

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RAFAEL DE MOURA RODRIGUES

SOLDAGEM DE PLACAS DE POLICARBONATO PELO PROCESSO FRICTION STIR
WELDING (FSW): FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO, FERRAMENTAS E
TESTES PRELIMINARES

BELO HORIZONTE

2017

RAFAEL DE MOURA RODRIGUES

SOLDAGEM DE PLACAS DE POLICARBONATO PELO PROCESSO FRICTION STIR
WELDING (FSW): FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO, FERRAMENTAS E
TESTES PRELIMINARES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no Curso de Graduação de Engenharia de
Materiais do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para o título de Bacharel em Engenharia
de Materiais.

Orientador: Cláudio Turani Vaz

BELO HORIZONTE

2017

RAFAEL DE MOURA RODRIGUES

SOLDAGEM DE PLACAS DE POLICARBONATO PELO PROCESSO FRICTION STIR
WELDING (FSW): FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO, FERRAMENTAS E
TESTES PRELIMINARES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no Curso de Graduação de Engenharia de
Materiais do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para o título de Bacharel em Engenharia
de Materiais.

Aprovado em

BANCA EXAMINADORA

Prof: Cláudio Turani Vaz – Orientador

Prof: Aline Bruna da Silva – Co-Orientador

Prof: Aderci de Freitas Filho

Prof: Bruno Silva Cota

Agradecimentos

A minha família, em especial a minha mãe pelo apoio e por nunca ter duvidado da minha capacidade.

Ao professor Cláudio Turani Vaz pela oportunidade, constante ajuda, paciência, incentivo e “empolgação”.

Aos meus amigos do limb, ousadia e do CEFET, especialmente os de 2011/1, que dentro e fora da faculdade não me deixaram desanimar.

Aos professores Aderci de Freitas Filho e Bruno Silva Cota por estarem sempre dispostos a dar suporte ao presente trabalho, seja propondo idéias, seja pela ajuda técnica, principalmente o professor Aderci.

Ao professor Rogério Felício dos Santos por me salvar entregando a chave do armário que estava sempre trancado e também pela ajuda técnica.

A professora Aline Bruna da Silva, por tirar dúvidas relacionadas aos materiais poliméricos.

Ao pessoal da manutenção, em especial ao Carlinhos.

Resumo

O processo *friction stir welding* (FSW) foi desenvolvido em 1991 no Instituto de Soldagem da Inglaterra (*TWI - The Welding Institute*). A princípio, a técnica FSW era basicamente utilizada no processo de união de ligas de alumínio, atualmente seu uso tem sido estendido para polímeros. No entanto, a soldagem de polímeros por FSW é muito recente e poucos trabalhos têm sido publicados. Portanto, é necessário estudar os diversos parâmetros, como rotação da ferramenta, velocidade transversal da ferramenta, força normal aplicada pela ferramenta, geometria da ferramenta (tanto a do pino como a do “ombro”), inclinação da ferramenta e até mesmo o material da ferramenta. No presente trabalho foi desenvolvido um sistema para fixação de placas de policarbonato para serem soldadas por FSW além de um conjunto de ferramentas com pinos de geometria diferentes. O objetivo é realizar testes preliminares para obter soldas com bom aspecto visual. Para isso, parâmetros como rotação por minuto (RPM) e inclinação da ferramenta foram variados, além de observações foram feitas com o intuito de aprimorar o processo, tais como: verificar a eficácia do sistema de fixação, a presença de defeitos superficiais e as dificuldades encontradas para realizar a soldagem FSW. Houve uma grande dificuldade de manter uma repetibilidade na qualidade superficial das soldas, mas, de modo geral, foi constatado que é possível a realização da soldagem FSW de placas de policarbonato com uma boa qualidade visual da solda desde que os parâmetros estejam calibrados, porém a variedade de parâmetros existentes faz com que essa tarefa seja mais complexa.

Palavras chave: *friction stir welding*, parâmetros FSW, policarbonato, polímeros

Abstract

The friction stir welding process (FSW) was developed in 1991 at the Welding Institute in England (TWI - The Welding Institute). At first, the FSW technique was basically used in the process of welding aluminum alloys, currently its use has been extended to polymers. However, welding of polymers by FSW is very recent and few papers have been published. Therefore, it is necessary to study the various parameters, such as tool rotation, tool transversal speed, axial force applied by the tool, tool geometry (both the pin and the "shoulder"), tool inclination and even the tool's material. In the present work a system was developed to fixate polycarbonate plates to be welded by FSW as well as set of tools with different geometry pins. The goal of this work is to conduct preliminary tests to obtain good visual welds. For this purpose, parameters such as RPM and tool inclination were varied, and observations were made with the purpose of improving the process, such as: checking the effectiveness of the clamping system, the presence of surface defects and the difficulties to perform FSW welding. There was great difficulty in maintaining a repeatability in the surface quality of the welds, but in general it was found that it is possible to perform FSW welding of polycarbonate plates with a good visual quality of the weld as long as the parameters are calibrated, however the variety of parameters makes this task more complex.

Keywords: friction stir welding, FSW parameters, polycarbonate, polymers

Sumário

1. Introdução	1
2. Objetivos	2
3. Revisão Bibliográfica	3
3.1 Soldagem: Definição e Classificação	3
3.1.1 Soldagem por Fusão:	3
3.1.2 Soldagem no Estado Sólido:	4
3.2 Soldagem por Fricção Convencional (FRW)	4
3.2.1 Método de Soldagem por Rotação ou Soldagem por Inércia	4
3.2.2 Soldagem por Fricção Linear (LFW - Linear Friction Welding)	5
3.3 “Friction Stir Welding” (FSW)	6
3.3.1 Definição	6
3.3.2 Vantagens e Desvantagens do processo FSW	7
3.3.3 Equipamentos	7
3.3.3.1 Máquina para Soldagem FSW	7
3.3.4 Sistema de Fixação	8
3.3.5 Ferramenta para Soldagem FSW	9
3.3.5.1 Geometria da ferramenta FSW	10
3.3.5.1.1 O “Ombro” da ferramenta	11
3.3.5.1.2 O pino da ferramenta	13
3.3.5.1.3 Material da Ferramenta	15
3.3.6 Materiais soldáveis por FSW	17
3.3.6.1 Soldagem por Fricção aplicada a Polímeros	18
3.4 Policarbonato	18
3.4.1 Soldagem por Fricção de Policarbonato (PC):	19
4. Metodologia	21
4.1 Equipamentos	21
4.2 Materiais	21
4.2.2. Fabricação das Ferramentas	22
4.2.3 Fabricação do Sistema de Fixação	23
4.3 Operação de Soldagem	23
5. Resultados e Discussões	25
5.1 Sistema de Fixação	25
5.2 Ferramentas	26
5.3 Avaliação das Soldas e do Processo de Soldagem FSW	28

5.3.1 Avaliação Visual	28
6. Conclusões	32
7. Sugestões para trabalhos futuros	33
8. Referências	34
9. Anexos.....	36
9.1 Desenho Técnico da Base do Sistema de Fixação.....	36
9.2 Desenho Técnico dos Grampos do Sistema de Fixação	37
9.3 Desenho Técnico da Ferramenta Cilíndrica.....	38
9.4 Desenho Técnico da Ferramenta Cilíndrica Rosqueada.....	39
9.5 Desenho Técnico da Ferramenta Cônica	40
9.6 Desenho Técnico da Ferramenta Hexagonal.....	41

Lista de Figuras

Figura 1. Soldagem por Rotação.	5
Figura 2. Soldagem por Fricção Linear.	5
Figura 3. (a) Ferramenta do processo FSW; (b) ilustração esquemática do processo FSW; (c) sistema de fixação das placas.	6
Figura 4. Sistema de Fixação para FSW de placas de PMMA.	8
Figura 5. Sistema de Fixação para FSW de placas de Polipropileno.	8
Figura 6. Sistema de Fixação para FSW de placas de Polipropileno.	9
Figura 7. (a) ferramenta fixa; (b) ferramenta ajustável; (c) ferramenta auto-reativa	10
Figura 8. Formatos de Ombros	11
Figura 9. Diversos tipos de características superficiais utilizadas em “ombros”.	12
Figura 10. Design de Pinos para o processo FSW.	14
Figura 11. O efeito na direção do fluxo do material de acordo com a rotação da ferramenta no sentido horário e anti-horário	15
Figura 12. Estrutura química do Policarbonato	18
Figura 13. Ferramenta FSW utilizada.	19
Figura 14. Sistema de fixação utilizada.	20
Figura 15. Fresadora modelo CLEVER FH-4.	21
Figura 16. Placas de Policarbonato branco com dimensões 178 mm x 48 mm x 3 mm	22
Figura 17. Sistema de Fixação com rebaixo.	25
Figura 18. Sistema de Fixação sem rebaixo	25
Figura 19. Placa de policarbonato com furo passante na área da solda.	26
Figura 20. Ferramenta Cilíndrica pré-tratamento térmico.	26
Figura 21. Ferramenta Cilíndrica Rosqueada pré-tratamento térmico	27
Figura 22. Ferramenta Cônica pré-tratamento térmico	27
Figura 23. Ferramenta Hexagonal pré-tratamento térmico	27
Figura 24. Ferramentas pós-tratamento térmico. (a) Cilíndrica; (b) Cônica; (c) Rosqueada; (d) Hexagonal	28
Figura 25. Sistema de fixação com as placas	28
<i>Figura 26. Soldagem FSW a 466RPM e 26mm/min. (a) ângulo de inclinação 0°; (b) ângulo de inclinação 1°</i>	<i>29</i>
Figura 27. Soldagem FSW a 642RPM e 26mm/min. (a) ângulo de inclinação 0°; (b) ângulo de inclinação 1°	29

Figura 28. Soldagem FSW a 864RPM e 26mm/min. (a) ângulo de inclinação 0°; (b) ângulo de inclinação 1°	29
Figura 29. Soldagem FSW a 1176RPM e 26mm/min. (a) ângulo de inclinação 0°; (b) ângulo de inclinação 1°	30
Figura 30. Soldagem FSW a 1590RPM e 26mm/min. (a) ângulo de inclinação 0°; (b) ângulo de inclinação 1°	30
Figura 31. Placa de policarbonato com deformação causada pelo ombro na região da solda..	31
Figura 32. Adesão do Polímero na Superfície do Ombro.....	31
Figura 33. Desenho Técnico da Base do Sistema de Fixação	36
Figura 34. Desenho Técnico dos Grampos do Sistema de Fixação.....	37
Figura 35. Desenho Técnico da Ferramenta Cilíndrica.....	38
Figura 36. Desenho Técnico da Ferramenta Cilíndrica Rosqueada	39
Figura 37. Desenho Técnico da Ferramenta Cônica.....	40
Figura 38. Desenho Técnico da Ferramenta Hexagonal.....	41

Lista de Tabelas

Tabela 1. Vantagens e Desvantagens do processo FSW.	7
Tabela 2. Especificação Técnica aço H13.	22
Tabela 3. Parâmetros do processo de soldagem FSW analisados	24

1. Introdução

Friction Stir Welding (FSW) é uma versão atualizada da soldagem por fricção convencional. Ela foi inventada em 1991 no Instituto de Soldagem da Inglaterra (*TWI - The Welding Institute*). A princípio, a técnica FSW ganhou atenção significativa no processo de união de ligas de alumínio, mas agora sua aplicação foi estendida a metais relativamente mais resistentes e também para polímeros (GIVI e ASADI, 2014).

Na técnica FSW, uma ferramenta composta de um “ombro” (*shoulder*) e um pino é rotacionada e lentamente mergulhada na linha de junta entre dois substratos rigidamente fixados (GIVI e ASADI, 2014). A ferramenta é, então, movimentada ao longo da linha de junta (CAO, WANJARA e LAROSE, 2012).

As vantagens deste processo são: eficiência energética, boas propriedades mecânicas, ambientalmente amigável, mantém as propriedades originais do material, facilmente automatizadas em fresadoras simples, resultando em menores custos de instalação e menor treinamento do operador, pode operar em todas as posições, pois não há poça de fusão, ausência de fumos tóxicos e respingos (GIVI e ASADI, 2014).

Uma das maiores potenciais aplicações do processo FSW é em polímeros. Nos últimos anos, as aplicações de polímeros na indústria aumentaram substancialmente. Portanto, encontrar técnicas eficazes para unir peças de polímero parece inevitável, o que resulta em custos reduzidos. Um dos métodos propostos para soldar polímeros é o processo FSW. Estudos e experimentos até agora têm demonstrado o alto potencial de utilização de FSW na união de polímeros, embora aplicações comerciais deste processo ainda não estejam disponíveis (GIVI e ASADI, 2014).

2. Objetivos

Objetivo Geral

Fabricar um dispositivo de fixação e ferramentas para soldagem por FSW de placas de policarbonato.

Objetivos Específicos

- Fabricar um sistema de fixação das placas de policarbonato e de ferramentas apropriadas para soldagem FSW.
- Realizar testes preliminares variando-se parâmetros como Rotação por Minuto (RPM) e Inclinação da Ferramenta.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Soldagem: Definição e Classificação

O processo de Soldagem possui grande importância, especialmente na fabricação de peças metálicas (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

De acordo com a Associação Americana de Soldagem (*American Welding Society – AWS*), a definição de soldagem é:

“Processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”

De acordo com (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009) outra definição de soldagem, no qual está baseada no tipo de forças que são responsáveis pela união dos materiais é:

“Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos”

Existem muitos outros tipos de processos de soldagem e, sem dúvida, mais processos de soldagem serão desenvolvidos a medida do aumento da necessidade. Em geral, existem dois grupos comuns de processos de soldagem: soldagem por fusão e soldagem no estado sólido, nos quais todas as técnicas de soldagem podem ser resumidas (GIVI e ASADI, 2014).

