



Desenvolvimento de Sistema Robótico Integrado para Automatização da Soldagem na Indústria Naval

Relatório Técnico Parcial 2

Eng. Régis Henrique G. e Silva

Florianópolis, outubro de 2010

1. INTRODUÇÃO

O presente relatório descreve atividades inseridas no escopo do projeto “Desenvolvimento de Sistema Robótico Integrado para Automatização da Soldagem na Indústria Naval”, aprovado pelo FINEP no âmbito do CT-Aquaviário, em seqüência aos resultados apresentados no Relatório 1. O referido projeto conta com a Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária (FAPEU) como entidade proponente, o Laboratório de Soldagem (LABSOLDA) como entidade executora e a SPS – Soluções para a Soldagem como entidade interveniente.

Primeiramente, são relatados testes nos quais o sistema robótico foi submetido a uma diferente geometria de trilho, sobre o qual o carro se desloca. As operações de soldagem na construção naval são caracterizadas por significativa variabilidade em termos de geometria das peças a serem unidas e cordões de solda, assim como posições de soldagem, o que demanda suficiente flexibilidade do equipamento em se adaptar a diferentes situações. Nesta atividade, foi verificado o desempenho sobre um trilho circular, que pode ser adaptado para outras formas, por exemplo, elípticas.

Na seqüência, é dada continuidade à comparação iniciada no Relatório 1, desta vez abordando questões de custos de soldagem para arame-eletrodo maciço e arame-eletrodo tubular, dando subsídios para a tomada de decisão quanto à escolha de um deles para as atividades subseqüentes do projeto. Para isso, instrumentação dedicada foi aplicada para monitoração da quantidade de arame alimentada e depositada. Esta é uma questão de fundamental importância, pois tem influência na determinação dos custos da obra e, em conseqüência, na análise de viabilidade dos investimentos.

Por fim, é descrita uma demonstração em campo de um protótipo do sistema robótico, juntamente à fonte de soldagem ao qual ele será integrado, como objetivo do projeto. A visita ocorreu em um estaleiro da cidade de Itajaí, SC, segundo maior pólo da construção naval do Brasil. Esta atividade foi conseqüência de um seminário no LABSOLDA, no qual se divulgou o projeto a empresas e outros grupos de pesquisa relacionados ao setor de construção naval, objetivando intercâmbios de conhecimento e possíveis parcerias.

2. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ROBÓTICO: VARIAÇÃO DA GEOMETRIA DO TRILHO

Sabe-se que na indústria naval é grande a variabilidade de equipamentos, materiais, geometrias, dimensões e funções das partes constituintes. Em assim sendo, é necessário que equipamentos dedicados à automação de operações de produção sejam dotados da flexibilidade necessária para adaptação a cada situação, pois a concepção, desenvolvimento, produção e aquisição de um equipamento para cada variação encontrada se mostra inviável.

Dentro do contexto da soldagem, o exposto significa que um sistema para automação deve ter, na maior escala possível, a capacidade não apenas de se fixar em diferentes geometrias de superfícies e posições de soldagem, mas também de se deslocar sobre diferentes geometrias de trilhos que acompanhem trajetórias não lineares de cordões de solda.

Inserido nesta temática, o sistema em desenvolvimento neste projeto foi submetido a testes sobre um trilho circular, numa configuração generalizada. A partir desta configuração, se podem realizar outras forma de trajetória, como elipses e cordões de solda curvos. Para esta verificação, foram projetados, construídos e montados quatro trilhos circulares, de diâmetros diferentes: aproximadamente 1,3 m; 1,7 m; 2,0 m e 2,4 m. A Figura 1 mostra o projeto renderizado em ambiente CAD de um deles, com o carro montado e a Tabela 1 as especificações dos trilhos.



Figura 1 – Renderização de projeto em ambiente CAD do carro do sistema robótico montado sobre trilho circular

Tabela 1 – Especificações geométricas dos trilhos circulares.

Trilho	Raio (mm)	Comprimento Total (mm)	Seção (°)	Área Revestida (m ²)	Número de segmentos	Número de Apoios
	R_F	C_T	S_F	A_R	N_T	N_A
T1	1300	8168	360	2,33	4	28
T2	1668	10480	360	3,27	5	35
T3	2027	12736	360	4,20	6	42
T4	2374	14916	360	5,10	7	49

A Figura 2 mostra o trilho montado e os detalhes da conexão entre os segmentos nos quais o círculo é dividido. Devido à necessidade de precisão tanto nos encaixes, como no próprio acoplamento do carro com o trilho, este foi fabricado por corte a laser.



Figura 2 – Trilho circular e detalhes da conexão entre os segmentos.

A Figura 3 mostra o carro do sistema robótico montado sobre um dos segmentos do trilho e a Figura 4 ilustra uma solda realizada com o conjunto. Neste caso, foi depositada uma camada com a técnica de tecimento, possibilitada pelo eixo y do carro.

