

Inovação e Desenvolvimento nas Actividades Marítimas, C. Guedes Soares e V. Gonçalves de Brito (Eds.), Edições Salamandra, Lisboa, 2006, (ISBN xxx-xxx-xxx-x), pp. xx-xx

POTENCIALIDADES DE PROCESSOS TECNOLÓGICOS AVANÇADOS DE CORTE E UNIÃO DE AÇO EM REPARAÇÃO NAVAL

J. M. Gordo, I. S. Carvalho e C. Guedes Soares

Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval, Instituto Superior Técnico,
Universidade Técnica de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1049-001 Lisboa
jose.gordo@ist.utl.pt, guedess@mar.ist.utl.pt

Resumo

Esta comunicação aborda aspectos ligados ao desenvolvimento tecnológico dos estaleiros de reparação naval na áreas de caldeiraria, em oficina e a bordo, explorando a aplicabilidade no sector de tecnologias de corte e união de aço, avançadas e alternativas. Estas tecnologias competem entre si e, quando comparadas com tecnologias tradicionalmente usadas, apresentam vantagens, algumas das quais económicas, metodológicas e ambientais. Contudo, apresentam diferentes limitações, algumas das quais implicam alterações de procedimento, de processo e sociológicas, impedindo a sua aplicação até que esses aspectos particulares não sejam resolvidos.

As tecnologias de corte consideradas incluem: *corte por jacto de água com abrasivo, corte por feixe de laser e corte por plasma*; as tecnologias de união de materiais consideradas incluem: *soldadura por feixe de laser, soldadura por plasma, soldadura híbrida laser – plasma, soldadura por fricção e ligação por adesivos*.

Estas tecnologias foram identificadas através da análise de necessidade de inovação tecnológica de estaleiros navais portugueses e europeus de reparação e da análise de oferta de equipamentos comerciais; a caracterização e a comparação das tecnologias foram feitas através da análise de informação disponibilizada por diferentes fornecedores de equipamento e através de desenvolvimentos resultantes de diferentes projectos de investigação europeus e nacionais.

1 Introdução

Na actividade de reparação naval, as actividades de corte e soldadura são as actividades produtivas que mais homens-hora consomem e representam a maior fatia do custo total de reparação. O equipamento usado (com pouca inovação tecnológica) e o *modus operandi* são factores determinantes no desempenho actual dos estaleiros, em particular para actividades a bordo.

Tomando como referência importantes estaleiros de reparação naval europeus participantes no projecto europeu 'SHIPMATES' (2003-2006), pode-se sistematizar as actividades tipicamente envolvidas numa reparação de navios comerciais (em que o aço é o principal material estrutural) como indicado figura 1, e estimar os gastos com mão de obra necessários para a realização das mesmas actividades.

Nas actividades a bordo, o corte e a soldadura de chapa são feitos em modo manual: maçarico de corte (oxicorte) e soldadura por eléctrodos revestidos ou por fio fluxado. Nas actividades em oficina, o corte de chapa é feito por oxicorte em modo automático mas com baixa velocidade de processamento e para soldar usa-se (por ordem de menor utilização) soldadura por eléctrodos revestidos (em modo manual), soldadura com fios fluxados (em modo semi-automático) e soldadura por arco submerso (em modo automático). Alguns estaleiros navais usam, marginalmente, corte por laser e plasma, mas estes estaleiros têm normalmente a construção como actividade principal, tendo investido nestas tecnologias como forma de aumentar a produtividade e qualidade.

Uma outra característica genérica da reparação naval do aço é a percentagem elevada de tempo e mão de obra gastos nas actividades a bordo, não estando os processos produtivos e de preparação de trabalho orientados para maximizar as operações em oficina. Tal, deve-se em parte à forma de contratação da obra e da sua evolução temporal.

A rentabilização do tempo e dos recursos envolvidos nas actividades de corte e soldadura, através da adopção de tecnologias avançadas, automatizadas, com múltiplas cabeças de corte e uso de sistemas de CAD/CAM, com melhor precisão, consumo optimizado de consumíveis, com elevadas velocidades de processamento e portáteis, são vectores principais e reconhecidamente identificados para reparações mais económicas (Rolland et al., 2004), (Figueiredo et al., 2001), (Gordo et al., 2006).

