



ESTUDO NUMÉRICO DE LIGAÇÕES TUBULARES ENTRE PERFIS CIRCULARES SUBMETIDAS A ALTAS TEMPERATURAS

Carlos Alexandre Seruti

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

carlosseruti@gmail.com

lucianolima@uerj.br

Aluno de IC – Iniciação Científica

Professor Associado

Departamento de Estruturas e Fundações, FEN/UERJ

Alexandre Landesmann

alandes@coc.ufrj.br

Professor Associado

COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo. Este artigo tem como objetivo apresentar uma investigação numérica para avaliação da resistência de ligações tubulares soldadas CHS-T sob esforços axiais de tração e compressão no montante submetidas a altas temperaturas. Simulações em modelos de elementos finitos utilizando o programa computacional ANSYS v12.0® foram realizadas. Para a validação do modelo numérico, relacionou-se a curva carga-deslocamento com aquelas obtidas em resultados numéricos e experimentais por Chen et al. Os resultados da simulação numérica foram comparados com os valores de cálculo obtidos através das equações de projeto do Eurocode 3, da NBR16239 e da ISO 14346, substituindo a tensão de escoamento do aço à temperatura ambiente por aquelas referentes às altas temperaturas. Foi investigada também a influência dos parâmetros geométricos α , β e γ na resistência das ligações. Verificou-se que, tanto para ligações submetidas a esforços de compressão quanto a esforços de tração no montante, a resistência da ligação sofre redução significativa a partir dos 500° C. Naquelas, as relações $P_{u,T}/P_{u,20}$ são menores que os fatores de redução para a resistência ao escoamento do aço, enquanto que nestas, as relações seguem praticamente conjuntas com a diminuição de tal resistência.

Palavras-chaves: Ligações Tubulares Circulares Soldadas; Método dos Elementos Finitos, Altas Temperaturas.

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Estruturas tubulares de aço soldadas são largamente utilizadas na construção civil devido à sua construção rápida, vantagens relacionadas às propriedades mecânicas, leveza do aço quando comparado ao concreto, aparência atraente e a capacidade de vencer grandes vãos, condições normalmente exigidas em estruturas de pontes, coberturas, plataformas offshore e estádios. Devido às possíveis descontinuidades de seção geométrica e da complexidade da distribuição das tensões em suas conexões, ligações tubulares exigem maior atenção quando comparadas a elementos únicos e contínuos. Quando submetidas a altas temperaturas, tal atenção deve ser ampliada porque as propriedades mecânicas do aço tendem a diminuir com o aumento de calor.

Várias pesquisas e sugestões de estudos sobre o comportamento mecânico de ligações soldadas sujeitas à temperatura ambiente têm sido realizadas (Mohamed *et al.*, 2015, Oliveira *et al.*, 2011, Affonso *et al.*, 2011, Santos *et al.*, 2011, Lu *et al.*, 1994 e Zhao, 2000), mas quando submetidas a temperaturas elevadas, poucos trabalhos são encontrados na literatura. Somado a isso, as normas técnicas Eurocode 3 (EN 1993-1-8, 2003) que serviu de base para a norma brasileira NBR 16239 (2013) e ISO 14346 (2013) apresentam somente equações para o cálculo da resistência última de ligações à temperatura ambiente. Quando submetidas a altas temperaturas, tais equações podem não ser indicadas. Shu-Bin *et al.* (2013), avaliaram ligações CHS-K sob cargas axiais nos montantes. Gao *et al.* (2013) investigaram o comportamento de falha de juntas tubulares CHS-Y sob diferentes temperaturas. Tan *et al.* (2013) e Chen *et al.* (2013) analisaram o comportamento estrutural de ligações tubulares CHS-T submetidas a cargas de compressão no montante sob altas temperaturas. Verificaram também a influência de parâmetros geométricos α , β e γ na resistência na ligação. Sendo que α é a razão entre duas vezes o comprimento do banzo l_1 e o diâmetro do banzo d_1 ($= 2l_1/d_1$); β é a razão entre o diâmetro do montante d_2 e o diâmetro do banzo d_1 ($= d_2/d_1$) e γ é a razão entre d_1 e duas vezes a espessura do banzo t_1 ($= d_1/2t_1$). Meng *et al.* (2012) avaliaram o comportamento de ligações CHS-T sob diferentes temperaturas e a influência dos parâmetros β , γ e τ que é a razão entre a espessura do montante e t_1 ($= t_2/t_1$). Ozyurt *et al.* (2014) estudaram a resistência a elevadas temperaturas de ligações tubulares circulares (CHS) e tubulares quadradas (SHS) submetidas a cargas axiais de tração e compressão no montante. Propuseram recomendações no cálculo da resistência de ligações sob altas temperaturas considerando as equações propostas pelas normas técnicas (EN 1993-1-8, 2003 e ISO 14346, 2013), mas não focaram os estudos unicamente em ligações tipo CHS-T. Portanto, pesquisas mais aprofundadas envolvendo tais ligações são necessárias.

Este artigo tem como objetivo investigar o comportamento de ligações CHS-T sujeitas a cargas axiais de compressão e tração no montante e submetidas a altas temperaturas. Foi verificada também a influência dos parâmetros geométricos β , α e γ na resistência da ligação.

2 METODOLOGIA

Nesta pesquisa, análises estacionárias envolvendo as temperaturas 20, 200, 300, 400, 500, 600, 700 e 800 °C foram realizadas. Ou seja, sob determinada temperatura, cargas são aplicadas até que ocorra a ruptura da ligação soldada. Um modelo de ligação tubular circular CHS-T foi desenvolvido com base no método dos elementos finitos (EF) utilizando o programa computacional Ansys v12.0® (2010). Elementos tipo casca com quatro nós, SHELL181, foram usados. O modelo numérico foi calibrado de acordo com os resultados dos

testes experimental e numérico de Chen *et al.* (2013) à temperatura ambiente para a ligação SP-T. Supõe-se que as extremidades do banzo sejam fixas com apoios de primeiro e segundo gêneros e a carga seja aplicada na extremidade superior do montante (Fig. 1). O ângulo θ_1 entre o banzo e o montante é 90° . O aço usado na ligação avaliada possui tensão de escoamento $f_{y,20} = 383$ MPa e módulo de elasticidade $E_{a,20} = 219$ GPa a 20°C . Considerou-se, também, que a solda possui $f_{y,20} = 480$ MPa.

A Fig. 2 apresenta uma comparação das curvas carga-deslocamento entre os resultados do modelo em EF e os testes. Sendo que δ_d é o deslocamento axial do montante, em mm, sob determinada carga P , em kN, aplicada em sua extremidade na forma de deslocamento Δ . Também é mostrado no gráfico da Fig. 2, a faixa referente ao critério de deformação limite referente a 3% do diâmetro do banzo ($3\% d_1$) proposto por Lu *et al.* (1994) para a determinação da carga última da ligação tubular.

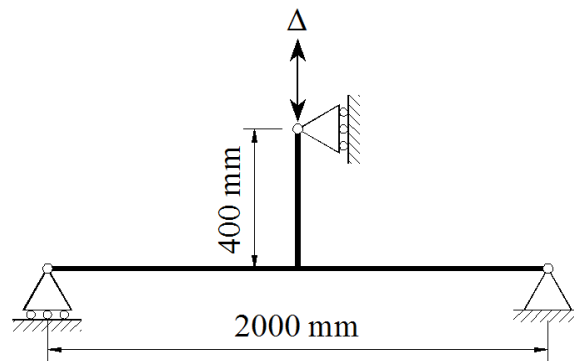


Figura 1. Esquema da ligação validada baseada na SP-T

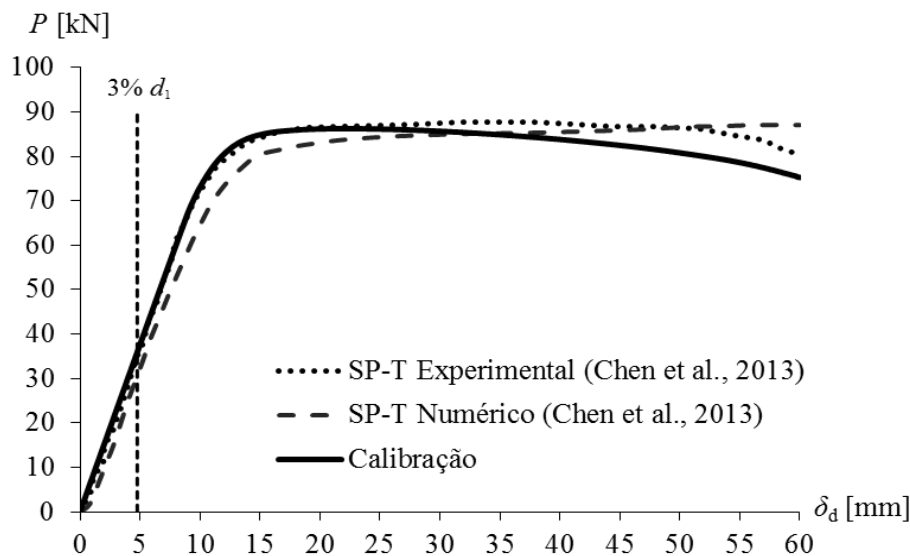


Figura 2. Curva carga versus deslocamento

A curva obtida através do modelo numérico está bem próxima às curvas experimental e numérica do autor relacionado. Conclui-se que o modelo é confiável e pode ser usado para gerir estudos paramétricos das ligações soldadas em diferentes temperaturas. Um esquema das ligações e o modelo em EF para o estudo paramétrico criado no Ansys v12.0[®] (2010) são mostrados nas Figs. 3 e 4, respectivamente.