3.1.1 Soldagem por Fusão:

No processo de soldagem por fusão de materiais metálicos, uma ligação metálica ocorre na fase fundida e pode exigir um metal de adição, como por exemplo um eletrodo consumível. As técnicas MIG (*Metal Inert Gas*), TIG (*Tungsten Inert Gas*), soldagem a laser (*laser beam welding - LBW*) e soldagem por feixe de elétrons (*electron beam welding - EBW*) podem ser considerados como exemplos típicos de processos de soldagem por fusão. (GIVI e ASADI, 2014).

Os processos de soldagem por fusão possuem muitas desvantagens, pois em todas estas técnicas, o metal funde e em seguida solidifica para formar a junta (GIVI e ASADI, 2014). Segundo (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009), a soldagem por fusão, por ser baseada na aplicação de energia mecânica e térmica, podem causar uma série de efeitos metalúrgicos, como alteração nas propriedades e mudanças de microestrutura, e efeitos

mecânicos, como tensões residuais e aparecimento de distorções. Além destes efeitos, a formação de descontinuidades, como por exemplo trincas e poros, podem prejudicar a performance dos componentes que foram soldados e causar sua falha antes do previsto.

3.1.2 Soldagem no Estado Sólido:

Os processos de soldagem no estado sólido foram desenvolvidos a fim de eliminar os efeitos indesejados causados pelos processos de soldagem por fusão (GIVI e ASADI, 2014). Nos processos de soldagem no estado sólido, as juntas são produzidas à temperaturas abaixo da temperatura de fusão do material de base. Portanto, nenhum material de adição é necessário em tais técnicas. Alguns exemplos desse processo são: soldagem por explosão, soldagem por ultrassom e soldagem por fricção. Nesses processos, existem poucos defeitos na junta, pois não ocorre fusão do metal e nem solidificação. Logo, as juntas mantêm suas propriedades originais. A zona térmicamente afetada é bem estreita comparada com as técnicas de soldagem por fusão, devido ao menor calor transferido (GIVI e ASADI, 2014).

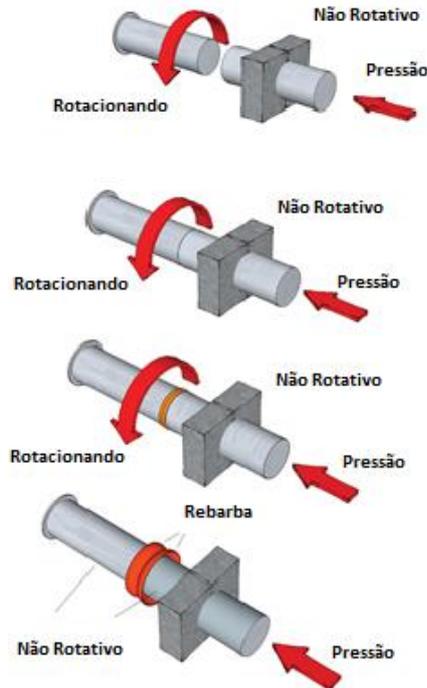
3.2 Soldagem por Fricção Convencional (FRW)

A soldagem por fricção convencional (*FRW – friction welding*) é um tipo de soldagem no estado sólido no qual calor é gerado por fricção entre um componente em movimento e outro estacionário. Este método é amplamente utilizado em metais e também em termoplásticos na indústria automotiva e na aviação. Existem diferentes tipos de soldagem por fricção, os quais serão comentados abaixo (GIVI e ASADI, 2014).

3.2.1 Método de Soldagem por Rotação ou Soldagem por Inércia

Consiste em duas garras que irão segurar as peças a serem soldadas, as quais uma delas é mantida fixa e a outra em rotação. Antes do processo começar, uma das peças a serem soldadas, que se encontra na garra em rotação, é ligada a um volante de um dado peso. A peça é, então, girada até atingir uma alta velocidade de rotação para fornecer energia necessária para ser armazenada no volante. Uma vez que a velocidade de rotação desejada é atingida, o motor é removido e as peças são forçadas sob pressão uma com a outra. A força é mantida sobre as peças, mesmo após o término da rotação, de modo que se estabeleça a solda (GIVI e ASADI, 2014). Na figura 1 o processo de soldagem por rotação é ilustrado.

Figura 1. Soldagem por Rotação.



Fonte: (GIVI e ASADI, 2014). Adaptado

3.2.2 Soldagem por Fricção Linear (LFW - Linear Friction Welding)

É semelhante ao método de soldagem por rotação, porém ao invés de uma das garras rotacionar, ela movimenta-se lateralmente. Esse processo requer uma pressão contínua nas peças e também exige que as peças possuam forças de cisalhamento elevadas. Este método necessita de máquinas de soldagem mais complexas do que a de soldagem por rotação, porém, nessa técnica, peças de qualquer formato podem ser unidas ao contrário do processo de soldagem por rotação, no qual une apenas peças com seções circulares. Outra vantagem dessa técnica é a qualidade da junta ser superior a junta obtida usando a técnica de soldagem por rotação (GIVI e ASADI, 2014). Na figura 2 pode ser observado o resultado da soldagem por fricção linear.

Figura 2. Soldagem por Fricção Linear.



Fonte: (GIVI e ASADI, 2014)

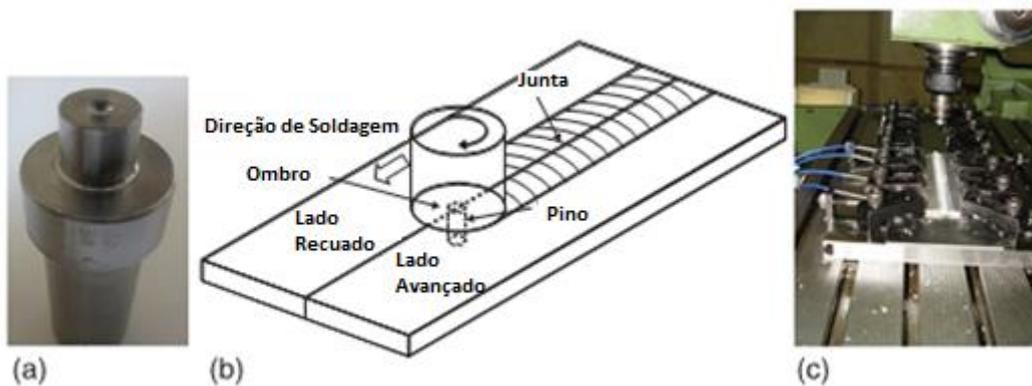
3.3 “Friction Stir Welding” (FSW)

3.3.1 Definição

Soldagem por fricção (FSW – *Friction Stir Welding*) é uma versão atualizada da soldagem por fricção convencional. A soldagem FSW foi desenvolvida em 1991 no Instituto de Soldagem da Inglaterra (*TWI - The Welding Institute*) (JAIGANESH, MARUTHU e GOPINAT, 2014). Esse método é considerado como o mais importante e recente processo de união de metais nas últimas duas décadas. A princípio, a técnica FSW ganhou atenção significativa no processo de união de ligas de alumínio, mas agora sua aplicação foi estendida a metais relativamente mais duros e também para polímeros. (GIVI e ASADI, 2014).

Na técnica FSW, uma ferramenta constituída de um “ombro” (*shoulder*) e um pino é rotacionada e lentamente mergulhada na linha de junta entre dois substratos rigidamente fixados (GIVI e ASADI, 2014). A ferramenta é, então, movimentada ao longo da linha da junta (CAO, WANJARA e LAROSE, 2012). O calor gerado pela fricção faz com que o material amoleça, e permita que a ferramenta percorra a linha da junta (BAGHERI, AZDAST e DONIAVI, 2012). Na figura 3 está representado a ferramenta utilizada no processo FSW (a), o esquema do processo FSW (b) e um sistema de fixação das placas (c).

Figura 3. (a) Ferramenta do processo FSW; (b) ilustração esquemática do processo FSW; (c) sistema de fixação das placas.



Fonte: (GIVI e ASADI, 2014). Adaptado

O “ombro” da ferramenta encontra-se firmemente em contato com a superfície superior da peça de trabalho com uma carga aplicada. O calor necessário para soldar o material é gerado pela fricção e pela deformação. O calor é gerado entre a ferramenta (“ombro” e pino) e a peça. O “ombro” da ferramenta experimenta maiores quantidades de calor do que a superfície do pino.

Por outro lado, a deformação ou agitação é gerada pela rotação do pino da ferramenta e calor adicional também é gerado (GIVI e ASADI, 2014).

3.3.2 Vantagens e Desvantagens do processo FSW

A natureza do processo FSW, o qual é uma soldagem no estado sólido, leva a várias vantagens sobre os métodos de soldagem por fusão, uma vez que qualquer dos defeitos prováveis associados com o resfriamento da fase líquida podem ser evitados. Problemas como porosidade e trinca de solidificação não ocorrem no processo FSW. Em geral, foi descoberto que o processo FSW é um método que produz baixa concentração de defeitos e é muito tolerante a variações de parâmetros e materiais. No entanto, esse processo está associado a um número de defeitos únicos. Temperaturas de solda insuficientes, resultantes de velocidades de rotação baixa ou de altas velocidades transversais, fazem com que o material da solda incapaz de acomodar a extensa deformação durante o processo de soldagem (GIVI e ASADI, 2014). A tabela 1 resume algumas vantagens e desvantagens do processo FSW:

Tabela 1. Vantagens e Desvantagens do processo FSW.

Vantagens	Desvantagens
Eficiência energética;	Deixa um orifício (<i>keyhole</i>) quando a ferramenta é retirada;
Boas propriedades mecânicas;	Menos flexível do que os processos manuais e de arco, ou seja, as dificuldades associadas com variações de espessura.
Ambientalmente Favorável;	Necessita de um sistema de fixação que mantenha as placas firmes;
Facilmente automatizadas em fresadoras simples, resultando em menores custos de instalação e menor treinamento;	Custo de equipamentos dedicados;
Como não há poça de fusão, pode operar em todas as posições (horizontal, vertical, etc);	
Geralmente a solda possui boa aparência;	
Melhoria da segurança devido à ausência de fumos tóxicos ou de respingos de material fundido;	

Fonte: (GIVI e ASADI, 2014)

3.3.3 Equipamentos

3.3.3.1 Máquina para Soldagem FSW

A soldagem FSW pode ser realizada de diversas formas:

- Máquinas desenvolvidas especialmente para FSW;
- Fresadora adaptada;
- Fresadora CNC adaptada;
- Robôs adaptados;

3.3.4 Sistema de Fixação

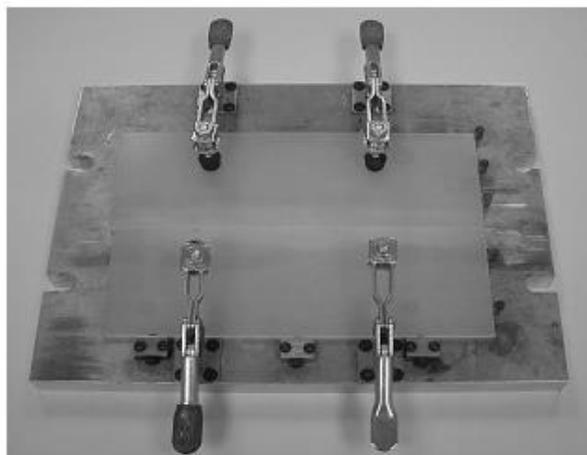
As peças a serem soldadas são rigidamente fixadas para evitar que elas sejam forçadas a separar-se durante o processo de soldagem (BAGHERI, AZDAST e DONIAVI, 2012). Alguns exemplos de sistemas de fixação utilizados no processo FSW estão ilustrados abaixo (figura 4, 5 e 6).

Figura 4. Sistema de Fixação para FSW de placas de PMMA.



Fonte: (GARBRECHT, CAMARGO, et al., 2015)

Figura 5. Sistema de Fixação para FSW de placas de Polipropileno.



Fonte: (STRAND, 2004)

Figura 6. Sistema de Fixação para FSW de placas de Polipropileno.



Fonte: (JAIGANESH, MARUTHU e GOPINAT, 2014)

3.3.5 Ferramenta para Soldagem FSW

A utilização de uma ferramenta não consumível é obrigatória durante o processo FSW. Ela é composta por um pino e um “ombro” e basicamente tem três propósitos: aquecer a peça, agitar e mover o material plastificado a fim de produzir a junta soldada e controlar o material processado sob o “ombro” da ferramenta. Portanto, a ferramenta do processo FSW é, sem dúvida, crucial para a realização do processo FSW, sendo essencial para melhorar tanto o desempenho mecânico da junta soldada quanto a velocidade máxima de soldagem durante o processo (INFANTE e VIDA, 2014).

A deformação termo-mecânica e o aquecimento por atrito da peça são influenciados pelo projeto da ferramenta (MISHRA, SARATHI DE e KUMAR, 2007). O “ombro” é responsável por gerar a maior parte do calor durante o processo, aplicando uma pressão descendente sobre a superfície da peça de trabalho, além disso, o “ombro” restringe o material plastificado em torno do pino impedindo a perda de material plastificado, o qual tende a escapar da junta da peça de trabalho. Já o pino em rotação simplesmente arrasta, plastifica e mistura o material presente na zona de mistura, criando uma junta soldada sem a necessidade de fusão (CAO, WANJARA e LAROSE, 2012).

