

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Leonardo Viana Dias

**INFLUÊNCIA DAS VELOCIDADES DE ROTAÇÃO E DESLOCAMENTO SOBRE
SOLDAS PRODUZIDAS EM POLICARBONATO PELO PROCESSO FRICTION
STIR WELDING**

**Belo Horizonte
Agosto de 2020**

Leonardo Viana Dias

INFLUÊNCIA DAS VELOCIDADES DE ROTAÇÃO E DESLOCAMENTO SOBRE
SOLDAS PRODUZIDAS EM POLICARBONATO PELO PROCESSO FRICTION
STIR WELDING

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Turani Vaz

Belo Horizonte

Agosto de 2020

D541i Dias, Leonardo Viana.
Influência das velocidades de rotação e deslocamento sobre soldas produzidas em policarbonato pelo processo friction stir welding / Leonardo Viana Dias. – 2020.
83 f. : il.

Orientador: Cláudio Turani Vaz

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2020.

Bibliografia.

1. Soldagem por fricção. 2. Solda e Soldagem. 3. Termoplásticos. 4. Polímeros. I. Vaz, Cláudio Turani. II. Título.

CDD: 671.52



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
“INFLUÊNCIA DAS VELOCIDADES DE ROTAÇÃO E
DESLOCAMENTO SOBRE SOLDAS PRODUZIDAS EM
POLICARBONATO PELO PROCESSO FRICTION STIR
WELDING”

Autor: Leonardo Viana Dias

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Turani Vaz

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Cláudio Turani Vaz (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. João Paulo Ferreira Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Bruno Silva Cota

Prof. Dr. Bruno Silva Cota
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Belo Horizonte, 22 de Junho de 2020.

AGRADECIMENTOS

Em 28 anos de vida, muito aconteceu para que eu pudesse chegar nesse momento, concluindo este trabalho. É impossível agradecer a tudo, mas alguns destaques são merecidos.

Em primeiro lugar ao meu orientador, Prof. Cláudio Turani, que me ajudou a evoluir, e a me tornar um pesquisador/professor mais completo.

Às instituições:

CEFET-MG, que desde o curso técnico de eletromecânica (2007), se tornou minha casa, e que me ajudou a escolher o que eu queria ser quando crescesse, e aqui ainda estou até hoje.

UFMG, lugar onde encontrei os modelos profissionais que me inspiram diariamente, em especial, o Prof. Modenesi e o Prof. Bracarense.

IFMG *campus* Ouro Branco, e a seu departamento de metalurgia, onde tenho colegas de trabalho que sei que posso contar, viabilizando o desenvolvimento da minha formação.

Aos colegas de jornada:

Rafael, que foi fundamental para trabalho, ajudando a desenvolver o dispositivo de fixação, e a padronizar a metodologia de soldagem.

Juscelino, que montou o dispositivo de aquisição de dados de temperatura, e, sempre encontrava algum tempo para ajudar, mesmo sabendo que o contrário, em muitas vezes, não poderia ser feito.

E por fim à Moara, que é a luz que me guia diariamente, me levando a momentos únicos em minha vida, fazendo parte fundamental dos caminhos mais importantes que tomei para chegar onde cheguei.

Por essas e muitas outras pessoas que creio em Deus, e sei que quando o trabalho é feito com coerência, o resultado pode demorar, mas ele chegará.

RESUMO

O aumento no uso dos materiais poliméricos, principalmente em aplicações estruturais, fomenta a necessidade de produção de peças maiores e mais complexas, atendendo a setores cada vez mais exigentes. Apesar da fácil processabilidade dos polímeros, propriedades como baixas temperaturas de degradação, condutividade térmica, capacidade de difusão e molhabilidade, além da grande variedade de *grades* e misturas, dificultam a união eficaz e com alta produtividade desses materiais. Dentre os diversos processos de união de polímeros, um dos mais recentes é a soldagem por *Friction Stir Welding* (FSW), que se baseia no aquecimento e mistura do material devido ao atrito entre um pino em rotação e a peça. O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito das velocidades de rotação e deslocamento da ferramenta em soldas de chapas de policarbonato submetidas ao processo FSW empregando ferramentas com pino cilíndrico e cônico. Foi observado que maiores velocidades de rotação da ferramenta geram um maior aumento de temperatura na peça, propiciando uma mistura mais homogênea e um cordão mais íntegro. Já o aumento da velocidade de translação reduziu as temperaturas de pico atingidas nas chapas soldadas por ambas ferramentas. Foi também calculada a razão ótima entre a velocidade de rotação e a velocidade de soldagem (razão R/T), obtendo-se 78,2 para a ferramenta de pino cilíndrico e 65,5 para a ferramenta de pino cônico. Nestas condições foram obtidos os maiores limites de resistência à tração dado a diferente superfície de contato com o substrato e ao menor volume de material afetado. O maior limite de resistência à tração médio encontrado, 33,96Mpa, equivale a 54% do limite de resistência do material como recebido, e foi registrado para a peça soldada com pino cônico com uma velocidade de rotação de 2160rpm e velocidade de soldagem de 40mm/min. Os resultados alcançados mostram a aplicabilidade da soldagem FSW em policarbonato, e a razão R/T possibilita a eficiente predição dos parâmetros para otimizar o limite de resistência à tração para cada ferramenta utilizada.

Palavras-chave: Soldagem por atrito com pino não consumível, Soldagem de Polímero, Policarbonato.

ABSTRACT

The increasing demand for polymeric material, especially in structural applications, promotes large and more complex parts production which must reach strict requirements. Although polymers present easy processability, properties as low melting temperature, thermal conductivity, diffusion capability and wettability, together with a wide variety of grades and mixtures, hinders the achievement of an efficient union and high productivity. Among the many polymeric-union processes, one of the most recent is the Friction Stir Welding, that relies on the heat and mixture of materials by the friction between a rotation tool and the substrate. The present work aims to investigate the influence of rotational and travel speed on polycarbonate plates welding using cylindrical and conical tool pin. It was observed that higher rotation speed results in a temperature increasing which results more homogeneous mixture and a welding bead free of visual defects. The optimal relations R/T (rotation/translation speed) were 78.2 using cylindrical pin and 65.5 for conical. This was due to their greater surface with the substrate and smaller volume of affected material. The best ultimate tensile strength measured, 33.96MPa, is 54% of the one measured for the unprocessed material plate, and that value was measured in the weld made using the conical plunge at a rotation speed of 2160rpm and a welding speed of 40mm/min. The results exhibit the applicability of friction stir welding in polycarbonate, and the relation R/T enables an efficient prediction of welding parameters to optimize mechanical properties for each tool.

Key words: Friction Stir Welding, Polymer welding, Polycarbonate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mero da macromolécula de policarbonato	18
Figura 2 - Classificação dos métodos de união de polímeros.	19
Figura 3 - Representação Esquemática da Soldagem por <i>Friction Stir Welding</i>	20
Figura 4 - Gráfico de taxa de contribuição dos parâmetros de soldagem FSW no limite de resistência à tração da soldagem feita em polietileno.	24
Figura 5 – Chapas de Nylon 6 soldadas por FSW à velocidade de rotação de a) 300RPM e b) 1000RPM.	25
Figura 6 – Imagem de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de um defeito de túnel na soldagem FSW de placas de polietileno e polipropileno.....	25
Figura 7 – Imagens de MEV para soldagem FSW de placas de polietileno e polipropileno a velocidade de a) 1860rpm, com fluxo laminar, e b) 2920rpm, com fluxo turbulento.	26
Figura 8 - Imagem por MEV da soldagem FSW de placas de polietileno e polipropileno com velocidade de soldagem baixa, 8mm/min.....	27
Figura 9 – Efeitos da variação da velocidade de rotação e da velocidade de soldagem na temperatura da chapa de PMMA soldada por <i>Friction Stir Welding</i>	27
Figura 10 – Gráfico do limite de resistência à tração em relação à Razão R/T para diferentes materiais.	28
Figura 11 – Micrografia de soldas por FSW em ABS com aumento de força axial: a) Força de 0,75kN, b) Força de 2,25kN e c) Força de 4kN.....	29
Figura 12 – Gráfico da variação de temperatura com a variação do ângulo de inclinação da ferramenta da soldagem na FSW de policarbonato.	29
Figura 13 – Simulação feita por dinâmica fluida computacional utilizando versão comercial do <i>Fluent</i> para a análise da distribuição de temperatura na soldagem FSW de PMMA com penetração da ferramenta de a) 0,2mm e b) 0,6mm.....	30
Figura 14 - Superfície de chapas de polipropileno soldadas por FSW para ferramenta de pino a) cônico com chanfro, b) triangular rosqueado; c) triangular e d) cilíndrico com chanfro.	31
Figura 15 - Componentes da Ferramenta de Soldagem FSW.	31
Figura 16 – Tipos de superfície para a base do ombro.	32
Figura 17 – Polipropileno aderido na superfície do pino e do ombro após soldagem por FSW.....	33

Figura 18 – Lado de avanço e recuo no processo FSW.	34
Figura 19 - Defeitos na região de recuo da soldagem FSW em placas de ABS. a) Seção transversal e b) Cordão de Solda.....	34
Figura 20 – Simulação feita por dinâmica fluida computacional utilizando versão comercial do <i>Fluent</i> para soldagem FSW em PMMA na velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 50mm/min.....	35
Figura 21 – Perfis de temperatura modelados com uso do <i>software</i> DEFORM-3D™ para a soldagem FSW em Alumínio 7075 em função dos ângulos de pino para avanço de 100mm/min e velocidade de rotação de 1000rpm.....	36
Figura 22 – Diferentes superfícies para pino de ferramenta cônica para soldagem FSW.	36
Figura 23 – Representação do sentido de fluxo de material na soldagem FSW para ferramenta de pino rosqueado quando rotacionado no sentido a) horário e b) anti-horário.	37
Figura 24 - Diferença de mistura na soldagem por FSW de placas sobrepostas de polipropileno (preta) e poliestireno (transparente) usando ferramenta de pino a) sem rosca, e b) com rosca.	37
Figura 25 – Imagens der MEV para soldagem FSW de placas de polietileno e polipropileno com ferramenta de pino de seção a) quadrática, b) triangular, c) cilíndrica e d) cilíndrica rosqueada.	38
Figura 26 – Comprimento de pino da ferramenta em relação à espessura da chapa usada na soldagem FSW em diferentes trabalhos.....	39
Figura 27 - Ciclo térmico esquemático em soldagem.....	40
Figura 28 – Temperaturas calculadas e medidas na soldagem FSW de Al 6061-T6.	40
Figura 29 - Fluxograma da metodologia do trabalho.....	42
Figura 30 – Projeto do Dispositivo de Fixação.	43
Figura 31 – Projeto da Ferramenta com pino cilíndrico para Soldagem FSW.....	43
Figura 32 – Projeto da Ferramenta com pino cônico para Soldagem FSW.	43
Figura 33 - Fresadora modelo CLEVER FH-4.....	45
Figura 34 – Penetração do pino feita para as ferramentas a) cilíndrica e b) cônica, considerando a mesma superfície de contato de ombro para ambos os casos.	46
Figura 35 – Disposição de termopares para levantamento de ciclo térmico da soldagem FSW em policarbonato.	46

Figura 36 – Seções de corte para análise da seção transversal do conjunto soldado e região de retirada de corpos de prova de tração.....	47
Figura 37 – Dimensões de corpo de prova utilizado para ensaio de tração.....	48
Figura 38 – Gráfico Tensão x Deformação do policarbonato como recebido.....	49
Figura 39 – Curva DSC para policarbonato transparente.	50
Figura 40 – Superfície das chapas de policarbonato soldadas com ferramenta cilíndrica a velocidade de soldagem de 25mm/min a uma velocidade de rotação de a) 466RPM, b) 1176RPM e c) 2160RPM.	51
Figura 41 – Verso das chapas de policarbonato soldadas com ferramenta cilíndrica a velocidade de soldagem de 25mm/min a uma velocidade de rotação de a) 466RPM, b) 1176RPM e c) 2160RPM.	52
Figura 42 – Seção transversal da soldagem FSW com pino cilíndrico em policarbonato com parâmetros a) 466RPM a 25mm/min e b) 2160RPM a 25mm/min.	53
Figura 43 – Ciclo Térmico para soldagem FSW utilizando ferramenta cilíndrica e velocidade de soldagem de 25mm/min e a) 466rpm e b) 2160rpm.....	53
Figura 44 – Temperaturas de pico alcançadas para soldagem FSW utilizando ferramenta cilíndrica e velocidade de soldagem de 25mm/min e velocidade de rotação de 466, 1176 e 2160rpm.	54
Figura 45 – Limite de resistência a tração médio para as chapas soldadas por FSW com ferramenta de pino cilíndrico, velocidade de soldagem de 25mm.min e diferentes velocidades de rotação.	55
Figura 46 – Alongamento percentual médio para as chapas soldadas por FSW com ferramenta de pino cilíndrico, velocidade de soldagem de 25mm.min e diferentes velocidades de rotação.	56
Figura 47 – Fraturas dos corpos de prova de tração na soldagem FSW a 466RPM e 25mm/min para ferramenta de pino cilíndrico.	57
Figura 48 – Fraturas dos corpos de prova de tração na soldagem FSW a 1176RPM e 25mm/min para ferramenta de pino cilíndrico.	57
Figura 49 – Fraturas dos corpos de prova de tração na soldagem FSW a 2160rpm e 25mm/min para ferramenta de pino cilíndrico.	58
Figura 50 – Superfície das chapas de policarbonato soldadas com ferramenta cônica a velocidade de soldagem de 25mm/min a uma velocidade de rotação de a) 466rpm, b) 1176rpm e c) 2160rpm.	59

Figura 51 – Verso das chapas de policarbonato soldadas com ferramenta cônica a velocidade de soldagem de 25mm/min a uma velocidade de rotação de a) 466rpm, b) 1176rpm e c) 2160rpm.	60
Figura 52 - Seção transversal da soldagem FSW com ferramenta cônica, e os seguintes parâmetros: a) 466rpm a 25mm/min e b) 2160rpm a 25mm/min.	60
Figura 53 – Ciclo Térmico para soldagem FSW utilizando ferramenta cônica e velocidade de soldagem de 25mm/min e a) 466rpm e b) 2160rpm.....	61
Figura 54 – Temperaturas de pico alcançadas para soldagem FSW utilizando ferramenta cônica e velocidade de soldagem de 25mm/min e velocidade de rotação de 466, 1176 e 2160rpm.	62
Figura 55 – Distância do termopar ao pino durante a soldagem para a ferramenta de pino a) cilíndrico e b) cônico.....	63
Figura 56 – Limite de resistência a tração médio para as chapas soldadas por FSW com ferramenta de pino cônico, velocidade de soldagem de 25mm.min e diferentes velocidades de rotação.	63
Figura 57 – Alongamento percentual médio para as chapas soldadas por FSW com ferramenta de pino cônico, velocidade de soldagem de 25mm.min e diferentes velocidades de rotação.	65
Figura 58 – Fraturas dos corpos de prova de tração na soldagem FSW a 466rpm e 25mm/min para ferramenta de pino cônico.	66
Figura 59 – Fraturas dos corpos de prova de tração na soldagem FSW a 1176rpm e 25mm/min para ferramenta de pino cônico.	66
Figura 60 – Fraturas dos corpos de prova de tração na soldagem FSW a 2160RPM e 25mm/min para ferramenta de pino cônico.	67
Figura 61 – Superfície do policarbonato soldado por FSW com pino cilíndrico em velocidade de rotação de 466rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.....	67
Figura 62 – Verso do policarbonato soldado por FSW com pino cilíndrico em velocidade de rotação de 466rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.....	68
Figura 63 – Superfície do policarbonato soldado por FSW com pino cilíndrico em velocidade de rotação de 2160rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.....	68

Figura 64 – Verso do policarbonato soldado por FSW com pino cilíndrico em velocidade de rotação de 2160rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.....	69
Figura 65 – Ciclo Térmico para soldagem FSW utilizando ferramenta cilíndrica e diferentes velocidades de soldagem, para velocidades de rotação de a) 466rpm e b) 2160rpm.	69
Figura 66 – Gráfico da Variação do Limite de Resistência a Tração Médio com a mudança de velocidade de soldagem para soldagem FSW com pino cilíndrico.	70
Figura 67 – Superfície do policarbonato soldado por FSW com pino cônico em velocidade de rotação de 466rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.....	71
Figura 68 – Verso do policarbonato soldado por FSW com pino cônico em velocidade de rotação de 466rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.	71
Figura 69 – Superfície do policarbonato soldado por FSW com pino cônico em velocidade de rotação de 466rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.....	72
Figura 70 – Verso do policarbonato soldado por FSW com pino cônico em velocidade de rotação de 466rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.	72
Figura 71 – Ciclo Térmico para soldagem FSW utilizando ferramenta cônica e diferentes velocidades de soldagem, para velocidades de rotação de a) 466rpm e b) 2160rpm.	73
Figura 72 – Gráfico da Variação do Limite de Resistência a Tração Médio com a mudança de velocidade de soldagem para soldagem FSW com pino cônico.....	74
Figura 73 – Limite de resistência a tração em função da Razão R/T na soldagem por FSW com ferramenta cilíndrica.	74
Figura 74 - Limite de resistência a tração e função da Razão R/T na soldagem por FSW com ferramenta cônica.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limite de Resistência à Tração encontrado na soldagem de diferentes termoplásticos por <i>Friction Stir Welding</i>	22
Tabela 2 - Matriz de experimentos.....	45
Tabela 3 – Temperaturas de pico médias para soldagem FSW com ferramentas cilíndrica e cônica para diferentes parametrizações.....	62
Tabela 4 –Limite de Resistencia a Tração Média para soldagem por FSW feita com ferramenta cilíndrica e cônica.....	64
Tabela 5 - Alongamento médio para soldagem por FSW feita com ferramenta cilíndrica e cônica.....	65
Tabela 6 – Temperaturas de pico médias para soldagem FSW com ferramenta cilíndrica e diferentes velocidades de soldagem.....	70
Tabela 7 – Temperaturas de pico médias para soldagem FSW com ferramenta cônica e diferentes velocidades de soldagem.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	–	Acrilo nitrila butadieno;
AS	–	<i>Advancing side;</i>
ASTM	–	<i>American Society for Testing Materials.</i>
FSW	–	<i>Friction stir welding;</i>
MEV	–	Microscópio eletrônico de varredura;
PC	–	Policarbonato;
PE	–	Polietileno;
PEAD	–	Polietileno de alta densidade;
PET	–	Poli(tereftalato de etileno);
PEUAPM	–	Polietileno de ultra alto peso molecular;
PMMA	–	Polimetilmetalacrilato;
PVDF	–	Poli(floureto de vinilideno);
RS	–	<i>Retreating side;</i>
UV	–	Ultravioleta;
ZTA	–	Zona termicamente afetada;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 Policarbonato	18
3.2 União de polímeros	19
3.3 Friction Stir Welding em polímeros.....	20
3.4 Parametrização da soldagem FSW em polímeros	23
3.4.1 Velocidade de rotação.....	23
3.4.2 Velocidade de soldagem (deslocamento).....	26
3.4.3 Razão R/T.....	28
3.4.4 Ângulo de inclinação	28
3.5 Ferramenta para a soldagem FSW em polímeros.....	30
3.5.1 Ombro da ferramenta	32
3.5.2 Pino da ferramenta	34
3.6 Ciclo térmico de soldagem	39
4 METODOLOGIA.....	42
4.1 Dispositivo de fixação.....	42
4.2 Projeto da ferramenta.....	43
4.3 Material Base	44
4.4 Procedimento de soldagem.....	44
4.5 Ciclo térmico de soldagem	46
4.6 Análises do conjunto soldado.....	47
4.6.1 Inspeção visual e microscopia ótica	47
4.6.2 Ensaio de tração.....	47
5 RESULTADOS	49
5.1 Caracterização do material de base.....	49

5.2 Variação de velocidade de rotação utilizando pino cilíndrico	50
5.2.1 Efeito da velocidade de rotação sobre o aspecto visual da solda	50
5.2.2 Influência da velocidade de rotação no ciclo térmico de soldagem	53
5.2.3 Influência da velocidade de rotação nas propriedades mecânicas	54
5.3 Variação de velocidade de rotação utilizando pino cônico	58
5.3.1 Efeito da velocidade de rotação sobre o aspecto visual da solda	58
5.3.2 Influência da velocidade de rotação no ciclo térmico de soldagem	61
5.3.3 Influência da velocidade de rotação nas propriedades mecânicas	63
5.4 Variação da velocidade de soldagem utilizando pino cilíndrico	67
5.4.1 Efeito da velocidade de soldagem sobre o aspecto visual da solda.....	67
5.4.2 Influência da velocidade de soldagem no ciclo térmico de soldagem	69
5.4.3 Influência da velocidade de soldagem nas propriedades mecânicas	70
5.5 Variação de velocidade de soldagem utilizando pino cônico.....	70
5.5.1 Efeito da velocidade de soldagem sobre o aspecto visual da solda.....	70
5.5.2 Influência da velocidade de soldagem no ciclo térmico de soldagem	72
5.5.3 Influência da velocidade de soldagem sobre as propriedades mecânicas	73
5.6 Variação da Relação R/T	74
6. CONCLUSÃO.....	77
7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

1 INTRODUÇÃO

Friction Stir Welding (FSW) é um processo de soldagem que se baseia no uso de uma ferramenta não consumível, que é colocada em rotação relativa a um substrato rigidamente fixado. Parte da ferramenta rotativa é inserida no substrato, e movimentada ao longo dele, gerando calor por atrito, plastificando e misturando o material adjacente, promovendo a união. Essa soldagem ocorre no estado sólido tendo, portanto, baixo aporte térmico, o que elimina problemas associados como inclusões sólidas e distorções, além de não gerar fumos ou respingos. Esse processo é simples e possibilita a obtenção de propriedades mecânicas e acabamento adequado nos conjuntos soldados com parametrização otimizada.

A princípio, a soldagem por FSW foi desenvolvida para união de ligas metálicas de baixa densidade, como alumínio e magnésio, mas seu uso já foi expandido para ligas de aço e titânio. Em materiais poliméricos, a aplicação da soldagem FSW ainda é pouco estudada, apesar do crescente uso desses materiais.

No geral, o desenvolvimento de processos de união de polímeros ainda apresenta desafios, devido a dificuldades como baixa energia superficial, baixa molhabilidade, e a presença de agentes de etapas anteriores de processamento. Não se consegue, portanto, atingir produtividade e nem propriedades suficientemente adequadas para a manufatura de grandes estruturas poliméricas.

Aplicação de FSW em polímeros oferece vantagens, principalmente ao se avaliar o custo da operação. O maquinário utilizado não é específico, pode-se inclusive adaptar uma fresadora para o processo, que é um equipamento de relativo baixo custo de aquisição e de manutenção. Além disso o processo é facilmente automatizável possibilitando uma alta produtividade em união de polímeros.

Neste trabalho foram realizados estudos relativos à soldagem FSW em polímeros, sendo confeccionadas ferramentas e dispositivo de fixação para execução do processo em chapas de policarbonato. As soldas foram produzidas empregando ferramentas com pino cilíndrico e cônico, variando as velocidades de rotação e de deslocamento da ferramenta. Durante a execução foi realizado o monitoramento da temperatura na chapa por meio de termopares tipo K associados a um sistema de

aquisição de dados, e as soldas resultantes foram avaliadas mecanicamente por meio de ensaio de tração, e quanto a seu aspecto visual.

2 OBJETIVOS

Esse trabalho teve como objetivo a produção de soldas sobrechapa pelo processo *Friction Stir Welding* em policarbonato, com os seguintes objetivos específicos:

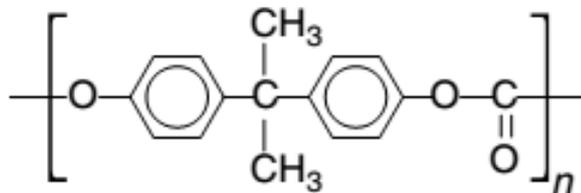
- Projetar e construir o dispositivo de fixação e as ferramentas para a soldagem FSW em fresadora;
- Produção de soldas sobrechapa variando a velocidade de rotação e velocidade de soldagem;
- Investigação da influência dos parâmetros e da geometria das ferramentas sobre a temperatura alcançada no policarbonato durante a soldagem;
- Avaliação visual e do comportamento mecânico das soldas realizadas com os diferentes parâmetros e ferramentas;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Policarbonato

O policarbonato é um polímero termoplástico de engenharia, que tem bastante rigidez graças aos anéis aromáticos da cadeia principal (Figura 1), que dificultam a cristalização do material, sendo o policarbonato comercial 100% amorfo. Esse polímero é, portanto, transparente, possui baixa contração na moldagem, e possui uma boa inercia química, apesar de ser sensível à hidrólise em elevadas temperaturas (WIEBECK; HARADA, 2005).

Figura 1 – Mero da macromolécula de policarbonato



Fonte: (CHANDA; ROY, 2006).