2 Actividades na Reparação do Casco

Num estudo recente (Gordo et al., 2006) calculou-se as possíveis reduções de diferentes custos directos envolvidos comparando o oxicorte em modo manual e em modo automático, e o oxicorte em modo automático e corte por plasma em modo automático. Estes valores são resumidos na tabela 1. Para diferentes processos de soldadura, a mesma informação é resumida na tabela 2. Estes cálculos foram obtidos com base num modelo de custos desenvolvido e em informação fornecida pelos estaleiros navais envolvidos no projecto acima mencionado.

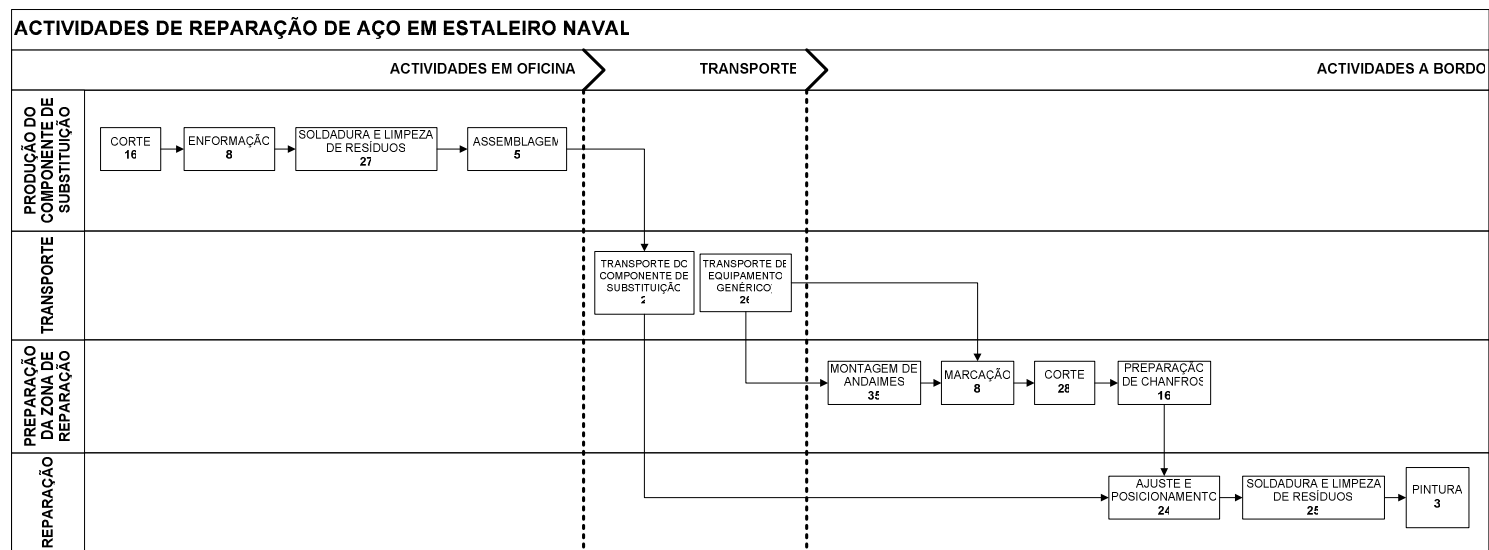


Figura 1 – Actividades tipicamente envolvidas em obras de reparação naval de navios comerciais

Redução de custos	Oxicorte em modo automático vs oxicorte em modo manual	Corte por plasma em modo automático vs oxicorte em modo automático
<i>Mão-de-obra directa</i>	13%	80%
<i>Gases de corte</i>	45%	71%

Tabela 1 – Comparação da redução de custos directos potencial entre diferentes tecnologias de corte

Redução de custos	Soldadura por fios fluxados vs soldadura por eléctrodos revestidos	Soldadura por arco submerso vs soldadura por eléctrodos revestidos	Soldadura por fios fluxados vs soldadura por arco submerso
<i>Mão-de-obra directa</i>	28%	37%	- 13%
<i>Energia</i>	19%	- 64%	71%
<i>Eléctrodos</i>	- 76 %	- 51%	- 52%

Tabela 2 – Comparação da redução de custos directos potencial entre diferentes tecnologias de soldadura

Os custos indirectos resultantes da qualidade de corte e soldadura, como sejam necessidade de trabalho complementar devido a distorções térmicas, deformações mecânicas, tempo de ajuste, etc. são igualmente importantes, e função do equipamento usado, entre outros factores. Segundo Rolland et al. (2006), este trabalho não produtivo pode ascender a 30% do esforço total de produção na indústria de construção naval em alguns casos.

