

Projeto de automatização de processos de soldadura de estruturas hiperestáticas em ligas de alumínio

A indústria de transportes é um dos setores mais importantes na economia global e qualquer alteração neste setor repercute-se nos custos de praticamente todos os outros setores económicos. Devido aos preços cada vez mais elevados da energia e às exigências ambientais progressivamente mais restritivas houve necessidade, por parte desta indústria, em adaptar-se a uma nova realidade. Assim, os diferentes setores da indústria de transporte têm-se adaptado às novas exigências a diversos níveis, que vão desde o desenvolvimento de sistemas de propulsão, vulgo motores, mais eficientes [1, 2] à seleção de materiais mais leves [3, 4].

No âmbito do projeto Portugal2020 "APSEHAL: *Automatização de Processos de Soldadura de Estruturas Hiperestáticas em Ligas de Alumínio*", a Roboplan e o Instituto Politécnico de Bragança irão desenvolver a componente da seleção de materiais mais leves, e nesse sentido tem-se verificado uma substituição progressiva dos materiais metálicos clássicos como o aço ou o ferro fundido, com elevada resistência mecânica, mas muito densos por materiais com uma densidade inferior, sendo de destacar os compósitos [5], ligas de magnésio [6] e ligas de alumínio [7]. Estes materiais têm, para além da leveza, boas propriedades mecânicas e elevada resistência à corrosão atmosférica [8], daí a sua crescente utilização nos diferentes tipos de transporte. Assim pode ver-se a sua aplicação na indústria automóvel [6, 9, 10], naval [11], ferroviária [12] e aeronáutica [13, 14]. Entre estes materiais destacam-se as ligas de alumínio com um preço inferior e os processos de fabrico e produção mais simples do que as ligas de magnésio [8] ou os materiais compósitos [15].

A utilização na indústria de transportes de ligas de alumínio tem vindo a crescer, particularmente na indústria automóvel ligeira e pesada, tanto a nível estrutural [7] como de componentes em chapa [16]. De acordo a "Associação Europeia de Alumínios", a substituição do aço pelas ligas de alumínio nos veículos permitiu uma poupança de 30% nos consumos energéticos e uma significativa redução de emissões de CO₂ [17], este material tem também a vantagem de ser totalmente reciclado. Devido à sua baixa densidade e resistência à corrosão, estes materiais são também muito utilizados em veículos não motorizados, nomeadamente nas bicicletas [18] e cuja utilização tem crescido significativamente [19]. Apesar de todas as vantagens enumera-

das das ligas de alumínio existem algumas desvantagens comparativamente com as ligas ferrocarbónicas, nomeadamente o preço mais elevado, processos de fabrico mais exigentes ao nível de controlo de qualidade [20], processos de ligação por soldadura mais difíceis [21, 22] e uma vida à fadiga menor [23]. No caso da indústria de transportes essas limitações são mais significativas na soldadura de elementos estruturais como, por exemplo, os chassis de automóveis ou os quadros de bicicletas. Estes elementos correspondem a estruturas hiperestáticas de elevada rigidez que, associadas às tensões residuais geradas durante o processo de soldadura, poderão provocar fissuração [24] ou empenos da estrutura [7, 24] e, no caso de não ocorrer fissuração ou empenos, o nível de tensões residuais é tão elevado que diminuirá significativamente a vida à fadiga dessas estruturas [25, 26]. Dadas as dificuldades na soldadura de estruturas hiperestáticas com os processos convencionais de soldadura por arco elétrico protegido por gás, MIG ou TIG, tem-se tentado utilizar outros processos de ligação como a rebitagem, soldadura de resistência por pontos, colagem com adesivos estruturais e, mais recentemente, soldadura com laser [7, 24] e por fricção linear [27]. A escolha de cada uma destas alternativas vai depender da geometria, dimensões e do tipo de liga utilizada, contudo, existem estruturas, como no caso dos quadros de bicicletas, que as alternativas aos processos de soldadura convencionais são tecnicamente muito difíceis de implementar e economicamente inviáveis para o fabrico de bicicletas em grande escala, sendo, geralmente, aplicadas no fabrico de séries limitadas e/ou específicas para competição [28].

Certas características intrínsecas ao alumínio introduzem dificuldades particulares para a soldadura. A mais importante destas corresponde à formação de uma camada de óxido superficial, resultante da reação do alumínio com oxigénio atmosférico. Esta película protege o metal contra a corrosão, mas também tem um ponto de fusão consideravelmente mais elevado do que o elemento Al original. Por conseguinte, uma soldadura bem-sucedida depende, em parte, da técnica aplicada para a desagregação desta camada de óxido, que irá manter-se estável, mesmo depois da fusão do alumínio [29].

