

TORQUE E FORÇAS NA SOLDAGEM POR ATRITO-MISTURA

Karen J. Quintana

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, COPPE, RJ, Brasil, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco G, Sala 204

kjq.cuellar@mecanica.coppe.ufrj.br

Jose Luis Silveira

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, POLI e COPPE, RJ, Brasil, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco G, Sala 204

jluis@mecanica.coppe.ufrj.br

Resumo: A soldagem por atrito-mistura (FSW, na sigla em inglês para “Friction Stir Welding”) é uma técnica promissora de soldagem em estado sólido para obter juntas com qualidade e menor consumo de recursos. O torque e as forças envolvidos no processo são quantidades importantes na soldagem, que estão relacionados com a qualidade da solda, o controle do processo, o consumo de energia e o impacto ambiental. No entanto, estudos para analisar essas quantidades e determinar os efeitos dos parâmetros de soldagem no torque e nas forças tem recebido pouca atenção. Neste trabalho, o torque e as forças foram estudados para determinar a influência dos principais parâmetros de soldagem por meio de análise experimental e de modelagem. Amostras de AA5052-H34, obtidas pela técnica de atrito-mistura, foram produzidas para medir o torque e as forças durante o processo de soldagem. As juntas foram obtidas para quatro níveis de velocidades de rotação: 600, 900, 1200 e 1500 rpm, três níveis de velocidade de soldagem: 100, 200 e 300 mm/min e para duas geometrias de ferramenta, com pino liso e rosqueado. Os sinais medidos do torque e das forças foram analisados para determinar o comportamento em função dos parâmetros de soldagem e foram propostos modelos para descrever este comportamento. A metodologia do problema inverso foi aplicada para estimar parâmetros desconhecidos dos modelos utilizando os resultados experimentais como dados de entrada. E foram usados dados experimentais adicionais para validar os modelos propostos. Adicionalmente, o consumo de potência e energia durante o processo foi calculado a partir dos valores do torque, para todas as condições de soldagem. Os resultados mostraram uma forte influência dos principais parâmetros de soldagem no torque e nas forças e uma boa concordância entre os dados experimentais e os modelos. Além disso, foi observado que a potência e a energia consumidas durante o processo podem ser reduzidas, com uma seleção adequada da geometria da ferramenta e dos parâmetros de soldagem, o que é positivo para os custos, a eficiência e o impacto ambiental.

Palavras-chave: Soldagem por atrito-mistura; Torque e forças; Geometria da ferramenta; Experimentos; Modelos mecanísticos

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, materiais com baixa densidade e elevada resistência mecânica são um requerimento de várias indústrias de engenharia, pelo que há uma tendência geral à implementação das ligas leves, as quais oferecem uma maior razão resistência-peso. No entanto, as soldas de ligas leves pelas técnicas convencionais de soldagem por fusão são dificultadas por características como uma forte tendência à formação de trincas, porosidade, segregados e a formação de uma estrutura frágil durante a solidificação (Goyal e Garg, 2019).

A soldagem por atrito-mistura é uma técnica desenvolvida especificamente para este tipo de materiais, com o intuito de produzir soldas em estado sólido com vantagens sobre as técnicas convencionais por fusão, entre elas, soldas de maior qualidade, menor custo, menos consumo de energia, sem o uso de consumíveis e menos impacto ambiental (Kumar *et al.*, 2019). Atualmente a técnica é aplicada em termoplásticos, soldas dissimilares, compósitos (Kumar *et al.*, 2018) e aços baixo carbono (Habibi *et al.*, 2018), entre outros materiais.

A técnica de soldagem por atrito-mistura consiste basicamente em duas fases: a fase de penetração, quando a ferramenta com uma rotação constante penetra o material até uma profundidade específica e a fase de soldagem, quando a ferramenta giratória avança para produzir o cordão de solda. A rotação da ferramenta mistura o material para produzir a solda. O aumento da temperatura local do material é produzido principalmente pelo atrito na interface ferramenta-peça e pela dissipação de energia devido à deformação plástica do material entorno da ferramenta (Mishra e Ma, 2005).

Há três forças e um torque envolvidos na FSW. Uma força axial devido à penetração da ferramenta na peça, uma força de soldagem devido ao deslocamento da ferramenta para produzir o cordão e uma força transversal associada à assimetria do processo (Dialami *et al.*, 2017), e um torque devido à rotação da ferramenta. Estas quantidades são influenciadas pela geometria da ferramenta, a qual muda a área de contato na interface entre a peça e a ferramenta (Quintana e Silveira, 2018). Consequentemente, o torque e as forças estão relacionados com a qualidade da solda, o

projeto da ferramenta e a eficiência do processo. Wahab *et al.* (2019) encontraram que para um pino da ferramenta e um percurso de soldagem específicos, a qualidade da solda depende significativamente da força axial e das velocidades do processo.

