

APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS COMPONENTES À AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES VIGA-PILAR SOLDADAS EM ALUMÍNIO

Andrade, J.¹, Simões da Silva, L.² e Lamas, A.³

RESUMO

O Eurocódigo 9 – Dimensionamento de Estruturas em Alumínio, actualmente em fase de conversão em norma definitiva, inclui um capítulo que trata o dimensionamento de ligações, o qual se resume à apresentação de verificações para alguns elementos da ligação. Esta norma não apresenta, assim, procedimentos completos e exaustivos para a avaliação do comportamento de ligações, em claro contraste com o Eurocódigo 3 (Estruturas em Aço).

Apresenta-se neste artigo um estudo de viabilidade da aplicação do método das componentes a ligações soldadas em alumínio. Em particular, explora-se o efeito da variação das propriedades do alumínio na zona afectada pela soldadura e apresenta-se uma proposta de aplicação do método a ligações soldadas.

1. INTRODUÇÃO

O Eurocódigo 9 – Dimensionamento de Estruturas em Alumínio ^[6], actualmente em fase de conversão em norma definitiva, inclui um capítulo que trata o dimensionamento de ligações, o qual se resume à apresentação de verificações para alguns elementos da ligação. Em particular, no caso de ligações soldadas em alumínio, a norma restringe-se à especificação dos procedimentos de verificação da resistência das soldaduras. Esta norma não apresenta, assim, procedimentos completos e exaustivos para a avaliação do comportamento de ligações, em claro contraste com o Eurocódigo 3 (Estruturas em Aço) ^[7], o qual particulariza o cálculo da resistência, rigidez e capacidade de rotação.

¹ Assistente, Universidade da Beira Interior, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Covilhã

² Prof. Associado com Agregação, Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra

³ Prof. Catedrático, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Lisboa

O sucesso da codificação, para ligações em aço, do método das componentes [5], conduziu ao desenvolvimento de um projecto de investigação com o objectivo de avaliar a possibilidade de estender a filosofia do método das componentes a ligações em alumínio.

O alumínio, entendido como material estrutural, compreende uma série de ligas com propriedades distintas. É assim útil apresentar inicialmente uma síntese das diversas ligas e suas propriedades. Seguidamente, sendo esta uma das primeiras abordagens sobre a aplicação do método das componentes a ligações em alumínio, tomaram-se por base ligações soldadas do tipo viga-coluna, não por estas serem as mais características em estruturas de alumínio, mas por permitirem o estudo de um número reduzido de componentes, permitindo desta forma mais facilmente identificar o comportamento individual de cada componente envolvida.

Adoptou-se uma abordagem numérica, com particular incidência sobre avaliação do efeito da variação das propriedades do alumínio na zona afectada pela soldadura. Finalmente apresenta-se uma proposta de aplicação deste método a ligações viga-pilar soldadas em alumínio.

2. O ALUMÍNIO COMO MATERIAL ESTRUTURAL: PROPRIEDADES E CLASSIFICAÇÃO

As ligas de alumínio têm propriedades diferentes consoante os elementos ligantes presentes. A presença destes elementos fornece ao alumínio, entre outras características, um aumento de resistência. Outra forma de aumentar a resistência destas ligas é através do endurecimento a frio ou da têmpera a quente [1],[2],[12].

Embora existam actualmente 9 famílias de ligas de alumínio só estão a ser utilizadas comercialmente 7. As famílias ou séries de ligas encontram-se divididas de acordo com a constituição química de cada uma. Na Tabela 1 apresentam-se a diversas séries de ligas assim como a possibilidade dessa liga poder ter tratamento térmico [9].

Tabela 1 - As séries de ligas existentes

Série	Elementos principais	Tipo
1xxx	(alumínio puro)	NTT
2xxx	cobre, Cu	TT
3xxx	manganês, Mn	NTT
4xxx	silício, Si	NTT
5xxx	magnésio, Mg	NTT
6xxx	magnésio e silício, MgSi	TT
7xxx	zinco, Zn	TT
8xxx	outros elementos	--
9xxx	esta série ainda não é utilizada	--

Nota: NTT = Não pode ter Tratamento Térmico

TT = pode ter Tratamento Térmico

A série, actualmente, mais utilizada na engenharia civil é a 6xxx, especialmente pelas suas óptimas capacidades de extrusão. Normalmente com tratamento térmico T4, T5 ou T6, consoante a necessidade de uma maior resistência (T6) ou de maior ductilidade (T4) [11].

Na Tabela 2 apresentam-se algumas das propriedades do alumínio, comparadas com a dos aços mais utilizados [11].

Tabela 2 - Comparação entre as propriedades principais das Ligas de Alumínio e do Aço

	Ligas de Alumínio	Aço
$f_{0,2}$ (f_y) [N·mm-2]	5083 ~ 140 6082 ~ 260 7020 ~ 360	S235 ~ 235 S355 ~ 350
f_u [N·mm-2]	5083 ~ 280 6082 ~ 310 7020 ~ 410	S235 ~ 360 S355 ~ 510
E [N·mm-2]	70000	206000
ϵ_u	10 - 25 %	25 - 30 %
γ [N·m-3]	26500	77000
α	0,00002	0,00001

A diminuição de resistência do alumínio e das suas ligas com a temperatura pode condicionar localmente uma dada secção ou estrutura, nomeadamente se esta for formada pela união de peças ou elementos através de soldadura. As zonas afectadas pelo calor gerado durante o processo de soldadura denominam-se HAZ, do inglês *Heat-Affected Zone*, e devem ser consideradas explicitamente no dimensionamento

3. O MODELO NUMÉRICO DA LIGAÇÃO

3.1 Introdução

Tal como indicado anteriormente, adoptou-se uma abordagem numérica para o presente estudo, tendo-se utilizado o programa de elementos finitos LUSAS ^[10]. A ligação tipo seleccionada encontra-se ilustrada na Figura 1 e corresponde a uma ligação viga-pilar soldada (Sim-01). De forma a alargar a representatividade dos resultados, considerou-se uma

