



Estudo do Processo de Soldagem por Fricção e Mistura por Ponto em juntas de Alumínio da Liga AA2024-T3 em centro de usinagem CNC

Study of the Welding Process Friction Stir Spot Welding in alloy joints of the AA2024-T3 League in CNC machining center

Franco da Silveira¹

Daniel Schröpfer²

Flávio Kieckow³

Filipe Molinar Machado⁴

Janis Elisa Ruppenthal⁵

Leonardo Nabaes Romano⁶

Marcela Avelina Bataghin Costa⁷

Resumo: A necessidade de redução de custos operacionais e a busca por inovações nos diferentes nichos de mercado aumentou, com ênfase para o desenvolvimento de novos processos de fabricação. Uma das novas tecnologias é o processo denominado *Friction Stir Spot Welding* (FSSW), o qual contempla características como agilidade e economia nos sistemas produtivos. Nesse contexto, o objetivo do artigo consiste em desenvolver o processo FSSW em juntas de alumínio da liga AA2024-T3, utilizando diferentes parâmetros de soldagem, a fim de comparar os resultados com o processo de rebitagem. Como complemento, analisam-se os efeitos da rotação da ferramenta e do tempo de patamar sobre as propriedades mecânicas da liga considerada. Como resultados, constatou-se que a resistência da solda FSSW em relação ao processo de rebitagem apresentou propriedades mecânicas superiores para os corpos de prova quando utilizado o ensaio

¹ UFSCar – Universidade Federal de Santa Maria

² URI – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

³ URI – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

⁴ UFSCar – Universidade Federal de Santa Maria

⁵ UFSCar – Universidade Federal de Santa Maria

⁶ UFSCar – Universidade Federal de Santa Maria

⁷ UFSCar – Universidade Federal de São Carlos

de cisalhamento e que os parâmetros de soldagem que proporcionaram maior eficiência nos testes de tração e de cisalhamento foram o tempo de patamar de 6 segundos e de rotação de 3000 rpm.

Palavras-chave: Soldagem FSSW; Rebitagem; Liga de Alumínio AA2024-T; Centro de Usinagem CNC.

Abstract: The need to reduce operating costs and the search for innovations in the different market niches has increased, with emphasis on the development of new manufacturing processes. One of the new technologies is the process called Friction Point Welding (FSSW), which includes features such as agility and economy in the production systems. In this context, the purpose of the article is to develop the process. FSSW in AA2024-T3 alloy aluminum joints, instead of different sales parameters, an aim of comparing the results with the riveting process. As a complement, we analyze the effects of tool rotation and threshold time on how mechanical properties of the alloy. As results, it was found that the resistance of the FSSW solder in relation to the refueling process presented the mechanical good for the test specimens when used in the shear test and that the parameter of sale that provide the highest efficiency in the tensile tests and Shear strengths were the time of landing of 6 seconds and of rotation of 3000 rpm.

Keywords: Welding FSSW; Riveting; AA2024-T Aluminum Alloy; CNC Machining Center.

1. Introdução

A crescente concorrência entre as empresas industriais do setor automotivo e aeronáutico gerou a busca por novas estratégias organizacionais relacionadas ao aprimoramento de processos de fabricação (ROMANO, 2013; SIMÕES et al., 2013; SILVEIRA, MACHADO, RUPPENTHAL, 2017). Além disso, com a determinação de novas normas governamentais de proteção ao meio ambiente, as empresas estão adotando materiais de ligas de alumínio e de magnésio em seus processos produtivos (XU et al., 2015; WU et al., 2016). Desse modo, no campo de aplicações técnicas, muitos componentes mecânicos são produzidos por diferentes processos, tais como estampagem, fundição, extrusão, forjamento e, em algum momento necessitam de outro processo, como o processo de montagem mecânica, que inclui a união de materiais (ROSENDO, 2009; BRZOSTEK, 2012).

As soldas ponto por resistência elétrica ou a *laser* são processos frequentemente utilizados na indústria automotiva para unir materiais. Porém, o processo da solda em ligas leves de alumínio e de magnésio é mais complexo e a soldabilidade dos materiais é baixa. Nos processos que envolvem fusão, a junção dissimilar das ligas pode dar origem às diferenças significativas nas propriedades físicas e proporcionar juntas de baixa qualidade e desempenho mecânico (FONSECA et al., 2017; PARADISO et al., 2017). Na indústria aeronáutica, a solda ponto por *laser*, rebiteagem convencional e rebiteagem por auto aprisionamento (em inglês, *Self Clinching Riveting*) são os processos comumente utilizados (ROSENDO, 2009). O processo de rebiteagem, embora proporcione um satisfatório desempenho mecânico, exhibe problemas, como o aumento de massa da estrutura, a necessidade de furação das chapas, a identificação de logística na realização de tratamento térmico dos rebites e o aumento da velocidade de propagação de trincas por fadiga através dos furos dos rebites (XAVIER, 2006; ARBEX, 2011).

Assim, processos que solucionam ou reduzem aspectos negativos são necessários para expandir a participação das empresas no mercado e para modernizar produtos e serviços, a fim de reduzir a disparidade em ambientes competitivos (HOSSEINIJOU et al., 2014). Desse modo, dois processos de união em estado sólido estão em desenvolvimento, como: *Friction Spot Welding* (FSpW) e o *Friction Stir Spot Welding* (FSSW). Ambos funcionam com base em solda por fricção e são caracterizados como processos inovadores de soldagem, perfazendo resultados

satisfatórios para aplicações em diferentes nichos de mercado (BRZOSTEK, 2012; GARG e BHATTACHARYA, 2017; PICCINI e SVOBODA, 2017).

Nesse contexto, o artigo objetiva comparar os resultados entre o processo de soldagem FSSW e o processo de rebitagem em juntas sobrepostas de chapas de alumínio da liga AA2024-T3, utilizando diferentes parâmetros de solda. A pesquisa assume relevância para fabricantes automotivos e do segmento de aviação, os quais necessitam reduzir massa das estruturas de seus produtos. Além disso, o estudo contribui para uma lacuna de informações de parâmetros como o efeito da rotação da ferramenta e o tempo de patamar, que são selecionados com a finalidade de alcançar melhores propriedades mecânicas nos processos produtivos de união de materiais. As proposições e reflexões levantadas no estudo também contribuem como subsídios para futuras pesquisas acadêmicas sobre o tema, que poderão dar continuidade a esse estudo inicial.

2. Metodologia

Esta seção tem por objetivo apresentar aspectos pertinentes aos procedimentos metodológicos adotados para a realização deste trabalho. Constam os métodos experimentais utilizados para realizar a soldagem FSSW em chapas finas de alumínio no centro de usinagem CNC. Estão descritos como foram concretizados os ensaios destrutivos dos corpos de prova, para avaliar as propriedades mecânicas da junta. O estudo consistiu em três etapas: (1) definir o material a ser testado; (2) definir as características do processo de soldagem FSSW e seus parâmetros técnicos; e (3) definir os equipamentos e a caracterização da solda FSSW.

2.1 Material

O material utilizado para o processo de soldagem FSSW é a liga de alumínio AA2024-T3 de 1,6 milímetro (mm) de espessura, que possui cobre (Cu) e magnésio (Mg) como principais elementos constituintes. A liga AA2024-T3 apresenta uma alta razão entre resistência e peso, boa resistência à corrosão e é amplamente utilizada na indústria aeronáutica e automotiva (ASHBY e JOHNSON, 2010). A composição química desta liga está representada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química da liga AA2024-T3.

