

CIP – Catalogação na Publicação

Borges, Ricardo Coleoni

Avaliação dos parâmetros processuais na adesão e no comportamento mecânico em soldagem por atrito rotacional de polipropileno e polietileno de alta densidade / Ricardo Coleoni Borges. -- 2019.

85 f.

Orientador: Daniela Lupinacci Villanova

Coorientador: Edson Francisquetti

Dissertação (Mestrado) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do RS, Campus Farroupilha, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais, Farroupilha, BR-RS, 2019.

1. Polímeros. 2. Polipropileno. 3. Polietileno.
4. Soldagem. I. Villanova, Daniela Lupinacci, orient.
II. Francisquetti, Edson, coorient. III. Título.

CDU 678.7

Elaborada pela Bibliotecária Rejane Cristina Job CRB-10/1639

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS PROCESSUAIS NA ADESÃO E NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO EM SOLDAGEM POR ATRITO ROTACIONAL
DE POLIPROPILENO E POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE**

RICARDO COLEONI BORGES

Farroupilha
2018

RICARDO COLEONI BORGES

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS PROCESSUAIS NA ADESÃO E NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO EM SOLDAGEM POR ATRITO ROTACIONAL
DE POLIPROPILENO E POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais para obtenção do grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: II - Tecnologia da Transformação de
Materiais

Orientadora: Prof. Dra. Daniela Lupinacci Villanova

Coorientador: Prof. Dr. Edson Francisquetti

FARROUPILHA

2018

RICARDO COLEONI BORGES

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS PROCESSUAIS NA ADESÃO E NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO EM SOLDAGEM POR ATRITO ROTACIONAL DE
POLIPROPILENO E POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE**

Trabalho Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Luis Catto

Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES

Profa. Dra. Melissa Dietrich da Rosa

Instituto Federal do Rio Grande do Sul - IFRS

Prof. Dr. Douglas Alexandre Simon

Instituto Federal do Rio Grande do Sul - IFRS

Orientador: Profa. Dra. Daniela Lupinacci Villanova

Instituto Federal do Rio Grande do Sul - IFRS

Apresentado e aprovado em: 21 de Novembro de 2018.

Local da defesa: IFRS – Campus Farroupilha

RESUMO

Devido ao seu balanço entre leveza, versatilidade e baixo custo, Polipropileno (PP) e Polietileno de Alta Densidade (PEAD) são dois dos principais polímeros com aplicação industrial no Brasil. Para sua utilização no mercado de utilidades térmicas, a união de diversos componentes é geralmente necessária. Entre as técnicas de união disponíveis, destacam-se processos de soldagem polimérica, a qual utiliza calor para fundir ou amolecer a superfície de união, propiciando difusão intermolecular e emaranhamento das cadeias, gerando uma junta de alta qualidade. O presente trabalho avaliou a influência dos parâmetros de soldagem na resistência mecânica de juntas em polipropileno e polietileno de alta densidade em soldagem por atrito rotacional. Para este fim, foram confeccionados corpos de prova com perfil de soldagem/centralização adaptado da norma ASTM D638-02:2014, os quais foram soldados em um torno com controlador numérico computadorizado (CNC), através da variação dos parâmetros velocidade de rotação (RPM) e profundidade de avanço, combinando PP com PP, PEAD com PEAD e PP com PEAD. Os materiais foram caracterizados por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), ensaios de tração, Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e avaliados através de análise estatística. Os resultados obtidos mostraram que, para soldagem de PEAD + PEAD e PP + PEAD, o processo escolhido não permitiu controle necessário dos fatores relevantes para obtenção de solda, de forma que não obteve-se união. Já nos resultados obtidos para PP+PP, observou-se uma relação entre o fator RPM e o fator profundidade de avanço, sugerindo que uniões mais resistentes são obtidas utilizando altas RPM com menor profundidade de avanço, propiciando uma solda com resistência máxima a tração de até 81,2% do material base.

Palavras-chave: Polipropileno. Polietileno de Alta Densidade. Soldagem. Atrito Rotacional.

ABSTRACT

Polypropylene and polyethylene of high density are two of the main polymers with industrial applications in Brazil, given to their balance between lightness, versatility and low cost. For using at the thermal utilities market, the join between multiple parts is usually necessary. Among all the joining technics available, the polymeric welding technics stand outs. In this technic, heat is used to fuse or to melt the joining surface, allowing intermolecular diffusion and chain entanglement, creating a high quality join. The current paper evaluate the influence of welding parameters at the mechanical resistance of polypropylene and polyethylene of high density by the spin welding technic. To do this, it were produced body proofs with welding/centering profiles, adapted from the ASTM D638-02:204 norm, which were welded at a CNC lathe, using high and low RPM and welding depth parameters, combining PP with PP, PEAD with PEAD and PP with PEAD. The materials were evaluated by Fourier-Transform Infrared Spectroscopy and the results obtained were tested by tensile strength test and differential exploratory calorimetry and evaluated by statistic analysis. The results showed that, for PEAD+PEAD and PP+PEAD, the chosen process didn't allow the necessary control of the factors to obtain a good weld. For the results with PP+PP, it showed that there is a connection between the RPM and welding depth parameters, suggesting that stronger joins are obtained using higher RPM's with lower welding depth, producing a good join, with tensile strength resistance of 81.2% of the original material.

Keywords: *Pollypropylene. High Density Polyethylene. Welding. Spin Welding.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	01
1.1 Justificativa e problema	03
1.2 Objetivos	03
1.2.1 Objetivo geral	03
1.2.2 Objetivos específicos	03
1.3 Abrangência e limites do trabalho.....	04
2 REVISÃO DA LITERATURA	06
2.1 Polipropileno	06
2.2 Polietileno de Alta Densidade	08
2.3 Processos de União de Polímeros	10
2.4 Teoria da Soldagem de Polímeros	15
2.5 Soldagem por Fricção	18
2.6 Soldagem por Atrito Rotacional	18
3 MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 Equipamentos Utilizados	26
3.2 Materiais Utilizados	26
3.3 Corpo de Prova	27
3.4 Método Utilizado	31
3.5 Pré-Testes	32
3.5.1 Pré-Testes em Polipropileno (PP)	32
3.5.2 Pré-Testes em Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	35
3.5.3 Pré-Testes Polipropileno com Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	36
3.6 Planejamento Experimental e Estatístico	38
3.7 Caracterizações	39
3.7.1 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	39
3.7.2 Resistência à tração	39
3.7.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	40
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	42
4.1 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	42
4.2 Ensaio de resistência a tração	43
4.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	50
5 CONCLUSÃO	61

5.1 Contribuição do trabalho	62
5.2 Possibilidades de trabalhos futuros	62
REFERÊNCIAS	63
APÊNDICES	67

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Brasileira de Indústrias do Plástico (ABIPLAST, 2015), dentre os principais tipos de resina disponíveis atualmente para aplicações industriais, destacam-se o polipropileno (PP) e o polietileno de alta densidade (PEAD), ocupando respectivamente o primeiro e o terceiro lugar no ranking de polímeros mais processados no Brasil.

Tais materiais também são amplamente utilizados no setor de utilidades térmicas – produtos como garrafas térmicas, caixas térmicas e outros itens para conservação de alimentos - propiciando leveza, versatilidade e redução de custos, comparativamente a similares fabricados em metais ou outros materiais não poliméricos. Para a empresa Soprano, fabricante de utilidades térmicas interessada neste estudo, polipropileno e polietileno de alta densidade representam os dois principais polímeros em consumo.

Para sua fabricação, a união de diversos componentes é comumente necessária, devido às restrições técnicas e econômicas em produzir peças de tamanho e complexidade excessiva para a moldagem em um único processo e pela necessidade em unir materiais dissimilares em uma mesma peça. Entre os métodos usuais de união de polímeros, destacam-se os processos de soldagem polimérica, pois, diferentemente das técnicas de união mecânica e por adesivos, em soldagem, o calor utilizado para fundir ou amolecer o polímero na região da interface propicia difusão intermolecular e emaranhamento das cadeias, resultando em uma alta resistência da junta (TROUGHTON, 2008).

Os processos de soldagem são comumente categorizados e identificados pelo método de aquecimento usado, sendo divididos em duas categorias gerais: aquecimento interno e aquecimento externo. De acordo com Gonçalves (1999, apud WISE, 1999), processos com aquecimento mecânico interno apresentam diversas vantagens, entre as quais destacam-se o baixo consumo de energia (uma vez que o calor necessário para a soldagem é proveniente do atrito gerado entre os componentes), curtos tempos de soldagem, altas taxas de produção e juntas com bom desempenho mecânico.

Existem quatro variações deste processo, em razão de seu movimento mecânico: linear, orbital, angular ou rotacional. Dentre estas variações, destaca-se a técnica por fricção rotacional, por propiciar uma boa distribuição de energia na superfície de junta, ciclos curtos de produção, baixo investimento inicial, versatilidade e baixa variação do processo, devido a geometria das peças (GREWELL e BENATAR, 2007).

Na aplicação de soldagem por atrito rotacional as peças a serem unidas são friccionadas sob pressão por rotação axial em um movimento circular unidirecional. Por esta razão, somente peças com simetria axial podem ser soldadas por esta técnica, o que é característico em produtos de utilidade térmica, devido ao uso de elementos de rosca para vazão dos líquidos em garrafas térmicas e ao perfil cilíndrico presente em ampolas de vidro (Fracos de Dewar) utilizadas como elemento isolante no mesmo produto. Ambos os fatores são limitantes a geometrias com simetria axial no projeto de tais peças.

Com isso, o estudo do processo de soldagem por atrito rotacional, bem como os materiais utilizados nesta pesquisa são de grande interesse para a indústria de processamento de polímeros e de utilidades térmicas, devido a suas propriedades desejadas de leveza, resistência mecânica e processabilidade frente a outros processos de união. Assim, este trabalho tem o intuito de avaliar a influência dos parâmetros processuais na adesão e comportamento mecânico de PP e PEAD utilizando esta técnica de soldagem, auxiliando na construção deste conhecimento a fim de implementar tal tecnologia na indústria.

1.1 Justificativa e problema

Justifica-se o desenvolvimento deste trabalho devido à necessidade em encontrar alternativas ao uso de encaixes mecânicos como métodos de união para o setor de utilidades térmicas, os quais apresentam baixo desempenho mecânico devido a concentração de tensões gerada na região entorno do fixador, podendo levar a formação de trincas e falhas (GONÇALVES, 2015).

Ainda, a partir da análise do termo *spin welding* como tema principal em artigos publicados nas últimas décadas, disponíveis nos principais sistemas de busca acadêmicas (*science direct*, periódicos capes, *google scholar*, *entre outros*), é possível constatar a baixa quantidade de estudos aplicados com foco no tema, sendo os mesmos concentrados em um reduzido número de autores-chave, desenvolvidos anteriormente aos anos 2000 ou apresentam caráter teórico, dificultando sua reprodutividade para a indústria (BORGES ET AL., 2018). Além disso, não apresentam estudos a respeito da resistência mecânica resultante do processo, fator de importância na substituição a encaixes mecânicos.

1.2 Objetivos

Neste tópico são apresentados os objetivos do projeto, os quais estão subdivididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a influência dos parâmetros de soldagem na resistência mecânica de juntas soldadas em polipropileno e polietileno de alta densidade pela técnica de soldagem por atrito rotacional.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atender o objetivo proposto foi necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Conformar os corpos de prova em polipropileno (PP) e o polietileno de alta densidade (PEAD), adaptados da norma ASTM D638;

- Realizar a soldagem por atrito rotacional nos corpos de prova, combinando PP e PP, PEAD e PEAD, PP e PEAD, variando os parâmetros processuais velocidade de rotação (RPM) e profundidade de avanço;
- Caracterizar os materiais utilizados através de técnica de Espectroscopia de Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR);
- Avaliar o desempenho mecânico das soldas através de ensaio de tração, comparativamente a corpos de prova inteiriços;
- Avaliar o grau de cristalinidade na região da solda através de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), comparativamente ao material base;
- Identificar, através de técnicas de análise estatística, a relação entre os parâmetros de soldagem e as propriedades das juntas soldadas.

1.3 Abrangência e limites do trabalho

Durante o desenvolvimento deste projeto foram evidenciadas algumas limitações, as quais, para uma melhor interpretação de seu conteúdo, devem ser destacadas:

- Falta de equipamento específico para soldagem por atrito rotacional. Em seu lugar, utilizou-se um torno CNC, substituto adequado para este estudo, conforme descrito por Tappe e Potente (1989) e evidenciado no decorrer deste trabalho;
- Devido a inviabilidade financeira para a produção de um molde específico para a produção de corpos de prova, foram utilizadas barras cilíndricas extrusadas (pré-processadas) adquiridas em um distribuidor de insumos poliméricos industriais, junto de suas respectivas fichas técnicas;
- Baixo número de parâmetros avaliados. Optou-se por apenas dois parâmetros com base no equipamento disponível, pré-testes de soldagem e na impossibilidade em conduzir um estudo com maior número de parâmetros utilizando quantidade suficiente de corpos de prova a ponto de ter relevância estatística;

- Barras supostamente heterogêneas, uma vez que, devido a sua armazenagem no fornecedor, apresentavam certo grau de flambagem, dificultando a centralização das peças durante o processo;
- Dificuldade em obter uma junta adequada (100% concordante), uma vez que, para a centralização e soldagem, as mesmas tiveram que ser usinadas individualmente.

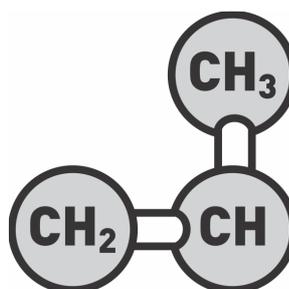
2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentado o estado da arte e o estado da técnica sobre o tema a que se refere o estudo.

2.1 Polipropileno

Pertencente a família das poliolefinas, o polipropileno é um material termoplástico obtido através da polimerização de moléculas de propeno (IUPAC) (KARIAN, 2003). A estrutura química dos meros (unidades de repetição) é apresentada pela Figura 1.

Figura 1 - Estrutura química do polipropileno



Fonte: Adaptado de Meier e Calafut (1999).

É um polímero semi-cristalino, apresentando ambas as fases amorfa e cristalina, sendo que a quantidade relativa de cada fase depende de suas características estruturais e estereoquímicas e de suas condições de processamento (KARIAN, 2003). A partir da alteração do arranjo estérico de seus grupos metil ligados a todo segundo átomo de carbono da cadeia, ocorrem alterações na taticidade do polímero, sendo possível ordenações de grupos metil isotáticos, sindiotáticos ou atáticos (TRIPATHI, 2002).

Para polipropilenos predominantemente isotáticos ou sindiotáticos, é encontrada cristalinidade em torno de 40%-70% (MOORE, 1996), sendo esta uma das características de grande influência nas propriedades do polímero. Polímeros semi-cristalinos possuem maior resistência mecânica, rigidez, densidade e ponto de fusão bem definido. Polímeros amorfos são duros e dúcteis, com maior resistência ao impacto e menor densidade (MAIER, 1998). Outros aspectos de grande influência

são a massa molecular e a presença de grupos polares, copolímeros ou ligações cruzadas (CANEVAROLO, 2006).

Sua estrutura química garante ao material um bom balanço entre propriedades físicas, mecânicas e térmicas quando em aplicações a temperatura ambiente (KARIAN, 2003). Suas principais propriedades de interesse para este estudo são apresentadas pela Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do polipropileno genérico.

Propriedades Físicas	Norma	Unidade	Valores
Densidade	ASTM D 792	g/cm ³	0,905
Fluidez	D 1238	g/10 min	40
Temperatura Máxima de Uso	-	°C	100
Propriedades Mecânicas	Norma	Unidade	Valores
Tensão de Resistência a tração	-	Mpa	35
Alongamento no Escoamento	ASTM D 638	%	12
Dureza Rockwell (Escala R)	ASTM D 785	-	101
Propriedades Térmicas	Norma	Unidade	Valores
Tg	-	°C	4-12
Tm	-	°C	165-175
Tc (cristalização)	-	°C	115-135
Condutividade Térmica	-	W/m K	0,22
Coeficiente Linear de Expansão Térmica (20-60 °C)	-	/°C	10 x 10 ⁻⁵

Fonte: Adaptado de Braskem¹ (2016) e Tripathi² (2002).

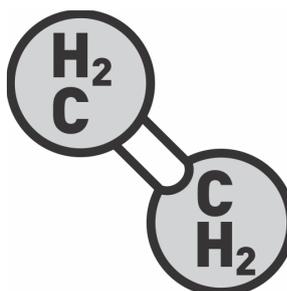
As resinas de polipropileno, assim como a maioria das poliolefinas são resistentes a muitos solventes e produtos químicos. É um material apolar, apresentando boa resistência a agentes químicos polares, porém é fortemente atacado por ácidos inorgânicos fortes (BRASKEM, 2010).

Devido a estas propriedades, é um material que encontra grande aplicabilidade em diversos setores, como por exemplo, na fabricação de embalagens alimentícias descartáveis, devido a sua ausência de sabor, boa rigidez e acabamento superficial e na construção de tubos e acessórios, devido à sua boa resistência química, baixo desgaste por fricção e elevada temperatura de uso permitida. (TRIPATHI, 2002).

2.2 Polietileno de Alta Densidade

Assim como o polipropileno, o polietileno de alta densidade também é um polímero pertencente a família das poliolefinas, sendo um material termoplástico obtido através da polimerização de moléculas de eteno (IUPAC) (PEACOCK, 2000). A estrutura química dos meros é apresentada pela Figura 2.

Figura 2 - Estrutura química do polietileno.

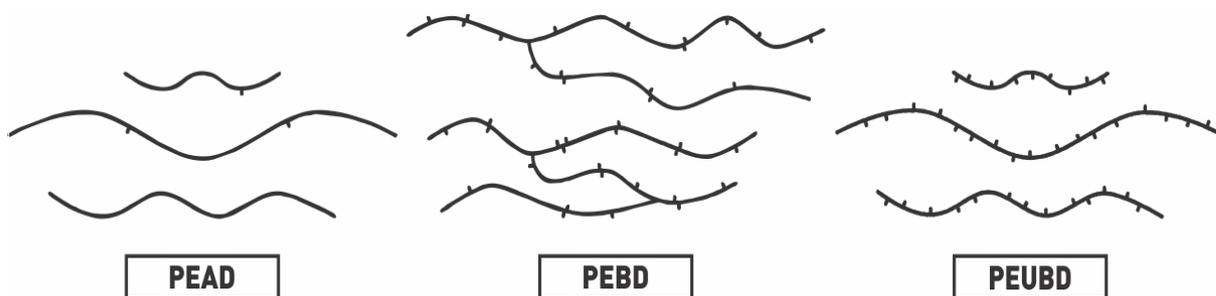


Fonte: Adaptado de Peacock (2000).

Muitos tipos de polietilenos podem ser produzidos, tendo essencialmente a mesma cadeia principal. As variações provêm principalmente de ramificações que modificam a natureza do material e, em menor quantidade, de defeitos na cadeia principal que limitam o grau de cristalinidade. Cadeias com menor presença de defeitos possuem maior grau de cristalinidade. O empacotamento de regiões com maior grau de cristalinidade é maior do que em regiões com menor grau de cristalinidade, provocando um aumento na densidade do material (PEACOCK, 2000).

O polietileno de alta densidade é quimicamente a estrutura mais próxima do polietileno puro, possuindo primariamente a presença de moléculas não ramificadas com poucas falhas em sua linearidade. Sendo assim, possui elevado grau de cristalinidade, na faixa de 60-80% (PEACOCK, 2000). Devido à influência da cristalinidade nas propriedades do polímero, possui elevada rigidez, resistência a tração (4 vezes mais do que polietileno de baixa densidade), alta resistência à compressão e excelente resistência ao impacto (VASILE E PASCU, 2005). Uma ilustração esquemática dos principais tipos de polietileno é apresentada pela Figura 3.

Figura 3 – Principais tipos de polietileno



Fonte: Adaptado de Peacock (2000)

Sua estrutura química e elevada densidade garantem ao material boas propriedades físicas, mecânicas e térmicas quando em aplicações a temperatura ambiente, mantendo grande parte dessas propriedades à baixas temperaturas (VASILE e PASCU, 2005). As principais propriedades de interesse para este estudo são apresentadas pela Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades do polietileno de alta densidade genérico.

Propriedades Físicas	Norma	Unidade	Valores
Densidade	ASTM D 792	g/cm ³	0,955
Fluidez	ASTM D 1238	g/10 min	20
Temperatura Máxima de Uso	ASTM D 792	°C	55
Propriedades Mecânicas	Norma	Unidade	Valores
Tensão de Resistência a tração	ASTM D 638	MPa	20-35
Alongamento no Escoamento	ASTM D 638	%	7,2
Dureza Shore D	ASTM D 2240	-	60
Propriedades Térmicas	Norma	Unidade	Valores
Tg	ASTM D 792	°C	-110
Tm	ASTM D 3418	°C	120-130
Tc (cristalização)	ASTM D-3895-02	°C	112,9
Condutividade Térmica	ASTM C 177	W/m/°C	4.63–5.22 × 10 ⁻³
Coeficiente Linear de Expansão Térmica	ASTM D 696	M/m/°C	12

Fonte: Braskem¹ (2016), Vasile e Pascu² (2005) e Araújo³ (2009).

PEAD é um material apolar, apresentando alta estabilidade a agentes químicos e outros meios, sendo resistente a soluções aquosas de sais, ácidos inorgânicos (exceto agentes oxidantes fortes, como ácido nítrico e sulfúrico fumegante) (BRASKEM, 2010).

Devido a estas propriedades, encontra aplicabilidade nos mais diversos setores, como na fabricação de garrafas para armazenagem de produtos químicos e cosméticos, em razão de suas boas propriedades químicas, na fabricação de recipientes alimentícios, sendo um material atóxico, certificado pela *U.S. Food and Administration (FDA)* e na fabricação de brinquedos, sendo facilmente moldado por diversos processos produtivos (VASILE E PASCU, 2005).

2.3 Processos de União de Polímeros

De maneira simplificada, os processos de união de materiais poliméricos e seus compósitos dividem-se em métodos de fixação mecânica e métodos de fixação por adesão. Métodos de fixação por adesão são ainda divididos em adesão por solventes, por adesivos ou por soldagem (STOKES, 1989). As principais técnicas de união para polímeros são apresentadas pela Figura 4.

Figura 4 – Principais técnicas de união para polímeros.



Fonte: Adaptado de Stokes (1989)

Na união por fixadores mecânicos as peças podem ser ligadas de maneira permanente ou desmontável, com sistemas de abertura e fechamento, sendo uma técnica compatível com todos os tipos de materiais, incluindo metais, e possibilitando a união de peças de materiais dissimilares. Alguns exemplos de fixadores mecânicos são rebites, parafusos, braçadeiras e encaixes.

Entre as vantagens desta técnica, destaca-se a possibilidade de produzir montagens simples e versáteis, especialmente em peças com geometrias

complexas ou com demandas de desmontagem/substituição de componentes (STOKES, 1989). Em contrapartida, as juntas não apresentam alto desempenho mecânico devido à concentração de tensões gerada na região entorno do fixador, podendo levar à formação de trincas e falhas (GONÇALVES, 2015). Para fixadores mecânicos desmontáveis a aplicabilidade é limitada devido à pouca resistência mecânica quando submetidos a cargas constantes ou a fadiga.

Já em técnicas de união por adesivos, através do uso de adesivos estruturais, a exemplo de adesivos epoxi ou fenólicos, é possível unir peças com demandas de resistência a cargas elevadas ou cíclicas, onde os componentes são submetidos a grandes tensões, próximo do limite de escoamento.

Para a aplicação, material adesivo é depositado entre as partes a serem unidas (aderentes), possibilitando a união de materiais iguais ou dissimilares, sendo comumente utilizada na união de metais e não-metais na indústria aeroespacial e automotiva. A união por adesivos também é compatível com polímeros termofixos, diferentemente de técnicas de soldagem (STOKES, 1989). Outras vantagens são a baixa concentração de tensões, boa resistência a fadiga, bom acabamento superficial, baixo custo e rápida aplicação. Dentre as desvantagens, destacam-se a necessidade de cuidadosa preparação das superfícies de união, longo tempo de cura, dependência de dispositivos de fixação para cura, aplicações limitadas para uso em temperatura elevada e baixa resistência a solventes e outros produtos químicos (EBNESAJJAD, 2008).

Existe ainda a classe de adesivos não-estruturais, a exemplo de colas com base latex, que possuem aplicação limitada a situações onde não há solicitação mecânica elevada, tendo meramente a função de garantir a fixação segura de peças leves. (EBNESAJJAD, 2008).

De maneira similar, na adesão por solventes, as superfícies de união são solubilizadas através da aplicação de solventes, sendo posteriormente fixas sob pressão, permitindo a difusão das cadeias por meio da superfície de união. A evaporação do solvente resulta na união desejada. Entretanto, os tempos de aplicação são lentos, não sendo uma técnica adequada para produção em escala.

Seu uso é indicado para aplicações especiais ou mesmo para a montagem de peças únicas onde não há demanda de repetibilidade (STOKES, 1989).

