

O PROCESSO FSW, SEUS SISTEMAS DE MÁQUINAS E CONTROLES E AS TENDÊNCIAS PARA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Hugo Pinto Bustamante

Faculdade Senai Cimatec, hpbeua@gmail.com

Resumo: Solda por fricção Linear ou Friction stir welding (FSW) é um processo de união de materiais, em estado sólido, através de uma ferramenta cilíndrica, com uma cavilha específica, rotacional, que opera linearmente, onde existe a união dos mesmos sem a necessidade de fundi-los. Essa pesquisa é uma revisão literária sobre os parâmetros operacionais, controle de força, sistemas de máquinas e robôs, com foco nas novas tendências e o uso na indústria automotiva, alavancado principalmente pelas pesquisas na indústria aeroespacial. Todo o processo produtivo FSW é descrito, além dos parâmetros para definição do sistema operacional e de controle, bem como os atributos para seleção de máquinas e robôs. Parâmetros de ajuste como, geometria da ferramenta, velocidade de rotação, velocidade transversal, tempo de permanência, profundidade de inserção, posição do ferramental, configuração de solda sobre a microestrutura e propriedades mecânicas das juntas são descritos, analisados e comparados. Parâmetros de máquinas como rigidez, força, precisão, desempenho e flexibilidade também são descritos, analisados e comparados para máquinas convencionais, máquinas específicas para FSW, ferramentas convencionais, robôs paralelos e robôs articulados. O processo FSW está em rápida evolução. Na indústria automotiva, por exemplo, os robôs articulados possuem a vantagem operacional de trabalhar componentes geometricamente complexos. Ao mesmo tempo, esse mesmo robô tem na precisão uma desvantagem. É possível aprimorar a precisão utilizando algoritmo em tempo real, passando a operar com a mesma qualidade de um sistema CNC pórtico ou até mesmo o uso de máquina compatível com 3D com base no conceito pentapod. Nota-se, portanto, que o sistema de controle do processo de FSW, que abrange os parâmetros de processo, controle de movimentos, tipos de máquinas e capacidades de força estão em rápida evolução e são amplamente abordados através das suas vantagens, desvantagens e sua capacidade de contribuir com a evolução tecnológica do setor automotivo.

Palavras-chave: Friction stir welding; Soldagem por Fricção Linear; Robótica; Manufatura; Sistemas de Controle

Abstract: Friction stir welding (FSW) (also known as linear friction welding) is a solid-state joining process that uses a cylindrical tool with a rotational probe to linearly fuse materials without melting them. This analysis reviews the literature on the operational parameters of FSW, including its control of force and machine and robot systems. It focuses on new trends, particularly on the use of FSW in the automotive industry, which has evolved primarily from research done in the aerospace sector. The entire process of FSW is described, as well as the parameters for defining the operational and control systems, and important attributes to consider during machine and robot selection. Included in the article are descriptions and analyses of: the parameters for adjusting tool shape, rotational speed, transversal velocity, depth of insertion and tool position; the configurations for welding microstructures; the mechanical properties of the joints and the measures of strength and longevity. Parameters including rigidity, strength, precision, performance and flexibility for conventional machines, machines designed specifically for FSW, conventional tools, and parallel as well as articulated robots are also described, analyzed and compared. The FSW process is evolving rapidly. In the automotive industry, for example, articulated robots have the advantage of being able to work with geometrically complex components, although with the disadvantage of being less precise. Using an algorithm, it is possible to improve the precision of FSW to equal that of a CNC system or even a machine compatible with 3D and based on the pentapod concept. It is important to note, however, that the FSW process control system, whose parameters include production, control of movement, types of machines and strength capacity, is rapidly evolving. Its advantages and disadvantages, as well as its capacity to contribute to the evolution of technology in the automotive sector are discussed in this article.

1. INTRODUÇÃO

O processo de FSW ou Solda por Fricção foi desenvolvido inicialmente por Thomas et al (1991), na década de 90 com o intuito de unir metais relativamente macios, como algumas ligas de alumínio, que naquele momento, eram difíceis de soldar através dos processos de fusão convencionais. Nos últimos 10 anos muitos avanços foram feitos na soldagem por fricção de metais, polímeros e materiais dissimilares. Essa evolução ocorre paralelamente e em conjunto com a evolução das Industriais como aeronáutica, ferroviária, naval, a recebe um forte incremento das indústrias aeroespacial e automotiva, principalmente em se tratando de soldagem de ligas de alumínio e união de materiais dissimilares. O processo de FSW ocorre na fase sólida, com a temperatura abaixo do ponto de fusão do material. Isso resulta em costuras de solda livre de defeitos como retração, fragilização, craqueamento ou porosidade. A temperatura de soldagem reduzida (em relação aos processos convencionais) durante o processo de fricção, possibilita distorções menores e tensões residuais, permitindo melhora nas propriedades mecânicas. O processo de FSW é também

energeticamente mais eficiente pois não requer um terceiro material (usado em alguns processo de solda convencional) nem a necessidade de gás. A soldagem convencional representa também uma ameaça a saúde e segurança do trabalhador, principalmente a fumaça da solda, bastante tóxica, os raios ultra violetas e os raios infravermelhos. Como a solda por fricção é um processo feito em estado solido, esses riscos são anulados.

O processo FSW tradicional consiste na inserção de uma ferramenta cilíndrica, em rotação, formada por um pino e um ombro que trabalham em contato com as superfícies das peças a serem soldadas sendo que essa ferramenta opera linearmente ao longo da junta de soldadura, como ilustrado na Fig. (1). Durante o processo, o pino localizado dentro da junta de solda, gera calor pela fricção e deformação plástica, amolece o material e permite o fluxo do mesmo, ocasionando a mistura de materiais. Ao mesmo tempo o ombro que esta na superfície de costura de ambos os materiais, aquece e arrasta o material da parte da frente para a parte de trás da ferramenta. esse trabalho do ombro evita o vazamento de material para fora da junta de soldagem e faz com que a superfície fique lisa. Durante o processo de soldagem, a ferramenta FSW pode ser inclinada para trás (ângulo de deslocamento) e lateralmente (ângulo de trabalho) Fig. (2). Normalmente usa-se um ângulo de deslocamento diferente de zero, quando é utilizada uma ferramenta de ombro rotacional com materiais de diferentes espessuras.

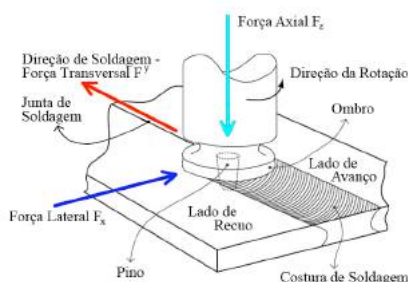


Figura 1. Representação do processo FSW.