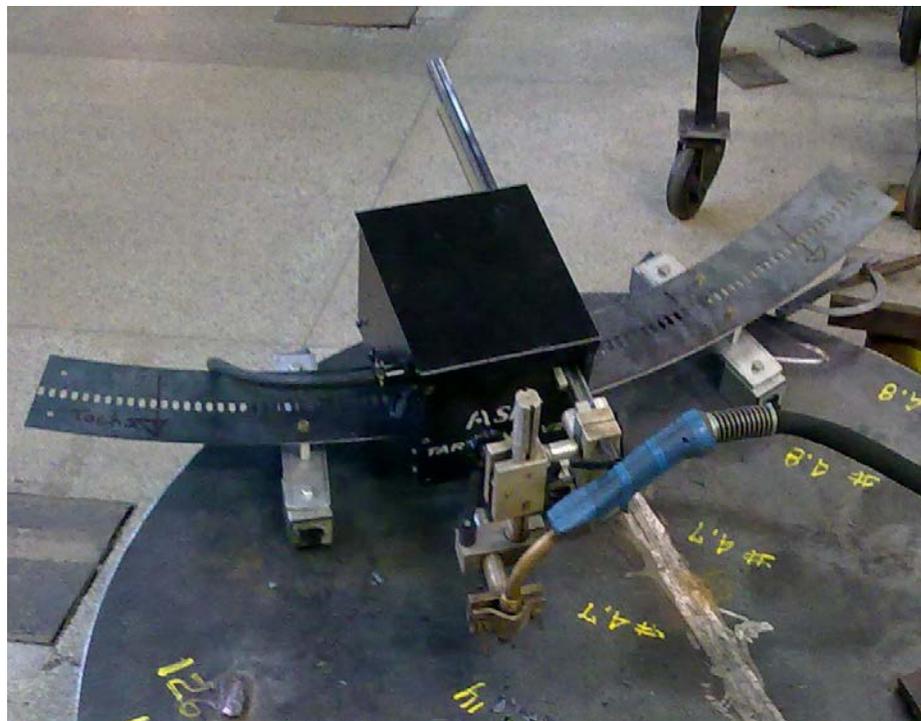


Figura 3 - Carro do sistema robótico montado sobre segmento circular de trilho



Figura 4 - Carro do sistema robótico montado sobre segmento circular de trilho

3. PROCESSO DE SOLDAGEM: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ARAME-ELETRODO MACIÇO E ARAME-ELETRODO TUBULAR

O projeto foca principalmente aplicações de soldagem com o processo MIG/MAG, o que leva a necessidade de seleção em um aspecto crucial: o tipo de arame. Existem no mercado as opções de arame tubular e arame maciço. Uma vez que cada versão atenda às demandas de compatibilidade metalúrgica com as peças a serem soldadas (ou revestidas), a escolha deve acontecer em função da robustez do procedimento de soldagem, da qualidade da solda, da repetitividade e dos custos alcançados.

Neste sentido, foi realizada uma comparação entre as duas opções, para peças de aço AISI 1020. Considerou-se adequado realizar a atividade em uma situação que, se não factível com alguma das opções, já desqualificaria a opção eventualmente incapaz, pois trata-se de uma configuração comum na soldagem da construção naval: soldas na posição vertical. Nota-se que há diferença entre os parâmetros de soldagem para cada tipo de arame, pois para cada um, se buscou um procedimento de maior estabilidade. A bancada experimental foi a mesma descrita no Relatório 1.

3.2 Metodologia

Utilizando o equipamento MVA, capaz de medir o comprimento de arame gasto durante a soldagem e uma balança de precisão (ambos na Figura 4), capaz de medir valores de massas na ordem de centésimos de grama, foram realizados testes para se medir o comprimento de arame e a massa de material depositada na peça durante a soldagem.



Figura 5 – MVA (medidor de velocidade de arame) e balança de precisão utilizados

O MVA foi instalado na fonte de soldagem e conforme o arame era consumido, o equipamento indicava o comprimento do arame gasto. Após cada passe de solda a peça era colocada na balança de precisão para se verificar a massa correspondente. Assim, foi possível saber a massa de material depositada na peça e o comprimento de arame gasto em cada passe de solda realizado.

Foram efetuados os testes com o arame maciço (ER70S-6) e arame tubular (E71T-1). O principal objetivo foi verificar as particularidades que os dois tipos de arame possuem quando comparados entre si no consumo de arame, na massa de material depositada, no rendimento do trabalho e também no custo de arame consumido ao final da soldagem.

3.2 Resultados – Arame Maciço

Na Tabela 2 são listados os parâmetros de soldagem para o teste realizado com o arame maciço.

O teste efetuado com os parâmetros da Tabela 2 para o arame maciço gerou um conjunto de resultados listados na Tabela 3, onde:

- m_0 é a massa inicial da chapa de teste, com apenas o passe de raiz;
- m_1 , m_2 , m_3 e m_4 são os valores de massa da chapa de teste após o 2º, 3º, 4º e 5º passes de solda respectivamente;
- Os “ Δm ” são as variações de massa entre cada passe de solda;
- L_0 é o comprimento inicial marcado no MVA;
- L_1 , L_2 , L_3 e L_4 são os comprimentos de arame marcados no MVA após o 2º, 3º, 4º e 5º passes respectivamente;
- Os “ ΔL ” são as variações de comprimento de arame entre cada passe de solda.

Obs.: aqui o passe de raiz é considerado como passe 1 do procedimento, porém ele não faz parte do teste por ser realizado pelo processo TIG.

Tabela 2. Parâmetros para a soldagem vertical ascendente com arame maciço.