Elemento	Cu	Mg	Si	Mn	Fe	Zn	Cr	Ti
(% em peso)	3,8 - 4,9	1,2 - 1,8	0 - 0,5	0,3 - 0,9	0 - 0,5	0 - 0,25	0 - 0,1	0 - 0,15

Fonte: (SAE, 1998).

As chapas se encontram na condição T3 de tratamento térmico, onde o material foi solubilizado, trabalhado a frio e envelhecido naturalmente a uma condição estável, com objetivo de aumentar as propriedades mecânicas da liga. A principal função das ligas de alumínio é aumentar a resistência mecânica sem prejudicar as outras propriedades do material.

2.2 Processo de Soldagem FSSW

O processo FSSW foi desenvolvido como um processo de soldagem no estado sólido, onde foi inicialmente aplicado às ligas de alumínio e apresenta a particularidade de não haver movimento transversal da ferramenta. A soldagem FSSW consiste em uma ferramenta rotativa, não consumível, que entra em contato com as chapas sobrepostas, onde ocorre à penetração, mistura e por fim o recuo da ferramenta, gerando assim a solidificação da junta, como representa a Figura 1. O processo perfaz um furo central na solda, devido ao pino da ponta da ferramenta (MALAFAIA, 2009).

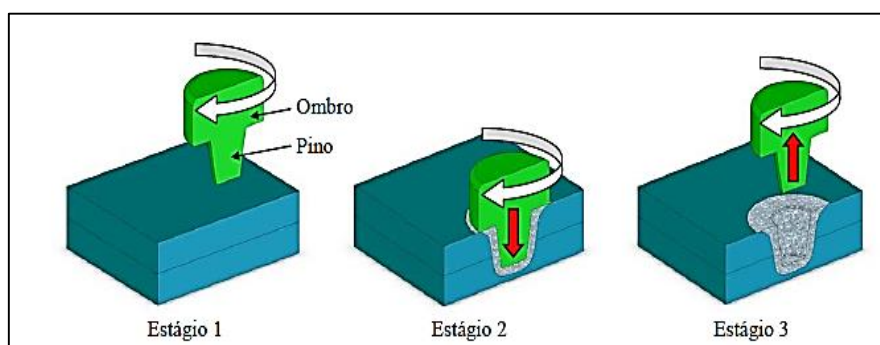


Figura 1: Fases do processo de soldagem por FSSW. Fonte: (ROSENDO, 2009).

O processo tem início com a introdução da ferramenta lentamente na superfície da primeira chapa, com uma velocidade rotativa pré-determinada, que proporciona uma aplicação de força axial, sem movimento de translação, e avança até que o pino da ferramenta esteja quase totalmente introduzido na segunda chapa. Destaca-se que nesse

momento o ombro da ferramenta também toca a superfície da primeira chapa (MALAFAIA, 2009).

Posteriormente, é realizado a mistura dos materiais a partir compressão da ferramenta nas chapas. Essa técnica é realizada na posição vertical, proporcionando um calor de fricção durante um tempo de mistura (tempo de patamar) pré-determinado e, assim, o aquecimento entre pino e ombro com a região de contato das chapas plastifica e amacia o material, proporcionando a mistura entre as chapas e a consequente união. Por fim, acontece o recuo da ferramenta, de maneira rápida após a mesma ter alcançado a profundidade final requerida, porém, após o recuo, observa-se um furo remanescente do pino no ponto central da solda (ROSENDO, 2009). A Figura 2 apresenta os fatores resultantes do processo de soldagem FSSW com suas impressões.



Figura 2: Fatores representativos do processo de soldagem FSSW. Fonte: Autores (2017).

Durante a mistura, o aquecimento devido à fricção amolece o material e a rotação da ferramenta provoca o fluxo deste material para as direções radial e axial. O material expelido durante a penetração do pino fica preso entre a superfície da primeira chapa com o ombro da ferramenta, neste momento o ombro propicia calor de fricção, pois este está comprimindo a junta (carregamento compressivo), facilitando assim, a formação da solda ao redor do pino, em estado sólido (abaixo do ponto de fusão) entre as duas chapas (RAMOS, 2008).

O tempo de processo é outro fator importante, geralmente ocorre em torno de 2 a 5 segundos, dependendo da espessura das chapas a serem unidas. O processo de penetração da ferramenta é primordial para a geração do calor de fricção necessário para a soldagem. Para ligas de alumínio, a temperatura possui um valor em torno de 250 °C a 530°C, podendo ter pequenas mudanças, dependendo da liga utilizada. No processo FSSW a solda é realizada em juntas sobrepostas (face-a-face) que geralmente possuem

entre 1 e 2 mm de espessura e a ferramenta possui giro no sentido horário, a fim de empurrar o material para a parte inferior das chapas (MALAFAIA, 2009; ROSENDO, 2009).

O pino da ferramenta da solda ponto por fricção possui um diâmetro em torno de 50-75% da espessura total da junta e penetra entre 90-95% do valor da espessura das chapas. Para realizar uma solda ponto por fricção de qualidade é necessário seguir alguns fatores, como escolha correta dos parâmetros, principalmente rotação e tempo de patamar para formar melhor a mistura, utilizar chapas uniformes, definir um sistema rígido de fixação das juntas a serem unidas. Além disso, é importante limpar a ferramenta e as chapas, para evitar o ingresso de materiais indesejados que podem afetar a qualidade da solda (MALAFAIA, 2009).

Com relação às contribuições que o pino e o ombro da ferramenta têm para o processo, ambos têm funções bem diferentes, pois o pino é mais atuante, ele tem mais contato com as chapas porque entra primeiro. Já o ombro da ferramenta começa a atuar depois que o pino ultrapassou a chapa superior, e se encaminha para chapa inferior. Para realização de experimentos de solda FSSW, máquinas como fresadoras, tornos CNC ou Centro de Usinagem são adaptados para realizar este processo. Nas indústrias que utilizam produção seriada, máquinas específicas são desenvolvidas e automatizadas para executar com agilidade e perfeição, com a finalidade de produzir uma solda FSSW de maior qualidade.

2.3 Parâmetros de Soldagem

Os parâmetros de soldagem utilizados na pesquisa foram definidos de acordo com a literatura estudada, principalmente por testes realizados por Malafaia (2009) e Rosendo (2009). Definiram-se valores de penetração do pino, velocidade de avanço, penetração do ombro, tempo de patamar e rotação da ferramenta. Como o objetivo é verificar a resistência da solda FSSW em diferentes rotações, variou-se este parâmetro conforme a Tabela 2, juntamente com o tempo de patamar, pois são fatores que influenciam diretamente na qualidade da solda.

Tabela 2: Parâmetros de soldagem.

Parâmetros	Valor	Unidade (SI)
Velocidade de Rotação	2000 - 3000 - 4000	Rpm
Velocidade de Avanço	2	mm/s
Penetração do Pino	2,7	Mm
Penetração do Ombro	0,3	Mm
Tempo de Patamar	3 - 4 - 5 - 6	S

Fonte: Autores (2017).