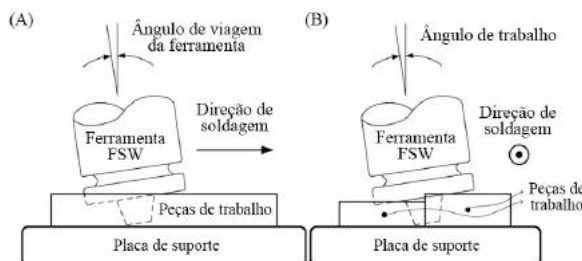


Figura 2. Ângulos de inclinação utilizados no processo FSW: (a) ângulo de deslocamento, (b) ângulo de trabalho.

2. CARACTERÍSTICAS DAS MÁQUINAS E SUAS APLICAÇÕES

As máquinas utilizadas no processo de FSW apresentam características bem distintas no que dizem respeito as suas configurações físicas. A máquina deve ser avaliada dependendo da sua aplicação, e deve ser a ser escolhida de acordo com diferentes capacidades técnicas: Força, rigidez, precisão, detecção, tomada de decisão e flexibilidade. Todas essas características serão amplamente analisadas nas próximas sessões.

2.1. Força

Um dos grandes desafios no processo de FSW é obter uma máquina hábil e capaz de suportar as altas cargas geradas durante todo o processo de soldagem. Principalmente pelo fato da escolha da máquina depender bastante do tipo de material a ser trabalhado e espessura das peças a serem soldadas. A força envolvida no processo deve ser analisada minuciosamente para obter-se dados fiéis no processo de escolha de maquinário. As forças que mais atuam no processo são o torque (M_z), a força axial (F_z), a força lateral (F_y) e a força de tração conforme Tab. (1). A Fig. (1) mostra exatamente como atuam todas as forças descritas. Todas essas forças tem uma importância enorme na performance do processo sendo que a análise de todas as cargas envolvidas no processo são pré-requisito na escolha ou até mesmo desenvolvimento de um equipamento de soldagem FSW, além de desempenhar também um papel importante no controle do processo. Por exemplo, ao manter um determinado torque ou uma determinada força lateral ou axial consegue-se conferir uma boa qualidade das costuras de soldagem, ou seja, precisão e informação nas regulagens das máquinas no que se refere as forças são fundamentais para o controle do processo.

Tabela 1. Cargas relevantes para o processo FSW

Força Axial (F_z)	A força axial é um dos principais parâmetros do processo. É responsável pela fricção entre a ferramenta FSW e as peças de trabalho, contribuindo para a geração de calor no processo FSW. Além disso, a força axial é responsável pela aplicação da pressão de forjamento que é vital para obter uma boa formação de solda;
Força Transversal (F_x)	A força de deslocamento ou força transversal, é responsável por suportar a resistência do material ao movimento da ferramenta ao longo da linha de junção;
Força Lateral (F_y)	A força lateral surge devido à assimetria do processo FSW, causada pela direção da rotação da ferramenta. O lado de avanço da solda é mais quente do que o lado de retirada da solda [2], consequentemente, o material no lado de avanço é mais macio e menos resistente. Esta força tem a direção do lado de retirada para o lado de avanço da solda;
Torque (M_z)	O torque também é responsável pelo atrito entre a ferramenta FSW e as peças de trabalho. Este atrito é uma das principais fontes de aquecimento para o processo de FSW.

2.2. Precisão e Rigidez

É a capacidade de um equipamento FSW suportar cargas sem ser deformado e sem deflexão. A relação é de simples entendimento, por exemplo, quando uma máquina apresenta uma baixa rigidez a ferramenta de trabalho se desvia do traçado programado da solda impactando fortemente na qualidade da solda. A baixa rigidez também causa excesso de vibração o que desestabiliza todo o processo impactando também na precisão e consequentemente na qualidade. Máquinas de FSW geralmente possuem altos níveis de precisão, porém, basta o nível de rigidez estar abaixo do necessário que a precisão é impactada.

2.3. Capacidade de detecção ou de sensoriamento

Capacidade de detecção ou de sensoriamento nada mais é do que a máquina estar totalmente ciente dos fenômenos que estão ocorrendo dentro do processo, mais precisamente na junta de solda. A máquina precisa saber todos os estados, valores, fenômenos em geral, de todas as variáveis direta e indiretamente envolvidos na soldagem. Nesta revisão, são considerados como variáveis de soldagem direta os parâmetros de soldagem que de alguma forma podem ser atuados de forma direta, são eles: Velocidade de rotação, velocidade de deslocamento, a entrada de calor externa e o ângulo de inclinação. A variáveis indiretas dependem de outras variáveis. Nesse caso é composta principalmente pela mistura e fluxo de material agitado, a temperatura na área de soldagem e pelas forças envolvidas no processo FSW (força de tração, axial, lateral e torque).

2.4. Flexibilidade

A flexibilidade de uma máquina é de extrema importância pois limita a complexidade do trabalho a ser executado, ou seja, materiais e caminhos de soldagem com geometrias mais complexas que exige soldagem em curva e mudanças de direção por exemplo, depende diretamente da capacidade de flexibilidade da máquina. O número de eixos que a máquina possui é o que normalmente estabelece e determina sua flexibilidade de trabalho. Essa relação entre número de eixos e flexibilidade é lógica, por exemplo, um caminho de soldagem unidimensional é o tipo menos complexo, ou seja, requer menos eixos na máquina pois exige menos flexibilidade. A versão mais simples desse tipo de máquina possui apenas dois eixos. Um caminho de soldagem bidimensional (2D) ou tridimensional (3D) exigem mais flexibilidade. No caso do caminho bidimensional, a máquina precisa ser mais flexível, ou seja, possuir mais eixos, pois a ferramenta deve ser movimentada nas duas direções, mantendo precisamente os ângulos de trabalho e de deslocamento. O caminho tridimensional é o mais complexo e que exige mais flexibilidade da máquina. Um maquinário mais simples para efetuar uma soldagem em três dimensões deve ter no mínimo cinco eixos. Além disso, em diversas aplicações são necessários múltiplas soldas em diferentes direções e múltiplas orientações exigindo cada vez mais flexibilidade.

2.5. Capacidade de tomada de decisão

Sensores são cada vez mais utilizados e são imprescindíveis na indústria, e neles estão um dos maiores focos da engenharia tecnológica de ponta atual. Não é diferente para o processo FSW. Todos os métodos de controle possíveis podem e devem ser implementados no sistema de controle do equipamento com o objetivo de permitir uma auto-adaptação do processo. Sensores devem fornecer dados precisos das variáveis direta e indireta (força axial, torque, força lateral, força de tração, temperatura, fluxo e mistura de material) e os mesmos são utilizados como informação para todo o sistema de controle. Na prática, as variáveis que são monitoradas convergem para valores e estado físico desejados e precisos, no qual a soldagem FSW produz a melhor solda possível em termos de qualidade. A máquina precisa ser inteligente para garantir mais qualidade ao processo.

3. APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA AEROESPACIAL E AUTOMOTIVA

Escolher uma máquina FSW específica para uma determinada operação depende dos diversos parâmetros exemplificados anteriormente. A grande barreira a ser transposta está relacionado diretamente com a industrialização do processo onde a máquina irá atuar e a capacidade da mesma em soldar diferentes tipos de geometrias, materiais, tamanho, espessura, precisão necessária ou seja, todos os níveis e variáveis de complexidade envolvidos. Somando-se isso tudo, o processo FSW tem sido mais usado justamente em ligas de alumínio e materiais dissimilares difíceis de soldar, no entanto as operações podem ter alto grau de complexidade. Buffa et al (2009), relataram em um artigo experimental um trabalho com o objetivo de obter T e juntas de apoio caracterizadas por dimensões de interesse industriais (painéis com 300 x 200 x 3mm) a partir de duas ligas de alumínio diferentes (AA2024-AA7175). Esse processo foi um sucesso e utilizado por diversos tipos de indústrias como aeronáutica, aeroespacial, construção naval, ferroviária, automotiva, eletrônica, elétrica entre outros.

A soldagem FSW tornou-se a tecnologia de solda mais adotada no setor aeroespacial, substituindo outras tecnologias de soldagem. Cada vez mais inúmeras peças, foguetes, sondas, entre outros já estão sendo fabricados pelo processo FSW. Esse processo é de grande vantagem porque reduz o peso das aeronaves e o custo de fabricação. A tecnologia de soldagem por fricção é usada para soldar montagens de motores, suportes e suportes de freio, para citar alguns. Junior et al (2013), realizaram o comparativo entre a eficiência do processo de união por FSW e por rebites, já que o uso de rebites vem caindo em desuso. No setor aeronáutico a busca por redução de peso das aeronaves e o consequente aumento na autonomia de voo, redução no gasto de combustíveis, além da diminuição na emissão de gases poluentes é o fator desejado atualmente. Uma possível solução para redução do peso seria a diminuição da utilização de rebites, já que o peso dos mesmos, dependendo do tamanho do avião, pode representar até 10% do peso total. O processo de FSW se adequa muito bem na fabricação de asas, fuselagens, painéis de piso, porta de trem de aterragem de aviões, tanques de combustível criogênico dos veículos espaciais entre outros. A Nasa e a Space X estão utilizando e desenvolvendo processos e ferramentas de FSW, que visam a obtenção de estruturas de alumínio de alta resistência, sem defeitos e uniformemente ligadas - um requisito vital para veículos de lançamento e hardware de próxima geração, projetados para viagens espaciais de longo prazo, incluindo a viagem a Marte.

Na indústria Automotiva, a soldagem FSW está sendo usada na fabricação de inúmeros componentes. Assim como na indústria aeroespacial os automóveis estão cada vez mais necessitando reduzir peso com o intuito de melhorar a performance e reduzir consumo e emissões. Enumerando os benefícios do uso de soldagem FSW na indústria automotiva, podemos citar a redução de peso, menor custo, a soldagem FSW melhora as propriedades mecânicas das peças, alto grau de personalização, eco amigável pois não gera gases tóxicos, consome menos energia elétrica, capacidade de soldar chapas finas de alumínio, não utiliza materiais de enchimento, as deformações são menos prováveis e é esteticamente atraente. Esse tipo de soldagem pode ser utilizado não só para construções mais lógicas como o corpo, chassi ou suspensão do automóvel, como também para produzir componentes do sistemas de gestão térmica como placas de frio e inversores, compartimentos herméticos como gabinetes eletrônicos, venturi e tanques de combustível além de outros componentes como bandejas de bateria, suportes e quadros. O processo se adequa a indústria automotiva pois produz soldas longas, retas e curvas, compatíveis com as complexas geometrias dos componentes e peças automotivas. A grande barreira do FSW na indústria automotiva era conseguir alcançar a velocidade de produção da linha montagem, porém essa barreira já está sendo ultrapassada com o avanço da tecnologia. Recentemente a Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) desenvolveu uma técnica dez vezes mais rápida do que as atuais de FSW, correspondendo, pela primeira vez, aos requisitos de uma linha de montagem de grande volume. A Honda, por exemplo, desenvolveu uma tecnologia para a soldagem por fricção de componentes de aço e alumínio, para unir o subframe dianteiro da versão norte-americana do Accord de 2013. O resultado é um processo comprovado que supera a velocidade, escala e limitações de qualidade de FSW que anteriormente interrompiam a linha de montagem na indústria automobilística. Essa tecnologia produz soldas que são tão fortes quanto as produzidas pelo processos de soldagem MIG, sendo que consome cerca da metade da energia necessária para a tarefa. O FSW convencional requer o uso de máquinas grandes, mas a Honda desenvolveu uma pistola de soldagem tipo C que pode ser montada em um robô industrial. Este sistema também pode ser empregado para a soldagem de alumínio com alumínio, podendo ser usado para a produção de um sub-quadro totalmente de alumínio. A Tesla Motors, por exemplo, absorveu as mesmas técnicas de soldagens FSW desenvolvidas dentro da Space X e as trouxe para a indústria automotiva. Essa tecnologia foi desenvolvida internamente e o resultado final é uma solda mais forte e mais leve e com apenas 10% de resíduos de metal, resultando em um chassi mais leve e mais forte e com economia de custos produtivos. O processo FSW já foi aplicado para produzir vigas, cabines, portas, spoilers, carroceria, chassi, pára-choques, sistema de suspensão pneumática, berços de motor e chassi, eixos entre outros componentes da indústria automotiva.

4. MÁQUINAS FSW

Na literatura são relatados três tipos diferentes de máquinas viáveis para realizar o processo FSW, são as máquinas convencionais, como por exemplo as fresadoras, evidenciado em estudos de Mendes et al (2014) e Minton et al (2006),

máquinas dedicadas para o processo FSW ou customizadas especificamente para uma determinada operação conforme Okawa et al (2006) e robôs industriais estudados por Smith et al (2000) e Mendes et al (2014). Todos os três tipos de máquinas serão analisados em detalhes.

