

ESTABELECIMENTO DE CRITERIOS PARA EVITAR A PERFURAÇÃO NA SOLDAGEM DE TUBULAÇÕES EM OPERAÇÃO

Guber Eduardo Guerrero Pérez

Aluno do curso de pós-graduação em Engenharia mecânica da UFSC

Universidade Federal de Santa Catarina.

Campus Universitário Cx postal 476, CEP 88040-900 – Florianópolis – SC

Carlos Enrique Niño

Professor do departamento de Eng. Mecânica – UFSC.

Resumo. *A instalação de conexões e o reparo de tubulações sem remove-las de operação são métodos bastante utilizados na manutenção de dutos, devido às evidentes vantagens econômicas e ambientais. Neste trabalho foi feito um estudo sobre o reparo por soldagem de dutos em operação com pequena espessura remanescente (3,2 e 4,8 mm), mediante a deposição automatizada de cordões de solda com eletrodo revestido básico. As temperaturas atingidas na superfície interna do tubo foram medidas com termopar e também estimadas utilizando equações analíticas de transferência de calor. Não ocorreu perfuração dos tubos quando a temperatura interna ficou abaixo de 1100 °C, confirmando assim o critério proposto pelo Instituto Battelle. Por outra parte, foi verificado que não podem ser prescritos limites de energia para evitar a perfuração, pois a mesma depende de outros fatores, em particular da corrente de soldagem.*

Palavras chaves: *soldagem em operação; perfuração; penetração.*

Keywords: *in-service repair welding; burnthrough; penetration.*

1. INTRODUÇÃO

A soldagem de tubulações em operação é realizada para reparar discontinuidades, reconstituir a espessura, instalar conexões ou interligar trechos de tubo sem paralisar o fornecimento do fluido. Nos últimos anos tem sido incrementado este tipo de intervenções a linha viva na Petrobras devido ao envelhecimento natural do parque de dutos e tubulações e, principalmente, pelo aumento da necessidade de interligar gasodutos a centros consumidores (termoelétricas, unidades industriais, postos de gás natural, etc).⁽⁵⁾

A soldagem em operação tem uma série de cuidados a serem tomados em seu planejamento e execução, já que este tipo de soldas, realizadas com fluxo interno, tem como agravante o resfriamento muito rápido da região da solda e, portanto, a iminência do trincamento a frio. Por conseguinte, é comum o emprego de eletrodos de baixo hidrogênio difusível para evitar as trincas. Portanto, é comum o emprego de eletrodos de baixo hidrogênio difusível para evitar trincas. Por outro lado, há o risco de perfurar a tubulação com o arco de solda quando se trata de baixas espessuras remanescentes. Em função disso, as alternativas a serem usadas neste tipo de reparo são o controle do aporte térmico e o uso de passes de revenimento.

Este trabalho apresenta o estudo da influência dos parâmetros de soldagem na penetração e na perfuração de dutos quando empregado o processo de soldagem por eletrodo revestido com consumível tipo básico (E7018) para o reparo ou intervenção de dutos em operação.

2. PROBLEMAS DA SOLDAGEM DE DUTOS EM OPERAÇÃO

O fenômeno de perfuração (burnthrough) ocorre devido a que a área não fundida logo abaixo da poça de fusão não tem a suficiente resistência para conter a tensão proveniente da pressão interna da tubulação⁽²⁾, ocasionando o vazamento do produto que está sendo escoado, que eventualmente pode ser tóxico ou inflamável. A perfuração é governada pela espessura local do duto, a penetração da solda e as condições operacionais da tubulação. O risco de perfuração diminui à medida que se reduz a penetração da solda, (pelo controle apropriado do aporte térmico) e aumenta a espessura da parede da tubulação onde está sendo efetuada a intervenção por soldagem.