As pesquisas acadêmicas que contemplam propriedades mecânicas decorrentes da microestrutura das juntas soldadas por FSSW são necessárias pois permitem verificar o comportamento de diferentes parâmetros e variáveis que estão envolvidos no processo e assim, identificar qual seria o melhor. As características e propriedades finais de uma solda FSSW estão diretamente relacionadas com as zonas das soldas, que são influenciadas por fatores como: o material que está sendo soldado, a geometria e a rotação da ferramenta, a profundidade de penetração e o tempo de patamar.

2.4 Ferramenta de Soldagem

A geometria da ferramenta é fundamental no desempenho de propriedades mecânicas da solda FSSW, sendo composta por pino e ombro. A ferramenta tem a função de gerar o calor de fricção e misturar o material ao redor do pino, por meio do aquecimento localizado, resultante da penetração da ferramenta nas chapas a serem soldadas (RAMOS, 2008; ROSENDO, 2009). A Tabela 3 representa as dimensões da ferramenta utilizada no processo.

Tabela 3: Geometria da ferramenta de soldagem FSSW.

Diâmetro do Pino [mm]	Comprimento do Pino [mm]	Geometria do Pino	Diâmetro do Ombro [mm]	Geometria do Ombro	Haste [mm]
4	2,7	Liso	11	Liso	Ø20x95

Fonte: Autores (2017).

O material da ferramenta selecionado foi o aço AISI H13 indicado para trabalho a quente, pois apresenta excelente tenacidade, boa resistência mecânica ao desgaste em altas temperaturas. O formato do pino escolhido foi do tipo cilíndrico liso, que de

acordo com a bibliografia, apresenta um desempenho satisfatório durante a soldagem FSSW (CHIOU, LIU, LEE, 2013).

2.5 Equipamentos e caracterização da Solda FSSW

A soldagem dos corpos de prova foi feita utilizando um Centro de Usinagem vertical CNC, modelo XV 560, fabricado pela YCM, com potência de 15 HP e rotação máxima de 10.000 rpm. O curso de seus eixos é de 560 mm na direção X, 450 mm na direção Z e 410 mm na direção Y. Após analisar a capacidade da máquina de suportar os parâmetros selecionados para realizar o processo de soldagem, constatou-se que era necessário desenvolver um sistema rígido de fixação para ajudar no processo de união das chapas. Desse modo, para dar continuidade a pesquisa foi necessário adequar a mesa da máquina de usinagem do CNC. A Figura 3 demonstra o Centro de Usinagem utilizado para realizar o processo de soldagem.



Figura 3: Centro de usinagem CNC utilizado para realizar a solda FSSW.

Fonte: Autores (2017).

Os ensaios de tração e cisalhamento foram realizados através de uma máquina de tração e compressão universal, modelo EMIC DL30000 com capacidade de 300 kN, representada pela Figura 4 a). Para verificação da macrografia, utilizou-se um estereoscópio modelo Pantec, conforme Figura 4 b), que aproxima cerca de 10 a 15 vezes, para dar ênfase na análise da mistura, ou seja, nas regiões da solda, para verificar

se houve uma correta homogeneização dos materiais. A medição do perfil de microdureza foi realizada por meio de um microdurômetro, modelo Buhler Micromet 2003 que consta na Figura 4 c).

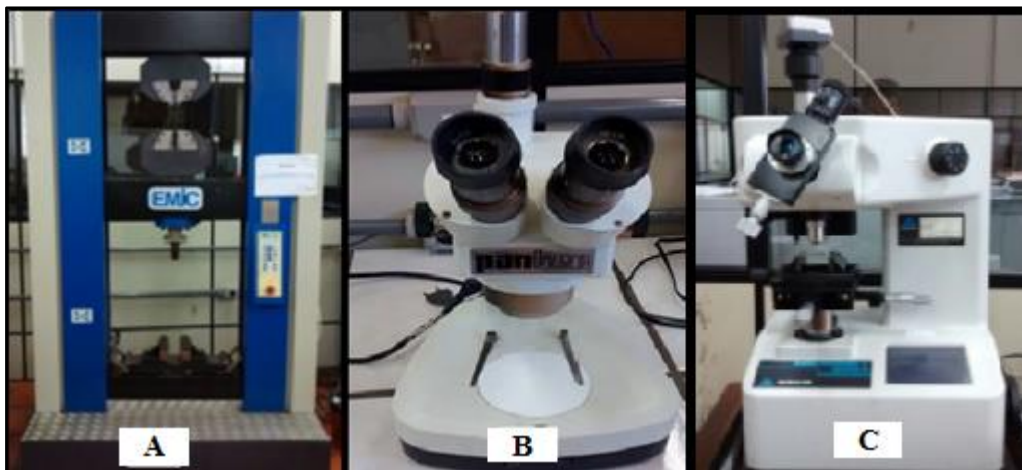


Figura 4: A) Máquina de ensaio de Tração e Compressão Universal. B) Modelo do Estereoscópio. C) Microdurômetro. Fonte: Autores (2017).

Após realizar a soldagem FSSW (a temperatura ambiente) e a rebagem nos corpos de prova selecionados, os mesmos foram ensaiados mecanicamente. Foram utilizados 64 corpos de prova nos ensaios (50 soldados e 14 rebitados), por ensaio de tração e cisalhamento. Destes, escolheu-se um corpo de prova de cada parâmetro para realizar a verificação da dureza e da caracterização da macroestrutura.

Para os ensaios de corpos de prova soldados e rebitados, seguiu-se a norma regulamentadora DIN EN ISO 14272 (DIN EN ISO 14272, 2002), que determina os passos e características de como obter a confecção dos corpos de prova (geometria), direção de esforços que serão utilizados no teste, bem como posicionamento e ordem de execução. Para os ensaios realizados nos corpos de prova soldados e rebitados, foi necessário adotar a norma DIN EN ISO 14273 (DIN EN ISO 14273, 2002) com o uso da máquina para ensaio de tração, idem Figura 4 A). Porém, devido às chapas estarem sobrepostas, necessitou-se usar espaçadores entre a chapa e as garras da máquina para alinhá-los (linha neutra), a fim de evitar que esforços de flexão atuem no ensaio.

Para realizar a análise metalográfica dos corpos de prova foi utilizado o estereoscópio. Inicialmente foram seccionados ao centro do botão de solda as amostras para efetuar os procedimentos de embutimento (a quente), lixamento manual com lixas d'água de granulometrias variadas gradualmente e polimento mecânico com uso da politriz. Após a limpeza da região com álcool, realizou-se o ataque químico, de acordo

com o material, com o emprego do reagente lixívia de solda (10 g de hidróxido de sódio + 90 mL de água destilada), com tempo de 10 segundos, seguido de enxágue com água corrente e secagem com ar quente (ROHDE, 2010). A microdureza foi realizada na superfície do botão de solda, em diversos pontos ao redor da solda com a finalidade de verificar o comportamento da dureza. Utilizou-se o microdurômetro, Figura 4 C), na escala Vickers e com penetrador em forma de pirâmide. A carga utilizada foi de 100 gf, com espaçamentos entre as medições de 1 mm (GARCIA, ALVES, SANTOS, 2012).

