

## APLICAÇÃO DO PROCESSO FSW – FRICTION STIR WELDING – EM SOLDAGEM DE CHAPA FINA DE ALUMÍNIO 5052 H32

Adonis Pellin, [157405@upf.br](mailto:157405@upf.br)<sup>1</sup>

Derimar Wegener, [164605@upf.br](mailto:164605@upf.br)<sup>1</sup>

Manfred Litz, [164606@upf.br](mailto:164606@upf.br)<sup>1</sup>

Tiago Alexandre Führ, [157404@upf.br](mailto:157404@upf.br)<sup>1</sup>

Charles Leonardo Israel, [israel@upf.br](mailto:israel@upf.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Passo Fundo - UPF

**Resumo:** Execução de ensaio de soldagem pelo processo FSW – Friction Stir Welding de chapas com espessura de 2,5 mm da liga de alumínio 5052 H32. O parâmetro de variação foi a velocidade de soldagem em 60, 80 e 100 mm/min, com a rotação da ferramenta em 1000 RPM. A velocidade de penetração da ferramenta de 10 mm/min, o ângulo de ataque de 0° e utilizado uma ferramenta de pino reto facetada com ângulo entre as faces de 120° com ombro plano, sendo o pino em aço AISI M2 tratado termicamente e o ombro em D6 sem tratamento térmico. A qualidade das juntas soldadas foi determinada por ensaio visual, ensaio de tração, dobramento a 180°, microdureza Vickers HV 0,1 kg, macrografia e micrografica. Os resultados do ensaio visual mostram que para as três velocidades de soldagem estudadas as soldas estão livres de defeitos, os ensaios macrográficos evidenciam uma descontinuidade interna longitudinal na raiz e o ensaio micrográfico mostra que as menores descontinuidades encontradas foram para a velocidade de soldagem de 60 mm/min. Para os ensaios de tração a eficiência da junta mínima para a tensão de escoamento é de 80,1 % e para a tensão máxima é de 80,7 % e alongamento de 39,8 a 63,5 %, ficando abaixo dos valores mínimos estabelecidos pela norma ASTM B 209. Os resultados do perfil de microdureza demonstraram homogeneidade entre as diferentes zonas microestruturais existentes ao longo da seção transversal resultantes do processo e de acordo com os valores estabelecidos pela norma. Os ensaios de dobramento de face aprovaram e os de raiz reprovaram em função da descontinuidade interna na raiz da solda como ponto de início da ruptura.

**Palavras-chave:** FSW – Friction Stir Welding, parâmetros de soldagem, liga de alumínio 5052 H32, propriedades mecânicas

Os valores médios de propriedades mecânicas obtidas nos ensaios são aqueles tomados como referência no cálculo da eficiência mecânica da junta soldada, definida como a relação entre o valor da propriedade mecânica resultante após

a soldagem e o valor observado no metal de base. As propriedades mecânicas do metal de base estão apresentadas na tabela 1 e análise química na tabela 2.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios mecânicos da liga 5052 H32. Fonte: os autores, 2016.

| Propriedades Mecânicas | Metal de Base                     |       |           |
|------------------------|-----------------------------------|-------|-----------|
|                        | Especificado pela norma ASTM B209 | Média | Des. Pad. |
| $\sigma_{esc}$ [MPa]   | 158                               | 186,9 | 2,42      |
| $\sigma_{max}$ [MPa]   | 213                               | 233,2 | 0,91      |
| $\epsilon$ [%]         | 7                                 | 11,8  | 2,68      |
| Micro dureza [HV 0,1]  | -                                 | 80,9  | 1,83      |

Nota:  $\sigma_{esc}$  – tensão de escoamento;  $\sigma_{max}$  – tensão máxima de ruptura;  $\epsilon$  – Alongamento (relativo a 50 mm).

Tabela 2 – Resultados da análise química da liga 5052 H32 (ASTM B209). Fonte: os autores, 2016.

|              | Si (%) | Fe (%) | Cu (%) | Mn (%) | Mg (%)  | Cr (%) | Zn (%) | Ti (%) | V (%) | Outros Elementos |       | Al (%)    |
|--------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|-------|------------------|-------|-----------|
|              |        |        |        |        |         |        |        |        |       | Individual       | Total |           |
| Especificado | 0,08   | 0,10   | 0,10   | 0,10   | 2,2-2,8 | ...    | 0,05   | ...    | 0,05  | 0,03             | 0,10  | Res-tante |
| Encontrado   | 0,07   | 0,77   | 0,001  | 0,08   | 3,09    | 0,24   | 0,001  | 0,003  | 0,004 | -                | -     | Res-tante |

## 2.2. Ferramenta de soldagem FSW

Para a soldagem FSW foi utilizada uma ferramenta de pino reto facetada com ângulo entre as faces de 120° e ombro plano, sendo o pino em aço AISI M2 tratado termicamente e o ombro em VC 131 sem tratamento térmico. As figuras 2-A e 2-B mostram os detalhes da ferramenta fabricada para a soldagem através do processo FSW.