Recentemente, novas características geométricas têm sido desenvolvidas a respeito do design de uma ferramenta FSW (FULLER, 2007). O diâmetro do “ombro” e seu perfil, o comprimento do pino, o perfil do pino e o diâmetro do pino são parâmetros importantes na determinação da

velocidade e qualidade da soldagem. Outro parâmetro importante para saber se a ferramenta é adequada ou não é o material da ferramenta (INFANTE e VIDA, 2014).

Mesmo que a maioria dos problemas comuns da técnica de soldagem por fusão são evitadas durante o processo FSW, a ferramenta usada no processo FSW está sujeita à tensões severas e à altas temperaturas principalmente durante a soldagem de ligas de alta dureza, tais como aços e ligas de titânio. De fato, a aplicação comercial do processo FSW para essas ligas é limitado pelo alto custo e vida curta das ferramentas FSW (INFANTE e VIDA, 2014).

3.3.5.1 Geometria da ferramenta FSW

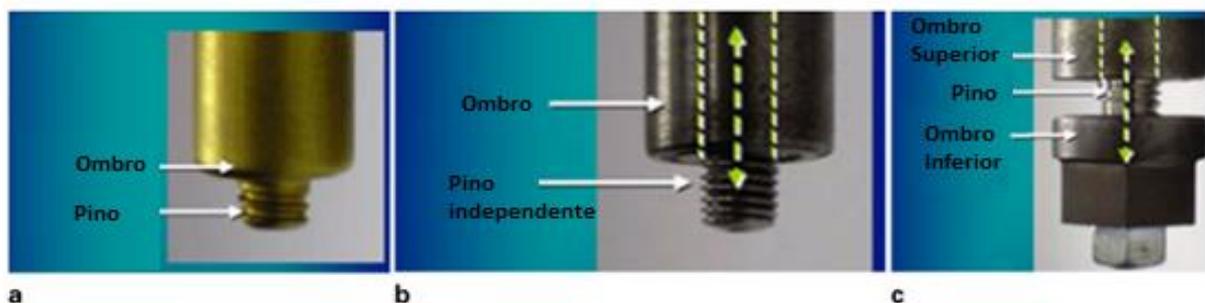
Em relação a geometria da ferramenta, existem três tipos de ferramentas para a soldagem FSW: ferramenta fixa (figura 7a), ajustável (figura 7b) e auto-reativa (self- reacting) (figura 7c).

A ferramenta com pino fixo corresponde a um componente único com um determinado pino e “ombro”. Devido ao comprimento do pino ser fixo, esse tipo de ferramenta só pode ser usado para soldar componentes com uma espessura específica.

Nas ferramentas ajustáveis, o “ombro” e o pino são componentes independentes permitindo ajustes no comprimento do pino, ou seja, pode-se obter ferramentas de configurações diferentes, facilitando a soldagem de um grande número de peças com espessuras diferentes.

A ferramenta auto-reativa é composta por três componentes diferentes: o “ombro” superior, o “ombro” inferior e o pino. Estas ferramentas podem operar apenas perpendicularmente à superfície da peça de trabalho, em contraste com a ferramenta fixa e ferramentas ajustáveis que podem ser inclinados longitudinalmente e lateralmente em relação à peça de trabalho (INFANTE e VIDA, 2014).

Figura 7. (a) ferramenta fixa; (b) ferramenta ajustável; (c) ferramenta auto-reativa



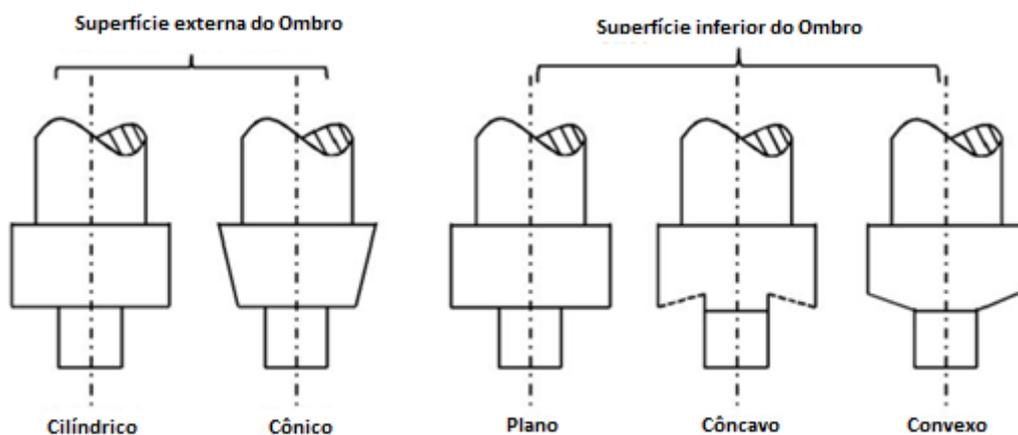
Fonte: (MISHRA, SARATHI DE e KUMAR, 2007). Adaptado

3.3.5.1.1 O “Ombro” da ferramenta

O “ombro” da ferramenta é projetado para promover o aquecimento por fricção nas regiões da superfície e abaixo da superfície da peça de trabalho que irá ser soldada (GIVI e ASADI, 2014).

O formato (superfície exterior) do ombro possui normalmente uma forma cilíndrica, mas, ocasionalmente, uma superfície cônica também é utilizado (figura 8). Geralmente, espera-se que o formato da superfície exterior do ombro (cilíndrica ou cônica) tenha uma influência insignificante sobre a qualidade da soldagem devido a profundidade de imersão do “ombro” ser tipicamente pequena (CAO, WANJARA e LAROSE, 2012).

Figura 8. Formatos de Ombros



Fonte: (CAO, WANJARA e LAROSE, 2012). Adaptado

O que pode influenciar a qualidade da soldagem FSW é a superfície inferior do ombro. Como demonstrado na figura 8, três tipos de superfícies na região inferior dos “ombros” são normalmente usados: “ombro” plano, côncavo e convexo.

O “ombro” com superfície plana na região inferior é o design mais simples. A principal desvantagem deste tipo de design é que a superfície plana na região inferior do “ombro” não é eficaz em reter o material que flui sob o ombro, levando à produção de rebarba em excesso (CAO, WANJARA e LAROSE, 2012).

O primeiro e o design mais comum de “ombro” para soldagem por fricção foi o de “ombro” côncavo. O “ombro” côncavo tornou-se popular, pois restringe a perda de material a partir dos lados do “ombro”. Esta forma simples é fácil de ser produzida e é capaz de realizar boas soldas.

A concavidade do “ombro” é definida por um pequeno ângulo entre a borda do “ombro” e o eixo do pino, tipicamente de 6 a 10 graus. Durante o tempo de imersão da ferramenta, o material

deslocado pelo pino da ferramenta é alimentada para dentro da cavidade no interior do “ombro” da ferramenta (o perfil côncavo do “ombro” funciona como um armazenador de volume de escape). O uso correto deste ombro exige a inclinação da ferramenta o quanto for necessário para reter o material e para permitir que a extremidade traseira do “ombro” da ferramenta para produzir uma força de compressão. Valores de 2 a 4 graus são os mais relatados na literatura como ângulos de inclinação adequados (INFANTE e VIDA, 2014).

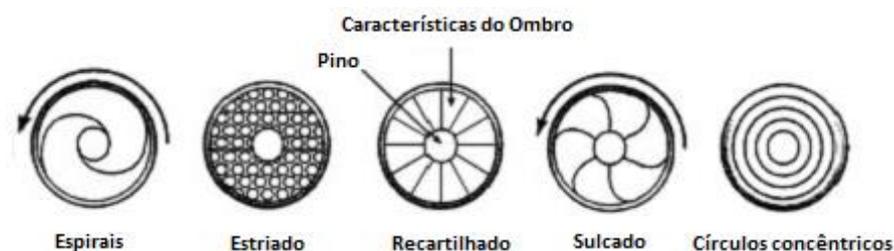
Outra forma possível de “ombro” é de um perfil convexo. As primeiras tentativas para a superfície de extremidade convexa não tiveram sucesso, pois o perfil convexo tende a empurrar o material para longe do pino.

Este projeto de “ombro” permite uma maior flexibilidade na área de contato entre o “ombro” e a peça de trabalho, aumenta a facilidade de união de peças de trabalho com diferentes espessuras, e melhora a capacidade de soldar curvaturas complexas (INFANTE e VIDA, 2014).

Características Geométricas Superficiais (*features*) do “ombro”:

O “ombro” também pode conter algumas características geométricas (figura 9) que aumentam a fricção do material. Esses recursos podem ser espirais (*scrolls*), estriados (*ridges*), recartilhado (*knurling*), sulcado (*grooves*) ou em círculos concêntricos (*concentric circles*) e podem ser incorporados em qualquer tipo de “ombro” da ferramenta, como côncava, plana ou convexa. A característica superficial em espiral é o recurso mais utilizado em “ombros” de ferramentas (INFANTE e VIDA, 2014).

Figura 9. Diversos tipos de características superficiais utilizadas em “ombros”.



Fonte: (THOMAS, 1996). Adaptado

“Ombro” com superfície em espirais possui um canal que auxilia a direção do fluxo no sentido da borda para o pino, assim, elimina-se a necessidade de se inclinar a ferramenta. O “ombro” côncavo com superfície plana tende a ser empurrada para longe da superfície da peça de

trabalho durante a soldagem por fricção em altas velocidades de soldagem devido ao material misturado que é continuamente preso na cavidade localizada embaixo do “ombro”.

Substituindo o “ombro” côncavo por um “ombro” com superfície em espirais, reduz a elevação da ferramenta ao aumentar a velocidade de soldagem. A utilização de um “ombro” com superfície em espiral elimina o rebaixamento da peça produzido por uma ferramenta côncava e diminui a produção de rebarba durante o processo de soldagem. Além disso, as forças normais em “ombros” com superfície em espirais são inferiores às forças em ferramentas com “ombros” côncavos, os quais deve-se aplicar uma carga tanto na direção normal quanto na transversal a fim de manter o “ombro” em contato com a peça de trabalho. Vale ressaltar que o material dentro dos canais da espiral são continuamente cisalhados, aumentando, assim, a deformação e o aquecimento por fricção na superfície (INFANTE e VIDA, 2014).

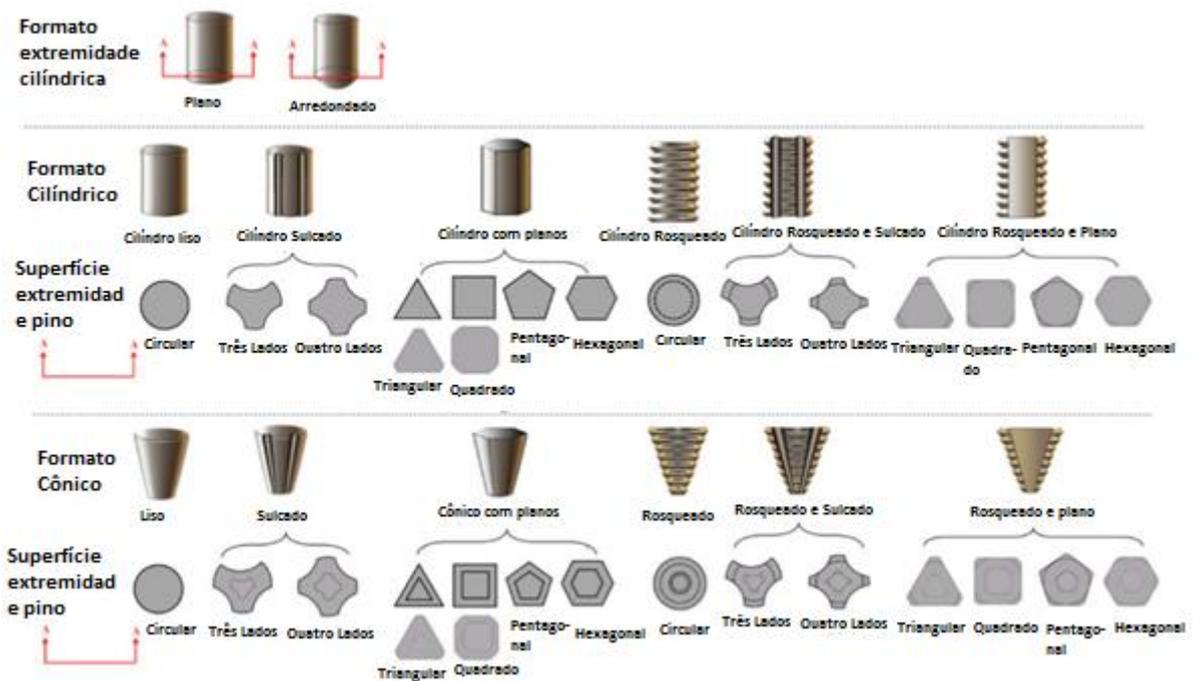
As limitações dos “Ombros” com superfície em espirais compreendem a incapacidade de soldar dois componentes com espessuras diferentes de modo satisfatório, a incapacidade para acomodar variação da espessura da peça de trabalho no comprimento da linha de soldagem e soldar curvaturas complexas (INFANTE e VIDA, 2014).

3.3.5.1.2 O pino da ferramenta

O pino da ferramenta tem a capacidade de produzir deformação e aquecimento por atrito. Este componente é projetado de modo a cisalhar o material a sua frente e mover o material para trás da ferramenta. A profundidade de deformação e velocidade de soldagem da ferramenta são controladas diretamente pelo pino da ferramenta, como também a sua geometria, influenciando o fluxo do material plastificado e afetando a performance da junta soldada (INFANTE e VIDA, 2014).

