



**Giliard Osinski
Jonathan Felipe Camargo**

**ESTUDO DA UNIÃO DE CHAPAS SOBREPOSTAS DE
ALUMÍNIO, UTILIZANDO O PROCESSO “*FRICTION STIR
WELDING*”**

Horizontina

2013

**Giliard Osinski
Jonathan Felipe Camargo**

**ESTUDO DA UNIÃO DE CHAPAS SOBREPOSTAS DE ALUMÍNIO,
UTILIZANDO O PROCESSO “*FRICTION STIR WELDING*”**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Richard Thomas Lermen, Doutor.

Horizontina

2013

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

**“Estudo da união de chapas sobrepostas de alumínio utilizando o processo
Friction Stir Welding”**

Elaborada por:

**Giliard Osinski
Jonathan Felipe Camargo**

como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 28/11/2013
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Prof. Me. Valtair de Jesus Alves
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Prof. Esp. Felipe Dal Piva Ely
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina
2013**

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho só foi possível devido ao empenho, dedicação e vontade de várias pessoas a quem gostaríamos de demonstrar os mais sinceros agradecimentos.

Primeiramente a DEUS por nos acompanhar e amparar nas horas de cansaço e necessidade espiritual.

Aos professores que dividiram seus conhecimentos e serviram de exemplo de vida e formação profissional, em especial ao nosso orientador Dr. Richard Thomas Lermen, queremos manifestar o nosso enorme reconhecimento pela sua ajuda, apoio e compreensão manifestada desde o início, bem como pela qualidade nos conselhos e orientação transmitidos.

Aos colegas de graduação, pela convivência, amizades realizadas e pelas experiências trocadas no decorrer do curso.

As nossas famílias que nos apoiaram durante toda a caminhada.

“A maior recompensa para o trabalho do homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso.”

John Ruskin

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é a realização de soldagem FSW (*Friction Stir Welding*) de chapas sobrepostas de alumínio com diferentes geometrias de ferramentas. Os quatro tipos de ferramentas utilizadas foram: ferramenta de aço inoxidável com pino cônico, ferramenta de aço inoxidável com pino facetado, ferramenta de aço 1045 tratado com pino cônico e ferramenta de aço 1045 tratado com pino facetado. “As velocidades de rotações das ferramentas utilizadas nos testes com os corpos de provas foram 1000 RPM, 1750 RPM e 2500 RPM; e as velocidades de soldagem foram 50 mm/min, 100 mm/min e 150 mm/min. Assim, as soldas foram obtidas e avaliadas através de ensaio mecânico de dobra e da análise macrográfica da seção transversal. Todas as ferramentas realizaram solda, porém, as ferramentas de aço inoxidável apresentaram defeitos menores ou não apresentaram defeitos em comparação com às ferramentas de aço 1045 e as ferramentas com pino facetado realizaram soldagem com menos imperfeições confrontando com às ferramentas de pino cônico utilizando os mesmos parâmetros de soldagem.”

Palavras-chave: Friction Stir Welding. Alumínio. Juntas sobrepostas.

ABSTRACT

The main aim of this work is to perform welding FSW (" Friction Stir Welding ") of overlapping aluminum sheets with different geometries of tools . The four types of tools were used : stainless steel tool with a tapered pin , stainless steel pin faceted tool , tool steel treated with tapered pin 1045 and 1045 steel treated with faceted tool pin. " The speeds of rotation of the tools used in the testing test samples were 1000 RPM , 1750 RPM and 2500 RPM, and the welding speed was 50 mm / min 100 mm / min and 150 mm / min. Thus , the welds were obtained and evaluated by mechanical bending test and macrographic analysis of cross section. All tools welding performed , however, stainless steel tools had lower defects and showed no defects compared to 1045 steel tools and tools with faceted pin welding performed with fewer imperfections confronting the tapered pin tools using the same parameters welding " .

Keywords: Friction Stir Welding. Aluminum. Lap joints.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de soldagem por FSW.....	12
Figura 2 - Representação esquemática do processo FSW.....	15
Figura 3 - Geometrias do ombro da ferramenta.....	17
Figura 4 - Geometrias do pino da ferramenta.....	18
Figura 5 - Tipos de juntas para o processo FSW.....	20
Figura 6 - Ferramenta FSW e variáveis geométricas relacionadas.....	21
Figura 7 - Fresadora universal Sanches Blanes.....	23
Figura 8 - Projeto sistema de fixação (a); detalhe do sistema de fixação fabricado (b).....	23
Figura 9 - Sistema de fixação sendo alinhado com a máquina.....	24
Figura 10 - (a) ferramenta de aço inóx facetada; (b) ferramenta de aço inóx cônica; (c) ferramenta de aço 1045 cônico; (d) ferramenta de aço 1045 facetada.....	25
Figura 11 - Vista superior dos corpos de prova soldados com diferentes ferramentas.....	26
Figura 12 - Vista superior dos corpos de prova soldados com diferentes velocidades de soldagem.....	27
Figura 13 - Vista superior dos corpos de prova soldados com diferentes rotações da ferramenta.....	28
Figura 14 - Amostra transversal dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço 1045 com pino cônico.....	29
Figura 15 - Amostra transversal dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço inoxidável com pino cônico.....	30
Figura 16 - Amostra transversal dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço inoxidável facetado.....	31
Figura 17 - Amostra transversal dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço 1045 facetado.....	32
Figura 18 - Ensaio de dobra dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço cônico.....	33
Figura 19 - Ensaio de dobra dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço 1045 facetado.....	34
Figura 20 - Ensaio de dobra dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço inoxidável cônico.....	35
Figura 21 - Ensaio de dobra dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço inoxidável com pino facetado.....	36

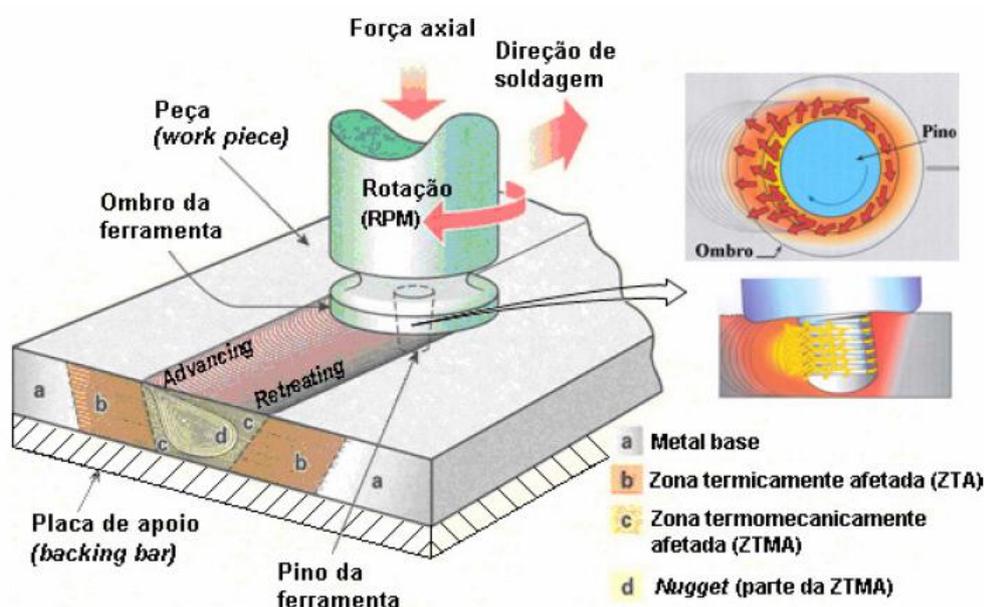
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1	SOLDAGEM POR FRICÇÃO (“ <i>FRICTION STIR WELDING</i> ”)	14
2.1.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO FSW	15
2.1.2	GEOMETRIA DA FERRAMENTA.....	16
2.1.3	MATERIAIS UTILIZADOS NO PROCESSO FSW	19
2.2	PARÂMETROS DO PROCESSO.....	19
3	METODOLOGIA.....	22
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	26
4.1	SOLDAGEM FSW	26
4.1.1	ANÁLISE MACROGRÁFICA	28
4.1.2	ENSAIO DE DOBRAMENTO	32
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39
ANEXO A	DESENHO DAS FERRAMENTAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

A busca por inovações nos processos de fabricação visando a diminuir o peso dos conjuntos, reduzir custos, diminuir ou eliminar impactos ambientais e melhorar as propriedades mecânicas dos materiais faz surgir novas técnicas de manufatura. Uma das técnicas, no campo da soldagem, que vem se destacando é o processo denominado FSW (“*Friction Stir Welding*”), que consiste na soldagem por fricção e mistura mecânica. Segundo Mishra e Ma apud Verástegui (2012), essa técnica foi desenvolvida em 1991 na Inglaterra, mais precisamente no “*The Welding Institute*” (TWI). A técnica consiste na união das peças no estado sólido, não ocorrendo a fusão dos materiais. Uma ferramenta cilíndrica, rotativa, não consumível de elevada resistência mecânica é utilizada para fazer a fricção das peças e promover calor, gerando, assim, a mistura mecânica dos materiais e realizando a soldagem. A Figura 1 representa a união de duas chapas pelo processo FSW.

Figura 1 - Processo de soldagem por FSW



Fonte: CRUZ e NETO, 2009 p.6.

Uma das vantagens do processo de soldagem FSW é a sua aplicabilidade no alumínio e suas ligas, que se destacam dos outros materiais devido a seu baixo peso específico e alta resistência mecânica de suas ligas. ABAL (2012) cita que o aumento da utilização das ligas de alumínio no setor aeronáutico e de transportes faz com que os processos de soldagem surjam como um ponto crítico do processo

de manufatura, pois as propriedades do metal acabam por se degradar quando ocorre a fusão do metal por isso o estudo da técnica de soldagem FSW é importante.

Este trabalho propõe realizar o processo FSW em uma fresadora universal adaptada para soldagem de chapas de alumínio sobrepostas a partir de ferramentas projetadas com diferentes geometrias. Este trabalho também contempla a realização de macrográfias das juntas soldadas e ensaios de dobramento das mesmas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Na revisão de literatura são abordados alguns conceitos fundamentais sobre o processo de soldagem “*Friction Stir Welding*” (FSW).

2.1 SOLDAGEM POR FRICÇÃO (“*FRICCTION STIR WELDING*”)

TWI Ltd. (2013) destaca que o processo Friction Stir Welding (FSW) foi inventado por Wayne Thomas na TWI Ltd, em 1991 e supera muitos dos problemas associados a técnicas tradicionais de união de peças. FSW é um processo de estado sólido que produz soldas de alta qualidade em materiais de que apresentam dificuldade para realizar o processo de soldagem convencional como, por exemplo, o alumínio. Conforme Dunkerton (1994), a união de materiais no estado sólido pode ser alternativa para os processos de solda por fusão. Metais que são difíceis de soldar e combinações de diferentes materiais podem ser soldados utilizando o processo no estado sólido. De acordo com Mishra e Ma apud Verástegui (2012) o processo FSW ameniza as distorções de chapas finas em relação a processos de soldagem convencionais, pois a união ocorre sem atingir o ponto de fusão do material.

