

ADAPTAÇÃO DE UMA MÁQUINA FRESADORA VERTICAL PARA SOLDAGEM FSW - “FRICTION STIR WELDING” DE LIGAS DE ALUMÍNIO

Daniel de Jesus Hiller

Endereço: Rua Manduca de oliveira, 216 - Pendotiba - Niterói - RJ

CEP: 24315-290 Celular: 21 9132 5057 E-mail: danielhiller@hotmail.com

Subsea7 do Brasil Ltda

Endereço: Rua Eng. Fábio Goulart - Ilha de Conceição – Niterói - Rio de Janeiro – CEP: 24050-090

Tel: (21) 2621 9692 E-mail: daniel.hiller@subsea7.com

Miguel Luiz Ribeiro Ferreira

Departamento de Engenharia Mecânica – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – Escola de Engenharia – Centro Tecnológico – Universidade Federal Fluminense

Endereço: Rua Passo da Pátria, 156 – Sala 304 – Bloco D – São Domingos – Niterói – RJ –

CEP: 24210-240.

Tel/Fax: (21) 2629-5420, Email: temmlrf@vm.uff.br.

Resumo. *O processo de soldagem FSW – Friction Stir Welding (Soldagem por Fricção) foi demonstrado pela primeira vez em 1991 para soldagem de juntas de topo em chapas de liga de alumínio, e desde então vem se constituindo como alternativa a outros processos. Os primeiros trabalhos de pesquisa e desenvolvimento foram realizados utilizando-se máquinas fresadoras adaptadas. O objetivo do presente trabalho é a adaptação de uma máquina fresadora convencional para realização bem sucedida de uma soldagem FSW de chapas de alumínio com espessura de 3/8” da liga 5052. Uma revisão bibliográfica possibilitou o estabelecimento de critérios mínimos para seleção da máquina assim como para o projeto e fabricação da ferramenta de soldagem e demais dispositivos auxiliares. As questões relevantes a cerca da seleção da fresadora, os principais aspectos do projeto da ferramenta e demais adaptações assim como alguns testes realizados para verificação da integridade da junta são apresentados e discutidos.*

Palavras chave: Alumínio, FSW – “Friction Stir Welding”, Soldagem.

1 – INTRODUÇÃO

A Soldagem por Fricção – Friction Stir Welding é um processo de união tanto para peças de metal quanto de plástico. Este processo foi patenteado na Inglaterra por Wayne Thomas em dezembro de 1991. Nesta ocasião foi demonstrada a sua utilização em juntas de topo de chapas de alumínio de 6,4mm.

Inúmeras vantagens são atribuídas ao processo FSW em relação a outras técnicas de soldagem. Diversos trabalhos de desenvolvimento e algumas tentativas de estabelecimento de parâmetros ótimos de soldagem foram realizados em máquinas fresadoras convencionais adaptadas, especialmente durante as fases iniciais do desenvolvimento do processo. A utilização destas máquinas é uma opção natural devido a grande semelhança entre os movimentos e esforços característicos deste tipo de soldagem em relação àqueles da usinagem convencional. Entretanto, os detalhes das adaptações utilizadas nestas máquinas são difíceis de serem encontradas na literatura

existente. Da mesma forma, são escassas as informações sobre as características necessárias à máquina fresadora para sua utilização neste processo de soldagem. Da mesma forma, são escassas as informações sobre os requisitos necessários à utilização destas máquinas neste processo de soldagem. Neste trabalho são apresentados os resultados de um experimento de adaptação de uma máquina fresadora vertical para realização de soldas de juntas de topo de chapas de alumínio de 9,5 mm de espessura. As questões relevantes a cerca da seleção da fresadora, os principais aspectos da especificação e fabricação da ferramenta e demais adaptações, assim como, alguns testes realizados para verificação da integridade da junta são apresentados e discutidos. O experimento aqui descrito encontra-se explicado de forma minuciosamente detalhada em Hiller ⁽¹⁾.

2 – SOLDAGEM POR FRICÇÃO – FSW (Friction Stir Welding)

2.1 – Características Gerais (Hiller ⁽¹⁾)

O processo FSW é um processo de união que ocorre no estado sólido. A soldagem é realizada por meio de uma ferramenta rotativa com um pino central, que é forçada a penetrar na linha da junta e então é deslocada ao longo da mesma. Com os componentes rigidamente fixados, a soldagem ocorre através do trabalho a quente no material ao redor da ferramenta de soldagem. O calor é gerado por meio de atrito entre a ferramenta de soldagem resistente ao desgaste e a superfície do metal de base. Este aporte de calor plastifica o material abaixo do ombro da ferramenta, permitindo o translado desta ao longo da linha da junta. Conforme a ferramenta se desloca, o material plastificado é transferido da parte da parte da frente (direção do avanço) para a parte de trás (direção oposta a do avanço) da junta. A (Figura 1) apresenta um esquema ilustrativo da soldagem FSW.