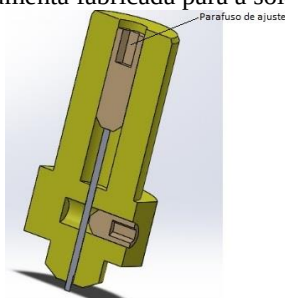


Figura 2 (A) – Desenho esquemático da ferramenta utilizada na soldagem FSW. Fonte: os autores, 2016.



Figura 2 (B) – Ferramenta de soldagem FSW. Fonte: os autores, 2016.

As características dimensionais de projeto da ferramenta foram baseadas em informações extraídas de literaturas. Segundo Capelari e Mazzaferro (2009), as dimensões básicas para uma ferramenta FSW devem contemplar um diâmetro de pino similar a espessura da chapa a ser soldada. O comprimento do pino deve ser um pouco inferior a espessura da chapa, já que a região soldada abaixo da ponta do pino estende-se por uma pequena fração de espessura da chapa. Além disto, o diâmetro do ombro deve corresponder a aproximadamente três vezes o diâmetro maior do pino. As variáveis estão ilustradas na tabela 3.

O material da ferramenta para o pino é aço AISI M2 tratado termicamente com dureza entre 60 a 64 HRC segundo fabricante e o ombro em VC 131 sem tratamento térmico com dureza aproximada de 250 HB segundo fabricante.

Tabela 3 – Detalhes dimensionais da ferramenta de soldagem. Fonte: os autores, 2016.

| Ferramenta/Geometria | Comprimento do pino [mm] | Ø do pino [mm] | Geometria do ombro | Ø do ombro [mm] | Observações      |
|----------------------|--------------------------|----------------|--------------------|-----------------|------------------|
| Facetada             | 2,3                      | 3,0            | Liso - reto        | 9,0             | 120° entre faces |

### 2.3. Testes preliminares

Com o objetivo de definir os parâmetros de soldagem mais adequados para produzir soldas com qualidade aceitável comparada com o metal de base, foram realizados uma série de ensaios, as observações e melhorias implementadas a partir dos pré testes foram as seguintes:

- Tamanho da rebarba;
- Descontinuidades visíveis (inspeção visual e macrografia);
- Visualização da linha de solda na raiz (penetração total).

Os parâmetros para os pré testes foram baseados em estudos de diversas literaturas. A velocidade de rotação e velocidade de penetração da ferramenta selecionada foi baseada no estudo feito por Capelari e Mazzaferro (2009) e Kwon, Shim e Park (2009), o ângulo de ataque de zero grau em função de que a fresadora CNC não possibilita a inclinação do cabeçote e as velocidades de soldagem de 60, 80 e 100 mm/min foram determinadas de acordo com o estudo de Kumbhar, Sahoo, Samajdar, Dey e Bhanumurty (2011).

A soldas preliminares foram realizadas em chapas de teste com dimensões de 300 x 250 x 2,5 mm. As chapas foram montadas no suporte e realizada a soldagem conforme ilustra a figura 3. O objetivo foi testar três velocidades diferentes de soldagem com os demais parâmetros fixos. Os parâmetros utilizados estão ilustrados na tabela 4.



Figura 3 – Experimento de soldagem FSW. Fonte: os autores, 2016.

Tabela 4 – Parâmetros testados nos ensaios preliminares. Fonte: os autores, 2016.

| Velocidade de Soldagem [mm/min] | Ângulo de Inclinação [°] | Velocidade de Rotação [RPM] | Penetração do Ombro [mm] | Velocidade de Penetração da Ferramenta [mm/min] |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------|
| 60                              | 0                        | 1000                        | 0,1                      | 10                                              |
| 80                              | 0                        | 1000                        | 0,1                      | 10                                              |
| 100                             | 0                        | 1000                        | 0,1                      | 10                                              |

### 2.4. Soldagem FSW dos testes preliminares

Diante dos parâmetros definidos foram soldadas as chapas com dimensões de 300 x 250 x 2,5 mm em junta de topo de forma a permitir a retirada dos corpos de prova de acordo com o Código ASME Seção IX para os ensaios de dobramento de face e raiz, ensaios de tração de acordo com a norma ASTM E8M, microdureza HV 0,1 e macrografia.

As chapas foram soldadas utilizando um centro de usinagem vertical do fabricante HARTFORD, modelo LG 500, comando Mitsubischi M70, velocidade de corte máxima 12000 RPM, avanço máximo 32 m/min e potência de 7,5 HP.

O suporte de soldagem está ilustrado na figura 3 que foi projetado e fabricado baseado em literaturas com o objetivo de impedir o afastamento das faces laterais durante a soldagem e também a movimentação vertical das mesmas, posicionando-as de forma adequada a soldagem.

Foram soldadas as chapas de teste com os parâmetros definidos na tabela 4 e detalhes dimensionais da ferramenta definidos na tabela 3. Foram soldadas cinco chapas de teste para as velocidades de soldagem de 60, 80 e 100 mm/min. As chapas foram soldadas sem limpeza, sem pré aquecimento ou tratamento específico.

## 2.5. Resultados e discussão dos testes preliminares

Nesta fase do estudo buscou-se identificar a influência da velocidade de soldagem sobre a qualidade da junta soldada, sendo que estas avaliações foram realizadas de modo quantitativo e qualitativo. As amostras foram submetidas a ensaios de tração, microdureza Vickers 0,1 e macrografia.