PASSES	Unidade	1	2	3	4	5
Arame		ER70S-6				
Diâmetro	mm	1,2				
Vazão de gás	l/min	15				
Tensão	V	17,5				
Velocidade de arame	m/min	3,5				
Ks		15				
Kd		20				
Velocidade de soldagem	cm/min	-	12	8	7	7
Amplitude	mm	-	6	9	13	17,5
Frequência	Hz	-	0,8	0,7	0,7	0,4
Tempo de parada	s	-	0,4 / 0,4	0,3 / 0,3	0,3 / 0,3	0,4 / 0,4
Distância bico de contato-peça	mm		12	12	12	12

Tabela 3. Resultados de comprimento e massa do arame maciço.

m0 = 2241,75g		L0 = 114,0m	
m1 = 2285,65g	$\Delta m1 = 43,9g$	L1 = 119,1m	$\Delta L1 = 5,1m$
m2 = 2351,50g	$\Delta m2 = 65,85g$	L2 = 126,9m	$\Delta L2 = 7,8m$
m3 = 2424,55g	$\Delta m3 = 73,05g$	L3 = 135,6m	$\Delta L3 = 8,7m$
m4 = 2495,75g	$\Delta m4 = 71,20g$	L4 = 143,9m	$\Delta L4 = 8,3m$

- 1 metro de arame maciço possui 8,50g

3.3 Resultados – Arame Tubular

Na Tabela 4 são listados os parâmetros de soldagem para o teste realizado com o arame tubular.

Tabela 4. Parâmetros para a soldagem vertical ascendente com arame tubular.

PASSES	Unidade	1	2	3	4	5
Arame				E71T-1		
Diâmetro	mm			1,2		
Vazão de gás	l/min			25		
Tensão	V			23		
Velocidade de arame	m/min			8,5		
Ks				20		
Kd				20		
Velocidade de soldagem	cm/min	-	25	17	13	10
Amplitude	mm	-	6,5	9,5	13	17
Frequência	Hz	-	0,9	0,8	0,6	0,4
Tempo de parada	s	-	0,1 / 0,1	0 / 0	0 / 0	0 / 0
Distância bico de contato-peça	mm		18	18	18	18

O teste efetuado com os parâmetros da Tabela 4 para o arame tubular gerou um conjunto de resultados listados na Tabela 5, onde:

- m_0 é a massa inicial da chapa de teste, com apenas o passe de raiz;
- m_1 , m_2 , m_3 e m_4 são os valores de massa da chapa de teste após o 2º, 3º 4º e 5º passes de solda respectivamente;
- Os “ Δm ” são as variações de massa entre cada passe de solda;
- L_0 é o comprimento inicial marcado no MVA;

- L1, L2, L3 e L4 são os comprimentos de arame marcados no MVA após o 2º, 3º, 4º e 5º passes respectivamente;

- Os “ ΔL ” são as variações de comprimento de arame entre cada passe de solda;

Obs.: aqui o passe de raiz é considerado como passe 1 do procedimento, porém ele não faz parte do teste por ser realizado pelo processo TIG.

Tabela 5. Resultados de comprimento e massa do arame tubular.

m0 = 2279,15g		L0 = 117,0m	
m1 2318,00g	=	$\Delta m1 = 38,85g$	L1 = 122,3m $\Delta L1 = 5,3m$
m2 2372,85g	=	$\Delta m2 = 54,85g$	L2 = 130,1m $\Delta L2 = 7,8m$
m3 2441,50g	=	$\Delta m3 = 68,65g$	L3 = 140,5m $\Delta L3 = 10,4m$
m4 2531,40g	=	$\Delta m4 = 89,90g$	L4 = 154,0m $\Delta L4 = 13,5m$

Massas com escória

m1 2314,55g	=	$\Delta m1 = 35,40g$
m2 2366,55g	=	$\Delta m2 = 52,00g$
m3 2434,10g	=	$\Delta m3 = 67,55g$
m4 2521,10g	=	$\Delta m4 = 87,00g$

Massas sem escória

- 1 metro de arame tubular possui 7,2g

3.3 Resultados – Comparações gráficas

Para uma fácil visualização e a verificação mais detalhada dos resultados obtidos nos testes, foram gerados cinco gráficos a partir dos valores anteriormente citados na Tabela 3 para o arame maciço e na Tabela 5 para o arame tubular.

O gráfico da Figura 6 demonstra a comparação entre o arame maciço e o arame tubular dos rendimentos de deposição de material de cada passe de solda.