Nos estudos do Instituto Batelle⁽³⁾ foi concluído que a perfuração é iminente quando a temperatura na superfície interna da tubulação que está sendo soldada alcança valores superiores a 1260 °C. Para aumentar a margem de segurança, foram então arbitrados limites de temperatura interna de parede menores: 980 °C para eletrodos de baixo hidrogênio e 760 °C para eletrodos celulósicos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nos experimentos do presente trabalho foram utilizadas seções de tubulação de aço AISI 1020 de 4,0 polegadas de diâmetro e comprimento de 250 mm. As soldas foram feitas por simples deposição na direção longitudinal, com eletrodos revestidos básicos E7018. Os eletrodos foram previamente ressecados a 300 °C durante 1 hora e mantidos em estufa até o seu uso.

A superfície dos tubos foi limpada com solvente e a carepa removida por esmerilhamento.

A bancada de soldagem (mostrada na figura 1), é constituída por um sistema automático de soldagem de eletrodo revestido estando composto por um dispositivo de mergulho do eletrodo, cujo servomotor é alimentado por um cabeçote de soldagem adaptado, de modo a manter a tensão do arco no valor ajustado. A velocidade de soldagem é controlada mediante um sistema de deslocamento linear acionado por motor de passo.

Nos ensaios foi utilizada uma fonte transistorizada dotada de placa de aquisição de sinais, a qual foi conectada a um computador para a aquisição dos sinais de tensão e de corrente, assim como o cálculo dos seus valores eficazes.

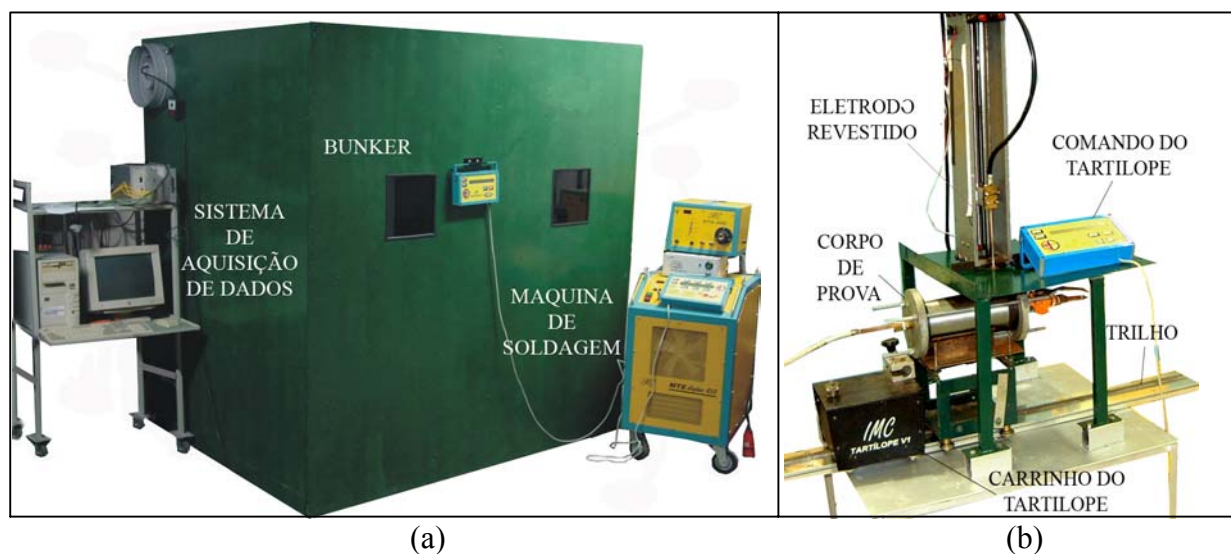


Figura 1. a) Vista geral da banca de soldagem; b) detalhe do sistema de deslocamento do eletrodo, alojado dentro do bunker.

Foram feitas seções transversais dos cordões de solda, as quais foram polidas, atacadas com Nital 2% e, depois, fotografadas em lupa estereoscópica utilizando uma câmera digital. A imagem obtida foi inserida num software de desenho, para a medição das dimensões do cordão e ZAC, como mostram os esquemas da figura 2.