3. Resultados e Discussões

3.1 Juntas Rebitadas

Após a rebitagem dos corpos de prova para ensaios de tração e de cisalhamento, realizou-se os ensaios mecânicos destrutivos dos mesmos, com o intuito principal de verificar a resistência mecânica, representada pela carga máxima e tensão máxima suportada nestes ensaios. A Figura 5 corresponde aos corpos de prova rebitados antes dos ensaios.

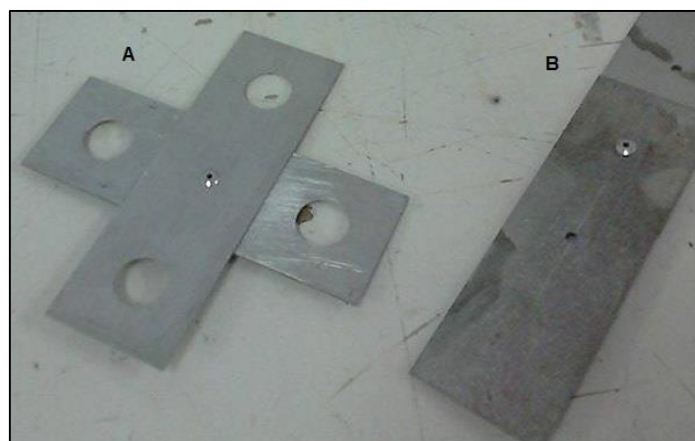


Figura 5: a) Corpo de prova para ensaio de tração; b) Corpo de prova para ensaio de cisalhamento. Fonte: Autores (2017).

Foram rebitados de 5 corpos de prova para cada tipo de ensaio, obtendo valores de força máxima (kN) e tensão máxima (MPa) com satisfatória repetibilidade. Os resultados de tensão máxima do ensaio de tração e cisalhamento das juntas rebitadas estão representados nos gráficos da Figuras 6. Destaca-se que o valor de força máxima médio foi de $1,52 \pm 0,12$ kN para o ensaio de tração e de $1,14 \pm 0,06$ kN para o ensaio

de cisalhamento (considerando os erros de medições e o desvio padrão com ajuda do software Excel).

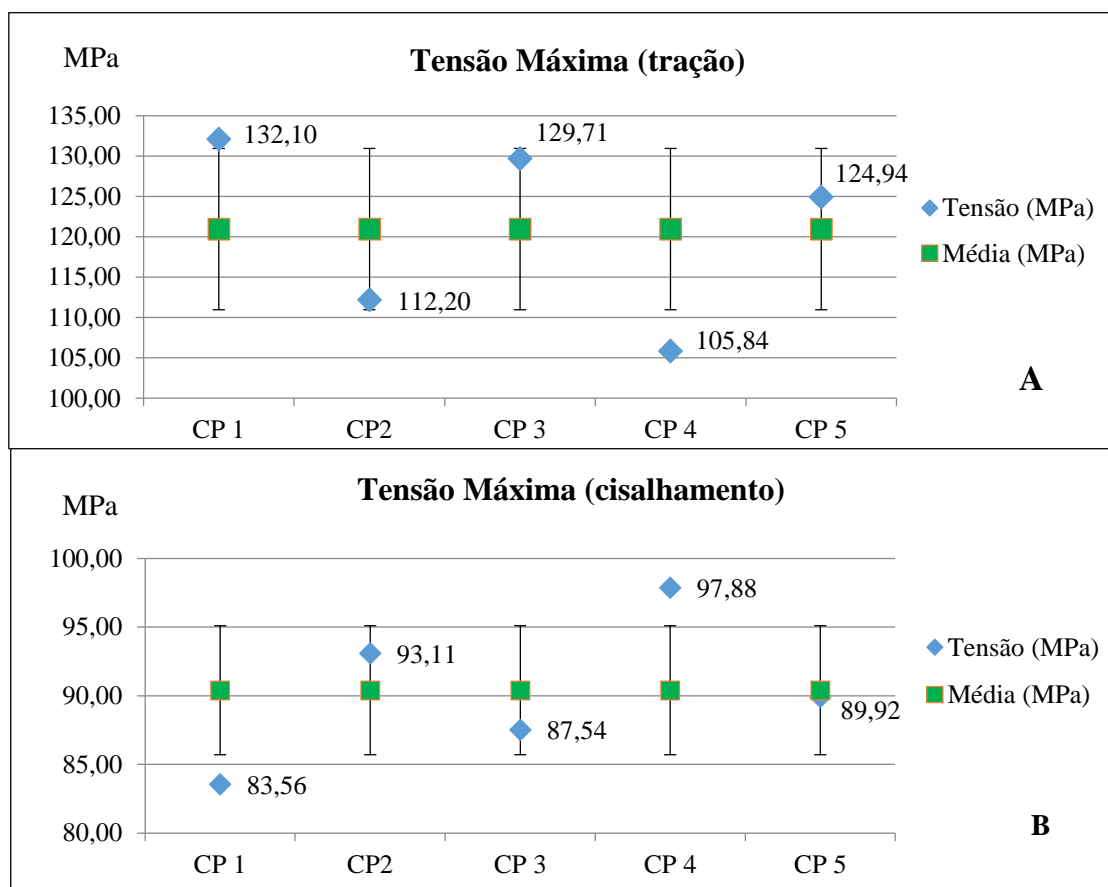


Figura 6: a) Gráfico do ensaio de tração das chapas rebitadas; b) Gráfico do ensaio de cisalhamento das chapas rebitadas. Fonte: Autores (2017).

Tendo a área transversal do rebite (4 mm) e a carga máxima, calculou-se também a tensão máxima dos corpos de prova rebitados. A fratura observada dos rebites no ensaio de tração se deve principalmente ao destacamento do mesmo, ou seja, ele é arrancado devido à força axial do teste. O modo de fratura dos ensaios de cisalhamento ocorreu por cisalhamento do rebite, devido ao efeito guilhotina provocado pelos furos das chapas de alumínio. Os exemplos da ruptura de tração e cisalhamento (rebites), respectivamente, estão apresentados na Figura 7.

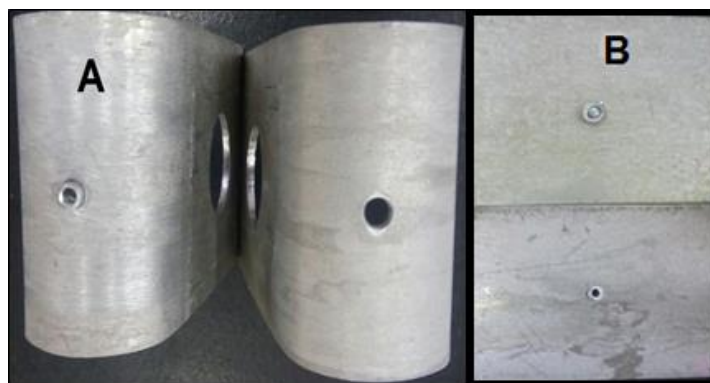


Figura 7: A) Ruptura do ensaio de tração; B) ruptura do ensaio de cisalhamento.

Fonte: Autores (2017).

3.2 Soldagem FSSW para Ensaio de Cisalhamento

O processo de soldagem teve início a partir da soldagem dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento, com os parâmetros de soldagem indicados na Tabela 1. Posteriormente, realizou-se o ensaio de cisalhamento, onde obteve-se os resultados para cada parâmetro selecionado. A Figura 8 representa a tensão máxima para a rotação de 2000 rpm em função do tempo de patamar.