Tabela 3 - Secções das vigas utilizadas em cada simulação

Modelo	Viga					
	h [mm]	b [mm]	t_f [mm]	t_w [mm]	M_{Rd} [kN.m]	$M_{Rd,haz}$ [kN.m]
Sim-00	125,00	60,00	5,50	6,30	7,436	7,436
Sim-01	125,00	60,00	5,50	6,30	15,846	7,436
Sim-02						
Sim-03						
Sim-04						

Tabela 4 - Secções das colunas utilizadas em cada simulação

Modelo	Coluna				
	h [mm]	b [mm]	t_f [mm]	t_w [mm]	M_{Rd} [N.mm]
Sim-00	76,80	80,00	6,80	6,10	5,113
Sim-01	76,80	80,00	6,80	6,10	10,896
Sim-02	80,00	80,00	10,00	6,10	14,871
Sim-03	76,80	80,00	6,80	4,00	10,568
Sim-04	80,00	80,00	10,00	4,00	14,601

variação paramétrica das espessuras dos banzos e alma do pilar, sintetizando-se as simulações seleccionadas nas Tabelas 3 e 4. Saliente-se ainda que, de forma a avaliar a influência da variação das propriedades ao longo da HAZ considerou-se ainda um quinto modelo, Sim-00. Note-se que, para a viga, é apresentado o momento resistente, não só para a zona não afectada pelo calor, M_{Rd} , mas também o momento resistente na zona mais afectada pelo calor, $M_{Rd,haz}$, podendo ser este último condicionante devido à existência de uma secção transversal totalmente influenciada pelo calor gerado durante a soldadura.

