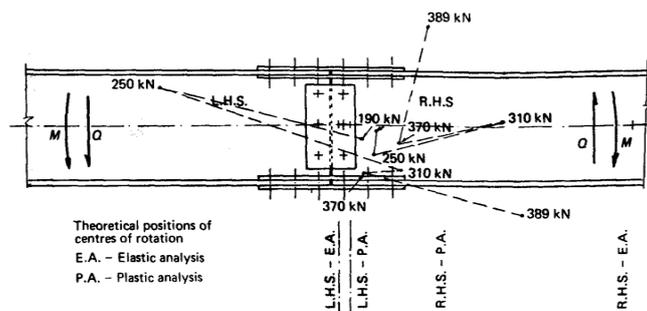


Projeto Econômico de Ligações

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
 PGECIV - Mestrado Acadêmico
 Faculdade de Engenharia – FEN/UERJ
 Disciplina: Tópicos Especiais em Estruturas (Ligações)
 Professor: Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

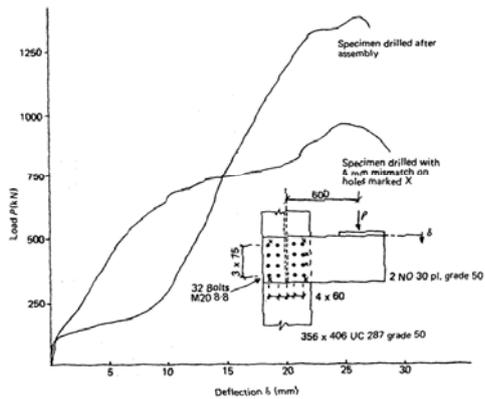
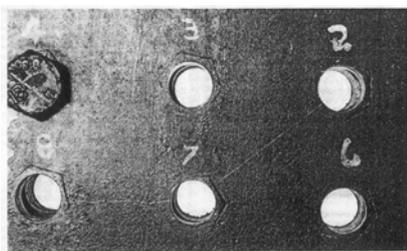
1. Introdução

- Incertezas → L. S. D. (Limit States Design)
- Laboratório x Teoria
 - 12 % Deslocamentos (16%)
 - 20 % Tensões (11%)
- Ligações → Efeito de alavanca → 100% → Falta de Alinhamento



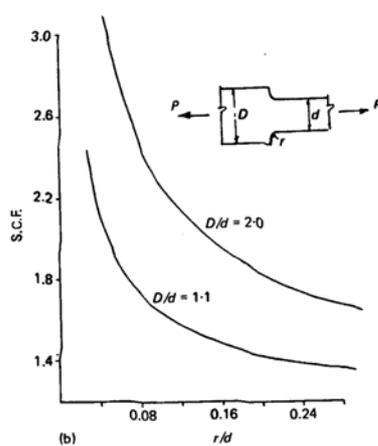
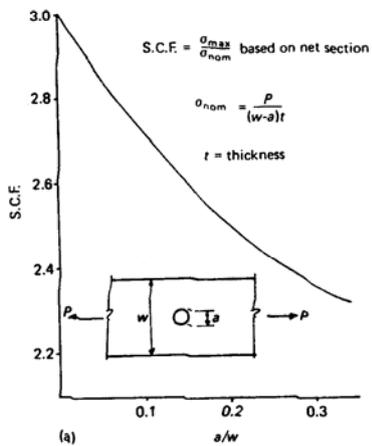
1. Introdução

- Elástico
- Plástico
 - Furação desalinhada → mais carga por parafuso
 - Tensões Residuais
 - Imperfeições
- Geometria Complexa
 - Concentração de Tensões
 - 20 x Tubos



1. Introdução

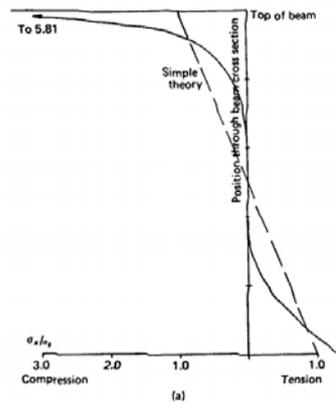
- Concentração de Tensões



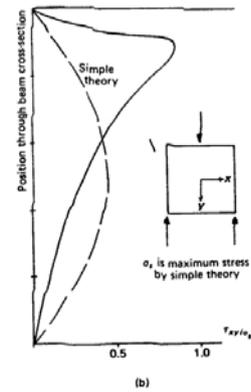
2. Distribuição Real de Tensões

- Vigas altas, Chapas de Gusset, Enrijecedores

Tensões Normais



Tensões de Cisalhamento



3. Deformações

- Deformações / Rigidez das Peças (Placa de Extremidade)

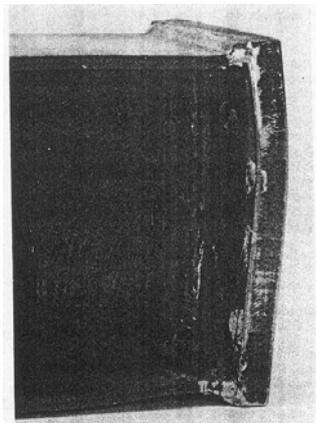


Figure 1.6 Short end-plate connection for an I-beam where yielding of beam web has permitted overall bending of end plate