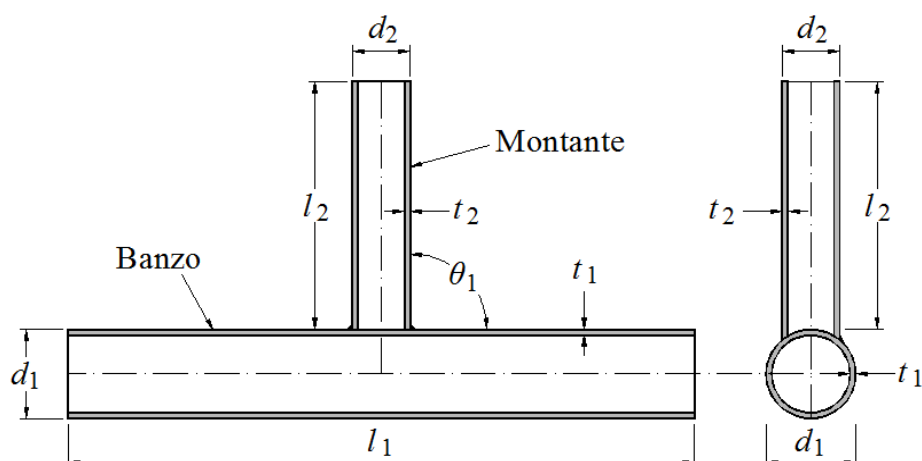


Figura 3. Esquema de uma ligação CHS-T

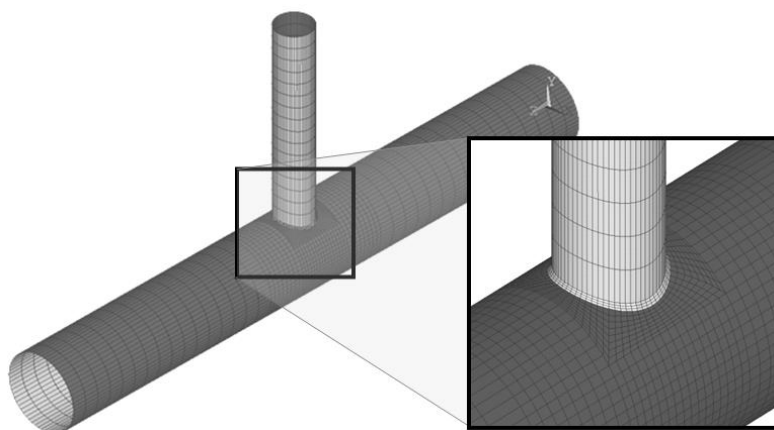


Figura 4. Modelo em EF da ligação CHS-T para os estudos paramétricos

Como etapa seguinte, o comportamento de outras três ligações também ensaiadas por Chen *et al.* (2013) foi avaliado - CHS-T-1, CHS-T-2, CHS-T-3. Enquanto que o autor fez uma análise transiente de tais ligações, ou seja, para certa carga de compressão aplicada no montante, a ligação é aquecida até a temperatura crítica, esta pesquisa envolve análises estacionárias como método de verificação, com cargas axiais de compressão e tração.

Adicionalmente, um estudo preliminar foi conduzido através de 16 modelos numéricos para investigar a influência de parâmetros geométricos na resistência de ligações CHS-T. Os parâmetros adimensionais avaliados foram β , α e γ . A Tabela 1 lista as configurações das 20 ligações estudadas. As propriedades dos tubos de aço das ligações CHS-T-1, CHS-T-2 e CHS-T-3 são mostradas na Tabela 2.

Tabela 1. Parâmetros Geométricos dos Modelos Numéricos (Chen *et al.*, 2013)

Nomenclatura	d_1 (mm)	t_1 (mm)	l_1 (mm)	d_2 (mm)	t_2 (mm)	l_2 (mm)	β	α	γ
SP-T	159	4,5	2000	121	4,5	400	0,76	25,16	17,67
CHS-T-1	325	6	2000	159	6	1000	0,49	12,31	27,08
CHS-T-2	219	6	2000	159	6	1000	0,73	18,26	18,25
CHS-T-3	180	6	2000	121	6	1000	0,67	22,22	15
CHS-T-P-1	400	10	5000	120	10	1866,7	0,3	25	20
CHS-T-P-2	400	10	5000	160	10	1866,7	0,4	25	20
CHS-T-P-3	400	10	5000	200	10	1866,7	0,5	25	20
CHS-T-P-4	400	10	5000	240	10	1866,7	0,6	25	20
CHS-T-P-5	400	10	5000	280	10	1866,7	0,7	25	20
CHS-T-P-6	400	10	5000	320	10	1866,7	0,8	25	20
CHS-T-P-7	400	10	3000	200	10	1200	0,5	15	20
CHS-T-P-8	400	10	4000	200	10	1522,3	0,5	20	20
CHS-T-P-9	400	10	6000	200	10	2200	0,5	30	20
CHS-T-P-10	400	10	7000	200	10	2533,3	0,5	35	20
CHS-T-P-11	400	10	8000	200	10	2866,7	0,5	40	20
CHS-T-P-12	400	16,7	5000	200	16,7	1866,7	0,5	25	12
CHS-T-P-13	400	11,1	5000	200	11,1	1866,7	0,5	25	18
CHS-T-P-14	400	8,7	5000	200	8,7	1866,7	0,5	25	23
CHS-T-P-15	400	8	5000	200	8	1866,7	0,5	25	25
CHS-T-P-16	400	6,7	5000	200	6,7	1866,7	0,5	25	30

Tabela 2. Propriedades dos Aços das Ligações CHS-T (Chen *et al.*, 2013)

Diâmetro do Tubo (mm)	$E_{a,20}$ (GPa)	$f_{y,20}$ (MPa)
325	198,31	318,84
219	185,57	290,89
180	181,93	317,06
159	204,67	361,79
121	189,55	313,70

3 ESTUDO PARAMÉTRICO

A pesquisa envolveu basicamente duas linhas de estudos: (i) ligações com o montante submetido a cargas axiais de compressão e (ii) ligações com o montante submetido a cargas axiais de tração. O banzo, em ambos os casos, não foi submetido a nenhuma carga axial. Cada caso englobou a análise dos 20 modelos descritos na Tabela 1 submetidos a oito temperaturas diferentes. Os valores de resistências últimas fornecidos nas análises numéricas foram comparados aos obtidos com as equações das normas técnicas Eurocode 3 (EN 1993-1-8, 2003) e ISO 14346 (2013) para a temperatura ambiente, substituindo a tensão de escoamento por aquelas com valores reduzidos devido ao aumento de temperatura. As equações em questão são as seguintes, ressaltando, mais uma vez, que a NBR 16239 fornece os mesmos valores da norma europeia para a resistência das ligações estudadas no presente trabalho:

$$N_{1,Rd} = \frac{\gamma^{0,2} k_p f_{y,20} t_1^2}{\sin \theta_1} (2,8 + 14,2 \beta^2) / \gamma_{M5} \quad (1)$$

$$N_i^* = \frac{\gamma^{0,2} f_{y,20} t_1^2}{\sin \theta_1} (2,6 + 17,7 \beta^2) Q_f \quad (2)$$

Onde $\gamma = d_1 / 2t_1$, $k_p = 1$, $f_{y,20}$ = tensão de escoamento do banzo à temperatura ambiente, t_1 = espessura do banzo, $\beta = d_2 / d_1$, γ_{M5} = fator parcial de segurança, $\gamma_{M5} = 1$. $\theta_1 = 90^\circ$. Q_f é um parâmetro que considera o efeito de pré-cargas aplicadas no banzo. Como não foi considerada a aplicação de pré-cargas no banzo, adota-se $Q_f = 1$.

Com o aumento de temperatura, a tensão de escoamento $f_{y,20}$ e o módulo de elasticidade $E_{a,20}$ do aço tendem a diminuir, de acordo com fatores de redução apresentados na norma técnica Eurocode 3 EN 1993-1-2 (2003). A Fig. 5 mostra as curvas tensão-deformação (σ_a x ϵ_a) do aço do banzo da ligação CHS-T-1 submetido a diferentes temperaturas.

Os modelos SP-T, CHS-T-1, CHS-T-2, CHS-T-3 foram estudados quanto a resistência última quando submetidos a cargas axiais de compressão e tração no montante. Os valores obtidos nas análises numéricas foram comparados graficamente aos obtidos teoricamente.

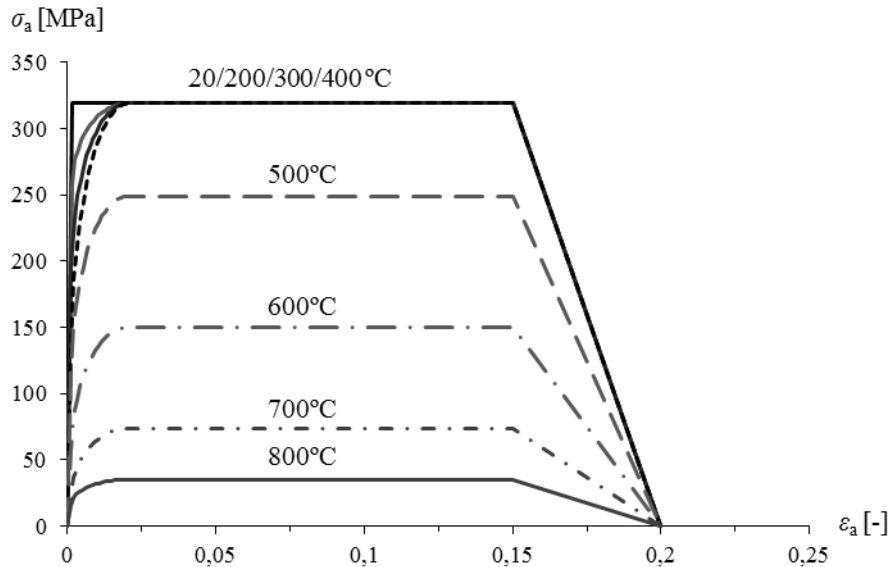


Figura 5. Curvas Tensão-deformação do aço a elevadas temperaturas

Para investigar a influência dos parâmetros geométricos β , α e γ na resistência de ligações tubulares circulares soldadas (CHS-T), estudos paramétricos foram conduzidos. Foram usados 16 modelos para este fim (CHS-T-P), de acordo com aqueles também avaliados por Chen *et al.* (2013). A tensão de escoamento e o módulo de elasticidade do aço em temperatura ambiente foram $f_{y,20} = 235$ MPa e $E_{a,20} = 206$ GPa, respectivamente. A solda possui $f_{y,20} = 480$ MPa.

