

# A INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA NA RESISTÊNCIA À DOBRA EM CHAPAS DE COBRE C110 E ALUMÍNIO 6060 T-5 SOLDADAS PELO MÉTODO FSW

Angelo Machado Crestani<sup>1</sup>  
Prof. Dr. Aldoni Wiedenhöft<sup>2</sup>  
Prof. Dr. Thiago da Silveira<sup>3</sup>

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a comparação experimental entre a influência da geometria do pino e do ombro da ferramenta utilizada no processo de soldagem FSW no ensaio de dobramento, além de correlacionar essa influência com os resultados dos ensaios de tração e micro dureza, obtidos anteriormente. Assim sendo, o trabalho foi feito em parceria com Dos Reis (2019). No primeiro segmento, foram realizados os ensaios de tração e micro dureza, e no segundo, o ensaio de dobramento. Quatro geometrias de ferramenta foram utilizadas e três corpos de prova oriundos de cada tipo de geometria foram submetidos ao ensaio de dobramento. Após o ensaio, os doze corpos de prova foram analisados e mensurados em uma análise experimental qualitativa. Os resultados mostraram que os corpos de prova oriundos das chapas soldadas pela ferramenta C apresentaram melhores índices nos ensaios de dobramento, tração e micro dureza.

Palavras-chave: ensaio de dobramento. *FSW*. Geometria de ferramenta.

## ABSTRACT

This work has as objective the experimental comparison between the influence of the pin and shoulder geometry of the tool used in friction stir welding (FSW) process in bending, tensile and microhardness tests. Therefore, the work was made and in partnership with Vasconcelos (2019). In the first segment, tensile and microhardness tests were performed and, in the second, the bending test. Four tool geometries were used and three test specimens from each type of geometry were used during the bending test. After the test, the twelve test specimens were produced and measured in a qualitative experimental analysis. The results show that the test specimens from plates welded by the C tool had better rates in bending, traction and microhardness tests.

Keywords: bending test. *FSW*. Tool geometry.

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os processos de soldagem existentes no universo da engenharia, destaca-se o método *Friction Stir Welding* (FSW). Inventado em 1991 por Wayne Thomas, superou todos os problemas associados com as técnicas tradicionais de soldagem por fusão, como a contração, rachadura e porosidade (Anil Kumar *et al.*, 2014). Tal método consiste na união de materiais sólidos através do atrito causado pelas superfícies em contato com o auxílio de uma ferramenta, em carga axial

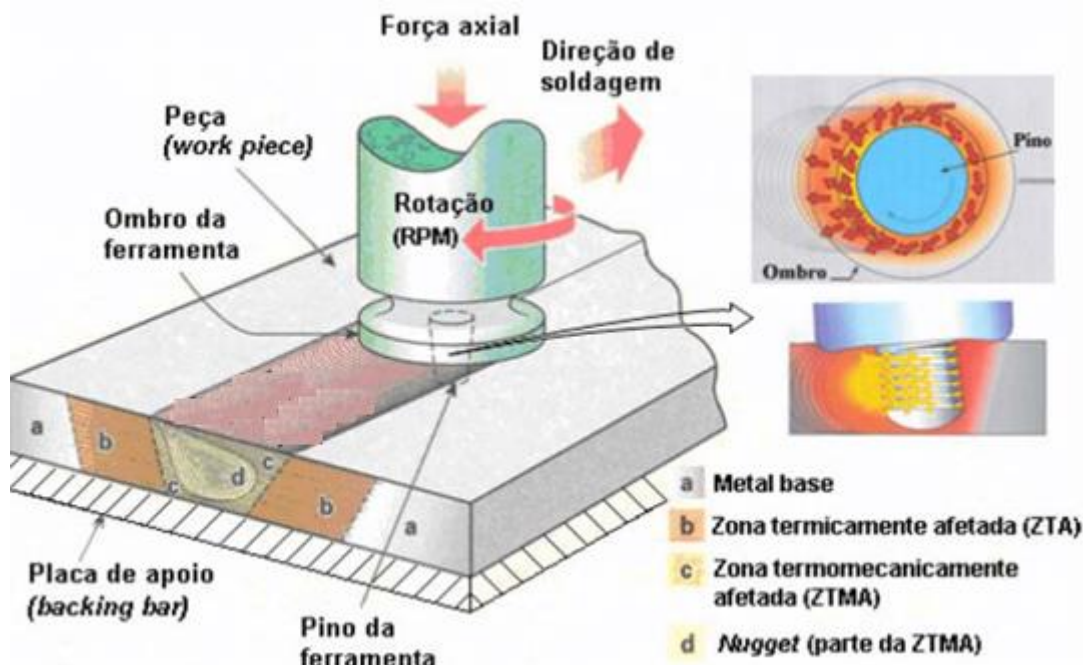
<sup>1</sup> Aluno de Engenharia Mecânica Campus Alegrete – Universidade Federal do Pampa. E-mail: [angelocrestani\\_08@hotmail.com](mailto:angelocrestani_08@hotmail.com)