4.1. Máquinas Convencionais

O processo FSW é semelhante, em se tratando de princípios operacionais dos equipamentos, a alguns processo industriais de fabricação existentes como por exemplo o processo de rebarbação, usinagem, trituração, perfuração, entre outros. A lógica operacional desses processos descritos acima é basicamente movimentar um ferramental rotativo através de uma peça de trabalho, produzindo assim um arrasto ou resistência na peça que está sendo trabalhada. Baseado nesse princípio é verossímil supor que uma máquina convencional, como uma fresadora, pode ser utilizada para executar um trabalho de solda por fricção. Teoricamente não é tão simples utilizar máquinas convencionais para o processo FSW por causa das cargas geradas pela soldagem. Na grande maioria das vezes, essas máquinas precisam ser reforçadas para aumentar a capacidade de carga e rigidez e consequentemente suportar a operação devido as altas cargas envolvidas no processo, conforme estudos de Longhurst et al (2010) e De et al (2012). Baseado nisso existem diversas oportunidades em potencial para modificar equipamentos já existentes e torná-los aptos para operar FSW. As modificações de máquina podem ser feitas em níveis estrutural, em termos de flexibilidade, tomadas de decisão e detecção ou sensoriamento. As modificações estruturais, na maioria das vezes, tem como objetivo tornar o equipamento mais robusto, ou seja, com o poder de suportar mais carga. Nesse processo de modificação, normalmente peças como motor, trilhos, eixos, etc, são substituídos por componentes mais adequados a tornar a máquina mais capacitada. A flexibilidade, como já foi dita anteriormente, pode ser aumentada introduzindo mais eixos e mais motores que proporcionam mais graus de liberdade de trabalho do equipamento. Devido as elevadas cargas do processo FSW, na maioria das soluções de adaptação foi implementado o controle de força tanto para garantir a qualidade da solda como para prevenir danos ao equipamento e a segurança do operador. A tomada de decisão pode ser incrementada com a possibilidade de aumentar as probabilidades de movimentos em cada vez mais direções além da possibilidade da máquina ser equipada com um número maior de sensores para coletar diferentes tipos de informações que serão utilizadas por uma central de controle embutida na máquina, com o intuito de controlar o equipamento de forma cada vez mais precisa e eficaz. Esse tipo de máquina modificada é indicado para soldagem de peças tanto espessas quanto mais finas, soldagem de peças de trabalho tanto longas quanto curtas, prototipagem e produção de poucas unidades em série, aplicações que necessitam de elevada rigidez e aplicações que exigem de um a dois eixos. Vale ressaltar que esse tipo de máquina normalmente tem um baixo desempenho de produção. Um exemplo de máquina modificada, no caso uma fresadora é apresentada na Fig. (3a).

4.2. Máquinas Dedicadas FSW

As máquinas desenvolvidas exclusivamente ao um determinado processo FSW, para uma determinada atividade, tendem a deter uma maior capacidade de carga, precisão, rigidez e disponibilidade. Esse tipo de máquina pode assumir diversos tipos de configurações com diferentes níveis de flexibilidade. As máquinas customizadas são desenvolvidas especificamente para satisfazer exigências especiais de um determinado produto. Esse tipo de máquina dificilmente se adequa a outro processo justamente devido as suas característica específicas para um determinada operação. As máquinas dedicadas normalmente são caras e o custo aumenta proporcionalmente com a flexibilidade. Esse tipo de máquina é recomendada para produção em série dos mesmos tipos de produtos usados por uma máquina convencional porém com um alto grau de qualidade de soldagem ou seja, é indicado para soldagem de peças tanto espessas quanto finas, soldagem de peças de trabalho tanto longas quanto curtas, aplicações que necessitam de elevada rigidez e aplicações que exigem de um a vários eixos todas com solda de alta qualidade.

Um exemplo prático da necessidade de uso de uma máquina dedicada é na soldagem de materiais de alta temperatura, como titânio, ligas de alumínio, aço, aço inoxidável, níquel, entre outros. Esses tipos de materiais requer um suporte de carga elevado e consequentemente máquinas extremamente robustas, ou seja, máquinas dedicadas, pois são as mais robustas, de estruturas mais rígidas e propícias para a atividade determinada. Muitas vezes é inevitável o uso de máquinas dedicadas justamente porque não existe uma solução disponível no mercado para aquela determinada operação. A Fig. (3b) é um exemplo de máquina FSW dedicada. O desenvolvimento de diferentes tipos de máquinas FSW está em larga expansão, principalmente dentro das grandes companhias automotivas e aeroespaciais, justamente para atender as necessidades dos novos projetos. Esta havendo o interesse também no desenvolvimento de máquinas FSW portáteis devido a necessidade de aplicar FSW em locais remotos, reparação de soldagem no local do problema e adição de componentes a grandes estruturas já existentes. Com o aumento do uso de alumínio nos automóveis por exemplos, aumenta a necessidade de máquinas portáteis para efetuar a manutenção de uma frota em expansão. Justamente com esse intuito de desenvolver máquinas portáteis, todas as variáveis para a viabilidade desse tipo de equipamento estão sendo estudados por Steel et al (2013). Esses tipos de equipamentos ainda não estão disponíveis no mercado, a redução da carga necessária e o peso do equipamento são os principais desafios para o desenvolvimento de um equipamento portátil adequado, porém uma grande tendência está na popularização de robôs móveis, que podem

ajudar com soluções adequadas e também no desenvolvimento do processo de soldagem FSW em geral conforme estudos de Ku et al (2014).



Figura 3. (a) Fresadora modificada para executar FSW. (b) Máquina dedicada para FSW. Fonte: Associação Brasileira de Soldagem.

4.3. Máquinas Robóticas FSW

As máquinas robóticas ou robôs industriais formam mais uma categoria de máquinas FSW. Esse tipo de máquina ficou de fora de operações de FSW por alguns anos, devido a sua baixa rigidez e capacidade de carga. Porém, os avanços tecnológicos levaram a novos desenvolvimentos de robôs com capacidade de carga e rigidez elevadas, tornando aptos a realização de soldagem por fricção em materiais de espessura fina e moderada. Os robôs tem como vantagens a flexibilidade e a automação do processo de soldagem, incrementando e melhorando a produtividade de todos o processo. Por exemplo, um material com plano de solda em múltiplos lados, tem como solução robótica a ideal pois permite soldar em múltiplos lados da peça em uma única configuração, como por exemplo a peça de trabalho mostrada na Fig. (4a). Isso melhora bastante a produtividade pois reduz a manipulação da peça a ser soldada, reduzindo consequentemente o custo de operação. As aplicações recorrentes as soldagens 3D estão cada vez mais viáveis e atraentes com o uso de um sistema robótico FSW. Para uma grande variedade desses tipos de aplicações é necessário apenas um robô industrial com cinco graus de liberdade ou DOF (degrees of freedom), o que torna bastante viável a escolha desse tipo de máquina pois a maioria dos robôs industriais que se encontram no mercado possuem de cinco a seis graus de liberdade. As soluções em robôs industriais disponíveis no mercado hoje podem ser divididos em duas classes, os robôs de braço articulado e os robôs cinemáticos paralelos.