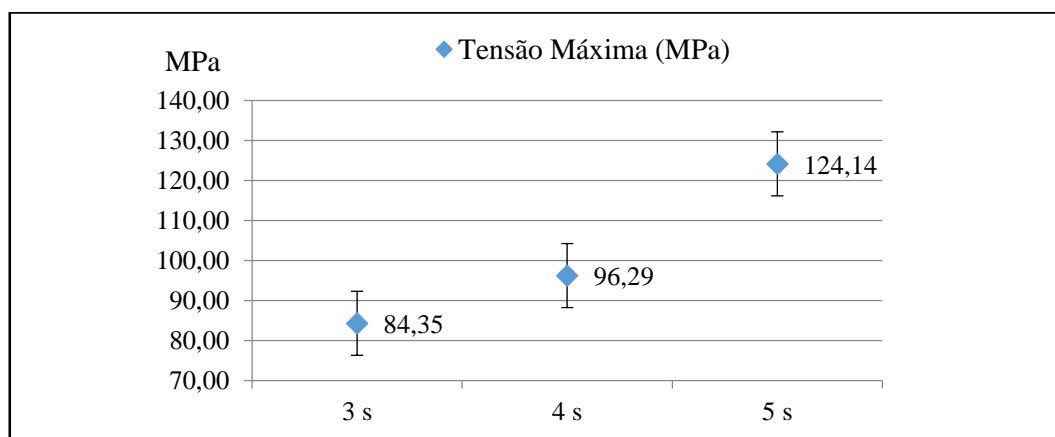


Figura 8: Gráfico da velocidade de rotação (2000 rpm) x tempo de patamar.

Fonte: Autores (2017).

Observa-se um grande aumento da resistência com a elevação do tempo de patamar, ocasionando uma solda de melhor qualidade, com maior mistura na região de união. A tensão máxima deste parâmetro foi o tempo de patamar de 5 segundos, com um aumento da resistência mecânica de 33% em comparação com o tempo de 3 segundos. A Figura 9 mostra os resultados para rotação de 3000 rpm.

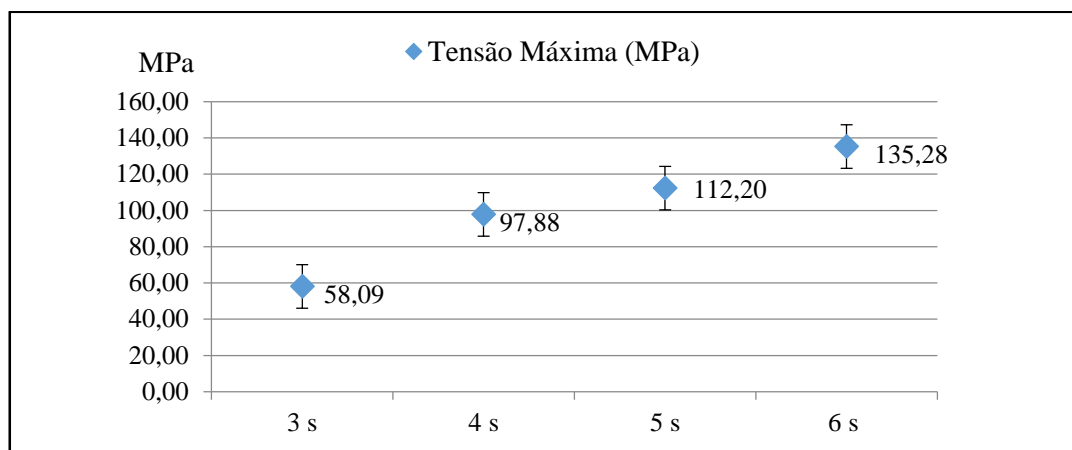


Figura 9: Gráfico da velocidade de rotação (3000 rpm) x tempo de patamar.

Fonte: Autores (2017).

Para tempo de patamar de 3 segundos obteve-se uma queda na tensão máxima, porém com o aumento desse tempo, a curva se eleva, chegando a um valor considerável de 135,28 MPa no tempo de 6 segundos, superando de forma satisfatória os resultados das chapas rebitadas, que obtiveram um valor médio de 90,4 MPa. O aumento da resistência foi de 232% comparando o tempo de patamar de 3 e 6 segundos. Com rotação de 4000 rpm notou-se que a resistência não aumentou, pelo contrário, decaiu seu valor em torno de 11% com o aumento do tempo de patamar, como representa a Figura 10.

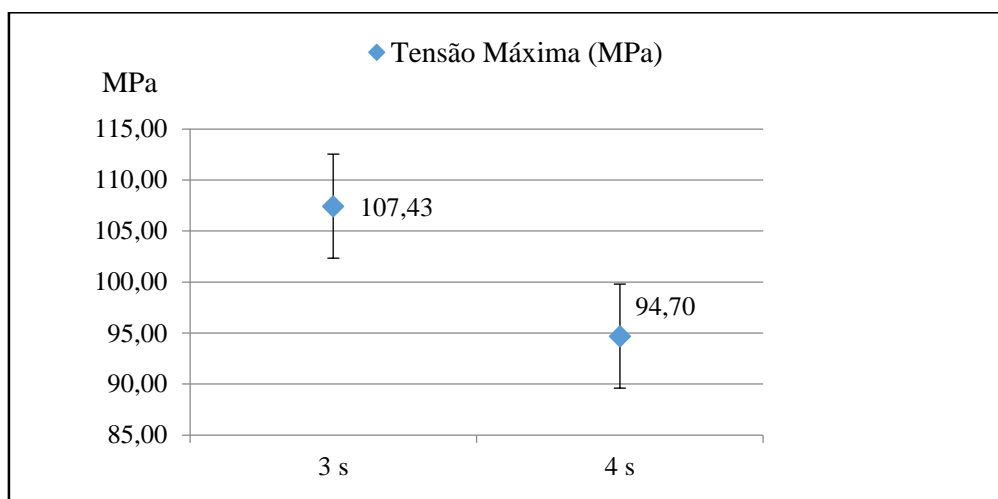


Figura 10: Gráfico da velocidade de rotação (4000 rpm) x tempo de patamar.

Fonte: Autores (2017).

Durante os ensaios percebeu-se que há um ponto de equilíbrio entre rotação e tempo de patamar. Não basta alterar um dos parâmetros para se conseguir melhores resultados, mas sim uma combinação de ambos. Conforme estudos de Malafaia (2009), isso se deve a temperatura gerada pelo atrito da ferramenta com as chapas, principal fator para se obter uma solda por fricção de qualidade, onde a ferramenta deve gerar a quantidade certa de energia necessária para unir as chapas, mas também não pode exceder, o que ocasiona uniões frágeis.

Desse modo, se comprova pelos ensaios realizados que muito tempo e rotação alta não são fatores satisfatório para a soldagem FSSW. Além disso, usou-se um parâmetro com rotação de 5000 rpm e tempo de patamar de 5 segundos, obtendo uma tensão máxima de 99,37 MPa, resultado este menor que o de rotação de 4000 rpm e tempo de 3 segundos, demonstrado na Figura 10. A Figura 11 representa os resultados de todos os parâmetros, juntamente com a tensão máxima suportada pelos rebites, para se obter uma comparação da rebitagem com o ensaio de cisalhamento dos corpos de prova soldados.