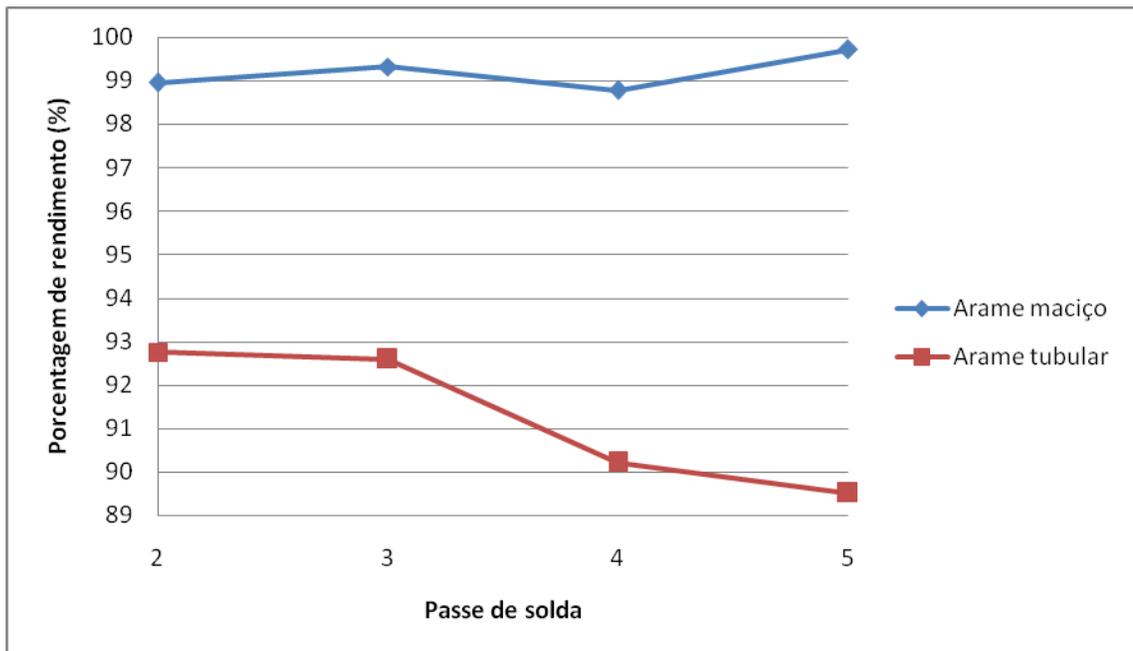


Figura 6 -. Rendimento de deposição de material dos passes de solda.

O rendimento total da deposição de material para o arame maciço foi $\eta = 99,94\%$ e para o arame tubular foi $\eta = 90,82\%$.

O rendimento de deposição do material foi calculado através da fórmula:

$\eta = \frac{m_f - m_i}{m \cdot L}$, onde:

m = massa do eletrodo
 L = comprimento do eletrodo

η = rendimento de deposição de material

m_f = massa final (g)

m_i = massa inicial (g)

Par/m = massa verificada de um metro do arame em questão

L = comprimento do arame que foi consumido

Os gráficos das Figuras 7 e 8 demonstram a comparação entre o arame maciço e o arame tubular da massa de material depositada dos passes de solda verificando-se cada passe de forma isolada (Figura 7) e também analisando os passes somando-se cumulativamente as massas depositadas nos passes de solda (Figura 8).

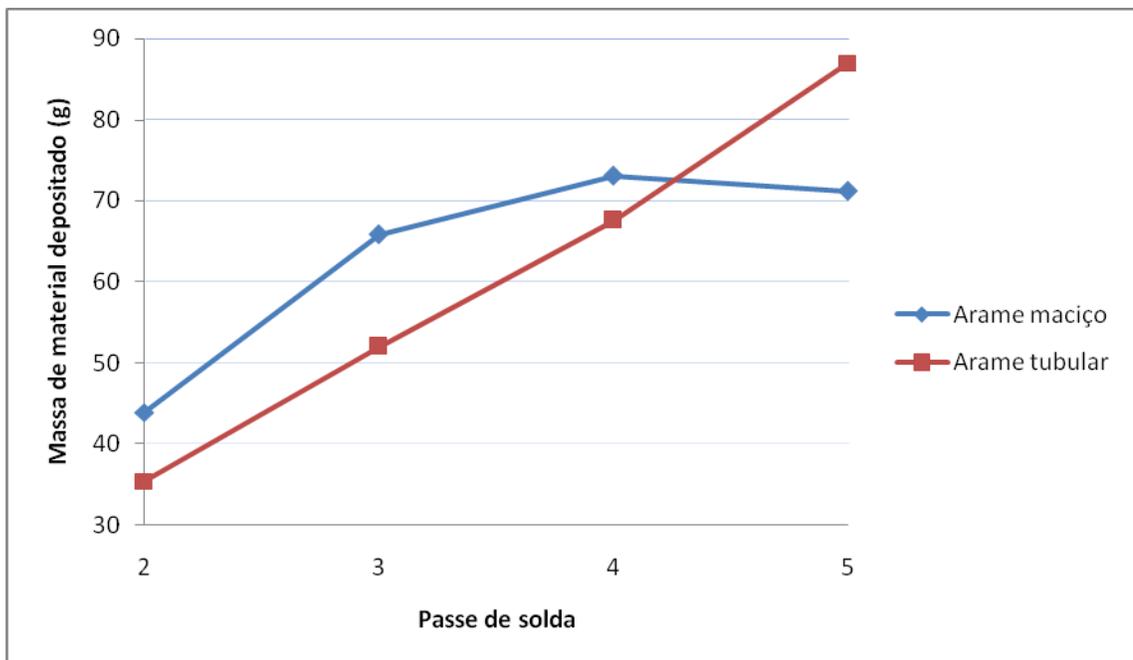


Figura 7 - Quantidade de material depositado por passe de solda (isoladamente)