Para estimar a temperatura atingida na superfície interna do tubo (isto é, do lado oposto ao arco), foram utilizadas as soluções analíticas de Santos ⁽¹⁾ para transferência de calor com fontes distribuídas, considerando a transferência por convecção nas duas superfícies do tubo. A metodologia de cálculo foi a seguinte:

- 1- Com as dimensões da ZAC visível e a energia de soldagem correspondente, foram estimadas as características da fonte de calor (eficiência térmica η , e parâmetro de distribuição σ).
- 2- Com as características da fonte e o valor de energia, foi calculada a distribuição de temperaturas de pico na região da solda e, especificamente, a temperatura máxima atingida na superfície interna do tubo.

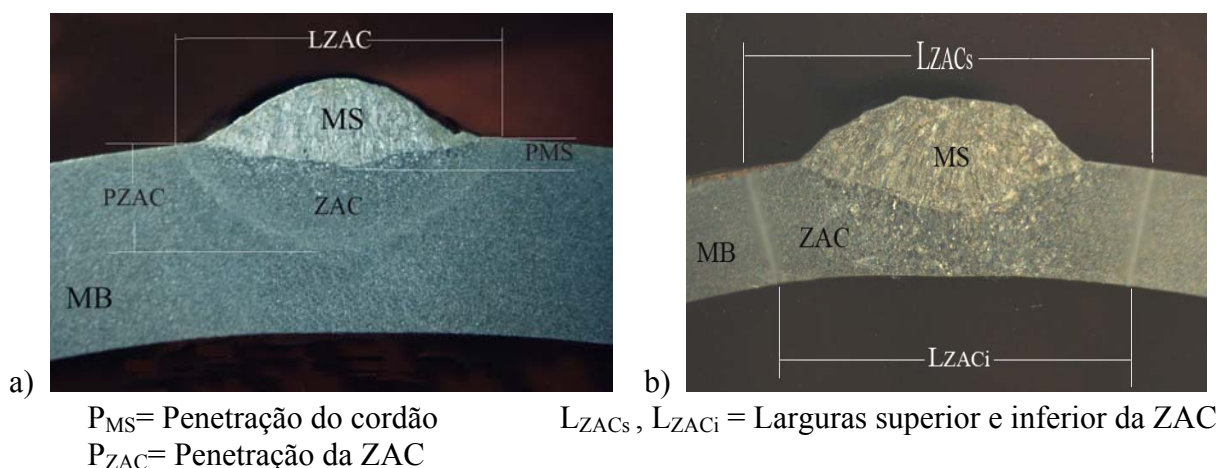


Figura 2. Esquemas das dimensões do cordão e ZAC medidas em duas situações: a) penetração da ZAC < espessura; b) penetração da ZAC > espessura.

O uso dessas soluções analíticas é justificado por facilitar a avaliação da temperatura interna, além de permitir estudar a relação da mesma com outras variáveis, como as condições de soldagem, o nível de penetração e a geometria da ZAC. Entretanto, para verificar a precisão das soluções de Santos e dos valores utilizados para as propriedades termofísicas nas mesmas, em primeira instância foram realizados ensaios que permitiram comparar os valores de temperatura previstos com aqueles medidos com termopar.

Para tal, foram soldadas as junções de 4 termopares tipo K (Chromel-Alumel) sobre a superfície interna do tubo, utilizando descarga capacitiva. Foram depositados cordões com um valor de corrente constante, sendo que a velocidade de soldagem foi variada a cada trecho de 50 mm (o centro de cada trecho correspondia ao local onde havia um termopar). Depois, foram feitas seções transversais aos cordões, coincidindo com o local do termopar, para permitir a medição das dimensões da ZAC e a aplicação das soluções de Santos, da forma em que foi descrito anteriormente. Nesses ensaios, ao todo, foram registrados 14 ciclos térmicos, correspondentes a soldagens com energias entre 3,7 e 8,2 kJ/cm.

