

**“MODELAÇÃO DE CUSTOS DE CORTE E SOLDADURA DE AÇO EM
REPARAÇÃO NAVAL”**

*J. Manuel Gordo¹, I. Silva Carvalho², J. Leiria de Lima³ e C. Guedes
Soares⁴*

¹ Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval, Instituto Superior Técnico,
Lisboa, Portugal
jgordo@mar.ist.utl.pt

² Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval, Instituto Superior Técnico,
Lisboa, Portugal
irene@mar.ist.utl.pt

³ Sistemas e Tecnologias, Lisnave Estaleiros Navais, S.A.,
Setúbal, Portugal
leiria.lima@lisnave.pt

⁴ Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval, Instituto Superior Técnico,
Lisboa, Portugal
guedess@mar.ist.utl.pt

Resumo

Aborda-se a temática da modelação de custos de corte e soldadura de (chapas) de aço na área da caldeira naval, em oficina e a bordo. Estes custos constituem *de per si* custos elevados e podem induzir a custos adicionais, como sejam custos decorrentes de tempo extra de ajuste e posicionamento durante a montagem ou de qualidade (decorrentes da necessidade de retrabalho da chapa devido a deterioração das propriedades mecânicas do aço devido a ter uma zona termicamente afectada, etc.,) e ambientais e que são função da tecnologia usada, pelo que são custos muito significativos do custo total de obras de reparação naval; sua modelação constitui uma importante ferramenta de apoio à orçamentação e controlo de custos mas também uma importante ferramenta para optimização de custos através do equipamento tecnológico usado.

O corte e a soldadura representam actividades discretas de toda uma obra de reparação; para a modelação destes custos considerou-se apenas custos directos – fixos e variáveis –, nomeadamente custos com materiais consumíveis, custos com mão-de-obra directa e custos com equipamento e energia. O modelo é linear com o volume de produção e as funções de custo foram modeladas em unidades €/m. Apresenta-se um exemplo numérico de aplicação do modelo para comparar a economicidade de diferentes tecnologias de corte e soldadura baseada nas suas variáveis técnicas.

1 Introdução

A orçamentação constitui um dos factores determinantes na análise de procura feita pelos Armadores e constitui um dos factores estratégicos na análise de oferta e desempenho feita pelos estaleiros navais.

Conceptualmente, as actividades produtivas envolvidas numa obra de reparação podem ser modeladas (J. Gordo et al., 2006) e as actividades de corte e soldadura definidas podem ser definidas como actividades discretas nesse organigrama. Estas actividades são as que mais homens-hora consomem e a tecnologia utilizada pode induzir a importantes custos não produtivos.

Existem vários trabalhos sobre esta problemática (Pavlovčič et al., 2004; Farkas, 2005; Uys et al., 2003; Jarmai, 1999; Klanšek et al., 2006a e 2006b), quer do ponto de vista da modelação e análise de custos quer do ponto de vista de optimização de processo em diferentes áreas de especialização, seja engenharia, seja gestão.

Neste trabalho, pretende-se modelar os custos destas actividades fazendo realçar a importância de variáveis técnicas para comparar diferentes tecnologias de corte e soldadura; intrinsecamente ligado às variáveis técnicas estão os custos directos envolvidos. Nesta nossa primeira abordagem ao tema, subdividiu-se os custos em:

- Custos com materiais consumíveis, incorridos pelo consumo de eléctrodos, fluxo, etc.; exclui-se o custo com a chapa de aço, uma vez que este não é um constrangimento técnico de uma tecnologia particular, i.e., independentemente da tecnologia usada a mesma quantidade de chapa será usada.
- Custos com mão-de-obra, incorridos pela utilização de força de trabalho humana;
- Custos com equipamento (manutenção e depreciação) e energia, incorridos pelo desgaste do equipamento e consumo energético.