Dixon (1994) define os processos de estados sólidos como aqueles nos quais é produzida a união das superfícies de atrito a temperatura menor que a de fusão do material sem inclusão de material ou metal de adição. As pressões podem ou não ser aplicadas. Estes processos envolvem difusão e deformação para produzir união de alta qualidade entre os dois materiais tanto materiais iguais ou diferentes.

De acordo com o trabalho desenvolvido por Ramos (2009), a área soldada é considerada uma camada de ligação, ou seja, a área efetiva de solda que suporta os esforços mecânicos da junta na seção transversal da solda. Quanto maior for a camada de ligação, maior será a resistência mecânica da junta da soldada.

O processo FSW possui vantagens se comparado com processos de soldagem tradicionais. TWI Ltd, (2013) apresenta as seguintes vantagens: baixo empenamento, mesmo em longos cordões de solda e tensões residuais pouco significativas; excelentes propriedades mecânicas em testes de fadiga, tração e flexão e composição química similar ao material base; sem respingos e ausência de porosidade; elimina geração de gases nocivos ao meio ambiente; opera em varias

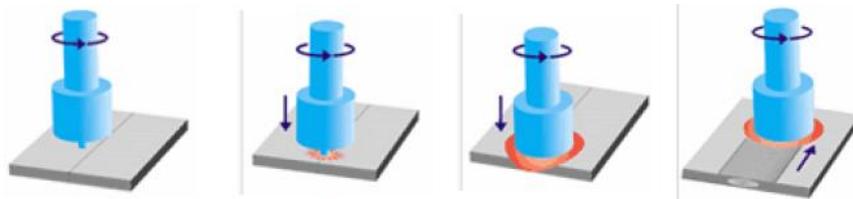
posições; pode soldar alumínio e cobre com espessura até 75 mm em um passe; permite soldar materiais com ponto de fusão diferente; não necessita de cuidados especiais como limpeza e desoxidação das peças.

Existem algumas desvantagens no processo. Capelari (2006) cita a necessidade de um rígido sistema de fixação para realizar o processo, presença de um furo no final da solda e dificuldade na soldagem de materiais de elevado ponto de fusão. A dificuldade de soldagem de materiais de elevado ponto de fusão acontece porque o calor é gerado pelo atrito da ferramenta com a peça. De acordo com Callister (2009) materiais de elevado ponto de fusão como, por exemplo, o aço de baixo carbono possui um ponto de fusão de 1410 °C.

2.1.1 Descrição do processo FSW

Com as peças a serem soldadas, fixas, uma ferramenta cilíndrica não consumível em rotação é inserido na junta até o contato do ombro da ferramenta com a superfície superior da junta gerando calor por meio de atrito. O pino da ferramenta é ligeiramente inferior à penetração desejada, penetrando na junta. O aquecimento resultante do atrito eleva a temperatura local até que o material entre no estado plástico e a ferramenta misture os materiais, unindo-os. Estabelecidas às condições termomecânicas adequadas, inicia-se o movimento linear ao longo do eixo de soldagem. O escoamento dos materiais em torno do eixo de soldagem promove a mistura no estado sólido dos materiais, originando a solda após o esfriamento do local (VERÁSTEGUI, 2012; MISHRA e MA, 2005; RODRIGUES et al, 2013] . A Figura 2 representa o princípio geral do processo FSW dividido em 4 partes.

Figura 2 - Representação esquemática do processo FSW.



Fonte: Rodriguez et al, 2013 P.4.

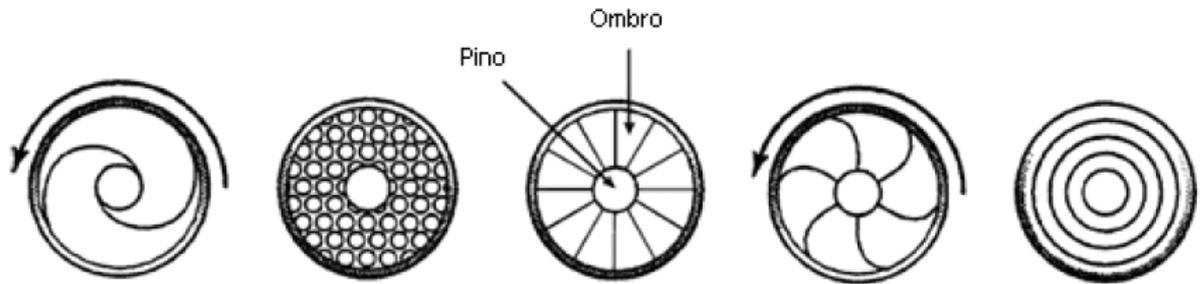
Leal e Loureiro (2004) definem que para a correta execução do processo é necessário uma fixação rígida das peças numa base de apoio, de modo a contrariar as elevadas forças de forjamento fornecidas pela ferramenta. As elevadas forças são aplicadas para o forjamento do material e deslocamento da base da ferramenta ao longo do material amaciado pelo calor, levando-o a um intenso desgaste da mesma.

2.1.2 Geometria da ferramenta

A relação entre a base/pino e sua relação de dimensões são os elementos chaves da geometria da ferramenta (KHALED, 2005; MISHRA e MA, 2005). De acordo com Mishra e Ma (2005) a geometria da base assume um papel extremamente importante no aquecimento e confinamento do volume de material aquecido. Esta pode ser plana, côncava ou convexa, lisa ou estriada. As bases cônicas, cuja concavidade é relativa a um pequeno ângulo entre periferia da base e o pino, permitem comparativamente às planas, um maior confinamento do material aquecido, atuando como volume de escape/reservatório do material ejetado pelo pino. As bases estriadas usualmente consistem numa superfície plana caracterizada por conter estrias concêntricas, ou em espiral, direcionadas desde a extremidade até ao centro. As referidas estrias encaminham o material desde a periferia da base até ao pino, eliminando assim a necessidade de um ângulo de ataque da ferramenta. Rebarba e reduções de espessura mais ténues ou inexistentes são outras características de soldagens obtidas com ferramentas de base estriada. As bases convexas lisas foram inicialmente encaradas pelo TWI como inadequadas para a produção de boas soldagens, pois, a sua forma encaminhava o material para longe do pino. Todavia, a presença de estrias nestas bases permite o direcionamento do material até o pino. Assim, a vantagem da utilização de bases convexas estriadas resulta da extremidade da ferramenta não necessitar de se encontrar em contato com o material, podendo a interface ser definida em qualquer local da superfície convexa. Esta geometria aumenta então a flexibilidade na área de contato entre a base e o material a soldar (SCHMIDT et al., 2004; FULLER, 2007; KHALED, 2005).

A Figura 3 ilustra algumas geometrias de ombro desenvolvidas junto ao TWI que melhoram o desempenho durante a soldagem.

Figura 3 - Geometrias do ombro da ferramenta.



Fonte: Mishra e Ma, 2005.

O pino pode ser cilíndrico ou cônico, liso ou roscado de extremidade plana ou convexa. Pode ainda possuir, ou não, facetamentos. Os pinos cônicos estão sujeitos, comparativamente com os cilíndricos, a menores esforços transversais e o maior momento de carga a que estão expostos está presente na base do cone, onde este apresenta maior resistência. Permitem então a soldagem de maiores espessuras a velocidades superiores. A presença de rosca na superfície dos pinos é responsável por aumentar o fenômeno de transporte vertical do material. Quanto às extremidades do pino, as planas possuem em relação às convexas maiores velocidades superficiais. As velocidades superficiais juntamente com o atrito existente entre o pino e o material realizam a deformação. Assim, os pinos de base plana têm maior capacidade em afetar o material que sobre ele se encontra. Todavia, bases convexas estão associadas a menor desgaste da ferramenta e à obtenção de soldagem com melhor qualidade da raiz. O objetivo do facetamento dos pinos consiste em aumentar localmente a deformação do material, produzindo fluxo metálico turbulento, preferível em juntas sobrepostas (FULLER, 2007; KHALED, 2005). Colligan et al apud Fuller (2007), concluíram que a redução das forças transversais e do momento a que a ferramenta se encontra sujeita é diretamente proporcional ao número de faces.

A Figura 4 representa três tipos de pino utilizados nas ferramentas para soldagem FSW e os detalhes dos ombros das ferramentas sendo a primeira um pino cônico, a segunda pino cônico com rosca e a terceira pino facetado.

Figura 4 - Geometrias do pino da ferramenta.



Fonte: Capelari, 2006, P.28.

De acordo com Fioravanti (2008) a ferramenta possui duas funções primárias que são aquecimento localizado e escoamento do material. Miyazaki (2009) comenta que caso o projeto ou o material da ferramenta não seja correto a solda tende a ser pobre.

Para escolher o material da ferramenta deve-se levar em conta as suas propriedades, segundo Miyazaki (2009) o material deve possuir: resistência a temperatura de trabalho; resistência ao desgaste; ductibilidade à fratura na temperatura ambiente e na temperatura de soldagem; boa performance a fluência; usinabilidade; possuir microestrutura estável; resistência à oxidação; preço razoável; curto tempo de fabricação.

De acordo com a literatura as dimensões básicas para uma ferramenta FSW são: diâmetro de pino similar à espessura da chapa a ser soldada; comprimento do pino deve ser um pouco inferior a espessura da chapa a ser soldada; diâmetro do ombro da ferramenta deve corresponder a 3 vezes o diâmetro maior do pino. CAPELARI, (2006).

Miyazaki (2009) cita alguns materiais utilizados na fabricação das ferramentas, tais como: os aços ferramentas, WC-Co, PCBN, metais refratários, ligas de cobalto, ligas de níquel, ligas de tungstênio, aços inoxidáveis e cerâmicos. A ferramenta pode ser revestida para melhorar sua performance destacando o revestimento de nitreto de titânio que apresenta ganhos consideráveis.

2.1.3 Materiais utilizados no processo FSW

Na soldagem por atrito FSW é fundamental que a temperatura do processo não exceda os 80% da temperatura de fusão do material (KHANDKAR et al., 2003). Os materiais que se destacam são o alumínio e suas ligas, magnésio, cobre, bronze e zinco.

ALUMÍNIO: de acordo com Callister (2009) o alumínio e suas ligas são caracterizados por uma densidade relativa baixa de $2,7 \text{ g/cm}^3$, em comparação com uma densidade de $7,9 \text{ g/cm}^3$ para o aço. O alumínio metálico obtido no processo de redução tem 99,7% de pureza e passa por adição de elementos de elementos como ferro, silício, manganês, magnésio, entre outros para composição. A principal limitação do alumínio está na sua baixa temperatura de fusão que é de 660°C o que restringe a temperatura máxima em que o alumínio pode ser utilizado.