A figura 10 resume as formas geométricas de pinos e suas principais características. A forma da extremidade do pino pode ser plana ou arredondada. A extremidade plana do pino enfatiza a facilidade de produção e é a forma mais utilizada. A principal desvantagem do pino com extremidade plana é a alta força de forjamento durante o mergulho da ferramenta. Em contraste, uma forma arredondada pode reduzir a força de forjamento e desgaste da ferramenta durante o mergulho e dessa forma pode aumentar a vida útil da ferramenta, eliminando concentradores de tensões locais e melhorar a qualidade da raiz de solda diretamente na parte inferior do pino. (CAO, WANJARA e LAROSE, 2012).

Figura 10. Design de Pinos para o processo FSW.

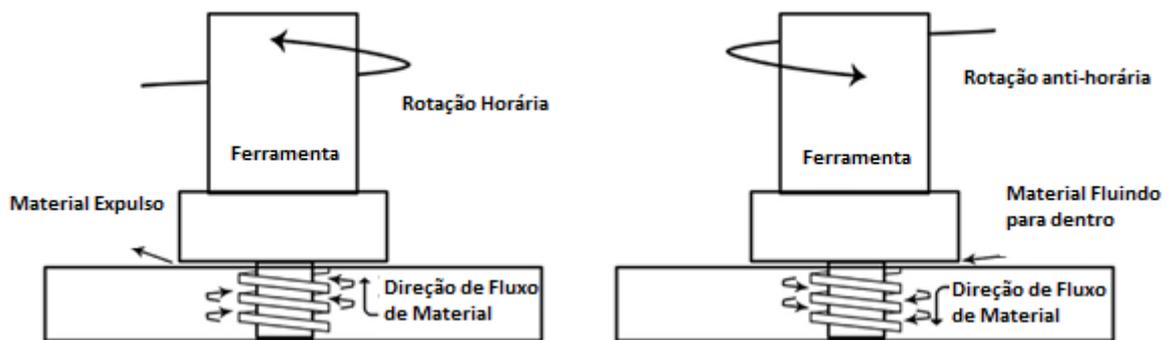


Fonte: (CAO, WANJARA e LAROSE, 2012). Adaptado

Os pinos para o processo FSW, geralmente possuem forma cilíndrica, porém a forma cônica também pode ser usada (figura 10). O pino na forma cônica por possuir maior área de contato com a peça de trabalho gera maior calor por atrito aumentando a deformação plástica. O pino cônico também promove uma elevada pressão hidrostática na solda, o que é extremamente importante para melhorar a agitação do material e a integridade da zona de mistura. No entanto, a alta temperatura e pressão hidrostática pode conduzir a um severo desgaste da ferramenta (CAO, WANJARA e LAROSE, 2012).

As superfícies exteriores do pino podem ter formas diferentes e características diferentes, incluindo roscas (threads), planos (flats) ou sulcos (flutes). Especialmente, um pino rosqueado para esquerda sob rotação no sentido anti-horário faz com que o material seja arrastado para baixo pelas roscas ao longo da superfície do pino. Este fenômeno promove agitação do material, fechamento do vazio/cavidade (void closure) e quebra de óxido (figura 11) (CAO, WANJARA e LAROSE, 2012).

Figura 11. O efeito na direção do fluxo do material de acordo com a rotação da ferramenta no sentido horário e anti-horário



Fonte: (BANJARE, SAHLOT e ARORA, 2016). Adaptado

Pinos sem rosqueamento são úteis em aplicações específicas de FSW quando as roscas não conseguem sobreviver sem fraturar ou sofrer desgaste severo, ou seja, eles são escolhidos em processos que envolvem ligas que possuem alta resistência ao desgaste ou são altamente abrasivas. Pinos sem rosqueamento também têm sido utilizados para produzir, propositalmente, soldas defeituosas, bem como para estudar o fluxo de material durante o processo de soldagem (INFANTE e VIDA, 2014).

3.3.5.1.3 Material da Ferramenta

A produção de uma boa junta em soldagem por fricção requer um material adequado para a ferramenta. De acordo com (INFANTE e VIDA, 2014), é desejável que o material da ferramenta possua:

- Boa resistência mecânica à temperatura ambiente e, principalmente, em temperaturas elevadas: O processo de soldagem por fricção é realizado a cerca de 70 a 90% do ponto de fusão do material, por isso, é importante que o material da ferramenta tenha resistência suficiente a esta temperatura, caso contrário ele irá falhar.
- Boa resistência ao desgaste: Apesar de alguns efeitos indesejáveis sobre a microestrutura da junta soldada, desgaste significativo da ferramenta aumenta o custo do processo FSW.
- Boa resistência a fratura: É obrigatório que a ferramenta resista ao dano sofrido durante o mergulho da ferramenta.
- Baixo coeficiente de dilatação térmica: Durante o processo de soldagem, o campo de temperatura da peça de trabalho depende da condutividade térmica do material da ferramenta.

O valor apropriado de condutividade térmica depende das variáveis de processo, o material da peça de trabalho e de algumas outras propriedades do material da ferramenta. O coeficiente de dilatação térmica pode afetar as tensões térmicas na ferramenta. Um baixo coeficiente de dilatação térmica entre os materiais do pino e “ombro” reduz as tensões térmicas. No entanto, uma elevada condutividade térmica pode ser indesejável se a remoção excessiva de calor da interface (ferramenta-peça de trabalho) requer uma alta velocidade de rotação da ferramenta para amolecer o material da peça de trabalho e para reduzir a tensão da ferramenta.

- Boa usinabilidade: Uma boa usinabilidade é importante a fim de facilitar a fabricação de características (features) complexas nas superfícies do “ombro” e do pino.

No início do desenvolvimento do processo FSW, o primeiro foco era na soldagem de ligas de alumínio, seguido pela soldagem de outros metais, tais como o cobre e magnésio. Na soldagem destes materiais pode-se utilizar ferramenta fabricada a partir de aço, que é posteriormente endurecido a fim de proporcionar uma boa resistência ao desgaste. No entanto, para as ligas de titânio, níquel e também para o aço, o custo de soldagem e a vida útil da ferramenta permanecem como tópicos de pesquisa, sendo o material da ferramenta uma das questões mais importantes a ser resolvido (INFANTE e VIDA, 2014).

Aços Ferramentas são os mais utilizados para a soldagem de ligas de alumínio. Dentro dos aços ferramenta, o AISI H13, um aço cromo/molibdênio trabalhado à quente e endurecido ao ar tem sido o aço mais utilizado para esta finalidade. Este aço possui uma elevada resistência ao desgaste, fadiga térmica e resistência a alta temperatura à altas temperaturas, aço com alta disponibilidade, boa usinabilidade, baixo custo e características bem estabelecidas. Outros aços ferramentas usados no processo FSW incluem: aços ferramentas endurecidos em óleo, aço ferramenta AISI D2, aço SKD61, entre outros. (INFANTE e VIDA, 2014).

Super ligas à base de níquel e cobalto foram inicialmente criados para aplicações e, componentes de motores de aeronaves por oferecer alta resistência, ductilidade, boa fluência e resistência à corrosão. No entanto, super ligas são difíceis de usar, o que faz com que haja dificuldade em produzir características complexas no perfil da ferramenta. Ligas à base de níquel, como *Nickel-based alloys*, como IN738LC, IN939, MARM-002, Stellite 12, IN-100, PM 3030, Nimonic 90, Inconel 718, Waspalloy and Nimonic 105, vêm sendo utilizados na soldagem por fricção de ligas de cobre. A liga a base de cobalto e níquel, MP 159, tem sido

utilizado como material de ferramenta do processo de soldagem por fricção de ligas de alumínio (INFANTE e VIDA, 2014).

Tungstênio, molibdênio, nióbio e tântalo são utilizados como materiais de ferramentas. Porém, os metais refratários possuem disponibilidade limitada, longos prazos de entrega, custos elevados e são difíceis de serem usinados (INFANTE e VIDA, 2014).

Carbetos são comumente usados como materiais para pinos e “ombros” no processo de soldagem por fricção (FSW) em temperatura ambiente, pois oferecem maior resistência ao desgaste e razoável tenacidade à fratura. Matrizes metálicas reforçadas por partículas cerâmicas também têm sido utilizados como materiais para ferramentas, porém a natureza frágil do compósito pode resultar em fratura durante o mergulho da ferramenta. Carbetos possuem uma melhor performance em elevadas temperaturas, e, portanto, adequadas para produção de ferramentas de usinagem (INFANTE e VIDA, 2014).

Nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN) foi originalmente desenvolvido para a usinagem de aços ferramenta, ferros fundidos e super ligas. Recentemente, PCBN ganhou aceitação como um material para ferramenta de fricção, especialmente para ligas de alta temperatura. O PCBN foi escolhida como uma ferramenta de fricção com base em seu sucesso anterior em aplicações de usinagem extremas. Além disso, tem um baixo coeficiente de fricção que resulta numa solda com superfície lisa. No entanto, devido à altas temperaturas e pressões necessárias no processo de fabricação do PCBN, os custos de produção da ferramenta são muito elevados. Devido à sua baixa resistência à fratura, o PCBN também tem uma tendência em falhar durante a fase de mergulho da ferramenta (INFANTE e VIDA, 2014).

3.3.6 Materiais soldáveis por FSW

As propriedades mecânicas melhoradas das soldas de FSW faz com que esta técnica seja propensa a uma vasta gama de aplicações industriais. A soldagem de materiais de baixa temperatura de fusão por FSW, tais como o alumínio e as suas ligas, tem sido adotadas e comercializadas, e, recentemente, o interesse agora está focado em unir alumínio a metais diferentes, como cobre, magnésio, aços e titânio. A princípio, a técnica FSW ganhou atenção significativa no processo de união de ligas de alumínio, mas agora sua aplicação foi estendida a metais relativamente mais duros e também a polímeros (GIVI e ASADI, 2014).

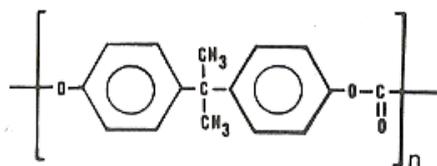
3.3.6.1 Soldagem por Fricção aplicada a Polímeros

A medida que a solicitação por tecnologia de alta eficiência em engenharia de Polímeros está crescendo nos laboratórios científicos, as técnicas de união de polímeros têm atraído uma atenção considerável. Existem vários métodos para a junção de polímeros, que podem ser categorizadas em: por radiação (exemplo: processo laser), por condução de calor (exemplo: processo gás quente) e por fricção (exemplos: processo por ultrassom e friction stir welding) (GIVI e ASADI, 2014).

Embora plásticos ofereçam altos graus de liberdade de design e capacidade de processamento, a fabricação de peças maiores e complexas geralmente requerem tecnologias de união, como a soldagem. Ao contrário dos materiais metálicos, polímeros têm uma dureza baixa, uma temperatura de fusão muito baixa o qual é rapidamente alcançado pelo fenômeno de fricção, um curto espaço de tempo de solidificação e uma baixa condutividade térmica. Vários materiais poliméricos foram soldadas com sucesso incluído polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), polipropileno (PP), acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e policarbonato (PC) (BAGHERI, AZDAST e DONIAVI, 2012).

3.4 Policarbonato

Figura 12. Estrutura química do Policarbonato



Fonte: (MANO, 2003)

Os policarbonatos são polímeros de cadeia longa (peso molecular de 10000-30000g/mol) compostos pela reação dos monômeros fosgênio e 4,4'-difenol-propano. São polímeros termoplásticos com baixa cristalinidade. Suas características principais são: densidade por volta de 1,20gcm⁻³, índice de refração de 1,59. Em relação as suas propriedades térmicas os policarbonatos possuem temperatura de Fusão (T_m) de cerca de 268°C e temperatura de Transição Vítreia (T_g) de cerca de 150°C.

Os policarbonatos possuem algumas propriedades importantes como por exemplo alta resistência ao impacto, boa estabilidade dimensional, boa resistência ao escoamento sob carga e resistência a chama.

Suas aplicações típicas são em janelas de segurança, escudos de proteção, lanternas de carro, capacete de proteção, artigos esportivos, para-choques, etc.

3.4.1 Soldagem por Fricção de Policarbonato (PC):

A soldagem por fricção (FSW) de materiais termoplásticos, tais como polipropileno e policarbonato, pode ser utilizada como uma alternativa aos métodos clássicos de união de tais materiais. A resistência da solda destes materiais é altamente influenciada por parâmetros FSW tais como taxa de rotação, velocidade de deslocamento e ângulo de inclinação da ferramenta (SHAZLY, M.M.Z e EL-RAEY, 2014).

Os autores investigaram o efeito de diferentes parâmetros do processo FSW, tais como velocidade de rotação da ferramenta, velocidade transversal e ângulo de inclinação da ferramenta através de uma série de procedimentos experimentais tais como preparação, união, teste e avaliação da qualidade da junta soldada.

Em seu trabalho, os autores utilizaram uma placa de policarbonato com dimensões iguais a 1000x1000x10 mm. Posteriormente essa placa foi cortada em placas retangulares com dimensões de 200 mm de comprimento e 100 mm de largura. O equipamento utilizado foi uma fresadora que pode atingir até 1850 RPM, uma ferramenta FSW cilíndrica feita de aço H13 com um pino rosqueado com passo de 1mm (figura 13). O ombro da ferramenta possui 20 mm de diâmetro, o pino possui 7mm de diâmetro e 9mm de comprimento.

Figura 13. Ferramenta FSW utilizada.



Fonte: (SHAZLY, M.M.Z e EL-RAEY, 2014).

