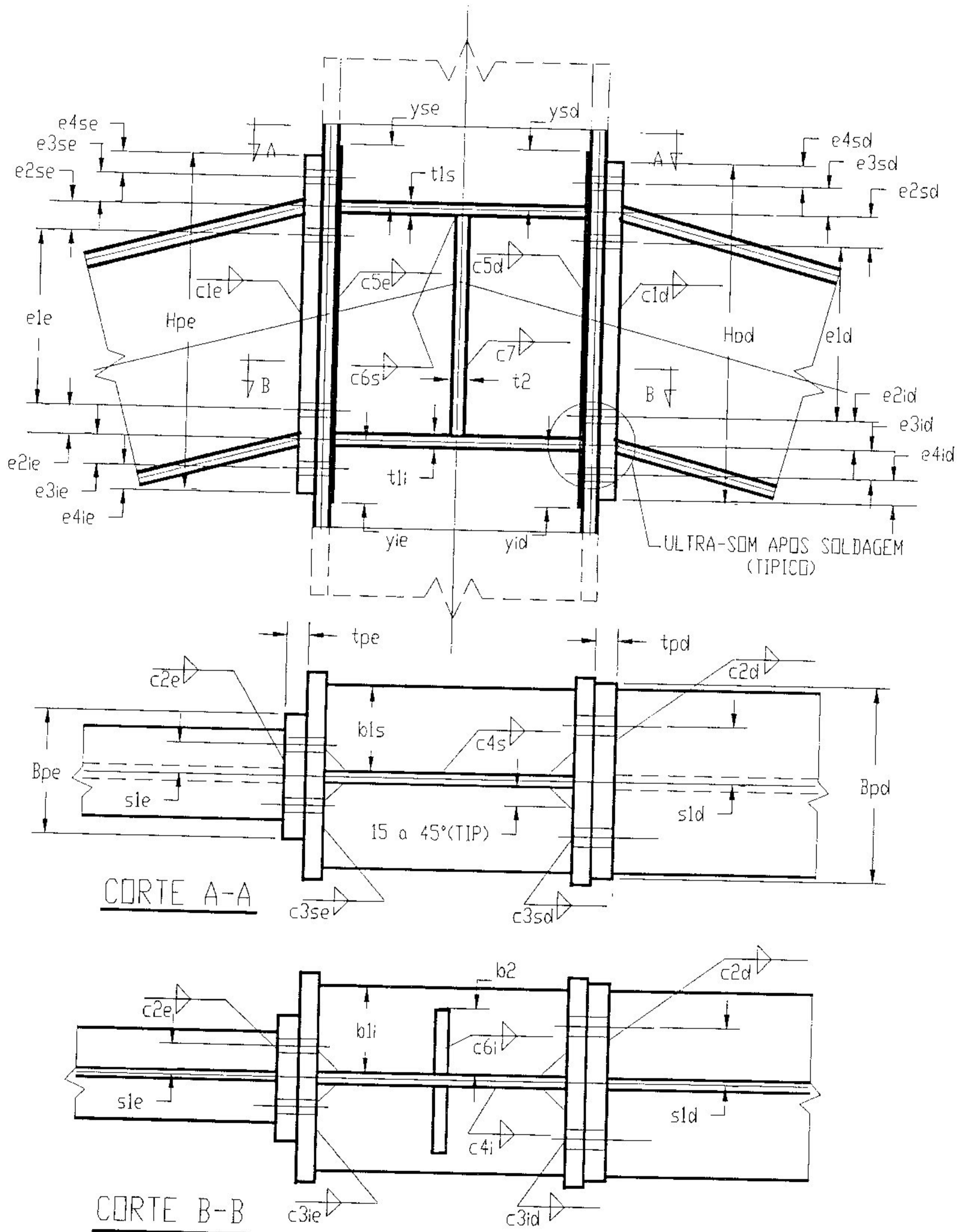


FIG 4-14

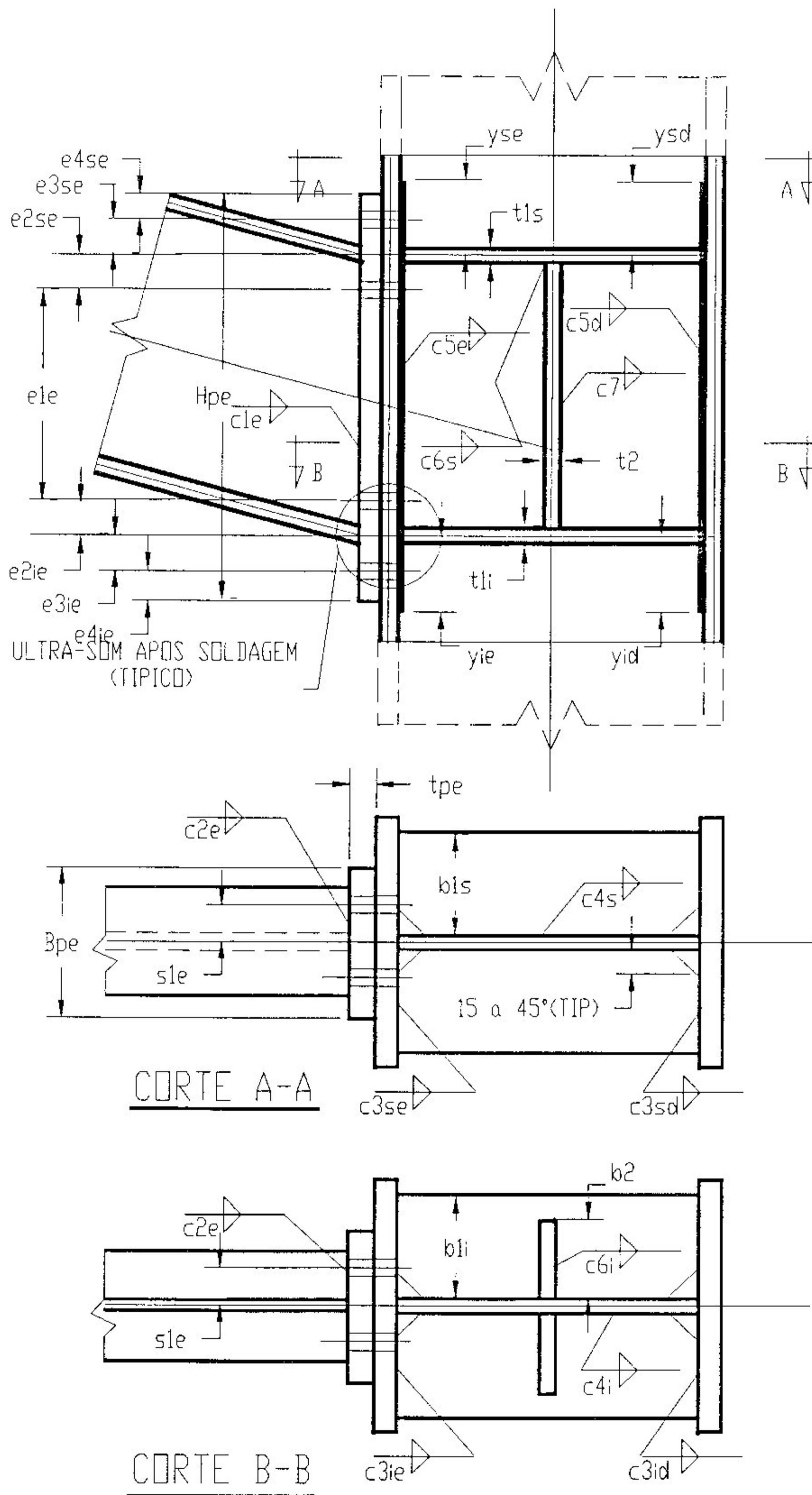


FIG 4-15

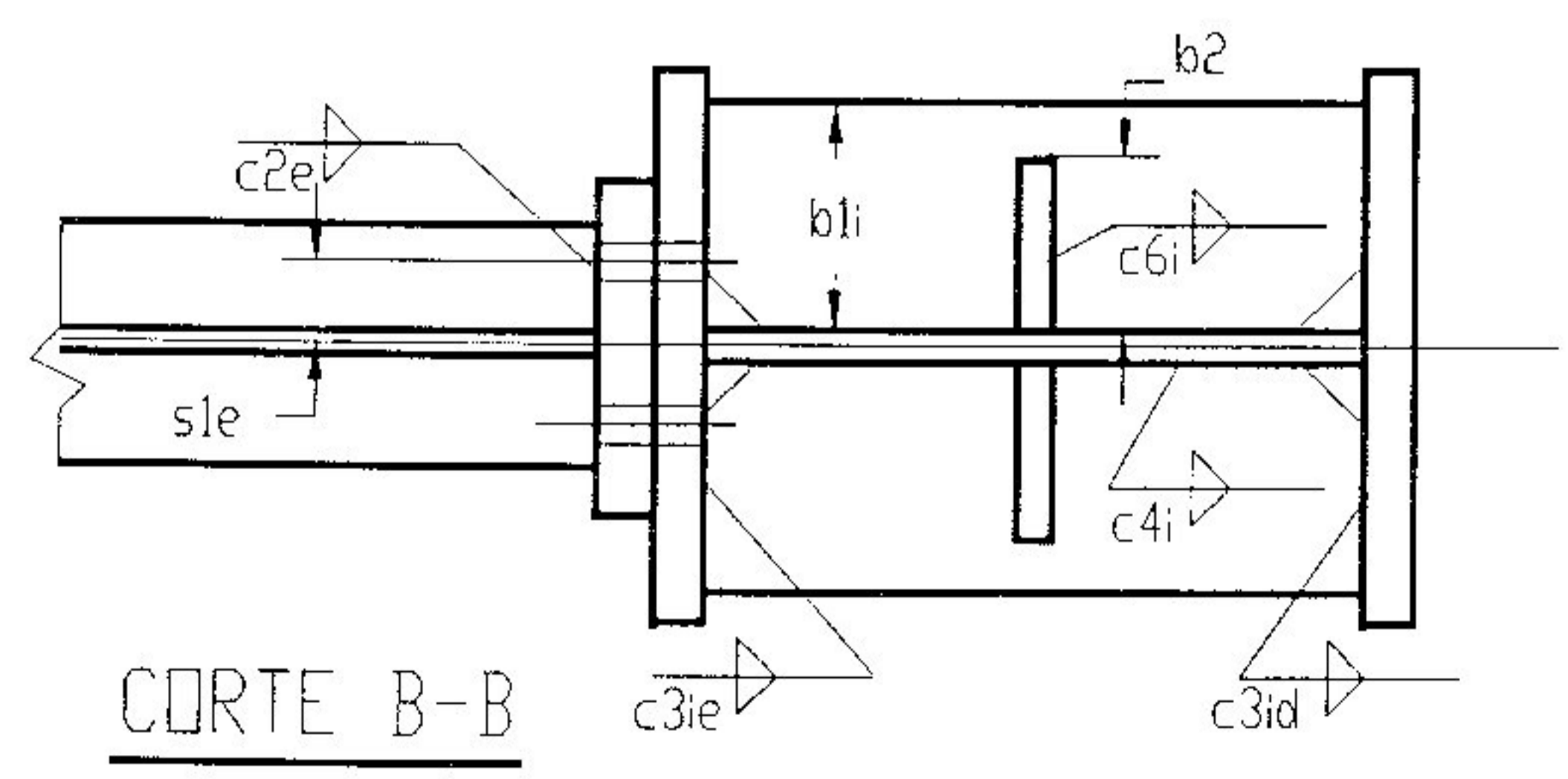
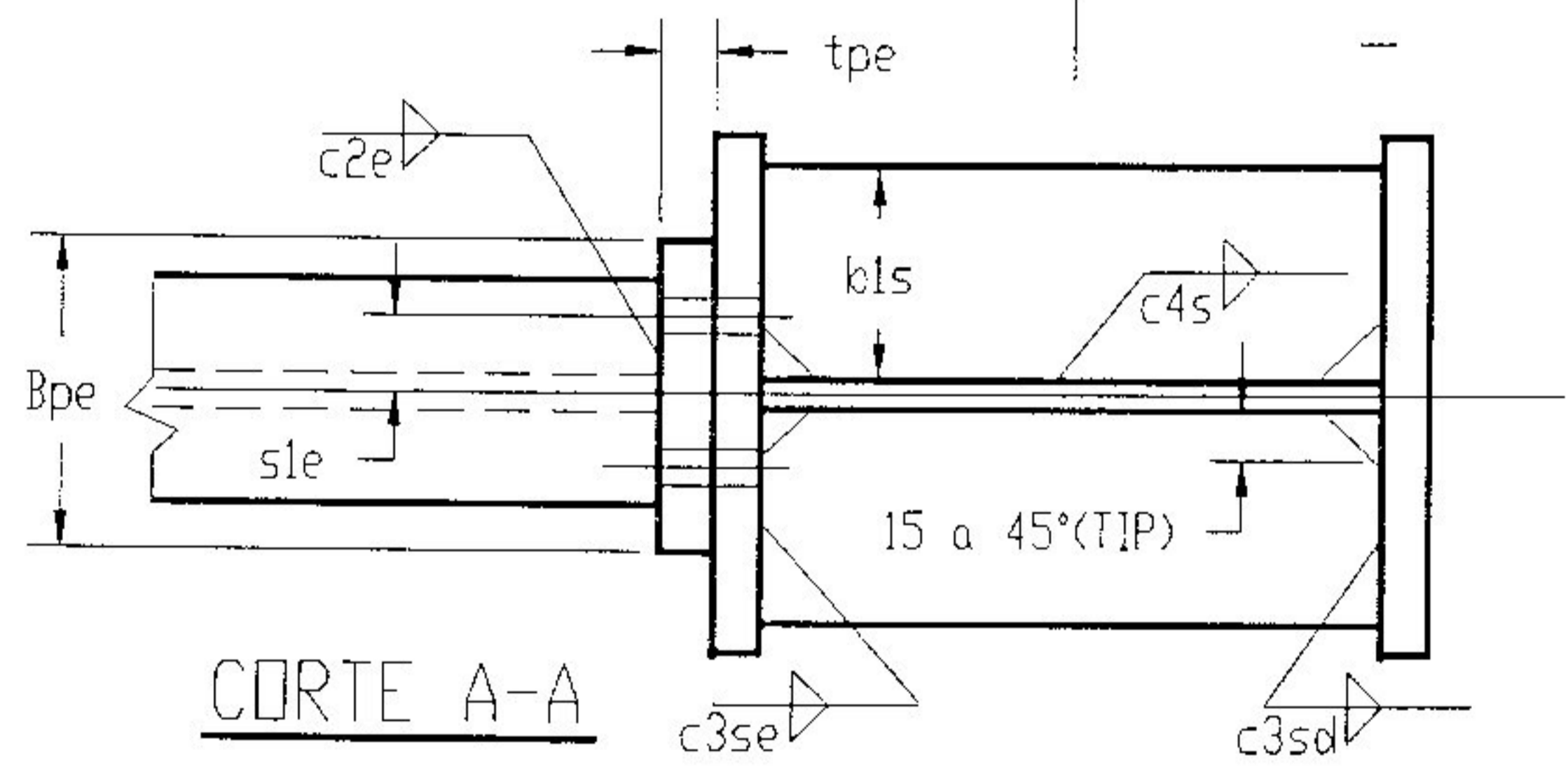
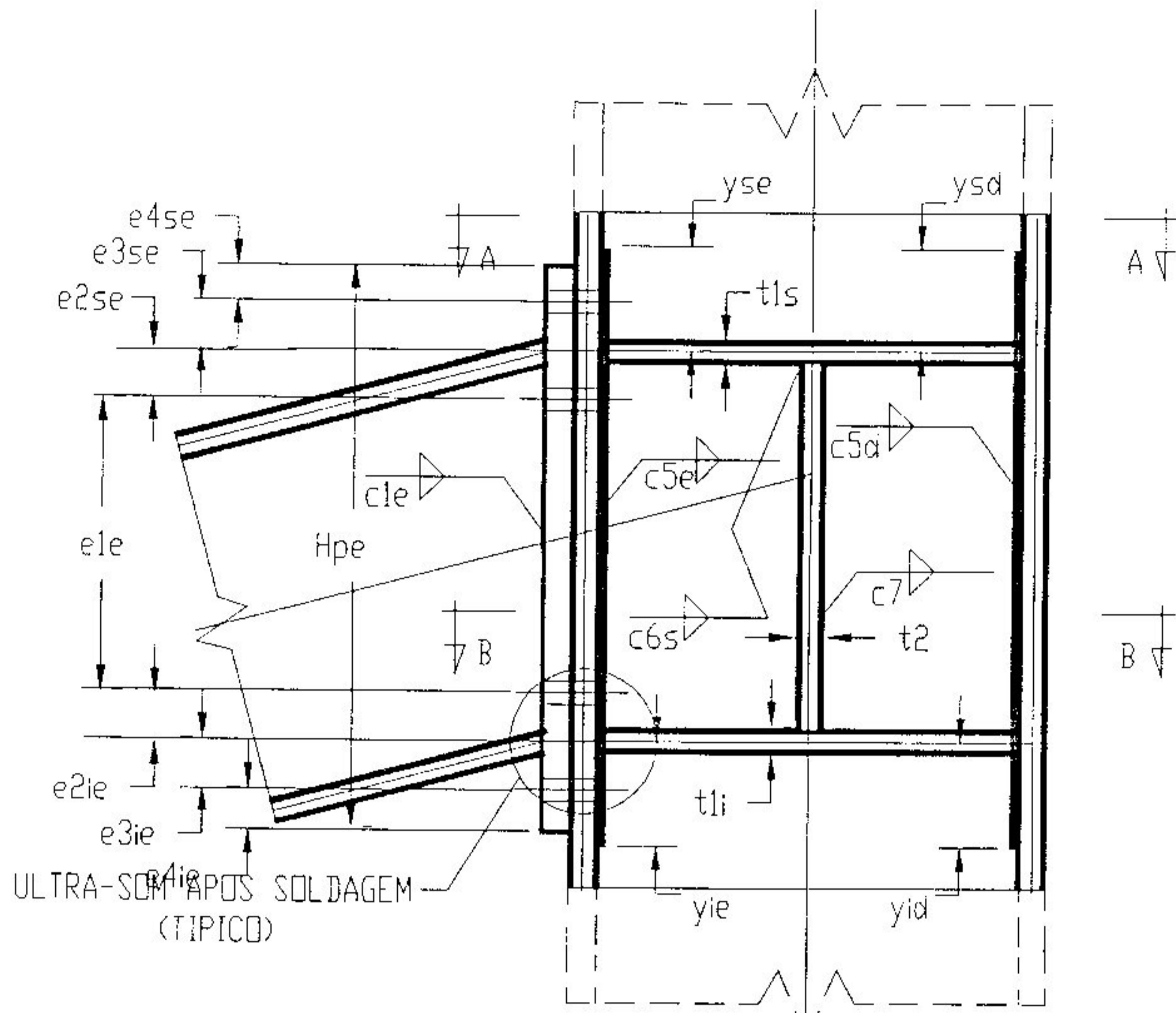


FIG 4-16

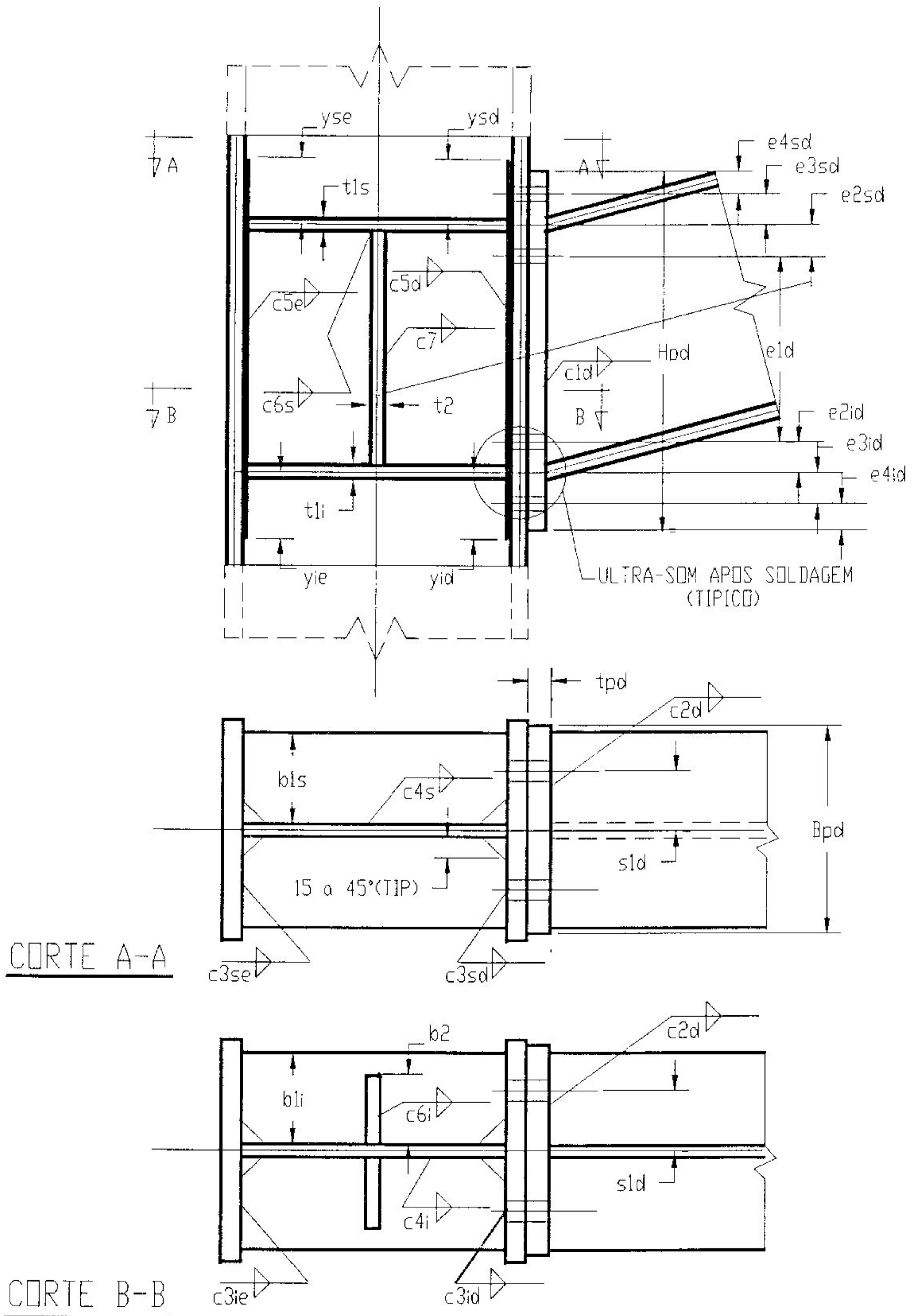


FIG 4-17

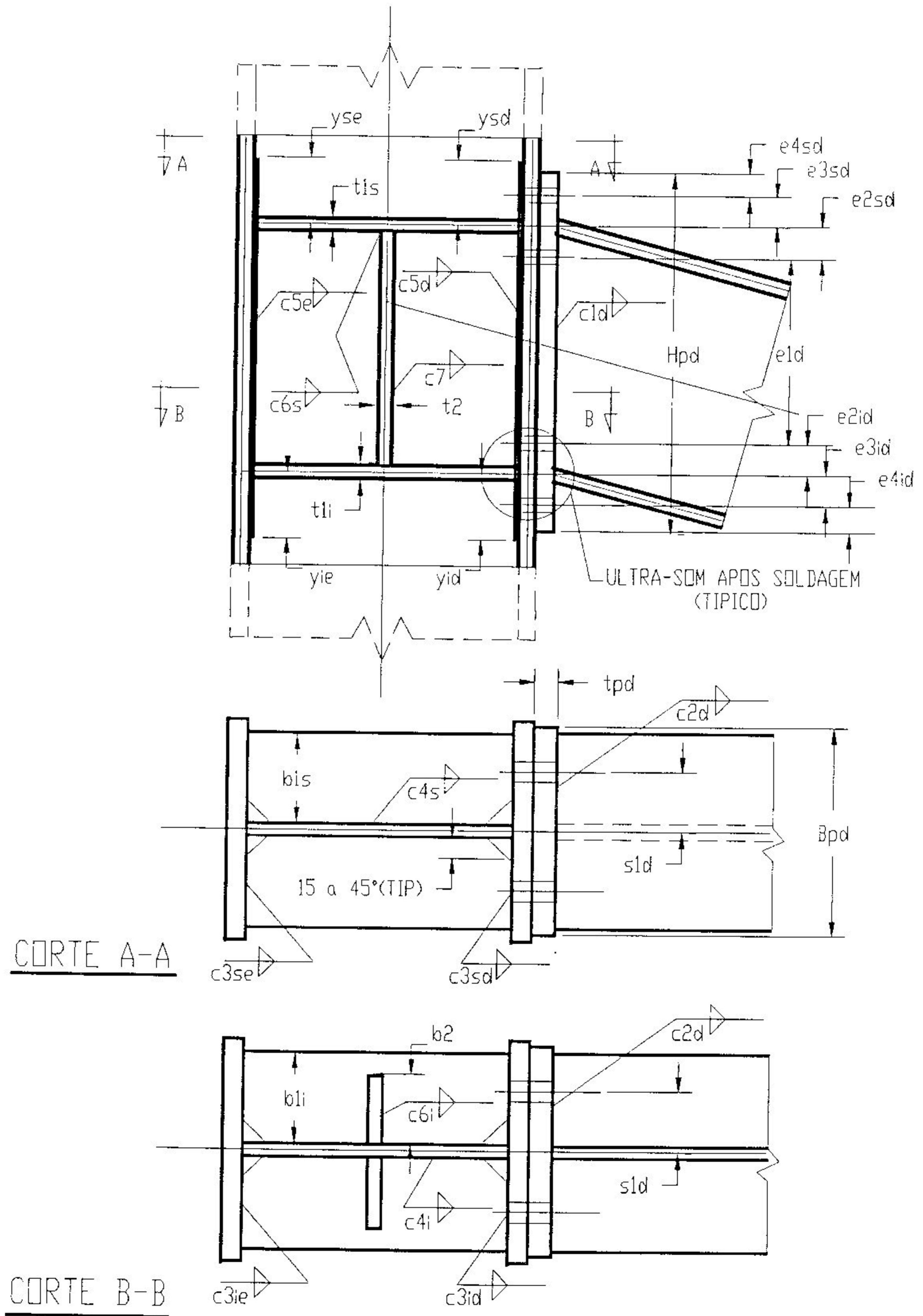


FIG 4-18

4-3) ALGORITMO

4-3-1) LIGAÇÕES SOLDADAS E PARAFUSADAS

4-3-1-1) Definição de valores padrão

Para espessuras de chapas adotaram-se os seguintes valores padrão: 0,3 - 0,475 - 0,63 - 0,8 - 0,95 - 1,25 - 1,6 - 1,9 - 2,24 - 2,5 - 3,15 - 3,75 - 5,0cm.

Para diâmetros de parafusos adotaram-se os seguintes valores padrão: 1,27 - 1,59 - 1,9 - 2,22 - 2,54 - 3,18 - 3,81cm, equivalentes, respectivamente, a 1/2", 5/8", 3/4", 7/8", 1", 1 1/4", 1 1/2".

Para distâncias mínimas b_0 entre centros de parafusos e chapas próximas adotaram-se os seguintes valores : 2,5 - 3,0 - 3,5 - 4,0 - 4,0 - 5,0 - 5,5cm, para os diâmetros padrão acima, na mesma ordem. Com estas distâncias mínimas, a porca não interfere nem com filete de solda com 1,2cm de cateto e nem com mesa de viga inclinada de 20° com relação à horizontal (fig. 4-19).

Para distâncias mínimas s_2m entre centros de dois parafusos adotaram-se os seguintes valores: 4,0 - 5,0 - 6,0 - 7,0 - 7,5 - 9,5 - 11,5cm, para os diâmetros padrão acima, na mesma ordem.

4-3-1-2) Leitura e impressão dos dados

Os dados são lidos na ordem apresentada no item 4-1 e impressos na mesma ordem, para que o usuário possa

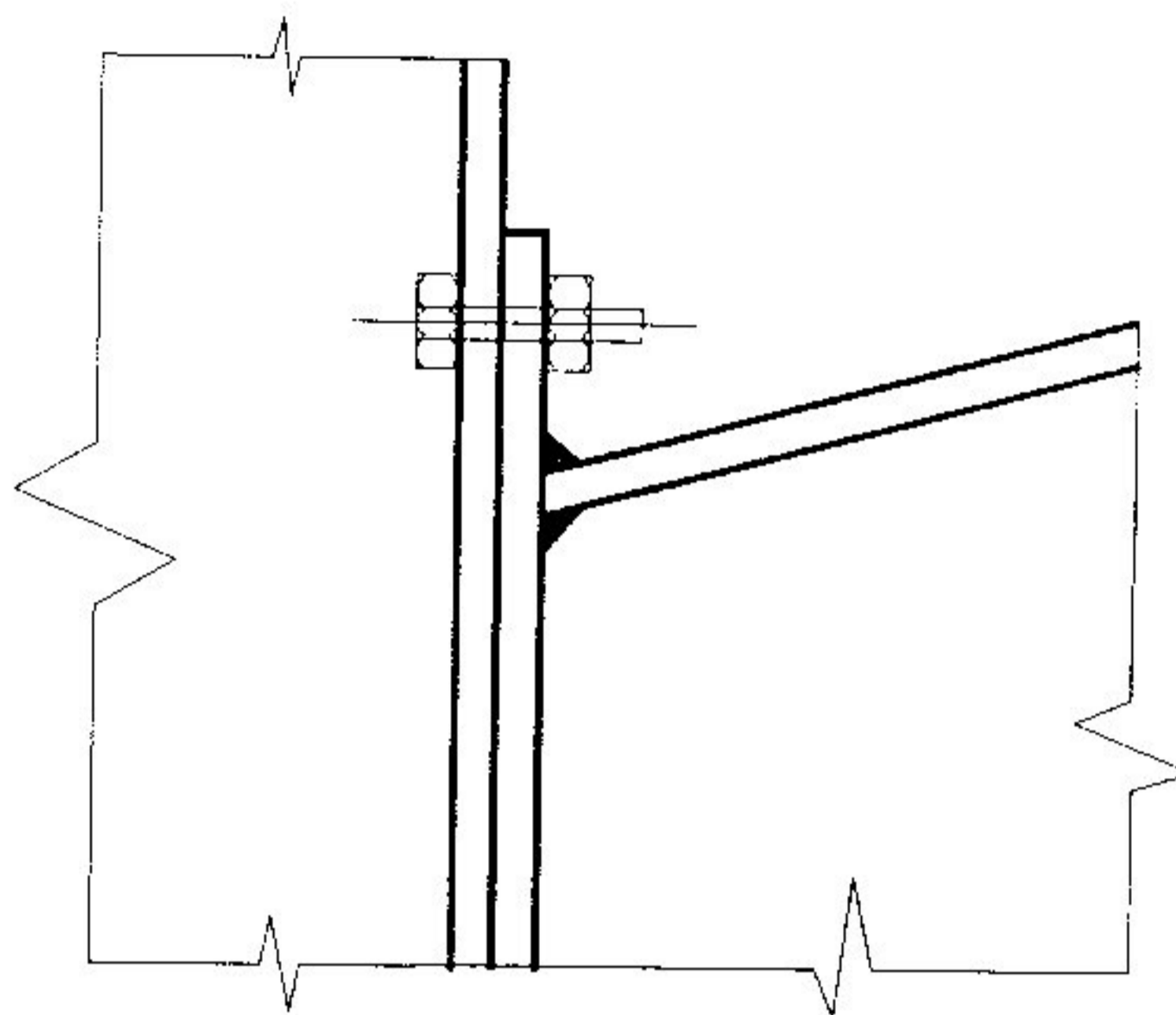


FIG 4-19

verificar se não houve erros de entrada.