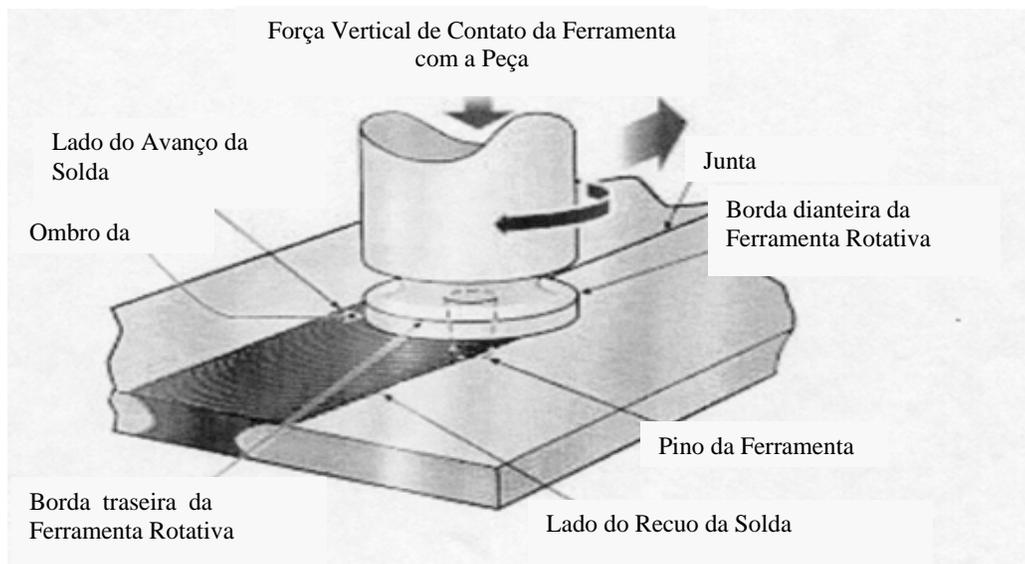


Figura 1. Esquema da soldagem FSW

O processo pode ser utilizado para soldagem de ligas de alumínio, magnésio, cobre, titânio, aço, chumbo, termoplásticos e zinco. Contudo aplicações industriais importantes estão restritas aos três primeiros materiais. Quanto ao tipo de junta, podem ser soldadas, preferencialmente, juntas de topo e sobrepostas de materiais similares e dissimilares. Juntas de filete não podem ser executadas, pois, o processo não utiliza metais de adição. Na (Figura 2) são apresentados alguns tipos de juntas típicos na soldagem FSW.

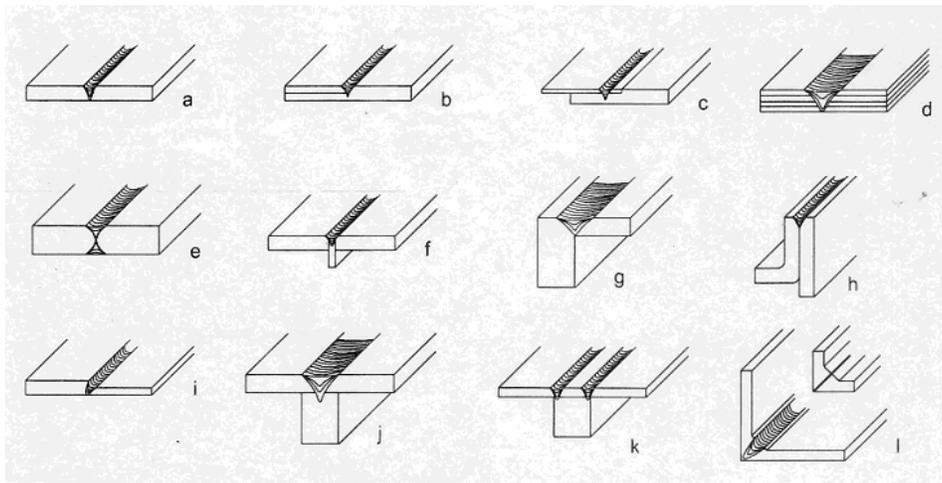


Figura 2. Juntas típicas para soldagem FSW

Na literatura, as principais variáveis que devem ser consideradas para utilização do processo, em função do metal de base a ser soldado e da geometria da junta, são: Projeto da Ferramenta, Velocidade de Rotação da Ferramenta, Aporte de Calor, Penetração da Ferramenta, Ângulos de Inclinação, Tempo de Espera (Aquecimento), Afastamento das Peças, Peças com Espessuras Diferentes, Variação da Espessura das Peças. Entre as variáveis mencionadas, aquelas que devem ser essencialmente monitoradas durante a realização da soldagem são: Velocidade de Rotação, Velocidade de Deslocamento e Força vertical. Por outro lado, no desenvolvimento de procedimentos para materiais que desenvolvam altas temperaturas durante a soldagem deve ser monitorada também a temperatura da ferramenta e da peça base, bem como, a temperatura e vazão do fluido de resfriamento.

