

APLICAÇÃO DA ASPERSÃO TÉRMICA NA RECUPERAÇÃO DE ESPESSURA NA SOLDAGEM EM OPERAÇÃO DO AÇO CARBONO SAE 1020 E AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

Nilceu Novicki

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET-PR, Coordenação de Eletromecânica, Medianeira, PR, Brasil; nilceu@yahoo.com.
Doutorando UFSC, bolsista do CNPQ-Brasil.

Augusto J. A. Buschinelli

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, Brasil; buschi@emc.ufsc.br

Ramon Cortés Paredes

Universidade Federal do Paraná – UFPR, Departamento de Engenharia Mecânica, Curitiba, PR, Brasil; ramon@demec.ufpr.br

Resumo. *A soldagem em operação é uma técnica freqüentemente empregada no reparo ou modificação de tubulações, com significativas vantagens econômicas, visto que evita as perdas oriundas da interrupção do serviço e garante a continuidade no fornecimento de fluido. Na aplicação da técnica, as principais dificuldades envolvidas são as trincas a frio, cuja possibilidade de ocorrência é aumentada pelas maiores taxas de resfriamento impostas pelo escoamento de fluido e, em especial, o risco de perfuração da parede da tubulação pelo arco voltáico, eventualmente com sérios danos ao soldador e ao meio ambiente. Este trabalho traz resultados promissores sobre uma via alternativa de reparo de dutos de pequena espessura remanescente, onde se propõe uma recuperação preliminar da espessura da parede através do depósito de camadas aspergidas termicamente, seguida de posterior revestimento por soldagem com eletrodos revestidos. Ensaios realizados em chapas de aço inoxidável AISI 304 e de aço SAE 1020, previamente revestidas com material aspergido pelo processo a arco-elétrico, demonstraram a viabilidade e a vantagem desse procedimento, na medida que reduz a penetração e conseqüentemente o risco de perfuração pelo arco numa posterior soldagem em operação. São comparados os valores das espessuras remanescentes não fundidas das chapas com e sem revestimento por aspersão, para testes estritamente controlados de soldagem, executados sob parâmetros selecionados a partir de experimentos realizados pelo Instituto Battelle. Adicionalmente, os resultados positivos da soldagem com eletrodos revestidos, diretamente sobre a camada no estado como aspergido, permitiram descartar como desnecessária a etapa intermediária de refusão do material aspergido com passes TIG.*

Palavras-chave: *soldagem em operação, aspersão térmica, reparo de dutos*

1. INTRODUÇÃO

Uma das técnicas comumente empregada na modificação, reparo ou expansão da malha de dutos, é a soldagem realizada com a tubulação em operação, que permite a intervenção sem interromper o escoamento do fluido. As vantagens de uma soldagem nestas condições, ainda que algumas situações exijam redução na vazão e/ou pressão, além de evidentemente econômicas, têm

reflexos ambientais, sendo desnecessários a selagem e desgaseificação dos dutos antes de ser executada a soldagem.

No Brasil, os serviços de soldagem em operação têm sido realizados pela Petrobrás há pelo menos trinta anos, seja pela necessidade de interligação de tubulações e troca de trechos, ou para reparo de descontinuidades, através do uso de calhas de reforço, ou deposição direta de metal de solda sobre regiões que apresentam perda de espessura localizada. Porém, nos últimos cinco anos evidencia-se um elevado incremento na execução desta modalidade de serviço, tanto pelo envelhecimento natural do parque de dutos como pela necessidade de interligação de gasodutos a centros consumidores (termoelétricas, petroquímicas, postos de gás natural, entre outros) [Paes et al]⁽¹⁾.