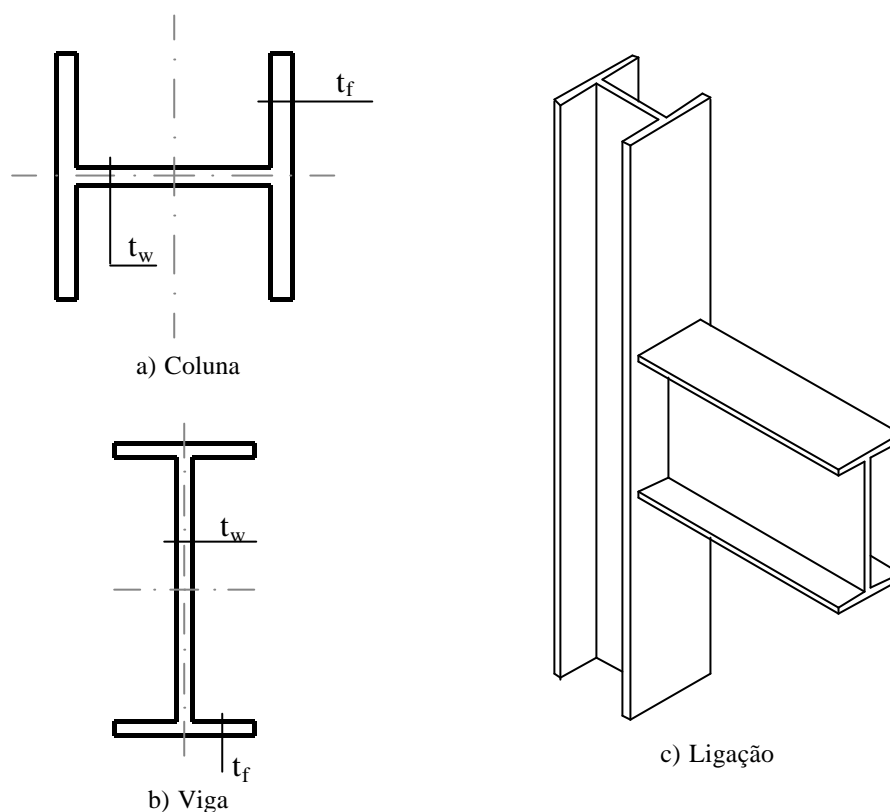


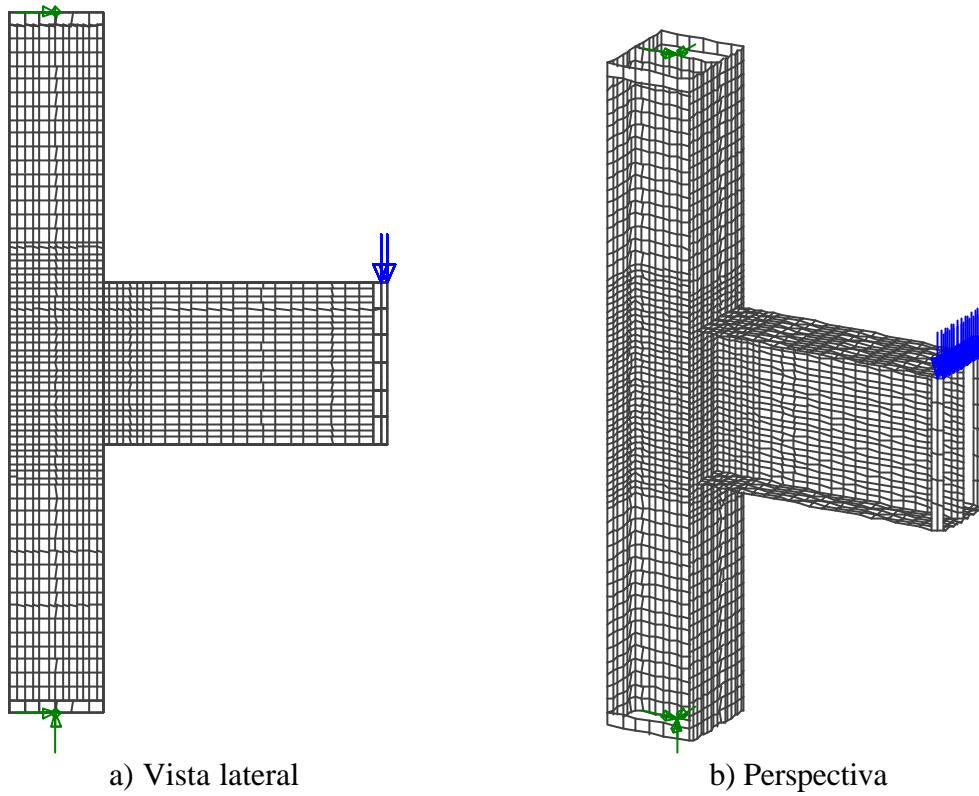
Figura 1 - Modelo base Sim-01

3.2 Discretização, carregamento e apoios

O modelo numérico utilizou elementos finitos de casca, de quatro nós, do tipo QTS4^[10] com 6 graus de liberdade por nó. A não-linearidade geométrica é conseguida através da formulação de Lagrange de modo a entrar em conta com grandes deslocamentos e extensões moderadas^[10]. Na modelação do material com propriedades não lineares é utilizada uma lei constitutiva elastoplástica baseada no critério de cedência de Von Mises^[10]. A discretização do modelo foi feita de modo a permitir simular as variações das propriedades do alumínio decorrentes da HAZ. Na Figura 2 encontra-se representado o modelo de elementos finitos utilizado.

Nas simulações aplicaram-se as cargas controlando-se os deslocamentos. O carregamento incremental foi aplicado na extremidade livre da viga, Figura 2. A carga inicial foi aplicada de modo a que o modelo responda ainda em regime elástico, sendo incrementada seguidamente até se atingir a rotura da ligação.

Considerou-se que o modelo estava apoiado sensivelmente nos pontos de inflexão da coluna, Figura 2, tendo-se nestes pontos restringido as translações.



a) Vista lateral
b) Perspectiva
Figura 2 - Modelo em EF com carregamento e sistema de apoio

3.3 Propriedades materiais

Para a modelação do material consideraram-se os resultados obtidos por Valtinat *et al.* [4],[8],[11] no estudo das propriedades da liga de alumínio na HAZ, ajustados através da aplicação

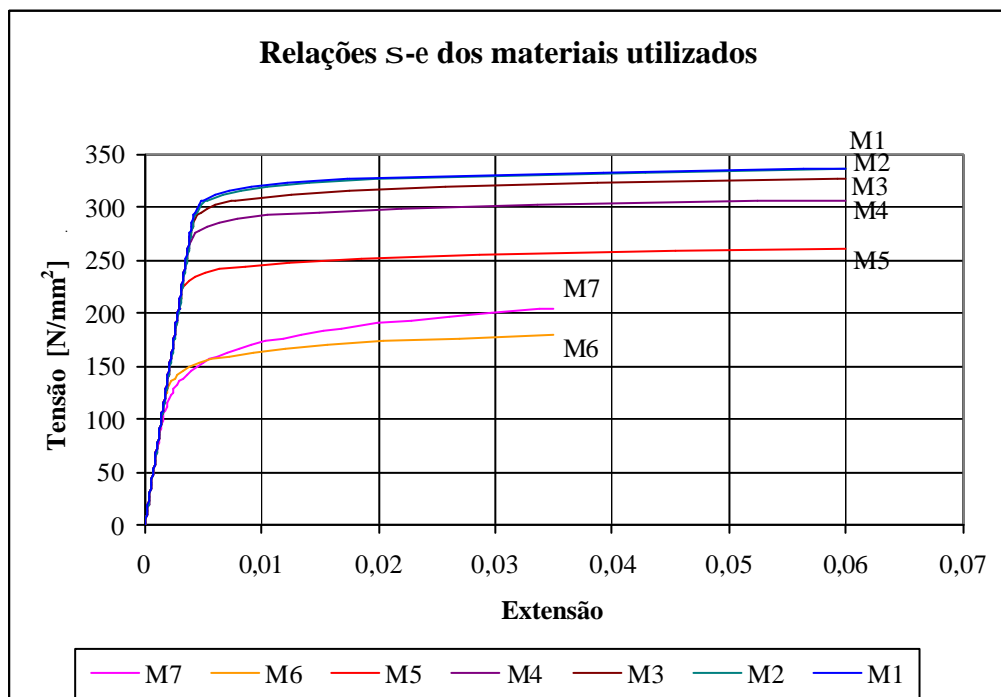


Figura 3 - Relação σ - ϵ dos diversos materiais utilizados

da lei de Ramberg-Osgood e que conduziram às curvas tensão/extensão que caracterizam o material da HAZ (Figura 3) [6],[8]. Assim, denominou-se M1 o material de base, M8 a solda e M2 a M7 as diferentes faixas na zona afectada pelo calor, sendo M7 a mais próxima da soldadura e M2 a mais afastada desta. Desta forma, para cada zona da ligação foi considerada a lei constitutiva do material de acordo com a localização relativa do elemento finito em relação à zona soldada.

3.4 Análise numérica das componentes

Sendo a ligação do tipo viga-coluna soldada, consideram-se somente as componentes presentes neste tipo de ligação, ou seja, as componentes c1 - alma da coluna ao corte, c2 - alma da coluna à compressão, c3 - alma da coluna à tracção, c4 - banzo da coluna à flexão e c7 - alma e banzo da viga à compressão. Destas cinco componentes e para as ligações estudadas, as três primeiras são condicionantes em termos de resistência, e as outras duas não influenciam na rigidez da ligação. Assim sendo resumiu-se este estudo às componentes referentes à alma da coluna, c1, c2 e c3.

