

Estudo numérico do efeito Shear Lag em perfis de aço com seção transversal do tipo U

Jorge Fernando Reis^{1*}, Bernardo de Matos Silva Melo^{2*}, Rodrigo Barreto Caldas^{3*}, Ana Lydia Reis de Castro Silva^{4*}, Hermes Carvalho^{5*}

**Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627 - Escola de Engenharia -Pampulha, Belo Horizonte, 31270-901, Minas Gerais, Brasil*

¹*reisjorgef@gmail.com*

²*bernardodematossilva@gmail.com*

³*caldas@dees.ufmg.br*

⁴*lydia@dees.ufmg.br*

⁵*hermes@dees.ufmg.br*

Resumo. Barras de aço tracionadas são amplamente empregadas em sistemas estruturais, tais como treliças de cobertura, torres de transmissão, sistemas de contraventamento e outros. Dentre os perfis mais utilizados, tem-se o tipo U, que pode ser conectado por meio de uma ou mais partes da seção transversal, por exemplo, conexão a partir do elemento da alma. Nesses casos, a distribuição de tensões se torna não uniforme ao longo da seção do perfil, tendo maior intensidade nas regiões conectadas. O efeito proveniente da concentração dessas tensões em uma área reduzida é conhecido como *shear lag* e tem como consequência a redução na capacidade resistente. Esse efeito é contemplado pelas normas ABNT NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-16 e EN 1993-1-1:2005 com simplificações gerais. Na literatura encontram-se estudos mais abrangentes para perfis cantoneira e ligações parafusadas. Sendo assim, realizou-se um estudo numérico por meio do método dos elementos finitos (MEF) de ligações de perfis U tracionados com ligações soldadas, considerando a influência da presença ou não de solda transversal em conjunto com a longitudinal, comprimento da barra e da ligação para seções com geometrias diferentes. Os resultados foram confrontados com a literatura, indicando comportamento menos conservador dos modelos.

Palavras-chaves: *shear lag*; estruturas de aço; seção transversal U.

1 Introdução

Em concepções estruturais em aço é muito comum a utilização de barras laminadas tracionadas com seções transversais do tipo cantoneira, U e T. Essas seções podem ser conectadas por meio de soldas ou parafusos, por meio de ligações dispostas em uma série de combinações distintas. É particularmente muito comum a realização de ligações por partes da seção transversal, podendo levar à distribuições não-uniformes de tensões associadas ao efeito de *shear lag*, que pode ser definido como um fenômeno que leva a perda de capacidade resistente de uma barra tracionada conectada apenas por partes da seção transversal [1].

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008[2] e americana ANSI/AISC 360[3] lidam com esse fenômeno por meio de coeficientes de redução em função da seção transversal e do tipo da ligação, aplicados na área da seção transversal levando a uma capacidade resistente reduzida.

Além disso, a literatura conta uma quantidade substancial de estudos sobre o efeito de *shear lag*, porém, devido as diferentes seções transversais usais e suas dimensões e uma enorme variedade de possíveis ligações, torna-se difícil generalizar de maneira acurada coeficientes de redução. Nesse sentido, como não há quantidade significativa de estudos com ligações soldadas para perfis U, esse estudo tem como objetivo analisar uma faixa de perfis U tracionados e conectados por meio de ligações soldadas e avaliar o seu comportamento em relação as proposições já estabelecidas.

2 Fundamentação teórica

Muitos estudos foram realizados no âmbito de analisar o efeito de *shear lag* em conexões de perfis de aço submetidos à tração. Munse e Chesson [4,5] conduziram uma pesquisa considerando diversos parâmetros em espécimes com ligações parafusadas ou rebitadas e propuseram um coeficiente de redução da capacidade resistente última que foi utilizado como referência para diversos estudos subsequentes e como base para definições normativas, como a ANSI/AISC 360 [3] e ABNT NBR 8800:2008 [2]. O cálculo do coeficiente de redução é dado pela eq. (1), conforme a seguir:

$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{L} \quad (1)$$

Sendo U o coeficiente de redução devido ao efeito de *shear lag*, \bar{x} a distância do plano de cisalhamento da ligação ao centro de gravidade da seção do elemento e L o comprimento da ligação.