4. Comportamento da Ligação

- Linear e Elástico

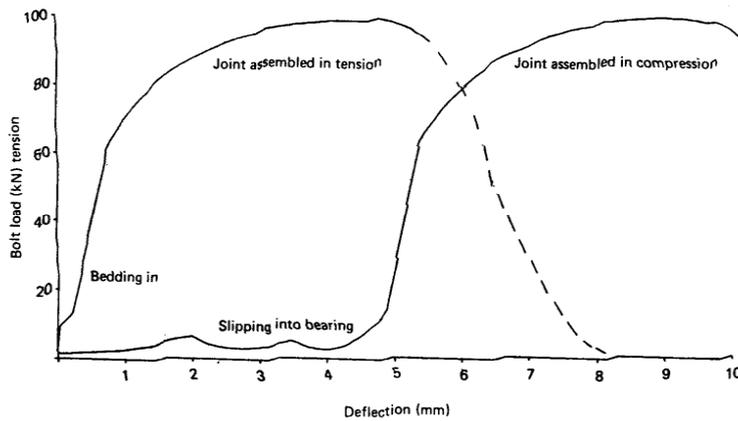


Figure 1.7 Load/deformation response of a single 20 mm diameter Grade 4,6 bolt in single shear

4. Comportamento da Ligação

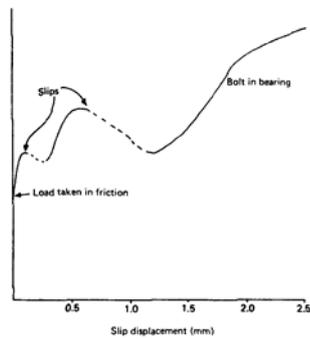


Figure 1.8 Load/deformation response of a single 20 mm diameter general grade HSFG bolt in double shear

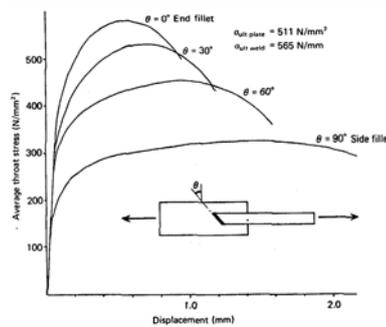


Figure 1.9 Load/deformation responses for 8 mm leg fillet welds at varying angles θ to load vector. Weld length 50 mm; plate thickness 19 mm

Deformações → Tensões nas Peças

Direção da solda de filete → Resistência

Análise Elastoplástica

→ Ductilidade

5. Filosofia de Projeto de Ligações

Análise Detalhada	X	Análise Simplificada
Pequenos Coeficientes de Segurança		Coeficientes de Segurança Médios

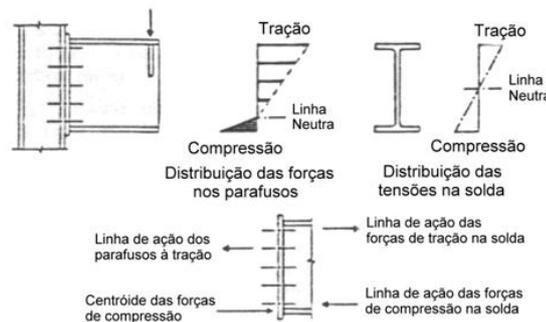
- O método das trajetórias de forças, proposto por Owens se baseia em uma análise simplificada.
- Os esforços atuantes são substituídos por sistemas de força equivalentes atribuídos a trajetórias específicas na ligação.
- Deve-se levar em conta a complexidade e a variabilidade do comportamento dos elementos estruturais envolvidos

5. Filosofia de Projeto de Ligações

- As quatro fases do método são:
- 1- Determinação da Distribuição de Forças Atuantes na Ligação
 - Estabelece-se o caminho por onde os esforços de flexão, cisalhamento e axial seguem de um elemento estrutural (viga, coluna, etc.) para o outro.
 - As excentricidades destes esforços são consideradas, gerando binários que atuarão nas mesas, almas dos perfis e nos conectores (soldas e parafusos) de acordo com a ligação.

5. Filosofia de Projeto de Ligações

- Análise seja consistente durante todo o processo.
- Evitar separar a análise da distribuição das forças nos parafusos da distribuição de tensão normal na alma da viga, pois estes elementos interagem.
- A solução está na redistribuição dos esforços na solda que une a chapa de extremidade à viga gerada pela ação do grupo de parafusos.
- A flexibilidade dos componentes da ligação também deve ser assegurada pois os elementos mais flexíveis da ligação governam o seu dimensionamento



5. Filosofia de Projeto de Ligações

- 2- Dimensionamento de Cada Componente Presente nas Trajetórias de Força Estabelecidas.
 - Garantir que cada elemento da trajetória do sistema de forças equivalentes tenha resistência suficiente.
 - Deve-se verificar individualmente a capacidade de cada componente:
 - mesas e a alma da viga
 - elementos conectores (soldas, parafusos e placas)
 - até a coluna, que deve ser verificada localmente.

