

## Consulta

De: angelo pontim <[engenharia@incase.com.br](mailto:engenharia@incase.com.br)>

Assunto: curvamento de tubo de troca térmica

Tenho o seguinte material: tubo de troca dia. 19,05mm espessura 1,65 mm SA-213-TP316L e menor raio de curvamento = 28,5mm.

- É requerido fazer tratamento térmico após curvamento? usando a tabela UHA-44 entendo que somente devo fazer tratamento caso temperatura de projeto seja acima de ~575 °C - esta correto meu entendimento? como a temperatura de projeto deste trocador é de 200°C não preciso fazer ?
- b- Qual a forma correta de verificar o alongamento de fibras?

## Resposta

1º- Primeiramente, o aço inoxidável austenítico 316L não consta na tabela UHA-44, pois, a Tabela 1A do ASME Scc II Parte D restringe a temperatura máxima para utilização a 454°C.

Assim, não é enquadrável na faixa de temperaturas acima de 580°C, dos aços inoxidáveis austeníticos da série 300, como indicado na Tabela UHA-44.

**TABLE 1A**

SECTION I; SECTION III, CLASSES 2 AND 3; \* SECTION VIII, DIVISION 1; AND SECTION XII  
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES S FOR FERROUS MATERIALS  
(\*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec No.	Type/Grade	Designation/ UNS No.	Condition/ Temper	Size/Thickness, mm	P-No.	Group No.
26	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316L	S31603	...	>125	8	1
27	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316L	S31603	...	>125	8	1
28	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-965	F316L	S31603	...	...	8	1

Line No.	Min. Tensile Strength, MPa	Min. Yield Strength, MPa	Applicability and Max. Temperature Limits (NP = Not Permitted) (SPT = Supports Only)				External Pressure Chart No.	Notes
			I	III	VIII-1	XII		
26	450	170	454	427	454	343	HA-4	G5, G34
27	450	170	454	NP	454	343	HA-4	G34
28	450	170	454	427	454	343	HA-4	G5, G34

**TABLE UHA-44**  
POSTFABRICATION STRAIN LIMITS AND REQUIRED HEAT TREATMENT

Grade	UNS Number	Limitations in Lower Temperature Range			Limitations in Higher Temperature Range		Minimum Heat-Treatment Temperature, °F (°C), When Design Temperature and Forming Strain Limits Are Exceeded [Notes (1) and (2)]
		For Design Temperature, °F (°C)		And Forming Strains Exceeding, %	For Design Temperature, °F (°C), Exceeding	And Forming Strains Exceeding, %	
		Exceeding	But Less Than or Equal to				
304	S30400	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	1,900 (1 040)
304H	S30409	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	1,900 (1 040)
304L	S30403	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	1,900 (1 040)
304N	S30451	1,075 (580)	1,250 (675)	15	1,250 (675)	10	1,900 (1 040)
309S	S30908	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	2,000 (1 095)
310H	S31009	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	2,000 (1 095)
310S	S31008	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	2,000 (1 095)
316	S31600	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	1,900 (1 040)
316H	S31609	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	1,900 (1 040)

2º- Mas, analisando, metalurgicamente, o código ASME requer TTAT-Tratamento Térmico de Alívio de Tensões, após a fabricação, para materiais acima de determinada espessura ou material ligado que seja suscetível a formar uma microestrutura martensítica (microestrutura de alta dureza).

O 316L é um aço inoxidável austenítico, Cr-Ni-Mo, não temperável, que não sofre alterações de fase quando soldado ou aquecido (permanece austenítico devido aos altos teores de elementos de austenização como o Níquel e ao baixo teor de Carbono), o que significa que não irá formar uma estrutura martensítica, com microdureza elevada na ZTA-Zona Termicamente Afetada, mesmo após resfriado.

Em geral, os inoxidáveis austeníticos, por ex. os da Tabela UHA-44, podem ser endurecidos por envelhecimento ou endurecidos após trabalho a frio (encruamento) ou quando permanecem em altas temperaturas por um longo período, daí o tratamento térmico preventivo indicado na Tabela UHA-44.

A soldagem de materiais que foram endurecidos deve ser precedida do tratamento térmico de solubilização, porque as tensões que ocorreriam no material são altas o suficiente para que a soldagem seja muito difícil e trincas ocorrerão.

Por outro lado, à luz do Código, quando a temperatura de projeto for menor que a tabelada na tabela UHA-44, não há o risco de encruamento ou de formação de precipitados nas regiões com algum encruamento, durante sua operação, mesmo que com a presença de alta deformação >20%.