Durante a soldagem por atrito-mistura, com o aumento da temperatura do material entorno da ferramenta diminui a tensão de escoamento local do material e, conseqüentemente, as forças e torque também diminuem. Portanto, há uma relação entre estas quantidades e a tensão de escoamento do material a traves da temperatura (Quintana e Silveira, 2018). E como o aporte de calor no processo de soldagem esta associado principalmente ao atrito entre a peça e a ferramenta e a deformação plástica produzida pela mistura sob a ação da ferramenta, então a geometria da ferramenta influencia a temperatura, o fluxo do material e a qualidade da solda (Papahn *et al.*, 2015).

O torque e as forças são influenciados pelas velocidades do processo de soldagem, principalmente pela velocidade de rotação (Reza *et al.*, 2015). Tanto o torque (Quintana e Silveira, 2017b) quanto as forças (Quintana e Silveira, 2018) diminuem com o aumento da rotação e incrementam com o aumento da velocidade de soldagem. O torque está diretamente relacionado com o consumo de energia no processo de soldagem por atrito-mistura. Buffa *et al.* (2019) usaram as curvas experimentais do torque no processo de FSW para estudar a influencia da velocidade de rotação no consumo de potência e energia no processo de soldagem em ligas de alumínio. Segundo Jain *et al.* (2016) o torque indica o consumo de potência no processo e é a quantidade principal para determinar a capacidade da máquina de soldagem. Por outro lado, Shiravastava *et al.* (2017) analisaram o sinal das forças e correlacionaram os parâmetros do sinal com a presença de descontinuidades na solda.

A pesar da importância das forças e do torque no processo de soldagem e da influência que a geometria da ferramenta tem sobre estas quantidades e, conseqüentemente, sobre a qualidade das soldas, este comportamento tem sido pouco estudado. Este artigo estuda o comportamento do torque e as forças na soldagem em função das velocidades de soldagem e da influencia da geometria do pino. Uma análise experimental é realizada e modelos mecanísticos são propostos para descrever o torque e as forças em função dos principais parâmetros da soldagem por atrito-mistura.

2. MATERIAIS E METODOS

2.1. Procedimento experimental

Soldas da liga de alumínio 5052-H34 foram realizadas pela técnica de atrito-mistura em um centro de usinagem CNC adaptado para o processo de soldagem. Durante a realização das soldas o torque e as forças foram medidos usando um dinamômetro Kistler 9272 acoplado a um amplificador de carga Kistler 5070 para o acondicionamento do sinal. As soldas foram realizadas para rotações de 600, 900, 1200 e 1500 rpm e velocidades de soldagem de 100, 200 e 300 mm/min. As ferramentas utilizadas foram fabricadas em aço H13 temperado para uma dureza de 50 HRC. As ferramentas têm um ombro e um pino de 10 e 4 mm de diâmetro, respectivamente e a altura do pino é de 4 mm. Duas ferramentas foram utilizadas, uma com pino liso e outra com pino rosqueado correspondente a uma rosca direita M4.

2.2. Descrição dos modelos

Modelos mecanísticos são propostos para descrever o torque e a força axial durante as fases de penetração (FP) da ferramenta na peça e a fase de soldagem (FS), durante o processo de FSW. A metodologia do problema inverso é implementada para estimar parâmetros desconhecidos dos modelos propostos usando os dados experimentais, uma descrição completa desta metodologia é apresentada em Quintana e Silveira (2017a). As expressões propostas consideram a descrição física da técnica de soldagem e o comportamento experimental do torque e força axial.

O torque durante a fase de penetração, M_p , que corresponde ao valor máximo do torque, é descrito pela Eq. (1) (Quintana e Silveira, 2021a) onde os parâmetros A , B e C são descritos pelas Eq. (2-4), respectivamente, ω é a velocidade de rotação em rpm, G é um fator geométrico, v_p é a velocidade de penetração da ferramenta na peça em mm/min e a_c é a área de contato entre a ferramenta e a peça em mm².

$$M_p = Ae^{-B\omega}G + Cv_p \quad (1)$$

$$A = (-A_1v_p + A_2)e^{(A_3v_p - A_4)a_c} \quad (2)$$

$$B = B_1a_cv_p - B_2v_p - B_3a_c + B_4 \quad (3)$$

$$C = C_1a_c - C_2 \quad (4)$$

Os parâmetros A_x , B_x e C_x são estimados via problema inverso. O fator geométrico considera a contribuição de cada parte da ferramenta em contato com o material, o comprimento do pino e as bases do ombro e do pino. O fator geométrico para a ferramenta lisa e rosqueada são apresentados nas Eq. (5) e (6), respectivamente. No caso da ferramenta

rosqueada, a área lateral do pino é modelada como a superfície de um cone truncado. Cada elemento da rosca é considerado como um cone truncado, como é mostrado esquematicamente na Fig. 1.