O processo FSW foi realizado sob três velocidades de rotação de ferramenta diferentes 1000, 1220 e 1850 RPM; Velocidades transversais de 20 e 40 mm/min e ângulos de inclinação da ferramenta de 1 e 3 graus. Duas placas de policarbonato foram unidas e fixadas utilizando uma sistema de fixação ilustrada na figura 14, a fim de reduzir a vibração da peça de trabalho,

particularmente quando se utilizaram altas velocidades de soldagem e de velocidades transversais.

Figura 14. Sistema de fixação utilizada.



Fonte: (SHAZLY, M.M.Z e EL-RAEY, 2014).

As propriedades mecânicas do material base e dos materiais soldados foram comparadas para estudar o efeito dos parâmetros de soldagem na junta resultante. Os ensaios de tração e as microdurezas foram realizados para este fim.

Finalizando, (SHAZLY, M.M.Z e EL-RAEY, 2014), concluíram que: O policarbonato foi unido com sucesso pela técnica FSW e alcançou uma eficiência de na junta de 30,78%. Conseguiu-se uma força máxima à velocidade de rotação de 1220 RPM, velocidade transversal 40mm/min e um ângulo de inclinação de 1°. A dureza máxima foi alcançada a uma velocidade de rotação de 1850 RPM, velocidade de deslocamento de 20 mm/min e ângulo de inclinação de 1°. Notou-se também que o aumento dos parâmetros teve um efeito inverso no perfil de dureza. Eles recomendaram deixar a amostra atingir a temperatura ambiente antes de soltá-la para evitar distorções.

4. Metodologia

4.1 Equipamentos

Para a soldagem FSW foi utilizado uma fresa do fabricante CLEVER modelo FH-4 (figura 15) o qual possui controle da velocidade de rotação da ferramenta (até 2160 RPM), cabeçote inclinável, indicador de posição da mesa digital e avanço automático nos 3 eixos (X, Y e Z).

Figura 15. Fresadora modelo CLEVER FH-4.



Fonte: Elaborada pelo Autor

4.2 Materiais

4.2.1 Placas de Policarbonato

Foram utilizados placas de Policarbonato branco de dimensões 178mm x 48mm x 3mm (figura 16). O policarbonato é importante por ser um polímero termoplástico de engenharia, com alta temperatura de fusão (tratando-se de polímeros) entre 225-250°C e alta temperatura de transição vítrea (T_g) de cerca de 145°C cedida pela empresa Toldoflex. Possui alta resistência ao impacto e devido as suas propriedades ópticas, como a transparência, o policarbonato é um material bastante utilizado na indústria.

Para o corte das placas de policarbonato nas dimensões desejadas, foi utilizado uma guilhotina de chapas metálicas.

A máquina fresadora foi utilizada para fazer o acabamento das placas de policarbonato, de modo a facilitar a montagem e auxiliar no alinhamento das mesmas.

Figura 16. Placas de Policarbonato branco com dimensões 178 mm x 48 mm x 3 mm



Fonte: Elaborada pelo Autor

4.2.2. Fabricação das Ferramentas

Para a fabricação da ferramenta, o material escolhido, segundo a literatura consultada, foi o aço H13. O aço H13 possui as seguintes vantagens: possui uma elevada resistência ao desgaste, resistência a trinca por fadiga térmica, boa usinabilidade, baixo custo e características bem estabelecidas. As ferramentas foram usinadas em um torno mecânico.

Não foi feita análise química da ferramenta, porém na tabela abaixo é apresentada a especificação técnica do aço H13 da Villares Metals:

Tabela 2. Especificação Técnica aço H13.

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,4	1,00	0,35	5,20	1,50	0,90

Fonte: Villares Metals

Foram fabricadas quatro ferramentas variando-se a geometria dos pinos, sendo eles: pino cilíndrico, cilíndrico rosqueado, cônico e hexagonal.

Os desenhos técnicos das ferramentas estão no anexo 9.3, 9.4, 9.5 e 9.6 do trabalho.

As ferramentas foram submetidas a tratamentos térmicos de têmpera e revenimento seguindo-se as recomendações da Villares Metals.

A têmpera foi realizada aquecendo-se o aço até 1000°C com um pré-aquecimento a partir de 400°C. O tempo de encharque foi de 1h. Após o encharque, o aço foi resfriado em óleo apropriado com agitação.

O revenimento foi realizado logo depois da têmpera. Foram feitos dois revenimentos com um intervalo de 1 hora entre cada devido ao resfriamento ao ar. A temperatura de revenimento foi de 600°C com 2h de tempo de encharque.

4.2.3 Fabricação do Sistema de Fixação

Para a fabricação do sistema de fixação, o material utilizado foi um aço ASTM A36, pois além do custo ser baixo, não há justificativa de se utilizar um material com propriedades mecânicas específicas sendo que não há altas solicitações mecânicas para tal.

O acabamento superficial do sistema de fixação foi feita por uma retificadora plana, de modo a melhorar o acabamento superficial e obter maior confiabilidade e planicidade.

Foi feita uma marcação no centro do sistema de fixação para auxiliar o alinhamento das placas, para servir como referência para centralizar o pino da ferramenta e para não haver inclinação das placas de policarbonato devido a força dos grampos direcionada para baixo.

A distância entre os rebaixos dos grampos projetada é de até 100mm, o qual é o comprimento suficiente para produzir corpos de prova para ensaios de tração de polímeros com 3mm de espessura (type V) segundo a norma ASTM D638-02a. O comprimento do corpo de prova, segundo essa norma, é de 63,5mm.

Os desenhos técnicos do sistema de fixação estão no anexo 9.1 e 9.2 do trabalho

4.3 Operação de Soldagem

No processo de soldagem FSW, os parâmetros que influenciam a resistência da solda são a velocidade de rotação, velocidade de deslocamento e ângulo de inclinação da ferramenta (SHAZLY, M.M.Z e EL-RAEY, 2014). Além disso, a geometria da ferramenta e a força normal aplicada pela ferramenta também influenciam.

De forma a avaliar os efeitos dos parâmetros de soldagem para obter-se uma solda com bom aspecto visual, foi utilizada apenas a ferramenta com geometria cilíndrica (sem rosqueamento), por ser mais simples, para que futuros testes tomem como base os resultados obtidos. Devido a

dificuldade encontrada em manter uma repetibilidade nos testes, as outras ferramentas fabricadas, a princípio, não foram utilizadas.

A tabela 3 apresenta os parâmetros empregados durante os testes. Nota-se que foram variadas a rotação da ferramenta e o ângulo de inclinação.

Tabela 3. Parâmetros do processo de soldagem FSW analisados

Ferramenta	Rotação (RPM)	Velocidade de Avanço (mm/min)	Ângulo da Ferramenta
Cilíndrica	466	26	0°
Cilíndrica	642	26	0°
Cilíndrica	864	26	0°
Cilíndrica	1176	26	0°
Cilíndrica	1590	26	0°
Cilíndrica	466	26	1°
Cilíndrica	642	26	1°
Cilíndrica	864	26	1°
Cilíndrica	1176	26	1°
Cilíndrica	1590	26	1°

Fonte: Elaborada pelo Autor

5. Resultados e Discussões

5.1 Sistema de Fixação

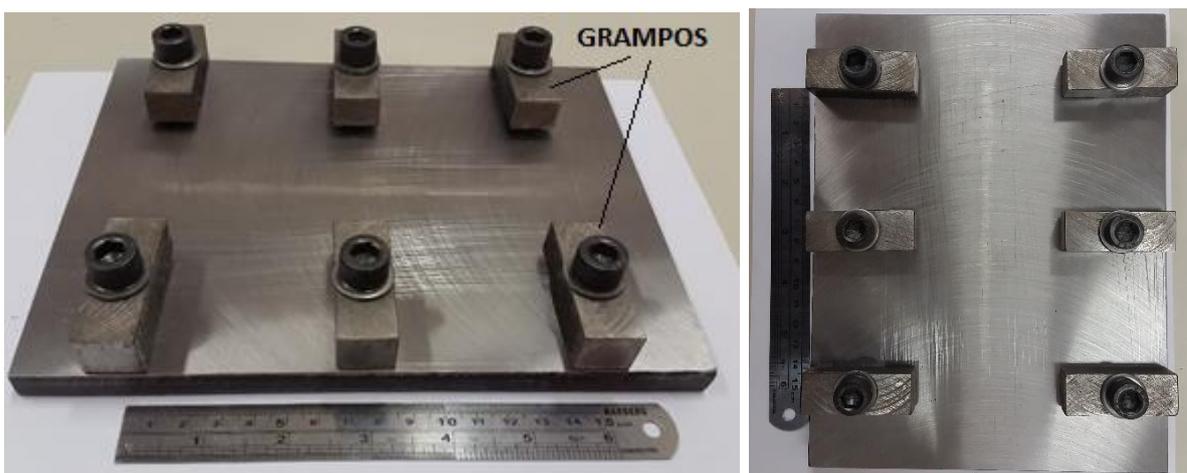
De acordo com a bibliografia consultada, alguns autores utilizavam pinos passantes e, por outro lado, outros autores não. Sendo assim, o sistema de fixação a ser utilizado foi projetado com um rebaixo (figura 17) para que o pino da ferramenta a ser utilizado fosse passante, porém, nos testes preliminares foi constatado que o pino passante expulsava o material e a solda não era formada. Portanto, para os resultados apresentados neste trabalho, foi-se utilizado o lado sem rebaixo (figura 18) do sistema de fixação.

Figura 17. Sistema de Fixação com rebaixo



Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 18. Sistema de Fixação sem rebaixo



Fonte: Elaborada pelo Autor

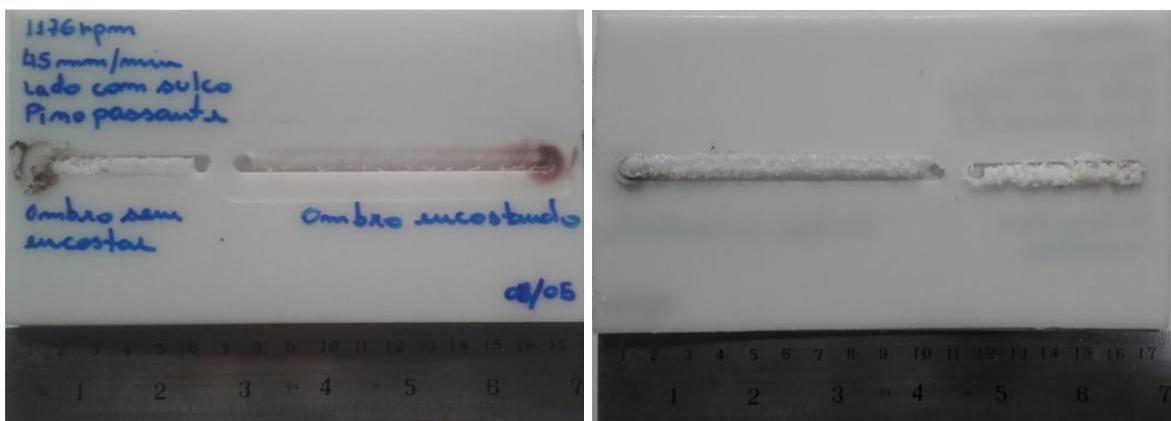
Durante realização dos experimentos foi constatada a importância de um rígido sistema de fixação, pois as placas adquiridas para o presente trabalho apresentavam um perfil convexo, devido a forma de como elas eram armazenadas (na forma de rolos), ou seja, não eram

totalmente planas. Portanto era necessário a fixação destas para que houvesse uniformidade no perfil das placas. Além disso, a fixação das placas era importante para que as placas não fossem lançadas para fora do sistema de fixação devido a rotação da ferramenta.

5.2 Ferramentas

Os pinos das ferramentas fabricadas foram projetados para serem passantes de acordo com a bibliografia consultada. No entanto, foi observado que a ferramenta passante expulsava o material para o rebaixo do sistema de fixação, como pode ser observado na figura 19.

Figura 19. Placa de policarbonato com furo passante na área da solda



Fonte: Elaborada pelo Autor

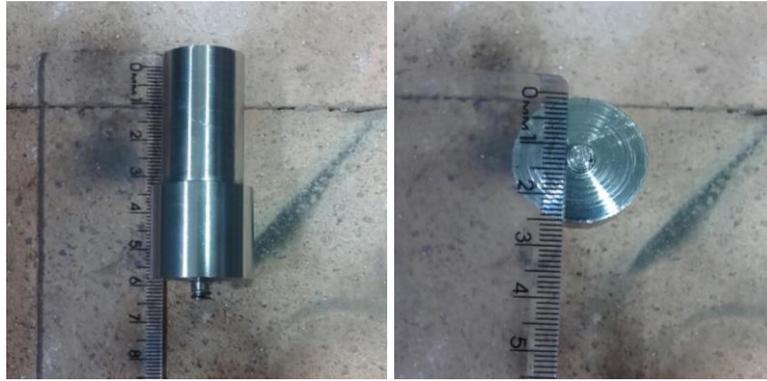
Sendo assim, a ferramenta com pino passante foi modificada e a altura do pino foi reduzida para 2,56 mm. As ferramentas antes e pós-tratamento térmico são mostradas nas figuras 20, 21, 22, 23 e 24. Pode ser observado que houve formação de carepa devido a oxidação nas ferramentas tratadas térmicamente.

