

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DANIEL DARÉ LUZIANO DA SILVA

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM E TENSÃO SUPERFICIAL DE
POLIPROPILENO COPOLÍMERO COMO REQUISITOS DE PROJETO DE TUBOS
DE CALOR OSCILANTE**

LONDRINA

2023

DANIEL DARÉ LUZIANO DA SILVA

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM E TENSÃO SUPERFICIAL DE
POLIPROPILENO COPOLÍMERO COMO REQUISITOS DE PROJETO DE TUBOS
DE CALOR OSCILANTE**

**Welding parameters and surface tension analysis of polypropylene copolymer
as design considerations for oscillating heat pipes**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Dra. Joice Erica Motezuki (UTFPR – BR)
Coorientador: Dr. Juan Pablo Flórez Mera (UIS – CO)

LONDRINA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

DANIEL DARÉ LUZIANO DA SILVA

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM E TENSÃO SUPERFICIAL DE
POLIPROPILENO COPOLÍMERO COMO REQUISITOS DE PROJETO DE TUBOS
DE CALOR OSCILANTE**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 23 de Junho de 2023

Prof. Dr. Francisco Rosário
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

Profa. Dra. Silvia Midori Higa
Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

Profa. Dra. Joice Erica Motezuki
Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

LONDRINA

2023

AGRADECIMENTOS

Início esse agradecimento usando as palavras do apóstolo Paulo: “Bendito seja Deus, Pai de nosso Senhor Jesus Cristo. Ele nos abençoou com toda a bênção do seu Espírito em virtude de nossa união com Cristo, no céu” (Ef 1,3).

Agradeço também à minha Mãezinha, a Virgem Maria, Mãe de Deus, se cá estou, foi porque sempre fui sustentado por Ela.

Agradeço à minha orientadora, Prof. Dra. Joice Erica Motezuki, pela ENORME paciência, mas mais que isso, pela dedicação incansável, pelo comprometimento com o ensino e pelo enorme conhecimento que compartilhou comigo durante a orientação.

Agradeço ao LABTUCAL – UFSC, na pessoa da Dra. Marcia Mantelli. Foi de um contato com ela em congresso em 2017, que eu ainda calouro me apaixonei por tubos de calor. Agradeço pela prontidão em me aceitar como pesquisador e indicar o meu coorientador: o prof. Dr. Juan Pablo Flórez Mera. A quem sou imensamente grato pelas inúmeras contribuições, desde 2019 quando começamos a falar sobre o tema.

Agradeço ao PPGCEM da UTFPR, na pessoa do prof. Dr. Carlos Eduardo Cava, por ceder o laboratório e equipamento para testes de ângulo de contato. Agradeço também ao LARX da UEL, na pessoa do prof. Dr. Alexandre Urbano, por ceder o uso do equipamento de plasma e por acompanhar os testes.

Deixo um agradecimento especial a meus pais: Antonio Luziano da Silva e Delminda de Jesus Daré da Silva. Talvez nenhuma equação deste trabalho lhes seja trivial, mas entendem o significado de dedicação, inspiração e de amor: isso foi o que me ensinaram! Se hoje eu entrego tal monografia, é porque a muito custo eles sempre estiveram aqui por mim e isso, diploma nenhum no mundo é capaz de retribuir!

Agradeço ainda a meu irmão, Diego Dare da Silva, a sua esposa Amanda e a minha tia Sebastiana Dario, por sempre terem me apoiado e impulsionado.

Agradeço ao meu orientador de IC, prof. Dr. André Luis Trevisan, por ter acreditado no meu potencial e me ensinado muito nos anos que trabalhamos juntos.

Agradeço ainda aos amigos da graduação, da minha turma ou do CA: Alan, Armando, Felipe (vulgo *Manaus*), Julio&Ana, Lauro, Leandro (vulgo *Gohan*) e Pedro (vulgo *Safas*), por estarem comigo ao longo do processo, sendo sorriso nos momentos felizes e sendo apoio nos momentos difíceis. Agradeço, por fim, ao amigo João Victor Fanton (vulgo *Bariri*) pelo apoio quando precisei de estadia para os laboratórios deste trabalho.

Ver o mundo e os perigos que virão, ver por trás
dos muros, chegar mais perto, encontrar o outro e
sentir. Esse é o propósito da vida.
(A Vida Secreta de Walter Mitty, 2013)

RESUMO

O uso de polímero para tubo de calor oscilante (OHP) flexível tem sido pesquisado como potencial para resfriamento de componentes eletrônicos. O presente trabalho tem como objetivo demonstrar se parâmetros de soldagem e a tensão superficial do invólucro devem ser considerados no projeto. São abordadas as características dos tubos de calor e a seleção de materiais, com ênfase nos polímeros, bem como a tensão superficial, sua influência no desempenho térmico, e a soldagem de polímeros, com uma análise crítica de como o assunto vem sendo tratado na literatura de OHPs. O polipropileno copolímero randômico (PPR) é utilizado como material deste trabalho, sendo caracterizado por meio de DSC e prensado para obtenção de corpos de prova de tração. A soldagem é analisada variando temperatura, pressão e tempo de solda e sua influência na resistência mecânica em ensaio de tração. Em seguida, corpos de prova foram submetidos à plasma a diferentes tempos, analisando-se o ângulo de contato da gota e propriedades mecânicas pós-plasma. Os resultados indicam que os parâmetros de soldagem não afetaram significativamente a resistência da solda, enquanto o plasma reduziu a tensão superficial em mais de 50%, sem causar degradação severa do polímero. Conclui-se que a utilização de meios de proteção da solda é mais indicada que um controle rígido dos parâmetros e que o tratamento por plasma de nitrogênio pode ser utilizado para melhorar a eficiência térmica de OHPs, promovendo a modificação superficial em polímeros hidrofóbicos.

Palavras-chave: OHP; tubo de calor flexível; PPR; soldagem de polímeros; plasma de nitrogênio.

ABSTRACT

The use of polymer for flexible oscillating heat pipes (OHPs) has investigated for its potential in electronic component cooling. This study aimed to assess the significance of welding parameters and the material surface tension in the design process. It addresses the characteristics of heat pipes and material selection, with a particular emphasis on polymers. Additionally, the study investigates surface tension and its impact on thermal performance, as polymer welding while critically analyzing the existing literature on polymer OHPs. Random polypropylene copolymer (PPR) is used as the material, characterized using DSC, and pressed to produce tensile test specimens. Welding was analyzed by temperature, pressure, and welding time variation, evaluating their influence on mechanical resistance through tensile testing. In addition, test specimens are subjected to plasma treatment for varying durations, it was analyzed the contact angle of the droplet and post-plasma mechanical properties. The results indicate that welding parameters do not significantly affect the weld strength, whereas plasma treatment reduces the surface tension by more than 50%, without causing severe polymer degradation. Consequently, it is inferred that the use of welding protection methods is preferable to strict control of parameters. Furthermore, it is concluded that nitrogen plasma treatment can be employed to enhance the thermal efficiency of OHPs by promoting surface modification in hydrophobic polymers.

Keywords: OHP; flexible heat pipe; PPR; polymer joining; nitrogen plasm.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivo Geral	10
1.2	Objetivos específicos	10
1.3	Justificativa	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Forças intermoleculares e de interface	12
2.1.1	Ângulo de contato e a equação de Young	13
2.2	Soldagem de polímeros	15
2.2.1	Soldagem por calor e descrição do processo	15
2.2.2	Análises mecânicas de soldagem de polímeros por calor	20
2.3	Tubos de calor	21
2.4	Tubos de calor oscilante (OHP)	22
2.4.1	Fundamentos de operação do OHP	23
2.4.2	Parâmetros de configuração	26
2.4.3	Influência da tensão superficial do invólucro	26
2.5	Seleção de materiais e o projeto de um tubo de calor	28
2.6	Panorama de pesquisas recentes em OHPs poliméricos	29
2.7	Polímeros como material de projeto	34
2.7.1	Polipropileno (PP) e seu copolímero randômico de etileno (PPR)	34
2.7.2	Modificação da superfície do polímero por meio de plasma	36
3	MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1	MATERIAL	37
3.1.1	Equipamentos utilizados	38
3.2	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	38
3.2.1	Caracterização do material	38
3.2.2	Prensagem das placas	39
3.2.3	Cunhagem dos corpos de prova	40
3.2.4	Soldagem dos corpos de prova	40
3.2.5	Tratamento a plasma	41
3.2.6	Teste da gota	42
3.2.7	Ensaio de tração	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	43

4.2	ENSAIO DE TRAÇÃO DOS CORPOS SOLDADOS	45
4.3	ANÁLISE DA TENSÃO SUPERFICIAL DO PPR	51
4.3.1	Teste do ângulo de contato	51
4.3.2	Variação da resistência à tração	53
4.4	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Projeto, de acordo com Ashby (2012, p. 2), é o “processo de traduzir uma nova ideia ou necessidades de mercado em formações detalhadas com as quais se pode fabricar um produto”. Tais necessidades têm se apropriado muito da capacidade de desenvolvimento de novos materiais ou soluções tecnológicas a partir da combinação destes. Dessa forma, pode-se afirmar que a seleção e desenvolvimento de materiais são a fronteira para tecnologias do futuro (ASHBY; JHONSON, 2010). No cenário atual, em que a necessidade de soluções eficazes de dissipação de calor é crucial, tubos de calor poliméricos emergem como uma alternativa promissora, porém, apresentam desafios únicos no campo da transferência de calor.

Os tubos de calor e os termossifões são trocadores de calor altamente eficientes, que utilizam a mudança de fase de um fluido encapsulado para facilitar a transferência térmica (ZHANG; FAGHRI, 2008). Desde a década de 1960, essa tecnologia tem sido aplicada em sistemas que geram altos fluxos de calor, mas necessitam ser mantidos a temperaturas adequadas para seu funcionamento, com destaque a indústria aeroespacial (NAZARI *et al.*, 2018). Atualmente, a utilização desses dispositivos está se expandindo em diversas áreas, como indústria, construção civil, setor eletroeletrônico, entre outros, como discute Chan (2015), demonstrando um aumento significativo em sua aplicação.

Na década de 1980, a partir de estudos com termossifões, Akachi (1990) patenteou um novo tipo de tubos de calor, chamados “*Oscillating*” ou “*Pulsating Heat Pipes*” (OHP ou PHP), “tubo de calor oscilante” em tradução livre, porque o fluxo por diferença de pressão se assemelha a pulsações. Zhang e Faghri (2008) e Nazari *et al.* (2018) apresentam uma sumarização de modelagem e experimentos das recentes pesquisas e descrevem uma gama de aplicações que vão desde aquecedores solares a equipamentos em ambientes criogênicos.

A literatura refere-se aos metais como principais materiais de tubos de calor, sendo cobre, alumínio e aços inoxidáveis os exemplos basilares (MA, 2015; CHAN *et al.*, 2015; LIPS *et al.*, 2016; LIM; KIM, 2018). No que concerne aos OHPs, a independência de estrutura porosa ou ranhuras para o retorno do fluido ao evaporador oferece benefícios à miniaturização. Como a maior parte da transferência de calor se dá pelo calor sensível, torna-se passível do uso de outros materiais (MA, 2015).

No entanto, ao abordar o uso de polímeros em OHPs, os autores frequentemente tendem a fazer generalizações, tratando-os como se fossem

semelhantes às propriedades dos metais comumente utilizados. Essa generalização pode ser atribuída a uma série de fatores, como a disponibilidade limitada de dados experimentais específicos para polímeros em OHPs.

Duas variáveis livres de projeto que podem implicar restrições são a qualidade da junta soldada em tubos placa-plana e a tensão superficial do invólucro. Isto porque esta influencia diretamente o comportamento do fluido de trabalho dentro dos tubos, afetando a transferência de calor e resistência ao fluxo (MA, 2015), enquanto a análise da qualidade da solda é essencial para garantir vedação eficaz, livre de vazamentos e vulnerabilidade de entrada de gases não condensáveis (LIM; KIM, 2018).

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo demonstrar se os parâmetros de soldagem de tubos de calor de placa-plana e a tensão superficial do invólucro devem (ou não) ser considerados no projeto de tubos de calor oscilantes poliméricos, partindo de ensaios em copolímero randômico de polipropileno.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o polímero estudado por meio de análise térmica – calorimetria diferencial por varredura (DSC);
- Desenvolver método de soldagem de corpos de prova e ensaios de tração em máquina de ensaios universal para avaliação da resistência da junta soldada;
- Submeter o material à variação de sua tensão superficial e avaliar a variação das propriedades mecânicas;
- Discutir os resultados confrontando com as publicações da literatura e como as variáveis aqui discutidas deveriam (ou não) ser levadas em conta no projeto de OHPs poliméricos.