Nos experimentos realizados para avaliar a perfuração foram utilizadas as seguintes condições:

- Velocidades de soldagem na faixa de 14 a 22 cm/min.
- Correntes na faixa de 65 a 160 A.
- Tensões na faixa de 20 a 30 V.
- Eletrodos revestidos E7018, com diâmetros de 2,0; 2,5; 3,2 e 4,0 mm.
- Seções de dutos de aço ABNT 1020 com espessuras de 3,2 e 4,8 mm.
- Não foi utilizado preaquecimento.
- O resfriamento da solda foi por convecção livre (ar calmo).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1 são apresentados os resultados dos ensaios realizados para verificar a precisão das soluções analíticas de Santos ⁽¹⁾. Para o aço ABNT 1020 do tubo, o limite da ZAC visível corresponde à temperatura de transformação dinâmica Ac1, que é aproximadamente 765 °C. A comparação dos valores de temperatura na superfície interna do tubo é feita mediante a figura 3, na qual pode ser observado que os valores estimados são bastante próximos dos medidos, havendo, em geral, uma pequena diferença (de 20 a 25 °C). Para conseguir uma maior coincidência dos valores teóricos e experimentais não se justifica o ajuste dos valores utilizados nas equações de Santos, haja vista que ao usar o termopar é de se esperar que a temperatura medida seja um pouco menor que a real, pois no local onde efetivamente é medida a tensão gerada pelo mesmo (zona de ligação dos fios do termopar com a junção) a temperatura deve ser menor que na superfície, devido às perdas de calor para o ambiente e para os próprios fios do termopar.

Tabela 1- Dimensões da ZAC, valores calculados pelas soluções de Santos (características da fonte de calor e temperatura atingida na superfície) e temperaturas medidas com termopar.

CP	Energia (kJ/cm)	Largura ZAC		Caracterist. fonte calor		Temper. superfície	
		Superior	Inferior	η	σ	Calculada	Medida
S01	3,74	7,75	5,38	0,586	2,231	881	912
S02	3,74	7,53	5,12	0,573	2,101	926	911
S03	4,72	10,68	10,09	0,554	2,750	926	908
S04	4,72	8,82	6,83	0,447	2,735	920	911
S05	5,05	11,05	10,05	0,650	2,998	1057	1065
S06	5,17	10,46	9,37	0,531	2,980	1174	1141
S07	5,17	11,23	10,66	0,533	3,050	1159	1132
S08	5,79	11,74	10,54	0,511	4,017	1100	1082
S09	6,09	11,39	9,82	0,490	4,293	1081	1051
S10	6,09	12,29	11,67	0,558	3,336	1212	1178
S11	6,34	12,45	11,15	0,493	4,474	1190	1165
S12	6,34	10,82	9,84	0,466	3,123	1147	1111
S13	6,39	12,21	10,80	0,523	4,362	1182	1153
S14	8,24	13,31	11,17	0,477	2,530	1245	1236

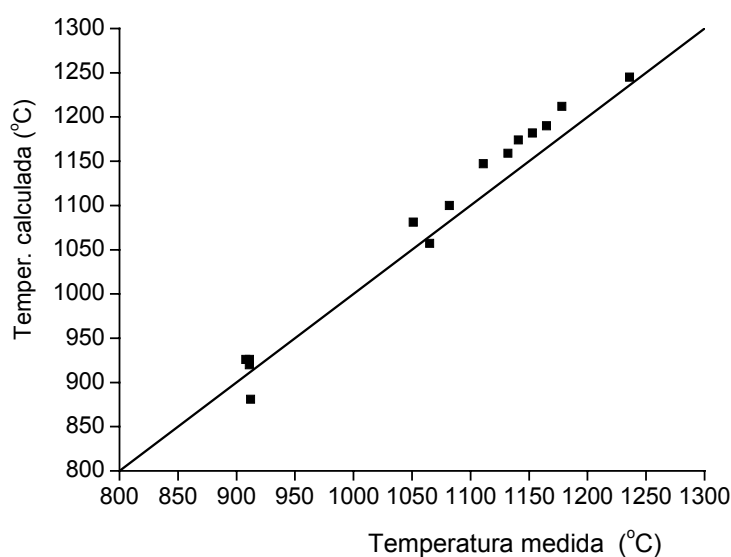


Figura 3- Relação entre as temperaturas medidas com termopar e as estimadas usando as soluções analíticas de Santos ⁽¹⁾.