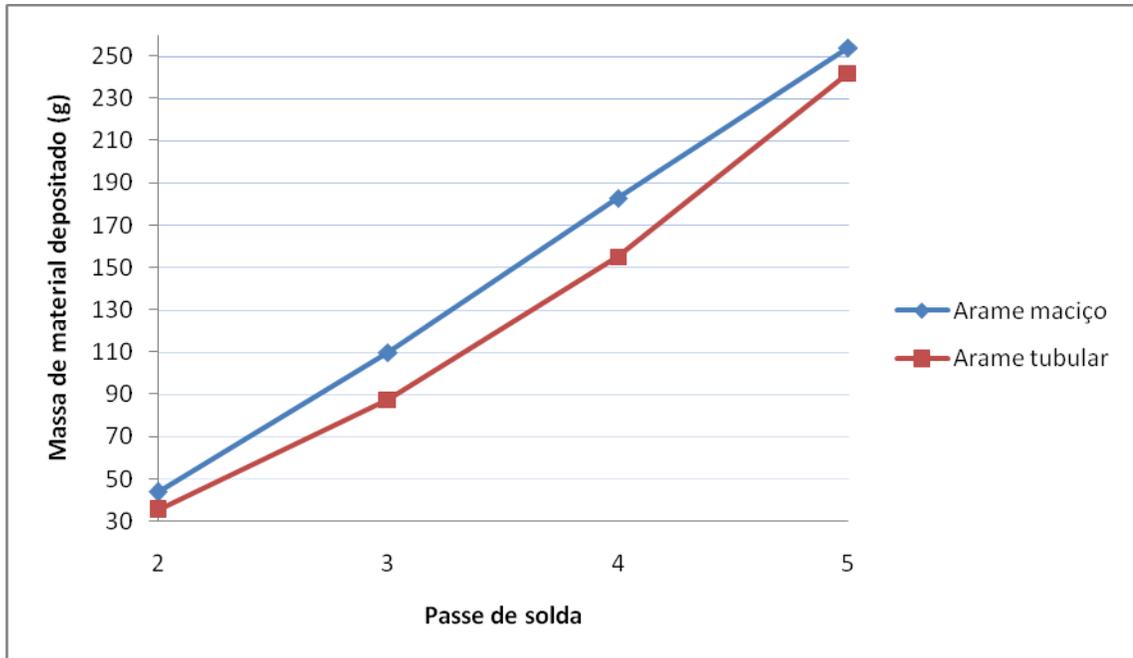


Figura 8 - Quantidade de material depositado por passe de solda (cumulativo)

Os gráficos das Figura 9 e 10 demonstram a comparação entre o arame maciço e o arame tubular do comprimento de arame gasto nos passes de solda verificando-se cada passe de forma isolada (Figura 9) e também somando-se cumulativamente os comprimentos de arame gastos nos passes de solda (Figura 10).

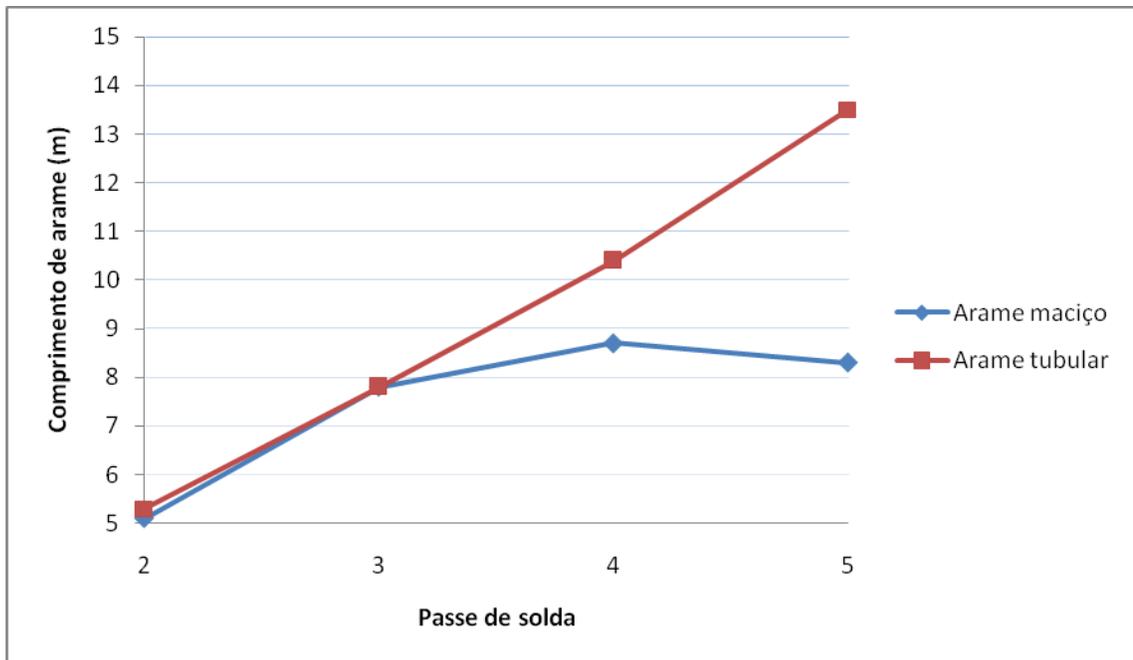


Figura 9 - Comprimento de arame por passe de solda (isoladamente)