4-3-1-3) Testes iniciais

Os dados de entrada são testados como descrito a seguir e, caso não passem em algum teste, o programa emite a mensagem correspondente, paralisando a execução.

- a) Se alguma espessura de chapa for inferior a 0,3cm: "MENOR ESPESSURA PREVISTA É DE 0,3cm".
- b) Se alguma espessura de chapa for superior a 5,0cm: "MAIOR ESPESSURA PREVISTA É DE 5cm".
- c) Se o filete da solda de composição da coluna tiver cateto (c) superior a 1,2cm: "MAIOR FILETE DE SOLDA PREVISTO É DE 1,2cm".
- d) Se o diâmetro preferencial dos parafusos (di) não coincidir com um dos diâmetros padrão: "DIAMETRO FORA DE PADRÃO".

- e) Se houver vigas de ambos os lados e suas alturas forem diferentes: "VIGAS DEVEM TER ALTURAS IGUAIS".
- f) Se a condição c) das considerações iniciais do cap. 4 não for atendida: "RELAÇÃO b/t DA MESA DA COLUNA ACIMA DA MÁXIMA PERMITIDA".
- g) Se a condição d) das considerações iniciais do cap. 4 não for atendida: "RELAÇÃO b/t DA ALMA DA COLUNA ACIMA DA PERMITIDA".
- h) Se a largura da viga (a mais larga no caso de haver duas) for superior à da coluna: "VIGA MAIS LARGA QUE COLUNA".
- i) Se a largura da seção da coluna for superior à altura: "LARGURA DA COLUNA MAIOR QUE ALTURA".
- j) Se a condição e) das considerações iniciais do cap. 4 não for atendida: " LARGURA DA VIGA ESQUERDA (ou DIREITA se for o caso) ABAIXO DA PERMITIDA".
- k) Se o valor absoluto do ângulo das vigas com a horizontal (α) for superior a 20° : "INCLINAÇÃO DA VIGA SUPERIOR A 20 GRAUS".
- l) Se $f_u/f_y < 1,35$: "RELAÇÃO f_u/f_y ABAIXO DA PERMITIDA".
- m) Se o número de combinações de carregamentos (n_{com}) for superior a 20: "NÚMERO DE COMBINAÇÕES MAIOR QUE 20".
- n) Se $f_y > 36\text{kN/cm}^2$: " f_y SUPERIOR A 36kN/cm^2 ".
- o) Se a condição j) das considerações iniciais do cap. 4 não for atendida: "METAL DA SOLDA INCOMPATIVEL COM METAL BASE".
- p) Se a ligação for parafusada e a condição k) das considerações iniciais do cap. 4 não for atendida: "MESA

DA VIGA ESQUERDA (ou DIREITA, se for o caso) MUITO LARGA PARA LIGAÇÃO COM 4 PARAFUSOS".

4-3-1-4) Propriedades da seção da coluna (fig. 4-3)

$$h_{cn} = H_c - 2t_{fc} \quad (4.3)$$

$$b_{fcn} = b_{fc} - t_{wc} \quad (4.4)$$

$$A_c = H_c \cdot b_{fc} - h_{cn} \cdot b_{fcn} \quad (4.5)$$

$$I_c = (b_{fc} \cdot H_c^3 - b_{fcn} \cdot h_{cn}^3) / 12 \quad (4.6)$$

$$h_{ef} = 1,904 t_{wc} (E/f_y)^{1/2} [1 - 0,336 (E/f_y)^{1/2} / (h_{cn}/t_{wc})]$$

$$(porém, h_{ef} \leq h_{cn}) \quad (4.7)$$

$$A_{ef} = A_c - (h_{cn} - h_{ef}) t_{wc} \quad (4.8)$$

Nas expressões anteriores:

A_c = área bruta da seção transversal

I_c = momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo perpendicular à alma

h_{ef} = altura efetiva da alma, levando em conta a resistência pós flambagem devida à força normal, na flexão composta [4]

A_{ef} = área efetiva da seção transversal, correspondente à altura h_{ef} da alma.

4-3-1-5) Solicitações auxiliares

Similarmente ao exposto nas considerações iniciais do capítulo 2, admitir-se-á que a alma da viga aplique na ligação apenas uma força vertical (F_w) e que as mesas da viga apliquem forças segundo sua própria direção (F_s e F_i), conforme indicado na figura 4-20.

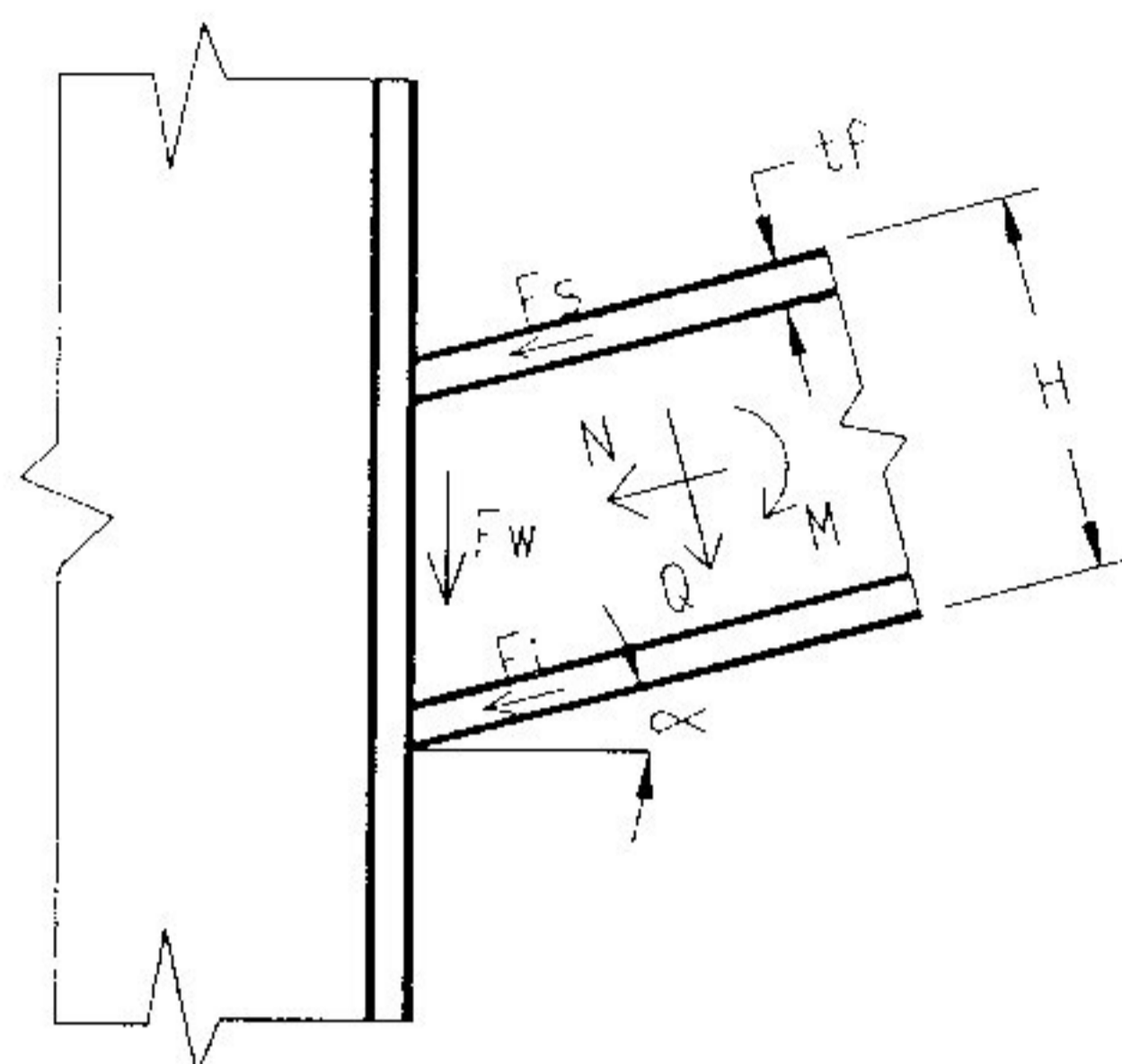


FIG 4-20

Por equilíbrio (N, Q, M na interseção do eixo da viga com a face da coluna):

$$F_s = N/2 - M/(H - t_f) - Q \cdot \operatorname{tg} \alpha / 2 \quad (4.9)$$

$$F_i = N/2 + M/(H - t_f) - Q \cdot \operatorname{tg} \alpha / 2 \quad (4.10)$$

$$F_w = Q / \operatorname{cose} \alpha \quad (4.11)$$

Os valores de F_s , F_i , F_w são determinados para a viga da esquerda (F_{se} , F_{ie} , F_{we}), para todos os ternos de esforços solicitantes (N_e , Q_e , M_e) correspondentes às "ncom" combinações de carregamentos; analogamente, para a viga da direita são determinados F_{sd} , F_{id} , F_{wd} , para todos os ternos N_d , Q_d , M_d . Nas expressões anteriores, a espessura " t_f " a ser usada será a das mesas da viga esquerda (t_{fe}) e da viga direita (t_{fd}), respectivamente.

A seguir determinam-se, para todas as combinações de carregamentos, os valores de F_{hse} , F_{hie} , F_{hsd} , F_{hid} , que são as projeções horizontais de F_{se} , F_{ie} , F_{sd} , F_{id} , respectivamente. Tem-se

$$F_h = F(\operatorname{cose} \alpha) \text{ (com sufixos iguais em } F_h \text{ e } F) \quad (4.12)$$

Determinam-se também os valores máximos e mínimos de F_{se} , F_{ie} , F_{sd} , F_{id} , F_{hse} , F_{hie} , F_{hsd} , F_{hid} , bem como os valores máximos de $|F_{we}|$ e $|F_{wd}|$, dentre todas as combinações de carregamentos.

4-3-1-6) Verificação da alma da coluna

Determina-se, para cada combinação de carregamentos:

$$Q_w = |F_{hse} - F_{hsd} + Q_s| \quad (\text{fig. 4-21}) \quad (4.13)$$

Q_w é a força cortante na coluna entre as mesas superiores e inferiores das vigas.

A seguir determina-se Q_{wmax} , igual ao valor máximo de Q_w dentre todas as combinações.

Compara-se Q_{wmax} com a resistência de cálculo $\phi_v V_n$ da alma da coluna à flambagem, sem enrijecedores ($k = 5,34$), conforme item 2-1.

Caso $Q_{wmax} > \phi_v V_n$, prevê-se a colocação de enrijecedores horizontais nos níveis das mesas superior e

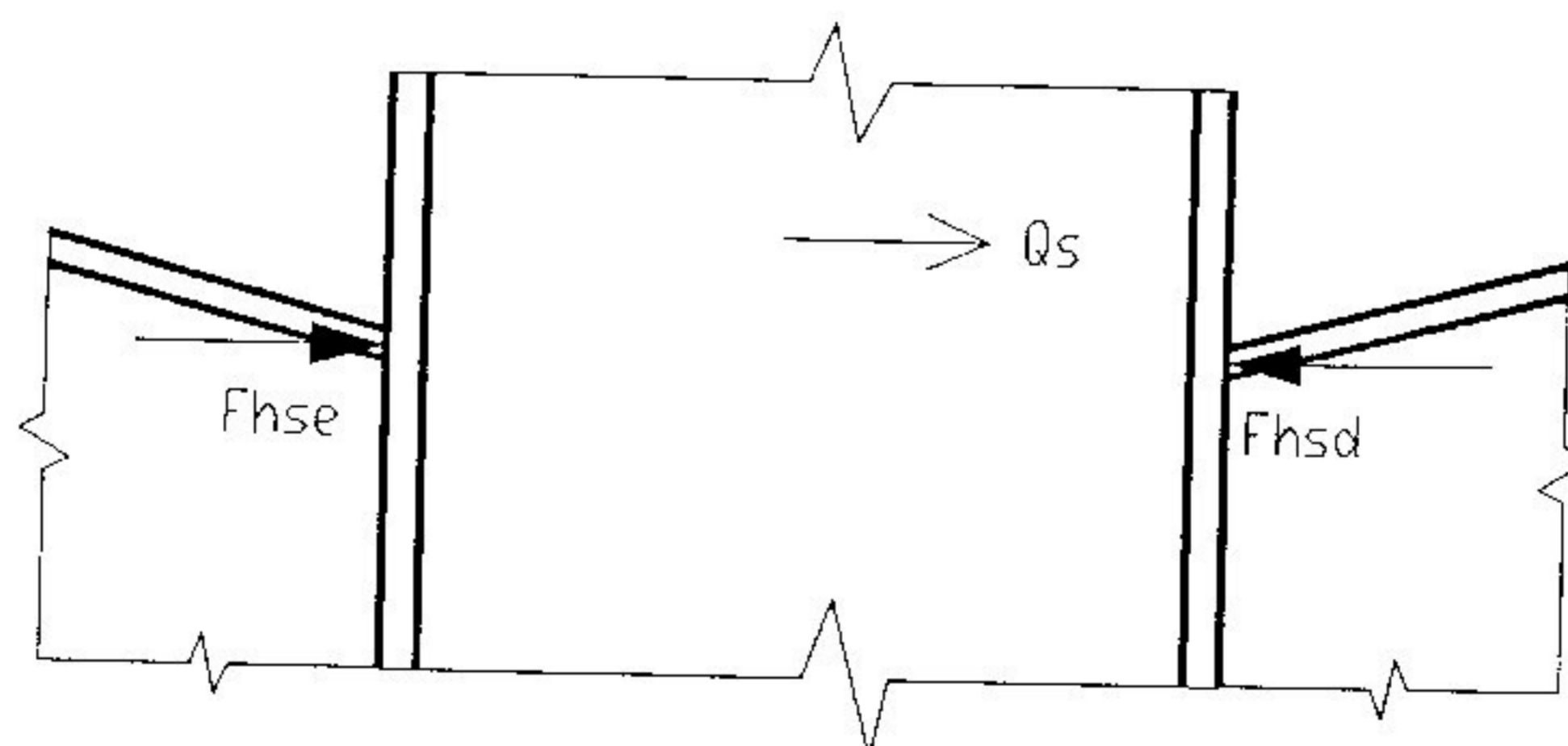


FIG 4-21

inferior, obedecendo às regras de locação dadas no item 4-2. Compara-se Q_{wmax} com a nova resistência de cálculo $\phi_v.V_n$, obtida conforme item 2-1, com o valor de k em função de a/h ; fazer:

$a = z_e$, se houver só viga esquerda

$a = z_d$, se houver só viga direita

$a = \text{maior de } (z_e, z_d)$, se houver 2 vigas

$z_e = (H - t_{fe}) / \cos \alpha$

$z_d = (H - t_{fd}) / \cos \alpha$

t_{fe} e t_{fd} são as espessuras das mesas da viga esquerda e da viga direita, respectivamente, e α é o ângulo das vigas com a horizontal.

Caso ainda permaneça $Q_{wmax} > \phi_v.V_n$, prevê-se a colocação de um enrijecedor vertical central, entre os horizontais já previstos; neste caso, a altura dos painéis resultantes fica sendo igual à metade da altura da alma da coluna e, tendo sido imposta a condição "d" das considerações iniciais do cap. 4, a resistência de cálculo da alma da coluna passa a ser $\phi_v.V_{pl}$, conforme item 2-1.

Se $Q_{wmax} > \phi_v.V_{pl}$, o programa emitirá a mensagem: "ALMA DA COLUNA INSUFICIENTE", interrompendo a execução.

4-3-1-7) Verificação das mesas das vigas

Cada mesa de viga é verificada para os estados limites de ruptura por tração uniforme e esmagamento por compressão uniforme. As solicitações de cálculo são os valores mínimo e máximo, respectivamente, de F_{se} , F_{ie} , F_{sd} ou F_{id} , conforme a

mesa analisada (observando que o sinal positivo significa compressão, a verificação à tração só é feita se o valor mínimo for negativo e à compressão se o máximo for positivo).

As resistências de cálculo para os dois estados limites são determinadas conforme item 2-5.

No caso da tração, a comparação entre solicitação de cálculo e resistência de cálculo é feita usando valor absoluto da solicitação.

Caso alguma solicitação de cálculo seja superior à resistência de cálculo correspondente, o programa emite a mensagem: "MESA SUPERIOR (ou INFERIOR) DA VIGA ESQUERDA (ou DIREITA) NÃO PASSA -TRAÇÃO (ou COMPRESSÃO)", interrompendo a execução.

4-3-2) LIGAÇÕES SOLDADAS

4-3-2-1) Solicitações complementares

Para considerar a redução da resistência ϕR_{tz} da mesa da coluna à plastificação local, conforme item 2-3, usa-se o procedimento a seguir para cada combinação de carregamentos:

-Determinam-se as tensões normais diretas f_{as} e f_{ai} , nos centros das mesas da coluna, logo acima e logo abaixo das vigas, respectivamente:

$$f_{as} = N_s / A_c + M_s (H_c - t_{fc}) / (2I_c), \quad \text{para } N_s \leq 0 \quad (4.14)$$

$$f_{ai} = N_i / A_c \pm M_i (H_c - t_{fc}) / (2I_c), \quad \text{para } N_i \leq 0 \quad (4.15)$$

Observações: Os sinais superiores valem para o lado

esquerdo da coluna (fase e faie) e os inferiores para o direito (fasd e faid); para $N_s > 0$ ($N_i > 0$), Ac deve ser substituída por Aef no cálculo de fas (fai).

Nas expressões anteriores:

$N_s, M_s, N_i, M_i, H_c, t_{fc}$ - dados de entrada (item 4-1)

Ac, I_c, A_{ef} - propriedades da seção da coluna (item 4-3-1-4)

-Calculam-se as resultantes P_{1s} e P_{1i} de fas e fai, respectivamente, multiplicando estas tensões por $b_{fc} \cdot t_{fc}$ (área da mesa da coluna).

-Compõem-se estas resultantes com as projeções verticais das forças F_s e F_i (item 4-3-1-5), respectivamente, da mesma combinação de carregamentos e do mesmo lado (esquerdo ou direito):

$$P_{3se} = P_{1se} + F_{se} \cdot \text{sen} \alpha \quad (4.16)$$

$$P_{3sd} = P_{1sd} + F_{sd} \cdot \text{sen} \alpha \quad (4.17)$$

$$P_{3ie} = P_{1ie} - F_{ie} \cdot \text{sen} \alpha \quad (4.18)$$

$$P_{3id} = P_{1id} - F_{id} \cdot \text{sen} \alpha \quad (4.19)$$

As forças P_3 são as forças axiais nas mesas da coluna logo abaixo das mesas superiores das vigas e logo acima das mesas inferiores, e as forças P_1 são as forças axiais nas mesas da coluna logo acima e logo abaixo das vigas.

Assim, o fator de redução de ϕ_{Rt2} para a combinação "i", no local de ligação com uma mesa de viga será (conforme item 2-3):

$$r[i] = 1 - (P[i] / P_y)^2 \quad (4.20)$$

$P[i] = |P_{1[i]}|$ ou $|P_{3[i]}|$, o que for maior, no local (mesa superior ou inferior, viga esquerda ou direita)

$$P_y = b_{fc} \cdot t_{fc} \cdot f_y$$

Notar que há 4 valores de r por combinação, um para cada local citado.

Caso qualquer um dos quatro valores de $P_{[i]}$ de qualquer combinação supere $0,9P_y$, o programa emitirá a mensagem: "MESA DA COLUNA INSUFICIENTE", interrompendo a execução.

4-3-2-2) Soldas das mesas das vigas com a coluna

Os catetos dos filetes de solda são obtidos, para cada viga, conforme critério apresentado no item 2-5, observando apenas que o ângulo do filete, ao invés de 90° , será $90-\alpha$ de um lado e $90+\alpha$ do outro e, portanto, a menor garganta do filete será $c \cdot \cos[(90+|\alpha|)/2]$, ao invés de $0,707c$. O valor obtido de " c " é arredondado para o primeiro valor inteiro (em milímetros) acima do calculado. Caso " c " seja inferior ao filete mínimo c_{min} que [4] indica para a maior espessura envolvida (mesa da coluna ou da viga), faz-se $c = c_{min}$. Caso $c > 1,2cm$, o programa indicará solda de penetração total.

4-3-2-3) Soldas das almas das vigas com a coluna

Os catetos dos filetes de solda são obtidos, para cada viga, com a condição das solicitações de cálculo $|F_{we}|_{max}$ (viga esquerda) e $|F_{wd}|_{max}$ (viga direita), determinadas conforme item 4-3-1-5, não superarem as respectivas resistências de cálculo ϕR_n das soldas, determinadas conforme item 2-6.

Adicionalmente, conforme item 2-6, impõe-se a condição da solda garantir escoamento local da alma da viga por tração, determinando novo valor do cateto para cada viga.

Assim, serão obtidos dois valores de cateto para cada viga, prevalecendo o maior, que é arredondado para o primeiro valor inteiro acima (em milímetros).

Caso o cateto final "c" seja inferior ao mínimo c_{min} que [4] indica para a maior espessura envolvida (mesa da coluna ou alma da viga), faz-se $c = c_{min}$. Caso $c > 1,2cm$, o programa indicará solda de penetração total.

4-3-2-4) Verificações relativas às forças horizontais que as mesas das vigas introduzem na coluna

Inicialmente determinam-se as forças limites que as mesas das vigas conseguem aplicar na coluna sem enrijecedores, levando em conta a distribuição não uniforme de tensões, conforme o item 2-5.

As forças limites de tração e de compressão serão denominadas F_{red} e F_{redb} , respectivamente (no caso de duas vigas, os limites são determinados para cada uma delas).

A seguir determinam-se os comprimentos de coluna y_{1s} e y_{1i} , acima e abaixo das vigas, respectivamente (utilizando dados de entrada - item 4-1):

$$y_{1s} = x_s - (Hc/2) \operatorname{tg} \alpha - (H/2) / \operatorname{cosec} \alpha \quad (4.21)$$

$$y_{1i} = x_i + (Hc/2) \operatorname{tg} \alpha - (H/2) / \operatorname{cosec} \alpha \quad (4.22)$$

Nas duas expressões, $H = H_d = H_e$.

As resistências de cálculo da coluna sem enrijecedores a

forças horizontais de tração ou compressão introduzidas pelas mesas das vigas são determinadas como a seguir:

- ϕR_{b1} e ϕR_{t1} conforme item 2-2 (estado limite escoamento local da alma da coluna); estas resistências serão consideradas nulas para forças introduzidas pelas mesas superiores das vigas, se $y_{1s} < H_c$, e pelas mesas inferiores, se $y_{1i} < H_c$. Notar que as resistências ϕR_{b1} e ϕR_{t1} são determinadas para cada viga, no caso de haver duas.

- ϕR_{t2} conforme item 2-3 (estado limite plastificação local da mesa da coluna para força de tração introduzida); esta resistência será considerada nula para forças de tração introduzidas pelas mesas superiores das vigas, se $y_{1s} < \delta t_{fc} + b_{fc}/2$, e pelas mesas inferiores, se $y_{1i} < \delta t_{fc} + b_{fc}/2$.

- ϕR_{b2} conforme item 2-4 (estado limite flambagem local da alma da coluna para força de compressão introduzida); esta resistência será considerada nula para forças de compressão introduzidas pelas mesas superiores das vigas, se $y_{1s} < 1,5H_c$, e pelas mesas inferiores, se $y_{1i} < 1,5H_c$.

Para cada mesa de viga efetuam-se os cálculos seguintes:

a) Determina-se a maior força horizontal de compressão a ser introduzida na coluna:

$$F_b = F_{hmax} \text{ se } F_{hmax} > 0 \quad (4.23)$$

$$F_b = 0 \text{ se } F_{hmax} \leq 0 \quad (4.24)$$

F_{hmax} é calculada conforme item 4-3-1-5.

Determinam-se também ϕR_b , igual ao menor dos valores ϕR_{b1} , ϕR_{b2} e F_{redb} no local analisado, e a diferença $dF_b = F_b - \phi R_b$. Esta diferença é a parcela

de F_b a ser absorvida pelos enrijecedores opostos à mesa analisada e vale zero se $F_b \leq \phi R_b$ (neste caso a força de compressão pode ser introduzida na coluna não enrijecida).

- b) Determina-se a maior força horizontal de tração a ser introduzida na coluna:

$$F_t = |F_{hmin}| \text{ se } F_{hmin} < 0 \quad (4.25)$$

$$F_t = 0 \text{ se } F_{hmin} \geq 0 \quad (4.26)$$

F_{hmin} é calculada conforme item 4-3-1-5.

Determina-se também ϕR_{tx} , igual ao menor dos valores ϕR_{t1} e F_{red} no local analisado, e a diferença $dF_{t1} = F_t - \phi R_{tx}$ ($dF_{t1} = 0$ se $F_t \leq \phi R_{tx}$).

- c) Para cada combinação de carregamentos determina-se ϕR_{ty} , igual ao menor dos valores (ϕR_{t2}). (r) e F_{red} no local analisado, e a diferença $dF_{ty} = |F_h| - \phi R_{ty}$ ($dF_{ty} = 0$ se $F_h \geq 0$ ou se $|F_h| \leq \phi R_{ty}$).

F_h é calculada conforme item 4-3-1-5 e "r" conforme item 4-3-2-1.

O maior valor de dF_{ty} dentre todas as combinações será chamado de dF_{t2} , e o valor de ϕR_{ty} para a combinação que gerou dF_{t2} será chamado de $Corresp$, que é a parcela de F_h a ser absorvida diretamente pela coluna, por flexão da mesa, quando $dF_{t2} > 0$.

- d) Define-se $dF_t = dF_{t1}$ ou dF_{t2} , o que for maior. A quantia dF_t é a maior parcela de força de tração a ser absorvida pelos enrijecedores opostos à mesa analisada e, caso dF_t seja nulo, as forças de tração

no local, para qualquer combinação de carregamentos, podem ser introduzidas na coluna não enrijecida.

4-3-2-5) Dimensionamento dos enrijecedores

Todo o processamento deste item é feito independentemente para o nível das mesas superiores das vigas e para o das mesas inferiores.

Inicialmente determina-se dF , igual ao maior dos valores dF_{be} , dF_{bd} , dF_{te} e dF_{td} , com dF_b e dF_t calculados conforme item 4-3-2-4 (os sufixos "e", "d" denotam lados esquerdo e direito, respectivamente).

Se $dF > 0$ ou se foi previsto uso de enrijecedores no item 4-3-1-6 (para evitar flambagem da alma da coluna pela força cortante), então haverá um par de enrijecedores no nível considerado (fig. 4-22).

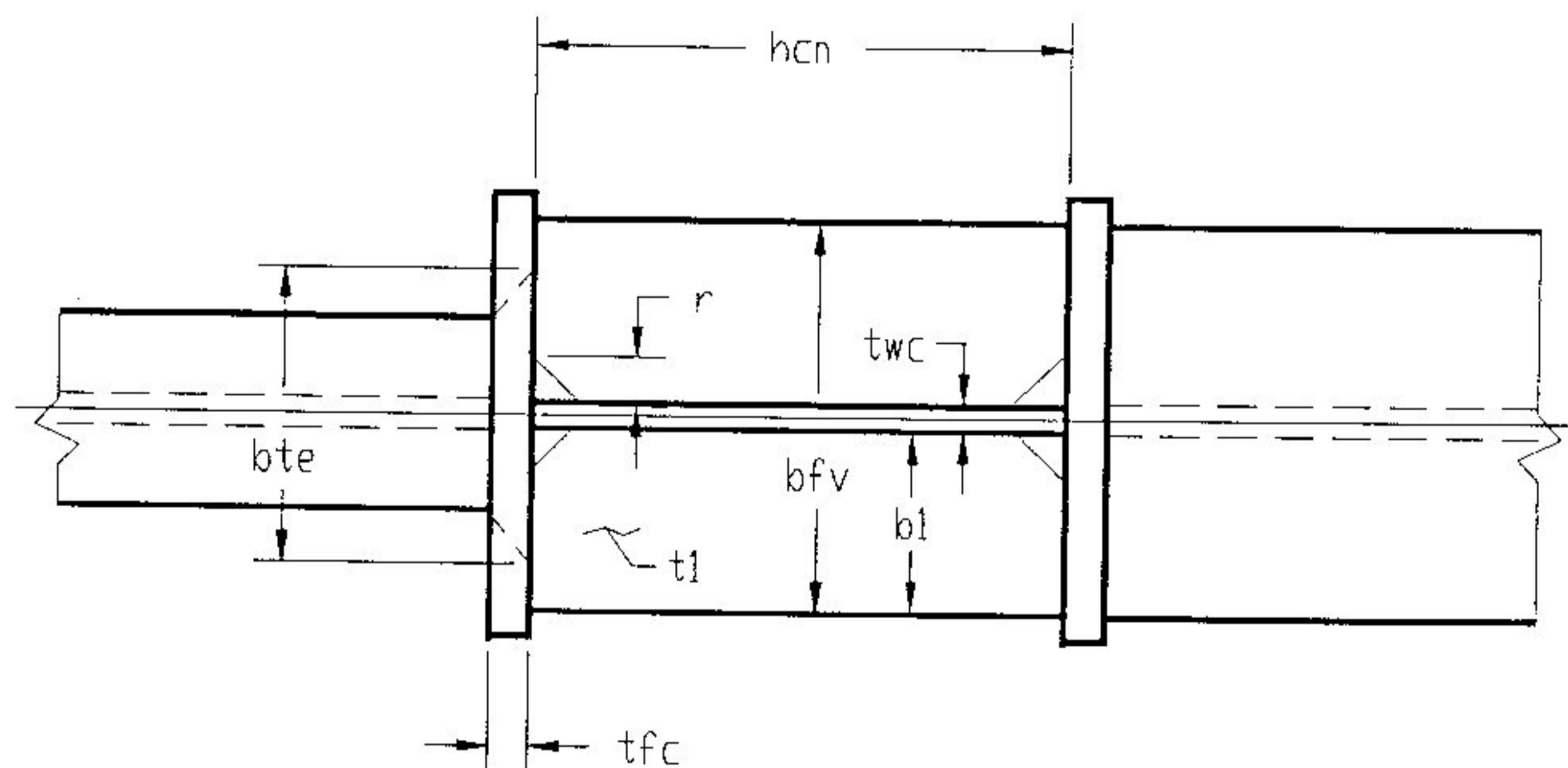


FIG 4-22

A largura total do par de enrijecedores, b_{fv} , será feita

igual à da viga mais larga; assim, cada enrijecedor terá uma largura:

$$b1 = (bfv - twc) / 2 \quad (4.27)$$

A largura responsável pela absorção da força introduzida, $b1$, será igual a bfv ou à largura da viga acrescida de $2tfc$ (a que for menor), conforme item 2-10-1.