Nas tabelas 2 e 3 são apresentadas as condições de ensaio, as dimensões do cordão e ZAC e as temperaturas da superfície avaliadas com base na isoterma Ac1, para os ensaios feitos em tubos com espessuras de 3,2 e 4,8 mm, respectivamente. Como nos 12 ensaios previamente definidos para a espessura de 4,8 mm nenhum apresentou perfuração, foram realizados outros 9 ensaios com aportes térmicos maiores.

Desses resultados pode ser observado que não ocorreu perfuração nas soldagens em que a temperatura interna máxima do tubo ficou abaixo de 1100 °C. Isto confirma o critério estabelecido nos estudos do Instituto Battelle⁽³⁾, pelo menos para as condições utilizadas nos ensaios (soldagem com eletrodo básico, com o interior do tubo à pressão atmosférica).

Tabela 2- Condições de soldagem em tubos de 3,2 mm, dimensões do cordão e ZAC e temperaturas estimadas na superfície.

CPs	Corrente eficaz (A)	Tensão eficaz (V)	Veloc. soldag. (cm/min)	Energia (kJ/cm)	Penetração do cordão (mm)	Dimensões da ZAC (mm)_			Temperatura superfície (°C)
						Profundid	Largura superior	Largura inferior	
E01	62	21,1	14,2	5,53	0,7	>3,2	9,6	8,2	1009
E02	65	22	14,2	6,04	1,1	>3,2	11,0	9,8	1034
E03	82	21,3	14,2	7,38	1,6	>3,2	13,8	13,0	1089
E04	54	24,5	22,0	3,61	0,5	>3,2	6,8	3,4	854
E05	67	24,8	22,0	4,53	1,3	>3,2	7,8	6,4	1032
E06	84	23,4	22,0	5,36	1,2	>3,2	10,2	8,6	1011
E07	88	20,1	14,2	7,47	2,3	>3,2	14,2	12,6	1108
E08	94	23,1	14,2	9,17	Perfurou	>3,2	—	—	—
E09	112	24,5	14,2	11,59	Perfurou	>3,2	—	—	—
E10	81	24,4	22,0	5,39	1,1	>3,2	10,2	8,8	1042
E11	98	27,5	22,0	7,35	1,7	>3,2	12,4	11,2	1050
E12	113	24,7	22,0	7,61	Perfurou	>3,2	—	—	—

Tabela 3- Condições de soldagem em tubos de 4,8 mm, dimensões do cordão e ZAC e temperaturas estimadas na superfície.

CPs	Corrente eficaz(A)	Tensão eficaz(V)	Veloc. soldag. (cm/min)	Energia (kJ/cm)	Penetração do cordão (mm)	Dimensões da ZAC (mm)_			Temperatura superfície (°C)
						Profundid	Largura superior	Largura inferior	
E13	79	22,8	14,2	7,61	1,1	>4,8	11,4	6,4	853
E14	98	24,1	14,2	9,98	1,5	>4,8	13,2	10,4	973
E15	117	22,2	14,2	10,97	2,2	>4,8	16,0	13,4	969
E16	84	20,5	22,0	4,70	0,8	2,9	8,6	—	719
E17	96	24,4	22,0	6,39	1,3	>4,8	10	4	832
E18	117	24,5	22,0	7,82	2,1	>4,8	11	7,4	942
E19	98	22	14,2	9,11	1,4	>4,8	12,2	9,4	970
E20	120	22,3	14,2	11,31	2,0	>4,8	15,4	12,4	940
E21	136	26,6	14,2	15,29	2,2	>4,8	17,6	14,8	920
E22	94	23,6	22,0	6,05	0,8	>4,8	10,2	1,6	793
E23	114	25,2	22,0	7,83	1,3	>4,8	11,6	7,2	903
E24	133	23,9	22,0	8,67	1,8	>4,8	13,2	10,4	1012
E25	99	24,2	9,2	15,62	2,2	>4,8	18,4	15,4	850
E26	116	25,1	9,2	18,99	3,2	>4,8	21,2	19,4	1100
E27	136	25,3	9,2	22,44	Perfurou	>4,8	—	—	—
E28	118	25,4	9,2	19,55	2,7	>4,8	19,2	16,2	824
E29	135	27,3	9,2	24,04	Perfurou	>4,8	—	—	—
E30	159	25,3	9,2	26,24	Perfurou	>4,8	—	—	—
E31	117	25,4	14,2	12,56	1,5	>4,8	18,2	15,0	837
E32	136	26	14,2	14,94	2,2	>4,8	19,2	17,8	1086
E33	160	28,6	14,2	19,34	Perfurou	>4,8	—	—	—