Outras abordagens, recentes, são o método *ABC (Activity-Based Costing)* – (Özbayrak et al., 2004) uma metodologia particularmente usada em sistemas de manufatura avançados e automatizados –, e o método da *Entidade de Custo (CE)* – um conceito particularmente útil para estimar custos de produção e de produtos em gestão e produção industrial, justificado pela crescente importância dos custos indirectos de produção nas indústrias de manufatura (H'mida et al., 2006).

Independentemente da abordagem, na literatura é habitual encontrar as funções de custo desenvolvidas em unidades de tempo. Vários autores consideram preferível usar unidades de tempo porque o tempo de corte/soldadura de diferentes tecnologias é diferente, permitindo uma comparação directa ou entre tecnologias independentemente da situação económica de diferentes países quando se quer comparar a produtividade entre países. No entanto, este pode ser um argumento discutível porque o tempo de corte/soldadura para a mesma tecnologia pode variar e.g. em função do grau de destreza técnica do trabalhador, etc. É também habitual encontrar as funções de custo desenvolvidas em função da geometria da estrutura a cortar e soldar.

Neste trabalho desenvolveu-se as funções de custo em unidades monetárias por metro de corte e cordão de soldadura e para um volume de produção genérico. A comparação da economicidade, produtividade e competitividades de diferentes tecnologias entre diferentes situações económicas pode igualmente ser feita com rácios de factores de custo adequados, e.g., o número de homens-hora necessários, etc.).

2 Modelação de custos

O custo operacional de uma obra de reparação, C , é considerado como a soma dos custos de cada actividade envolvida, c_i :

$$C = \sum c_i \quad (1)$$

onde $c_i = \sum a_j^i$; a_j^i significa o j -ésimo custo específico do i -ésima actividade.

Se considerarmos apenas os custos operacionais das actividades de corte e soldadura (1) resume-se a (conforme a figura 1):

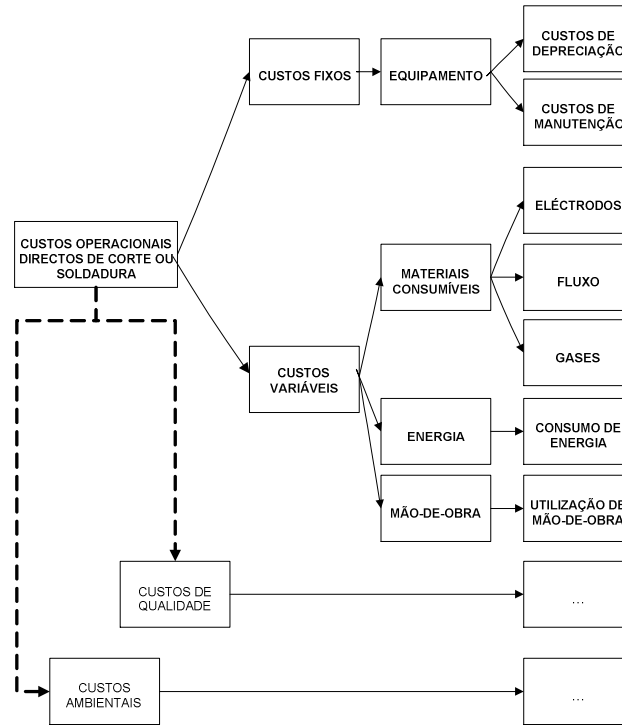


Figura 1 – Representação Esquemática dos custos directos operacionais considerados

$$C = \sum a_j = \left(\begin{matrix} \text{custos} \\ \text{fixos} \end{matrix} \right) + \left(\begin{matrix} \text{custos} \\ \text{variáveis} \end{matrix} \right) = \quad (2)$$

$$= \left(\begin{matrix} \text{Custos com} \\ \text{equipamento} \\ \text{e energia} \end{matrix} \right)_{\text{fixos}} + \left[\left(\begin{matrix} \text{Custos com} \\ \text{consumíveis} \end{matrix} \right) + \left(\begin{matrix} \text{Custos com} \\ \text{mão - de - obra} \end{matrix} \right) \right]_{\text{variáveis}}$$

Aos custos operacionais deveriam ser acrescentados os custos ambientais e de qualidade.