3º- Assim, no seu caso específico, uso do material 316L, não é necessário o TTAT após o curvamento.

Contudo, esse tubo pode ficar sujeito a CST-Corrosão Sob Tensão se operar em um meio susceptível e aí é requerido o TTAT devido ao meio corrosivo.

Logo, é importante verificar quais são os fluidos e seus contaminantes que terão contato com o inox 316L, interna e externamente, e se há risco de CST.

No código ASME Sec II Part D Apêndice Não Obrigatório parágrafo A-350, há uma discussão sobre o uso de TTAT em aço inoxidável austenítico, para reduzir as chances de CST, em meios propícios a esse fenômeno.

Segundo este apêndice o TTAT seria feito na faixa de temperaturas em que o material se torna sensibilizado (logo há perda de resistência à corrosão), mas as tensões seriam reduzidas, evitando a corrosão em regiões com concentração de tensões elevadas.

Seguem abaixo as pesquisas feitas em fóruns técnicos, informados pelo engº Patrício da Petrobras, que você também pode consultar.

<http://www.eng-tips.com/viewthread.cfm?qid=410273>

<http://hghouston.com/resources/discussion-forums/forumid/5/postid/5143/scope/posts>

4º- Quanto ao cálculo da deformação, creio que pode ser feita com as expressões do parágrafo UHA-44:

(c) curvas de tubo e tube: o maior entre

$$\% \text{ deformação} = \frac{100r}{R}$$

ou

$$\% \text{ deformação} = \left( \frac{t_A - t_B}{t_A} \right) 100$$

Onde

R = raio nominal de curvatura para a linha de centro do tubo ou tube

r = raio externo nominal do tubo ou tube

tA = espessura média medida da parede da curva  
tB = espessura mínima medida da parede da curva

## ANEXOS

### Anexo 1

Consulta ao consultor engenheiro Adayr Borro Junior <[adayr@treinarsempre.com.br](mailto:adayr@treinarsempre.com.br)>, criador e coordenador do site Treinar Sempre, sobre aços inoxidáveis.

Questionamento:

Estão em fabricação várias curvas de tubo dobrado a frio de inox 316L para feixe tubular de permutador de calor: material SA-213-TP316L

tubo de diâmetro 19,05mm

espessura 1,65 mm

menor raio de curvamento = 28,5mm.

A temperatura de trabalho é 200°C.

A dúvida é se há risco de encruamento e necessidade de tratamento térmico de alívio de tensões, após a fabricação?

Acredito que o 316L é um aço inoxidável austenítico que não sofre alterações de fase quando soldado ou aquecido (permanece austenítico devido aos altos teores de elementos de austenização como o Níquel e ao baixo teor de Carbono), o que significa que não irá formar uma estrutura com microdureza elevada na ZTA-Zona Termicamente Afetada, mesmo após o trabalho a frio.

Assim, posso dispensar o TTAT-Tratamento Térmico de Alívio de Tensões, após a fabricação. Certo?

Resposta do consultor Adayr Borro Junior

Vc está correto, mas vc deve se ater ao fato de haver ou não uma especificação de projeto (cliente) exigindo ou não TTAT.

### Anexo 2

Segue a tradução livre dos parágrafos do ASME Sec VIII Div 1 envolvidos.

- UG-79 FORMING SHELL SECTIONS AND HEADS

UG-79 CONFORMAÇÃO DE SEÇÕES DO CORPO E DE TAMPOS

(a) Os limites se aplicam ao trabalho a frio de todos os aços carbono e baixa liga, ligas não ferrosas, aços de alta liga e aços ferríticos com propriedades de tração aumentadas pelo tratamento térmico [ver UCS-79 (d), UHA-44 (a), UNF-79 (a) e UHT-79 (a) (1)].

(b) Se as chapas forem laminadas, as bordas contíguas das juntas longitudinais dos vasos cilíndricos deverão ser moldadas em primeiro lugar para a curvatura adequada, rolando ou conformando preliminarmente, a fim de evitar trechos planos não desejáveis ao longo das juntas concluídas (ver UG-80).

(c) Quando a seção do corpo do vaso de pressão, tampos ou outras partes pressurizadas forem conformados a frio por outro fornecedor que não o fabricante do vaso, a certificação exigida para a peça deve indicar se a peça foi ou não tratada termicamente (ver UCS-79, UHA-44, UNF-79 e UHT-79).