Esta comunicação tem como motivação caracterizar e comparar diferentes tecnologias de corte e união de aço, do ponto de vista dos fundamentos do processo mas sobretudo discutir vantagens, limitações e desenvolvimentos com vista à sua aplicabilidade e implementação na indústria de reparação naval a curto – médio prazo, por ser um factor estratégico para a competitividade e desenvolvimento sustentável dos estaleiros de reparação naval portugueses face aos seus congéneres europeus e asiáticos.

Os aspectos ambientais são uma preocupação crescente sobretudo por imposições legais e pressão social. As tecnologias usadas actualmente são ambientalmente muito onerosas e pouco inócuas, associadas à excessiva concentração de fumos nocivos e barulho produzido. No entanto, adoptando eventualmente algumas das tecnologias alternativas, que medidas deverão ser tomadas de modo a respeitar o ciclo de vida dos equipamentos tecnológicos obsoletos? Em que medida isto tem impacto no ambiente?

3 Tecnologias Alternativas de Corte e Soldadura

As tecnologias consideradas neste artigo podem ser classificadas conforme a natureza do corte e da ligação produzida, e de acordo com o tipo da fonte de energia, apresentando-se nas figuras 2 e 3 uma sistematização possível.

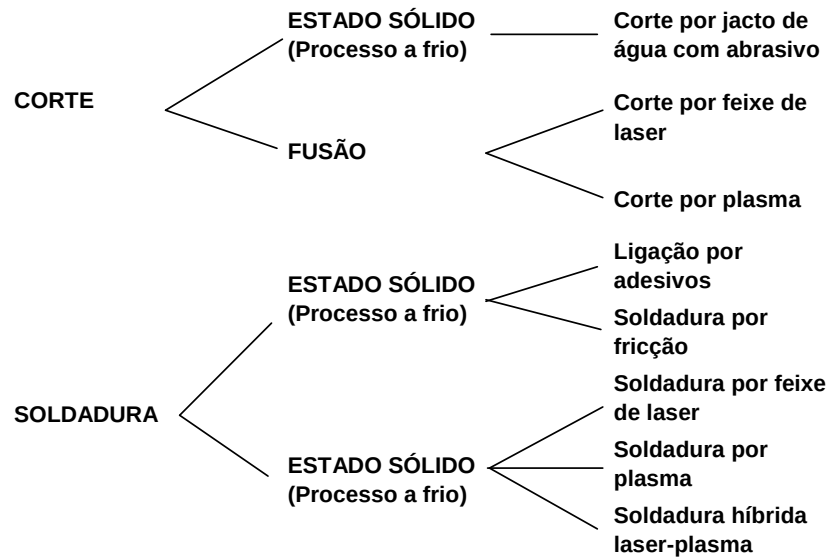


Figura 2 – Classificação dos processos alternativos de corte e soldadura considerados em função da natureza do corte e ligação resultantes

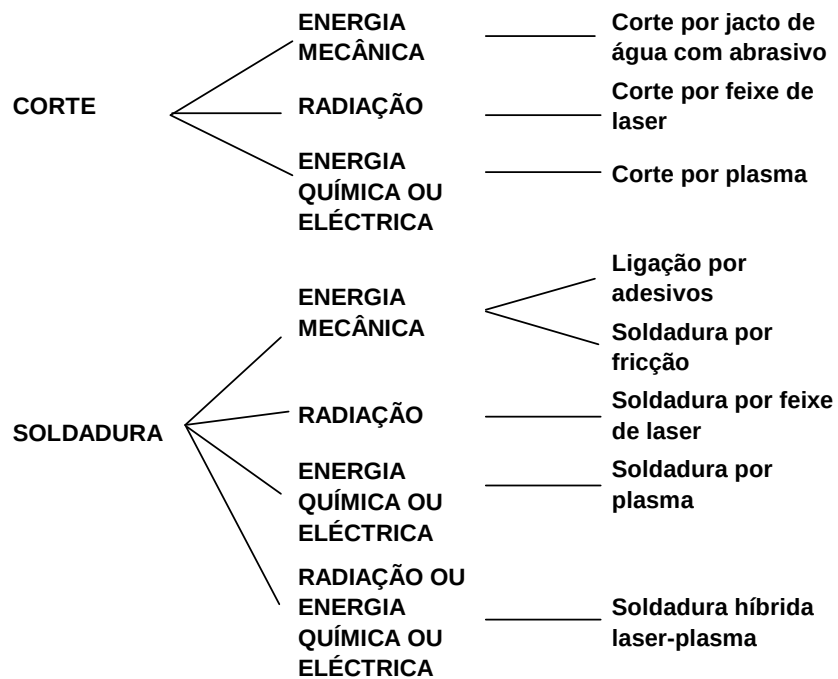


Figura 3 – Classificação dos processos alternativos de corte e soldadura considerados em função do tipo de energia requerida