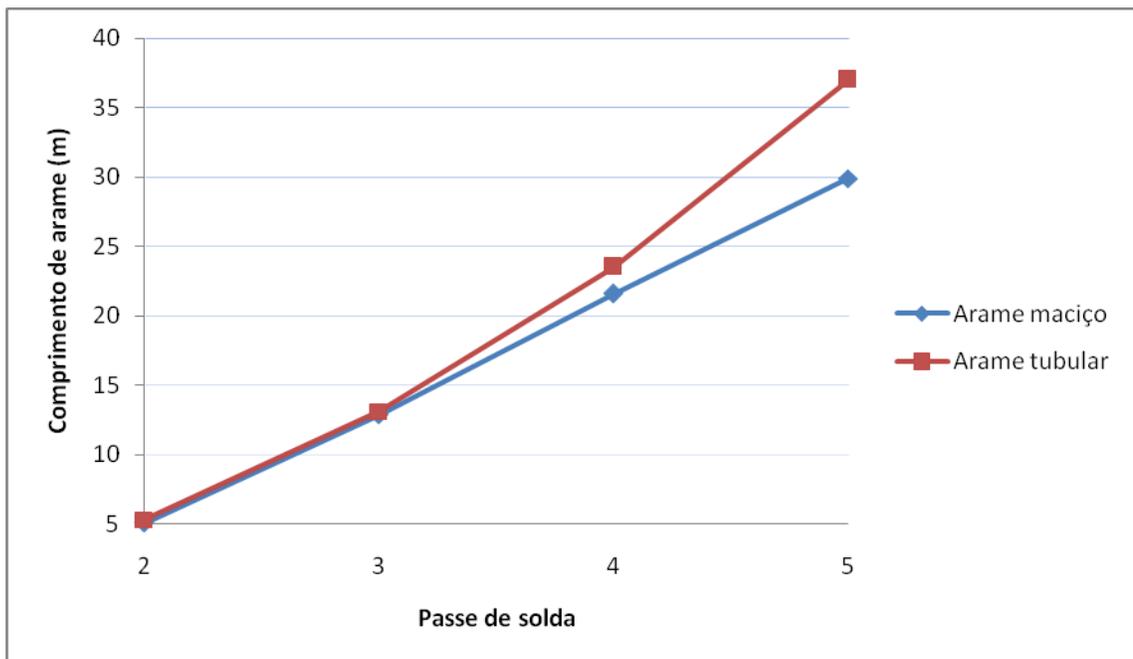


Figura 10 - Comprimento de arame por passe de solda (cumulativo)

Nos gráficos das Figuras 11 e 12 é feita uma comparação entre a massa de material calculada, que deveria ser depositada na peça durante a soldagem e a massa real de material depositada (verificada experimentalmente). Essa comparação foi feita com os dois tipos de arame. Foi explicitada levando-se em consideração cada passe de solda isoladamente na Figura 11 e somando-se cumulativamente as massas de cada passe na Figura 12.

As massas calculadas foram obtidas através do produto entre a massa de um metro do arame em questão e o comprimento de arame da soldagem.

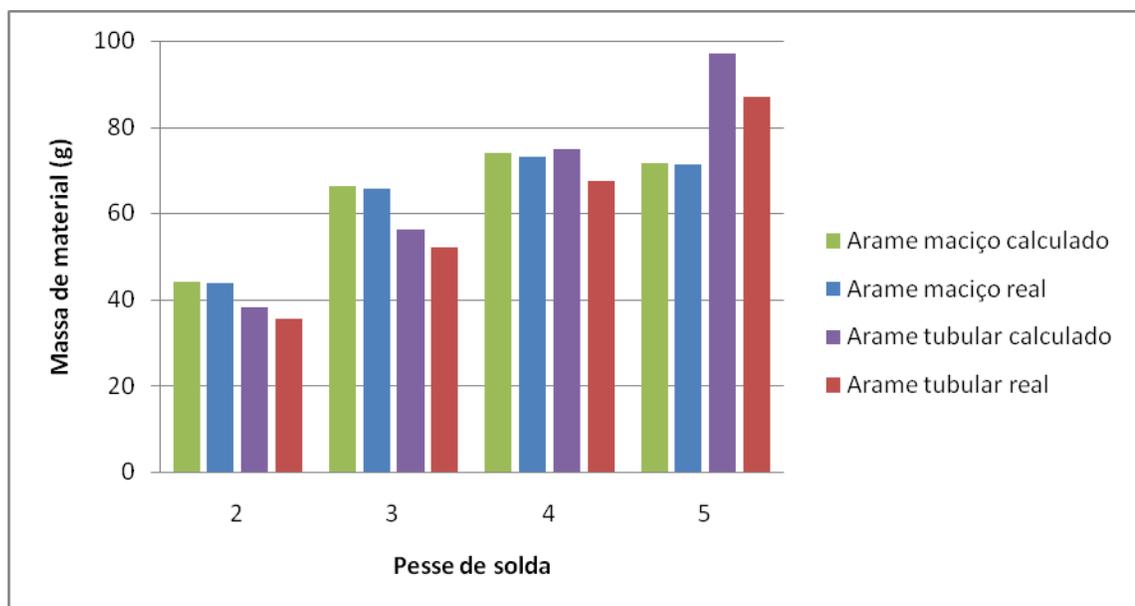


Figura 11 - Comparação entre massa de material calculada e depositada na solda (isoladamente).