$$G = \int_0^{r_s} \int_0^{2\pi} r(rd\theta dr) + \int_0^L \int_0^{2\pi} r(rd\theta dl) + \int_0^{r_p} \int_0^{2\pi} r(rd\theta dr) \quad (5)$$

$$G = \int_{r_{ex}}^{r_s} \int_0^{2\pi} r(rd\theta dr) + \int_0^{r_{ex}} \int_0^{2\pi} r(rd\theta dr) + r_{ex} \left(2\pi(r_{ex} + r_{in}) \sqrt{\left(\frac{P}{2}\right)^2 + (r_{ex} - r_{in})^2} \right) \frac{L}{P} \quad (6)$$

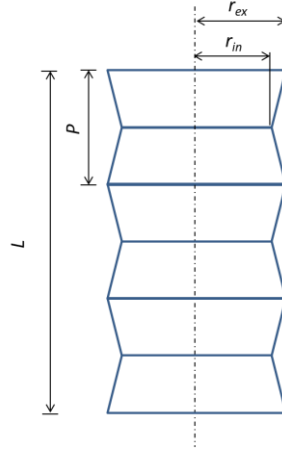


Figura 1. Descrição esquemática da área lateral do pino rosqueado

Onde r_s é o raio do ombro, r_p é o raio do pino liso, r_{ex} é o raio externo do pino rosqueado, r_{in} é o raio interno do pino rosqueado, P é o passo da rosca e L o comprimento do pino. O torque na fase de soldagem, M_s , corresponde ao valor do torque estabilizado durante o percurso da ferramenta e é descrito na Eq. (7) (Quintana e Silveira, 2021a). Os parâmetros D_1 e D_2 são estimados via problema inverso e v_s é a velocidade de soldagem em mm/min.

$$M_s = M_p + (D_1 e^{-D_2 \omega}) v_s \quad (7)$$

A força axial na fase de penetração da ferramenta, F_p , corresponde ao máximo valor da força axial e é descrita pela Eq. (8) onde A_T e A_L são as áreas transversal e lateral da ferramenta descritas nas Eq. (9) e (10), respectivamente e A , B e E são os parâmetros a ser estimados via problema inverso. A força axial na fase da soldagem, F_s , representa o valor da força axial estabilizada durante o percurso da ferramenta e é descrita na Eq. (11) (Quintana e Silveira, 2021b). Os parâmetros F_1 e F_2 são estimados via problema inverso.

$$F_p = A e^{-B\omega} \left(A_T + \frac{A_L}{\sqrt{3}} \right) + E v_p \quad (8)$$

$$A_T = \int_{r_{ext}}^{r_s} \int_0^{2\pi} r d\theta dr + 0.7854(2r_{ext} - 0.9382P)^2 \text{ (Pino rosqueado)} \quad (9)$$

$$A_T = \int_0^{r_p} \int_0^{2\pi} r d\theta dr + \int_0^{r_s} \int_0^{2\pi} r d\theta dr \text{ (Pino liso)}$$

$$A_L = 2\pi(r_{ext} + r_{int}) \left(\frac{L}{P} \right) \sqrt{\left(\frac{P}{2} \right)^2 + (r_{ext} - r_{int})^2} \text{ (Pino rosqueado)} \quad (10)$$

$$A_L = \int_0^L \int_0^{2\pi} r d\theta dl \text{ (Pino liso)}$$

$$F_s = F_p + (F_1 \log(\omega) + F_2) v_w \quad (11)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a fase de penetração, o pino liso apresenta um torque maior durante a maior parte desta fase, entre entanto, no final da fase, quando o torque atinge seu valor máximo, o pino rosqueado apresenta um valor máximo maior ao do pino liso. A Fig. 2a mostra o comportamento do torque máximo na fase de penetração em função da velocidade de rotação para os dois pinos. De forma geral, a Fig. 2 mostra um comportamento decrescente para o torque e a força axial

com o aumento da velocidade de rotação. Como a velocidade de soldagem não interfere na FP os valores máximos do torque e da força axial são independentes deste fator. O aumento da velocidade de rotação, aumenta o atrito na interface ferramenta peça que produz um aumento local da temperatura e, consequentemente, diminui a tensão de escoamento local do material.

O pino rosqueado produz um incremento do torque máximo, que muda com a velocidade de rotação, entre 19.6% e 25.7% sobre o valor do pino liso. Em relação à força axial, o pino rosqueado também apresenta um valor máximo maior do que o valor observado para o pino liso. A Fig. 2b mostra o comportamento da força axial máxima na fase de penetração em função da velocidade de rotação para os dois pinos. O incremento da máxima força axial produzido pelo pino rosqueado muda com a velocidade de rotação entre 12.7% para 600 rpm e 8.1% para 1500 rpm sobre o valor do pino liso.

O pino rosqueado melhora o fluxo do material entorno da ferramenta. Jain *et al.* (2018) através de uma análise por elementos finitos predizem um aumento na taxa de deformação, na velocidade do material e do fluxo vertical do material para uma ferramenta rosqueada cônica em relação a uma cônica lisa. Porém, esta mudança no fluxo do material promove que uma maior quantidade de material seja movimentada pela entrada do pino da ferramenta, o que produz um incremento do torque e da força quando o material entra em contato com o ombro da ferramenta. Adicionalmente, para este estudo, a ferramenta com pino rosqueado incrementa a área de contato em 15.8% em relação ao pino liso, o que contribui para aumentar os valores máximos do torque e da força.