2.1 Custos com equipamento

2.1.1 Custo de depreciação

Este custo, designado por $c_{deg.}$, reflecte a perda de valor comercial do equipamento devido ao seu desgaste por utilização. Assume-se que a utilização do equipamento está intrinsecamente ligada ao volume de produção. Por obra de reparação, este custo pode ser analiticamente expresso pela equação:

$$c_{deg.} = \left(\frac{A_{eq.}}{D_{eq.} \cdot V_{prod.}} \right) \times t \quad (3)$$

onde: $A_{eq.}$ [€] designa o custo de aquisição do equipamento, $D_{eq.}$ [ano] designa a durabilidade do equipamento (entendida como o tempo de vida útil do equipamento), $V_{prod.} = V_i \times \eta_{eq. disponivel} \times \eta_{eq. alocado}$ [h/ano] designa o

volume de produção anual e $t = \frac{1}{v}$ [h/m] designa o tempo de corte/soldadura do equipamento.

Por sua vez:

$V_i = s \times d \times h$ [h/ano] traduz o volume anual ideal, onde s designa o número anual de semanas úteis de trabalho, d designa o número semanal de dias úteis de trabalho e h designa o número diário de horas úteis de trabalho; $\eta_{eq. disponivel} : 0 < \eta_{eq. disponivel} < 1$ designa a fracção de V_i que o equipamento está disponível, i.e., $\eta_{eq. disponivel} = 1 - \eta_{eq. em \text{ manutenção}}$; $\eta_{eq. alocado} : 0 < \eta_{eq. alocado} < 1$ designa a fracção de V_i que o equipamento está efectivamente alocado a uma obra (conforme a figura 2);

$v = v_i \times \eta_r$ [h/m] traduz a velocidade de processamento corrigida: v_i [h/m] designa a velocidade ideal de processamento e η_r designa um factor correctivo, empírico, de cadência para compensar desvios como a destreza do trabalhador, etc.

2.1.2 Custo de manutenção

Este custo, designado por $c_{meq.}$, reflecte o custo com a manutenção anual do equipamento como consequência do desgaste, etc., por utilização. Assim, por obra de reparação, este custo pode ser analiticamente expresso pela equação:

$$c_{meq.} = \left(\frac{M_{eq.}}{V_{prod.}} \right) \times t \quad (4)$$

onde, $M_{eq.}$ designa o custo anual de manutenção do equipamento e as outras variáveis mantêm o significado antes definido.

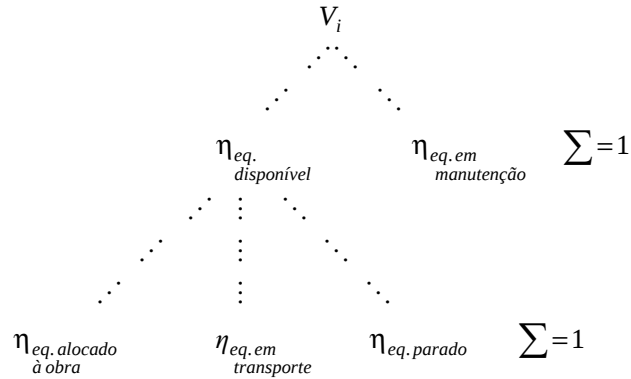


Figura 2 – Modelação da estrutura de distribuição do equipamento

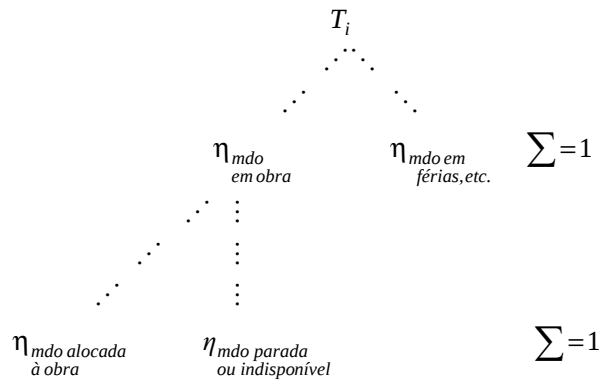


Figura 3 – Modelação da estrutura de distribuição da mão-de-obra

2.2 Custos com mão-de-obra directa

Este custo, designado por c_{mdo} , pode ser analiticamente expresso pela equação