Figura 20. Ferramenta Cilíndrica pré-tratamento térmico



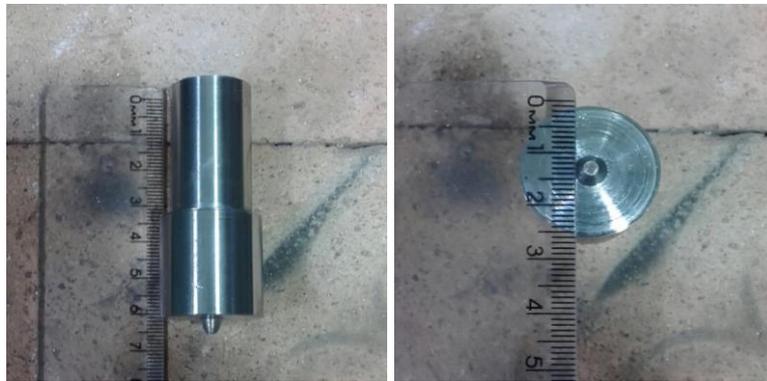
Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 21. Ferramenta Cilíndrica Rosqueada pré-tratamento térmico



Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 22. Ferramenta Cônica pré-tratamento térmico



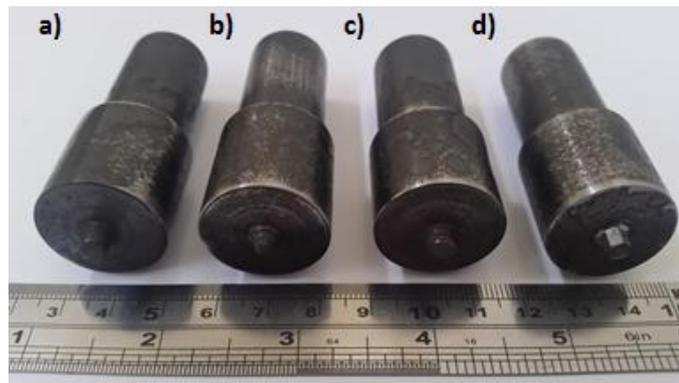
Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 23. Ferramenta Hexagonal pré-tratamento térmico



Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 24. Ferramentas pós-tratamento térmico. (a) Cilíndrica; (b) Cônica; (c) Rosqueada; (d) Hexagonal



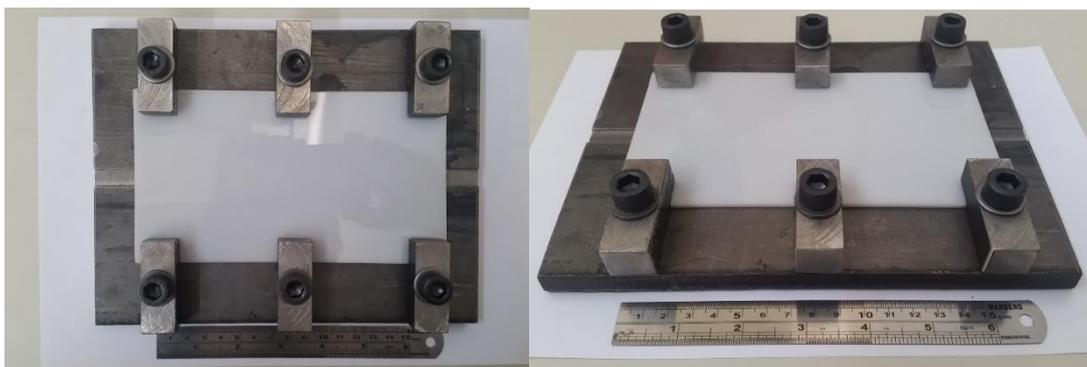
Fonte: Elaborada pelo Autor

5.3 Avaliação das Soldas e do Processo de Soldagem FSW

Antes de realizar o processo de soldagem, a verificação da planicidade do sistema de fixação deve ser feita. Essa verificação é importante para certificar que a diferença de altura entre os lados opostos do sistema de fixação tenham a menor influência sobre o processo. Essa diferença é bastante comum se o sistema não estiver assentado corretamente na morsa.

A montagem do sistema de fixação com as placas de policarbonato para o processo de soldagem FSW está mostrado na figura 25.

Figura 25. Sistema de fixação com as placas



Fonte: Elaborada pelo Autor

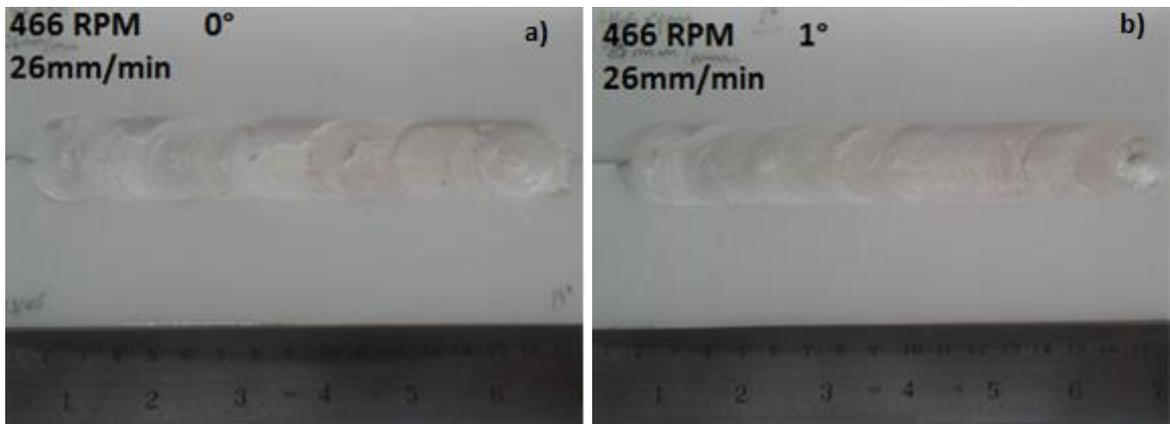
5.3.1 Avaliação Visual

A soldagem FSW foi realizada alterando-se os parâmetros: rotação da ferramenta e ângulo da ferramenta.

As figuras 26, 27, 28, 29 e 30 apresentam os resultados das soldas com mudança na rotação da ferramenta e variação do ângulo de inclinação da ferramenta. Na coluna a esquerda encontram-

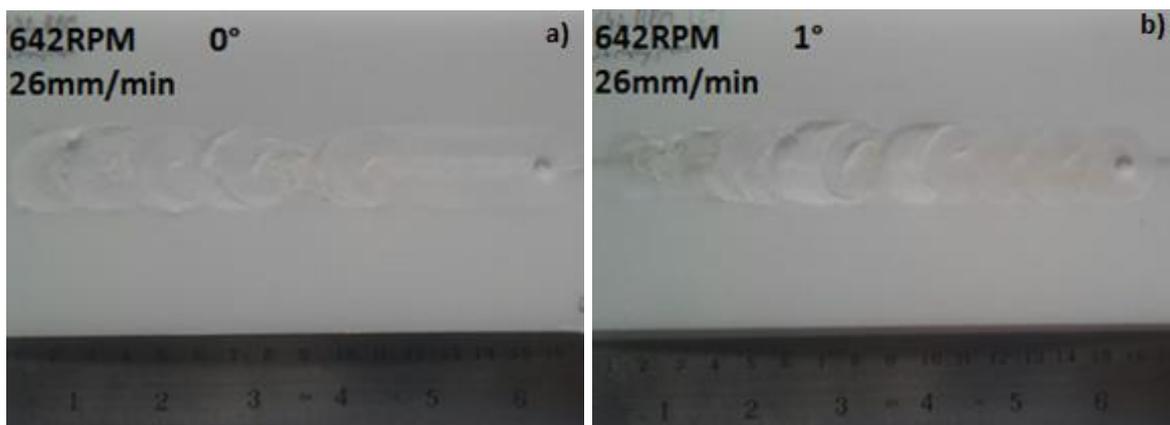
se as soldagens em determinada rotação (de acordo com a legenda) e com 0° de inclinação e na coluna a direita encontra-se os resultados das soldagens com 1° de inclinação.

Figura 26. Soldagem FSW a 466RPM e 26mm/min. (a) ângulo de inclinação 0° ; (b) ângulo de inclinação 1°



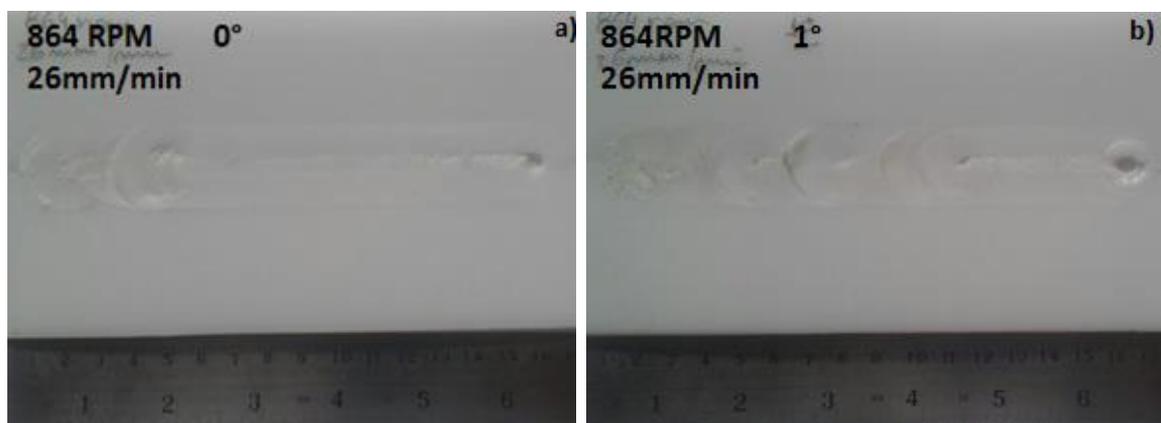
Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 27. Soldagem FSW a 642RPM e 26mm/min. (a) ângulo de inclinação 0° ; (b) ângulo de inclinação 1°



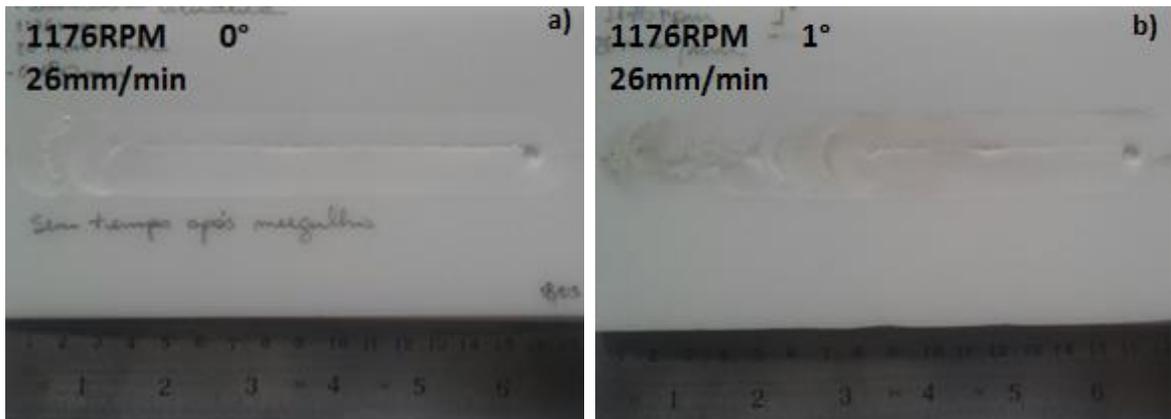
Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 28. Soldagem FSW a 864RPM e 26mm/min. (a) ângulo de inclinação 0° ; (b) ângulo de inclinação 1°



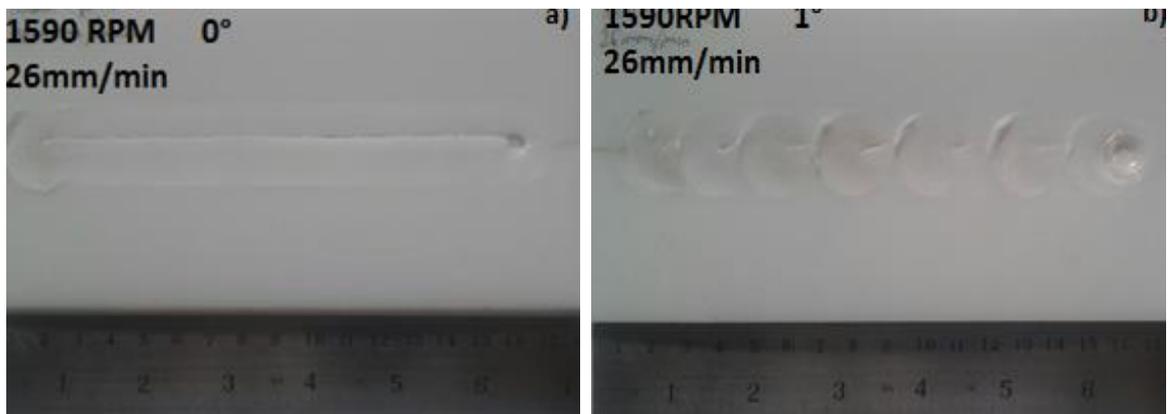
Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 29. Soldagem FSW a 1176RPM e 26mm/min. (a) ângulo de inclinação 0°; (b) ângulo de inclinação 1°



Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 30. Soldagem FSW a 1590RPM e 26mm/min. (a) ângulo de inclinação 0°; (b) ângulo de inclinação 1°



Fonte: Elaborada pelo Autor

A uniformidade, parcial ou em grande extensão, da superfície da solda obtida com as ferramentas inclinadas a 0° e 1°, que podem ser observadas nas figuras 27a, 28a, 28b, 29a, 29b, e 30a, sugerem que a rotação tem pouca influencia sobre a uniformidade da qualidade superficial da solda, mas sugere que o sistema de fixação não estava mantendo plana as placas de policarbonato de modo satisfatório, pois, por estas apresentarem perfil convexo, e portanto, ondulações ao longo do sistema, as placas estavam “travando” a ferramenta durante a soldagem FSW, levando a uma não uniformidade do aspecto visual da solda. Uma provável solução é a fabricação de novos grampos para reduzir os desníveis na região da zona de mistura.