<sup>2</sup> Professor – Campus Alegrete – Universidade Federal do Pampa. E-mail: [aldoniwiedenhofthoft@unipampa.edu.br](mailto:aldoniwiedenhofthoft@unipampa.edu.br)

<sup>3</sup> Professor – Campus Alegrete – Universidade Federal do Pampa. E-mail: [thiagodss@unipampa.edu.br](mailto:thiagodss@unipampa.edu.br)

controlada, conforme figura 1. À medida que a ferramenta se move pela linha de solda, as chapas aquecidas se misturam sem derreter e formam a junta soldada (BISADI, 2011 apud S Li, Y. *et al.*, 1999). Em contraste com as técnicas de soldagem convencionais, o material não é fundido, o processo não necessita de gás e outros tipos de consumíveis, além do consumo de energia ser menor.

Figura 1 – Exemplificação do processo de soldagem FSW.



Fonte: adaptado de CRUZ e NETO, 2009 P.6.

O presente artigo se justifica pela importância do método FSW para setores complexos da engenharia que necessitam de grande precisão e qualidade em seus processos, como a engenharia aeroespacial, automotiva, naval, nuclear e ferroviária. Além disso, unir esses dois materiais (cobre e alumínio) traz benefícios econômicos em diferentes âmbitos como, por exemplo, a utilização dessa união soldada como condutores nas redes elétricas, o que gera uma redução de custo, pois o alumínio é mais barato que o cobre. Portanto, diferentes estudos e ensaios se fazem necessários, pois trata-se de uma liga com bastante potencial de uso.

O objetivo principal desse artigo é testar a influência da geometria da ferramenta utilizada no processo FSW na resistência à dobra, em uma chapa composta por uma liga de alumínio 6060 T5 e de cobre eletrolítico C110. Além disso, tem-se como objetivo específico a correlação dos resultados de ensaio de tração e micro dureza obtidos da literatura existente, com os resultados obtidos nos ensaios de dobramento realizados pelo autor.

## 2 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para esse artigo, foi utilizado o método de pesquisa qualitativo, onde os resultados obtidos por meio do ensaio de dobramento apontam se sofreu ruptura ou não. Com a finalidade de melhor entendimento dos resultados, somente será apresentado se houve ruptura ou não, da chapa de alumínio e cobre.

Com isso, os resultados referentes ao ensaio de tração e de micro dureza, a relação das ferramentas utilizadas no processo de soldagem, além dos corpos de

prova utilizados para o ensaio de dobramento, foram feitos em parceria com Dos Reis (2019), bacharel em engenharia mecânica pela Universidade Federal do Pampa, que realiza estudos na área.

## 2.1 GEOMETRIA DAS FERRAMENTAS

Segundo Wiedenhöft (2018), a ferramenta de soldagem exerce um papel importante no resultado final do processo, pois através dela é gerado o calor pelo atrito e também por promover a deformação plástica entre os materiais.

Zhao (2005) explica que a geometria do pino tem importante efeito na geração de calor e do fluxo do material, portanto, interfere nas propriedades mecânicas da junta após o processo de soldagem.

Para avaliação dos resultados, leva-se em conta a geometria das ferramentas utilizadas para a soldagem das chapas. Para facilitar a organização e compreensão dos resultados, as geometrias das ferramentas foram organizadas por letras do alfabeto e são apresentadas no quadro 1.