A tabela 5 apresenta os resultados de ensaio de tração e microdureza Vickers 0,1 para a velocidade de 60 mm/min, na tabela 6 para velocidade de 80 mm/min e na tabela 7 para velocidade de 100 mm/min. A figura 4 apresenta a seção transversal da chapa de teste soldada para a velocidade de soldagem de 60 mm/min. Foi selecionada somente esta porque no ensaio visual da raiz as demais apresentaram falta de penetração.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios mecânicos para velocidade de 60 mm/min. Fonte: os autores, 2016.

| Propriedades Mecânicas | Junta Soldada |               |                         |
|------------------------|---------------|---------------|-------------------------|
|                        | Média         | Desvio Padrão | Eficiência da Junta [%] |
| $\sigma_{esc}$ [MPa]   | 135,4         | 1,96          | 72,4                    |
| $\sigma_{max}$ [MPa]   | 144,3         | 9,96          | 61,8                    |
| $\varepsilon$ [%]      | 5,18          | 0,44          | 43,8                    |
| Micro dureza [HV 0,1]  | 80,1          | 2,12          | 99,0                    |

Tabela 6 – Resultados dos ensaios mecânicos para velocidade de 80 mm/min. Fonte: os autores, 2016.

| Propriedades Mecânicas | Junta Soldada |               |                         |
|------------------------|---------------|---------------|-------------------------|
|                        | Média         | Desvio Padrão | Eficiência da Junta [%] |
| $\sigma_{esc}$ [MPa]   | 133,9         | 2,18          | 71,6                    |
| $\sigma_{max}$ [MPa]   | 163,7         | 7,96          | 70,1                    |
| $\varepsilon$ [%]      | 5,36          | 0,22          | 45,4                    |
| Micro dureza [HV 0,1]  | 77,9          | 1,93          | 96,2                    |

Tabela 7 – Resultados dos ensaios mecânicos para velocidade de 100 mm/min. Fonte: os autores, 2016.

| Propriedades Mecânicas | Junta Soldada |               |                         |
|------------------------|---------------|---------------|-------------------------|
|                        | Média         | Desvio Padrão | Eficiência da Junta [%] |
| $\sigma_{esc}$ [MPa]   | 127,3         | 15,82         | 68,1                    |
| $\sigma_{max}$ [MPa]   | 133,7         | 12,71         | 57,3                    |
| $\varepsilon$ [%]      | 2,88          | 0,87          | 24,4                    |
| Micro dureza [HV 0,1]  | 80,7          | 1,88          | 99,7                    |

Velocidade de soldagem de 60 mm/min



Figura 4 – Macrografia da seção transversal (reagente poulton's) aumento 12,5 X. Fonte: os autores, 2016.

Observou-se que para as três velocidades de soldagem as propriedades mecânicas dos ensaios de tração não atingiram os valores mínimos especificados por norma, isso deve-se a falta de penetração e a descontinuidade interna apresentada no ensaio macrográfico, já o ensaio de microdureza quando comparado com o do metal de base conforme tabela 1 atende ao valor encontrado durante a caracterização.

Na macrografia é possível identificar uma assimetria em relação a linha central da junta soldada, provocada pela combinação dos movimentos de translação e rotação da ferramenta. Para a velocidade de soldagem de 60 mm/min observa-se uma descontinuidade longitudinal ao cordão localizada próxima a raiz da solda e que se estende ao longo de todo o comprimento soldado. Observando a macrografia na figura 4 identifica-se uma descontinuidade a 0,53 mm da raiz da junta, concluindo-se que o comprimento do pino ou a penetração do ombro não foi ajustado corretamente.

Analizando outras literaturas, as mesmas colocam que aumentado o ângulo de ataque, diminui ou elimina-se a descontinuidade longitudinal na raiz. Neste estudo foi utilizado um centro de usinagem vertical, e o mesmo não possibilita a inclinação do cabeçote para variar o ângulo de ataque. Diante desta constatação resta aumentar o comprimento do pino ou aumentar a penetração do ombro.

### 3. TESTES FINAIS PELO PROCESSO FSW

#### 3.1. Soldagem pelo processo FSW

Após definido os parâmetros para a soldagem FSW baseado nos testes preliminares e realizado o ajuste de comprimento de pino para 2,4 mm com o auxílio do parafuso de ajuste ilustrado na figura 2 A e a penetração do ombro mantida em 0,1 mm, foram soldadas as chapas de teste para posterior realização dos ensaios e avaliação dos dados quantitativos (propriedades mecânicas) e qualitativos (macrografia e dobramento).

Foram soldadas quatro chapas de teste para cada velocidade de soldagem de 60, 80 e 100 mm/min.

#### 3.2. Ensaio Visual de solda

O ensaio visual de solda foi realizado conforme descrito no parágrafo QW-194 do Código ASME Seção IX para determinar se a superfícies das soldas atendem a qualidade especificada por norma, que não podem ter trincas, ter penetração total e sem vazios entre o metal termomecanicamente misturado e metal de base.

Durante a inspeção visual das chapas de teste foram avaliadas a face e a raiz da junta de todas as chapas soldadas e não foram encontradas descontinuidades visíveis.