Já na adesão por soldagem, duas peças, de materiais iguais ou muito parecidos, são unidos sob calor e pressão. Para que sejam soldadas, as superfícies de união devem ser levadas a um estado amolecido (para polímeros amorfos) ou fundido (para polímeros semicristalinos), sendo posteriormente unidas sob pressão. A junta é resfriada até que atinja novamente a estabilidade de forma.

As principais vantagens, desvantagens e características dos processos de solda variam de acordo com o método de aquecimento utilizado em sua aplicação, os quais são divididos em aquecimento por movimento mecânico, aquecimento externo e aquecimento por eletromagnetismo (BUXTON, 2016). As principais técnicas de soldagem polimérica com aplicação industrial (MICHAELI, 1995; TROUGHTON, 2008 e HARPER, 2002) são apresentados pela Tabela 3.

Tabela 3 – Principais técnicas de soldagem polimérica.

Aquecimento por Movimento Mecânico	Aquecimento Externo	Aquecimento por Eletromagnetismo
Soldagem por Vibração	Soldagem Chata com Corpo Quente	Soldagem por Implante Resistivo
Soldagem por Atrito Rotacional	Soldagem por Impulso de Calor	Soldagem por Indução
Soldagem por Ultrassom	Soldagem por Gás Aquecido	Soldagem por Alta Frequência
Soldagem por Friction-Stir	Soldagem por Extrusão	Soldagem por Infravermelho
	Soldagem Livre de Rebarbas (<i>Flash-Free Welding</i>)	Soldagem a Laser
		Soldagem por Microondas

Fonte: Adaptado de Michaeli (1995), Troughton (2008) e Harper (2002).

As principais vantagens, desvantagens e aplicações de cada um destes processos são descritas resumidamente na Tabela 4.

Tabela 4 – Vantagens, desvantagens e aplicações dos processos de soldagem.

Técnicas	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Soldagem por Vibração	Rápida, bom acabamento, compatível com peças de qualquer processo produtivo e entre diferentes polímeros.	Pouca confiabilidade de dimensional final, alto investimento inicial e tamanho limitado das peças.	Linha branca, automativa, utilidades, materiais com carga e outros.
Soldagem por Atrito Rotacional	Rápida, baixo custo de produção e baixo investimento inicial.	Limitada a perfis com simetria axial.	Aplicada a tanques, cilindros aerossóis, containers e outras peças cilíndricas.
Soldagem por Ultrassom	Baixo custo de operação, acabamento sem rebarba, facilmente automatizada.	Dimensional limitado das peças, investimento inicial elevado.	Técnica muito utilizada. Ideal para a indústria médica pois não introduz contaminantes.
Soldagem por Friction-Stir	Pode proporcionar peças com ótimo acabamento, rapidez e estanqueidade.	Limitada a chapas e com espessuras elevadas.	Soldagem de grossas chapas poliméricas na construção de tanques de armazenagem.
Soldagem Chata com Corpo Quente	Econômica e compatível com quase todos os materiais termoplásticos.	Produz rebarba aparente e longos ciclos de produção.	Muito utilizada no setor automotivo para a soldagem de luzes de iluminação de veículos.
Soldagem por Impulso de Calor	Produz pouca rebarba, elevada produtividade e baixo custo de operação.	Limitada a aplicação em filmes poliméricos finos.	Indústria médica e alimentícia na produção de embalagens plásticas.
Soldagem por Gás Aquecido	Boa resistência das juntas soldadas (até 90%) e baixo investimento inicial.	Aplicação manual, tempo elevado de aplicação e dependência do operador.	Utilizado na fabricação de itens customizados e no reparo de componentes.
Soldagem por Extrusão	Bom acabamento, estanque e com baixo tempo de aplicação.	Peso elevado do equipamento e dependência da habilidade do operador.	Utilizada na fabricação de tanques, canos e outras peças de grande dimensão.
Soldagem Livre de Rebarbas (<i>Flash-Free Welding</i>)	Livre de rebarbas, produz fechamento hermético e pode ser automatizada.	Ciclos elevados de operação, limitação na espessura das peças a serem soldadas.	Canos, estrusões ou filmes. Ideal para armazenar químicos de alta pureza.
Soldagem por Implante Resistivo	Ciclos rápidos, elevada compatibilidade com peças com carga. Automatizável.	Custo extra do implante e operação de aplicação do mesmo.	Desenvolvida para polímeros de alta performance reforçados com fibras.
Soldagem por Indução	Soldagem extrutural e estanque. Técnica rápida e com ótimo acabamento.	Custo adicional do implante e sua operação de aplicação.	Alta aplicabilidade para variados processos, geometrias e aditivos.
Soldagem por Alta Frequência	Ciclos curtos, pouca rebarba, solda múltiplas camadas simultaneamente.	Limitada a materiais que contém grupos polares, finos e de baixa complexidade.	Colchões de praia, bolas de ar e invólucros para sangue.
Soldagem por Infravermelho	Rápida e econômica, com pouca rebarba. Compatível com materiais de grande área superficial.	Não é adequada para materiais translúcidos ou peças com imperfeições.	Produtos biomédicos, acabamentos na construção civil e outras peças com demanda estanque.
Soldagem a Laser	Rápida, com pouca rebarba. Processo automatizado com elevada confiabilidade.	Riscos relativos ao trabalhos com laser, elevado custo de equipamentos.	Indústria textil, artigos biomédicos, eletrônicos, automotivos e outros.
Soldagem por Micro-ondas	Muito baixo custo de equipamento e aplicação. Ciclos curtos.	Necessário o uso de material de união. Pouca aplicabilidade comercial.	Única aplicação conhecida na soldagem de canos e encaixes de PVDF.

Fonte: Adaptado de Michaeli (1995), Troughton (2008) e Harper (2002).

Devido a grande aplicabilidade dos materiais polipropileno e polietileno de alta densidade na indústria de processamento de polímeros, diversas técnicas de soldagem já foram aplicadas a estes materiais.

Strand (2004) estudou o efeito da variação dos parâmetros de soldagem (diâmetro do pino, taxa de alimentação, temperatura do calço e tempo de pressão) na microestrutura e propriedades mecânicas de uma junta soldada de polipropileno através do processo de soldagem por fricção FSW (Friction Stir Welding). Neste estudo, as propriedades mecânicas foram ensaiadas com base na norma DVS 2203-5, "Análise de juntas soldadas em formato tipo prato ou tubo: ensaio de dobramento", apresentada pela Associação Alemã de Soldagem (DVS - Deutscher Verband Für Schweissen), que determina normas específicas para ensaios mecânicos em corpos de prova poliméricos soldados. A norma estabelece critérios para aceite e classificação como "boa solda" para alguns métodos de soldagem como gás quente, extrusão e soldagem a laser (DVS, 1999).

Dentre os quatro parâmetros estudados, três apresentaram efeitos estatisticamente significantes no ângulo de dobramento antes da falha: um maior diâmetro do pino, resultando em um aumento do ângulo em 25%; uma taxa de alimentação de 51 mm/min, apresentando um aumento de 13% em relação à segunda maior e uma temperatura elevada do calço, na faixa de 177 °C, propiciando um aumento de 20% em relação a segunda maior (110 °C). Foram produzidas soldas com resistência à flexão de 80-92% da resistência do material-base e foram encontrados defeitos e tipos de microestruturas similares em todas as soldas, sendo eles: esferulitos, vazios, trincas, linhas de fluxo, entre outros.

Oliveira et al. (2012) analisou a soldabilidade de polímeros termoplásticos utilizando *Friction Spot Welding*, através da soldagem de placas confeccionadas em polimetilmetacrilato de metila (PMMA). *Friction Spot Welding* é uma técnica derivada do *Friction Stir Welding*, em que é usada a mesma ferramenta rotacional, porém sem movimento transversal (ROSENDO, 2009). As amostras foram analisadas por microscopia óptica, medições de microdureza Vickers e ensaio de resistência ao cisalhamento. Através da avaliação da resistência mecânica das peças, comparativamente a placas soldadas por ultrassom, microondas e *thermal bonding*, o autor constatou que as propriedades mecânicas finais foram superiores para *Friction Spot Welding* e concluiu que esta técnica é especialmente adequada para a aplicação em materiais termoplásticos.

Por sua vez, Gonçalves (2015) investigou o uso de *Friction Spot Welding* na fabricação de juntas pontuais entre chapas de Poliamida 6 (PA6) sobrepostas. Os parâmetros de soldagem utilizados, bem como suas variações escolhidas, foram: velocidade de rotação (1000 RPM, 1500 RPM e 2000 RPM), tempo de soldagem (5s, 6s e 7s), profundidade de penetração da ferramenta (5mm, 5,5mm e 6mm) e tempo de consolidação (0,5s, 10,5s e 20,5s). A pressão foi mantida constante em 7,0kN e o resfriamento, aplicável por meio de fluxo de ar, foi mantido desligado durante todo o teste. Através da produção de 21 condições diferentes de soldagem e com o uso de técnicas estatísticas, o autor concluiu que os parâmetros velocidade de rotação e tempo de soldagem possuem maior influência sobre a resistência mecânica das juntas alcançando resistência de 26MPa por ensaio de cisalhamento sob tração estático. Não houve variação significativa do grau de cristalinidade nas soldas e observou-se um decréscimo de até 7% na massa molar da poliamida 6 (PA6) em relação ao material de base. O autor justificou este fenômeno através do aumento da temperatura de solda (foram obtidas temperaturas de solda de até 275 °C), que contribuiu para o conseqüente aumento da área de soldagem.

2.4 Teoria da Soldagem de Polímeros

No processo de soldagem, calor é aplicado para amolecer (materiais amorfos) ou fundir (materiais semicristalinos) o material polimérico presente nas superfícies de contato, permitindo a formação de uma junta através de difusão intermolecular e emaranhamento de cadeias (SERCER, 2006). Em associação com a energia presente na zona de contato, a pressão atua permitindo a fluidez necessária ao material amolecido/fundido para que as duas superfícies sejam unidas. Por esta razão, somente polímeros termoplásticos podem ser soldados (MICHAELI, 1995). A maior parte dos processos de solda tem em comum cinco etapas distintas: preparação das superfícies, aquecimento, pressão, difusão intermolecular e resfriamento.

Para processos automatizados, que não dependem da habilidade e experiência do operador para sua execução, a etapa de preparação é raramente necessária. Nos casos em que esta se faz necessária, sua função é eliminar a presença de contaminantes como óleos, graxas, poeira, entre outros. Ainda, a etapa de preparação pode incluir a usinagem das peças para garantir a presença de

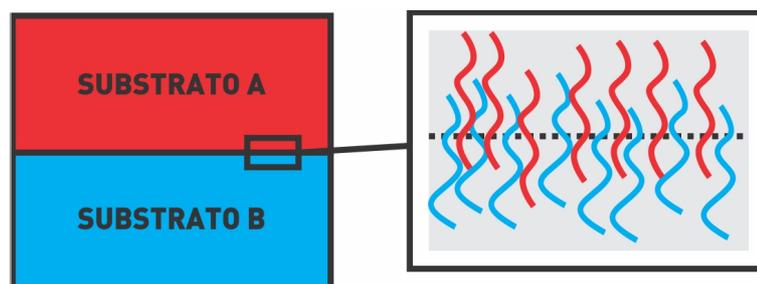
superfícies planas e uniformes necessárias a determinados processos (SERCER, 2006).

Segundo Michaeli (1995) e Sercer (2006), o aquecimento é a etapa mais crítica do processo de soldagem em polímeros, permitindo a formação de uma camada de material amolecido/fundido em quantidade suficiente nas superfícies de junta. Após o aquecimento, as superfícies são unidas sob pressão, propiciando contato polímero-polímero.

De acordo com Sercer (2006), para a formação de uma solda boa e durável é necessária difusão intermolecular e emaranhamento das cadeias pela interface termoplástica, fenômeno que pode ser compreendido, segundo Kim e Wool (1983) pela teoria da reptação, desenvolvida por De Gennes e posteriormente por Doi e Edwards, para géis poliméricos, polímeros fundidos e soluções poliméricas concentradas.

A teoria de De Gennes assume que, em condições de movimentação restrita pela presença de cadeias vizinhas, as moléculas se deslocam através de movimentos de reptação (relativo ao movimento de reptais), tendo sua movimentação limitada pelos pontos de embaraçamento (AKCELRUD, 2007). A Figura 5 ilustra o movimento de reptação proposto por De Gennes.

Figura 5– Movimento de reptação em polímeros.



Fonte: Adaptado de Awaja (2016).

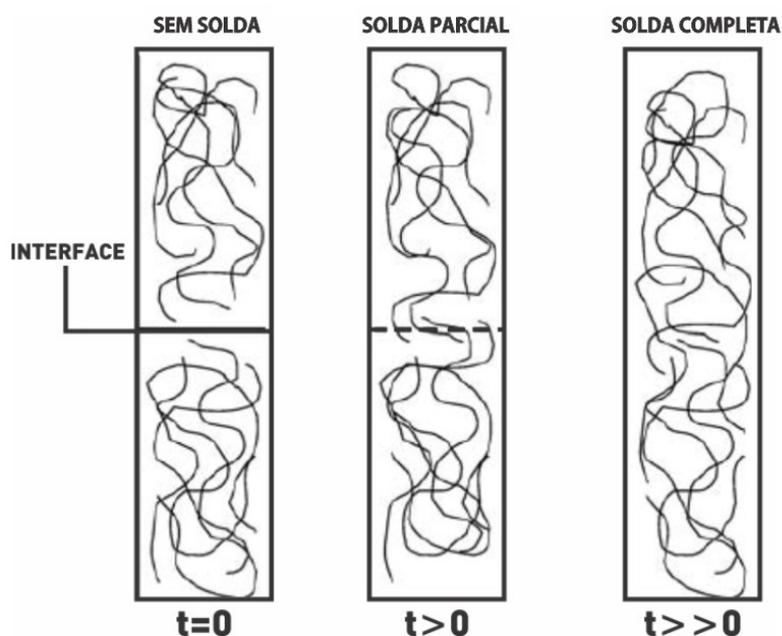
Como resultado, a interface desaparece gradualmente por meio de um processo de solda e a resistência mecânica aumenta nesta região gradualmente ao aumento no tempo de contato (AWAJA, 2016).

Entretanto, segundo Grewell e Benatar (2007), nestes modelos, são consideradas diversas suposições fundamentais, como a de superfícies de

soldagem completa e intimamente em contato e temperaturas relativamente constantes. Na maior parte das aplicações estas suposições não são corretas, uma vez que, mesmo em superfícies relativamente lisas, picos de aspereza impedem contato íntimo entre as superfícies, sendo tal contato possível somente após a fusão destes picos, os quais, durante a soldagem amolecem e fluem, preenchendo os espaços intersticiais. Ainda, somente experimentos de elevado controle atingem condições constantes de temperatura.

Grewell e Benatar (2006) estudaram modelos acoplados de temperatura, difusão e fusão para predição de solda entre superfícies, com os quais propõem um modelo matemático para a predição da altura do espaço entre superfícies em função do tempo. Uma vez que as interfaces conformam-se uma a outra, elas soldam unidas por meio da difusão de cadeias poliméricas através da interface de um lado a outro, sendo que, sob condições ideais de solda, as cadeias poliméricas de um lado da interface migram através da mesma, de modo que essa se torne indistinguível do material pré-moldado (GREWELL e BENATAR, 2007). A Figura 6 apresenta os detalhes da solda molecular da interface em função do tempo.

Figura 6 – Solda molecular em função do tempo.



Fonte: Adaptado de Grewell e Benatar (2007).

O estágio final no processo de solda é o resfriamento e ressolidificação do polímero na superfície de união. Durante esta etapa, as matrizes semicristalinas

recristalizam para obter sua microestrutura final. Polímeros amorfos mantêm a orientação molecular previamente induzida, podendo manter distorções ou tensões residuais induzidas termicamente (SERCER, 2006).

2.5 Soldagem por Fricção

Soldagem por fricção abrange um vasto grupo de processos de soldagem, baseados em aquecimento mecânico interno, no qual a energia provocada por um tipo de movimento mecânico é convertida em calor através de fricção superficial e intermolecular. Estes processos incluem soldagem por fricção rotacional, angular, *friction-stir welding* (FSW), entre outros, tendo como principal diferença a geometria do movimento correspondente (TROUGHTON, 2008).

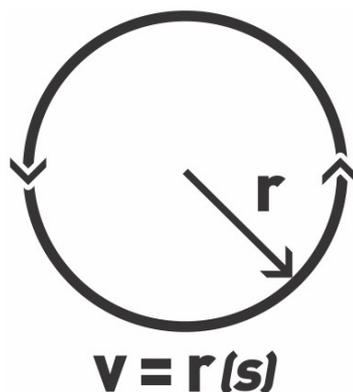
Processos de soldagem por fricção são realizados a partir de quatro etapas distintas. Na primeira etapa, calor é gerado por fricção sólido-sólido. Por esta razão, materiais com baixo coeficiente de fricção não são compatíveis com este tipo de processo. Alguns materiais com menor coeficiente de fricção, como polietileno, demandam maior força de fechamento para gerar fricção em quantidade suficiente para permitir a soldagem.

Na segunda etapa o aquecimento do material sólido dá lugar a aquecimento de material viscoso por cisalhamento da fina camada de material amolecido formada na interface, culminando na estabilização da peça (terceira etapa). Após isso, caso o processo continue, existe contribuição à presença de rebarbas. Por fim, na última etapa o movimento friccional é cessado, permitindo a solidificação da peça sob pressão (GREWELL e BENATAR, 2007).

2.6 Soldagem por Atrito Rotacional

Sendo a geometria do movimento friccional a responsável pela caracterização da técnica de soldagem por fricção, a Figura 7 representa o movimento rotacional e a velocidade correspondente para soldagem por atrito rotacional.

Figura 7– Movimento rotacional e velocidade para atrito rotacional.



*v=velocidade * r=radianos/segundo

Fonte: Adaptado de Grewell e Benatar (2007).

A velocidade angular do deslocamento é dada em radianos/s, permitindo estimar a dissipação de energia, com base no pressuposto fundamental de que energia é igual a velocidade multiplicado pela força friccional (GREWELL e BENATAR, 2007).

Segundo Troughton (2008), no processo de soldagem por atrito rotacional peças termoplásticas, cujas superfícies de união possuem simetria rotacional, são friccionadas uma contra a outra sob pressão em um movimento circular unidirecional. Normalmente uma das peças permanece parada enquanto a outra é rotacionada. O calor gerado durante o processo amolece/funde o polímero na interface, formando uma solda por meio de seu resfriamento.

É uma técnica usada principalmente na montagem final de pequenos componentes. Exemplos incluem tubos de ventilação, tanques de combustíveis produzidos por sopro-extrusão, filtros de gasolina e adição de tampas a compartimentos de armazenagem (TAPPE e POTENTE, 1989).

Durante os primeiros anos de seu desenvolvimento, o atrito rotacional era produzido com a ajuda de tornos e brocas modificadas, prejudicando, em alguns casos, a resistência da junta soldada devido a falta de reprodutibilidade do processo. Somente nos anos 80 tornou-se regular o uso da soldagem na produção em massa, levando empresas desenvolvedoras de máquinas a introduzir equipamentos de solda com modernas tecnologias de controle (TAPPE e POTENTE, 1989).

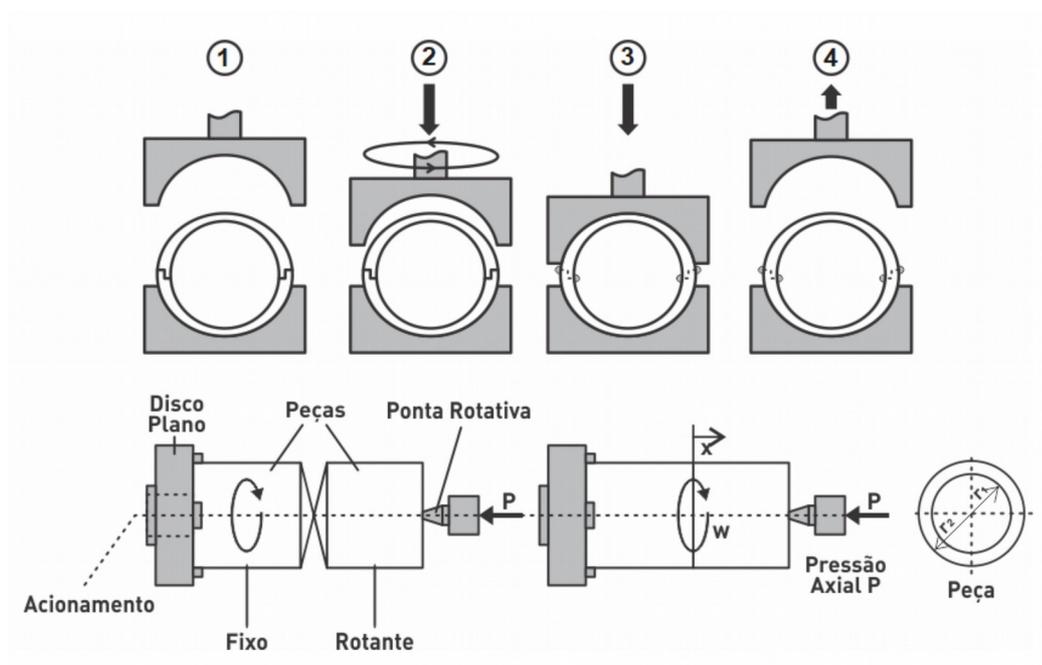
Segundo Forward Technologies (2016), os tempos de ciclo de soldagem são baixos, na faixa de 3 a 6 segundos. Tempos de ciclos curtos fazem deste método ideal para processos de produção em massa (TAPPE e POTENTE, 1989).

Algumas das principais ferramentas para soldagem por atrito rotacional são comandos e fixadores. Comandos são ferramentas personalizadas para segurar, rotacionar a peça e gerar a solda. Geralmente utilizam superfícies dentadas, porém, calços de silicone podem ser utilizados em peças pequenas ou frágeis. Com frequência as peças plásticas podem ter *plugs* em relevo com conexão direta para os comandos (FORWARD TECHNOLOGIES, 2016).

Já os fixadores são peças não-rotativas e devem ser fixas de modo que as duas 'metades' estejam alinhadas ao longo de seu eixo em comum e não rotacionem. Detalhes aplicados nas peças como *plugs* e nervuras são de grande auxílio para prevenir rotação indesejada da parte fixa.

De acordo com Troughton (2008), o processo é geralmente dividido em quatro etapas. A Figura 08 apresenta uma ilustração do processo:

Figura 8– Processo de soldagem por atrito rotacional.



Fonte: Adaptado de Troughton (2008), Michaeli (1995) e Tappe e Potente (1989).

Os principais procedimentos de cada etapa são:

- (1) As peças são posicionadas na máquina de soldagem. Normalmente, ambas as peças são posicionadas em fixadores presos na base do equipamento, porém, para peças de grande dimensão é comum a fixação das peças superiores e inferiores separadas. Este procedimento geralmente tem duração de 2-5 segundos (TROUGHTON, 2008).

Em seguida, geralmente ativada pelo operador, através de acionamento bimanual com atuação síncrona, a peça móvel inicia o movimento rotacional, direcionando-se de encontro a peça fixa. A velocidade alvo média de rotação (n_0) é de cerca de 2000 RPM, podendo variar de 200 a 14.000 RPM, dependendo do tamanho das peças a serem soldadas. As duas peças a serem soldadas são postas em contato através de uma pressão axial (P). Este procedimento geralmente tem duração de 1-2 segundos. Quanto maior a velocidade e a pressão axial, menor será a duração desta fase (TROUGHTON, 2008 e TAPPE e POTENTE, 1989).

- (2) Uma vez que a peça móvel encontra a peça fixa, o movimento gera calor na interface de contato. Inicialmente o movimento friccional ocorre entre as duas superfícies aumentando a temperatura da superfície de contato até sua temperatura de transição vítrea/temperatura de fusão. Conforme a espessura do material amolecido ou fundido aumenta, o calor passa a ser gerado através de seu cisalhamento interno. A taxa de cisalhamento e calor gerado são teoricamente infinitos e, portanto, a temperatura aumenta muito rapidamente. O abrupto gradiente de temperatura provoca um aumento na espessura da camada de material amolecido/fundido. Esta etapa geralmente tem duração de 3-4 segundos (TROUGHTON, 2008 e TAPPE e POTENTE, 1989).

- (3) Na terceira etapa, chamada de etapa de fricção estável, um estado de equilíbrio é estabelecido entre o calor gerado e o calor eliminado através da rebarba e na direção axial, podendo ser aparente ou não, de acordo com o perfil da peça. A redução axial no comprimento das peças em processo de solda aumenta de maneira linear de acordo com o tempo. Durante esta etapa a camada de material amolecido/fundido possui espessura constante, através da qual encontra-se um gradiente significativo de temperatura. Visando atingir uma elevada resistência da

solda, uma quantidade suficiente de material deve ser transportada para fora do plano de união (TROUGHTON, 2008 e TAPPE e POTENTE, 1989).