$$c_{mdo} = p_{mdo} \times t \times n_t \quad (5)$$

onde p_{mdo} [€/h] designa o preço unitário de compra da mão-de-obra directa; neste trabalho assume-se que o tempo de utilização de mão-de-obra é igual ao tempo de utilização do equipamento. Isto é uma simplificação porque na prática são necessárias actividades pré e pós corte/soldadura e que podem (ou devem) ser afectas às próprias actividades de corte e soldadura. I.e. fazendo uma subdivisão análoga à ilustrada na figura 2, para a mão-de-obra teríamos a figura 3; n_t significa o número de trabalhadores envolvidos na operação do equipamento.

E, portanto, $\eta_{mdo \text{ alocado em obra}}$ pode ser diferente do $\eta_{eq. \text{ alocado à obra}}$ e os respectivos tempos também, Para simplificação, neste trabalho assume-se que os tempos são iguais.

2.3 Custos com energia

O custo com o consumo energético, designado por c_e pode ser expresso analiticamente pela equação:

$$c_e = \left[\frac{1}{1000} \times \left(\frac{I \times V}{\phi} \right) \right] \times t \times p_e \quad (6)$$

onde: I [Ampere] designa a intensidade de corrente;

V [V] designa a voltagem;

p_e [€/kWh] designa o preço unitário de compra da energia eléctrica;

ϕ designa a eficiência do equipamento devido a perdas por efeito de Joule, etc. Alguns valores empíricos específicos são resumidos na tabela 1:

Equipamento	Transformador	Rectificador trifásico	Rectificador monofásico	Gerador
ϕ	0.8	0.75 (≤ 400 A)	0.8 (> 400 A)	0.65

Tabela 1 – Eficiência de consumo energético por tipo de equipamento

2.4 Custos com material consumível

2.4.1 Gases de corte e de protecção

O custo com o consumo de gases de corte, protecção ou outro usado, designado por c_g , pode ser expresso analiticamente pela equação:

$$c_g = \left(\frac{G}{\rho_g} \right) \times p_g \times n_{cos} \quad (6)$$

onde G [kg/m] designa a taxa de consumo do gás; ρ_g [kg/m³] designa a densidade do gás, p_g [€/m³] designa o preço unitário de compra do gás e n_{cos} designa o número de cabeças de corte/soldadura em operação simultânea.

2.4.2 Eléctrodos

O custo com o consumo de eléctrodos, designado por c_f , pode ser expresso analiticamente pela equação:

$$c_f = F \times p_f \times n_{cos} \quad (7)$$

onde F [kg/m] designa o consumo (corrigido) de eléctrodo e p_f [€/kg] designa o preço unitário de compra do eléctrodo.

Por sua vez, $F = F' \times \eta_f$ onde F' [kg/m] designa a taxa de consumo (igual à taxa de deposição) ideal e η_f designa um factor correctivo, empírico, que depende do tipo de tecnologia usado. Alguns valores empíricos específicos são resumidos na tabela 2. Mesmo que possa depender do trabalhador, a tecnologia usada tem mais influência da variação do parâmetro.

<i>Tecnologia</i>	<i>Soldadura por eléctrodos revestidos</i>	<i>Soldadura por arco submerso</i>
η_f	0.65	0.95

Tabela 2 – Eficiência de consumo de eléctrodo por tipo de tecnologia

2.4.3 Fluxo

O custo com o consumo de eléctrodos, designado por c_x pode ser expresso analiticamente pela equação:

$$c_x = X \times p_x \times n_{cos} \quad (8)$$

onde X [kg/m] designa o consumo (corrigido de fluxo; p_x [€/kg] designa o preço unitário de compra do fluxo.