As máquinas para a soldagem FSW são muito parecidas com uma máquina fresadora convencional. Na verdade, muitos dos trabalhos pioneiros foram realizados em máquinas deste tipo com algumas adaptações. A máquina deve ter a capacidade de suportar as altas cargas verticais que são aplicadas às peças a serem soldadas, acarretando na utilização de máquinas de grande porte. Além disto a possibilidade de inclinação do cabeçote e uma ampla faixa de rotações e de velocidades de translação da mesa são também características importantes, sendo uma opção atraente com relação ao custo do equipamento.

Uma característica importante da soldagem FSW é o fato de que as forças desenvolvidas durante a soldagem são consideravelmente elevadas. À medida que a ferramenta é empurrada ao longo da linha de soldagem há uma forte tendência de separação das peças, e uma tendência de elevação das mesmas no caso de placas finas. Assim, é fundamental a utilização de um bom sistema de fixação para impedir o movimento das peças durante a soldagem. Sistemas de fixação pneumáticos, hidráulicos e a vácuo provaram ser eficientes. Em alguns casos, a força de fixação necessária deve ser o suficiente para posicionar as peças, enquanto em outros casos, precisam ser rigidamente fixadas. Na soldagem de materiais mais espessos, a força aplicada pela ferramenta e as dimensões da peça são, normalmente, suficientes para evitar qualquer tipo de movimentação e distorção.

2.2 – Projeto da Ferramenta

A ferramenta de soldagem é a essência do processo FSW e a sua forma básica é a de um cilindro escalonado com duas partes principais denominadas ombro e pino. O ombro é projetado para aplicar uma força vertical de contato às superfícies das peças base e ainda contribuir para conter o material plastificado evitando a sua expulsão pelo movimento de rotação. Seu diâmetro é determinante na geração de calor necessário para a plastificação do metal na interface ferramenta / peça base e na intensidade da força vertical, que atua no sentido de eliminar poros e vazios da

região soldada pela ação da tensão compressiva. Para ilustração, na (Figura 3) é apresentada a ferramenta que foi desenvolvida para realização deste trabalho, bem como, suas dimensões principais.

Segundo Johnson⁽²⁾, a relação do diâmetro do ombro com o torque de acionamento aparentemente é linear, ao passo que com a intensidade da força vertical parece ser quadrática (dependência linear com a área). O movimento de rotação do ombro gera, além do atrito, deformações cisalhantes no material quando este plastifica e esta também é uma fonte de calor. Em peças delgadas, quase todo o calor é gerado pela ação do ombro, entretanto, a parcela de calor gerada pelo pino aumenta com a espessura do material. Ombros com superfícies convexas, ranhuradas ou com anéis concêntricos já foram testados, Thomas et al⁽³⁾.

A principal função do pino é de agir como uma bomba de material plastificado forçando-o a se deslocar para trás e para baixo da ferramenta. Adicionalmente, o pino deve dispersar os óxidos do material plastificado. A experiência prática recomenda que o diâmetro do pino deva ser da mesma magnitude da espessura da peça a ser soldada em soldas de penetração total. Contudo, uma faixa de diâmetros relativamente ampla pode ser utilizada com diferentes tipos de estruturas, tais como rebaiços, sulcos e roscas helicoidais, entre outras. Quanto ao comprimento, que é medido a partir do ombro, deverá também ser da ordem de grandeza da espessura das peças a serem soldadas. Por outro lado, pode-se constatar a utilização em vários experimentos de pinos de dimensões maiores e menores. Contudo, existem recomendações de que o comprimento do pino deva ser 3 a 5 décimos de milímetros menor do que a espessura nominal da peça, em função das prováveis variações de espessura da peça durante a realização da soldagem. Assim, evita-se que um pino muito curto cause problemas de penetração na raiz da solda, e também que um muito longo entre em contato com o apoio das peças.