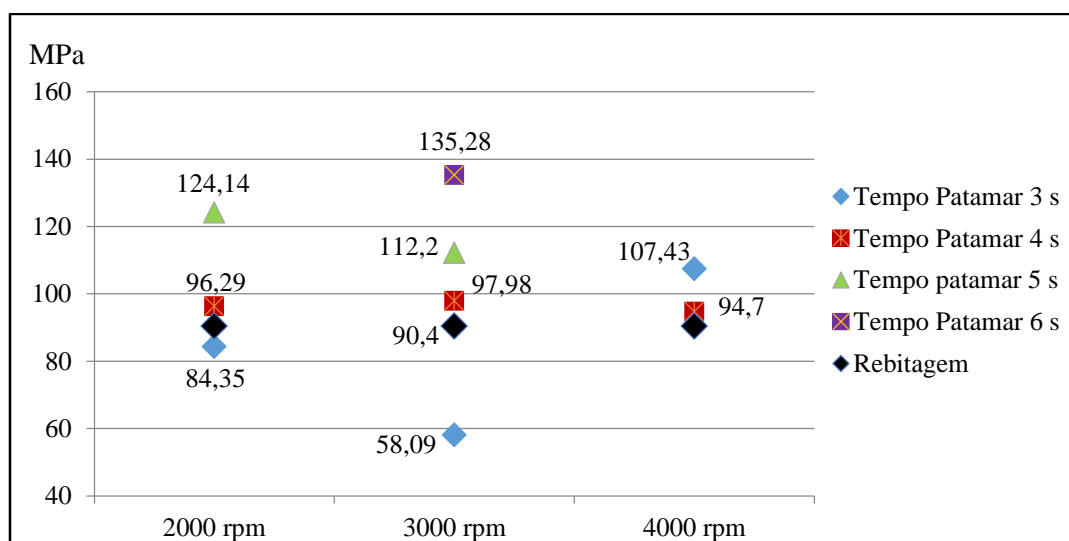


Figura 11: Gráfico comparativo entre parâmetros da soldagem FSSW para cisalhamento e do processo de rebitagem. Fonte: Autores (2017).

Com os dados representados na Figura 11, percebe-se que vários parâmetros soldados superaram a tensão máxima (MPa) dos corpos de prova rebitados, principalmente os com rotação de 3000 rpm, obtendo uma tensão máxima de 135,28 MPa com 6 segundos de patamar. Além disso, com a utilização de tempos de patamar muito baixos, como 3 segundos, são ocasionadas soldas com baixa resistência

mecânica. Assim, aumentar muito a rotação também não é a melhor alternativa, pois de acordo com o gráfico, para 4000 rpm de rotação a tensão máxima decai no tempo de patamar de 4 e 5 segundos por exemplo. Durante os testes, notou-se que com tempo de patamar inferior a 3 segundos, não era possível soldar, pois não unia as chapas, se rompiam no momento da retirada da base de soldagem.

3.3 Soldagem FSSW para Ensaio de Tração

Os parâmetros selecionados constam na Tabela 1. Para os corpos de prova soldados para o ensaio de tração houve uma atenção maior durante o processo, principalmente no dispositivo de fixação, que deve estar bem alinhado e fixado para evitar movimentos laterais durante a penetração da ferramenta de soldagem. Para a rotação de 2000 rpm em função do tempo de patamar, a tensão máxima está representada pelo gráfico da Figura 12. Para os parâmetros adotados a tensão máxima obtida foi no tempo de 4 segundos, com um valor de 34,22 MPa. Observa-se que ocorreu uma pequena queda de 18% no valor da resistência mecânica com o aumento do tempo de patamar de 4 para 5 segundos.

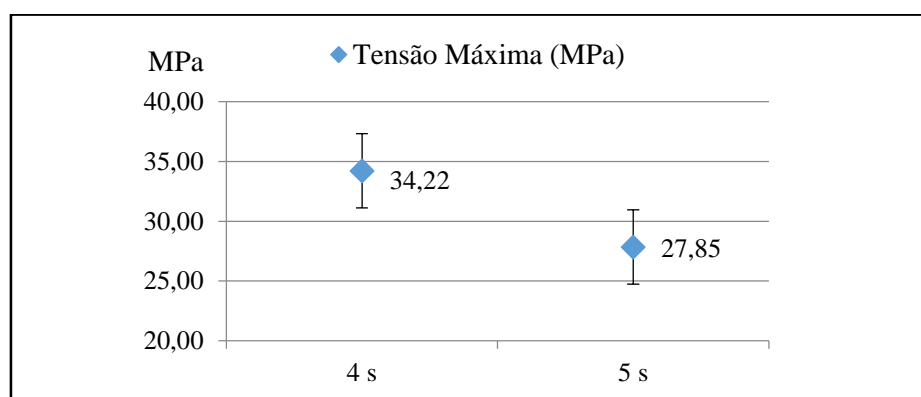


Figura 12: Gráfico da velocidade de rotação (2000 rpm) x tempo de patamar.

Fonte: Autores (2017).

Utilizando uma rotação de 3000 rpm, a tensão máxima em função do tempo de patamar está apresentada na Figura 13. Observa-se que a resistência teve um aumento significativo de 9%, devido à alta rotação e pelo maior tempo de patamar utilizado. A tensão máxima foi de 52,52 MPa para o tempo de 6 segundos.

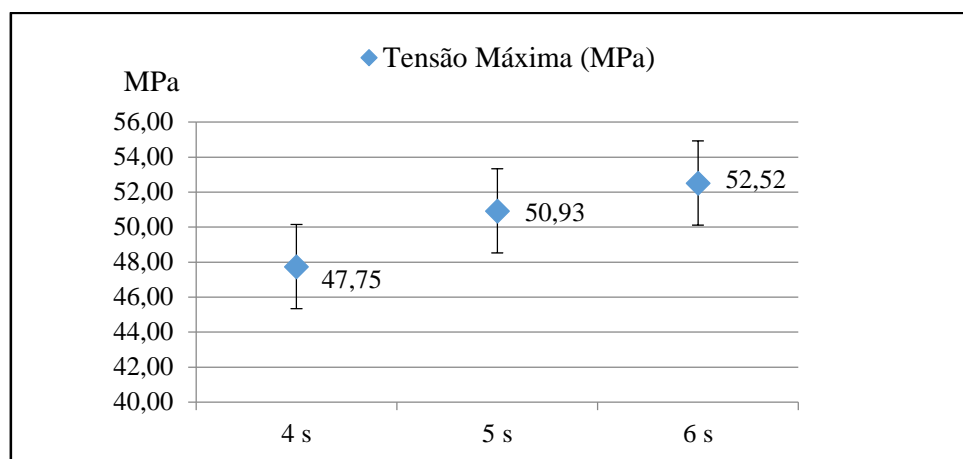


Figura 13: Gráfico da velocidade de rotação (3000 rpm) x tempo de patamar.

Fonte: Autores (2017).

Por seguinte, usando uma rotação de 4000 rpm e tempo de 4 segundos a carga máxima em função do tempo se mostrou menor, obtendo uma tensão máxima de 20,69 MPa. Para tempos de 3 e 5 segundos, os corpos de prova soldados, romperam durante a tentativa de dobramento das chapas, para realizar o ensaio de tração. A Figura 14 representa um resumo de todos os parâmetros de soldagem para ensaio de tração, juntamente com a tensão máxima dos rebites, para poder se ter uma melhor análise dos resultados.