3.1 Tecnologias Alternativas de Corte

As tecnologias de corte actualmente disponíveis ao nível industrial são o corte por jacto de água com abrasivo, corte por feixe de laser e o corte por plasma.

➤ Corte por jacto de água com abrasivo

Trata-se de um processo a frio cujo princípio de acção de corte é a erosão do metal base sob acção de uma suspensão aquosa abrasiva (figura 4). As substâncias abrasivas existem na forma de partículas (e.g., sílica) e, mais recentemente, sob a forma de gel (longas cadeias poliméricas). Os resíduos de corte são recolhidos pelo equipamento. Dependendo da composição do aço, é uma tecnologia economicamente utilizável para espessuras entre 1 e 50 mm, com precisão de corte de ~ 0.1 mm e tolerância de ~ 0.2 mm para espessuras baixas.

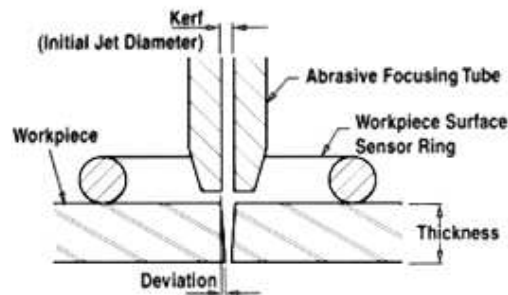


Figura 4 – Esquematisação do processo de corte por jacto de água com abrasivo

➤ Corte por feixe de laser

Trata-se de um processo térmico cujo princípio de acção de corte é por fusão do metal base sob a acção de um feixe de radiação laser (figura 5). O laser CO₂ e o laser Nd-YAG (acrónimo inglês para Neodymium-Yttrium-Aluminium garnet) são os mais usados industrialmente. A junta de corte é removida por jacto de gás, que pode ser inerte (para produzir arestas de corte não oxidadas) ou quimicamente activo (para aumentar a velocidade de corte). Dependendo da composição do aço, é uma tecnologia económica para espessuras de ~ 3 mm até ~ 10 mm, com precisão de corte de ~ 0.025 mm e tolerância de ~ 0.05 mm.

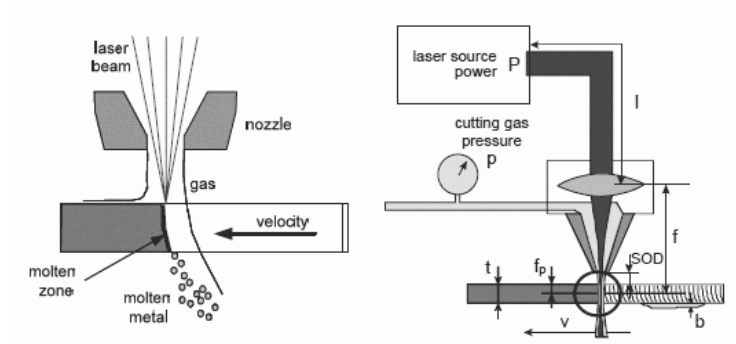


Figura 5 – Esquematização do processo de corte por feixe de laser

➤ Corte por plasma

Trata-se de um processo a quente cujo princípio da acção de corte é por fusão do metal base sob a acção de um feixe de plasma produzido por descarga eléctrica entre um ânodo e um cátodo através de meio gasoso (figura 6). O meio gasoso é tipicamente ar comprimido, mas pode ser um gás inerte ou activo. A escória de corte é removida por jacto de ar comprimido. Dependendo da composição do aço, é uma tecnologia económica para espessuras de ~ 3 mm até ~ 10 mm (verificar acho muito pouco), com precisão de corte de ~ 0.8 a 1.5 mm e tolerância de ~ 0.5 mm.