Na figura 4 está graficada a temperatura da superfície em função da energia de soldagem, junto com uma reta ajustada aos dados por regressão de mínimos quadrados. Pode ser observada a elevada dispersão dos valores e a baixa correlação R (que foi de 0,83 e 0,40 para os ensaios em tubos de 3,2 e 4,8 mm, respectivamente). Com base nisso, pode ser concluído que carece de fundamento a especificação de limites de energia como critério para evitar a perfuração.

A anterior conclusão pode ser reforçada pelo fato de que com alguns níveis de energia que foram repetidos nos ensaios, em algumas ocasiões ocorreu perfuração e em outras não. Por exemplo, no CP E12, soldado com 7,6 kJ/cm, houve perfuração (veja a tabela 2), enquanto que nos CPs E03, E07 e E11, soldados com níveis similares de energia, não ocorreu perfuração.

Então, pode ser afirmado que a perfuração não depende diretamente da energia, mas das condições de soldagem. Especificamente, com o aumento da corrente aumenta a penetração devido, pelo menos em parte, a que cresce a pressão exercida pelo plasma sobre a poça fundida. Com isso, o calor do arco é transferido mais eficientemente para a peça.

Esse efeito da corrente pode ser verificado ao comparar as macrografias de duas soldas realizadas com a mesma energia (figura 5), mas com correntes diferentes.

Na figura 6 é mostrada a penetração em função da energia. De forma similar a como foi observado com a temperatura, a dispersão observada é alta e a correlação baixa (R de 0,817 e 0,877 para as soldagens em tubos de 3,2 e 4,8 mm, respectivamente).

A partir de dados experimentais podem ser elaborados modelos que relacionem a penetração com as condições de soldagem. Por exemplo, utilizando parâmetros constituídos de potências das variáveis de soldagem de maior influência. Assim, utilizando como parâmetro $I^{1,2}/v^{0,4}$ (que traduz a maior influência da corrente do que a velocidade de soldagem), de forma similar a como é relatado por McGlone ⁽⁴⁾, a correlação obtida entre a penetração e o parâmetro melhora (veja a figura 7, para as soldagens em tubo de 3,2, com coeficiente R=0,885).