Os modelos foram convenientemente divididos em três grupos, conforme o parâmetro avaliado, como descrito a seguir:

- (1) Grupo 1 (CHS-T-P-1 a CHS-T-P-6): estudo do efeito do parâmetro β na resistência da ligação CHS-T. Os valores de β são respectivamente 0,2 – 0,3 – 0,4 – 0,5 – 0,6 – 0,7 – 0,8 e os valores de α e γ constantes de 25 e 20, respectivamente.
- (2) Grupo 2 (CHS-T-P-7 a CHS-T-P-11): estudo do efeito do parâmetro α na resistência da ligação CHS-T. Os valores de α são respectivamente 15 – 20 – 25 – 30 – 35 – 40 e os valores de β e γ constantes de 0,5 e 20, respectivamente.
- (3) Grupo 3 (CHS-T-P-12 a CHS-T-P-16): estudo do efeito do parâmetro γ na resistência da ligação CHS-T. Os valores de γ são respectivamente 12 – 18 – 20 – 23 – 25 – 30 e os valores de β e α constantes de 0,5 e 20, respectivamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta e discute, primeiramente, os resultados da simulação numérica das 20 ligações estudadas por Chen *et al.* (2013). Depois, os parâmetros são tratados.

Ligações CHS-T

As Figs. 6(a) a (d) ilustram as curvas $P_{u,T} \times T$ das ligações SP-T, CHS-T-1, CHS-T-2 e CHS-T-3, respectivamente, cujos montantes foram submetidos a cargas axiais de compressão (MC), e as relaciona àquelas obtidas através das Eq. 1 e 2.

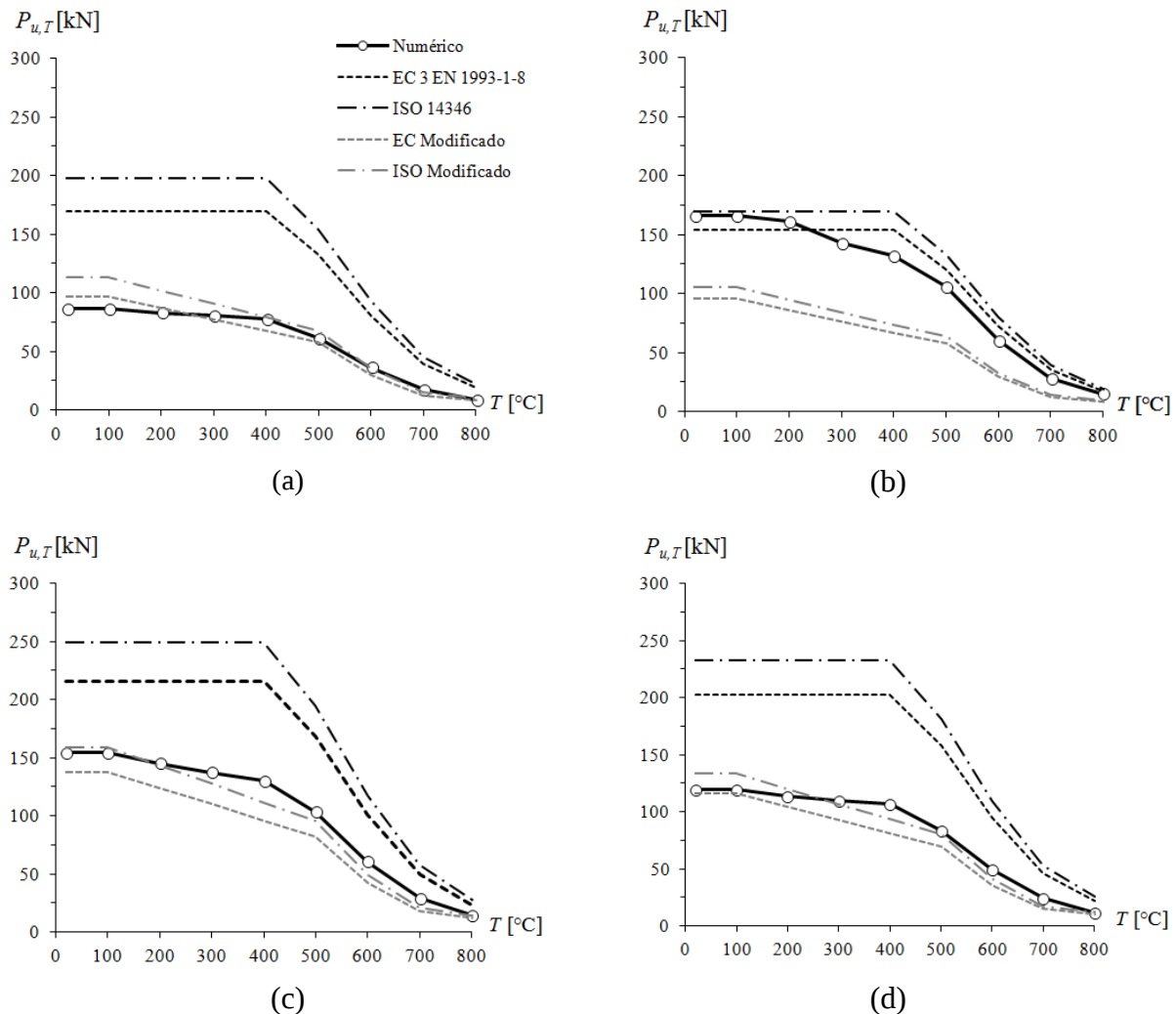


Figura 6. Curvas MC ($P_{u,T} \times T$): (a) SP-T, (b) CHS-T-1, (c) CHS-T-2, (d) CHS-T-3

A Fig. 7 apresenta as cargas últimas das ligações sob altas temperaturas normalizadas com a temperatura ambiente ($P_{u,T}/P_{u,20}$). A partir da observação dos gráficos, pode-se verificar que:

- (i) A resistência última das ligações tubulares circulares soldadas reduzem com o aumento da temperatura. A diminuição apresenta-se mais expressiva a partir dos 500 °C em três ligações avaliadas - Figs. 6(a), (c) e (d);
- (ii) Nas Figs. 6(a), (c) e (d), referentes às ligações SP-T, CHS-T-2 e CHS-T-3, respectivamente, percebe-se que as cargas últimas $P_{u,T}$ obtidas numericamente pelo Ansys v12.0[®] (2010) nas diferentes temperaturas foram inferiores às curvas fornecidas

pelas equações obtidas nas normas técnicas. Conclui-se, nestes casos, que a aplicação das fórmulas na obtenção das resistências últimas não é recomendada;

- (iii) Na ligação CHS-T-1, mostrada na Fig. 6(b), a aplicabilidade da Eq.1 obtida no Eurocode 3 (EN 1993-1-8, 2003) oferece, às temperaturas de 20 a 200 °C, certa segurança. Após tal temperatura, tal condição não é mais satisfeita. A Eq. 2, obtida na ISO 14346 (2013), não é recomendada em nenhum caso;
- (iv) Na Fig. 7 pode ser visto que as resistências obtidas na simulação numérica são geralmente menores do que os fatores de redução da tensão de escoamento do aço ($k_{y,\theta}$) e maiores do que fatores de redução do módulo de elasticidade ($k_{E,\theta}$) sob temperaturas elevadas. Isso pode ser explicado devido às deformações na interseção da face superior do banzo com o montante, provocadas pelas tensões geradas com a aplicação de carga de compressão. Como consequência, a seção transversal do banzo tende a se achatar (ovalização), como mostrado na Fig. 8.

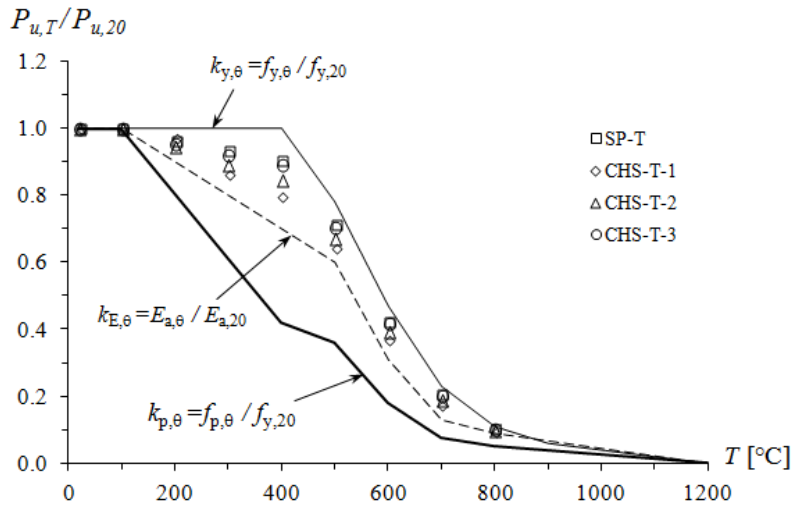


Figura 7. Redução da resistência à compressão das ligações tubulares CHS-T sob elevadas temperaturas

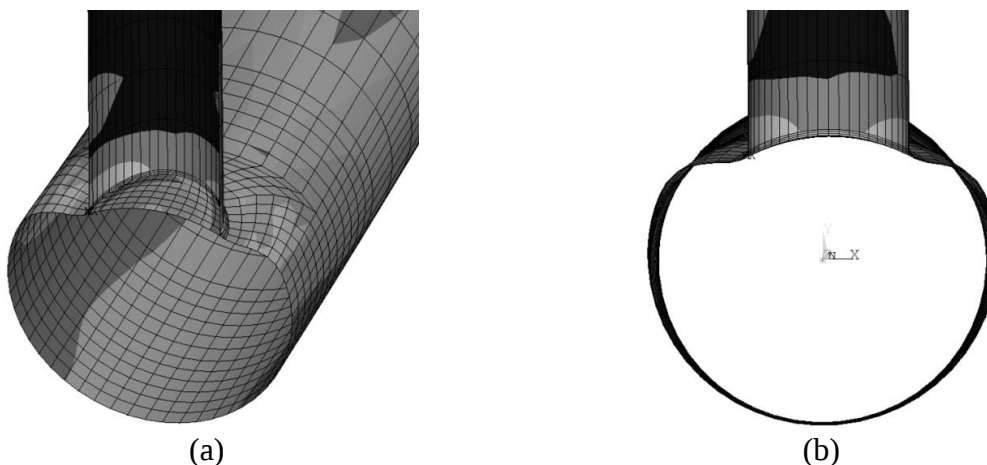


Figura 8. Falha por compressão da ligação CHS-T-1 a 600 °C: (a) Corte, (b) Seção transversal

As Figs. 9(a) a (d) ilustram as curvas $P_{u,T} \times T$ das ligações SP-T, CHS-T-1, CHS-T-2, CHS-T-3, respectivamente, cujos montantes foram submetidos a cargas axiais de tração (MT), e as relaciona àquelas obtidas através das Eq. 1 e 2.