- UCS-79 FORMING SHELL SECTIONS AND HEADS

UCS-79 CONFORMAÇÃO DE SEÇÕES DO CORPO E DE TAMPOS

a) Aplicam-se as seguintes disposições para além das regras gerais de conformação constantes do UG-79.

b) As chapas de aço Carbono e de baixa liga não devem ser conformadas a frio por forjamento.

(c) Placas de aço de carbono e de baixa liga podem ser conformadas por golpes a uma temperatura de forjamento, desde que os golpes não deformem a placa de maneira não desejável e sejam subsequentemente tratados termicamente após soldagem.

(d) As seções do corpo de vasos de pressão, tampos e outras partes pressurizadas, de chapas de aço carbono e de baixa liga fabricadas por conformação a frio devem ser submetidas a tratamento térmico posterior (ver UCS-56), quando o alongamento resultante da fibra extrema for superior a 5% da condição como laminado.

Para materiais P-No. 1 dos Grupos 1 e 2, o alongamento da fibra extrema pode ser tão grande quanto 40% quando nenhuma das seguintes condições existe:

- (1) O vaso conterá substâncias letais líquidas ou gasosas (ver UW-2).
- (2) O material não está isento de testes de impacto pelas regras desta Divisão ou o teste de impacto é requerido pela especificação do material.
- (3) A espessura da peça antes da conformação a frio excede 5/8 pol. (16 mm).
- (4) A redução por conformação a frio da espessura do material como laminado é superior a 10% em qualquer local onde o alongamento da fibra extrema exceda 5%.
- (5) A temperatura do material durante a conformação está na faixa de 250°F a 900°F (120°C a 480°C).

O alongamento das fibras extremas deve ser determinado pelas seguintes fórmulas:

Para curvatura dupla (por exemplo, tampos ou calotas),

$$\% \text{ alongação da fibra externa} = \frac{75t}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_o} \right)$$

Para curvatura única (por exemplo, corpos cilíndricos),

$$\% \text{ alongação da fibra externa} = \frac{50t}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_o} \right)$$

Onde

R<sub>f</sub> = raio final da linha de centro, pol ou mm

R<sub>o</sub> = raio original da linha de centro (igual a infinito para placa plana), pol ou mm

t = espessura da chapa, pol ou m

- UHA-44 REQUIREMENTS FOR POSTFABRICATION HEAT TREATMENT DUE TO STRAINING

REQUISITOS UHA-44 PARA O TRATAMENTO TÉRMICO PÓS-FABRICAÇÃO DEVIDO À DEFORMAÇÃO

UHA-44 (a) As seguintes regras devem ser aplicadas em adição às regras gerais para a conformação dada em UHA-40.

UHA-44 (a) (1) Se as seguintes condições prevalecerem, as áreas conformadas a frio dos componentes pressurizados, fabricados de ligas austeníticas, deverão ser solubilizadas por aquecimento nas temperaturas indicadas na Tabela UHA-44 por 20 min / in. (20 min / 25 mm) de espessura ou 10 min, o que for maior, seguido de resfriamento rápido:

(a) a temperatura de conformação está abaixo da temperatura mínima de tratamento térmico dada na Tabela UHA-44; e

(b) a temperatura de projeto do metal e as deformações excedem os limites mostrados na Tabela UHA-44.

UHA-44 (a) (2) As deformações devem ser calculadas da seguinte forma:

a) cilindros conformados a partir da chapa:

$$\% \text{ deformação} = \frac{50t}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_o} \right)$$

b) tampos esféricos ou côncavos conformados a partir de chapa:

$$\% \text{ deformação} = \frac{75t}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_o} \right)$$

(c) curvas de tubo e tube: o maior entre

$$\% \text{ deformação} = \frac{100r}{R}$$

OU

$$\% \text{ deformação} = \left( \frac{t_A - t_B}{t_A} \right) 100$$

Onde

R = raio nominal de curvatura para a linha de centro do tubo ou tube

Rf = raio médio após a conformação

Ro = raio original (igual ao infinito para uma placa plana)

r = raio externo nominal do tubo ou tube

t = espessura nominal da chapa, tubo ou tube antes da conformação

tA = espessura média medida da parede de tubo ou tube

tB = espessura mínima medida da parede da curva

UHA-44 (b) Quando as deformações não puderem ser calculadas como mostrado em (a) acima, o fabricante terá a responsabilidade de determinar a deformação máxima.