Quanto aos materiais, é desejável que os mesmos confirmem à ferramenta um longo tempo de vida útil, devendo possuir resistência a abrasão em altas temperaturas, além de aliar dureza a resistência mecânica para que não deformem exageradamente ou cheguem à fratura sob condições de operação. Outros requisitos importantes a serem considerados na seleção dos materiais para a ferramenta são de que os mesmos não deverão reagir com o material da peça nas temperaturas de operação e devem possuir condutibilidade térmica menor do que a do material soldado. Por outro lado, como o ombro e o pino desempenham funções diferentes, os mesmo poderão ser confeccionados de materiais distintos, entretanto, o projeto da ferramenta deverá ter o cuidado de considerar a diferença de expansão térmica entre estes componentes. Finalmente, cabe ressaltar, que no caso específico das ligas de alumínio têm sido comumente usados os aços ferramenta para trabalho à quente como o AISI H13, segundo Threadgill e Nunn⁽⁵⁾ e Threadgill⁽⁶⁾.



Figura 3. Esquema da Ferramenta FSW

2.3 – Aporte de Calor

Atualmente, a melhor estimativa para a determinação do aporte de calor desenvolvido durante o processo é relacionada ao torque a que é submetido o cabeçote da máquina, sendo que a fórmula descrita abaixo na (Equação 1) é muito utilizada:

Equação (1)

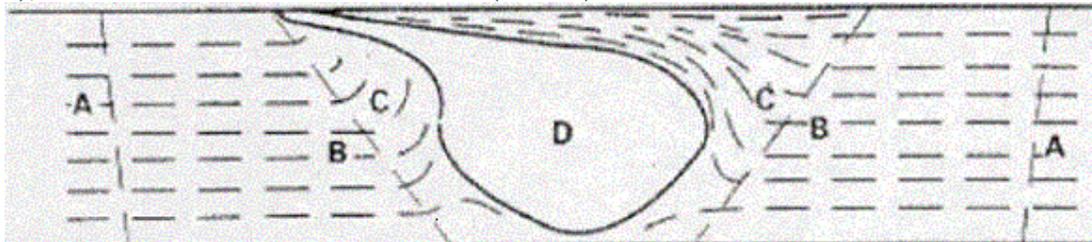
$HI = 2 \pi r T E / 1000v$, onde, HI = aporte de calor (kJ/mm); v = velocidade de translação (mm/min); E = fator de eficiência [adimensional($\cong 0,9$ para alumínio)], T = torque (Nm) e r = Velocidade de rotação (rpm).

O aporte de calor na soldagem FSW é geralmente inferior ao desenvolvido na soldagem ao arco elétrico. Assim, segundo dados experimentais gerados do TWI – The Welding Institute, para soldagem de chapas de alumínio com 6,4 mm de espessura com um único passe com o processo plasma o aporte de calor gerado é de 0,81 kJ/mm, comparativamente, no processo FSW para soldagem de chapas de alumínio de 6,0 mm espessura este valor é de 0,45 kJ/mm.

Quanto a eficiência de transferência, Lienert apud Threadgill⁽⁴⁾ e Russel apud Threadgill⁽⁴⁾, propuseram valores de 0,87 e 0,94, respectivamente, para soldagem de alumínio. Da mesma forma, Lienert apud Threadgill⁽⁴⁾ propôs também os valores de 0,73 para aços e 0,56 para ligas de titânio.

2.4– Macroestrutura das Juntas Soldadas pelo Processo FSW em Alumínio

As juntas soldadas de alumínio são divididas em quatro áreas distintas, conforme proposto por Threadgill⁽⁴⁾ e ilustrado na (Figura 4), que são: Zona não afetada, Zona Termicamente Afetada (ZTA), Zona Termomecanicamente Afetada (ZMTA) e Centro ou Núcleo da solda.



.A – Zona Não Afetada, B – ZTA, C- ZMTA, D – Núcleo da Solda.

Figura 4. Macrografia Típica de uma Junta Soldada pelo Processo FSW

A Zona não afetada é a região da que não sofre modificações devido ao ciclo térmico e à deformação plástica desenvolvida durante a soldagem. A ZTA corresponde à região da junta soldada que sofre modificações devido ao ciclo térmico da soldagem. Na ZMTA o material sofre tanto os efeitos do ciclo térmico, quanto é submetido a um processo de deformação plástica significativo. O Centro ou Núcleo da solda é considerado como sendo uma parte restrita da ZMTA, na qual o material é dinamicamente recristalizado durante a operação de soldagem. A fronteira entre o núcleo e o restante da ZMTA é razoavelmente identificável, porém, para aumentos grandes esta identificação pode ser dificultada. A microestrutura do núcleo consiste sempre de grãos equiaxiais muito finos, com aproximadamente 2 à 5 microns de diâmetro. Há ainda uma outra formação presente na área do núcleo chamada de “*onion ring*”, que são uma espécie de elipsóides concêntricos dentro do núcleo. Às vezes estes anéis correspondem a mudanças no tamanho dos grãos do material, sendo que também em alguns casos não podem ser observados para grandes ampliações. Por outro lado, existem fortes evidências de que a formação destes anéis esteja associada às variações da velocidade de avanço e de rotação da ferramenta, bem como, a geometria da mesma.