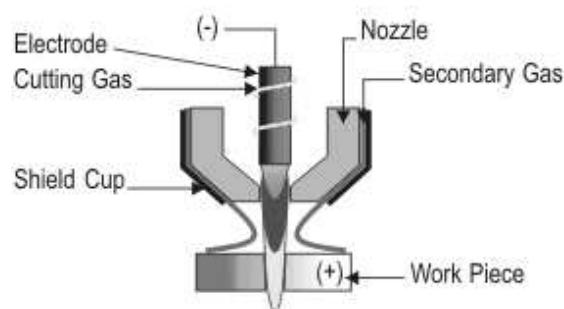


Figura 6 - Esquematização do processo de corte por plasma

➤ Análise comparativa e aplicações

Conceptualmente, os principais benefícios destas tecnologias no corte em oficina, quando comparadas com o oxicorte manual e automático, são:

- Aumento da produtividade e redução de custos operacionais (directos e indirectos);
- Melhoria da qualidade das superfícies de corte;
- Redução do impacte ambiental e melhoria da segurança e higiene no trabalho.

Para o aumento da produtividade contribuem:

- O aumento da velocidade de corte dos equipamentos, com factores multiplicativos entre 1.5 para o corte por jacto de água com abrasivo e 5 para o corte por feixe de laser e corte por plasma, mas que dependem da espessura do material, quando comparados com o oxicorte,
- A redução e minimização de actividades suplementares como seja redução de tempos de marcação e de montagem pelo uso de sistema de posicionamento automático e de sistemas CAD/CAM,
- A redução de actividades de trabalho suplementar de correcção e ajuste pelo facto de serem processos a frio ou em que a energia térmica transferida para o metal é controlada, minimizando efeitos de deformação térmica e de degradação das propriedades mecânicas do aço pela acção do calor, e

Complementarmente, por terem melhor precisão e tolerâncias mais apertadas, optimizam os custos operacionais e melhoram a qualidade da reparação.

Para a redução do impacto ambiental e do aumento da qualidade de segurança e higiene no trabalho contribuem:

- A redução do consumo de chapa necessária (aproximadamente 7%);
- A redução de resíduos (aproximadamente 90%) e o consumo mais eficiente de gases (pelo aumento das velocidades de processamento, optimização do caudal e libertação de fumos). Note-se que nenhuma das tecnologias referidas anteriormente produzem directamente dióxido de carbono ao contrário por exemplo do oxicorte.

Estas vantagens também se aplicam para o corte a bordo, com importância acrescida. No entanto, a sua aplicabilidade a bordo tem várias condicionantes. A especificidade do corte a bordo impõe limitações na utilização de sistemas muito automatizados ou que requeiram condições excepcionais para a sua implementação. Muitas das tecnologias aqui mencionadas ainda requerem condições de trabalho muito condicionadas ao acesso por outros trabalhadores quer pela sua perigosidade intrínseca quer por ambientais incompatíveis com o desenvolvimento de outros trabalhos em áreas circundantes. As principais limitações do uso de lasers convencionais são a produção de muita escória, uma gama de espessuras de aplicação limitada e importantes problemas de segurança, especialmente pela utilização de potências elevadas. Enquanto que uma das principais limitações do corte por plasma é a necessidade de utilizar elevadas frequências iniciais para estabelecer o arco, que interfere com equipamento electrónico como sejam computadores, etc.

Os custos operacionais destas tecnologias diferem consideravelmente como esquematizado na tabela 3.

	Corte de água com abrasivo ⁴	Corte por feixe de laser ⁵	Corte por plasma ⁶
<i>Recursos</i>	Energia, água abrasivo, mão-de-obra	Energia, gás laser, gás de corte, mão-de-obra	Energia, mão-de-obra
Consumos médios	Energia: 22-35 kW; água: 10 l/h; abrasivo: 36 kg/h	Energia: 24-40 kW; gás laser: 2 – 16 l/h; gás de corte: 500 – 2000 l/h	Energia: 55 kW

Tabela 3 – Comparação dos custos operacionais de diferentes tecnologias de corte.
⁴Considerando o uso de um gerador de 20 kW; ⁵ Considerando um laser CO₂ com 1500 W de potência; ⁶ Considerando uma lâmpada de 300 A.

Estas tecnologias encontram aplicações em vários sectores chave de desenvolvimento: indústria aeronáutica, automóvel e electrónica, e mesmo na indústria de construção naval, em menor escala. Alguns desenvolvimentos e aplicações recentes destas tecnologias são ilustrados nas figuras 7 a 12.