MAGNÉSIO: o magnésio tem tido papel importante em aplicação onde se busca a redução de peso de estruturas. Aliada sua baixa densidade e boa resistência mecânica tem alto coeficiente de expansão térmica ($28 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ na faixa de $20\text{--}300^\circ\text{C}$). O ponto de fusão magnésio é de 649°C , e densidade de $1,74 \text{ g/cm}^3$.

COBRE: A soldabilidade varia conforme a pureza do cobre. Temperatura de fusão de aproximadamente 1083°C e a densidade é de $8,94 \text{ g/cm}^3$.

BRONZE: o bronze é um conjunto de ligas metálicas que tem o cobre como base. A adição de outros elementos, além do cobre, como: estanho, zinco, alumínio, antimônio, fósforo, permite ao Bronze alcançar a característica de ser mais resistente. O Cobre isolado não garante as propriedades adquiridas pela junção de vários metais. Possui as vantagens de ser um material não corrosivo e de fácil manuseio, podendo ser polido e trabalhado com facilidade, seu ponto de fusão é de 930°C e a Densidade à 20°C : de $9,2 \text{ g/cm}^3$

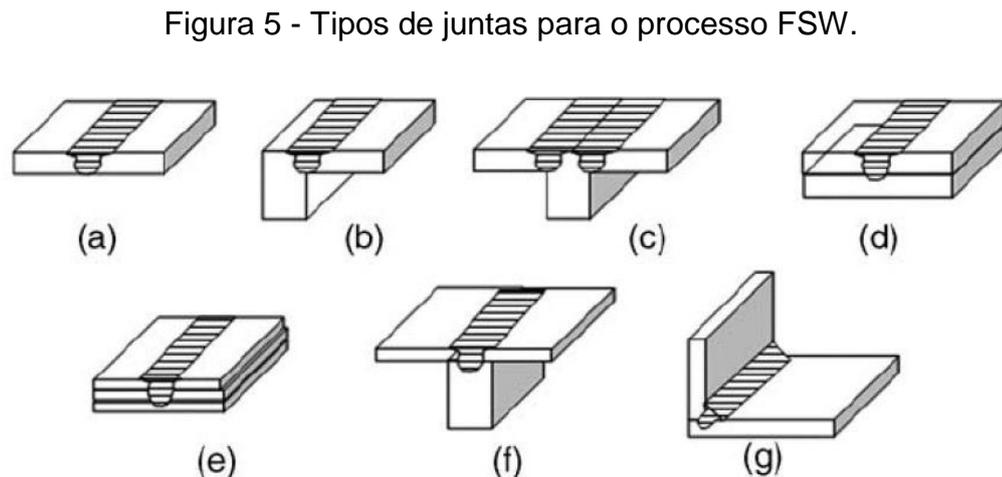
ZINCO: o zinco puro é um metal branco-azulado, com um ponto fusão de 419°C . É usado em liga com cobre, e também para recobrir o ferro (galvanizado) numa liga com 1% de cobre e 0,1% de titânio, como em coberturas de telhados.

2.2 PARÂMETROS DO PROCESSO

Conforme Mishra e Ma (2005) além da geometria da ferramenta os parâmetros de soldagem são os fatores mais determinantes para o processo de

FSW. Capelari (2006) cita alguns fatores que influenciam no escoamento do material no processo FSW e, conseqüentemente, na qualidade da solda, os quais são: tipo de junta; velocidade de rotação da ferramenta; velocidade de soldagem (ou avanço da ferramenta); inclinação da ferramenta; profundidade de penetração do pino (força).

Tipo de junta: As configurações mais comuns são juntas de topo e sobrepostas. Outros tipos de juntas como juntas em T também são possíveis quando necessário para a engenharia. É importante salientar que duas placas limpas podem ser unidas sem qualquer tipo de preparação. Esse processo pode ser aplicado em componentes curvos e tubulares. Conforme, Rodrigues et al (2013) , Cruz e Neto (2009). A figura 5 representa juntas do tipo (a) topo simples, (b) topo de aresta, (c) topo T, (d) junta sobreposta, (e) junta sobreposta múltipla, (f) junta sobreposta T, (g) junta de filete.



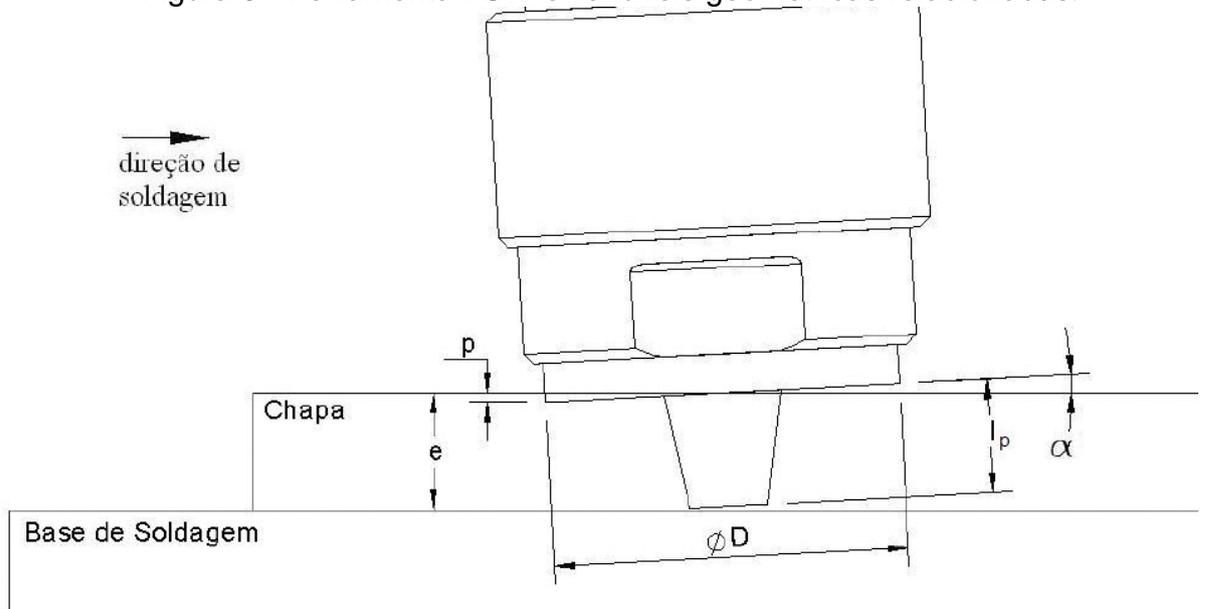
Fonte: Cruz e Neto, 2009, P.7.

Velocidade de rotação: A velocidade de rotação está diretamente ligada à geração de calor pelo atrito, quanto maior a rotação maior será o calor gerado. O aumento de temperatura favorece a movimentação do material plastificado. Tang apud Mishra e Ma (2005) indica que devido ao coeficiente de atrito há um limite na rotação e que outros parâmetros devem ser modificados para obtenção de condições favoráveis de soldagem. Capelari (2006) comenta que informações de experimentos anteriores indicam que velocidades adequadas para uma ferramenta fabricada com aço AISI H13 variam de 600 a 1000 RPM. Para ferramentas fabricadas com diferentes materiais as velocidades serão diferentes.

Velocidade de soldagem: A velocidade tem relação direta com a geração de calor durante a soldagem, quanto menor a velocidade, maior o calor gerado no processo. As escolhas de valores neste parâmetro influenciam nas propriedades mecânicas e microestrutura resultante conforme Peel e Renck apud Capelari (2006).

Inclinação da ferramenta: Conforme Kumar, K. e Kailas, S. V. (2008), o ângulo de ataque da ferramenta e a superfície das chapas a soldar, referem que a inclinação adequada do eixo da ferramenta, para a retaguarda, assegura que a base o direcione eficientemente da frente para trás do pino o material por este movimento. Este ângulo não é usualmente necessário em caso de ferramentas com base estriada. A Figura 6 representa um desenho esquemático da ferramenta inclinada.

Figura 6 - Ferramenta FSW e variáveis geométricas relacionadas.



Fonte: Capelari, 2006, P.21.

Penetração do pino: Segundo Capelari (2006) a penetração define a pressão que é exercida sobre o material na parte posterior da ferramenta durante a soldagem, quando o pino é muito longo o ombro da ferramenta não entra em contato diminuindo a temperatura e a pressão de contato resultando em soldas defeituosas, porém se o pino é curto a penetração do ombro na peça será excessiva e gerará rebarba. Na Figura 6 pode-se ver uma penetração ideal da ferramenta na peça a ser soldada.

3 METODOLOGIA

Após preparar os corpos de prova de alumínio 5056 H18 com a dimensão final 150mm x 50 mm x 2 mm foi instalado o sistema de fixação na fresadora. Foi variado quatro ferramentas de soldagem: cônica 1045, facetada 1045, cônica inóx 304 L , facetada inóx 304 L; e foi definido os parâmetros através de pré testes realizados na máquina considerando apenas o aspecto visual dos corpos de prova resultando em três velocidades de rotação: 1000 RPM, 1750 RPM , 2500 RPM e três velocidades de soldagem : 50 mm/min, 100 mm/min, 150 mm/min. Um total de 36 corpos de prova foram produzidos utilizando os parâmetros conforme Tabela 1.

Tabela 1 Parâmetros de soldagem dos corpos de prova.

Corpo de prova	Velocidade de rotação (RPM)	Velocidade de soldagem	Penetração do pino	Material – Tipo de ferramenta
01	1000	100	3,65	Aço 1045 - cônico
02	1000	100	3,7	Aço inóx - facetada
03	1750	150	3,6	Aço inóx - cônico
04	1000	150	3,6	Aço inóx - facetada
05	2500	50	3,75	Aço 1045 - cônico
06	1000	150	3,7	Aço 1045 - facetado
07	1000	100	3,7	Aço 1045 - facetado
08	2500	50	3,6	Aço inóx - cônico
09	2500	150	3,7	Aço 1045 - facetado
10	2500	150	3,6	Aço inóx - cônico
11	1000	50	3,6	Aço inóx - cônico
12	2500	100	3,7	Aço 1045 - facetado
13	1000	50	3,7	Aço 1045 - facetado
14	1750	100	3,7	Aço inóx - facetada
15	2500	100	3,6	Aço inóx - cônico
16	2500	100	3,75	Aço 1045 - cônico
17	1000	50	3,7	Aço inóx - facetada
18	1750	50	3,7	Aço 1045 - facetado
19	2500	50	3,7	Aço 1045 - facetado
20	1750	100	3,6	Aço inóx - cônico
21	1750	50	3,75	Aço inóx - facetada
22	1750	100	3,7	Aço 1045 - facetado
23	1750	50	3,75	Aço 1045 - cônico
24	1750	100	3,75	Aço 1045 - cônico
25	1750	150	3,75	Aço inóx - facetada
26	1000	50	3,7	Aço 1045 - cônico
27	1750	150	3,7	Aço 1045 - facetado
28	1750	50	3,6	Aço inóx - cônico
29	2500	150	3,75	Aço 1045 - cônico
30	1000	150	3,6	Aço inóx - cônico
31	2500	100	3,75	Aço inóx - facetada
32	1000	150	3,75	Aço 1045 - cônico
33	2500	50	3,75	Aço inóx - facetada
34	1000	100	3,6	Aço inóx - cônico
35	2500	150	3,75	Aço inóx - facetada
36	1750	150	3,75	Aço 1045 - cônico

As ferramentas fabricadas com aço 1045 foram tratadas termicamente através de têmpera para aumentar sua dureza que passou para 55 HRC (Dureza Rockwell) e consequentemente aumentou a resistência ao desgaste.