3 – ESPECIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E DIPOSITIVOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 – Metal de Base

Para realização deste trabalho foram utilizadas chapas da liga de alumínio 5052 H38, que não é tratável termicamente, tendo como elementos de liga notáveis o Mg (teores de 2,5% em peso) e o Cromo (teores de 2,5% em peso). As dimensões das chapas utilizadas foram de 500 mm de comprimento, 60 mm de largura e 9,5mm de espessura. As principais propriedades mecânicas desta liga são: Resistência a Tração - 42 Ksi; Limite de Escoamento – 37 Ksi; Alongamento Percentual (em 50mm) – 8%; Dureza Brinell (5000Kg, 10 mm) – 77.

3.2 – Ferramenta FSW

As principais dimensões da ferramenta foram estabelecidas com base nas informações dos trabalhos experimentais citados em 2.2 onde também é apresentada na (Figura 3) a ferramenta desenvolvida para realização deste trabalho. Também foram incorporadas diversas características observadas em várias outras referências além de algumas não encontradas como, por exemplo, o furo central. A ferramenta foi provida de uma haste cilíndrica destinada ao acoplamento desta ao eixo-árvore da máquina fresadora por meio de uma pinça de fixação padrão. Um anel perfurado de aço inoxidável foi acoplado à ferramenta para prover o sistema de uma área de dissipação de calor e reduzir o contato direto das regiões quentes da ferramenta com o sistema de fixação. O material escolhido para a confecção da ferramenta foi o AISI H13.

3.3 – Dispositivo de Fixação

As peças de alumínio a serem soldadas foram fixadas num dispositivo composto de uma placa de apoio com furos que permitiram sua fixação à mesa da máquina, conforme é apresentado na (Figura 5). Da mesma forma, utilizou-se batentes posicionados nas direções transversal e longitudinal em relação à placa base. Na confecção da placa base utilizou-se aço inoxidável austenítico e para os batentes aços carbono. O esquema do dispositivo de fixação é apresentado na

abaixo

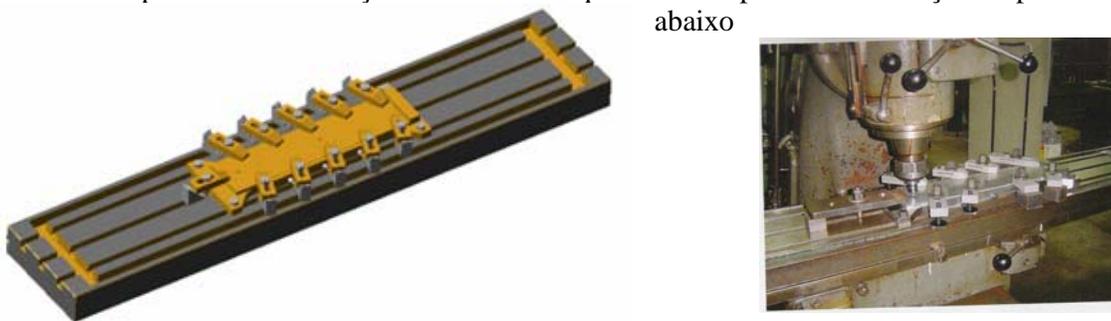


Figura 5. Esquema dos dispositivos de Fixação

3.4 – Máquina Fresadora

Para realização do experimento foi utilizada uma máquina fresadora vertical, modelo 1175 PBPANAMBRA (fabricante: VILH. PEDERSEN) com potência 6CV, velocidades de rotação de 40 a 900 rpm, velocidades de translação da mesa de 15 a 546 mm/min. A máquina não permite que a rotação nem a velocidade de avanço sejam alteradas durante a realização da soldagem, portanto, estas variáveis devem ser ajustadas previamente.