A espessura do enrijecedor ($t1$) será a espessura padrão imediatamente acima da maior espessura determinada como segue (caso se obtenha $t1 > 5,0\text{cm}$ o programa emitirá a mensagem: "ESPESSURA $t1$ NÍVEL SUPERIOR (ou INFERIOR) MAIOR QUE 5cm ", interrompendo a execução).

a) Metade da maior espessura de mesa de viga [4].

b) Se os enrijecedores foram previstos no item 4-3-1-6:

$$t1 \geq (hcn/50)^4 \times 12 / bfv^3 \quad (\text{ver item 2-1}) \quad (4.28)$$

c) Seja dFt o maior de $dFte$ e $dFtd$; se $dFt > 0$:

$$t1 \geq dFt / (2.0,9 \cdot b1 \cdot fy) \quad (\text{ver item 2-10-2}) \quad (4.29)$$

d) Se $dFt1e > 0$, calcula-se a largura útil do enrijecedor para a absorção de $dFt1e$:

$$bt1e = bte - (Fte - dFt1e) \cdot bue / Frede + 2tfc$$

$$\text{ou } bte - twc - 2r, \text{ a que for menor} \quad (4.30)$$

(Ft , $dFt1$ e $Fred$ conforme item 4-3-2-4, bu conforme item 2-5 para tração; o sufixo "e" denota lado esquerdo).

$$t1 \geq dFt1e / (0,75fu \cdot bt1e) \quad (\text{ver item 2-10-1}) \quad (4.31)$$

e) Se $dFt1d > 0$, procede-se como no caso anterior, trocando o sufixo "e" por "d", esquerdo por direito.

f) Se $dFtze > 0$, calcula-se a largura útil do

enrijecedor para a absorção de dF_{tze} :

$$bt_{2e} = b_{te} - \text{Correspe.} \cdot b_{ue} / F_{rede} + 2t_{fc}$$

$$\text{ou } b_{te} - t_{wc} - 2r, \text{ a que for menor} \quad (4.32)$$

(Corresp e Fred conforme item 4-3-2-4, bu conforme item 2-5 para tração; o sufixo "e" denota lado esquerdo).

$$t_1 \geq dF_{tze} / (0,75f_u \cdot bt_{2e}) \quad (\text{ver item 2-10-1}) \quad (4.33)$$

g) Se $dF_{tzd} > 0$, procede-se como no caso anterior, trocando o sufixo "e" por "d", esquerdo por direito.

h) Se $dF_{be} > 0$, calcula-se a largura útil do enrijecedor para a absorção de dF_{be} :

$$bb_{1e} = b_{te} - (F_{be} - dF_{be}) \cdot b_{ue} / F_{redbe} + 2t_{fc}$$

$$\text{ou } b_{te} - t_{wc} - 2r, \text{ a que for menor} \quad (4.34)$$

(F_b , dF_b e F_{redb} conforme item 4-3-2-4, bu conforme item 2-5 para compressão; o sufixo "e" denota lado esquerdo).

$$t_1 \geq dF_{be} / (0,75 \times 1,5f_y \cdot bb_{1e}) \quad (\text{item 2-10-1}) \quad (4.35)$$

i) Se $dF_{bd} > 0$, procede-se como no caso anterior, trocando o sufixo "e" por "d", esquerdo por direito.

j) Seja dF_b o maior de dF_{be} e dF_{bd} ; se $dF_b > 0$, t_1 deve ser tal que a resistência de cálculo ϕR_{nb} , definida no item 2-10-3, seja igual ou superior a dF_b .

4-3-2-6) Capacidade real dos enrijecedores, para absorção das forças introduzidas

Devido às diversas condições impostas no dimensionamento

dos enrijecedores e devido ao uso de espessura padrão, a capacidade real dos enrijecedores é superior a algumas das solicitações de cálculo neles aplicadas, ou a todas elas. Tais capacidades reais são determinadas para os níveis superior e inferior (caso haja enrijecedores no nível) e para cada extremidade dos enrijecedores (esquerda e direita) que absorva força introduzida, como segue.

- a) Seja ϕR_{nte} a capacidade real dos enrijecedores para tração introduzida, lado esquerdo. A largura útil b_{t1e} , calculada em 4-3-2-5-d, pode ser alterada para:

$$b_{t1e} = b_{te} - (F_{te} - \phi R_{nte}) b_{ue} / F_{rede} + 2t_{fc}$$

$$\text{ou } b_{te} - t_{wc} - 2r, \text{ a que for menor.} \quad (4.36)$$

para determinar b_{t1e} na 1a. expressão, faz-se

$$\phi R_{nte} = 0,75f_u \cdot t_1 \cdot b_{t1e} \quad (4.37)$$

(conforme item 2-10-1) e resolve-se a equação.

Obtido o menor valor de b_{t1e} , ter-se-á ϕR_{nte} igual ao menor de $0,9f_y(2b_1 \cdot t_1)$ e $0,75f_u(t_1 \cdot b_{t1e})$, conforme itens 2-10-2 e 2-10-1, respectivamente. No caso do menor valor ser o primeiro, a largura b_{t1e} (utilizada posteriormente para dimensionamento da solda) é igual ao menor valor obtido das expressões acima, com $\phi R_{nte} = 0,9f_y(2b_1 \cdot t_1)$ na 1a. expressão.

- b) Para determinar ϕR_{ntd} e b_{t1d} (resistência real e largura útil, respectivamente, lado direito), procede-se como no caso anterior trocando o sufixo "e" por "d".

c) Seja ϕR_{nbe} a capacidade real dos enrijecedores para compressão introduzida, lado esquerdo. A largura útil bb_{1e} , calculada em 4-3-2-5-h, pode ser alterada para:

$$bb_{1e} = b_{te} - (F_{be} - \phi R_{nbe}) b_{ue} / F_{redbe} + 2t_{fc}$$

$$\text{ou } b_{te} - t_{wc} - 2r, \text{ a que for menor} \quad (4.38)$$

Para determinar bb_{1e} na 1a. expressão, faz-se

$$\phi R_{nbe} = 0,75 \times 1,5 f_y \cdot t_1 \cdot bb_{1e} \quad (4.39)$$

(conforme item 2-10-1) e resolve-se a equação.

Obtido o menor valor de bb_{1e} , ter-se-á ϕR_{nbe} igual ao menor de $0,9\rho \cdot Q \cdot f_y (2b_1 \cdot t_1)$ e $0,75 \times 1,5 f_y (t_1 \cdot bb_{1e})$, conforme itens 2-10-3 e 2-10-1, respectivamente. No caso do menor valor ser o primeiro, a largura bb_{1e} (utilizada posteriormente para dimensionamento da solda) é igual ao menor valor obtido das expressões acima, com $\phi R_{nbe} = 0,9\rho \cdot Q \cdot f_y (2b_1 \cdot t_1)$ na 1a. expressão.

d) Para determinar ϕR_{nbd} e bb_{1d} (resistência real e largura útil, respectivamente, lado direito), procede-se como no caso anterior, trocando o sufixo "e" por "d".

4-3-2-7) Verificação dos enrijecedores a cisalhamento, em seções paralelas à alma da coluna; dimensionamento da solda dos enrijecedores com a alma da coluna

Para os níveis superior e inferior (caso haja enrijecedores no nível), procede-se como segue (ver fig. 4-23).

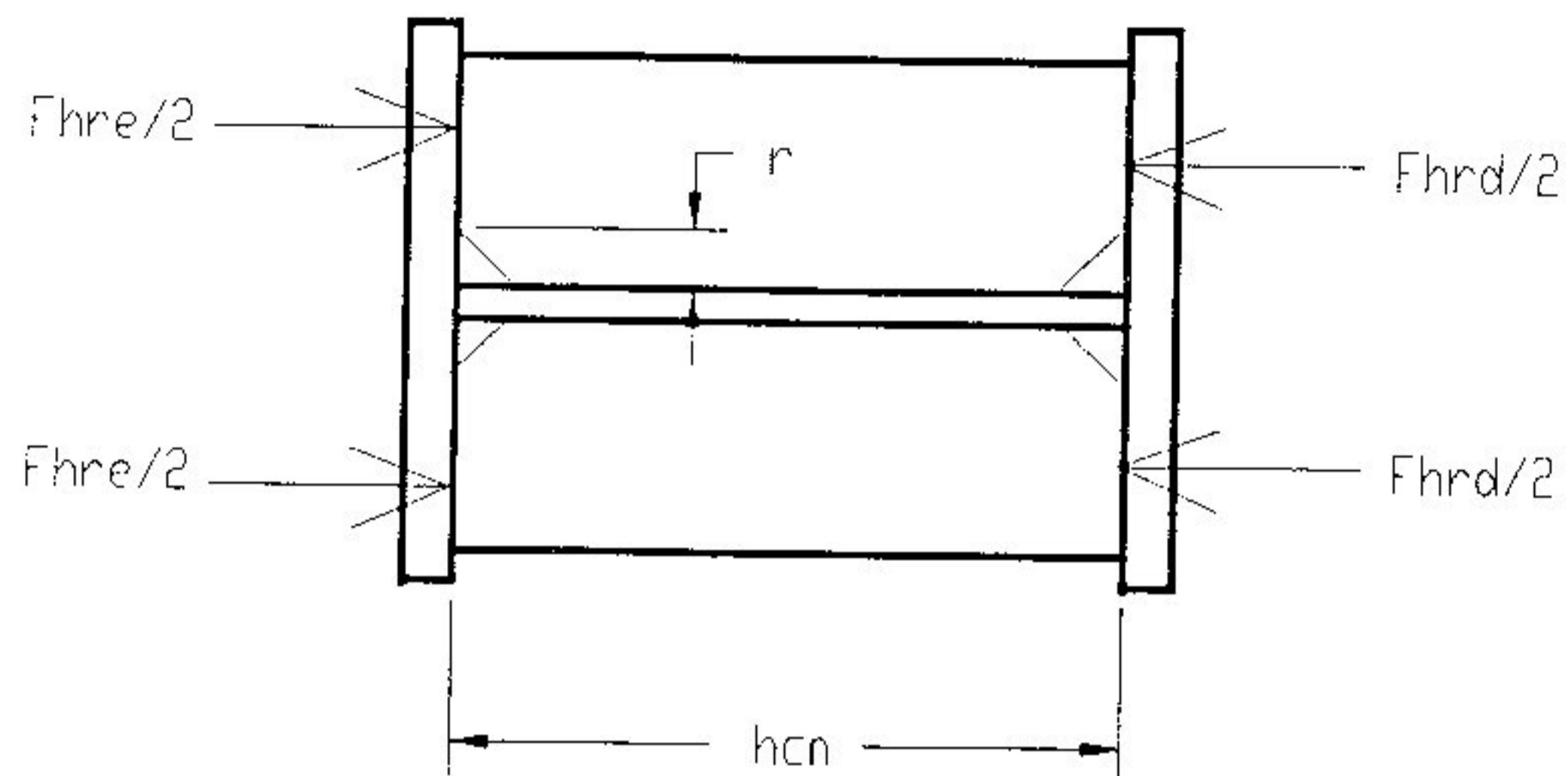


FIG 4-23

a) Para cada uma das "ncom" combinações de carregamentos:

$$Fhre = \text{maior de } (Fhe, -\phi Rnte), \text{ se } Fhe \leq 0 \quad (4.40)$$

$$Fhre = \text{menor de } (Fhe, \phi Rnbe), \text{ se } Fhe > 0 \quad (4.41)$$

$$Fhrd = \text{maior de } (Fhd, -\phi Rntd), \text{ se } Fhd \leq 0 \quad (4.42)$$

$$Fhrd = \text{menor de } (Fhd, \phi Rnbd), \text{ se } Fhd > 0 \quad (4.43)$$

Fhre e Fhrd são as forças finais absorvidas pelos enrijecedores para a combinação em pauta;

Fhe e Fhd conforme item 4-3-1-5, observando o nível ("s" ou "i");

$\phi Rnte$, $\phi Rnbe$, $\phi Rntd$ e $\phi Rnbd$ conforme item 4-3-2-6.

b) Determina-se a força cortante para cada combinação de carregamentos :

$$Ftau = |Fhre - Fhrd| \quad (4.44)$$

A força cortante de cálculo, $Ftaumax$, será o maior valor de $Ftau$ dentre todas as combinações.

c) Com base no item 2-10-4, a espessura dos enrijecedores deverá atender a:

$$t_1 \geq F_{taumax} / [2 \times 0,75(h_{cn} - 2r)(0,6f_u)] \text{ e} \quad (4.45)$$

$$t_1 \geq F_{taumax} / [2 \times 0,9h_{cn}(0,6f_y)] \quad (4.46)$$

Caso o valor de t_1 assim obtido supere o já calculado no item 4-3-2-5 (o que é altamente improvável), a espessura dos enrijecedores passará a ser a espessura padrão imediatamente acima do novo valor de t_1 , a menos que este supere 5,0cm, caso em que o programa emite a mensagem já mencionada em 4-3-2-5 e interrompe a execução.

d) O cateto das soldas de filete dos enrijecedores com a alma da coluna é calculado com (conforme item 2-10-4):

$$c = F_{taumax} / [4 \times 0,75 \times 0,707(h_{cn} - 2r)(0,6f_{uw})] \quad (4.47)$$

O valor de "c" é arredondado para o primeiro valor inteiro (em milímetros) acima do calculado. Caso "c" seja inferior ao filete mínimo c_{min} que [4] indica para a maior espessura envolvida (enrijecedor ou alma da coluna), faz-se $c = c_{min}$.

Caso $c > 1,2$ cm, o programa indicará solda de penetração total.

4-3-2-8) Soldas dos enrijecedores com as mesas da coluna

Para os níveis superior e inferior (caso haja enrijecedores no nível), procede-se como segue (com base no item 2-10-5).

b) Determinam-se os valores máximos F_{ruemax} e F_{rudmax} de F_{rue} e F_{rud} , respectivamente, dentre todas as combinações, com os quais se calculam os catetos das soldas de filete para os lados esquerdo e direito, respectivamente:

$$ce = F_{ruemax} / [2 \times 0,75 \times 0,707(0,6f_{uw})] \quad (4.59)$$

$$cd = F_{rudmax} / [2 \times 0,75 \times 0,707(0,6f_{uw})] \quad (4.60)$$

Os valores assim obtidos são arredondados, cada um independentemente, para o primeiro valor inteiro (em milímetros) acima do calculado. Caso o resultado seja inferior ao mínimo que [4] indica para a maior espessura envolvida (enrijecedor ou mesa da coluna), tal mínimo será utilizado para "ce" e/ou "cd" (conforme o resultado).

Se "ce" (ou "cd") for superior a 1,2cm, o programa indicará solda de penetração total no local.

4-3-2-9) Testes de bordas da coluna e de inclinação dos enrijecedores

A menor borda de coluna (para fins construtivos) foi fixada em 3cm, a partir da face externa da mesa da viga ou do enrijecedor. Para a mesa da viga já foram calculados y_{1s} e y_{1i} no item 4-3-2-4, e nenhum dos dois pode ser inferior a 3cm.

Havendo enrijecedor no nível analisado (o das mesas superiores ou o das mesas inferiores das vigas) calcula-se a borda da coluna a partir da face externa do enrijecedor

(fig. 4-25)

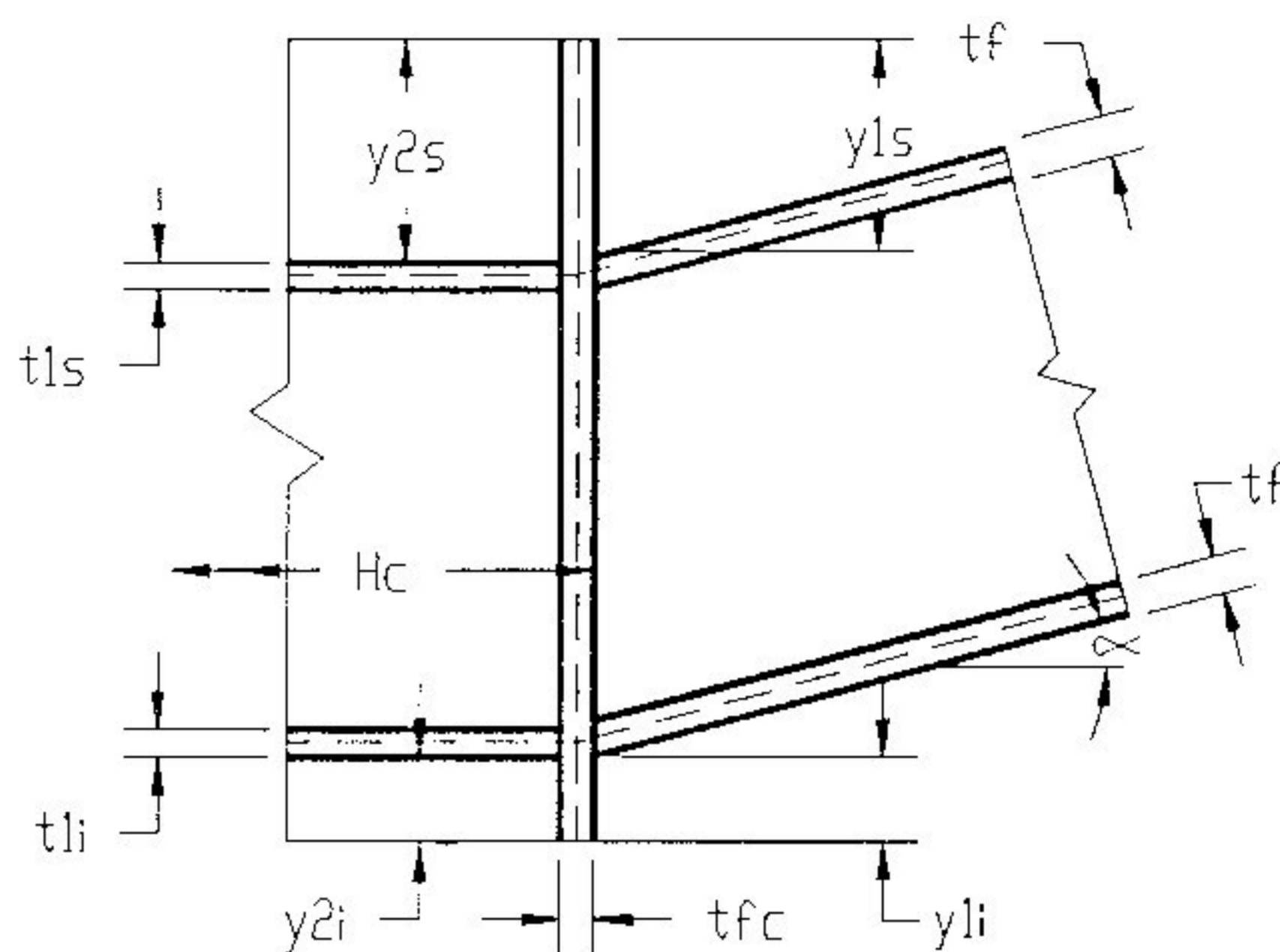


FIG 4-25

$$y2s = y1s + tf / (2 \cos \alpha) + (tfc / 2) \operatorname{tg} \alpha - t1s / 2 \quad (4.61)$$

$$y2i = y1i + tf / (2 \cos \alpha) - (tfc / 2) \operatorname{tg} \alpha - t1i / 2 \quad (4.62)$$

Deve-se ter $y2s \geq 3\text{cm}$ e $y2i \geq 3\text{cm}$

Notar que, havendo vigas à esquerda e à direita com espessuras diferentes de mesas ($tfe \neq tfd$) e havendo enrijecedores no nível analisado, os valores de $y2s$ (ou $y2i$) serão diferentes à esquerda e à direita, resultando numa inclinação dos enrijecedores, dada por:

$$i = [|tfe - tfd| / (2 \cos \alpha)] / (Hc - tfc) \quad (4.63)$$

Para que a hipótese de enrijecedores horizontais seja aplicável, estabeleceu-se uma inclinação máxima permitida de 0,03.

Caso o critério de borda mínima igual a 3cm não seja atendido, o programa emite a mensagem: "DISTANCIA XS (ou XI) INSUFICIENTE" e interrompe a execução (XS e XI são as distâncias x_s e x_i da fig. 4-4).

Caso a inclinação "i" seja superior a 0,03 ,o programa emite a mensagem: "ENRIJECEDOR COM INCLINAÇÃO SUPERIOR A 3 POR CENTO" e interrompe a execução.

4-3-2-10) Reforço da solda de composição da coluna

O processamento a seguir é feito independentemente para as soldas de composição do lado esquerdo e do lado direito da coluna (base: item 2-7).

a) Para cada combinação de carregamentos determinam-se:

a.1) A força horizontal introduzida diretamente na alma da coluna:

$$F_{hw} = |F_h|, \text{ se não houver enrijecedor no nível} \quad (4.64)$$

$$F_{hw} = |F_h - F_{hr}|, \text{ se houver enrijecedor no nível} \quad (4.65)$$

F_h conforme item 4-3-1-5 e F_{hr} conforme item 4-3-2-7-a (os sufixos de F_h e F_{hr} são compatíveis com o lado analisado - "e" ou "d" para lados esquerdo ou direito, respectivamente)

Devem ser calculados dois valores de F_{hw} , um superior e outro inferior, do mesmo lado, prevalecendo o maior. O comprimento de distribuição da força horizontal na alma, com base no item 2-2 (fig. 2-4) é:

$$x_{at} = 5t_{fc} + t_f / \cos \alpha \quad (t_f = t_{fe} \text{ ou } t_{fd}) \quad (4.66)$$

A força horizontal por unidade de comprimento, para a combinação analisada é:

$$F_{whu} = F_{hw}/x_{at} \quad (4.67)$$

a.2) A força vertical por unidade de comprimento da solda de composição:

$$F_{wvu} = Q/h_{cn} \quad (4.68)$$

$Q = |Q_s|$ ou $|Q_i|$ ou Q_w , o que for maior na combinação analisada (Q_s e Q_i são dados de entrada, item 4-1, e Q_w é definido no item 4-3-1-6)

h_{cn} = altura da alma da coluna (distância entre faces internas das mesas)

a.3) A resultante de F_{whu} e F_{wvu} :

$$F_{wru} = (F_{whu}^2 + F_{wvu}^2)^{1/2} \quad (4.69)$$

b) A seguir determina-se F_{wrumax} , igual ao maior valor de F_{wru} dentre todas as combinações.

c) O cateto necessário para os filetes da solda de composição, no lado analisado, é dado por:

$$c = F_{wrumax}/(2 \times 0,75 \times 0,707 \times 0,6 f_{uw}) \quad (4.70)$$

O valor de "c" é arredondado para o primeiro valor inteiro (em milímetros) acima do calculado. Caso o resultado seja inferior ao filete mínimo c_{min} que [4] indica para a maior espessura envolvida (mesa ou alma da coluna), faz-se $c = c_{min}$. Caso $c > 1,2$ cm, o programa indicará solda de penetração total.

d) O reforço da solda de composição é feito na região entre os centros das mesas da viga e deve se estender y_s acima e y_i abaixo desta região, para atender ao comprimento de distribuição x_{at} correspondente:

$$y_s = x_{at}/2 + (t_{fc}/2) \operatorname{tg} \alpha \quad (4.71)$$

$$y_i = x_{at}/2 - (t_{fc}/2) \operatorname{tg} \alpha \quad (4.72)$$

Por razões construtivas, y_s e y_i devem corresponder a comprimentos de solda de pelo menos 5cm além da face externa dos enrijecedores (ou da interseção dos centros das mesas da coluna e da viga, quando não há enrijecedor no nível).

Entretanto, se no local analisado não houver força horizontal introduzida diretamente na alma da coluna, isto é, $F_{hw} = 0$ para todas as combinações, o valor de y_s (e/ou de y_i , dependendo de onde $F_{hw} = 0$) será tal que a solda se estenda até a extremidade da coluna ou 5cm além da face externa do enrijecedor, o que for mais próximo. Não havendo enrijecedor, os 5cm são contados a partir da interseção dos centros das mesas da coluna e da viga.

4-3-2-11) Constantes de mola

Para cada uma das quatro posições de introdução de forças horizontais (lados esquerdo e direito, mesas superior e inferior da viga) determinam-se as constantes de mola conforme item 3-2-3, com as seguintes observações:

- se não houver enrijecedores no nível considerado, $A_{enr} = 0$;
- se a solda entre as mesas da viga e da coluna for de penetração, $b_s = 0$;
- para levar em conta a inclinação da viga (α), deve-se dividir "tb" por "cos α " na determinação de l_0 ;

- se a borda (y_{1s} ou y_{1i} , conforme o caso, calculados conforme item 4-3-2-4) for inferior a b_s+t_c , ter-se-á:

$$l_0 = (t_b/\cos\alpha) + y_{1s} \text{ (ou } y_{1i}) + b_s + t_c \quad (4.73)$$

Não havendo viga de um lado, as constantes de mola só são determinadas para o lado oposto.

4-3-2-12) Dimensionamento do enrijecedor vertical e de suas soldas

Caso tenha sido necessário o uso de enrijecedor vertical, conforme item 4-3-1-6, seu dimensionamento será feito como a seguir (fig. 4-26).

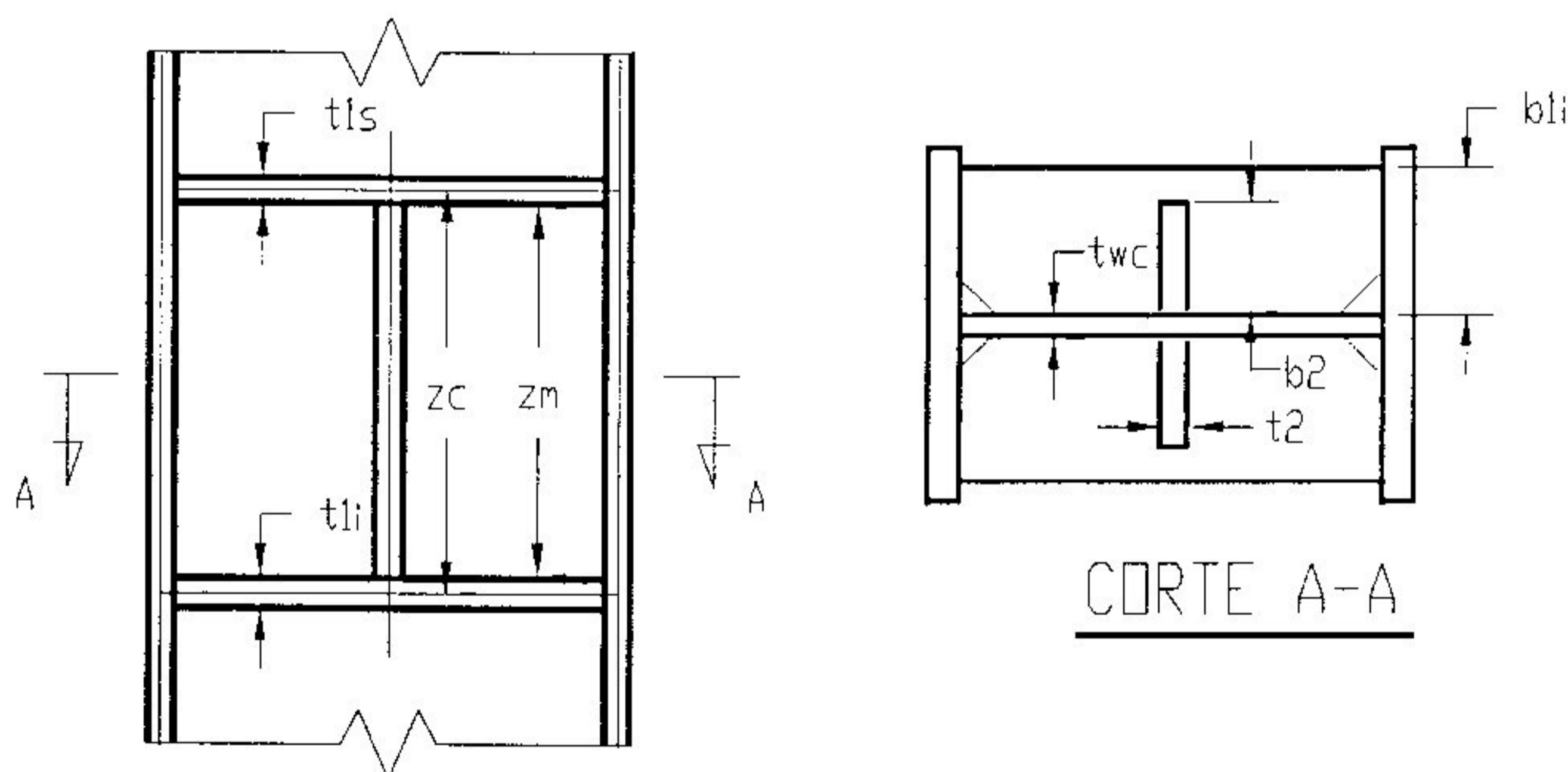


FIG 4-26

Determina-se a altura do enrijecedor entre centros dos enrijecedores horizontais:

$$z_c = (z_e + z_d)/2, \text{ no caso de haver duas vigas}$$

$$z_c = z_e, \text{ caso só haja viga à esquerda}$$

$$z_c = z_d, \text{ caso só haja viga à direita} \quad (4.74)$$

$$z_e = (H_e - t_{fe}) / \cos \alpha \quad (4.75)$$

$$z_d = (H_d - t_{fd}) / \cos \alpha \quad (4.76)$$

(H_d , H_e , t_{fd} , t_{fe} , α , são dados de entrada - item 4-1)

A altura livre z_m será:

$$z_m = z_c - (t_{1s} + t_{1i}) / 2 \quad (4.77)$$

Usa-se um par de chapas, cada uma com largura b_2 igual à menor largura dentre os enrijecedores horizontais superior e inferior.

A espessura t_2 é determinada com a condição de rigidez necessária [4]:

$$t_2 \cdot (2b_2 + t_{wc})^3 / 12 \geq (z_m / 50)^4 \quad (4.78)$$

A espessura t_2 final será a espessura padrão imediatamente acima da calculada. Caso se obtenha $t_2 > 5,0\text{cm}$ o programa emitirá a mensagem: "ESPESSURA t_2 MAIOR QUE 5cm", interrompendo a execução.

As soldas do enrijecedor vertical com a alma da coluna e com os enrijecedores horizontais serão filetes mínimos, conforme [4], baseados na maior espessura envolvida em cada caso.