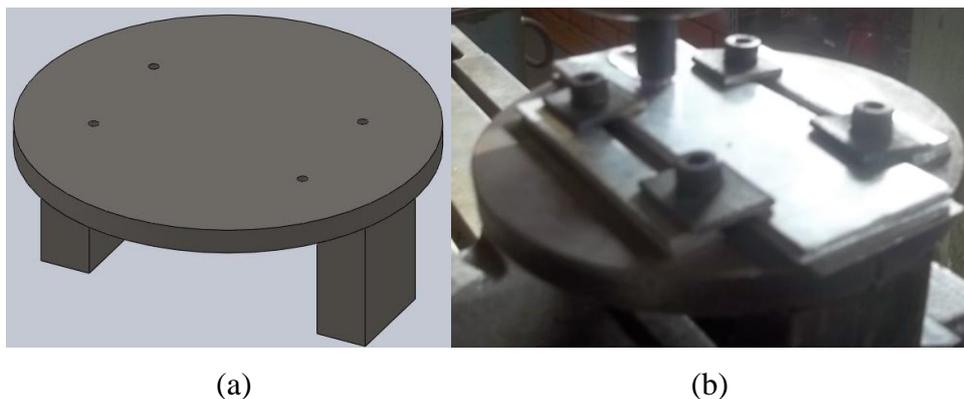
A soldagem das chapas utilizando o método FSW, realizou-se no laboratório de usinagem da FAHOR – FACULDADE HORIZONTALINA que disponibilizou uma fresadora universal marca Sanches Blanes modelo FHIIA ano 1998 conforme Figura 7, para ser adaptada para o processo de soldagem.

Figura 7 - Fresadora universal Sanches Blanes.



O sistema de fixação das chapas na fresadora pode ser visualizado através da Figura 8, para melhor o set-up na troca dos conjuntos soldados, foram soldados 4 porcas necessitando soltar apenas 4 parafusos M5. O sistema precisa ser extremamente rígido para garantir a qualidade e acabamento da solda neste processo.

Figura 8 - Projeto sistema de fixação (a); detalhe do sistema de fixação fabricado (b).



(a)

(b)

Para garantir a perpendicularidade em relação à ferramenta foi utilizado um relógio comparador marca Mitutoyo conforme Figura 9.

Figura 9 - Sistema de fixação sendo alinhado com a máquina.



As ferramentas têm características dimensionais baseadas na revisão de literatura, a qual cita que o diâmetro maior do pino deve ser igual a espessura da chapa soldada, o comprimento do pino deve ser ligeiramente inferior a espessura da chapa soldada e o diâmetro do ombro deve corresponder a três vezes o diâmetro maior do pino. A Tabela 2 apresenta detalhes dimensionais das ferramentas de soldagem.

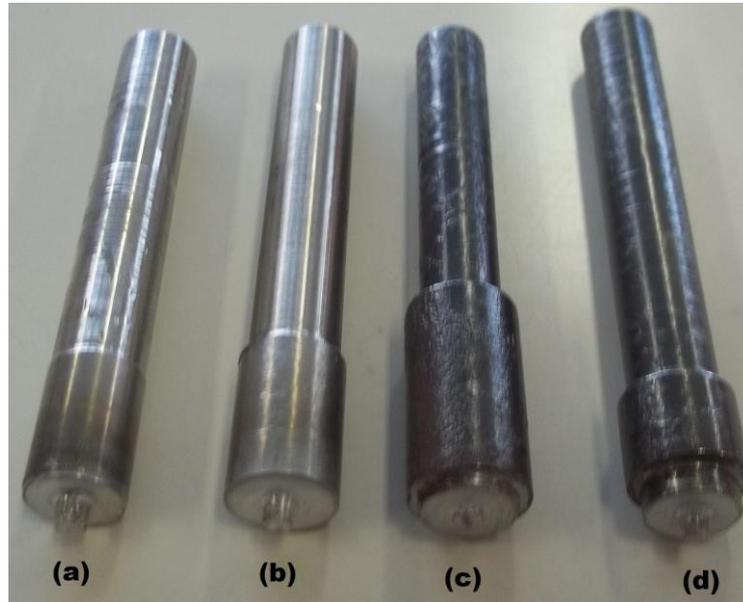
Tabela 2 - Detalhes dimensionais das ferramentas.

Ferramenta	Comprimento do pino (mm)	Ø do pino (mm)	Geometria do ombro	Ø do ombro (mm)	Observações
A – cônica – aço 1045	3,75	4	Liso - reto	12	Inclinação 10°
B – facetada – aço 1045	3,75	4	Liso - reto	12	120° entre faces
C – cônica – aço inox 304 L	3,7	4	Liso - reto	12	Inclinação 10°
D – facetada – aço inox 304 L	3,7	4	Liso - reto	12	120° entre faces

Para a soldagem foi fabricado quatro ferramentas, pino cônico usinada em aço inoxidável 304 L sem tratamento térmico, pino facetado usinada em aço inoxidável 304 L, pino cônico usinada em aço 1045 com tratamento térmico e pino facetado usinado em aço 1045 com tratamento térmico. A Figura 10 apresenta as ferramentas

projetadas. As características dimensionais das ferramentas são encontradas no anexo 1.

Figura 10 - (a) ferramenta de aço inóx facetada; (b) ferramenta de aço inóx cônica; (c) ferramenta de aço 1045 cônica; (d) ferramenta de aço 1045 facetada.



As macrográfias e ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Metalografia e Ensaios Mecânicos com equipamentos disponibilizados pela FAHOR – Faculdade Horizontina.

Os corpos de prova foram cortados com uma cortadora metalográfica AROTEC COR-40 com refrigeração. O embutimento das amostras para análise macrográfica foi realizado em uma prensa embutidora. As amostras foram lixadas com uma lixadeira politriz AROTEC APL-4 até ser possível realizar o ataque químico.

As macrográfias dos corpos de prova foram realizadas de acordo com a NBR 8108/83 – Ataque com reativos metalográficos em ligas ferrosas, que fixa as condições exigíveis para o ataque com reativos metalográficos aplicado em exames macrográficos de ligas ferrosas.

Foram preparados corpos de prova para o ensaio de dobramento de acordo com a NBR 6153/88 – Ensaio de dobramento, que prescreve o método para ensaio de dobramento de produtos metálicos com espessura superior a 0,2 mm. As chapas foram submetidas ao dobramento em 90°.

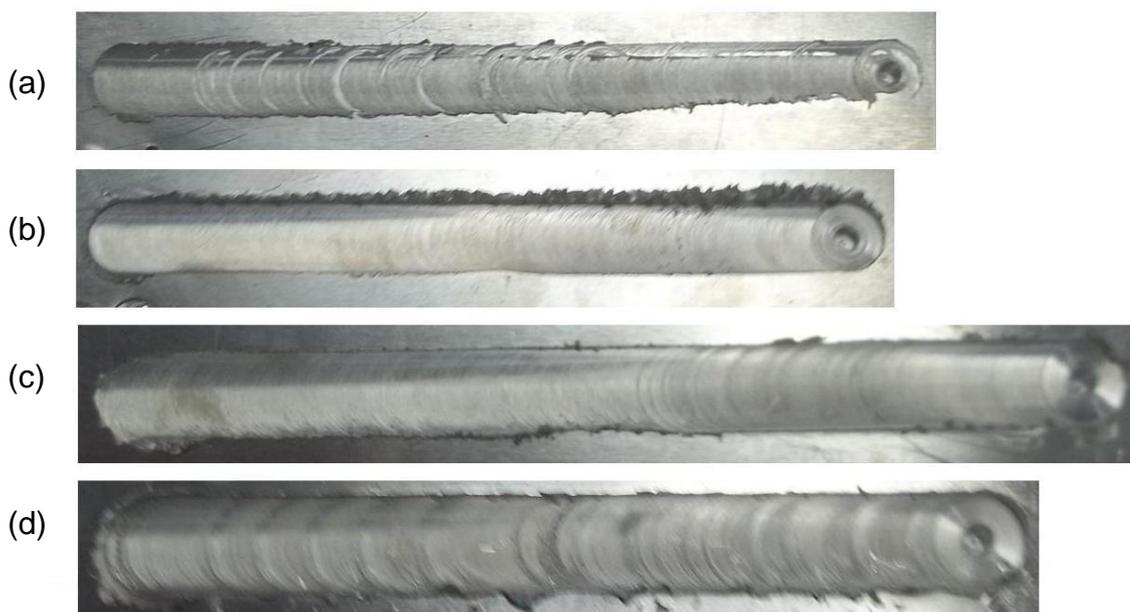
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 SOLDAGEM FSW

Definidos os parâmetros conforme a Tabela 1 e testado as ferramentas de soldagem, foram realizados as soldas nos corpos de prova para avaliação da qualidade da solda, variando velocidade de rotação, velocidade de soldagem e tipo de ferramenta. As chapas foram soldadas em temperatura ambiente.

No aspecto visual os corpos de prova não apresentaram falhas, houve pequenas variações, pois o acabamento da solda é sensível à variação de penetração do pino. O aspecto visual obtido pelas quatro ferramentas utilizando a velocidade de rotação da ferramenta de 1000 RPM e velocidade de soldagem de 100 mm/min é apresentado na Figura 11, sendo (a) corpo de prova 01 soldado com ferramenta de aço 1045 com pino cônico; (b) corpo de prova 02 soldado com ferramenta de aço inoxidável de pino facetado; (c) corpo de prova 07 soldado com ferramenta de aço 1045 de pino facetado; (d) corpo de prova 34 soldado com ferramenta de aço inoxidável de pino cônico.