Figura 7 – Corte por jacto de água com abrasivo de chapa de aço para substituir no casco (desenvolvimento comercial: DIAJET®)

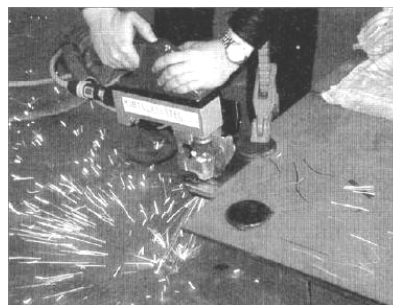


Figura 9 – Equipamento de corte manual por Laser (DOCKLASER, 2002)



Figura 8 – Corte por jacto de água com abrasivo de tubagem (OSPREY®)

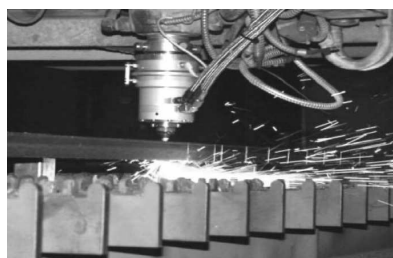


Figura 10 – Equipamento de corte automático por Laser (LASOX™7®)



Figura 11 – Equipamento de corte manual por plasma



Figura 12 – Equipamento de corte automático por plasma

Desenvolvimentos comerciais recentes de corte por jacto de água com abrasivo incluem desenvolvimento de processo e de equipamento; nomeadamente: desenvolvimento de suspensões abrasivas gelificadas (SUPER-WATER®); a acção abrasiva é intensificada pela hidratação do gel antes de formar a suspensão. Outros desenvolvimentos de processo incluem a investigação de fluidos criogénicos como fluido de corte; a nível de desenvolvimento de equipamento, caminha-se para a introdução de múltiplas cabeças de corte em equipamento automatizado cuja movimentação e acção é controlada numericamente e com sistema CAD/CAM, optimização dos componentes da cabeça de corte em número e robustez, aumentando o tempo de vida útil e optando por materiais com melhor resistência ao desgaste. Um exemplo deste tipo é o sistema AUTOLINE® pela Ingersoll-Rand. As figuras 7 e 8 ilustram os desenvolvimentos e aplicações desta tecnologia desenvolvidos pelo grupo BHR (UK).

Desenvolvimentos comerciais recentes de corte por laser incluem desenvolvimento de processo e de equipamento. O sistema LASOX^{TM7}® (figura 10), acrónimo inglês para Laser Assisted Oxygen, usa oxigénio para auxiliar a acção de corte do aço e um nozzle especialmente concebido para direccionar um jacto supersónico de oxigénio para a superfície a cortar, permitindo cortar secções de aço como espessuras entre 50 mm a 100 mm sem aumentar a potência do laser para além dos 2kW; a vantagem deste sistema é a utilização do oxigénio cuja reacção com o aço é muito exotérmica, gerando calor adicional para fundir e cortar o metal e com melhor qualidade de corte porque a quantidade de calor direccionada para o aço é controlada. Outro desenvolvimento importante, feito no âmbito da indústria de construção e reparação naval para utilizar a bordo na montagem final, é o sistema móvel resultante do projecto DOCKLASER (figura 9): a técnica de processamento e o equipamento utiliza um sistema mecânico de locomoção e é usado em modo manual; é um sistema flexível e pode ser usado em locais de acesso limitado.

Uma das vias de desenvolvimento da tecnologia de corte por plasma é desenvolvimento de equipamento com menor frequência inicial para estabelecer o arco eléctrico ionizador.

3.2 *Tecnologias Alternativas de União*

➤ **Soldadura por feixe de laser**

Trata-se de um processo a quente cujo princípio de acção de soldadura é por fusão e coalescência dos metais base sob acção do calor gerado por radiação incidente, coerente, concentrada e energeticamente muito intensa (figura 13). Com o aumento da potência do laser, a profundidade de penetração e a espessura do metal que pode ser soldada num único passe aumenta; permite soldar em várias posições, exigindo cada situação tolerâncias e técnicas específicas. A sua implementação na indústria naval é muito reduzida e praticamente inexistente na reparação do aço.