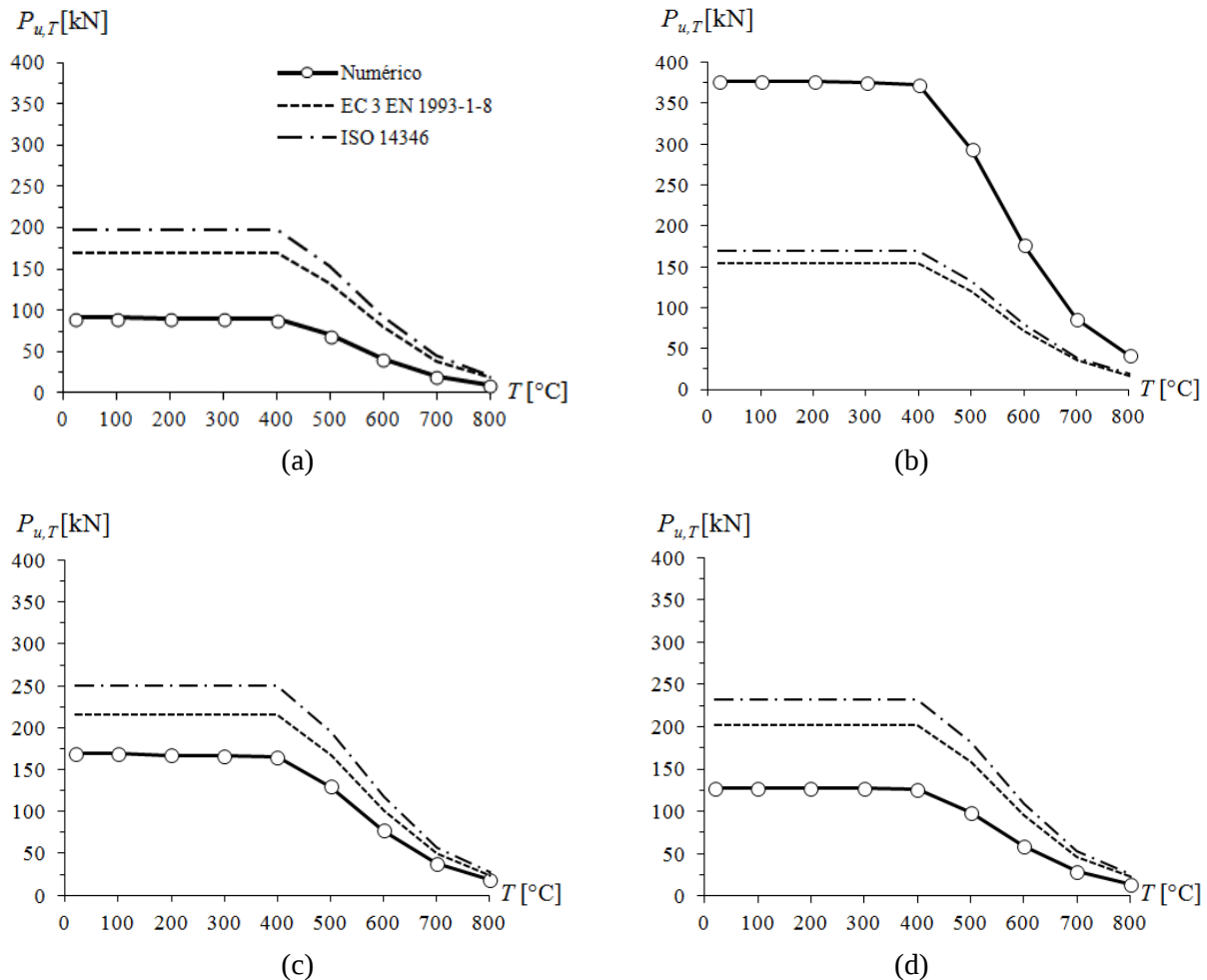


Figura 9. Curvas MT ($P_{u,T} \times T$): (a) SP-T, (b) CHS-T-1, (c) CHS-T-2, (d) CHS-T-3

A Fig. 10 apresenta as cargas últimas das ligações sob altas temperaturas normalizadas com a temperatura ambiente ($P_{u,T}/P_{u,20}$). A partir da análise dos gráficos, pode-se observar que:

- (i) Nas Figs. 9(a), (c) e (d), referentes às ligações SP-T, CHS-T-2 e CHS-T-3, respectivamente, verifica-se que ocorreu a mesma situação de quando foram consideradas cargas de compressão no montante. As cargas últimas $P_{u,T}$ obtidas numericamente pelo Ansys v12.0[®] (2010) nas diferentes temperaturas foram menores àquelas fornecidas pelas equações obtidas nas normas técnicas (EN 1993-1-8, 2003, ISO 14346, 2013). Pode-se concluir também que a aplicação das fórmulas na obtenção das resistências últimas à tração não é recomendada nestas ligações;
- (ii) Na ligação CHS-T-1, mostrada na Fig. 9(b), as curvas formadas pelos valores obtidos nas Eq.1 e 2 estão posicionadas abaixo da curva referente à simulação numérica em todas as temperaturas. Portanto, neste caso, ambas as fórmulas podem ser usadas;

- (iii) Na Fig. 10 pode ser observado que as resistências obtidas na simulação numérica seguem praticamente juntas aos fatores de redução da tensão de escoamento do aço sob temperaturas elevadas ($k_{y,\theta}$). Quando submetidas a cargas de tração no montante, não há mais o efeito da ovalização na interseção banzo/montante da ligação, conforme pode ser observado na Fig. 11.

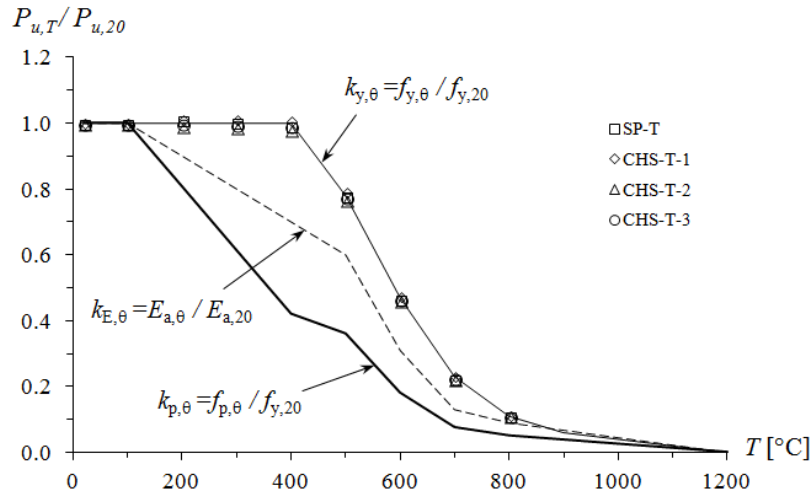


Figura 10. Redução da resistência à tração das ligações tubulares CHS-T sob elevadas temperaturas

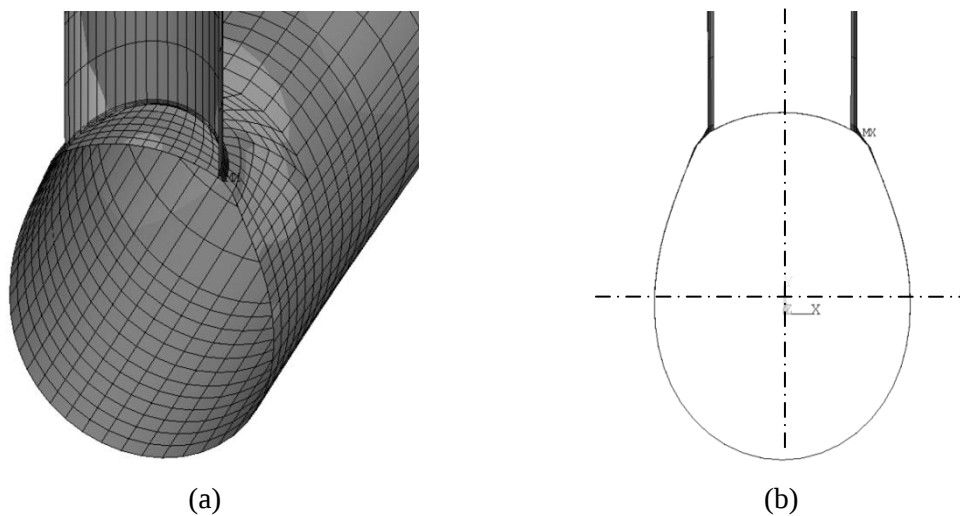


Figura 11. Falha por tração da ligação CHS-T-1 a 600 °C: (a) Corte, (b) Seção transversal

Modelos Paramétricos CHS-T-P

Adicionalmente, um extenso estudo preliminar paramétrico envolvendo outros 16 modelos (Tabela 1) foi realizado, os de nomenclatura CHS-T-P. Foi investigada a resistência última dessas ligações sob elevadas temperaturas e a relação entre os valores obtidos pelas equações propostas pelas normas técnicas. As respostas da simulação numérica são apresentadas através das curvas $P_{u,T} \times T$ e as compara àquelas obtidas analiticamente.

As Figs. 12 a 27 mostram os resultados considerando o montante das ligações submetido a cargas de compressão. Analisando as curvas escuras, as seguintes observações podem ser apontadas:

- (i) Em todas as ligações, até aproximadamente 150 °C, os valores da simulação numérica são maiores que os fornecidos pela Eq. 1. Após tal temperatura, não é mais garantida tal situação. Há casos em que a resistência da ligação até tal temperatura é inferior a obtida pela Eq. 2. Isto pode ser observado nas ligações CHS-T-P-4, 5, 6 e 12, que estão representadas nas Figs. 15, 16, 17 e 23, respectivamente. Pode-se concluir que o uso das equações a temperatura ambiente apenas substituindo a tensão de escoamento do aço do banzo a 20 °C, $f_{y,20}$, por aquelas reduzidas devido a altas temperaturas, $f_{y,\theta}$, não é aconselhável. Propõe-se a substituição na equação a temperatura ambiente das tensões de escoamento $f_{y,\theta}$ pelos módulos de elasticidade reduzidos $E_{a,\theta}$ divididos por 1000. As curvas obtidas com esta substituição podem ser vistas em linhas claras também nas Figs. 12 a 27. Com isso, as equações podem ser usadas com certa margem de segurança, pois se percebe que a capacidade da ligação reduz-se teoricamente;
- (ii) As resistências últimas das ligações aumentam de CHS-T-P-1 até CHS-T-P-6. Partindo de CHS-T-P-7 para CHS-T-P-8, a resistência decresce. O mesmo ocorre de CHS-T-P-9 até CHS-T-P-16. Isso se deve a influência de relações geométricas da ligação, que serão discutidas posteriormente de forma mais detalhada.