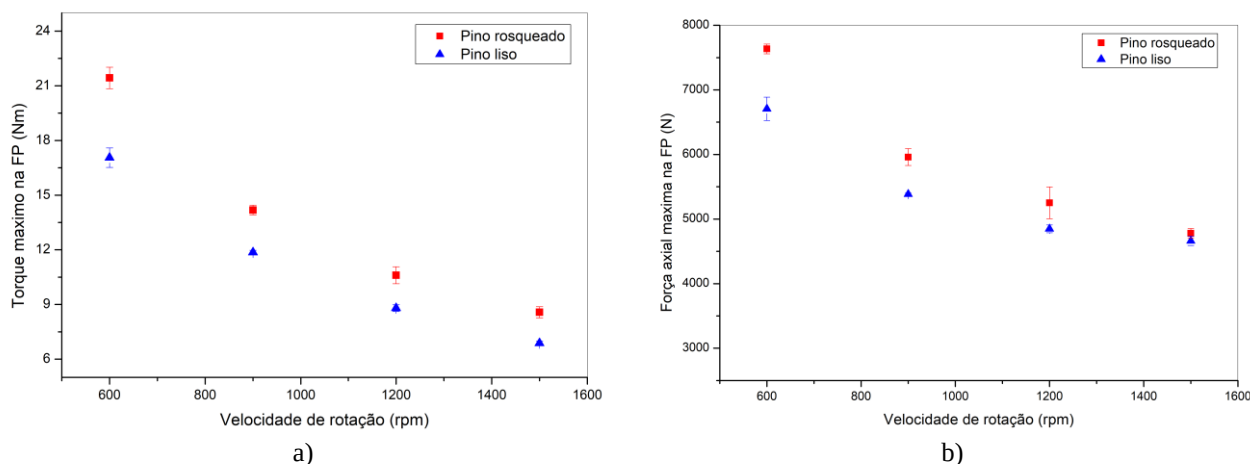


Figura 2. Torque (a) e força axial (b) máximos, durante a fase de penetração, em função da velocidade de rotação para os pinos liso e rosqueado

Durante a fase da soldagem, no estado estacionário, o valor estabilizado tanto do torque quanto da força axial é menor do que o valor máximo apresentado na FP devido ao amolecimento do material pelo calor aportado durante a fase inicial. A redução do valor do torque da FP para a FS produzida pelo pino rosqueado é entorno de 2.5 vezes a redução produzida pelo pino liso. A redução do valor da força da FP para a FS é influenciada pela velocidade de rotação. A redução produzida pelo pino rosqueado é maior para baixas velocidades de rotação (600 e 900 rpm) e menor para altas velocidades de rotação (1200 e 1500 rpm) em relação ao pino liso.

A Fig. 3 mostra o torque e força axial durante a FS em função da velocidade de rotação para os dois pinos estudados. Tanto o torque quanto a força axial diminuem com o aumento da velocidade de rotação, devido ao aumento do aporte de calor que amolece o material e diminui a sua tensão de escoamento local. De modo contrário, o torque e a força axial aumentam com o aumento da velocidade de soldagem, já que maiores velocidades de soldagem diminuem o tempo disponível para o aporte de calor no processo e, consequentemente, o material menos afetado pelo calor tem uma resistência maior. Como observado na Fig. 3, o efeito da velocidade de rotação no torque e na força axial é mais significativo do que o efeito da velocidade de soldagem.

Em geral, durante a FS o efeito do pino rosqueado no torque e na força axial depende das velocidades, principalmente da velocidade de rotação. Para baixas velocidades de rotação, o torque é sempre menor para o pino rosqueado com uma redução entorno de 17%. Para altas velocidades de rotação o torque para o pino rosqueado pode ser igual ou maior do que o apresentado pelo pino liso, com um aumento de aproximadamente 13%. Em relação à força axial, esta é menor para o pino rosqueado para a velocidade de rotação de 600 rpm, apresentado uma redução entorno de 15%, e para velocidades superiores a 600 rpm, a força axial é sempre maior para o pino rosqueado com incrementos entorno de 20%. Este comportamento indica que o efeito do pino rosqueado no material é diminuído com o aumento da velocidade de rotação. Segundo Hussein *et al.* (2015) a velocidade de rotação é o fator mais influente no incremento da temperatura no processo de soldagem por atrito-mistura.

Os parâmetros estimados via problema inverso foram previamente analisados para garantir independência linear entre eles e evitar uma matriz singular bem como parâmetros com baixa sensibilidade. Foi implementado o método de

Levenberg-Marquardt para realizar a estimativa dos parâmetros usando os dados experimentais como dados de entrada. Uma completa descrição do processo de estimativa dos parâmetros dos modelos do torque e da força axial é apresentada em Quintana e Silveira, (2021a) e Quintana e Silveira, (2021b), respectivamente.