➤ **Soldadura por plasma**

Trata-se de um processo térmico cujo princípio de acção de soldadura é por fusão e coalescência dos metais base sob acção do calor gerado pelo arco estabelecido entre o eléctrodo e o metal base ou entre o eléctrodo de tungsténio e o orifício constringente. O arco ioniza um gás aumentando a sua temperatura acima dos 20 000°C, sendo este projectado sobre a zona a soldar (figura 14). Tal como o laser é um processo que permite soldar em várias posições, exigindo cada situação tolerâncias e técnicas específicas. Quando automatizada, a soldadura por plasma é normalmente feita na horizontal e ao baixo.

➤ **Soldadura híbrida laser-plasma**

Combina as sinergias dos dois princípios de acção (figura 15). Permite maiores profundidades de penetração com lasers de menor potência; é aplicável a outras geometrias de junta, especialmente, filetes em juntas topo-a-topo e sobrepostas.

➤ **Soldadura por fricção**

Trata-se de um processo a frio cujo princípio de acção de soldadura é por fricção entre as superfícies metálicas a soldar, sob a acção do calor gerado por fricção; é considerado um processo a frio porque a temperatura de processo é inferior à temperatura de fusão dos metais (figura 16). Tem sido usado para soldar juntas topo-a-topo, juntas sobrepostas, juntas de canto e juntas e T e pode ser usado em todas as posições porque é um processo a frio, exigindo cada situação técnicas específicas. A sua implementação na indústria naval está em crescimento com especial incidência da construção de embarcações em alumínio.

➤ **Ligação por colagem adesiva**

Trata-se um processo a frio cujo princípio de acção é a união entre duas superfícies metálicas por adesivos sob acção das forças de adesão metal/adesivo (figura 17). Os adesivos usados são colas e, mais recentemente, adesivos de epoxi.

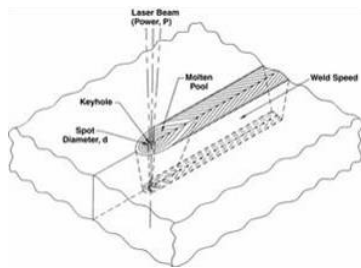


Figura 13 – Soldadura por feixe de laser



Figura 16 – Soldadura híbrida laser – plasma

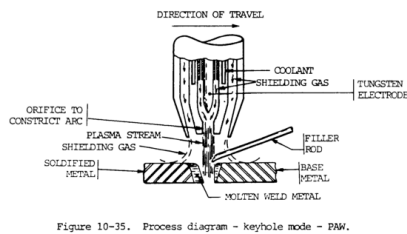


Figure 10-35. Process diagram - keyhole mode - PAW.

Figura 14 – Soldadura por plasma

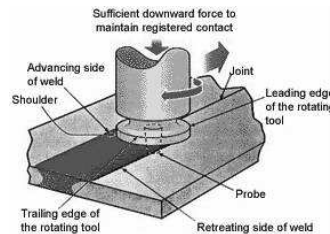


Figura 17 – Soldadura por fricção

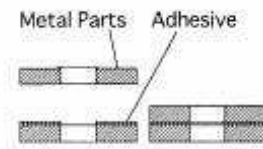


Figura 15 – Ligação por adesivos

➤ Análise comparativa e aplicações

Conceptualmente, os principais benefícios destas tecnologias na soldadura a bordo ou em oficina incluem:

- Aumento da produtividade, eficiência e redução de custos operacionais (directos e indirectos);
- Melhoria da qualidade das soldaduras e da estrutura reparada, pela minimização da distorção térmica, consequência do maior controlo sobre o calor incidente na superfície ou por ser um processo a frio;
- Redução do impacto ambiental e melhoria da segurança e higiene no trabalho, pela menor libertação de fumos, etc.

Alguns desenvolvimentos destas tecnologias são ilustrados nas figuras 18 a 22.



Figura 18 – Equipamento de soldadura manual por Laser (DOCKLASER, 2002)



Figura 20 – Equipamento de soldadura manual por plasma (ROWER, 1998)



Figura 19 – Equipamento de soldadura híbrida automática



Figura 21 – Equipamento automático de soldadura por fricção

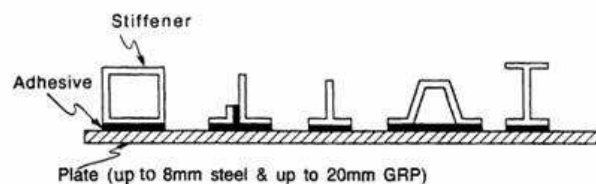


Figura 22 – Possíveis componentes estruturais usados em estruturas marítimas aos quais a ligação por adesivos é uma tecnologia aplicável