No caso da soldadura MIG o fluxo do gás de revestimento sobre o eletrodo consumível remove o óxido do banho de fusão. Contudo, este efeito não ocorre na soldadura TIG, neste caso, o eletrodo não consumível deve ser usado para dispersar a película de óxido. Este efeito é conseguido através do tipo de polarização do eletrodo, quando se usa corrente contínua com polaridade positiva, forma-se o ponto catódico na peça, o que



torna a ponta do eletrodo mais quente que a peça, diminui a penetração da soldadura e produz o chamado "efeito de decapagem catódica na peça" (bombardeamento de iões do eletrodo para a peça) que provoca, em determinadas situações, a destruição das camadas de óxidos existentes na superfície da peça, o que favorece a ligação soldada. Quando se usa corrente alternada, o ponto catódico forma-se, alternadamente, na peça e no eletrodo, originando o aparecimento da "decapagem catódica" e, simultaneamente, diminuindo o aquecimento do eletrodo, o que favorece a penetração relativamente ao que ocorreria com corrente contínua com polaridade positiva [29]. Existem, no entanto, outras limitações importantes no processo de soldadura de ligas de alumínio usadas no fabrico de estruturas hiperestáticas, sendo as mais relevantes:

Suscetibilidade à fissuração na soldadura: durante a soldadura autogénea existe uma tendência, em algumas ligas de alumínio, para ocorrer fissuração devido à formação de uma película frágil na junta de grão. A fissuração ocorre como o resultado da segregação de elementos de liga com baixo ponto de fusão e da migração de impurezas para as fronteiras ou limites de grão [29]. A presença desse filme com fraca coesão nos limites do grão torna a soldadura suscetível à ocorrência de fissuração intergranular, provocada pelas tensões originadas na contração do material durante a solidificação.

Distorções e tensões termicamente induzidas: a introdução de uma quantidade de calor considerável, resultante do arco elétrico da soldadura, origina, normalmente, um significativo grau de distorção e um elevado nível de tensões residuais de origem térmica [29].

Tratamento térmico pós-soldadura: como a junta soldada contém uma região (cordão de soldadura) que é semelhante a um fundido e como a estrutura do metal ao seu redor, a zona afetada pelo calor (ZAC) é significativamente alterada pelo processo de soldadura, a junta soldada corresponde a uma parte da estrutura mais fragilizada. Para garantir que resistência mecânica da junta soldada seja semelhante à do metal base é necessário realizarem-se tratamentos térmicos, o que acrescenta um custo adicional ao processo de soldadura. Alternativamente, alguns autores como Winter et al. [30] sugerem alterações geométricas na preparação de juntas com o objetivo de reduzir as tensões residuais na ZAC, aumentando assim a capacidade para suportar cargas externas e diminuir a possibilidade de ocorrência de falhas.

Apesar das dificuldades referidas anteriormente, é possível soldar estruturas hiperestáticas em ligas de alumínio com técnicas convencionais (MIG ou TIG), desde que se escolham os parâmetros de soldadura adequados, a preparação correta de juntas, a fixação dos elementos a soldar com o grau de rigidez ajustada e uma sequência de soldadura que limite a distorção e as tensões residuais [31, 32]. Contudo, só é possível adequar todos estes parâmetros durante o processo de soldadura, isto é, há a necessidade de ir ajustando e balanceando alguns destes elementos enquanto se está a executar a soldadura e, como tal, obriga a que estes processos sejam manuais e dependam da qualificação e sensibilidade do soldador. Logo é extremamente difícil automatizar este processo havendo, por isso, a necessidade de um estudo e desenvolvimento profundos para a automatização de sistemas de soldadura de estruturas hiperestáticas fabricadas em ligas de alumínio.

A abordagem proposta para contornar as limitações da soldadura automatizada ou robotizada para soldar estruturas hiperestáticas de ligas de alumínio será realizada em duas fases distintas: simulação numérica com recurso a programas de elementos finitos dedicados à soldadura e ensaios experimentais com um *robot* de soldadura baseados num método de otimização, Taguchi, com o objetivo de determinar os parâmetros de soldadura ótimos para o tipo de soldadura em análise.