Para o estudo destas componentes analisou-se a distribuição das tensões (σ_x e τ_{xy}) e das extensões (ϵ_x e γ_{xy}) na alma da coluna [3]. Para a análise das tensões e das extensões ao longo da coluna dividiu-se esta em fatias com 5mm de largura, calculando-se os valores médios no eixo de cada fatia. Através desta análise localizaram-se as zonas de influência de cada componente e a distribuição destas ao longo dessa zona, Figura 4 e Figura 5.

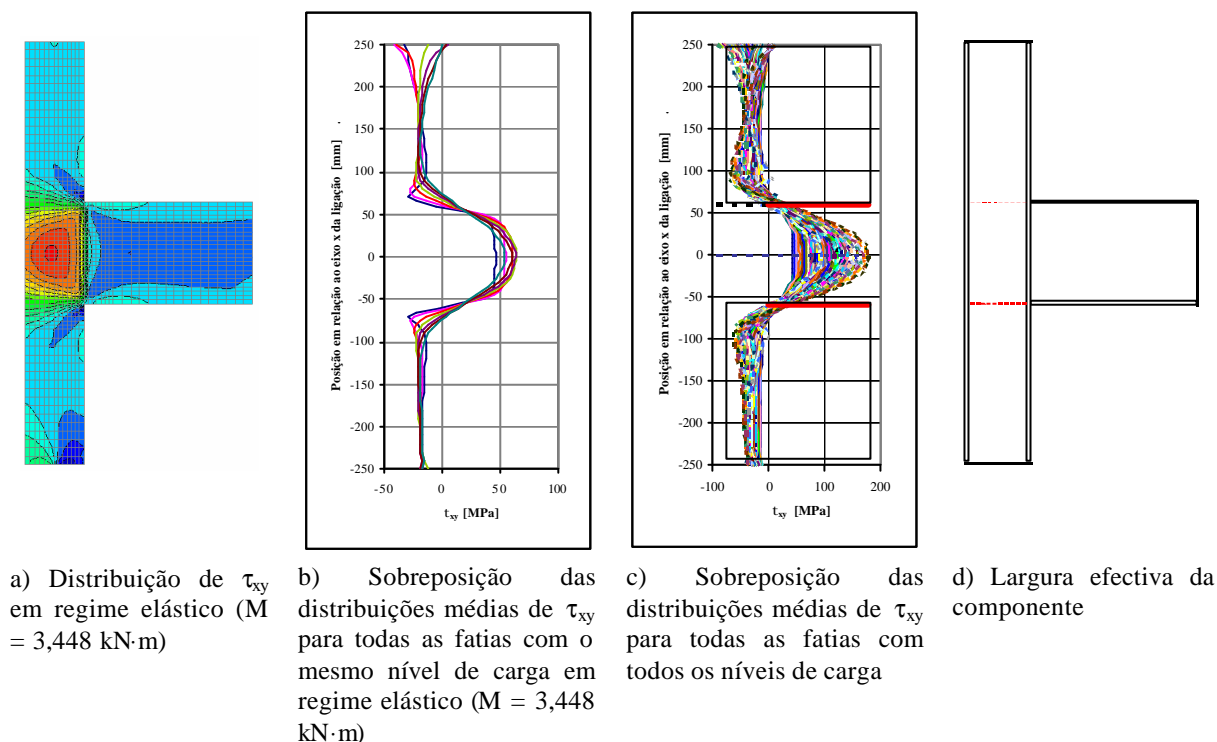
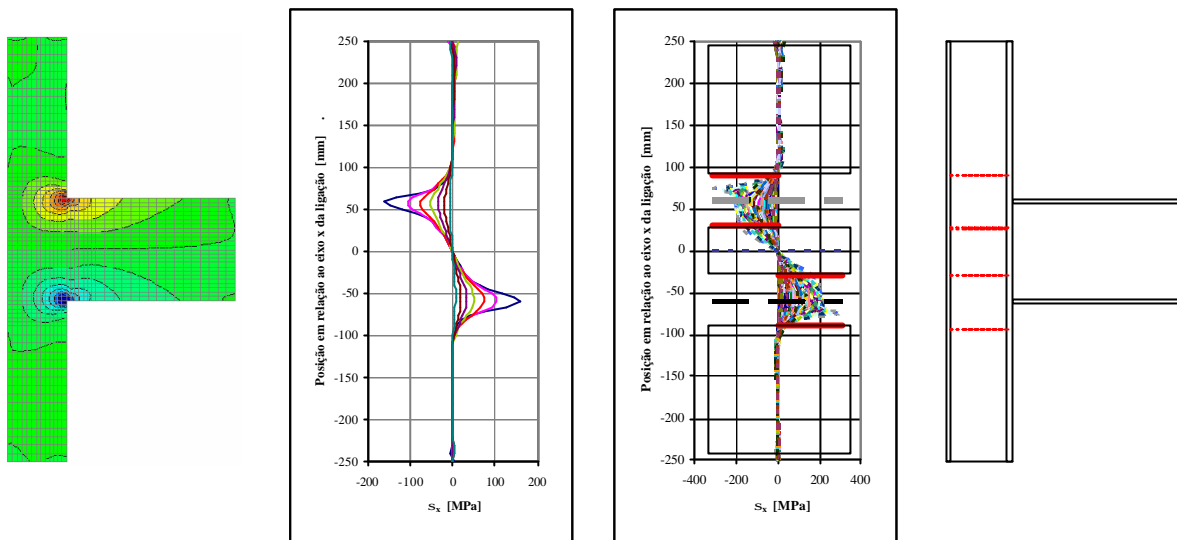