Quadro 1 – Relação nomenclatura adotada x ferramenta

Placa	Pino	Ombro
A	Cônico	Plano
B	Cônico	Côncavo
C	Hexagonal	Plano
D	Cilíndrico	Plano

Fonte: Dos Reis (2019).

## 2.2 CORPOS DE PROVA

No ensaio foram utilizados corpos de prova usinados a partir de uma liga de alumínio 6060 T5 e de uma liga de cobre eletrolítico C110 soldados previamente pelo método FSW. Para melhor organização do trabalho, as chapas foram nominadas igualmente às respectivas ferramentas utilizadas na soldagem. A figura 2 mostra alguns dos corpos de prova utilizados no ensaio de dobramento.

Figura 2 – Exemplo de corpos de prova

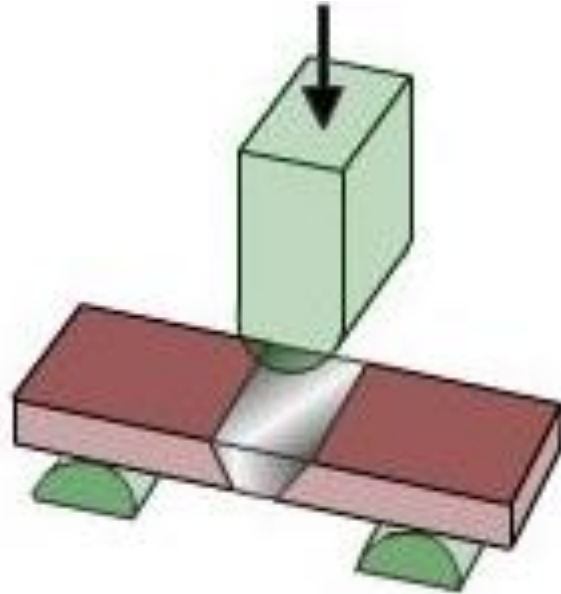


Fonte: Dos Reis (2019).

### 2.3 ENSAIO DE DOBRAMENTO

No ensaio de dobramento, espera-se avaliar a ductilidade da chapa soldada pelo método FSW, submetendo à mesma uma deformação plástica por flexão. O ensaio foi feito contra a raiz da solda em todos os corpos de prova. A figura 3 ilustra como é feito o ensaio de dobramento.

Figura 3 – Ensaio de dobramento



Fonte: CIMM (2010).

Para a realização do ensaio de dobramento, foi utilizada a máquina Shimadzu AGS-X. No ensaio, foram usinados 3 corpos de prova oriundos de cada chapa soldada pela sua respectiva ferramenta usada no processo. A figura 4 mostra o modelo da máquina utilizada.

Figura 4 – Shimadzu AGS-X



Fonte: Direct Industry (2021).

## 2.4 ENSAIOS DE TRAÇÃO E MICRO DUREZA

Os ensaios de tração e micro dureza foram realizados por Vasconcelos (2019). Para o ensaio de micro dureza, utilizou-se a escala Vickers (HV) de dureza e foi adotada uma carga de 200g e um tempo de aplicação de 10s. Os espaçamentos entre cada ponto de medição foram de 0,5mm.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 FERRAMENTA A

Trata-se da ferramenta de pino cônico e ombro plano. O quadro 2, mostra os resultados obtidos no ensaio de dobramento para as chapas soldadas pela ferramenta A.