3.5 – Procedimento de Soldagem

Imediatamente antes do início do procedimento de soldagem as peças foram lixadas, desengraxadas e desengorduradas para garantir a retirada da camada de óxido de alumínio, bem como, quaisquer outras impurezas que pudessem comprometer a junta soldada. As peças foram

fixadas sobre a chapa de apoio na mesa da máquina fresadora, por meio de batentes e fixadores, de forma que a linha da junta estivesse alinhada com a direção do movimento transversal. A ferramenta de soldagem foi montada diretamente ao eixo-árvore do cabeçote, por meio de um dispositivo de fixação de fresas do tipo pinça de pressão. Os valores dos principais parâmetros de soldagem para realização do experimento representam a média daqueles utilizados em experimentos já publicados. Assim, os parâmetros iniciais de soldagem foram ajustados com os seguintes valores: velocidade de rotação da ferramenta – 510 rpm; velocidade de translação – 72 mm/min; ângulo de inclinação – 2° e ângulo de inclinação lateral - 0° . Em seguida, a rotação do eixo-árvore da máquina foi acionada e o processo de penetração da peça iniciado lentamente por meio de elevação da mesa. Quando a ferramenta penetrou à profundidade determinada nas peças (9,3 mm) foi iniciada a contagem do tempo de espera estabelecido (8 segundos) e finalmente iniciado o movimento de translação.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Adaptação de Máquinas Fresadoras

Os trabalhos pioneiros de pesquisa e desenvolvimento da soldagem FSW foram desenvolvidos utilizando-se máquinas fresadoras convencionais adaptadas, Threadgill (1999) e Threadgill; Nunn⁽⁵⁾. Entretanto, não existem muitas informações a respeito das características fundamentais exigidas das máquinas de usinagem que poderão se utilizadas no processo, bem como, da abrangência da utilização, das possibilidades de adaptações e dos detalhes de construção destes dispositivos. Por outro lado, a semelhança dos esforços e movimentos que envolvem a soldagem FSW e as operações convencionais de usinagem é evidente. Neste sentido, para avaliação da possibilidade da utilização da máquina fresadora vertical para realização do experimento aqui descrito foram adotados os seguintes critérios: robustez; potência; faixa de rotações disponível, faixa de velocidades de avanço da mesa e possibilidade de inclinação do cabeçote.

Quanto à robustez, A máquina fresadora utilizada possui uma estrutura prismática inteiriça fundida em ferro fundido. Sua estabilidade geométrica a permitiu suportar as cargas envolvidas no processo de soldagem. Da mesma forma, a faixa de rotações disponível, faixa de velocidades de avanço da mesa e possibilidade de inclinação do cabeçote desta máquina atenderam aos parâmetros estabelecidos na operação de soldagem, os quais foram baseados na literatura consultada.

Segundo Johnson⁽²⁾ os esforços de soldagem envolvidos no processo FSW podem ser, consideravelmente, maiores do que os desenvolvidos em usinagem, sendo que é atribuída a força vertical o maior valor. Esta força é função dos seguintes fatores: parâmetros de soldagem; diâmetro do ombro da ferramenta, profundidade de penetração e tipo de material a ser soldado. Na soldagem de ligas de alumínio com ferramentas de 20 a 25 mm, profundidade de penetração de até 0,2 mm a magnitude desta força é da ordem de 10 a 30 kN. Ainda segundo Johnson⁽²⁾, a força horizontal mais significativa na direção de soldagem representa de 10 a 35% da força vertical. A potência estimada para realização da soldagem foi de 3,3 Cv, sendo que sua determinação foi baseada o torque e a velocidade de rotação utilizada na soldagem de ligas da mesma série sob condições similares, segundo Johnson⁽²⁾. O torque é fortemente dependente do diâmetro da ferramenta e da velocidade de rotação, fatores que foram considerados na realização deste experimento. Como já foi dito os valores dos principais parâmetros de soldagem para realização do experimento representam a média daqueles utilizados em experimentos já publicados e foram comparados com aqueles disponíveis nas máquinas de usinagem. Assim, em face dos resultados das juntas obtidas, consideramos que os critérios adotados para seleção da máquina fresadora foram bem sucedidos. Entretanto, destacamos a necessidade de uma análise mais aprofundada sobre cada um dos parâmetros aqui mencionados, através da sua monitoração efetiva durante a realização do processo bem como, do aumento do número de experimentos realizados.

4.2 – Desempenho da Ferramenta

O projeto da ferramenta incorporou algumas orientações e recomendações, entre as quais, algumas são mencionadas na literatura. A geometria utilizada se mostrou eficiente. Foi considerada também a necessidade de um projeto de fabricação simples e da prevenção contra o fluxo de calor na direção do cabeçote da máquina, de modo a evitar danos a seus componentes. Foi observado que as precauções tomadas no sentido de evitar o sobre-aquecimento da máquina e à possibilidade de degradação do lubrificante no interior do cabeçote, por meio da utilização de um anel espaçador de aço inoxidável, se mostraram pertinentes, pois, alguns minutos após a soldagem verificou-se uma diminuição da viscosidade do óleo que cobria o fuso do cabeçote da máquina, um pouco acima da pinça de fixação. Este tipo de precaução também é preconizado por Threadgill; Nunn⁽⁵⁾, principalmente, no caso de soldagens longas.