4-3-3) LIGAÇÕES PARAFUSADAS

4-3-3-1) Dimensionamento dos parafusos

O procedimento descrito a seguir é feito independentemente para o lado esquerdo (caso haja viga à esquerda) e para o lado direito (caso haja viga à direita).

a) A referência [9], que está sendo utilizada neste trabalho para introdução da força de tração na coluna através de ligação parafusada com chapa de cabeça, estabelece as seguintes proporções para a ligação (fig 4-27):

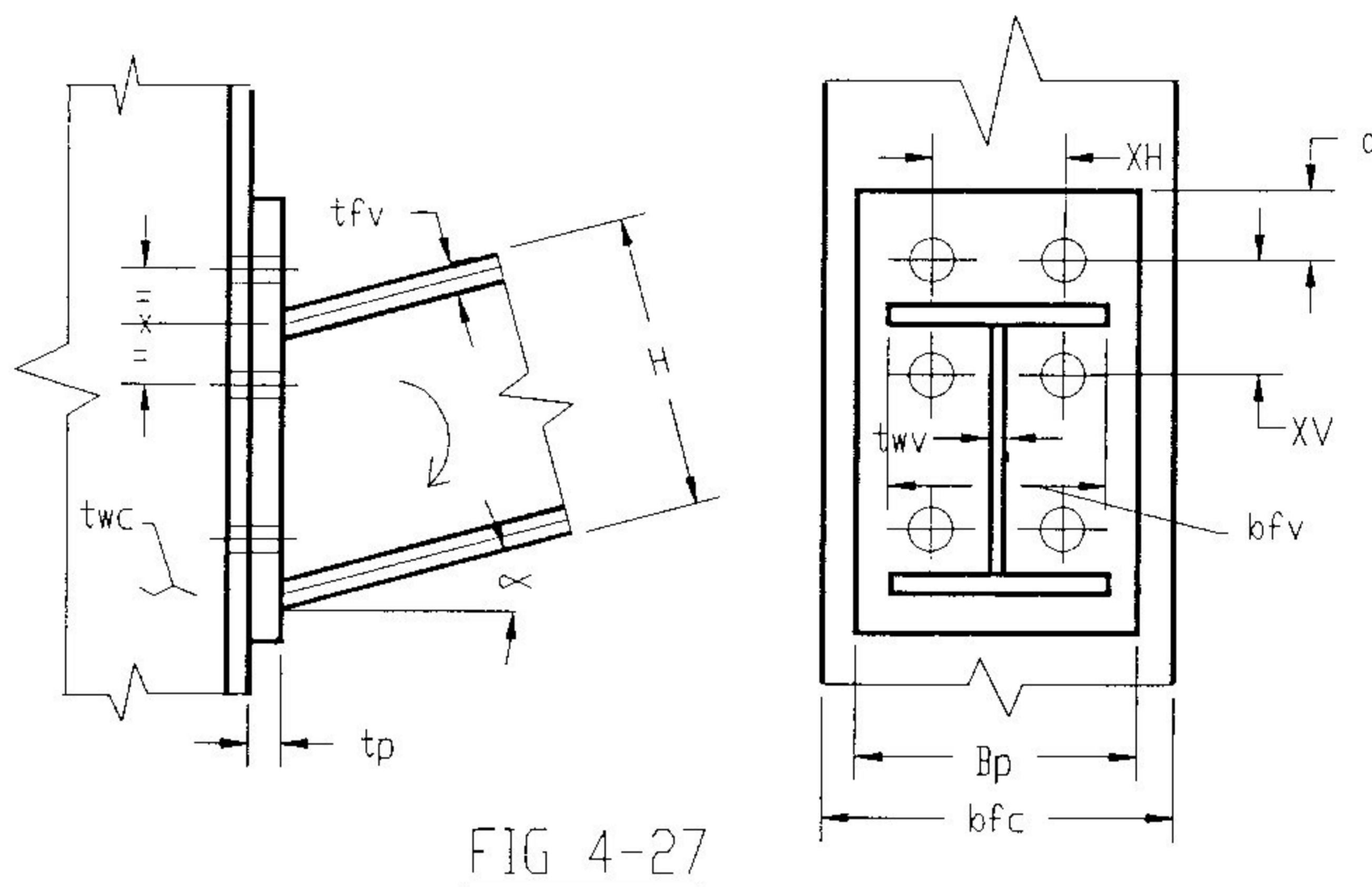


FIG 4-27

$$B_p \cong 9d \quad XH \cong 5d \quad XV \cong 6d \quad a \cong 2,5d, \text{ onde}$$

d = diâmetro dos parafusos

Além disto devem ser observadas as distâncias mínimas b_0 entre centros de parafusos e chapas próximas bem como as distâncias mínimas s_2m entre centros de dois parafusos, definidas no item 4-3-1-1. Adicionalmente deve-se observar que a largura B_p da chapa de cabeça não deve ser superior à da coluna (b_{fc}) e nem inferior à da viga (b_{fv}), e que, para evitar concentração da força da mesa da viga na chapa de cabeça, a distância XH não deve ser superior à

largura da viga (b_{fv}). Assim, o diâmetro "d" dos parafusos deve ser tal que as seguintes condições de compatibilidade sejam atendidas:

$$I) \quad b_{fv} \geq XH = 5d \quad (4.79)$$

$$II) \quad b_{fv} \leq Bp = 9d \quad (4.80)$$

$$III) \quad b_{fc} \geq Bp = 9d \quad (4.81)$$

$$IV) \quad XH = 5d \geq 2b_o + t_{wc} \quad (4.82)$$

$$V) \quad XH = 5d \geq 2b_o + t_{wv} \quad (4.83)$$

$$VI) \quad XV = 6d \geq 2b_o + (t_{fv} / \cos \alpha) \quad (4.84)$$

$$VII) \quad [(H - t_{fv}) / \cos \alpha] - 6d \geq s_{2m} \quad (4.85)$$

(estabelecendo que os parafusos internos inferiores e superiores fiquem à mesma distância das faces internas das mesas adjacentes da viga)

b) Se $F_{hsmin} \geq 0$ e $F_{himin} \geq 0$ (conforme item 4-3-1-5, com as letras "s" e "i" significando níveis das mesas superior e inferior da viga, respectivamente) fica contrariada a hipótese de predominância do momento fletor na ligação, e o programa emite a mensagem: "CASO ANORMAL - MOMENTO FLETOR NÃO PREDOMINA", interrompendo a execução.

Se $F_{hsmin} < 0$ ($F_{himin} < 0$) o programa estabelece $n_{ps} = 4$ ($n_{pi} = 4$), do contrário $n_{ps} = 2$ ($n_{pi} = 2$); n_{ps} (n_{pi}) é o número de parafusos adjacentes à mesa superior (inferior) da viga.

Para que os parafusos não sofram ruptura por tração, conforme item 2.8, é necessário que seja atendida a condição de resistência:

$$0,75 \times 0,75 (\pi d^2 / 4) f_{up} \geq T_b / 3 \quad (4.86)$$

$T_b = |F_h|$, sendo $F_h = F_{hmin}$ ou F_{himin} , o que for menor

$f_{up} = 82,5 \text{ kN/cm}^2$ para $d \leq 2,54 \text{ cm}$, ASTM A325

$f_{up} = 72,5 \text{ kN/cm}^2$ para $d > 2,54 \text{ cm}$, ASTM A325

$f_{up} = 103,5 \text{ kN/cm}^2$ para qualquer d , ASTM A490

(valores de f_{up} conforme [4]).

Notar que se $n_{ps} = 2$ ($n_{pi} = 2$) não há tração nos parafusos correspondentes.

- c) O programa começa testando o menor diâmetro padrão (item 4-3-1-1), ou seja 1,27cm. Caso uma (ou mais) das 7 condições de compatibilidade (letra "a") não seja atendida e/ou caso a condição de resistência (letra "b") não seja atendida, o programa testa o diâmetro padrão imediatamente superior, e assim por diante, até encontrar um diâmetro padrão " d_r " que atenda a todas as condições de compatibilidade e de resistência.

Caso, na sequência de diâmetros, seja atingido o maior diâmetro padrão (3,81cm) e mesmo ele deixe de atender a alguma condição de compatibilidade ou de resistência, o programa emitirá a mensagem: "LIGAÇÃO INEXEQUIVEL - ESPAÇO INSUFICIENTE PARA PARAFUSOS LADO DIREITO (ou ESQUERDO)", interrompendo a execução.

Caso tenha sido encontrado $d_r < d_i$ (diâmetro preferencial dado na entrada - item 4-1), o programa verifica se " d_i " também atende a todas as condições

de compatibilidade e resistência; se atender, será escolhido $d = d_i$, caso contrário $d = d_r$.

d) Verificação dos parafusos escolhidos para solicitação combinada de tração e corte - para cada combinação "i" de carregamentos determinam-se:

d1) a força vertical a ser transmitida da chapa de cabeça para a coluna:

$$V = Q \cos \alpha + N \sin \alpha \quad (4.87)$$

$Q = Q_e$ (ou Q_d), $N = N_e$ (ou N_d) e " α " são dados de entrada (item 4-1).

d2) a força vertical por parafuso

$$V_p = |V| / (n_p s + n_p i) \quad (4.88)$$

d3) a força horizontal $F_{hsi} = F_{hs}$ ou F_{hi} (conforme item 4-3-1-5), a que for menor na combinação "i".

d4) se, para alguma combinação de carregamentos, ocorrer $F_{hsi} < 0$ e $|F_{hsi}| / 3 > 0,75 \times 0,92 (\pi d^2 / 4) f_{up} - 1,93 V_p$ [4], o programa emitirá a mensagem: "CASO ANORMAL - MOMENTO FLETOR NÃO PREDOMINA LADO DIREITO (ou ESQUERDO)", interrompendo a execução.

e) Verificação de corte dos parafusos e de esmagamento da mesa da coluna [4] - determina-se V_{pmax} , igual ao maior V_p (item d2) dentre todas as combinações de carregamentos. Determinam-se as resistências de cálculo do parafuso ao corte

$$\phi R_{pv} = 0,65 \times 0,42 (\pi d^2 / 4) f_{up} \quad (4.89)$$

e da mesa da coluna ao esmagamento dos furos

$$\phi R_{pb} = 0,75 \times 2,4 \cdot d \cdot t_{fc} \cdot f_u \quad (4.90)$$

(t_{fc} e f_u são dados de entrada - item 4-1)

Caso $V_{pmax} > \phi R_{pv}$ ou $V_{pmax} > \phi R_{pb}$, o programa emite a mensagem: "CASO ANORMAL - MOMENTO FLETOR NÃO PREDOMINA LADO DIREITO (ou ESQUERDO)", interrompendo a execução.

4-3-3-2) Dimensionamento das chapas de cabeça

O procedimento descrito a seguir é feito independentemente para o lado esquerdo (caso haja viga à esquerda) e para o lado direito (caso haja viga à direita).

- a) Estabelece-se, conforme item 4-3-3-1-a, a largura da chapa de cabeça $B_p = 9d$ e, conforme item 2-9, o balanço de cálculo (fig. 4-27):

$$bal = (XV/2) - 0,5d - (t_{fv}/2) / \cos\alpha = 2,5d - (t_{fv}/2) / \cos\alpha \quad (4.91)$$

- b) Fixa-se uma espessura inicial t_p igual à menor espessura padrão (0,3cm, conforme item 4-3-1-1) e verifica-se esta espessura para todas as combinações de carregamentos, como na letra c). Se ela não for suficiente, passa-se para a espessura padrão imediatamente superior, e assim por diante, até encontrar uma espessura suficiente. Caso a maior espessura padrão (5,0cm) não seja suficiente, o programa emite a mensagem: "ESPESSURA t_p LADO DIREITO (ou ESQUERDO) MAIOR QUE 5cm", interrompendo a execução.

- c) Verificação do estado limite último plastificação da

chapa de cabeça por flexão, conforme item 2-9, considerando redução de resistência devida às tensões normais axiais na chapa de cabeça similarmente ao final do item 2-3. Para cada combinação de carregamentos, se $F_{hs} < 0$:

$$M_{s\text{ext}} = |F_{hs}| \cdot b_{al}/2 \quad (4.92)$$

$$M_{s\text{int}} = |F_{hs}[b_{al}/2 + (tg\alpha)(t_p/2)]| \quad (4.93)$$

$$P_{s\text{ext}} = |2V/(n_{ps} + n_{pi})| \quad (4.94)$$

$$P_{s\text{int}} = |2V/(n_{ps} + n_{pi}) - F_{hs} \cdot tg\alpha| \quad (4.95)$$

$$r_{s\text{ext}} = 1 - [P_{s\text{ext}}/(B_p \cdot t_p \cdot f_y)]^2 \quad (4.96)$$

$$r_{s\text{int}} = 1 - [P_{s\text{int}}/(B_p \cdot t_p \cdot f_y)]^2 \quad (4.97)$$

e, se $F_{hi} < 0$:

$$M_{i\text{ext}} = |F_{hi}| \cdot b_{al}/2 \quad (4.98)$$

$$M_{i\text{int}} = |F_{hi}[b_{al}/2 - (tg\alpha)(t_p/2)]| \quad (4.99)$$

$$P_{i\text{ext}} = |2V/(n_{ps} + n_{pi})| \quad (4.100)$$

$$P_{i\text{int}} = |2V/(n_{ps} + n_{pi}) - F_{hi} \cdot tg\alpha| \quad (4.101)$$

$$r_{i\text{ext}} = 1 - [P_{i\text{ext}}/(B_p \cdot t_p \cdot f_y)]^2 \quad (4.102)$$

$$r_{i\text{int}} = 1 - [P_{i\text{int}}/(B_p \cdot t_p \cdot f_y)]^2 \quad (4.103)$$

Nas expressões anteriores:

"s" e "i" significam níveis das mesas superior e inferior, respectivamente, da viga

ext e int significam interseções da chapa de cabeça com as faces externa e interna, respectivamente, da mesa da viga

"M" e "P" são o momento fletor e a força normal, respectivamente, na chapa de cabeça

V, n_{ps}, n_{pi} - conforme item 4-3-3-1

Fhs, Fhi - conforme item 4-3-1-5

A resistência de cálculo da chapa, sem redução pela força normal, é

$$\phi \cdot Mn = 0,9fy \cdot Bp \cdot tp^2/4 \quad (4.104)$$

Portanto, para que a espessura tp seja suficiente, é necessário que

$$\phi \cdot Mn \cdot r/M \geq 1,0 \quad \text{e} \quad r \geq 0 \quad (4.105)$$

em todos os quatro pontos (sext, sint, iext, iint) e para todas as combinações.

Adicionalmente, para que não haja risco de flambagem local por força normal de compressão, é necessário que (similarmente à condição "c" das considerações iniciais do item 4):

$$Bp/(2tp) \leq 0,55(E/fy)^{1/2} \quad (4.106)$$

d) Verificações adicionais da chapa de cabeça

d1) Esmagamento dos furos - analogamente ao item 4-3-3-1-e, se $V_{pmax} > 0,75 \cdot 2,4 \cdot d \cdot tp \cdot fu$, o programa emite a mensagem: "CASO ANORMAL - MOMENTO FLETOR NÃO PREDOMINA LADO DIREITO (ou ESQUERDO)" e interrompe a execução.

d2) Escoamento pela força normal na chapa de cabeça - um limite superior da solicitação seria δV_{pmax} ; caso ocorra $\delta V_{pmax} > 0,9fy \cdot Bp \cdot tp$, o programa emite a mensagem anterior, interrompendo a execução.

e) Posições dos furos e altura da chapa de cabeça - conforme item 4-3-3-1-a e fig. 4-28, tem-se:

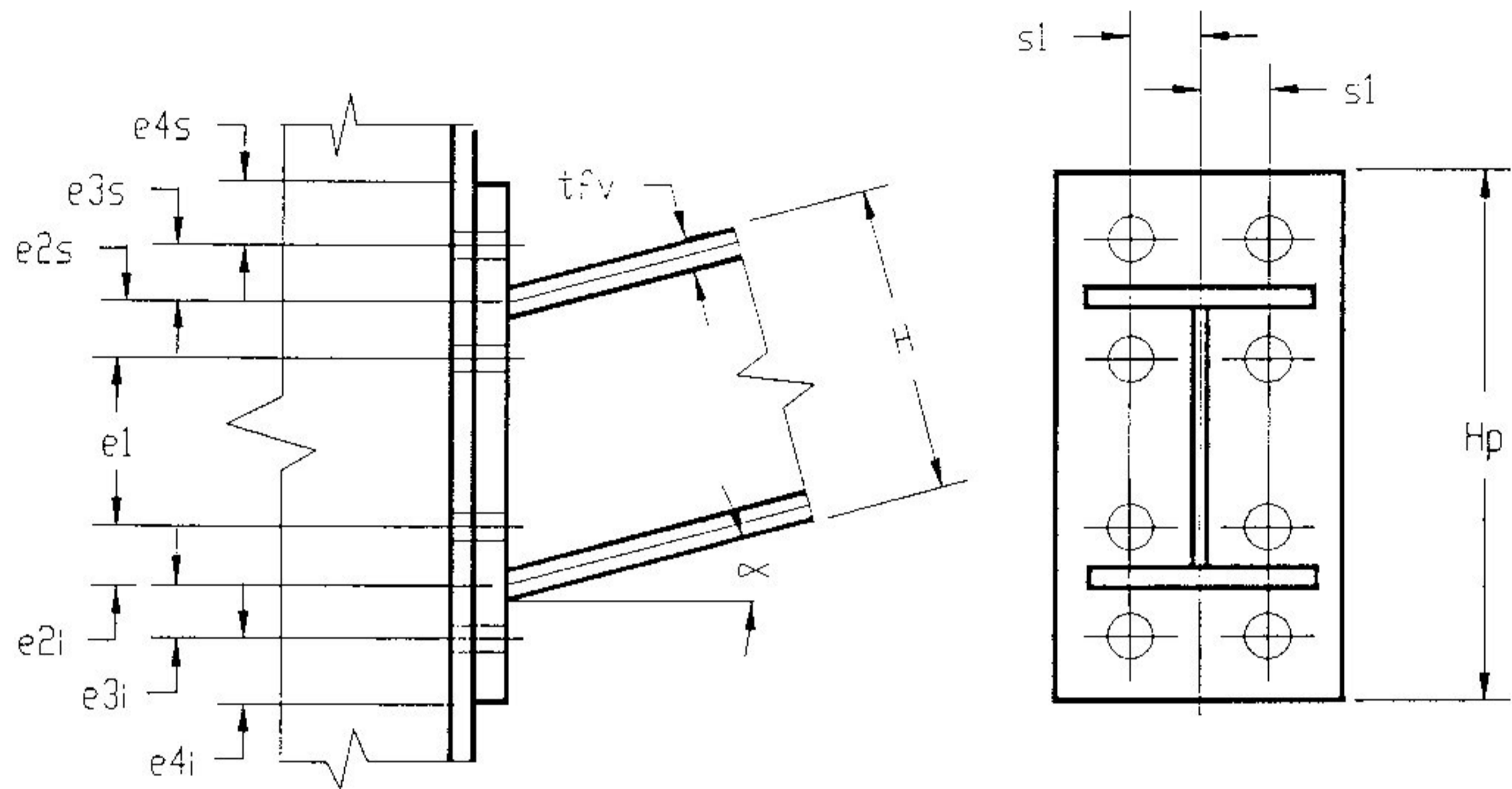


FIG 4-28

$$s1 = XH/2 = 2,5d \quad (4.107)$$

$$e1 = (H-tfv)/\cos\alpha - 2(XV/2) = (H-tfv)/\cos\alpha - 6d \quad (4.108)$$

$$e2s = e2i = XV/2 = 3d \quad (4.109)$$

$$e3s = XV/2 = 3d, \text{ se nps} = 4 \quad (4.110)$$

$$e3s = 0, \text{ se nps} = 2 \quad (4.111)$$

$$e3i = XV/2 = 3d, \text{ se npi} = 4 \quad (4.112)$$

$$e3i = 0, \text{ se npi} = 2 \quad (4.113)$$

$$e4s = a = 2,5d, \text{ se nps} = 4 \quad (4.114)$$

$$e4s = tfv/(2\cos\alpha) + (3cm \text{ ou } tp), \text{ o que for maior, se nps}=2 \quad (4.115)$$

$$e4i = a = 2,5d, \text{ se npi} = 4 \quad (4.116)$$

$$e4i = tfv/(2\cos\alpha) + (3cm \text{ ou } tp), \text{ o que for maior, se npi}=2 \quad (4.117)$$

$$Hp = e1 + e2s + e2i + e3s + e3i + e4s + e4i \quad (4.118)$$

Observação: a menor projeção da chapa de cabeça, além

da mesa da viga, foi estipulada em 3cm (construtivo) ou t_p , se $t_p > 3\text{cm}$; com essa projeção igual ou superior a t_p , garante-se que a região de contato entre a mesa da viga e a chapa de cabeça pode ser aberta a 45° , através da chapa de cabeça, para força de compressão introduzida.

4-3-3-3) Solicitações complementares

O procedimento é o mesmo já visto para ligações soldadas (item 4-3-2-1), com a seguinte alteração: na determinação das forças P_3 (s_e , s_d , i_e , i_d), ao invés das projeções verticais das forças F_s e F_i nas mesas das vigas, usam-se as forças verticais transmitidas pelos parafusos :

$$F_{vse} = V_e \cdot n_{pse} / (n_{pse} + n_{pie}) \quad (4.119)$$

$$F_{vie} = V_e \cdot n_{pie} / (n_{pse} + n_{pie}) \quad (4.120)$$

$$F_{vsd} = V_d \cdot n_{psd} / (n_{psd} + n_{pid}) \quad (4.121)$$

$$F_{vid} = V_d \cdot n_{pid} / (n_{psd} + n_{pid}) \quad (4.122)$$

Nestas expressões:

- os sufixos "d" e "e" indicam lado direito e lado esquerdo, respectivamente;
- forças V conforme item 4-3-3-1-d, para a combinação apropriada de carregamentos;
- quantidades de parafusos, n_{ps} e n_{pi} , conforme item 4-3-3-1-b;
- $F_{vse} = F_{vie} = 0$ se não houver viga à esquerda
- $F_{vsd} = F_{vid} = 0$ se não houver viga à direita

Desta forma tem-se:

$$P3se = P1se + Fvse \quad (4.123)$$

$$P3sd = P1sd + Fvsd \quad (4.124)$$

$$P3ie = P1ie - Fvie \quad (4.125)$$

$$P3id = P1id - Fvid \quad (4.126)$$

e os cálculos prosseguem como em 4-3-2-1.

4-3-3-4) Soldas das mesas das vigas com as chapas de cabeça

São determinadas da forma já vista para ligações soldadas (item 4-3-2-2), alterando-se apenas a determinação do filete mínimo (c_{min}), uma vez que as chapas envolvidas passam a ser a chapa de cabeça (ao invés da mesa da coluna) e a mesa da viga.

4-3-3-5) Soldas das almas das vigas com as chapas de cabeça

São determinadas da forma já vista para ligações soldadas (item 4-3-2-3), alterando-se apenas a determinação do filete mínimo (c_{min}), uma vez que as chapas envolvidas passam a ser a chapa de cabeça (ao invés da mesa da coluna) e a alma da viga.

4-3-3-6) Verificações relativas às forças horizontais que as mesas das vigas introduzem na coluna

Os procedimentos descritos a seguir aplicam-se, independentemente, aos lados esquerdo (caso haja viga à esquerda) e direito (caso haja viga à direita) da coluna, bem como aos níveis da mesa superior e da mesa inferior de cada viga.

a) Inicialmente determinam-se os comprimentos de coluna além da interseção da face externa da mesa da viga com a chapa de cabeça (fig. 4-29):

$$y_1 = x_s - (H_c/2 + t_p) \operatorname{tg} \alpha - H / (2 \cos \alpha) \quad (\text{mesa sup.}) \quad (4.127)$$

$$y_1 = x_i + (H_c/2 + t_p) \operatorname{tg} \alpha - H / (2 \cos \alpha) \quad (\text{mesa inf.}) \quad (4.128)$$

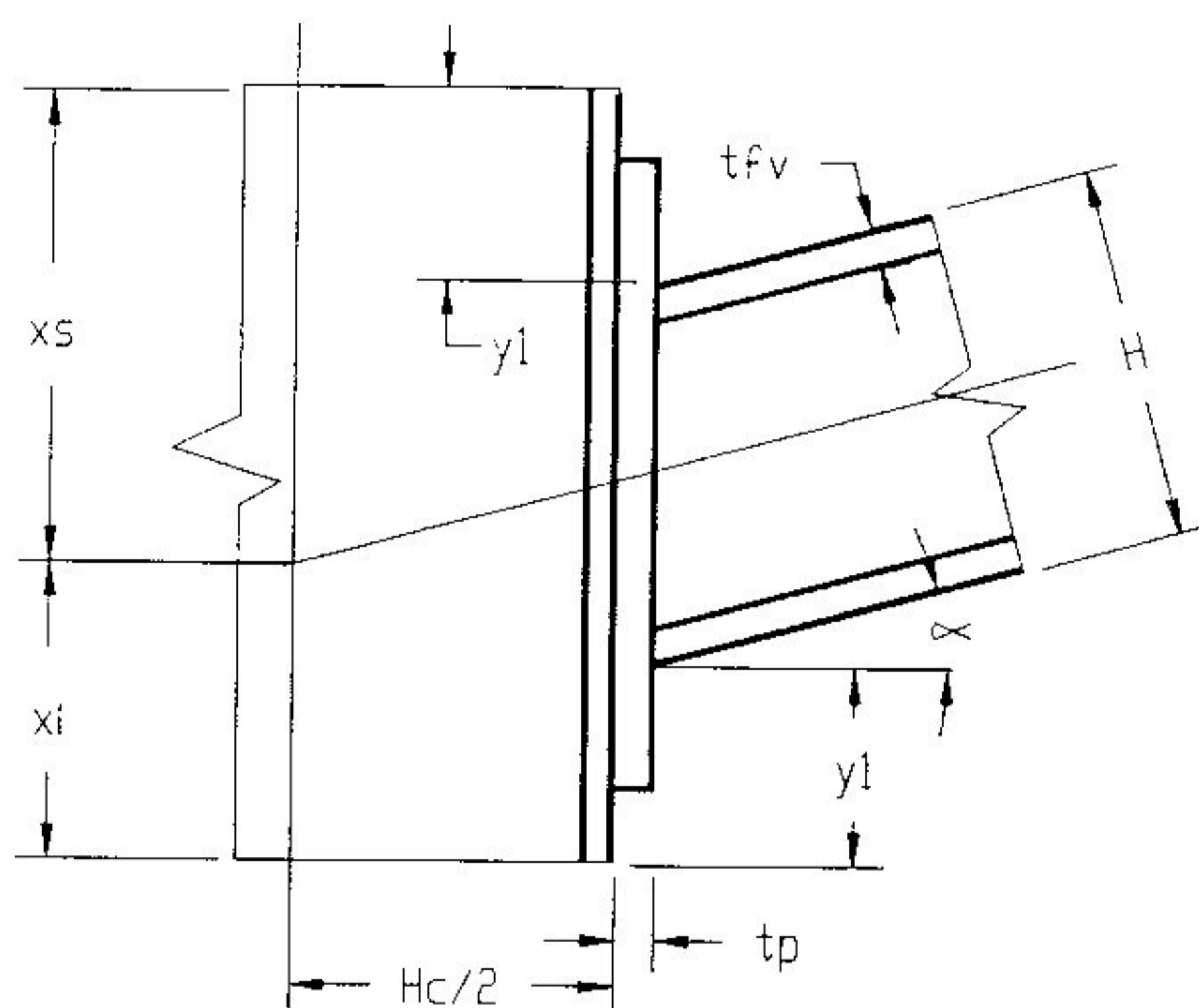


FIG 4-29

Como a chapa de cabeça não pode se projetar além da extremidade da coluna, se $y_1 < e_3 + e_4 - t_{fv} / (2 \cos \alpha)$ (fig. 4-28 com sufixos de e_3 e e_4 correspondentes ao nível analisado) o programa emite a mensagem: "DISTANCIA X NÍVEL SUPERIOR (ou INFERIOR) INSUFICIENTE", interrompendo a execução.

- b) Determina-se a maior força horizontal de compressão a ser introduzida, F_b , como para ligações soldadas (item 4-3-2-4-a).
- c) Determina-se a maior força horizontal de tração a ser introduzida, F_t , como para ligações soldadas (item

4-3-2-4-b).

d) Determinam-se as resistências de cálculo da coluna sem enrijecedores para força horizontal de compressão introduzida pela mesa da viga:

- ϕR_{b1} conforme item 2-2 (estado limite escoamento local da alma da coluna); esta resistência será considerada nula se $y_1 < H_c$.

- ϕR_{b2} conforme item 2-4 (estado limite flambagem local da alma da coluna); esta resistência será considerada nula se $y_1 < 1,5H_c$.

A resistência de cálculo final, ϕR_b , será a menor das duas anteriores.

e) Determinam-se as resistências de cálculo da coluna para força horizontal de tração introduzida pela mesa da viga:

- ϕR_{t1} conforme item 2-2 (estado limite escoamento local da alma da coluna); com as distâncias estabelecidas no item 4-3-3-1-a, prevalece $b_m = 2c = 2XV = 12d$, donde $\phi R_{t1} = 0,9 \times 12d \cdot t_w \cdot f_y$; esta resistência será considerada nula se $y_1 < H_c$.

- ϕR_{t2} conforme item 2-3 (estado limite plastificação local da mesa da coluna não enrijecida); esta resistência será considerada nula se $y_1 < 12d$.

- ϕR_{t2a} conforme item 2-3 (estado limite plastificação local da mesa da coluna enrijecida); para determinar o valor "v" que aparece na expressão de ϕR_{t2a} , considera-se a menor espessura permitida

para o enrijecedor [4], que é igual à metade da espessura da mesa da viga (da mesa mais espessa se houver 2 vigas), arredondada (tal metade) para a espessura padrão imediatamente acima; a resistência ϕR_{tza} será considerada nula se $y_1 < 12d$.

f) Determina-se a parcela de F_b a ser absorvida pelos enrijecedores:

$$dF_b = F_b - \phi R_b, \text{ se } F_b > \phi R_b \quad (4.129)$$

$$dF_b = 0, \text{ se } F_b \leq \phi R_b \quad (4.130)$$

g) Determina-se dF_{t1} :

$$dF_{t1} = F_t - \phi R_{t1}, \text{ se } F_t > \phi R_{t1} \quad (4.131)$$

$$dF_{t1} = 0, \text{ se } F_t \leq \phi R_{t1} \quad (4.132)$$

h) Para cada combinação de carregamentos determinam-se:

$$dF_{ty} = |F_h| - \phi R_{tz.r} \quad (4.133)$$

$$dF_{tz} = |F_h| - \phi R_{tza.r} \quad (4.134)$$

F_h é calculada conforme item 4-3-1-5 e "r" conforme item 4-3-3-3.