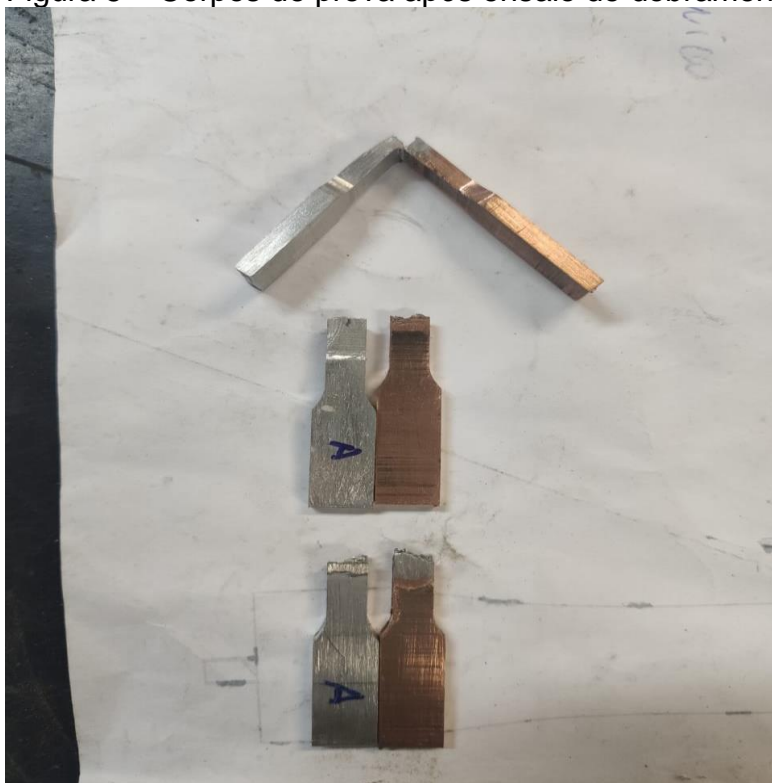
Quadro 2 – Ensaio de dobramento na chapa soldada pela ferramenta A.

Corpo de prova	Resultado
1	Não resistiu
2	Não resistiu
3	Não resistiu

Fonte: autoria própria.

Percebe-se, portanto, que nenhum corpo de prova resistiu ao ensaio de dobramento. A figura 5 demonstra os corpos de prova utilizados no ensaio de dobramento.

Figura 5 – Corpos de prova após ensaio de dobramento.



Fonte: autoria própria.

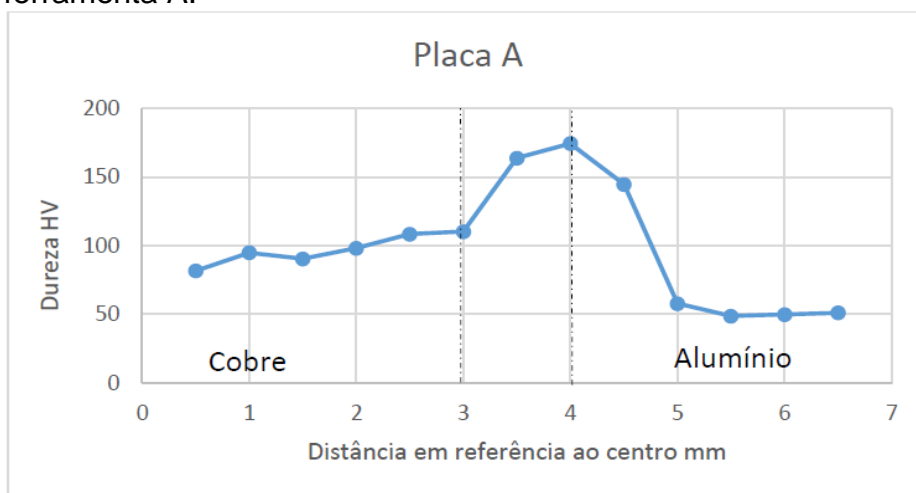
Para a análise de correlação com o ensaio de dobramento, os resultados de ensaio de tração e dureza são apresentados no quadro 3 e na figura 6, a seguir.

Quadro 3 – Resultados de ensaio de tração na chapa soldada pela ferramenta A.

Corpo de prova	$F_{rupt}$ [N]	$\sigma_{rupt}$ [MPa]
4	945,47	52,52
5	1262,43	70,13
6	1041,05	57,83

Fonte: adaptado de Dos Reis (2019).

Figura 6 – Resultados de ensaio de micro dureza nas chapas soldadas pela ferramenta A.



Fonte: Dos Reis (2019).

Com base nos resultados apresentados pelo quadro 3 e pela figura 6, respectivamente, percebe-se, portanto, valores razoavelmente baixos em função do ensaio de tração e micro dureza, para a chapa soldada pela ferramenta A.

### 3.2 FERRAMENTA B

Trata-se da ferramenta de pino cônico e ombro côncavo. O quadro 4, mostra os resultados obtidos no ensaio de dobramento para as chapas soldadas pela ferramenta B.

