

ESTUDO COMPARATIVO DE CUSTOS NA SOLDAGEM DE CHAPAS DE AÇO CARBONO PARA OS PROCESSOS SMAW E FCAW¹

*Miguel Luiz Ribeiro Ferreira²
Jonas Lopes de Resende³
Mário Marques Arruda³
Mônica Pinto Maia⁴
Daniel Pontes Lannes⁵
Juan Manuel Parda⁶*

Resumo

O presente trabalho visa estabelecer um modelo teórico de custos para os processos de soldagem por eletrodos revestidos (*SMAW*) e arame tubular (*FCAW*). O modelo apresentado foi estabelecido em base a outros modelos propostos na literatura. Estudos experimentais, em aços carbono para diferentes tipos de juntas soldadas foram realizados em campo em ambos os processos mencionados. Os resultados obtidos em campo convergem com aqueles propostos no modelo, de maneira que este trabalho exhibe suma importância na determinação da produtividade de empreendimentos na construção e montagem de estruturas metálicas em indústrias *offshore*.

Palavras chave: Aço carbono; *SMAW*; *FCAW*; Custos de soldagem.

COMPARATIVE STUDY OF COSTS IN WELDING OF CARBON STEEL PLATES FOR SMAW AND FCAW PROCESSES

Abstract

The purpose of this work was to establish a theoretical model of welding costs in shield metal arc welding (*SMAW*) and flux core arc welding (*FCAW*) processes. The model was adopted in reference to other models established in literature. Experimental studies on site, using carbon steel plates for different joint types were carried out for both the mentioned processes. The results obtained agreed with those considered in the model, thus this work shows the great importance in the determination of the productivity of enterprises in the construction and assembly of metallic structures in the offshore industries.

Key words: Carbon steel; *SMAW*; *FCAW*; Welding cost.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFF.*

³ *Aluno do Curso de Especialização em Montagem Industrial UFF.*

⁴ *Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFF.*

⁵ *Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFF.*

1 INTRODUÇÃO

As crescentes demandas na construção e montagem de estruturas metálicas assim como de embarcações nas indústrias navais e *offshore* no Brasil motivaram à necessidade do conhecimento da produtividade e custos da soldagem por se tratar de uns dos processos de fabricação mais importantes desse segmento com vistas ao crescimento e maior competitividade destas indústrias no mercado.

De modo estabelecer uma análise teórica de custos nos processos de soldagem, as fontes consultadas⁽¹⁻³⁾ se baseiam em diversas variáveis do processo em questão. A *American Welding Society (AWS)*⁽¹⁾ propôs uma análise de custo teórica baseada no material, mão de obra e custo indireto. Por outro lado, a Lincoln⁽²⁾ propõe um modelo fundamentado na utilização de tabelas para o procedimento empregado, embora sejam necessárias informações adicionais, tais como: o custo por peso do eletrodo, custos de mão de obra por hora, custos indiretos por hora, assim como o fator de ocupação estimado (*FO*), sendo esta última variável definida como:

$$FO = \frac{t_{ARC}}{t_{tos}} \quad (A)$$

Onde:

t_{ARC} : Tempo de arco aberto

t_{tos} : Tempo total da operação da soldagem

Modenesi⁽³⁾ estabelece uma serie de variáveis que podem afetar o custo final de uma operação de soldagem, tais como: consumíveis (metal de adição, gás, fluxo e outros), custos fixos, mão de obra, energia elétrica, manutenção e depreciação de equipamentos, materiais de proteção, peças, ferramentas, entre outros. Entretanto, Modenesi⁽³⁾ considera em seu trabalho somente três itens relativos a custos, detalhados a seguir: consumíveis, fixos, mão de obra e energia elétrica.

De maneira geral, todos os modelos abordam os aspectos mais importantes concernentes a material e mão-de-obra, complementando-se no relativo aos custos indiretos e energia elétrica.

No modelo proposto, foi empregado do modelo da AWS⁽¹⁾ o uso das planilhas de dados, visando o levantamento das informações no campo. Do modelo da Lincoln⁽²⁾, foi considerada a metodologia de cálculo do custo de soldagem propriamente dita. Finalmente, do modelo proposto por Modenesi,⁽³⁾ foi acrescentado mais um aspecto no cálculo do custo referente à energia elétrica.