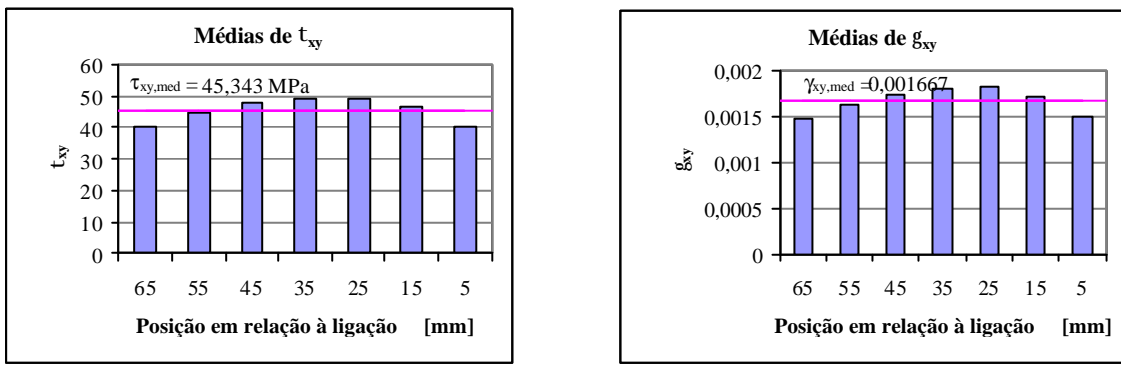
Figura 4 - Análise do campo das tensões τ_{xy} em Sim-01



a) Distribuição de σ_x em regime elástico ($M = 3,448 \text{ kN}\cdot\text{m}$)
 b) Sobreposição das distribuições médias de σ_x para todas as fatias com o mesmo nível de carga em regime elástico ($M = 3,448 \text{ kN}\cdot\text{m}$)
 c) Sobreposição das distribuições médias de σ_x para todas as fatias com todos os níveis de carga
 d) Largura efectiva das componentes

Figura 5 - Análise do campo das tensões σ_x em Sim-01

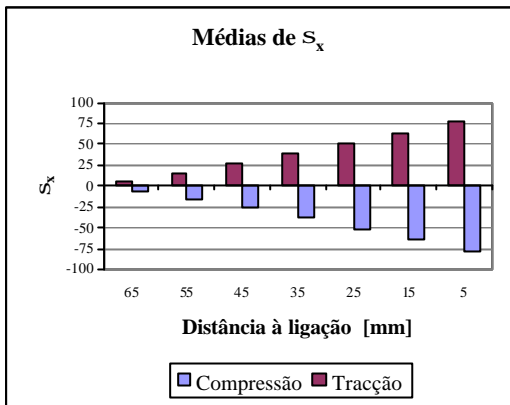
Analisando as distribuições das tensões tangenciais (τ_{xy}) e das distorções (γ_{xy}) para cada nível de carga obtêm-se o histograma dos valores médios de τ_{xy} e γ_{xy} , Figura 6, calculando a média destes valores obtêm-se respectivamente $\tau_{xy,med}$ e $\gamma_{xy,med}$ para esse nível de carga.



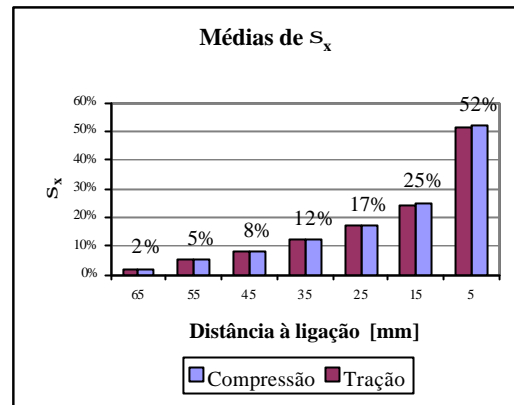
a) Média de τ_{xy} em cada fatia e valor de $\tau_{xy,med}$ para o mesmo nível de carga ($M = 3,448 \text{ kN}\cdot\text{m}$)
 b) Média de γ_{xy} em cada fatia e valor de $\gamma_{xy,med}$ para o mesmo nível de carga ($M = 3,448 \text{ kN}\cdot\text{m}$)

Figura 6 - Valores médios para τ_{xy} e γ_{xy} em Sim-01

De um modo semelhante e para o mesmo nível de carga, obtêm-se o histograma com os valores médios de σ_x . Atendendo a que os valores máximos das tensões σ_x ocorrem na fatia mais próxima da zona da ligação, a qual corresponde ao material menos resistente, considerou-se que o comprimento efectivo da componente resumir-se-ia a essa fatia. Para validar este pressuposto apresentam-se os histogramas com os valores médios adimensionalizados em relação à tensão de cedência média em cada fatia, Figura 7. Deste modo os valores de $\sigma_{x,med}$ e $\epsilon_{x,med}$ para um dado nível de carga correspondem, respectivamente, aos valores médios de σ_x e ϵ_x na fatia considerada.



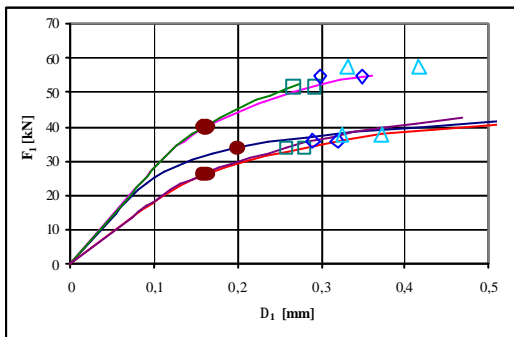
a) Média de σ_x em cada fatia ($M = 3,448 \text{ kN}\cdot\text{m}$)



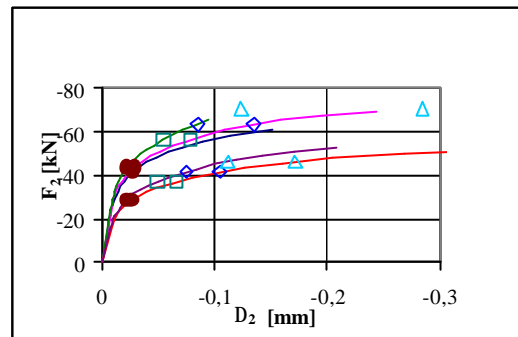
b) Tensões σ_x adimensionalizadas em relação à tensão de cedência de cada material ($M = 3,448 \text{ kN}\cdot\text{m}$)