O policarbonato também apresenta alta temperatura de transição vítrea (145°C) e alta temperatura de degradação (320°C a 340°C), apresentando uma boa estabilidade dimensional. Apesar da alta Tg, o policarbonato tem uma boa resistência ao impacto por causa do seu elevado volume livre, e da presença dos grupos fenileno, isopropilideno e carbonatos na cadeia. Esses grupos possuem movimentação mesmo em temperaturas abaixo da Tg, gerando temperaturas de transição vítrea secundárias, a Tg_{beta}, que ocorre a temperatura de -200°C e a Tg_{alfa} que ocorre a 0°C (WIEBECK; HARADA, 2005).

Em diversos casos o policarbonato recebe aditivos para aumentar ainda mais sua resistência ao impacto, e sua resistência à degradação por radiação ultravioleta (UV), além de pigmentação e outros aditivos. É comum o policarbonato conter fibra de vidro, por exemplo, para aplicações estruturais (WIEBECK; HARADA, 2005).

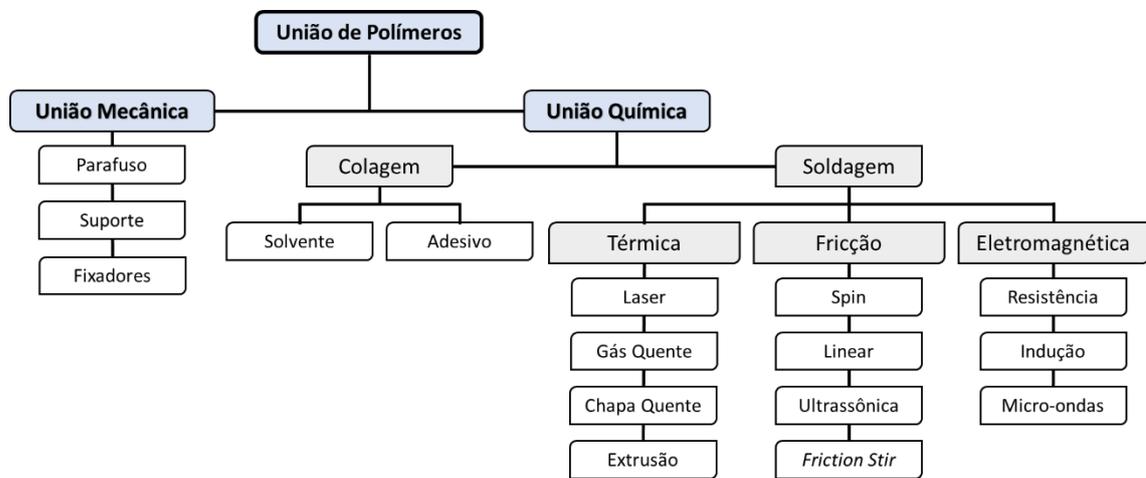
Dado suas propriedades óticas, e sua elevada resistência ao impacto, o policarbonato é muito utilizado principalmente na indústria da construção civil, substituindo o vidro e alguns materiais metálicos em muitas situações, como em toldos e em janelas de segurança. Outros setores também utilizam o policarbonato, sendo este aplicado em

faróis automotivos, janelas de avião, óculos de proteção, componentes eletrônicos, equipamentos para indústria de alimentos (WIEBECK; HARADA, 2005).

3.2 União de polímeros

Apesar da facilidade de conformação dos polímeros, para manufatura de conjuntos maiores ou mais complexos, muitas vezes é necessário que se faça a união de componentes distintos (STRAND, 2004). Desse modo, pode ser feita uma união mecânica, colagem ou soldagem, conforme a relação proposta na Figura 2.

Figura 2 - Classificação dos métodos de união de polímeros.



Fonte: STOKES (1989) apud in STRAND (2004) Modificada.

Apesar dos diversos métodos existentes para a união de materiais poliméricos, eles ainda são frequentemente ineficazes em decorrência das propriedades intrínsecas aos polímeros, como baixa energia superficial, baixa molhabilidade e a presença de agentes de processamentos anteriores. Mesmo os métodos mecânicos de união, geram concentração de tensões, podendo resultar em baixa performance do conjunto (STRAND, 2004).

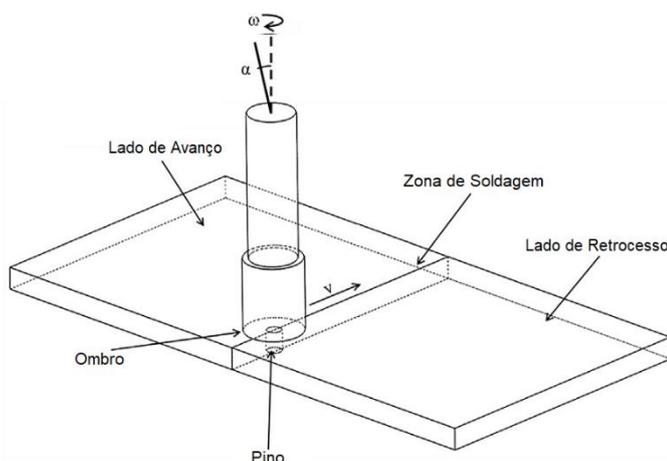
No âmbito da soldagem, é possível unir polímeros de forma rápida e com versatilidade (STRAND, 2004), sendo que o entendimento do material a ser soldado é fundamental. Dado as reticulações presentes nos termofixos e elastômeros, normalmente, somente polímeros termoplásticos são soldados (HAQUE et al., 2016), e mesmo assim não é trivial, pois, associado aos problemas já citados, os polímeros têm temperatura de fusão mais baixa, curto espaço de tempo para solidificação e baixa condutividade térmica (BAGHERI et al., 2013).

Os diferentes processos de soldagem apresentam vantagens e limitações, porém, a complexidade da soldagem de polímeros, e a importância produtiva dos processos de união, torna fundamental o estudo e desenvolvimento de novos métodos de soldagem desses materiais. Em 1991 foi patenteado o processo de soldagem *Friction Stir Welding* (FSW) pelo *The Welding Institute*, que a princípio foi idealizado para ligas metálicas de baixa densidade, mas tem se provado uma alternativa também na soldagem de polímeros termoplásticos (THOMAS et al., 1991).

3.3 Friction Stir Welding em polímeros

Friction Stir Welding (FSW) é um processo de soldagem que se baseia na inserção de uma ferramenta giratória no material de base, gerando aquecimento por atrito e mistura desse material, propiciando a união no estado sólido (KISS; CZIGÁNY 2012), conforme o esquema da Figura 3. Esse processo é considerado uma alternativa para que sejam produzidas peças poliméricas maiores e mais complexas (HOSEINLAGHAB et al., 2015; BAGHERI et al., 2013; ARICI e SINMAZ 2005).

Figura 3 - Representação Esquemática da Soldagem por *Friction Stir Welding*.



Fonte: (SAHU, 2018).

Por ser uma soldagem no estado sólido, a difusão atômica desempenha um papel importante para a qualidade desse processo. Em polímeros, a natureza macromolecular dificulta a ocorrência de difusão (SHAZLY et al., 2014; GAO et al., 2015). Segundo Kausch e Tirrel (1989), a difusividade em sistemas emaranhados está na ordem de grandeza de $10^{-16} \text{m}^2/\text{s}$, diferente de ligas metálicas, onde a difusividade é da ordem de $10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$.

Outro fator complicador na soldagem por FSW em polímeros é a restrição do calor à região de solda, ocasionado pela baixa condutividade térmica desses materiais. Desse modo são reduzidas as interações interatômicas entre material de base/solda (GAO et al., 2015).

A baixa difusividade aliada a baixa condutividade térmica dos polímeros gera uma interface frágil entre a zona de mistura e o material de base. Derazkola e Simchi (2018) comparou na soldagem por FSW de PMMA o limite de resistência a tração de um corpo de prova retirado inteiro na região de mistura, no sentido longitudinal ao cordão, com um corpo de prova retirado no sentido transversal, com a região misturada ao centro, encontrado um valor 35,6% menor para o último caso, evidenciando a fragilidade dessa interface. Ainda nesse âmbito, tanto Zafar et al. (2016), quanto Shazly et al. (2014), constataram em corpos de prova de tração de Nylon 6 e PMMA respectivamente, que o rompimento do ensaio sempre se dava na interface do material de base com a zona de mistura.

Apesar de ser uma soldagem feita no estado sólido, a temperatura que o material alcança durante o processo também é determinante para o resultado obtido. Superar a temperatura de transição vítrea do polímero possibilita um movimento segmental da fração amorfa, facilitando a ocorrência de mistura. Nas soldagens feitas por Zafar et al. (2016), Derazkola e Simchi (2018), Aydin (2010) e Derazkola et al. (2019) em Nylon6, PEUAPM, PMMA, PEAD e PC, respectivamente, os melhores resultados foram evidenciados quando a temperatura medida superou a Tg do material. Zafar et al., 2016, quando utilizou parâmetros que geraram maiores temperaturas, percebeu a saída de material, formando defeitos de túnel e *flash*.

No trabalho de Aydin (2010), foi utilizado pré-aquecimento para a execução do processo em PEUAPM. Em seus testes ele encontrou um limite de resistência a tração de 89% do valor encontrado para o material recebido, quando a temperatura do material esteve acima da Tg, porém, abaixo da temperatura de fusão (Tm). Em maiores temperaturas de pré-aquecimento, a região de solda superou a Tm, tendo um limite de resistência a tração menor, de 72% do material original. Bozkurt (2012), por outro lado, obteve melhores resultados na soldagem do PEAD quando a temperatura ultrapassou a fusão do polímero, o que foi justificado pela maior difusão do material para a raiz, diminuindo a ocorrência de defeitos nesta região.

Como um dos grandes desafios na soldagem de polímeros é a manutenção das propriedades mecânicas dos materiais dentro de uma faixa aceitável, uma forma comumente utilizada de análise da solda de polímeros por FSW é o limite de resistência a tração alcançado em relação ao do material original. A Tabela 1 reúne os limites de resistência a tração encontrados para diferentes polímeros por diferentes autores.

Tabela 1 – Limite de Resistência à Tração encontrado na soldagem de diferentes termoplásticos por *Friction Stir Welding*.

Material	LRT Material de Base (MPa)	LRT Material Soldado (MPa)	Eficiência Relativa
Nylon 6 (PANNERSELVAN; LENIN, 2014)	73	35	47%
ABS (SADEGHIAN; GIVI, 2015)	42	42	100%
PEAD (BOZKURT, 2012)	22	21	96%
PP (SAHU et al., 2018)	33	20	60%
PMMA (DERAZKOLA; SIMCHI, 2018)	70	43,5	62%
PEUAPM (AYDIN, 2010)	32	28	89%
PC (DERAZKOLA; SIMCHI, 2019)	67	55	82%

Apesar dos resultados satisfatórios obtidos por soldas FSW em polímeros, outros estudos realizados encontraram valores divergentes para mesmos materiais. Tanto Pannersevam e Lenin (2014), quanto Zafar et al. (2016) estudaram as propriedades mecânicas da soldagem FSW em Nylon 6, sendo que o primeiro conseguiu alcançar um limite de resistência a tração da solda 47% do encontrado para o material base, já o segundo teve resultado de 32%, mas em ambos casos a baixa viscosidade do material dificulta a soldagem em maiores velocidades de rotação.

Também para a soldagem FSW de policarbonato alguns resultados divergiram, como Derzkola et al. (2019) que, ao fazer a soldagem FSW em chapas de 4mm de espessura, encontrou um limite de resistência a tração de 82% em relação ao material base, diferente de Shazly et al. (2014), que, ao soldar chapas de 10mm, encontrou para a mesma relação 31%.

No caso desses autores foram usados diferentes parâmetros, ferramentas, montagens e metodologias para encontrar seus respectivos resultados ótimos. Na soldagem de polímeros propriedades dos materiais também devem ser consideradas para explicar os resultados distintos sob os mesmos parâmetros, dado que, ainda que

na mesma categoria de polímeros, pode haver diferenças de massa molar, aditivação e processamentos prévios realizados.

Para a soldagem por *Friction Stir Welding* em polímeros dissimilares, a complexidade é ainda maior dada a imiscibilidade dos materiais (SINGH et al., 2016). Nesses casos é importante uma análise prévia da compatibilidade possibilitando uma solda com propriedades mecânicas adequadas.

No trabalho realizado por Eslami et al. (2015) foram realizadas soldas sobrepostas entre polipropileno e poliestireno durante o desenvolvimento de novas ferramentas para a soldagem FSW, alcançando até 50% do limite de resistência a tração do PP para o conjunto soldado. Eslami et al. (2017) por sua vez, utilizou materiais mais compatíveis, polietileno e polipropileno, alcançando um limite de resistência a tração de 76% do PP, resultado similar ao encontrado por Hajideh et al. (2017) na soldagem realizada com os mesmos materiais.

Para a soldagem de PEBD e PEAD reciclados, Singh et al. (2016) obteve soldas com propriedades mecânicas melhores que os materiais originais. Este resultado foi obtido ao se adicionar 10% de pó de ferro antes da soldagem, conseguindo realizar ligações metálicas na interface. Outra solução foi o uso de nanotubos de carbono feita por Gao et al. (2015), que conseguiu melhorar a formabilidade da soldagem feita com PEAD e ABS.

Produzir juntas poliméricas soldadas por *Friction Stir Welding* que tenham desempenho satisfatório é possível, porém, o entendimento das variáveis do processo e como elas afetam nos resultados é necessário. Os parâmetros devem ser otimizados, levando em consideração tanto o material que será soldado, quanto a ferramenta escolhida. Dentre as variáveis do processo de soldagem FSW, o ângulo de inclinação, a velocidade de soldagem e a velocidade de rotação, são fatores determinantes para obtenção de soldas satisfatórias.

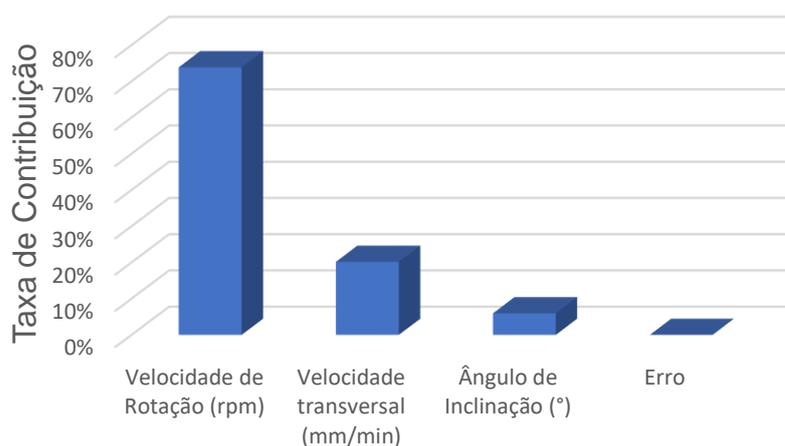
3.4 Parametrização da soldagem FSW em polímeros

3.4.1 Velocidade de rotação

Em seus estudos Bozkurt (2012) avaliou a influência dos parâmetros de soldagem sobre a resistência a tração de juntas soldadas pelo processo FSW, empregando uma

taxa de contribuição para quantificar o impacto de cada uma das variáveis. Nos resultados encontrados (Figura 4), a velocidade de rotação da ferramenta é o parâmetro avaliado com maior influência na soldagem por FSW.

Figura 4 - Gráfico de taxa de contribuição dos parâmetros de soldagem FSW no limite de resistência à tração da soldagem feita em polietileno.



Fonte: (BOZKURT, 2012)

A velocidade de rotação está diretamente ligada ao aquecimento da peça durante o processo (HOSEINLAGHAB et al., 2015). Em velocidades mais baixas, as juntas não atingem um bom aspecto visual e nem as propriedades mais adequadas, devido à falta de calor gerado pela fricção durante a soldagem. Esse baixo calor gera fluxo impróprio de material na zona de soldagem, resultando em baixa resistência, podendo ocorrer inclusive remoção de material na linha da junta (HAJIDEH et al., 2017).

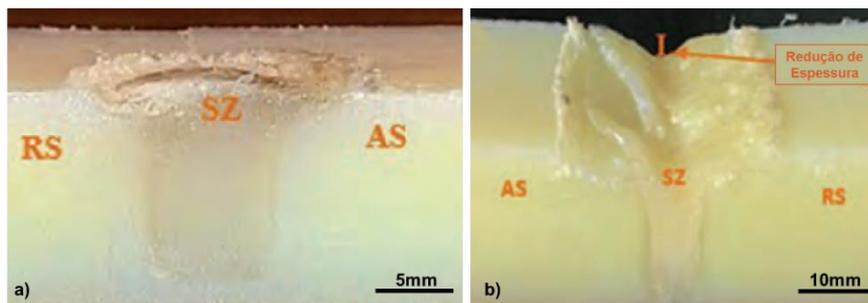
Payganeh et al. (2011) registrou, a uma baixa velocidade de rotação, a ocorrência de transporte insuficiente de material em decorrência da geração insuficiente de calor por fricção, gerando descontinuidades conhecidas como *wormholes*.

Para maiores velocidades de rotação, Mendes et al. (2014) observa um acréscimo no fluxo e mistura de material, reduzindo também defeitos nas soldagens. Tais melhoras acontecem até um ponto ótimo, onde há geração de calor suficiente para o processo, resultando em melhores propriedades mecânicas, além do melhor aspecto visual da junta soldada (HOSEINLAGHAB et al., 2015; HAJIDEH et al., 2017).

O aumento excessivo de velocidade de rotação, gera muito calor por atrito na linha de solda, o que pode acarretar fusão e até escoamento do material base para fora do

cordão de solda (HAJIDEH et al., 2017). Zafar et al. (2016) identificou saída de material da zona de mistura e consequente redução de espessura da chapa de Nylon 6 com o aumento excessivo da velocidade de rotação, como pode ser observado na Figura 5. Em casos extremos, o maior calor gerado pode levar à degradação do polímero (PAYGANEH et al., 2011).

Figura 5 – Chapas de Nylon 6 soldadas por FSW à velocidade de rotação de a) 300RPM e b) 1000RPM.

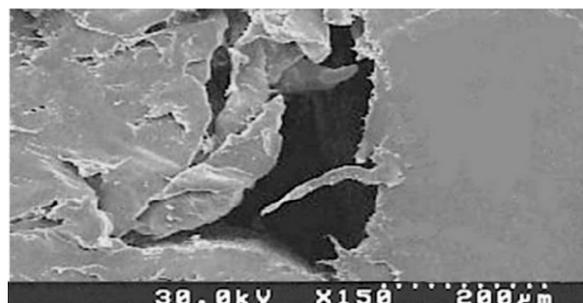


Fonte: (ZAFAR et al., 2016)

Além disso, altas velocidades de rotação geram altas forças inerciais que formam alguns defeitos na zona de mistura, resultando na redução da resistência da junta (HAJIDEH et al., 2017).

Em velocidades de rotação muito altas, falta tempo para fazer o material plastificado fluir sob a ferramenta, levando ao defeito de túnel na zona de mistura (Figura 6), um dos defeitos mais críticos para as propriedades do conjunto soldado por FSW conforme observado por HAJIDEH et al. (2017), na união de polietileno e polipropileno. Esse defeito é alcançado principalmente pela alta turbulência da solda (PAYGANEH et al., 2011).

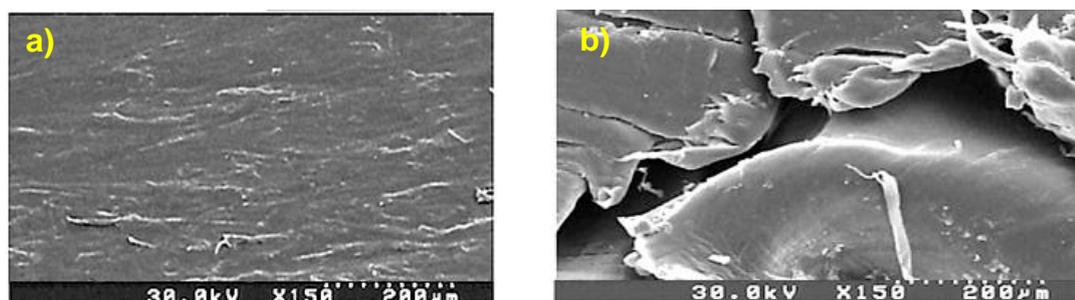
Figura 6 – Imagem de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de um defeito de túnel na soldagem FSW de placas de polietileno e polipropileno.



Fonte: (HAJIDEH et al., 2017)

Em maiores velocidades de rotação, o fluxo de material passa a ser turbulento, resultando em uma mistura não adequada. Esses diferentes fluxos observados estão representados na Figura 7.

Figura 7 – Imagens de MEV para soldagem FSW de placas de polietileno e polipropileno a velocidade de a) 1860rpm, com fluxo laminar, e b) 2920rpm, com fluxo turbulento.



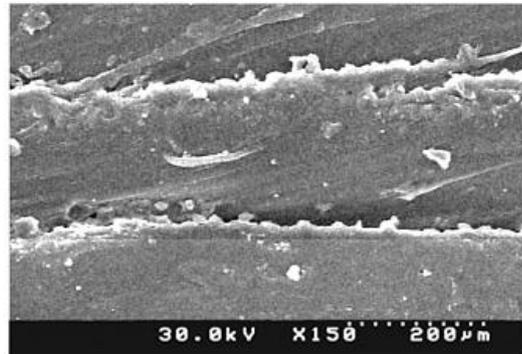
Fonte: (HAJIDEH et al., 2017).

3.4.2 Velocidade de soldagem (deslocamento)

A velocidade de soldagem, ou seja, a velocidade de deslocamento, tem uma menor influência na qualidade na soldagem por *Friction Stir Welding* em comparação à velocidade de rotação (BOZKURT, 2012), porém, ainda é importante parâmetro, e pode alterar de forma significativa os resultados do processo.

Em velocidades de soldagem baixas, há um aumento do calor fornecido na região de solda, pois a ferramenta tem mais tempo para atritar/aquecer o material, portanto, o efeito é análogo ao de velocidades de rotação elevadas, podendo ocasionar a fusão do material de base, e até sua degradação. Segundo Hajideh et al. (2017), devido ao acréscimo de fluidez da zona de mistura nessas baixas velocidades de soldagem, é possível a formação de estrutura em camadas não uniformes, conforme Figura 8. Já em velocidades de soldagem muito altas, falta calor para o processo, formando juntas defeituosas (HAJIDEH et al., 2017), e em decorrência ao fluxo inadequado da matriz, pode-se formar inclusive o defeito de túnel, reduzindo a resistência do conjunto soldado.

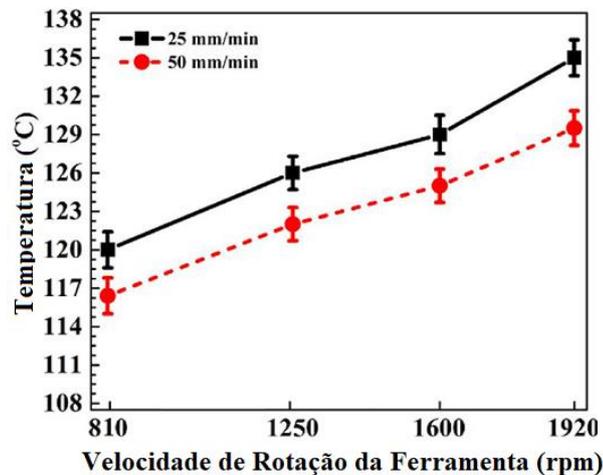
Figura 8 - Imagem por MEV da soldagem FSW de placas de polietileno e polipropileno com velocidade de soldagem baixa, 8mm/min.



Fonte: (HAJIDEH et al., 2017).

É possível afirmar, portanto, que a energia específica absorvida por unidade de comprimento na junta soldada é inversamente proporcional à velocidade de soldagem e diretamente proporcional à velocidade de rotação (HOSEINLAGHAB et al., 2015). Essa variação de temperatura em relação a variação de parâmetros foi analisada por Derazkola e Simchi (2018) em PMMA (Figura 9).

Figura 9 – Efeitos da variação da velocidade de rotação e da velocidade de soldagem na temperatura da chapa de PMMA soldada por *Friction Stir Welding*.



Fonte: (DERAZKOLA; SIMCHI 2018).

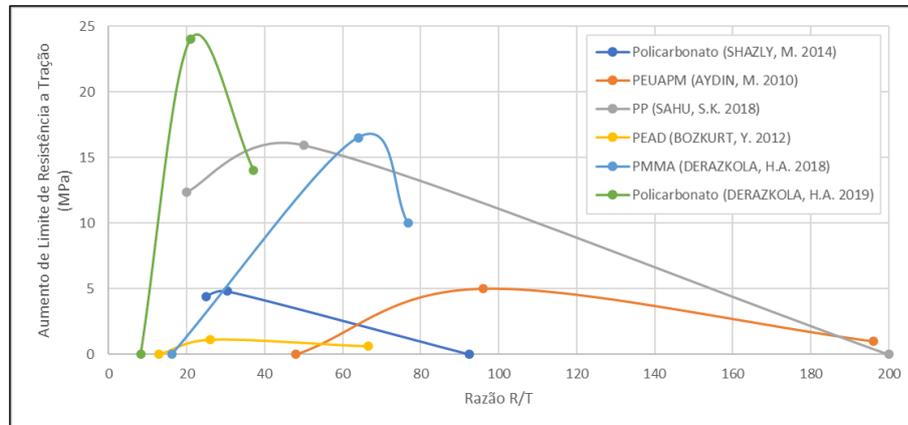
Pela relação de proporcionalidade entre esses parâmetros, uma razão importante para controlar a qualidade de soldagem FSW é dada pela divisão da velocidade de rotação pela velocidade de soldagem, sendo chamada de Razão R/T, como mostrado por Hoseinlaghab et al. (2015). Altas taxas R/T levam para um superaquecimento, e baixas taxas R/T indicam falta de calor no material, sendo esses valores extremos os piores resultados de fluência.