1.3 Justificativa

Com o avanço da tecnologia, os eletrônicos estão passando por uma gama de mudanças em sua forma e desempenho. Uma tendência crescente é a demanda por portáteis cada vez menores, leves e flexíveis (HAN; CHANG, 2023). A miniaturização cria novos problemas mecânicos e térmicos – implica que a estrutura deva ser excepcionalmente fina ao mesmo tempo que resistente e, embora a potência elétrica seja baixa, a densidade de potência é alta, exprimindo um desafio maior no gerenciamento térmico (ASHBY; JHONSON, 2010).

Sendo assim, alternativas para produção de extratores de calor de alta potência e baixa densidade traduzem as expectativas desse nicho de mercado (JI *et al.*, 2013). Uma alternativa que tem aumentado sua notoriedade de pesquisa em detrimento de métodos tradicionais de refrigeração, como ar, água ou imersão, para componentes eletrônicos são os tubos de calor (HAN *et al.*, 2016; LIPS *et al.*, 2016), em especial tubos de calor oscilantes, tendo potencial para entregar soluções simples, leves e flexíveis (MIYAZAKI, 2005).

Neste contexto, pesquisas com polímeros têm tido interesse crescente como uma alternativa aos materiais tradicionais, dado as vantagens potenciais: flexibilidade, baixo custo de produção, baixa densidade e resistência à corrosão (QU *et al.*, 2018). Devido ao baixo custo, poliolefinas tendem a dominar também esta área de aplicação e apresentam menor complexidade estrutural para estudos iniciais. O polipropileno copolímero randômico (PPR), por sua vez, mostra maior resistência térmica e melhores propriedades mecânicas que o polipropileno (PP) puro (BRYDSON, 1999).

Diante dessa realidade, o foco deste estudo é plenamente justificado, dada a natureza inovadora do tema e a escassez de pesquisas publicadas até o momento. A lacuna de estudos abre espaço para a investigação de aspectos cruciais: a qualidade da junta soldada e a vedação do OHP; a durabilidade das propriedades da junta; e a análise das características químicas dos polímeros utilizados como invólucro.

Portanto, esta pesquisa contribuirá para avançar o conhecimento na área de transferência de calor e para o desenvolvimento de OHPs flexíveis mais eficientes, confiáveis e economicamente viáveis às diversas aplicações industriais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Serão abordados os principais conceitos sobre forças interfaciais e tensão superficial na interfase sólido-líquido, bem como processos e característica de soldagem por placa quente de polímeros. Também se faz uma revisão dos conceitos de tubos de calor e parâmetros de configuração de OHPs, com uma visão dos princípios de seleção de materiais para esses dispositivos e ênfase nas pesquisas recentes de OHPs poliméricos. É importante observar que o volume de publicações científicas sobre este tema é limitado. Por fim, uma breve revisão de conceitos de materiais poliméricos e aplicação de plasma para mudanças superficiais é apresentado.

2.1 Forças intermoleculares e de interface

De acordo com Callister e Rethwisch (2016), as ligações primárias referem-se a ligações interatômicas relativamente fortes, nas quais as energias de ligação são relativamente grandes. Existem três tipos principais de ligações primárias: iônica, covalente e metálica. Por outro lado, as ligações secundárias são ligações interatômicas e intermoleculares relativamente fracas, com energias de ligação relativamente pequenas. A natureza da força dessas ligações secundárias varia dependendo das características das moléculas envolvidas, envolvendo dipolos atômicos ou moleculares (CANEVAROLO, 2002).

Exemplos comuns de ligações secundárias incluem as forças de *van der Waals* e a ligação de hidrogênio. Essas forças desempenham um papel fundamental na determinação das propriedades físicas e químicas das substâncias, como ponto de ebulição, ponto de fusão, solubilidade e viscosidade (BROWN; HOLME, 2017). Quando se avança para o campo de interação das substâncias ou das fases de uma mesma substância, as forças secundárias também vão assumir papel importante como forças interfaciais (BUTT; GRAF; KAPPL, 2003).

Birdi (2014) afirma que as ditas forças interfaciais são o que vão dar origem à tensão superficial na fronteira de fase de líquidos, o que se dá devido às forças assimétricas que fazem com que as moléculas da superfície estejam sob tensão. Quanto mais forte a tensão, maior a energia necessária para aumentar a área superficial, mantendo temperatura e a pressão constante. Isto explica a esfericidade

de gotas, por exemplo, uma vez que esta é a forma geométrica que possui a menor área de superfície em relação ao seu volume (SCHIFINO, 2013).

A variação da temperatura e pressão podem afetar a tensão superficial (BROWN; HOLME, 2017). A equação de Eötvös, segundo Schifino (2013) descreve a relação entre a tensão superficial de um líquido e a temperatura, dado pela Equação (1).

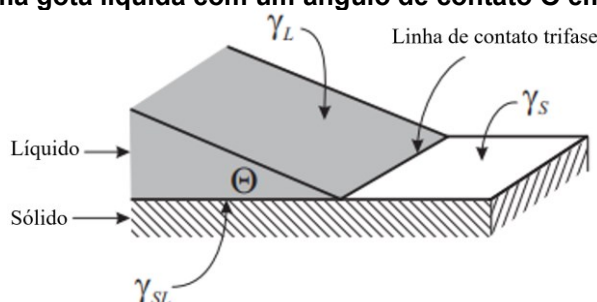
$$\gamma = K \cdot \Delta\rho \cdot \frac{1}{T} \quad (1)$$

Em que γ é a tensão superficial do fluido, em J/m^2 , $\Delta\rho$ é a diferença de densidade entre as duas fases, em kg/m^3 , T é a temperatura absoluta e K é a constante de Eötvös.

2.1.1 Ângulo de contato e a equação de Young

O ângulo de contato e o teste da gota são conceitos intimamente relacionados à tensão superficial em sólidos e líquidos. Segundo Birdi (2014), quando uma gota de líquido é colocada em uma superfície sólida, existem duas situações: ou o líquido se espalha completamente sobre a superfície, formando um ângulo de contato igual a zero, ou um ângulo de contato finito é estabelecido. No segundo caso, forma-se uma linha de contato trifase, também conhecida como linha de molhamento, onde as três fases (sólido, líquido e vapor) estão em contato entre si, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Borda de uma gota líquida com um ângulo de contato Θ em uma superfície sólida



Fonte: Butt, Graf e Kappl (2003)

A equação de Young é utilizada para descrever quantitativamente os fenômenos de molhamento. A equação de Young relaciona o ângulo de contato com as tensões interfaciais, como a tensão superficial do líquido (γ_L), a tensão superficial

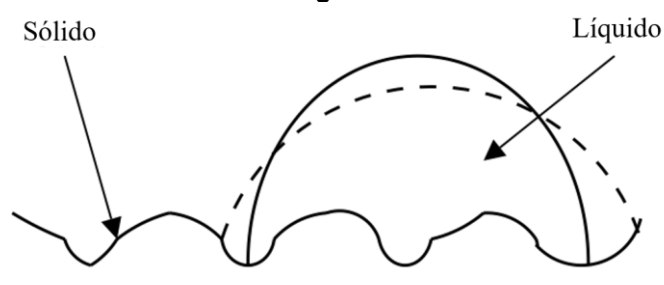
do sólido (γ_s) e a tensão superficial líquido-sólido (γ_{SL}) (SCHIFINO, 2013). Essa equação é expressa como a Equação (2).

$$\gamma_L \cdot \cos \Theta = \gamma_s - \gamma_{SL} \quad (2)$$

Para medir o ângulo de contato, é comumente utilizado um instrumento chamado goniômetro. O goniômetro é um dispositivo que permite medir e registrar o ângulo de contato formado entre a gota de líquido e a superfície sólida. Essa medida é importante para compreender a molhabilidade e as propriedades de adesão entre o líquido e o sólido (BUTT; GRAF; KAPPL, 2003).

Em se tratando de situações reais de experimento, a análise do ângulo de contato em superfícies rugosas é mais complexa do que em superfícies lisas, como mostrado na Figura 2. Em uma superfície rugosa, a gota de líquido pode apresentar um ângulo de contato real (linha sólida) ou um ângulo de contato aparente menor (linha pontilhada), dependendo da orientação da gota. No entanto, independentemente da rugosidade da superfície, as forças envolvidas na interação líquido-sólido permanecem as mesmas. Isso significa que, em uma escala microscópica, a rugosidade da superfície não afeta o equilíbrio das forças na interface líquido-sólido e no ângulo de contato (BIRDI, 2014).

Figura 2 - Análise do ângulo de contato de uma gota líquida sobre uma superfície sólida rugosa



Fonte: Adaptado de Birdi (2014)

2.2 Soldagem de polímeros

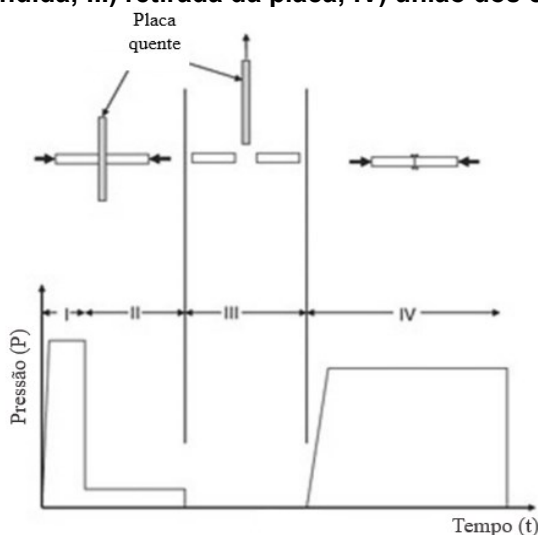
Soldagem de polímeros é um processo utilizado para unir polímeros termoplásticos, formando uma junção forte e durável (TROUGHTON, 2008). Existem várias técnicas disponíveis para este tipo de soldagem que são frequentemente classificadas em termos do método de geração de calor na interface da junta: térmico, fricção ou eletromagnético (AMANATA; JAMES; MCKENZIE, 2006).

2.2.1 Soldagem por calor e descrição do processo

A soldagem por ferramenta aquecida ou placa quente (*HPW: hot plate welding*) é um dos tipos de soldagem térmica amplamente utilizada para unir componentes moldados por injeção ou perfis extrudados, em que durante as fases de aquecimento e união das juntas é aplicada uma carga axial (TROUGHTON, 2008).

O processo geralmente utilizado é mostrado na Figura 3 e descrito por Ülker *et al.* (2017): envolve o uso de uma placa metálica aquecida para aquecer e fundir as superfícies de interface das peças termoplásticas, sob dada pressão (fase I). Na fase II ocorre o aumento da espessura fundida, a pressão aplicada é reduzida, permitindo que mais calor seja absorvido pelo material. Após o amolecimento ou fusão suficiente das interfaces, a placa quente é removida (fase III) e os componentes são pressionados juntos para formar a solda, sob pressão específica e tempo de permanência (fase IV).

Figura 3 – Diagrama de tempo e pressão para HPW, mostrando as quatro fases do processo: I) contato com a placa aquecida sob pressão; II) redução da pressão para aumento da espessura fundida; III) retirada da placa; IV) união dos componentes



Fonte: Adaptado de Ülker *et al.* (2017)

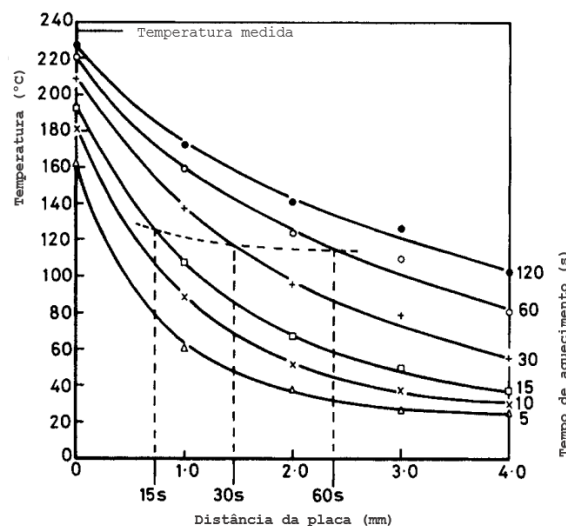
Bucknall, Drinkwater e Smith (1980) discutem que durante a fase de aquecimento e fusão (fases I e II), o contato com a placa quente produz um gradiente de temperatura no material circundante. A equação de fluxo de calor unidirecional (Equação (3)) descreve a variação da temperatura em um meio condutor ao longo do tempo e da distância e expressa comportamentos encontrados pelos autores para polimetilmetacrilato (PMMA), conforme mostra a Figura 4.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3)$$

Em que $\frac{\partial T}{\partial t}$ é a taxa de variação da temperatura em relação ao tempo, em K/s, α é a difusividade térmica, em m^2/s e $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ é a segunda derivada parcial da temperatura em relação à distância, em K/m^2 .

Essa equação descreve como a temperatura muda ao longo do tempo e do espaço quando há uma fonte de calor (a placa quente) aplicada em um dos lados do material, leva em consideração a condutividade térmica do material, sua densidade e calor específico (BROWN; HOLME, 2017).