A rotação, por outro lado, influenciou consideravelmente a formação de defeitos como a falta de mistura no lado avançado a medida que aumentou-se a rotação e, provavelmente, irá influenciar as propriedades mecânicas das soldas. O oposto foi observado por (BAGHERI, AZDAST e DONIAVI, 2012). Eles observaram que, devido ao fluxo de material ser diferente

no lado avançado e recuado das amostras de soldagem, uma falta de material no lado recuado da solda ocorreu e levou a fratura frágil nessa área. Adicionalmente, segundo (ESLAMI, DE FIGUEIREDO, *et al.*, 2017), geralmente no processo FSW, o lado avançado (*advancing side*) é mais quente do que o lado recuado (*retreating side*) levando à formação de defeitos por geração insuficiente de calor no lado recuado (*retreating side*) da solda. A baixa condutividade térmica dos polímeros, amplifica essa questão levantada por (ESLAMI, DE FIGUEIREDO, *et al.*, 2017).

O “ombro” da ferramenta deve encostar na placa a ser soldada, para que gere calor por fricção e também diminua a perda de material. Essa é uma etapa crítica para que o aspecto visual da superfície da solda seja adequado. O contato entre o ombro da ferramenta e a superfície do substrato deve ser o mínimo possível para que o ombro não mergulhe para dentro da placa causando maior deformação e fusão do polímero (figura 31) e, como consequência, a adesão do polímero na superfície do ombro, como mostrado na figura 32. Para controlar o quanto o ombro deve encostar na superfície da placa é sugerido a utilização de uma célula de carga para medir a força normal (*axial force*) aplicada pela ferramenta.

Figura 31. Placa de policarbonato com deformação causada pelo ombro na região da solda



Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 32. Adesão do Polímero na Superfície do Ombro



Fonte: Elaborada pelo Autor

6. Conclusões

O trabalho desenvolvido com o objetivo de fabricação de um sistema de soldagem FSW de placas de Policarbonato, composto de um dispositivo para fixação de placas e ferramentas para realização da soldagem, permitiu concluir que:

- A força normal aplicada pela ferramenta na placa de policarbonato é um parâmetro crítico na soldagem FSW, pois ela irá ditar o quanto que o ombro mergulha na placa e, portanto, na qualidade superficial da solda.
- O sistema de fixação se mostrou muito importante no processo FSW, pois foi constatado que a placa a ser soldada deve ser mantida o mais plano possível para que uma boa qualidade da superfície da solda seja adquirida.
- Repetibilidade tem que ser melhorada, para isso é sugerido a utilização de uma célula de carga para medir a força normal (*axial force*) aplicada pela ferramenta.
- Foi-se observado que, quanto maior a velocidade de rotação, mantendo-se a velocidade de avanço constante para todos os testes, maior a falta de mistura na região da solda, especialmente na região do lado “avançado” (*advancing side*).
- A avaliação das melhores condições do processo é uma tarefa muito complexa, pois muitos parâmetros do processo devem ser considerados e todos estes parâmetros são interligados.
- É possível a realização da soldagem FSW de placas de policarbonato com uma boa qualidade visual de solda desde que os parâmetros estejam calibrados.

7. Sugestões para trabalhos futuros

- Fabricação de novos grampos para aumentar a área de contato entre o grampo e a placa com o objetivo de melhorar a fixação das placas e mantê-las o mais plano possível.
- Realizar a soldagem FSW usando um termômetro infravermelho para observar se a solda está se formando no estado sólido ou no estado líquido (acima da T_m), pois foi observado por (SIMÕES e RODRIGUES, 2013) que houve fusão parcial do polímero na região de mistura durante a soldagem.
- Realizar soldagem FSW de placas de Policarbonato com pinos de geometria variada e verificar a influência destes na qualidade da solda.
- Realizar caracterização da solda usando outros métodos como ensaios de tração, microscopia, ensaios de dureza e DSC.
- Fabricação de um dispositivo chamado “Hot Shoe” (atua como ombro não-rotativo e evita que o material seja expulso. Como o ombro é estacionário, calor adicional deverá ser fornecido através de uma resistência) para verificar se há uma melhora na qualidade da solda superficial.

8. Referências

- ASTM Committee. Standard ASTM test method for tensile properties of plastics (D638-02a);
- AZARSA, E.; MOSTAFAPOUR, A. Experimental investigation on flexural behavior of friction stir welded high density polyethylene sheets. **Journal of Manufacturing Processes**, Tabriz, December 2013.
- BAGHERI, A.; AZDAST, T.; DONIAVI, A. An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets, Urmia, 2012.
- BANJARE, P. N.; SAHLOT, P.; ARORA, A. An assisted heating tool design for FSW of thermoplastics, Gandhinagar, Julho 2016.
- CAO, X.; WANJARA, P.; LAROSE, S. Review of tools for friction stir welding and processing. **Canadian Metallurgical Quarterly**, Julho 2012.
- ESLAMI, S. et al. Parameter optimisation of friction stir welded dissimilar polymers joints. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Janeiro 2017.
- FULLER, C. B. Friction Stir Tooling: Tool Materials and Designs. In: MISHRA, R. S.; MAHONEY, M. W. **Friction Stir Welding and Processing**. [S.l.]: ASM International, 2007.
- GAO, J. et al. Improvements of mechanical properties in dissimilar joints of HDPE and ABS via carbon nanotubes during friction stir welding process. **Materials and Design**, Nanjing, July 2015.
- GARBRECHT, A. M. et al. Efeito dos Parâmetros de Soldagem Friction Stir Welding Sobre a União de Chapas Sobrepostas de Acrílico, Horizontina, 2015.
- GIVI, M. K. B.; ASADI, P. **Advances in Friction-Stir Welding and Processing**. [S.l.]: A volume in Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, 2014.
- INFANTE, V.; VIDA, C. Tool and welding design. **Elsevier Limited**, Lisboa, 2014.
- JAIGANESH, V.; MARUTHU, B.; GOPINAT, E. Optimization of process parameters on friction stir welding of high density polypropylene plate, 2014.
- MANO, E. B. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. 3a. ed. [S.l.]: Editora Edgard Blucher LTDA, 2003.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3ª. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.
- MISHRA, R. S.; SARATHI DE, P.; KUMAR, N. Friction Stir Welding and Processing. In: _____ **Friction Stir Welding and Processing**. [S.l.]: Springer International Publishing, 2007.
- SHAZLY, M.; M.M.Z, A.; EL-RAEY, M. Friction Stir Welding of Polycarbonate Sheets, Fevereiro 2014.

SIMÕES, F.; RODRIGUES, D. M. Material flow and thermo-mechanical conditions during Friction Stir Welding of polymers Literature review, experimental results and empirical analysis, Coimbra, December 2013.

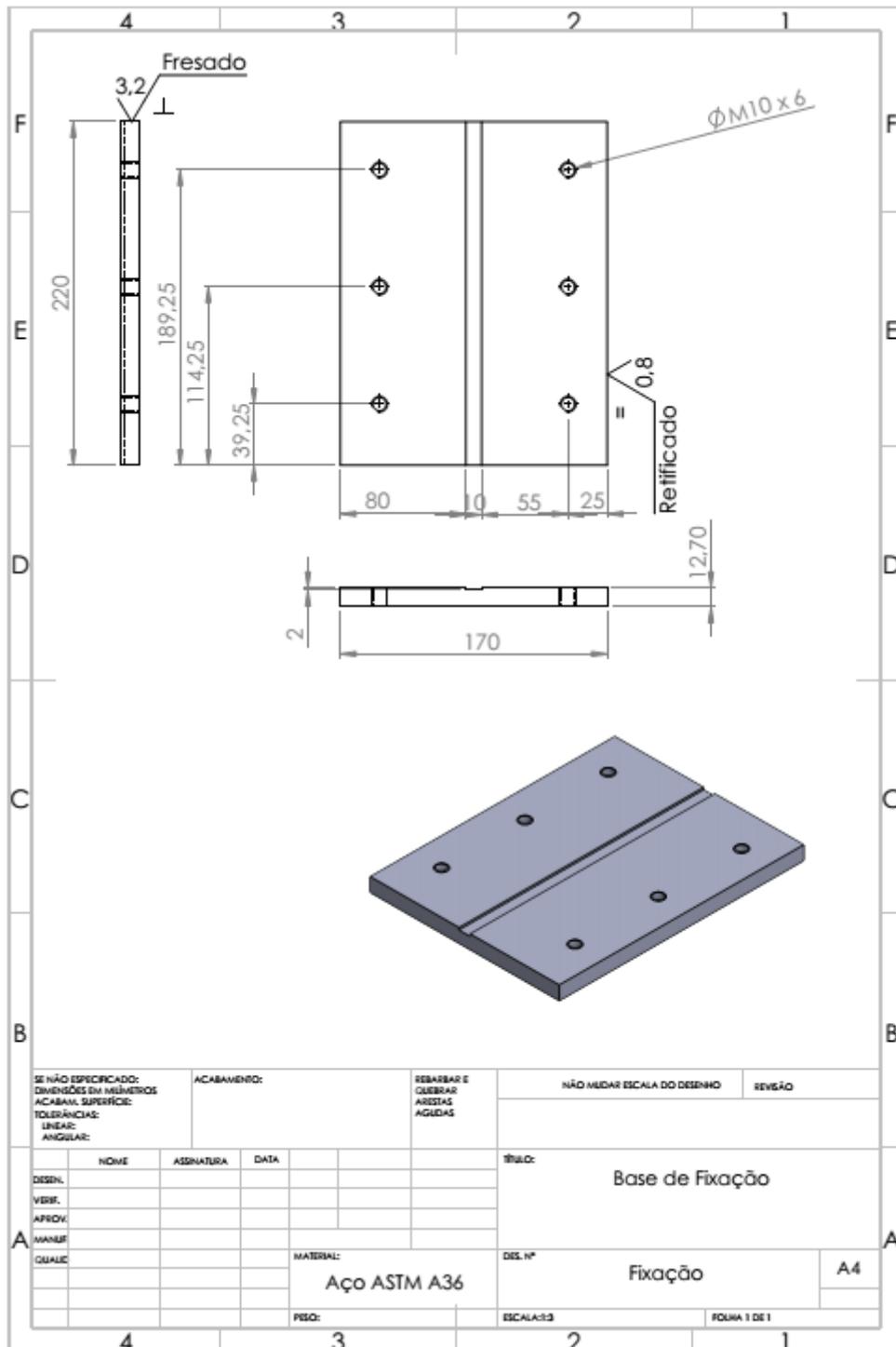
STRAND, S. R. Effects of Friction Stir Welding on Polymer Microstructure, 2004.

THOMAS, W. M. **Friction stir welding**. 306–66, 1996.

9. Anexos

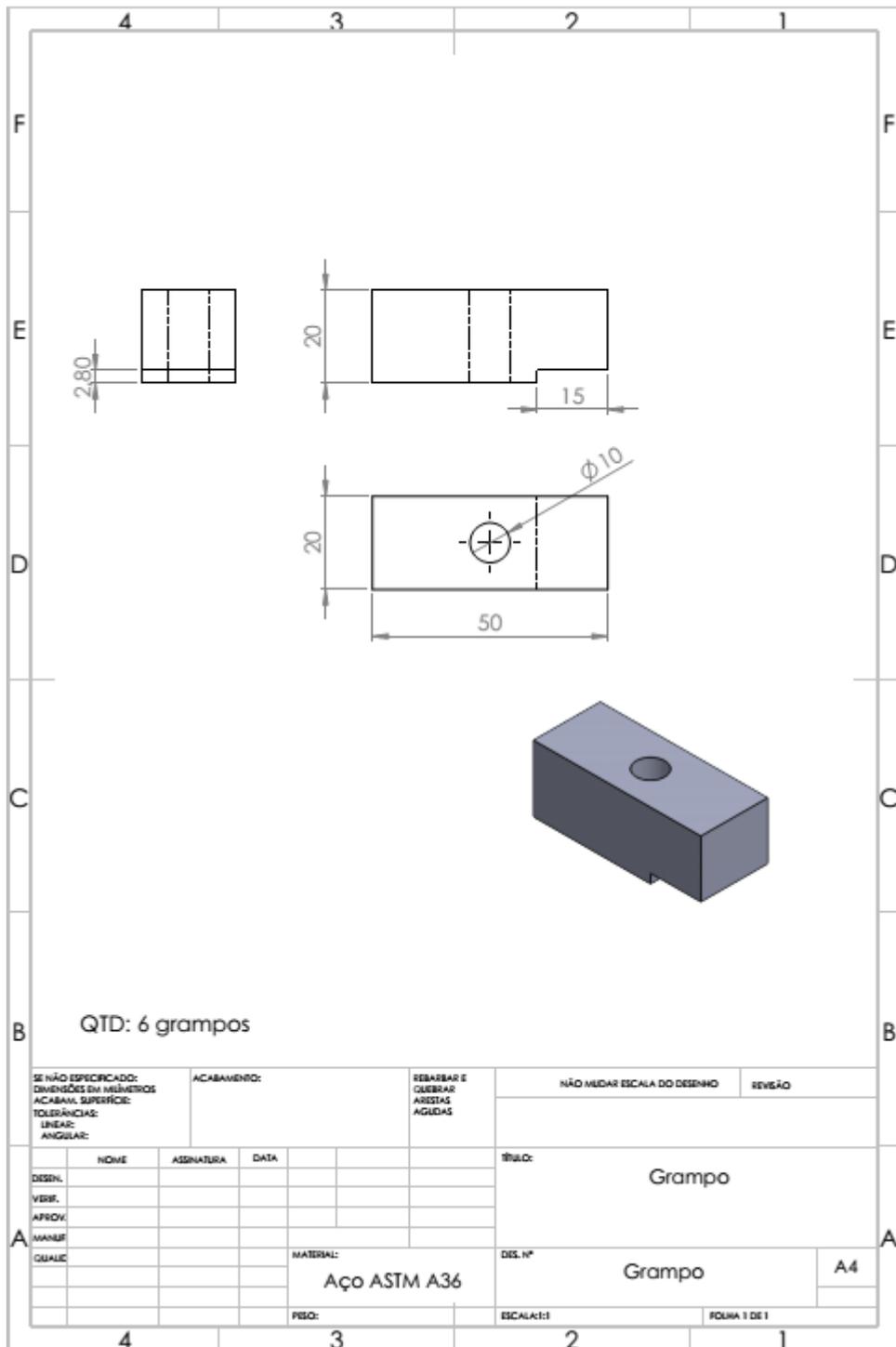
9.1 Desenho Técnico da Base do Sistema de Fixação