3.4.3 Razão R/T

A razão R/T, por ser uma divisão entre a velocidade de rotação pela velocidade de soldagem, resulta em número de rotações que da ferramenta por unidade de comprimento da chapa soldada. Sendo assim, um aumento dessa razão implica diretamente em mais rotações dadas pela ferramenta em uma mesma distância, fornecendo assim mais calor para a soldagem.

Autores como Hoseinlaghab et al. (2015) e Mendes (2014) estipularam em seus estudos faixas de Razão R/T para obtenção de soldas com melhor qualidade. Para cada material, assumindo que a ferramenta escolhida não influi na parametrização ótima, é possível levantar uma faixa ótima da razão R/T evitando assim falta ou excesso de aquecimento. Na Figura 10 é apresentado um gráfico que reúne razões R/T utilizadas na soldagem de diferentes materiais, relacionando-as com o aumento de limite de resistência a tração da solda.

Figura 10 – Gráfico do limite de resistência à tração em relação à Razão R/T para diferentes materiais.



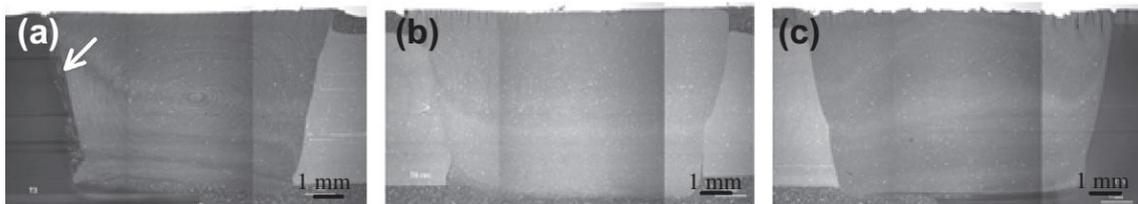
3.4.4 Ângulo de inclinação

O ângulo da ferramenta é outro importante parâmetro na soldagem FSW, pois é responsável por evitar a saída de material durante a soldagem, minimizando discontinuidades por falta de material, além de exercer função de forjamento na região traseira do sentido de avanço do processo (SOUZA, 2010; MENDES et al., 2014).

Com o aumento do ângulo de inclinação da ferramenta, há aumento da força axial feita sobre o conjunto soldado, alterando os resultados da operação de soldagem. A

Figura 11 mostra a presença de vazios no cordão soldado por FSW em chapas de acrilonitrila butadieno estireno (ABS), que foram minimizados com o aumento da força axial aplicada.

Figura 11 – Micrografia de soldas por FSW em ABS com aumento de força axial: a) Força de 0,75kN, b) Força de 2,25kN e c) Força de 4kN.

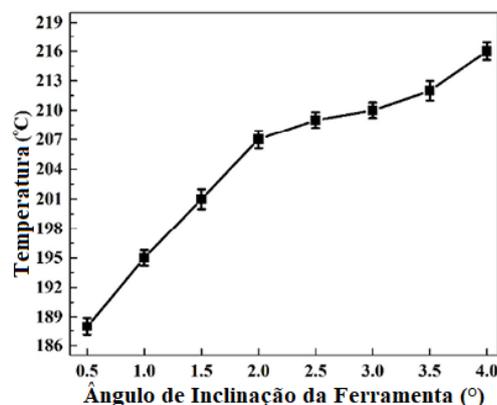


Fonte: (MENDES et al., 2014).

Bagheri et al. (2013) ao utilizar ângulo de inclinação de 1° , percebeu que o material plastificado foi mantido na zona soldada, resultando em um ganho de qualidade de superfície da solda, além da não formação de vazios ou trincas. Resultados similares foram levantados por Derazkola e Simchi (2018), encontrando ângulo ótimo de 2° para a soldagem de PMMA, a partir do qual observou defeitos no material.

Zafar et al. (2016) obteve soldas com mais *flash defect* ao utilizar 3 graus de inclinação, o que foi justificado pelo aumento da carga compressiva na superfície do material, aumentando fricção e a geração de calor. Esse aumento de temperatura pode ser significativo, e foi levantado por Derazkola et al. (2019) conforme Figura 12.

Figura 12 – Gráfico da variação de temperatura com a variação do ângulo de inclinação da ferramenta da soldagem na FSW de policarbonato.

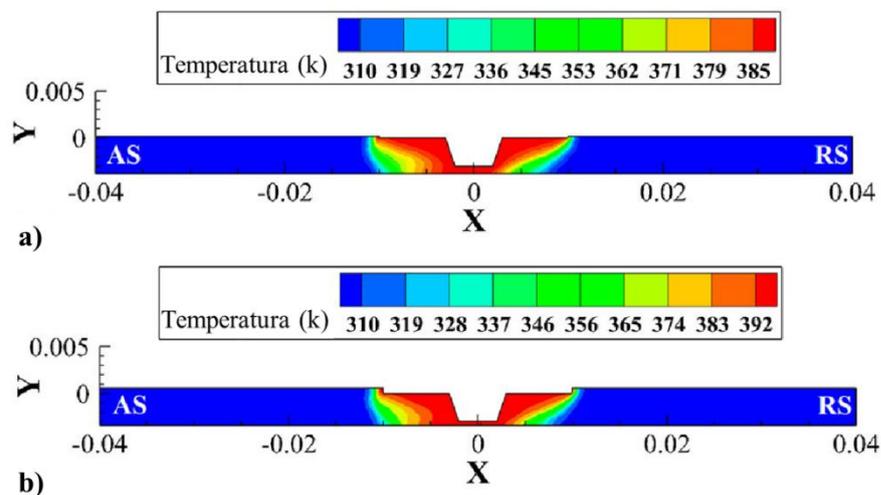


Fonte: (DERAZKOLA et al., 2019).

Arici e Tamer (2005), em seus estudos, obteve menores valores de resistência mecânica quando aplicou um ângulo da ferramenta acima de 1° . Isso foi justificado pela redução de espessura da chapa causada pelo aumento desse parâmetro.

Além da inclinação do ombro, a profundidade da penetração da ferramenta no material de base é importante para o processo. Esse aumento resulta em maior área da zona de mistura (Figura 13), incrementando a temperatura na região, o que pode ocasionar adesão do polímero à superfície do ombro (DERAZKOLA; SIMCHI 2017)

Figura 13 – Simulação feita por dinâmica fluida computacional utilizando versão comercial do *Fluent* para a análise da distribuição de temperatura na soldagem FSW de PMMA com penetração da ferramenta de a) 0,2mm e b) 0,6mm.

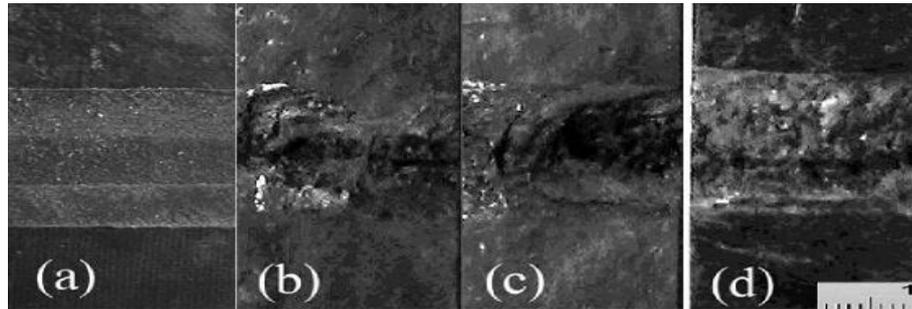


Fonte: (DERAZKOLA; SIMCHI 2017).

3.5 Ferramenta para a soldagem FSW em polímeros

Como o princípio da soldagem FSW se baseia no contato ferramenta/peça, a escolha da ferramenta ideal também é fundamental para a qualidade do processo. A Figura 14 contém diferentes cordões de solda, obtidos por Payganeh (2011), utilizando-se ferramentas de diferentes geometrias de pino.

Figura 14 - Superfície de chapas de polipropileno soldadas por FSW para ferramenta de pino a) cônico com chanfro, b) triangular rosqueado; c) triangular e d) cilíndrico com chanfro.



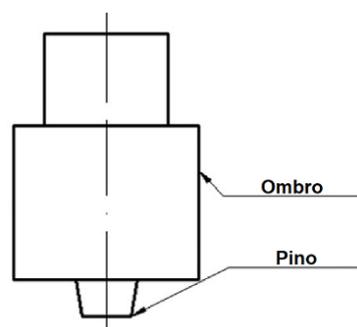
Fonte: (PAYGANEH et al., 2011).

A ferramenta para soldagem FSW é um componente não consumível que tem a função de aquecer a peça a ser soldada e movimentar o material plastificado, a fim de promover a mistura da junta soldada, sem permitir que o material seja expelido do conjunto. Desse modo, o projeto de ferramenta afeta diretamente o aquecimento por atrito da peça, e o fluxo de material (MEHTA et al., 2011; ZHANG et al., 2012).

Esta ferramenta escolhida também pode influenciar nos tipos de materiais que podem ser soldados, assim como sua espessura (KODERSTANI et al., 2017; ZHANG et al., 2012). De acordo com os resultados de Hajideh et al. (2017), a influência da geometria da ferramenta nas propriedades mecânicas de uma junta soldada por FSW chega a ser maior do que os parâmetros de soldagem dentro de uma dada faixa.

Sua otimização, portanto, promove tanto uma melhoria de desempenho mecânico, quanto da velocidade máxima de soldagem durante o processo. Essa ferramenta é composta basicamente de um pino e um ombro, como representado na Figura 15.

Figura 15 - Componentes da Ferramenta de Soldagem FSW.



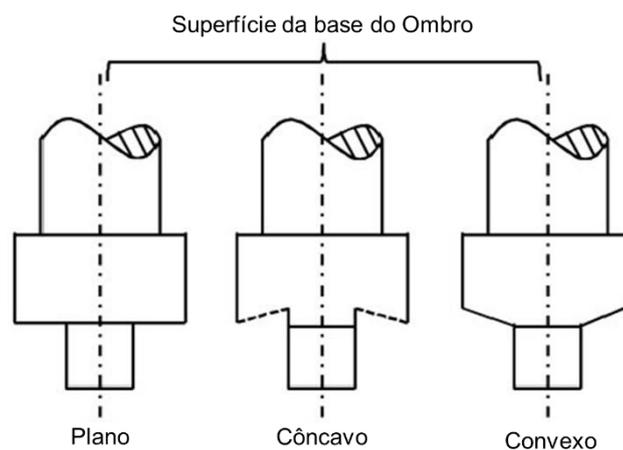
Fonte: (GAO et al., 2016).

3.5.1 Ombro da ferramenta

O ombro da ferramenta é responsável por gerar maior parte do calor durante o processo devido à pressão e a fricção executada na região da superfície da peça de trabalho. Além disso, essa parte da ferramenta restringe o material plastificado em torno do pino, evitando que este seja expelido para fora do conjunto (MEHTA et al., 2011; ESLAMI et al., 2015; ZHANG et al., 2012).

Dado que o ombro tem uma imersão na peça de no máximo 5% de sua espessura, sua geometria externa não influencia de forma significativa no conjunto soldado. Contudo, o formato da superfície de contato do ombro com a peça pode promover diferenças nas características da solda (ZHANG et al., 2012). Essa superfície pode ser plana, côncava ou convexa (Figura 16).

Figura 16 – Tipos de superfície para a base do ombro.



Fonte: (ZHANG et al., 2012).

- Superfície Plana – É simples, e pode não ser eficaz em reter o fluxo de material, produzindo flash excessivo;
- Superfície Côncava – Restringe de forma mais eficiente a extrusão de material, armazenando volume de escape. Com uma inclinação de 1 a 3°, esse ombro propicia uma maior força compressiva de forjamento, aumentando a pressão hidrostática.
- Superfície Convexa – Pouco usual, dado que atua empurrando material para fora da ferramenta, porém pode ser interessante em juntas dissimilares, ou com espessuras diferentes, pelo contato efetivo entre as peças.

As superfícies dos ombros ainda podem ter texturas específicas, promovendo um fluxo controlado de material ao se utilizar roscas, ou maior atrito e consequente aquecimento quando se utiliza recartilamento ou entalhes (ZHANG et al., 2012).

Além da geometria, um aspecto importante do ombro são suas dimensões. Um ombro mais largo, provê maior área de contato, resultando em aquecimento por fricção mais significativo do que o obtido em maiores velocidades de rotação (MEHTA et al., 2011). Calor insuficiente pode impedir a soldagem, enquanto calor excessivo pode ocasionar fusão parcial do material, fazendo com que este seja expelido ou acabe aderindo à ferramenta (Figura 17), prejudicando o contato efetivo ferramenta/peça (ESLAMI et al., 2015). Sahu et al. (2018) ao aumentar apenas o diâmetro do ombro durante a soldagem de polipropileno, encontrou um aumento de distorção da peça. O aumento de calor gerado também ocasionou degradação do material.

Figura 17 – Polipropileno aderido na superfície do pino e do ombro após soldagem por FSW.



Fonte: (ESLAMI et al., 2015).

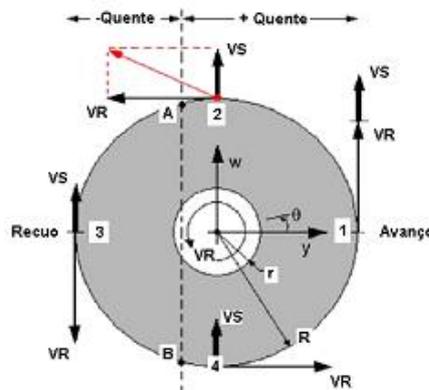
Nos estudos de Mehta et al. (2011), foi investigada a influência do torque na soldagem FSW, sendo que o diâmetro ótimo de ombro escolhido é o que promove maior torque, pois esse parâmetro indica maior resistência do substrato e, portanto, maior efetividade da ferramenta.

Menores torques indicam ou uma superfície de contato pequena do ombro, gerando um aquecimento baixo, ou uma excessiva superfície de contato do ombro, que gerou calor demais, fazendo um estado de deformação de baixo fluxo e alta temperatura.

3.5.2 Pino da ferramenta

O pino em rotação tem a função de arrastar, plastificar e misturar o material presente na zona de mistura, soldando a região sem a fusão do material (ESLAMI et al., 2015; GAO et al., 2015; KODERSTANI et al., 2017). Este componente, portanto, atua diretamente no cisalhamento do material a sua frente e na deposição desse material atrás, possuindo uma região de entrada e saída de material (avanço e recuo) tal qual a Figura 18.

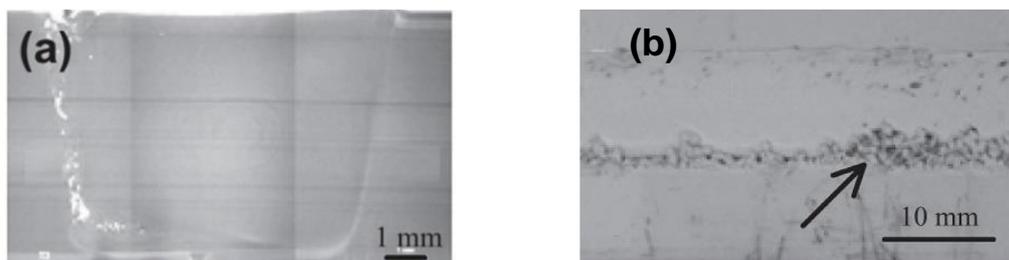
Figura 18 – Lado de avanço e recuo no processo FSW.



Fonte: VILAÇA (2005) Apud in SOUZA (2010).

Mendes et al. (2014) percebeu para a soldagem FSW em ABS descontinuidades na região de recuo (Figura 19). Por essa ser uma região que tem menor geração de calor, somado a baixa condutividade térmica dos polímeros, por vezes a temperatura alcançada não é suficiente para promover ligação do material plasticamente deformado com o material a menor temperatura. O mesmo comportamento já tinha sido observado por Bagheri et al. (2013).

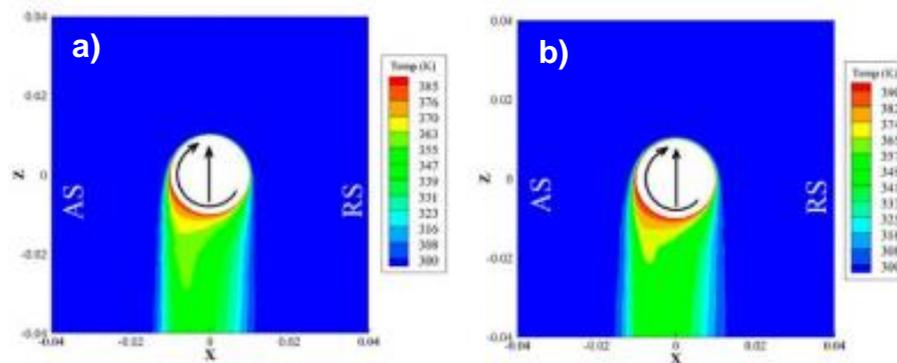
Figura 19 - Defeitos na região de recuo da soldagem FSW em placas de ABS. a) Seção transversal e b) Cordão de Solda.



Fonte. (MENDES et al., 2014).

Derazkola e Simchi (2017), através de simulação termomecânica simulação feita por dinâmica fluida computacional utilizando versão comercial do *Fluent* (Figura 20), encontrou uma menor geração de calor no Lado de Recuo na soldagem do PMMA, sendo que a baixa condutividade do material acarreta uma pequena Zona Termicamente Afetada (ZTA), o que pode acarretar inclusive na carbonização da superfície, enquanto o material imediatamente abaixo se mantém imutável (SAHU et al., 2018).

Figura 20 – Simulação feita por dinâmica fluida computacional utilizando versão comercial do *Fluent* para soldagem FSW em PMMA na velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 50mm/min.



Fonte: (DERAZKOLA; SIMCHI 2017).

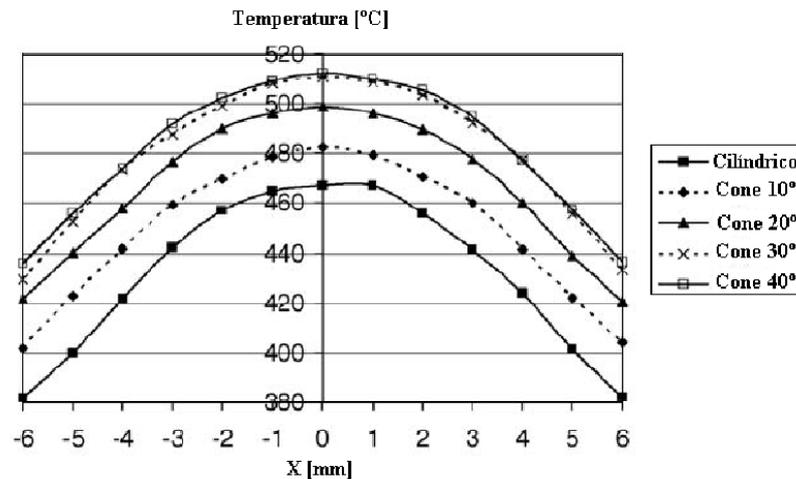
A geometria do pino é, portanto, fundamental para propiciar uma soldagem adequada pelo processo FSW, sendo três as regiões avaliadas no design: a extremidade do pino, o formato e a superfície do formato.

A extremidade do pino pode ser reta ou abaulada. Por sua fácil produção, a reta é mais utilizada, entretanto, a extremidade abaulada aumenta a vida útil da ferramenta, por ter menos concentradores de tensão, além de precisar de menor força durante o mergulho da ferramenta no substrato (ZHANG et al., 2012).

Quanto ao formato do pino, ele pode ser cônico ou cilíndrico. Apesar de serem de manufatura mais complexa, os pinos cônicos geram mais calor por fricção, dado sua maior área de contato com a peça, além promover uma maior pressão hidrostática na região da solda, melhorando a mistura (ZHANG et al., 2012).

Seguindo a modelagem matemática feita por Buffa et al. (2006) apud in Souza (2010), o ângulo do pino cônico em que ocorre maior cisalhamento de material e, portanto, alcança maiores temperaturas está entre 30 e 40°, conforme Figura 21.

Figura 21 – Perfis de temperatura modelados com uso do *software* DEFORM-3D™ para a soldagem FSW em Alumínio 7075 em função dos ângulos de pino para avanço de 100mm/min e velocidade de rotação de 1000rpm.



Fonte: BUFFA et al. (2006) apud in SOUZA (2010).

A superfície do pino, por sua vez, pode ser feita de diferentes formas: rosqueada, sulcada ou plana. Na Figura 22 estão alguns exemplos de superfície do pino para o formato cônico, sendo que os mesmos exemplos podem ser usados para formatos cilíndricos.

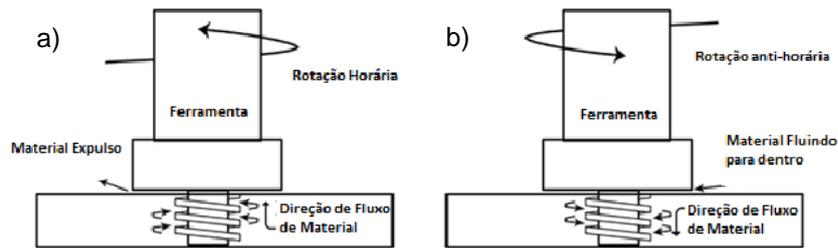
Figura 22 – Diferentes superfícies para pino de ferramenta cônica para soldagem FSW.



Fonte: (ZHANG et al., 2012).

A superfície do pino é escolhida de modo a proporcionar um melhor fluxo, ou um maior calor ao processo. Um pino rosqueado para esquerda sob rotação no sentido anti-horário (Figura 23) faz com que o material seja arrastado para baixo pelas roscas ao longo da superfície do pino, o que promove sua agitação, e fechamento de vazios/cavidades (ZHANG et al., 2012, ESLAMI et al., 2015).

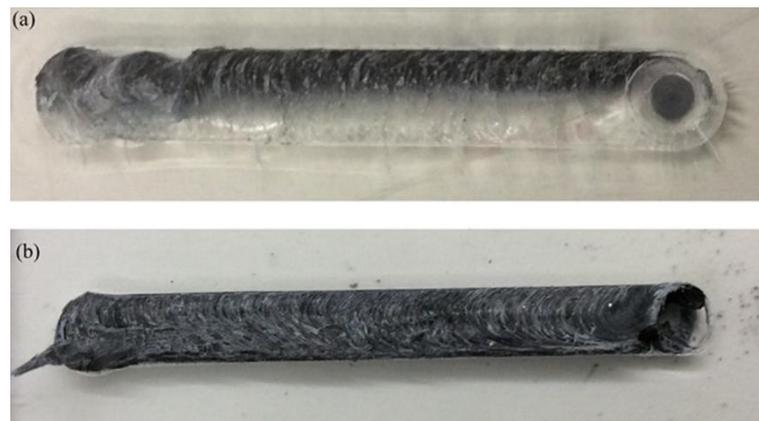
Figura 23 – Representação do sentido de fluxo de material na soldagem FSW para ferramenta de pino rosqueado quando rotacionado no sentido a) horário e b) anti-horário.



Fonte: (BANJARE et al., 2016) Modificado.

Não utilizar roscas ou sulcos pode ocasionar acúmulo de material no lado de avanço da solda, dificultando uma mistura adequada (ESLAMI et al., 2015). Na Figura 24 é mostrado em uma soldagem de materiais dissimilares, a diferença de mistura quando se utiliza pino rosqueado e não rosqueado.

Figura 24 - Diferença de mistura na soldagem por FSW de placas sobrepostas de polipropileno (preta) e poliestireno (transparente) usando ferramenta de pino a) sem rosca, e b) com rosca.