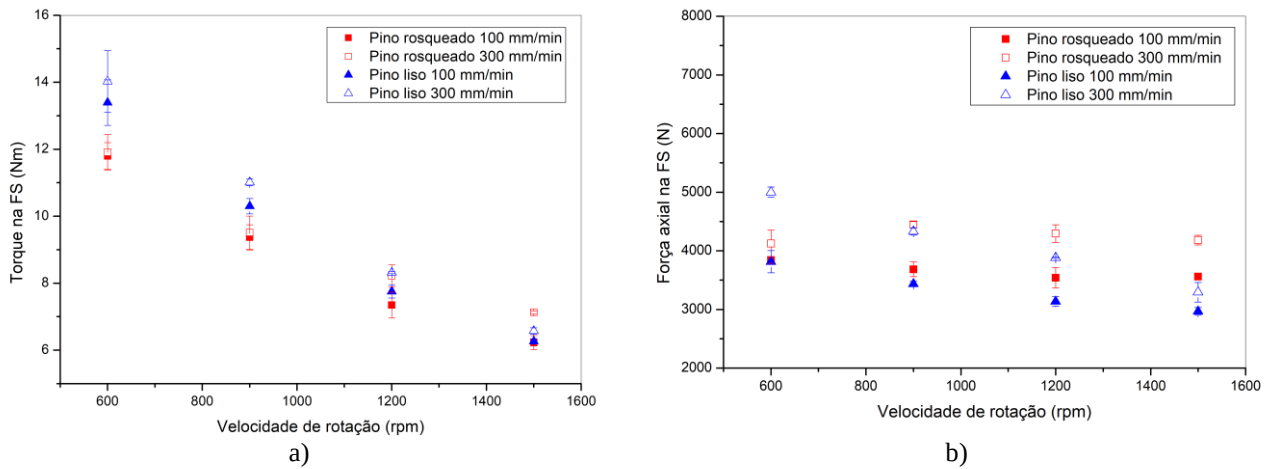


Figura 3. Torque (a) e força axial (b) estabilizados, durante a fase de soldagem, em função da velocidade de rotação para os pinos liso e rosqueado

A Fig. 4 apresenta os modelos para o torque nas fases de penetração (FP) e de soldagem (FS) para as duas ferramentas. Os resultados mostram que a influência da velocidade de rotação e do formato do pino são mais significativas do que a influência da velocidade de soldagem no torque. Os modelos mostram que o valor do torque máximo durante a FP é sempre maior para o pino rosqueado, enquanto, durante a FS o valor do torque é maior para o pino rosqueado para velocidades de rotação acima de aproximadamente 1000 rpm. A Fig. 5 apresenta a razão entre os modelos da força axial para a ferramenta lisa e para a ferramenta rosqueada, nas fases de penetração e de soldagem. Os modelos mostram que a força axial máxima, na FP, é sempre maior para o pino rosqueado, entretanto, durante a FS, a força axial estabilizada é geralmente maior para o pino rosqueado. Para uma velocidade de soldagem de 100 mm/min, a força axial estabilizada é sempre maior para o pino rosqueado para rotações acima de 150 rpm. Para velocidades de soldagem maiores do que 100 mm/min, a força axial estabilizada é sempre maior para o pino rosqueado para velocidades de rotação entre 700 e 2200 rpm aproximadamente.

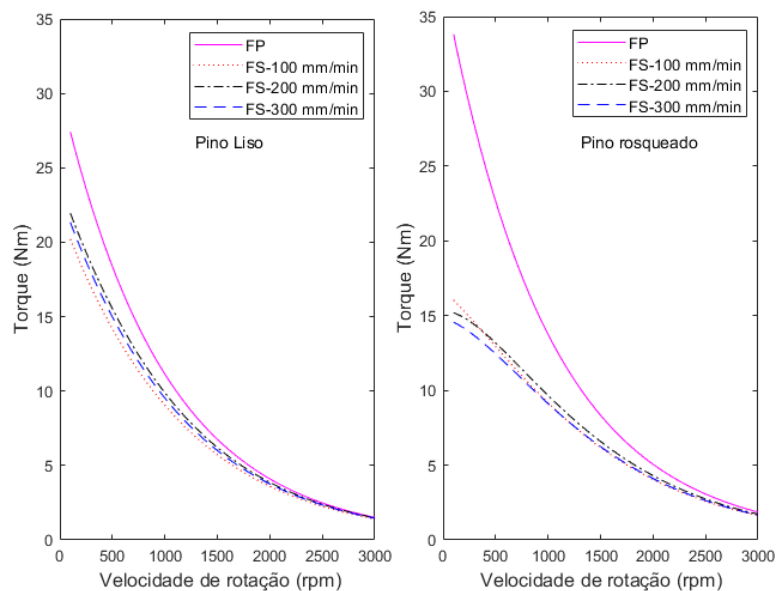


Figura 4. Modelos para o torque na FP e FS em função da velocidade de rotação para os pinos liso e rosqueado e todas as velocidades de soldagem avaliadas