Na combinação analisada:

$$dF_{ty} = dF_{tz} = 0, \text{ se } F_h \geq 0 \quad (4.135)$$

$$dF_{ty} = 0, \text{ se } |F_h| \leq \phi R_{tz.r} \quad (4.136)$$

$$dF_{tz} = 0, \text{ se } |F_h| \leq \phi R_{tza.r} \quad (4.137)$$

O maior valor de dF_{ty} , dentre todas as combinações, será chamado de dF_{tz} .

O maior valor de dF_{tz} , dentre todas as combinações, será chamado de dF_{tza} .

Caso se tenha $dF_{tza} > 0$ a ligação é inexecutável, mesmo com enrijecedores; considerar-se-á, do lado da

segurança, que ela é também inexequível se $dFt_1 > 0$ (letra "g"); em um caso ou outro, o programa emite a mensagem: "LIGAÇÃO INEXEQUÍVEL LADO DIREITO (ou ESQUERDO) NÍVEL SUPERIOR (ou INFERIOR) - TRAÇÃO", interrompendo a execução.

4-3-3-7) Dimensionamento dos enrijecedores

Todo o processamento deste item é realizado independentemente para o nível das mesas superiores das vigas e para o das mesas inferiores.

Inicialmente determinam-se:

$$dFt = \text{maior valor dentre } dFtze \text{ e } dFtzd \quad (4.138)$$

$$dFb = \text{maior valor dentre } dFbe \text{ e } dFbd \quad (4.139)$$

$$dF = \text{maior valor dentre } dFt \text{ e } dFb \quad (4.140)$$

$dFbe$ e $dFbd$ conforme item 4-3-3-6-f; $dFtze$ e $dFtzd$ conforme item 4-3-3-6-h; em ambos os casos os sufixos "e", "d" denotam lados esquerdo e direito, respectivamente.

Se $dF > 0$ ou se foi previsto uso de enrijecedores no item 4-3-1-8 (para evitar flambagem da alma da coluna pela força cortante), então haverá um par de enrijecedores no nível considerado (fig. 4-30).

A largura total do par de enrijecedores, b_y , será feita igual a largura da chapa de cabeça B_p (a maior dentre B_{pe} e B_{pd} quando houver vigas dos dois lados); assim, para cada enrijecedor:

$$b_1 = (b_y - t_{wc})/2 \quad (4.141)$$

A largura b_t , responsável pela absorção de uma força de

tração introduzida, será feita igual à largura da chapa de cabeça correspondente ($b_{te} = E_{pe}$, $b_{td} = B_{pd}$). A largura útil b_{tu} será obtida subtraindo de b_t a espessura da alma da coluna e os recortes:

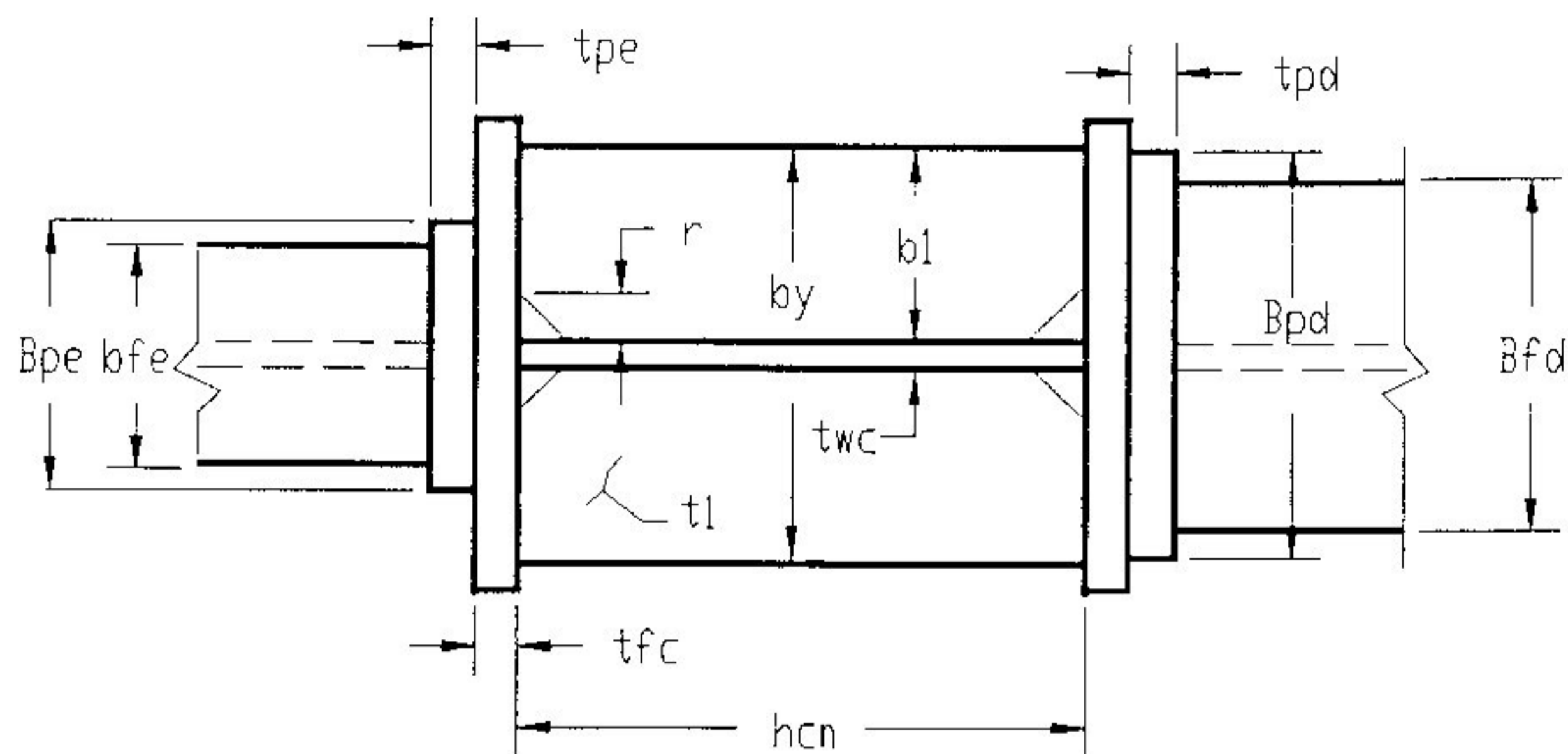


FIG 4-30

$$b_{tue} = b_{te} - t_{wc} - 2r \quad (4.142)$$

$$b_{tud} = b_{td} - t_{wc} - 2r \quad (4.143)$$

A largura b_b , responsável pela absorção de uma força de compressão introduzida, será igual ao menor dos três valores (considerando aberturas a 45° conforme item 2-10-1): $b_f + 2t_p + 2t_{fc}$ ou $B_p + 2t_{fc}$ ou b_y , com b_f , t_p e B_p correspondentes ao lado analisado. A largura útil será obtida como no caso da tração:

$$b_{bue} = b_{be} - t_{wc} - 2r \quad (4.144)$$

$$b_{bud} = b_{bd} - t_{wc} - 2r \quad (4.145)$$

A espessura do enrijecedor (t_1) será a espessura padrão imediatamente acima da espessura determinada como segue (caso se obtenha $t_1 > 5,0\text{cm}$ o programa emitirá a mensagem:

"ESPESSURA t_1 NÍVEL SUPERIOR (ou INFERIOR) MAIOR QUE 5cm", interrompendo a execução).

a) Metade da maior espessura de mesa de viga [4].

b) Se foram previstos enrijecedores no item 4-3-1-6:

$$t_1 \geq (h_{cn}/50)^4 \times 12 / b_y^3 \quad (\text{item 2-1}) \quad (4.146)$$

c) Do lado da segurança considerar-se-á que, na coluna enrijecida, metade da força de tração F_t (item 4-3-3-6-c) seja absorvida pelos enrijecedores (ver apêndice A - item c-II). Chamando de F_{tr} a maior dentre F_{te} (lado esquerdo) e F_{td} (lado direito), se $F_{tr} > 0$ deve-se ter:

$$t_1 \geq (F_{tr}/2) / (2 \times 0,9 f_y \cdot b_1) \quad (\text{item 2-10-2}) \quad (4.147)$$

Se $F_{te} > 0$:

$$t_1 \geq (F_{te}/2) / (0,75 f_u \cdot b_{tue}) \quad (\text{item 2-10-1}) \quad (4.148)$$

Se $F_{td} > 0$:

$$t_1 \geq (F_{td}/2) / (0,75 f_u \cdot b_{tud}) \quad (\text{item 2-10-1}) \quad (4.149)$$

d) Se $dF_{be} > 0$:

$$t_1 \geq dF_{be} / (0,75 \times 1,5 f_y \cdot b_{bue}) \quad (\text{item 2-10-1}) \quad (4.150)$$

e) Se $dF_{bd} > 0$:

$$t_1 \geq dF_{bd} / (0,75 \times 1,5 f_y \cdot b_{bud}) \quad (\text{item 2-10-1}) \quad (4.151)$$

f) Se $dF_b > 0$, t_1 deve ser tal que a resistência de cálculo ϕR_{nb} , definida no item 2-10-3, seja igual ou superior a dF_b .

4-3-3-8) Capacidade real dos enrijecedores, para absorção das forças de compressão introduzidas

Devido às diversas condições impostas no dimensionamento

dos enrijecedores e devido ao uso de espessura padrão, a capacidade real dos enrijecedores é superior a algumas das solicitações de cálculo neles aplicadas, ou a todas elas. Tais capacidades reais são determinadas para os níveis superior e inferior (caso haja enrijecedores no nível) e para cada extremidade (que absorva força) dos enrijecedores. A seguir elas serão determinadas só para forças de compressão (uma vez que para tração considerar-se-á, do lado da segurança, toda a força agindo na solda de composição da coluna).

a) Lado esquerdo

$$\phi R_{nbe} = 0,9\rho.Q.f_y(2b_1.t_1) \quad \text{ou} \\ 0,75 \times 1,5f_y.bb_{ue}.t_1, \text{ a que for menor} \quad (4.152)$$

(conforme itens 2-10-3 e 2-10-1, respectivamente).

b) Lado direito

$$\phi R_{nbd} = 0,9\rho.Q.f_y(2b_1.t_1) \quad \text{ou} \\ 0,75 \times 1,5f_y.bb_{ud}.t_1, \text{ a que for menor} \quad (4.153)$$

(conforme itens 2-10-3 e 2-10-1, respectivamente).

4-3-3-9) Verificação dos enrijecedores a cisalhamento, em seções paralelas à alma da coluna; dimensionamento da solda dos enrijecedores com a alma da coluna

Para os níveis superior e inferior (caso haja enrijecedores no nível), procede-se como no item 4-3-2-7 com as seguintes alterações:

$$F_{hre} = F_{he}/2 \text{ (do lado da segurança), se } F_{he} \leq 0 \\ (4.154)$$

$$Fhrd = Fhd/2 \text{ (do lado da segurança), se } Fhd \leq 0$$

(4.155)

No comentário sobre o valor obtido de t_1 , substituir a referência "item 4-3-2-5" por "item 4-3-3-7".

4-3-3-10) Verificação de gabarito mínimo para parafusos

Obtida a espessura final t_1 dos enrijecedores, é necessário verificar se não foi violada a distância mínima b_0 , definida no item 4-3-1-1, entre a face do enrijecedor e o centro dos parafusos; assim, sendo "d" o diâmetro dos parafusos (o menor diâmetro quando houver vigas dos dois lados), deve-se ter:

$$XV = 6d \geq t_1 + 2b_0 \quad (4.156)$$

XV conforme item 4-3-3-1-a

b_0 = distância mínima correspondente a "d"

Caso esta condição não seja atendida o programa emitirá a mensagem: "ENRIJECADOR NÍVEL SUPERIOR (ou INFERIOR) EXCESSIVAMENTE ESPESSO", interrompendo a execução.

4-3-3-11) Soldas dos enrijecedores com as mesas da coluna

Para os níveis superior e inferior (caso haja enrijecedores no nível), procede-se como segue (com base no item 2-10-5):

a) Para cada combinação de carregamentos determinam-se:

$$bre = btue, \text{ se } Fhre \leq 0 \quad (4.157)$$

$$bre = bbue, \text{ se } Fhre > 0 \quad (4.158)$$

$$brd = btud, \text{ se } Fhrd \leq 0 \quad (4.159)$$

$$brd = bbud, \text{ se } Fhrd > 0 \quad (4.160)$$

$btue, bbue, btud, bbud$ conforme item 4-3-3-7

$Fhre, Fhrd$ conforme item 4-3-3-9

$$exce = bre/4+r \quad (4.161)$$

$$excd = brd/4+r \quad (4.162)$$

$exce$ e $excd$ são as excentricidades - fig. 4-31

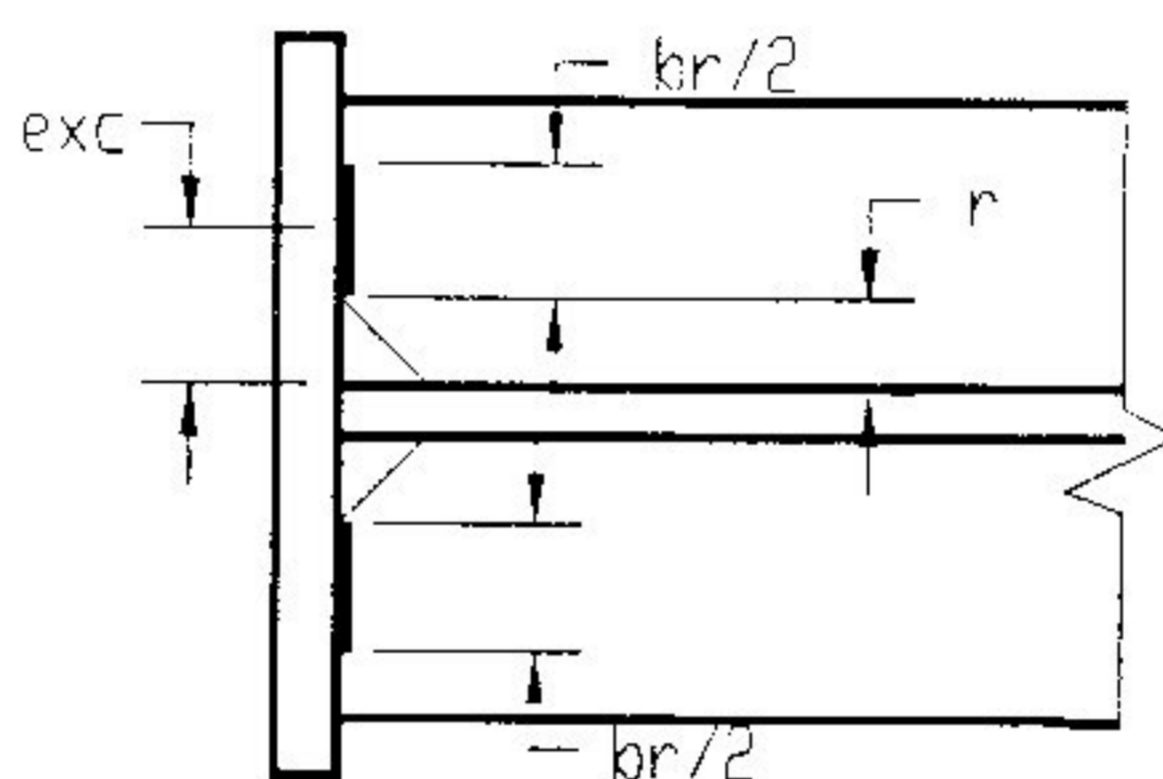


FIG 4-31

A seguir determinam-se $Fhue, Fhud, Fvu, Frue, Frud$, exatamente como para ligações soldadas (item 4-3-2-8-a).

b) Complementação idêntica à de ligações soldadas (item 4-3-2-8-b).

4-3-3-12) Testes de bordas da coluna e de inclinação dos enrijecedores

A menor borda de coluna, para fins construtivos, foi fixada em 3cm, a partir da face externa do enrijecedor (além da condição já imposta no item 4-3-3-6-a). Havendo

enrijecedores no nível analisado, tem-se (fig. 4-32)

$$y_2 = y_1 + t_f / (2 \cos \alpha) - t_1 / 2 \quad (4.163)$$

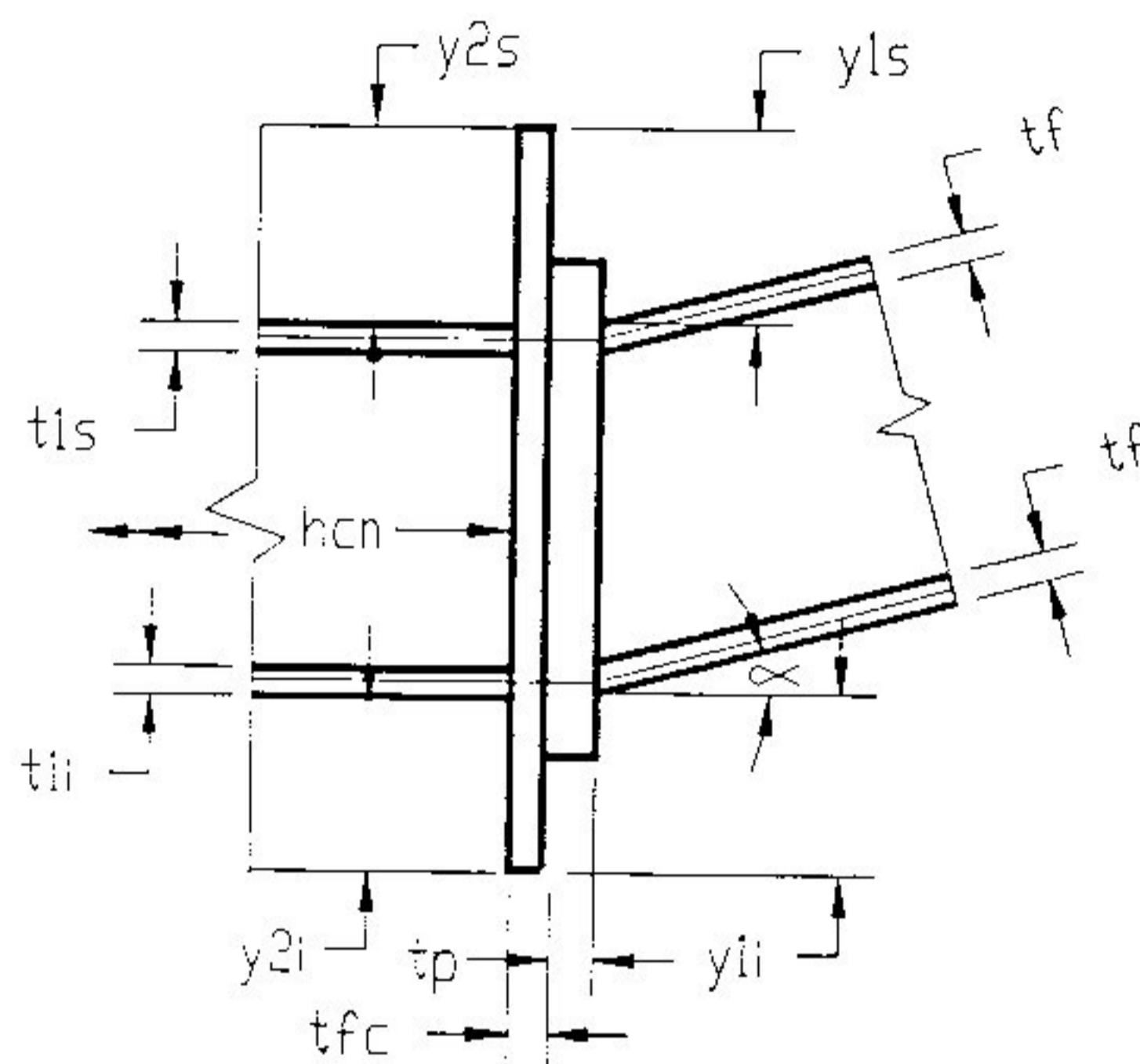


FIG 4-32

(os termos y_2 , y_1 , t_1 terão sufixos "s" ou "i" para níveis superior ou inferior, respectivamente).

Caso haja viga apenas de um lado, y_2 será calculado deste lado e os enrijecedores serão horizontais.

Caso haja vigas dos dois lados, ter-se-á um valor de y_2 à esquerda (y_{2e}) e outro à direita (y_{2d}) e os enrijecedores terão uma inclinação:

$$i = |y_{2e} - y_{2d}| / h_{cn} \quad (4.164)$$

(com y_{2e} e y_{2d} do nível considerado)

Caso ocorra qualquer $y_2 < 3\text{cm}$, o programa emitirá a mensagem "DISTANCIA XS (ou XI) INSUFICIENTE", e, caso ocorra $i > 0,03$, o programa emitirá a mensagem "ENRIJECEDOR SUPERIOR (ou INFERIOR) COM INCLINAÇÃO MAIOR QUE 3 POR CENTO", interrompendo a execução em um caso ou outro.

4-3-3-13) Reforço da solda de composição da coluna

O processamento a seguir é feito independentemente para as soldas de composição do lado esquerdo e do lado direito da coluna (base: item 2-7).

a) Para cada combinação de carregamentos determinam-se:

a1) A força horizontal introduzida diretamente na alma da coluna

$F_{hw} = F_h$, se não houver enrijecedor no nível, ou se houver e $F_h < 0$ (do lado da segurança) (4.165)

$F_{hw} = F_h - F_{hr}$, se houver enrijecedor no nível e $F_h \geq 0$ (4.166)

F_h conforme item 4-3-1-5 e F_{hr} conforme item 4-3-3-9 (os sufixos de F_h e F_{hr} são compatíveis com o lado analisado - "e" ou "d" para lados esquerdo ou direito, respectivamente).

a2) A força horizontal F_{whu} por unidade de comprimento da solda de composição - o comprimento de atuação de F_{hw} será

$x_{at} = 12d$, se $F_{hw} < 0$ (4.167)

$x_{at} = 5t_{fc} + 2t_p + t_f / \cos \alpha$, se $F_{hw} \geq 0$ (4.168)

Assim tem-se

$F_{whu} = |F_{hw}| / x_{at}$ (4.169)

Calcula-se um valor de F_{whu} para o nível da mesa superior da viga e outro para o da mesa inferior, prevalecendo o que for maior (evidentemente, não havendo viga do lado analisado, $F_{whu} = 0$).

a3) A força vertical F_{wvu} por unidade de comprimento da solda de composição - como para ligações soldadas (item 4-3-2-10-a2).

a4) A resultante de F_{whu} e F_{wvu} :

$$F_{wru} = (F_{whu}^2 + F_{wvu}^2)^{1/2} \quad (4.170)$$

b) A seguir determina-se F_{wrumax} , igual ao maior valor de F_{wru} dentre todas as combinações.

c) O cateto necessário para os filetes da solda de composição é determinado como para ligações soldadas (item 4-3-2-10-c)

d) O reforço da solda de composição é feito na região entre os centros das mexas das vigas e deve se estender y_s acima e y_i abaixo desta região, para atender ao comprimento de distribuição x_{at} correspondente. O processamento a seguir é feito para os níveis superior (s) e inferior (i) de cada lado. Inicialmente determina-se o valor F_{hwmax} , igual ao máximo F_{hw} dentre todas as combinações.

O valor de y será igual ao maior dentre y' , y'' , y''' :

$$y' = (t_1/2) + 5cm \quad (\text{construtivo}) \quad (4.171)$$

$$y'' = 6d, \text{ se } F_t > 0$$

$$y'' = 0, \text{ se } F_t = 0 \quad (4.172)$$

$$y''' = [t_f / (2 \cos \alpha)] + t_p + 2,5 t_{fc}, \text{ se } F_{hwmax} > 0$$

$$y''' = 0, \text{ se } F_{hwmax} \leq 0 \quad (4.173)$$

d = diâmetro dos parafusos

t_1, t_p, t_f, t_{fc} - conforme figura 4-32

Ft conforme item 4-3-3-6-c

Evidentemente a solda não pode se estender além da extremidade da coluna, o que pode ser uma limitação no valor de y quando $F_{hw} = 0$ para todas as combinações (neste caso não há força horizontal introduzida diretamente na alma e a borda da coluna pode ser inferior a 5cm além da face externa do enrijecedor).

4-3-3-14) Constantes de mola

Para cada uma das quatro posições de introdução de forças horizontais (lados esquerdo e direito, mesas superior e inferior da viga) determinam-se as constantes de mola, conforme item 3-2-3, com as seguintes observações:

- se não houver enrijecedor no nível considerado,
 $A_{enr} = 0$

- para mola de compressão (k_b), o comprimento l_o será (fig. 4-33)

$$l_o = (t_f / \cos \alpha) + 2b_s + 2t_p + 2t_{fc} \quad (4.174)$$

$$(l_o = t_f / \cos \alpha + y_1 + b_s + t_p + t_{fc}, \text{ se } y_1 < b_s + t_p + t_{fc})$$

(b_s será tomado igual a zero se a solda entre a mesa da viga e a chapa de cabeça for de penetração)

- para mola de tração (k_t), o comprimento l_o será

$$l_o = 12d \quad (4.175)$$

d = diâmetro dos parafusos

Não havendo viga de um lado, as constantes de mola só são determinadas para o lado oposto.

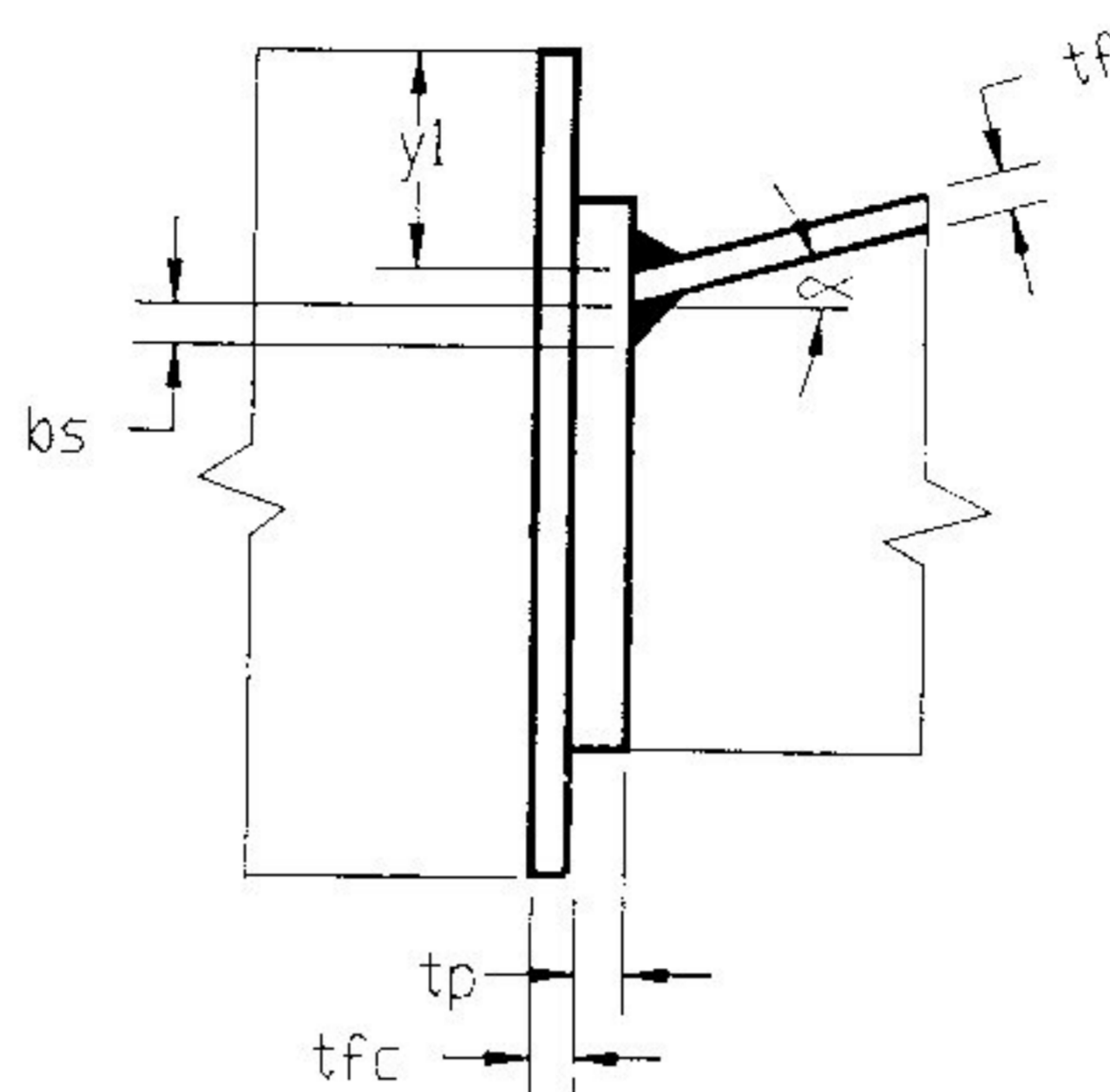


FIG 4-33

4-3-3-15) Dimensionamento do enrijecedor vertical e de suas soldas

Procedimento idêntico ao de ligações soldadas (item 4-3-2-12).

5-EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

5-1) EXEMPLO BASEADO NA REF. [18]

- a) Determinar o deslocamento vertical na extremidade do balanço da estrutura da fig. 5-1, considerando a ligação viga/coluna perfeitamente rígida.
- b) Com o programa desenvolvido neste trabalho, dimensionar a ligação viga/coluna considerando-a soldada e depois parafusada (utilizar os esforços solicitantes no nó de interseção do eixo da viga com o eixo da coluna, obtidos na fase "a").

Considerar aço para detalhes igual ao dos perfis ($f_y = 36\text{kN/cm}^2$, $f_u = 50\text{kN/cm}^2$), parafusos A325 e eletrodos de solda AWS-E70XX ($f_{uw} = 48,3\text{kN/cm}^2$).