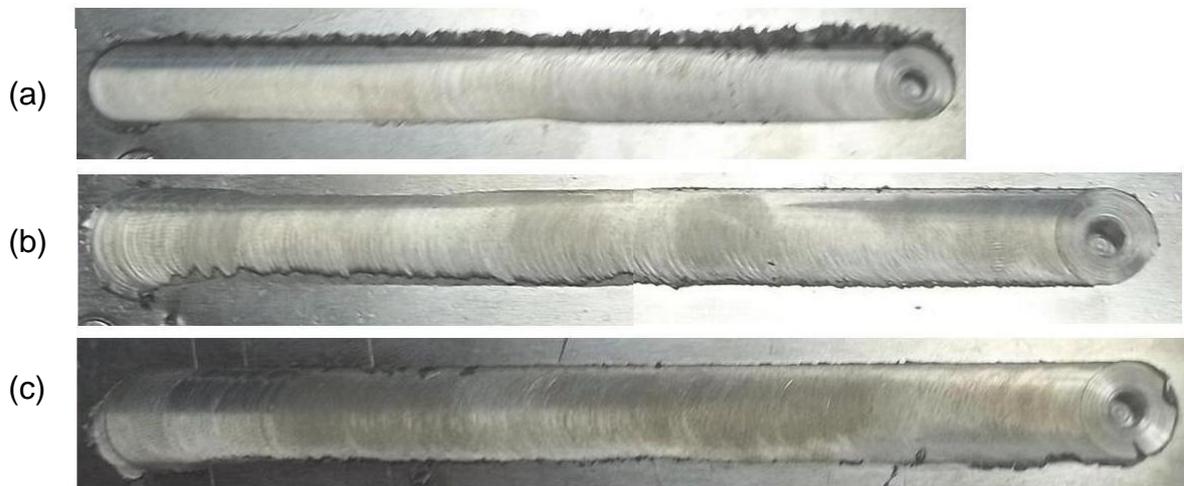
Figura 11 - Vista superior dos corpos de prova soldados com diferentes ferramentas.



Utilizando mesmos parâmetros os cordões apresentaram um melhor acabamento com as ferramentas de pino facetado em relação às ferramentas de pino cônico.

Na Figura 12 observam-se os acabamentos dos cordões de solda soldados com a mesma ferramenta (ferramenta de aço inóx de pino cônico) e velocidade de rotação da ferramenta (1000 RPM) variando apenas a velocidade de soldagem sendo (a) corpo de prova 02 soldado com velocidade de 100 mm/min, (b) corpo de prova 04 soldado com velocidade de 150 mm/min, (c) corpo de prova 17 soldado com velocidade de 50 mm/min.

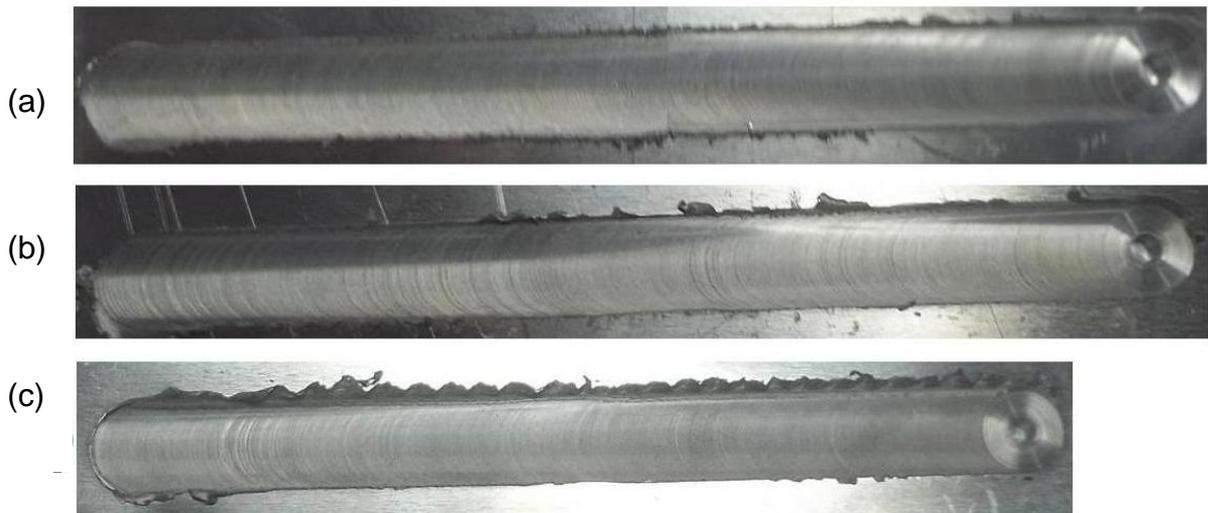
Figura 12 - Vista superior dos corpos de prova soldados com diferentes velocidades de soldagem.



Pode-se observar com clareza que a variação de penetração da ferramenta gera resultados distintos no acabamento, em relação à diferença de velocidade não apresentou diferenças no aspecto visual do cordão de solda.

A diferença obtida pela variação de velocidade de rotação da ferramenta pode-se observar na Figura 13 onde foi utilizada a mesma ferramenta (ferramenta de aço 1045 de pino facetado), a mesma velocidade de soldagem (50mm/min) variando apenas a rotação da ferramenta, sendo (a) corpo de prova 13 soldado com uma rotação da ferramenta de 1000 RPM; (b) corpo de prova 18 soldado com uma rotação da ferramenta de 1750 RPM; (c) corpo de prova 19 soldado com uma rotação da ferramenta de 2500 RPM.

Figura 13 - Vista superior dos corpos de prova soldados com diferentes rotações da ferramenta.



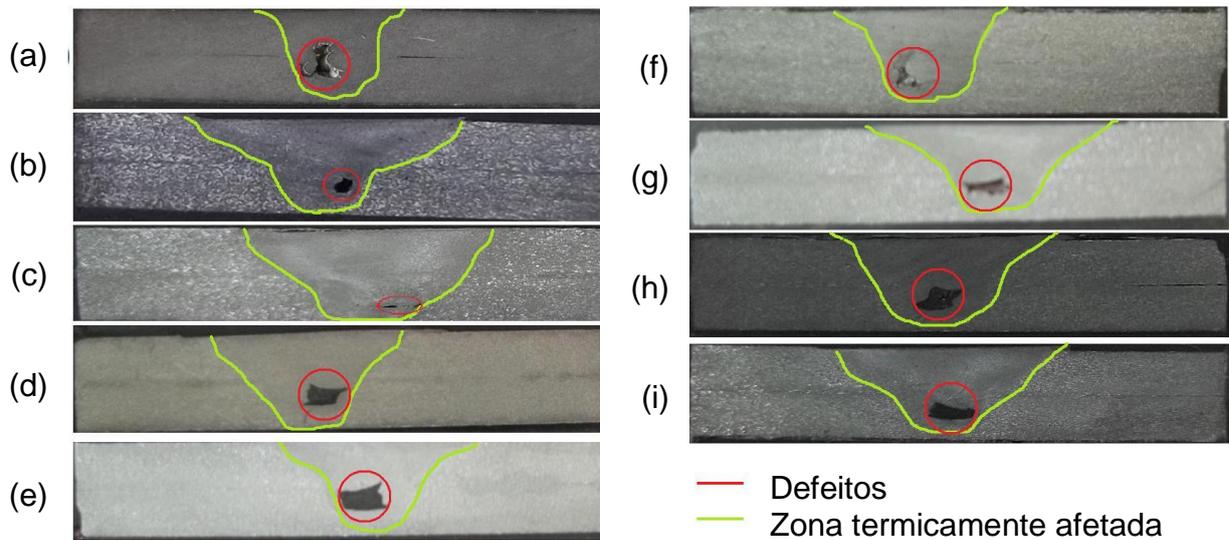
Os cordões obtiveram um acabamento equivalente entre eles e visualmente bom. A quantidade de rebarba da solda difere apenas pela diferença de penetração da ferramenta na peça.

4.1.1 Análise Macrográfica

Cada corpo de prova soldado teve uma amostra da seção transversal do cordão de solda para observação macrográfica das possíveis descontinuidades ocorridas devido a variações e efeitos dos parâmetros de soldagem. A penetração da solda ficou incompleta devido aos pinos das ferramentas serem $\sim 0,3$ mm menores que a espessura das duas chapas sobrepostas.

A Figura 14 mostra a análise macrográfica feita com os corpos de prova soldados com ferramenta de aço 1045 com pino cônico onde: (a) corresponde ao corpo de prova 01, (b) corresponde ao corpo de prova 05, (c) corresponde ao corpo de prova 16, (d) corresponde ao corpo de prova 23, (e) corresponde ao corpo de prova 24, (f) corresponde ao corpo de prova 26, (g) corresponde ao corpo de prova 29, (h) corresponde ao corpo de prova 32; (i) corresponde ao corpo de prova 36.

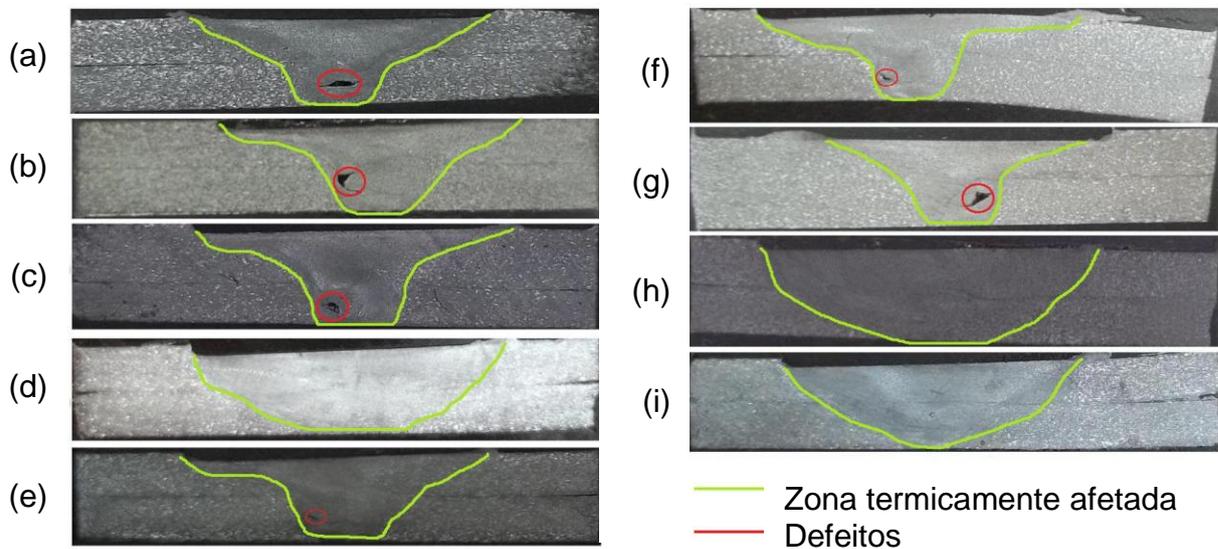
Figura 14 - Amostra transversal dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço 1045 com pino cônico.