A Fig. 6 mostra a energia específica em função da velocidade de rotação para os dois pinos estudados. A energia específica, E_s , é calculada a partir do modelo do torque segundo a Eq. (12). A Fig. 6 mostra que para todas as velocidades de soldagem avaliadas, a energia requerida é máxima para uma rotação de 1110 rpm para o pino liso e para

uma rotação de 1250 rpm no caso do pino rosqueado. Para as variáveis usadas neste estudo, o valor máximo da energia específica é de 600 J/mm, enquanto a energia específica requerida para produzir soldas usando técnicas convencionais de soldagem a arco elétrico é entre 400 e 5000 J/mm (Marques *et al.*, 2009).

$$E_s = \frac{M_s \omega}{v_s} \quad (12)$$

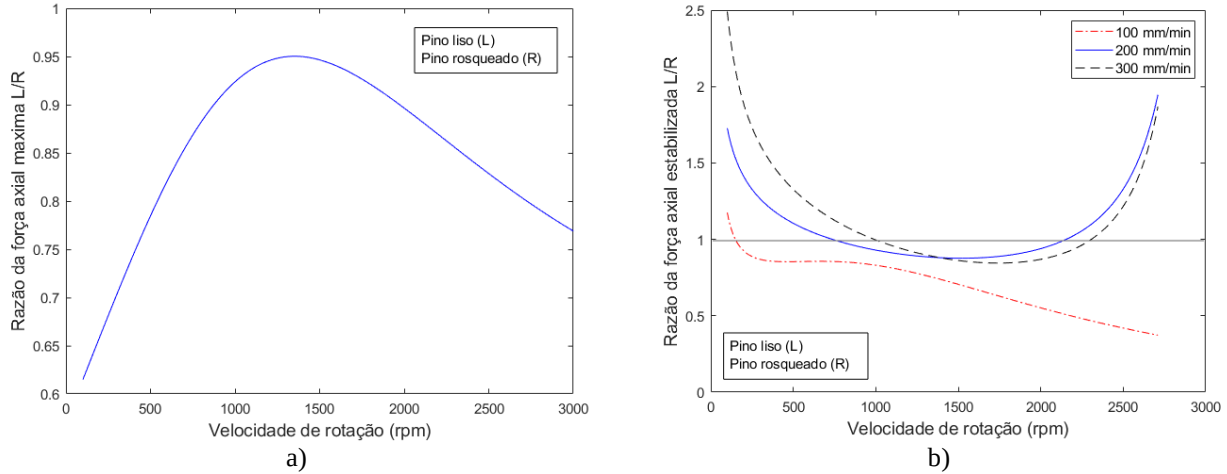


Figura 5. Razão entre os modelos para a força axial da ferramenta lisa e da ferramenta rosqueada para a) a fase do percurso e b) a fase de soldagem

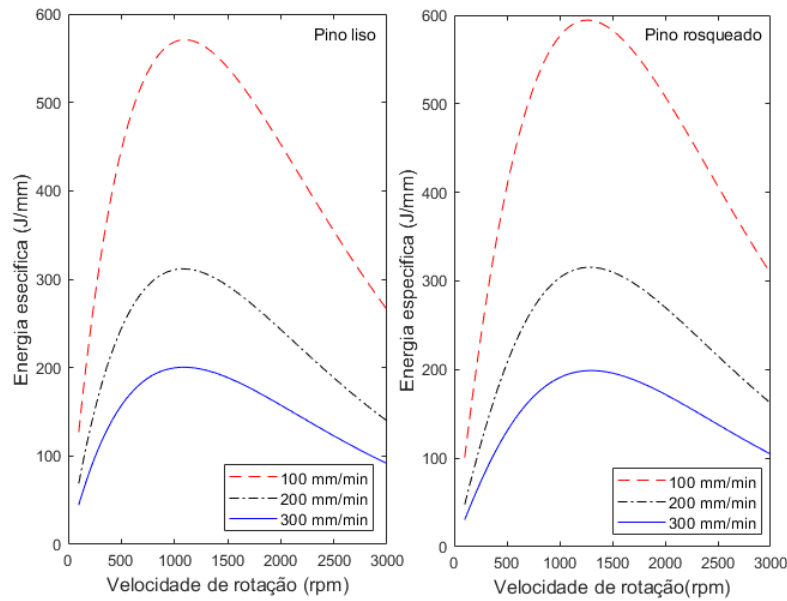


Figura 6. Energia específica em função da velocidade de rotação para os pinos liso e rosqueado e para todas as velocidades de soldagem

A Fig. 7 mostra os modelos do torque e da força axial para a ferramenta rosqueada com os pontos de calibração e de validação. Os erros relativos entre os valores modelados e os obtidos experimentalmente são inferiores a 10% na maioria dos casos, tanto para a ferramenta lisa quanto para a ferramenta rosqueada (Quintana e Silveira, 2021a e 2021b) conforme o observado na Fig. 7.