A tecnologia existente e a experiência estão relacionados principalmente com o reparo de tubos de parede espessa (maior ou igual a 6 mm) e de aços de baixa resistência [Bruce]⁽²⁾. Entretanto existe uma necessidade crescente de realizar soldagens em operação e, cada vez mais, em tubos de parede fina. Isto teria duas razões: i) porque as tubulações instaladas há várias décadas, fabricadas em aço de menor resistência e sem meios adequados de proteção contra a corrosão, apresentam perdas significativas de material, e portanto, espessuras remanescentes pequenas; ii) à medida que se utilizam aços de maior resistência, diminui também a espessura da parede das tubulações a serem soldadas. Como recurso alternativo à recuperação de tubulações ou dutos com perda acentuada de espessura, está sendo estudada a utilização da aspersão térmica, que não introduz aquecimento severo no material base, além de não gerar tensões residuais elevadas após a deposição, e com isso minimiza os riscos de perfuração. O objetivo é revestir/amanteigar por aspersão térmica, superfícies corroídas, trincadas ou desgastadas, para posterior soldagem em operação. Os processos a serem testados são a chama convencional e arco elétrico.

Este trabalho traz resultados promissores de ensaios sobre chapas de espessura reduzida, onde em aços carbono SAE 1020 e em aços inoxidáveis austeníticos AISI 304, foram depositados cordões de solda através do processo de soldagem a arco com Eletrodo Revestido (ER) sobre uma camada de revestimento previamente aspergida. Adicionalmente, mostrou-se como desnecessária uma etapa intermediária de refusão do amanteigamento através de passes TIG.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais de Base

Os ensaios foram realizados sobre chapas de aços carbono SAE 1020 e inoxidável austenítico AISI 304, respectivamente, com 3,2 e 3,0 mm de espessura, recortadas em corpos de prova nas dimensões de 150 x 150 mm. A textura necessária para a aplicação do revestimento por aspersão térmica foi obtida através de jateamento abrasivo com óxido de alumínio de grana 26, até atingir a rugosidade R_a entre 4 e 5 μm . Posteriormente à texturização, as chapas foram parcialmente aspergidas, mantendo-se 75 x 150 mm sem revestimento, região onde foram iniciados os cordões, conforme indicado na Figura 1.

2.2 Parâmetros e Materiais para Aspersão Térmica

Foram utilizados para os revestimentos por aspersão térmica, os seguintes arames sólidos: as ligas E70S6 e E309L, como material similar às chapas; e ligas a base de Níquel 06T Nickel e AS-751, esta contendo FTC (Fused Tungsten Carbide), nas chapas de aço inoxidável. A Tabela 1 indica a composição química das ligas fornecida pelos fabricantes, sendo que a 06T possui 99 % de Níquel, com traços de C, S, Fe, Si, Co e Cu.

Para a aspersão a arco elétrico, realizada no Laboratório de Aspersão da Universidade Federal do Paraná, foi utilizada uma fonte Sulzer Metco ValueArc 300E. O revestimento a chama, com uma pistola Metco 012, foi aspergido na empresa Revesteel, em Pinhais-PR, com um arame de diâmetro 3,2 mm; pressão do oxigênio 0,5 MPa e do acetileno 0,2 MPa; para o ar considerou-se 0,7 MPa. Os parâmetros do processo a arco estão indicados na Tabela 2.

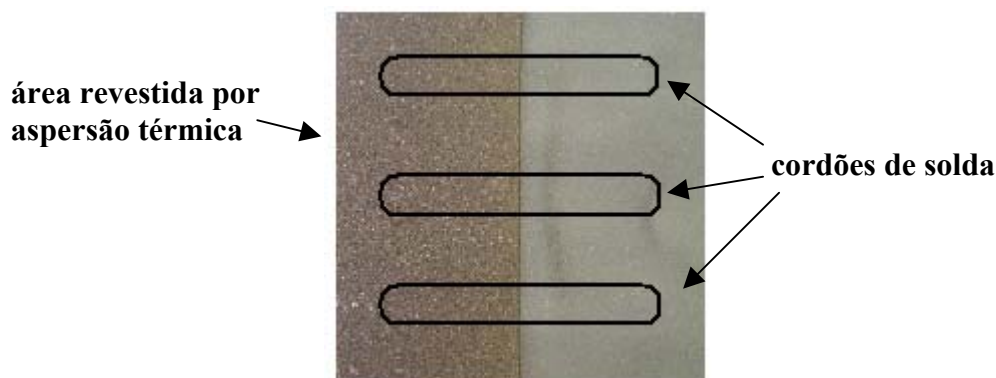


Figura 1. Esquema da disposição dos cordões de solda sobre chapa com área revestida por aspersão térmica de 75 x 150 mm

Tabela 1. Composição química dos arames utilizados na aspersão térmica (% em peso).