Figura 7 - Valor médio de σ_x em Sim-01

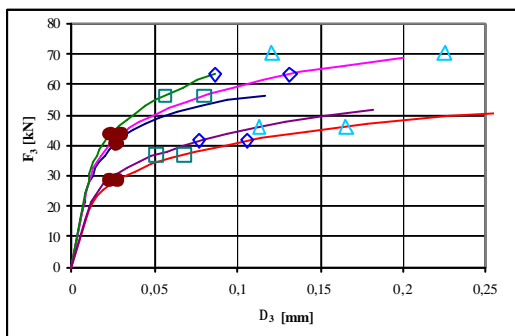
Repetindo este procedimento para todos os níveis de carga e para todas as simulações efectuadas obtêm-se as relações σ - ϵ (τ_{xy} - γ_{xy} para a c1 e σ_x - ϵ_x para c2 e c3) e F - Δ para cada componente, Figura 8. Identificam-se, também, os pontos onde se considerou o início da cedência de cada componente, assim como o início da rotura. Enquanto para a cedência considerou-se um critério único ($0,90 \cdot f_{0,2}/\sqrt{3}$ para c1 e $0,80 \cdot f_{0,2}$ para c2 e c3) para a rotura consideraram-se 3 critérios ($0,90 \cdot f_u/\sqrt{3}$, $0,95 \cdot f_u/\sqrt{3}$ e $1,00 \cdot f_u/\sqrt{3}$ para c1 e $0,80 \cdot f_u$, $0,90 \cdot f_u$ e $1,00 \cdot f_u$ para c2 e c3). Estes critérios resultam essencialmente da observação da distribuição das tensões em questão ao longo de cada componente.



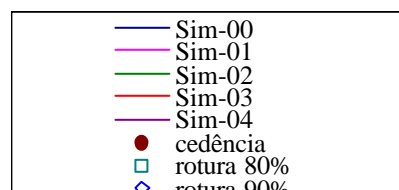
a)



b)



c)



a) Relação $F_1 - \Delta_1$
 b) Relação $F_2 - \Delta_2$
 c) Relação $F_3 - \Delta_3$

Figura 8 - Relações F - Δ para cada componente nas diversas ligações

Deste modo, e tomando por base o valor obtido para a força de cedência de cada componente simplificou-se o comportamento destas através da bi-linearização da curva F - Δ . Na Figura 9 apresenta-se a simplificação realizada para Sim-01, onde se calculou além da

rigidez elástica, a rigidez após a cedência. Na Tabela 5 apresentam-se os valores obtidos. A inclinação do patamar após a cedência, K_p , foi calculada considerando-se unicamente o desenvolvimento da curva $F-\Delta$ de cada componente.

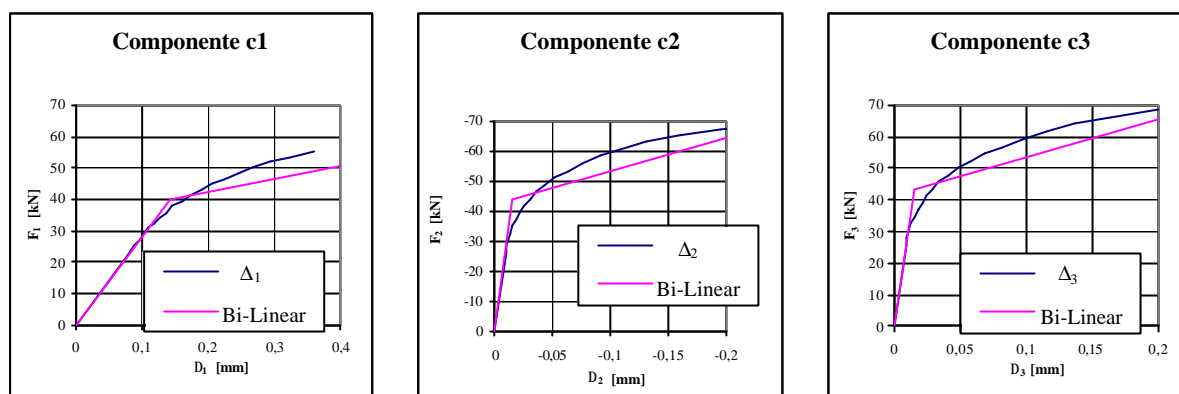


Figura 9 - Relação $F-\Delta$ para cada componente em Sim-01

Tabela 5 - Valores obtidos para F_0 , K_e e K_p para cada componente nas diversas ligações

Simulação	Componente c1			Componente c2			Componente c3		
	F_0 [kN]	K_e [kN/m]	K_p [kN/m]	F_0 [kN]	K_e [kN/m]	K_p [kN/m]	F_0 [kN]	K_e [kN/m]	K_p [kN/m]
Sim-01	40,061	278734	150558	43,613	2976803	300836	43,613	2851194	324386
Sim-02	40,061	279683	170145	43,613	2802236	704555	43,613	2707312	682996
Sim-03	26,269	182808	42280	28,598	1590468	47817	28,598	1550370	94677
Sim-04	26,269	185112	101301	28,598	1818286	272325	28,598	1770199	297161

4. O MÉTODO DAS COMPONENTES

Apresentam-se, de forma sucinta, as alterações propostas ao método das componentes, tal como especificado no EC3, de forma a permitir a sua aplicação a ligações soldadas em alumínio.