Nas últimas décadas, os métodos de simulação numérica têm vindo, progressivamente, a substituir a realização de ensaios experimentais em diversos processos de fabrico [33, 34, 35, 36], que têm custos mais elevados e o tempo de preparação e realização dos ensaios muito superior ao tempo de computação necessário para simular o comportamento dos materiais processados. No caso das soldaduras é fundamental que as simulações prevejam as distorções [36], as tensões residuais [37] e, em alguns casos, a alteração da microestrutura do cordão de soldadura [38]. Nestas simulações é necessário definir a geometria dos elementos que pretendem ligar, os materiais a soldar, os parâmetros de soldadura (corrente, tensão, velocidade, distância da tocha à peça) e o grau de rigidez da fixação das peças. Com base nestes parâmetros é possível simular a soldadura e obter os resultados referidos. Normalmente, os programas dedicados à simulação de soldadura têm bases de dados com as alterações termodinâmicas e microestruturais para diferentes temperaturas e materiais garantindo, desta forma, uma elevada acuidade nos resultados obtidos.

Os métodos experimentais são normalmente realizados em ambientes laboratoriais controlados [39], embora possam também ser realizados no campo [40]. No trabalho que se pretende desenvolver neste projeto está previsto realizarem-se os ensaios experimentais num laboratório com ambiente controlado, que será constituído por um *robot* com um aparelho de soldadura e um sistema de fixação das peças (*gabarit*). Para além desta estrutura base está previsto a utilização de um equipamento de macrografia para análise dos cordões de soldadura [41] e de um equipamento para controlo dimensional com o objetivo de medir as distorções [42]. No decurso deste estudo pretende-se, também, medir as tensões residuais com o método do furo incremental [43] e controlar os defeitos internos com correntes induzidas de Eddy e ultrassons [44]. Está também planeado a determinação de algumas propriedades mecânicas da soldadura [45], nomeadamente, a tensão de cedência, tensão de rotura, alongamento após rotura e ductilidade da junta. Uma parte significativa dos elementos de controlo da qualidade das soldaduras, baseiam-se na norma ASME IX [46]. Os ensaios experimentais permitirão determinar os parâmetros de soldadura ótimos para obtenção de soldaduras de boa qualidade, nesse sentido e para diminuir o número de ensaios experimentais optou-se por recorrer a um método de otimização muito utilizado no controlo de qualidade na indústria, denominado método de Taguchi [47, 48]. Este método permite definir planos de ensaios experimentais, onde são indicadas várias combinações de parâmetros de soldadura e, entre essas combinações, é possível obter o valor ótimo para determinada característica de controlo. As vantagens deste método têm-no popularizado na definição de planos de ensaios experimentais em vários processos de fabrico [49, 50], nomeadamente, na soldadura [51, 52]. O método de Taguchi é utilizado na soldadura

para a determinação de parâmetros ótimos em diferentes processos de soldadura e que vão desde os processos convencionais como o TIG [53] a processos mais recentes como o caso da soldadura a laser [54], ou o processo que tem estado muito em voga no mundo académico e que é soldadura por fricção linear [55]. O método de Taguchi é uma ferramenta poderosa para o planeamento de ensaios de processos de fabrico, contudo, ela vem frequentemente associada a outras técnicas de tratamento de dados estatísticos [56, 57] ou de otimização [58], que lhe permite realizar uma análise mais eficiente e completa dos resultados obtidos nos ensaios.

Assim, a implementação deste projeto será efetuado do acordo com as bases técnico científicas apresentadas nesta descrição do estado da arte e identificação das características inovadoras do processo.