	C	Si	B	P	Cu	S	Cr	Ni	Mn	FTC	Base
E70S6	0,06–0,15	0,8–1,15	-	0,025	0,5	0,025	-	-	1,4–1,85	-	Fe
E309L	0,03	0,58	-	-	-	-	23,1	12,9	1,73	-	Fe
AS751	0,4	4 - 5	1,7–2,0	-	-	-	-	-	-	50	Ni

Tabela 2. Parâmetros utilizados na aspersão de arame a arco elétrico.

Arame	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Distância (mm)	Pressão (MPa)
AS-751	1,6	100	32	100	0,5
E70S6	1,6	150	32	150	0,48

Para o aço carbono foram aspergidas placas pelos processos a arco e a chama, com espessura de revestimento (e) entre 140 e 260 μm a arco, e aproximadamente 1,6 mm a chama. Para o aço inoxidável AISI 304, somente o processo a arco foi testado com e entre 300 e 500 μm .

2.3 Parâmetros e Materiais de Soldagem

Foram utilizados nas chapas de aço carbono, consumíveis de baixo hidrogênio E7018 com 2,5 mm de diâmetro, armazenados em estufa com temperatura controlada de 50°C. Para os cordões depositados sobre chapa de aço inoxidável AISI 304 foram usados eletrodos E309L. As composições químicas dos respectivos eletrodos revestidos estão apresentadas na Tabela 3 (dados do fabricante).

Tabela 3. Composição química dos eletrodos revestidos E7018 e E309L como soldados (% em peso).

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
E7018	0,05	1,30	0,50	0,010	0,010	-	-
E309L	0,03	1,32	0,41	-	-	23,00	13,50

Até o momento, foram testadas quatro situações: aspersão a arco em AISI 304 e SAE 1020 com posterior deposição de material por processo ER; aspersão a arco em SAE 1020 seguida de passe TIG e deposição de solda por processo ER; e revestimento aspergido a chama convencional novamente com depósito de metal de solda por ER. Como parâmetros de soldagem TIG e ER, observados na Tabela 4, foram adotados valores a partir de experimentos realizados pelo Instituto Battelle⁽³⁾ e outros trabalhos, como os de Bruce⁽⁴⁾ para o EWI. Todas as soldagens foram realizadas em bancada construída que permite a automatização do processo Eletrodo Revestido, mantendo a tensão de arco constante mediante o controle da velocidade de avanço. A Figura 2 mostra uma vista da bancada.

Em cada chapa foram depositados três cordões de 13 cm de comprimento, com deslocamento a partir da área não aspergida para a região de aspersão, mantendo desta forma os parâmetros de soldagem sobre as duas regiões.

Após a soldagem, os cordões foram cortados transversalmente sendo retiradas seis amostras de cada para metalografia: três referentes à região aspergida, e três do cordão depositado diretamente sobre a chapa. Para o corte, foram desprezados os 2,0 cm iniciais e finais de cada cordão. Após preparação metalográfica, foram analisados em microscopia ótica e estereoscópio, e com auxílio de Autocad, medida e avaliada como referência do efeito da aspersão, a distância entre o final da poça de fusão e a superfície posterior da chapa. Esta Espessura Remanescente Não Fundida (ENF) está definida na Figura 3.

Tabela 4. Parâmetros de soldagem utilizados nos processos TIG e ER.

Processo	Corrente CC ⁺ (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)	Aporte (kJ/cm)
TIG	88 - 92	10 - 11	17	3,1 - 3,5
ER	75 - 85	24 - 29	17	6,9 - 7,7