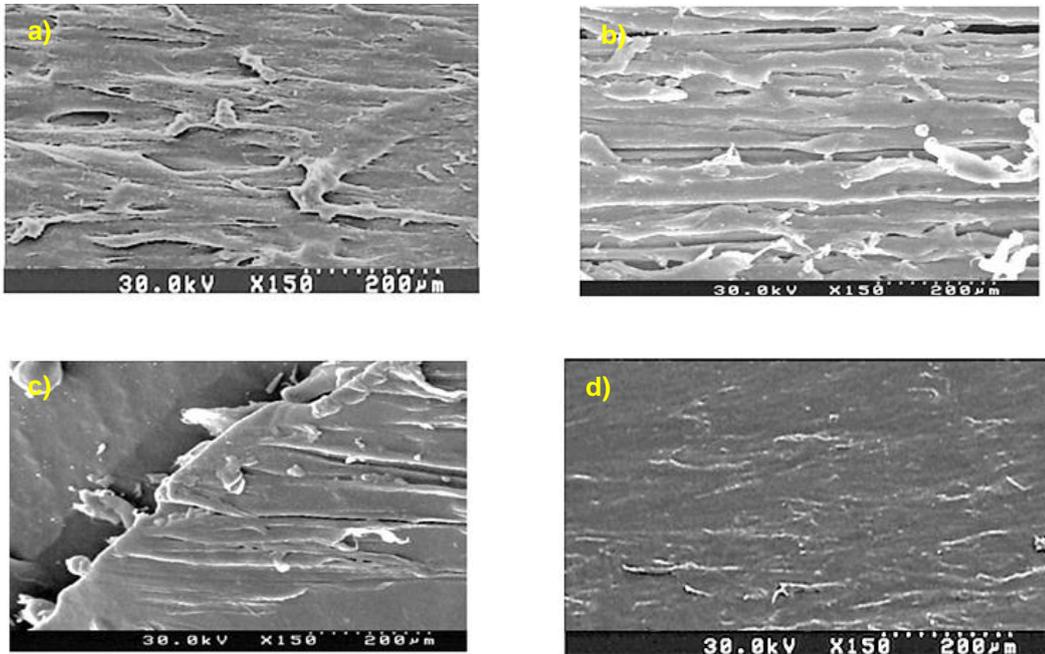
Fonte. (ESLAMI et al., 2015).

Kordestani et al. (2017), executou a soldagem por FSW utilizando pino cônico com rosca e chanfro, pino cônico com rosca, pino de seção quadrática e pino com 4 sulcos rosqueado, e encontrou melhor resistência a tração e aparência da solda com pino cônico rosqueado e chanfrado. Isso se deve à maior superfície de contato dessa ferramenta, resultando em um maior calor por fricção, possibilitando uma melhor mistura e conseqüente homogeneidade da junta.

Resultados dos estudos de Hajideh et al. (2017), também mostram que a ferramenta com maior superfície de contato usada, no caso cilíndrica e rosqueada, teve as melhores misturas e resultados de resistência a tração em soldas de polipropileno

com polietileno. A estrutura obtida nos cordões de solda feitos por Hajideh et al. (2017) com diferentes pinos está representada na Figura 25.

Figura 25 – Imagens der MEV para soldagem FSW de placas de polietileno e polipropileno com ferramenta de pino de seção a) quadrática, b) triangular, c) cilíndrica e d) cilíndrica rosqueada.

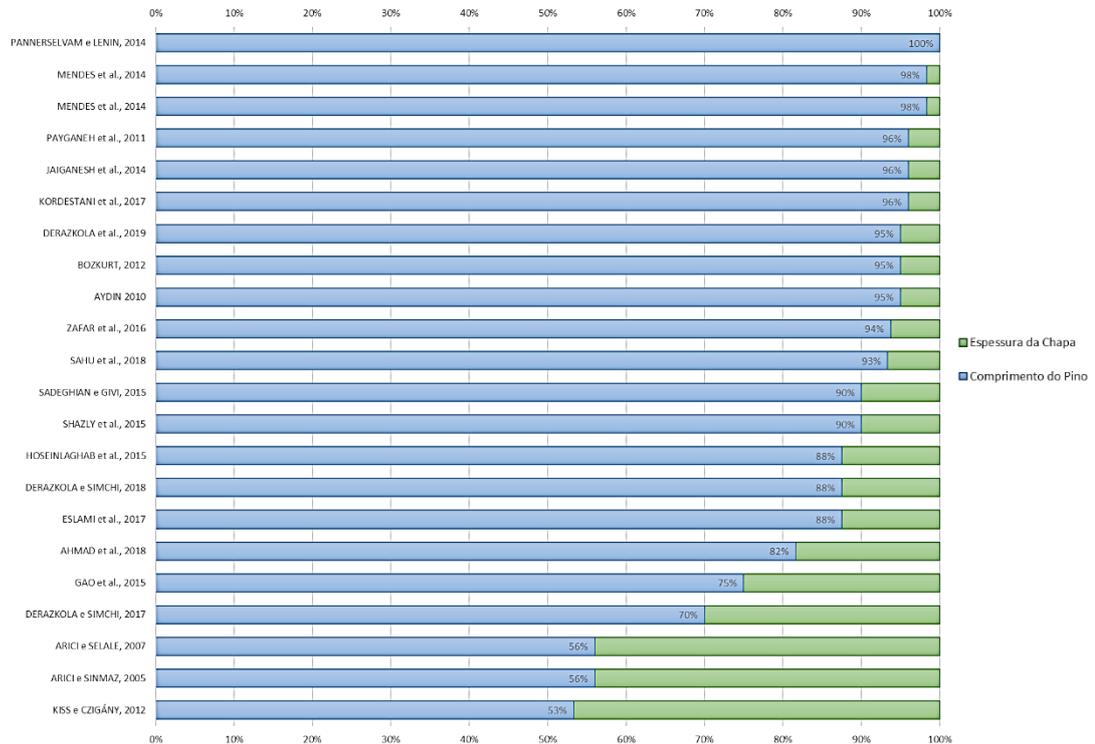


Fonte: (HAJIDEH et al., 2017).

As dimensões do pino e seus componentes também devem ser avaliadas para a adequada execução da soldagem. Diâmetro, comprimento do pino e até o passe de rosca devem ser considerados. Para menores comprimentos do pino, são observados defeitos na raiz ou a não soldagem da chapa inferior, no caso de chapas sobrepostas (ESLAMI et al., 2015).

O aumento de pressão causada pelo comprimento de pino inserido, resulta em maior retirada de material da zona de mistura, formando defeito de *flash*. Desse modo, o ideal é planejar o comprimento do pino de acordo com a espessura da chapa a ser soldada. Na Figura 26 contém um gráfico que reúne os dados do comprimento utilizado em ferramentas para FSW em polímeros em relação à espessura da chapa soldada por diferentes autores.

Figura 26 – Comprimento de pino da ferramenta em relação à espessura da chapa usada na soldagem FSW em diferentes trabalhos.



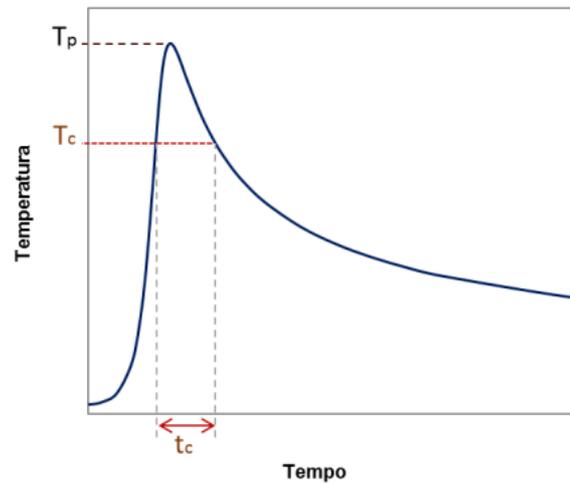
No caso do uso de roscas, o passe de rosca deve ser bem avaliado. Pinos com passe muito grande, podem funcionar como broca, retirando material acumulado no ombro (BOZ; KURT, 2003). Kiss e Czigány (2007) soldaram duas placas de polipropileno de cores diferentes, possibilitando a visualização da mistura ocorrida no processo. Foi observado que o processo realizado com a ferramenta de ângulo de rosca de 45° obteve uma mistura mais homogênea na solda, do que usando a ferramenta de ângulo de 15°.

3.6 Ciclo térmico de soldagem

Ciclo térmico de soldagem consiste na variação de temperatura que ocorre em um determinado ponto da junta durante a soldagem. Essa variação depende do tipo de material base, da geometria e espessura da junta e da energia de soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Na soldagem de materiais metálicos envolvendo aquecimento, com ou sem fusão, o gráfico da temperatura em função do tempo apresenta a forma típica mostrada na Figura 27 (CASTRO, 2017).

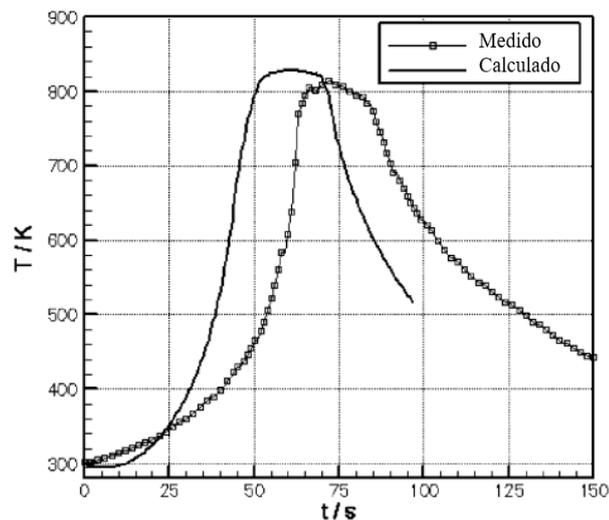
Figura 27 - Ciclo térmico esquemático em soldagem.



Fonte: (CASTRO, 2017).

Os trabalhos de Song e Kovacevic (2003) e Chao et al. (2003), propuseram um modelamento térmico para soldagem FSW de alumínio. Em ambos os casos foram construídos gráficos de temperatura em função do tempo comparando-se os valores de temperatura obtidos por modelamento com os dados medidos por termopares (Figura 28).

Figura 28 – Temperaturas calculadas e medidas na soldagem FSW de Al 6061-T6.



Fonte: (SONG; KOVACEVIC, 2003).

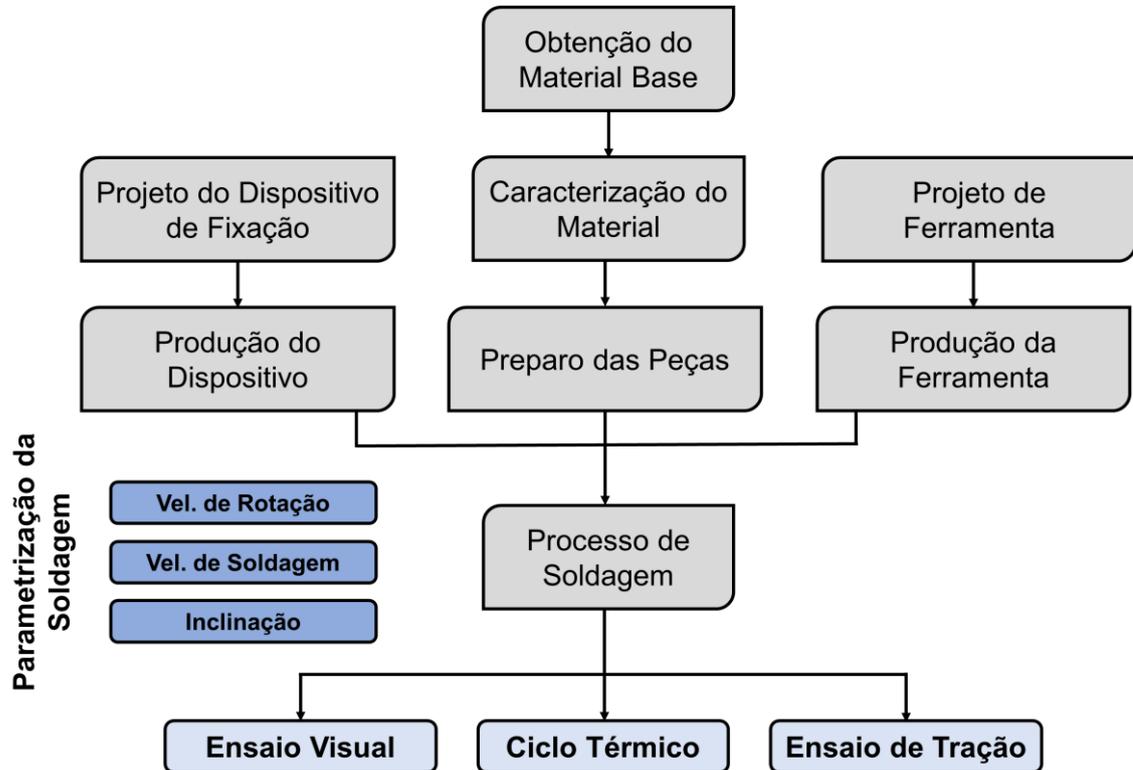
Entender o ciclo térmico da soldagem FSW é importante, mais ainda em materiais poliméricos, dado a baixa condutividade térmica, e baixa temperatura de degradação desses materiais. Menos calor gerado é dissipado por condução, podendo degradar o polímero próximo da região da ferramenta.

Entender a temperatura ótima para o processo para materiais poliméricos também é fundamental, dado que não se deseja a fusão do material, mas não se sabe ao certo o quão acima da temperatura de transição vítrea deve-se chegar para a melhor mistura e execução da soldagem.

4 METODOLOGIA

Neste trabalho, seguiu-se a metodologia de acordo com o fluxograma representado pela Figura 29.

Figura 29 - Fluxograma da metodologia do trabalho.



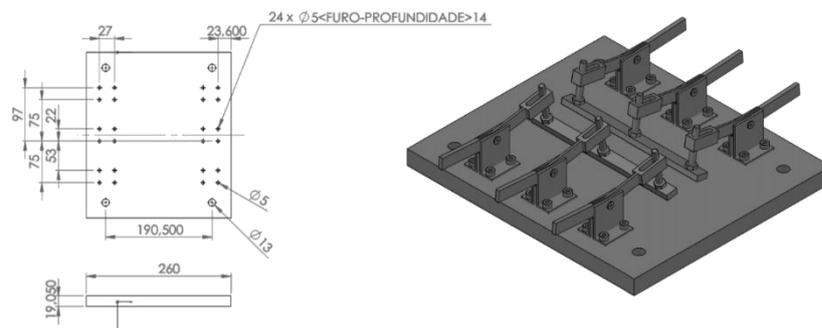
Fonte: Autor.

4.1 Dispositivo de fixação

Para o dispositivo de fixação foi utilizada uma chapa de aço ASTM A36, dado seu baixo custo, fácil usinabilidade e obtenção. As dimensões seguiram o projeto indicado pela Figura 30, que prevê a alocação de 6 grampos de fixação rápida, garantindo uniformidade e rigidez no posicionamento do substrato.

Para garantir o paralelismo entre as superfícies do dispositivo de fixação, o material foi retificado, e furos foram feitos para que este componente seja acoplado à mesa da fresadora onde foi executada a soldagem. Tanto o paralelismo do dispositivo feito, quanto sua eficácia em fixar e aplainar a chapa de polímero foi verificada com uso de relógio comparador em mesa de desempenho.

Figura 30 – Projeto do Dispositivo de Fixação.

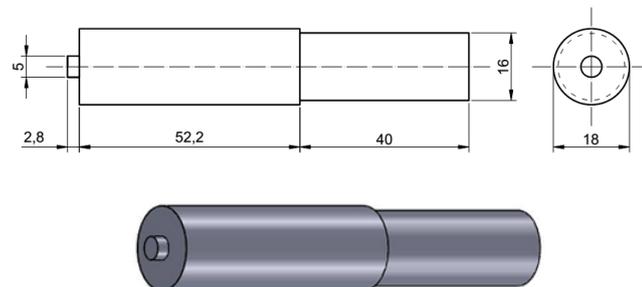


Fonte: Autor

4.2 Projeto da ferramenta

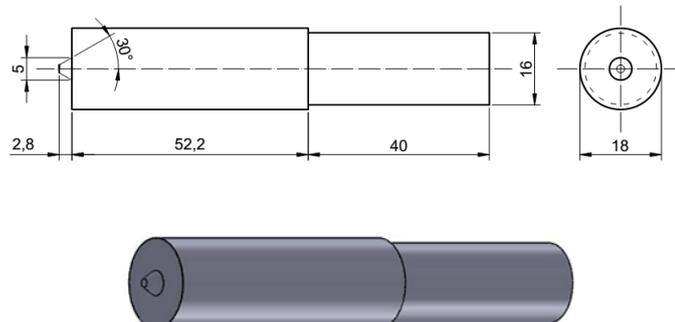
As ferramentas para soldagem FSW foram feitas utilizando aço AISI H13, assim como feito por Sahu et al. (2018) e Zafar et al. (2016). Esse aço possui boa resistência ao desgaste, a trinca e a fadiga térmica, além de uma boa usinabilidade e baixo custo. Essas ferramentas foram feitas utilizando o torno CNC, seguindo os projetos das Figuras 31 e 32.

Figura 31 – Projeto da Ferramenta com pino cilíndrico para Soldagem FSW.



Fonte: Autor

Figura 32 – Projeto da Ferramenta com pino cônico para Soldagem FSW.



Fonte: Autor

Conforme os projetos, foram feitas ferramentas com pino cilíndrico e com o pino cônico, com superfícies de ombro retas. Mesmo com sua baixa complexidade, o pino cilíndrico pode ser eficaz, e foi usado com relativo sucesso por Arici e Selale (2007) na soldagem de polietileno. Já o pino cônico, tem uma superfície mais complexa para realização de mistura na soldagem, além de ser inserido no substrato de forma mais fácil durante no início do processo, e foi usado por Derzkola e Simchi (2018) em PMMA.

4.3 Material Base

Para a soldagem foram utilizadas chapas de policarbonato branco e chapas de policarbonato transparente, adquiridas na empresa Actos. Ambas as chapas foram cortadas com dimensões de 178mm x 120mm x 3mm.

Para o levantamento das propriedades mecânicas do material recebido, foram feitos ensaios de tração seguindo a norma ASTM D-638. Esses ensaios foram feitos na Máquina universal para ensaio de tração/compressão, dobramento e fadiga EMIC DL30000N com célula de carga Trd 29, a uma velocidade de ensaio de 1mm/min.

A análise por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), visando caracterizar o comportamento térmico do material, foi realizada empregando um equipamento marca SII EXSTAR, modelo DSC 7020. No ensaio empregou-se atmosfera de nitrogênio com vazão de 50mL.min⁻¹, taxa de aquecimento de 10°C com massa aproximada de 7,4mg de policarbonato em cadinho de alumínio, com faixa de temperatura variando de 30°C a 300°C.

4.4 Procedimento de soldagem

A soldagem foi realizada na fresadora CLEVER, modelo FH-4 (Figura 33). Esse equipamento tem como condições operacionais: velocidade de Rotação de até 2160 rpm, velocidade no eixo longitudinal de 25 a 505mm/min, cabeçote inclinável e indicador digital de posição;

Figura 33 - Fresadora modelo CLEVER FH-4.



Fonte: Autor.

Partindo-se da soldagem sobrechapa, os parâmetros foram ajustados e a análise da repetibilidade do procedimento foi realizada utilizando policarbonato branco. No policarbonato transparente foram feitas 36 soldas, variando-se a velocidade de rotação da ferramenta, a velocidade de soldagem, e o tipo de ferramenta, seguindo a Tabela 2.

Tabela 2 - Matriz de experimentos

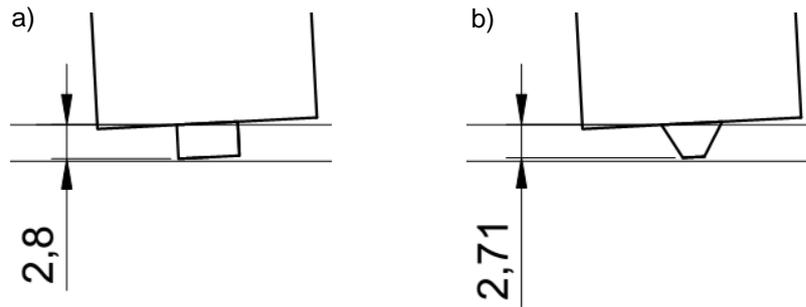
Ferramenta	Velocidade de Rotação (RPM)	Velocidade de Soldagem (mm/min)	R/T	Ângulo de Inclinação (°)
Ferramenta Cilíndrica	466	25	19	3
		40	12	3
	1176	25	47	3
		40	29	3
	2160	25	86	3
		40	54	3
Ferramenta Cônica	466	25	19	3
		40	12	3
	1176	25	47	3
		40	29	3
	2160	25	86	3
		40	54	3

Fonte: Autor.

Todas as soldagens foram realizadas com ângulo de ferramenta de 3°, o que propicia uma maior pressão de forjamento. O posicionamento da ferramenta foi feito tomando

como base o contato ferramenta/chapa, e, dado a angulação, para possibilitar que uma mesma área do ombro esteja em contato com a chapa nas diferentes ferramentas, as soldagens foram feitas com mergulho de 2,80mm para a ferramenta cilíndrica, e de 2,71mm para as ferramentas cônicas, conforme Figura 34.

Figura 34 – Penetração do pino feita para as ferramentas a) cilíndrica e b) cônica, considerando a mesma superfície de contato de ombro para ambos os casos.

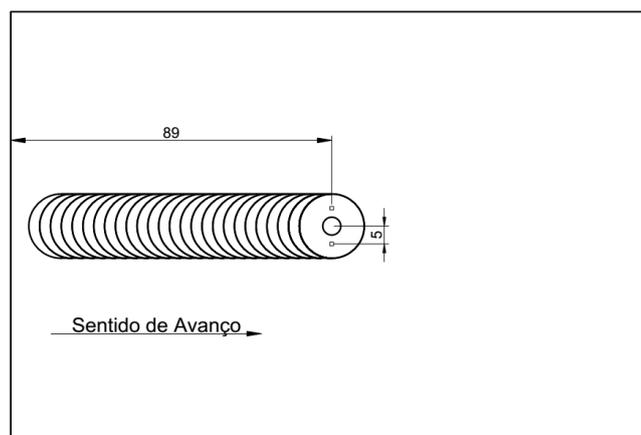


Fonte: Autor.

4.5 Ciclo térmico de soldagem

Durante as soldagens foi monitorada a temperatura em dois pontos do polímero utilizando termopares tipo K acoplados a um sistema de aquisição de dados com uma taxa de aquisição de 3 medições por segundo. Os termopares foram posicionados segundo a Figura 35.

Figura 35 – Disposição de termopares para levantamento de ciclo térmico da soldagem FSW em policarbonato.



Fonte: Autor

Os termopares foram afixados a 1,5mm da superfície inferior das chapas, evitando interferência com o fluxo do material, nos lados de avanço e retrocesso, permitindo uma análise média das temperaturas alcançadas nesses pontos.

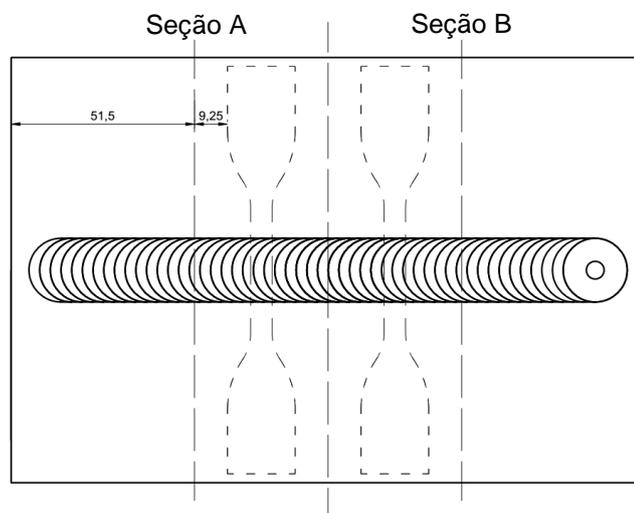
4.6 Análises do conjunto soldado

4.6.1 Inspeção visual e microscopia ótica

A inspeção visual realizada foi a primeira análise feita após a soldagem, objetivando a averiguação de defeitos como: saída de material, defeito de túnel, porosidade, falta de homogeneidade na mistura e arrancamento de material. Dado a transparência das chapas, as imagens foram feitas em um anteparo escuro, possibilitando contraste com a região soldada, que tende a ficar branca.

Para a verificação da ligação promovida entre a região de mistura e o material base no lado de avanço foram feitas análises macrográficas das seções transversais de cada cordão nas seções A e B especificadas pela Figura 36. Para isso foi realizado microscopia ótica utilizando o microscópio AXIO Scope com câmera AxioCam ERc5s acoplada. O material analisado foi lixado com lixas de 1500# a 3000# e polido com alumina em suspensão.

Figura 36 – Seções de corte para análise da seção transversal do conjunto soldado e região de retirada de corpos de prova de tração.