#### 3.3. Ensaios de dobramento

Após a inspeção visual as mesmas foram cortadas para preparar os corpos de prova para ensaios de dobramento de face e raiz de acordo com o parágrafo QW-462.3(a) do Código ASME Seção IX. As chapas foram submetidas a dobramento guiado a 180°. Após o dobramento as amostras foram avaliadas com o critério de aceitação de que na ZTMA – Zona Termomecanicamente Afetada e na ZAC – Zona Afetada pelo Calor, na superfície convexa não devem apresentar aberturas maior que 3,0 mm.

As chapas soldadas com velocidade de soldagem de 60 mm/min, não apresentaram defeitos para os dobramentos de face conforme mostrado na figura 5, já para os dobramentos de raiz apresentaram defeito maior que 3,0 mm que é um defeito longitudinal em toda a extensão da solda que se originou em função da descontinuidade longitudinal na raiz mostrada na macrografia na figura 11.

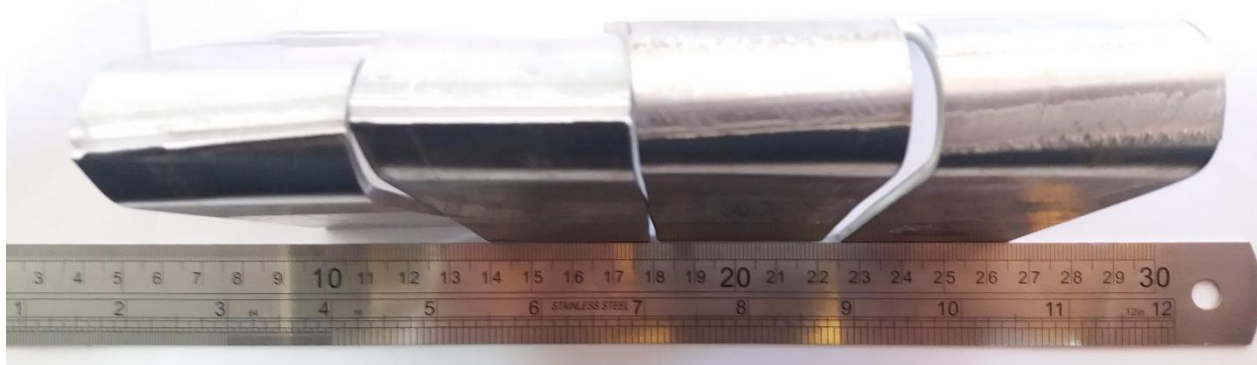


Figura 5 – Dobramentos de face e raiz para velocidade de soldagem de 60 mm/min. Fonte: os autores, 2016.

As chapas soldadas com velocidade de soldagem de 80 mm/min, não apresentaram defeitos para os dobramentos de face conforme mostrado na figura 6, já para os dobramentos de raiz apresentaram defeito maior que 3,0 mm que é um defeito longitudinal em toda a extensão da solda que se originou em função da descontinuidade longitudinal na raiz mostrada na macrografia na figura 11.



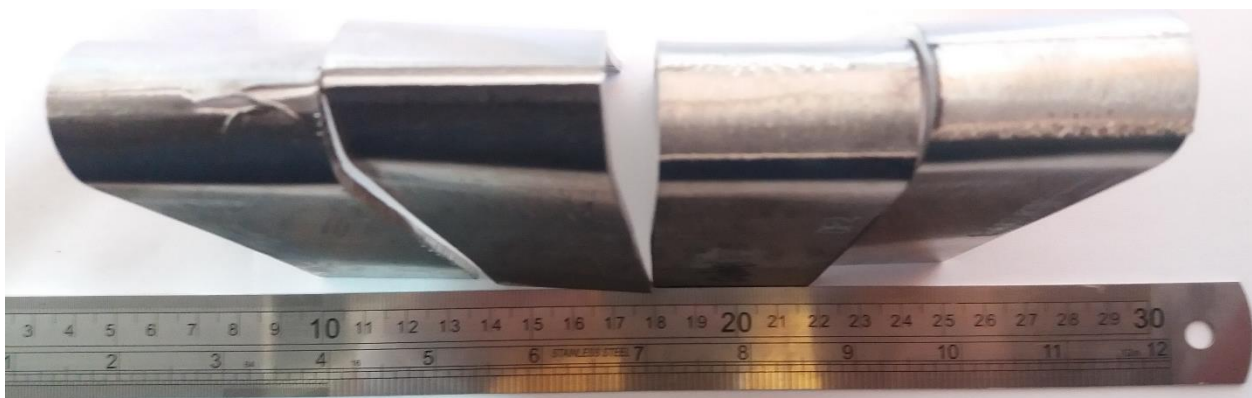


Figura 6 – Dobramentos de face e raiz para velocidade de soldagem de 80 mm/min. Fonte: os autores, 2016.

As chapas soldadas com velocidade de soldagem de 100 mm/min, não apresentaram defeitos para os dobramentos de face conforme mostrado na figura 7, já para os dobramentos de raiz apresentaram defeito maior que 3,0 mm que é um defeito longitudinal em toda a extensão da solda que se originou em função da descontinuidade longitudinal na raiz mostrada na macrografia na figura 11.