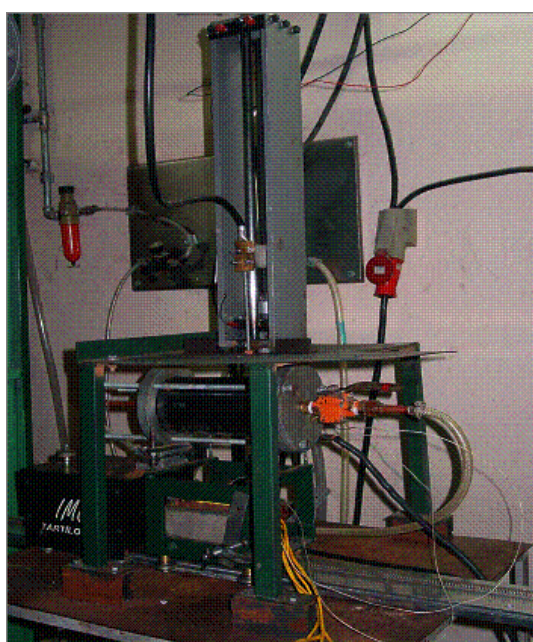


Figura 2. Bancada semi-automática de soldagem com Eletrodo Revestido.

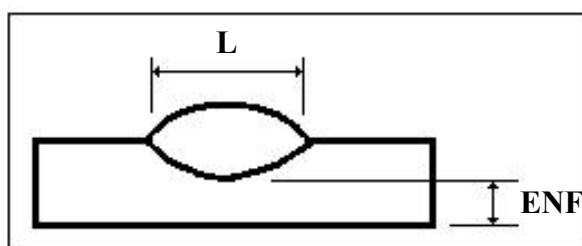


Figura 3. Grandezas observadas nos cordões de solda.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaio de Simples Deposição sobre Chapas de Aço Carbono Revestidas por Aspersão Térmica

A refusão do revestimento de aço carbono pela soldagem de material similar foi bem sucedida, obtendo-se cordões com boa relação largura/penetração tanto sobre camadas aspergidas pelo processo a arco elétrico como por chama convencional.

A Figura 4 mostra o aspecto dos revestimentos, aparentemente com boa aderência e sem quantidade excessiva de poros, e na Figura 5 podem ser vistas seções dos depósitos de solda sobre as camadas revestidas. A Tabela 5 permite comparar os valores médios da ENF dos cordões depositados: diretamente sobre a chapa de aço carbono; sobre camada aspergida a arco; e sobre refusão do revestimento por passe TIG. A Tabela 6 traz o aumento percentual médio (*ganho*) do valor de ENF, quando da soldagem sobre chapas previamente revestidas (inclusive após refusão com passes TIG), em relação aos cordões depositados sobre chapas com a espessura original. Para o caso do processo a chama os resultados estão apresentados nas Tabelas 7 e 8.

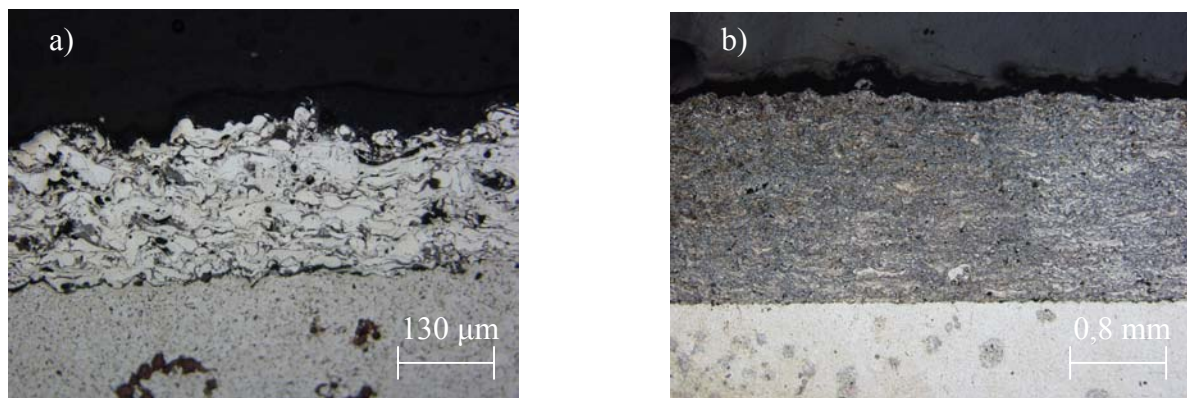


Figura 4. Camadas aspergidas com arame E70S6 sobre chapa de aço carbono: a) a arco-elétrico, espessura de 210 µm b) a chama convencional, espessura de 1,6 mm. Ataque Nital.