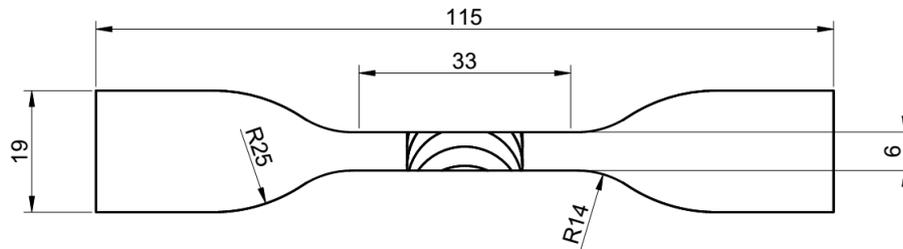
Fonte: Autor

4.6.2 Ensaio de tração

De modo análogo ao feito com o material recebido, foram levantadas as propriedades mecânicas do conjunto soldado por meio de ensaios de tração seguindo a norma ASTM D-638 (Figura 38). Para o ensaio foram retirados dois corpos de prova da região central de cada chapa, seguindo a Figura 37, de modo a evitar regiões de início e fim

do cordão, possibilitando uma melhor comparação entre as propriedades entre os corpos de prova ensaiados. Esses corpos de prova foram feitos utilizando corte a água, evitando danos ao material potencialmente frágil, nas dimensões da Figura 37.

Figura 37 – Dimensões de corpo de prova utilizado para ensaio de tração



Fonte: Autor.

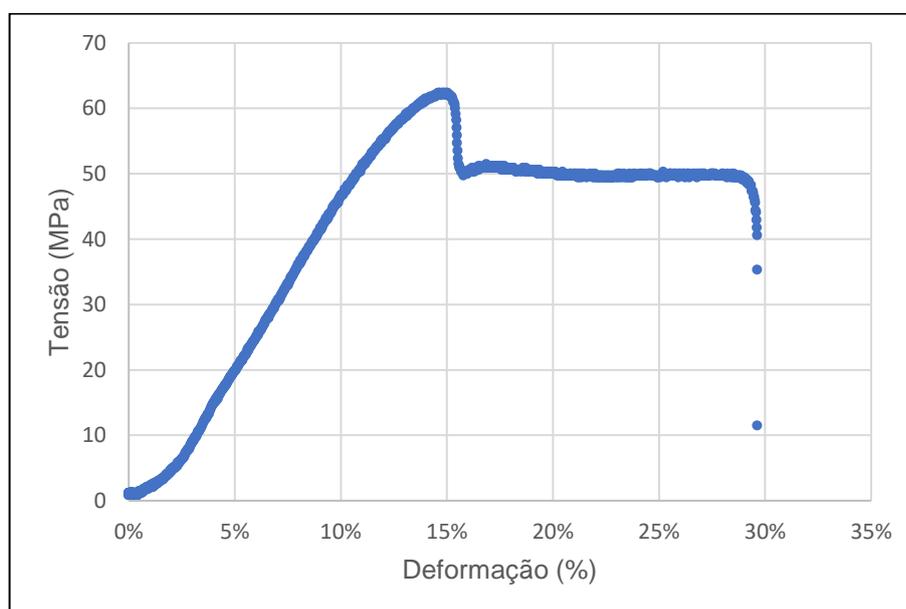
Em toda a literatura, o ensaio de tração se mostrou o mais utilizado para mensurar a qualidade dos conjuntos soldados, comparando-se o resultado do limite de resistência a tração do material recebido com o da junta soldada. Em complemento foram avaliados o tipo e local de ocorrência da fratura através da avaliação visual utilizando a técnica de sombreamento para auxiliar na visualização do contraste da amostra transparente.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização do material de base

Através do ensaio de tração do policarbonato como recebido, foi levantada a curva Tensão x Deformação apresentada na Figura 38. Analisando o gráfico é possível ver que o material alcança um alongamento de 30%, assim como um limite de resistência a tração de 62MPa, o que é condizente com a norma ASTM D3935.

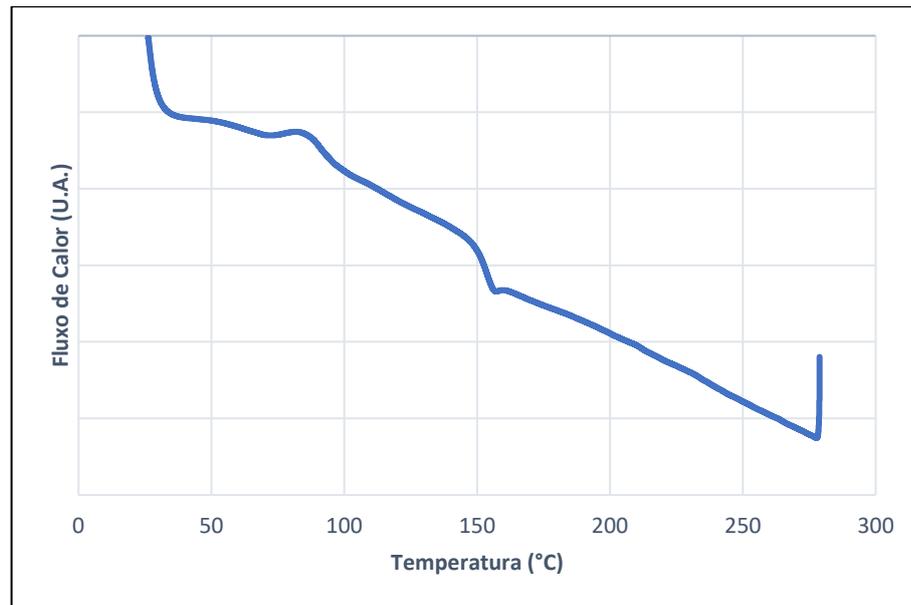
Figura 38 – Gráfico Tensão x Deformação do policarbonato como recebido.



Fonte: Autor.

O resultado do ensaio de DSC pode ser visualizado na Figura 39. A curva encontrada no aquecimento possui um fluxo térmico em constante queda, indicando que a amostra absorve calor ao longo de todo o procedimento, o que incomum para este tipo de ensaio. Esse fluxo pode estar associado a reações endotérmicas como evaporação da água (até os 100°C) ou liberação de Bisfenol A. Ainda assim, é possível visualizar um fenômeno endotérmico em destaque, que se inicia em 150°C. Essa mudança de comportamento observada no gráfico indica um pico de calor absorvido, que ocorreu em temperatura condizente com a transição vítrea do policarbonato (COSTA, 2013).

Figura 39 – Curva DSC para policarbonato transparente.



Fonte: Autor.

5.2 Variação de velocidade de rotação utilizando pino cilíndrico

5.2.1 Efeito da velocidade de rotação sobre o aspecto visual da solda

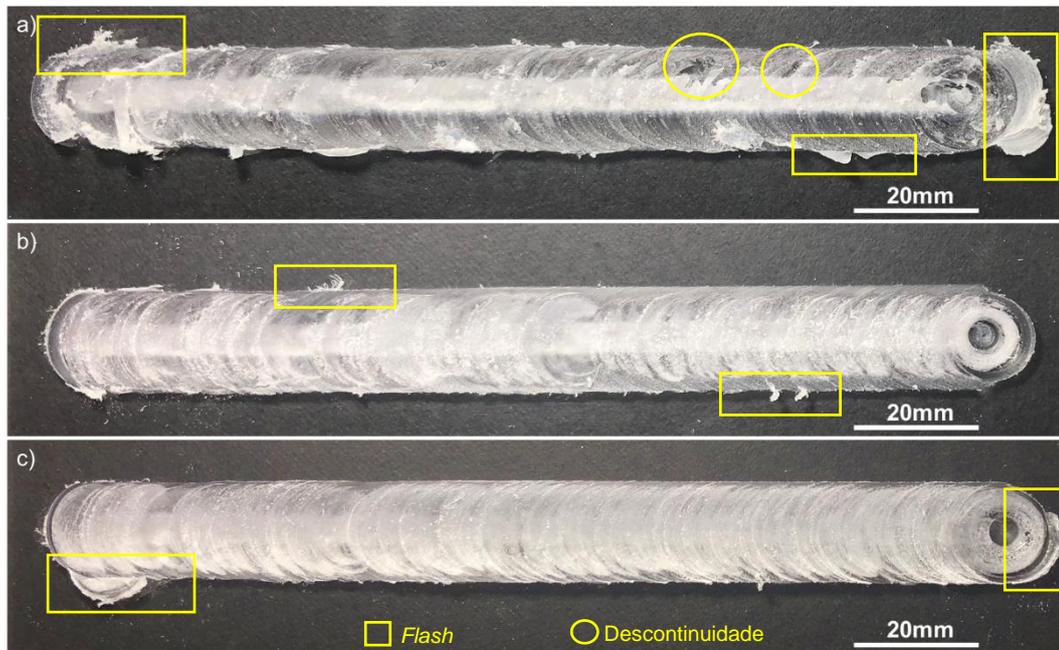
A velocidade de rotação na soldagem por *Friction Stir Welding* é o parâmetro mais significativo de mudança de propriedades do conjunto soldado (Bozkurt, 2012). Na Figura 40 é possível verificar a evolução no aspecto visual na soldagem de policarbonato transparente com o aumento da velocidade de rotação (466RPM, 1176RPM e 2160RPM), sendo mantidas a velocidade de soldagem em 25mm/min e a ferramenta utilizada, de pino cilíndrico.

A soldagem feita a 466RPM (Figura 40 a), tem maior transparência na região atritada apenas pelo ombro, sendo possível ver defeitos superficiais, como a falta de material nas regiões indicadas. O início da soldagem também apresenta uma saída de material de aspecto quebradiço, diferente do *flash* do final do material.

Em contraste, a soldagem feita a 2160RPM (Figura 40 c), é quase totalmente opaca, indicando uma maior mistura. O cordão tem aspecto padrão do início ao fim, com escamas regulares. Não é possível identificar defeitos superficiais significativos.

A soldagem feita na velocidade de 1176RPM (Figura 40 b), tem uma boa continuidade do cordão de solda, mas também apresenta algumas pequenas falhas superficiais e transparência intermediária.

Figura 40 – Superfície das chapas de policarbonato soldadas com ferramenta cilíndrica a velocidade de soldagem de 25mm/min a uma velocidade de rotação de a) 466RPM, b) 1176RPM e c) 2160RPM.

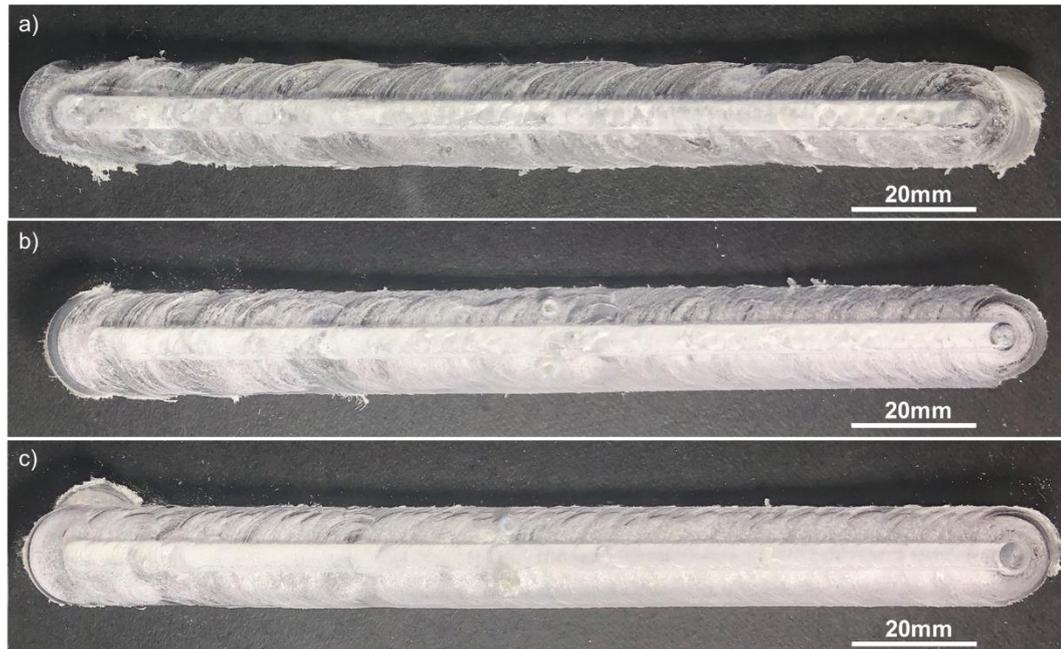


Fonte: Autor.

Uma análise visual ainda mais completa pode ser feita utilizando as imagens da Figura 41, que contém o verso das chapas soldadas. Nessas imagens é possível analisar, principalmente, a continuidade da raiz, possibilitando constatar a falta de mistura, ou pelo menos a falta de material nessa região, que pode ser catastrófico para o uso dos componentes.

Com a variação de velocidade de rotação, nota-se uma diferença de homogeneidade na raiz da solda, indicando uma variação de continuidade em cada condição. Na velocidade de rotação mais baixa, 466RPM (Figura 41 a), existe uma heterogeneidade das cores da raiz, indicando em alguns pontos falta de material, ou mistura incompleta. Quando a análise é feita na maior velocidade, de 2160RPM (Figura 41 c), a linha da raiz se comporta de forma praticamente uniforme, com poucas regiões de descontinuidade. Esse prognóstico visual indica uma maior qualidade da solda realizada à 2160RPM, sendo menos propensa a falhas, quando se comparada às soldas feitas em menores velocidades de rotação, mantendo-se os demais parâmetros constantes.

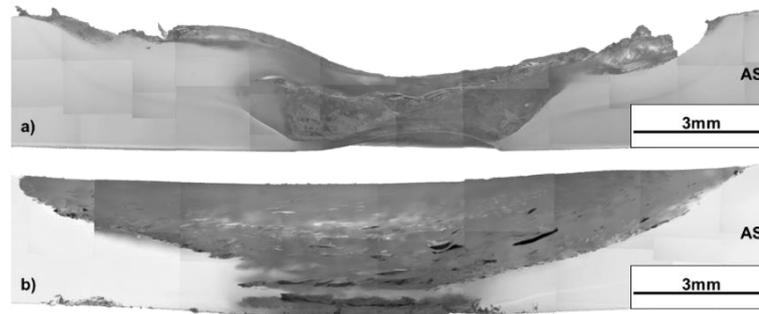
Figura 41 – Verso das chapas de policarbonato soldadas com ferramenta cilíndrica a velocidade de soldagem de 25mm/min a uma velocidade de rotação de a) 466RPM, b) 1176RPM e c) 2160RPM.



Fonte: Autor.

Quanto a análise macroestrutural da seção transversal da solda (Figura 42), na velocidade de rotação mais baixa, 466RPM (Figura 42 a), observa-se uma redução da espessura da chapa na região soldada, arrancamento de material, e pequenos poros na raiz do lado de recuo. Na condição oposta, em velocidade de rotação de 2160RPM (Figura 42 b), a espessura da chapa se mantém constante, não sendo perceptível arrancamento de material, mas, apresentando bolhas maiores em toda a região de mistura. Nota-se ainda que a área afetada pela ferramenta aparenta ser significativamente maior na soldagem a 2160RPM, indicando em uma maior região do material que atingiu uma temperatura suficiente para plastificar e misturar. Além disso, não é possível ver qualquer descontinuidade significativa na interface da raiz com o metal de base. Resultados similares foram observados nas demais amostras analisadas da soldagem FSW feita com os mesmos parâmetros.

Figura 42 – Seção transversal da soldagem FSW com pino cilíndrico em policarbonato com parâmetros a) 466RPM a 25mm/min e b) 2160RPM a 25mm/min.

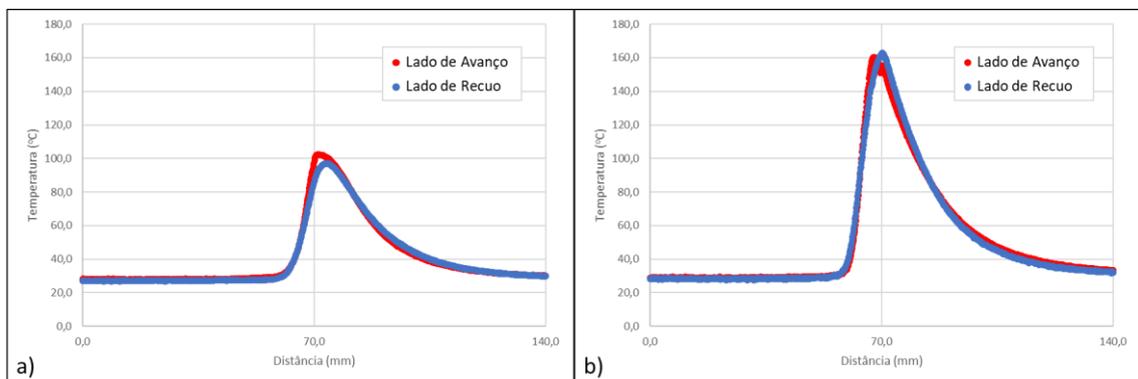


Fonte: Autor.

5.2.2 Influência da velocidade de rotação no ciclo térmico de soldagem

Com os dados dos termopares, foi possível construir gráficos da temperatura registrada no termopar em relação a posição da ferramenta (Figura 43). Para todos os diferentes parâmetros, o comportamento das curvas se manteve, com início do aquecimento ocorrendo quando ferramenta percorreu 60mm, estando a 10mm do termopar.

Figura 43 – Ciclo Térmico para soldagem FSW utilizando ferramenta cilíndrica e velocidade de soldagem de 25mm/min e a) 466rpm e b) 2160rpm.

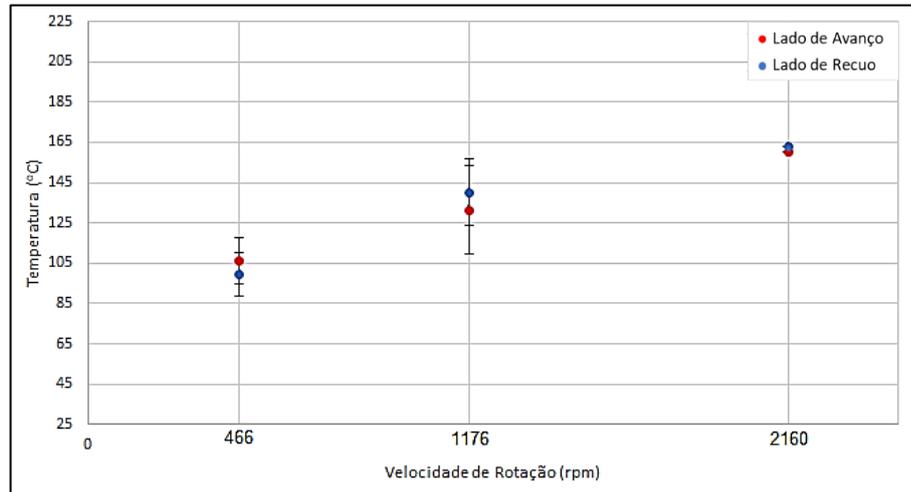


Fonte: Autor.

Com o aumento da velocidade de rotação o ganho de temperatura foi significativo, e pode ser constatado na Figura 44. Nesse mesmo gráfico é possível notar que apenas na soldagem com maior velocidade de rotação, 2160rpm, foi superada a temperatura de transição vítrea do policarbonato na posição do termopar, a 2,5mm do pino da ferramenta, garantindo que o material tenha até nesse ponto um movimento segmental suficiente para fluir, viabilizando uma melhor mistura, em uma maior área. Em relação às temperaturas registradas no Lado de Avanço e no Lado de Recuo, não foi possível notar diferença significativa, o que difere dos autores x e y, que indicam

uma maior temperatura alcançada no lado de avanço na soldagem FSW. Apesar dos resultados constatados, mais testes precisariam ser realizados de modo a minimizar o erro das medições.

Figura 44 – Temperaturas de pico alcançadas para soldagem FSW utilizando ferramenta cilíndrica e velocidade de soldagem de 25mm/min e velocidade de rotação de 466, 1176 e 2160rpm.

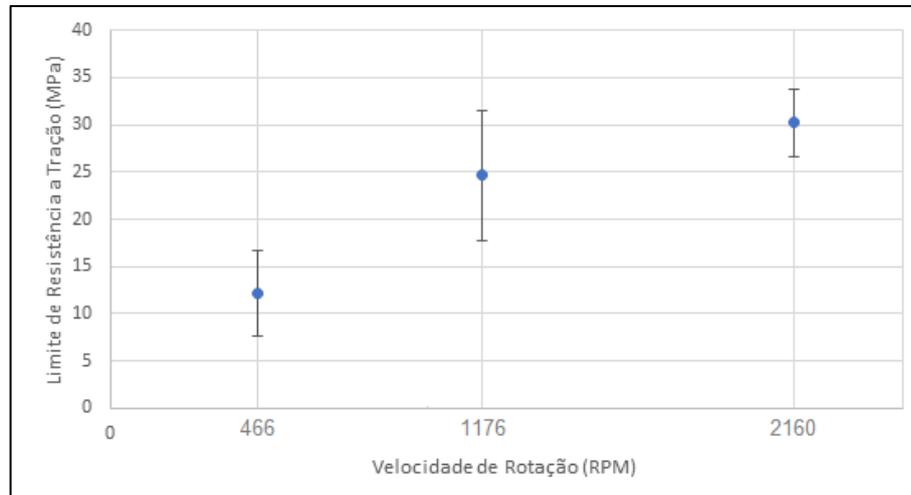


Fonte: Autor.

5.2.3 Influência da velocidade de rotação nas propriedades mecânicas

Em relação a evolução das propriedades mecânicas das chapas soldadas com diferentes velocidades de rotação da ferramenta foram avaliados limite de resistência, alongamento e região de ruptura. No gráfico da Figura 45 são apresentados os limites de resistência à tração médio para as diferentes velocidades de rotação, mantendo-se constante as velocidades de soldagem em 25mm/min e a ferramenta de pino cilíndrico.

Figura 45 – Limite de resistência a tração médio para as chapas soldadas por FSW com ferramenta de pino cilíndrico, velocidade de soldagem de 25mm.min e diferentes velocidades de rotação.

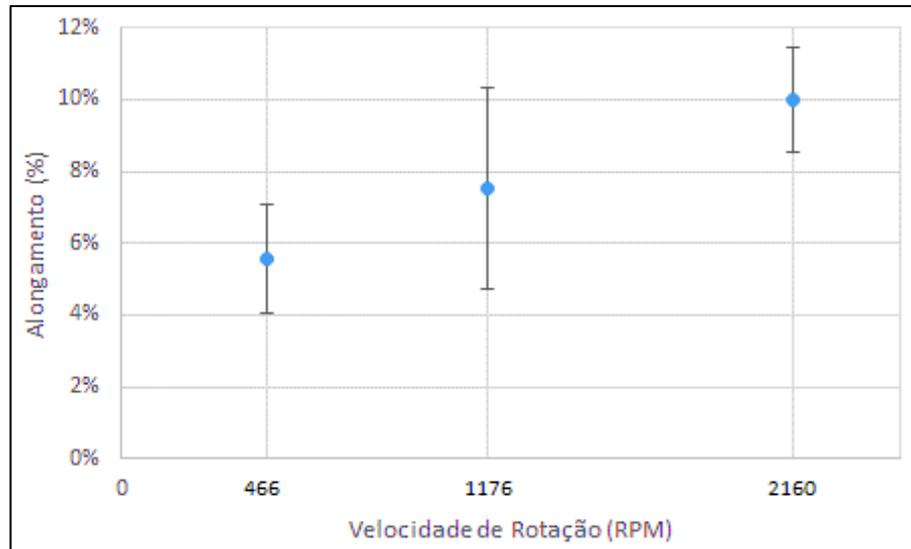


Fonte: Autor.

Dentre todos os ensaios feitos, o maior limite de resistência à tração encontrado foi de 36,67MPa para a soldagem a 2160rpm, sendo que, o valor médio encontrado para essa parametrização é de 30,2MPa. Essa média corresponde a 48,7% do limite de resistência à tração encontrado para o policarbonato sem solda. Apesar da redução da resistência à tração, o valor medido é promissor, sendo superior ao encontrado por Shazly et al. (2014) para o mesmo material.

O alongamento percentual do material apresentou um aumento com o acréscimo da velocidade de rotação, porém, conforme gráfico da Figura 46, esse acréscimo não foi significativo, saindo de uma média de 6% de alongamento para a soldagem feita a 466RPM para 10% de alongamento para a soldagem a 2160rpm.

Figura 46 – Alongamento percentual médio para as chapas soldadas por FSW com ferramenta de pino cilíndrico, velocidade de soldagem de 25mm.min e diferentes velocidades de rotação.