Ragan e Salter [6] realizaram um estudo experimental com perfis cantoneira soldados, considerando diversas características da ligação, por fim, propondo uma equação para perfis cantoneira ligados por solda. Já Easterling e Giroux [7] analisou o comportamento devido ao efeito de *shear lag* para perfis cantoneira, U e placa soldados, considerando o efeito da presença de solda transversal.

Abi-Saad e Bauer [1] desenvolveram um modelo analítico para determinar a força resistente última em perfis tracionados soldados, abrangendo perfis cantoneira, placas e U. Kulak e Wu [8] executaram uma análise experimental para cantoneira simples e dupla parafusadas, levando em consideração um série de parâmetros e propondo diversas considerações de projeto.

Tanto a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 [2] quanto a americana ANSI/AISC 360 [3] utilizam a eq. (1) para o cálculo do coeficiente de redução na definição da área da seção líquida efetiva, conforme eq. (2):

$$A_e = C_t A_n \quad (2)$$

Onde A_n é a área líquida da barra, sendo igual a área bruta da seção transversal para ligações soldadas e C_t é o coeficiente de redução da área líquida. Contudo, a ABNT NBR 8800:2008 [2] limita esse valor inferiormente em 0,6 e superiormente em 0,9, o que não é previsto na ANSI/AISC 360 [3].

3 Análise Numérica

Com o intuito de simular a ruptura da seção líquida em ligações soldadas de perfil do tipo U, uma análise numérica via Método dos Elementos Finitos (MEF) foi conduzida utilizando o software ABAQUS [9]. Nesse sentido, foram necessárias várias considerações para reproduzir de maneira confiável as características de um modelo real. Para tanto, realizou-se análise não linear física e geométrica, por meio de uma análise estática de Riks.

3.1 Geometria dos modelos

O estudo realizado foi composto por 120 modelos (Fig. 1), considerando 3 seções transversais usuais encontradas no mercado (Tab. 1), cada qual com uma excentricidade de ligação, e_c . A análise foi realizada considerando os seguintes parâmetros: comprimentos de ligação, l_c ; razão entre o comprimento da barra e da ligação, L/l_c ; e utilização de solda transversal ou não em conjunto com a solda longitudinal (Tab. 2). O estudo foi organizado variando-se para cada seção transversal diversos comprimentos de solda, relações de comprimento da barra com o comprimento da ligação e presença ou não de solda transversal. Para todos os modelos foram consideradas soldas longitudinais aplicadas ao longo dos vértices da alma e de mesmo comprimento.

Tabela 1. Seções transversais consideradas no estudo

Seção	h (mm)	b (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	e _c (mm)
A	70	40	5	7	13.83
B	100	50	5	7.5	16.86
C	125	65	6	8	21.11

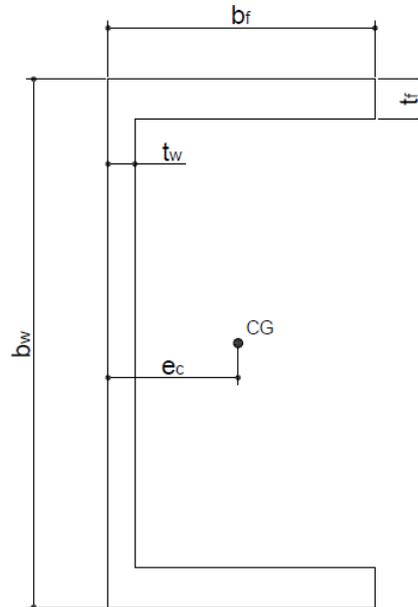


Figura 1: Seção típica modelada

Tabela 2. Definição dos parâmetros utilizados no estudo paramétrico

Parâmetros	Varição Adotada
l _c (mm)	50; 70; 90; 110; 130; 150; 170; 190
L/l _c	2.5; 5.0; 7.5; 10.0; 12.5
Solda	Long.; Long. + Transversal

3.2 Material

Como se trata de uma análise não linear não só geométrica, como também física, faz-se necessário representar tanto o comportamento elástico como o plástico do aço. Sendo assim, utilizou-se módulo de elasticidade (E) de 200000 N/mm² e coeficiente de Poisson igual a 0.3. Para a parte plástica do aço, foram calculados pontos de tensão e deformação reais a partir de valores nominais (Tab. 3) para representar de maneira satisfatória o comportamento plástico do material.