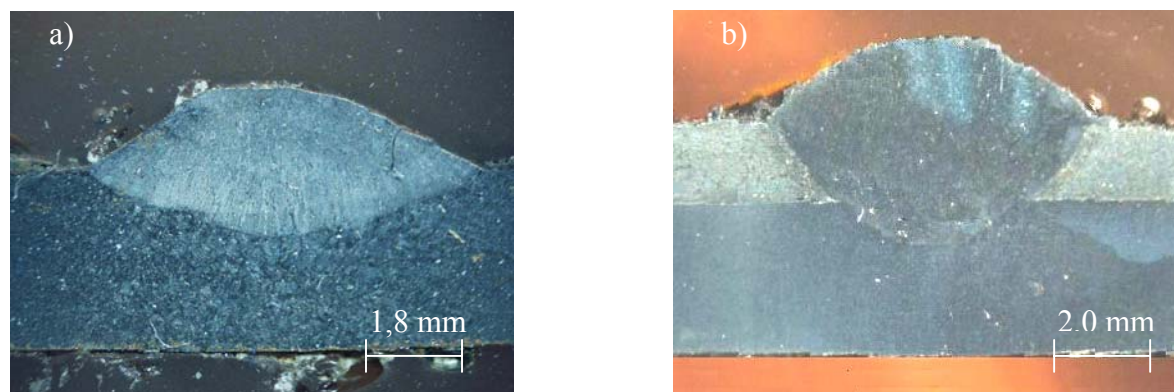


Figura 5. Vista transversal de cordões de solda E7018 depositados sobre camadas aspergidas de aço carbono (E70S6): a) a arco elétrico, espessura de 210 µm ; b) a chama convencional, espessura de 1,6 mm. Ataque Nital.

Tabela 5. Resultados da ENF média dos cordões de E7018 depositados diretamente sobre chapas de aço carbono sem revestimento (SR); e sobre a camada de E70S6 nos estados como aspergida (RA) e após refusão TIG (RR), considerando o processo a arco (A).

Chapa	ENF- média em cada cordão (mm)									e (µm)	Aporte (kJ/cm)
	SR	RA			RR						
I-A	1,48	1,55	1,59	1,59	1,58	1,61	-	-	-	140	7,0-7,1
II-A	1,50	1,51	1,46	1,72	1,59	1,62	-	-	-	194	7,1-7,2
III-A	1,24	1,38	1,45	1,76	1,87	1,83	-	-	-	229	7,1-7,3
IV-A	1,39	1,46	1,50	1,90	1,84	1,99	-	-	-	252	7,0-7,1
V-A	1,48	1,52	1,63	-	-	-	1,89	1,95	1,98	247	7,0-7,2
VI-A	1,51	1,57	1,42	-	-	-	1,75	1,77	1,68	182	6,9-7,2

Tabela 6. Aumento percentual médio (*ganho*) da ENF dos cordões, depositados em camadas aspergidas (RA) e após refusão TIG (RR), em relação aos cordões aplicados sobre chapas SAE 1020 sem revestimentos (SR).

Chapa	ENF- média em cada chapa (mm)			e (µm)	Ganho (%)
	SR	RA	RR		
I-A	1,54	1,59	-	140	3,2
II-A	1,49	1,64	-	194	10,1
III-A	1,35	1,82	-	229	34,8
IV-A	1,45	1,91	-	252	31,7
V-A	1,54	-	1,94	247	25,9
VI-A	1,50	-	1,73	182	15,3

Tabela 7. Resultados da ENF média dos cordões de E7018 depositados diretamente em SAE 1020, e sobre a camada de E70S6 aspergida a chama.