Quanto ao material utilizado para confecção da ferramenta, um aço ferramenta para trabalho a quente segundo Threadgill⁽⁶⁾, apresenta desempenho satisfatório, o que foi confirmado neste trabalho onde foi utilizado o aço AISI H13. Cabe ressaltar, que para uma avaliação definitiva sobre a ferramenta utilizada no desenvolvimento deste trabalho há a necessidade da realização de um número maior de experimentos e da avaliação do seu comportamento sob outros parâmetros de soldagem.

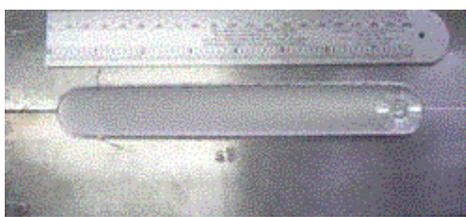
4.3 – Desempenho dos dispositivos auxiliares

A forma geral das peças da base de fixação e suas dimensões básicas foram concebidas em função das peças a serem soldadas e para facilitar a utilização dos fixadores padronizados, além de evitar interferências com a ferramenta durante a realização do processo de soldagem.

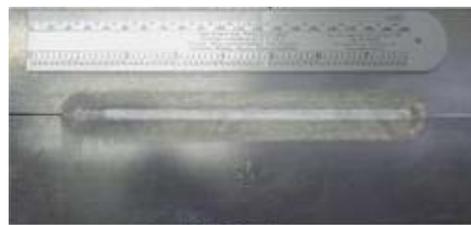
Embora durante todo o percurso de soldagem o conjunto tenha se mostrado estável e capaz de conter movimentação das peças base, algum afastamento foi notado no início da soldagem, possivelmente devido às altas forças de contato, decorrentes da penetração da ferramenta nas chapas de alumínio. O problema pode ser resolvido por meio de uma fixação mais efetiva nesta região ou por meio da utilização de furos piloto de maior diâmetro.

4.4 - Aspectos das Soldas

As juntas soldadas foram inspecionadas visualmente e por meio do Ensaio por Líquidos Penetrantes. Não foram detectados defeitos aparentes na raiz e na face da solda. O aspecto das soldas obtidas foi semelhante àquelas observadas na literatura como pode ser visto na (Figura 6).



Face da Solda



Raiz da Solda

Figura 6. Aspecto visual da solda: processo FSW (Face e Raiz)

4.5 – Perfil de Dureza

O perfil de dureza ao longo da seção transversal obtido e apresentado na (Figura 7) é semelhante aos dados experimentais já obtidos para ligas da mesma família por Threadgill⁽⁴⁾. As variações observadas são decorrentes do ciclo térmico desenvolvido durante a soldagem. Por outro lado, os valores mínimos observados na junta soldada são superiores àqueles do material recozido da ordem de 47 HV. O aumento da dureza do núcleo da solda é atribuído à intensa deformação plástica imposta pela ferramenta de soldagem nesta região, que gera algum endurecimento por trabalho mecânico.