Na Figura 14 pode-se observar grandes discontinuidades em todos os corpos de prova embora a penetração da ferramenta tenha sido completa, sendo o melhor resultado na imagem (c) que corresponde ao corpo de prova 16, no qual foi utilizado uma rotação de 2500 rpm e um avanço de 100 mm/min. A falta da inclinação da ferramenta em relação ao corpo de prova pode ter gerado estas discontinuidades.

A Figura 15 mostra a análise macrográfica feita com os corpos de prova soldados com ferramenta de aço inoxidável com pino cônico onde: (a) corresponde ao corpo de prova 03, (b) corresponde ao corpo de prova 08, (c) corresponde ao corpo de prova 10, (d) corresponde ao corpo de prova 11, (e) corresponde ao corpo de prova 15, (f) corresponde ao corpo de prova 20, (g) corresponde ao corpo de prova 28, (h) corresponde ao corpo de prova 30; (i) corresponde ao corpo de prova 34.

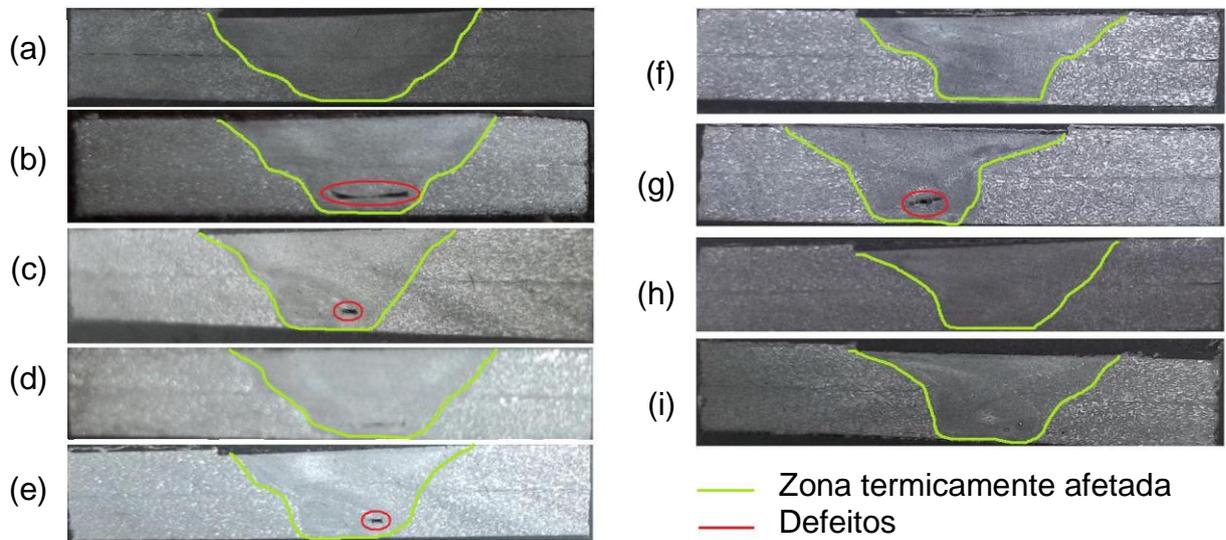
Figura 15 - Amostra transversal dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço inoxidável com pino cônico.



Na Figura 15 observa-se que a ferramenta de aço inóx cônico apresentou uma soldagem mais completa ocorrendo falhas menores ou até mesmo livre de falhas como nos corpos de prova 11, 30 e 34 que possuem em comum o fato de terem sido soldadas com a ferramenta a uma rotação de 1000 rpm apresentando-se assim como a rotação ideal para realizar a soldagem para esta ferramenta, uma rotação superior gera muito calor que apesar de ser bom para a movimentação do material plastificado altera o coeficiente de atrito do material e gera imperfeições.

A Figura 16 demonstra a análise macrográfica realizada com os corpos de prova soldados com uma ferramenta de aço inoxidável com pino facetado onde: (a) corresponde ao corpo de prova 02, (b) corresponde ao corpo de prova 04, (c) corresponde ao corpo de prova 14, (d) corresponde ao corpo de prova 17, (e) corresponde ao corpo de prova 21, (f) corresponde ao corpo de prova 25, (g) corresponde ao corpo de prova 31, (h) corresponde ao corpo de prova 33; (i) corresponde ao corpo de prova 35.

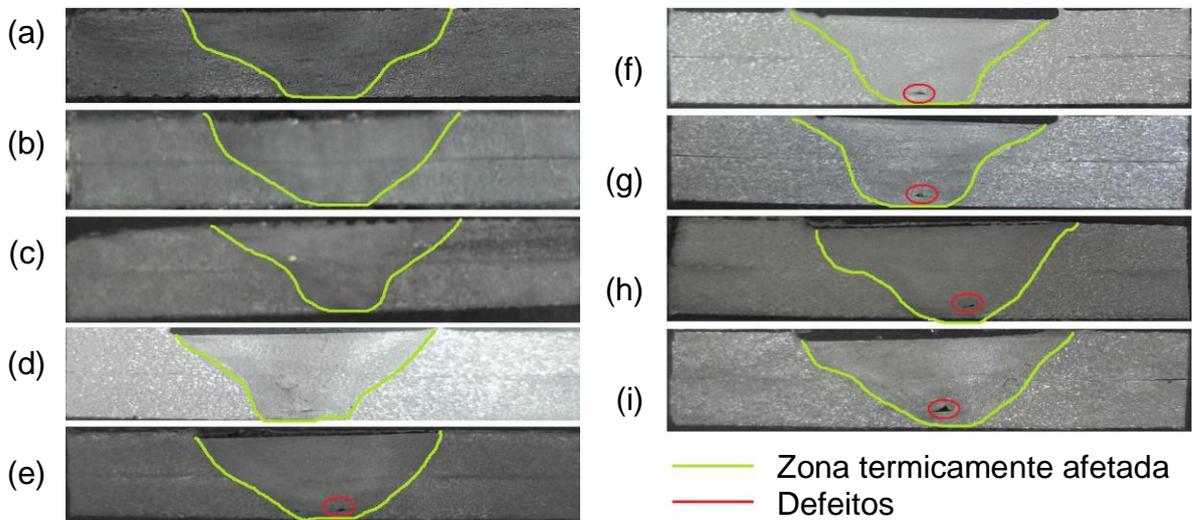
Figura 16 - Amostra transversal dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço inoxidável facetado.



Na Figura 16, apenas os corpos de prova 04, 14, 21 e 31 apresentaram pequenas falhas, em comum nestes corpos de prova apenas o fato de todos os corpos de prova que foram soldados a uma velocidade de 50 mm/min não apresentarem falhas, porém o corpo de prova (02) soldado com velocidade de rotação da ferramenta de 1000 RPM e velocidade de soldagem de 100 mm/min e o corpo de prova (35) soldado com velocidade de rotação da ferramenta de 2500 RPM e velocidade de soldagem de 150 mm/min também não apresentaram falhas.

A Figura 17 mostra a análise macrográfica realizada com os corpos de prova soldados com uma ferramenta de aço 1045 com pino cônico onde: (a) corresponde ao corpo de prova 06, (b) corresponde ao corpo de prova 07, (c) corresponde ao corpo de prova 09, (d) corresponde ao corpo de prova 12, (e) corresponde ao corpo de prova 13, (f) corresponde ao corpo de prova 18, (g) corresponde ao corpo de prova 19, (h) corresponde ao corpo de prova 22; (i) corresponde ao corpo de prova 27.

Figura 17 - Amostra transversal dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço 1045 facetado.



A Figura 17 evidencia que as ferramentas de pino facetado tiveram um desempenho superior as de pino cônico, sendo que houve pequenas falhas nos corpos de prova 13, 18, 19 e 27, tendo como padrão as soldas com avanço de 50 mm/min apresentando falhas.

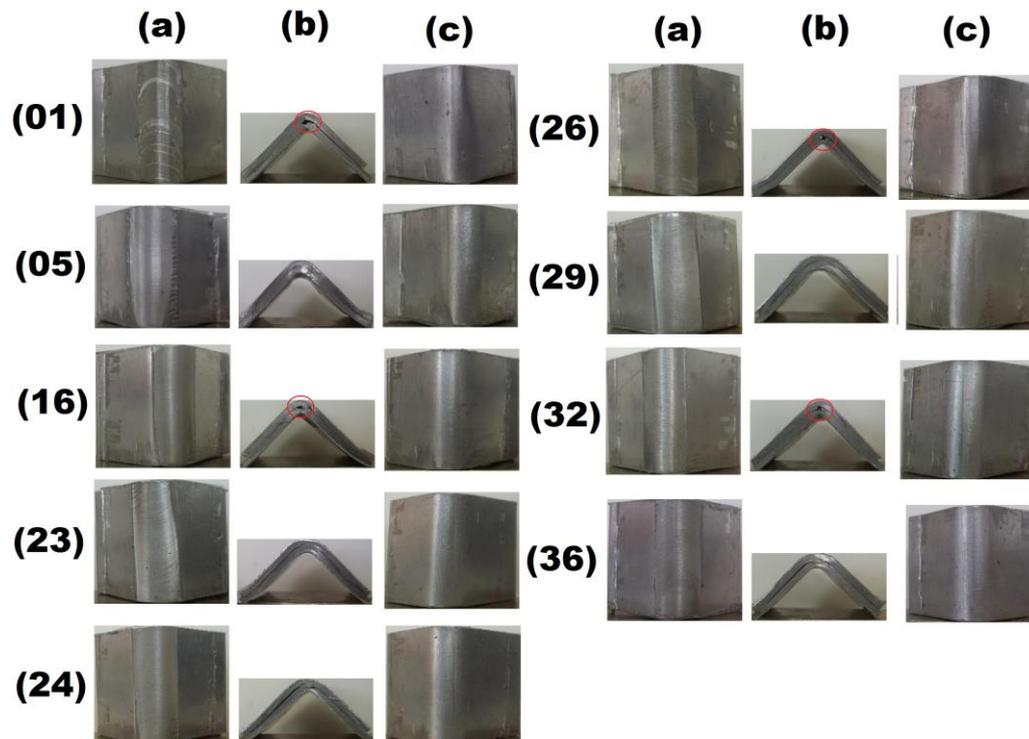
Os resultados das análises macrográficas mostram que uma rotação da ferramenta de 1000 RPM é suficiente para a soldagem de alumínio pelo processo FSW, a velocidade de soldagem que apresenta melhores resultados são para as ferramentas de aço inoxidável de 50 mm/min e para as ferramentas de aço 1045 de 100 mm/min, isso se deve a diferença de geração de calor que cada um dos materiais das ferramentas possui.