Tabela 3. Tensões e deformações para o comportamento plástico

	σ _{nom} (Mpa)	ε _{nom}	σ _{real} (Mpa)	ε _{real}
f _y	250	0.0	250.3125	0.0
1.01f _y	252.5	0.01	255.0250	0.008675
(f _u +f _y)/2	325	0.07	347.7500	0.065920
f _u	400	0.15	460.0000	0.137462
f _r	-	-	0.00001	0.15

3.3 Definição da malha de elementos

Como o perfil é formado por elementos cujas espessuras são muito menores que as demais dimensões, foram considerados elementos de casca para constituir a malha, caracterizados por seis graus de liberdade por nó, sendo três rotações e três translações. Com o intuito de adotar uma dimensão que conduza a resultados satisfatórios e ao mesmo tempo tenha um custo computacional razoável, foi feita uma análise de sensibilidade de malha. Nesse sentido, os perfis foram modelados com malha de tamanho variado e elementos quadrilaterais de integração reduzida, S4R, e completa, S4. Por fim, decidiu-se pela utilização de elemento S4R com malha de 20 mm, proporcionando resultados consistentes.

3.4 Força e condições de contorno

Para consolidação das condições do modelo foi aplicada uma força concentrada no centro geométrico da seção oposta à ligação, com valor inicial de f_y multiplicado pela área da seção transversal. Essa associação foi feita por meio da constrição *coupling*, estabelecendo uma conexão na direção U3 entre um ponto de referência localizado no centro geométrico e os nós da face de aplicação da força.

Quanto as condições de restrição, foram limitados os deslocamentos nas direções U1, U2 e U3 ao longo do comprimento dos trechos que simulam a presença de soldas.

3.5 Validação

A validação se deu por meio da comparação com resultados experimentais obtidos por Easterling e Giroux [7], conforme Tab. 4. Foram reproduzidos quatro modelos de perfil U duplo tracionados que apresentaram diferença relativa entre 5-9% em relação aos coeficientes de redução obtidos por Easterling e Giroux [7].

Tabela 4. Validação dos modelos numéricos com Easterling e Giroux [7]

Modelo	C_t - numérico	C_t [7]	Diferença (%)
Modelo C-L-1b	0.972	0.890	9.17
Modelo C-L-2b	0.971	0.900	7.92
Modelo C-L-3b	0.973	0.910	6.88
Modelo C-B-1	0.967	0.920	5.07

4 Resultados

A partir dos resultados obtidos, avaliou-se a influência do comprimento da ligação no coeficiente de redução (C_t), representado pela razão tensão última de ruptura do modelo numérico sobre a tensão última nominal para os três perfis estudados (Fig. 2). Para comprimentos de ligação pequenos, o coeficiente de redução apresenta valores menores, que aumentam à medida que o comprimento da ligação aumenta, atingindo um patamar e se mantendo constante a partir de certo ponto. Percebe-se que para o perfil da classe A, com as menores dimensões, o coeficiente se mantém constante com um valor acima 0.95 para toda a faixa de variação, ao contrário de perfis maiores, como o classe C que apresenta grande variação, começando com valores de 0.75 para comprimento de ligação de 50 mm até atingir a estabilidade se aproximando de 0.95.

Ao se analisar a influência do comprimento do perfil em relação ao da ligação (Fig. 3), usando como referência o comprimento de ligação de 130 mm, percebe-se que a variação do coeficiente é desprezável, de modo que os valores de C_t se mantêm constantes independentemente da relação para ambos os perfis analisados.