Para a componente c1 - alma da coluna ao corte, pode-se constatar nas diversas simulações realizadas que esta componente se situa numa zona em que a influência da temperatura não é condicionante, pelo que parece ser razoável que na sua caracterização se considere que o material que não sofreu a influência do calor.

Já para as componentes c2 - alma da coluna à compressão e c3 - alma da coluna à tracção, verificou-se, nas diversas simulações efectuadas, que estas componentes se situavam numa zona próxima da ligação dos banzos da viga à coluna, pelo que se desenvolvem em zonas afectadas pelo calor resultante do processo de soldadura, ou seja, na HAZ. Assim sendo, pensa-se que, para a caracterização destas componentes se deverá considerar as propriedades do material na zona afectada pelo calor.

As componentes c4 - Banzo da coluna à flexão e c7 - Alma e banzo da viga à compressão não foram abordadas neste estudo dado que os modelos numéricos foram desenvolvidos tendo em conta que a ligação não entrava em cedência por estas componentes. Deste modo considerou-se que o cálculo da resistência da componente c4 era em tudo idêntico ao descrito no EC3.

Deste modo propõe-se, para o cálculo da resistência e da rigidez inicial, a formulação apresentada na Tabela 6:

Tabela 6 - Cálculo da Resistência e da Rigidez Inicial de cada componente

Componente	Resistência	Rigidez Inicial
c1	$V_{wp,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{v,wc} \cdot A_{vc}}{\gamma_{M0}}$	$k_1 = \frac{0,38 \cdot A_{vc}}{\beta \cdot z}$
c2	$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{0,haz,wc}}{\gamma_{M0}}$ <p style="text-align: center;">mas</p> $F_{c,wc,Rd} \leq \frac{\omega \cdot \rho \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y,wc}}{\gamma_{M1}}$	$k_2 = \frac{0,7 \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc}}{d_c}$
c3	$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega \cdot b_{eff,t,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{0,haz,wc}}{\gamma_{M0}}$	$k_3 = \frac{0,7 \cdot b_{eff,t,wc} \cdot t_{wc}}{d_c}$
c4	$F_{fc,Rd} = \frac{b_{eff,b,fc} \cdot t_{fb} \cdot f_{0,haz,fg}}{\gamma_{M0}}$	n.a.
Nota: Todos os parâmetros são idênticos aos definidos no EC9 ou no EC3 quando aplicável		

Aplicando o método de acordo com o EC3, mas com as modificações sugeridas anteriormente obtiveram-se, para cada componente, os valores da Tabela 7. Na Tabela 8 apresentam-se os valores do momento resistente e da rigidez inicial obtidos por este processo para cada ligação estudada.

Tabela 7 - Valores de resistência e rigidez para cada componente em todas as simulações

Simulação	Alma da coluna ao corte		Alma da coluna à compressão		Alma da coluna à tracção		Banzo da coluna à flexão		Banzo e alma da viga à compressão	
	F ₁ [kN]	k ₁ [mm]	F ₂ [kN]	k ₂ [mm]	F ₃ [kN]	k ₃ [mm]	F ₄ [kN]	k ₄ [mm]	F ₇ [kN]	k ₇ [mm]
Sim-01	61,169	1,187	42,295	3,338	42,295	3,338	60,300	n.a.	85,835	∞
Sim-02	63,718	1,236	48,642	4,453	48,642	4,453	85,453	n.a.	85,835	∞
Sim-03	40,111	0,778	27,103	2,189	27,103	2,189	57,942	n.a.	85,835	∞
Sim-04	41,782	0,811	29,664	3,052	29,664	3,052	83,095	n.a.	85,835	∞

Tabela 8 - Momento e rigidez inicial de cada ligação

Simulação	M [kN·m]	S _{j,ini} [kN·m/rad]
Sim-01	5,075	699,114
Sim-02	5,837	801,256
Sim-03	3,252	458,435
Sim-04	3,560	533,654

5. ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS

De modo a comparar os resultados obtidos pelos diversos métodos utilizados elaboraram-se três curvas momento/rotação, $M-\phi$, distintas que se sobrepuseram para cada ligação considerada, Figura 10. Assim sendo, para cada ligação, apresenta-se a curva $M-\phi$

referente ao modelo numérico (numérico), a curva M- ϕ referente ao método das componentes em que o cálculo das características destas foi feito tendo por base os resultados da simulação numérica (mc-numérico) e a curva M- ϕ referente ao método das componentes do EC3 modificado (mc-modificado).

Para o cálculo da curva M- ϕ referente ao mc-numérico idealizou-se um modelo de molas e bielas rígidas semelhante ao preconizado pelo EC3. Neste, às molas referentes a cada componente activa foi atribuído o comportamento bi-linear calculado anteriormente para cada simulação.