Quadro 4 – Ensaio de dobramento na chapa soldada pela ferramenta B.

Corpo de prova	Resultado
1	Não resistiu
2	Não resistiu
3	Não resistiu

Fonte: autoria própria.

Assim como os corpos de prova soldados pela ferramenta A, mostrados no quadro 3, os corpos de prova oriundos da ferramenta B, cujos resultados foram apresentados pelo quadro 4, também não resistiram ao ensaio de dobramento. A figura 6 demonstra o resultado visual do ensaio de dobramento nos corpos de prova soldados pela ferramenta B.

Figura 7 – Corpos de prova após ensaio de dobramento.



Fonte: autoria própria.

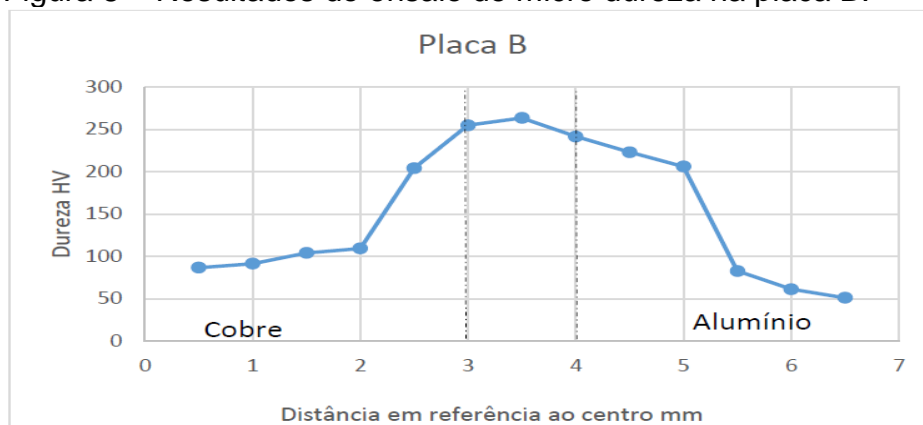
O quadro 5 e a figura 8 ilustram, respectivamente, os resultados do ensaio de tração e micro dureza na chapa.

Quadro 5 – Resultados do ensaio de tração na chapa soldada pela ferramenta B.

Corpo de prova	$F_{rupt}$ [N]	$\sigma_{rupt}$ [MPa]
4	1477,89	82,10
5	1287,45	71,52
6	1791,56	99,53

Fonte: adaptado de Dos Reis (2019).

Figura 8 – Resultados do ensaio de micro dureza na placa B.



Fonte: Dos Reis (2019).

Analisando os resultados apresentados no quadro 5 e na figura 8, nota-se resultados de ensaio de tração e micro dureza superiores aos da ferramenta A,

mostrando-se a ferramenta B, uma geometria de pino e ombros que conferem resultados mais satisfatórios.

### 3.3 FERRAMENTA C

Trata-se da ferramenta de pino hexagonal e ombro plano. O quadro 6, mostra os resultados obtidos no ensaio de dobramento para as chapas soldadas pela ferramenta C.

Quadro 6 – Ensaio de dobramento na chapa soldada pela ferramenta C.

Corpo de prova	Resultado
1	Resistiu
2	Resistiu
3	Resistiu

Fonte: autoria própria

A figura 8 mostra o resultado visual dos corpos de prova soldados pela ferramenta C. Nota-se que os corpos de prova não romperam após o ensaio de dobramento.

Figura 9 – Corpos de prova após ensaio de dobramento.



Fonte: autoria própria

O quadro 7 e a figura 10 ilustram, respectivamente, os resultados do ensaio de tração e micro dureza na chapa.