REFERÊNCIAS

- [1] Nurettin Demirdöven, John Deutch, "Hybrid Cars Now, Fuel Cell Cars Later", *Science*, Vol. 305, 5686, 2004, pp. 974-976;
- [2] Sheldon S. Williamson, Ali Emadi, Kaushik Rajashekara, "Comprehensive Efficiency Modeling of Electric Traction Motor Drives for Hybrid Electric Vehicle Propulsion Applications", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 56 4, 2007, pp. 1561-1572;
- [3] Elaheh Ghassemieh, "Materials in Automotive Application, State of the Art and Prospects", Chapter book of New Trends and Developments in Automotive Industry, Edited by Marcello Chiaberge, ISBN 978-953-307-999-8, Publisher: InTech, 2011, pp. 365-394;
- [4] N. Chawla, K. K. Chawla, "Metal-matrix composites in ground transportation", *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 58, 11, 2006, pp. 67-70;
- [5] James Holbery and Dan Houston, "Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications", *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 58, 11, 2006, pp. 80-86;
- [6] Mustafa K. Kulecki, "Magnesium and its alloys applications in automotive industry", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 39, 9-10, 2008, pp. 851-865;
- [7] Daniel Carle, Gordon Blount, "The suitability of aluminium as an alternative material for car bodies", *Materials and Design*, Vol. 20, 1999, pp. 267-272;
- [8] G. S. Cole, A. M. Sherman, "Lightweight Materials for Automotive Applications", *Materials Characterization*, Vol. 35, 1, 1995, pp. 3-9;
- [9] R. Zah, R. Hischer, A.L. Leão, I. Braun, "Curau´ fibers in the automobile industry e a sustainability assessment", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, 2007, pp. 1032-1040;
- [10] W.S. Miller, et al., "Recent development in aluminium alloys for the automotive industry", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 280, 1, 2000, pp. 37-49;
- [11] Stefano Ferraris, "Aluminium alloys in third millennium shipbuilding: materials, technologies, perspectives", *The Fifth International Forum on Aluminum Ships*, Tokyo, pp. 11-13, October, 2005;
- [12] Michael Skillingberg, John Green, "Aluminum Applications in the Rail Industry", *Light Metal Age*, October, 2007, pp. 1-5;
- [13] Nikhil V Nayak, "Composite Materials in Aerospace Applications", *International Journal of Scientific and Research Publications*, Vol. 4, 9, 2014;
- [14] Tolga Dursun, Costas Soutis, "Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys", *Materials & Design*, 56, 2014, pp. 862-871;
- [15] X. Tan, et al., "Cost-Efficient Materials in Aerospace: Composite vs Aluminium", Chapter book of Collaborative Product and Service Life Cycle Management for a Sustainable World, Proceedings of the 15th ISPE International Conference on Concurrent Engineering, Edited by Springer, 2008, pp. 259-266;
- [16] John Banhart, "Aluminium foams for lighter vehicles", *Int. J. Vehicle Design*, Vol. 37, 2-3, 2005, pp. 114-125;
- [17] "Aluminium in transport", European Aluminium Association Report, 2014;
- [18] Forrest Dwyer, "Material and Design Optimization for an Aluminum Bike Frame", Master Thesis, Worcester Polytechnic Institute, 2014;
- [19] www.ibike.org/library/statistics-data.htm, consultado a 01 de outubro de 2016;
- [20] Serkan Toros, Fahrettin Ozturk, Ilyas Kacar, "Review of warm forming of aluminium-magnesium alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 207, 1-3, 2008, pp. 1-12;
- [21] A. K. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian, K. Elangovan, "Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminium alloy joints", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 40, 3-4, 2009, pp. 286-296;
- [22] S. Malarvizhi, V. Balasubramania, "Effect of welding processes on AA2219 aluminium alloy joint properties", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, 5, 2011, pp. 962-973;
- [23] M. Avallé, G. Belingardi, M.P. Cavatorta, R. Doglione, "Casting defects and fatigue strength of a die cast aluminium alloy: a comparison between standard specimens and production components", *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, 1, 2002, pp. 1-9;
- [24] T.A. Barnes, I.R. Pashby, "Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles Part I - solid and liquid phase welding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 99, 2000, pp. 62-71;
- [25] S.J. Maddox, "Review of fatigue assessment procedures for welded aluminium structures", *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, 12, 2003, pp. 1359-1378;
- [26] M.N. James, et al., "Residual stresses and fatigue performance", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 14, 2, 2007, pp. 384-395;
- [27] Ana C. F. Silva, Daniel F. O. Braga, M. A. V. de Figueiredo, P. M. G. P. Moreira, "Ultimate tensile strength optimization of different FSW aluminium alloy joints", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, Vol. 79, 5-8, pp. 805-814;
- [28] "Head tube junction on a bicycle", Patente US6375210 B1;
- [29] L.M. Gourd, "Fundamentals of Welding - Principles of Welding Technology", Chapter 7, 3rd ed., Arnold, Paris, 1995;
- [30] E.F.M. Winter, M.L. Sharp, G.E. Nordmark, V.K. Banthia, "Design considerations for aluminium spaceframe automotive structures", SAE technical series, Report No 905178, 1990, pp. 465-471;
- [31] Tso-Liang Teng, et al., "Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, 8, 2001, pp. 523-538;
- [32] Tso-Liang Teng, et al., "Effect of welding sequences on residual stresses", *Computers & Structures*, Vol. 81, 5, 2003, pp. 273-286;
- [33] Domenico Umbrello, "Finite element simulation of conventional and high speed machining of Ti6Al4V alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, 1-3, 2008, pp. 79-87;
- [34] R. W. Lewis, K. Ravindran, "Finite element simulation of metal casting", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 47, 1-3, 2000, pp. 29-59;
- [35] Lianggang Guo, He Yang and Mei Zhan, "Research on plastic deformation behaviour in cold ring rolling by FEM numerical simulation", *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 3, 7, 2005, pp. 1029-1046;
- [36] Dean Deng, Hidekazu Murakawa, Wei Liang, "Numerical simulation of welding distortion in large structures", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 196, 45-48, 2007, pp. 4613-4627;
- [37] Zhi Zeng, Lijun Wang, Pingan Du, Xunbo Li, "Determination of welding stress and distortion in discontinuous welding by means of numerical simulation and comparison with experimental measurements", *Computational Materials Science*, Vol. 49, 2010, pp. 535-543;