4. CONCLUSÕES

O formato de pino influencia significativamente os valores do torque e da força axial na soldagem por atrito-mistura. A influência do formato do pino no torque e na força axial depende da interação das velocidades de rotação e de soldagem. No geral foi observado que com o aumento da velocidade de rotação a influência do pino rosqueado no material é menos relevante o que pode estar relacionado com um aumento na temperatura local do material. Nesta condição o aumento da área de contato devido ao pino rosqueado seria mais relevante que o efeito da rosca no fluxo do material.

Os valores máximos do torque e da força axial são maiores para o pino rosqueado, o qual apresentou incrementos entorno de 20% e 10%, respectivamente. Durante a fase de soldagem, os valores de torque e força axial estabilizados são menores para o pino rosqueado para baixas velocidades de rotação.

O pino rosqueado produz uma redução maior do torque da FP para a FS. Considerando que a fase de soldagem é a fase mais longa do processo isto indica uma redução do torque, potência e energia durante a soldagem o que diminui o impacto ao meio ambiente.

A energia requerida no processo de soldagem por atrito-mistura é consideravelmente menor do que a requerida nos processos convencionais de soldagem a arco elétrico, este comportamento é refletido em uma redução de custos e do impacto ambiental, bem como de um processo de soldagem mais eficiente.

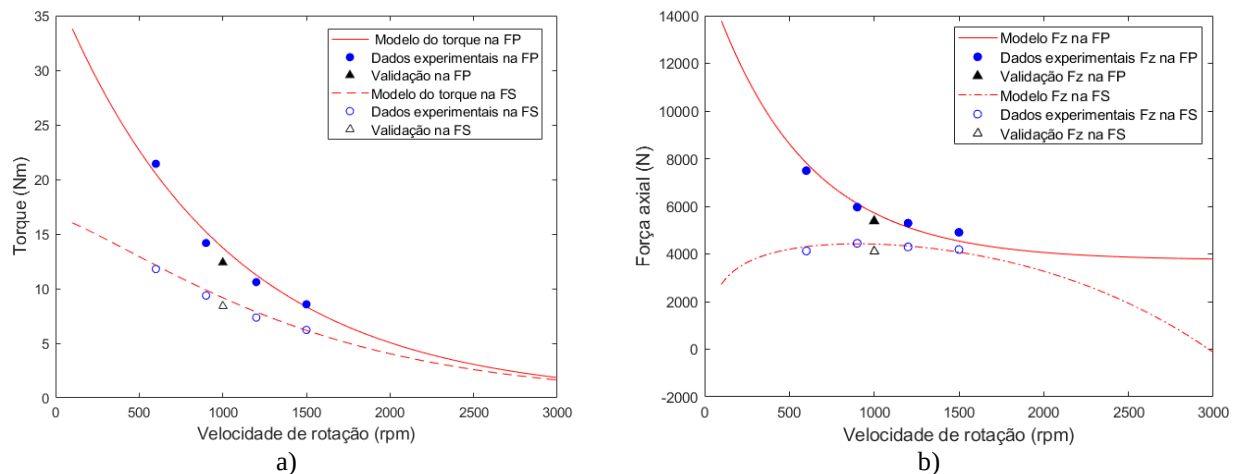


Figura 7. Modelos e dados experimentais de calibração e validação da ferramenta rosqueada, para a) o torque e b) a força axial