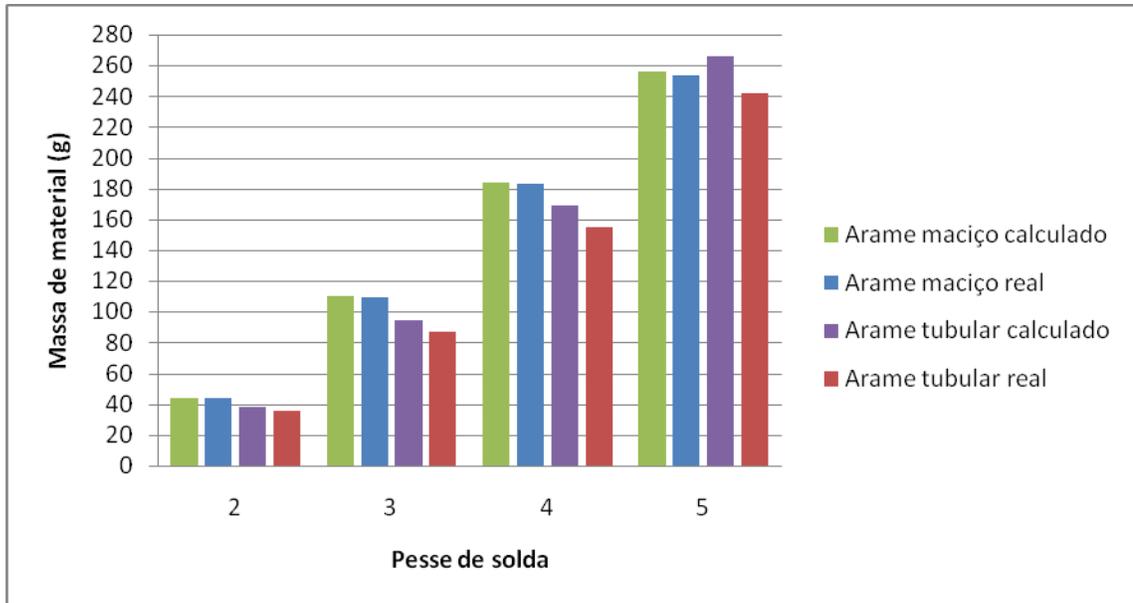


Figura 12 - Comparação entre massa de material calculada e depositada na solda (cumulativo).

Relacionando-se apenas a massas de material depositadas nos passes de solda e o comprimento de arame necessário para o trabalho, fica faltando ainda, para uma análise completa da melhor escolha do tipo de arame a ser usado, o custo final do trabalho, com cada um dos dois tipos de arame.

Assim, analisando os dados experimentais de rendimento, comprimento de arame e massa de material depositada para os dois procedimentos (soldagem com arame maciço e tubular), é possível chegar a uma fórmula capaz de calcular o custo do procedimento em relação ao comprimento da solda. Essa fórmula fica então enunciada da seguinte assim:

$$C_s = P_a \cdot (T_d \cdot 100 / \eta) \cdot (V_s \cdot 60 / 100), \text{ onde:}$$

C_s = custo da soldagem (R\$/m)

P_a = preço do arame (R\$/Kg)

T_d = taxa de deposição (Kg/h)

η = rendimento de deposição de material (%)

V_s = velocidade de soldagem (cm/min.)

Portanto, calculando as taxas de deposição de material em cada passe para cada tipo de arame, através do quociente entre a massa de material depositado e o tempo de soldagem do passe (tempo de arco aberto). Com a velocidade de soldagem do referido passe, o rendimento e o custo do arame em questão por quilo é possível se calcular o custo do procedimento em relação ao comprimento do cordão de solda.

Efetuada os cálculos, em todos os passes para os dois tipos de arame, foram conseguidos os seguintes valores:

Para arame maciço: R\$7,00 por Kg

Passe 2: Cs = 0,2217 Pa	Cs = 1,55 reais/m
Passe 3: Cs = 0,3314 Pa	Cs = 2,31 reais/m
Passe 4: Cs = 0,3688 Pa	Cs = 2,58 reais/m
Passe 5: Cs = 0,3581 Pa	Cs = 2,50 reais/m

Para arame tubular: R\$13,00 por Kg

Passe 2: Cs = 0,1912 Pa	Cs = 2,48 reais/m
Passe 3: Cs = 0,2806 Pa	Cs = 3,64 reais/m
Passe 4: Cs = 0,3752 Pa	Cs = 4,87 reais/m
Passe 5: Cs = 0,4860 Pa	Cs = 6,31 reais/m

Os preços valores de preço dos arames (Pa) foram obtidos através de cotação em loja especializada e são de uma mesma marca, a qual possui qualidade e confiabilidade comprovadas na área de soldagem.

Observa-se que os valores acima citados estão em função do custo do arame de modo a simplificar o cálculo do custo total do procedimento já que existem muitos fabricantes para os arames em questão e também porque o preço deles no mercado varia constantemente.

A seguir foi reproduzido um gráfico (Figura 13) com os custos por comprimento de solda para os dois tipos de arame utilizando os valores obtidos por intermédio da fórmula citada anteriormente.

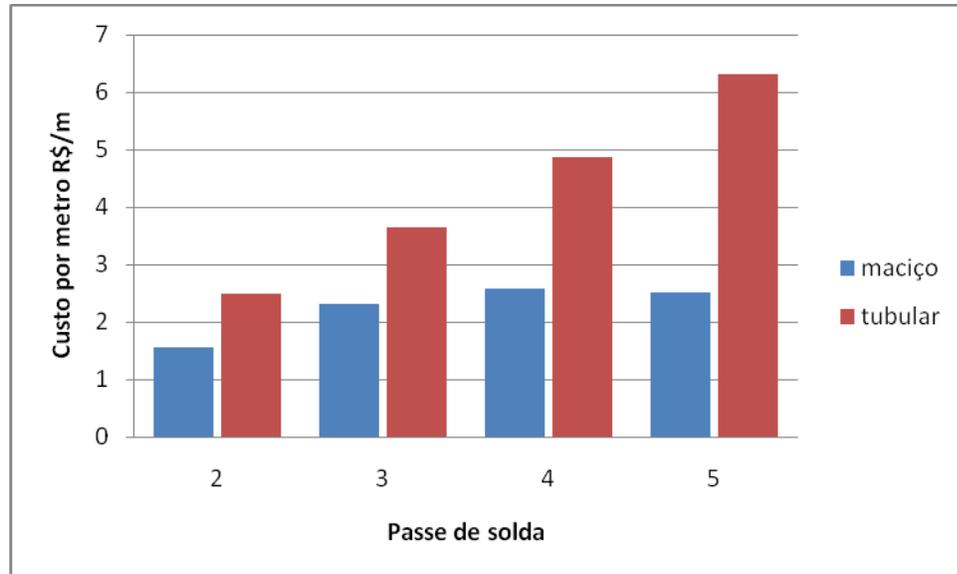


Figura 13 - Custo do arame por comprimento de solda.