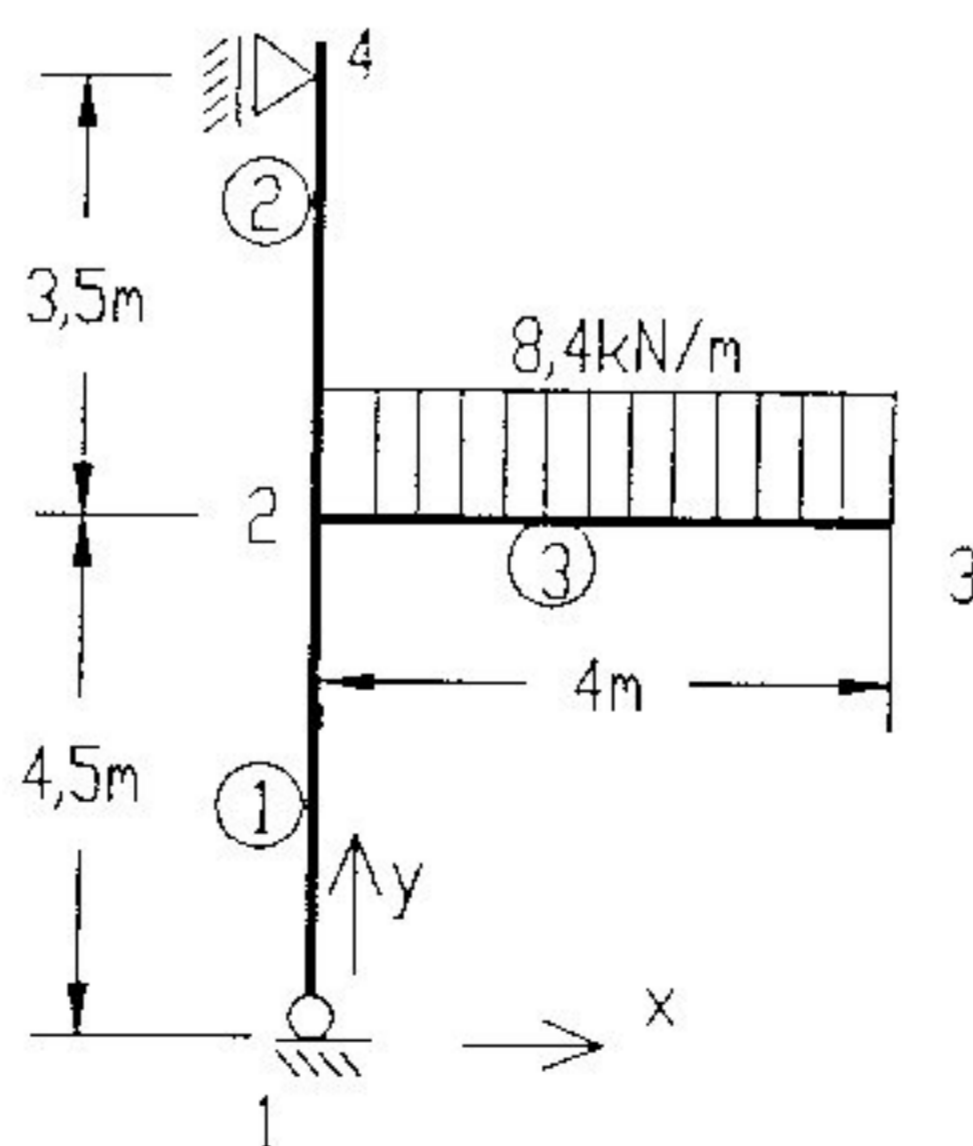


FIG 5-1

c) Determinar o mesmo deslocamento de "a", levando em conta a rigidez real da ligação dimensionada em "b".

Solução

Perfis soldados equivalentes aos laminados do exemplo (com a notação dos dados de entrada - item 4-1):

coluna: $H_c = 18\text{cm}$ $b_{fc} = 18\text{cm}$ $t_{fc} = 1,45\text{cm}$ $t_{wc} = 0,89\text{cm}$

viga: $H_d = 27\text{cm}$ $b_{fd} = 13,5\text{cm}$ $t_{fd} = 1,08\text{cm}$ $t_{wd} = 0,66\text{cm}$

Parte a) Utilizando o programa STRESS [19] (ver páginas 118 e 119) determinam-se:

deslocamento vertical em 3 = 4,665cm (4,55cm pela ref. [18])

esforços solicitantes (notação conforme dados de entrada - item 4-1)

$N_s = 0$	$Q_s = -8,4\text{kN}$	$M_s = -2940\text{kNcm}$
$N_i = 33,6\text{kN}$	$Q_i = -8,4\text{kN}$	$M_i = -3780\text{kNcm}$
$N_e = 0$	$Q_e = 0$	$M_e = 0$
$N_d = 0$	$Q_d = 33,6\text{kN}$	$M_d = 6720\text{kNcm}$

Parte b) Dimensionamento da ligação e constantes de mola (ver páginas 120 a 124)

Parte c) O novo modelo para análise é o indicado na fig. 5-2 (conforme item 4-1)

Constantes de mola para as barras 6 e 7, conforme parte "b":

ligação soldada: $k = 38913\text{kN/cm}$ (com enrijecedores)

ligação parafusada: $k = 12000\text{kN/cm}$ (sem enrijecedores)

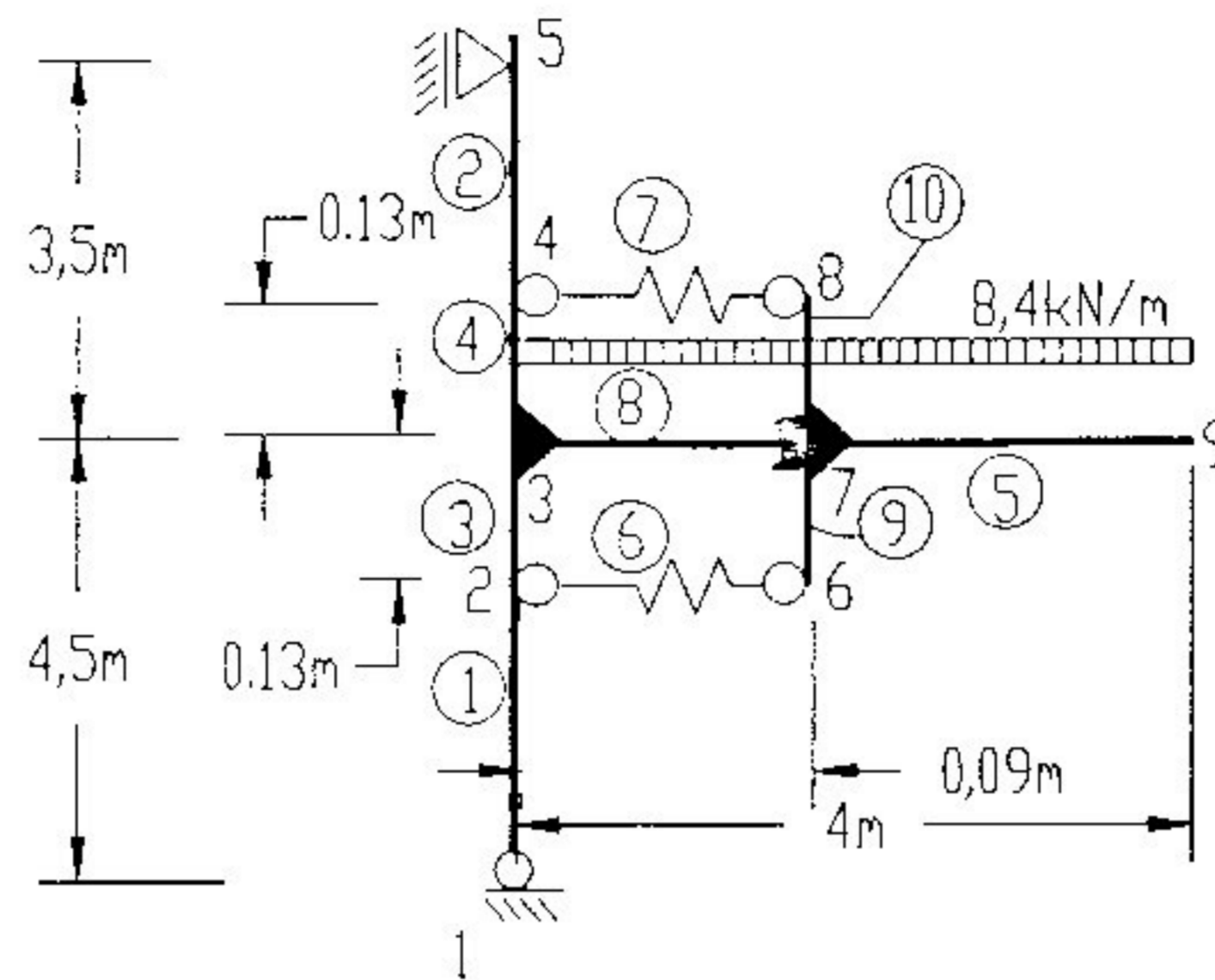


FIG 5-2

Área equivalente da barra de aço : $A_{eq} = kl/E$ ($l =$ comprimento)

ligação soldada: $A_{eq} = 17,08\text{cm}^2$

ligação parafusada: $A_{eq} = 5,27\text{cm}^2$

Área resistente à força cortante da coluna, barras 3 e 4 :

$$A_y = 0,89(18 - 2 \times 1,45) = 13,4\text{cm}^2$$

Momentos de inércia das barras rígidas 8, 9 e 10:

$$I_z = 10 \cdot I_{z5} = 10 \times 5790 = 57900\text{cm}^4$$

Utilizando novamente o programa STRESS [19], com o novo modelo, obtêm-se os seguintes deslocamentos verticais em 9 (ver páginas 125 a 128)

$\delta_v = 5,32\text{cm}$ (ligação soldada, com enrijecedor - 5,43cm, pela ref. [18])

$\delta_v = 5,73\text{cm}$ (ligação parafusada, sem enrijecedor - 5,68cm, pela ref. [18])

Conclusão: para este caso o acréscimo do deslocamento

vertical, devido à flexibilidade da ligação, foi de 14% para a ligação soldada (coluna enrijecida) e de 23% para a ligação parafusada (coluna não enrijecida), do deslocamento correspondente à ligação rígida.

É evidente que tais porcentagens dependem, além da rigidez da ligação, também da rigidez de cada barra envolvida. Por exemplo, se os momentos de inércia da viga e da coluna fossem duplicados, os resultados seriam, aproximadamente (considerando inalterados os dados para as ligações):

ligação rígida: $\delta v \cong 2,33\text{cm}$

ligação soldada, com enrijecedores:

$$\delta v \cong 2,33 + (5,32 - 4,665) = 2,99\text{cm} \text{ (28\%)}$$

ligação parafusada, sem enrijecedor:

$$\delta v = 2,33 + (5,73 - 4,665) = 3,40\text{cm} \text{ (46\%)}$$

As pequenas diferenças entre os resultados da ref. [18] e deste trabalho devem-se a:

- na ligação soldada, a diferentes relações entre área de enrijecedores e área considerada da alma da coluna (A_{enr}/A_o do item 3-2-3)

- nas ligações soldada e parafusada ao fato de [18] ter desprezado a deformação da coluna causada pelo momento fletor entre os pontos 2 e 4 da fig. 5-2.

S T R E S S

STRU EX 1
TYPE PLAN FRAM
NUMB OF JOIN 4
NUMB OF MEMB 3
NUMB OF SUPP 2
NUMB OF LOAD 1
TABU ALL
JOIN COOR
1 0. 0. S
2 0. 450.
3 400. 450.
4 0. 800. S
MEMB INCI
1 1 2
2 2 4
3 2 3
JOIN RELE
1 MOME Z
4 FORC Y MOME Z
MEMB PROP PRIS
1 THRU 2 AX 65.3 IZ 3830.
3 AX 45.9 IZ 5790.
CONS E 20500. ALL
LOAD 1 C VERT
MEMB LOAD
3 FORC Y UNIF -0.084
SOLVE
PROBLEMA CORRETAMENTE ESPECIFICADO.SOLUCAO A SEGUIR

S T R E S S

STRU EX 1

LOAD 1 C VERT

=====

MEMBER FORCES

MEMBER	JOINT	AXIAL FORCE	SHEAR FORCE	MOMENT
1	1	33.600	-8.400	.00
1	2	-33.600	8.400	-3779.98
2	2	.000	-8.400	-2940.02
2	4	.000	8.400	.00
3	2	.000	33.600	6720.00
3	3	.000	.000	.00

APPLIED JOINT LOADS, FREE JOINTS

JOINT	FORCE X	FORCE Y	MOMENT Z
2	.000	.000	.00
3	.000	.000	.00

REACTIONS, APPLIED LOADS SUPPORT JOINTS

JOINT	FORCE X	FORCE Y	MOMENT Z
1	8.400	33.600	.00
4	-8.400	.000	.00

FREE JOINT DISPLACEMENTS

JOINT	X-DISPLACEMENT	Y-DISPLACEMENT	ROTATION
2	-.5617	-.0113	-.0060
3	-.5617	-4.6653	-.0135

DADOS DE ENTRADA

0	1	1	0.0000	350.00	450.00	
36.00	50.00	48.30	0.00			
18.00	18.00	1.450	0.890			0.60
0.00	0.00	0.000	0.000			
27.00	13.50	1.080	0.660			
0.00	-8.40	-2940.00				
33.60	-8.40	-3780.00				
0.00	0.00	0.00				
0.00	33.60	6720.00				

RESULTADOS FINAIS

(s = sup., i = inf., e = esq., d = dir.)

(VER FIGURA 4-11)

zd = 25.92
c1d = 0.70
c2d = USAR SOLDA DE PENETRACAO TOTAL
DESNECESSARIO REFORCAR SOLDA DE COMPOSICAO LADO ESQUERDO
DESNECESSARIO REFORCAR SOLDA DE COMPOSICAO LADO DIREITO
b1s = 6.31
t1s = 0.630
c3se = 0.60
c3sd = 0.80
c4s = 0.50
b1i = 6.31
t1i = 0.630
c3ie = 0.60
c3id = 0.90
c4i = 0.50
NAO EXISTE ENRIJECEADOR VERTICAL
CONSTANTES DE MOLA (COLUNA DE PERFIL LAM. HPP,HPM,HPL OU SOLD. SIMILAR)
ksd = 38913
kid = 38913

SOLICITACOES E RESISTENCIAS DE CALCULO

1) SOLICITACOES DE CALCULO
1.1) FORÇAS HORIZONTAIS QUE AS MESAS DA(S) VIGA(S) APLICAM
NA COLUNA (SINAL(-) = TRACAO)
FhcdMax = -259.26
FhcdMin = -259.26
FhidMax = 259.26
FhidMin = 259.26
1.2) F. CORT. NA COLUNA, ENTRE MESAS SUP. E INF. DA(S) VIGA(S)
QwMax = 250.86
2) RESISTENCIAS DE CALCULO DA COLUNA, SEM ENRIJECEADORES
(SEM VERIFICAR SOLDA DE COMPOSICAO)
2.1) A FORÇA CORTANTE
FiQn = 261.25
2.2) A FORÇAS HORIZ. APLICADAS PELAS MESAS DA(S) VIGA(S),
EST. LIMITE ESCOAMENTO LOCAL DA ALMA DA COLUNA
FiR1sd = 240.20
FiR1id = 240.20
2.3) A F. HORIZ. DE TRACAO APLIC. PELAS MESAS DA(S) VIGA(S),
EST. LIM. PLASTIF. LOCAL DA MESA DA COLUNA, POR FLEXAO,
NA AUSENCIA DE TENSOES NORMAIS DIRETAS
FiRt2s = 408.73
FiRt2i = 408.73
2.4) A F. HORIZ. DE COMPR. APLIC. PELAS MESAS DA(S) VIGA(S),
EST. LIMITE FLAMBAGEM LOCAL DA ALMA DA COLUNA
FiRb2s = 794.12
FiRb2i = 794.12

FIM

DADOS DE ENTRADA

1	1	1	0.0000	350.00	450.00	
	36.00		50.00	48.30	1.59	
	18.00		18.00	1.450	0.890	0.60
	0.00		0.00	0.000	0.000	
	27.00		13.50	1.080	0.660	
	0.00		-8.40	-2940.00		
	33.60		-8.40	-3780.00		
	0.00		0.00	0.00		
	0.00		33.60	6720.00		

RESULTADOS FINAIS

(np = num. de paraf.; s = sup., i = inf., e = esq., d = dir.)
(VER FIGURA 4-17)

tpd = 2.240
Bpd = 14.31
Hpd = 38.21
dd = 1.590
npsd = 4
npid = 2
sld = 3.97
e1d = 16.38
e2d = 4.77
e3sd = 4.77
e3id = 0.00
e4sd = 3.97
e4id = 3.54
c1d = 0.80
c2d = USAR SOLDA DE PENETRACAO TOTAL
DESNECESSARIO REFORCAR SOLDA DE COMPOSICAO LADO ESQUERDO
c5d = 0.90
ysd = 9.54
yid = 6.40
NAO EXISTE ENRIJECEDOR SUPERIOR
NAO EXISTE ENRIJECEDOR INFERIOR
NAO EXISTE ENRIJECEDOR VERTICAL
CONSTANTES DE MOLA (COLUNA DE PERFIL LAM. HPP,HPM,HPL OU SOLD. SIMILAR)
(kt = MOLA P/ TRACAO kb = MOLA P/ COMPRESSAO)
ktsd = 12000
kbsd = 12000
ktid = NAO HA TRACAO PARA ESF. SOLICIT. DADOS
kbid = 12000

SOLICITACOES E RESISTENCIAS DE CALCULO

1) SOLICITACOES DE CALCULO
1.1) FORÇAS HORIZONTAIS QUE AS MESAS DA(S) VIGA(S) APLICAM
NA COLUNA (SINAL(-) = TRACAO)
FhsdMax = -259.26
FhsdMin = -259.26
FhidMax = 259.26
FhidMin = 259.26
1.2) F. CORT. NA COLUNA, ENTRE MESAS SUP. E INF. DA(S) VIGA(S)
QwMax = 250.86
2) RESISTENCIAS DE CALCULO DA COLUNA, SEM ENRIJECEDORES
(SEM VERIFICAR SOLDA DE COMPOSICAO)
2.1) A FORÇA CORTANTE
FiQn = 261.25
2.2) A F. HORIZ. DE TRACAO APLIC. PELAS MESAS DA(S) VIGA(S),
EST. LIMITE ESCOAMENTO LOCAL DA ALMA DA COLUNA
FiRt1sd = 550.19
FiRt1id = NAO DETERMINADA PARA np = 2
EST. LIM. PLASTIF. LOCAL DA MESA DA COLUNA, POR FLEXAO,
NA AUSENCIA DE TENSOES NORMAIS DIRETAS
FiRt2sd = 436.98
FiRt2id = NAO DETERMINADA PARA np = 2

2.3) A F. HORIZ. DE COMPR. APLIC. PELAS MESAS DA(S) VIGA(S),
EST. LIMITE ESCOAMENTO LOCAL DA ALMA DA COLUNA
FiRb1sd = 369.39
FiRb1id = 369.39
EST. LIMITE FLAMBAGEM LOCAL DA ALMA DA COLUNA
FiRb2sd = 794.12
FiRb2id = 794.12

FIM

S T R E S S

STRU EX 1-S
TYPE PLAN FRAM
NUMB OF JOIN 9
NUMB OF MEMB 10
NUMB OF SUPP 2
NUMB OF LOAD 1
TABU DISP
JOIN COOR
1 0. 0. S
2 0. 437.
3 0. 450.
4 0. 463.
5 0. 800. S
6 9. 437.
7 9. 450.
8 9. 463.
9 400. 450.
MEMB INCI
1 1 2
2 4 5
3 2 3
4 3 4
5 7 9
6 2 6
7 4 8
8 3 7
9 6 7
10 7 8
JOIN RELE
1 MOME Z
5 FORC Y MOME Z
MEMB RELE
6 STAR MOME Z END MOME Z
7 STAR MOME Z END MOME Z
8 END FORC X MOME Z
MEMB PROP PRIS
1 THRU 2 AX 65.3 IZ 3830.
3 THRU 4 AX 65.3 AY 13.4 IZ 3830.
5 AX 45.9 IZ 5790.
6 THRU 7 AX 17.08 IZ 1000.
8 THRU 10 AX 50. IZ 57900.
CONS E 20500. ALL
LOAD 1 C. VERT.
MEMB LOAD
5 FORC Y UNIF -.084
8 FORC Y UNIF -.084
SOLVE
PROBLEMA CORRETAMENTE ESPECIFICADO.SOLUCAO A SEGUIR

S T R E S S

STRU EX 1-S

LOAD 1 C. VERT.

=====

FREE JOINT DISPLACEMENTS

JOINT	X-DISPLACEMENT	Y-DISPLACEMENT	ROTATION
2	-.5618	-.0107	-.0052
3	-.4627	-.0110	-.0056
4	-.3628	-.0110	-.0053
6	-.5681	-.0612	-.0081
7	-.4623	-.0612	-.0082
8	-.3565	-.0612	-.0081
9	-.4623	-5.3161	-.0152

SUPPORT JOINT DISPLACEMENTS

JOINT	X-DISPLACEMENT	Y-DISPLACEMENT	ROTATION
1	.0000	.0000	.0046
5	.0000	-.0110	.0011

S T R E S S

STRU EX 1-P
TYPE PLAN FRAM
NUMB OF JOIN 9
NUMB OF MEMB 10
NUMB OF SUPP 2
NUMB OF LOAD 1
TABU DISP
JOIN COOR
1 0. 0. S
2 0. 437.
3 0. 450.
4 0. 463.
5 0. 800. S
6 9. 437.
7 9. 450.
8 9. 463.
9 400. 450.
MEMB INCI
1 1 2
2 4 5
3 2 3
4 3 4
5 7 9
6 2 6
7 4 8
8 3 7
9 6 7
10 7 8
JOIN RELE
1 MOME Z
5 FORC Y MOME Z
MEMB RELE
6 STAR MOME Z END MOME Z
7 STAR MOME Z END MOME Z
8 END FORC X MOME Z
MEMB PROP PRIS
1 THRU 2 AX 65.3 IZ 3830.
3 THRU 4 AX 65.3 AY 13.4 IZ 3830.
5 AX 45.9 IZ 5790.
6 THRU 7 AX 5.27 IZ 1000.
8 THRU 10 AX 50. IZ 57900.
CONS E 20500. ALL
LOAD 1 C. VERT.
MEMB LOAD
5 FORC Y UNIF -.084
8 FORC Y UNIF -.084
SOLVE
PROBLEMA CORRETAMENTE ESPECIFICADO.SOLUCAO A SEGUIR

S T R E S S

STRU EX 1-P

LOAD 1 C. VERT.

=====

FREE JOINT DISPLACEMENTS

JOINT	X-DISPLACEMENT	Y-DISPLACEMENT	ROTATION
2	-.5369	-.0110	-.0052
3	-.4380	-.0113	-.0056
4	-.3387	-.0113	-.0053
6	-.5574	-.0613	-.0092
7	-.4377	-.0613	-.0092
8	-.3181	-.0613	-.0092
9	-.4377	-5.7316	-.0163

SUPPORT JOINT DISPLACEMENTS

JOINT	X-DISPLACEMENT	Y-DISPLACEMENT	ROTATION
1	.0000	.0000	.0045
5	.0000	-.0113	.0011

5-2) EXEMPLO COM DUAS VIGAS INCLINADAS

Com o programa desenvolvido neste trabalho, dimensionar as ligações viga/coluna para o nó da fig. 5-3, dando solução soldada e solução parafusada. Dados (ver item 4-1):

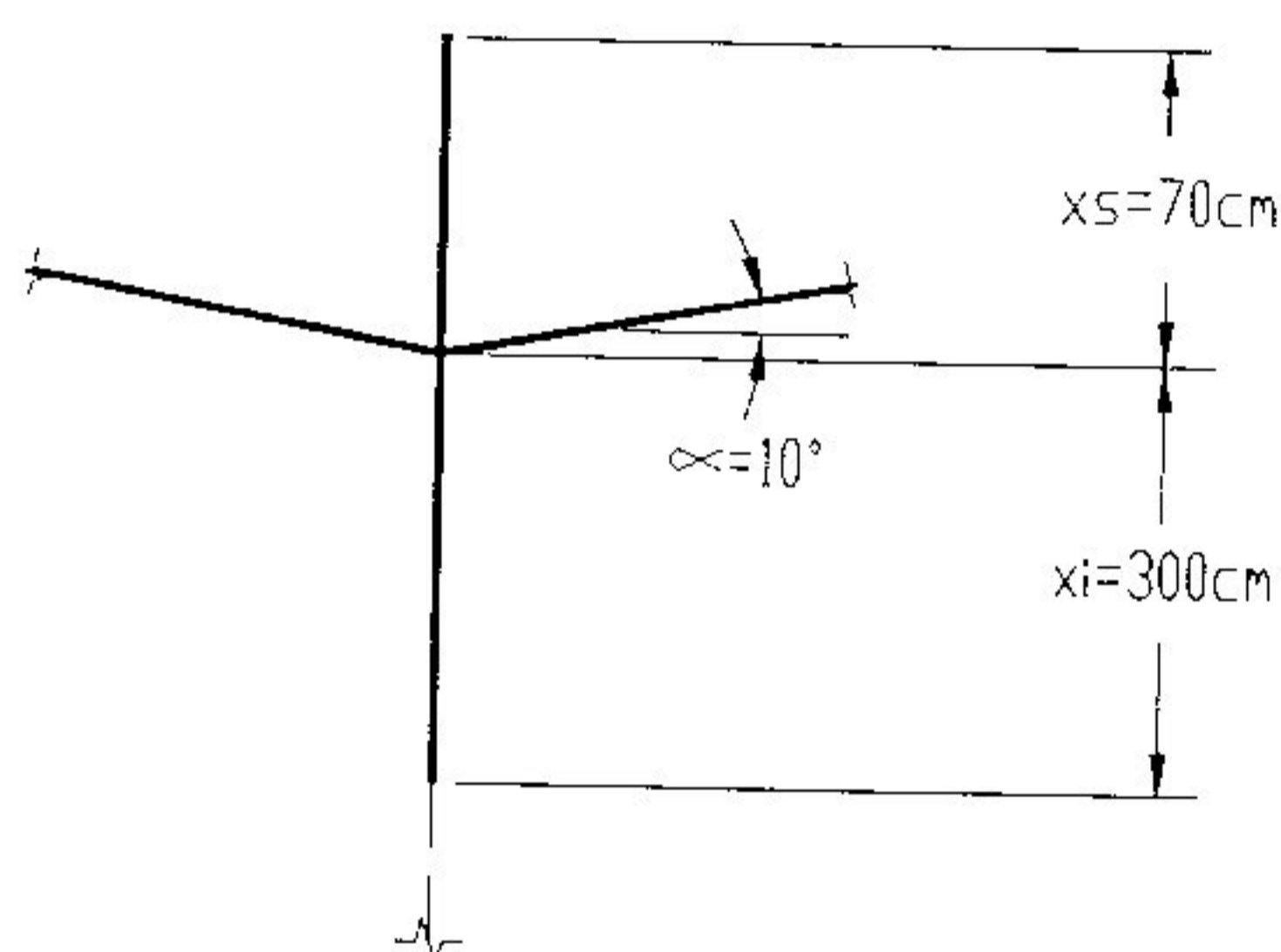


FIG 5-3

$$f_y = 25 \text{ kN/cm}^2 \quad f_u = 40 \text{ kN/cm}^2 \quad f_{uw} = 48,3 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{parafusos A325} \quad d_i = 1,59 \text{ cm}$$

$$\text{coluna: } H_c = b_{fc} = 30 \text{ cm}; \quad t_{fc} = 1,6 \text{ cm}; \quad t_{wc} = 0,95 \text{ cm}; \quad c = 0,6 \text{ cm}$$

$$\text{viga esq.: } H_e = 40 \text{ cm}; \quad b_{fe} = 20 \text{ cm}; \quad t_{fe} = 0,95 \text{ cm}; \quad t_{we} = 0,63 \text{ cm}$$

$$\text{viga dir.: } H_d = 40 \text{ cm}; \quad b_{fd} = 25 \text{ cm}; \quad t_{fd} = 1,25 \text{ cm}; \quad t_{wd} = 0,8 \text{ cm}$$

esforços solicitantes de cálculo (combinação 1)

$$N_s = 0 \quad Q_s = 0 \quad M_s = 0$$

$$N_i = 151 \text{ kN} \quad Q_i = -11 \text{ kN} \quad M_i = -6000 \text{ kNcm}$$

$$N_e = 0 \quad Q_e = 50 \text{ kN} \quad M_e = 12000 \text{ kNcm}$$

$$N_d = 20\text{kN} \quad Q_d = 100\text{kN} \quad M_d = 18000\text{kNcm}$$

esforços solicitantes de cálculo (combinação 2)

$$N_s = 0 \quad Q_s = 0 \quad M_s = 0$$

$$N_i = -23\text{kN} \quad Q_i = 2\text{kN} \quad M_i = 12000\text{kNcm}$$

$$N_e = 0 \quad Q_e = 40\text{kN} \quad M_e = 6000\text{kNcm}$$

$$N_d = -20\text{kN} \quad Q_d = -60\text{kN} \quad M_d = -6000\text{kNcm}$$

A solução encontra-se nas páginas 131 a 136, incluindo as constantes de mola e as principais solicitações e resistências de cálculo.