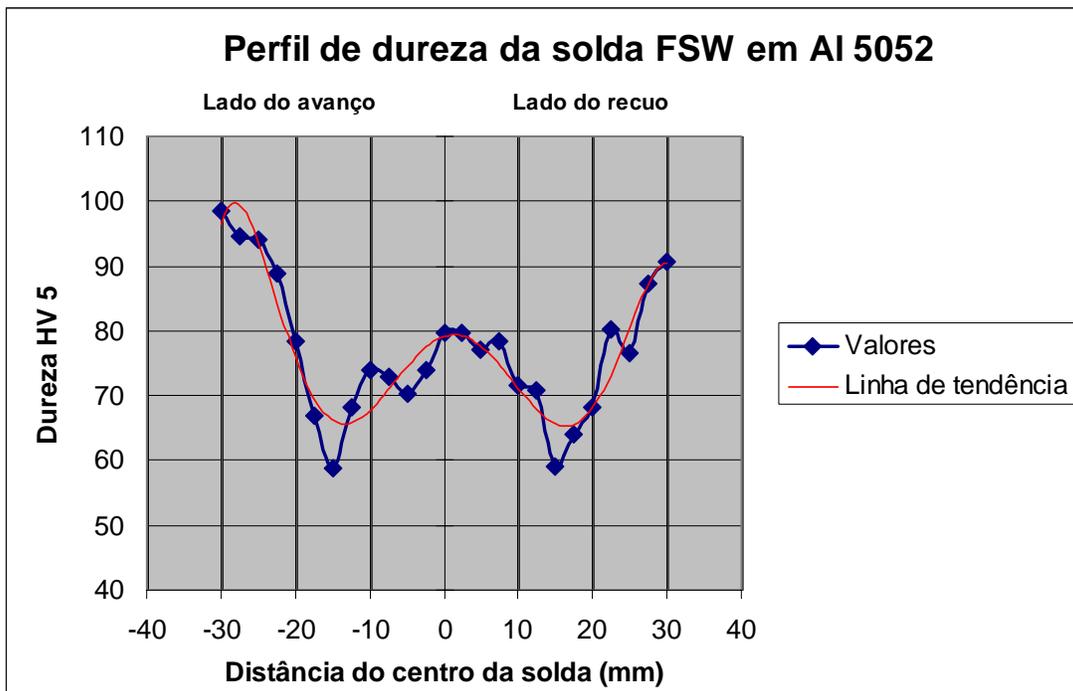


Figura 7. Perfil de Dureza da Seção Transversal da Junta Soldada

4.6 – Macrografia das Juntas Soldadas

A análise metalográfica da seção transversal da junta soldada apresentou a microestrutura típica daquelas obtidas pelo processo FSW segundo Threadgill⁽⁴⁾, que pode ser vista na (Figura 8). Nas extremidades pode-se identificar o metal não afetado com sua estrutura de grãos alongados resultante do encruamento durante a laminação. A seguir observa-se a ZTA com a faixa mais escura, que mantém semelhança morfológica com o material não afetado. Sob a posição de incidência do ombro da ferramenta pode-se observar a ZMTA, região que se inicia com a presença de grãos rotacionados de até 90°, circundando o núcleo da solda que apresenta grãos recristalizados.



Figura 8. Macrografia da Seção Transversal da Junta Soldada (Centro do Corpo de Prova).

5 – CONCLUSÕES

Com base nos resultados pôde-se concluir:

É possível a adaptação de uma máquina fresadora vertical para realização da soldagem FSW em uma liga de alumínio da série 5052 numa configuração de junta de topo;

As variáveis de soldagem apresentadas na literatura podem ser utilizadas como um ponto de partida para o desenvolvimento de novos procedimentos de soldagem;

Os critérios mínimos utilizados para a seleção da máquina fresadora para execução de soldas das ligas de alumínio da série 5052 se mostraram satisfatórios;

A ferramenta e dispositivos de suporte fabricados para realização deste trabalho para execução de soldas das ligas de alumínio da série 5052 apresentaram desempenho satisfatório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.HILLER, D. DE JESUS. **Desenvolvimento do Processo de Soldagem FSW para a Liga de Alumínio da Série 5052**. 2004. 87f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense. Niterói. 2004.
- 2.JOHSON, R. Forces in Stir Welding of Aluminum Alloys – Further studies. England. **TWI. Rep. n 716**, 2000.
- 3.THOMAS, W. M.; MINUS, I.; SMITH, PT. Friction Stir Welding of an Aluminum Alloy – Effects of Tool Geometry. England. **TWI. Rep. n 668**, 1999.
- 4.THREADGILL, P. L. Friction Stir Welding – The State of Art. England. **TWI. Rep. n 678**, 1999.
- 5.THREADGILL, P. L; NUNN, M E. A Review of Friction Stir Welding: Part 1, Process Review. England. **TWI. Rep. n 760**, 2003.
- 6.THREADGILL, P. L. A Review of Friction Stir Welding: Part 2, Process Review. England. **TWI. Rep. n 761**, 2003.

ADAPTATION OF A VERTICAL MILLING MACHINE FOR FSW – FRICTION STIR WELDING OF ALUMINUM ALLOYS

***Abstract.** Since 1991, when it was demonstrated for the first time, Friction Stir Welding – FSW has been an alternative for welding aluminum alloys and plastic plates. The pioneer development works were carried out using conventional milling machines with some adaptation devices. This article approaches the critical issues on setup of an experimental welding of butt joints of aluminum alloy 5052 plates , with 9,5 mm thickness; using a conventional milling machine, a welding tool and adaptation devices that were manufactured for the purpose. Key aspects on the design of the welding tool and the adaptation features, relevant questions on the equipment selection and the results of some tests performed on the produced FSW weld are also presented and discussed.*

Keywords:Aluminum,Friction,Welding.