13

5. Filosofia de Projeto de Ligações

- 3- Garantia do Comportamento Dúctil dos Componentes Determinados Anteriormente.
 - Os itens anteriores garantem que a ligação possui resistência adequada.
 - Deve-se garantir as condições acima antes que haja ruína ou flambagem de um de seus componentes.
 - Um modelo simplificado pode ser adotado, desde que se garanta a ductilidade dos elementos.

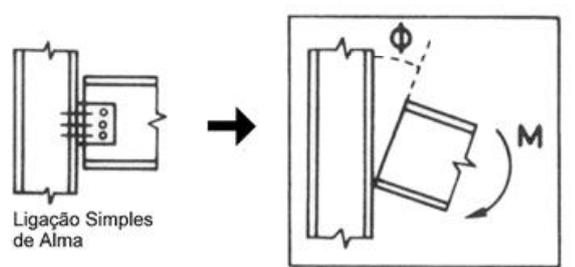
14

5. Filosofia de Projeto de Ligações

- A ductilidade da ligação viabiliza a hipótese de duas linhas neutras, uma para a solda e outra para os parafusos.
- Devido ao ajuste das peças de uma ligação após o início do seu carregamento, ou em função de simplificações no modelo adotado, é necessário assegurar que estas possuam suficiente ductilidade, evitando um colapso prematuro.
- Isto leva a uma redistribuição das forças até que se atinja à configuração adotada no dimensionamento.

5. Filosofia de Projeto de Ligações

- A ligação quando dimensionada como flexível, deve permitir uma rotação na extremidade da viga.
- Isto gera deformações nas cantoneiras, mesa da coluna e alma da viga que devem acomodar e redistribuir estes esforços.
- Este fato está diretamente ligado a capacidade necessária de rotação de uma ligação.

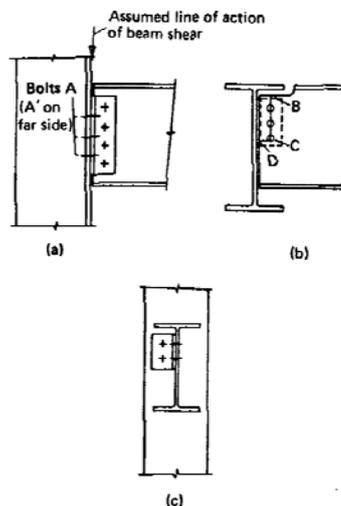


5. Filosofia de Projeto de Ligações

- 4- Garantia de Aceitação de Todos os Estados Limites Anteriormente Utilizados.
- Os critérios de dimensionamento usados nas fases anterior só atendem aos estados limites últimos
- Ainda é necessário verificar os estados limites de utilização
- Para ligações dimensionadas por aproximações elásticas tradicionais, este passo pode ser omitido, exceto:
 - Se o dimensionamento de um componente da ligação foi baseado em uma hipótese rígido-plástica simplificada, onde deve-se garantir um limite para as deformações plásticas;
 - Se a ligação é sujeita à fadiga, que requer uma verificação detalhada do seu comportamento elástico e dos fatores de concentração de tensões em pontos críticos.

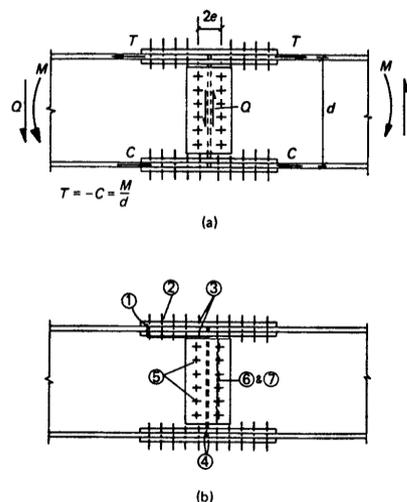
5. Filosofia de Projeto de Ligações

- Cantoneiras e Chapas → Rasgamento
- Parafuso
 - Corte
 - Tração
- A x A' → Simetria x Excentricidade
- Outras Verificações → Distâncias mínimas
- Ductilidade Suficiente
- (b) block Shear
- (c) Momento devido a excentricidade deve ser considerado



5. Filosofia de Projeto de Ligações

- Forças T, C, Q x M, Q
- 1- Mesa a tração
 - Seção crítica → seção vertical líquida na 1ª linha de parafusos
 - Seção efetiva da mesa na 1ª linha de parafusos sob a tensão resultante na mesa (redução de W)
- 2- Parafusos nas mesas → Atrito → T
- 3- Placas de cobrejunta → T/2
- 4- Resistência a compressão das placas de ligação x flambagem vertical
- 5- Parafusos da alma → Atrito → Q, excentricidade "e"
- 6/7- Capacidade da seção líquida da alma x placa de ligação

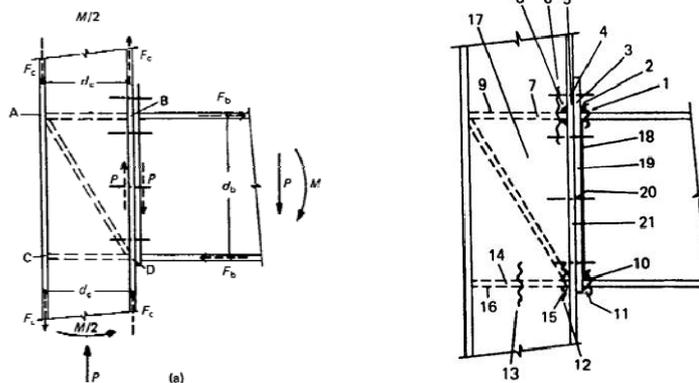


5. Filosofia de Projeto de Ligações

- Viga vs. coluna sujeita a um momento e cortante.
- O procedimento é apropriado para um momento inferior a 70% da capacidade plástica da viga à flexão.
- Acima disto, deve-se mobilizar parte da alma para resistir ao binário gerado por esta solicitação, para não sobrecarregar as mesas do perfil.