Portanto, neste trabalho o novo modelo está baseado nos três modelos mencionados levando em consideração àquelas variáveis de grande importância. De modo a validar o novo modelo foi realizada uma análise experimental no campo para a soldagem de chapas de aço carbono, em juntas do tipo ângulo e topo, empregando os processos *SMAW* e *FCAW*.

Deste modo o presente trabalho visa estabelecer um modelo validado por dados experimentais obtidos no canteiro de obra, efetuando uma análise comparativa de custos de soldagem para os processos *SMAW* e *FCAW*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, de modo de obter informações experimentais bem fundamentadas, duas maneiras de levantamento dos dados foram consideradas. A

primeira delas foi efetuada a partir de observações feitas na própria linha de produção. A segunda foi efetuada mediante a realização de ensaios feitos em laboratório para uma determinada quantidade de amostras.

No concernente à própria linha de produção, foram observadas 37 juntas, sendo 26 do tipo ângulo e 11 do tipo topo, executadas pelos processos *SMAW* e *FCAW*. Esta observação visa avaliar: geometria do cordão, diâmetro do eletrodo, parâmetros de soldagem, tempo de arco aberto e quantidade de eletrodo consumido para o processo *SMAW*. Por outro lado, no processo *FCAW*, durante a observação foram medidas: a geometria do cordão, o diâmetro do arame, os parâmetros de soldagem, o tempo de arco aberto e a velocidade do arame, assim como a taxa de fluxo de gás de proteção.

Foram estudadas em laboratório seis juntas soldadas, sendo: duas juntas dos tipos ângulo e topo com eletrodo de bitola 2,5 mm, duas juntas dos tipos ângulo e topo com eletrodo bitola 3,25 mm e duas juntas dos tipos ângulo e topo com arame bitola 1,2 mm.

Os materiais utilizados como metal de base para a realização deste trabalho foram os aços correspondentes às designações ASTM A36 e ASTM A131 com espessuras variando de 8 mm a 12 mm. O metal de base no caso das juntas produzidas em laboratório foi ASTM A36 de 9,5 mm de espessura. Em relação ao material de adição foram utilizados o eletrodo revestido E7018, nas bitolas de 2,5 mm e 3,25 mm, assim como arame tubular E71T-1 com bitola de 1,2 mm.

A fim de garantir o cálculo do peso de metal depositado foram levantadas as dimensões reais das chapas e dos filetes de solda, adotando-se um acréscimo de 10% no cálculo do peso de metal depositado em virtude da convexidade do cordão de solda.

De modo a determinar a potência consumida durante a operação de soldagem foram feitas leituras da tensão e corrente utilizadas na execução de cada cordão de solda.

Na determinação do fator de ocupação foi cronometrado o tempo de arco aberto para cada cordão de solda.

A quantidade de eletrodo consumida na soldagem foi calculada para cada cordão efetuando-se a pesagem dos mesmos em uma balança de precisão. A velocidade de alimentação de arame foi levantada para cada cordão de solda. O comprimento de arame consumido foi calculado em função do tempo de arco aberto e da velocidade de alimentação do arame. O peso médio para 1,0 m de arame foi estimado em balança de precisão.

Para calcular o volume de gás de proteção utilizado no processo *FCAW*, a taxa de fluxo de gás de proteção foi estimada com base no valor médio consumido para cada cordão de solda executado pelo processo.

A seguir são apresentadas as equações utilizadas no cálculo prático a partir dos dados levantados experimentalmente em cada processo de soldagem utilizado.

2.1 Processo de *SMAW* para Ambos os Tipos de Juntas

Cálculo do Metal de Adição

$$P_{MA} = n_E \times P_E \quad (B)$$

Onde:

P_{MA} – Peso do metal de adição (kg)

n_E – Quantidade de eletrodos consumidos
 P_E – Peso unitário do eletrodo (kg)

Cálculo da Eficiência de Deposição

$$ED = 100 \times P_{MD} / P_{MA} \quad (C)$$

Onde:

ED – Eficiência de deposição (%)
 P_{MD} – Peso do metal depositado (kg)

Cálculo da Taxa de Deposição

$$T_{DEP} = P_{MD} / t_{ARC} \quad (D)$$

Onde:

T_{DEP} – Taxa de deposição (kg/h)
 t_{ARC} – Tempo de arco aberto (h)

2.2 Processo de FCAW para Ambos os Tipos de Juntas

Cálculo do Metal de Adição

$$L_{Ar} = v_{ar} \times t_{ARC} \quad (E)$$

Onde:

L_{Ar} – Comprimento de Arame consumido (m)
 v_{ar} – Velocidade do Arame (m/min)

$$P_{MA} = L_{Ar} \times P_{Ar} \quad (F)$$

Onde:

P_{AR} – Peso unitário do arame (kg/m)

Cálculo da Eficiência de Deposição

$$ED = 100 \times P_{MD} / P_{MA} \quad (G)$$

Cálculo da Taxa de Deposição

$$T_{DEP} = P_{MD} / t_{ARC} \quad (H)$$

Uma vez levantados estes dados, foram realizados os cálculos para a determinação do custo de soldagem em cada tipo de junta, em função do seu respectivo processo de soldagem, com base em 1,0 metro de cordão.

2.3 Determinação de Custos para o Processo SMAW em Ambos os Fipos de Juntas

Cálculo do Custo de Eletrodo

$$CE = P_{MA} \times CE_{UNT} \quad (I)$$

Onde:

C_E – Custo do Eletrodo (R\$)

$C_{E\,UNIT}$ – Custo do Eletrodo por peso (R\$/kg)

Cálculo do Custo de Energia

$$P_{EI} = (V \times I) / 1000 \quad (J)$$

Onde:

P_{EI} – Potência Elétrica (kW)

V – Voltagem (V)

I – Corrente (A)

$$E_{EI} = (P_{EI} \times t_{ARC}) / \varphi_{EI} \quad (K)$$

Onde:

E_{EI} – Energia Elétrica (kWh)

φ_{EI} – Eficiência Elétrica (%)

Com relação à eficiência elétrica do equipamento de soldagem, no caso de uma fonte retificadora, seu valor pode variar entre 75% a 85%.

$$CE_{EI} = E_{EI} \times CE_{UNT} \quad (L)$$

Onde:

CE_{EI} – Custo da Energia (R\$)

CE_{UNT} – Custo da Energia (R\$/kWh)

Cálculo do Custo de Mão-de-Obra

$$t_{ARC} = P_{MD} / T_{DEP} \quad (M)$$

$$M.O. = 100 \times t_{ARC} / FO \quad (N)$$

Onde:

$M.O.$ – Mão-de-Obra (h)

FO – Fator de Ocupação (%) definido pela equação (A)

$$C_{M.O.} = M.O. \times C_{M.O.-UNT} \quad (O)$$

Onde:

$C_{M.O.}$ – Custo de Mão-de-Obra (R\$)

$C_{M.O.-UNT}$ – Custo de Mão-de-Obra unitário (R\$/h)

Cálculo do Custo Total

$$C_{TOTAL} = CE + CE_{EI} + C_{M.O.} \quad (P)$$

Onde:

C_{TOTAL} – Custo Total (R\$)

CE – Custo do Eletrodo (R\$)

2.4 Determinação de Custos para o Processo FCAW em Ambos os Tipos de Juntas

Cálculo do Custo do Arame

$$CA = P_{MA} \times CA_{UNT} \quad (Q)$$

Onde:

CA – Custo do Arame (R\$)

CA_{UNT} – Custo do Arame por peso (R\$/kg)

Cálculo do Custo do Gás de Proteção

$$CG = V_{GP} \times CG_{UNT} \quad (R)$$

Onde:

CG – Custo do Gás de proteção (R\$)

V_{GP} – Volume do Gás de Proteção (m³)

CG_{UNT} – Custo do Gás por volume (R\$/m³)

Os cálculos do custo de energia e mão de obra para este processo são idênticos aos apresentados para o processo de eletrodo revestido (*SMAW*).

Cálculo do Custo Total

$$C_{TOTAL} = CA + CG + CE_{EI} + C_{M.O.} \quad (S)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os custos calculados em cada processo em cada tipo de junta, sendo levantados a partir de valores experimentais médios colhidos no laboratório e no canteiro de obras.

Tabela 1. Custos de soldagem estimados a partir de valores experimentais.