Os robôs de braços articulados apresentam alta flexibilidade e repetibilidade, alta capacidade de tomada de decisão e baixo custo se compararmos com uma máquina FSW dedicada, porém tem pouca precisão sendo que a precisão piora proporcionalmente com o aumento da carga aplicada na peça trabalhada. Esse tipo de máquina pode ser uma ótima solução para alguns tipos de projetos devido ao seu baixo custo e alta flexibilidade porém devido a baixa capacidade de carga, ela se limita a soldar uma gama limitada de materiais. Como regra geral um robô mais robusto solda até 6 mm de espessura de uma liga de alumínio conforme Marcotte et al (2010), Schultz et al (2013) e Wanjara et al (2013). Materiais com ponto de fusão mais altos limita o processo para esse tipo de máquina assim como uma alta conformidade causa problemas de estabilidade de processo. O uso de robôs de braços articulados é indicado para aplicações com múltiplas soldaduras, o que exigiria múltiplas configurações se não o fosse utilizado, é indicado para uso em materiais de fina a média espessura, materiais de espessuras dissimilares, nesse caso especificamente, é necessário analisar a modificar o ângulo de trabalho e o ângulo de deslocamento, indicado em aplicações que necessitem de múltiplos eixos, aplicações onde o volume de produção seja mais elevado onde a produtividade é um fator diferencial.

O outro tipo de configuração robótica é o robô cinemático paralelo. Esse tipo de robô suporta cargas mais elevadas e tem rigidez significativamente maior do que o robô de braço articulado. Entretanto o custo desse tipo de máquina é bem maior e a sua produtividade é menor, bem como sua flexibilidade. Os robôs cinemáticos paralelos devem ser considerados em aplicações semelhantes aos de braço articulado porém o volume de trabalho é relativamente pequeno e os requisitos de rigidez e capacidade de carga são maiores. Soldar materiais com pequena e alta temperatura também é totalmente possível com o uso desse tipo de máquina. Um exemplo típico de robô cinemático paralelo é o da Fig. (4b).



Figura 4. (a) Robô FSW numa peça de múltiplas soldagem (b) Robô Cinemático Paralelo. Fonte: Associação Brasileira de Soldagem.

5. ESTUDOS PRÁTICOS SOBRE ROBÔS DE BRAÇO ARTICULADO E ROBÔS CINEMÁTICOS PARALELO.

No estudo realizado por Marcotte et al (2010), eles desenvolveram um sistema de braço articulado e foi relatado com sucesso a produção de soldas de alumínio com soldaduras em 1D, 2D e 3D. A Fig. (5) apresenta justamente um robô de braço articulado capaz de soldar em 1D, 2D e 3D. Já Shi et al (2012), desenvolveram um mecanismo paralelo para executar FSW de soldadura 3D. O mecanismo paralelo desenvolvido foi denominado 3PRS (Prismatic, revolute e spherical joint) que é caracterizado por um articulação em forma de prisma e esférica capacitando uma máquina cinemática paralela a desenvolver soldagem em 3D o que aumentou significativamente a sua flexibilidade. A Tab. (3) apresenta uma análise comparativa de diferentes tipos de máquinas.

No robô articulado, ao ser usado para o processo FSW, acontece bastante dos caminhos do movimento do robô sofrerem pequenas modificações de posição não programadas, o que pode colocar em risco a qualidade da solda. Uma das possíveis soluções para amenizar o problema é o controle intenso de carga que atua sobre o robô durante a soldagem. Muitas técnicas de ajuste de trajetória tem sido propostas até o momento, porém nenhuma delas resolveu o problema por completo. Vamos aprofundar o estudo dos sistemas robóticos analisando as limitações dos robôs articulados, métodos para detectar variáveis com o intuito de melhorar a qualidade da solda, formas de melhorar a precisão robótica no processo FSW e parâmetros de soldagem que afetam os requisitos de rigidez da máquina.



Figura 5. Robô industrial de braço articulado da Kuka, executando FSW.

5.1. Limitações dos robôs de braço articulado

Devido as altas cargas envolvidas no processo FSW e a baixa rigidez apresentada nesse tipo de máquina, eles não podem garantir a mesma qualidade de trabalho de uma máquina FSW convencional ou dedicada. Robôs de braço articulado são compostos por caixas de engrenagens, eixos de transmissão, juntas e ligações que possuem servo motores tudo isso trabalhando em conjunto. Todos esses componentes são possíveis variáveis causadoras de fenômenos não projetados como vibração, folga, rotação dos rolamentos, desgastes mecânicos não previsíveis, que atribuem conformidade aos robôs articulados, podendo levar a deflexões em certos componentes conforme Schneider et al (2014) e Leali et al (2014). Esses tipos de fenômenos fazem com que os codificadores montados nas máquinas, com o intuito de ler seu real posicionamento, não detectem essas deflexões, ou seja, as leituras dos codificadores são enviadas erradamente para os sistemas de controle, determinando erroneamente o real posicionamento da ferramenta. É importante ressaltar que a diferença entre o movimento livre do robô e do movimento em trabalho efetivo é enorme. Quando os robôs estão movendo-se ao ar livre, as deflexões são insignificamente pequenas, praticamente não tem carga envolvida, porém, quando a ferramenta entra em contato com a peça a ser trabalhada, todas essas ligações e junções causam alterações e desvios no caminho definido para o trabalho do robô afetando totalmente a qualidade do

trabalho.

5.2. Aumentando a precisão robótica FSW

Com o objetivo de realizar FSW nos robôs de braço articulado, que apresentam baixa rigidez, tem sido proposto controlar as cargas envolvidas no processo ao invés de controlar a posição do robô, podendo assim igualar em qualidade a um trabalho realizado por uma máquina FSW mais rígida. A lógica em teoria é simples, se as soldas pudessem ser executadas em cargas menores, consequentemente os requisitos de carga da máquina também poderiam ser reduzidos. Ao realizar o controle de carga, evita-se cargas excessivas e perda de contato entre a ferramenta e o produto, evitando assim possíveis danos dos componentes que fazem parte do processo além de problemas com a qualidade da solda.