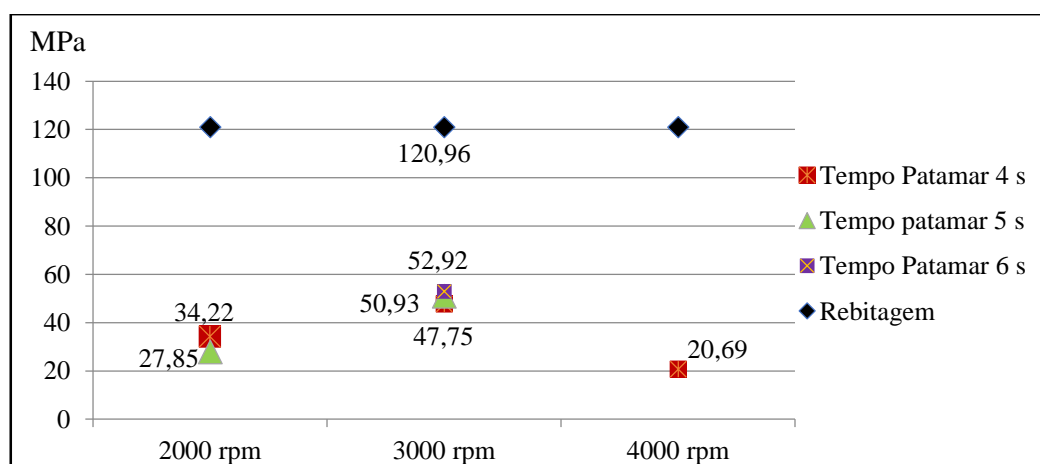


Figura 14: Gráfico comparativo entre parâmetros da soldagem FSSW para tração e do processo de rebiteagem. Fonte: Autores (2017).

Nota-se que a rebiteagem obteve resultados superiores à soldagem FSSW com esforço de tração. Com baixo tempo de patamar (4 segundos) o resultado foi ainda menor. Porém, houve um aumento na tensão utilizando 6 segundos de espera com a

ferramenta rotacionando nas chapas. Ademais, novamente a rotação de 3000 rpm foi a que obteve melhores resultados.

3.4 Caracterização Metalúrgica da Soldagem FSSW

Após a realização dos ensaios de dureza e metalografia dos corpos de prova soldados, podemos descrever as principais características do processo da soldagem FSSW, como o seu aspecto visual, conforme foi demonstrado anteriormente na Figura 2, a microestrutura e os principais defeitos da união das chapas. Desse modo, amostras de uniões foram analisadas no estereoscópio (utilizando escala de aproximação de 10 vezes), a fim de verificar a macrografia da junta, além da mistura e os defeitos de soldagem FSSW. A Figura 15 representa o corte transversal do botão de solda do parâmetro de 2000 rpm com tempo de patamar de 4 segundos.

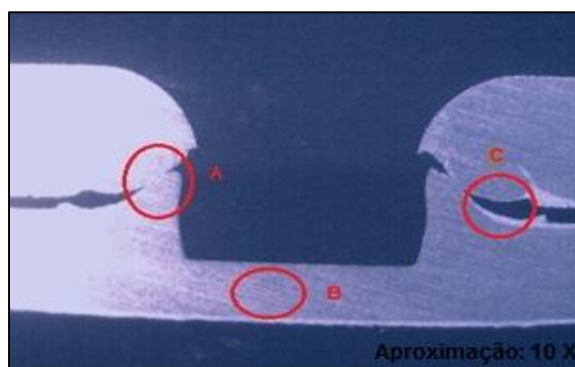


Figura 15: Macrografia do botão de solda com 2000 rpm e 4 segundos. Fonte: Autores (2017).

No item A ocorreu pouca difusão do material na zona de mistura, causando uma visível diferença entre as interfaces das duas chapas, o que deixa a solda com pouca adesão, resultando em uma baixa resistência mecânica, que se comprova pela Figura 12. Segundo Malafaia (2009), o problema está relacionado ao baixo tempo de patamar, que juntamente com a falta de pressão do ombro da ferramenta, geram calor de fricção insuficiente para amolecer o material base em torno do pino da ferramenta, difundido pouco material em torno do furo central da solda.

No ponto C, à falta de aquecimento proporciona um preenchimento insuficiente de material, provocando vazios abaixo do ombro da ferramenta. De acordo com Rosendo (2009), para a solda de boa qualidade com alta resistência mecânica, toda a região abaixo do ombro deve estar amolecida, formando um anel de solda compacto e

homogêneo, esse anel possui maior área na parte superior (devido ao maior aquecimento) e vai diminuindo de área até chegar à parte inferior do botão de solda.

Outro ponto identificado no item B foi à baixa penetração do pino da ferramenta, que deveria ter um avanço maior, para facilitar a junção das chapas e melhorar o resultado do processo da solda. Esse problema resulta do ajustamento da profundidade nominal (calculada) pela profundidade real da máquina na hora de zerar o centro de usinagem. Primeiramente zerou-se o mesmo pela superfície da chapa superior, porém só conseguiu-se soldar quando o mesmo foi zerado a partir da base da chapa inferior. A macrografia também foi realizada utilizando o parâmetro que obteve a melhor resistência mecânica, com rotação de 3000 rpm e tempo de patamar de 6 segundos. A Figura 16 representa esta análise.

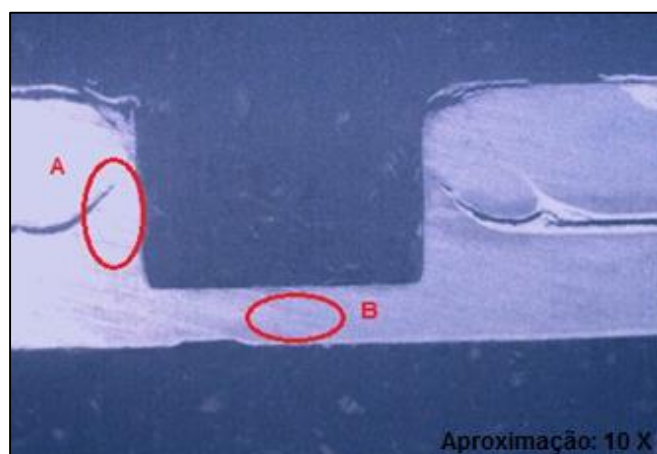


Figura 16: Macrografia do botão de solda com 3000 rpm e 6 segundos. Fonte: Autores (2017).

Nota-se que no ponto A houve uma região de mistura mais bem formada que no caso anterior, com aumento da área difundida, criando um anel de solda maior, devido principalmente ao aumento do tempo de patamar e da rotação. No ponto B, observa-se que o pino da ferramenta teve um avanço ligeiramente superior ao parâmetro da Figura 14, resultado este que se comprova pela sua maior resistência mecânica.