Figura 4 – Gradientes de temperatura para especificações de PMMA em contato com a pluma quente, medida em uma faixa de tempos de contato

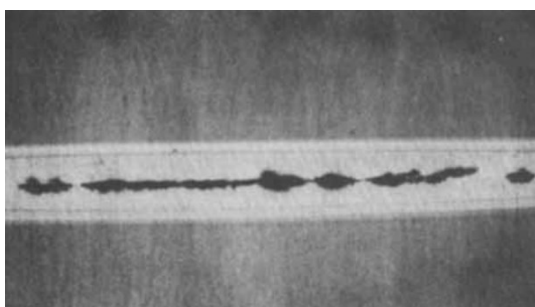


Fonte: Bucknall, Drinkwater e Smith (1980)

Bucknall, Drinkwater e Smith (1980) discutem que a redução do tempo de contato na fase I diminui a profundidade da zona fundida e, conseqüentemente, aumenta o deslocamento de soldagem. Além desse efeito, que causa alta orientação

na solda, a redução do tempo de aquecimento também diminui a temperatura na solda, resultando em uma diminuição no grau de entrelaçamento. Ambos os fatores levam a uma redução na resistência da solda. Um exemplo extremo de contato insuficiente na superfície da solda é mostrado na Figura 5, que é uma micrografia de uma amostra de polipropileno em que se observa uma ligação parcial com uma quantidade considerável de ar retido dentro da solda.

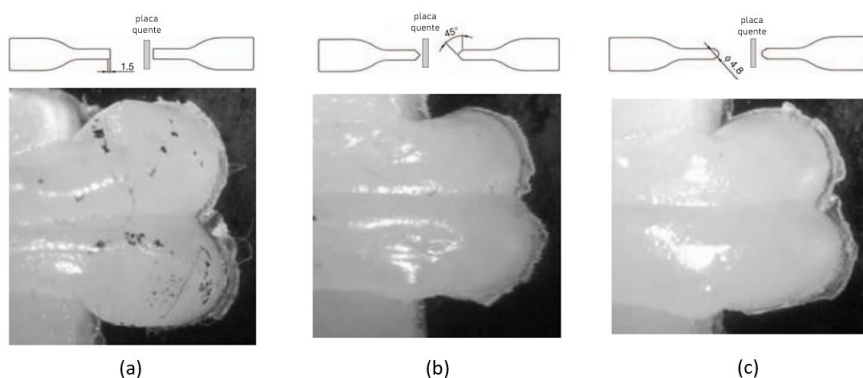
Figura 5 – Micrografia PP soldado a placa quente a 260°C, com deslocamento de soldagem de 0,4 mm, por 60 s: exemplo do efeito de contato insuficiente na superfície da solda



Fonte: Bucknall, Drinkwater e Smith (1980)

Um inconveniente da soldagem por ferramenta aquecida é que as dimensões finais da peça não podem ser controladas diretamente. Variações na espessura fundida e na sensibilidade da viscosidade do material termoplástico a pequenas variações de temperatura podem resultar em variações inaceitáveis nas dimensões da peça soldada (VENDAN *et al.*, 2019). A Figura 6 mostra os resultados visuais das soldas realizadas por Liu e Cheng (2009), com diferentes geometrias da superfície de solda de PP.

Figura 6 – Padrões de cordões de solda para PP, a 260°C, com tempo de permanência de 60 s, a 4,4 Mpa, com geometrias: (a) quadrada; (b) semicircular; e (c) triangular



Fonte: Adaptado de Liu e Cheng (2009)

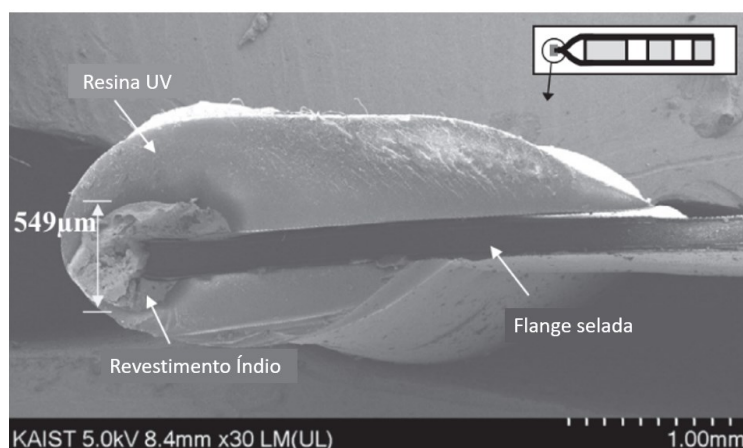
Para filmes, a soldagem (também chamada selagem) por barra quente é uma adaptação do processo anteriormente descrito. Quando dois filmes termoplásticos são pressionados contra uma barra de metal, eles amolecem e uma junta pode ser formada entre eles. No entanto, essa técnica é limitada pela condução de calor através de um dos filmes, o que restringe a espessura do material que pode ser soldado. Em alguns casos, são utilizadas duas barras aquecidas, uma em cada lado dos filmes, o que reduz o tempo de soldagem (AMANATA; JAMES; MCKENZIE, 2006).

Durante o processo de selagem industrial contínuo, a distribuição de temperatura e a pressão aplicada na superfície da placa de selagem desempenham um papel crucial. Esses parâmetros têm um impacto direto na integridade da selagem, na adesão do material e na eficiência do processo (URIBE-JUÁREZ; CORONA-LIRA; RAMÍREZ-REIVICH, 2023).

Os autores que se utilizam da soldagem de polímeros para construção de OHP de placa-plana dificilmente discutem os parâmetros de solda utilizados. Isto está ausente na discussão de Ogata, Sukegawa e Kimura (2014a), Ogata, Sukegawa e Kimura (2014b) e Lim e Kim (2018). Lim, Kang e Wu (2008) e Ji *et al.* (2013) utilizaram-se do próprio dimetil polisiloxano (PMDS) com cura a quente como cola das laterais, Han e Chang (2023), por sua vez, utilizaram impressão 3D para produção do OHP, o que dispensa necessidade de soldagem.

Lim e Kim (2018) aplicaram um revestimento de índio nos flanges selados termicamente para bloquear a permeação de gases não condensáveis em direção lateral, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Imagem SEM de seção transversal do revestimento de índio no flange selado a quente de OHP de invólucro de PE multicamadas

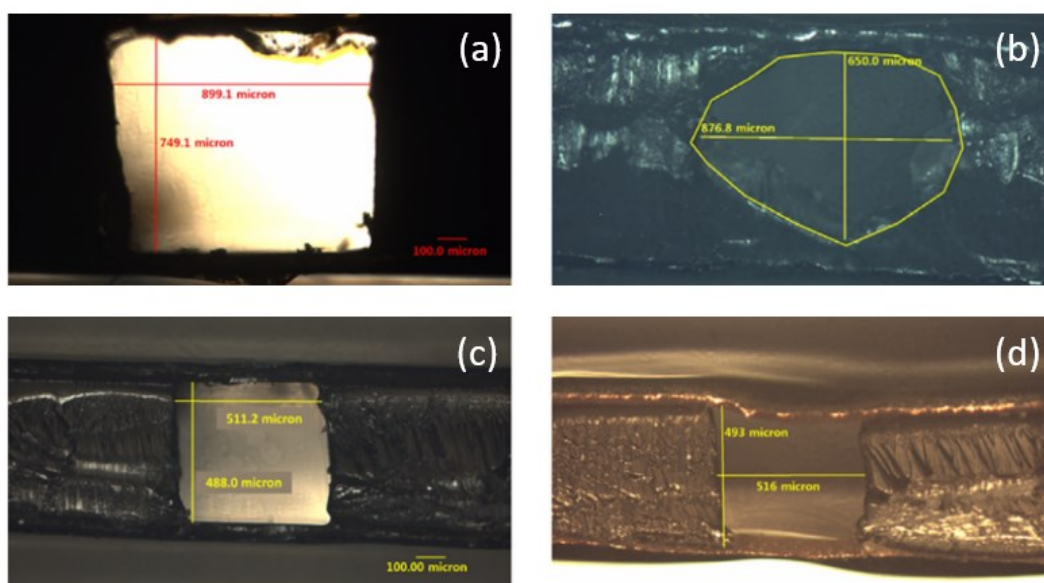


Fonte: Adaptado de Lim e Kim (2018)

O revestimento de índio foi protegido por uma resina de cura UV flexível, garantindo a integridade do revestimento mesmo sob condições de flexão. Os resultados do teste de vida acelerado mostraram que o OHP com o revestimento de índio teve uma vida útil de 18,2 dias no ambiente de teste, equivalente a 306 dias em atmosfera padrão. Isso representa um aumento significativo em comparação com o mesmo OHP sem revestimento de índio (119 dias) e em relação a versão de Ogata, Sukegawa e Kimura (2014b), utilizando PET como invólucro, que apresentou 18 dias de tempo de vida.

Jung, Lim e Kim (2020) utilizaram tratamento em plasma de O₂ para funcionalização do policarbonato, seguido de tratamento com amino-propil-trietoxi-silano (APTES) para obter uma solda química entre os canais e uma folha de cobre para selagem do flange. O processo de união desenvolvido foi realizado em temperatura ambiente para evitar a deformação da geometria do canal, isso melhora significativamente a integridade do canal, como mostrado pelos autores. A Figura 8 mostra a geometria do canal antes dos processos de união (a) e (c) e após o processo a quente (b) e químico (d) proposto por Jung, Lim e Kim (2020).

Figura 8 – Imagens microscópicas da geometria do canal de OHPs: (a) antes e (b) após solda térmica e (c) antes e (d) após ligação mediada por silano



Fonte: Adaptado de Jung, Lim e Kim (2020)

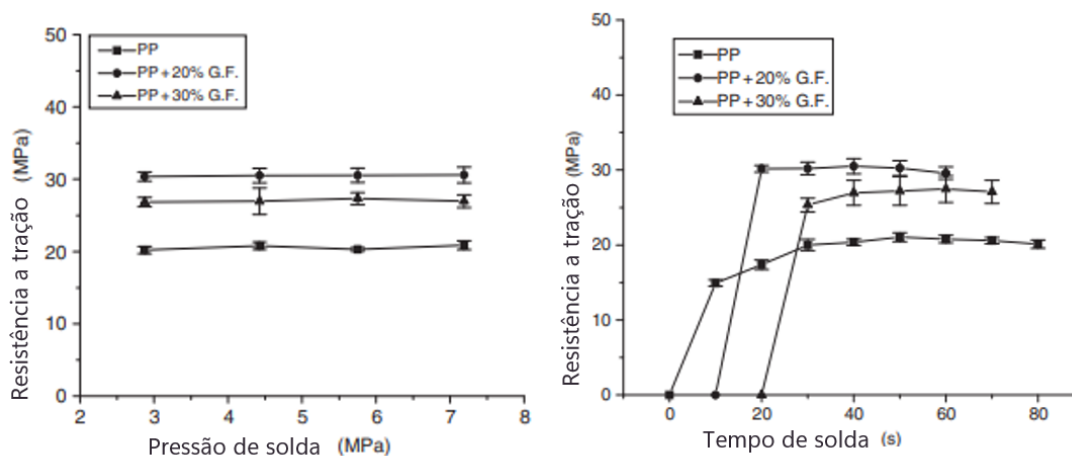
2.2.2 Análises mecânicas de soldagem de polímeros por calor

Condições desfavoráveis de soldagem podem levar à formação de vazios, tensões residuais e orientação molecular, o que reduz a resistência da solda. A fusão do polímero próxima à superfície da placa quente destrói sua microestrutura prévia. Uma nova microestrutura se formará durante o resfriamento, ditada pelos parâmetros de soldagem, ou seja, temperatura da placa quente, tempo de aquecimento e pressão de união (OLIVEIRA; HEMSLEY, 1985).

Watson e Murch (1989) avaliaram o tempo de permanência e a pressão de união em polipropileno (PP), poliestireno de alto impacto (HIPS) e polióxido de p-fenileno (PPO). Para o PP, o tempo de aquecimento e a pressão de união tiveram impacto significativo no limite de tração do corpo de prova soldado por placa quente.

Liu e Cheng (2009), por sua vez, estudando compósito de polipropileno com fibra de vidro (GF), não encontraram diferenças significativas entre a média da resistência das soldas em relação a pressão, como mostrado na Figura 9. No entanto, encontraram um tempo mínimo de contato necessário para se obter soldas minimamente robustas, principalmente para os compósitos.

Figura 9 - Efeitos da resistência à tração de PP puro e compósitos com fibra de vidro soldados em placa quente a 260°C em função da (a) pressão de solda; e do (b) tempo de solda.