5.3. Parâmetros de soldagem que afetam os requisitos de rigidez da máquina

Os parâmetros de soldagem influem e afetam diretamente a qualidade da solda, e cada parâmetro individual não só pode causar defeitos como pode afetar outros parâmetros. Isso quer dizer que pode-se obter soldas com qualidades iguais porém com configurações de parâmetros diferentes conforme Shi et al (2015). Baseado em estudos, a quantidade de calor fornecido a uma junta de solda é o ponto principal para alcançar soldas de alta qualidade. Para obter a quantidade de calor ideal, vários parâmetros devem ser levados em consideração como por exemplo a velocidade de rotação, força axial, velocidade transversal, profundidade de imersão, tipo de material, aquecimento externo na junta, espessura das peças de trabalho, entre outros. Todas essas variáveis são extremamente importantes para a qualidade da solda além disso, com o estudo e aplicações corretas desses parâmetros torna possível a redução das cargas geradas no processo de soldagem FSW bem como o nível exigido de rigidez da máquina, mantendo a mesma quantidade de calor. Isso tudo abre as portas para o desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente com a possibilidade de tornar as ferramentas mais portáteis e com alto grau de variabilidade, para atender a demanda de serviços. Estudos comprovaram que o controle da força de uma fresadora monitorada através do controle do movimento, mostrou uma redução significativa da força axial quando elevada a velocidade de rotação da ferramenta, consequência do aumento de entrada de calor que causa um maior amolecimento do material. Analisando os resultados desse estudo, fica claro que as deflexões nos robôs podem ser significativamente reduzidas com uma maior velocidade de rotação e com menor força axial, porém, é sempre importante citar que o coeficiente de atrito entre a ferramenta e o material é um fator limitante para a velocidade de rotação. Os ajustes apropriados dos parâmetros do processo e o projeto da ferramenta, podem reduzir as forças de reação possibilitando o uso de robôs para FSW. Cook et al (2004), concluíram que o calor gerado pela força axial, a velocidade de rotação, a velocidade de deslocamento e o design da ferramenta é de extrema importância e deve ser parametrizada de maneira adequada para soldar alumínio através de uma fresadora por exemplo. Algumas conclusões interessantes foram apontadas, como por exemplo, elevada entrada de calor e alta força axial, somadas a uma velocidade de deslocamento muito baixa, ocasionará simplesmente uma fundição, ou melhor, uma elevada penetração em movimento vertical da ferramenta, fundindo no material a ser soldado. Já a alta entrada de calor irá produzir um material mais macio o que beneficia o desempenho do robô, influenciando diretamente na precisão e qualidade. Outro estudo feito por Crawford et al (2006), através de simulação do processo FSW utilizando robôs, concluiu que ao aumentar a força de rotação, a força axial e o torque diminuem, a mesma conclusão foi tirada por Zimmer et al (2010), porém, eles acrescentaram também, que é possível diminuir a força axial e o torque não só com o aumento da velocidade de rotação como também com a menor velocidade de imersão da ferramenta e utilizando a força de controle ao invés do controle de movimento do ferramental. Como pode ser observado, o estudo e aplicação correta dos parâmetros é a chave para obter as corretas soluções em soldagem FSW.

5.4. Métodos de detecção para melhorias na qualidade da solda

Uma série de estudos de FSW tem sido feitos inspirados principalmente nos estudos dos de uso de força, movimento de controle e também pela robotização no processo de soldagem. Fleming et al (2008), por exemplo, investigou a detecção automática de falhas em soldas de robôs FSW. Por exemplo, para superar falhas como espaços vazios na solda, foi proposto uma análise em tempo real da força axial aplicada no momento, através de uma técnica baseada na análise dos componentes principais (ACP). Em um outro estudo, realizado por Yang et al (2008), foi proposto um algoritmo de monitoramento em tempo real para detectar falhas na soldagem.

Um grande problema na soldagem de alumínio pelo processo FSW utilizando robôs é o desvio lateral da ferramenta. Para evitar esse tipo de desvio, muitos estudos tem sido realizados. Fleming et al (2010), apresentou um método de rastreamento automático da costura de solda em juntas de rebordo. Nesse método o rastreamento é feito movimentando a ferramenta FSW para frente e para trás, perpendicularmente aos sinais de direção transversal e da força de monitoramento e torque. O estudo mostrou ser eficiente e esse tipo de tecelagem não compromete a qualidade da solda. Esse processo pode ser utilizado com o uso de robôs, ferramenta dedicada ou ferramenta convencional. Outros estudos como por exemplo o realizado por Becker et al (2012) e Guillo et al (2016), demonstraram que os desvios laterais são causados pela deflexão do robô, sendo que os desvios em materiais finos ou materiais moles, foram

considerados irrelevantes durante a soldagem porém esses desvios devem ser compensados quando se refere a uma liga de alumínio de alta resistência. Uma forma de monitoramento visual somado a sensores a laser foram utilizadas para medir esses desvios laterais do robô, e três conclusões diferentes se mostraram eficazes para garantir a qualidade da solda. São elas: a utilização de um sistema de rastreamento de costura visual, implementar compensações nos percursos pré-programados do robô e utilização de técnicas de pré-aquecimento de juntas de soldagem.

6. MÁQUINAS FSW

O controle da força do robô vem assumindo uma responsabilidade cada vez mais importante no desempenho de determinadas tarefas robóticas nos últimos anos. Esse controle é importante não apenas em tarefas onde a força é suficiente para executar os trabalhos pré-programados, como por exemplo, a força de contato e torques adequados para aquela determinada atividade. Isso se encaixa nos casos mais comuns de uso de robôs como o controle em atividades de montagem, polimento ou rebarbação. O que é de extrema importância é também ter o controle sobre as tarefas onde a deflexão do robô é um fator de peso, como em atividades de fresagem, perfuração e FSW. Nessa segunda categoria de atividades, são onde a rigidez e a carga útil entram em campo. Na realidade, independente do tipo de atividade, o tipo de abordagem para lidar com essa questão é a mesma, ou seja, deve-se controlar a força e o torque entre o robô e o ambiente a ser trabalhado de maneira apropriada. O controle pode ser feito de forma passiva ou ativa, dependendo diretamente da tarefa a ser executada. No controle de força ativa, as forças de contato são necessárias para finalizar a atividade corretamente, ou seja, as forças de contato devem ser controladas, assumindo um valor particular específico ou seguindo um perfil determinado de força. No controle de força passivo, as forças de contato geram um efeito indesejável e não são necessárias para que o processo seja realizado.

O controle de força ativo exige um investimento mais elevado, tanto em termos monetários quanto em processamento de informação porém esse sistema de controle garante forças de contato adequadas ao processo, por isso mesmo é o tipo de controle mais utilizado nas indústrias. Muitos estudos vem sendo realizados sobre o tema a partir dos métodos mais comuns apresentados na literatura, como o controle de força, controle de movimento e um método híbrido de controle de força e movimento ao mesmo tempo, sendo esse o que tem sido apontado pela comunidade científica, como o mais adequado para lidar com as questões de deflexão do robô e o impacto da força e do torque. Esse método permite controlar as direções da tarefa não limitadas no controle de movimento e também as direções das tarefas restritas no controle de força, ou seja, a arquitetura desse sistema híbrido consiste de um sistema de controle de força externo fechado, em torno de um sistema de controle de movimento interno. Para trabalhar com deflexão do robô, por exemplo, esse sistema é o ideal pois o controlador de força é projetado para dominar o controlador de movimento. Ou seja, um erro de posição é tolerado ao longo das direções de tarefas restritas com o intuito de garantir a regulação da força.

Existem quatro maneiras distintas de controlar o processo robótico de FSW, Ajustar a profundidade de imersão de acordo com uma determinada força, ajustar a profundidade de imersão de acordo com um determinado torque dos motores do robô, ajustar a profundidade de imersão de acordo com um determinado torque da ferramenta, e ajustar a velocidade de deslocamento de acordo com uma determinada força definida. Todos os quatro métodos de controle serão analisados e discutidos a seguir.