- [38] Masao Toyoda, Masahito Mochizuki, "Control of mechanical properties in structural steel welds by numerical simulation of coupling among temperature, microstructure, and macro-mechanics", *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 5, 1–2, 2004, pp. 255–266;
- [39] Jean-Jacques Janosch, "International Institute of Welding work on residual stress and its application to industry", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, 2008, pp. 183–190;
- [40] Eurico Assunção, Luisa Quintino, Rosa Miranda, "Comparative study of laser welding in tailor blanks for the automotive industry", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 49, 1–4, 2010, pp. 123–131;
- [41] M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss, P.J. Withers, "Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds", *Acta Materialia*, Vol. 51, 16, 15 2003, pp. 4791–4801;
- [42] I. Sattari-Far, Y. Javadi, "Influence of welding sequence on welding distortions in pipes", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, 4, 2008, pp. 265–274;
- [43] J. E. Ribeiro, "Caraterização Experimental e Numérica de Campos de Tensões Residuais Provocadas por Processos de Fabrico", Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006;
- [44] M. Arone, D. Cerniglia, V. Nigrelli, "Defect characterization in Al welded joints by non-contact Lamb wave technique", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 176, 1–3, 2006, pp. 95–101;
- [45] A. Kumar, S. Sundarajan, "Optimization of pulsed TIG welding process parameters on mechanical properties of AA 5456 Aluminum alloy weldments", *Materials & Design*, Vol. 30, 4, 2009, pp. 1288–1297;
- [46] "Part QW Welding - Welding General Requirements", ASME IX;
- [47] Phillip J. Ross, "Taguchi Techniques for Quality Engineering", Second Edition, Edited by McGraw-Hill, 1988, New York;
- [48] Yui Wu, Alan Wu, "Taguchi methods for Robust Design", Edited by American Society of Mechanical Engineers, 2000, USA;
- [49] M. Nalbant, H. Gokkaya, G. Sur, "Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning", *Materials & Design*, Vol. 28, 2007, pp. 1379–1385;
- [50] G.P. Syrcos, "Die casting process optimization using Taguchi methods", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 135, 1, 2003, pp. 68–74;
- [51] S. V. Sapakal, M. T. Telsang, "Parametric Optimization of MIG Welding using Taguchi Design Method", *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, Vol. 1, 4, 2012, pp. 28–30;
- [52] Sukhomay Pal, et al., "Optimization of quality characteristics parameters in a pulsed metal inert gas welding process using grey-based Taguchi method", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 44, 11–12, 2009, pp. 1250–1260;
- [53] Y. S. Tarn, W. H. Yang, "Optimisation of the weld bead geometry in gas tungsten arc welding by the Taguchi method", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 14, 8, 1998, pp. 549–554;
- [54] Lung Kwang Pan, et. al, "Optimization of Nd:YAG laser welding onto magnesium alloy via Taguchi analysis", *Optics & Laser Technology*, Vol. 37, 1, 2005, pp. 33–42;
- [55] M. Koilraj, V. Sundareswaran, S. Vijayan, S.R. Koteswara Rao, "Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA2219 to AA5083 – Optimization of process parameters using Taguchi technique", *Materials & Design*, Vol. 42, 2012, pp. 1–7;
- [56] Z. Shayfull, et. al, "Optimizing Length of Weld Line Formation in Thin Plate by Taguchi Method and Analysis of Variance (ANOVA)", *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 11, 1, 2011, pp. 111–116;
- [57] Y.S. Tarn, S.C. Juang, C.H. Chang, "The use of grey-based Taguchi methods to determine submerged arc welding process parameters in hardfacing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 128, 1–3, 2002, pp. 1–6;
- [58] Y. S. Tarn, W. H. Yang, S. C. Juang, "The Use of Fuzzy Logic in the Taguchi Method for the Optimisation of the Submerged Arc Welding Process", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, 9, 2000, pp. 688–694. 📄