Figura 7 – Dobramentos de face e raiz para velocidade de soldagem de 100 mm/min. Fonte: os autores, 2016.

Analisando os ensaios de dobramento, nota-se que a soldagem não interferiu na ductilidade do material e que a presença de descontinuidades abertas a superfície na raiz da solda é decorrente de descontinuidades internas a zona termomecanicamente misturada.

### 3.4. Ensaios de tração

Os de tração foram preparados e realizados de acordo com a norma ASTM E8M, sendo realizado quatro chapas de teste para cada velocidade, totalizando oito ensaios de tração para cada velocidade. A tabela 8 apresenta os valores obtidos nos ensaios de tração das amostras das chapas soldadas com a velocidade de soldagem de 60 mm/min, a tabela 9 apresenta os valores obtidos nos ensaios de tração das amostras das chapas soldadas com a velocidade de soldagem de 80 mm/min e a tabela 10 apresenta os valores obtidos nos ensaios de tração das amostras das chapas soldadas com a velocidade de soldagem de 100 mm/min.

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de tração para velocidade de 60 mm/min. Fonte: os autores, 2016.

| Propriedades Mecânicas | Junta Soldada |               |                         |
|------------------------|---------------|---------------|-------------------------|
|                        | Média         | Desvio Padrão | Eficiência da Junta [%] |
| $\sigma_{esc}$ [MPa]   | 153,16        | 7,27          | 81,9                    |
| $\sigma_{max}$ [MPa]   | 191,83        | 25,37         | 82,2                    |
| $\epsilon$ [%]         | 6,57          | 2,80          | 55,7                    |

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de tração para velocidade de 80 mm/min. Fonte: os autores, 2016.

| Propriedades Mecânicas | Junta Soldada |               |                         |
|------------------------|---------------|---------------|-------------------------|
|                        | Média         | Desvio Padrão | Eficiência da Junta [%] |
| $\sigma_{esc}$ [MPa]   | 149,83        | 35,32         | 80,1                    |

|                       |        |       |      |
|-----------------------|--------|-------|------|
| $\sigma_{\max}$ [MPa] | 188,33 | 11,92 | 80,7 |
| $\varepsilon$ [%]     | 4,7    | 3,14  | 39,8 |

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de tração para velocidade de 100 mm/min. Fonte: os autores, 2016.

| Propriedades Mecânicas      | Junta Soldada |               |                         |
|-----------------------------|---------------|---------------|-------------------------|
|                             | Média         | Desvio Padrão | Eficiência da Junta [%] |
| $\sigma_{\text{esc}}$ [MPa] | 154,20        | 3,63          | 82,5                    |
| $\sigma_{\max}$ [MPa]       | 198,75        | 24,58         | 85,2                    |
| $\varepsilon$ [%]           | 7,49          | 3,24          | 63,5                    |

Analizando os dados observa-se primeiramente que a tensão de escoamento para a velocidade de soldagem de 60 mm/min apresenta um desvio padrão grande, o que indica uma heterogeneidade nos corpos de prova pois temos três regiões distintas que são o metal de base, zona afetada pelo calor e zona termomecanicamente misturada, mais a descontinuidade como mostra na macrografia. A provável causa do desvio padrão ser elevado, é a existência da descontinuidade, porque analisando os valores dos ensaios em separado, observa-se que alguns corpos de prova atingiram o valor especificado por norma e outros não.

Para as velocidades de soldagem de 80 e 100 mm/min o desvio padrão foi baixo. Analisando o valor médio encontrado para as três velocidades comparando com o valor do metal de base a eficiência da junta mínima para a tensão de escoamento é de 80,1 %, para a tensão máxima é de 80,7 % e alongamento de 39,8 a 63,5 %, mas se comparar com o valor especificado por norma os mesmos ficaram abaixo.

Analizando a tensão máxima o desvio padrão para as três velocidades ficou alto e a causa provável é a descontinuidade que se apresenta na raiz da solda, como pode ser visto nos ensaios de dobramento nas figuras 5, 6 e 7 e nas macrografias na figura 11.

Analizando os valores de alongamento observa-se um valor muito baixo, representando uma redução na ductilidade que se confirma analisando os ensaios de dobramento e a eficiência da junta variou de 39,8 a 63,5 % e muito abaixo do valor especificado por norma.

Em todos os corpos de prova o local de ruptura observado encontra-se sobre o cordão de solda conforme figuras 8, 9 e 10, e a origem da falha se dá pela raiz da junta, local em que se localiza a descontinuidade.



Figura 8 – Ruptura sobre o cordão de solda para velocidade de soldagem de 60 mm/min. Fonte: os autores, 2016.



Figura 9 – Ruptura sobre o cordão de solda para velocidade de soldagem de 80 mm/min. Fonte: os autores, 2016.





Figura 10 – Ruptura sobre o cordão de solda para velocidade de soldagem de 100 mm/min. Fonte: os autores, 2016.

### 3.5. Análise macrográfica

A figura 11 ilustra a seção transversal da solda obtida pelo processo FSW para as velocidades de 60, 80 e 100 mm/min. Observa-se a mesma descontinuidade encontrada nos testes preliminares para as três velocidades de soldagem. Para a velocidade de soldagem de 60 mm/min observa-se uma descontinuidade longitudinal ao cordão localizada próxima a raiz da solda e que se estende ao longo de todo o comprimento soldado, esta mesma descontinuidade se apresenta para as velocidades de 80 e 100 mm/min. Observando a macrografia da figura 11 mostra que a descontinuidade para a velocidade de soldagem de 60 mm/min é menor que para as demais velocidades.