6.1. Ajustar a profundidade de imersão de acordo com uma determinada força

Esse tópico propõe o uso do controle da força, onde a profundidade de imersão da ferramenta FSW é ajustada a medida que a ferramenta atravessa a junta de solda. Ou seja, a força axial converge para uma força de ajuste assegurando que a consolidação e o forjamento do material agitado seja ideal. Para implementar esse sistema necessita-se de um sensor de força, justamente para coletar os dados sobre as cargas que atuam na ferramenta FSW. Esses dados de força são redirecionados de volta para uma central de controle que por sua vez controlam os servo motores do robô atribuindo a posição ideal à ferramenta. Esse tipo de arquitetura de controle de força é denominada de controle de força direta. Um sensor de força é simples de acoplar ao sistema porém pode ter um custo elevado e pode ser susceptível a distúrbios de ruído. A força axial tem sido o parâmetro de controle mais utilizado porque é a carga mais pesada que atua na ferramenta FSW, portanto, prevenir o uso máximo e muitas vezes desnecessários de força axial é importantíssimo para garantir a segurança de todo o sistema de máquinas e ferramentas e a qualidade do processo FSW. Uma forma mais barata de controlar a força é através do sensoriamento da deflexão da ligação robótica conforme estudo de Gibson et al (2012).

6.2. Ajustar a profundidade de imersão de acordo com um determinado torque dos motores do robô

Esse segundo tópico é muito parecido com o primeiro, a diferença é apenas em dados brutos já que nesse caso específico os dados em questão são as leituras dos torques dos motores dos robôs. Esses dados são processados para estimar as cargas que estão agindo sobre a ferramenta FSW. Se usarmos como referência a matriz Jacobiana do robô, a força axial aplicada pode ser calculada com base na corrente medida fornecida a cada motor em um robô de braço

articulado configurado em série. Esse tipo de controle elimina os sensores de força que são muito caros. Esse sistema é denominado de controle de força indireta sendo que permite alcançar um controle aproximado da força de contato devido a geometria e complexidade de conformidade do robô de braço articulado. Algumas pessoas tem sido bem sucedidas em soldagem FSW através do controle de força indireta para soldar alumínio com uso de robô de braço articulado

6.3. Ajustar a profundidade de imersão de acordo com um determinado torque da ferramenta

Esse tópico leva em consideração o torque exercido na ferramenta para alimentar o sistema de controle do robô. Todos os deslocamentos axiais são enviados para o braço do robô com o intuito de mudar a programação do caminho de soldagem prévia do mesmo, de modo a atingir o torque ajustado, o torque ideal. A literatura já evidencia que o controle do torque na ferramenta proporciona resultados mais estáveis do que o controle da força axial quando a variável em questão é justamente a profundidade de imersão. Portanto, como o torque é a variável mais representativa das cargas que atuam na ferramenta de FSW, mais até que a força axial, o método de controle é baseado no modelo matemático do torque de soldagem que é Eq. (1):

$$Torque = \int_e^R 2\pi r^2 \sigma dr + 2\pi r^2 t \sigma + \int_0^r 2\pi r^2 \sigma dr \quad (1)$$

Onde σ é a tensão de cisalhamento (N/m²) no limite da interface de cisalhamento, ou seja, estamos falando da superfície da ferramenta, R é o raio do ombro da ferramenta (m), r é o raio do pino da ferramenta (m) e t é o comprimento do pino da ferramenta (m). Esse cálculo prevê que o torque de soldagem é função da profundidade de mergulho.

Os principais benefícios do controle do torque ao invés do controle da força, como já foi dito, é a simplicidade do sistema de controle e o menor custo de investimento. Para fazer a coleta de leituras de torque muitas vezes é utilizado um sensor de força-torque porém uma forma mais econômica de coletar dados de torque é simplesmente utilizar mais uma vez a medição indireta através da corrente fornecida ao motor spindle também conhecido como motor rotativo de alta frequência, ou no caso de um motor hidráulico, a análise será logicamente realizada pela diferença de pressão através do motor. O controle do torque foi evidenciado com sucesso na automação de uma fresadora convencional por exemplo, faltam estudos semelhantes para robôs de braço articulado.

6.4. Ajustar a velocidade de deslocamento de acordo com uma determinada força definida

Esse tópico consiste em controlar a força utilizando a velocidade de deslocamento como a variável de atuação. É bastante semelhante a abordagem de ajuste de profundidade de imersão no tópico 6.1, ou seja um sensor de força é utilizado para coletar os dados de força sobre as cargas que atuam na ferramenta FSW. O interessante é que foi relatado que esse sistema é mais robusto e estável quando comparado com um controlador de força que usa a profundidade de imersão como variável de atuação. No entanto, quando a velocidade de deslocamento da ferramenta é utilizada como variável de atuação a profundidade de imersão deve ser mantida constante. Infelizmente esse tipo de abordagem é mais complicado de ser utilizado por robôs articulados justamente pela natureza de conformidade. Se um robô de braço articulado de seis eixos é usado para controlar a força axial através da velocidade de deslocamento transversal, mais de uma ligação deve ser ajustada simultaneamente a medida que a ferramenta atravessa progressivamente ao longo da junta de solda. Ou seja, qualquer ajuste de múltiplas ligações simultâneas pode ocasionar alterações na profundidade de imersão da ferramenta. Isso também trará como consequência, flutuações da força axial anulando as vantagens de utilizar a velocidade de deslocamento como a variável de controle de força. Esse tipo de solução tem os custos de investimento iguais ao de controle de força pela profundidade de imersão, ou seja, relativamente altos.

7. TENDÊNCIAS FUTURAS E CONCLUSÃO

Os tipos de máquinas descritos ao longo do trabalho, apresentam características diferentes entre si, sendo que essas características determinam a sua adequação para uma determinada aplicação. Como foi dito, o uso de robôs industriais no processo FSW é muito atraente para o futuro da indústria de manufatura, em destaque a indústria automotiva. A melhora no controle das cargas envolvidas no processo FSW, está conduzindo a obtenção de soldas de extrema qualidade com o uso de robôs de braço articulado. Existe hoje uma forte tendência para tornar os robôs de braço articulado e robôs cinemáticos paralelos baseados nos conceitos hexapod e pentapod, mais autônomos, flexíveis, fáceis de operar e com capacidade de tomar decisões, introduzindo conceitos de inteligência artificial nesse tipo de operação. O sistema pentapod, somado a uma mesa de trabalho giratória por exemplo, está sendo testado em experimentos com inteligência artificial, pois a capacidade de soldagem e controle é enorme, tornando-se um sistema excelente e de tamanho atraente para soldagem de peças grandes, muito atrativo para a indústria automotiva. Essa performance é evidenciada com sucesso tanto na soldagem FSW simples, como em soldagens extremamente complexas de raios muito

baixos, soldagens 3D de estruturas côncavas a convexas, soldagens de polímeros, enfatizado por Mendes et al (2016). Cada vez mais os robôs autônomos terão incorporados mais sensores e inteligência artificial que permitirão lidar com as diferenças de posição (falhas) e manter o processo FSW controlado, assim como todas as variáveis de soldagem estabilizadas durante todo o processo. O aumento do uso de alumínio e as exigências técnicas da indústria automotiva estão contribuindo para o desenvolvimentos de novas tecnologias, ressaltando que esse uso deve dobrar até 2025. A Electromobility por exemplo, é um novo campo de pesquisa na indústria de carros elétricos. Nesse caso, a união de alumínio e cobre é um desafio significativo no design de baterias. Em estudos recentes, um sistema FSW robótico pentapod executou com sucesso a soldagem FSW desses materiais conforme estudos de Grimm et al (2015). As máquinas FSW e todas as suas capacidades citadas nesse artigo terão um papel importante no futuro da indústria, em especial a indústria aeroespacial e automotiva.