DADOS DE ENTRADA

0	1	2	10.0000	70.00	300.00	
	25.00		40.00	48.30	0.00	
	30.00		30.00	1.600	0.950	0.60
	40.00		20.00	0.950	0.630	
	40.00		25.00	1.250	0.800	
	0.00		0.00	0.00		
151.00			-11.00	-6000.00		
	0.00		50.00	12000.00		
	20.00		100.00	18000.00		
	0.00		0.00	0.00		
-23.00			2.00	12000.00		
	0.00		40.00	6000.00		
-20.00			-60.00	-6000.00		

RESULTADOS FINAIS

(s = sup., i = inf., e = esq., d = dir.)
(VER FIGURA 4-7)

ze = 39.65
zd = 39.35
cle = 0.60
cld = 0.60
c2e = 1.10
c2d = USAR SOLDA DE PENETRACAO TOTAL
DESNECESSARIO REFORCAR SOLDA DE COMPOSICAO LADO ESQUERDO
DESNECESSARIO REFORCAR SOLDA DE COMPOSICAO LADO DIREITO
bls = 12.02
tls = 0.630
c3se = 0.60
c3sd = 0.60
c4s = 0.50
bli = 12.02
tli = 0.630
c3ie = 0.60
c3id = 0.60
c4i = 0.50
NAO EXISTE ENRIJECEDOR VERTICAL
CONSTANTES DE MOLA (COLUNA DE PERFIL LAM. HPP, HPM, HPL OU SOLD. SIMILAR)
kse = 42070
kie = 42070
ksd = 54823
kid = 54823

SOLICITACOES E RESISTENCIAS DE CALCULO

1) SOLICITACOES DE CALCULO

1.1) FORÇAS HORIZONTAIS QUE AS MESAS DA(S) VIGA(S) APLICAM NA COLUNA (SINAL(-) = TRACAO)

FhseMax = -154.79
FhseMin = -306.97
FhieMax = 298.29
FhieMin = 147.84
FhsdMax = 147.85
FhsdMin = -456.29
FhidMax = 458.62
FhidMin = -157.12

1.2) F. CORT. NA COLUNA, ENTRE MESAS SUP. E INF. DA(S) VIGA(S)

QwMax = 302.64

2) RESISTENCIAS DE CALCULO DA COLUNA, SEM ENRIJECEDORES (SEM VERIFICAR SOLDA DE COMPOSICAO)

2.1) A FORÇA CORTANTE

FiQn = 343.71

2.2) A FORÇAS HORIZ. APLICADAS PELAS MESAS DA(S) VIGA(S), EST. LIMITE ESCOAMENTO LOCAL DA ALMA DA COLUNA

FiRlse = 191.62
FiRlie = 191.62
FiRlsd = 198.13
FiRlid = 198.13

2.3) A F. HORIZ. DE TRACAO APLIC. PELAS MESAS DA(S) VIGA(S), EST. LIM. PLASTIF. LOCAL DA MESA DA COLUNA, POR FLEXAO, NA AUSENCIA DE TENSOES NORMAIS DIRETAS

FiRt2s = 345.60
FiRt2i = 345.60
2.4) A F. HORIZ. DE COMPR. APLIC. PELAS MESAS DA(S) VIGA(S),
EST. LIMITE FLAMBAGEM LOCAL DA ALMA DA COLUNA
FiRb2s = 453.47
FiRb2i = 453.47

FIM

DADOS DE ENTRADA

1	1	2	10.0000	70.00	300.00	
	25.00		40.00	48.30	1.59	
	30.00		30.00	1.600	0.950	0.60
	40.00		20.00	0.950	0.630	
	40.00		25.00	1.250	0.800	
	0.00		0.00	0.00		
	151.00		-11.00	-6000.00		
	0.00		50.00	12000.00		
	20.00		100.00	18000.00		
	0.00		0.00	0.00		
	-23.00		2.00	12000.00		
	0.00		40.00	6000.00		
	-20.00		-60.00	-6000.00		

RESULTADOS FINAIS

(np = num. de paraf.; s = sup. i = inf., e = esq., d = dir.)
(VER FIGURA 4-13)

tpe = 3.150
 Bpe = 22.86
 Hpe = 57.25
 de = 2.540
 npse = 4
 npie = 2
 sle = 6.35
 ele = 24.41
 e2e = 7.62
 e3se = 7.62
 e3ie = 0.00
 e4se = 6.35
 e4ie = 3.63
 tpd = 3.750
 Bpd = 28.62
 Hpd = 74.33
 dd = 3.180
 npsd = 4
 npid = 4
 sld = 7.95
 eld = 20.27
 e2d = 9.54
 e3sd = 9.54
 e3id = 9.54
 e4sd = 7.95
 e4id = 7.95
 cle = 0.80
 cld = 0.80
 c2e = 1.10
 c2d = USAR SOLDA DE PENETRACAO TOTAL
 DESNECESSARIO REFORCAR SOLDA DE COMPOSICAO LADO ESQUERDO
 DESNECESSARIO REFORCAR SOLDA DE COMPOSICAO LADO DIREITO
 b1s = 13.83
 t1s = 0.630
 c3se = 0.60
 c3sd = 0.60
 c4s = 0.50
 b1i = 13.83
 t1i = 0.630
 c3ie = 0.60
 c3id = 0.60
 c4i = 0.50
 NAO EXISTE ENRIJECEDOR VERTICAL
 CONSTANTES DE MOLA (COLUNA DE PERFIL LAM. HPP,HPM,HPL OU SOLD. SIMILAR)
 (kt = MOLA P/ TRACAO kb = MOLA P/ COMPRESSAO)
 ktse = 19224
 kbse = 29387
 ktie = NAO HA TRACAO PARA ESF. SOLICIT. DADOS
 kbie = 29387
 ktsd = 17770
 kbsd = 30397
 ktid = 17770
 kbid = 30397

SOLICITACOES E RESISTENCIAS DE CALCULO

1) SOLICITACOES DE CALCULO

1.1) FORÇAS HORIZONTAIS QUE AS MESAS DA(S) VIGA(S) APLICAM NA COLUNA (SINAL(-) = TRACAO)

FhseMax = -154.79
FhseMin = -306.97
FhieMax = 298.29
FhieMin = 147.84
FhsdMax = 147.85
FhsdMin = -456.29
FhidMax = 458.62
FhidMin = -157.12

1.2) F. CORT. NA COLUNA, ENTRE MESAS SUP. E INF. DA(S) VIGA(S) QwMax = 302.64

2) RESISTENCIAS DE CALCULO DA COLUNA, SEM ENRIJECEDORES (SEM VERIFICAR SOLDA DE COMPOSICAO)

2.1) A FORÇA CORTANTE

FiQn = 343.71

2.2) A F. HORIZ. DE TRACAO APLIC. PELAS MESAS DA(S) VIGA(S), EST. LIMITE ESCOAMENTO LOCAL DA ALMA DA COLUNA

FiRt1se = 651.51
FiRt1ie = NAO DETERMINADA PARA np = 2
FiRt1sd = 815.67
FiRt1id = 815.67

EST. LIM. PLASTIF. LOCAL DA MESA DA COLUNA, POR FLEXAO, NA AUSENCIA DE TENSOES NORMAIS DIRETAS

FiRt2se = 403.03
FiRt2ie = NAO DETERMINADA PARA np = 2
FiRt2sd = 399.86
FiRt2id = 399.86

2.3) A F. HORIZ. DE COMPR. APLIC. PELAS MESAS DA(S) VIGA(S), EST. LIMITE ESCOAMENTO LOCAL DA ALMA DA COLUNA

FiRb1se = 326.28
FiRb1ie = 326.28
FiRb1sd = 358.44
FiRb1id = 358.44

EST. LIMITE FLAMBAGEM LOCAL DA ALMA DA COLUNA

FiRb2se = 453.47
FiRb2ie = 453.47
FiRb2sd = 453.47
FiRb2id = 453.47

FIM

6-COMENTÁRIO FINAL

Como as referências utilizadas basearam seus estudos em ensaios realizados com colunas de perfis laminados, é importante, no Brasil, realizar ensaios similares com colunas de perfis soldados. Para a determinação das constantes de mola (item 3-2), quando as colunas são perfis soldados, tais ensaios são imprescindíveis.

Para trabalhos futuros seriam importantes também ensaios visando:

- a) outros tipos de ligação
- b) análise inelástica da estrutura
- c) solicitação variável (fadiga)

Para agilizar os cálculos, outra proposta de trabalho futuro seria a elaboração de um programa de computador integrando análise (levando em conta rigidez das ligações), dimensionamento das barras e dimensionamento das ligações (com determinação das constantes de mola).

Numa última etapa, com auxílio da computação gráfica, tal programa poderia gerar, como uma das saídas, os desenhos finais de execução da estrutura com todos os detalhes necessários.

APÊNDICE

A1) EFEITO DE ALAVANCA (PRying-ACTION)

É bastante utilizado no Brasil o Manual do AISC [2], que traz na Parte 5 - "Connections" - um processo de determinação do efeito de alavanca Q (Prying-action) baseado na ref. [3]. Este processo é reproduzido a seguir (fig. A-1).

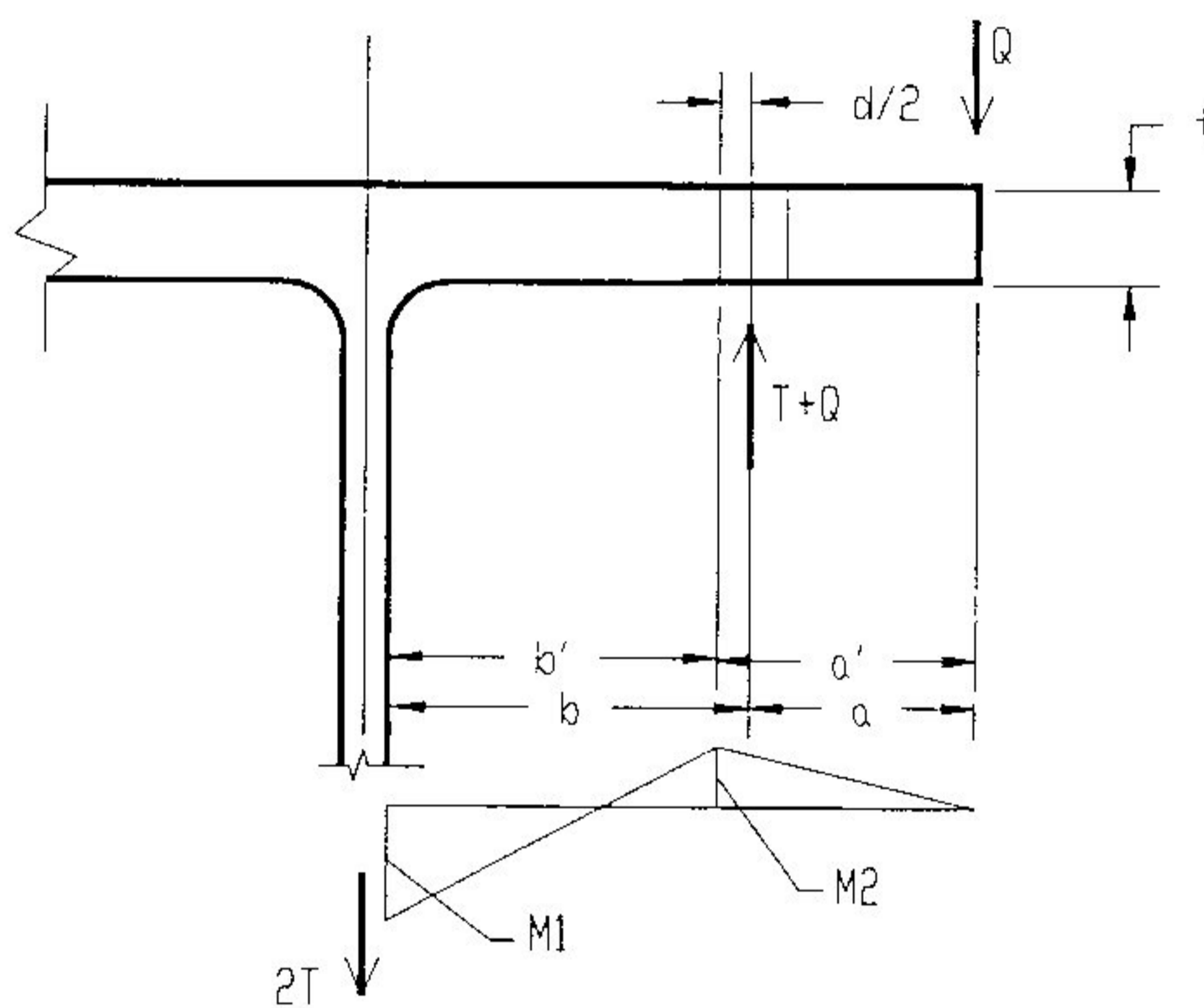


FIG A-1

T = força de tração externa aplicada, por parafuso

Q = efeito de alavanca, por parafuso

p = largura da chapa (de espessura t) que trabalha à flexão, por parafuso (esta dimensão é perpendicular ao plano da figura)

d = diâmetro do parafuso

d' = diâmetro do furo

a, b - conforme indicado, porém, se $a > 1,25b$, usa-se $a = 1,25b$

Considera-se que o ponto de aplicação da força final no parafuso (T+Q) sofra um deslocamento de $d/2$ na direção do apoio, devido à deformação da ligação, resultando em

$$b' = b - d/2 \quad e \quad a' = a + d/2 \quad (A.1)$$

O momento fletor na seção adjacente ao apoio será

$$M1 = (T+Q)b' - Q(a'+b') = Tb' - Qa' \quad (A.2)$$

e na seção do furo:

$$M2 = Qa' = Tb' - M1 \quad (A.3)$$

Para determinar Q, estabelece-se que M1 provoca a plastificação total da chapa, isto é:

$$M1 = \phi M_p = \phi(p \cdot t^2/4) f_y, \text{ donde} \quad (A.4)$$

$$Q = [Tb' - \phi(p \cdot t^2/4) f_y] / a' \quad (A.5)$$

ϕ = coeficiente de resistência = 0,9 [4]

Entretanto, é necessário que o momento M2 não supere o momento de cálculo de plastificação total da chapa na seção do furo, ou seja:

$$M2 \leq \phi[(p-d')t^2/4] f_y \quad (A.6)$$

Valor mínimo de Q:

Se for calculado $Q < 0$, isto é, se $Tb' < \phi M_p$, ter-se-á $Q = 0$ (não existe Q negativo)

Valor máximo de Q :

Com a limitação de M2 tem-se

$$Q \leq \phi[(p-d')t^2/4] f_y / a' \quad (A.7)$$

Fazendo: $\phi t^2 \cdot f_y/4 = \phi M_p/p = M_1/p = (Tb' - Qa')/p$:

$$Q \leq [(p-d')/p](Tb' - Qa')/a', \text{ ou seja}$$

$$Q \leq [(p-d')/p](Tb'/a')/[1+(p-d')/p] \quad (\text{A.8})$$

Com base nas proporções estabelecidas por [9] e citadas no item 4-3-3-1-a, tem-se (para a mesa da coluna):

- apoio na alma da coluna

$$p = 6d; \quad (p-d')/p \cong (p-d)/p = 5/6$$

$$b'/a' \cong (2,5d - 0,5d)/(2d + 0,5d) = 0,8$$

Donde:

$$Q \leq 0,364T$$

- apoio nos enrijecedores

$$p = 4,5d; \quad (p-d')/p \cong (p-d)/p = 0,778$$

$$b'/a' \cong (3d - 0,5d)/(2,5d + 0,5d) = 0,833$$

Donde:

$$Q \leq 0,364T$$

Conclui-se que o valor utilizado ($Q = T/3$), baseado nas refs. [9] e [10], está bem próximo do máximo que se obteria pelo método que acabamos de apresentar, obedecidas as proporções estipuladas naquelas referências.

A-2) PLASTIFICAÇÃO LOCAL DA MESA DA COLUNA CAUSADA POR FORÇA DE TRAÇÃO INTRODUZIDA

a) LIGAÇÃO SOLDADA

Como a ref. [6] cita apenas uma faixa para o valor da força que produz a plastificação local, far-se-á apenas uma demonstração aproximada, considerando valores médios de $bfc = 12tfc$ e $bfv = bfc$ (fig. A-2)

As distâncias de $6tfc$ acima e abaixo da mesa da viga são da ref. [6].

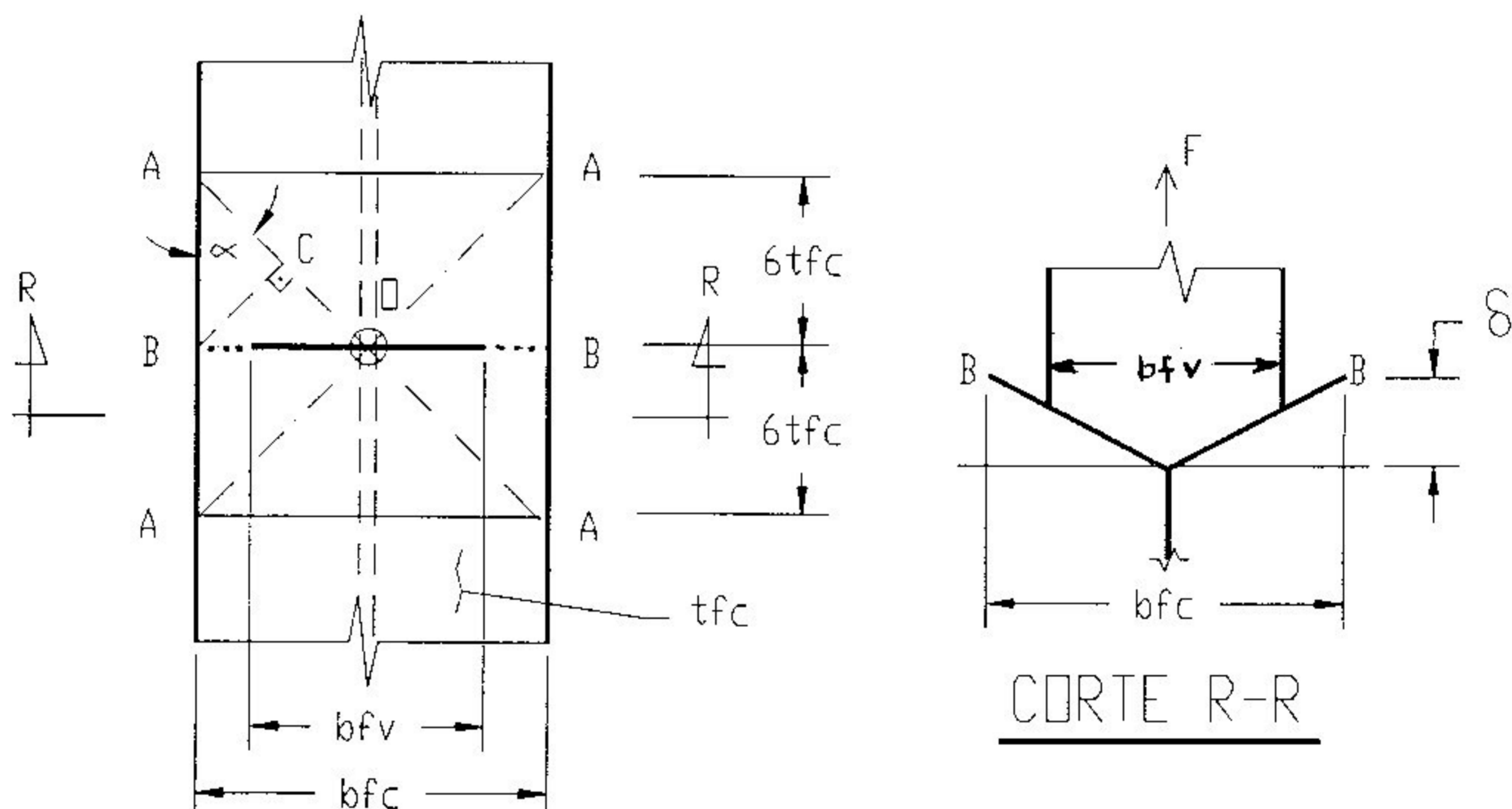


FIG A-2

Considera-se que, ao aplicar a força de tração F na coluna, através da mesa da viga, haverá plastificação da mesa da coluna nas linhas OB (convexa na vista da figura) e OA (côncava na vista da figura).

Sendo δ o deslocamento vertical dos pontos B (pontos A não se deslocam), ter-se-á, pelo princípio dos trabalhos

virtuais:

$$F \cdot \delta' = m_p(4 \cdot OA \cdot \theta_1 + 2 \cdot OB \cdot \theta_2) \quad (A.9)$$

δ' = deslocamento (médico) do ponto de aplicação de F =
 $(1/2)(\delta) = \delta/2$

m_p = momento de plastificação total por unidade de comprimento = $tfc^2 \cdot f_y/4$

θ_1 = rotação na linha OA = $\delta/BC = \delta/(OB \cos \alpha)$

θ_2 = rotação na linha OB = $2\delta/AB = 2\delta/(6tfc)$

Com os valores médios considerados:

$$OB = bfc/2 = 6tfc \Rightarrow \theta_1 = \delta/(6tfc \cdot \cos \alpha) \quad (A.10)$$

$$OA = AB/\cos \alpha = 6tfc/\cos \alpha \quad (A.11)$$

Substituindo tudo na expressão dos trabalhos virtuais:

$$F(\delta/2) = (tfc^2 f_y/4) [4(6tfc/\cos \alpha) \delta/(6tfc \cdot \cos \alpha) + 2 \cdot 6tfc \cdot 2\delta/(6tfc)] ; \text{ como } \alpha = 45^\circ:$$

$$\therefore F = 6tfc^2 f_y \quad (\text{utilizado neste trabalho}) \quad (A.12)$$

Observação: para evitar que a linha OA de plastificação da mesa terminasse exatamente na extremidade da coluna, exigiu-se, neste trabalho, um comprimento mínimo da coluna igual a $bfc/2$, entre a seção A-A e a extremidade adjacente.

b) LIGAÇÃO PARAFUSADA, COLUNA NÃO ENRIJECIDA, CHAPA DE CABEÇA RÍGIDA

De acordo com [9], há dois mecanismos de colapso possíveis (para determinar a resistência última da mesa da coluna): mecanismo B e mecanismo C.

No mecanismo B não aparece linha de plastificação total

entre os parafusados que ficam do mesmo lado da alma da coluna, e a deformação dos parafusos contribui na realização do trabalho virtual interno. As linhas de plastificação consideradas, AB, BB, BC, são mostradas na figura A-3, onde, para maior clareza, a chapa de cabeça foi suprimida da vista principal. Aplica-se deslocamento virtual δ nos pontos A (os pontos B e C não se deslocam). Ocorre contato com a chapa de cabeça ao longo de A-A (com aparecimento de efeito de alavanca), as linhas AB e AC são retas inclinadas e as regiões ABC correspondem (cada uma) a $1/4$ do cone com vértice em A, altura δ , raio da base igual a $m+n$.

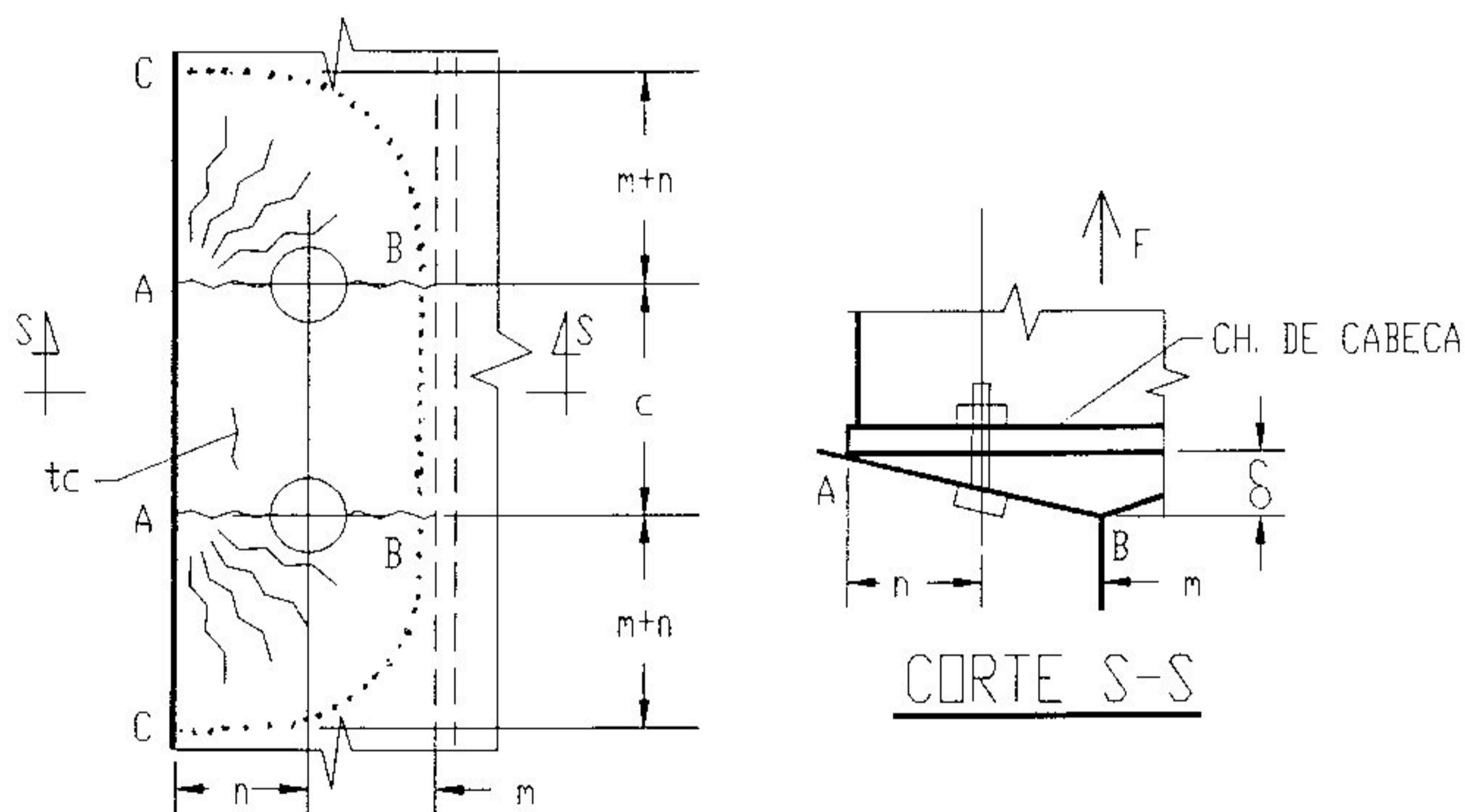


FIG A-3

No mecanismo C aparece linha de plastificação total entre os parafusos que ficam do mesmo lado da alma da coluna e, por hipótese, não existe deformação dos parafusos. As linhas de plastificação consideradas AB, BB, BC, BD, CC, CD,

DE são mostradas na fig. A-4, onde, para maior clareza, a chapa de cabeça foi suprimida da vista principal. O deslocamento virtual δ é aplicado nos pontos A e B (os pontos C, D, E não se deslocam). Ocorre contato com a chapa de cabeça no plano ABBA (com aparecimento de efeito de alavanca), as linhas BC, BD, AE são retas inclinadas e as regiões BCD correspondem (cada uma) a 1/4 do cone com vértice em B, altura δ , raio da base igual a "m". Tal configuração (dentre outras possibilidades analisadas por [9]) foi a que apresentou resultados teóricos mais próximos dos obtidos experimentalmente.

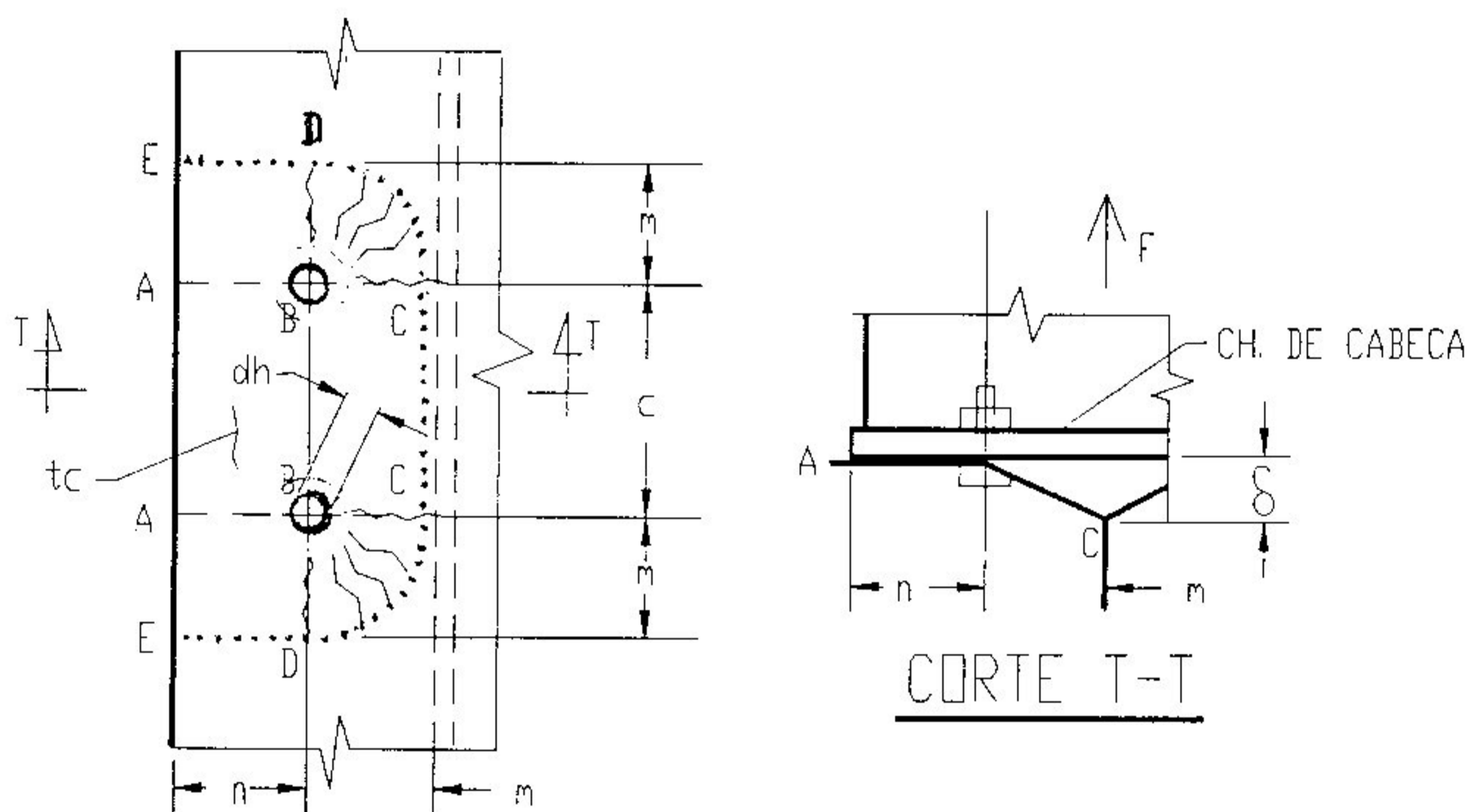


FIG A-4

Antes de escrever a equação dos trabalhos virtuais para os dois mecanismos, mostrar-se-á qual o trabalho virtual interno correspondente à plastificação de uma placa circular engastada na borda, sujeita a um deslocamento virtual δ no centro [20].

Considere-se inicialmente que a placa seja um polígono de n lados e que todos os lados, bem como os raios que vão do centro P aos vértices, sejam linhas de plastificação total quando P se desloca de δ (fig. A-5).