Substituindo as equações (3) a (8) na equação (2), resulta que o custo operacional de corte/soldadura, em €/m é explicitado pela equação (9):

$$\begin{aligned} C &= (d_{meq.} + c_{meq.}) + c_{mdo} + c_e + c_g + c_f + c_x = \\ &= t \cdot \left[\frac{A_{eq.}}{D_{eq.} \cdot V_{prod.}} + \frac{M_{eq.}}{V_{prod.}} + p_{mdo} + \left(\frac{I \times V}{1000 \times \varphi} \right) \cdot p_e \right] + \left(\frac{G}{\rho_g} \right) \cdot p_g + \\ &+ F \cdot p_f + X \cdot p_x \end{aligned} \quad (9)$$

2.5 Limitações do modelo

O modelo desenvolvido tem algumas limitações de conceptuais: as funções de custo apresentam um comportamento linear com o volume de produção não tendo em conta a geometria da estrutura a reparar; o valor previsto é o valor a menos de respectivos custos ambientais, de qualidade, sendo estes custos função da tecnologia usada e não sendo contabilizados podem não distinguir custos importantes quando se compara uma tecnologia para ser utilizada a bordo ou em oficina. Estas limitações afectam directamente o custos calculado da actividades de corte e soldadura e, por adição, o custo total de reparação. A aferição e refinamento do modelo implica as posteriores análises de sensibilidade e de robustez, e que fazem parte do trabalho a desenvolver posteriormente.

3 Exemplo Numérico

Considere-se os seguintes dados para as seguintes tecnologias de corte e soldadura. Os dados foram reportados por estaleiros navais portugueses; alguns dados são experimentais. Para oxicorte considere-se o corte e soldadura ao baixo de chapas de aço com 14 mm e para corte por plasma considere-se chapas de aço com 20 mm de espessura. Admite-se, ainda, ter apenas um trabalhador a operar o equipamento e uma cabeça de corte/soldadura a operar.

<i>Tecnologia</i>	<i>Oxicorte manual</i>	<i>Oxicorte automático</i>	<i>Corte por plasma</i>
<i>Velocidade média do processo [m/h]</i>	15.3	17.6	99.5
<i>Custo médio de aquisição do equipamento [€]</i>	60	70 000	1 000 000
<i>Custo anual médio de manutenção do equipamento [€/ano]</i>	15	2 100	25 435
<i>Durabilidade média do equipamento [ano]</i>	3	20	20
<i>Consumo de Gases de corte</i>	C_2H_2 : 0.0838 [kg/m] O_2 : $\frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{C}_2\text{H}_2}} = 5$	C_3H_8 : 0.086 [kg/m] O_2 : $\frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{C}_3\text{H}_8}} = 5$	N_2 : 0.045 [kg/m]

Tabela 3 – Definição de parâmetros de equipamento de corte por tecnologia

<i>Tecnologia</i>	<i>Soldadura por eléctrodos revestidos</i>	<i>Soldadura por fios fluxados</i>	<i>Soldadura por arco submerso</i>
<i>Velocidade média do processo [m/h]</i>	3.4	4.71	5.42
<i>Número de passes por metro de cordão de soldadura</i>	4	4	3
<i>Custo médio de aquisição do equipamento [€]</i>	2 500	4 000	29 000
<i>Custo anual médio de manutenção do equipamento [€/ano]</i>	75	120	870
<i>Durabilidade média do equipamento [ano]</i>	10	10	10
<i>Consumo de Gases de protecção [kg/passe]</i>	-	0.34	-
<i>Consumo de eléctrodo e eficiência de consumo</i>	2.68 [kg/m] φ : 0.9	3.81 [kg/m] φ : 0.9	2.69 [kg/m] φ : 0.9
<i>Consumo de fluxo</i>	-	0.94 [kg/m]	-
<i>Consumo energético e eficiência do equipamento</i>	4.24 φ : 0.75	4.73 φ : 0.75	20.26 φ : 0.8

Tabela 4 – Definição de parâmetros de equipamento de soldadura por tecnologia

Substituindo valores na equação (9), obtêm-se as seguintes fórmulas de cálculo, em unidades de [euro/m]:

- Oxicorte manual:

$$\frac{2.29}{V_{prod.}} + 6.54 \times 10^{-2} \times p_{mdo} + 3.22 \times 10^{-4} \times p_{O_2} + 6.45 \times 10^{-5} \times p_{C_2H_2} ;$$

- Oxicorte automático:

$$\frac{2.29}{V_{prod.}} + 5.69 \times 10^{-2} \times p_{mdo} + 3.37 \times 10^{-4} \times p_{O_2} + 6.73 \times 10^{-5} \times p_{C_3H_8} ;$$

- Corte por plasma:

$$\frac{689}{V_{prod.}} + 1.01 \times 10^{-2} \times p_{mdo} + 2.12 \times 10^{-5} \times p_{N_2} ;$$

- Soldadura por eléctrodos revestidos:

$$\frac{106}{V_{prod.}} + 2.94 \times 10^{-1} \times p_{mdo} + 2.98 \times p_f + 1.66 \times p_x ;$$

- Soldadura por fios fluxados:

$$\frac{123}{V_{prod.}} + 2.12 \times 10^{-1} \times p_{mdo} + 4.23 \times p_f + 1.34 \times p_e + 7.39 \times 10^{-4} \times p_g ;$$

- Soldadura por arco submerso:

$$\frac{733}{V_{prod.}} + 1.85 \times 10^{-1} \times p_{mdo} + 2.99 \times p_f + 2.99 \times p_x + 4.67 \times p_e ;$$

Assumindo que o tempo máximo útil de trabalho é 52 semanas/ano, 5 dias/semana e 8h/dia, dá um total de 2080 h/ano, 1 trabalhador, e ainda as assumções das tabelas 5 e 6:

p_{mdo} [€/h]	$\eta_{eq. disponível}$	$\eta_{mdo} \text{ alocado}$ em obra	V_{prod} [h/ano]
39	0.9	0.7	1310

Tabela 5 – Assumpções para o volume de produção anual a considerar

p_{O_2} [€/m ³]	$p_{C_2H_2}$ [€/m ³]	$p_{C_3H_8}$ [€/m ³]	p_{N_2} [€/m ³]	$p_{\text{gás de protecção}}$ [€/m ³]	p_f^1 [€/kg]	p_x [€/kg]	p_e [€/kW]
0.203	3.24	1.219	0.59	2.37	0.72; 2.12; 1.45	1.72	0.05

Tabela 6 - Assumpções para consumos a considerar

Substituindo todos os valores obtém-se as seguinte figuras:

Redução de custos	Oxicorte automático versus Oxicorte manual	Corte automático por plasma versus Oxicorte manual
Mão-de-obra	13%	84%
Gases de corte	45%	93%

Tabela 7 Comparação da economicidade de diferentes tecnologias de corte

Redução de custos	Soldadura por fios fluxados versus Soldadura por eléctrodos revestidos	Soldadura por arco submerso versus soldadura por eléctrodos revestidos	Soldadura por fios fluxados versus Soldadura por arco submerso
Mão-de-obra	28%	37%	- 13%
Energia	19%	- 64%	71%
Eléctrodos	- 76%	- 51%	- 52%

Tabela 8 Comparação da economicidade de diferentes tecnologias de soldadura

Importantes reduções de custos operacionais podem ser conseguidas pela opção por tecnologias avançadas.

As figuras 4 e 5 comparam os custos de corte e soldadura em unidades de €/m de corte e soldadura.

¹ Os fluxos usados variam consoante a tecnologia usada; os preços associados a esses fluxos também são diferentes: 0.72 [€/kg] será usado no cálculo do custo da soldadura por eléctrodos revestidos, 2.12 [€/kg] será usado no cálculo do custo da soldadura por fios fluxados e 1.45 [€/kg] será usado no cálculo da soldadura por arco submerso.