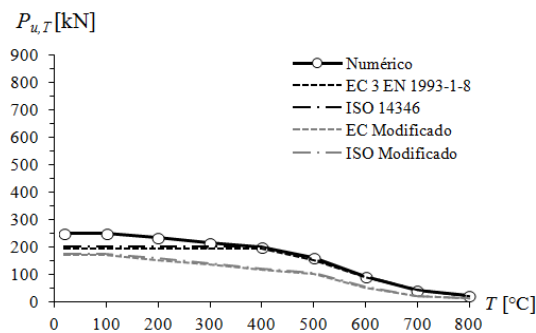


Figure 12. CHS-T-P-1

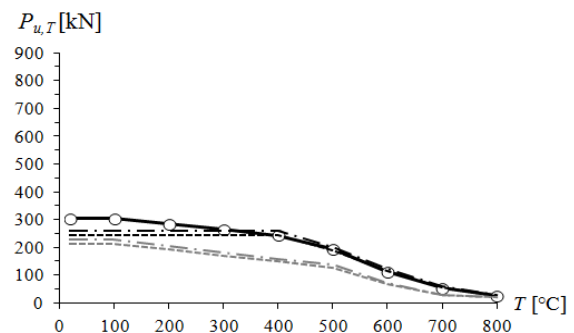


Figure 13. CHS-T-P-2

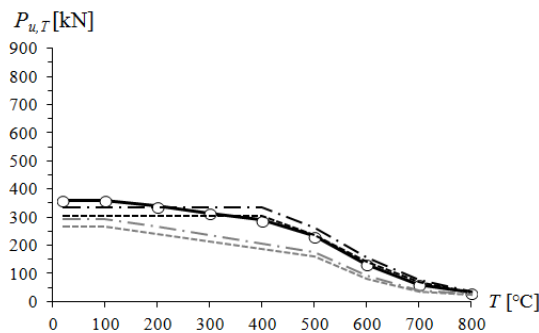


Figure 14. CHS-T-P-3

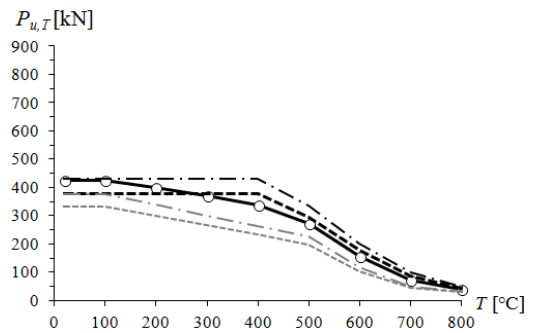


Figure 15. CHS-T-P-4

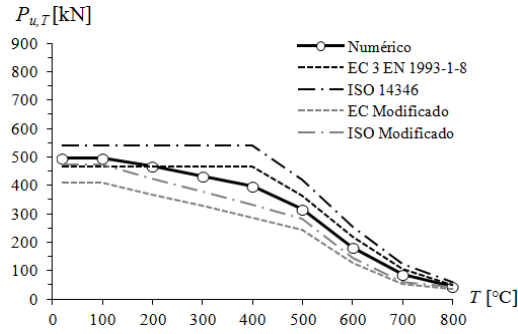


Figure 16. CHS-T-P-5

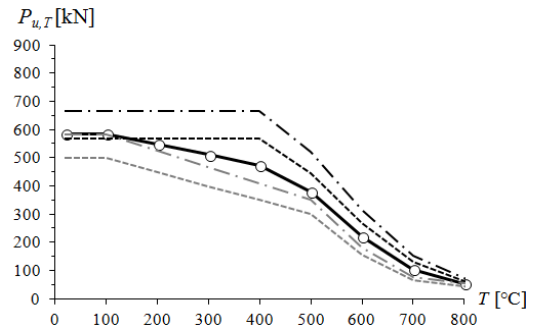


Figure 17. CHS-T-P-6

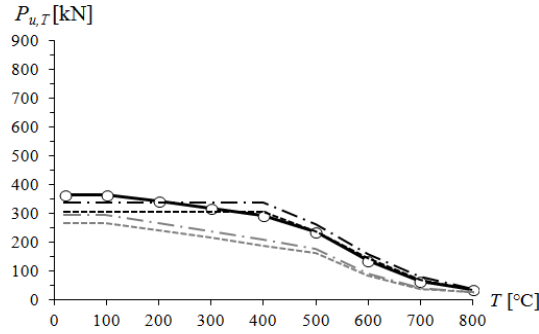


Figure 18. CHS-T-P-7

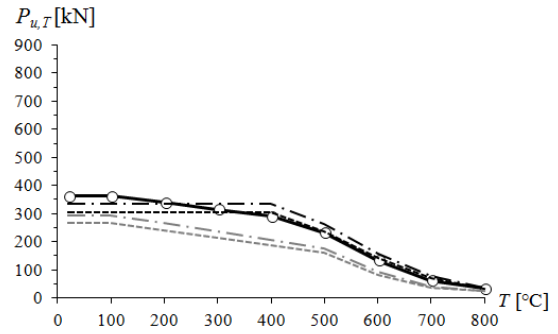


Figure 19. CHS-T-P-8

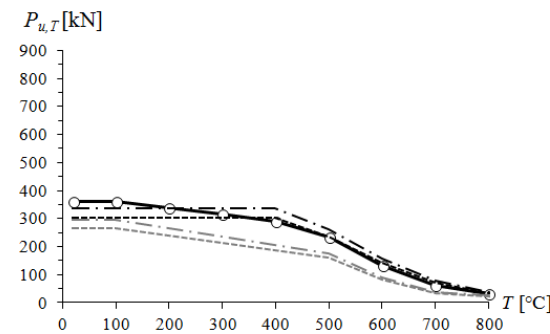


Figure 20. CHS-T-P-9

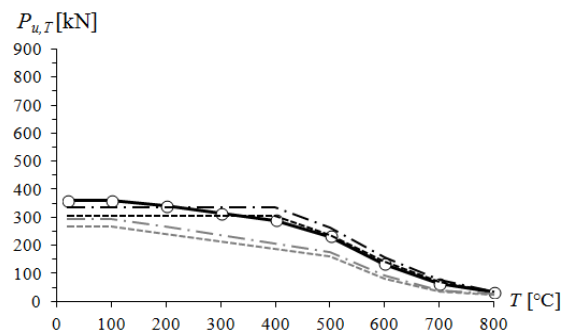


Figure 21. CHS-T-P-10

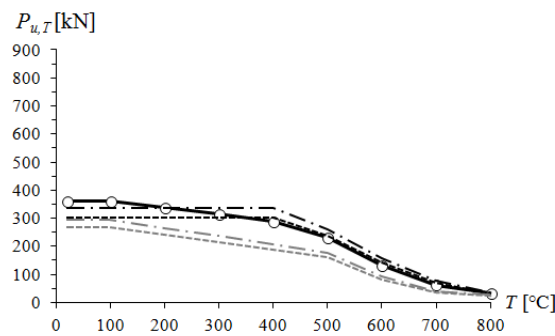


Figure 22. CHS-T-P-11

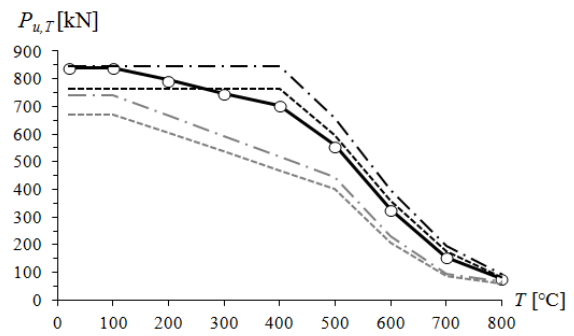


Figure 23. CHS-T-P-12

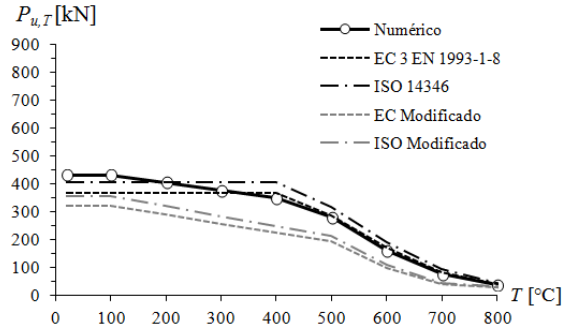


Figure 24. CHS-T-P-13

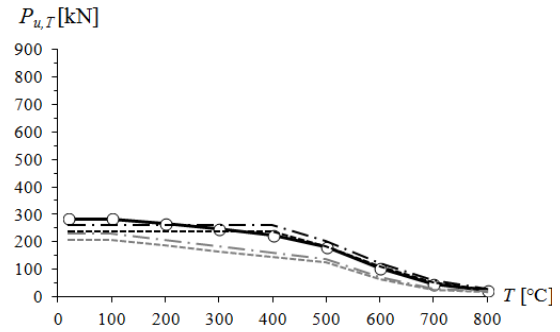


Figure 25. CHS-T-P-14

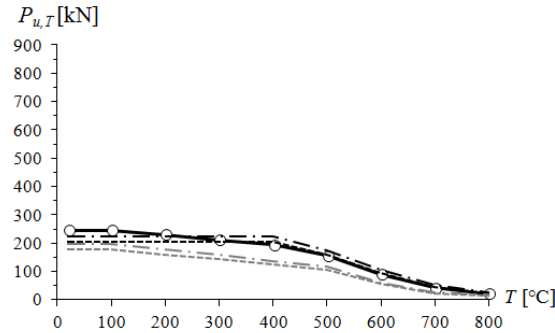


Figure 26. CHS-T-P-15

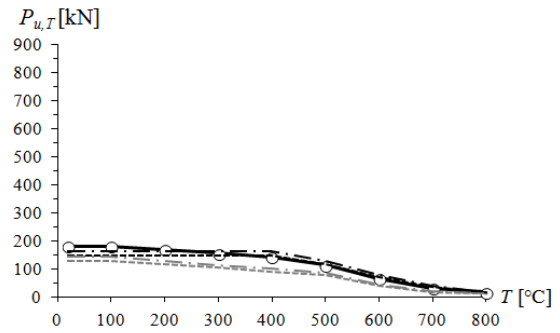


Figure 27. CHS-T-P-16

Na Fig. 28, que relaciona as capacidades últimas das ligações à compressão normalizadas à temperatura ambiente, pode ser visto que as resistências obtidas na simulação preliminar paramétrica são menores do que os fatores de redução da tensão de escoamento do aço ($k_{y,\theta}$), assim como na Fig. 7, referente às ligações CHS-T.