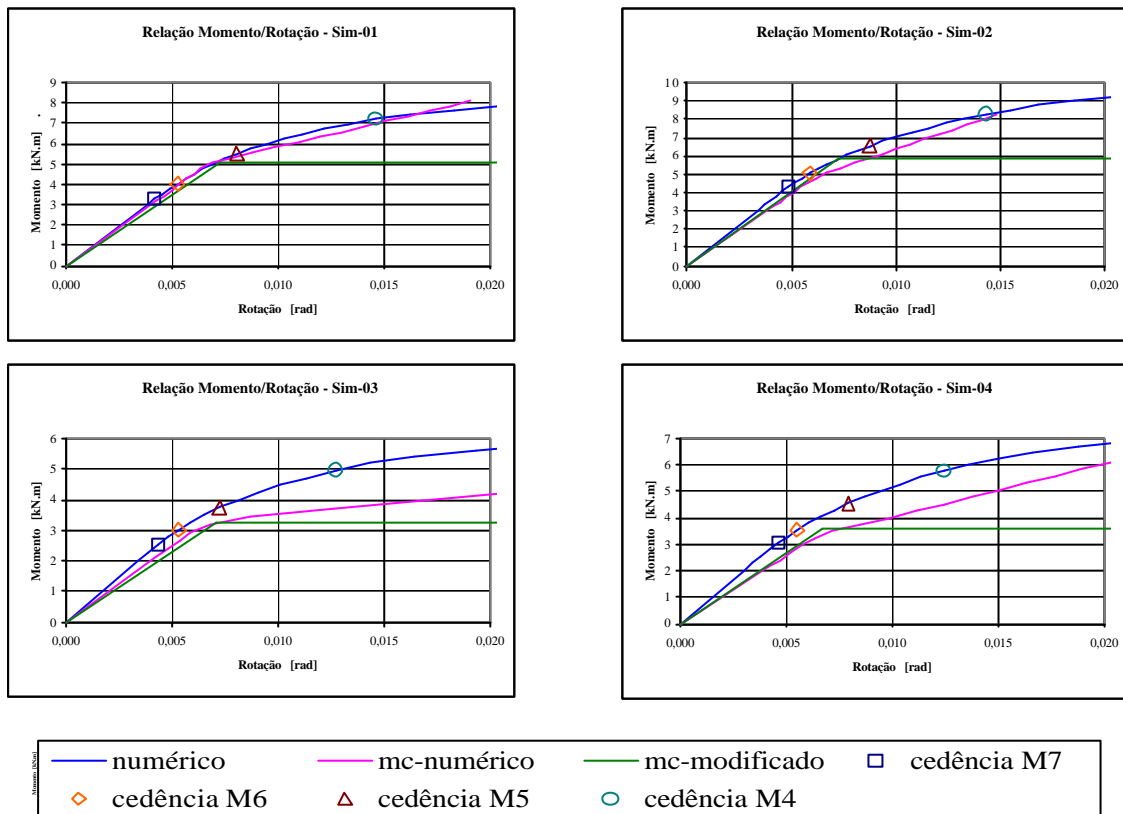


Figura 10 - Relação M- ϕ para cada ligação

6. CONCLUSÕES

Em termos de síntese, poder-se-á afirmar que o método das componentes é aplicável às ligações soldadas em estruturas de alumínio. No entanto, essa aplicação não pode ser directa devido às propriedades específicas das ligas de alumínio, tais como a existência da HAZ, o facto de a curva σ - ϵ do alumínio não ter patamar de cedência e da influência do encruamento na liga de alumínio durante o processo de produção dos perfis utilizados.

Na Tabela 9 resume-se para cada ligação o momento de cedência (M) e a rigidez inicial ($S_{j,ini}$) para o método das componentes do EC3 modificado e o momento de cedência da primeira componente (M), a rigidez inicial ($S_{j,ini}$) e a rigidez plástica (S_p) para o método das componentes calculado numericamente.

Dos gráficos apresentados anteriormente para as diversas simulações, Figura 10, pode-se concluir que a utilização de um método das componentes em que se pressupõem que uma ligação fique caracterizada pelo momento plástico resistente, M_{pl} , e rigidez inicial, $S_{j,ini}$, é extremamente condicionante para as ligações em estruturas de alumínio. Sugere-se, deste

modo, o refinamento do modelo de modo a implementar uma rigidez plástica, S_p , e possivelmente um momento resistente último, M_u . Para esse propósito considerou-se que cada componente activa da ligação deverá ser caracterizada, não só pela sua força de cedência e rigidez elástica, mas também por uma rigidez após a cedência e uma força resistente última. Neste campo foram apresentados valores para estes parâmetros de rigidez e de resistência para cada componente de cada ligação simulada.

Tabela 9 - Comparação entre o MC modificado e o MC numérico

Simulação	Método da Componentes modificado		Método da Componentes numérico		
	M [kNm]	$S_{j,ini}$ [kNm/rad]	M [kNm]	$S_{j,ini}$ [kNm/rad]	S_p [kNm/rad]
Sim-01	5,075	699,114	4,772	751,424	246,179
Sim-02	5,837	801,256	4,551	783,968	384,986
Sim-03	3,252	458,435	2,931	500,061	61,261
Sim-04	3,560	533,654	2,953	517,475	199,501

7. REFERÊNCIAS

- [1] AluBook - Lexical Knowledge about Aluminium - www.alu-info.dk em /Html/alulib/modul/albook40.htm
- [2] Alunet International - www.alunet.net
- [3] Andrade, J. (2001) A Utilização do Alumínio como Material Estrutural - Desenvolvimento de Metodologia para Análise de Ligações, Dissertação de Mestrado apresentada à FCTUC.
- [4] Bulson, P. S. (1991) Aluminium Structural Analysis, Recent European Advances, Elsevier Applied Science, London and New York.
- [5] Simões da Silva, L., “Ligações metálicas: métodos avançados de análise e dimensionamento”, *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, nº 51, pp. 37-50, (2002).
- [6] CEN (1998) Eurocode 9 - ENV 1999-1-1:1998, Design of Aluminium Structures -Part 1-1: General rules - General rules and rules for Buildings, CEN, European Committee for Standardization, Brussels.
- [7] CEN, Eurocode 3, prEN - 1993-1-1: 2003, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Stage 49 draft, Part 1.8: Design of Joints, 5 May 2003, European Committee for Standardization, Brussels, 2003.
- [8] CISM (2001) Lecture notes Aluminium Structural Design - Advanced Professional Training, CISM - Centro Internazionale di Scienze Meccaniche, Udine, Italy.
- [9] Dwight, J. (1999) Aluminium Design and Construction, E&FN Spon, London and New York.
- [10] FEA (1999) Lusas Finite Element System, Lusas - Theory Manual, FEA, Kingston-upon-Thames.
- [11] Mazzolani, F. M. (1995) Aluminium Alloy Structures, 2ª edição, E&FN Spon, London.
- [12] World-Aluminium Home of the International Aluminium Institute (IAI) - www.world-aluminium.org