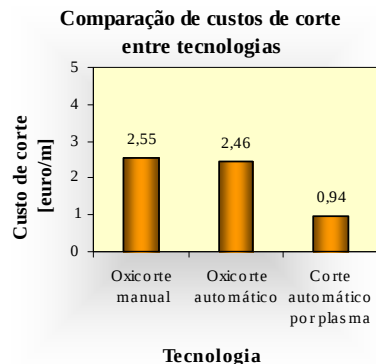


Figura 4 – Comparação de custos unitários de corte

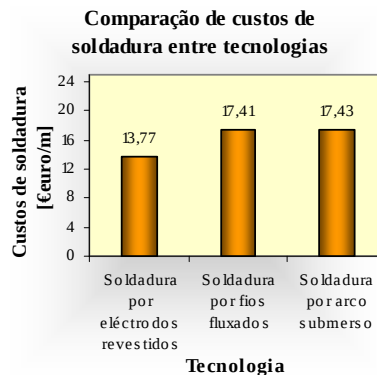


Figura 5 – Comparação de custos unitários de soldadura

A quantificação percentual da contribuição de cada item de custo para este custo unitário é ilustrada nas figuras 6-10. Os custos com mão-de-obra constituem uma fatia importante do custo com material consumível, pelo que a automatização das tecnologias usadas traduz vantagens competitivas.

O comportamento dos custos unitários e com o volume de produção é ilustrado nas figuras 12 e 13. O aumento do volume de produção rentabiliza o equipamento. Para este efeito contribui a diminuição dos custos com equipamento e o aumento dos custos com mão-de-obra (os mais significativos) e com materiais consumíveis e energia, pelo que as tecnologias com maior velocidade de processamento se tornam vantajosas para maiores volumes de produção, quando o peso dos custos com equipamento tende para zero.