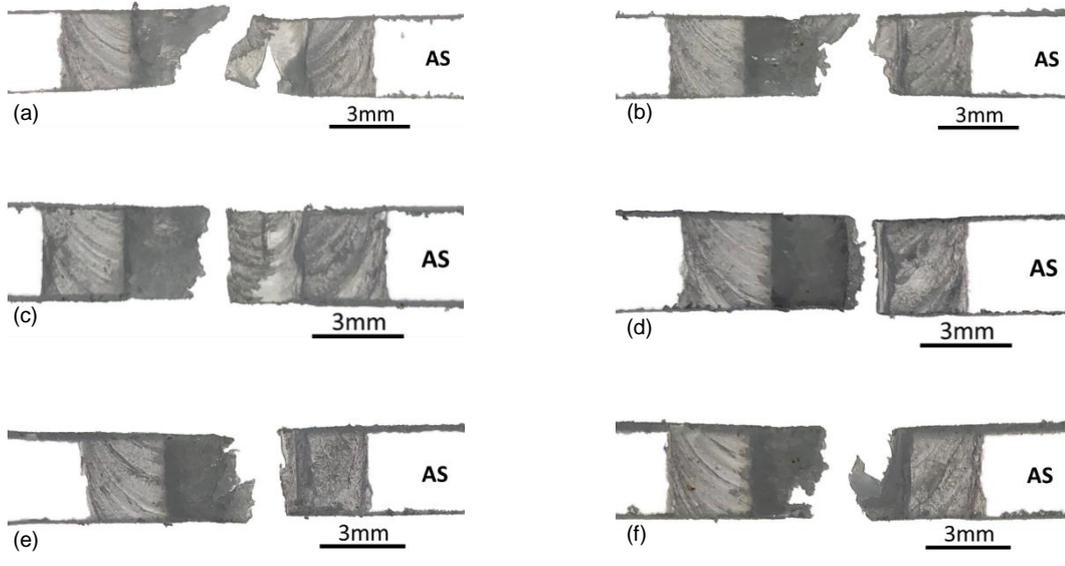


Fonte: Autor.

Tanto o decréscimo de limite de resistência a tração, quanto o decréscimo de alongamento, são esperados, dado que a soldagem foi realizada sobrechapa e o processo de *Friction Stir Welding* não possui material de adição para conferir maior resistência à região afetada pelo processo. Segundo Zafar et al. (2016), é de se esperar na soldagem FSW redução de espessura da chapa pela saída de material durante a soldagem por causa de *flash* ou por degradação do polímero, gerando um cordão de solda que invariavelmente terá menos massa do que o material original, fazendo com que essa região seja a mais frágil.

As fraturas das soldas produzidas a 466rpm podem ser verificadas na Figura 47. Todas as falhas começaram no lado de avanço, na interface da área de contato do pino com o *welding nugget*, o que pode ser justificada por falhas na raiz, dado uma mistura ineficiente para essa parametrização. Nos corpos de prova da Figura 47 a e Figura 47 c, o rompimento se deu em dois tempos, devido à falta de material na raiz, separando a face superior e inferior da chapa.

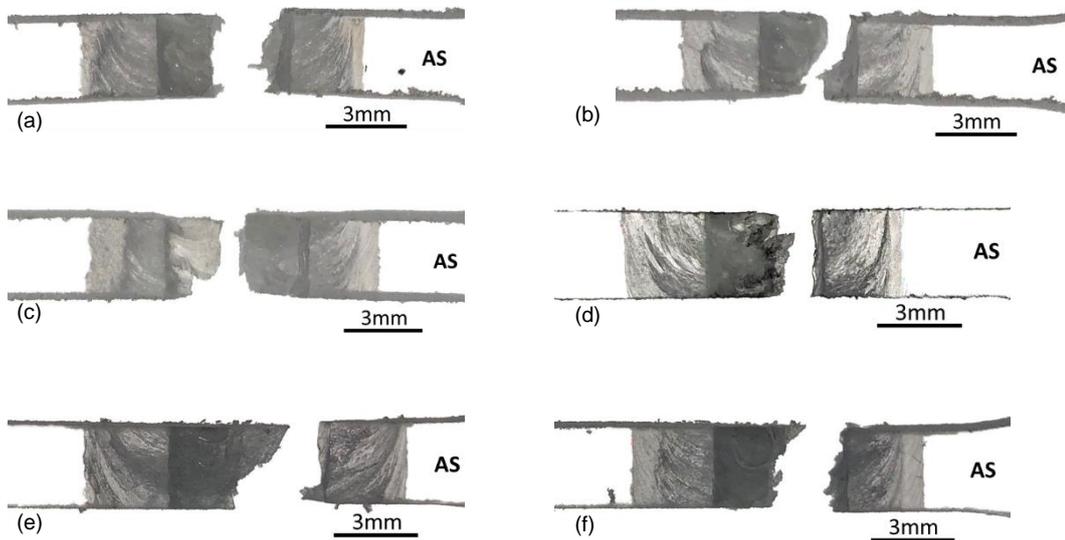
Figura 47 – Fraturas dos corpos de prova de tração na soldagem FSW a 466RPM e 25mm/min para ferramenta de pino cilíndrico.



Fonte: Autor.

Assim como na soldagem a 466rpm, a soldagem a 1176rpm ocasionou fraturas preferencialmente no lado de avanço dos corpos de prova de tração (Figura 48).

Figura 48 – Fraturas dos corpos de prova de tração na soldagem FSW a 1176RPM e 25mm/min para ferramenta de pino cilíndrico.

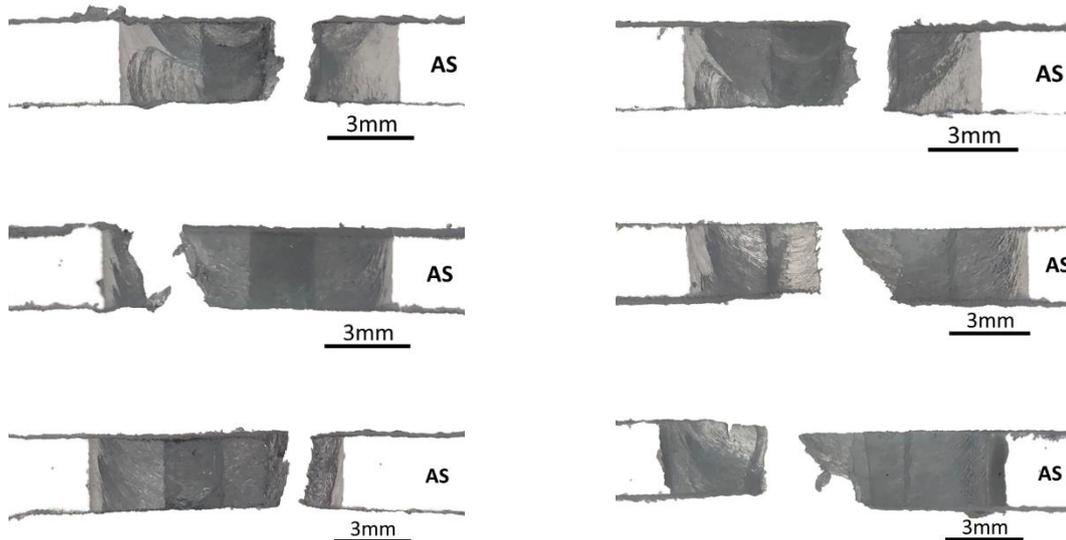


Fonte: Autor.

Diferente das soldagens a 466rpm e a 1176rpm, a que foi realizada a 2160rpm apresentou fraturas iniciadas tanto na interface de contato pino chapa, quanto na interface inteira do *welding nugget* com o material não misturado (Figura 49 c e Figura

49 e) indicando, portanto, a redução das descontinuidades presentes na raiz da solda para essa parametrização.

Figura 49 – Fraturas dos corpos de prova de tração na soldagem FSW a 2160rpm e 25mm/min para ferramenta de pino cilíndrico.



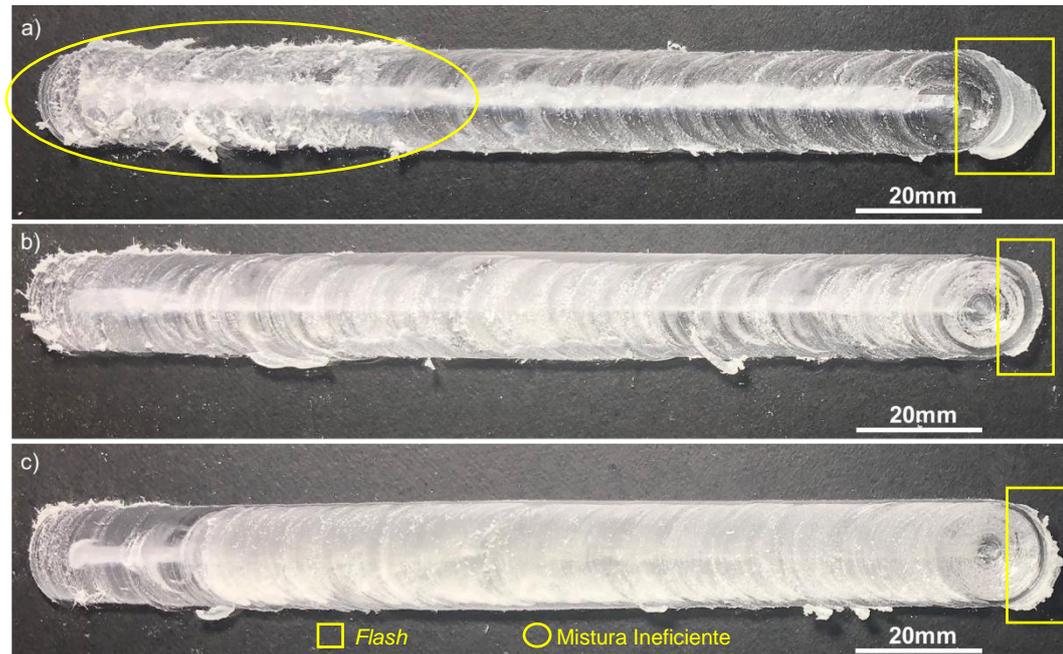
Fonte: Autor.

5.3 Variação de velocidade de rotação utilizando pino cônico

5.3.1 Efeito da velocidade de rotação sobre o aspecto visual da solda

Utilizando-se o pino cônico para a soldagem por *Friction Stir Welding*, o aspecto visual dos cordões realizados teve comportamento similar das soldas realizadas com a ferramenta cilíndrica, tanto na superfície do cordão de solda (Figura 50), quanto no verso (Figura 51).

Figura 50 – Superfície das chapas de policarbonato soldadas com ferramenta cônica a velocidade de soldagem de 25mm/min a uma velocidade de rotação de a) 466rpm, b) 1176rpm e c) 2160rpm.



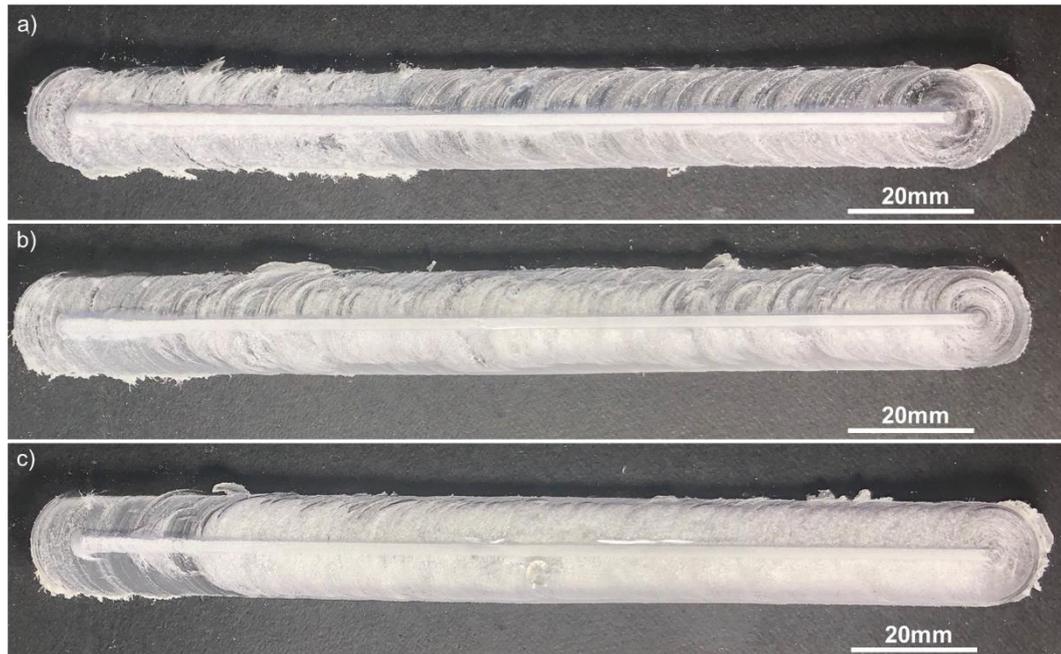
Fonte: Autor.

Para velocidade de rotação de 466rpm (Figura 50 a), o cordão de solda é majoritariamente transparente, sendo que, no início da soldagem ele apresenta um aspecto quebradiço, com uma mistura ineficiente, e na saída na ferramenta da peça um arrancamento de material. Para maior velocidade de rotação, 2160rpm (Figura 50 c), o cordão foi uniforme, com aspecto majoritariamente opaco.

Uma diferença perceptível entre a soldagem com ferramenta cilíndrica e a cônica, para velocidade de rotação de 2160rpm é uma zona de mistura inicial translúcida, o que indica uma recuperação do material ao seu aspecto ótico como recebido, sendo uma região ainda mais eficiente no que tange a qualidade de mistura.

No verso das chapas (Figura 51) a diferença mais significativa encontrada entre as soldas feitas com ferramenta cilíndrica e a cônica é a diminuição da região de mistura do pino, o que torna quase imperceptível qualquer descontinuidade nessa região para qualquer uma das três velocidades de rotação.

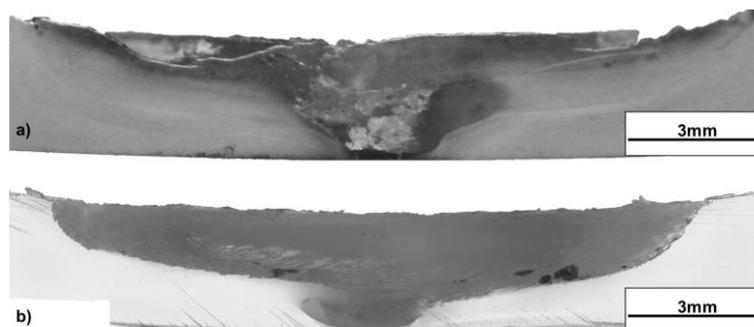
Figura 51 – Verso das chapas de policarbonato soldadas com ferramenta cônica a velocidade de soldagem de 25mm/min a uma velocidade de rotação de a) 466rpm, b) 1176rpm e c) 2160rpm.



Fonte: Autor.

Na seção transversal da região soldada, ao se comparar a soldagem com velocidade de rotação de 466rpm (Figura 52 a) com a de 2160rpm (Figura 52 b), assim como na soldagem utilizando a ferramenta cilíndrica, percebe-se na primeira uma maior redução de espessura da chapa na região soldada, sendo notório um arrancamento de material não plastificado, além de ser notório a presença de descontinuidades na interface da raiz com a chapa. Para a soldagem a 2160rpm a redução de espessura é menos perceptível, assim como é notório o maior tamanho da região de mistura, que apresenta, assim como na soldagem feita com pino cilíndrico, bolhas relativamente grandes em seu interior.

Figura 52 - Seção transversal da soldagem FSW com ferramenta cônica, e os seguintes parâmetros: a) 466rpm a 25mm/min e b) 2160rpm a 25mm/min.

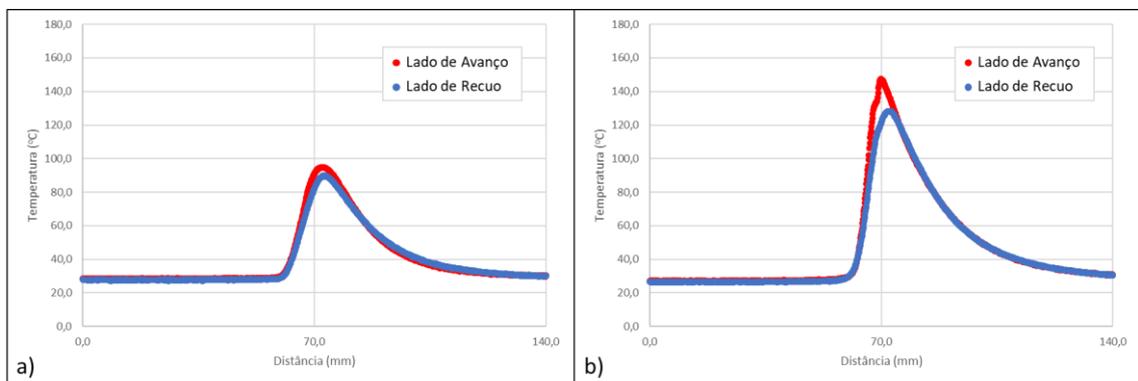


Fonte: Autor.

5.3.2 Influência da velocidade de rotação no ciclo térmico de soldagem

Para a ferramenta de pino cônico, as curvas de temperatura por posição da ferramenta (Figura 53) se comportaram de forma semelhante ao que aconteceu com o uso da ferramenta de pino cilíndrico, indicando o aumento de temperatura de pico média alcançada com o aumento de velocidade de rotação. Quanto ao perfil das curvas, tanto a taxa de aquecimento quanto a de resfriamento se mantiveram padrão para os diferentes parâmetros utilizados.

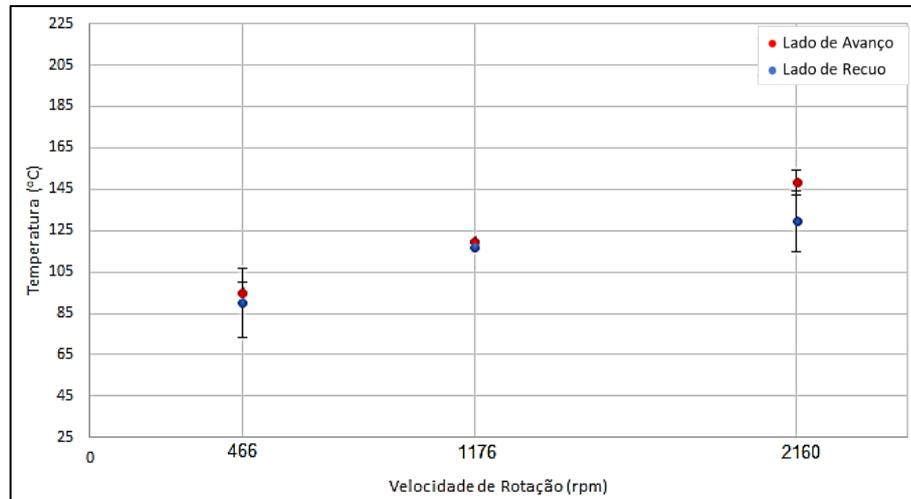
Figura 53 – Ciclo Térmico para soldagem FSW utilizando ferramenta cônica e velocidade de soldagem de 25mm/min e a) 466rpm e b) 2160rpm.



Fonte: Autor.

O aumento de temperatura de pico média alcançada com o aumento de velocidade de rotação é ilustrado no gráfico da Figura 54. Nesse gráfico, diferente do que acontece para a soldagem com ferramenta cilíndrica, em todos os casos o lado de avanço alcançou temperatura média maior que o lado de recuo, porém, ainda dentro do desvio padrão, não podendo ser confirmada uma diferença entre essas temperaturas.

Figura 54 – Temperaturas de pico alcançadas para soldagem FSW utilizando ferramenta cônica e velocidade de soldagem de 25mm/min e velocidade de rotação de 466, 1176 e 2160rpm.



Fonte: Autor.

Comparando as temperaturas de pico durante a soldagem realizada com as ferramentas cilíndrica e cônica (Tabela 3), evidencia-se um maior aquecimento das ferramentas cilíndricas. Há apenas uma exceção a isso, na temperatura medida no lado de avanço na velocidade de rotação de 466rpm e velocidade de soldagem a 40mm/min, onde a ferramenta de pico cônico teve um ganho de 2% de temperatura em relação à ferramenta de pino cilíndrico, o que deve ter acontecido por uma descentralização da ferramenta durante a soldagem, dado que o lado de recuo nessas condições teve uma perda média de 23% de temperatura.

Tabela 3 – Temperaturas de pico médias para soldagem FSW com ferramentas cilíndrica e cônica para diferentes parametrizações.

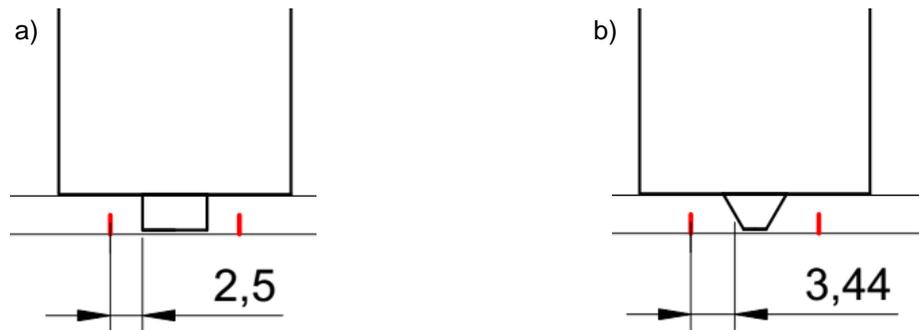
Vel. Rotação (RPM)	Temp. de pico média lado de avanço (°C)			Diferença (%)	Temp. de pico média lado de recuo (°C)			Diferença (%)
	F. Cilíndrica	F. Cônico	F. Cilíndrica		F. Cônico			
466*	106,3	95,1	-11%	99,5	90,1	-9%		
1176*	131,6	120,0	-9%	140,2	117,0	-17%		
2160*	160,5	148,5	-7%	163,0	129,5	-21%		
*Soldagem feita com velocidade de soldagem de 25mm/min								
Vel. Rotação (RPM)	Temp. de pico média lado de avanço (°C)			Diferença (%)	Temp. de pico média lado de recuo (°C)			Diferença (%)
	F. Cilíndrica	F. Cônico	F. Cilíndrica		F. Cônico			
466**	80,7	82,0	2%	97,3	75,3	-23%		
1176**	100,7	91,9	-9%	95,0	87,5	-8%		
2160**	168,9	115,2	-32%	121,9	94,1	-23%		
**Soldagem feita com velocidade de soldagem de 40mm/min								

Fonte: Autor.

Em relação a maior temperatura de pico média encontrada na soldagem utilizando a ferramenta de pino cilíndrico em relação a soldagem com a ferramenta de pino cônico, pode-se afirmar que esse fato é verdade apenas nos pontos onde os termopares

estavam localizados. Como o policarbonato não é um bom condutor térmico, as temperaturas medidas a uma maior distância da fonte de calor, caso do pino cônico em relação ao pino cilíndrico (Figura 55), são significativamente menores, o que não implica necessariamente que foi alcançada uma menor temperatura na zona de mistura.

Figura 55 – Distância do termopar ao pino durante a soldagem para a ferramenta de pino a) cilíndrico e b) cônico.

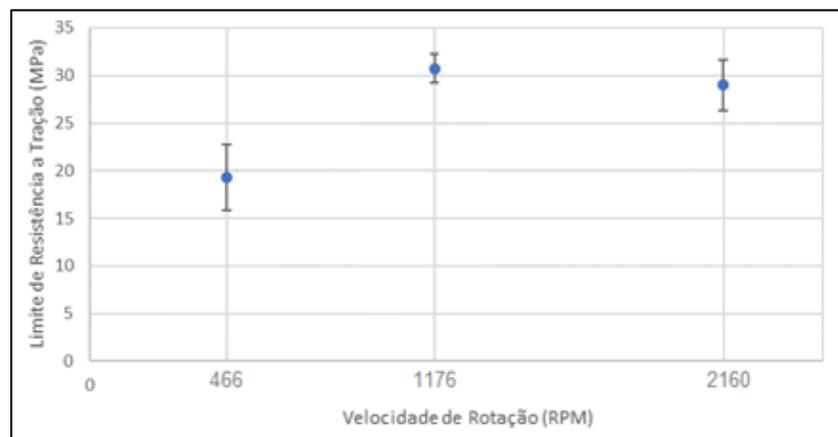


Fonte: Autor.

5.3.3 Influência da velocidade de rotação nas propriedades mecânicas

Assim como feito para a ferramenta cilíndrica, foi obtido o gráfico do limite de resistência a tração médio para as diferentes velocidades de rotação (Figura 56). Esse gráfico indica um maior limite de resistência para a velocidade de rotação de 1176rpm estando esse valor, contudo, contido no intervalo do desvio padrão encontrado para a velocidade de rotação de 2160rpm.

Figura 56 – Limite de resistência a tração médio para as chapas soldadas por FSW com ferramenta de pino cônico, velocidade de soldagem de 25mm.min e diferentes velocidades de rotação.



Fonte: Autor.

Na soldagem com ferramenta cônica, com exceção da velocidade de rotação de 2160RPM, atingiu-se limites de resistência à tração médios maiores do que os encontrados para a ferramenta cilíndrica com os mesmos parâmetros. Essa mudança de comportamento na resistência à tração do material, quando se comparado com o ocorrido com a ferramenta cilíndrica (Tabela 4) pode ser justificado por eventuais falhas na seção transversal do material, maior redução de espessura dessa região, ou pela alteração da ferramenta em si, que ocasiona uma mudança da superfície de contato que há entre material/ferramenta. Por essa diferença de resultados não ser superior ao desvio padrão medido, pode-se dizer que a parametrização ótima independe da escolha da ferramenta, conforme relatado por Hajideh et al. (2017), porém, mais ensaios devem ser feitos para confirmar a hipótese.