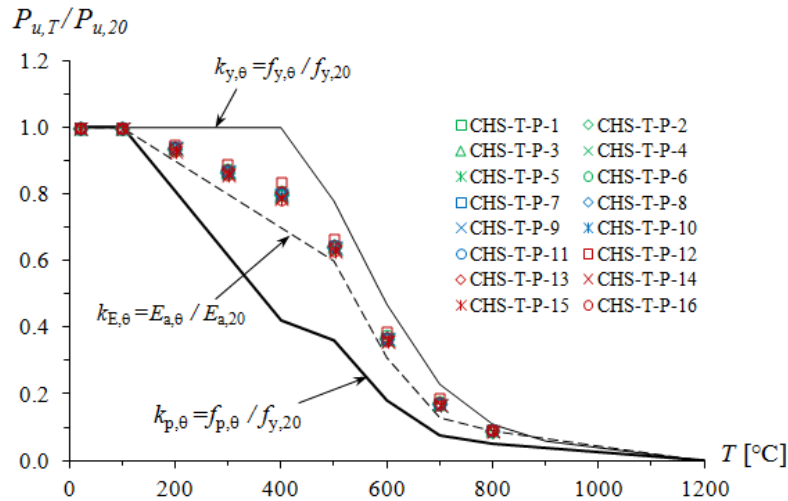


Figura 28. Redução da resistência à compressão das ligações tubulares CHS-T-P sob elevadas temperaturas

Considerando, agora, o montante das ligações submetido a cargas de tração, as Figs. 29 a 44 apresentam os gráficos que relacionam suas resistências últimas em diversas temperaturas. Da análise desses gráficos, as seguintes observações podem ser apontadas:

- (i) Em todas as ligações, os valores da simulação numérica são bem maiores que os fornecidos pela Eq. 1. Sendo assim, pode-se concluir que o uso da fórmula para a temperatura ambiente obtida no Eurocode 3 (EN 1993-1-8, 2003), para estes casos, pode ser usada, substituindo a tensão de escoamento do aço do banzo à temperatura ambiente $f_{y,20}$ por aquelas reduzidas a altas temperaturas $f_{y,\theta}$. Isto está de acordo com as conclusões de Ozyurt *et al.* (2014).
- (ii) Considerando a equação disposta na ISO 14346 (2013), apesar de na maioria dos casos, ela fornecer valores inferiores ao numérico, há uma exceção para a ligação CHS-T-P-6. Portanto, pode-se deduzir que a mesma não é totalmente segura de ser usada nas ligações tubulares circulares soldadas envolvendo altas temperaturas.