- (4) O movimento rotacional é cessado, reduzindo a velocidade a zero. É essencial que o movimento relativo cesse antes que a zona de união solidifique. As peças são fixas sob uma pressão predeterminada, garantindo íntimo contato entre as interfaces e permitindo o resfriamento da junta. Para diversos materiais provou-se benéfico aumentar ou reduzir a pressão axial quando a etapa de fricção estável é atingida. Uma vez que a soldagem tenha solidificado, a peça móvel é deslocada e as peças são removidas (TROUGHTON, 2008 e TAPPE e POTENTE, 1989).

De acordo com Tappe e Potente (1989) o tempo de parada geralmente tem duração de 2-5 segundos, porém, Troughton (2008) defende que este tempo não se prolongue mais do que um segundo ou o material amolecido/fundido na superfície de união será cisalhado enquanto inicia sua solidificação, reduzindo a resistência produzida pela solda. Esta parada pode ser realizada de forma abrupta ou através de redução gradual da velocidade, dividindo assim os processos de soldagem por atrito rotacional em dois tipos: por inércia ou conduzida.

O processo por inércia é o mais simples e comum, no qual a peça móvel é rotacionada a uma velocidade constante, utilizando um motor elétrico ou pneumático conectado a um volante. Isto propicia uma energia cinética constante armazenada na massa rotante. A quantidade de energia cinética pode variar mudando a velocidade de rotação ou a massa da parte móvel. Quando a velocidade de rotação esperada é atingida o motor é desligado e a pressão começa a atuar. A peça móvel rotaciona livremente até que toda a energia cinética armazenada seja transferida para a junta. O equipamento necessário para a aplicação desta técnica é simples, porém, não permite o controle da posição angular final da peça, uma vez que o final da rotação se dá em consequência da inércia do equipamento (TROUGHTON, 2008 e TAPPE e POTENTE, 1989).

Já em soldagem rotacional conduzida, a velocidade rotacional permanece constante até o fim da etapa de soldagem, utilizando um servo motor ou um motor de passo que pode ser programado para parar a rotação quase que

instantaneamente a um ângulo predefinido, o que é ideal para aplicações em que há demanda de alinhamento específico entre as peças.

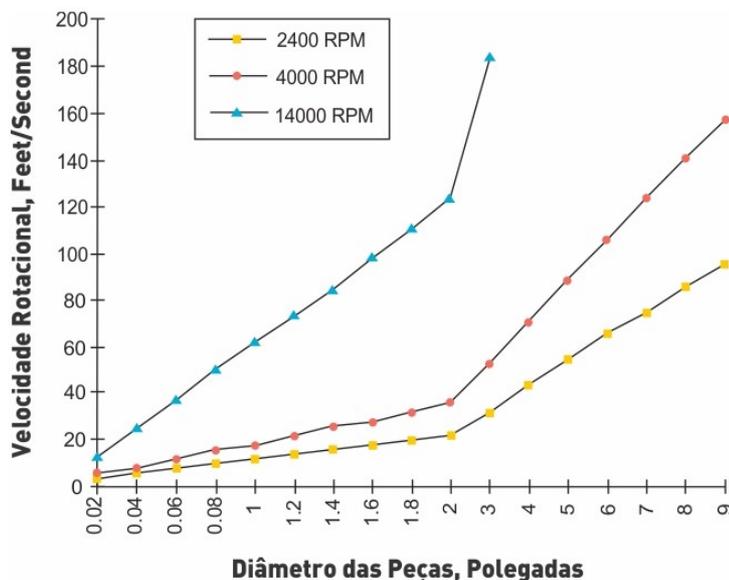
De acordo com Tappe e Potente (1989), as máquinas de soldagem por atrito rotacional conduzido são mais adequadas para produção em massa, mantendo uma qualidade uniforme da junta soldada pelo uso de unidades de controle. A principal desvantagem destes equipamentos é seu custo elevado. Os controles nestas máquinas não somente tornam possível determinar os parâmetros de velocidade, pressão axial e tempo de fricção, como ainda, rodar programas de pressão em razão do tempo de aplicação. Isso torna possível coordenar a pressão axial e a velocidade na fase de fricção individual, adequando o processo para uma elevada gama de materiais dos quais a peça soldada pode ser feita.

Segundo Forward Technologies (2016), fabricante global de equipamentos para testes e soldagem de polímeros, dentre as condições necessárias para obter sucesso na aplicação do processo destacam-se: desenho da junta da peça, velocidade rotacional, pressão de união, tempo de giro e peças com simetria axial.

Destaca-se ainda que o desenho de uma boa junta soldada deve ter área de solda igual ou maior do que uma parede típica de uma seção da peça a ser soldada e deve propiciar suficiente alinhamento peça-a-peça. Ainda, segundo Strand (2004), conforme o raio da peça aumenta, ocorre o aumento da velocidade angular, propiciando sobreaquecimento e degradação do material nas regiões externas de peças sólidas de grande diâmetro. Sendo assim, Forward Technologies (2016) propõe uma taxa constante de velocidade rotacional em função do diâmetro, dada aqui em pés/segundo e expressa pela Equação 1, sendo representada graficamente pela Figura 9.

$$\text{Pés/Segundo} = \frac{(\text{Diâmetro da Peça} \times \pi \times \text{RPM} / \text{Segundo})}{12} \quad \text{Eq. (1)}$$

Figura 9 – Relação entre velocidade rotacional e diâmetro de peça.



Fonte: Adaptado de Forward Technologies (2016).

Ainda, para atingir amolecimento/fusão uniforme, peças ocas com finas espessuras de parede são mais indicadas. A Figura 10 apresenta alguns desenhos típicos de juntas de solda para atrito rotacional.

Figura 10 – Desenhos típicos de juntas de solda.



Fonte: Adaptado de Forward Technologies (2016).

Tappe e Potente (1989) também estudaram a influência dos parâmetros e do material de solda na temperatura da zona de soldagem, na taxa de amolecimento/fusão e no torque em soldagem por atrito rotacional de polímeros semicristalinos, através da análise da etapa de fricção. Foram realizadas comparações entre resultados obtidos experimentalmente em Polietileno de Alta Densidade e resultados obtidos através de modelos matemáticos. Uma vez que os modelos matemáticos utilizaram-se de algumas suposições básicas simplificadas

como contato superficial, fluxo, propriedades do material e calor constantes, foram encontrados desvios em relação aos modelos experimentais. Porém, devido à similaridade entre os resultados calculados e os experimentais, os autores concluíram que os modelos matemáticos eram adequados para explicar o fenômeno estudado.

Tappe e Potente (1989) investigaram, ainda, a influência dos parâmetros na qualidade da solda em amostras cilíndricas injetadas em Polietileno de Alta Densidade, Polietileno de Baixa Densidade, Poliamida, Poliamida com fibra de vidro, Poliestireno e Acrilonitrila Butadieno Estireno, os quais foram soldados em condições variadas de velocidade, pressão axial, tempo de fricção e tempo de parada.

A qualidade da solda foi avaliada através de testes de ensaio de tração em corpos de prova em tiras retiradas das peças soldadas. Todas as amostras apresentaram melhores resultados com tempo de parada rápido (abrupto) do que em parada contínua. Ainda, percebeu-se que a qualidade da solda aumenta inicialmente com o aumento do tempo de fricção. Porém, assim que o sistema entra em estado de equilíbrio (fricção estável) o aumento do tempo de fricção perde influência na qualidade da solda. Para PEAD e PEBD a velocidade foi o parâmetro com maior influência na qualidade da solda.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os métodos e procedimentos adotados para o desenvolvimento do trabalho.

3.1 Equipamentos Utilizados

Os equipamentos utilizados para a obtenção das amostras, preparação e soldagem são descritos a seguir:

- Paquímetro;
- Serra manual;
- Torno mecânico convencional de marca MANROD, modelo MR 302;
- Torno mecânico com Comando numérico computadorizado (CNC) Nardini Logic 250VS Comando Fanuc OIT.

3.2 Materiais Utilizados

Os polímeros comerciais utilizados foram adquiridos em barras extrusadas de perfil circular de diâmetro 13,3mm adquiridas na empresa RA BERTOLDI Comércio de Plásticos Industriais, localizada na cidade de Caxias do Sul. As barras foram adquiridas de mesmo lote e nos materiais especificados (PP e PEAD) acompanhados de ficha técnica dos mesmos. Os dados são apresentados nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5 – Principais características do polipropileno.

Polímero	Propriedades	Valores	Unidades	Norma
Polipropileno	Resistência a Tração (escoamento)	30	MPa	DIN EN ISO 527
	Módulo Elástico (tração)	1600	MPa	DIN EN ISO 178
	Coefficiente de fricção ¹	0,3	-	-

¹Em aço retificado-p=0,05N/mm², v=0,6m/s

Fonte: RA BERTOLDI (2018).

Tabela 6 – Principais características do polietileno de alta densidade.

Polímero	Propriedades	Valores	Unidades	Norma
Polietileno de Alta Densidade	Resistência a Tração (escoamento)	25	MPa	DIN EN ISO 527
	Módulo Elástico (tração)	1000	MPa	DIN EN ISO 178
	Coefficiente de fricção ¹	0,29	-	-

¹Em aço retificado- $p=0,05\text{N/mm}^2$, $v=0,6\text{m/s}$

Fonte: RA BERTOLDI (2018).

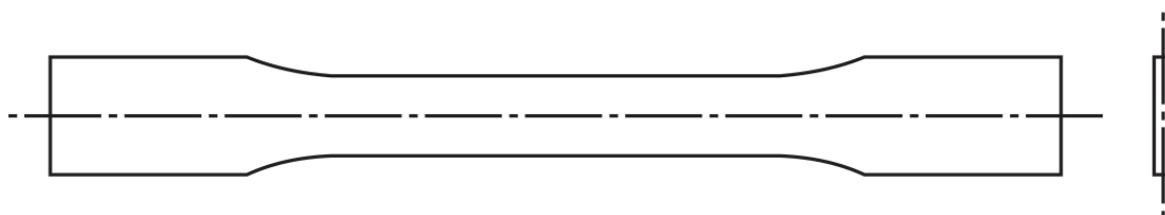
3.3 Corpo de Prova

Visando a aplicação posterior para ensaio de tração, os corpos de prova para soldagem foram adaptados da norma ASTM D638-02:2014 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics).

Uma das premissas para a obtenção de peças soldadas por atrito rotacional é seu perfil axial. Uma vez que o critério limitante para a proporção dimensional das peças, presente na norma supracitada, é sua espessura, e tendo em vista que os corpos de prova foram adaptados de barras extrusadas pré-processadas, optou-se pela confecção do modelo ASTM D638 tipo 3, utilizando como delimitante o diâmetro em comum disponível no mercado que contemplasse ambos os materiais (PP e PEAD).

Inicialmente, buscando conformidade com norma supracitada, houve a tentativa em usinar as peças com o perfil "H" indicado pela mesma (Figura 10), entretanto, como resultado da usinagem as peças apresentaram flambagem excessiva, impossibilitando sua aplicação, dada a exigência de simetria axial de giro.

Figura 10 – Perfil de solda padrão ASTM D638.



Fonte: Adaptado de ASTM D638-02:2014.

De mesma forma, foram realizados testes de soldagem entre faces simples /planas, como indicado na Figura 11-1, porém, como resultado da própria armazenagem das barras no fornecedor, o material já apresentava pequena flambagem e quando aquecido durante o processo de soldagem, facilmente perdia sua centralidade. Sendo assim, optou-se pela aplicação de um perfil centralizador de solda, propiciando maior uniformidade e segurança ao processo.

Foram avaliados 2 perfis de solda, sendo um sem borda de contenção (Figura 11-2) e outro com borda de contenção (Figura 11-3). Os testes indicaram que, após o aquecimento do material por fricção, o perfil sem borda apresentava perda de centralização devido à falta de suporte, optando-se assim, pelo perfil 3, com borda de contenção. A Figura 11 apresenta os perfis avaliados no trabalho.

Figura 11 – Perfis de solda avaliados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Mesmo com a maior uniformidade proporcionada pelo perfil de solda escolhido, os corpos de prova apresentaram leve desalinhamento, devido a irregularidades presentes no material utilizado, já evidenciadas anteriormente, as quais foram consideradas aceitáveis para os testes propostos e foram

compreendidas como limitações da pesquisa. A Figura 12 apresenta a condição de solda obtida para o processo.

Figura 12 – Padrão de soldagem aprovado.



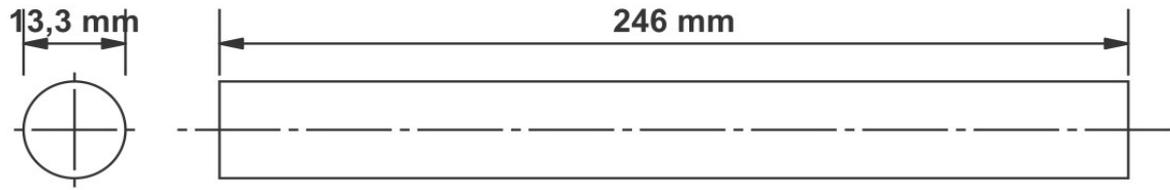
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após definição do corpo de prova final, as barras, adquiridas em metro, inteiriças, foram cortadas com sobrematerial, em observância ao valor dimensional objetivo instruído pela norma (246mm de comprimento - inteiriços) e (123mm de comprimento - metades, para posterior soldagem). Após os cortes iniciais, as peças foram faceadas individualmente com a utilização de um torno mecânico, até que apresentassem duas faces planas. As peças inteiriças foram segregadas para posterior uso e as metades foram separadas em dois grupos, para a criação das peças-macho e peças-fêmea, visando que, quando unidas, apresentassem o dimensional final idêntico ao das peças inteiriças, em concordância com a norma.

Para a união dos corpos de prova (soldagem), utilizou-se um torno mecânico com CNC, no qual, através da utilização de um mandril com adaptador acoplado, tanto na castanha como na torre, as peças foram presas para soldagem através de fricção por atrito rotacional. Os parâmetros utilizados e o processo detalhado serão apresentados posteriormente.

Os corpos de prova inteiriços com medidas são apresentados na Figura 13.

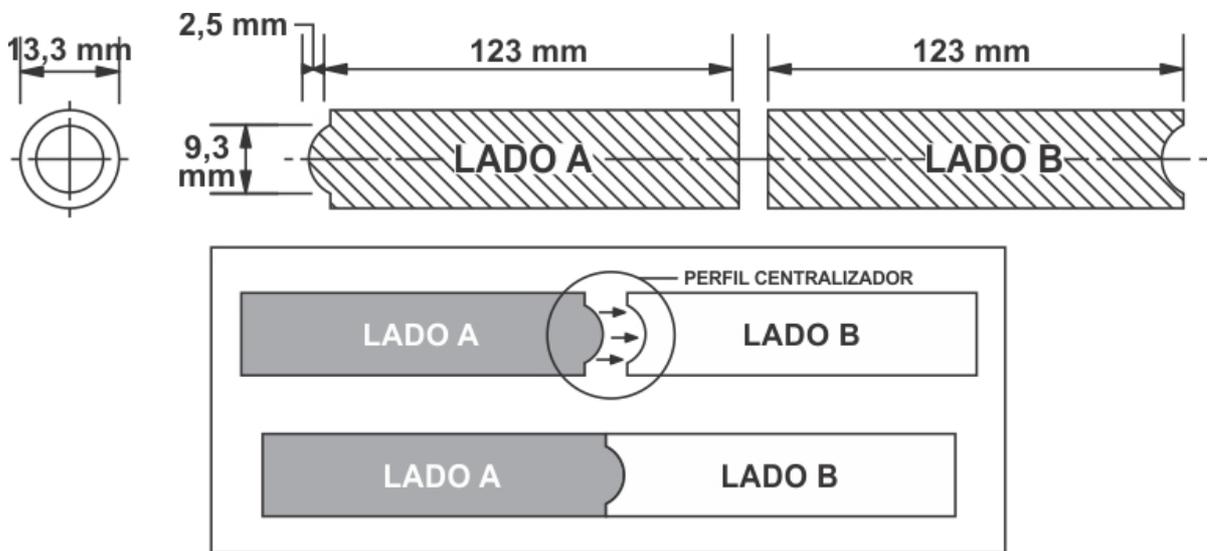
Figura 13 – Corpo de prova adaptado (inteiriço).



Fonte: Adaptado de ASTM D638-02:2014.

Os corpos de prova bidivididos e os perfis de solda são apresentados na Figura 14.

Figura 14 – Corpo de prova adaptado (bidividido).

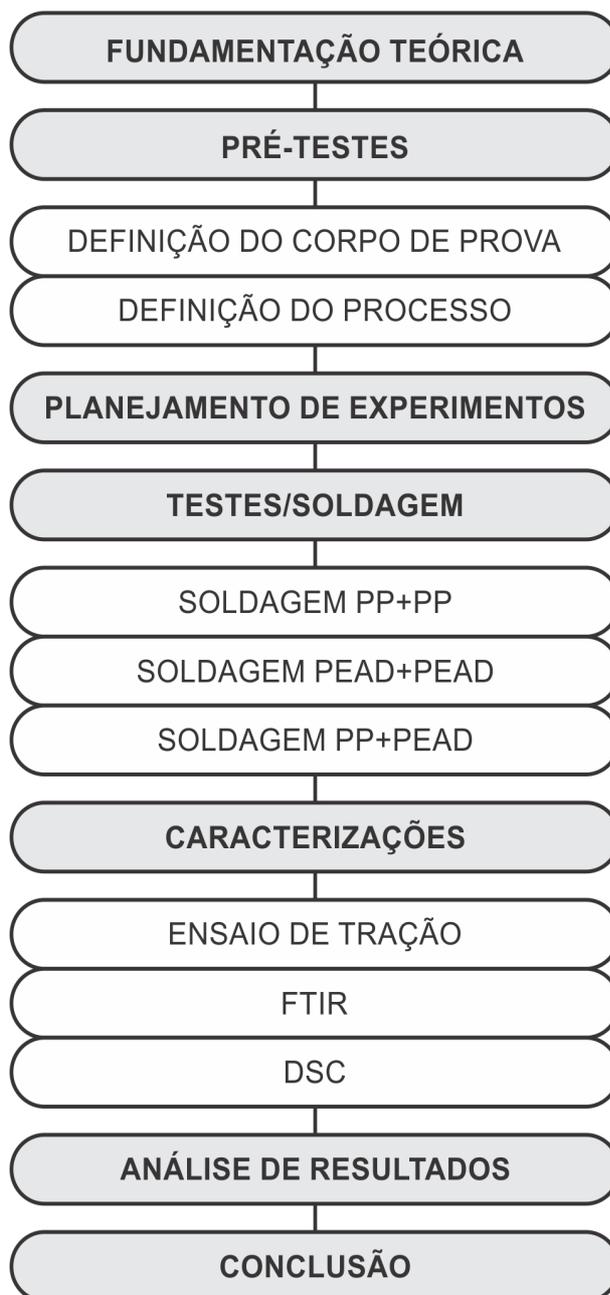


Fonte: Adaptado de ASTM D638-02:2014.

3.4 Método Utilizado

O fluxograma da Figura 15 apresenta as etapas utilizadas para o desenvolvimento deste projeto.

Figura 15 – Fluxograma do projeto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5 Pré-Testes

Utilizando como base os dados obtidos na fundamentação teórica, foram realizados testes iniciais para a definição dos parâmetros a serem avaliados, compreensão de seus limites mínimos e máximos e compatibilidade do material adquirido com o equipamento proposto.

Inicialmente, foram realizados testes em 5 corpos de prova com face lisa, em ambos os materiais (PP e PEAD) e utilizando como equipamento um torno mecânico convencional, para validação inicial do material frente ao equipamento.

Nesta fase só houve controle do parâmetro velocidade de rotação (RPM), uma vez que o objetivo era avaliar a aderência do corpo de prova e viabilidade do equipamento e não a influência dos parâmetros. O fator RPM utilizado foi baseado nos estudos de Troughton (2008) - cerca de 2000 RPM, podendo variar de 200 a 14.000 RPM - sendo definido como um valor comum de utilização para ambos os materiais. Os resultados foram corpos de prova com boa aparência e resistência ao manuseio, entretanto constatou-se que o equipamento utilizado não propiciava controle necessário para alguns parâmetros como velocidade de avanço e profundidade de avanço (contato entre corpos de prova).

3.5.1 Pré-Testes em Polipropileno (PP)

Todos os parâmetros utilizados e dados obtidos para validação do processo em polipropileno são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Pré-testes em polipropileno.

Quantidade	RPM	Avanço	Velocidade de Avanço	Resistência a tração na Ruptura (média)
Teste 1 (Pré-teste)	Variável: Uso de torno convencional com parâmetros empíricos			
5 peças	2000	-	-	-
Teste 2	Variável: Corpo de prova com perfil de solda tipo (1)			
2 peças	2000	0,3 mm	10mm/min	25 MPa
2 peças	1500	0,3 mm	10mm/min	24,8 MPa
Teste 3	Variável: Corpo de prova com perfil de solda tipo (2)			
2 peças	1500	0,3 mm	10mm/min	12,27 MPa
2 peças	2500	0,3 mm	10mm/min	21,5 MPa
2 peças	3000	0,3 mm	10mm/min	4,99 MPa
Teste 4	Variável: Corpo de prova com perfil de solda tipo (3)			
2 peças	1500	0,2 mm	10mm/min	20,9 MPa
2 peças	2500	0,2 mm	10mm/min	24,07 MPa
2 peças	1500	0,3 mm	10mm/min	18,9 MPa
2 peças	2500	0,3 mm	10mm/min	22,6 MPa

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para validação do processo em polipropileno, no segundo teste foi utilizado um torno mecânico com CNC e foram avaliados 4 corpos de prova com face plana (2 com cada combinação), no intuito de trazer maior segurança na tomada de decisão já nesta fase. Para fixação das amostras no equipamento, foram adquiridos mandris com suporte ao diâmetro do corpo de prova pretendido, uma vez que a castanha do torno, por si só, causava má centralização e deformação dos corpos de prova.

Com a utilização do torno mecânico com CNC, para todos os testes o procedimento de parada foi realizado respeitando a inércia do equipamento, uma vez que o mesmo não possibilita uma parada abrupta, diferentemente do torno convencional.

Foi definida uma velocidade de avanço média, de modo a propiciar um tempo de contato de até 5 segundos, seguindo os estudos de Troughton (2008) e Tappe e Potente (1989) e fazendo uso de duas variações de RPM, 2000 e 1500 RPM, mantendo um avanço médio de 3 décimos, buscando gerar material (rebarba)

suficiente para união das peças, porém, não excessiva a ponto de interferir no controle do processo (peças moles ou soltas). Constatou-se que os corpos de prova faceados não eram adequados devido a falta de centralização por flambagem resultante da armazenagem no fornecedor. Neste ponto, já foram realizados ensaios de tração para avaliar a aderência dos parâmetros de soldagem preestabelecidos.

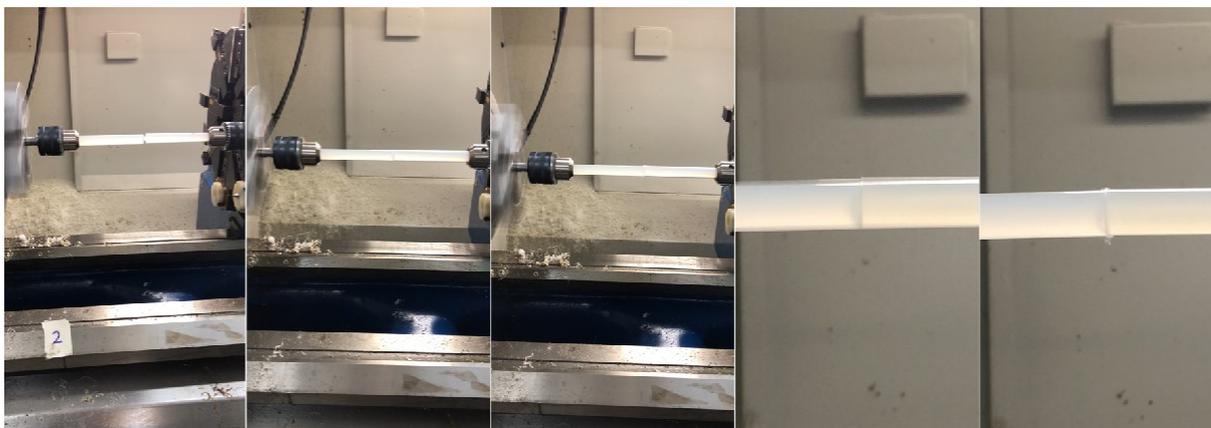
Cabe destacar que o Teste 2, realizado com face reta, sem perfil de centralização, apresentou os melhores resultados de resistência a tração na ruptura, entretanto, devido a flambagem do material e a própria decentralização natural das peças durante a solda (uma vez que não havia nada garantindo sua fixação no eixo de giro), os resultados visuais e o controle do processo não foram considerados adequados, apresentando extrema dificuldade de controle.

Visando corrigir os problemas decorrentes da flambagem do material, foram avaliadas peças com perfil de solda, conforme apresentado anteriormente, e com variação de parâmetro baixo, médio e alto de RPM, para avaliação dos efeitos. Percebeu-se que velocidades na faixa das 3000 RPM não eram adequadas ao processo, gerando resultados mecânicos inferiores e que o melhor efeito se encontrava na faixa dos 2000 RPM. Ainda, constatou-se que o perfil de solda resultou em maior confiabilidade do processo, porém não impediu o desalinhamento das peças.