5. Filosofia de Projeto de Ligações

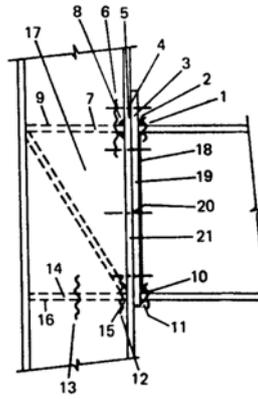
- Com a configuração do sistema de forças equivalentes a serem utilizadas determinam-se três trajetórias de força (tração, compressão e cisalhamento).
- Com o sistema de forças equivalentes verifica-se as componentes estruturais nas várias trajetórias.



21

5. Filosofia de Projeto de Ligações

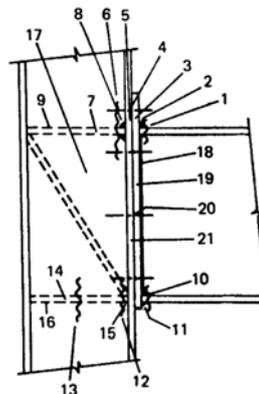
- a) Trajetória de Tração:
- 1 - mesa da viga à tração;
- 2 - Solda unindo a mesa da viga à chapa de extremidade;
- 3 - Flexão da chapa de extremidade;
- 4 - Tração nos parafusos;
- 5 - Flexão na mesa da coluna (pode ser necessário o uso de enrijecedores);
- 6 - Tração na alma da coluna;
- 7 - Enrijecedor, caso seja necessário devido aos itens cinco ou seis;
- 8 - Tração na solda da mesa da coluna ao enrijecedor;
- 9 - Cisalhamento na solda da alma da coluna ao enrijecedor;



22

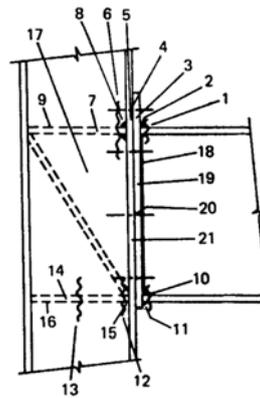
5. Filosofia de Projeto de Ligações

- b) Trajetória de Compressão:
- 10 - Compressão na mesa da viga;
- 11 - Solda da mesa à placa de extremidade;
- 12 - Ruptura local na alma da coluna por plastificação;
- 13 - Flambagem na alma da coluna;
- 14 - Compressão no enrijecedor, caso seja necessário devido aos itens 10, 12 ou 13;
- 15 - Compressão na solda do enrijecedor à mesa da coluna;
- 16 - Cisalhamento da solda do enrijecedor à alma da coluna;



5. Filosofia de Projeto de Ligações

- c) Trajetória de Cisalhamento:
- 17 - Esforço cortante no painel ABCD;
- 18 - Cisalhamento na solda da alma da viga à placa de extremidade;
- 19 - Esforço cortante e esmagamento na chapa de extremidade;
- 20 - Corte nos parafusos;
- 21 - Esmagamento da mesa da coluna.
- Interação entre os passos ou seja:
 - Se for necessário o uso de enrijecedor entre os pontos A e D, torna-se desnecessário o uso entre os pontos C e D.
 - Esta alteração afeta a trajetória de forças e implica em sua revisão.
- Trabalhosas 3, 4, 5, 13, 17, 20
- Fáceis 1, 6, 7, 10, 11, 12, 14
- Resto → Ductilidade



6. Recomendações Práticas - Eficiência e Economia

- Custo → Trabalho → Ligações
- Corte Oblíquo ou Ajuste Preciso → 10 hs/ton
- Falta de Parafusos de Montagem → Dobra Custos de Montagem
- 50% Custo Global → Ligações