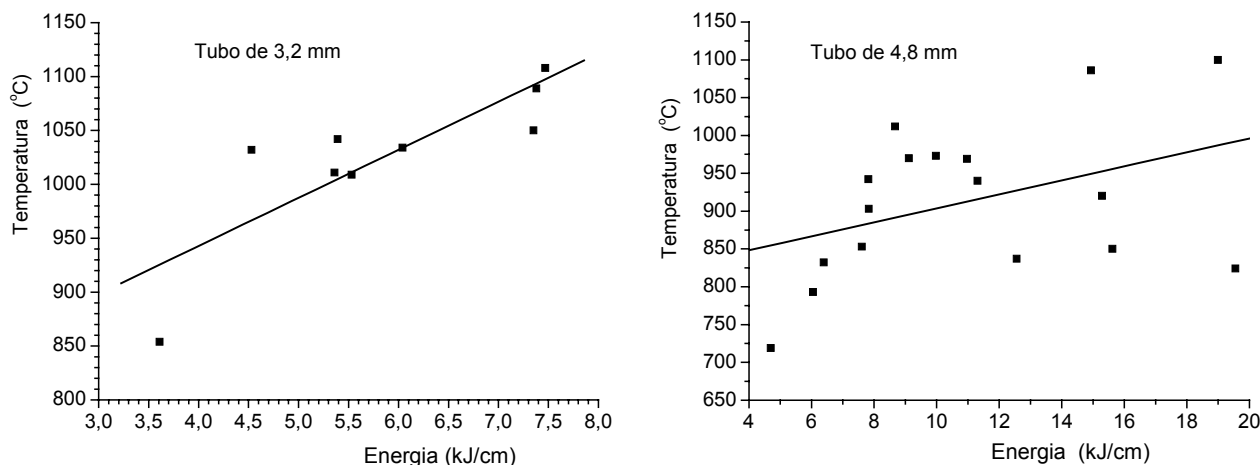


Figura 4. Temperatura interna do tubo em função da energia de soldagem

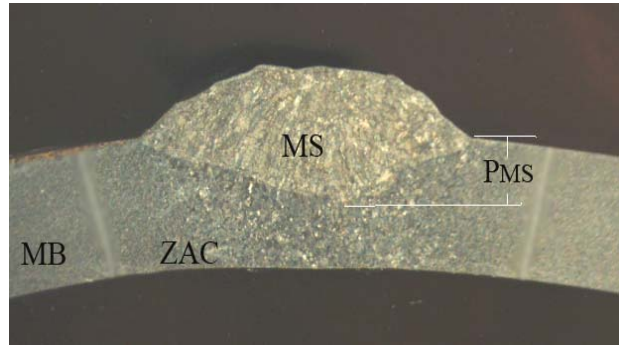
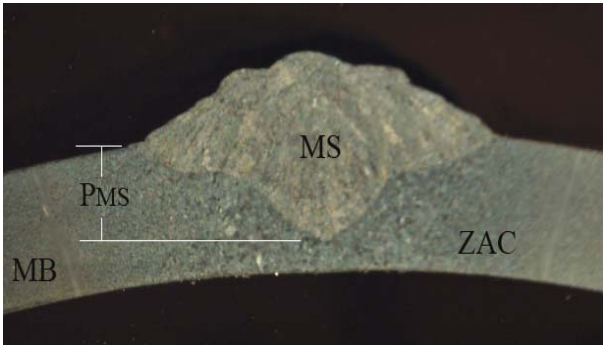


Figura 5. Macrografias de duas soldas realizadas com energia de 7,4 kJ/cm: a) penetração 2,3mm e temperatura interna de 1108°C; b) Penetração 1,7mm e temperatura interna de 1050°C

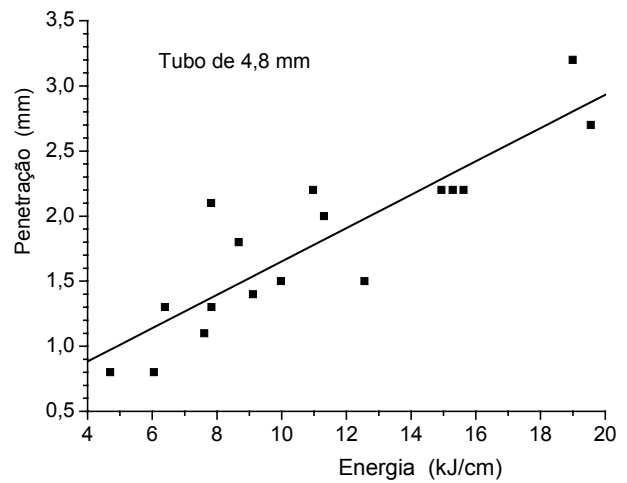
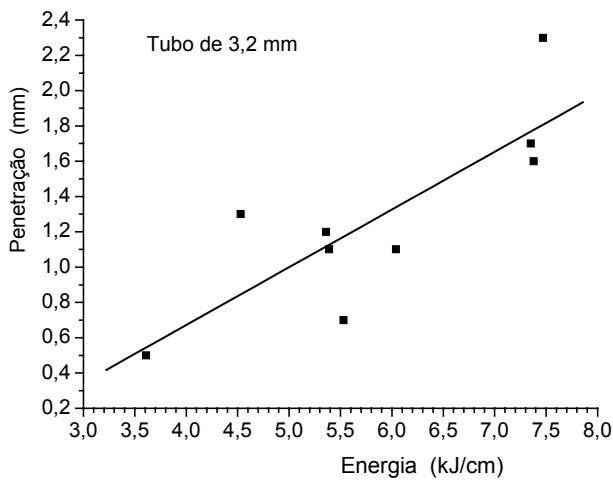