Para situações de risco de explosão, impacto ou graves distúrbios operacionais, o tratamento térmico de acordo com a Tabela UHA-44 deve ser aplicado, independentemente da quantidade de deformação.

TABLE UHA-44  
POSTFABRICATION STRAIN LIMITS AND REQUIRED HEAT TREATMENT

Grade	UNS Number	Limitations in Lower Temperature Range			Limitations in Higher Temperature Range		Minimum Heat-Treatment Temperature, °F (°C), When Design Temperature and Forming Strain Limits Are Exceeded [Notes (1) and (2)]
		For Design Temperature, °F (°C)		And Forming Strains Exceeding, %	For Design Temperature, °F (°C), Exceeding	And Forming Strains Exceeding, %	
		Exceeding	But Less Than or Equal to				
304	S30400	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	1,900 (1 040)
304H	S30409	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	1,900 (1 040)
304L	S30403	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	1,900 (1 040)
304N	S30451	1,075 (580)	1,250 (675)	15	1,250 (675)	10	1,900 (1 040)
309S	S30908	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	2,000 (1 095)
310H	S31009	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	2,000 (1 095)
310S	S31008	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	2,000 (1 095)
316	S31600	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	1,900 (1 040)
316H	S31609	1,075 (580)	1,250 (675)	20	1,250 (675)	10	1,900 (1 040)

NOTAS GERAIS:

(a) Os limites mostrados são para cilindros conformados por chapas, tampos esféricos ou côncavos conformadas a partir de chapas e curvas de tubos e tubes.

(b) Quando as deformações não puderem ser calculadas como mostrado em UHA-44 (a), os limites de deformação devem ser metade daqueles tabulados nesta Tabela. [ver UHA-44 (b)].

NOTAS:

(1) A taxa de resfriamento a partir da temperatura de tratamento térmico não está sujeita a limites de controle específicos.

(2) Embora as temperaturas mínimas de tratamento térmico sejam especificadas, recomenda-se que a faixa de temperatura de tratamento térmico seja limitada a 150°F (85°C) acima do mínimo 250°F (140°C) para 347, 347H, 347LN, 348 e 348H.

(3) Para curvas simples de tubos ou tubes cujo diâmetro externo é menor que 3,5 pol. (88 mm), esse limite é de 20%.

- ASME Sec II

NONMANDATORY APPENDIX A METALLURGICAL PHENOMENA

## A-350 HEAT TREATMENT OF AUSTENITIC CHROMIUM-NICKEL STEELS

Em reconhecimento à opinião controversa relativa aos efeitos do tratamento térmico pós-soldagem dos aços inoxidáveis austeníticos, os requisitos obrigatórios para tais foram omitidos.

A experiência de serviço é muito limitada para permitir a comparação entre a segurança relativa de soldagens de aço austenítico como soldado e o tratado termicamente após a solda, particularmente em seções espessas.

É reconhecido que a estabilidade dos aços austeníticos e seu comportamento ótimo em serviço são influenciados pelo tratamento mecânico e térmico que receberam; no entanto, é um princípio básico que as regras do Código destinam-se a fornecer requisitos mínimos de segurança para novas construções, não para cobrir a deterioração que pode ocorrer em serviço como resultado de corrosão, instabilidade do material ou condições operacionais incomuns, como fadiga ou choque.

Onde a máxima resistência à corrosão é necessária, é aconselhável que o tratamento térmico mantenha todos os carbonetos de cromo em solução. Para tal serviço, recomenda-se que o seguinte procedimento seja seguido: mantenha o vaso dentro da faixa de temperatura da solubilização prescrita pelas especificações de material em não menos que 1 h / 25,4 mm de espessura. Resfriar todas as partes do vaso de maneira uniforme e o mais rápido possível. O material não estabilizado com colúmbio ou titânio deve ser resfriado na faixa de 925°C a 540°C em não mais de 3 min. O resfriamento rápido deve continuar abaixo de 425°C. Taxas de resfriamento mais lentas podem ser satisfatórias para algumas composições do material e condições de serviço.

Aços inoxidáveis austeníticos podem ser endurecidos por envelhecimento ou endurecidos após trabalho a frio ou se permanecerem em altas temperaturas por um longo período.

A soldagem de materiais que foram endurecidos deve ser precedida do tratamento térmico de solubilização, porque as tensões que ocorreriam no material são altas o suficiente para que a soldagem seja quase impossível e trincas ocorrerão.