Chapa	ENF- média em cada cordão (mm)					e (mm)	Aporte (kJ/cm)	
	Sem Revestimento		Região Aspergida					
I-C	1,52	1,47	1,50	1,83	1,75	1,74	1,61	7,4-7,5
II-C	1,52	1,48	x	1,77	1,70	x	1,57	7,3-7,4

Tabela 8. Aumento percentual médio (*ganho*) da ENF dos cordões sobre o revestimento (RA) a chama em relação aos cordões depositados diretamente sobre a chapa não revestida (SR)

Chapa	ENF- média em cada chapa (mm)		e (mm)	Ganho (%)
	SR	RA		
I-C	1,49	1,77	1,61	18,7
II-C	1,50	1,73	1,57	15,3

Os resultados da ENF em aço carbono, mostram para as chapas aspergidas a arco, *ganhos* entre 25 e 35 % para espessuras de revestimento superiores a 200 µm. De outro modo, a refusão com passe TIG não apresenta resultados consideravelmente melhores, com *ganho* máximo de 25,9 % em uma espessura revestida de 247 µm, inferior portanto ao ganho de 31,7 % observado em espessura de 252 µm, o que permite desconsiderar a refusão para esta faixa de revestimento. Salienta-se que os resultados estão baseados somente na faixa de espessura testada, não se podendo categoricamente desconsiderar o recurso da refusão pelo TIG, em particular para o caso de revestimentos com maiores espessuras, onde os passes TIG consistirão de etapa intermediária entre deposição de camadas.

Os ensaios com processo a chama limitaram-se a espessuras próximas a 1,6 mm. Os *ganhos*, entre 15 e 19 %, foram proporcionalmente menores que os obtidos em processo a arco, mas a ausência de resultados em espessuras similares, não permite ainda uma conclusão de que o processo a arco realmente apresenta um *ganho* maior.

3.2 Ensaios de Simples Deposição de Cordão sobre Camadas Aspergidas de Aço Inoxidável e Ligas de Níquel

Sobre chapas de aço inoxidável AISI 304, somente foram aspergidos revestimentos pelo processo a arco. Uma vista da seção de um cordão depositado sobre camada aspergida com AS-751 está mostrada na Figura 6, com boa relação largura/penetração, o que não foi possível no revestimento com material similar ou Níquel 99 %, onde foi constatado *baixa molhabilidade / excessiva penetração*. Admitindo-se que o fenômeno resulte da oxidação excessiva na atmosfera da pistola a arco, o emprego de uma liga de Níquel (menos oxidável), AS-751, deu resultado positivo, mas o uso do Níquel 99 %, 06T Nickel, mostrou os mesmos problemas. Na Figura 7 pode ser observado o aspecto de *baixa molhabilidade / excessiva penetração* ocorridos. Testes com pressão

reduzida até 0,24 MPa, e distância pistola-substrato de 100 mm foram realizados tentando amenizar a inabilidade dos cordões. Como estas variações não alteraram a molhabilidade inadequada, assumiu-se a liga AS-751 como material a ser aspergido em substrato inoxidável.

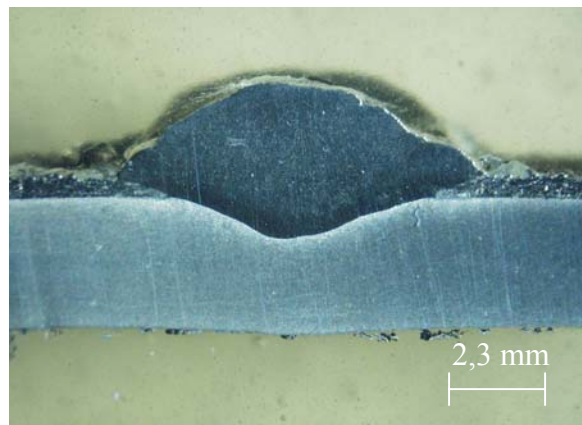


Figura 6. Corte transversal de cordão de aço inoxidável (E309L) depositado sobre camada aspergida de liga de Níquel (espessura de 500 μm) em substrato de AISI 304. Ataque: Marble.