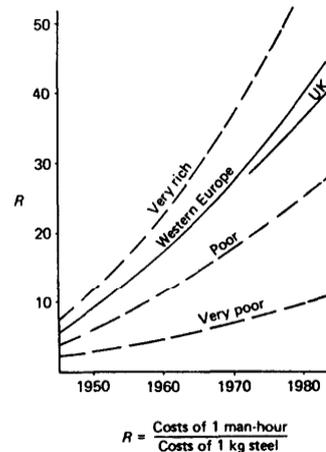
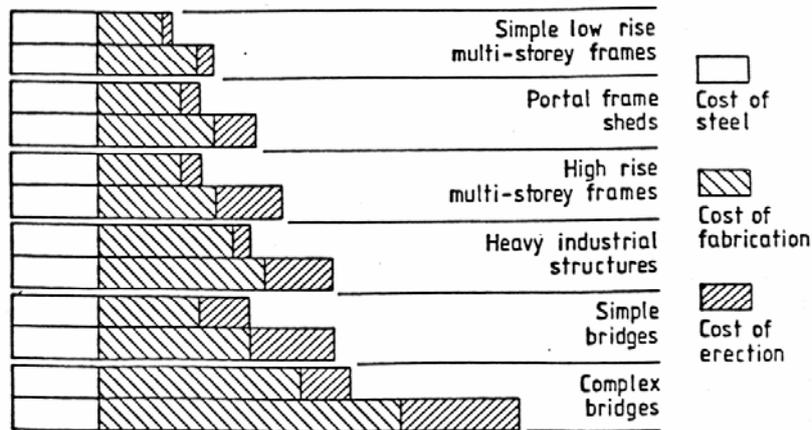


Figure 9.1 Cost ratio between labour and material

7. Custos Globais



Fabrication & erection costs expressed as proportions of steel costs. Approximate upper & lower bounds for different classes of structure
 NOTE: High fabrication cost can be accompanied by low erection cost & vice versa

8. Parafusos X Soldas

- Fábrica
 - Soldas (Tração ou cisalhamento)
 - Linha de furação/vazia soldagem/sobrecarregada → parafusos
- UK → Parafusos
- 1- Mais acesso para solda/soldador
- 2- Proteção chuva → Preaquecimento difícil no campo
- 3- soldador + caros e especializados que montadores
- 4- Parafusos → trabalho semi-especializado
- 5- Certificação/Qualificação de soldadores e soldas no campo + caro
- 6- Inspeção de parafusos é + fácil

9. Filete x Entalhe

- Filete + barato
- 6mm é a maior perna possível com solda manual em 1 passe
- Multipasso vantagem diminui
- + 12mm ou 15mm de perna → Arco Submerso
- Entalhe
 - Maior resistência a fadiga
 - Melhor acabamento/ aparência final
 - Chapas de ligação com filete → Pontos de ferrugem

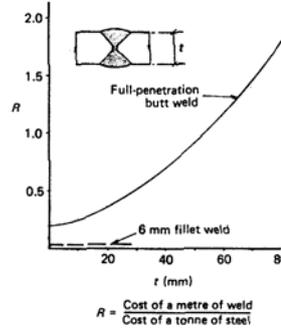
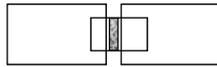


Figure 9.2 Comparative costs of butt and fillet welds

Table 9.1 Relationship between fillet weld size and number of passes for manual metal arc welding in the downhand position

Leg size	<6	8-10	11-13	14-16	19	22	25
Number of runs	1	2	3	4	5	7	10

10. Parafusos comuns x alta resistência

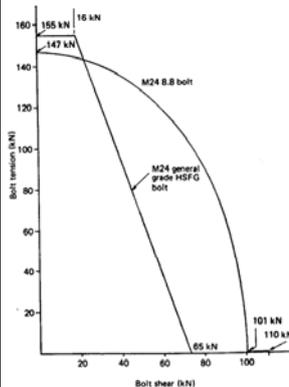


Figure 9.3 Design strengths of HSPG and Grade 8.8 bolts to BS 5400: Part 3

- Tração → HSPG
- Dif. montagem → Aperto
- Comuns → Deslizamento
- Emendas → HSPG → Fadiga
- 8.8 ≠ A407
- Nacional → Montagem

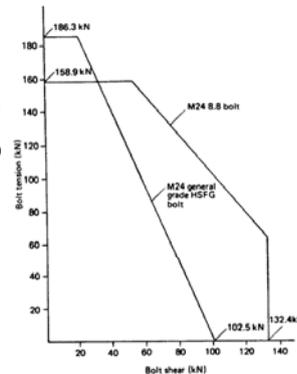


Figure 9.4 Design strengths of HSPG and Grade 8.8 bolts to BS 5950: Part 1

11. Acesso para soldas e parafusos

- Soldas
 - Máscaras pesadas
 - Espelhos
 - Eletrodos pequenos ou dobrados
 - Atenção na produtividade e qualidade

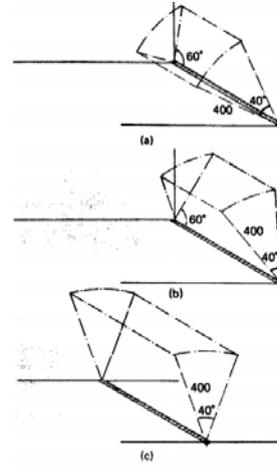
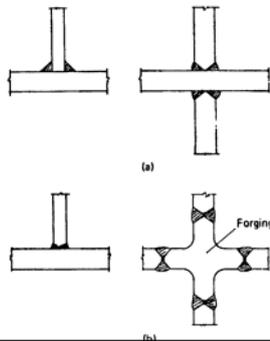


Figure 9.5 Access requirements for manual welding. (a) Fillet weld; (b) corner butt weld; (c) planar butt weld