3.5 Perfil de Microdureza

As medições do perfil da Microdureza na escala Vickers foram realizadas conforme o fluxo metodológico explícito anteriormente. Primeiramente aferiu-se 3 medições da dureza do material base (a chapa de alumínio AA2024-T3). A dureza

média do material base foi de 147,33 HV. Na sequência, o parâmetro de soldagem de rotação 3000 rpm e tempo de 6 segundos foi analisado. Os locais dos pontos de medição e os valores do perfil da microdureza em torno do botão de solda estão exemplificados na Figura 17.

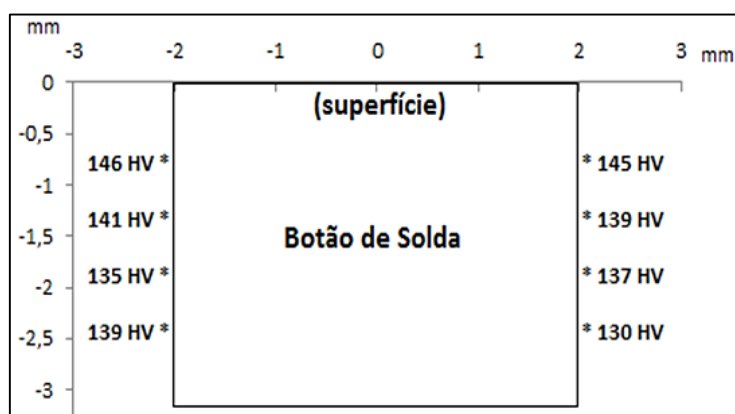


Figura 17: Posição e valores de medição do perfil da microdureza. Fonte: Autores (2017).

A altura do botão de solda é de 3,2 mm e 4 mm de diâmetro, e as medições foram medidas em diferentes profundidades como pode-se verificar na Figura 17. Nos pontos superiores a dureza é ligeiramente superior aos demais pontos, isso se explica, segundo Malafaia (2009), pelo aquecimento superior na superfície das chapas, em que o alto gradiente térmico da zona termo-mecanicamente afetada (próxima do centro da solda) gera refino de grão, ocasionando uma aumento de dureza devido ao resfriamento, podendo até ser superior ao material base. Na parte inferior do botão de solda, especificamente os pontos 4 e 8, a dureza diminui um pouco em razão da falta de aquecimento, gerando grãos mais grosseiros, com menos resistência (RAMOS, 2008; ROSENDO, 2009).

4. Conclusões

O processo de soldagem por FSSW produz um grande impacto em diferentes indústrias em razão de suas vantagens técnicas relativas às propriedades mecânicas. Particularmente, os setores industriais automotivo e da aeronáutica desenvolvem diferentes processos FSSW, com forte influência na soldagem de chapas finas de ligas de alumínio. No entanto, o conhecimento referente aos parâmetros selecionados no processo de soldagem para obter melhores características das articulações é escasso.

Desse modo, com base nos resultados da presente pesquisa, conclui-se que a soldagem FSSW proporcionou propriedades mecânicas superiores das juntas de alumínio da liga AA2024-T3 em esforço de cisalhamento. O melhor parâmetro de soldagem para os testes de tração e de cisalhamento foi com rotação de 3000 rpm e tempo de patamar de 6 segundos. Além disso, a pesquisa contribuiu para compreender melhor as principais características dos processos de soldagem FSSW frente a outros processos de fabricação.

5. Referências

ARBEX, A. A. 2011. *Análise Estrutural e de Fadiga de juntas Rebitadas de uso Aeronáutico utilizando o método dos Elementos Finitos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

ASHBY, M. F.; JOHNSON, K. 2010. *Materials and design: the art and science of material selection in product design*. Amsterdam: Elsevier/ButterworthHeinemann.

BRZOSTEK, R. C. 2012. *Estudo da Fratura em Solda Ponto por Fricção em Alumínio ALCLAD 2024-T351 e Alumínio 2024-T351: uma abordagem Numérica e Experimental*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CHIOU, Y. C.; LIU, C. T.; LEE, R. T. 2013. A pinless embedded tool used in FSSW and FSW of aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 213, n. 11, p. 1818-1824.

DIN EN ISO 14272, Cross Tension. 2002. *Norma Técnica para Testes de Tração em juntas sobrepostas de solda ponto*.

DIN EN ISO 14273, Lap Shear. 2002. *Norma Técnica para Testes de Cisalhamento em juntas sobrepostas de solda ponto*.

FONSECA, C. S. et al. 2017. Influência do aporte térmico sobre a microestrutura em juntas soldadas de aço inoxidável AISI 304. *ENGEVISTA*, v. 19, n. 1, p. 1 – 8, 2017.

GARCIA, A.; ALVES, J. A.; SANTOS, C. A. 2012. *Ensaio dos Materiais*. 2°. ed. Rio de Janeiro: LC.

GARG, A.; BHATTACHARYA, A. 2017. Strength and failure analysis of similar and dissimilar friction stir spot welds: Influence of different tools and pin geometries. *Materials & Design*, v. 127, p. 272–286.

HOSSEINIJOU, S. A. et al. 2014. Social life cycle assessment for material selection: a case study of building materials. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 19, n. 3, p. 620–645.

MALAFAIA, A. M. S. 2009. *Avaliação das Propriedades Mecânicas de Tração e Fadiga com Monitoramento de Trincas, de Juntas de A1AA2024 - T3 soldadas a ponto por fricção-mistura*. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo, São Carlos.

PARADISO, V. et al. 2017. Magnesium and Aluminium alloys Dissimilar Joining by Friction Stir Welding. *Procedia Engineering*, v. 183, p. 239–244.

PICCINI, J. M.; SVOBODA, H. G. 2017. Tool geometry optimization in Friction Stir Spot Welding of Al-Steel joints. *Journal of Manufacturing Processes*, n. 26, p. 142–154.

- ROHDE, R. A. 2010. *Metalografia Preparação de Amostras, uma Abordagem Prática*. Apostila Técnica, Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais, URI Santo Ângelo.
- RAMOS, F. D. 2008. *A Influência do Perfil da Ferramenta e Velocidade de Rotação na Solda Ponto por Fricção e Mistura Mecânica das Ligas AA6181-T4 e Mg AZ31*. Tese de Doutorado Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ROMANO, L. N. 2013. *Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas: planejamento, projeto e produção*. São Paulo: Blucher Acadêmico.
- ROSENDO, T. S. 2009. *Estudo do Desempenho Mecânico de Solda(s) Ponto por Fricção (FSpW) da Liga AA6181-T4*. Tese de Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SAE. SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. 1998. *AMSQQA250/4A*. Aluminum alloy 2024, Plate and Sheet. Aerospace Material Specification, SAE International.
- SILVEIRA, F.; MACHADO, F. M.; RUPPENTHAL, J. E. 2017. *Processo de Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas*. 1. ed. Saarbrücken: Novas Edições Acadêmicas. v. 1. 77p.
- SIMÕES, C. L. et al. 2013. Integrating Environmental and Economic Life cycle analysis in Product Development: a material selection case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 18, n. 9, p. 1734 - 1746.
- XAVIER, A. C. B. 2006. *Considerações para a Análise de juntas Aeronáuticas unidas Mecanicamente*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- XU, W. et al. 2015. A high specific strength and corrosion resistant magnesium alloy. *Nature Materials*, v. 14, p. 1229–1235.
- WU, G. et al. 2016. Electrochemical Degradation and extraction capability of Magnesium Wastes in Sewage Treatment. *Materials and Design*, v. 111, p. 537-540.