Elementos de Custo (R\$/Kg)		Tipos de Junta			
		Junta de Ângulo		Junta de Topo	
		Processo		Processo	
		Eletrodo Revestido	Arame Tubular	Eletrodo Revestido	Arame Tubular
Material	Metal De Adição (C_{MA})	13,00	13,87	10,53	11,53
	Gás De Proteção (C_G)	-	1,13	-	0,98
Energia Elétrica ($C_{E_{EL}}$)		1,41	1,34	1,25	1,23
Mão-de-Obra ($C_{M.O.}$)		47,97	10,71	49,62	9,28
Custo Total (C_{TOTAL})		62,38	27,05	61,40	23,02

Apesar dos custos de mão de obra por hora serem semelhantes para ambos os processos (R\$ 15,40), a principal discrepância observada, na diferença entre os custos envolvidos, esta relacionada ao custo de mão de obra ($C_{M.O.}$) de cada processo. Segundo os critérios da AWS⁽¹⁾ foram adotados fatores de ocupação de 30 e 50% para os processos SMAW e FCAW, respectivamente. No entanto, os tempos de arco aberto (t_{ARC}) cronometrados em ambos os processos foram em média 0,16h/m e 0,58h/m para SMAW com junta em ângulo e de topo, assim como 0,08h/m e 0,25h/m para o processo para FCAW com junta em ângulo e de topo, respectivamente. Por fim, outra variável de importância envolvendo o cálculo do custo de mão de obra ($C_{M.O.}$) é o peso de metal depositado, sendo estimado em 0,16 e 0,60 Kg/m para o processo para SMAW com junta em ângulo e de topo. No entanto, foram obtidos os valores de 0,23 e 0,83Kg/m para o processo para FCAW com junta em ângulo e de topo.

A partir do estudo efetuado conclui-se que os principais fatores que influenciam a maior produtividade do processo de FCAW são o F.O. e a maior taxa de deposição em relação ao processo SMAW.

Por outra parte, na Tabela 1 não se exibem diferenças significativas nos custos estimados para cada tipo de junta.

Na continuação são apresentadas as equações utilizadas para o cálculo teórico de cada uma das variáveis envolvidas a partir do modelo proposto em ambos os processos de soldagem. Neste modelo, o custo para cada item nos dois processos, eletrodo revestido (SMAW) e arame tubular (FCAW), foi composto em R\$ por quilograma de solda depositada (R\$/Kg).

Custo de Mão-de-Obra

$$C_{M.O.} = \frac{C_{M.O.UNIT}}{T_{DEP} \cdot FO} \quad (T)$$

Onde:

$C_{M.O.UNIT}$ – Salário do soldador + Encargos + outros (valor médio = R\$15,40/h)

T_{DEP} – Taxa de deposição ideal (arco aberto) – (Ver tabelas 2 e 3)
 FO – Fator de ocupação, SMAW = 0,3, FCAW = 0,5

Tabela 2. Parâmetro de soldagem para o processo de SMAW.⁽⁴⁾

AWS	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Valor ótimo (A)	Tx. dep. (kg/h)	Ef. dep. (%)
E7018	2,5	65 – 105	90	0,8	66
E7018	3,2	100 – 150	120 / 140	1,2 / 1,2	72 / 71
E7018-1	4,0	130 – 200	140 / 170	1,4 / 1,7	75 / 74
E7018-1	5,0	185 – 270	200 / 250	2,2 / 2,4	76 / 75

Tabela 3. Parâmetro de soldagem para o processo de FCAW.⁽⁵⁾

Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Taxa Deposição (Kg/h)	Eficiência Deposição (%)	Extensão Eletrodo (mm)
1,2	150	28	1,90	87	10 - 20
	210	29	2,85	87	10 - 20
	250	30	3,85	88	10 - 20
	290	33	4,85	88	10 - 20
	330	34	5,75	90	10 - 20

Custo de consumíveis de soldagem

$$C_{MAT} = C_{MA} + CG \quad (U)$$

$$C_{MA} = C_{MA\,UNIT} / ED \quad (V)$$

Onde:

ED – Eficiência do metal de adição – (Ver tabelas 2 e 3)

$C_{MA\,UNIT}$ – Preço do metal de adição – o valor médio é:

Eletrodo Revestido = R\$8,00/kg

Arame Tubular = R\$11,00/kg

$$CE = \frac{8}{0,69} = R\$11,59/kg \quad (1) \text{ eletrodo revestido}$$

$$CA = \frac{11}{0,87} = R\$12,64/kg \quad (2) \text{ arame tubular}$$

$$CG = (T_{FG} \times CG_{UNIT}) / T_{DEP} \quad (\text{custo do gás}) \quad (W)$$

Onde:

T_{FG} – vazão do gás (litros/hora) – (Ver tabela 4)

CG_{UNIT} – preço do gás – (R\$0,0037/litro)⁽⁶⁾

$$CG = \frac{900 \times 0,0037}{2,80} = R\$1,19/\text{kg} \quad (2) \text{ arame tubular}$$