Tabela 4 –Limite de Resistencia a Tração Média para soldagem por FSW feita com ferramenta cilíndrica e cônica.

Vel. Rotação (RPM)	LRT (MPa) F. Cilíndrica	Desvio Padrão	LRT (MPa) F. Cônica	Desvio Padrão
2160	30,2	3,6	29,0	2,7
1176	24,6	7,0	30,7	1,5
466	12,1	4,6	19,3	3,4

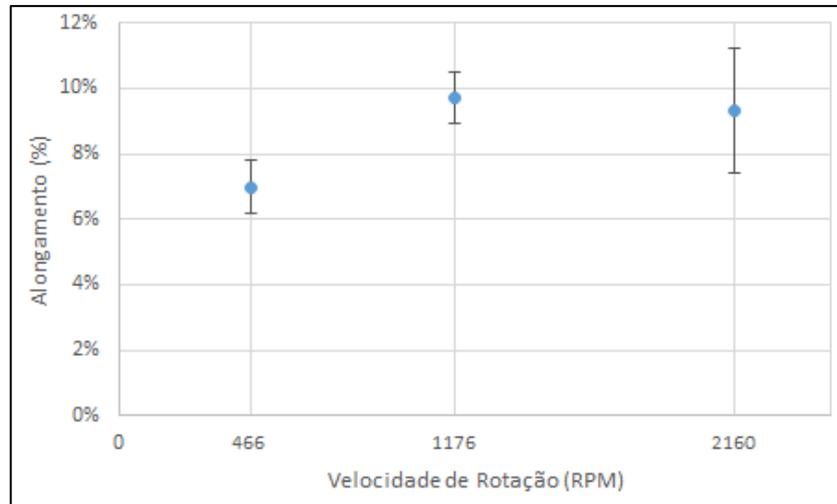
Fonte: Autor.

Mesmo para a velocidade de rotação de 2160rpm, onde a ferramenta cilíndrica alcança uma média de limite de resistência a tração maior do que a ferramenta cônica com a mesma parametrização, a diferença desses valores médios encontrados é menor do que para os demais parâmetros. Além disso, para todos os parâmetros o desvio padrão da ferramenta cilíndrica é maior do que o desvio padrão da ferramenta cônica, indicando uma maior dispersão nos valores obtidos com ela.

O alongamento segue o mesmo comportamento do limite de resistência a tração, ou seja, nota-se um aumento de alongamento até a velocidade de rotação intermediária, e uma queda na velocidade de rotação de 2160rpm conforme indicado no gráfico da Figura 57. Ainda assim, os valores médios para as soldagens a 1176rpm e 2160rpm são próximos.

O alongamento alcançado pelo material soldado utilizando a ferramenta cônica tende a ser maior do que quando usado a ferramenta cilíndrica (Tabela 5), seguindo o mesmo comportamento observado para o limite de resistência a tração.

Figura 57 – Alongamento percentual médio para as chapas soldadas por FSW com ferramenta de pino cônico, velocidade de soldagem de 25mm.min e diferentes velocidades de rotação.



Fonte: Autor.

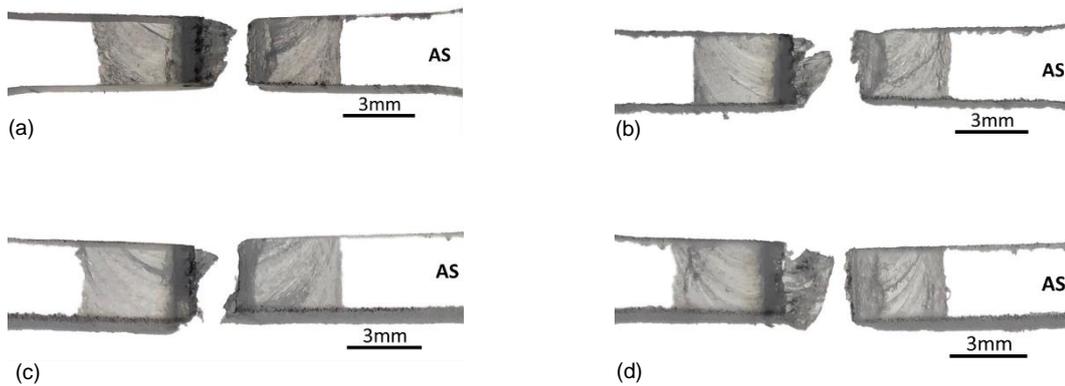
Tabela 5 - Alongamento médio para soldagem por FSW feita com ferramenta cilíndrica e cônica.

Vel. Rotação (RPM)	Alongamento (%) F. cilíndrica	Desvio Padrão	Alongamento (%) F. cônica	Desvio Padrão
466	6%	0,015	7%	0,008
1176	8%	0,028	10%	0,008
2160	10%	0,014	9%	0,019

Fonte: Autor.

De modo similar ao observado nas fraturas de soldas produzidas empregando ferramenta com pino cilíndrico, as que resultaram de operações realizadas com pino cônico se deram majoritariamente no lado de avanço na interface de contato do pino com o material não misturado. As fraturas dos corpos de prova soldados a 466rpm são apresentadas na Figura 58.

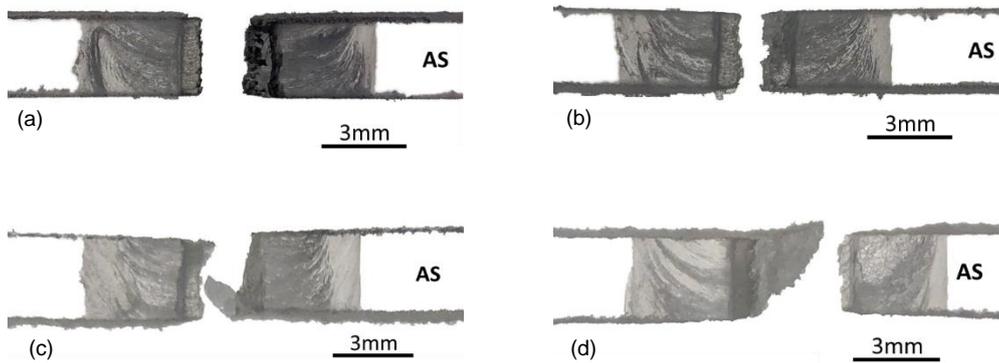
Figura 58 – Fraturas dos corpos de prova de tração na soldagem FSW a 466rpm e 25mm/min para ferramenta de pino cônico.



Fonte: Autor.

Para os corpos de prova soldados a uma velocidade de rotação de 1176rpm (Figura 59), as fraturas também se deram preferencialmente no lado de avanço.

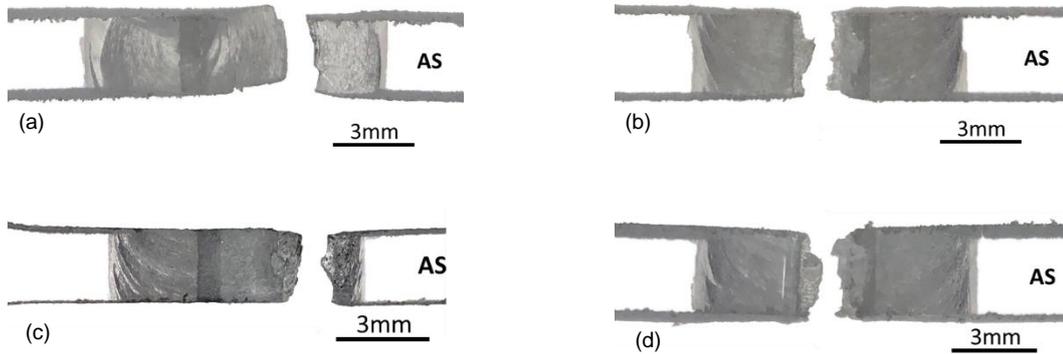
Figura 59 – Fraturas dos corpos de prova de tração na soldagem FSW a 1176rpm e 25mm/min para ferramenta de pino cônico.



Fonte: Autor.

Diferente das fraturas ocorridas nas soldagens a 466rpm e a 1176rpm, a soldagem a 2160rpm teve fraturas iniciadas na interface do *welding nugget* com o material de base, o que denota uma melhor qualidade da raiz. Entretanto, na Figura 60b e Figura 60d, as fraturas se iniciaram no centro da raiz da solda, indicando uma falha pontual nessas regiões.

Figura 60 – Fraturas dos corpos de prova de tração na soldagem FSW a 2160RPM e 25mm/min para ferramenta de pino cônico.



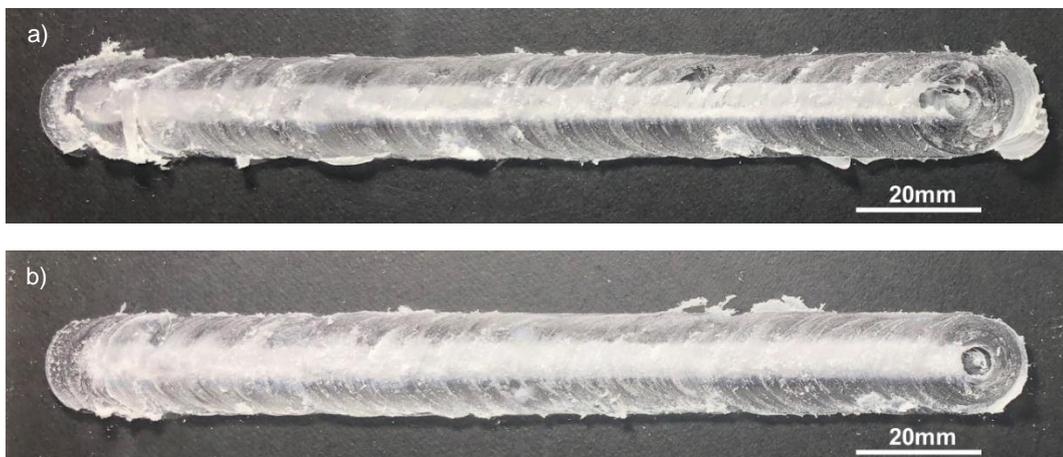
Fonte: Autor.

5.4 Variação da velocidade de soldagem utilizando pino cilíndrico

5.4.1 Efeito da velocidade de soldagem sobre o aspecto visual da solda

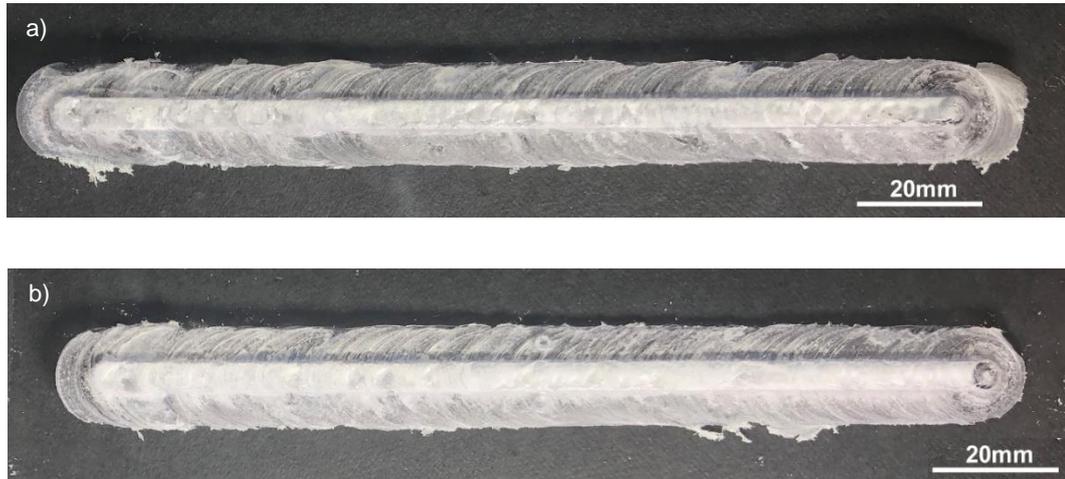
Segundo Bozkurt (2012), a velocidade de rotação é o segundo parâmetro mais significativo de mudança de propriedades de conjuntos soldados por *Friction Stir Welding*. Na Figura 61 é perceptível uma maior homogeneidade no aspecto superficial do cordão de solda feito a 466rpm com o aumento de velocidade de soldagem para 40mm/min quando comparado ao cordão feito a 25mm/min. Mesmo na raiz da solda (Figura 62) o aspecto é mais homogêneo, fazendo parecer que o material possui menos descontinuidades.

Figura 61 – Superfície do policarbonato soldado por FSW com pino cilíndrico em velocidade de rotação de 466rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.



Fonte: Autor.

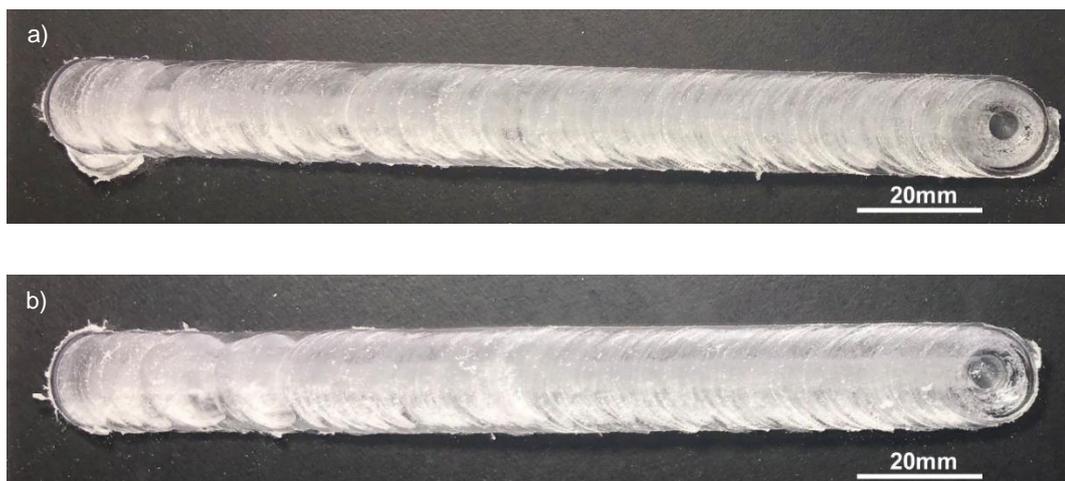
Figura 62 – Verso do policarbonato soldado por FSW com pino cilíndrico em velocidade de rotação de 466rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.



Fonte: Autor.

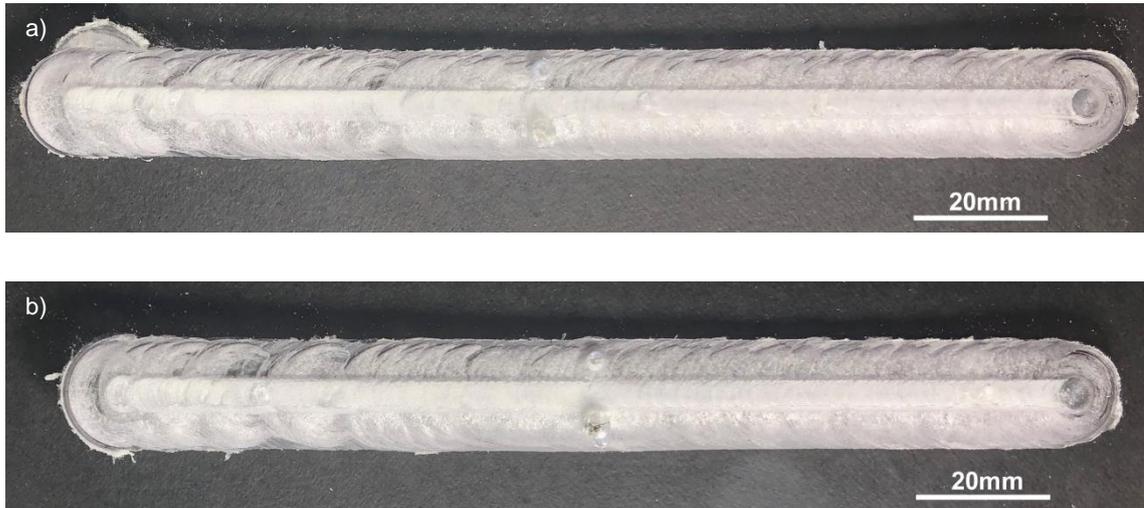
Para velocidade de rotação de 2160rpm, as diferenças visuais resultantes das mudanças de velocidade de deslocamento são praticamente imperceptíveis, tanto na superfície (Figura 63) quanto na raiz (Figura 64). Isso pode ser justificado pelo material ter alcançado em ambos os casos uma temperatura adequada para soldagem, superando em uma área significativa a transição vítrea, o que possibilita uma mistura mais adequada.

Figura 63 – Superfície do policarbonato soldado por FSW com pino cilíndrico em velocidade de rotação de 2160rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.



Fonte: Autor.

Figura 64 – Verso do polycarbonato soldado por FSW com pino cilíndrico em velocidade de rotação de 2160rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.

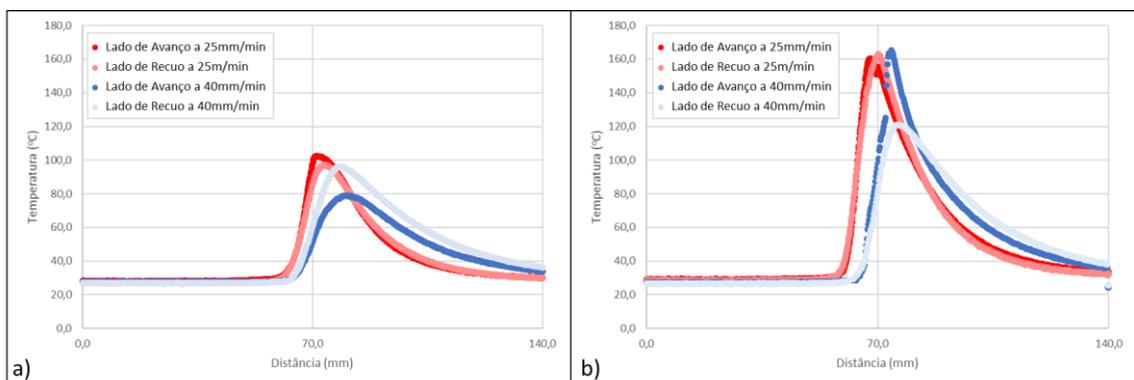


Fonte: Autor.

5.4.2 Influência da velocidade de soldagem no ciclo térmico de soldagem

Comparando-se as temperaturas alcançadas na soldagem FSW em diferentes velocidade de soldagem (Figura 65), nota-se que o perfil das curvas na velocidade de soldagem de 40mm/min está um pouco diferente do perfil encontrado para a soldagem à velocidade de soldagem de 25mm/min, o que ocorre devido a essa maior velocidade, que faz com que menor tempo seja dado, tanto no aquecimento do material, quanto no seu resfriamento, para uma mesma distância percorrida pela ferramenta.

Figura 65 – Ciclo Térmico para soldagem FSW utilizando ferramenta cilíndrica e diferentes velocidades de soldagem, para velocidades de rotação de a) 466rpm e b) 2160rpm.



Fonte: Autor.

Para os casos de alteração de velocidade de soldagem, as diferenças de temperatura são significativas, porém, inversamente proporcionais. Conforme consta na Tabela 6, majoritariamente, com o aumento da velocidade de soldagem, houve diminuição da

temperatura alcançada, com exceção do lado de avanço na soldagem a 2160rpm Tal fato pode ter ocorrido por uma descentralização da ferramenta no momento em que ela passou pelos termopares, pois, na mesma velocidade de rotação, para o lado de recuo, o aumento da velocidade de soldagem resultou em um decréscimo de 25% na temperatura.

Tabela 6 – Temperaturas de pico médias para soldagem FSW com ferramenta cilíndrica e diferentes velocidades de soldagem.

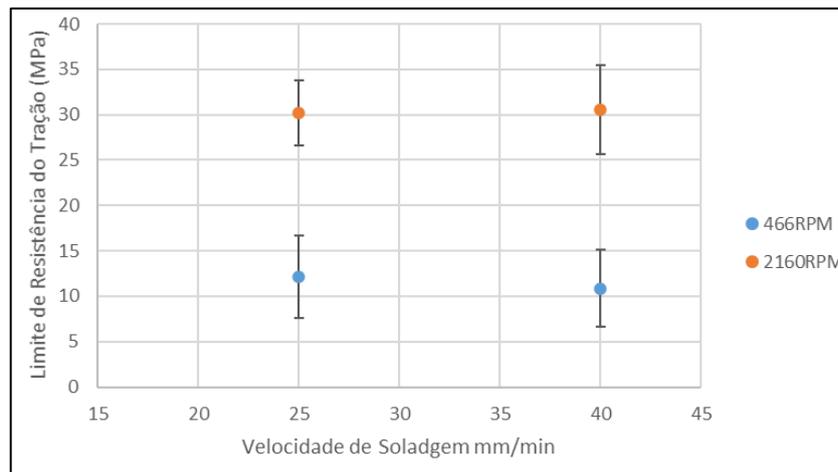
Vel. Rotação (RPM)	Temp. de pico média lado de avanço (°C)		Diferença (%)	Temp. de pico média lado de recuo (°C)		Diferença (%)
	a 25mm/min	a 40mm/min		a 25mm/min	a 40mm/min	
466	106,3	80,7	-24%	99,5	97,3	-2%
1176	131,6	100,7	-23%	140,2	95,0	-32%
2160	160,5	168,9	5%	163,0	121,9	-25%

Fonte: Autor.

5.4.3 Influência da velocidade de soldagem nas propriedades mecânicas

Em relação aos limites de resistência à tração obtidos variando a velocidade de soldagem usadas, os resultados são inconclusivos, pois praticamente não foram observadas alterações significativas, conforme apresentado no gráfico da Figura 66.

Figura 66 – Gráfico da Variação do Limite de Resistência a Tração Médio com a mudança de velocidade de soldagem para soldagem FSW com pino cilíndrico.



Fonte: Autor.

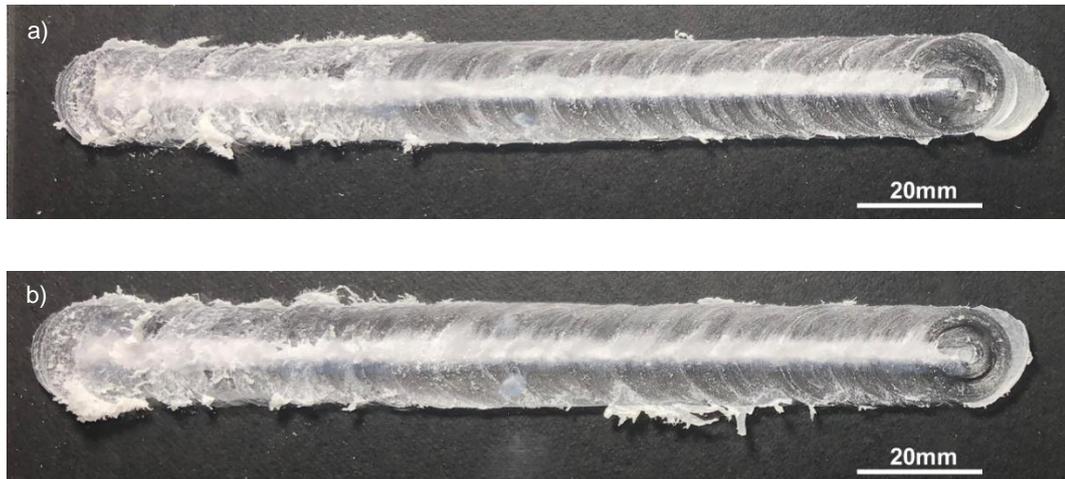
5.5 Variação de velocidade de soldagem utilizando pino cônico

5.5.1 Efeito da velocidade de soldagem sobre o aspecto visual da solda

Para a soldagem a 466RPM com a ferramenta cônica, tanto a superfície da solda (Figura 67) quanto a raiz da mesma (Figura 68) não foram observadas diferenças

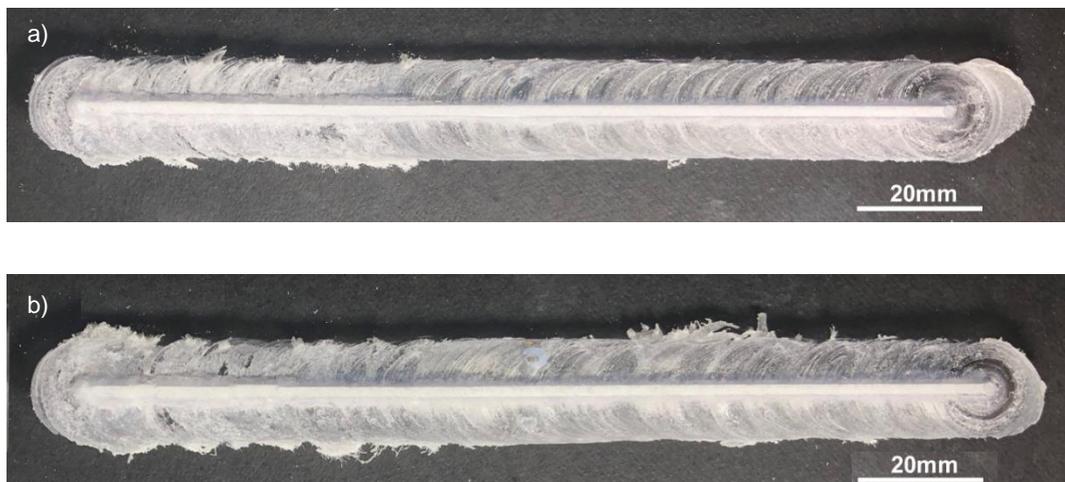
significativas a serem pontuadas com o aumento da velocidade de soldagem. Ambas têm início de cordão com aspecto frágil, aparentando uma mistura mal executada, mas há melhora do acabamento com o avanço da soldagem.