■ Inspeção → Raio X → 2 Faces

12. Soldas

- Reparos em soldas
 - Chipping → Martelo c/ ponta arredondada
 - Grinding → Discos abrasivos
 - Air Gouging → Goivagem
- Preparação para superfície de solda
- Entalhe
 - 1- Execução econômica
 - 2- Minimizar o volume de solda
 - 3- Raiz bem executada
 - 4- Acesso
 - 5- Limpeza entre 2 passos

■ Filete

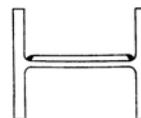
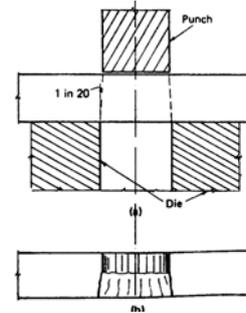


Figure 9.7 Welding detail for reinforcing plate on column web or vertical leg of wide seating angle

13. Furação por punção x brocas

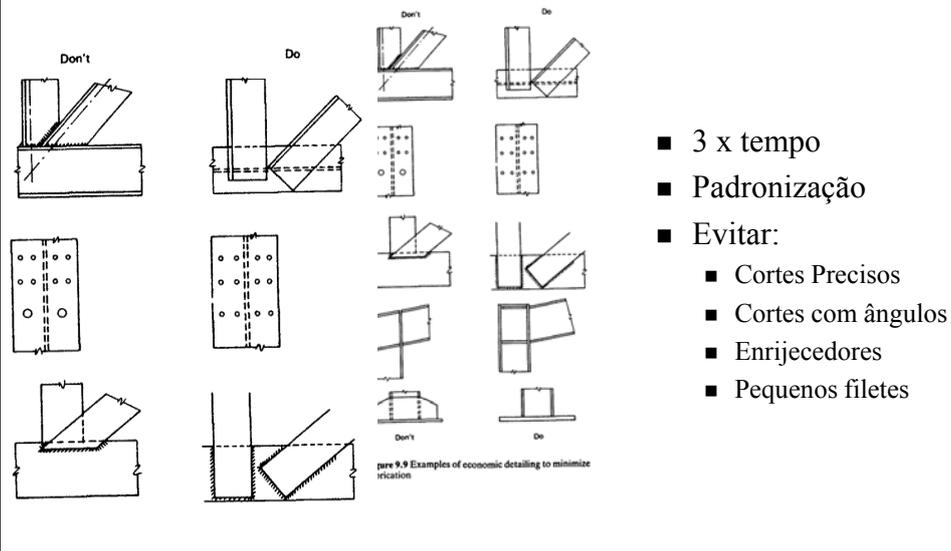
- Puncionados
 - Qualidade do equipamento
 - Resíduos de material
 - Fragilização da região do furo ($\pm 1\text{mm}$) fissuras
 - Limitar deformação na região do furo a 2mm em parafusos sob tração
 - Mais suscetível ao operador



14. Tipo de Corte da Chapa

- Guilhotinagem
 - Contato ruim \rightarrow superfícies irregulares
 - Fragilização do material \rightarrow fadiga
 - Mais fácil e rápida
- Serragem
 - Contato bom
- Maçarico
 - Automática e manual
 - Fragilização do material \rightarrow 3mm
 - Abrasão (grinding) para regularização de superfície

15. Detalhamento



16. Custos de Detalhamento

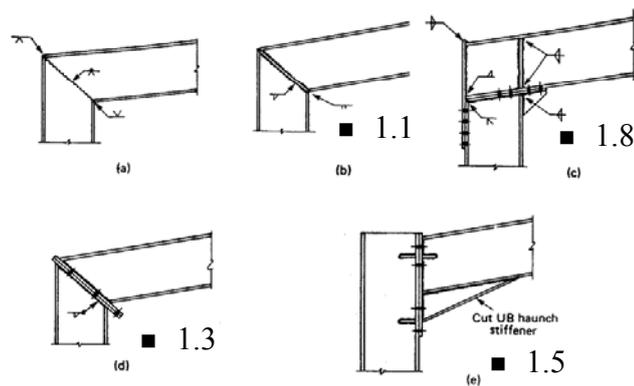
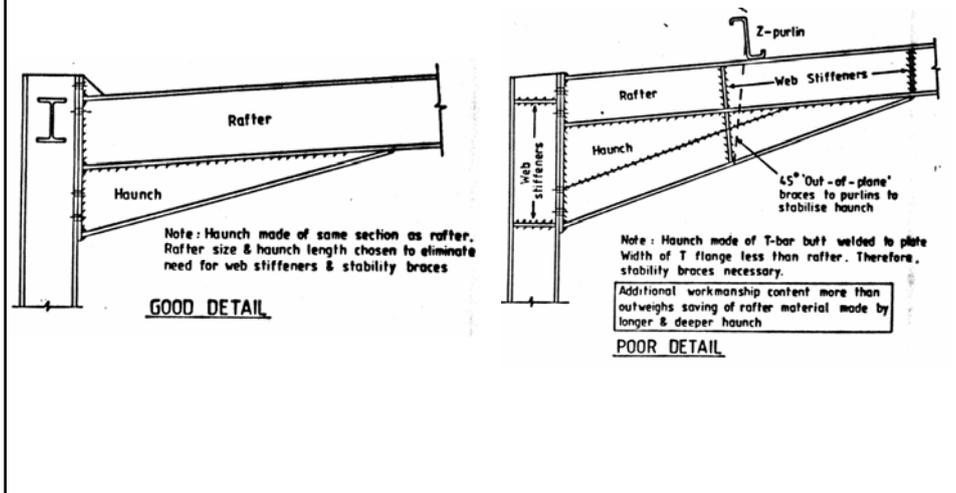