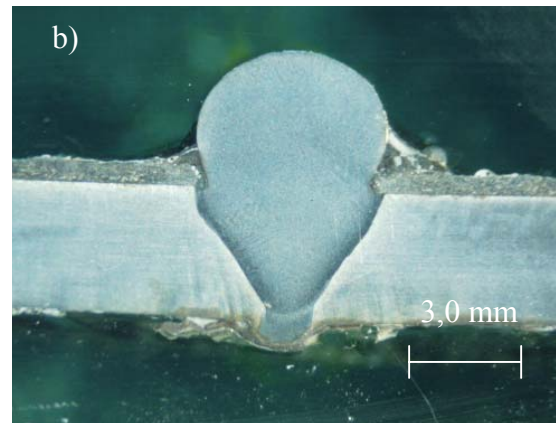
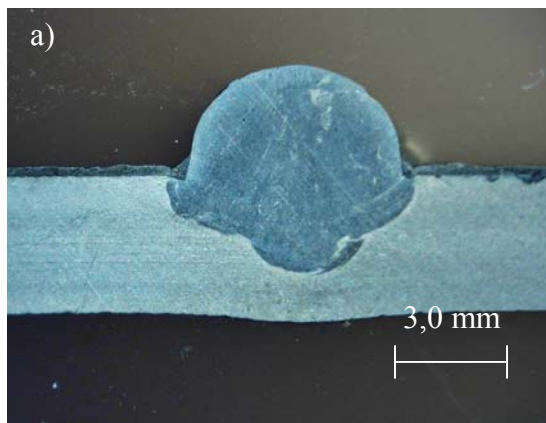


Figura 7. Molhabilidade dos cordões de solda E309L sobre camada aspergida a arco: a) 210 μm de espessura, revestimento com material similar (E309L); b) camada aspergida de Níquel 99 % (06T Nickel) com 450 μm de espessura. Ataque Marble.

As Tabelas 9 e 10 apresentam os resultados da ENF dos cordões depositados sobre os revestimentos com espessuras aspergidas entre 300 e 500 μm , e diretamente na chapa sem revestimento.

Tabela 9. Resultados da ENF média dos cordões de E309L depositados diretamente em AISI 304, e sobre revestimento com liga a base de Níquel AS-751 aspergida a arco (A).

Chapa	ENF- média em cada cordão (mm)						e (μm)	Aporte (kJ/cm)
	Sem Revestimento			Região Aspergida				
1-A	1,13	1,27	1,18	1,77	1,68	1,59	311	7,6-7,7
2-A	1,17	1,25	1,15	2,04	1,88	1,92	503	7,6-7,7
3-A	1,33	1,45	1,22	2,33	2,02	2,23	491	6,9-7,1
4-A	1,18	1,21	1,15	1,90	1,85	1,93	501	7,6-7,7

Tabela 10. Aumento percentual médio (*ganho*) da ENF considerando cordões sobre a camada revestida (RA) em relação aos cordões depositados diretamente sobre a chapa AISI 304 sem revestimento (SR).

Chapa	ENF- média em cada chapa (mm)		<i>e</i> (μm)	Ganho (%)
	SR	RA		
1-A	1,19	1,68	311	41,2
2-A	1,19	1,94	503	63,0
3-A	1,33	2,19	491	64,6
4-A	1,18	1,89	501	60,1

Os resultados mostram uma tendência esperada de aumento da ENF segundo a espessura de revestimento: próxima a 40 % em 300 μm, e superior a 60 % em espessuras em torno de 500 μm. Nesta espessura, com ensaios em três chapas, os *ganhos* tem valores próximos, inclusive na chapa 3-A, onde o aporte térmico foi menor, diminuindo a penetração nas duas regiões, mas sem alteração significativa de *ganho*. Pode-se perceber que a melhora na condição com revestimento não se deve exclusivamente a uma menor penetração equivalente à espessura do revestimento, mas também a um aumento da largura (L) do cordão depositado sobre camada aspergida em relação ao mesmo cordão em chapa sem revestimento, resultando em uma ainda menor penetração. Esta melhor molhabilidade deve-se possivelmente a menor densidade da camada revestida, provocada pela porosidade inerente ao processo de aspersão. A Tabela 11 mostra os resultados da largura dos cordões depositados sobre os revestimentos e diretamente sobre as chapas.

Tabela 11. Largura (L) dos cordões de E309L depositados diretamente sobre AISI 304 e sobre camada aspergida de liga a base de Níquel (AS-751).