Assim, na etapa 4 foram avaliadas peças com novo perfil de solda e variação no avanço e RPM das peças, dentro dos melhores limites previamente identificados, as quais obtiveram resultados mais homogêneos e maior confiabilidade no processo, sendo escolhidos como parâmetros para os ensaios finais.

A Figura 16 apresenta imagens para a condição final de solda para polipropileno:

Figura 16 – Processo de solda em polipropileno.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5.2 Pré-Testes em polietileno de alta densidade

A validação do processo em polietileno de alta densidade ocorreu após a definição do processo em polipropileno, de forma que não foram necessários testes relativos ao perfil de soldagem. Ainda, esse perfil foi mantido igual para uma comparação dos materiais.

Quanto aos parâmetros de soldagem para o PEAD, também foram realizados diversos pré-testes. Como os testes iniciais em torno convencional, apontados anteriormente, apresentaram qualidade satisfatória, foram realizados diversos testes com maior controle dos parâmetros, utilizando o torno mecânico com CNC. Inicialmente foram testados os mesmos parâmetros do processo em polipropileno, os quais geraram uma solda fraca, rompendo-se facilmente ao manuseio ou mesmo não soldando.

Visando melhorar a qualidade da solda, foram testados valores baixos e altos para RPM (150, 300, 1500, 2000 e 2500), avanço (0,2mm, 0,3 mm, 2mm e 3 mm) e até mesmo velocidade de avanço (5, 10 ou 15 mm/min), visando cobrir todas as respostas possíveis aos parâmetros, dentro das possibilidades permitidas pelo equipamento. As peças ensaiadas não apresentaram soldagem com parâmetros altos ou baixos.

Sendo assim, optou-se pela utilização dos mesmos parâmetros do processo em polipropileno, os quais apresentaram soldagem para alguns dos corpos de prova

em pead, ainda que abaixo do esperado, e abrangeram uma faixa de valores média para os parâmetros, tornando possível avaliar o efeito de sua variação de modo focal, bem como a sensibilidade do processo.

Todos os parâmetros utilizados e dados obtidos para validação do processo em polietileno de alta densidade são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Pré-testes do projeto em polietileno de alta densidade.

Quantidade	RPM	Avanço	Velocidade de Avanço	Resistência a tração na Ruptura (média)
Teste 1	Variável: Uso de torno convencional com parâmetros empíricos			
5 peças	2000	-	-	5 MPa
Teste 2	Variável: Torno CNC (Corpo de prova com perfil de solda tipo (3))			
2 peças	2500	0,3 mm	10mm/min	1 MPa
2 peças	2500	0,2 mm	10mm/min	-
1 peça	2500	2 mm	10mm/min	-
1 peça	2500	3 mm	10mm/min	-
1 peça	2500	0,3 mm	15mm/min	-
1 peça	2500	0,3 mm	5mm/min	-
1 peça	2000	0,3 mm	10mm/min	-
1 peça	1500	0,3 mm	10mm/min	-
1 peça	1500	0,2 mm	10mm/min	-
1 peça	1500	2 mm	10mm/min	-
1 peça	1500	3 mm	10mm/min	-
1 peça	1500	0,3 mm	15mm/min	-
1 peça	1500	0,3 mm	5mm/min	-
1 peça	300	0,3 mm	10mm/min	-
1 peça	150	0,3 mm	10mm/min	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5.3 Pré-testes polipropileno com polietileno de alta densidade

Para validação do processo de solda de polipropileno com polietileno de alta densidade, o procedimento de testes seguiu a mesma ordem dos testes em PEAD. Nenhum corpo de prova apresentou soldagem com qualquer uma das condições testadas.

Posteriormente, foram realizados novos testes em torno convencional, visando entender de forma mais manual as variáveis de possível interferência no processo e que não estavam sendo atendidas. De mesma maneira, as peças não apresentaram soldagem, o que poderia ser explicado por seus pontos de fusão muito diferentes e pelas limitações de parâmetros de processo, corpos de prova e materiais disponíveis neste estudo. Sendo assim, sugere-se avaliar em um trabalho futuro a soldagem entre materiais dissimilares, concentrando-se neste trabalho na soldagem entre mesmos materiais (PP+PP e PEAD+PEAD). Todos os parâmetros utilizados e dados obtidos para validação do processo em polietileno de alta densidade com polipropileno são apresentados pela Tabela 9.

Tabela 9 – Pré-testes do projeto em Polietileno de Alta Densidade e Polipropileno.

Quantidade	RPM	Avanço	Velocidade de Avanço	Resistência a tração na Ruptura (média)
Teste 1	Variável: Torno CNC (Corpo de prova com perfil de solda tipo (3))			
1 peça	2500	0,3 mm	10mm/min	-
1 peça	2500	0,2 mm	10mm/min	-
1 peça	2500	2 mm	10mm/min	-
1 peça	2500	3 mm	10mm/min	-
1 peça	2500	0,3 mm	15mm/min	-
1 peça	2500	0,3 mm	5mm/min	-
1 peça	2000	0,3 mm	10mm/min	-
1 peça	1500	0,3 mm	10mm/min	-
1 peça	1500	0,2 mm	10mm/min	-
1 peça	1500	2 mm	10mm/min	-
1 peça	1500	3 mm	10mm/min	-
1 peça	1500	0,3 mm	15mm/min	-
1 peça	1500	0,3 mm	5mm/min	-
1 peça	300	0,3 mm	10mm/min	-
1 peça	150	0,3 mm	10mm/min	-
Teste 2	Variável: Torno convencional (Corpo de prova com perfil de solda tipo (3))			
1 peça	2000	0,3 mm	-	-
1 peça	2000	0,2 mm	-	-
1 peça	1500	0,3 mm	-	-
1 peça	1500	0,2 mm	-	-
1 peça	1500	-	-	-
1 peça	2000	-	-	-
1 peça	1000	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 Planejamento Experimental e Estatístico

Para este estudo, optou-se pela aplicação de um projeto fatorial 2^2 , na qual existem 2 fatores de análise com 2 níveis cada, sendo um nível considerado baixo e outro alto, mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Fatorial 2^2 para análise estatística dos experimentos.

FATORES	NÍVEIS	
	+	-
RPM	2500	1500
AVANÇO	0,3	0,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

O objetivo do projeto foi determinar quais níveis dos fatores RPM e Avanço possuem influência na resposta resistência mecânica, realizando uma análise estatística dos resultados. Outros fatores poderiam ter sido considerados (perfil de solda, mecanismo de parada, pressão, etc.), mas não foram incluídos pois não são controláveis através das ferramentas disponíveis para este estudo ou seus efeitos são esperados serem muito pequenos, com base nos pré-testes já realizados.

Em cada replicação do experimento todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores foram investigadas, permitindo avaliar os efeitos individuais de cada fator e determinar se os mesmos interagem. As combinações possíveis são descritas na Tabela 11.

Tabela 11 – Combinações níveis x fatores

FATORES	NÍVEIS	
	AVANÇO 0,3mm	AVANÇO 0,2mm
RPM 1500	COMBINAÇÃO A	COMBINAÇÃO B
RPM 2500	COMBINAÇÃO C	COMBINAÇÃO D

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram realizadas 5 réplicas de cada tratamento, visando reduzir ao máximo o erro experimental. Ainda, a ordem das corridas foi determinada aleatoriamente. Através da listagem de todas as amostras (tratamentos e réplicas) a serem realizadas, estas foram numeradas de 1 a 60 (valor total de amostras), e utilizou-se

uma tabela de números aleatórios, disponibilizada por Stevenson (1981), a qual foi lida de cima para baixo e da esquerda para direita, considerando duplas de números, a contar da esquerda para a direita, até o final da tabela ou até que todas as combinações fossem esgotadas. No caso de números acima de 60 ou repetidos, considerou-se apenas o primeiro número da dupla. A ordem de ensaios aleatorizada é apresentada no Apêndice C, ao final deste trabalho.

3.7 Caracterização

As caracterizações dos materiais foram realizadas de acordo com os métodos descritos a seguir.

3.7.1 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Devido a obtenção do material em estado já processado por extrusão, foram avaliadas amostras dos lotes via Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) considerada uma das mais relevantes técnicas para a caracterização de polímeros, identificando e/ou determinando características estruturais, principalmente grupos funcionais e ligações presentes na amostra (UFRGS, 2018).

As análises foram realizadas em espectrofotômetro Perkin Elmer Frontier com ATR acoplado, localizado no Laboratório de Caracterização de Polímeros do Instituto Federal de Educação e Tecnologia do Rio Grande do Sul, em Farroupilha.

Os espectros foram obtidos através do programa Spectrum e a identificação dos polímeros foi feita por comparação dos espectros das amostras com espectros padrão contidos na biblioteca do laboratório.

3.7.2 Resistência à tração

Os ensaios de resistência a tração foram realizados conforme norma ASTM D638 adaptada, com corpos de prova tipo III cilíndricos, com espessura de 13,3mm, sem perfil gravata, devido a limitações previamente explicadas. Devido a tais limitações, foram realizados pré-testes para avaliar a segurança da garra quanto a fixação das peças, evitando erros experimentais.

Os ensaios foram realizados em corpos de prova soldados e inteiriços, no intuito de avaliar suas diferenças nos critérios de resistência e comportamento mecânico. Uma vez que as peças soldadas não possuíam perfil gravata, os corpos de prova inteiriços também foram avaliados sem preparação especial, garantindo a mesma condição comparativa.

O ensaio foi realizado utilizando-se o equipamento EMIC DL 2000 em sala climatizada à temperatura ambiente e umidade relativa do ar de 50 ± 5 %. A velocidade do ensaio foi de 50 mm/min com célula de carga Trd24 com capacidade de 500 kgf. Foram utilizadas 5 amostras para cada material, com exceção das peças soldadas em polietileno de alta densidade, nas quais houve ocorrência de solda em apenas duas peças, as quais foram devidamente analisadas. As peças com a combinação PP+PEAD não apresentaram solda e, portanto, não foram avaliadas. Todos os ensaios foram realizados no IFRS Campus Caxias do Sul.

3.7.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

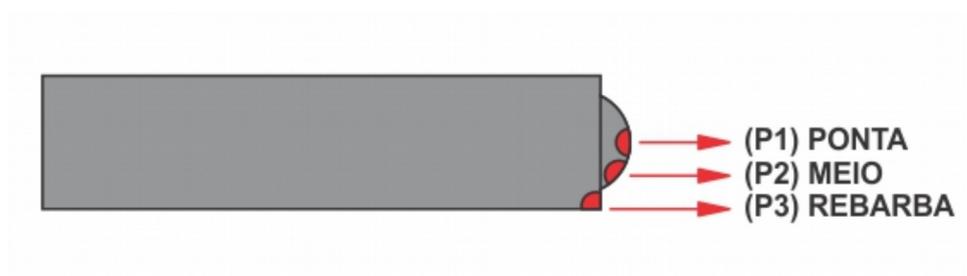
Para este estudo, as curvas de DSC foram utilizadas para medir as temperaturas de interesse (temperatura de fusão), características térmicas do material (calor de fusão) e análise de modificações do material durante o processamento (percentual de cristalinidade), de modo a avaliar a influência dos diferentes parâmetros testados na qualidade da solda e reforçando os resultados obtidos pelas análises mecânicas.

O ensaio foi realizado tendo como base a norma ASTM D3418-15 (*Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry*) e estudo de Costa et.al (2015). A determinação do grau de cristalinidade foi calculada com base em Canevarolo (2002).

Para esta análise utilizou-se o analisador térmico DSC 6000, da Perkin Elmer, localizado no Laboratório de Caracterização de Polímeros do Instituto Federal de Educação e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) de Farroupilha. O calorímetro diferencial de varredura operou a uma taxa de aquecimento de 40°C/min, isoterma de 1 minuto a 30 °C e aquecimento de 30°C até 210°C, com massa das amostras entre 3 e 4,5 mg e utilizando nitrogênio como gás de arraste inerte.

Para a obtenção das amostras pós preparação/soldagem, foram realizados cortes com o auxílio de uma pinça e um bisturi, livres de contaminantes, em 3 pontos da zona de soldagem: ponta, bordas (rebarba) e na zona entre estes dois hemisférios (meio). Para a amostra do material base e do material extrusado, o corte foi extraído das extremidades, facilitando o manuseio. As zonas de extração são representadas pela Figura 17.

Figura 17 – Preparação e extração de amostras para DSC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do software do equipamento, foi determinada a temperatura e entalpia de fusão de todos os picos. Utilizando os pontos da linha de base que delimitaram as áreas integradas foi possível obter os valores de Δh_f para as amostras analisadas.

A cristalinidade do polímero foi calculada segundo a equação 2:

$$X_c\% = (\Delta h_f / \Delta H_F^\circ) * 100 \quad \text{Eq. (2)}$$

$X_c\%$ representa o percentual de cristalinidade, Δh_f o calor de fusão da amostra (área da curva endotérmica) e ΔH_F° o calor de fusão para os polímeros teoricamente 100% cristalinos. Os valores de ΔH_F° utilizados foram de 286,6 J/g para PEAD (BODOR, 1991) e 209 J/g para PP (OLIVEIRA et al., 2013).

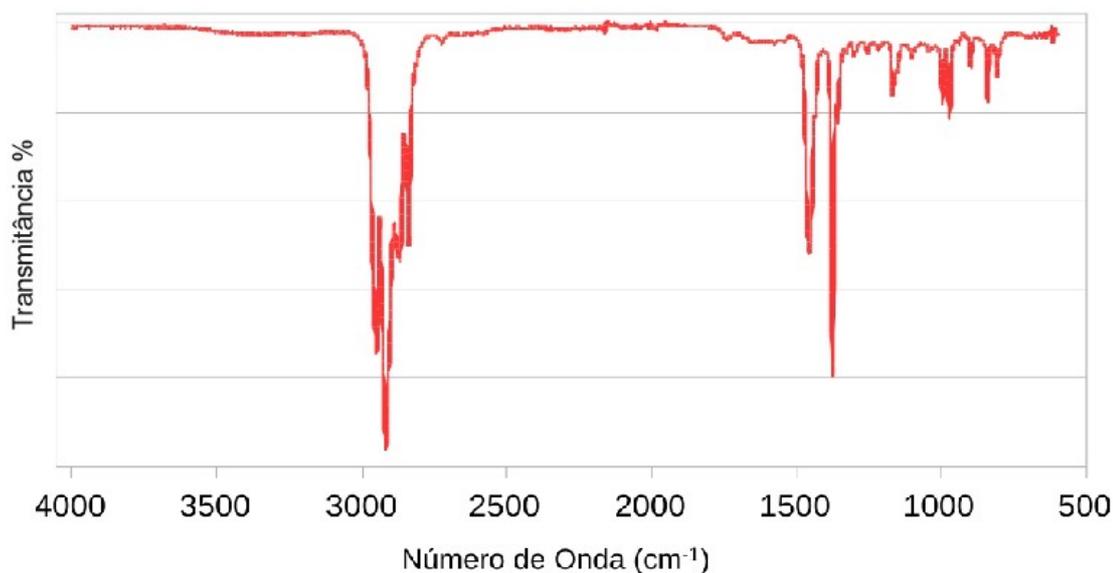
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são tratados os resultados obtidos e suas respectivas discussões.

4.1 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 18 apresenta o espectro de infravermelho para o PP, visando identificar os números de onda que se situam nas regiões espectrais características para o material.

Figura 18 – Espectro de infravermelho do PP.

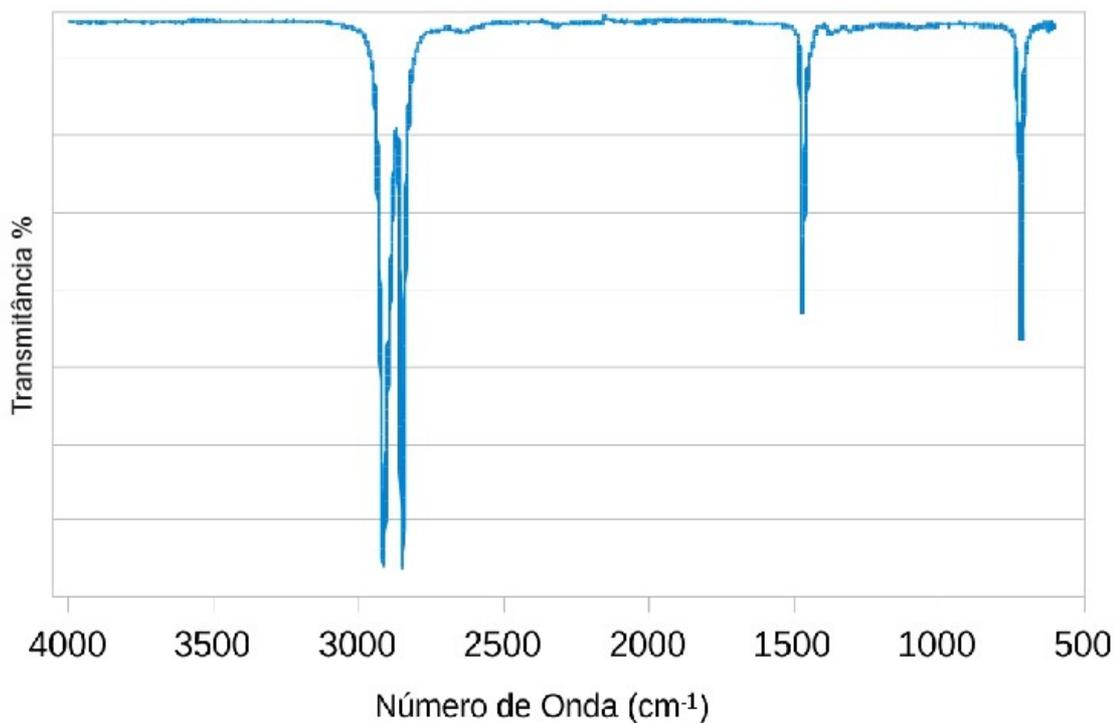


Fonte: Elaborado pelo autor.

O espectro de FTIR para PP apresenta 4 bandas na região entre 2950 - 2830 cm⁻¹, comportamento relatado também por Jorge e Neves (2016), pois além da ligação CH₂ da cadeia principal, o PP possui o grupo metila (CH₃) a cada 2 ligações CH₂, o qual, por repetir-se ao longo da cadeia, também transmite radiação, tanto para as deformações axiais quanto para as angulares, as quais são características para polipropileno.

A Figura 19 apresenta o espectro de infravermelho para o PEAD.

Figura 19 – Espectro de infravermelho do PEAD.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme relatado por Torres (2007), o espectro apresenta picos correspondentes a três regiões de transmitância, cada uma relacionada a um modo de vibração. Um pico de valência ou *stretching*, com número de onda previsto na faixa de 2950 e 2850 cm⁻¹; um pico *bending*, com número previsto de onda na faixa entre 1350 e 1450 cm⁻¹ e um pico torção ou *rocking*, com número de onda de aproximadamente 700 cm⁻¹, os quais são característicos para polietileno de alta densidade.

4.2 Ensaio de resistência a tração

A resistência a tração para as amostras confeccionadas em PP e PEAD é apresentada nas Tabelas 12 e 13, respectivamente.

Tabela 12 – Resultados de resistência a tração em PP.

Resistência a tração na Ruptura (PP)							
COMBINAÇÃO	#1 (MPa)	#2 (MPa)	#3 (MPa)	#4 (MPa)	#5 (MPa)	MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)
A (1500 + 0,3mm)	22,80	19,30	23,20	23,90	17,90	21,42	2,65
B (1500 + 0,2mm)	21,00	18,60	7,30	12,10	24,2	16,64	6,85
C (2500 + 0,3mm)	19,90	23,50	16,80	18,60	16,50	19,06	2,84
D (2500 + 0,2mm)	22,20	24,30	21,00	24,00	19,50	22,20	2,02
INTEIRIÇO	19,20	19,40	20,3	19,4	-	19,50	0,45
Resistência Máxima a tração (PP)							
INTEIRIÇO	27,5	27,4	27,7	26,7	-	27,32	0,43

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Resultados de resistência a tração em PEAD.

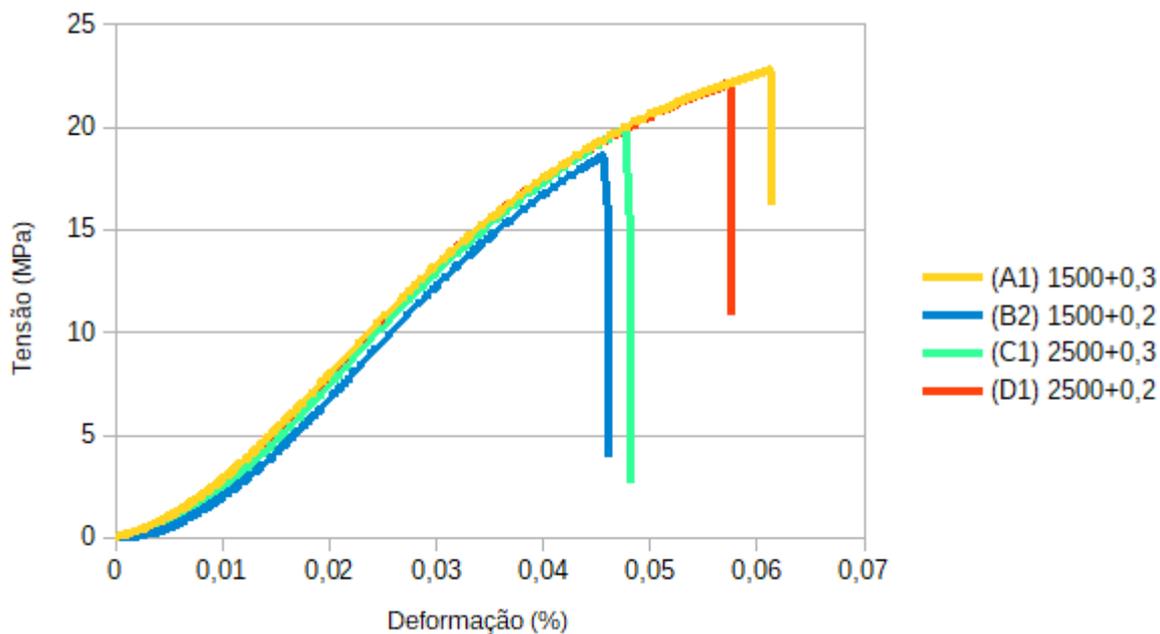
Resistência a tração na Ruptura (PEAD)							
COMBINAÇÃO	#1 (MPa)	#2 (MPa)	#3 (MPa)	#4 (MPa)	#5 (MPa)	MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)
D (2500 + 0,2mm)	1,10	1,07	-	-	-	1,08	0,02
INTEIRIÇO	5,90	7,7	7,90	7,20	-	7,24	0,79
Resistência Máxima a tração (PEAD)							
INTEIRIÇO	19,30	19,00	19,00	18,60	-	18,97	0,28

*OBS.: nas demais combinações não ocorreu soldagem.

Fonte: Elaborado pelo autor.

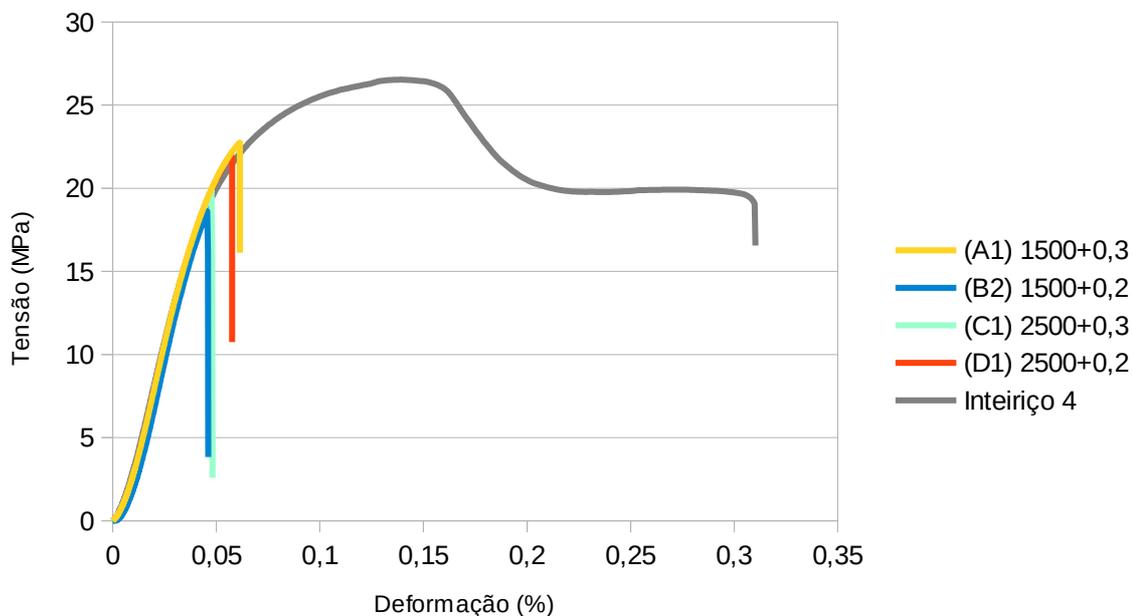
O diagrama tensão x deformação para as juntas soldadas em PP, bem como para os corpos de prova inteiriços (sem solda) é apresentado nas Figuras 20 e 21. Para melhor clareza e organização, somente uma amostra de cada combinação está apresentada, devidamente identificada e escolhida por aproximação do valor médio de resistência a tração na ruptura para aquela combinação (A, B, C ou D). Os gráficos contendo as demais replicações estão disponíveis no Apêndice para análise.