Figure 9.10 Costs comparisons for eaves connection in portal frames. (a) Welded knee joint detail where stiffeners are not required (cost ratio 1.0 (base)); (b) welded knee joint detail with division plate – square butt weld (cost ratio 1.1); (c) bolted knee joint (cost ratio 1.8); (d) diagonal bolted knee joint (cost ratio 1.3 but more difficult to erect); (e) typical knee joint with haunch stiffener (cost ratio 1.5)

16. Custos de Detalhamento



17. Montagem Econômica

- Parafusos de montagem
- Espaço para montagem
- Imperfeições de fábrica

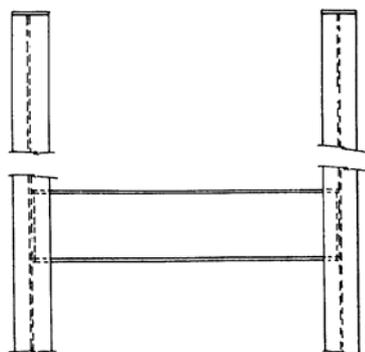
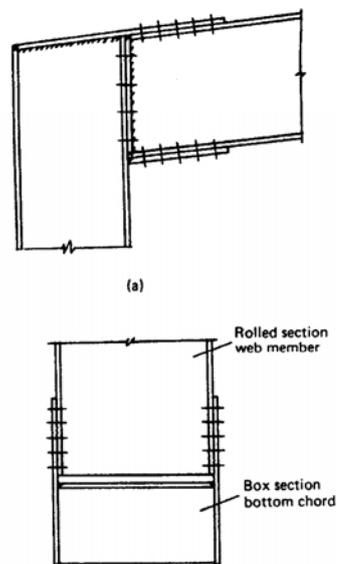


Figure 9.11 Beam framing into minor axis of columns that will create difficulties in erection



18. Fabricação de Estruturas de Aço - Orçamento

- As informações são expressas em tempo em minutos para execução da tarefa e incorporam extras para:
 - i) manuseio
 - ii) ajuste inicial
 - iii) intervenções do operador (quando aplicável)
- Definições:
 - A – área da seção transversal em cm²
 - t – espessura da placa em cm
 - D – diâmetro do furo em cm
 - H – pontos de corte em máquinas de corte múltiplo

18. Fabricação de Estruturas de Aço - Orçamento

Table 9.3 Examples of typical labour times for common fabrication activities

Operation	Time (min)	Limitations
<i>Cutting and edge preparation</i>		
Sawing: square cut	$A/20 + 4$	—
oblique cut	$A/10 + 8$	—
Cropping: square cut	0.5–1.0	$A \nabla 15$
oblique cut	1.0–2.0	$A \nabla 15$
Shearing	3.5 per metre	$t \nabla 20$
Hand burning	0.5 t per metre	—
Automatic burning (square cut)	0.2/H per metre	—
Chipping: square	t per metre	—
30° bevel	0.1t ² per metre	—
45° bevel	0.15t ² per metre	—
J prep.	0.5t per metre	—
Planing: square or bevel	1.5 + 0.1 t per metre	—
J prep.	3 + 0.2 t per metre	—
Automatic flame cut edge preparation	4 + 0.25 t per metre	—
<i>Holing</i>		
Radial drilling	1.54 + 0.00005 t × D ²	—
Punching	0.1	—

18. Fabricação de Estruturas de Aço - Orçamento

Mark out and assembly

Bolted connections	4 min per bolt	—
Mark set and tack cleat	12 min	—
Mark set and tack base or end plate (depends on size)	15–60 min	—
Fit stiffener for rolled section	45 min	—

Welding: hand

Fillet welding:	Horizontal/vertical	17 min per metre per pass—
	vertical	34 min per metre per pass—
Butt welding:	flat	$0.2r^2-0.4r^2$ min per metre—
	vertical	$0.4r^2-0.8r^2$ min per metre—

Welding: automatic submerged arc

Setting-up time	70 min per second	—
Run-on and run-off plate	90 min per second	—
Preheating – add 10% to welding times where $\Sigma t > 35$ mm		—
Fillet welds:		
5–13 mm	10 min per metre	—
14–19 mm	20 min per metre	—
Butt weld	0.15 r^2 per metre	—

A: Cross-sectional area (cm²).
 t: Thickness (mm).
 D: Hole diameter (mm).
 H: Number of heads for multiple-cutting machines.