Figura 6. Penetração do cordão em função da energia de soldagem

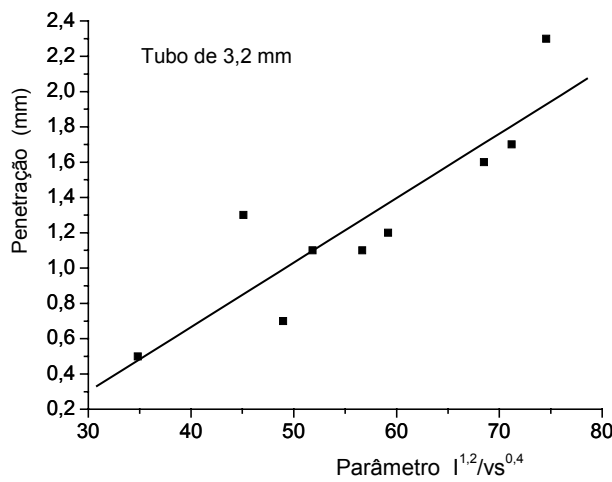


Figura 7. Penetração do cordão em função do parâmetro $I^{1,2}/v^{0,4}$

CONCLUSÕES

As soluções analíticas para transferência de calor em soldagem desenvolvidas por Santos ⁽¹⁾ permitiram estimar com precisão as temperaturas máximas atingidas na parede interna do tubo durante a soldagem.

O critério estabelecido pelo Instituto Battelle para evitar a perfuração (temperatura interna menor que 1260 °C) foi confirmado, pois não ocorreu perfuração nas soldas que apresentaram temperaturas de até 1100 °C.

Não é correto fixar um limite de energia para evitar a perfuração na soldagem de uma certa espessura e condições de operação do fluido, pois foi verificado que para um mesmo nível de energia pode ou não ocorrer perfuração, em função das condições específicas de soldagem.

Para um mesmo nível de energia, tanto a temperatura na superfície interna como a penetração aumentam com a corrente de soldagem, em função do aumento da eficiência na transferência de calor do arco para a peça.

5. AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina, que possibilitou a realização dos ensaios em seus laboratórios.

À equipe de trabalho do laboratório de soldagem, Labsolda, pelo apoio técnico e humano.

6. REFERÊNCIAS

Dissertações e teses

1. SANTOS, A. **Condução de calor na soldagem com pulsação térmica**. Tese de Doutorado, Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFSC- Florianópolis, abril de 2002.

Artigos de revista

2. BRUCE, W.A; Swatzel J. F; Dorling D. V. **Direct weld deposition repair of pipeline defects In: First International Conference on Welding onto In Service Petroleum gas and liquid pipelines**. March 2000, Wollongong.
3. BRUCE, W.A. **Overview of in-welding service research at EWI In: First International Conference on Welding onto In Service Petroleum gas and liquid pipelines. March 2000**, Wollongong.
4. MCGLONE, J.C. **Weld bead prediction- a review**. Metal Construction, July 1982, p.378-384.
5. PISA, M.T.P. **Procedimentos para soldagem de dutos e tubulações industriais em operação**. Relatório técnico final – PETROBRAS, 2000.

ESTABLISHING CRITERIA FOR BURNTHROUGH ON PIPELINES IN-SERVICE WELDING.

The installation of connections and the in-service repair of pipelines are common used methods of maintenance because of their economic and environmental advantages. On this paper, results of the in-service weld repair of pipes with a very thin residual wall (3,2 and 4,8 mm) are presented: weld beads were automatic deposited by the process SMAW. The achieved internal surface temperatures weres measured with a thermocouple and estimated using heat transfer analytic equations. Tube puncture was not observed when the internal temperature was under 1100 °C, confirming the criteria proposed by the Institute Battelle. Otherwise, it was verified that energy limits cannot be prescribed to avoid puncture, because they depend on weld current and other factors.

Keywords: in-service repair welding; burnthrough; penetration.