Tabela 4. Vazão do gás de proteção no processo FCAW.⁽⁵⁾

	Vazão do gás de proteção
Arames tubulares com fluxo não metálico	15 - 20 l/min
Arames tubulares com fluxo metálico	18 - 20 l/min

Custo com energia elétrica. (CE_{EI})

V – Voltagem (V)

I – Amperagem (A)

CE_{UNIT} = Preço do kwh - (R\$ 0,53 / kwh)

φ_{EL} = Eficiência do equipamento (75 %)

T_{DEP} = Taxa de deposição ideal (arco aberto).

$$CE_{EL} = \frac{20 \times 100 \times 0,53}{0,75 \times 1 \times 1000} = R\$1,41/\text{kg} \quad (1) \text{ Eletrodo revestido (SMAW)}$$

$$CE_{EL} = \frac{28 \times 200 \times 0,53}{0,75 \times 2,80 \times 1000} = R\$1,41/\text{kg} \quad (2) \text{ Arame tubular (FCAW)}$$

Custo total de soldagem (C_{TOTAL})

O custo total de soldagem (em Reais por quilograma de metal depositado) será:

$$C_{TOTAL} = C_{M.O.} + C_{MAT} + CE_{EI} \quad (X)$$

$$C_{TOTAL} = 51,33 + 11,59 + 1,41 = R\$ 64,33/\text{kg} \quad (1) \text{ eletrodo revestido (SMAW)}$$

$$C_{TOTAL} = 11,00 + 13,83 + 1,41 = R\$ 26,24/\text{kg} \quad (2) \text{ arame tubular (FCAW)}$$

Tabela 5. Custos de soldagem estimados a partir do modelo teórico proposto.

ELEMENTOS DE CUSTO (R\$/Kg)	TEÓRICO	
	PROCESSOS	
	Eletrodo Revestido	Arame Tubular
Material	11,59	13,83
Energia Elétrica	1,41	1,41
Mão-de-Obra	51,33	11,00
Custo Total	64,33	26,24

Comparando a Tabelas 1 e 5 pode-se assegurar que os custos do modelo adotado para cada processo se encontram próximos daqueles obtidos experimentalmente. Deste modo, o modelo descrito pode ser utilizado em distintos empreendimentos para estimar os custos da soldagem nos processos estudados com um grau de confiança elevado. Da mesma forma, também pode ser verificado que os custos dos dois processos de soldagem para os dois tipos de junta, nos quesitos de material e energia elétrica, são bem próximos. A mesma observação é pertinente para o custo teórico.

Assim como no calculo experimental, no que concerne ao custo da mão-de-obra no processo de arame tubular, a diferença é bem acentuada, sendo aproximadamente cinco vezes menor ao custo do eletrodo revestido.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo permite concluir:

1. Como resultado final do estudo realizado, fica evidenciado que o processo de soldagem *FCAW* (Arame Tubular) é o mais econômico quando comparado com o *SMAW* (Eletrodo Revestido) para ambos os tipos de juntas analisadas. Cabe destacar, que apesar dos equipamentos de soldagem do processo *FCAW* possuírem um custo significativamente mais alto em comparação com o processo *SMAW*, para grandes volumes de metal solda depositado esta diferença é rapidamente compensada em favor do processo *FCAW*.
2. Um modelo de custo teórico foi apresentado exibindo resultados semelhantes àqueles obtidos experimentalmente. Sendo assim, fica evidenciado que a produtividade calculada através do modelo teórico proposto, utilizando dados de tabelas disponíveis na literatura, pode ser empregada com resultados satisfatórios sem a necessidade de obtenção de dados experimentais.

REFERÊNCIAS

- 1 AWS. Welding Handbook. V. 1, 8. ed. American Welding Society, 1987. p. 265-286.
- 2 The Lincoln Electric Company. The Procedure Handbook of Arc Welding. 12.ed. Cleveland: 1973. Seção 12.
- 3 Modenesi, Paulo J. Estimativa de Custos em Soldagem. Belo Horizonte: UFMG, 2001. 7 p. Disponível em:
<http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt/custo_em_soldagem.pdf>. Acesso em: 27 maio de 2007.
- 4 Catálogo do processo *SMAW* da ESAB.
- 5 Catálogo do processo *FCAW* da ESAB.
- 6 White Martins. Tabela base de custos de gases industriais. Abril de 2008.