Figura 20 – Amostras Compiladas PP – Soldadas.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 – Amostras Compiladas PP – Soldadas x Inteiriças.



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme Tabelas 12 e 13 e Figura 21, é possível constatar que, diferentemente do material inteiriço, o limite de ruptura para os corpos de prova

soldados também representa sua resistência máxima à tração, em virtude do baixo percentual de deformação antes da quebra. Este fenômeno explica os valores mais baixos para tração na ruptura das peças inteiriças que, por apresentarem deformação plástica, apresentaram diminuição da área na seção do corpo de prova antes da quebra, influenciando o valor obtido de resistência a tração na ruptura, dado que, para o cálculo da tensão é considerada apenas a área inicial.

De mesmo modo, percebe-se que as peças soldadas romperam antes do limite de escoamento, não tendo suportado nenhum tipo de deformação plástica. Este fenômeno pode ser explicado pelas baixas forças de ligação presentes na solda frente ao material preprocessado (inteiriço), o que permitiu um bom comportamento das peças dentro do regime elástico, mas não suficiente para deformar o corpo de prova fora da região de solda quando submetido a uma deformação permanente (plástica).

Os valores obtidos de resistência a tração na ruptura foram avaliados através da análise de variância (ANOVA), que visa identificar a importância de um ou mais fatores, comparando as médias das variáveis de resposta nos diferentes níveis de fator. A hipótese nula afirma que todas as médias de população (médias de nível de fator) são iguais, enquanto a hipótese alternativa afirma que, pelo menos uma, é diferente.

Os fatores escolhidos para análise foram RPM e profundidade de avanço e, dentre os diversos fatores que influenciam o processo de solda, espera-se que estes fatores sejam os mais significativos. Os demais fatores não contemplados por esta pesquisa são considerados resíduos. O teste F (Teste Fisher) descreve o quanto os dados são representativos (o quanto influenciam, frente aos demais fatores não considerados).

Tabela 14 – Análise de variância para as amostras de PP

FONTE DE VARIACÃO	SS TOTALS (SST)	DF	MS	F0	P-VALUE	F CRÍTICO
RPM	3,3620000	1	3,36200000000008	0,203271	0,658144	4,49399848
Avanço	12,8000000	1	12,7999999999993	0,773905	0,392033	4,49399848
Interação	78,4080000	1	78,4080000000004	4,740651	0,044771	4,49399848
Erro	264,6320000	16	16,5394999999999			
Total	359,2020000	19				

	F0		F CRÍTICO		RESPOSTA
F0 RPM:	0,203270957405	<	4,49399847766636	?	FALSO
F0 Avanço:	0,773904894344	<	4,49399847766636	?	FALSO
F0 Interação:	4,740651168415	>	4,49399847766636	?	VERDADEIRO

Fonte: Elaborado pelo autor

Através da análise da tabela ANOVA (Tabela 14) constatou-se que não há diferença significativa para os fatores RPM e profundidade de Avanço, mas há influência da interação entre os fatores.

Entretanto, o teste ANOVA é utilizado para avaliar se há diferença entre os tratamentos, mas não informa qual tratamento é estatisticamente diferente. Sendo assim, utilizou-se o teste de Tukey (Tabela 15) para analisar qual combinação de fatores obteve o melhor desempenho através de uma comparação de médias. Uma vez que há interação entre os fatores, todas as médias de todos os tratamentos foram comparadas entre si.

Tabela 15 – Teste Tukey para as amostras de PP

Teste Tukey						
RPM	AVANÇO	MÉDIAS	Yi-Yj			≠
2500 RPM	0,3 mm	19,06	1-2	-2,36	< 5,46	Igual
1500 RPM	0,3 mm	21,42	1-3	-3,14	< 5,46	Igual
2500 RPM	0,2 mm	22,2	1-4	2,42	< 5,46	Igual
1500 RPM	0,2 mm	16,6	2-3	-0,78	< 5,46	Igual
			2-4	4,78	< 5,46	Igual
			3-4	5,56	> 5,46	Diferente

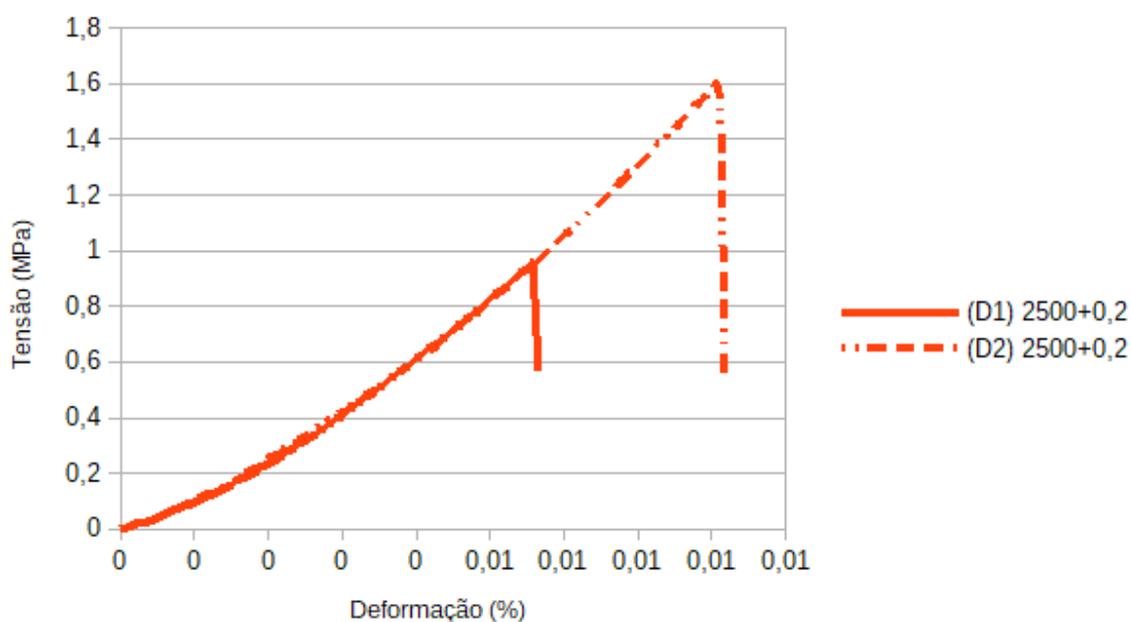
Fonte: Elaborado pelo autor

O teste Tukey revela que somente as médias 3 e 4 são estatisticamente diferentes. Percebe-se que ambas as médias utilizaram um avanço de 0,2mm e representam, sucessivamente o maior e o menor valor de resistência a tração na ruptura para polipropileno. Tendo em vista que existe interação entre os fatores, não é possível concluir, somente com base neste teste, que uma maior RPM resulte em

melhores propriedades mecânicas, mas sim que, neste caso, uma RPM maior utilizando uma profundidade de avanço de 0,2mm resulta em um aumento nas propriedades do material frente ao mesmo avanço utilizando uma RPM menor (1500).

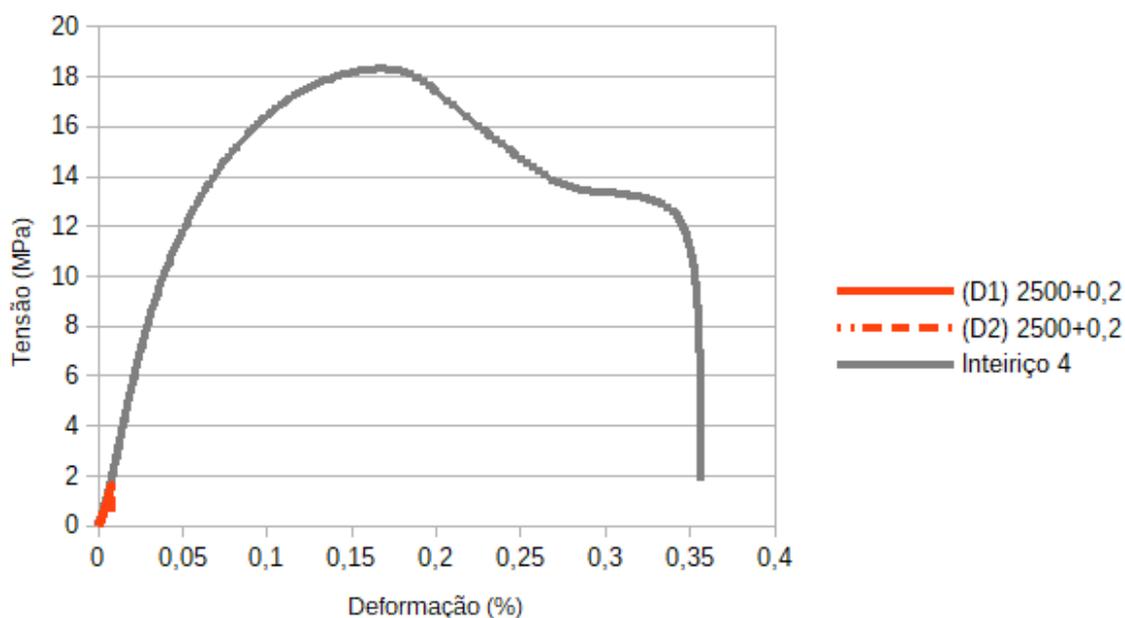
Nas Figuras 22 e 23 pode-se avaliar o diagrama tensão x deformação para as juntas soldadas em PEAD, bem como para os corpos de prova inteiros (sem solda). Uma vez que, somente dois corpos de prova obtiveram soldagem, ambos são apresentados e posteriormente comparados com o corpo de prova inteiro cuja resistência a tração na ruptura mais se aproxima da média das replicações. Os demais gráficos são disponibilizados no Apêndice para análise.

Figura 22 – Amostra Soldada – PEAD (D)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Amostras compiladas PEAD – Soldadas x Inteiriças



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo somente dois corpos de prova com presença de soldagem e ambos com o uso de mesmos parâmetros, não existem dados suficientes para realizar nenhum tipo de comparativo estatístico a esse respeito.

Através da análise do diagrama tensão x deformação dos corpos de prova inteiriços frente aos corpos de prova soldados, é possível constatar que as peças soldadas resultaram em uma união frágil, evidenciada graficamente junto a curva referente ao material inteiriço. De mesma forma, os corpos de prova apresentaram somente deformação elástica, ainda que muito pequena.

Para este tipo de caso, a realização do ensaio de tração não fornece muitos dados valiosos, visto que o comportamento observado não pode ser comparado ou não é significativo estatisticamente. Assim verifica-se que os parâmetros de soldagem utilizados não propiciaram uma união forte com boas propriedades ao material.

4.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Nos ensaios realizados por calorimetria exploratória diferencial (DSC), analisou-se a influência de todo o processo de preparação e soldagem na cristalinidade e temperatura de fusão na região de solda.

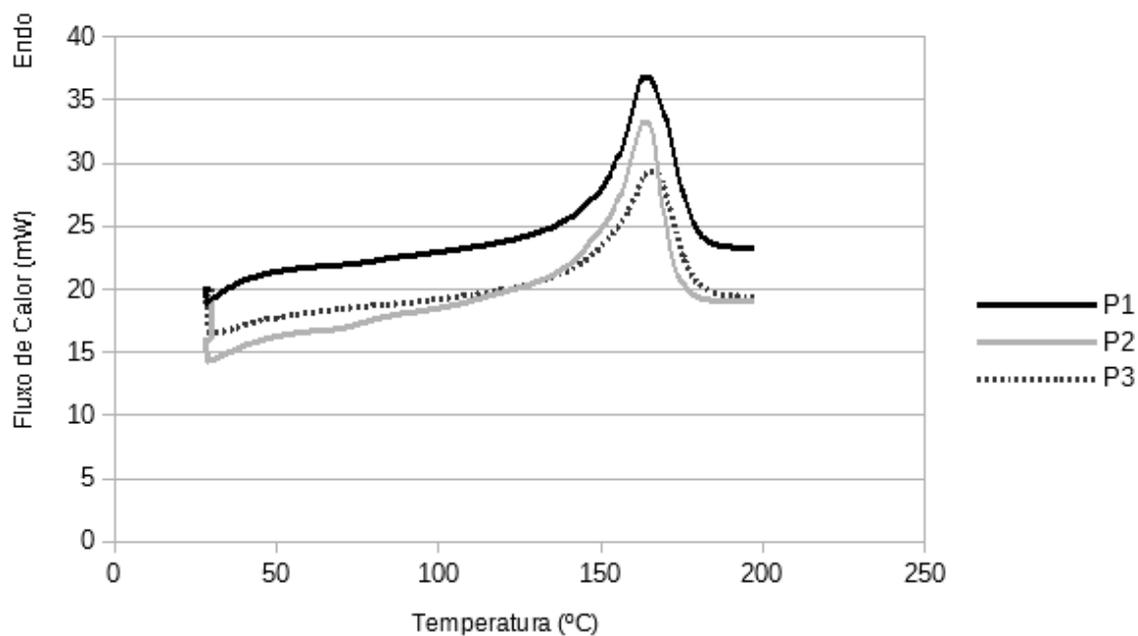
Para os corpos de prova soldados, analisou-se somente o primeiro ciclo de aquecimento, visto que é nele que encontram-se as propriedades de interesse para este estudo. A segunda corrida é relativa ao material e não traz dados a respeito do processo de solda.

Também foram analisados: (1) os corpos de prova usinados com perfil de centralização (sem solda), visando entender os efeitos da preparação nas propriedades na região da solda; (2) o material adquirido em barra, uma vez que as mesmas foram obtidas por processo de extrusão, o qual promove orientação molecular e aumento da formação de cristais (PEACOCK, 2000 e BARROS et BRANCIFORTI, 2018) e (3) o material base (PP e PEAD padrão), analisando a segunda corrida de aquecimento e eliminando fatores externos de preparação ou processamento.

Desta forma, foi possível realizar uma leitura mais precisa da influência da soldagem nas propriedades finais das peças soldadas, tendo como referência os efeitos de processamento e preparação já presentes nos corpos de prova.

As Figuras 24 e 25 apresentam o comportamento térmico das amostras em PP e PEAD durante o primeiro ciclo de aquecimento. Somente as amostras da combinação A foram apresentadas para melhor compreensão visual, sendo que os dados relevantes a respeito de cada combinação foram tabelados (Tabela 17 e 18) e os demais gráficos, para cada combinação estão disponíveis no Apêndice. Para todos os ensaios, verificou-se a presença de apenas um evento endotérmico.

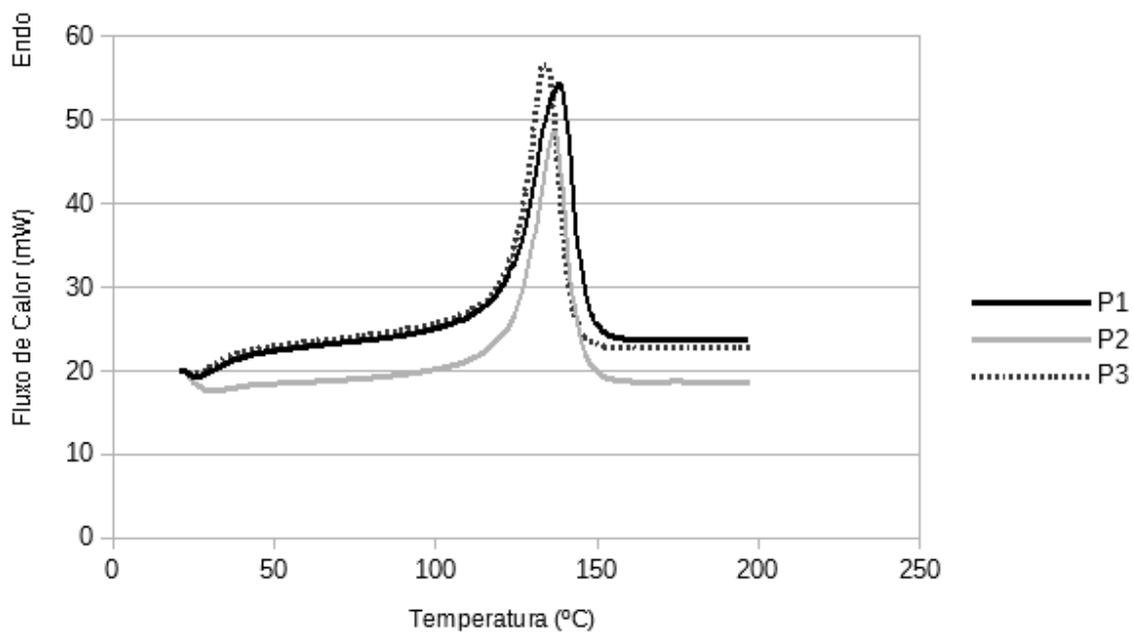
Figura 24 – Análise de DSC PP



*P1=Ponta / P2=Meio / P3=Rebarba

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Análise de DSC PEAD



*P1=Ponta / P2=Meio / P3=Rebarba

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do DSC foram determinadas as temperaturas de fusão (T_m) e o percentual de cristalinidade (X_c) dos polímeros. Os valores obtidos para PEAD são apresentados pela Tabela 16.

Tabela 16 – T_m e Percentual de Cristalinidade ($X_c\%$) para amostras em PEAD.

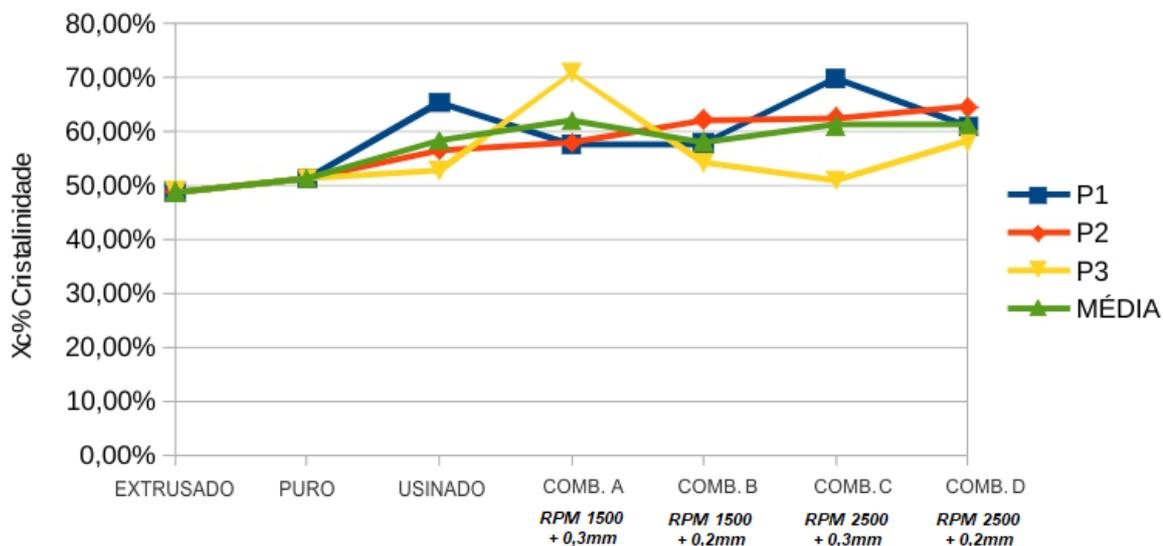
		PEAD					
		T_m (°C)	Δh_f (J/g)	ΔH_f^0 (J/g)	X_c (%)	MÉDIA	DP
PEAD EXTRUSADO (BARRAS ADQUIRIDAS)							
AMOSTRA 1	P1	134,27	139,7037	286,6	48,75%	48,75%	-
PEAD PURO (SEGUNDO AQUECIMENTO)							
AMOSTRA 1	P1	140,31	146,77	286,6	51,21%	51,21%	-
USINADO							
AMOSTRA 1	P1	137,89	186,76	286,6	65,16%		
	P2	137,66	162,01	286,6	56,53%	58,12%	6,40%
	P3	138,3	150,96	286,6	52,67%		
COMBINAÇÃO A (RPM 1500 + 0,3mm)							
AMOSTRA 1	P1	138,76	164,5352	286,6	57,41%		
	P2	137,61	165,6118	286,6	57,78%	61,96%	7,57%
	P3	134,12	202,6215	286,6	70,70%		
COMBINAÇÃO B (RPM 1500 + 0,2mm)							
AMOSTRA 2	P1	138,94	165,2158	286,6	57,65%		
	P2	136,17	177,8739	286,6	62,06%	57,95%	3,97%
	P3	135,7	155,1825	286,6	54,15%		
COMBINAÇÃO C (RPM 2500 + 0,3mm)							
AMOSTRA 2	P1	138,67	199,8275	286,6	69,72%		
	P2	136,78	179,0175	286,6	62,46%	61,03%	9,49%
	P3	142,3	145,9149	286,6	50,91%		
COMBINAÇÃO D (RPM 2500 + 0,2mm)							
AMOSTRA 1	P1	136,2	174,0894	286,6	60,74%		
	P2	134,85	184,5297	286,6	64,39%	61,07%	3,16%
	P3	133,58	166,4645	286,6	58,08%		

*P1= Ponta; P2 = Meio; P3 = Rebarba; Δh_f = calor de fusão da amostra;
 ΔH_f^0 = calor de fusão para os polímeros teoricamente 100% cristalinos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo em vista que somente a combinação D apresentou algum grau de soldagem, é possível constatar que os valores de cristalinidade encontrados ponto a ponto para a combinação D assemelham-se aos valores da combinação B, que não obteve soldagem. Entretanto, analisando o desvio padrão entre ambas as combinações, percebe-se que a combinação D apresentou maior homogeneidade entre os pontos, o que sugere um processamento mais uniforme, contribuindo para a obtenção da solda. O gráfico presente na Figura 26 facilita a interpretação destes dados.

Figura 26 – Xc% Cristalinidade PEAD



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em valores médios, percebe-se que os valores de B e D distanciam-se e o valor de C torna-se o mais próximo em comparação aos demais. Tal mudança justifica-se pelo desvio padrão de ambas as combinações (B e C), que tornam os resultados muito diversos nos pontos medidos, o que sugere que a soldagem para PEAD possui elevado grau de sensibilidade para mudanças processuais. Ainda, percebe-se grande influência de todas as etapas de preparação na cristalinidade das peças, especialmente a etapa de usinagem, que provocou um aumento significativo na cristalinidade, comparativamente ao material extrusado.

Outro dado relevante é que, para as amostras analisadas, o processo de extrusão acabou por reduzir a cristalinidade (48,75%), quando comparado ao material puro (51,21%), um efeito oposto ao esperado para este tipo de processo, uma vez que o processo de extrusão promove estiramento e maior alinhamento das cadeias, resultando em um aumento do grau de cristalinidade, efeito similar ao encontrado por Lorandi (2016).

Verificou-se também que, ainda que o gráfico de médias sugira que todas as combinações apresentam cristalinidade muito superior à do material base, analisando ponto a ponto, percebe-se mais uma vez que a amostra D possui maior linearidade e a maior proximidade com os valores de cristalinidade em relação ao material base. Já para os demais corpos de prova, ainda que alguns apresentem ao

menos um ponto muito similar ao do material base, contém regiões com cristalinidade muito superior, o que, tendo em vista que não houve soldagem para estas peças, indicaria que o atrito provocado pelo processo atuou como um tratamento térmico muito mais do que como um mecanismo de promoção de adesão.

Ainda, segundo Wise (1999), a densidade do polímero também afeta a resistência mecânica da solda. Polímeros com maior densidade resultam em maiores regiões cristalinas em sua estrutura e possuem faixa de temperatura de fusão mais estreita do que para polímeros com menor cristalinidade. Por esta razão, em aplicações de soldagem, a zona afetada pelo calor é menor para materiais com maior densidade, levando a soldas mais frágeis e com maior presença de falhas, como no caso do PEAD, que apresenta densidade na faixa de $0,94 - 0,97 \text{ g/cm}^3$ (PEACOCK, 2000), frente a densidade do PP que é de $0,9 \text{ g/cm}^3$ (KARIAN, 2003).

Outro aspecto relevante e que não pode ser controlado neste estudo é o tempo de parada. Segundo Tappe e Potente (1989), em processos de soldagem por fricção para PEAD, a parada abrupta do processo de soldagem produz juntas de maior qualidade do que em processos com parada contínua. Uma vez que a estabilidade do processo é atingida, o movimento rotacional deixa de proporcionar aumento na resistência da solda.

Já para a cristalinidade em PP, todos os corpos de prova apresentaram soldagem e, uma vez que há indicação de interação entre os fatores e que o melhor balanço de propriedades mecânicas está presente nas combinações A e D, é interessante analisar quais fatores influenciaram estes resultados.