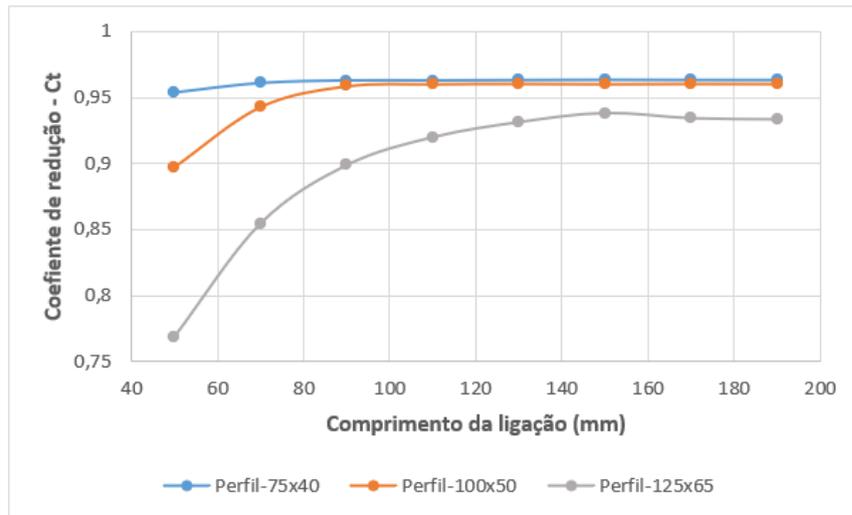


Figura 2. Relação do coeficiente de redução com o comprimento da ligação.

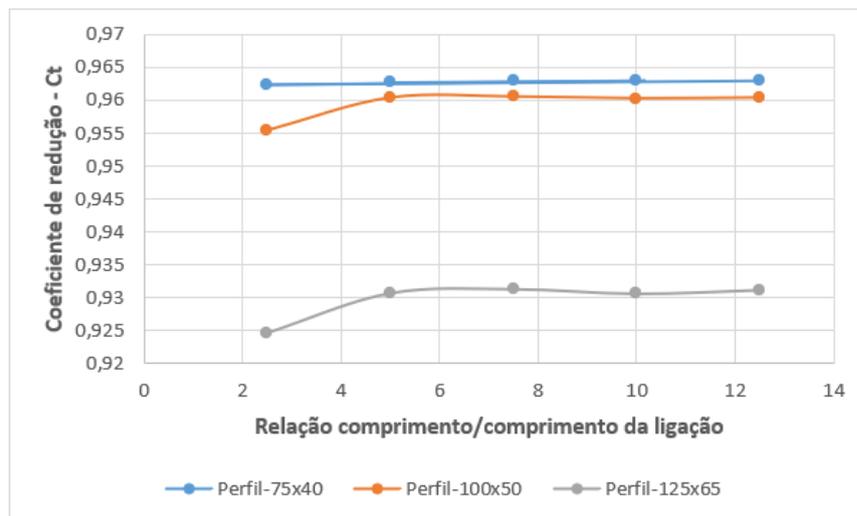


Figura 3. Variação do coeficiente de redução em função da razão comprimento da ligação/comprimento do perfil.

No caso da utilização de solda transversal em conjunto com a solda longitudinal, ocorre pequeno aumento no coeficiente para comprimentos de ligação menores e apenas para perfis com dimensões maiores, como no caso da classe C (Fig 4.c). Para as seções A e B, mesmo para ligações menores, a presença da solda transversal é irrisório (Fig. 4.a e 4.b).

Por fim, relacionou-se o coeficiente de redução em função da razão e_c/l_c para todos os modelos utilizando solda longitudinal do estudo em comparação com a eq. 1 (Fig. 5). Os valores do coeficiente de redução apresentaram uma maior dispersão para razões de excentricidade/comprimento de ligação mais elevados, principalmente para o perfil C, que apresenta maior excentricidade. Em comparação com o comportamento da eq. (1), os valores numéricos apresentam queda menos acentuada.