4.1.2 Ensaio de dobramento

O ensaio de dobramento destina-se a revelar defeitos presentes na solda e a ductibilidade do material. Os corpos de prova foram preparados para o ensaio de dobramento conforme NBR6153/88. Os corpos foram submetidos a um dobramento de 90° na raiz e na face para verificação de falhas ou trincas. Convém ressaltar que os corpos de prova sofreram um processo de abrasão mecânica a fim de eliminar arestas.

A Figura 18 apresenta os corpos de prova submetidos aos ensaios de dobramento sendo: (a) dobramento da face da solda; (b) vista lateral do dobramento; (c) dobramento da raiz da solda.

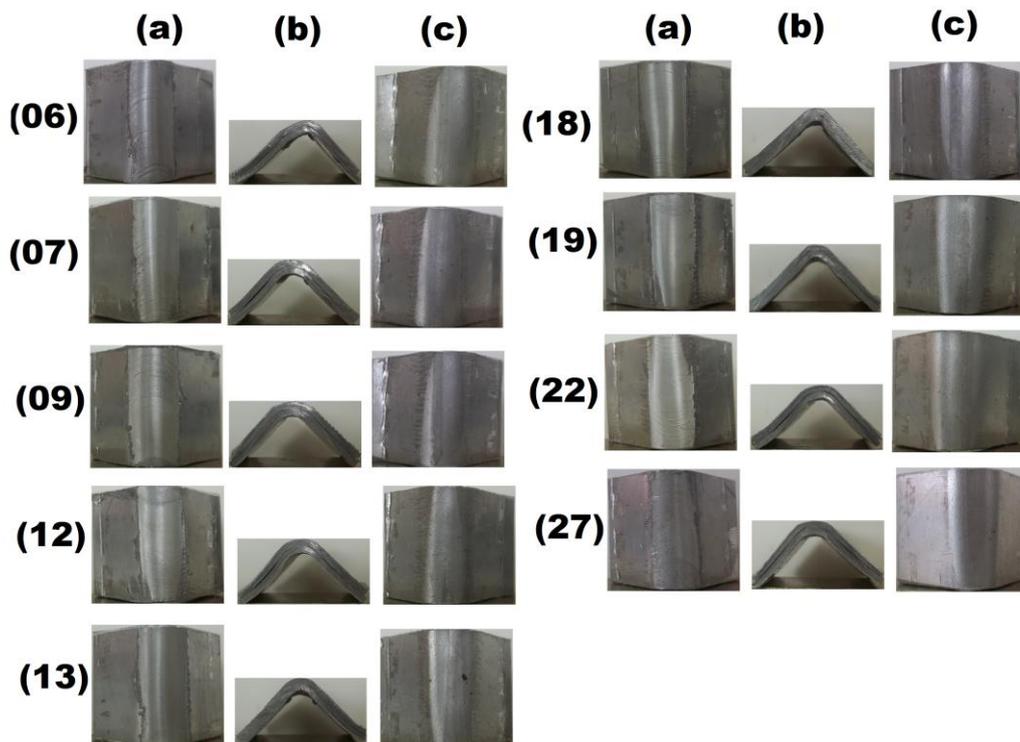
Figura 18 - Ensaio de dobra dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço cônico.



Os corpos de prova 01, 16, 26 e 32 apresentaram vazios no interior da solda indicando que a soldagem com a ferramenta de aço 1045 cônico tem pouca qualidade utilizando estes parâmetros, mas no que se refere ao ensaio de dobramento não houve rupturas, trincas ou fissuras no dobramento de face e de raiz da solda. Os corpos de prova que apresentaram defeitos tem em comum o fato de serem soldadas com uma velocidade de 100 mm/min. A presença de defeitos internos não levou a ruptura prematura dos corpos de prova ensaiados.

A Figura 19 apresenta os ensaios de dobra para os corpos de prova onde: (a) dobramento da face da solda; (b) vista lateral do dobramento; (c) dobramento da raiz da solda.

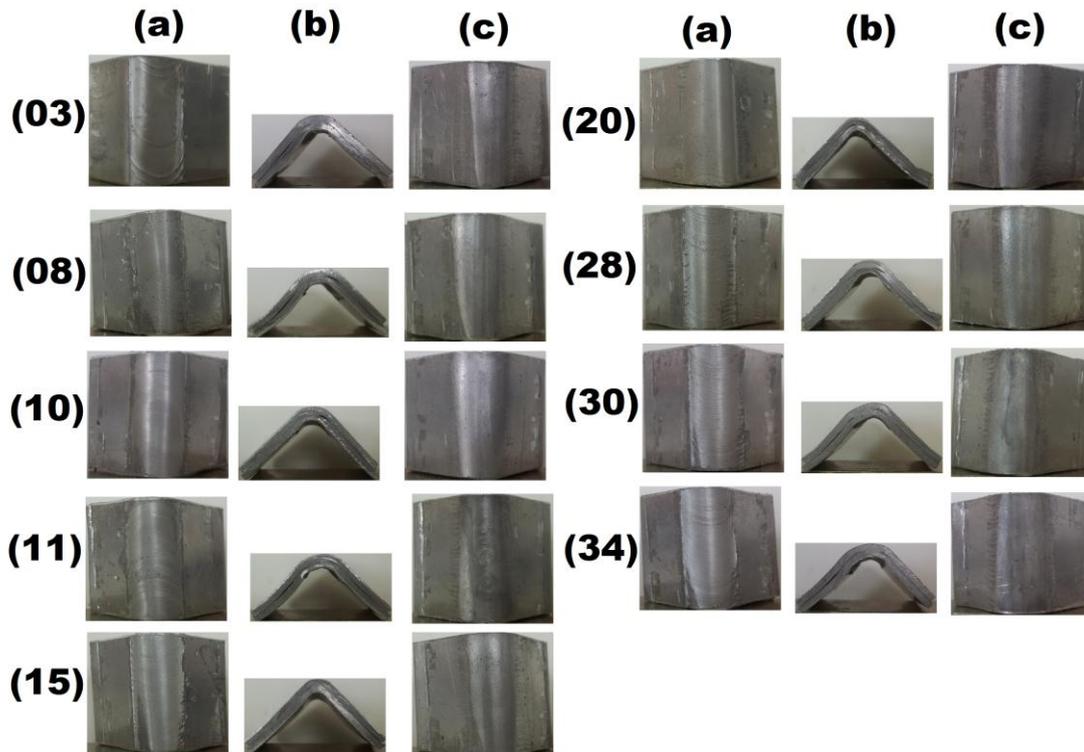
Figura 19 - Ensaio de dobra dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço 1045 facetado.



Os corpos de prova não apresentaram falhas, fissuras ou trincas na superfície externa suportando assim um dobramento de raiz e de face em 90° indicando que a ferramenta de aço 1045 facetado faz a soldagem com qualidade utilizando estes parâmetros.

Na figura 20 são mostrados os ensaios de dobra da ferramenta de aço inox cônico sendo: (a) dobramento da face da solda; (b) vista lateral do dobramento; (c) dobramento da raiz da solda.

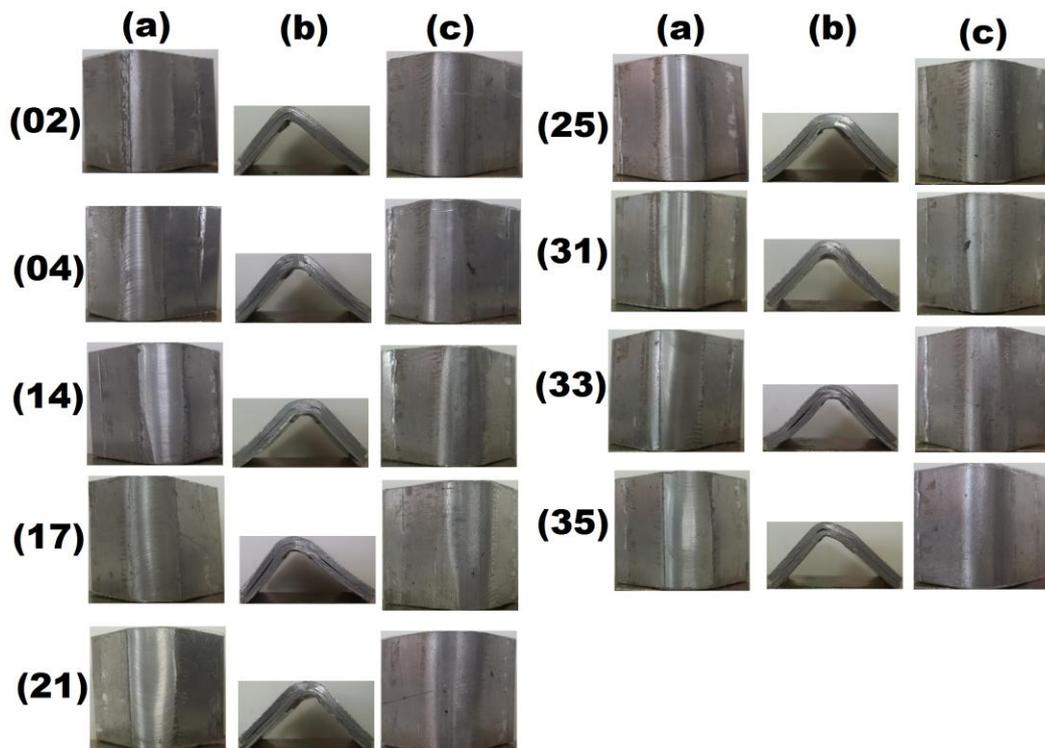
Figura 20 - Ensaio de dobra dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço inoxidável cônico.



Os corpos de prova não apresentaram trincas, falhas ou fissuras na superfície externa do corpo de prova durante o ensaio de dobra indicando que a ferramenta de aço inoxidável cônico faz a soldagem com qualidade utilizando estes parâmetros.

A Figura 21 apresenta os resultados da ferramenta de aço inoxidável facetado sendo: (a) dobramento da face da solda; (b) vista lateral do dobramento; (c) dobramento da raiz da solda.

Figura 21 - Ensaio de dobra dos corpos de prova soldados com ferramenta de aço inoxidável com pino facetado



Os corpos de prova não apresentaram falhas, trincas ou fissuras tanto no dobramento de raiz como no dobramento de face indicando que a ferramenta de aço inoxidável com pino facetado faz a soldagem com qualidade utilizando estes parâmetros.