A Tabela 17 apresenta os valores de T_m e Cristalinidade ($X_c\%$) ponto a ponto para as amostras em PP.

Tabela 17 – Tm e Percentual de Cristalinidade (Xc%) para amostras em PP.

		PP					
		Tm (°C)	Δh_f (j/g)	ΔH_f^0 (j/g)	Xc (%)	MÉDIA	DP
PP EXTRUSADO (BARRAS ADQUIRIDAS)							
AMOSTRA 1	P1	163,28	62,6436	209	29,97%	29,97%	-
PP PURO (SEGUNDO AQUECIMENTO)							
AMOSTRA 1	P1	162,02	83,32	209	39,87%	39,87%	-
USINADO							
	P1	161,36	87,93	209	42,07%		
AMOSTRA 1	P2	163,43	74,21	209	35,51%	36,31%	5,40%
	P3	164,72	65,54	209	31,36%		
COMBINAÇÃO A (RPM 1500 + 0,3mm)							
	P1	164,64	80,4589	209	38,50%		
AMOSTRA 4	P2	164,63	68,3955	209	32,73%	32,05%	6,82%
	P3	166,09	52,068	209	24,91%		
COMBINAÇÃO B (RPM 1500 + 0,2mm)							
	P1	162,7	98,3455	209	47,06%		
AMOSTRA 1	P2	163,95	84,2906	209	40,33%	37,67%	10,97%
	P3	168,84	53,537	209	25,62%		
COMBINAÇÃO C (RPM 2500 + 0,3mm)							
	P1	162,62	74,753	209	35,77%		
AMOSTRA 4	P2	163,28	60,4129	209	28,91%	31,66%	3,63%
	P3	163,31	63,3422	209	30,31%		
COMBINAÇÃO D (RPM 2500 + 0,2mm)							
	P1	164,69	54,5756	209	26,11%		
AMOSTRA 4	P2	163,90	90,2699	209	43,19%	35,48%	8,66%
	P3	164,67	77,5843	209	37,12%		

*P1= Ponta; P2 = Meio; P3 = Rebarba; Δh_f = calor de fusão da amostra;
 ΔH_f^0 = calor de fusão para os polímeros teoricamente 100% cristalinos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

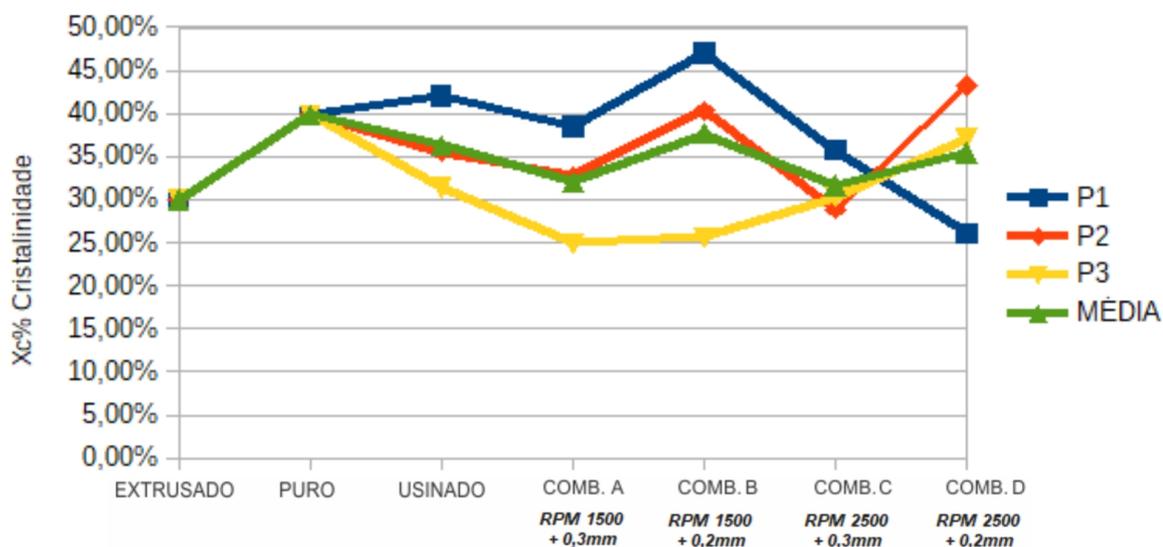
De forma similar aos resultados encontrados para PEAD, percebe-se grande influência de todas as etapas de preparação (36,31%) na cristalinidade das peças também para o PP, propiciando um aumento significativo quando comparada aos valores do material extrusado (29,97%), o qual também apresentou redução da cristalinidade em relação ao material base (39,87%).

É possível constatar que ambas as amostras (A e D) apresentaram valores muito similares de cristalinidade, porém em regiões inversamente proporcionais entre si. Sendo o ponto P1 a região de maior calor durante a rotação, uma vez que a energia propaga-se do centro para as bordas devido ao perfil do corpo de prova e ao sentido de avanço utilizado na solda, causa estranheza a presença de maior cristalinidade na região da rebarba (P3), fenômeno que também foi evidenciado na amostra da combinação A em PEAD. Para uma melhor compreensão deste

fenômeno, seria interessante avaliar a temperatura de solda, de resfriamento (junto ao tempo de consolidação) e pressão, fatores que não puderam ser controlados neste experimento, os quais contribuem significativamente para a resistência mecânica e formação de cristais, como evidenciado pelos estudos de Gonçalves (2015) e Peacock (2000).

Uma teoria que ajudaria a explicar este fenômeno é a presença de falhas na preparação dos corpos de prova, uma vez que estes foram usinados e não injetados com mesmos parâmetros e ciclos, podendo ter propiciado diferença entre os perfis macho e fêmea e contribuindo tanto para um maior contato direto na região da rebarba (P3) ou do centro (P1), afetando a condição para a formação de cristais nestas regiões. Isto se justifica quando compara-se a cristalinidade nos 3 pontos para todas as combinações em ambos os materiais, evidenciando uma tendência de que o ponto central apresente maior cristalinidade do que os demais pontos, fenômeno encontrado até mesmo para os corpos de prova usinados. O gráfico presente na Figura 27 facilita a interpretação destes dados.

Figura 27 – Xc% Cristalinidade PP



*P1= Ponta; P2 = Meio; P3 = Rebarba.

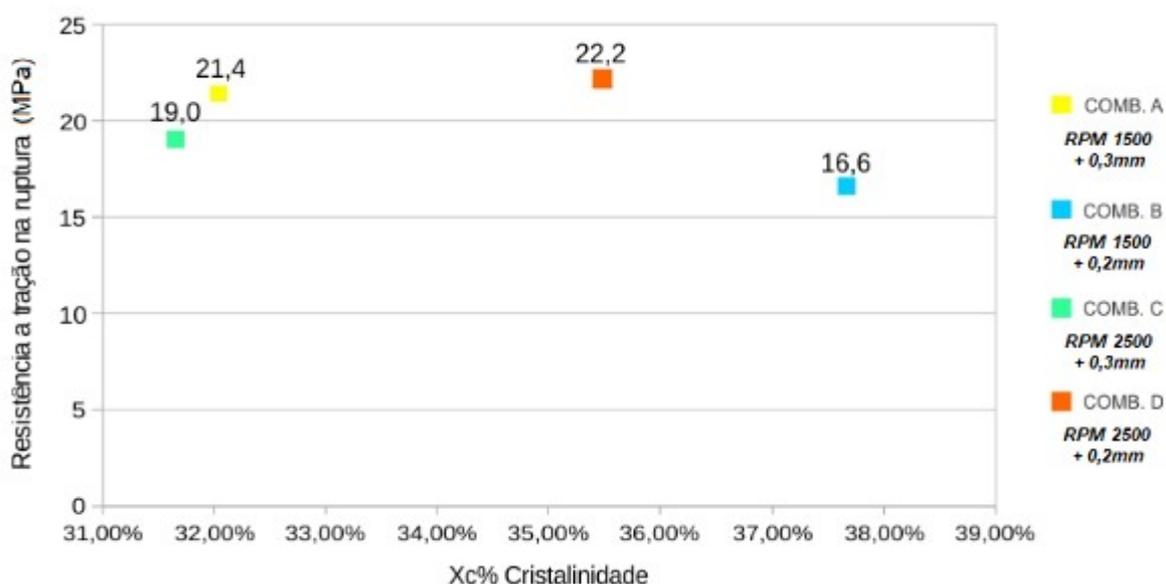
Fonte: Elaborado pelo autor.

Por sua vez, os pontos analisados para a combinação B apresentaram grande amplitude de valores, o que sugere uma baixa homogeneidade do material na zona

de soldagem, gerando propriedades mecânicas diferentes para os pontos medidos. Já os pontos medidos para a combinação C apresentaram a menor amplitude de valores, indicando boa uniformidade.

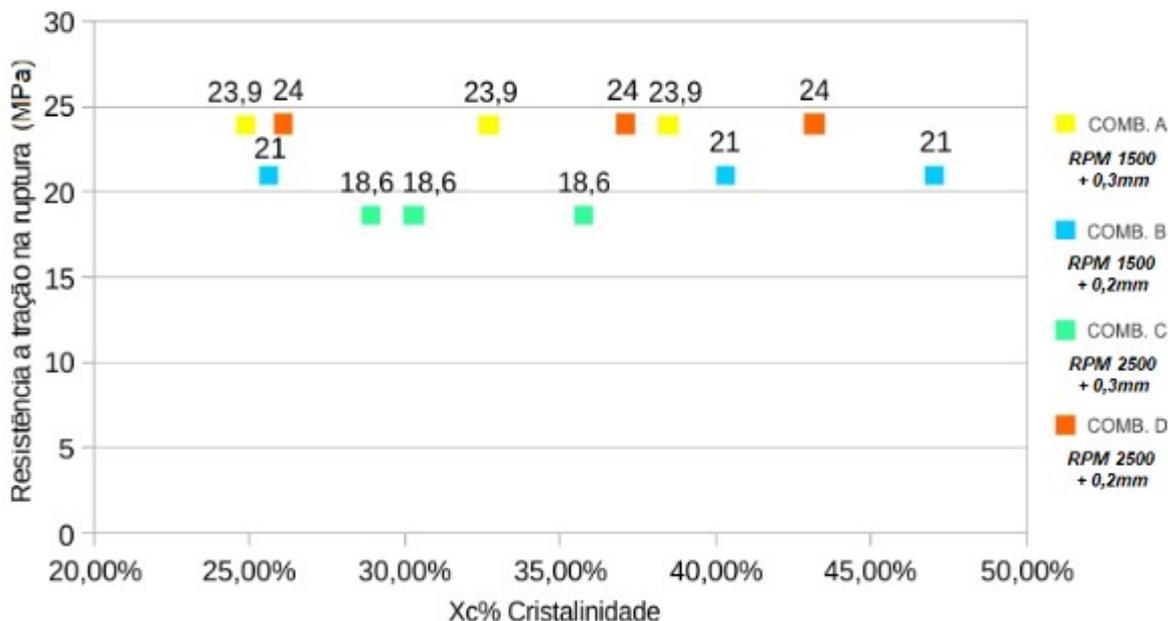
Estes fenômenos foram também evidenciados nos resultados de resistência a tração na ruptura. Os gráficos presentes nas Figuras 28 e 29 relacionam a resistência mecânica com a cristalinidade em cada ponto. A Figura 28, relaciona o valor médio de resistência a tração para todas as amostras de uma combinação em função da cristalinidade média da mesma combinação. Porém, uma vez que a cristalinidade foi obtida com base em uma amostra específica de cada combinação, na Figura 29 utilizou-se o valor de resistência mecânica da mesma amostra testada no DSC.

Figura 28 – Resistência a tração Média (MPa) x Xc% Cristalinidade Média PP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 – Resistência a tração (MPa) x Xc% Cristalinidade PP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise da Figura 28, inicialmente observa-se um comportamento aleatório, onde os valores são distribuídos aleatoriamente sem relação entre os fatores cristalinidade e resistência a tração. Fazendo o uso de uma análise mais simplista seria possível sugerir que os parâmetros utilizados inicialmente propiciam um aumento da cristalinidade e conseqüente aumento da resistência a tração, até atingir seu ápice e não mais apresentando melhora nas propriedades a partir deste ponto.

Entretanto, a partir da análise da Figura 29, a qual é mais representativa para os valores encontrados, uma vez que apresenta o resultado de mesmos corpos de prova para tração e para cristalinidade, percebe-se a presença de uma grande amplitude para os valores de cristalinidade, com exceção do corpo de prova referente a combinação C, que mantém seu comportamento uniforme. Observa-se assim, que não há uma tendência de que valores maiores de cristalinidade desempenhem melhor na resistência mecânica para as amostras obtidas.

Este é um resultado pouco esperado, tendo em vista que a cristalinidade é um fator de influência na resposta mecânica para materiais poliméricos. Estudos como o de Gao e Kim apud Batista (2015), relataram aumento tanto da resistência a tração quanto do módulo elástico para polietereceterona com o aumento do grau de

cristalinidade, fenômeno explicado pela presença de cristalitos melhor ordenados, (os quais foram obtidos por taxas de resfriamento mais lentas), dificultando a deformação por escorregamento dos planos do cristal.

Entretanto, Gonçalves (2015) evidenciou em seus estudos sobre soldagem pontual por fricção de Poliamida 6, uma variação significativa nos resultados obtidos de resistência a tração dos corpos de prova com baixa variação de cristalinidade dos mesmos. O autor indicou ainda que os melhores resultados de resistência a tração foram evidenciados em corpos de prova com maior área soldada em virtude do calor gerado durante o processo.

Um ponto que deve ser levado em consideração, neste caso, é de que não foi possível determinar quanto da região cristalina do corpo de prova é representativa para cada percentual, o que pode provocar grandes alterações na resposta mecânica encontrada.

Através da análise da superfície de ruptura na solda para os corpos de prova em PP, percebe-se a presença de pontos com baixa ou nenhuma fusão, conforme ilustrado pela Figura 30.

Figura 30 – Superfície de ruptura na solda.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A presença de pontos centrais onde é possível distinguir o perfil de solda utilizado no processo evidencia a presença de regiões onde houve baixa ou nenhuma fusão entre as peças, fenômeno que poderia explicar a resposta mecânica observada durante o ensaio de tração, frente ao percentual de cristalinidade obtido pelo ensaio de DSC.

Percebe-se também que, de maneira geral, as quebras respeitaram uma ordem axial, relativa ao movimento de fricção utilizado para união. Entretanto, todos os corpos de prova apresentam regiões com maior e menor grau de união, mesmo fora do ponto central, decorrente do desalinhamento dos corpos de prova durante o processo de solda, o qual pode ter influenciado tanto na união das peças quanto no resultado dos ensaios de tração, supondo por tal desalinhamento, que os esforços de tração ocorreram fora do eixo central.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou a influência dos parâmetros processuais na adesão e no comportamento mecânico em polipropileno e polietileno de alta densidade.

A partir da variação e avaliação dos parâmetros definidos para análise, evidenciou-se que os mesmos não foram adequados para a soldagem de PP com PEAD.

Para a soldagem em PEAD, foram obtidas somente duas peças soldadas, porém com muito baixas propriedades mecânicas. O ensaio de DSC indicou que o parâmetro utilizado (2500 RPM + 0,2mm) propiciou maior uniformidade ao processo, sugerindo que o mesmo possui alta sensibilidade, não respondendo de maneira efetiva à variação dos parâmetros. De mesma forma, entende-se que os parâmetros utilizados não foram adequados para soldagem em PEAD.

Já para a soldagem em PP, todas as peças obtiveram solda, entretanto constatou-se que as mesmas não apresentaram deformação plástica quando submetidas a ensaios de tração, o que sugere uma fraca união. Ainda assim, estatisticamente identificou-se que há presença de interação entre os parâmetros utilizados, influenciando na resistência das peças, o que aponta que os parâmetros 2500 RPM e 0,2mm de avanço é a melhor combinação para o processo estudado.

Através de análises visuais da superfície de ruptura e da análise de cristalinidade, nas quais identificou-se variação de resposta entre o ponto central e as extremidades dos corpos de prova soldados, entende-se que os corpos de prova, sua preparação e a própria armazenagem do material contribuíram de maneira negativa para o resultado encontrado. Ainda assim, foram encontradas peças com até 81,2% (Combinação D) da resistência máxima do material base, o que é considerado satisfatório em virtude das limitações do processo.

5.1 Contribuição do trabalho

- Contribuição intelectual, trazendo grande volume de dados a respeito do processo de soldagem por atrito rotacional em polímeros (especialmente polipropileno e polietileno de alta densidade), técnica sobre a qual existe pouco material de literatura, sendo mais difundida para materiais metálicos;
- Identificação da influência na qualidade da solda para os parâmetros RPM e profundidade de avanço em PP e a presença de interação entre os fatores;
- Validação dos dados obtidos no referencial teórico, como a adequação do uso de torno CNC para a técnica proposta;

5.2 Possibilidades de trabalhos futuros

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros acerca do tema, visando ampliar sua abrangência, recomenda-se:

- Avaliar a influência de diferentes perfis de solda dos corpos de prova nas variáveis estudadas (adesão, resistência mecânica e parâmetros de soldagem);
- Medir e controlar um maior número de fatores como temperatura de soldagem e pressão de soldagem;
- Utilizar corpo de prova injetado, com maior grau de confiabilidade e controle do contato face a face durante a solda;
- Avaliar a soldagem entre materiais dissimilares (PP e PEAD), propiciando maior entendimento sobre os fatores que afetaram a soldabilidade para os pré-testes realizados neste estudo.

REFERÊNCIAS

AMANCIO-FILHO, S.T. ***Friction Riveting: Development and Analysis of a new joining technique for polymer-metal multi-material structures***. Harburg University of Technology, Hamburg, Alemanha, 2007.

ARAÚJO, J.R. ***Compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibra de curauá obtidos por extrusão e injeção***. Campinas, SP. 2008. Tese de Mestrado.

AKCELRUD, L. ***Fundamentos da ciência dos polímeros***. Editora Manole Ltda, 2007.

AWAJA, F. ***Autohesion of polymers***. Polymer, v.97. Elsevier, 2016.

BARROS, R. M.; BRANCIFORTI, M. C. ***Correlação entre orientação molecular, cristalinidade e permeabilidade de filmes biaxialmente orientados de polietileno linear de baixa densidade***. Revista Matéria, v.23, n.1, 2018

BILLMEYER. ***Textbook of Polymer Science***. Wiley India Pvt Limited, Third Edition,, 2007.

BODOR, G. ***Structural Investigation of Polymer***. Ellis Horwood Series in Polymer Science and Technology, 1991.

BORGES, R. C.; VILLANOVA, D. L.; FRANCISQUETTI, E. ***Fatores de influência na adesão e na resistência mecânica de peças poliméricas soldadas por atrito rotacional: Uma revisão de literatura***. Revista Tecno-Lógica. Santa Cruz do Sul,, v.22, n.2, 2018.

BRASKEM. Data sheet PEAD HA 7260. <Disponível em: <http://www.braskem.com.br/cms/Principal/produto/download?id=EAfS1bhBbXE=&folhadados=true>> Acesso em: 25/09/2016.

BRASKEM. *Literatura técnica*: resistência química do polietileno. <Disponível em: http://www.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/html/boletm_tecnico/Resistencia_quimica%20_PE.pdf> Acesso em: 25/09/2016.

BRASKEM. *Data sheet PP H 103*. <Disponível em: <http://www.braskem.com.br/cms/Principal/produto/download?id=l32iSGQ9fKM=&folhadados=true>> Acesso em: 25/09/2016.

BRASKEM. *Literatura técnica*: resistência química do polipropileno. <Disponível em: http://www.braskem.com.br/portal/principal/arquivos/html/boletm_tecnico/resistencia_quimica%20_pp.pdf> Acesso em: 25/09/2016.

BROWN, R. **Handbook of Polymer Testing: Short-Term Mechanical Tests**. United Kingdom: Rapra Technology Ltd., 2002.

BUXTON, A. L. Welding technologies for polymers and composites. <Disponível em: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/welding-technologies-for-polymers-and-composites/>> Acesso em: 15/11/2016.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

D'AGNOLUZZO, P. L. **Determinação da influência dos parâmetros de extrusão na reologia e propriedades mecânicas de resinas PEAD**. UFRGS: 2016.

DVS – Deutscher Verband Für Schweissen Und Verwandte Verfahren E.V. **Testing of welded joints of thermoplastics plates and tubes: Technological Bend Test**. DVS, 1999.

EBNESAJJAD, S. **Adhesives technology handbook**. 2. ed. New York: William Andrew, 2008.

FORWARD TECHNOLOGIES. *Spin Welders Datasheet*. <Disponível em: <http://www.forwardtech.com/docs/SpinWelders.datasheet.pdf>> Acesso em: 15/11/2016.

GARCIA, A; SPIM, J. A; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTD. 2000.

GONÇALVES, J. **Soldagem pontual por fricção (FSPW) de poliamida 6**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2015.

GREWELL, D.; BENATAR, A. **Coupled Temperature, Diffusion and Squeeze Flow Models for Interfacial Healing Predictions**. Annual Technical Conference for the Society of Plastic Engineers Proceedings. Brookfield, Connecticut. 2006.

GREWELL, D.; BENATAR, A. **Welding of plastics: fundamentals and new developments**. Intern. Polymer Processing XXII. Munich: Carl Hanser Verlag, 2007.

HARPER, C. **Handbook of Plastics, Elastomers and Composites**. 4.ed. McGraw-Hill, 2002.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE TRANSFORMAÇÃO DE MATERIAL PLÁSTICO. **Perfil 2014**. São Paulo, 2015.

JORGE, F. E.; NEVES, M. A. F. S. **Comparação entre técnicas simples e a análise de espectroscopia no infravermelho na caracterização de polímeros recicláveis**. IFRJ:RJ, 2016.

KARIAN, H. G. **Handbook of polypropylene and polypropylene composites**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2003.

KIM, Y. H.; WOOL, R. P. **A Theory of Healing at a Polymer-Polymer Interface**. Macromolecules, 1983.

KINLOCH, A. J. **Adhesion and Adhesives Science and Technology**. 1. ed. London: Chapman and Hall, 1986.

MANROD. Ficha técnica torno mecânico industrial MR-302. <Disponível em: <http://www.manrod.com.br/produto/torno-mecanico-industrial/>> Acesso em: 09/04/2017.

MAIER, C; CALAFUT, T. **Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook**. New York: Plastics Design Library, 1998.

METTLER TOLEDO. **Excellence Thermal Analysis Innovations from METTLER TOLEDO**. Mettler Toledo: 2018.

MICHAELI, W; GREIF, H; KAUFMANN, H; VOSSEBÜRGER, F. **Tecnologia dos Plásticos**. 1. ed. Edgard Blücher, 1995.

MOORE, E. P. **Polymerization, Characterization, Properties, Processing, Applications**. Cincinnati: Hanser-Gardner, 1996.

OLIVEIRA, P. H. F; AMANCIO FILHO, S. T; SANTOS, J. F; HAGE JUNIOR, J. **Estudo de Viabilidade da Soldagem de Termoplásticos por "Friction Spot Welding" (FspW)**. Soldag. Insp. São Paulo, 2012.

OLIVEIRA, R. V. B.; FERREIRA, C. L.; PEIXOTO, L. J.F.; BIANCHI, O.; SILVA, P. A.; DEMORI, R; SILVA, R. P.; VERONESE, V. B. **Mistura Polipropileno/Poliestireno: Um exemplo da Relação Processamento-Estrutura-Propriedade no Ensino de Polímeros**. Programa de Pós- Graduação em Ciência dos Materiais (PGCIMAT), Instituto de Química, UFRGS, Porto Alegre-RS, Brasil.

PEACOCK, A. J. **Handbook of polyethylene: structures, properties and applications**. New York: Marcel Dekker, 2000.

ROSENDO, T.D.S. **Estudo do Desempenho Mecânico de Solda(s) Ponto por Fricção (FSpW) da Liga AA6181-T4**. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SERCER, M.; RAOS, P. **Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS): Joining of Plastics and Composites**. Welding Engineering and Technology, 2006.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (SENAI-SP). **Soldagem**. São Paulo: SENAI-SP editora, 2013.

SKILLINGS, J. H.; WEBER, D. ***A First Course in the Design of Experiments: A Linear Models Approach***. 1º Ed. ed. [S.I.]: CRC Press, 1999.

SOUZA, S. A. ***Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos***. São Paulo: Editora Blucher; 1982.

STEVENSON, W. J. ***Estatística aplicada à administração***. São Paulo: Harbra, 1981

STOKES, V. K. ***Joining methods for plastics and plastic composites: An overview***. Polymer Engineering and Science, 1989.

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

TAPPE, P; POTENTE, H. ***New Results on the Spin Welding of Plastics***. Polymer engineering and science, 1989.

TORRES, A. A. U. ***Envelhecimento físico químico de tubulações de polietileno de alta densidade empregadas em redes de distribuição de derivados de petróleo***. PUC-RIO: 2017. Tese de Mestrado.

TRIPATHI, D. ***Practical Guide to Polypropilene***. United Kingdon: Rapra Technology Ltd., 2002.

TROUGHTON, M. J. ***Handbook of plastics joining: a practical guide***. 2. ed. New York: William Andrew Inc., 2008.