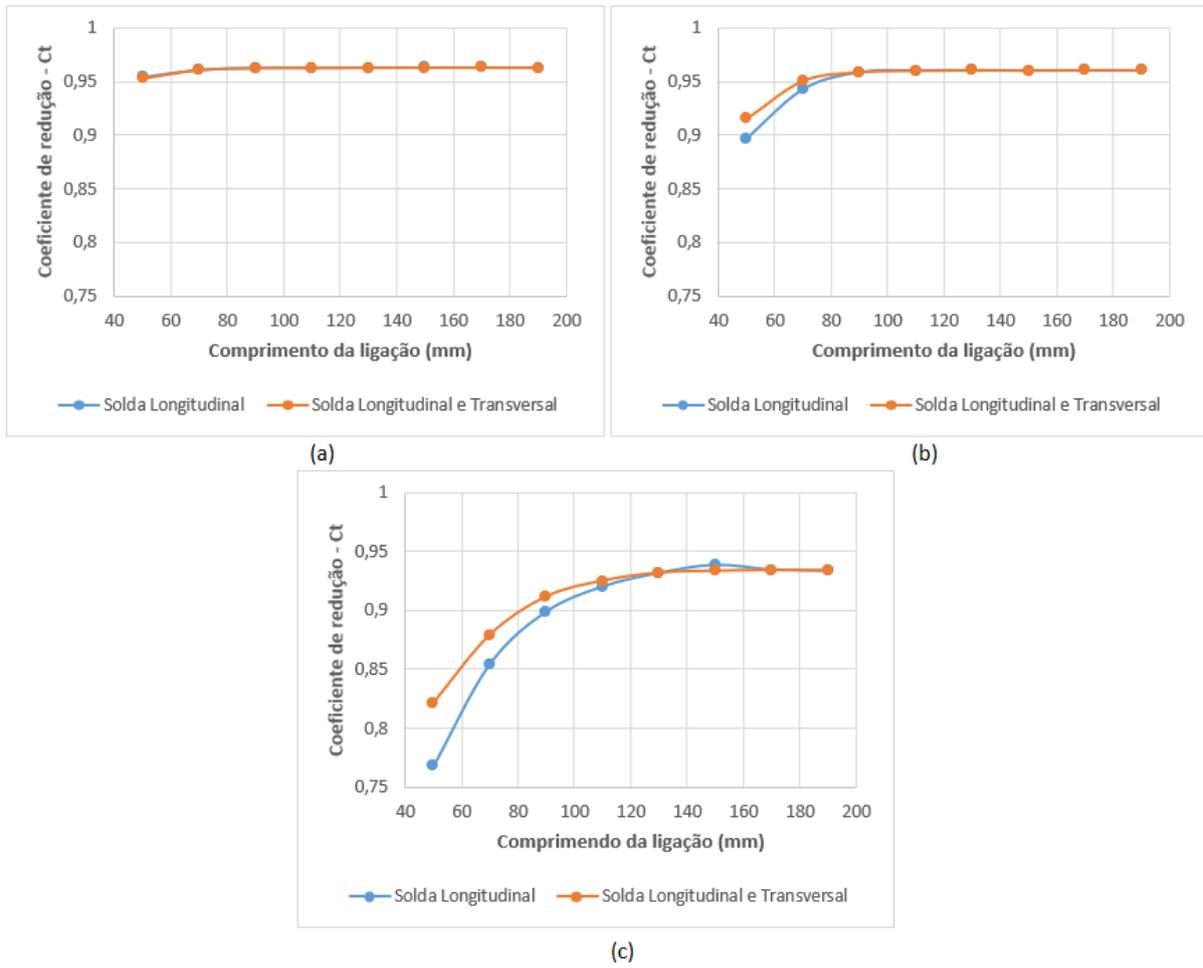


Figura 4. Comportamento de C_t com e sem solda transversal: a) Perfil 75x40 b) Perfil 100x50 c) Perfil 125x65.