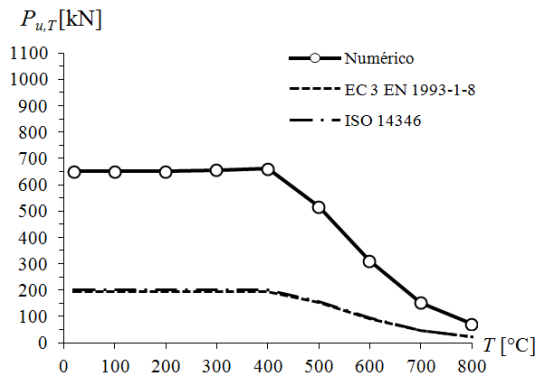


Figure 29. CHS-T-P-1

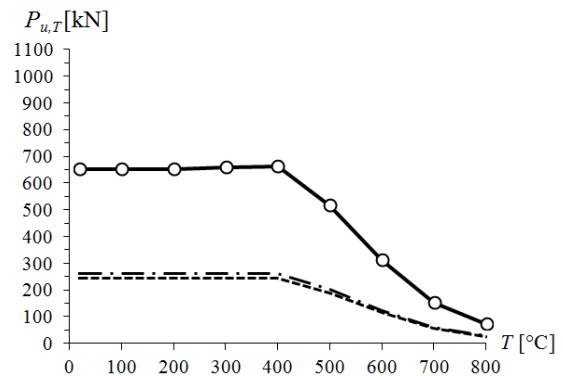


Figure 30. CHS-T-P-2

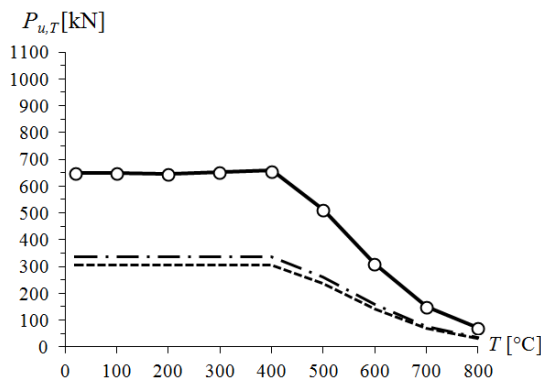


Figure 31. CHS-T-P-3

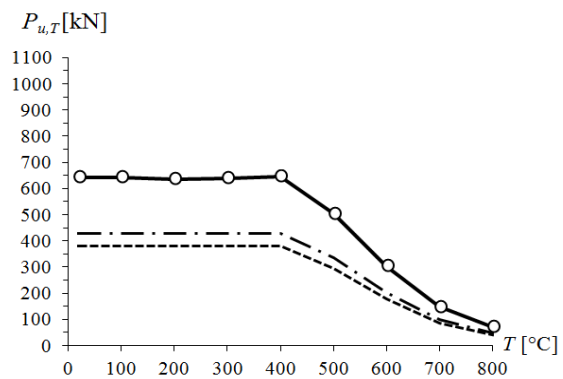


Figure 32. CHS-T-P-4

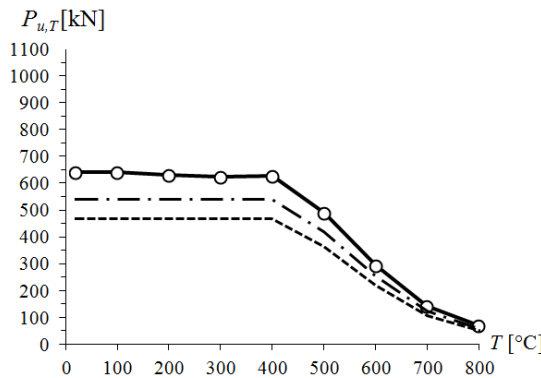


Figure 33. CHS-T-P-5

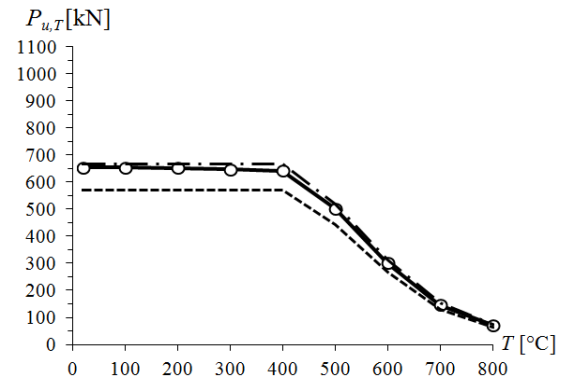


Figure 34. CHS-T-P-6

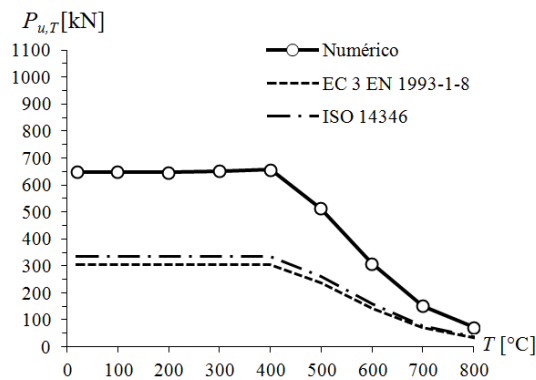


Figure 35. CHS-T-P-7

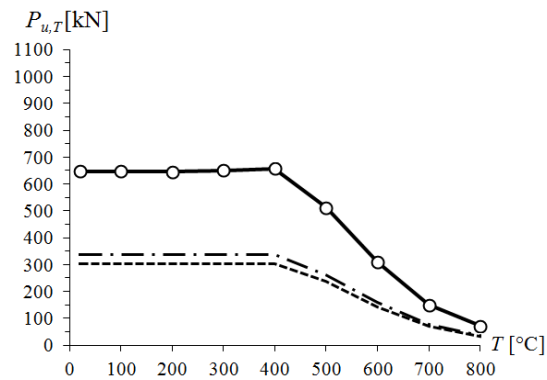


Figure 36. CHS-T-P-8

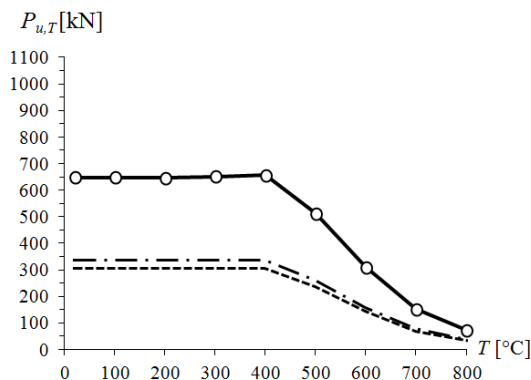


Figure 37. CHS-T-P-9

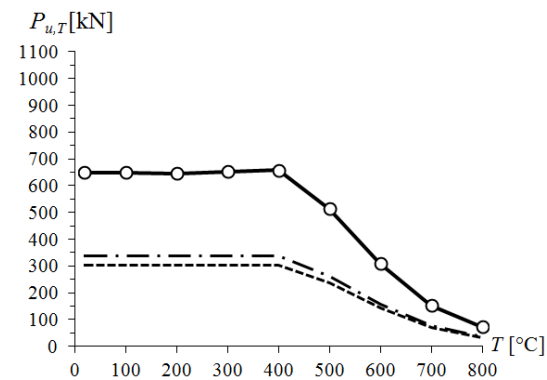


Figure 38. CHS-T-P-10

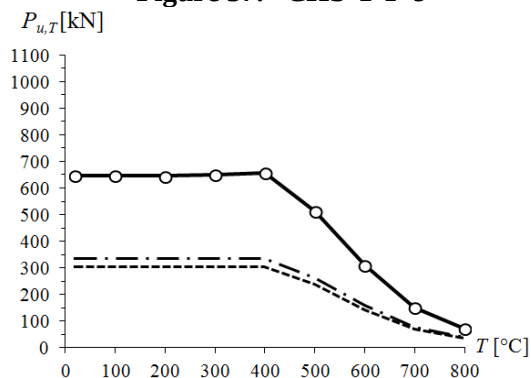


Figure 39. CHS-T-P-11

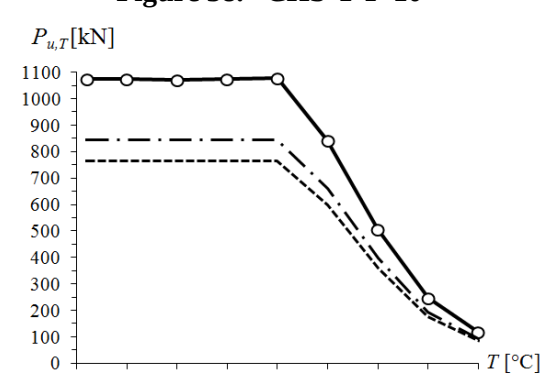


Figure 40. CHS-T-P-12

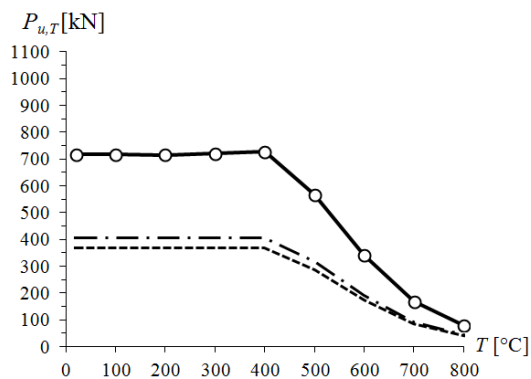


Figure 41. CHS-T-P-13

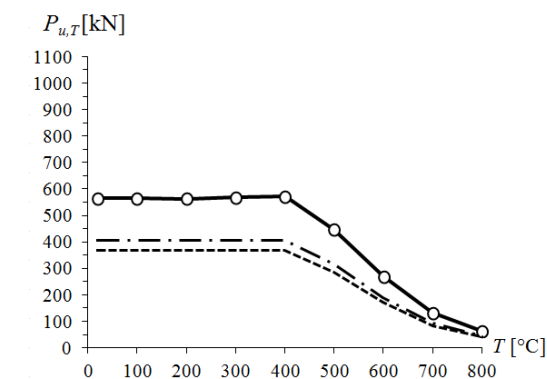


Figure 42. CHS-T-P-14

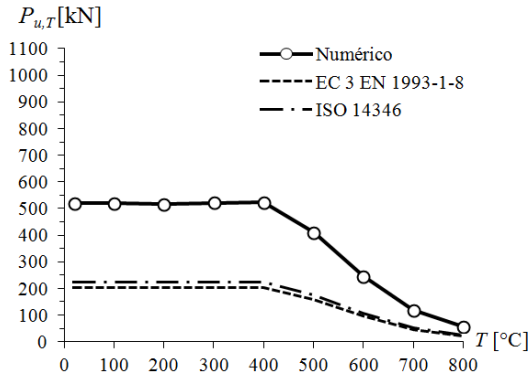


Figure 43. CHS-T-P-15

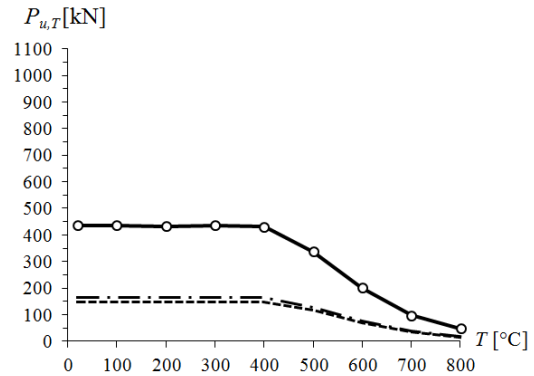


Figure 44. CHS-T-P-16

A Fig. 45 relaciona as capacidades últimas das ligações sujeitas a cargas de tração no montante normalizadas à temperatura ambiente. Pode ser visto que as resistências obtidas na análise numérica seguem a curva referente aos fatores de redução da tensão de escoamento do aço ($k_{y,\theta}$), como aconteceu na Fig. 10, referente às ligações CHS-T.

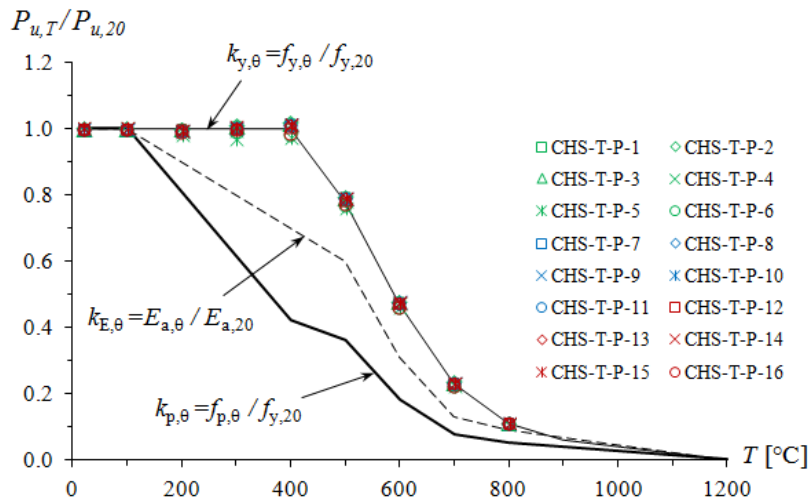


Figura 45. Redução da resistência à tração das ligações tubulares CHS-T-P sob elevadas temperaturas

Por fim, a relação entre os parâmetros geométricos β , α e γ das ligações com as suas resistências últimas foi averiguada. Para isto, os modelos foram divididos em três grupos, cada qual envolvendo o efeito de um parâmetro, e mantendo os outros dois constantes.

4.2.1 Efeito de β

Considerando as ligações submetidas a esforços axiais de compressão, a variação entre a carga última aplicada nos montantes e o parâmetro β , com aumento da temperatura, é mostrada na Fig. 46. Pode ser visto que, para a mesma temperatura, a capacidade última das ligações é proporcional ao incremento de β . Isto também pode ser verificado em estudos envolvendo o método transiente de temperaturas, de acordo com Chen et al. (2013). Quando

submetidas a esforços de tração, tal ocorrência não é claramente visível. As cargas seguem praticamente no mesmo valor, como mostrado na Fig. 47. Pode-se deduzir que a influência de β na resistência da ligação é maior quando submetidas a cargas de compressão no montante do que quando submetidas a tração.

4.2.2 Efeito de α

O efeito de α nas ligações submetidas tanto a esforços axiais de compressão quanto de tração é bem baixo quando comparado ao de β , como é mostrado nas Figs. 48 e 49. Pode ser visto em ambos os casos que, para a mesma temperatura, a capacidade última das ligações praticamente não varia com o aumento de α , tanto que tal fator não está incluído em nenhuma equação das normas técnicas envolvidas (EC 3 EN 1993-1-8, 2003 e ISO 14346, 2013).

4.2.3 Efeito de γ

Sendo γ a relação entre o diâmetro e duas vezes a espessura do banzo, é de se esperar que a resistência da ligação reduza com o aumento do parâmetro, pois a espessura do tubo também diminuiu. Isto é comprovado nas Figs. 50 e 51, tanto para as ligações submetidas a esforços de compressão quanto de tração. É possível perceber, também, que nas curvas, de 20 a 400 °C, as resistências são próximas. A partir de 500 °C, a capacidade das ligações decresce em maior proporção.