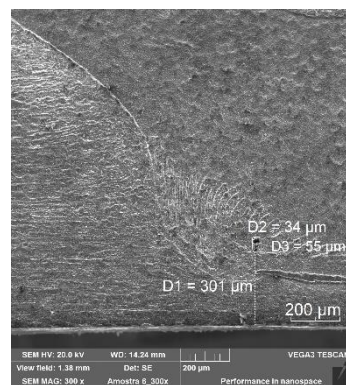
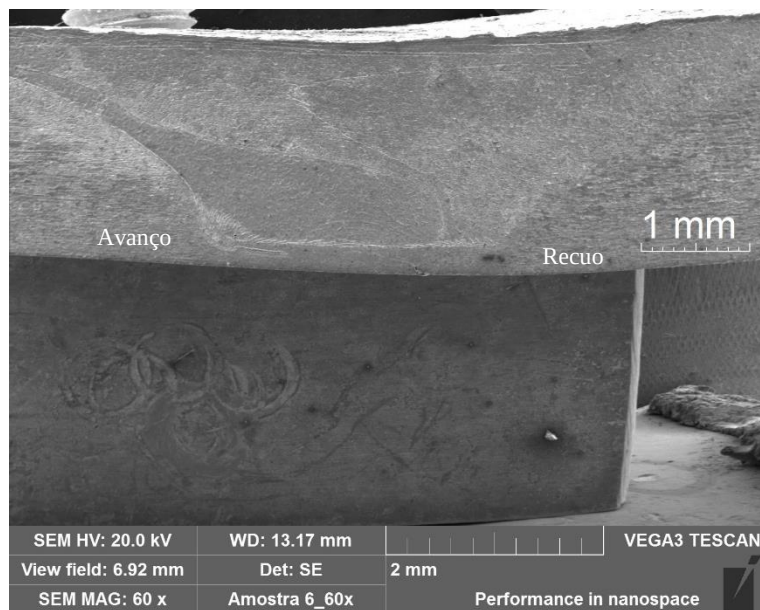


Figura 11 – Macrografia da seção transversal (reagente poulton's) aumento 12,5 X. Fonte: os autores, 2016.

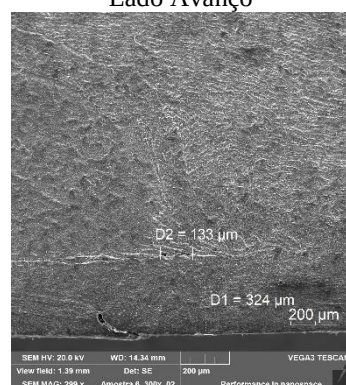
### 3.6. Análise micrográfica

Com o auxílio do MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura foi gerado imagens da seção transversal com aumento de 60 vezes para as velocidades de 60, 80 e 100 mm/min e com o objetivo de caracterizar as descontinuidades foi realizado imagens com aumento de 300 vezes conforme ilustrado nas figuras 12, 13 e 14, nas quais observar-se que para a velocidade de 60 mm/min apresenta as menores descontinuidades.

Analisando outras literaturas, as mesmas colocam que aumentado o ângulo de ataque, diminui ou elimina-se a descontinuidade longitudinal na raiz.

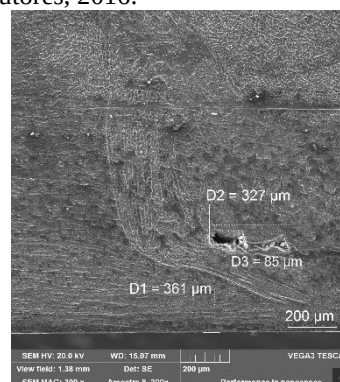
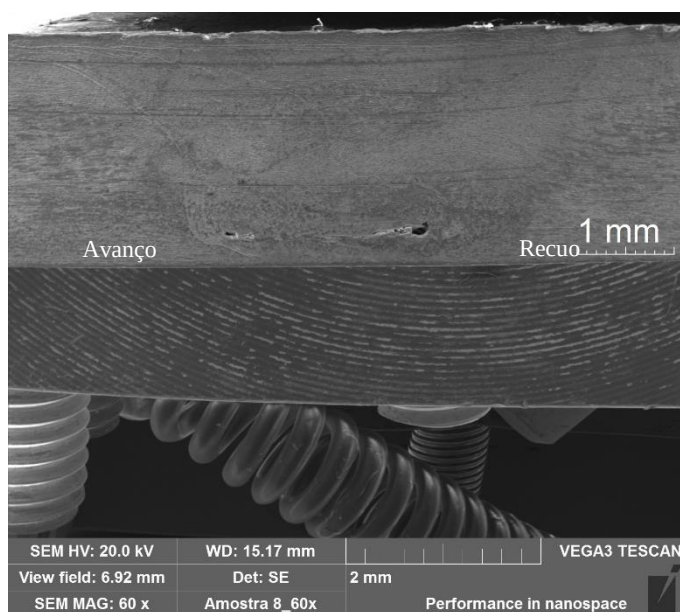