4 Conclusões

A inovação tecnológica na actividade de reparação naval é uma necessidade premente e garantia da sua competitividade económica, através do aumento da produtividade e redução de custos operacionais. Neste sentido, e como resultado do trabalho desenvolvido num projecto europeu, abordou-se diferentes aspectos relacionados com o desenvolvimento tecnológico dos processo de corte e soldadura usados em estaleiros de reparação naval, nomeadamente, caracterizou-se resumidamente algumas das tecnologias de corte e soldadura cujos desenvolvimentos tecnológicos recentes potenciam a sua aplicabilidade nas actividades de reparação naval, na área de caldeiraria. O uso destas tecnologias na

indústria automóvel e aeronáutica são o paradigma da importância de usar tecnologias avançadas como forma de melhoria da produtividade e qualidade do produto final, mas também de redução de custos operacionais. O facto de existirem vários projectos de investigação dedicados a estes assuntos corrobora a importância do avanço tecnológico para estas indústrias e aos quais a indústria de reparação naval não pode estar alheia.

5 Reconhecimento

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

Os autores agradecem aos participantes no projecto as valiosas contribuições, comentários e empenho durante todas as etapas do projecto.

6 Referências

ASM Handbook Committee, “*Metals Handbook*” (1983), Vol. 14, 9th ed., ASM, OHIO

J. M. Gordo, I. S. Carvalho, J. M., Lima, J.L. e Guedes Soares, C. “*Modelação de Custos de Corte e Soldadura de Aço em reparação Naval*” (2006), Inovação e Desenvolvimento nas Actividades Marítimas, C. Guedes Soares e V. Gonçalves de Brito (Eds.), Edições Salamandra, Lisboa, 2006, (In Press xxx-xxx-xxx-x), pp. xx-xx

Jarry, E. et al. “*Performance of Butt Strap Joints for Marine Applications*” (2006), International Journal of Adhesion & Adhesives, 26

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

E. M. Knox et al., “*Adhesively Bonded Steel Corrugate Core Sandwich Construction for Marine Applications*”, (1998, Marine Structures, 22

F. Rolland, L. Manzoni, P. Kujala, M. Brede e J. Weitzenböck, “*Advanced Joining Techniques in European Shipbuilding*”, 2004, Journal of Production, Vol. 20, N. ° 3, pp. 200-210

H. Hasaga et al., “*Assembly Technique for Control Panel Enclosures with the Combined Adhesive and Rivets and the Reduction of energy Consumption*”, 2003, International Journal of Adhesion & Adhesives, 23

J. F. Oliveira Santos, e L. Quintino, “*Processos de Soldadura*”, Oeiras, 1993, Vol. I, ISQ

J. F. Oliveira Santos, e L. Quintino, “Processos de Soldadura”, Oeiras, 1993, Vol II, ISQ, Oeiras

J. M. Figueiredo, “Guia Técnico Sectorial – Sector da Metalurgia e Metalomecânica”, 2001) INETI

J. M. Figueiredo, “Guia Técnico Sectorial – Sector da Indústria Marítima”, 2001, INETI

J. M. Figueiredo, “PNAPRI – Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais”, 2001, INETI

L. Manzon, “*Laser Welding Process: A Research Project on Quality Assurance and Control*”, 2004, Journal of Ship Production, Vol. 20, N. ° 3, pp. 188-192.

7 Referências de Projectos I&D e Comerciais

DIAJET, <http://www.bhrgroup.com/diajet/index.htm>

OSPREY, <http://www.bhrgroup.com/diajet/osprey-mp.htm>

DOCKLASER (2002), <http://www.docklaser.com/>;

www.bendership.com

DOCKWELDER (2001), <http://www.mip.sdu.dk/dockwelder/>

ECONWELD (2006), projecto europeu, <http://www.econweld.com/>

ROWER (2000), <http://www.iai.csic.es/users/gds/default.htm>

LOSTIR, <http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=acro.resultslist&CFID=11010897&CFTOKEN=46879971>

BONDSHIP (2000), <http://research.dnv.com/bondship/>

IWM water jet cutter, <http://www.iwmwaterjet.com/>

Tesko Laser, <http://teskolaser.com/>

<http://www.osaka-gu.ac.jp/php/nakagawa/TRIZ/eTRIZ/eforum/e2006Forum/eETRIATFC2006Rep/eFiggDuflou1.GIF>

<http://www.weldguru.com/plasma-welding.html>