Nestes ensaios pode-se comprovar que a ferramenta de aço inoxidável tem desempenho superior a ferramenta de aço 1045 tratado e a ferramenta de pino facetado tem desempenho superior ao desempenho da ferramenta de pino cônico utilizando estes parâmetros de soldagem. Todos os corpos de prova ensaiados não apresentaram trincas, fissuras ou falhas na superfície externa da dobra.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os experimentos, ensaio de dobra e análise metalográfica pode-se concluir que:

Foi realizada a soldagem de chapas sobrepostas de alumínio pelo processo FSW com os quatro diferentes tipos de ferramentas.

As ferramentas de aço inoxidável apresentaram um baixo nível de defeitos comparando com as ferramentas de aço 1045 temperado e a ferramenta com pino cônico obtiveram um desempenho inferior aos resultados obtidos com a ferramenta com pino facetado utilizando os parâmetros propostos no desenvolvimento do trabalho como demonstrou a análise macrográfica e ensaio de dobra.

A penetração da ferramenta é fundamental para obtenção de uma solda de qualidade sendo que se o ombro da ferramenta penetrar mais que 0,05 mm gera rebarba excessiva e se o ombro da ferramenta não estiver em contato com a chapa gera um acabamento ruim.

O sistema de fixação é um dos pontos críticos do processo, pois o processo é sensível à vibração e empenamentos do material.

Apesar de o calor gerado ser fundamental para o escoamento do material plastificado, um calor excessivo gera mudanças no coeficiente de atrito do material e causa falhas na solda.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

Através dos resultados obtidos e visualizando a continuidade da pesquisa, apresentam-se as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Realizar soldagem de topo de chapas de alumínio.
- Realizar soldagem de outras ligas de alumínio.
- Realizar soldagem de materiais dissimilares.
- Realizar soldagem de tubos quadrados e redondos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL, Associação Brasileira do alumínio. **A sustentabilidade da indústria brasileira do alumínio**. 2012.

CALLISTER Willian D. **Uma introdução a Ciência e Engenharia de materiais**. 5^o edição. Janeiro: Editora, 1999.

CAPELARI, Tiago V.. **Avaliação da geometria da ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA 5052**. 2006. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CRUZ, M. F.; NETO, C. de M. **Friction Stir Welding – Review: Potencial de Aplicação na Indústria**. Trabalho apresentado no XI Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, São Jose dos Campos - SP, 2009.

DIXON, R. **Brazing and soldering**. In: **ASM Handbook. Brazing and Soldering**. United States: ASM Internacional, 1994. V, cap. Procedure Development and Practice Considerations for Solid-State Welding

DUNKERTON, S. B. **Procedure development and practice considerations for diffusion welding**. In: **ASM Handbook Welding, Brazing and Soldering**. United States: ASW Internacional, 1994. V, cap. Procedure Development and Practice Considerations for Solid-State Welding.

FIORAVANTI, Artur S. **Soldagem por FSW de ligas de alumínio ALCLAD AA 2024-T3 e AA7075**. 2008. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FULLER, C. B. Friction Stir Tool Materials and Designs. In: Mishra R. S.. **Friction Stir Welding and Processing**. 1^o edição. ASM Internacional, 2007, 7 – 36

KHANDKAR, M. Z. H.; KHAN, J.A.; REYNOLDS, A.P., **“Prediction of Temperature Distribution and Thermal History During Friction Stir Welding: Input Torque Based Model”**, Science and Technology of Welding and Joining 2003, Vol.8 No. 3.

KHALED, T. (2005), **“An Outsider looks at friction stir welding”**. Federal Aviation Administration.

KUMAR, K. KAILAS, S. V. (2008), **“ The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation”**, Materials Science and Engineering A, 485, 367- 374.

LEAL, R. LOUREIRO, A. (2004), **“ Defects Formation in friction stir welding of aluminium alloys”**, Materials Science Forum, 455 – 456, 239 – 302.

MISHRA, R. S; MA, Z. Y. **Friction Stir Welding and Processing**. A review journal. Materials Science e Engineering, Volume 50, issues 1 – 2, p. 1 – 78 , 31 August 2005.

MIYAZAKI, Marcos H. **Desenvolvimento de novo conceito de junção de reforçadores aeronáuticos por FSW**. 2009. Tese (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica e Mecânica, São Jose dos Campos, 2009.

NBR 6153/88, **Produtos metálicos – Ensaio de dobramento semi-guiado**. Rio de Janeiro, 1988.

NBR 8108/83, **Ataque com reativos metalográficos em ligas ferrosas**. Rio de Janeiro, 1983.

RAMOS, F. D. **The influence of the tool profile in friction stir spot welding of the aluminium alloy AA6181-T4 e MG-AZ31**. 2008

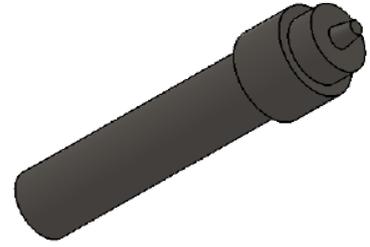
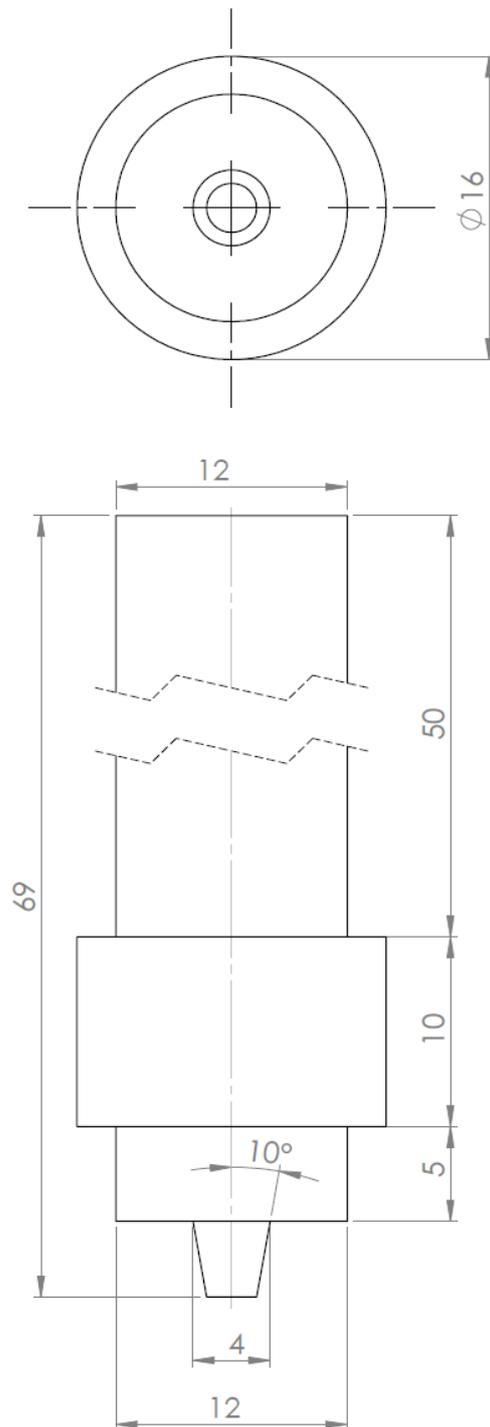
RODRIGUES D.; LOUREIRO A.; LEAL R.. **Soldadura por fricção linear**. Disponível em: http://www2.dem.uc.pt/dulce.rodrigues/ref_web/rn_1.pdf. Acesso em 19 ago. 2013.

SCHMIDT, H. et al. (2004) “ **An analytical modelo for the heat generation in friction stir welding**”. Modelling Simul. Mate Sci. Eng., 12, 143 – 157.

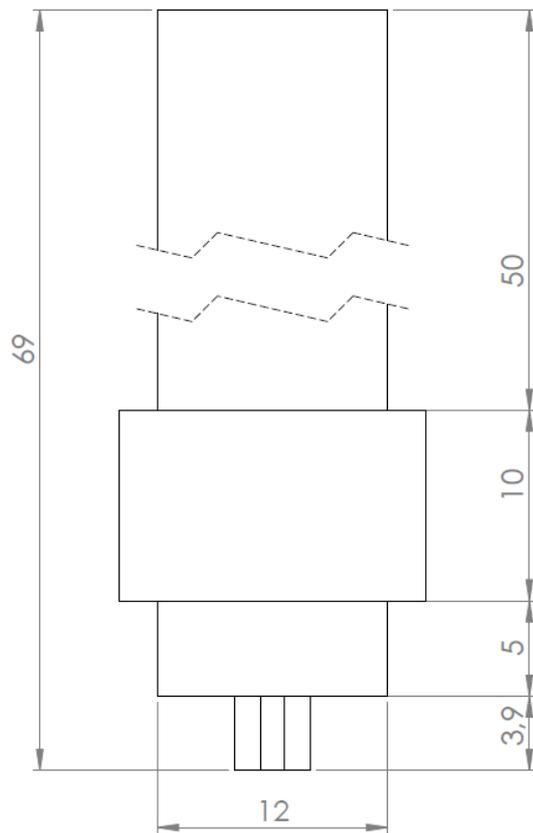
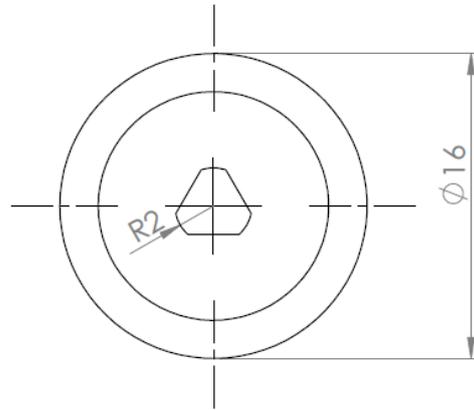
VERÁSTEGUI, Roger N. **Estudo de uniões dissimilares alumínio – solda por “ Solda Ponto por Fricção e mistura mecânica com preenchimento do furo” (Friction Spot Welding – FSpW)**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

TWI ltd – The Welding Institute. **Friction Stir Welding at TWI**. Disponível em: < <http://www.twi.co.uk/technologies/welding-coating-and-material-processing/friction-stir-welding/>>. Acesso em : 19 ago. 2013.

ANEXO A DESENHO DAS FERRAMENTAS



	PROJETADO:	DATA:	Laboratório de Usinagem FAHOR		
Projetado:	Camargo	28/08/2013			
Revisado:					
Revisado:					
MATERIAL:	Aço 1045		NOME:	Conica lisa 1045	Formato
				A4	
Raios não especificados 0,3 mm			SCALE:3:1	SHEET 1 OF 1	



Nota: as faces do triângulo são equidistantes 120° entre si.

PROJETADO:		DATA:		Laboratório de Usinagem FAHOR	
Projetado	Camargo		28/08/2013		
Revisado:					
Revisado:					
MATERIAL:		NOME:		Formato	
Aço 1045		facetada 1045		A4	
Raios não especificados 0,3 mm		SCALE:3:1		SHEET 1 OF 1	