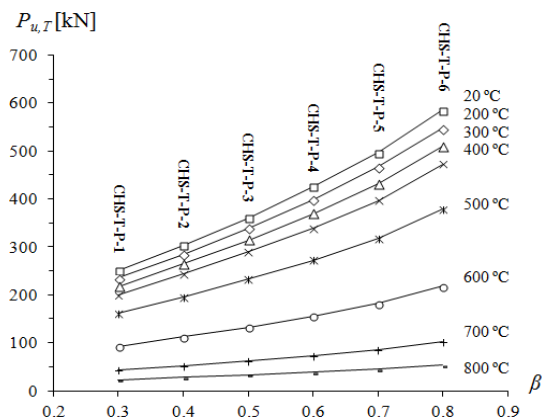


Figura 46. Efeito de β nas ligações CHS-T-P submetidas a compressão

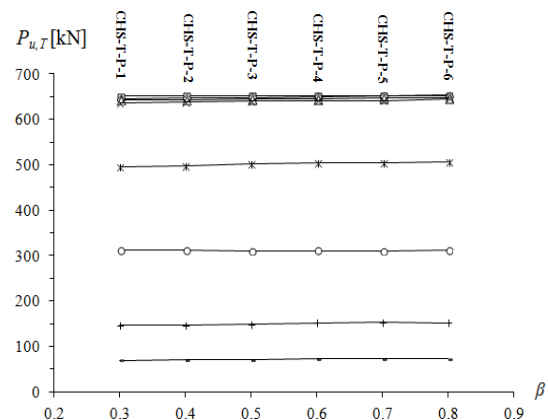


Figura 47. Efeito de β nas ligações CHS-T-P submetidas a tração

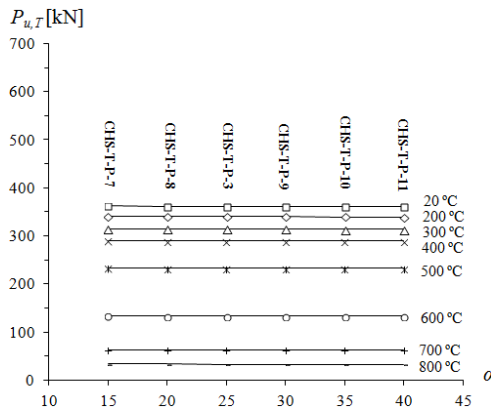


Figura 48. Efeito de α nas ligações CHS-T-P submetidas a compressão

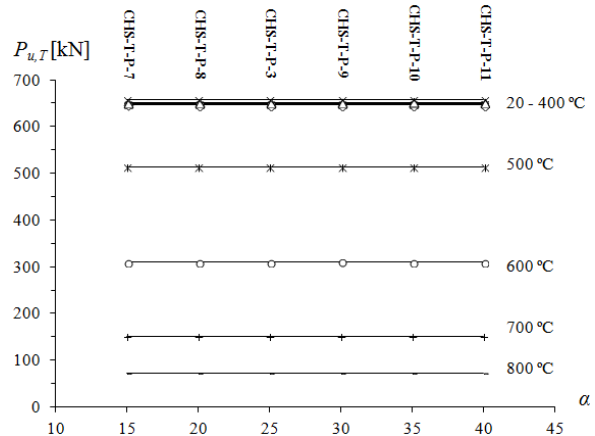


Figura 49. Efeito de α nas ligações CHS-T-P submetidas a tração

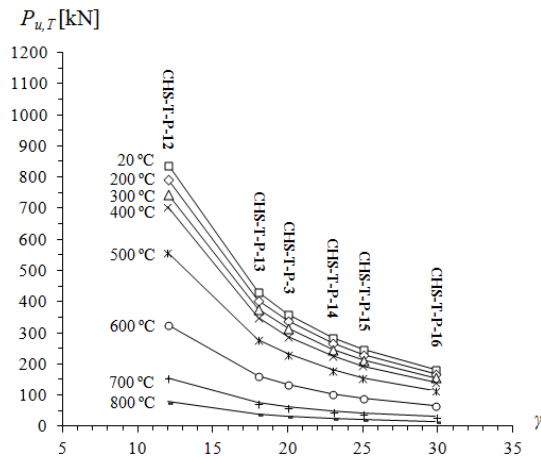


Figura 50. Efeito de γ nas ligações CHS-T-P submetidas a compressão

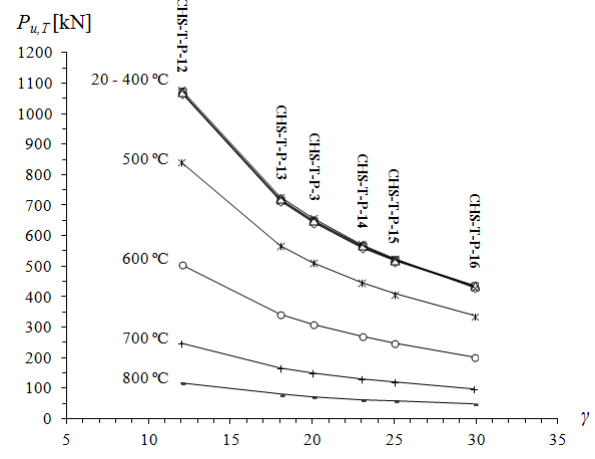


Figura 51. Efeito de γ nas ligações CHS-T-P submetidas a tração

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa envolveu o estudo de ligações tubulares circulares soldadas sob altas temperaturas. O método estacionário de submissão ao calor foi usado. Foi investigada a resistência a compressão e a tração das ligações através de simulações numéricas. Adicionalmente, um estudo paramétrico envolvendo o efeito de relações geométricas sobre a capacidade resistente de várias ligações foi efetuado. Tomando os fatores de redução da tensão de escoamento e módulo de elasticidade a temperatura ambiente obtidos no EC3 (EN 1993-1-2, 2003) e as equações propostas por EC3 (EN 1993-1-8, 2003) e ISO 14346 (2013), comparações foram feitas. Deve-se atentar que nas análises não foi considerado o critério de deformação limite proposto por Lu *et al.* (1994). Os valores das resistências últimas descritos nesta pesquisa foram àqueles obtidos diretamente através da simulação numérica.

As seguintes conclusões envolvendo as ligações tubulares circulares sob altas temperaturas estudadas podem ser tomadas:

- (i) Considerando o estudo paramétrico preliminar, para ligações submetidas a cargas axiais de compressão no montante, os valores das resistências últimas normalizados

pela temperatura ambiente são menores que os fatores de redução do EC3 (EN 1993-1-2, 2003). Pode-se concluir que o uso das equações a temperatura ambiente propostas pelas normas técnicas EC3 (EN 1993-1-8, 2003) e ISO 14346 (2013) para o cálculo das resistências a altas temperaturas não é aconselhável apenas mudando os valores da tensão de escoamento a 20 °C por aqueles reduzidos com o aumento de calor. Propõe-se a substituição das tensões de escoamento $f_{y,\theta}$ pelos módulos de elasticidade reduzidos $E_{a,\theta}$ divididos por 1000 nas equações a temperatura ambiente. Entretanto, tal procedimento anteriormente descrito, no caso das ligações CHS-T, não é completamente garantido, como pode ser visto nas Figs. 6(a), (c) e (d) referentes às ligações SP-T, CHS-T-2 e CHS-T-3, respectivamente. Estudos aprofundados envolvendo tais ligações produzidas com aço de diferentes módulos de elasticidade devem ser realizados.

- (ii) Por outro lado, também de acordo com o estudo preliminar paramétrico, para ligações submetidas a cargas axiais de tração, os valores das resistências últimas normalizados pela temperatura ambiente formam praticamente a mesma curva obtida pelos fatores de redução do EC3 (EN 1993-1-2, 2003). Pode-se concluir que o uso das equações a temperatura ambiente propostas pelas normas técnicas EC3 (EN 1993-1-8, 2003) e ISO 14346 (2013) para o cálculo das resistências a altas temperaturas é aconselhável apenas mudando o valor da tensão de escoamento a 20 °C por aqueles reduzidos com o aumento de calor. Vale ressaltar que tal procedimento deve ser motivo de estudos mais aprofundados, principalmente através de ensaios experimentais, pois as ligações CHS-T estudadas inicialmente, apresentaram valores menores que os fatores de redução em todas as temperaturas envolvidas.
- (iii) Os parâmetros geométricos β e γ tem grande influência na resistência última das ligações. Nas ligações submetidas a cargas de compressão no montante, enquanto que com o aumento de β , a resistência tende a aumentar, com o aumento de γ , a resistência decresce. Já para ligações submetidas a cargas de tração, o aumento de β teve pouca influência, já com o aumento de γ , a resistência também diminuiu. O parâmetro α teve pouco efeito na capacidade última das juntas em ambos os casos.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores desta pesquisa agradecem a UERJ, ao CNPq e a CAPES pelo apoio financeiro e ao LabCIV (Laboratório de Computação da Faculdade de Engenharia Civil da UERJ) pelo suporte computacional.

REFERÊNCIAS

- Affonso, G.R.; Lima, L.R.O.; Freitas, A.M.S.; Vellasco, P.C.G.; Silva J.G.S. Comportamento de Ligações Tipo T entre RHS e CHS. In: CILAMCE, Ouro Preto, Brasil, 2011.
- Ansys v12.0®, ANSYS – Inc. Theory Reference, 2010.
- Chen, C.; Shao, Y.; Yang, J. Experimental and numerical study on fire resistance of circular tubular T-joints. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol 85, pp. 24-39, 2013.

European Committee for Standardization (CEN-2005). Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-2: General Rule- Structural Fire Design. ECP 3 1993-1-2, Brussels, Belgium, 2003.

European Committee for Standardization (CEN-2005). Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-8: Design of Joints. ECP 3 1993-1-8, Brussels, Belgium, 2003.

Gao, F.; Zhu, H.; Liu, X. Failure Behavior of Axially Loaded Tubular Y-Joints under Fire. *Advances in Structural Engineering*, vol 16, pp. 1523-1534, 2013.

International Organization for Standardization (ISO). ISO 14346:2013 - Static Design Procedure for Welded Hollow-section Joints – Recommendations. Switzerland, 2013.

Lu, L.H.; Winkel, G.D.; Yu, Y.; Wardenier, J. Deformation Limit for the Ultimate Strength of Hollow Sections. In: *Tubular Structures VI: Proceedings of the 6th International Symposium on Tubular Structures*. Melbourne, Australia, pp 341-347, 1994.

Meng, J.; Jincheng, Z.; Jing, C.; Daxu, Z. Experimental and Parametric Study on the Post-fire Behavior of Tubular T-joint. *Journal of Construction Steel Research*, vol 70, pp. 93-100, 2012.

Mohamed, M.A.; Shaat, A.A.; Sayed-Ahmed, E.Y. Through-bolts to Control Ovalization of CHS T-Joints under Brace Member Compressive Loads. In: *Tubular Structures XV: Proceedings of the 15th International Symposium on Tubular Structures*. Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

Oliveira, A.E.C.; Nobre D.S.; Lima L.R.O.; Vellasco P.C.G.; Silva J.G.S. Comportamento de Ligações Tipo T entre Perfis CHS Sujeitas a Esforços Axiais no Banzo. In: *CILAMCE*, Ouro Preto, Brasil, 2011.

Ozyurt, E.; Wang, Y.C.; Tan, K.H. Elevated Temperature Resistance of Welded Tubular Joints under Axial Loading the Brace Member. *Engineering Structures*, nº 59, pp. 574-586, 2014.

Santos, M.L.; Lima, L.R.O.; Freitas, A.M.S.; Vellasco, P.C.G.; Silva J.G.S. Comportamento de Ligações Tipo K entre RHS e CHS. In: *CILAMCE*, Ouro Preto, Brasil, 2011.

Shu-Bin, H.; Yong-Bo, S.; Hong-Yan, Z.; Dong-Ping, Y.; Feng-Le, L. Experimental Study on Circular Section (CHS) Tubular K-Joints at Elevated Temperature. *Engineering Failure Analysis*, vol 34, pp. 204-216, 2013.

Tan, K.H.; Fung, T.C.; Nguyen. Structural Behavior of CHS T-Joints subjected to Brace Axial Compression in Fire Conditions. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol 139, pp. 73-84, 2013.

Zhao, X. Deformation Limit and Ultimate Strength of Welded T-Joints in Cold-formed RHS Sections. *Journal of Construction Steel Research*, vol 53, pp. 149-165, 2000.