Lado Avanço

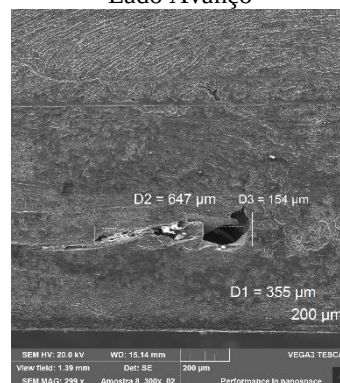


Lado Recuo

Figura 12 – Micrografia da seção transversal para velocidade de soldagem de 60 mm/min com dimensionamento das descontinuidades (reagente poultion's). Fonte: os autores, 2016.

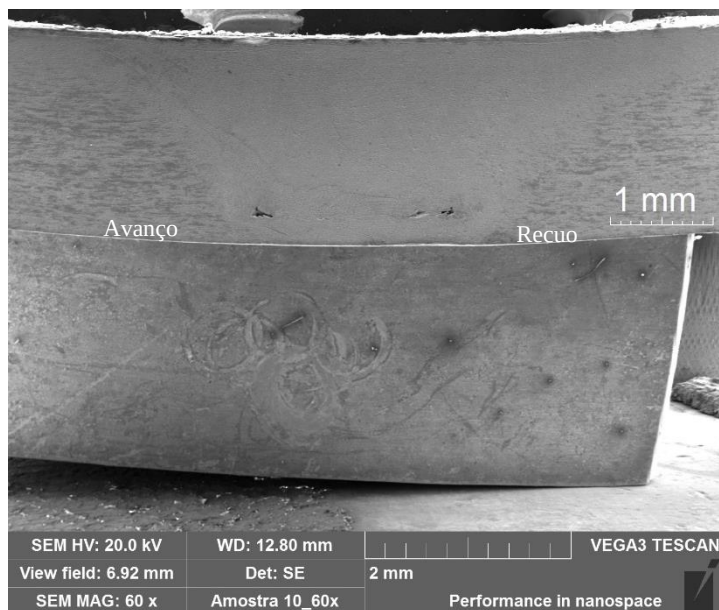


Lado Avanço



Lado Recuo

Figura 13 – Micrografia da seção transversal para velocidade de soldagem de 80 mm/min com dimensionamento das descontinuidades (reagente poultion's). Fonte: os autores, 2016.



Lado Avanço



Lado Recuo

Figura 14 – Micrografia da seção transversal para velocidade de soldagem de 100 mm/min com dimensionamento das descontinuidades (reagente poultton's). Fonte: os autores, 2016.

### 3.7. Perfis de dureza

As figuras 15, 16 e 17 apresentam os gráficos que mostram os valores de microdureza encontrados na seção transversal das soldas produzidas por FSW. Observando os resultados dos testes preliminares de microdureza que apresentaram valores dentro do desvio padrão quando comparados com a microdureza do metal de base, mesmo que na junta soldada tem regiões diferentes, de zona afetada pelo calor, zona termomecanicamente misturada e recristalização. Com base nestes valores optou-se por fazer somente a medição de um perfil de microdureza no centro da espessura para cada velocidade de soldagem. Cada ponto representa o valor único de microdureza na posição x da seção transversal.

O ponto zero indica o centro da solda, sendo o sentido de x positivo o lado de recuo e negativo o lado de avanço da ferramenta. A linha horizontal representa a dureza média do metal de base que é 80,9 HV. As medições foram realizadas em um espaçamento entre indentações igual a 0,5 mm.

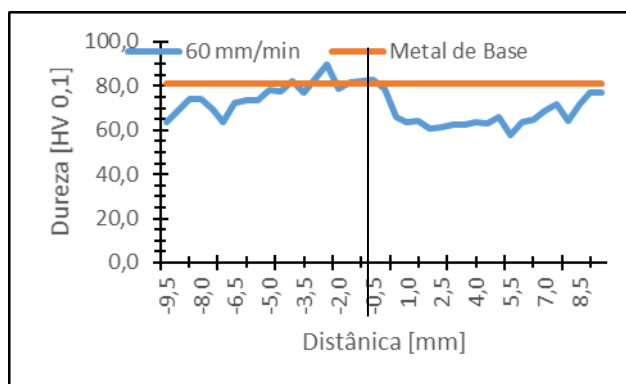


Figura 15 – Perfil de microdureza – velocidade de soldagem de 60 mm/min. Fonte: os autores, 2016.



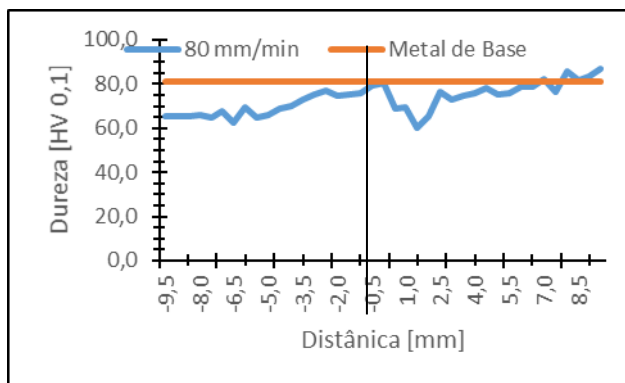


Figura 16 – Perfil de microdureza – velocidade de soldagem de 80 mm/min. Fonte: os autores, 2016.