O trabalho interno será

$$T = mp \cdot n(\overline{BP} \cdot \theta_1 + a \cdot \theta_2) \quad (\text{A.13})$$

mp = momento de plastificação total por unidade de comprimento

$$\overline{BP} = (a/2) / \text{sen} \alpha$$

$$\theta_1 = \text{rotação na linha BP} = 2\delta' / \overline{AD} \quad (\text{corte V-V})$$

$$\theta_2 = \text{rotação na linha AB} = \delta / \overline{EP}$$

$$\delta' = \delta(\overline{BD} / \overline{BP}) = \delta \cdot a \cdot \text{sen} \alpha / [(a/2) / \text{sen} \alpha] = 2\delta \cdot \text{sen}^2 \alpha \quad (\text{corte U-U})$$

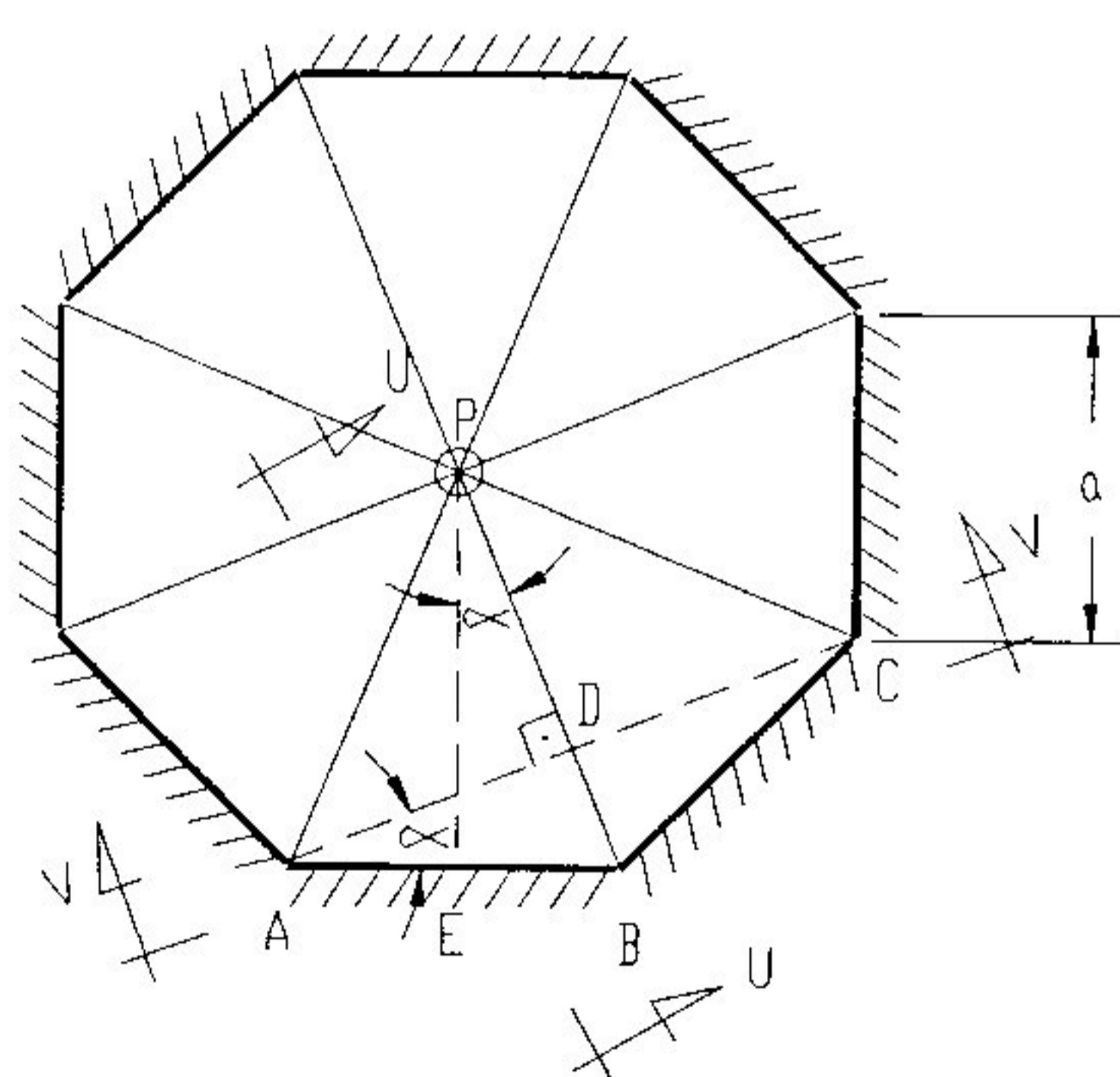
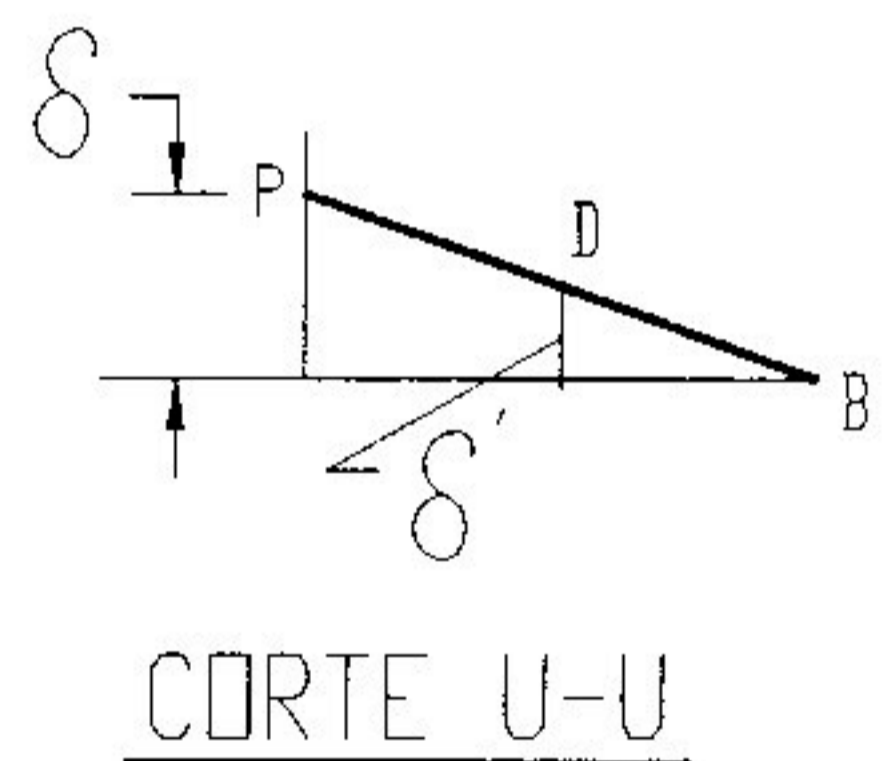
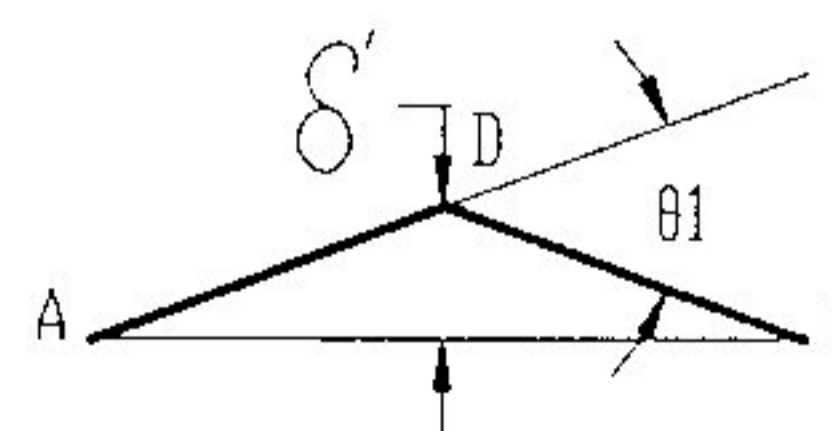


FIG A-5



CORTE U-U



CORTE V-V

$$\overline{AD} = a \cdot \text{cos} \alpha$$

$$\overline{EP} = (a/2) / \text{tga}$$

Substituindo na expressão de T :

$$T = mp.n\{[(a/2)/\text{sen}\alpha]4\delta.\text{sen}^2\alpha/(a.\text{cos}\alpha) + a.\delta/[(a/2)/\text{tg}\alpha]\} = mp.n(2\delta.\text{tg}\alpha + 2\delta.\text{tg}\alpha) = 4mp.\delta.n.\text{tg}\alpha \quad (\text{A.14})$$

Entretanto (fazendo $\overline{EP} = r$):

$$n.\text{tg}\alpha = n(a/2)/r = p/(2r) \quad (\text{A.15})$$

(p = perímetro do polígono)

No caso da placa circular (polígono com número infinito de lados) tem-se $p = 2\pi r$ e $p/(2r) = \pi$

Assim, para a placa circular:

$$T = 4mp.\delta.\pi \quad (\text{A.16})$$

Voltando agora ao mecanismo B (fig. A-3), tem-se, pelo princípio dos trabalhos virtuais:

$$F\delta = mp[2c.\delta/(m+n) + 4\delta.\pi] + 4Rp.\delta.n/(m+n) \quad (\text{A.17})$$

$4mp.\delta.\pi$ é a parcela correspondente aos 4 quartos de cone;

Rp é a resistência nominal de um parafuso à tração;

$\delta.n/(m+n)$ é o alongamento do parafuso (corte S-S);

$\delta/(m+n)$ é a rotação na linha BB;

mp é o momento de plastificação total por unidade de comprimento da mesa da coluna = $f_y.t_c^2/4$;

Dai obtém-se $F_{mb} = F$ correspondente ao mecanismo B:

$$- F_{mb} = f_y.t_c^2[\pi + 0,5c/(m+n)] + 4Rp.n/(m+n) \quad (\text{A.18})$$

Para o mecanismo C (fig. A-4) tem-se:

$$F\delta = mp[4(n-dh/2)\delta/m + 4n.\delta/m + 2(c-dh)\delta/m + 2c.\delta/m + 4\delta.\pi] \quad (\text{A.19})$$

$4mp.\delta.\pi$ é a parcela correspondente aos 4 quartos de cone;

δ/m é a rotação nas linhas AB, DE, BB, CC;

mp tem o mesmo significado anterior;

Daí obtém-se $F_{mc} = F$ correspondente ao mecanismo C:

$$- F_{mc} = f_y \cdot t_c^2 [\pi + (2n + c - dh) / m] \quad (A.20)$$

c) LIGAÇÃO PARAFUSADA, COLUNA ENRIJECIDA, CHAPA DE CABEÇA RÍGIDA

De acordo com [9] a resistência F_{mc} anterior pode ser aumentada como a seguir (se F_{mb} não for menor que F_{mc}), usando enrijecedores na coluna, opostos à mesa da viga.

O mecanismo que apresentou resultados teóricos mais próximos dos obtidos experimentalmente foi o indicado na figura A-6, onde a chapa de cabeça foi suprimida da vista principal para maior clareza. O deslocamento virtual δ é aplicado nos pontos A e B (os pontos C, D, E, F não se deslocam). Ocorre contato com a chapa de cabeça nas linhas AB (com aparecimento de efeito de alavanca) e as linhas de

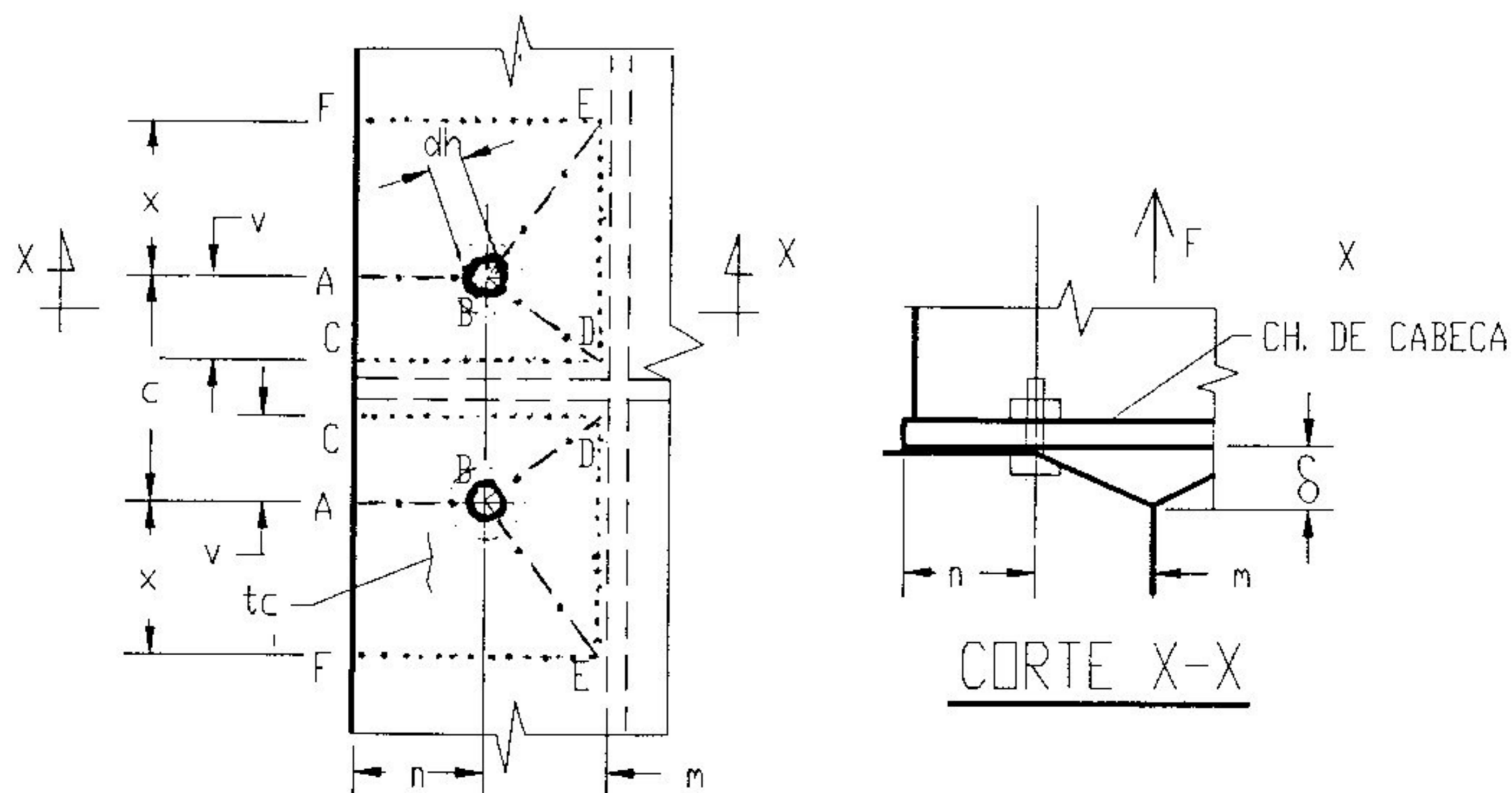


FIG A-6

plastificação são AB, BD, BE, CD, DE, EF.

Tem-se:

$$\overline{BD} = (m^2 + v^2)^{1/2} \quad \overline{BE} = (m^2 + x^2)^{1/2} \quad (A. 21)$$

Rotações:

δ/x na linha EF

δ/v na linha CD

δ/m na linha DE

$\delta/x + \delta/v$ na linha AB

Pode-se mostrar que as rotações nas linhas BD e BE são, respectivamente, $\delta \cdot \overline{BD} / (m \cdot v)$ e $\delta \cdot \overline{BE} / (m \cdot x)$.

Assim, pelo princípio dos trabalhos virtuais:

$$\begin{aligned} F\delta = & mp(4(m+n)\delta/x + 4(m+n)\delta/v + 4(v+x)\delta/m + \\ & 4(n-dh/2)(\delta/x + \delta/v) + 4[(m^2 + v^2)^{1/2} - \\ & dh/2]\delta(m^2 + v^2)^{1/2} / (m \cdot v) + \\ & 4[(m^2 + x^2)^{1/2} - dh/2]\delta(m^2 + x^2)^{1/2} / (m \cdot x) \end{aligned} \quad (A. 22)$$

A partir daí, tendo mp o mesmo significado do item b, obtém-se $F_{ms} = F$ correspondente à coluna enrijecida:

$$- F_{ms} = fy \cdot tc^2 [(1/v + 1/x)(2m + 2n - dh) + (2v + 2x - dh)/m] \quad (A. 23)$$

Para chegar a este resultado foi feita uma aproximação, com o objetivo de simplificar a expressão de F_{ms} : o termo $dh/2$ foi multiplicado por $(m+v)/(m^2+v^2)^{1/2}$ na penúltima parcela e por $(m+x)/(m^2+x^2)^{1/2}$ na última. Este procedimento é justificado pelo fato de $dh/2$ ser pequeno em relação a $(m^2+v^2)^{1/2}$ e $(m^2+x^2)^{1/2}$, e pelo fato da aproximação ser do lado da segurança (os multiplicadores de $dh/2$ ficam entre 1 e $2^{1/2}$).

O valor de "x" a ser usado é o que minimiza F_{ms} ($dF_{ms}/dx = 0$), que é

$$x = [m(m+n-0,5dh)]^{1/2} \quad (A.24)$$

Observações sobre os itens "b" e "c"

I) Com as proporções estabelecidas por [9] (ver item 4-3-3-1-a) e impondo que a coluna deve se prolongar pelo menos de metade da largura da mesa além da região plastificada (como no item "a"), têm-se as seguintes distâncias mínimas entre a mesa da viga e a extremidade da coluna:

$$\text{fig. A-3: } \cong (c/2) + 2(m+n) \cong 3d + 2(2,5d + 2d) = 12d$$

$$\text{fig. A-4: } \cong (c/2) + m + (m+n) \cong 3d + 2,5d + (2,5d + 2d) = 10d$$

$$\text{fig. A-6: } \cong (c/2) + x + (m+n) \cong 3d + 3,2d + (2,5d + 2d) = 10,7d$$

$$(x \cong [2,5d(2,5d + 2d - 0,5d)]^{1/2} \cong 3,2d)$$

Desta forma, considerou-se neste trabalho um prolongamento da coluna de no mínimo 12d, além da mesa da viga, para que a mesa da coluna possa atingir a plastificação total.

II) Mostra-se também, utilizando as proporções citadas, que F_{ms} é sempre inferior a $2F_{mc}$ (com isto é justificável aplicar nos enrijecedores a metade da força de tração). De fato:

$$F_{mc} = f_y \cdot t_c^2 [\pi + (2n + c - dh)/m] \cong$$

$$f_y \cdot t_c^2 [\pi + (2 \times 2d + 6d - d)/2,5d] = 6,74 f_y \cdot t_c^2$$

$$F_{ms} = f_y \cdot t_c^2 [(1/v + 1/x)(2m + 2n - dh) + (2v + 2x - dh)/m] \cong$$

$$\cong f_y \cdot t_c^2 [(1/3d + 1/3,2d)(2 \times 2,5d + 2 \times 2d - d) +$$

$$+ (2 \times 3d + 2 \times 3,2d - d)/2,5d] = 9,73 f_y \cdot t_c^2 \cong 1,44 F_{mc}$$

A3) FLAMBAGEM LOCAL DA ALMA DA COLUNA NÃO ENRIJECIDA,
SUJEITA A DUAS FORÇAS DE COMPRESSÃO INTRODUZIDAS POR
MESAS OPOSTAS DE DUAS VIGAS

Na referência [5] tem-se a determinação da carga P_{cr} que provoca a flambagem elástica, considerando duas forças opostas de compressão atuando em um painel simplesmente apoiado nas 4 bordas (fig. A-7).

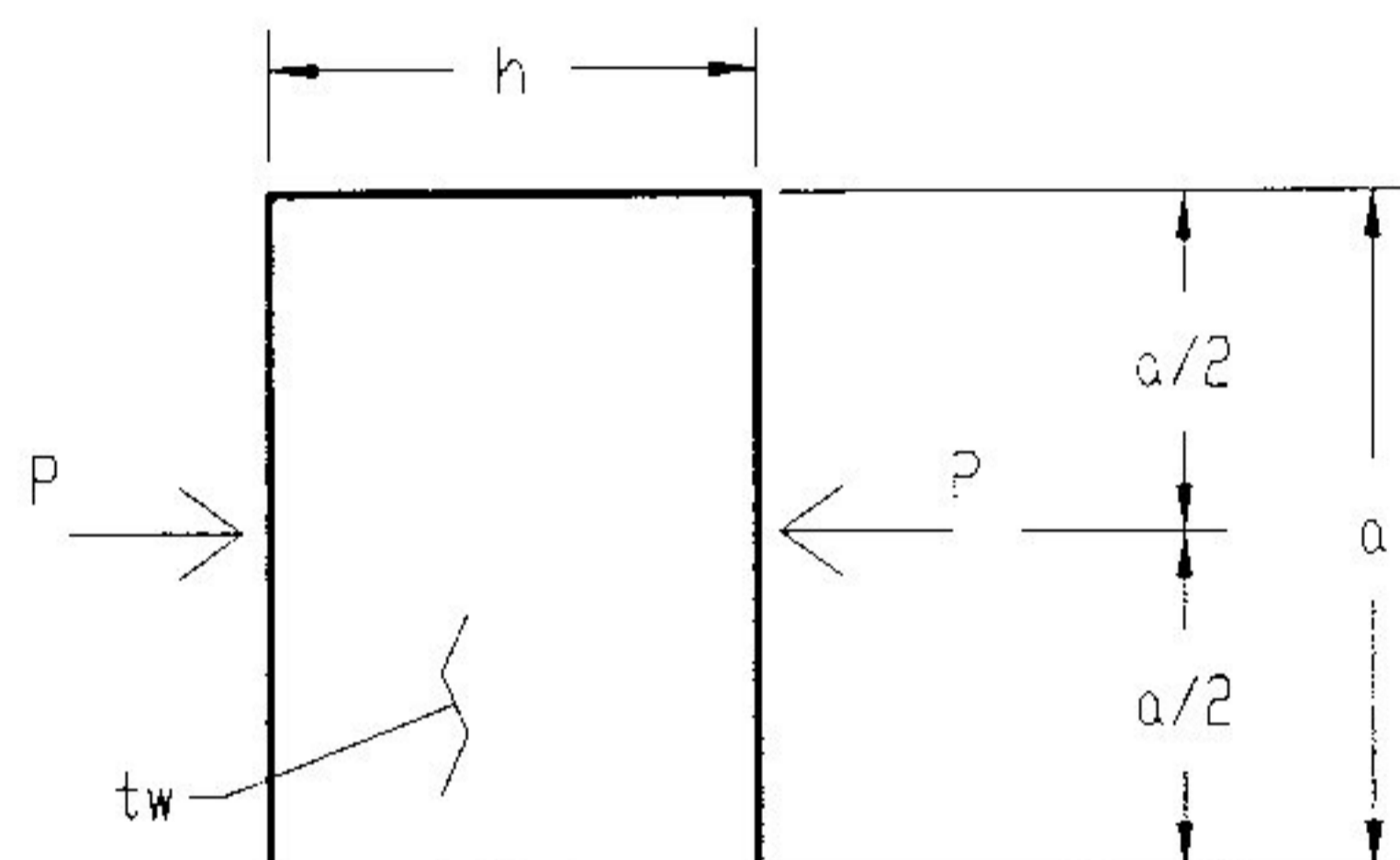


FIG A-7

Conforme [5], à medida que a relação $\beta = a/h$ cresce, a carga de flambagem converge rapidamente para

$$P_{cr} = 4\pi \cdot E \cdot t_w^3 / [12(1-\nu^2)h], \quad (A.25)$$

sendo que, para $a/h = 2$ o valor de P_{cr} já é igual a 97,3% desse limite. Substituindo $\nu = 0,3$ (coeficiente de Poisson) tem-se:

$$P_{cr} = 1,15E \cdot t_w^3 / h \quad (A.26)$$

Através de ensaios [13], verificou-se que:

I) Para o aço ASTM A36 ($f_y = 250\text{MPa}$) um limite inferior

para P_{cr} seria da ordem de $2/3$ do valor acima, isto é. :

$$P_{cr} \cong 0,77E.tw^3/h \quad (A.27)$$

II) Para aços com $f_y > 250\text{MPa}$ a carga de flambagem cresce, podendo atingir quase o dobro do valor correspondente ao A36 (para $f_y = 700\text{MPa}$); propôs-se, então, um fator de correção de P_{cr} , igual a $(f_y/250)^{1/2}$, com f_y em MPa. Na NBR8800 [4], para se obter uma expressão independente do sistema de unidades, o valor 250MPa que aparece no fator de correção foi substituído por $E/820$ (para $E = 205000\text{MPa}$, $E/820 = 250\text{MPa}$). Assim, obtém-se a resistência nominal R_{bz} da NBR8800, dada no item 2-4:

$$R_{bz} = (0,77E.tw^3/h)[f_y/(E/820)]^{1/2} = \\ 22tw^3(E.f_y)^{1/2}/h \quad (A.28)$$

Os ensaios foram realizados em perfis não enrijecidos, de pequeno comprimento (da ordem de 2,5 a 4 vezes a altura da seção).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Tschemmerneegg, F., Tautschnig, A., Klein, H., Braun, Ch. und Humer, Ch., "Zur Nachgiebigkeit von Rahmenknoten", Stahlbau, 10/1987, pp. 299-306.
- [2] "Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design," American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, 1986.
- [3] Fisher, J. W. and Struik, J. H. A., "Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints", John Wiley & Sons, New York, 1974.
- [4] "Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios", Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR8800, 1986.
- [5] Timoshenko, S. P., Gere, J. M., "Theory of Elastic Stability", McGraw-Hill Book Company, Inc., 1961.
- [6] Graham, J. D., Sherbourne, A. N. and Khabbaz, R. N., "Welded Interior Beam-to-Column Connections", American Institute of Steel Construction, Chicago, 1959.
- [7] "Common Unified Code of Practice for Steel Structures", Eurocode 3, Draft, 1983.

- [8] Witteven, J., Stark, J. W. B., Bijlaard, F. S. K. and Zoetemeijer, P., "Welded and Bolted Beam-to-Column Connections", Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 108, NO. ST2, February 1982, pp. 433-455.
- [9] Packer, J. A. and Morris, L. J., "A Limit State Design Method for the Tension Region of Bolted Beam - Column Connections", The Structural Engineer, vol. 55, NO. 10, October 1977, pp. 446-458.
- [10] Mann, A.P. and Morris, L. J., "Limit Design of Extended End - Plate Connections", Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 105, NO. ST3, March 1979, pp. 511-526.
- [11] Murray, T. M., "Recent Developments for the Design of Moment End-Plate Connections", J. Construct. Steel Research 10, 1988, pp. 133-162.
- [12] Neal, B. G., "The Plastic Methods of Structural Analysis" - Chapman and Hall - Londres, 1977.
- [13] Chen, W. F. and Newlin, D. E., "Column Web Strength in Beam -to-Column Connections", Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 99, NO. ST9, September 1973, pp. 1978-1984.

- [14] "Stahlbau Handbuch", Stahlbau - Verlags - GMBH, Köln, 1982.
- [15] Humer, Ch. and Tschemmerneegg, F., "A Nonlinear Joint Model for the Design of Structural Steel Frames", Construzioni Metalliche no. 1, 1988, pp. 31-41.
- [16] Humer, Ch, "Das Momenten-Rotationsverhalten von Steifenlosen Rahmenknoten mit Kopfplattenanschlüssen", Tese de doutorado apresentada à Universidade de Innsbruck, Áustria, em 1987.
- [17] Tschemmerneegg, F., "Extended End-Plate Connections with Backing Plates", Palestras proferidas na EEUFMG, Belo Horizonte, 1989.
- [18] Tschemmerneegg, F., "Bestimmung der Knotenkennwerte für eine Kombination Stütze HEB 180 / Riegel IPE 270", Palestras proferidas na EEUFMG, Belo Horizonte, 1989.
- [19] "Structural Engineering System Solver (STRESS)" - Massachusetts Institute of Technology - 1964
- [20] Martinelli, D. A. O., Montanari, I., "Teoria das Charneiras Plásticas", USP - S. Carlos.

BIBLIOGRAFIA

Aggarwal, A.K. and Coates, R.C., "Moment-Rotation Characteristics of Bolted Beam-Column Connections", J. Construct. Steel Research 6, 1986, pp. 303-318.

"Berechnung von Regelanschlüssen im Stahlhochbau", Merkblatt 140, Beratungsstelle für Stahlverwendug, Düsseldorf, 1978.

Censi, A. L. C., "Autocad 10 - Guia Prático", Livros "Érica Editora Ltda., São paulo, 1987.

Chen, W. F. and Newlin, D. E., "Column Web Strength in Beam-to-Column Connections", Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 99, NO. ST9, September 1973, pp. 1978-1984.

"Common Unified Code of Practice for Steel Structures", Eurocode 3, Draft, 1983.

Cunningham, R., "Some Aspects of Semi-Rigid Connections in Structural Steelwork", The Structural Engineer, Vol. 68, No. 5/6, March 1990, pp. 85-92.

Curtis, L. E. and Murray, T. M., "Column Flange Strength at Moment End-Plate Connections", Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, 2nd quarter, 1989, pp.

41-50.

Farrer, H., Becker, C. G., Faria, E. C., Campos Filho, F. F., Matos, H. F., Santos, M. A., Maia, M. L., "Pascal Estruturado", Editora Guanabara, RJ, 1985.

Fisher, J. W. and Struik, J. H. A., "Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints", John Wiley & Sons, New York, 1974.

Graham, J. D., Sherbourne, A. N. and Khabbaz, R. N., "Welded Interior Beam-to-Column Connections", American Institute of Steel Construction, Chicago, 1959.

Horne, M. R., Morris, L. J., "Plastic Design of Low-Rise Frames", Collins, Londres, 1981.

Humer, Ch. and Tschemmernegg, F., "A Nonlinear Joint Model for the Design of Structural Steel Frames", Construzioni Metalliche no. 1, 1988, pp. 31-41.

Humer, Ch, "Das Momenten-Rotationsverhalten von Steifenlosen Rahmenknoten mit Kopfplattenanschlüssen", Tese de doutorado apresentada à Universidade de Innsbruck, Austria, em 1987.

Krishnamurt, N., "A Fresh Look at Bolted End-Plate Behavior and Design", Engineering Journal, American

Institute of Steel Construction, 2nd quarter, 1978, pp. 39-49.

Mann, A.P. and Morris, L. J., "Limit Design of Extended End - Plate Connections", Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 105, NO. ST3, March 1979, pp. 511-526.

"Manual of Steel Construction", American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, 8a. ed. (1980) e 9a. ed. (1989).

"Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design," American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, 1986.

Martinelli, D. A. O., Montanari, I., "Teoria das Charneiras Plásticas", USP - S. Carlos.

Murray, T. M., "Recent Developments for the Design of Moment End-Plate Connections", J. Construct. Steel Research 10, 1988, pp. 133-162.

Neal, B. G., "The Plastic Methods of Structural Analysis" - Chapman and Hall - Londres, 1977.

Packer, J. A. and Morris, L. J., "A Limit State Design Method for the Tension Region of Bolted Beam - Column

Connections", The Structural Engineer, vol. 55, NO. 10, October 1977, pp. 446-458.

"Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios", Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR8800, 1986.

Queiroz, G., "Elementos das Estruturas de Aço", Belo Horizonte, 1991.

Salmon, C. G., Johnson, J. E., "Steel Structures", Harper & Row, Publishers, N. York, 1990.

"Stahlbau Handbuch", Stahlbau - Verlags - GMBH, Köln, 1982.

"Structural Engineering System Solver (STRESS)" - Massachusetts Institute of Technology - 1964

Thornton, W. A., "Prying Action - A General Treatment", Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, 2nd quarter, 1985, pp. 67-75.

Timoshenko, S. P., Gere, J. M., "Theory of Elastic Stability", McGraw-Hill Book Company, Inc., 1961.

Tschemmerneegg, F., "Bestimmung der Knotenkennwerte für eine Kombination Stütze HEB 180 / Riegel IPE 270", Palestras proferidas na EEUFMG, Belo Horizonte, 1989.

Tschemmernegg, F., "Extended End-Plate Connections with Backing Plates", Palestras proferidas na EEUFMG, Belo Horizonte, 1989.

Tschemmernegg, F., Tautschnig, A., Klein, H., Braun, Ch. und Humer, Ch., "Zur Nachgiebigkeit von Rahmenknoten", Stahlbau, 10/1987, pp. 299-306.

Witteven, J., Stark, J. W. B., Bijlaard, F. S. K. and Zoetemeijer, P., "Welded and Bolted Beam-to-Column Connections", Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 108, NO. ST2, February 1982, pp. 433-455.