Figura 67 – Superfície do policarbonato soldado por FSW com pino cônico em velocidade de rotação de 466rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.



Fonte: Autor.

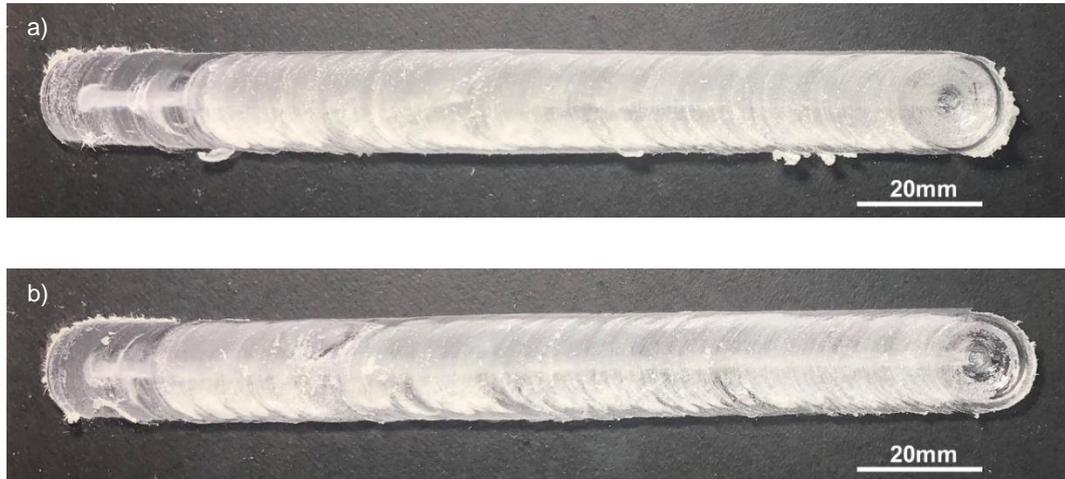
Figura 68 – Verso do policarbonato soldado por FSW com pino cônico em velocidade de rotação de 466rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.



Fonte: Autor.

Para velocidade de rotação de 2160rpm, a soldagem feita a uma velocidade mais baixa (Figura 69a) apresenta um cordão mais homogêneo do que a soldagem feita com uma velocidade de soldagem alta (Figura 69b). Ainda assim, as similaridades são grandes, como a transparência do início do cordão, que pode ser verificada também no verso da chapa (Figura 70).

Figura 69 – Superfície do policarbonato soldado por FSW com pino cônico em velocidade de rotação de 466rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.



Fonte: Autor.

Figura 70 – Verso do policarbonato soldado por FSW com pino cônico em velocidade de rotação de 466rpm e velocidade de soldagem de a) 25mm/min e b) 40mm/min.

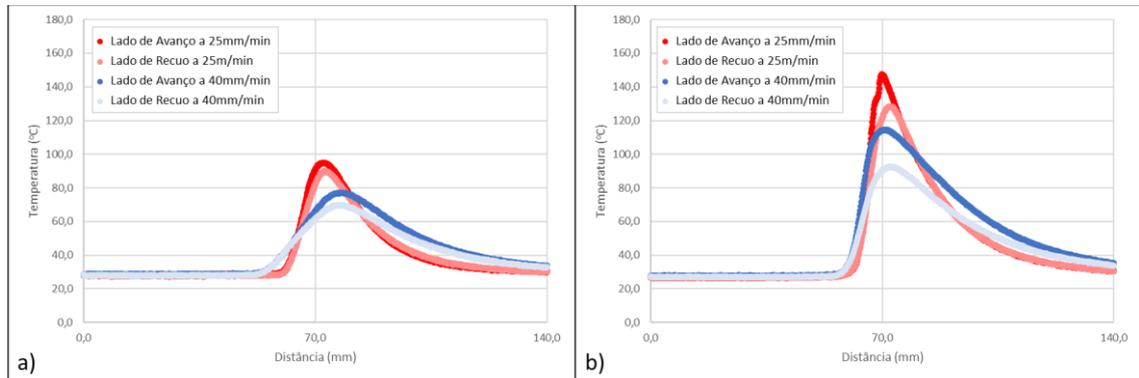


Fonte: Autor.

5.5.2 Influência da velocidade de soldagem no ciclo térmico de soldagem

Na soldagem utilizando a ferramenta de pino cônico, comparando-se as temperaturas alcançadas em relação à posição da ferramenta (Figura 71), nota-se também um perfil mais largo das curvas na velocidade de soldagem de 40mm/min em relação à velocidade de soldagem de 25mm/min. Assim como na soldagem realizada com a ferramenta de pino cilíndrico, essa mudança de perfil se justifica pela maior velocidade, que faz com que menos tempo seja dado tanto no aquecimento, quanto no resfriamento do material para uma mesma distância percorrida pela ferramenta.

Figura 71 – Ciclo Térmico para soldagem FSW utilizando ferramenta cônica e diferentes velocidades de soldagem, para velocidades de rotação de a) 466rpm e b) 2160rpm.



Fonte: Autor.

Ao se comparar as diferenças na temperatura de pico encontradas para as diferentes velocidades de soldagem, os valores são mais consistentes do que os encontrados para a soldagem realizado com a ferramenta de pino cilíndrico. Na Tabela 7, para todos os parâmetros, nota-se que o aumento de velocidade de soldagem resultou num decréscimo significativo da temperatura medida no termopar.

Tabela 7 – Temperaturas de pico médias para soldagem FSW com ferramenta cônica e diferentes velocidades de soldagem.

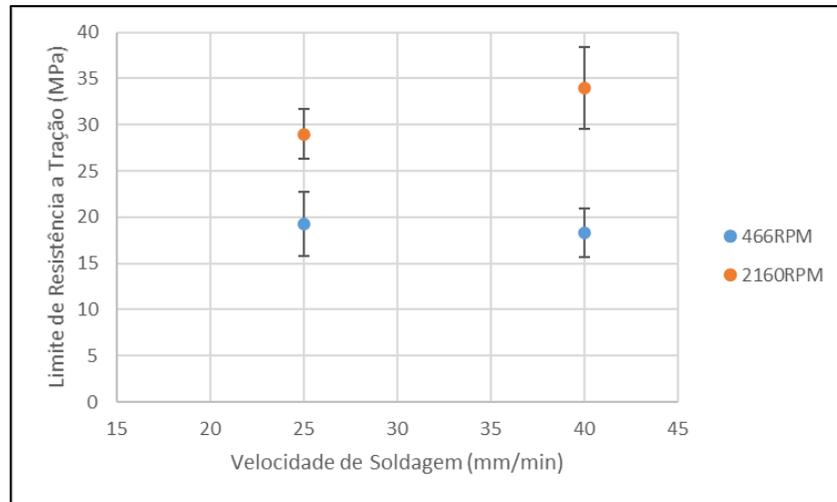
Vel. Rotação (RPM)	Temp. de pico média lado de avanço (°C) a 25mm/min	Temp. de pico média lado de avanço (°C) a 40mm/min	Diferença (%)	Temp. de pico média lado de recuo (°C) a 25mm/min	Temp. de pico média lado de recuo (°C) a 40mm/min	Diferença (%)
466	95,1	82,0	-14%	90,1	75,3	-17%
1176	120,0	91,9	-23%	117,0	87,5	-25%
2160	148,5	115,2	-22%	129,5	94,1	-27%

Fonte: Autor.

5.5.3 Influência da velocidade de soldagem sobre as propriedades mecânicas

Ao avaliar o limite de resistência à tração obtido para soldas produzidas empregando diferentes velocidades de soldagem nota-se um aumento significativo com o acréscimo da velocidade de soldagem para a velocidade de rotação de 2160rpm, conforme indicado no gráfico da Figura 72. Conforme a bibliografia, tanto o aumento de velocidade de rotação, quanto a diminuição da velocidade de soldagem, atuam aumentando a temperatura alcançada no material. Sendo assim, uma justificativa para a piora de resistência à tração com a menor velocidade de rotação seria um sobreaquecimento do policarbonato, gerando perda de material por degradação.

Figura 72 – Gráfico da Variação do Limite de Resistência a Tração Médio com a mudança de velocidade de soldagem para soldagem FSW com pino cônico.

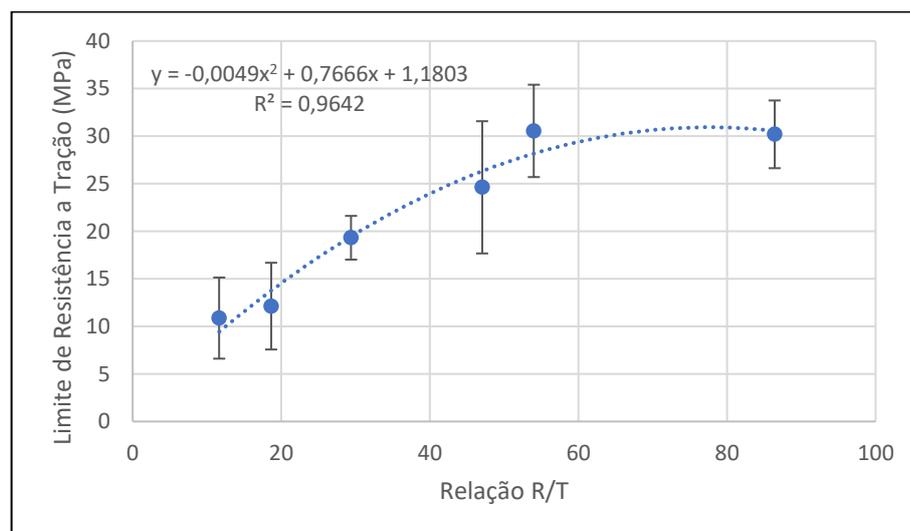


Fonte: Autor.

5.6 Variação da Relação R/T

A razão R/T é utilizada como uma forma de encontrar uma melhor correlação entre Velocidade de Rotação e Velocidade de Soldagem para a soldagem FSW de um determinado material. Para a soldagem com a ferramenta cilíndrica foi plotado o gráfico da Figura 73, correlacionando a Razão R/T com o limite de resistência a tração, de tal modo a determinar a relação ótima entre os valores.

Figura 73 – Limite de resistência a tração em função da Razão R/T na soldagem por FSW com ferramenta cilíndrica.

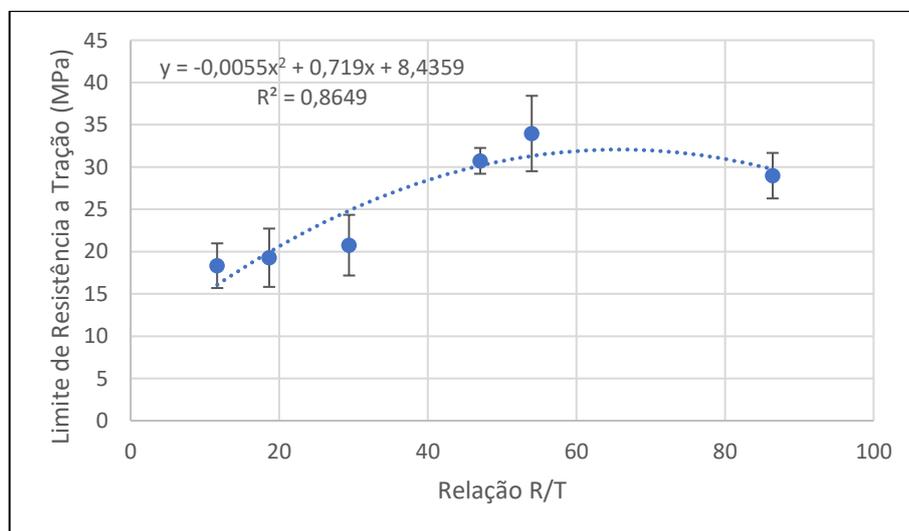


Fonte: Autor.

A partir do gráfico foi possível gerar um polinômio de segundo grau com o coeficiente de determinação de 0,96, indicando uma equação que explica de forma satisfatória os pontos levantados. Com base nessa equação, temos que a relação R/T que obteria o melhor resultado de limite de resistência a tração para a ferramenta cilíndrica seria de 78,2, ou seja, nos parâmetros possíveis do equipamento utilizado, para uma velocidade de rotação de 2160RPM, a velocidade de soldagem ideal teria que ser 27,61mm/min.

A mesma análise foi feita com a ferramenta cônica, levantando-se o gráfico da Figura 74. Nesse caso, o polinômio de segundo grau gerado tem um coeficiente de determinação de 0,86, sugerindo ser essa uma equação satisfatória na descrição do comportamento. Para ferramenta com tal geometria de pino, a Razão R/T que resultaria no melhor limite de resistência a tração para essa soldagem seria de 65,4. Assim, para uma velocidade de rotação de 2160RPM, a velocidade de soldagem ideal seria de 33,0mm/min, possibilitando um ganho de produtividade na soldagem desse material.

Figura 74 - Limite de resistência a tração e função da Razão R/T na soldagem por FSW com ferramenta cônica.



Fonte: Autor.

Os dados compilados na razão R/T possibilitaram a predição dos parâmetros ótimos da soldagem FSW em policarbonato, considerando o limite de resistência à tração médio. Esse fator pode ser usado como referência para o uso do processo em diferentes aplicações, dado uma curva única para cada material. Em relação às diferentes ferramentas, recomenda-se o uso de curvas únicas também, porém, não é

possível afirmar que há diferença nessa parametrização ótima com as diferentes ferramentas, pois as propriedades em ambos os casos se encontram dentro do desvio padrão medido, sendo necessário mais ensaios para confirmar uma possível diferença de propriedade média alcançada utilizando diferentes ferramentas.

6. CONCLUSÃO

A soldagem do policarbonato por *Friction Stir Welding* é viável, e o equipamento montado atende a esse propósito, possibilitando uma soldagem com alta produtividade. Em relação ao processo é possível concluir que:

- O aumento de velocidade de rotação produziu um aumento significativo de temperatura alcançada na peça, sendo a causa da maior homogeneidade e da maior área de mistura encontrada com o aumento desse parâmetro.
- A ferramenta de pino cônico, no geral, alcançou melhores resultados de limite de resistência à tração, quando se comparado com a ferramenta de pino cilíndrico, o que se deve pelo formato do pino em si, que propicia uma mudança na superfície de contato com o substrato aliado a um menor volume de material afetado pela inserção da ferramenta.
- O aumento da velocidade de soldagem ocasionou uma diminuição da temperatura de pico atingida pela chapa.
- A razão R/T possibilitou a predição dos parâmetros para otimizar o limite de resistência à tração da soldagem FSW em policarbonato para as ferramentas utilizadas.
- Para a ferramenta de pino cilíndrico, a razão R/T ótima foi de 78,2, já para a ferramenta de pino cônico foi de 65,5. Apesar dessa diferença, o erro das medidas é significativo, necessitando de mais ensaios para confirmar que cada ferramenta tenha uma parametrização ótima única para a soldagem FSW.
- O melhor limite de resistência à tração médio encontrado foi de 33,96MPa para a ferramenta de pino cônico a uma velocidade de rotação de 2160rpm e velocidade de soldagem de 40mm/min, sendo esse valor 54% do encontrado para o material recebido. Esse resultado é promissor para a aplicação desse processo na soldagem de policarbonato.

7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Essa dissertação foi o início de uma possível linha de pesquisa. Vários aspectos da soldagem de *Friction Stir Welding* em polímeros ainda precisam ser avaliados, tais como:

- Propriedades Mecânicas da soldagem FSW em juntas de topo em comparação com outros métodos de soldagem de polímeros, como *Hot Gas*;
- Estudo da Degradação UV em chapas de policarbonato soldadas pelo processo;
- Levantamento das temperaturas alcançadas ao longo da chapa soldada;
- Fabricar ferramentas mais complexas para o processo, com rosca ou chanfro, e avaliar a diferença de mistura e propriedades alcançadas.
- Análise da evolução da temperatura na ferramenta, e avaliação do uso de tempo de pré-aquecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, J.S.; ALI, D.; JARRAR, F.; DEVECI, S. A study of friction stir welding of high density polyethylene. 2018.

ARICI, A.; SINMAZ, T. Effects of double passes of the tool on friction stir welding of polyethylene. **J. Mater. Sci.** 2005; 40:3313–6.

ARICI, A.; SELALAE, S. Effects of tool tilt angle on tensile strength and fracture location of friction stir welding of polyethylene. **Science and Technology of Welding and Joining.** 2007;12(6):536-539.

ASTM D3935-15, Standard Classification System and Basis for Specification for Polycarbonate (PC) Unfilled and Reinforced Material, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM D-638 – 14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

AYDIN, M. Effects of welding parameters and pre-heating on the friction stir welding of UHMW-Polyethylene. **Polymer-Plastics Technology and Engineering.** 2010;49(6):595-601.

BAGHERI, A.; AZDAST, T.; DONIAVI, A. An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets. **Mater. Des.** 2013; 43:402–9.

BANJARE, P.N.; SAHLOT, P.; ARORA, A. An assisted heating tool design for FSW of thermoplastics. **Journal of Materials Processing Technology.** 2017;239:83-91.

BOZ, M.; KURT, A. The influence of stirrer geometry on bonding and mechanical properties in friction stir welding process. **Materials and Design.** 2004;25:343-347.

BOZKURT, Y. The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets. **Mater. Des.** 2012; 35:440–5.

CALLISTER, W.D.Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** Rio De Janeiro: LTC; 2008.

CASTRO, M.M. **Estudo da influência da adição de arame frio no processo de soldagem ao arco submerso com dois arames energizados: Aspectos operacionais e metalúrgicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – UFMG. Minas Gerais. 2017.

CHANDA, C.; ROY, S.K. **Plastics Technology Handbook.** Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC; 2006.

CHAO, Y.J.; QI, X.; TANG, W. Heat Transfer in Friction Stir Welding – Experimental and Numerical Studies. **Journal of Manufacturing and Engineering** 2003; 125: 138-145.

COSTA, F.L. Caracterização de Policarbonato com o Foco na Utilização em Documentos de Identificação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – UFRJ. Rio de Janeiro. 2013

DERAZKOLA, H.A.; SIMCHI, A. Experimental and thermomechanical analysis of tool pin profile on the friction stir welding of poly(methyl methacrylate) sheets. **Journal of Manufacturing Processes.** 2018;34:412-423.

DERZKOLA H.A.; SIMCHI A.; LAMBIASE F. Friction stir welding of polycarbonate lap joints: Relationship between processing parameters and mechanical properties. **Polymer Testing.** 2019

DERAZKOLA H.A.; SIMCHI A. Experimental and thermomechanical analysis of friction stir welding of poly(methyl methacrylate) sheets. **Science and Technology of Welding and Joining.** 2017:1-10.

ESLAMI, S.; RAMOS, T.; TAVARES, P.J.; MOREIRA, P.M.G.P. Shoulder design developments for FSW lap joints of dissimilar polymers. **J. Manuf. Process.** 2015; 20:15–23.

ESLAMI, S.; FIGUEIREDO, M.A.V.; TAVARES, P.J.; MOREIRA, P.M.G.P. Parameter optimisation of friction stir welded dissimilar polymers joints. **Int. J Adv Manuf Technol.** 2017; <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0043-5>.

GAO, J.; Li, C.; SHILPAKAR, U.; SHEN, Y. Improvements of mechanical properties in dissimilar joints of HDPE and ABS via carbon nanotubes during friction stir welding process. **Mater. Des.** 2015; 86:289-96.

HAJIDEH, R.M.; FARAHANI M.; ALAVI, S.A.D.; RAMEZANI, M.N. Investigation on the effects of tool geometry on the microstructure and the mechanical properties of dissimilar friction stir welded polyethylene and polypropylene sheets. **J. Manuf. Process.** 2017; 26:269–79.

HAQUE, M.S.; SIDDIQUI, M.A. Plastic Welding: Important Facts and Developments. **American Journal of Mechanical and Industrial Engineering.** Vol. 1, 2016, 15-19.

HOSEINLAGHAB, S.; MIRJAVADI, S.S.; SADEGHIAN, N.; JALILI, I.; AZARBARMAS, M.; GIVI, M.K.B. Influences of welding parameters on the quality and creep properties of friction stir welded polyethylene plates. **Mater. Des.** 2015; 67:369–378.

JAIGANESH, V.; MARUTHU, B.; GOPINATH, E. Optimization of process parameters on friction stir welding of high density polypropylene plate. **Procedia Eng.** 2014; 97:1957–65.

KAUSCH H.H.; TIRRELL M. Polymer Interdiffusion. **Annu. Rev. Mater. Sci.**1989;19:341-77.

KISS, Z.; CZIGÁNY, T. Effect of welding parameters on the heat affected zone and the mechanical properties of friction stir welded poly(ethylene-terephthalateglycol). **J. Appl. Polym. Sci.** 2012; 125:2231–8.

KORDESTANI, F.; GHASEMI, F.A.; ARAB, N.B.M. Effect of pin geometry on the mechanical strength of friction-stir-welded polypropylene composite plates. **Mech. Compos. Mater.** 2017; 53(4):525–32.

MARQUES, P.V., MODENESI, P.J., BRACARENSE, A.Q. **Soldagem - fundamentos e tecnologia.** Editora UFMG, 2011. 362 p.

MENDES, N.; LOUREIRO, A.; MARTINS, C.; NETO, P.; PIRES, J.N. Effect of friction stir welding parameters on morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene plate welds, **Mater. Des.** 2014; 58:457–464.

MENDES N.; LOUREIRO A.; MARTINS C.; NETO P.; PIRES J.N. Morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene welds performed by robotic friction stir welding. **Materials and Design**. 2014;64:81-90.

MEHTA, M.; ARORA, A. DE, A.; DEBROY, T. Tool geometry for friction stir welding – optimum shoulder diameter. **Metall. Mater. Trans. A** 2011; 42:2716–22.

PANNEERSELVAM, K.; LENIN, K. Joining of nylon 6 plate by friction stir welding process using threaded pin profile. **Mater. Des.** 2014; 53:302–7.

PAYGANEH, G.H.; ARAB, N.B.; ASL, Y.D.; GHASEMI F.A.; BOROUJENI S. Effects of friction stir welding process parameters on appearance and strength of polypropylene composite welds. **Int. J. Phys. Sci.** 2011; 6(19):4595–601.

SADEGHIAN, N.; GIVI, M.K.B. Experimental optimization of the mechanical properties of friction-stir welded Acrylonitrile Butadiene Styrene sheets. **Mater. Design**. 2015; 67:145–53.

SAHU S.K.; MISHRA D.; MAHTO R.P.; SHARMA V.M.; PAL S.K.; PAL K.; BANERJEE S.; DASH P. Friction stir welding of polypropylene sheet. **Engineering Science and Technology, an International Journal**. 2018;21:245-254.

SHAZLY, M.; AHMED, M.M.Z.; EL-RAEY, M. Friction stir welding of polycarbonate sheets. **In Characterization of Minerals, Metals, and Materials**. 2014; 555–563.

SINGH, R.; KUMAR, V.; FEO, L.; FRATERNALI, F. Experimental investigations for mechanical and metallurgical properties of friction stir welded recycled dissimilar polymer materials with metal powder reinforcement. **Composites Part B**. 2016; 103:90–7.

STRAND, S.R. **Effects of Friction Stir Welding on Polymer Microstructure**. Dissertação, Brigham Young University, USA, 2004.

SONG, M.; KOVACEVIC, R. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 2003; 43:605–615.

SOUZA, G.S. **Influência da Geometria Da Ferramenta na Soldagem Da Liga De Alumínio 5052 pelo Processo Friction Stir Welding**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2010.

THOMAS, W.M., 1991. Friction stir welding, International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8, December 1991, U.S Patent No. 5,460,317.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações**. São Paulo: Artliber; 2005.

ZAFAR A.; AWANG M.; KHAN S.R.; EMAMIAN S. Investigating friction stir welding on thick nylon 6 plates. **Welding Journal**. 2016;95:210-218.

ZHANG, Y.N.; CAO, X.; LAROSE, S.; WANJARA, P. Review of tools for friction stir welding and processing. **Can. Metall. Quart.** 2012; 51, 250–261.