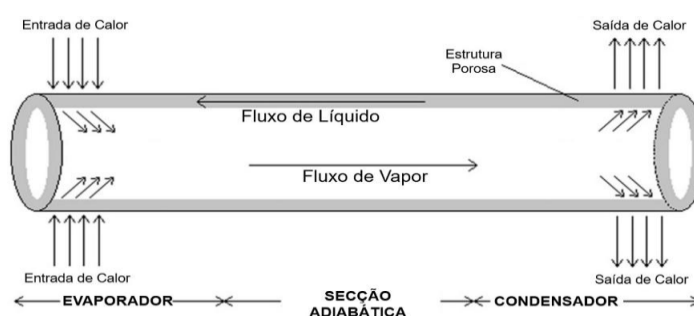


Fonte: Adaptado de Liu e Cheng (2009)

2.3 Tubos de calor

Tubos de calor e termossifões são dispositivos para troca de calor, que utilizam eficazmente a evaporação e condensação para transferir calor a uma longa distância. Consistem, basicamente, de um invólucro (tubo oco) evacuado e preenchido com um fluido de trabalho a uma porcentagem de seu volume (PETERSON, 1994). A Figura 10 apresenta a ilustração de um tubo de calor convencional.

Figura 10 - Estrutura de um tubo de calor convencional



Fonte: Adaptado de Chan *et al.* (2015)

São compostos de três seções distintas: (1) evaporador – onde o fluido de trabalho evapora a partir da exposição a uma fonte de calor; (2) seção adiabática – onde não existem trocas efetivas de calor, encontra-se entre o evaporador e o condensador, podendo ser inexistente em alguns casos e o (3) condensador – onde o fluido se condensa dissipando o calor transportado. O modo como o fluido de trabalho retorna do condensador ao evaporador é utilizado para classificação destes dispositivos (FAGHRI, 2012).

Nos tubos de calor convencionais (Figura 10), o invólucro é revestido internamente por um meio poroso, pelo qual o retorno do fluido se dá pelo efeito de bombeamento capilar, enquanto para os termossifões este retorno dá-se por efeito da gravidade, o que restringe sua aplicação, uma vez que o condensador deve sempre estar acima do evaporador. Existem ainda tubos de calor que dispensam a estrutura porosa como é o caso dos rotativos, estes operam em movimento circular, utilizando-se da força centrífuga para o retorno do fluido de trabalho (MA, 2015).

Outros tipos de tubos de calor podem ser citados, de acordo com Peterson (1994): mini/micro tubos de calor; circuitos de bombas capilares (CLPs), tubos de calor em *loop* – ou circuito (LHPs), tubos de calor de condutância variável,

bem como outras classificações: em função do tamanho ou fator de forma, da temperatura de trabalho, etc, cuja abordagem foge ao escopo deste trabalho.

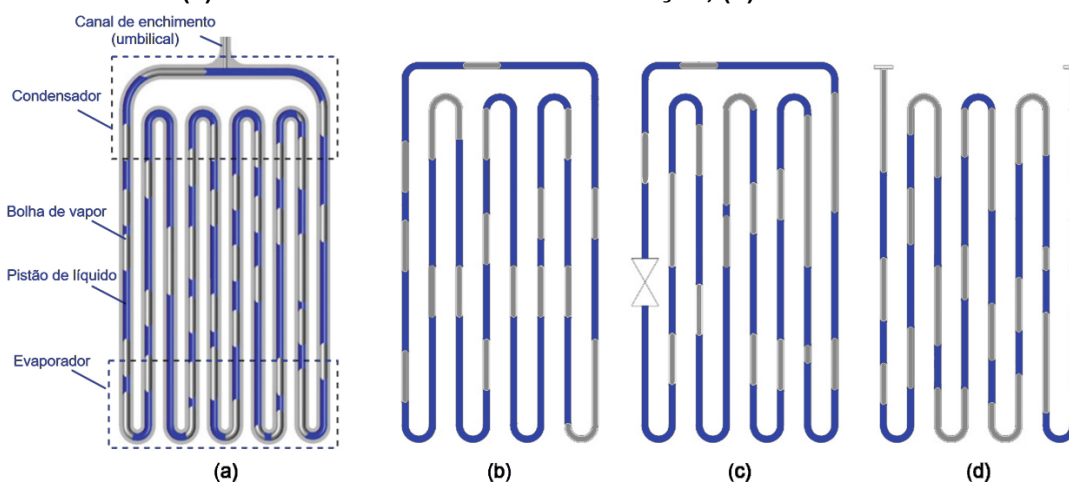
Tubos de calor são considerados máquinas térmicas passivas. Do ponto de vista termodinâmico, as regiões do evaporador e do condensador podem ser consideradas como a fonte quente e a fonte fria, respectivamente. Uma parte da energia térmica adicionada ao evaporador deve ser convertida em trabalho e consumida pelas forças de atrito, o restante da saída de trabalho é usada para bombear o fluido no sistema, não há trabalho líquido resultante no sistema. Por este motivo, o tubo de calor pode transportar mais eficientemente o calor do que a condução de calor puramente pelo material (MA, 2015).

2.4 Tubos de calor oscilante (OHP)

Tubos de calor oscilante, como os tubos de calor convencionais, são sistemas bifásicos fechados, capazes de transportar calor sem qualquer entrada adicional de energia. Funcionam através do movimento de oscilação excitado termicamente, induzido pela mudança de fase cíclica de um fluido de trabalho encapsulado, de modo que o campo de pressão de vapor, formado entre o evaporador e o condensador, causa pulsações responsáveis por bombear o fluido, o que motiva comumente chamá-los de tubos pulsantes ou oscilantes. O transporte de calor se dá por meio de pistões de líquido/ bolhas de vapor, em canais capilares interconectados em serpentina (MA, 2015; NAZARI *et al.*, 2018; HAN *et al.*, 2016).

A Figura 11(a) mostra a representação das seções. O tubo pode ser fechado (Figura 11 (b)), com a inserção de válvulas de retenção (Figura 11(c)) ou aberto (Figura 11(d)). Segundo Charoensawan *et al.* (2003) e Zhang e Faghri (2008) é, geralmente, aceito pelos pesquisadores que dispositivos de circuito fechado sem quaisquer válvulas de retenção são mais favoráveis em muitos aspectos práticos. Em relação aos abertos, possibilitam melhor circulação do fluido de trabalho e, embora as válvulas de retenção orientem o fluido em uma direção especificada, a miniaturização do dispositivo torna-se complicada, além disso, sua instalação é difícil e cara.

Figura 11 - Ilustração de OHPs: (a) Representação esquemática (b) OHP fechado; (c) OHP fechado com válvula de retenção; (d) OHP aberto



Fonte: Adaptado de Ma (2015) e Han *et al.* (2016)

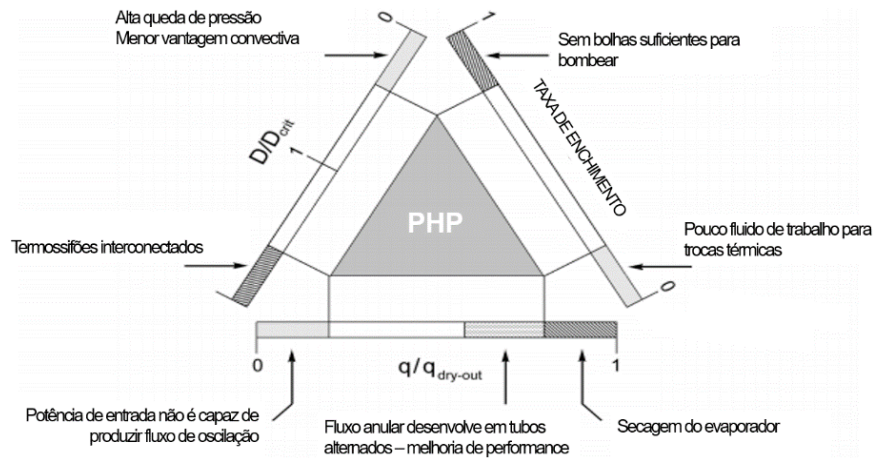
2.4.1 Fundamentos de operação do OHP

Tubos de calor oscilantes são dispositivos que apresentam importantes vantagens em relação aos tubos de calor convencionais, de acordo com Zhang e Faghri (2008), Ma (2015), e Faghri (2012):

- a) não existe retorno por estrutura porosa, nem fluxo de contracorrente entre o líquido e o vapor; com isto, o fluido de trabalho não é submetido a grandes quedas de pressão e o fluxo garante retorno rápido ao evaporador, reduzindo possibilidades de secagem do evaporador (*dry-out*);
- b) métodos de fabricação são fáceis e os custos são reduzidos, quando comparados aos convencionais, bem como usualmente são mais leves;
- c) com diâmetro muito pequeno, a tensão superficial desempenha um papel maior na dinâmica do que a força gravitacional, permitindo uma operação bem-sucedida e independência da gravidade;
- d) o filme líquido formado na parede do tubo é muito fino no fluxo de golfada, conseqüentemente, a resistência térmica é muito baixa, resultando em um coeficiente de transferência de calor alto e facilitando o *start-up* do tubo.

O dimensionamento de um OHP exige, entretanto, que pelo menos três condições termomecânicas de contorno – diâmetro interno do tubo, fluxo de entrada de calor e a taxa de enchimento – devam ser satisfeitas para que a estrutura se comporte como um verdadeiro dispositivo “pulsante” (KANDHEKAR; GROLL; 2003). A Figura 12 sumariza estas condições.

Figura 12 - Condições limite para operação de tubo de calor oscilante



Fonte: Adaptado de Kandhekar e Groll (2003)

Para que o tubo funcione como um OHP é necessário garantir uma condição ótima no balanço entre as forças capilares e gravitacionais no tubo, para isso utiliza-se o número adimensional de Eötvös (HAN *et al.*, 2016), este número também é chamado de número de Bond (MA, 2015), ambos pesquisadores chegaram às mesmas constatações empíricas. Neste trabalho, preferir-se-á chamá-lo Eötvös, dado pela Equação (4).

$$E\ddot{o} = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot \phi^2}{\gamma} \quad (4)$$

Sendo $E\ddot{o}$ o número adimensional de Eötvös, em que $\Delta\rho$ é a diferença de densidade entre as duas fases (líquido e vapor) em kg/m^3 , ϕ é o diâmetro hidráulico do capilar, em metros, g é a aceleração da gravidade em m/s^2 e γ é a tensão superficial do fluido de trabalho, em J/m^2 .

Garantindo-se que as forças viscosas sobreponham as forças gravitacionais ($E\ddot{o} < 4$) a bolha de vapor pode aderir a ambos os lados da parede do canal e o tubo funciona como OHP (LIN; KANG; WU, 2009).

Entretanto, diâmetros muito reduzidos implicam em baixo volume de fluido de trabalho e, conseqüentemente, baixa efetividade de transferência de calor, Charowesan *et al.* (2003) e Lee e Kim (2017) mostraram que o desempenho e o limite de operação melhoram com o aumento do diâmetro hidráulico. É aceito que o diâmetro do canal deve ter número de Eötvös de no mínimo 0,7 e no máximo 1,8, de modo a maximizar o desempenho (HAN *et al.*, 2016; HAO; MA; MA, 2019).

A segunda condição de contorno é a taxa de enchimento – volume de fluido em relação ao volume do tubo vazio – que para OHPs é geralmente entre 40%

e 60% (FAGHRI, 2012). Todavia, é uma das variáveis mais controversas para este tipo de tubo, visto que as características de fluxo são demasiadamente influenciadas pelo fluido e por condições operacionais e de fabricação, que ainda não são bem relacionadas na literatura. O que se convencionou é que quanto maior a taxa de enchimento, maior a dificuldade de fluxo pois menor a quantidade de bolhas, e quando a taxa é menor, maior o grau de liberdade e menor a condução por calor sensível (KANDHEKAR; GROLL, 2003).

Por exemplo, utilizando borracha fluorada, Qu *et al.* (2017) concluíram que menores taxas de enchimento (50%) apresentaram melhores resultados, enquanto para Hao, Ma e Ma (2019) trabalhando com tubos de teflon, taxas mais altas de enchimento (70%) tiveram melhores desempenhos. Qu *et al.* (2017) utilizavam seções adiabáticas bem maiores, o que implica que as características de fluxo naquela situação eram mais importantes que as de condução, destarte, é necessário avaliar com cuidado as configurações do tubo para escolha da taxa de enchimento.

Como terceira e última condição de contorno, a potência de entrada está associada principalmente ao padrão de escoamento. A baixas potências, o fluxo não é bem definido pois as perturbações ainda são baixas para bombear as bolhas. O aumento da potência implica na organização do fluxo e o tubo passa a se comportar como pulsante, o filme líquido fino aumenta expressivamente a transferência de calor no evaporador. A potências muito altas, o padrão de escoamento pode se converter totalmente em anular, reduzindo o drasticamente o desempenho e possibilitando secagem do evaporador (KHANDHEKAR; GROLL, 2003).