4. DEMONSTRAÇÃO EM CAMPO – VISITA A ESTALEIRO

No intuito de se verificar in loco potenciais aplicações, dificuldades, adquirir sugestões e sanar dúvidas de potenciais futuros usuários da tecnologia em desenvolvimento, foi realizada uma primeira visita a um estaleiro. Na ocasião, aconteceu também uma demonstração do protótipo do sistema integrado em desenvolvimento. Foram utilizados procedimentos já levantados no LABSOLDA, descritos anteriormente, adicionando-se o passe de raiz também com o processo MIG/MAG. Sob o link:

http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_atuais/soldanaul_videos.php

é possível visualizar o vídeo de um procedimento de soldagem executado nas dependências do estaleiro.

A Figura 14 mostra a bancada de soldagem utilizada para fixação do corpo de prova, que foi providencialmente deformado para adquirir a forma de um costado. Na mesma figura, se pode ver também a fonte de soldagem.

Já na Figura 15 se ilustra uma solda sendo realizada, com a presença de vários técnicos da equipe do estaleiro.

A Figura 16 mostra a raiz (passe de maior criticidade) de um corpo de prova soldado durante a demonstração.



Figura 14 – Bancada – suporte para soldagem e fonte de soldagem microprocessada.



Figura 15 – Solda sendo realizada na demonstração de protótipo em campo.

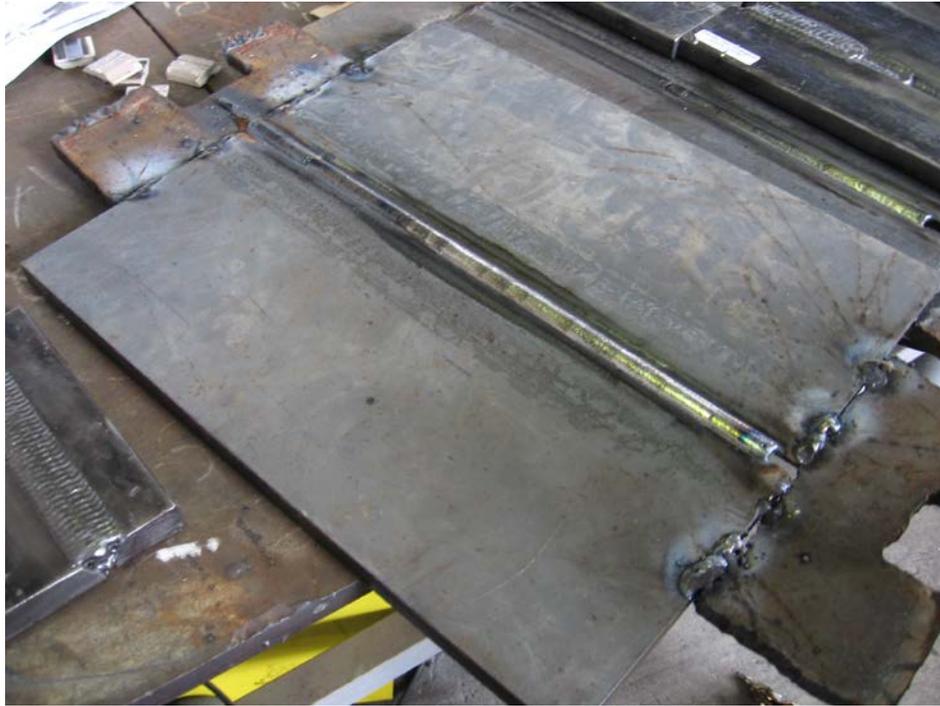


Figura 16 – Corpo de prova soldado durante a visita / demonstração no estaleiro (reforço interno do passe de raiz).

5. CONCLUSÕES

Em relação ao projeto mecânico do sistema robótico para soldagem na construção naval, conclui-se que, dentro de condições testadas, é possível a adaptação do trilho à necessidade de trajetórias circulares, elípticas e curvas que potencialmente estarão presentes em aplicações práticas industriais. Iniciativas de projeto no sentido de flexibilizar ainda mais o equipamento, sem perda de rigidez e robustez, continuarão a ser realizadas.

A análise comparativa de custos de soldagem mostrou vantagem para o arame maciço em relação ao tubular. Naturalmente, não só a velocidade de soldagem, eficiência de deposição e o custo dos arames devem ser levados em consideração para cálculo da produtividade e estimativa do custo global da operação de soldagem. Outros fatores podem influenciar, como outros materiais, posições de soldagem, acabamento... Assim, novas investigações relativas aos custos deverão ser conduzidas.

Considerou-se de grande valia a visita e demonstração em campo, pois forneceu uma grande oportunidade para verificação de problemas reais de campo, que não são observados em laboratório. Somente com este modus operandi integrativo será possível gerar uma tecnologia realmente aplicável industrialmente, pois ao mesmo tempo em que se visualizamos problemas reais a serem atacados, também se promove a familiarização gradual dos soldadores ao sistema em desenvolvimento no projeto. Pretende-se realizar novas visitas, uma já marcada a um dos maiores estaleiros do Brasil na cidade do Recife.