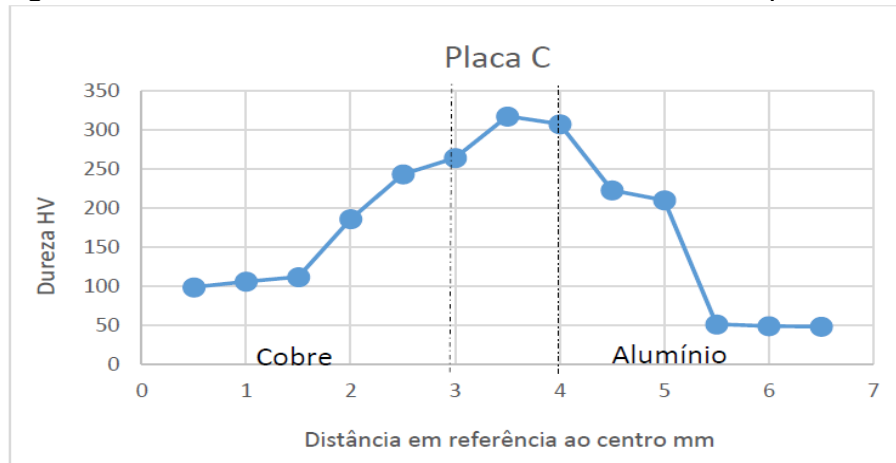
Quadro 7 – Resultado do ensaio de tração na chapa soldada pela ferramenta C.

Corpo de prova	$F_{rupt}$ [N]	$\sigma_{rupt}$ [MPa]
4	2268,147	126,00
5	2651,856	147,32
6	3001,664	166,75

Fonte: adaptado de Dos Reis (2019).



Figura 10 – Resultados do ensaio de micro dureza na placa C.



Fonte: Dos Reis (2019).

Os resultados apresentados pelo quadro 7 e pela figura 10, respectivamente, confirmam, junto com os resultados do ensaio de dobramento apresentados pelo quadro 6, que a ferramenta C apresentou elevado desempenho, oferecendo melhores resistências mecânicas do que a ferramenta A e B.

### 3.4 FERRAMENTA D

Trata-se da ferramenta de pino cilíndrico e ombro plano. O quadro 8, mostra os resultados obtidos no ensaio de dobramento para as chapas soldadas pela ferramenta D.

Quadro 8 – Ensaio de dobramento na chapa soldada pela ferramenta D.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Resultado</b>
1	Resistiu
2	Não resistiu
3	Resistiu

Fonte: autoria própria.

A figura 11 mostra o resultado visual dos corpos de prova soldados pela ferramenta D. Nota-se que os corpos de prova, (exceto o corpo de prova 2) assim como os soldados pela ferramenta C, não romperam após o ensaio de dobramento.

Figura 11 – Corpos de prova após ensaio de dobramento.



Fonte: autoria própria.

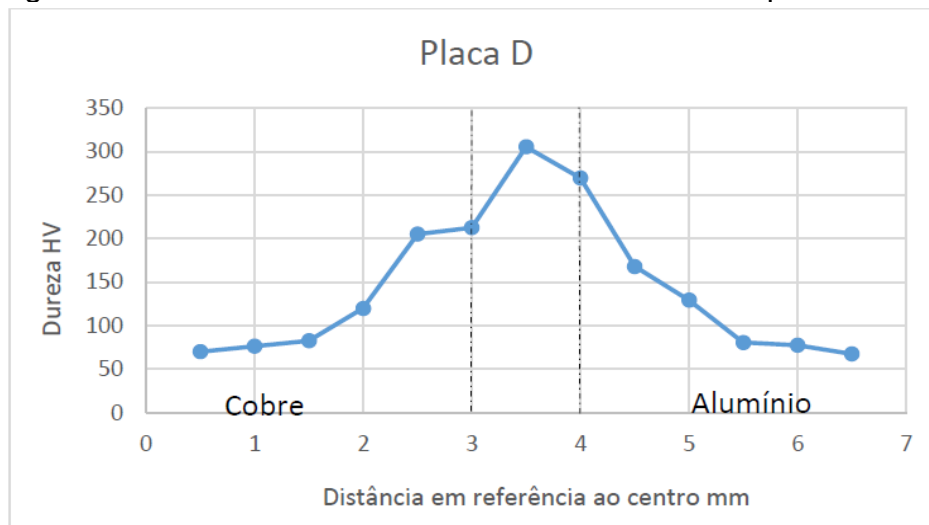
O quadro 9 e a figura 12 ilustram, respectivamente, os resultados do ensaio de tração e micro dureza na chapa.

Quadro 9 – Resultado do ensaio de tração na chapa soldada pela ferramenta D.