Chapa	L (mm)						<i>e</i> (μm)	Aporte (kJ/cm)
	Sem Revestimento			Região Aspergida				
1-A	7,88	7,15	7,60	9,60	9,52	x	311	7,6-7,7
2-A	7,86	7,18	7,57	10,80	9,96	10,8	503	7,6-7,7
3-A	7,68	7,72	7,59	9,65	8,68	9,39	491	6,9-7,1
4-A	8,18	8,09	8,05	9,05	9,60	10,49	501	7,6-7,7

4. CONCLUSÕES

- Os resultados indicam, que a aplicação prévia de um “amanteigamento” por Aspersão Térmica, reduz o risco de perfuração em soldagem em serviço de chapa/duto com pequena espessura remanescente.
- A refusão da camada aspergida pela aplicação de passe TIG mostra-se desnecessária frente aos *ganhos* apresentados somente com depósito por ER, em espessuras de revestimento até 250 μm em aço SAE 1020.
- O revestimento aumenta a molhabilidade do cordão de E309L sobre liga de Níquel (AS-751) em substrato AISI 304.
- O revestimento de chapas de aço inoxidável AISI 304 com material similar ou com liga de Níquel 99 %, provoca baixa molhabilidade / excessiva penetração na deposição de cordões E309L.

5. AGRADECIMENTOS

À empresa Revesteel, em Pinhais-PR, que possibilitou os revestimentos a Chama.

6. REFERÊNCIAS

1. PAES, M. T. P., POPE, A. M., FILHO, B. G. S. Soldagem em operação de dutos e tubulações: revisão do estado da arte. IN: ENCONTRO TÉCNICO DE SOLDAGEM, 1., 2004, Rio de Janeiro. **Anais do I Encontro Técnico de Soldagem**. Rio de Janeiro, 2004.
2. BRUCE, W. A. Welding onto in-service thin-wall pipelines. Final Report, PRC International, Project PR-185-9908, Edison Welding Institute, 2000.
3. COLA, M. J., KIEFNER, J. F., FISCHER, R. D., BUBERNIK, T. A., JONES, D. J., BRUCE, W. A. Development of simplified weld cooling rate models for in-service gas pipelines. Project Report No. J7134, AGA, Arlington, 1992.
4. BRUCE, W. A. Selection an appropriate procedure for welding onto in-service pipelines. IN: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PIPELINE REPAIRS, 1., 2001, Woolong, Australia. **Anais da I International Conference on Pipeline Repairs**. Woolong, Austrália, 2001.

APPLICATION OF THERMAL SPRAY COATING IN RECUPERATION OF THICKNESS IN-SERVICE WELDING

Nilceu Novicki

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET-PR, Coordenação de Eletromecânica, Medianeira, PR, Brasil; nilceu@yahoo.com

Augusto J. A. Buschinelli

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, Brasil; buschi@emc.ufsc.br

Ramon Cortés Paredes

Universidade Federal do Paraná – UFPR, Departamento de Engenharia Mecânica, Curitiba, PR, Brasil; ramon@demec.ufpr.br

***Abstract.** Welding in-service technique is frequently employed in pipelines repair or modification, with significant economic advantages, since it avoids interruption operation damages and guarantee the continuity fluid supply. The principals problems, during the technique application, are the cold cracks, whose possibility is increased by the fast cooling rates produced by the flowing fluid, and, in especial, the risk of burn through by welding arc, with grave damages for the welder and environment. This work shows potentials results about an alternative technique of thin-wall pipelines repair, where a preliminary recuperation of thickness with buttering layer that are deposited with thermal spray, with coating posterior by SMAW. Experiments were conducted in AISI 304 stainless steel and SAE 1020 steel metal plates, previously buttered with arc thermal spray process, showing the possibility and advantage of the process, given a decrease of the arc penetration and consequently the risk of burn through during in-service welding. The values of remaining thickness not molten of wall pipelines with and without thermal spray coating are analyzed, for welding tests strictly supervised, conducted with parameters based in experiments of Battelle Institute. Additionally, the positive results of SMAW welding, directly over sprayed coating, let us reject as a unnecessary of the intermediate stage of refusion sprayed material with TIG beads.*

***Keywords.** welding in-service, spray coating ,pipeline repair.*