8. REFERÊNCIAS

- Thomas, W., Nicholas, E., Needham, J., Murch, M., Temple-Smith, P., Dawes, C., 1991, "Friction-stir butt welding", International patent application no. PCT/GB92/02203.
- Buffa, G., Fratini, L., Ruisi, V., 2009, "Friction stir welding of tailored joints for industrial applications", *Int. J. Mater. Form.* 2, 311–314.
- Junior, A.F., Fracasso, A.A., Pedrosa, N.C., Silva, P.S., 2013, "Solda por Fricção Linear (FSW – FRICCTION STIR WELDING) na Indústria Aeronáutica".
- Mendes, N., Neto, P., Simão, M.A., Loureiro, A., Pires, J.N., 2014, "A novel friction stir welding robotic platform: welding polymeric materials", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*
- Minton, T., Mynors, D.J., 2006, "Utilisation of engineering workshop equipment for friction stir welding", *J. Mater. Process. Technol.* 177, 336–339.
- Okawa, Y., Taniguchi, M., Sugii, H., Marutani, Y., 2006, "Development of 5-axis friction stir welding system", *SICE-ICASE Int. Jt. Conf., IEEE*; pp. 1266–1269.
- Smith, C.B., 2000, "Robotic friction stir welding using a standard industrial robot", 2nd Frict. Stir Weld. Int. Symp., Gothenburg, Sweden, 2000.
- Longhurst, W.R., Strauss, A.M., Cook, G.E., Cox, C.D., Hendricks, C.E., Gibson, B.T., et al., 2010, "Investigation of force-controlled friction stir welding for manufacturing and automation", *Proc. Inst. Mech. Eng. B J. Eng. Manuf.* 224 937–949.
- De, B.J., 2012, "Robotic Friction Stir Welding for Flexible Production", Lund University.
- Steel, R.J., Packer, S.M., Fleck, R.D., Sanderson, S., Tucker, C., 2013, "Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding", *Proc. 1st Int. Jt. Symp. Join. Weld. Elsevier*, pp. 125–127.
- Ku, N., Ha, S., Roh, M.I., 2014, "Design of controller for mobile robot in welding process of shipbuilding engineering", *J. Comput. Des. Eng.* 1 243–255.
- Marcotte, O., Vanden-Abee, L., 2010, "2d and 3d friction stir welding with articulated robot arm", 8th Int. Symp. Frict. Stir Weld. pp. 778–797.
- Shultz, E.F., Fehrenbacher, A., Pfefferkorn, F.E., Zinn, M.R., Ferrier, N.J., 2013, "Shared control of robotic friction stir welding in the presence of imperfect joint fit-up", *J. Manuf. Process.* 15 25–33.
- Wanjara, P., Monsarrat, B., Larose, S., 2013, "Gap tolerance allowance and robotic operational window for friction stir butt welding of AA6061", *J. Mater. Process. Technol.* 213 631–640.
- Shi, J., Wang, Y., Zhang, G., Ding, H., 2012, "Optimal design of 3-DOF PKM module for friction stir welding", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 66 1879–1889.
- Schneider, U., Drust, M., Ansaloni, M., Lehmann, C., Pellicciari, M., Leali, F., et al., 2014, "Improving robotic machining accuracy through experimental error investigation and modular compensation", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*
- Leali, F., Vergnano, A., Pini, F., Pellicciari, M., Berselli, G., 2014, "A workcell calibration method for enhancing accuracy in robot machining of aerospace parts", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*
- Shi, L., Wu, C.S., Liu, H.J., 2015, "The effect of the welding parameters and tool size on the thermal process and tool torque in reverse dual-rotation friction stir welding", *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 91, 1–11.
- Cook, G.E., Crawford, R., Clark, D.E., Strauss, A.M., 2004, "Robotic friction stir welding", *Ind. Robot Int. J.* 31, 55–63.
- Crawford, R., Cook, G.E., Strauss, A.M., Hartman, D.A., 2006, "Modelling of friction stir welding for robotic implementation", *Int. J. Model. Identif. Control.* 1, 101–106.
- Zimmer, S., Langlois, L., Laye, J., Bigot, R., 2010, "Experimental investigation of the influence of the FSW plunge processing parameters on the maximum generated force and torque", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 47, 201–215.
- Fleming, P., Lammlein, D., Wilkes, D., Fleming, K., Bloodworth, T., Cook, G., et al., 2008, "In-process gap detection in friction stir welding", *Sens. Rev.* 28, 62–67.
- Yang, Y., Kalya, P., Landers, R.G., Krishnamurthy, K., 2008, "Automatic gap detection in friction stir butt welding operations", *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 48, 1161–1169.
- Fleming, P.A., Hendricks, C.E., Cook, G.E., Wilkes, D.M., Strauss, A.M., Lammlein, D.H., 2010, "Seam-tracking for

- friction stir welded lap joints”, *J. Mater. Eng. Perform.* 19, 1128–1132.
- De Backer, J., Christiansson, A.K., Oueka, J., Bolmsjö, G., 2012, “Investigation of path compensation methods for robotic friction stir welding”, *Ind. Robot Int. J.* 39, 601–608.
- Gibson, B.T., Cox, C.D., Longhurst, W.R., Strauss, A.M., Cook, G.E., 2012, “Exploiting robotic link deflection for low-cost force measurement in manufacturing”, *Measurement* 45, 140–143.
- Grimm, A., Schulze, S., Silva, A., Göbel, G., Standfuss, J., Brenner, B., Beyer, E., Füssel, U., 2015, “Forming Technologies and Further Processing Friction stir welding of light metals for industrial applications”, *Conference MEFORM 2015, Light Metals*
- Mendes, N., Neto, P., Simão, M.A., 2016, “A novel friction stir welding robotic platform: welding polymeric materials”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 85, Issue 1, page 37–46.
- Guillo, M., Laurent, D., 2016, “Impact & improvement of tool deviation in friction stir welding: Weld quality & real-time compensation on an industrial robot”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol 39, Pag. 22–31.