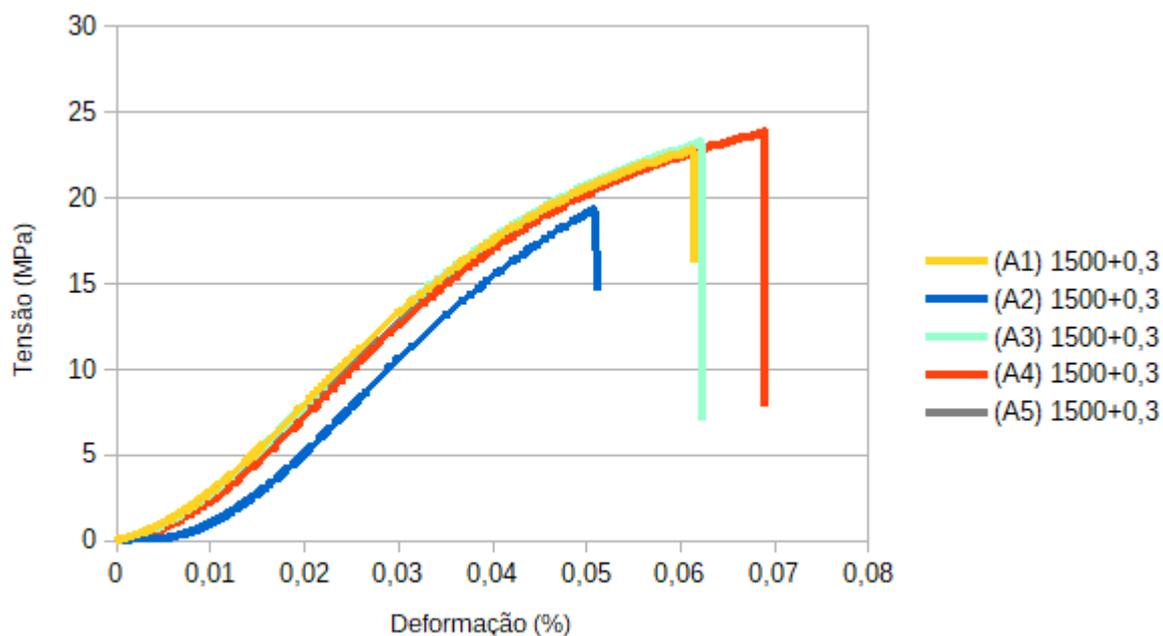
UFRGS – Laboratório de Polímeros. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). <Disponível em: <http://www.ufrgs.br/lapol/>> Acesso em: 15/11/2016.

VASILE, C; PASCU, M. ***Practical Guide to Polyethylene***. United Kingdon: Rapra Technology Ltd., 2005.

WISE, R. J. ***Thermal Welding of Polymers***. England: Abington Publishing, 1999.

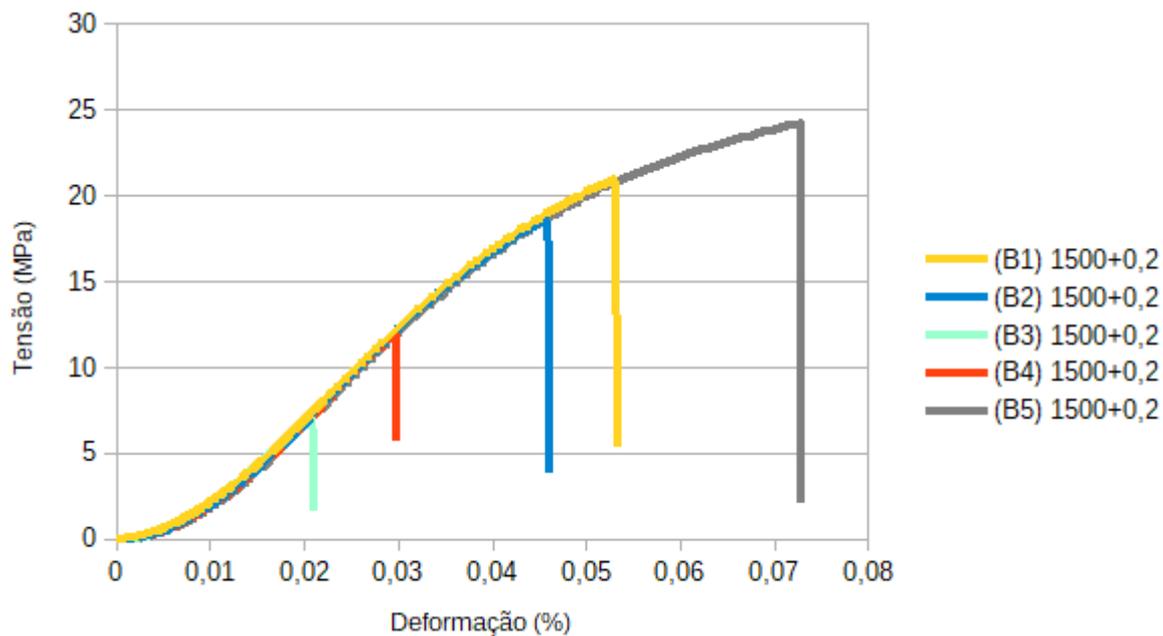
APÊNDICE A – Gráficos Tensão x Deformação PP e PEAD

Figura 31 – Amostra Soldada – PP (A)



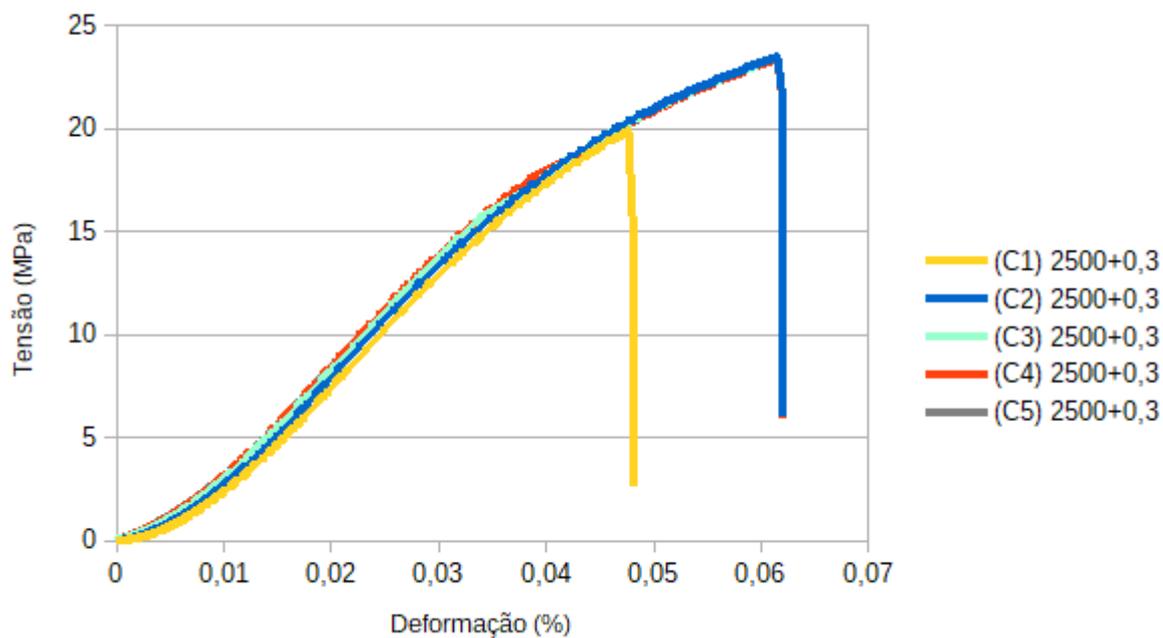
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 32 – Amostra Soldada – PP (B)



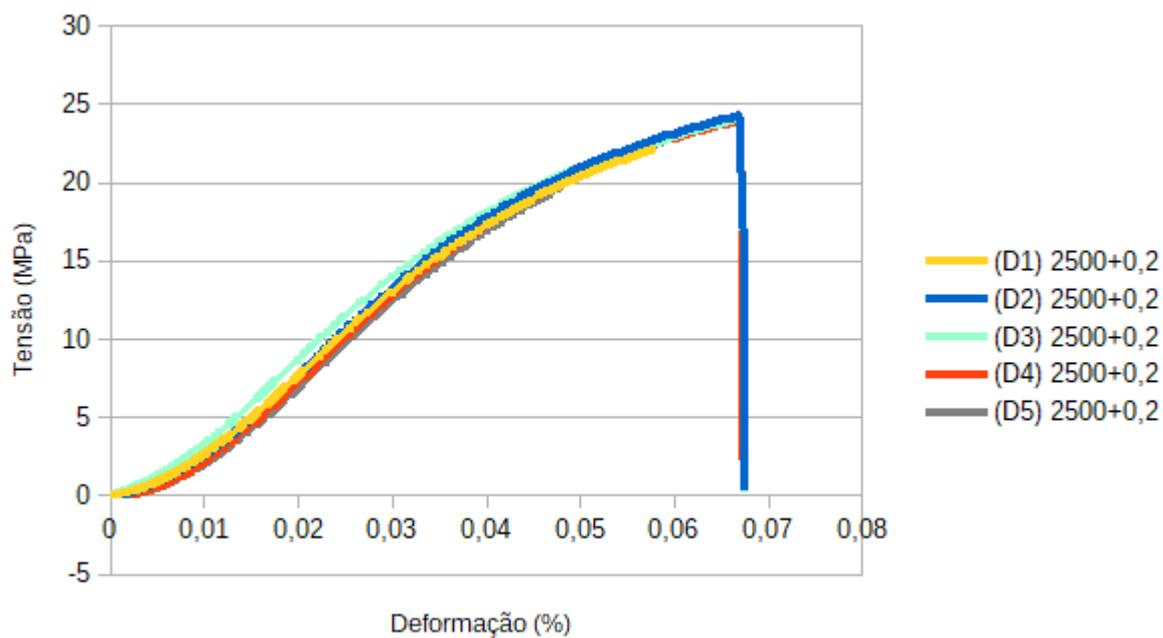
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33 – Amostra Soldada – PP (C)



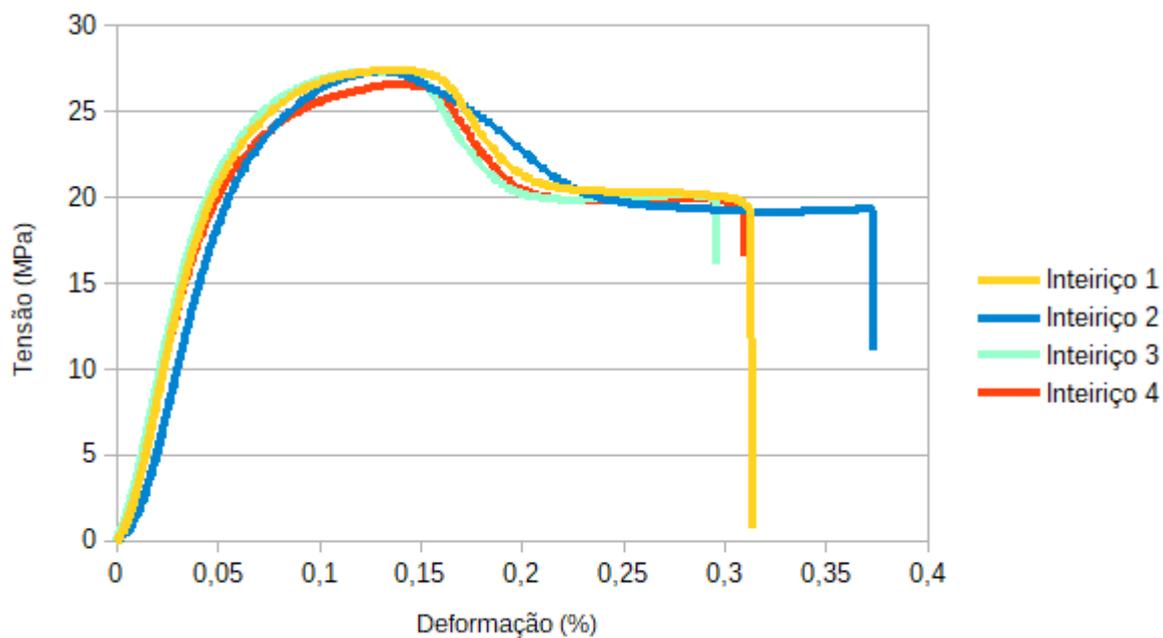
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34 – Amostra Soldada – PP (D)



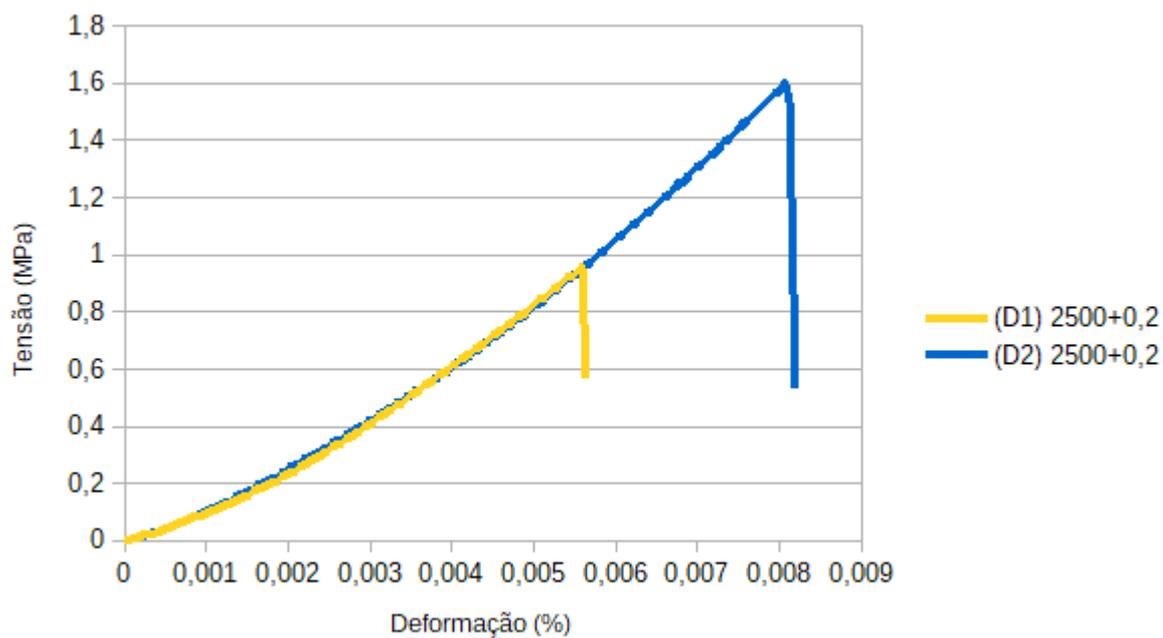
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35 – Amostra Inteira – PP



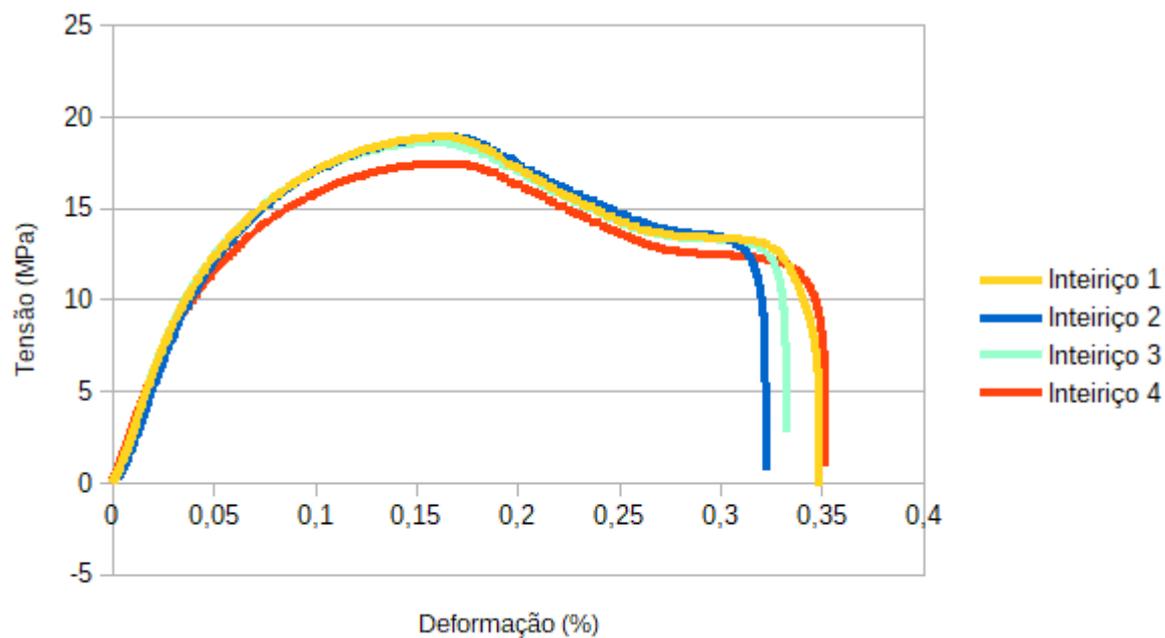
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 36 – Amostra Soldada – PEAD (D)



Fonte: Elaborado pelo autor

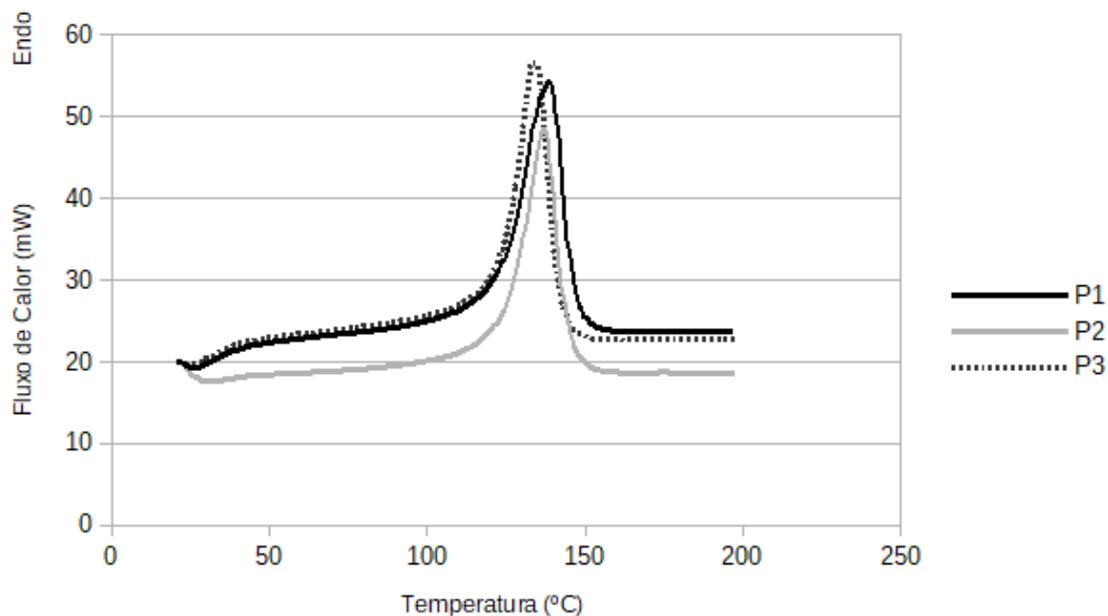
Figura 37 – Amostra Inteira – PEAD



Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE B – Gráficos DSC PP e PEAD

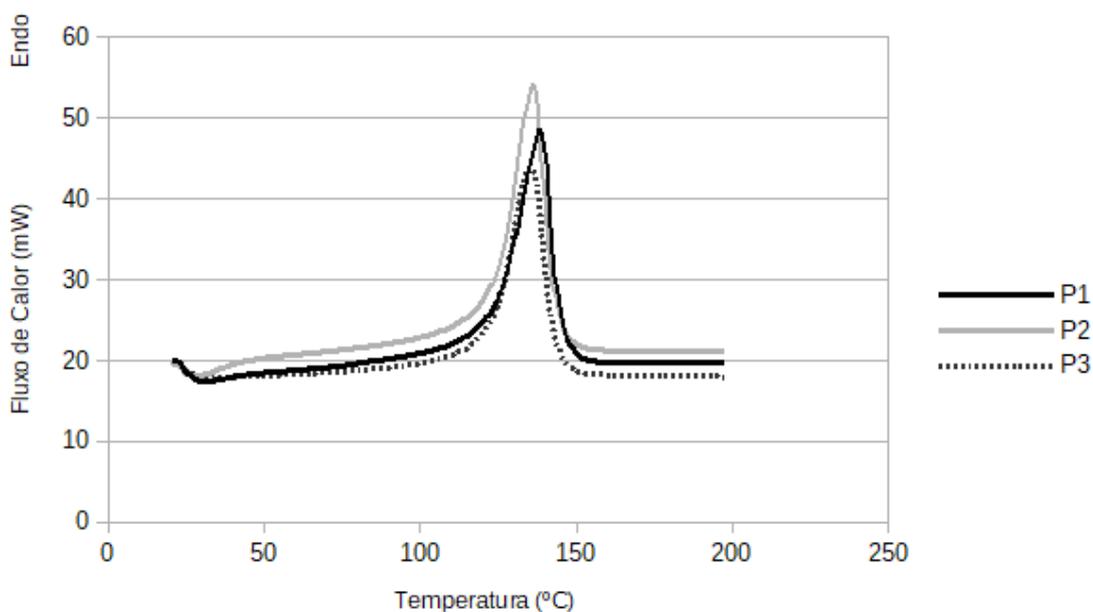
Figura 38 – Análise de DSC PEAD A (1500+0,3)



*P1=Ponta / P2=Meio / P3=Rebarba

Fonte: Elaborado pelo autor.

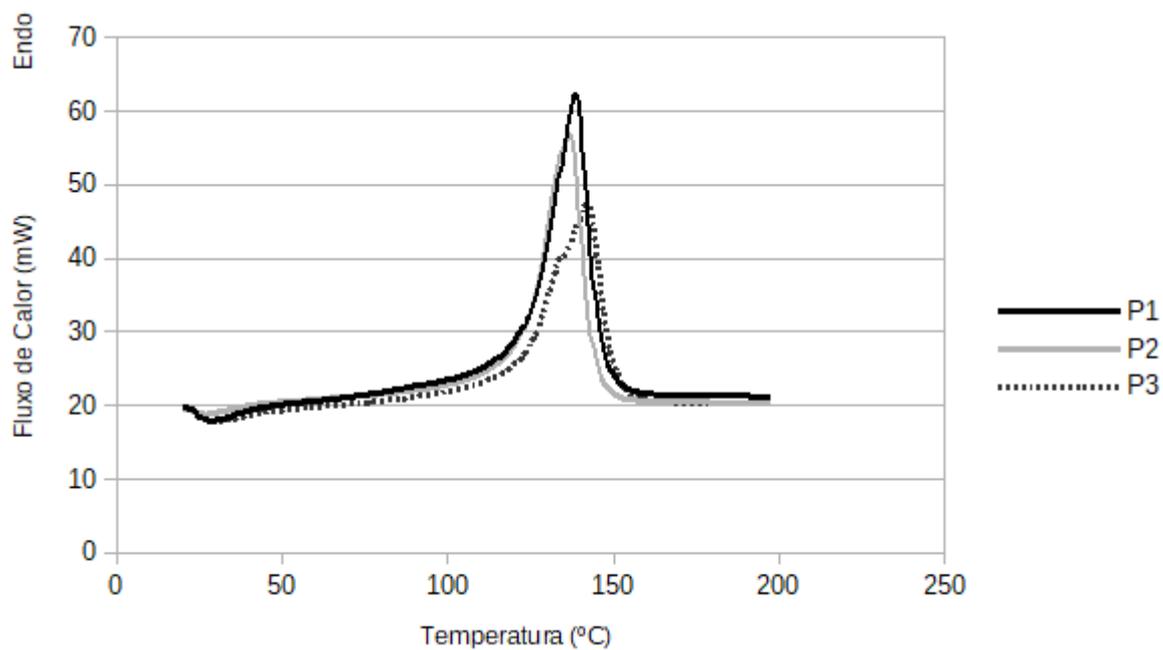
Figura 39 – Análise de DSC PEAD B (1500+0,2)



*P1=Ponta / P2=Meio / P3=Rebarba

Fonte: Elaborado pelo autor.