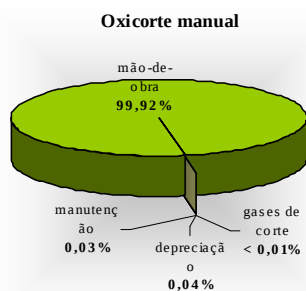


Figura 6 – Percentagem do i-ésimo item para o custo operacional de corte

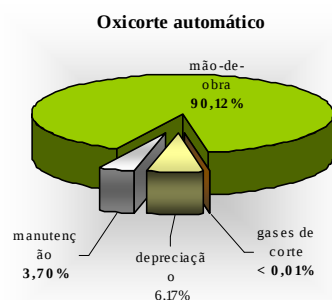


Figura 7 - Percentagem do i-ésimo item para o custo operacional de corte

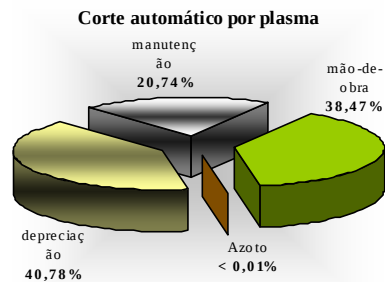


Figura 8 – Percentagem do i-ésimo item para o custo operacional de corte

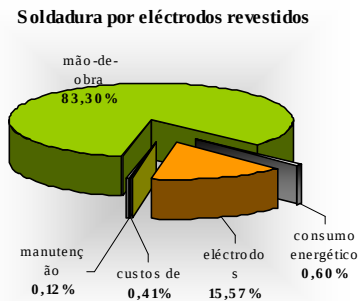


Figura 9 - Percentagem do i-ésimo item para o custo operacional de soldadura

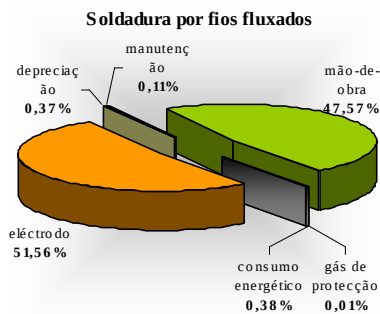


Figura 10 - Percentagem do i-ésimo item para o custo operacional de soldadura

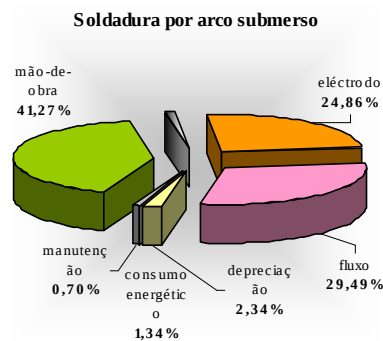


Figura 11 – Percentagem do i-ésimo item para o custo operacional de soldadura

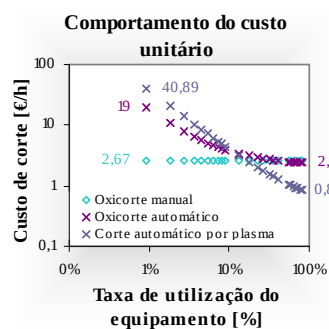


Figura 12 – Variação dos custos de corte com o volume de produção anual

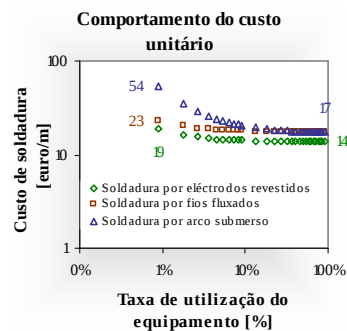


Figura 13 – Variação dos custos de soldadura com o volume de produção anual

Estas são as figuras iniciais de custo de acordo com as hipóteses e simplificações iniciais. A aferição e refinamento do modelo implica as posteriores análises de sensibilidade e de robustez.

Reconhecimento

Este artigo apresenta parte do trabalho desenvolvido no âmbito do projecto SHIPMATES (**SHIP**repair to **MA**intain Transport which is **E**nvironmentally **S**ustainable), co-financiado pela Comissão Europeia, sob a prioridade temática 6.2: Desenvolvimento Sustentável, Alteração Global & Ecossistemas – transporte 1 e transporte 2, através do contrato FP6 – 506606.

Os autores agradecem aos participantes do projecto as valiosas contribuições, comentários e empenho durante todas as etapas do projecto.

Referências:

Farkas, J. “*Structural Optimization as a Harmony of design, fabrication and economy*” (2005), *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 30, pp. 66 – 75.

H'mida, F, Martin, P. e Vernadtat, F., “*Cost estimation in mechanical production: The Cost Entity approach applied to integrated product engineering*” (2006), *International Journal of Production Economics*, Vol. 203, pp 17-35.

Jármai, K e Farkas, J., “*Cost calculation and optimisation of welded steel structures*” (1999), *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 50, pp. 115-135.

Klanšek, K. e Kravanja, S., “*Cost estimation, optimization and competitiveness of different composite floor systems – Part 1: Self manufacturing cost estimation of composite steel structures*” (2006), *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, pp. 434-448.

Klanšek,U. e Kravanja, S., “*Cost estimation, optimization and competitiveness of different composite floor systems – Part 2: Self manufacturing cost estimation of composite steel structures*” (2006), *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, pp. 449-462

Özbayrak, M., Akgün, M. e Türker, A.K, “*Activity-based cost estimation in a push/pull advanced manufacturing system*” (2004), *International Journal of Production Economics*, Vol. 87, pp 49-65.

Paclovčič, L., Kranjc, A. e Beg, D., “*Cost function analysis in the structural optimization of steel frames*” (2004), *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 28, pp. 286 – 295.

Gordo, J.M., Carvalho, I. Silva e Guedes Soares, C., “*Potencialidades de Processos Tecnológicos Avançados de Corte e União de Aço em Reparação Naval*” (2006), Actas das X Jornadas de Engenharia Naval.

Uys, P.E., Jarmai, K. e Farkas, J. ,“*Optimal design of a hoist structure frame*” (2003), Applied Mathematical Modelling, Vol. 27, pp. 963-982

Wainer, E., Brandi, S.D. e Homem de Mello, F. D., “*Soldagem – Processos e Metalurgia*” (1995), Ed. Edgard Blücher, S. Paulo.