A medição do desempenho do tubo, segundo Charoensawan *et al.* (2003), pode ser conduzida de duas maneiras: (i) controlando o fluxo de calor de entrada e a temperatura do condensador, caso em que a temperatura do evaporador é a variável dependente e, (ii) controlando a temperatura do evaporador e do condensador, assumindo potência como variável dependente. A resistência térmica global (R_e), dada em K/W é a propriedade mais importante geralmente medida, mede a facilidade do tubo transportar calor. É aferida pela razão da diferença de temperatura entre as seções (em K) pela potência de entrada Q (dada em W), como mostra a Equação (5).

$$R_e = \frac{T_C - T_E}{Q} \quad (5)$$

2.4.2 Parâmetros de configuração

Segundo Ma (2015), o tubo pode ser construído em configuração tubular (tubo dobrado em serpentina), ou placa-plana (placas com ranhuras de meio canal usinadas na superfície e unidas por solda). A primeira configuração é mais fácil de ser construída, mas difícil de se combinar com as geometrias das superfícies de evaporador e condensador. Quanto à geometria do canal, Lee e Kim (2017) discutiram em seus resultados que um micro OHP de canal quadrado pode lidar com um fluxo de calor mais alto que um de canal circular.

Ainda relacionado à geometria, o número de voltas do tubo está associado ao incremento da oscilação (ZHANG; FAGHRI, 2008). Charoensawan *et al.* (2003) mostraram que um número crítico de voltas é necessário para funcionamento à altas potências e o desempenho na horizontal melhora quanto maior o número de voltas.

Outra etapa importante no projeto do tubo é a escolha do fluido de trabalho, pois é o que determina o desempenho térmico. Dentre os fatores que devem ser levados em consideração, estão faixa de temperatura de operação, compatibilidade química com o invólucro, tensão superficial, condutividade térmica, calor latente, calor específico, viscosidade e densidade (NAZARI *et al.*, 2018). Também é importante garantir a ausência de gases não condensáveis diluídos no fluido, a partir de um processo de degaseificação antes do carregamento (PETERSON, 1994).

A presença de gases não condensáveis (GNC) problemática para tubos de calor porque estes se acumulam no condensador, impedindo a transferência de calor, a presença de GNC em 5% em volume podem reduzir cerca de 20% da taxa de condensação. Para OHPs isso é ainda mais pronunciado, uma vez que a força motriz para o funcionamento é a diferença de pressão entre as fases, GNCs afetam diretamente a frequência de oscilação e desempenho (SENJAYA; INOUE, 2014).

2.4.3 Influência da tensão superficial do invólucro

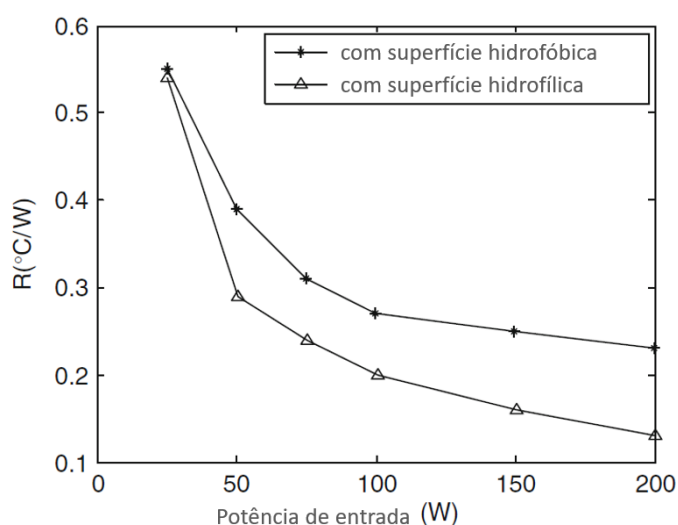
Devido à sua dependência do movimento oscilatório termicamente excitado, um tubo de calor oscilante pode funcionar mesmo quando sua superfície interna é hidrofóbica. Isso é diferente do tubo de calor convencional, que não funcionará nessa condição devido à falta de pressão capilar para bombear o condensado. Na transferência de calor em um tubo de calor oscilante, a maior parte do calor é

transportada pelo calor sensível através do movimento oscilatório, proporcionando um mecanismo alternativo eficiente de transferência de calor (MA, 2015).

Embora, possa funcionar, OHPs com material hidrofóbico apresentam desempenho pior devido à dificuldade de formação de filme fino na seção do evaporador, conforme é mostrado por Ji *et al.* (2012). À medida que a potência de entrada aumenta, a resistência térmica do OHP com superfície hidrofóbica diminui. Isso segue a mesma tendência observada no OHP com superfície interna hidrofílica, no entanto, a resistência térmica do OHP com superfície hidrofóbica é maior do que aquela com superfície interna hidrofílica (JI *et al.*, 2012; MA, 2015).

A Figura 13 mostra os resultados obtidos por Ji *et al.* (2012), a resistência térmica de OHP hidrofóbicos pode ser até 33% maior que a dos hidrofílicos, com mesma potência de entrada, além de dificultar o início de fluxo, o que pode impedir a refrigeração de componentes que apresentam baixa saída de calor.

Figura 13 – Efeito da energia de entrada na resistência térmica para OHPs hidrofóbicos e hidrofílicos



Fonte: Adaptado Ji *et al.* (2012)

2.5 Seleção de materiais e o projeto de um tubo de calor

A performance de um produto depende de seu material constituinte e de um processo de fabricação viável para dar-lhe forma. O ato de projetar um produto a partir da tarefa de seleção de materiais implica em coletar o máximo de informações necessárias sobre as exigências do material em cada etapa de vida do produto e traduzi-las em exigências e restrições de projeto.

O desenvolvimento do design se inicia pela formulação das características desejadas de um produto, sendo a aplicação das restrições fundamental. Neste processo de projeto, somente experimentando maneiras diferentes em que estas variáveis são combinadas é que o design pode ser refinado (ASHBY; JHONSON, 2010). O Quadro 1 fornece uma visão precisa do que corresponde a etapa de tradução de um projeto, sobretudo explorada neste trabalho.

Quadro 1 – Condições limite para operação de tubo de calor oscilante

Condições limite de projeto	Delimitação
Função	O que o componente faz?
Restrições*	Quais são as condições não negociáveis que ele deve cumprir? Quais são as condições negociáveis, porém desejáveis, que ele deve cumprir?
Objetivo	O que deve ser maximizado ou minimizado?
Variável livre	Quais são os parâmetros do problema que o projetista tem liberdade de mudar?

Nota: Às vezes é útil distinguir entre restrições absolutas e restrições relativas. Por exemplo, rigidez e resistência devem ser requisitos absolutos, enquanto custo pode ser negociável, logo restrição relativa.

Fonte: Adaptado de Ashby (2012)

O processo de design de um tubo de calor passa por várias etapas de desenvolvimento, porque neste componente inúmeras variáveis, como mostrado na seção 2.4, podem atuar como variáveis livres, o que faz com que o projeto concirna uma sequência de decisões, que devem ser tomadas, para cada uma das etapas do processo de dimensionamento e que dependem também do tipo de aplicação do tubo (FAGHI, 2012; PETERSON, 1994). O Quadro 2 traz a importância qualitativa do fluido de trabalho e do material do tubo a diferentes características consideradas no projeto.

Quadro 2 – Compatibilidade físico-química entre materiais e fluidos para tubos de calor

Característica	Fluido de Trabalho	Material do Tubo
	Performance Térmica	
Capacidade de transporte	FORTE	FRACO
Faixa de temperatura de operação	FORTE	FRACO
Diferença de temperatura	MÉDIO	FRACO
	Aspectos Mecânicos	
Geometria, peso, etc	FRACO	MÉDIO
Espessura da parede	FRACO	FORTE
Interface com evaporador e condensador	DESPREZÍVEL	FORTE
Estática e dinâmica	FRACO	FORTE
	Confiabilidade e Segurança	
Compatibilidade de materiais	FORTE	FORTE
Corrosão e degradação	DESPREZÍVEL	FORTE
Fabricação	MÉDIO	MÉDIO
Possibilidade de vazamento	FRACO	FORTE

Fonte: Adaptado de Peterson (1994)

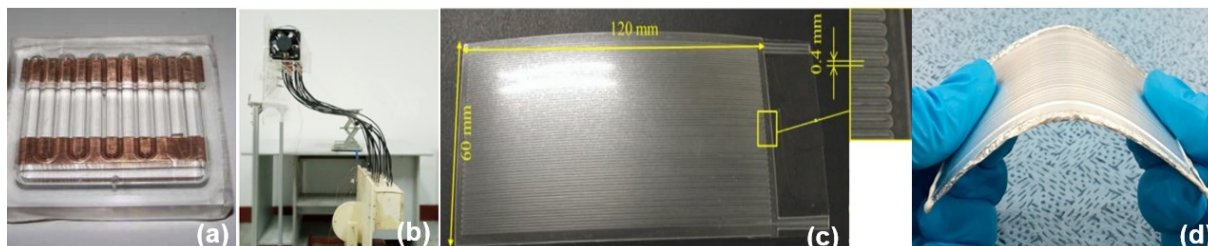
2.6 Panorama de pesquisas recentes em OHPs poliméricos

Devido à alta eficiência, tubos de calor têm se tornado cada vez mais populares como tecnologias de transferência de calor passiva e os estudos envolvendo esta tecnologia ganharam proeminência nos últimos anos (LIPS *et al.*, 2016). Como mostrado na seção anterior, o desempenho térmico do tubo é fracamente influenciado pelo material do invólucro. Assim, as possibilidades de conformação e combinação de polímeros a baixo custo, além da facilidade de produção, são um campo bastante atrativo para o desenvolvimento de tubos de calor flexíveis.

Polímeros foram relatados na literatura pela primeira vez como material promissor para OHPs por Miyazaki (2005), utilizando teflon na seção adiabática de um tubo de cobre. O tubo estudado tinha 12 voltas, 1 mm de diâmetro do canal, R-134A como fluido de trabalho e taxa de enchimento de 70%. Mesmo não funcionando na horizontal, o dispositivo apresentou bom desempenho, sem dependência em relação à inclinação, atestando a possibilidade de aplicação para o resfriamento de componentes eletrônicos.

As pesquisas atuais têm se centrado em tubos puramente poliméricos ou com interação com metais nas seções do evaporador e condensador, em que se exige trocas térmicas (QU *et al.*, 2017). A Figura 14 mostra alguns exemplos de configuração de tubos estudados.

Figura 14 - OHPs poliméricos. (a) PMDS; (b) Borracha Fluorada; (c) PET; (d) PE/laminado

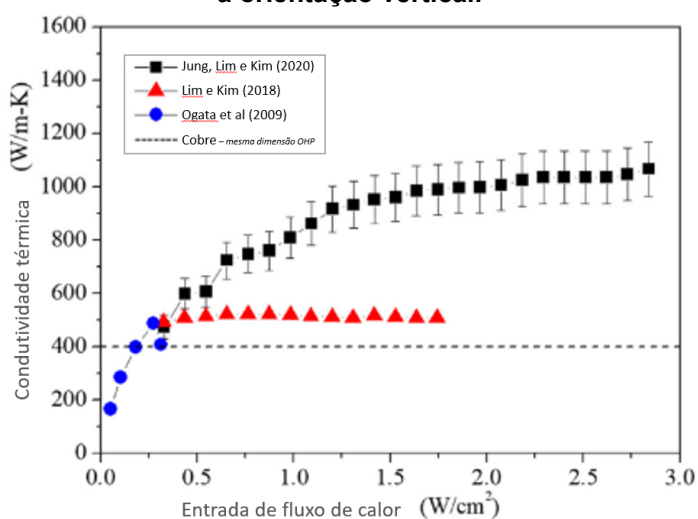


Fonte: Adaptado (a) Ji *et al.* (2013); (b) Qu *et al.* (2017); (c) Ogata *et al.* (2014a) e (d) Lim; Kim (2018)

O que se tem de resultados mais promissores nessa área foram os estudos de Hao, Ma e Ma (2019) em configuração tubular, utilizando-se de tubos de teflon-PTFE (poli-tetra-flúor-etileno), obtiveram $0,092 \text{ }^\circ\text{C/W}$ foi alcançada no OHP com acetona (70% taxa de enchimento) e 260 W.

Em se tratando de tubos placa-plana, Jung, Lim e Kim (2020), que já tiveram resultados promissores no método de solda citados na seção 2.2.1, fizeram um comparativo de performance térmica apresentado na Figura 15. Os resultados são os deles (JUNG; LIM; KIM, 2020) com seu dispositivo de policarbonato soldado quimicamente por amino-propil-trietoxi-silano (APTES) a filme de cobre em comparação aos de Lim e Kim (2018) que utilizaram polietileno (PE) e Ogata *et al.* (2009) que utilizou politereftalato de etila (PET).

Figura 15 – Condutividades térmicas efetivas do OHP em vários fluxos de calor de entrada em a orientação vertical.