4. REFERÊNCIAS

- Buffa, G., Ingarao, G., Campanella, D., Di, L.R., Micari, F. e Fratini, L., 2019. An insight into the electrical energy demand of friction stir welding processes: the role of process parameters, material and machine tool architecture. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 100, p. 3013-3024.
- Dialami, N., Cervera, M., Chiumenti, M., e Agelet de Saracibar, C., 2017. A fast and accurate two-stage strategy to evaluate the effect of the pin tool profile on metal flow, torque and forces in friction stir welding. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 122, p. 215-227.
- Goyal, A. e Garg, R.K., 2019. Establishing mathematical relationships to study tensile behavior of friction stir welded AA5086-H32 aluminium alloy joints. *Silicon*, Vol. 11, p. 51-65.
- Habibi, M., Hashemi, R., Tafti, M.F. e Assempour, A., 2018. Experimental investigation of mechanical properties, formability and forming limit diagrams for tailor-welded blanks produced by friction stir welding. *Journal of Manufacturing Process*, Vol. 31, p. 310-323.
- Hussein, S.A., Tahir, A.S. e Izamshah, R., 2015. Generated forces and heat during the critical stages of friction stir welding and processing. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29(10), p. 4319-4328.
- Jain, R., Pal, S.K. e Singh, S.B., 2016. A study on the variation of forces and temperature in a friction stir welding process: a finite element approach. *Journal of Manufacturing Process*, Vol. 23, p. 278-286.
- Jain, R., Pal, S.K. e Singh, S.B., 2018. Finite element simulation of pin shape influence on material flow, forces in friction stir welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 94, p. 1781-1797.
- Kumar, R., Singh, R. e Ahuja, I.P.S., 2019. Mechanical, thermal and micrographic investigations of friction stir welded: 3D printed melt flow compatible dissimilar thermoplastics. *Journal of Manufacturing Process*, Vol. 38, p. 387-395.
- Kumar, R., Singh, R., Ahuja, I.P.S., Penna, R. e Feo, L., 2018. Weldability of thermoplastic materials for friction stir welding- A state of art review and future applications. *Composites*, Vol. B137, p. 1-15.
- Marques, P.V., Modenesi, P.J. e Bracarense, A.Q. 2009. *Soldagem fundamentos e tecnologia*. UFMG, Brazil, 3ª edição.
- Mishra, R.S. e Ma, Z.Y., 2005. Friction Stir Welding and Processing. *Materials Science and Engineering*, Vol. R50(1-2), p. 1-78.
- Papahn, H., Bahemmat, P., Haghpanahi, M. e Aminaie, I.P., 2015. Effect of friction stir welding tool on temperature, applied forces and weld quality. *IET Measurement Science and Technology*, Vol. 9(4), p. 475-484.
- Quintana, K.J. e Silveira, J.L., 2017a. Analysis of torque in friction stir welding of aluminum alloy 5052 by inverse problem method. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 139(4), p. 041017.

Quintana, K.J. e Silveira, J.L., 2017b. Mechanistic models and experimental analysis for the torque in FSW considering the tool geometry and the process velocities. *Journal of Manufacturing Process*, Vol. 30, p. 406-417.

Quintana, K.J. e Silveira, J.L., 2018. Mechanistic models for the forces in FSW of aluminum alloy 5052-H34. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 96, p. 3993-4008.

Quintana, K.J. e Silveira, J.L., 2021a. Effects of threaded pin profile on torque, power, and energy by modeling and experimental analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 114, p. 2739-2751.

Quintana, K.J. e Silveira, J.L., 2021b. Threaded pin effects analysis on forces in FSW. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 43, p. 491.

Reza-E-Rabby, M., Tang, W. e Reynolds, A.P., 2015. Effect of tool pin features on process response variables during friction stir welding of dissimilar aluminum alloys. *Science Technology of Welding and Joining*, Vol. 20(5), p. 425-432.

Shiravastava, A., Zinn, M., Duffie, N.A., Ferrier, N.J., Smith, C.B. e Pfefferkorn, F.E., 2017. Force measurement-based discontinuity detection during friction stir welding. *Journal of Manufacturing Process*, Vol. 26, p.113-121.

Wahab, M.A., Dewan, M.W., Huggett, D.J., Okeil, A.M., Liao, T.W. e Nunes, A.C., 2019. Challenges in the detection of weld-defects in friction stir-welding (FSW). *Advances in Materials and Processing Technologies*, Vol. 5(2), p. 258-278.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

TORQUE AND FORCES IN FRICTION STIR WELDING

Karen J. Quintana

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Department of Mechanical Engineering, COPPE, RJ, Brazil, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco G, Sala 204
kjq.cuellar@mecanica.coppe.ufrj.br

Jose Luis Silveira

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Department of Mechanical Engineering, POLI and COPPE, RJ, Brazil, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco G, Sala 204
jluis@mecanica.coppe.ufrj.br

Abstract. Friction stir welding (FSW) is a promisor technic of solid-state welding to obtain joints with quality and less consumption of resources. Torque and forces are important quantities in FSW that are related to weld quality, process control, energy consumption, and environmental impact. However, studies to analyze these quantities and determine the effects of the welding parameters on torque and forces have received little attention. In this paper, the torque and forces were studied to determine the influence of the main welding parameters by experimental and modelling analysis. Specimens of AA5052-H34 obtained by the technique of friction stir were carried out to measure the torque and forces during the welding process. The joints were obtained for four levels of rotational speeds, namely 600, 900, 1200, and 1500 rpm, three levels of welding speed, namely 100, 200, and 300 mm/min and for two tool geometries, with a smooth and a threaded pin. The forces and torque signals were analyzed to determine the behavior as a function of the welding parameters and models were proposed to describe this behavior. The inverse problem methodology was used to estimate unknown parameters of the models using the experimental data. The proposed models were validated with additional experimental data. The power and energy consumption during the process were computed from the torque values for all the welding conditions. The results showed a strong influence of the main welding parameters on torque and forces and a good agreement between the experimental data and the models. Additionally, the power and energy consumed during the process can be reduced with a proper selection of tool geometry and welding parameters, which is positive for costs, efficiency, and for the environment impact.

Keywords: Friction Stir Welding; Torque and forces; Tool geometry; Experiments; mechanistic models.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.