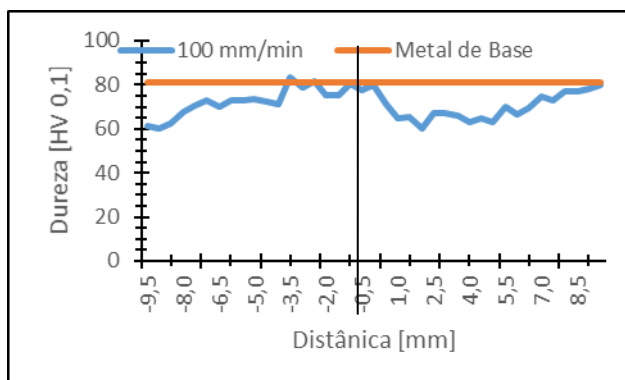


Figura 17 – Perfil de microdureza – velocidade de soldagem de 100 mm/min. Fonte: os autores, 2016.

Nota-se que o perfil de microdureza para as velocidades de soldagem de 60, 80 e 100 mm/min, mostra que no lado recuo da ferramenta os valores diminuíram em função das tensões de tração geradas em uma extensão de aproximadamente 2,0 mm que é a zona de ligação e após os valores começaram a aumentar até se aproximar ao valor do metal de base, já para o lado do avanço os mesmos aumentaram em função das tensões de compressão geradas em uma extensão de aproximadamente 2,0 mm que é a zona de ligação e após os valores começaram a diminuir até se aproximar ao valor do metal de base.

#### 4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados dos ensaios tem-se as seguintes conclusões:

- A soldagem realizada utilizando a ferramenta de pino reto de diâmetro 3,0 mm facetada com ângulo entre as faces de 120° e ombro plano, não apresentou desempenho satisfatório em relação as propriedades mecânicas, sendo que a tensão de escoamento e tensão máxima tiveram uma eficiência da junta mínima, para a tensão de escoamento é de 80,1 % e para a tensão máxima é de 80,7 % e alongamento de 39,8 a 63,5 %, ficando abaixo dos valores mínimos estabelecidos pela norma ASTM B 209;
- Os ensaios de dobramento mostram uma queda na ductilidade do material em função da descontinuidade aberta a superfície na raiz da solda;
- Os ensaios de macrografia mostram a descontinuidade longitudinal na raiz da solda que mesmo ajustando o comprimento do pino não foi possível eliminá-la;
- Na caracterização das descontinuidades com o auxílio do MEV conclui-se que as menores descontinuidades encontradas foram para a velocidade de soldagem de 60 mm/min;
- O perfil de microdureza para as velocidades de soldagem de 60, 80 e 100 mm/min mostram que no lado do recuo da ferramenta os valores diminuíram em função das tensões de tração geradas e para o lado do avanço os mesmos aumentaram em função das tensões de compressão geradas até aproximadamente 2,0 mm do centro da solda e após tendem a se aproximar dos valores do metal de base;
- A hipótese mais provável para a indução da descontinuidade longitudinal na raiz da solda é em função do ângulo de ataque ser de 0°, pois em diversas literaturas quando foi aumentado o ângulo de ataque a descontinuidade reduziu ou foi eliminada.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao laboratório de usinagem do CEP – Colégio Evangélico Panambi onde foram realizadas as soldagens, aos laboratórios de ensaios mecânicos e metalografia da UPF – Universidade de Passo Fundo onde foram realizados ensaios e a Bruning Tecnometal por disponibilizar a matéria prima, preparação dos corpos de prova e ensaios mecânicos.

## 6. REFERÊNCIAS

- Capelari, T.V., Mazzaferro, J.A.E., 2009, “Avaliação da Geometria de Ferramenta e Parâmetros do Processo FSW na Soldagem da Liga de Alumínio AA 5052”, Soldagem Insp., Vol. 14, No. 3 São Paulo, Brasil, pp. 215-227.
- Kumbhar, N. T., Sahoo, S. K., Samajdar, I., Dey, G. K., Bahanumurthy, K., 2011 “Microstructure and microtextural studies of friction stir welded aluminium alloy 5052”, Materials and Design, pp. 1657-1666.
- Thomas, W. M., E.D., Nicholas, J.C., Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes, G.B. Patent Application No.9125978.8, December, 1991.
- Mishra, R. S., Mahoney, M. W., 2007 “Friction Stir Welding and Processing”, Estados Unidos, ASM International.
- ASTM B209/B209M, 2013, “Specification for Aluminum and Aluminum alloy Sheet And Plate”, The American Society of Mechanical Engineers.
- Kwon, Y.J., Shim, S. B., Park, D. H., 2009, “Friction stir welding of 5052 aluminium alloy plates”, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, China, s23 – s27.
- ASME BPVC IX, 2015, “Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operators”, The American Society of Mechanical Engineers.
- ASTM E8/E8M, 2011, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, American Standard Testing and Metals.