Fonte: Adaptado de Jung, Lim e Kim (2020)

Han e Chang (2023) desenvolveu com sucesso OHP utilizando impressão 3D com elastômero termoplástico de poliuretano (TPU). Seus resultados mostraram que

a taxa de enchimento de 40% de etanol proporcionou a menor resistência térmica e maior eficiência operacional, alcançando uma condutividade térmica efetiva máxima de 514 W/m-K, a uma potência de 7 W e resistência térmica de 1,16°C/W. A integração do tubo de calor com circuitos impressos flexíveis demonstrou um bom desempenho de gerenciamento térmico, mantendo a operação normal dos circuitos e prolongando sua vida útil, o que abre caminho para aplicações futuras em dispositivos eletrônicos vestíveis, LEDs flexíveis de alta potência e outros sistemas (HAN; CHANG, 2023)

O Quadro 3 apresenta uma análise dos protótipos e dos principais resultados publicados nos últimos anos para tubos de calor poliméricos entre 2009 e 2020.

Quadro 3 – Sumarização de modelagem e experimentos recentes com OHPs poliméricos de 2009-2020

(continua)

AUTORES (ANO)	MATERIAL	CONFIGURAÇÃO	FLUIDO DE TRABALHO	GEOMETRIA CANAL (DIMENSÃO)	POSIÇÕES DE TESTE	Nº VOLTAS	TAXA ENCHIMENTO	CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS
Lim, Kang e Wu (2009)	Polidimetilsiloxano (PDMS)/Cobre	Placa-plana (fechado)	Metanol Etanol	Circular (Φ 2m m)	Vertical/ Horizontal	6	60%	Altas resistências térmicas a baixa potência de entrada (3W-8W); Resistência térmica do metanol é menor que o etanol (-4,5°C/W); Tubo não funcionou na horizontal.
Ji <i>et al.</i> (2013)	Polidimetilsiloxano (PDMS)/Cobre	Placa-plana (fechado)	Etanol Nanofluido (Etanol/ Al ₂ O ₃)	Circular (Φ 2mm)	Vertical	5	70%	Resistência térmica diminuiu com o aumento da potência de entrada (a 20W – pode ser tão baixa quanto 2,46°C/W). Nanofluido e interação com campo elétrico não afetaram desempenho.
Ogata, Sukegawa e Kimura (2014a)	Polietilenotereftalato (PET)/ Resina de cura UV (composição não informada)	Placa-plana (aberto)	Hidrofluoroéter (HFE-7000)	Retangular (L - 0,4 mm/ h - 0,25 mm)	Horizontal	68	50%	Com 0,34 mm de espessura, acima de 4W de potência de entrada, o OHP apresentou resistência térmica equivalente a uma placa de cobre de referência.
Ogata, Sukegawa e Kimura (2014b)	Polietilenotereftalato (PET)/ Resina de cura UV (composição não informada)	Placa-plana (aberto)	Hidrofluoroéter (HFE-7000)	Retangular (L 0,4 mm/ h 0,25 mm)	Horizontal	68	50%	A exposição do tubo de calor a atmosfera ao longo do tempo mostrou que a permeabilidade de gases do filme gerou um aumento acima de 10% da resistência térmica inicial em 18 dias. Enquanto os tubos expostos a pressão reduzida mantiveram o comportamento constante ao longo do mês testado.
Qu <i>et al.</i> (2017)	Híbrido Condensador e evaporador: Cobre ranhurado Seção adiabática: borracha fluorada	Tubular (fechado)	Água deionizada	Circular (Φ 4 mm)	Vertical (a) "I" (b) "Degrau" (c) "N" (d) "U" invertido	7	50% 60% 70%	Somente a configuração em "I" pode funcionar bem e a flexão da seção adiabática degrada parcialmente o <i>start-up</i> e a transferência de calor da OHP. Deformação maior da seção adiabática leva ao aumento da temperatura do evaporador. O fenômeno de secagem do evaporador também se verificou para as configurações em "degrau" e em "N". Menores taxas de enchimento apresentaram melhores resultados.

Quadro 3 – Sumarização de modelagem e experimentos recentes com OHPs poliméricos de 2009-2020

(conclusão)

AUTORES (ANO)	MATERIAL	CONFIGURAÇÃO	FLUIDO DE TRABALHO	GEOMETRIA CANAL (DIMENSÃO)	POSIÇÕES DE TESTE	Nº VOLTAS	TAXA ENCHIMENTO	CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS
Qu <i>et al.</i> (2018)	Híbrido Condensador e evaporador: Cobre ranhurado Seção adiabática: borracha fluorada	Tubular (fechado)	Água deionizada	Circular (Φ 4 mm)	Vertical (a) "I" (b) "Degrau" (c) "N" (d) "U" invertido	7	50%	Neste estudo variou-se o tamanho da seção adiabática. O aumento da seção implicou em um maior tempo de <i>start-up</i> e apenas a forma em "I" apresentou desempenho suficiente para aplicação como controle térmico de bateria de veículos híbridos.
Lim e Kim (2018)	Polietileno de baixa densidade (LDPE) e multicamada laminada (PET/LDPE/AL/LLDPE) + recobrimento com índio	Placa-plana (fechado)	Hidrofluoroéter (HFE-7000)	Quadrada (L variável - 0,7 e 1,4 mm h - 0,84 mm)	Vertical/ Horizontal/ 90°	12	50%	O protótipo operou na horizontal e vertical com resistência inferior a referência de cobre. Em orientação vertical, a resistência térmica foi de 2,41 K/W, 37% menor que a referência de cobre e com massa 16% menor. Na orientação horizontal, a resistência térmica foi 30% maior que na orientação vertical. Para os testes com angulação de 90°, houve um aumento de 5,5% quando evaporador operava na vertical e 8,1% quando operava na horizontal. Os testes de vida mostraram uma duração de 306 dias para o protótipo.
Hao, Ma e Ma (2019)	Politetrafluoroetileno (PTFE)	Tubular (fechado)	Água Etanol Acetona	Circular (Φ 2,41 mm)	Vertical	6	50% 70%	As resistências térmicas foram maiores para uma maior taxa de enchimento. A menor resistência térmica de 0,092 °C/W foi alcançada no OHP com acetona (70% taxa de enchimento) e 260 W. A água como fluido de trabalho demonstrou menores amplitudes de oscilação, no entanto foi o que apresentou maior resistência térmica.
Jung, Lim e Kim (2020)	Policarbonato (PC) e multicamada laminada de cobre e poliimida	Placa-plana (fechado)	Hidrofluoroéter (HFE-7000)	Quadrada (L variável - 0,5 e 1,5 mm h - 0,84 mm)	Vertical/ Horizontal/ 45°	15	50%	O OHP operou normalmente em todas as orientações. A condutividade térmica foi 20,4% menor na orientação horizontal e 3,4% menor com a inclinação de 45° quando comparado à vertical. O tempo de vida estimado foi de 2000 dias.

Fonte: Autoria própria (2023)

2.7 Polímeros como material de projeto

Polímeros são macromoléculas com massa molar acima de 10.000 g/mol, formadas a partir da repetição de unidades estruturais chamados meros (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Podem ser formados por um único mero – homopolímeros, ou ainda, por dois ou mais meros – copolímeros. As alterações na cadeia pela inclusão de meros diferentes podem modificar propriedades específicas, viabilizando aplicações. O modo como esses meros estão organizados os classifica em copolímeros randômico (ou aleatório), alternado, em bloco ou grafitizado (VENDAN *et al.*, 2019).

Segundo Canevarolo (2002), podem também ser classificados quanto à estrutura química: poliolefinas (e.g. PE e PP), polímeros de dienos (e.g. Neopreno e NBR), estirenicos (e.g. PS e ABS), clorados (e.g. PVC), fluorados (PTFE), acrílicos (e.g. PMMA), poliéteres (e.g. PA) e poliésteres (e.g. PET), poliamidas (e.g. Nylon), poliuretanos (e.g. PU), entre outros. Especificamente, poliolefinas são polímeros originários de monômeros de hidrocarboneto insaturado de cadeia aberta contendo dupla ligação carbono-carbono reativa. Os termoplásticos poliolefinicos são classificados dentre os polímeros *commodities*, que se caracterizam pela facilidade de produção e processamento a baixo custo (VENDAN *et al.*, 2019).

Como mostrado na seção 2.6, as pesquisas envolvendo OHPs poliméricos são um campo recente de estudo. Para OHPs, a permeabilidade do material é extremamente importante, como discutido na seção 2.4.2.

2.7.1 Polipropileno (PP) e seu copolímero randômico de etileno (PPR)

O polipropileno é sintetizado pela polimerização em cadeia do propeno, geralmente com uma orientação específica que depende do catalisador. A presença do grupo metil favorece a formação da polimerização cabeça-cauda e a regularidade química do polímero, apresentando cerca de 60% de cristalinidade, com conformação helicoidal e como principal produto comercial o polipropileno isotático. Pode apresentar ainda polimorfismo, cristalizando nas formas α (célula unitária monoclinica) - mais termodinamicamente estável e comum; β (célula unitária hexagonal) - formada

pelo processo de estiramento a baixas temperaturas; e γ (célula unitária triclínica) – resultado do resfriamento a baixas taxas (KARGER-KOCSIS, 1995).

Em produtos fabricados, é comum observar uma predominância de esferulitos de baixa birrefringência positiva do tipo α , juntamente com uma menor quantidade de esferulitos de alta birrefringência negativa, do tipo β . A fusão das formas α e β apresentam comportamentos distintos. Amostras contendo apenas a forma α demonstram um único pico de fusão em calorimetria diferencial de varredura (DSC). Por outro lado, quando ambas as formas estão presentes, múltiplos picos de fusão podem ser observados, dependendo da taxa de aquecimento e da temperatura de cristalização (OLIVEIRA; HEMSLEY, 1985).

Polímeros randômicos de polipropileno (PPR) são formados por meros de propileno e etileno (usualmente em até 7%), o que confere propriedades distintas em relação ao homopolímero. Polietileno tem conformação zigue-zague, o que altera a direção de propagação das cadeias na cristalização do PPR, inserindo defeitos na estrutura e, conseqüentemente, diminuindo a cristalinidade. A célula unitária para copolímeros é prioritariamente triclínica (cristalização na forma γ) e somente para valores muito altos de etileno (>15%) é que se formarão blocos cristalinos de etileno, sendo prioritariamente inseridos como defeitos inclusos ou excluídos das lamelas (BRYDSON, 1999).

A presença do etileno aumenta a fase amorfa e com isso reduz a temperatura de fusão, propriedade utilizada com fim industrial para filmes termo seláveis, também possibilita um incremento da flexibilidade do polímero. A temperatura de fusão do PP homopolímero, cerca de 160°C é reduzida para 145°C em polímeros randômicos (KISSEL; HAN; MAYER, 1999), entretanto a resistência à trabalho sob temperatura, as propriedades mecânicas (levemente menores) e a estabilidade térmica tem proporcionado o uso de PPR para sistemas de tubos de água quente em aplicações residenciais e industriais (TETLOW, 2015). O PPR apresenta ainda hidrofobicidade e boa resistência química, quando comparado a outros termoplásticos (KARGER-KOCSIS, 1995).

A escolha do PPR é atribuída a uma melhor característica de flexibilidade e temperatura de trabalho. Todavia, com uma menor cristalinidade, verifica-se uma maior permeabilidade devido a maior fração de volume livre. Deste modo, o trabalho procura conciliar as propriedades de interesse, visto que a maior flexibilidade permite melhor desempenho mecânico sob flexão.

2.7.2 Modificação da superfície do polímero por meio de plasma

O objetivo mais atraente da modificação superficial de polímeros é modificar significativamente as propriedades da superfície sem alterar suas propriedades *bulk*. O plasma tem sido utilizado com sucesso para melhorar as propriedades e estrutura da superfície, seja ativando superfícies quimicamente inertes de ou revestindo o substrato com uma fina camada funcionalizada de polímero depositado por plasma (Ma *et al.*, 2015).

O plasma é uma mistura gasosa de radicais, íons, elétrons e neutros que também é conhecido como o quarto estado da matéria, sendo classificados como térmicos, cujo principal exemplo é a corona, ou não térmicos (plasma a frio), que utilizam de baixas pressões para gerar excitação por meio da descarga de corrente contínua (DC), radiofrequência (RF) ou micro-ondas (STROBEL; LYONS; MITTAL, 1994).

O método *glow discharge* (descarga de brilho, em tradução livre) é um método de corrente contínua, em que as descargas ocorrem entre dois eletrodos desencapados, em pressões de trabalho geralmente variando de 10^{-1} a 10 Pa. Devido à alta energia dos elétrons gerados, eles excitam facilmente átomos e moléculas neutras, resultando no fenômeno característico da descarga de brilho (RANKUMAR *et al.*, 2018).