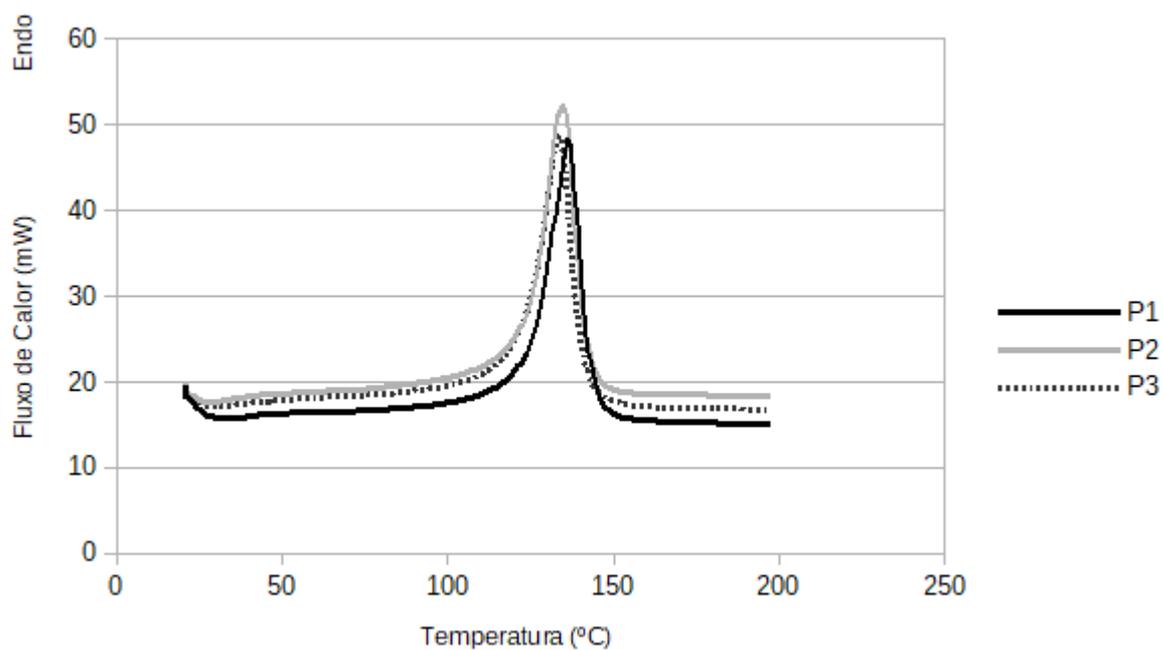
Figura 40 – Análise de DSC PEAD C (2500+0,3)



*P1=Ponta / P2=Meio / P3=Rebarba

Fonte: Elaborado pelo autor.

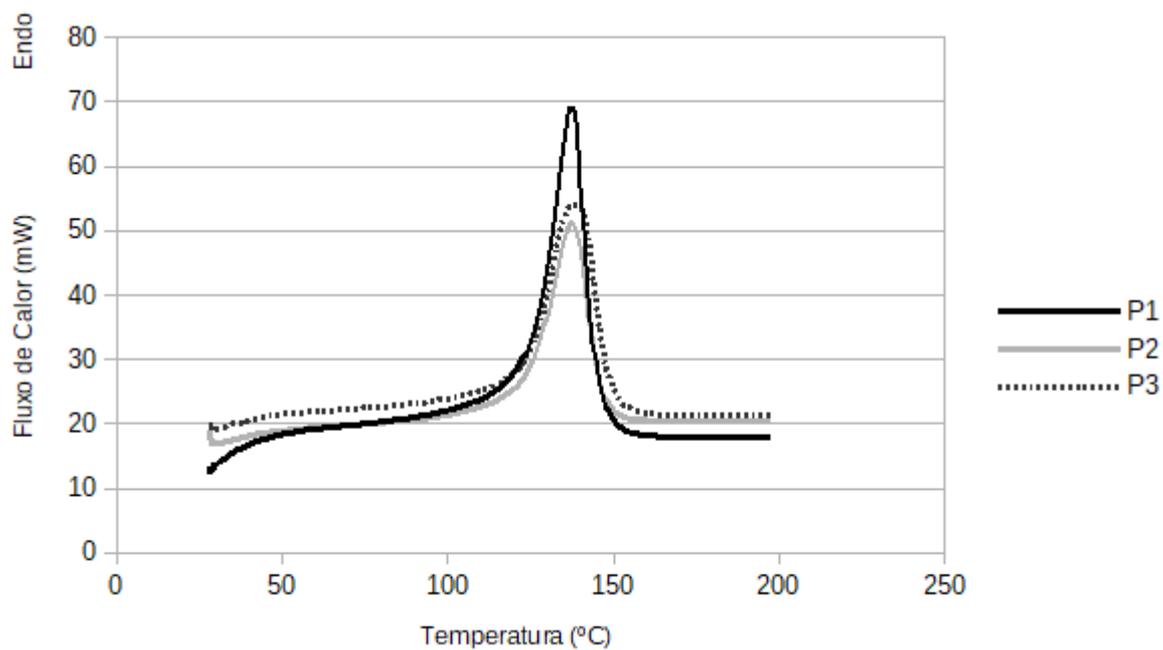
Figura 41 – Análise de DSC PEAD D (2500+0,2)



*P1=Ponta / P2=Meio / P3=Rebarba

Fonte: Elaborado pelo autor.

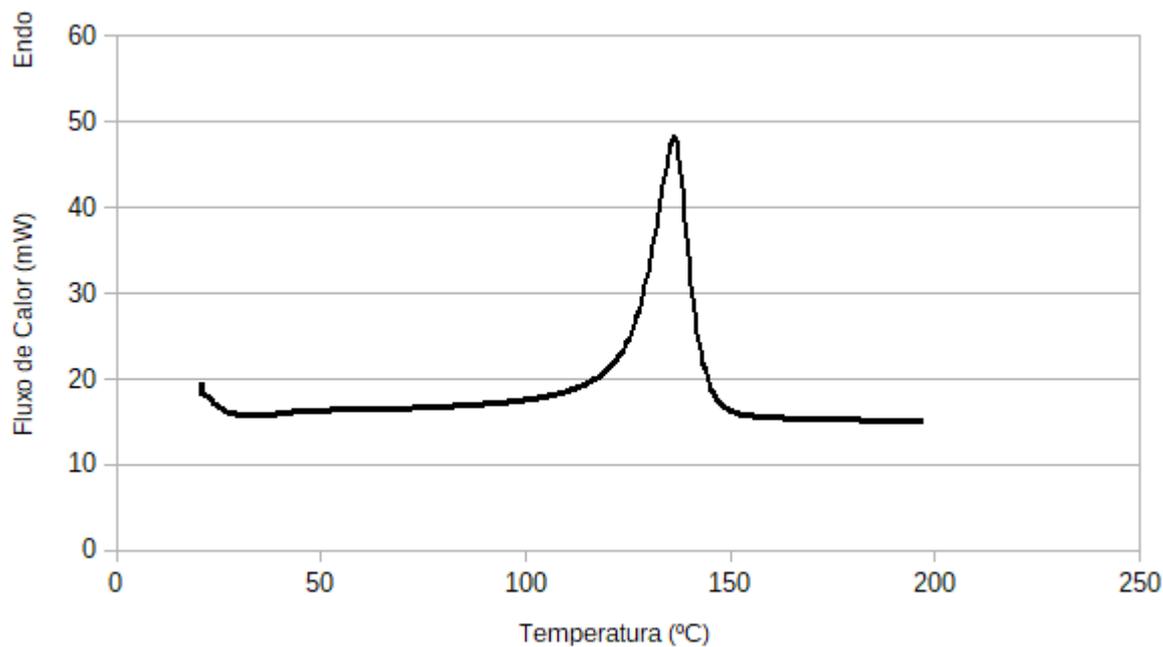
Figura 42 – Análise de DSC PEAD USINADO



*P1=Ponta / P2=Meio / P3=Rebarba

Fonte: Elaborado pelo autor.

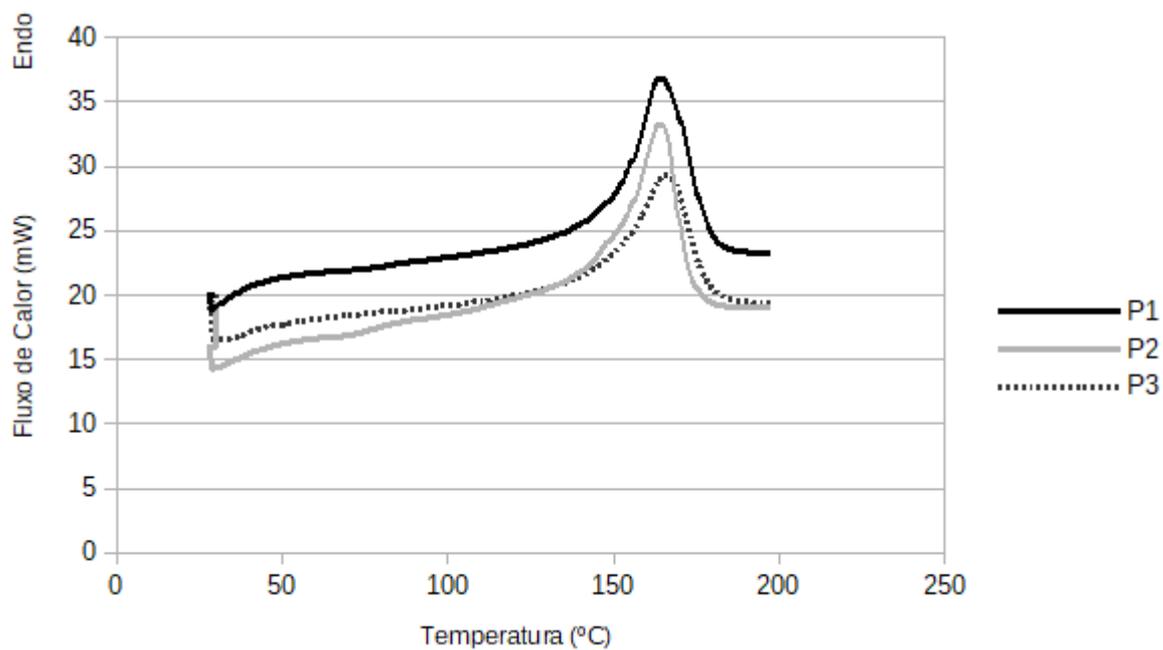
Figura 43 – Análise de DSC PEAD BASE



*P1=Ponta / P2=Meio / P3=Rebarba

Fonte: Elaborado pelo autor.

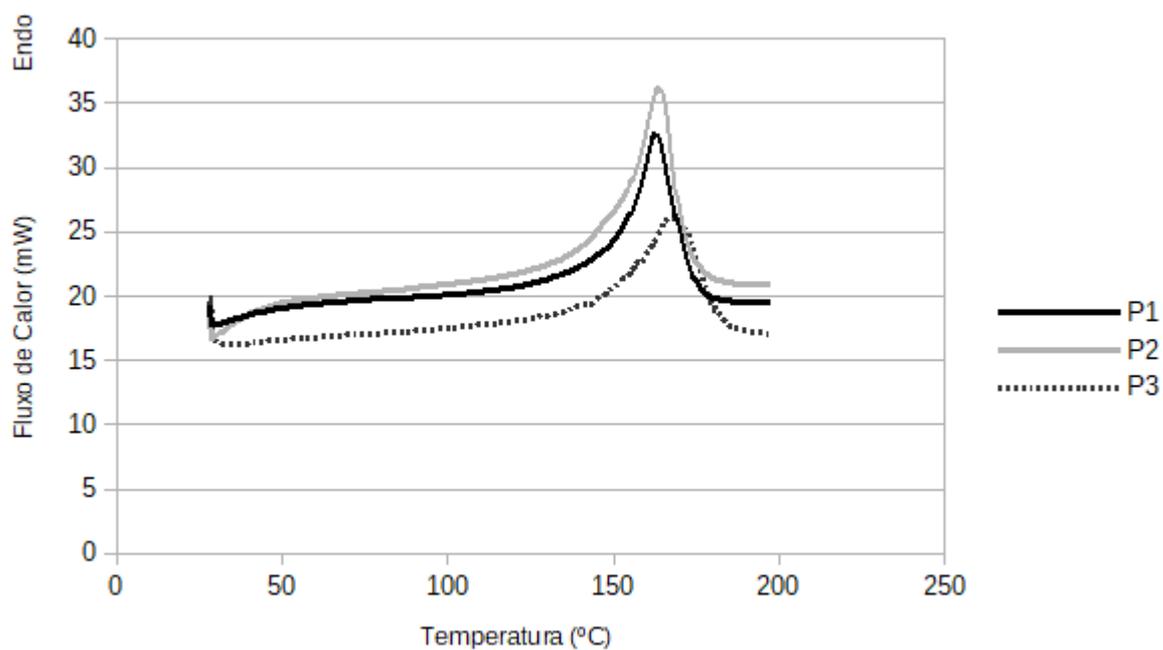
Figura 44 – Análise de DSC PP A (1500+0,3)



*P1=Ponta / P2=Meio / P3=Rebarba

Fonte: Elaborado pelo autor.

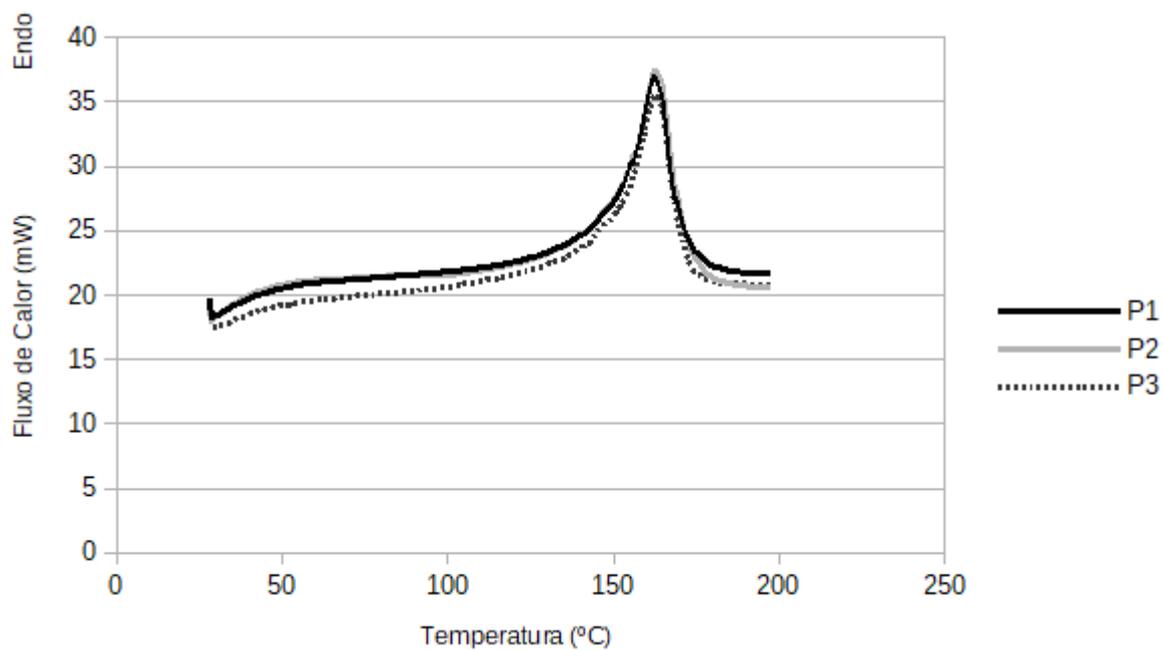
Figura 45 – Análise de DSC PP B (1500+0,2)



*P1=Ponta / P2=Meio / P3=Rebarba

Fonte: Elaborado pelo autor.

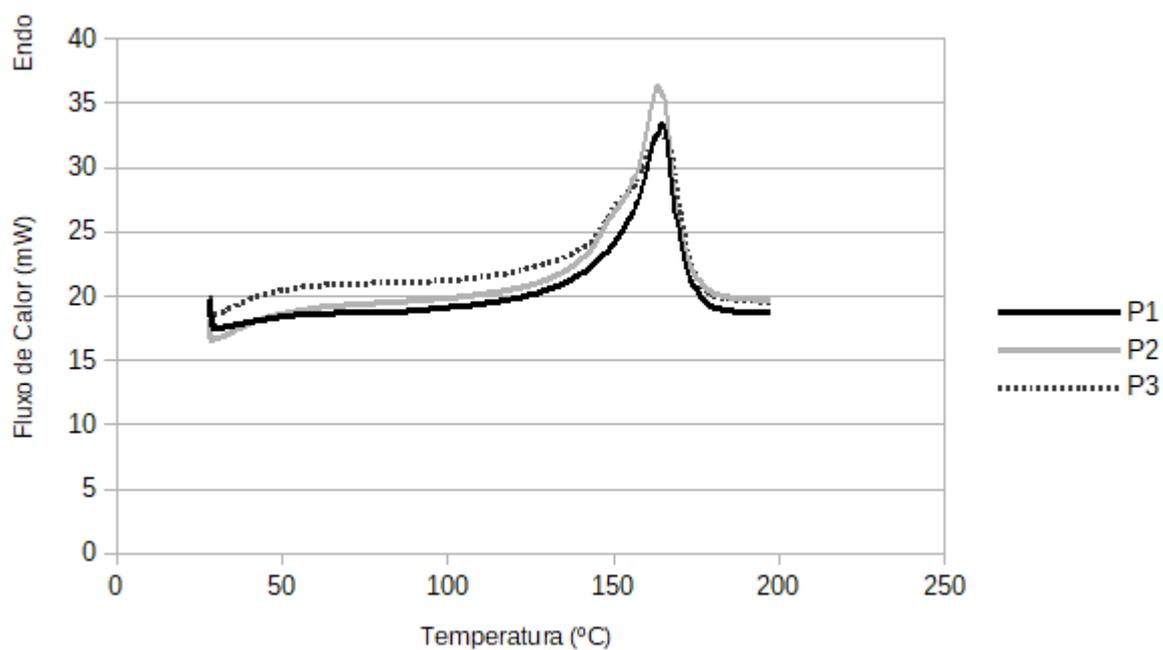
Figura 46 – Análise de DSC PP C (2500+0,3)



*P1=Ponta / P2=Meio / P3=Rebarba

Fonte: Elaborado pelo autor.

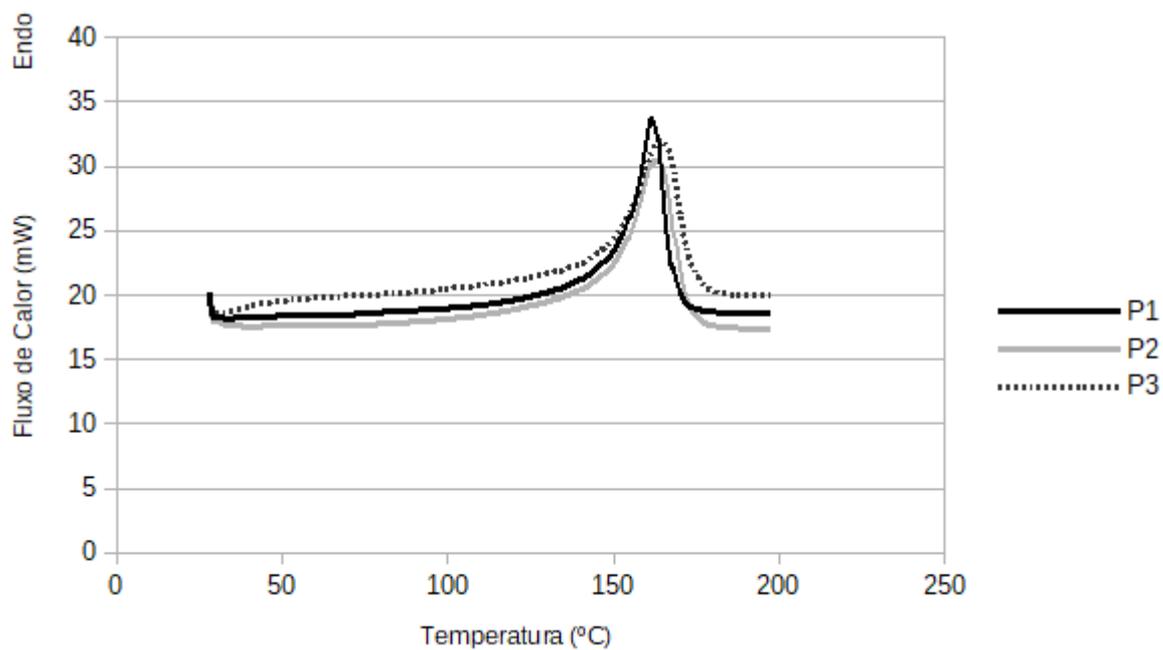
Figura 47 – Análise de DSC PP D (2500+0,2)



*P1=Ponta / P2=Meio / P3=Rebarba

Fonte: Elaborado pelo autor.

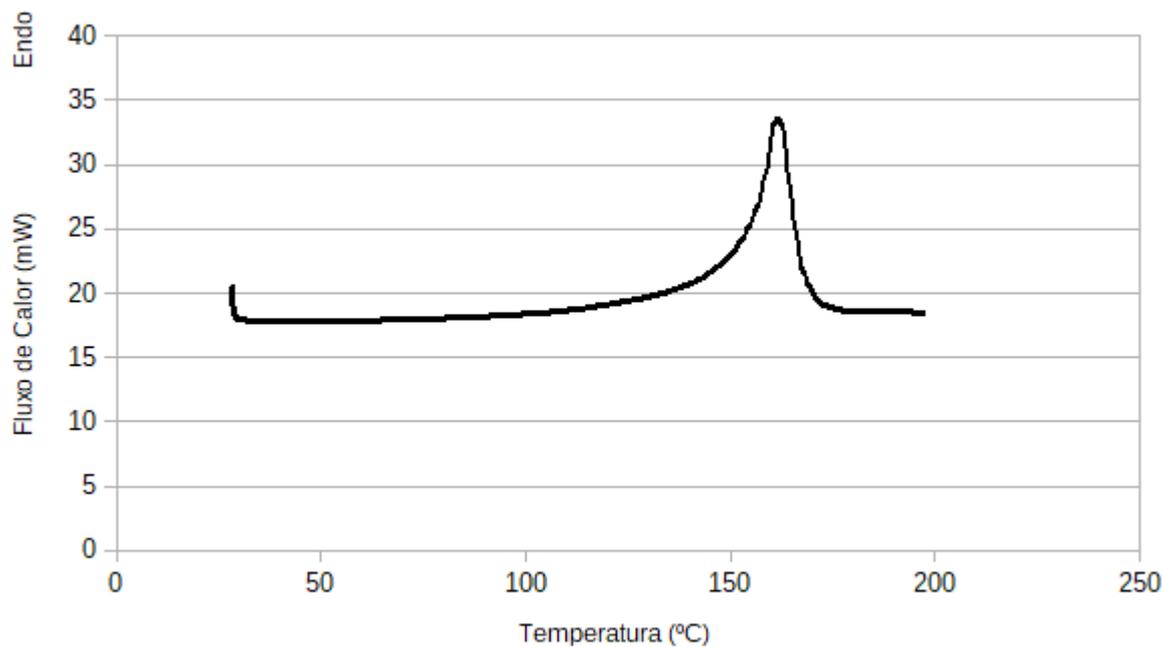
Figura 48 – Análise de DSC PP USINADO



*P1=Ponta / P2=Meio / P3=Rebarba

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49 – Análise de DSC PP BASE



*P1=Ponta / P2=Meio / P3=Rebarba

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C – Ordem dos ensaios aleatorizada.

Tabela 18 – Ordem dos ensaios aleatorizada.

#	MATERIAL	RPM	AVANÇO
1	PP+PEAD	1500	0,2
2	PEAD	1500	0,3
3	PEAD	1500	0,2
4	PP	2500	0,3
5	PP	1500	0,3
6	PEAD	2500	0,3
7	PP+PEAD	1500	0,3
8	PP	2500	0,2
9	PP+PEAD	1500	0,3
10	PP	1500	0,2
11	PEAD	2500	0,3
12	PEAD	2500	0,3
13	PP	1500	0,2
14	PP+PEAD	2500	0,3
15	PEAD	1500	0,2
16	PP	1500	0,2
17	PEAD	2500	0,2
18	PP	2500	0,3
19	PP+PEAD	1500	0,2
20	PP	1500	0,3
21	PP+PEAD	2500	0,2
22	PP+PEAD	2500	0,2
23	PP	1500	0,2
24	PP+PEAD	2500	0,3
25	PEAD	2500	0,2
26	PP	2500	0,2
27	PEAD	2500	0,2
28	PEAD	2500	0,2
29	PP	2500	0,3
30	PP	1500	0,3
31	PEAD	1500	0,2
32	PP+PEAD	1500	0,2
33	PP+PEAD	1500	0,3
34	PP	1500	0,3
35	PP+PEAD	2500	0,3
36	PP+PEAD	1500	0,3
37	PEAD	2500	0,3
38	PP	2500	0,2
39	PEAD	1500	0,2
40	PEAD	1500	0,2
41	PP+PEAD	2500	0,2
42	PEAD	1500	0,3
43	PEAD	1500	0,3
44	PP	2500	0,2
45	PP	1500	0,3
46	PP+PEAD	1500	0,2
47	PP+PEAD	2500	0,3
48	PEAD	2500	0,2
49	PP+PEAD	1500	0,3
50	PP	1500	0,2
51	PP+PEAD	2500	0,2
52	PEAD	1500	0,3
53	PP	2500	0,3
54	PEAD	1500	0,3
55	PEAD	2500	0,3
56	PP+PEAD	2500	0,3
57	PP+PEAD	2500	0,2
58	PP	2500	0,3
59	PP+PEAD	1500	0,2
60	PP	2500	0,2

Fonte: Elaborado pelo autor.