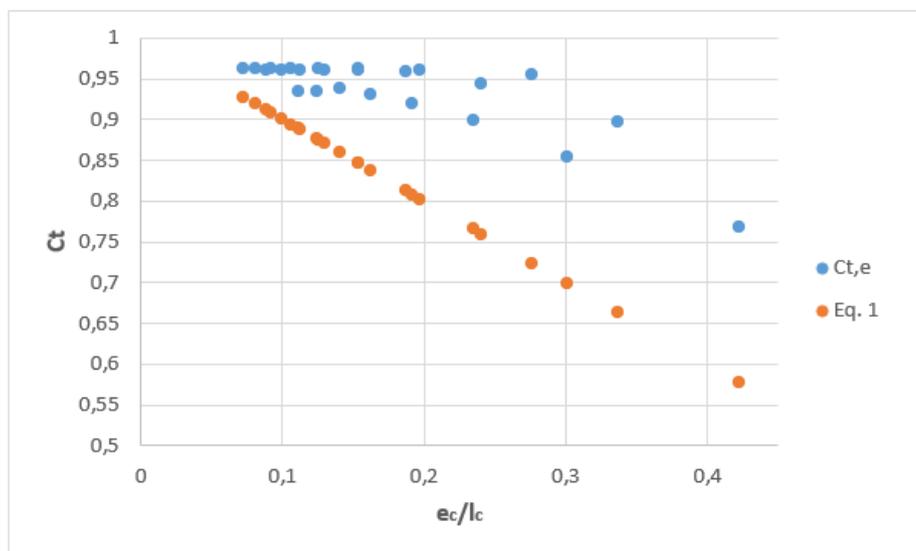


Figura 5. Relação de C_t com e_c/l_c para os modelos com solda longitudinal

5 Conclusão

A partir dos resultados obtidos nesse trabalho, percebeu-se que o comprimento da ligação influencia substancialmente o valor de C_t apenas para comprimentos menores, sendo que a partir de certo ponto, o aumento desse parâmetro não causa variações significativas no coeficiente. Outro resultado também identificado foi a influência desprezável da presença da solda transversal, provocando algum ganho apenas em situações de pequenos comprimentos de ligação e perfis com maior excentricidade.

Em relação à razão do comprimento do perfil em função do comprimento da ligação, também não se identificou variações relevantes em quase nenhuma situação analisada, com alguma sutil influência para barras curtas para a seção C, com razão de 2.5.

De maneira geral, os coeficientes de redução obtidos numericamente apresentaram valores sempre acima dos calculados por meio da eq. (1) e uma queda menos acentuada em função de e_c/l_c . Houve uma dispersão mais significativa para relações de e_c/l_c mais elevadas, isto é, para pequenos comprimentos de ligação relacionados a maior excentricidade, principalmente para os perfis do grupo C.

Sugere-se como futuros estudos analisar a relação e_c/l_c para uma maior diversidade de seções transversais e comprimentos de ligações com o intuito de estabelecer padrões de comportamento para maiores relações.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao apoio financeiro em forma de fomento à pesquisa concedido pela CAPES, FAPEMIG, CNPq e à UFMG.

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material aqui incluído como parte do presente trabalho é propriedade (e autoria) dos autores, ou tem a permissão dos proprietários a serem incluídos aqui.

Referências

- [1] G. Abi-Saad, D. Bauer. "Analytical approach for shear lag in welded tension members". *Can. J. Civ. Eng.* Vol. 33, 2006.
- [2] ABNT NBR 8800. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- [3] ANSI/AISC 360-10, Specification for steel buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, USA, 2010.
- [4] E. Chesson, W.H. Munse, "Riveted and bolted joints: truss type tensile connection. *J. Struct. Eng. ASCE*, vol. 89, p.p. 67-106, 1963.
- [5] W.H. Munse, E. Chesson, "Riveted and bolted joints: net section design. *J. Struct. Eng. ASCE*, vol. 89, p.p. 107-126, 1963.
- [6] P. Regan, P. Salter. Tests on welded-angle tension members. *Struc. Eng.* vol. 62, p.p. 25-30, 1983.
- [7] W.S. Easterling, L. G. Giroux. Shear lag effects in steel tension members. *AISC Engineering Journal*, vol. 30, p.p. 77-89, 1993.
- [8] G.L. Kulak, E.Y. Wu. Shear lag in bolted angle tension members. *J. Struct. Eng.* vol. 123, p.p. 1144-1152, 1997.
- [9] SIMULIA. Abaqus/CAE User's Guide. 2014.