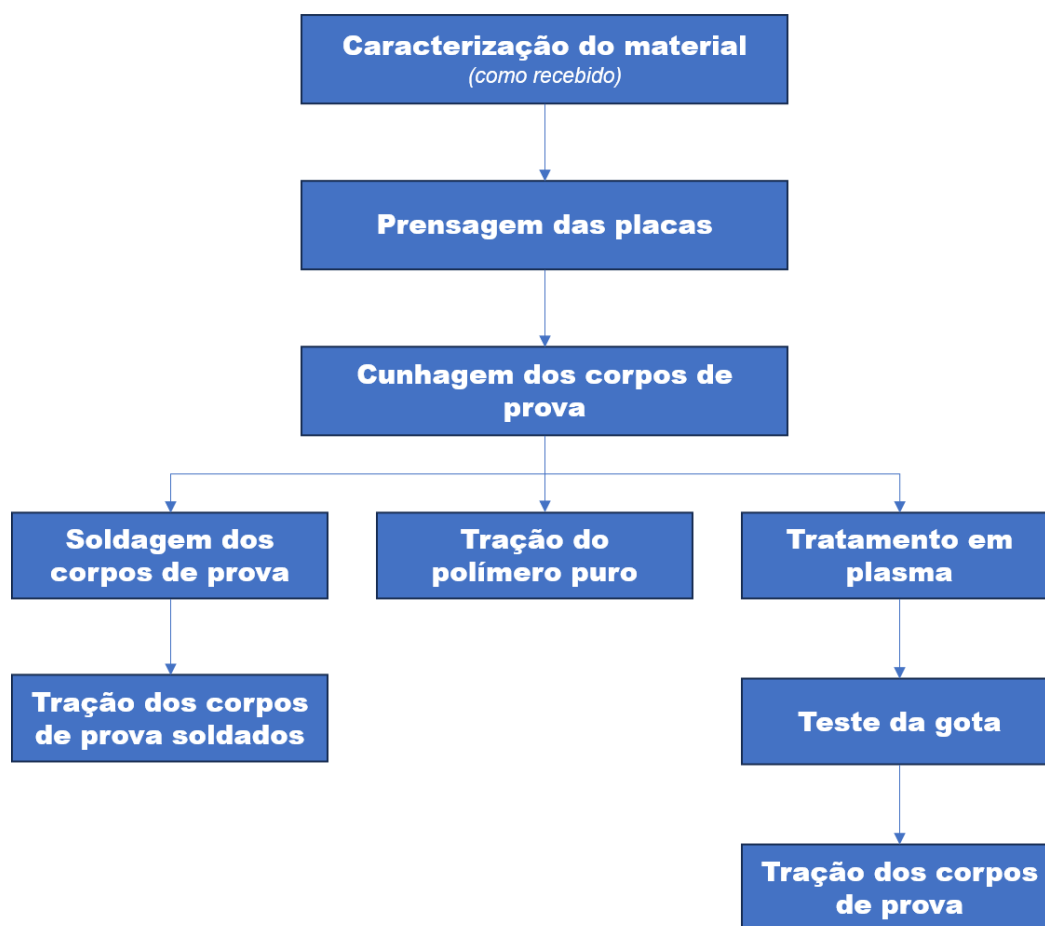
Os mecanismos envolvem o bombardeio físico por partículas energéticas e fótons ultravioleta, especialmente o ultravioleta de vácuo (VUV, $\lambda \leq 175$ nm), que possuem energia suficiente para quebrar a maioria das ligações orgânicas e causar reações químicas na superfície ou em suas proximidades. Esses mecanismos resultam em quatro principais efeitos: limpeza, abrasão, reticulação e modificação química da superfície. Esses efeitos ocorrem em uma sinergia complexa, dependendo de vários parâmetros controlados pelo operador (MORENT *et al.*, 2008).

Strobel, Lyons e Mittal (1994) discutem que amostras tratadas com plasma de nitrogênio não apresentaram nenhuma oxidação, conforme determinado pela análise de NMR, FTIR e SEM. O NMR mostrou apenas uma diminuição na intensidade do pico de metila de cerca de 5% e um aumento de cerca de 5% nas intensidades de pico CH e CH₂, indicando a presença, indicando a formação de ligação de exometileno. Este estudo dá bases para a modificação de superfície que se discute nesse trabalho.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O procedimento experimental utilizado neste trabalho a fim de cumprir com os objetivos estabelecidos é apresentado no fluxograma da Figura 16.

Figura 16 – Fluxograma de atividades



Fonte: Autoria Própria (2023)

3.1 MATERIAL

O polímero utilizado nesse trabalho foi o PP copolímero randômico de nome comercial Esenttia 01R25, da empresa Propilco, disponibilizado pelo Departamento de Engenharia de Materiais da UTFPR – Londrina. Este apresenta, segundo *datasheet* fornecido pelo fornecedor, um índice de fluidez de 0,8 g/min, resistência à tração de 24,13 MPa, tensão de alongamento de 13,5% (50 mm/min) e resistência ao impacto de 128,11 J/M (método Izod com corpo de prova entalhado).

3.1.1 Equipamentos utilizados

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os equipamentos a seguir descritos com modelo, marca e local de utilização:

- DSC 60 (Shimadzu) – Laboratório de Análise de Materiais (UTFPR-LD);
- Balança analítica UX620H (Shimadzu) – Laboratório Polímeros (UTFPR-LD);
- Prensa hidráulica 15 ton (Marconi) – Laboratório de Polímeros (UTFPR-LD);
- Máquina universal de ensaios WDW-100E (Time Group) – Laboratório de Ensaio de Materiais (UTFPR-LD);
- Paquímetro analógico (ZAAS) – Laboratório de Ensaio (UTFPR-LD);
- Goniômetro de ângulo de contato (Ossila) – Laboratório de Nanomateriais do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM (UTFPR-LD);
- Micropipeta (Kasvi) – Laboratório de Nanomateriais do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM (UTFPR-LD);
- Evaporadora AUTO 306 (HHV) – Laboratório de Análises por Técnicas de Raios X – LARX (UEL-LD).

3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Como apresentado na Figura 16, pode-se dividir os métodos deste trabalho em quatro etapas (i) preparação do material: caracterização do material, prensagem de placas de polipropileno para retirada dos corpos de prova, cunhagem dos corpos de prova; (ii) soldagem dos corpos de prova variando pressão e tempo de solda; (iii) exposição a plasma variando tempo de exposição; e (iv) ensaios de caracterização: ensaio de tração e ensaio do ângulo de contato. A seguir cada uma das etapas são descritas.

3.2.1 Caracterização do material

O polímero, *em pellet*, foi caracterizado por calorimetria exploratória diferencial (DSC) no equipamento DSC 60 da Shimadzu. A amostra em forma de cortes de *pellet* foi pesada em um porta amostra de alumínio, perfazendo um total de

2,5 mg de amostra. A análise foi conduzida em atmosfera de nitrogênio (30 ml/min.) varrendo da temperatura de 25°C até 210°C com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, resfriada até 25°C com uma taxa de 10 °C/min e reaquescida até 210°C, com mesma taxa de aquecimento.

As curvas foram analisadas em software Origin18 a fim de determinar as áreas sob as curvas de fusão e cristalização, bem como as temperaturas de pico, que equivalem à temperatura de fusão e máxima de cristalização, respectivamente.

Também é possível determinar por meio da análise de DSC, o grau de cristalinidade do copolímero, considerando a área da curva do pico endotérmico de fusão da curva de resfriamento, pode-se aplicar a Equação (6) proposta por Canevarolo (2002):

$$\text{Grau de cristalinidade} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} = \frac{kA_f}{m \cdot \Delta H_f^0} \quad (6)$$

Em que ΔH_f é a entalpia de fusão e ΔH_f^0 é a entalpia de fusão do polipropileno 100% cristalino, ambas em J/g, m é a massa ensaiada, em g, K é a constante de calibração do equipamento, adimensional, e A_f é a área sob o pico de fusão, em J. Para o equipamento utilizado considerando Índio como material de referência, a constante K equivale a 4,33846 de acordo com o software do equipamento.

3.2.2 Prensagem das placas

O processo para fabricação de uma placa se deu: pesando-se 100g de *pellets* de PPR em balança analítica e dispendo em moldura de aço doce para prensagem de 1,5 mm de espessura. Foi utilizada prensa hidráulica termo estatizada para moldagem por compressão de materiais poliméricos da marca Marconi, a parte inferior e superior foram recobertas com papel manteiga.

Foram executadas quatro etapas para fusão e conformação das placas: (i) material submetido à temperatura de 200°C sem aplicação de pressão por sete minutos; (ii) aplicação de pressão de uma tonelada para homogeneização da temperatura em toda a extensão da placa, por três minutos; (iii) pressão de 10 toneladas por 10 minutos, mantendo-se a temperatura de 200°C; (iv) resfriamento

forçado por fluxo de água até 60°C (processo variando de 40 a 60 minutos, a depender das condições de clima no dia da confecção). O tempo total para produção de uma placa era de 70 minutos em média.

Esse processo foi repetido várias vezes para conformação das placas para os corpos de prova de tração. Ao longo do desenvolvimento do trabalho, aproximadamente 30 placas foram conformadas.

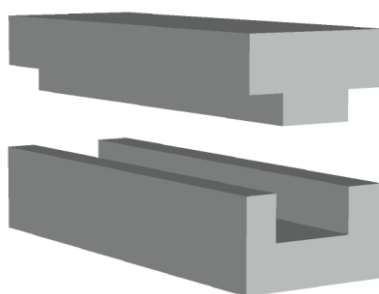
3.2.3 Cunhagem dos corpos de prova

Para confecção dos corpos de prova, utilizou-se estampo de aço para corte de corpos de prova do tipo IV - ASTM D638 (ASTM, 2003). As placas foram estampadas a frio, utilizando-se suporte de madeira, a pressão de 2 toneladas.

3.2.4 Soldagem dos corpos de prova

O corpo de prova gravata para ensaio de tração (tipo IV - ASTM D 638) era cortado ao meio e as partes centrais eram sobrepostas. Para inserção na prensa, utilizou-se aparato torneado em perfil de aço que limitava a descentralização da solda. Uma representação esquemática é mostrada na Figura 17.

Figura 17 – Representação do aparato de solda



Fonte: Aatoria Própria (2023)

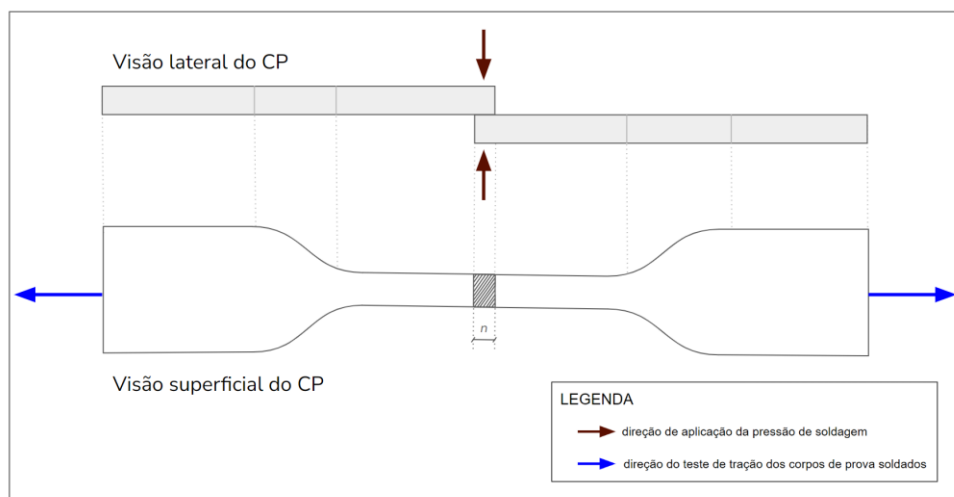
O aparato era inserido entre as placas da prensa com auxílio de uma pinça metálica. Lá era deixado por 10 minutos para homogeneização da temperatura. Após isso, se inseria o corpo de prova e se mantinha por 3 minutos. Aplicava-se então a pressão de carga e cronometrava-se o tempo de solda. Após a solda, retirava-se o aparato com o corpo de prova e a solda mais aparato resfriados em água corrente. O

presente método de solda vertical de corpos de prova se baseia na metodologia de SHI, VILLEGAS e BERSEE (2013).

Foram soldados corpos de prova à 146°C, 147°C, 148°C e 149°C, utilizando-se cargas de 0,5 ton e 1,5ton e em dois tempos de aplicação de carga, 30s e 120s. Em seguida, os corpos de prova eram submetidos à tração, conforme exposto a seguir. Os tratamentos foram conduzidos em triplicata.

A Figura 18 mostra uma representação do corpo de prova, da superposição das partes para inserção no aparato, a direção da pressão de soldagem e a direção do ensaio de tração após solda.