Corpo de prova	$F_{rupt}$ [N]	$\sigma_{rupt}$ [MPa]
4	1909,70	106,09
5	1396,99	77,61
6	1750,53	97,24

Fonte: adaptado de Dos Reis (2019).

Figura 12 – Resultados do ensaio de micro dureza na placa D.



Fonte: Dos Reis (2019).

Assim como a ferramenta C, as chapas soldadas pela ferramenta D apresentaram, com exceção de um corpo de prova, resistência à dobra. Pelos resultados mostrados pelo quadro 9 e pela figura 12, percebe-se também, que os

ensaios de tração e micro dureza apresentaram resultados satisfatórios e com valores maiores que as chapas soldadas pela ferramenta A e B.

## **4 CONCLUSÕES**

- (1) Analisando os resultados do ensaio de dobramento, percebe-se que todos os corpos de prova soldados pela ferramenta C, de pino hexagonal e ombro plano, resistiram ao ensaio de dobramento. Ainda, dentre os corpos de prova soldados pela ferramenta D, de pino cilíndrico e ombro plano, dois corpos de prova resistiram ao ensaio de dobramento, enquanto um acabou por não resistir à flexão imposta. Portanto, os corpos de prova soldados pela ferramenta C obtiveram os melhores resultados no ensaio de dobramento;
- (2) Os resultados do ensaio de tração nos corpos de prova soldados pela ferramenta C mostraram, dentre todos os outros corpos de prova, as melhores resistências à tração. Isso corrobora, comparando aos resultados do ensaio de dobramento, que a ferramenta C traz os melhores resultados quanto à tração e à dobra;
- (3) Quanto ao ensaio de micro dureza, novamente a ferramenta C, seguida da ferramenta D, trouxeram os melhores resultados dentre as ferramentas utilizadas no processo de soldagem FSW;
- (4) Fazendo a análise global dos objetivos desse artigo, percebe-se, portanto, que a ferramenta C trouxe os melhores resultados no ensaio de dobramento, tração e micro dureza. Alguns fatores podem ser influentes nesse resultado como menor presença de vazios ou poros na região da solda, resultando em uma melhor união entre os materiais base, que nesse caso, são o alumínio e o cobre, impedindo que a solda seja seca (dura).

### **4.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

- (1) Realizar o ensaio de dobramento a favor da raiz da solda e, por conseguinte, fazer a comparação dos resultados obtidos com os resultados existentes nesse trabalho referentes ao ensaio de tração e micro dureza;
- (2) Submeter a chapa soldada pelo processo FSW ao tratamento de recozimento, com a finalidade de aumentar a resistência ao dobramento;
- (3) Testar outros tipos de geometria do pino e do ombro da ferramenta e realizar os ensaios de tração, micro dureza e dobramento.

## 5 REFERÊNCIAS

ANIL KUMAR , H.M.; VENKATA RAMANA, V. **An Overview of Friction Stir Welding (FSW): A New Perspective**. Research Inventy, 2014.

BISADI , H.; TOUR M.; TAVAKOLI, A. **The Influence of Process Parameters on Microestruure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al 5083 Alloy Lap Joint**. American Journal of Materials Science, 2011.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. **A aplicabilidade dos ensaios de dobramento**. Disponível: [https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/7526-a-aplicabilidade-dos-ensaios-de-dobramento](https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7526-a-aplicabilidade-dos-ensaios-de-dobramento)

CRUZ, Márcio Fernando.; NETO, Carlos de Moura. **Friction Stir Welding – Review: Potencial de Aplicação na Indústria Aeroespacial**. XI Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, 2009.

DOS REIS, Alexandre Vasconcellos. **Influência da geometria da ferramenta no processo de solda por fricção (FSW) entre alumínio (6060 T5) e cobre (C110)**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Pampa, Alegrete, 2019.

WIEDENHÖFT, Aldoni Gabriel. **Estudo do comportamento mecânico, metalúrgico e elétrico de juntas sobrepostas dissimilares da liga de Cobre ASTM C110 e de Alumínio AA6060-T5 produzidas pelo processo de soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW) modificado**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ZHAO, Y.; LIN, S.; WU, L.; QU, F. **The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy**. Materials Letters, 59, p. 2948-2952, 2005.