Figura 33. Desenho Técnico da Base do Sistema de Fixação



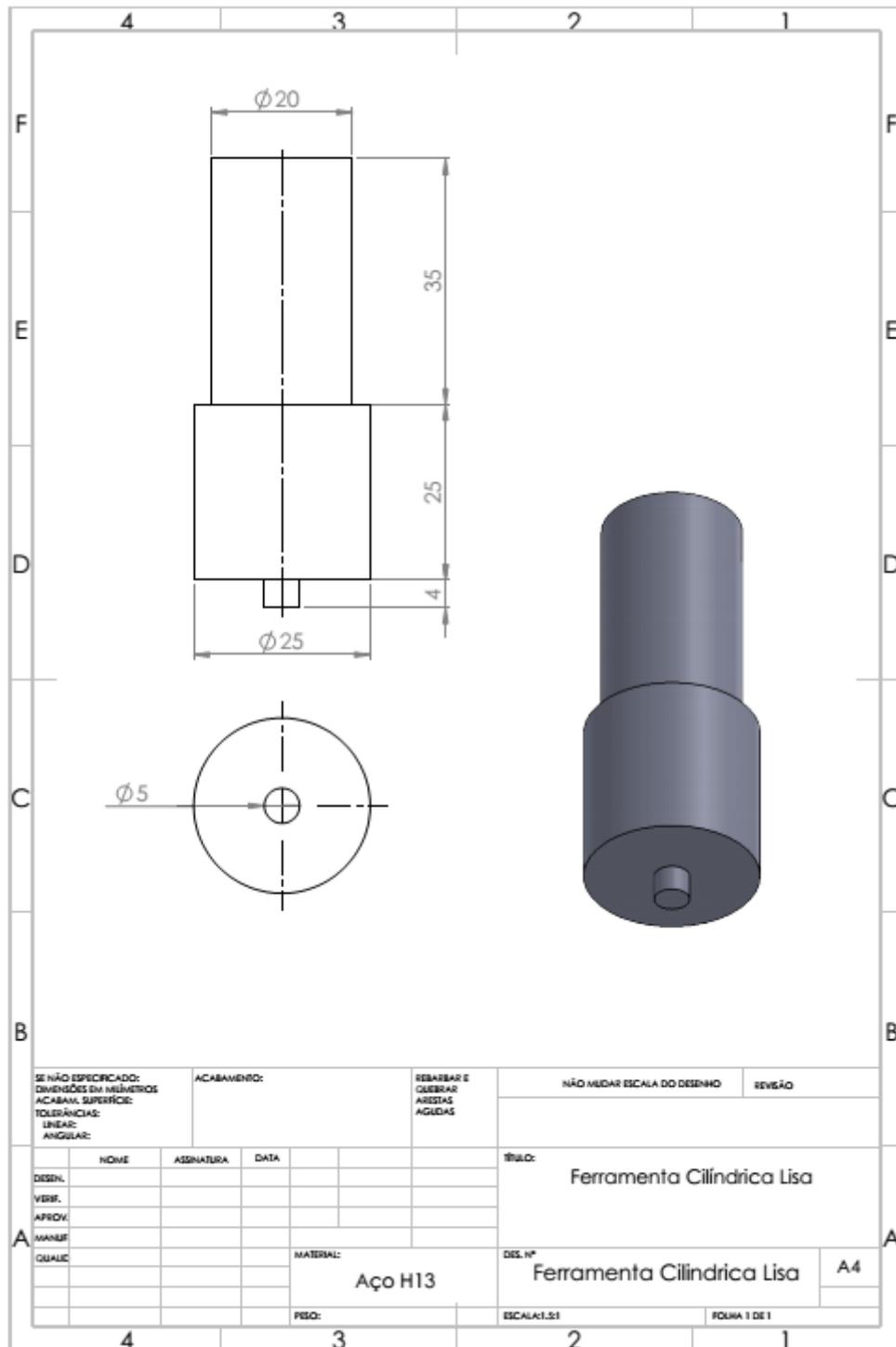
9.2 Desenho Técnico dos Grampos do Sistema de Fixação

Figura 34. Desenho Técnico dos Grampos do Sistema de Fixação



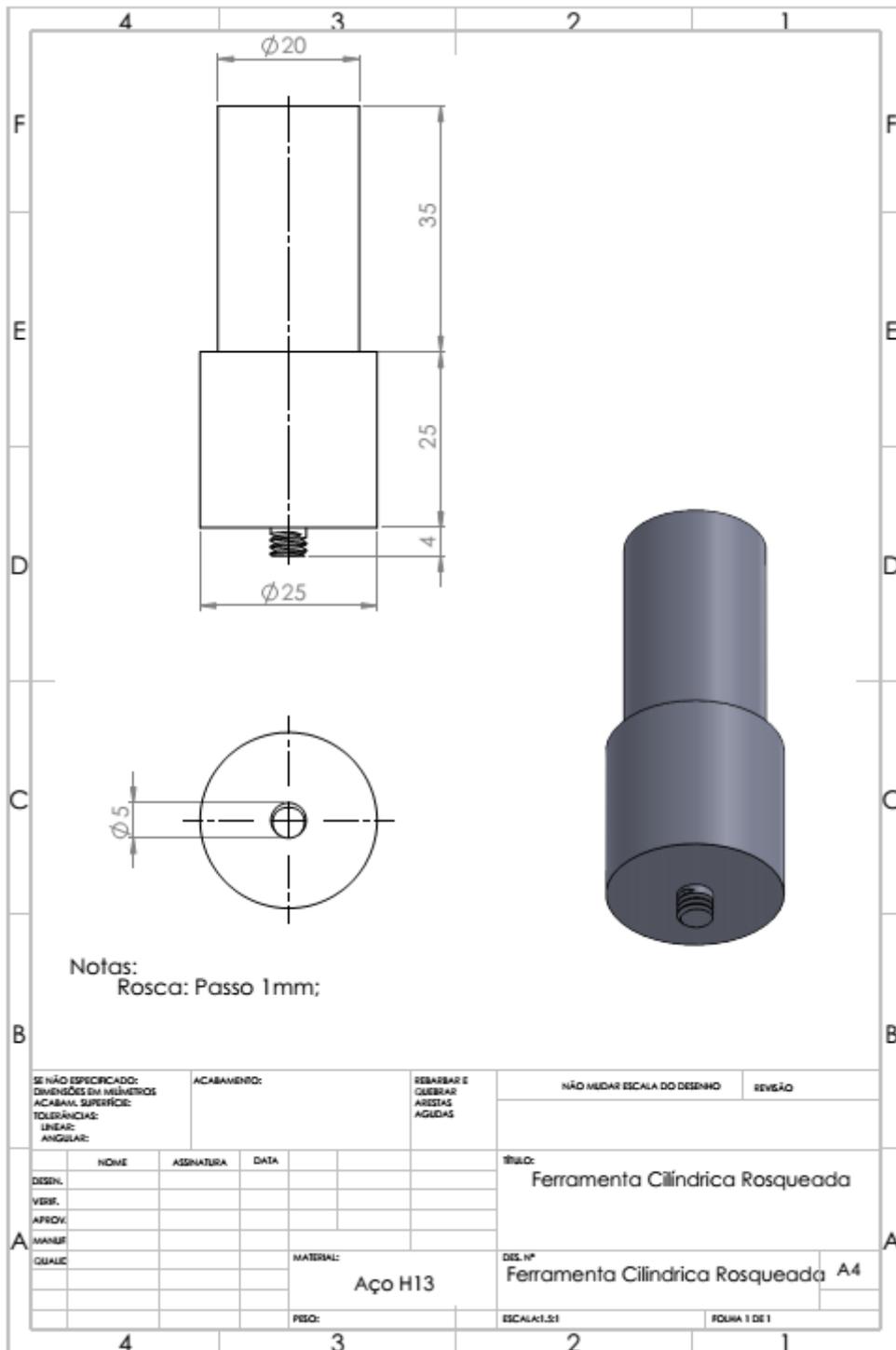
9.3 Desenho Técnico da Ferramenta Cilíndrica

Figura 35. Desenho Técnico da Ferramenta Cilíndrica



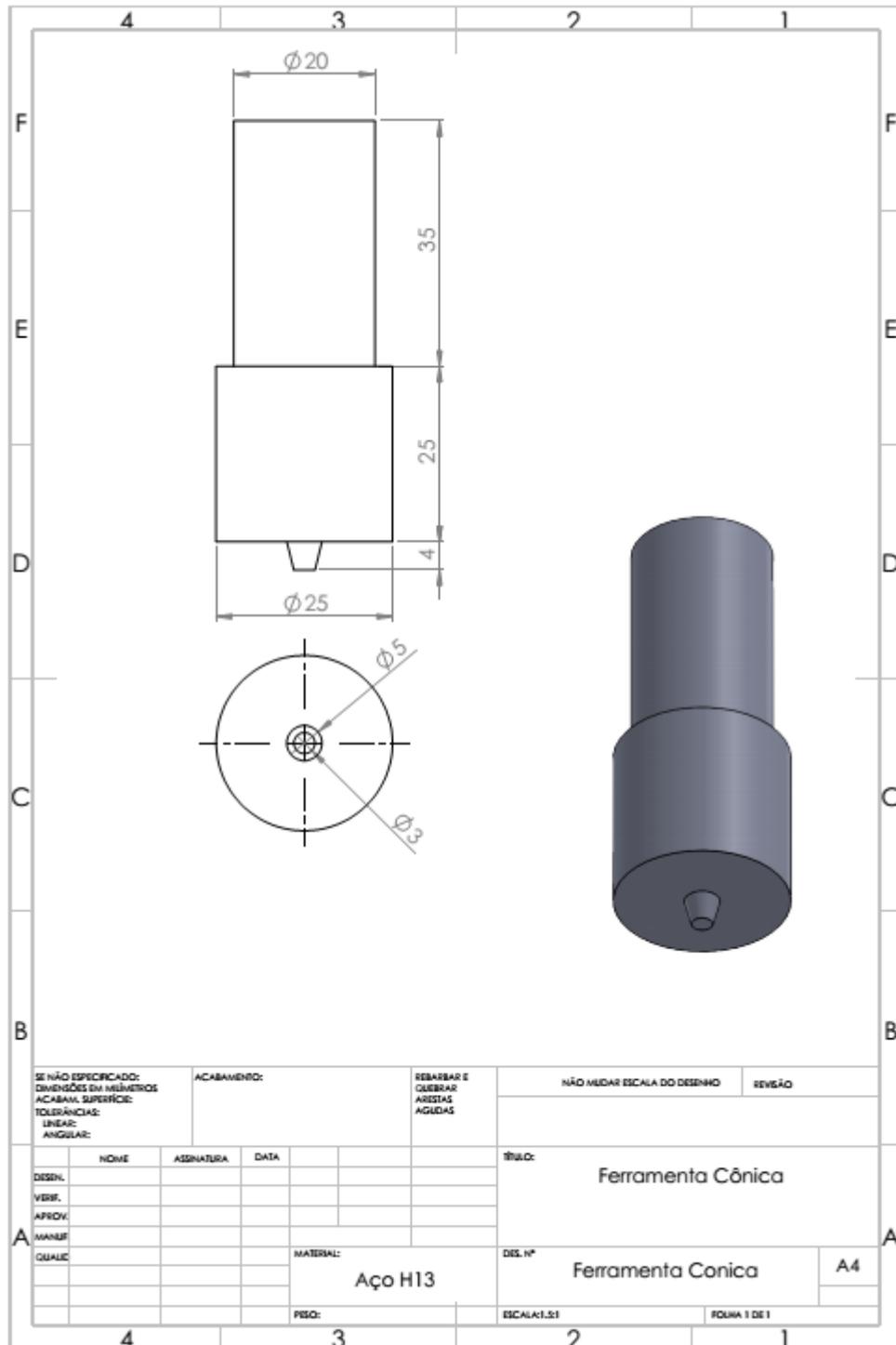
9.4 Desenho Técnico da Ferramenta Cilíndrica Rosqueada

Figura 36. Desenho Técnico da Ferramenta Cilíndrica Rosqueada



9.5 Desenho Técnico da Ferramenta Cônica

Figura 37. Desenho Técnico da Ferramenta Cônica



9.6 Desenho Técnico da Ferramenta Hexagonal

Figura 38. Desenho Técnico da Ferramenta Hexagonal