19. Corte e preparação de borda

i) Corte com serra	$\left(\frac{A}{20}+4\right)$ mins	Estes valores são para cortes retos; adicione 100% para cortes oblíquos.
ii) Corte com guilhotina	$\left(\frac{A}{20}+0.35\right)$ mins (máxima A de 15 cm ²)	
iii) Corte com tesoura mecânica	3.5 mins por metro ($t \leq 1.9$ cm somente)	
iv) Maçarico manual	5t mins por metro	
v) Maçarico automático	$\left(\frac{2t}{H}\right)$ mins por metro (somente corte reto)	
vi) Desbastação	Corte reto	10t mins por metro
	30° oblíquo	10t ² mins por metro
	45° oblíquo	15t ² mins por metro
	Preparação em J	50t mins por metro
vii) Aplainamento (máquina)	Corte reto/oblíquo	1.5 + t mins por metro
	Preparação em J	3 + 2 t mins por metro
viii) Preparação para corte com maçarico automático	Duplo/simples oblíquo	4 + 2.5 t mins por metro
ix) Furação com broca radial	$\left(1.5+\frac{D^2}{18}\right)$ mins por furo	

20. Marcação e Montagem

i) Ligações Aparafusadas		4 mins por parafuso
	Marcação, ajuste e ponteamto de solda	12 mins
ii) Ligações Soldadas	Marcação, ajuste e ponteamto de placas de base e de extremidade (depende das dimensões)	15 -- 60 mins
	Enrijecedores para perfis laminados	45 mins

21. Solda Manual

i) Solda de Filete	Horizontal/Vertical	17 mins por passe
	Vertical	34 mins por passe equivalente

Dimensão da perna (mm)	5-6	8-10	11-13	14-16	19	22	25
Número de passes	1	2	3	4	5	7	10

ii) Solda de Bujão/Tampão	Vertical	Todos os tempos correspondem ao dobro dos valores para soldas planas
---------------------------	----------	--

21. Solda Manual

iii) Solda de Entalhe - Plana		
V simples	$t < 3.0$.80t mins/metro
	$t > 3.0$.120t mins/metro
V Duplo	$11 < t \leq 2.5$	60t mins/metro
	$t > 2,5$	$30t^2$ mins/metro
Bisel Simples	$t \leq 1.9$ cm	80t mins/metro
	$t > 1.9$	$40t^2$ mins/metro
J Simples	$2.2 < t \leq 3.0$	60t mins/metro
	$t > 3.0$	80t mins/metro
J Duplo	$2.5 < t \leq 3.5$	60t mins/metro
	$t > 3.5$	90t mins/metro

22. Solda com Arco Submerso

- Este processo não é econômico para comprimentos menores que cinco metros

i) Tempo de Ajuste Inicial	70 mins por solda	
ii) Entrada e saída das placas na máquina	90 mins por solda	
iii) Pré-aquecimento	Adicione 10% no tempo de soldagem para soldas que necessitem de pré-aquecimento tipicamente quando $\sum t > 3.5$ cm.	
iv) Solda	Solda de filete	5-13 mm – por passe com 10 mins/metro
		14-19 mm. – dois passes com total de 20 mins/metro
	Entalhe em V Simples	$t \leq 3.0$ - 50t mins/metro
		$3.0 < t < 4.1$ - $16t^2$ mins/metro
Entalhe em V Duplo	$t \leq 3.8$ - 50t mins/metro	
	$3.8 < t < 5.1$ - $14t^2$ mins/metro	

23. Custos Indiretos da Mão de Obra

- Custos variam de acordo com o tipo de operação.
- Pode-se assumir um custo médio de 4 libras por hora.
- A este valor deve-se acrescentar um overhead de aproximadamente 200%.

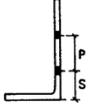
24. Custos dos Materiais

Aço grade 43	£ 300 Libras por tonelada
Aço grade 50	£ 520 Libras por tonelada
Parafusos, porcas e arruelas	
Grade 4.6 M 20 - 75 mm de comprimento	£ 85 Libras por 100
Grade 8.8 M 20 - 75 mm de comprimento	£ 120 Libras por 100
Alta Resistência H.S.F.G. M 20 75 mm de comprimento	£ 200 Libras por 100
Outros tipos pro rata por peso.	£ 200 Libras por 100

Valores de Novembro de 1987

25. Furação Padronizada - Laminados

Table 9.2 Standard backmarks, cross-centres and transverse pitches for rolled sections

Section	Flange width or leg length	Backmark (S) or cross-centre (C)	Transverse pitch (P)	Maximum diameter of bolt
 Channel	102	55		24
	89	55		20
	76	45		20
	64	35		16
	51	30		10
 Angle	200 (2 bolts)	75	75	30
	200 (3 bolts)	55	55	20
	150	55	55	20
	125, 120	45	50	20, 16
	100	55	-	24
	90	50	-	24
	80, 75	45		20
	70	40		20
	65, 60	35		20, 16
	50	28		12
	 Columns, beams and Tees	424 - 362 (2 or 4 bolts)	140	75
322 - 300 (2 bolts)		140	-	24
322 - 312 (4 bolts)		120	60	24
322 - 300 (4 bolts)		120	60	20
294 - 203 (2 bolts)		140	-	24
193 - 162 (2 bolts)		90	-	24
162 - 150 (2 bolts)		90	-	20
146 - 130 (2 bolts)		70	-	20
127 - 98 (2 bolts)		54	-	12