Figura 18 – Ilustração do corpo de prova soldado. A área hachurada corresponde a junta soldada de largura n



Fonte: Autoria Própria (2023)

3.2.5 Tratamento a plasma

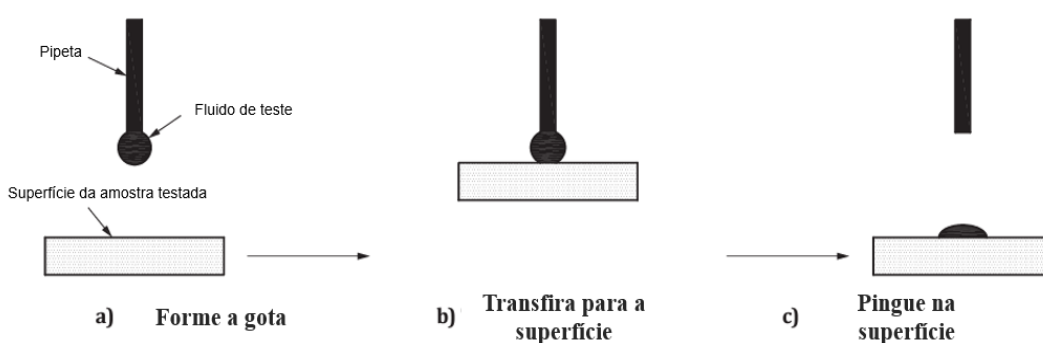
Para variação da tensão superficial do polímero foi utilizado um tratamento em plasma de *glow discharge* em uma evaporadora HHV modelo AUTO 306. A pressão de vácuo medida com um sensor do tipo *penning* foi na casa de 8×10^{-6} mbar e a pressão de trabalho de $1,15 \times 10^{-5}$ mbar, com atmosfera de nitrogênio. Os corpos de prova foram expostos ao plasma por tempo de 30, 60, 90, 120 e 300 s. Os tratamentos foram conduzidos em corpos de prova de tração e realizados em triplicata.

3.2.6 Teste da gota

Após tratamento em plasma, os corpos de prova foram submetidos à medida do ângulo de contato de gota de água destilada, para verificação da variação da tensão superficial. Foram testados corpos de prova sem tratamento e com tratamento de plasma a 30, 60, 90, 120 e 300 s.

Foi utilizado um goniômetro de ângulo de contato da marca Ossila. Para fixação e manutenção da planicidade, utilizou-se fita dupla face para acoplar o corpo de prova no equipamento. Em um suporte com garra, acoplou-se uma micropipeta da marca Kasvi, de volume de 0,05 ml. A gota era depositada sobre a superfície do corpo de prova e captado pelo equipamento, o ângulo de contato foi obtido pelo software Ossila *Contact Angle*, baseado no método proposto pela ISO 19403-2 (2017), mostrado na Figura 19. Os ensaios foram realizados em triplicata, em um mesmo dia, à temperatura mantida por ar condicionado a 23°C e pressão ambiente.

Figura 19 – Método de deposição da gota séssil segundo ISO 19403-2



Fonte: Adaptado de ISO 19403-2 (2017)

3.2.7 Ensaios de tração

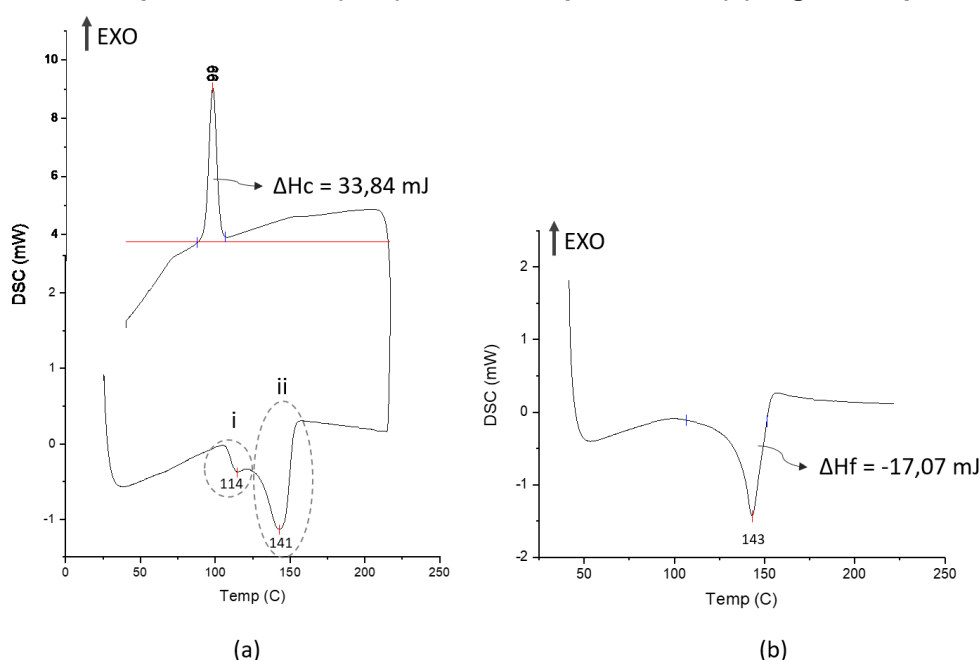
Os ensaios foram realizados em máquina universal de ensaios modelo WDW-100E, as dimensões dos corpos de prova foram medidas com paquímetro analógico ZAAS. Para os corpos de prova puro e tratados, foi utilizado a velocidade de 50mm/min baseado na norma ASTM D638-08 (ASTM, 2003), até a estabilização da alongação, não sendo aguardado a ruptura. Já para os corpos de prova soldados, a velocidade de ensaio foi 5mm/min, com ensaios até a ruptura. Os dados foram tratados em software Excel 2016 e as curvas plotadas com o auxílio do software Origin 18. Para análise estatística e ANOVA das médias foi utilizada o software Minitab 19.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

A análise de calorimetria exploratória diferencial foi utilizada para investigar as transições térmicas no polímero. A Figura 20 apresenta o gráfico do DSC do *pellet* como recebido da petroquímica fabricante, no qual estão representados o fluxo de calor em função da temperatura.

Figura 20 – Curva de DSC do PPR como recebido: (a) aquecimento e resfriamento, no qual se observa dois picos de fusão (i e ii) durante o aquecimento (b) segundo aquecimento



Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se na Figura 20(a) que no primeiro aquecimento o material apresentou um pico duplo de fusão, sinalizado na imagem por (i). Isso ocorre quando um polímero possui duas estruturas diferentes em sua cadeia, que se comportam de maneira distinta durante a fusão (CANEVAROLO, 2002). A primeira hipótese era de se tratar da presença de cadeias oligoméricas, o que indicaria copolimerização incompleta.

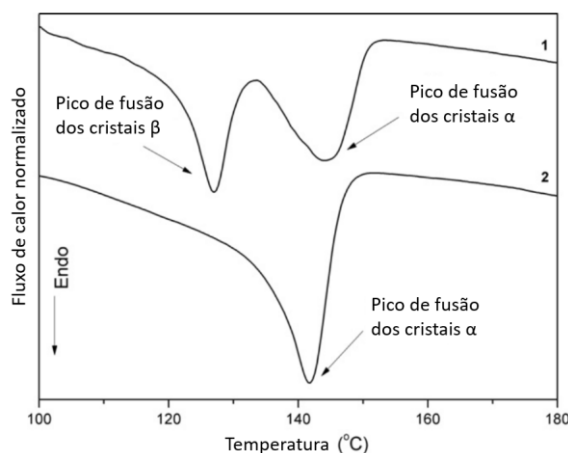
Ainda, a inserção de aditivos pelo fabricante, que são desconhecidos do autor, pode causar o primeiro pico, como agente deslizante. Os mais utilizados atualmente são à base de amidas graxas, como as erucamidas e oleamidas, siliconas, ceras de polietileno e teflon (MANRICH, 2013). Sanches (2022) também reconhece

que o copolímero comercial Esentia 01R25 pode conter agentes deslizantes para diminuição do índice de fluidez. O PTFE, por exemplo, apresenta Tg por volta de 119°C (CANEVAROLO, 2002), se usado como agente deslizante poderia causar desvio da linha base, que aqui se está interpretando como primeiro pico de fusão.

Entretanto, a segunda curva de aquecimento não mostrou a presença de picos duplos e um pico de fusão de temperatura 2°C superior. Isso descarta as hipóteses de se tratar de um pico de fusão o Tg de agente deslizante, indicando que durante o ensaio de aquecimento (como recebido), seguido de resfriamento lento do polipropileno ocorreram rearranjos moleculares e mudanças na organização das cadeias poliméricas.

Como apresentando em 2.7.1, o polipropileno é conhecido por exibir diferentes formas polimórficas, que são arranjos cristalinos com estruturas moleculares distintas. Cada forma polimórfica pode ter uma temperatura de fusão diferente. No primeiro aquecimento, é possível que o polipropileno apresente duas formas polimórficas, cada uma com sua própria temperatura de fusão, a forma α , estável e comum e a β célula unitária hexagonal, formada pelo processo de estiramento a baixas temperaturas. Papageorgiou, Bikiaris e Chrissafis (2012) encontrou duplo picos em PPR com a presença de cristalitos β e os confirmou por meio de difração de raios x. A Figura 21 mostra o DSC de duas amostras estudadas pelos autores, percebe-se picos similares aos encontrados na Figura 20(a).

Figura 21 – Curva de DSC de PPR-CT (1) e PPR (2) com taxa de aquecimento de 20°C/min



Fonte: Adaptado de Papageorgiou, Bikiaris e Chrissafis (2012)

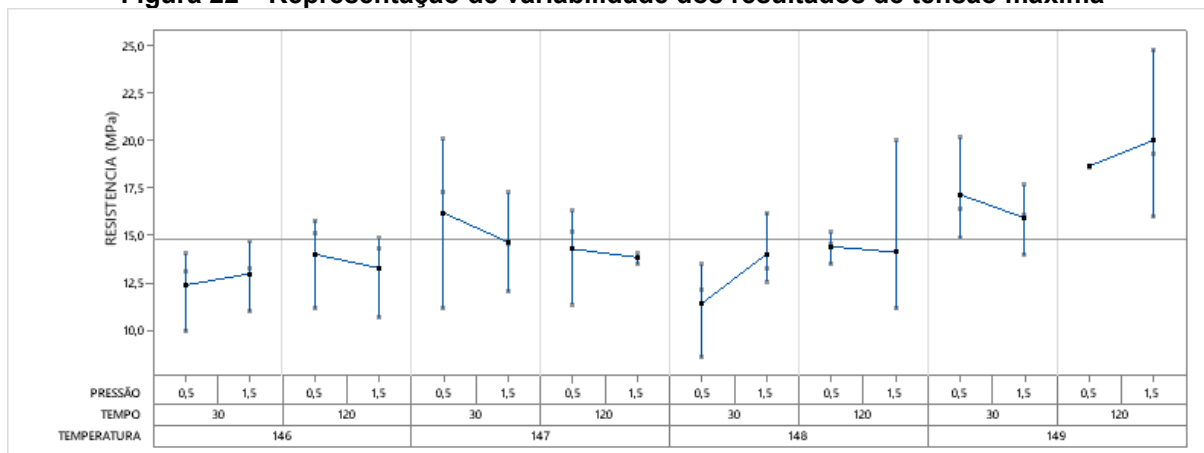
No resfriamento lento subsequente, as duas formas polimórficas podem se rearranjar e se transformar em uma única forma mais estável, resultando em um único pico de fusão maior na segunda curva, Figura 20 (b).

A energia de fusão é corresponde a área sob o pico de fusão, na Figura 20(b), 17,07 mJ. Considerando 2,5 mg de material ensaiado, a entalpia de fusão do polipropileno 100% cristalino como 165 J/g de acordo com Kissel, Han, Meyer (1999) e aplicando a Equação (5), com K fornecido pelo software do equipamento, temos uma cristalinidade de 20%. Considerando que o PP isotático (iPP) que é semicristalino apresenta maior grau de cristalinidade (até 60%) entre as conformações de PP e temperatura de fusão 164°C, temos que a inserção do polietileno na cadeia reduziu em 66% a cristalinidade.

4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO DOS CORPOS SOLDADOS

Os resultados de tensão dos corpos de provas soldados foram obtidos por meio do diagrama tensão deformação para cada uma das rodadas de teste, aqui considera-se como resistência da solda a máxima tensão obtida no ensaio, em Mpa, logo antes da estricção. A Figura 22 traz uma visão do intervalo de tensões por parâmetro. Cada ponto cinza representa um ensaio, as barras representam a variação total naquela condição (temperatura, tempo e pressão), enquanto os pontos em preto expressam a média da triplicata.

Figura 22 – Representação de variabilidade dos resultados de tensão máxima

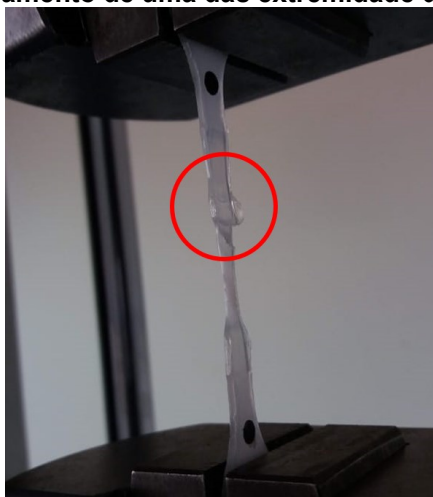


Fonte: Autoria própria (2023)

Os resultados da análise de tração foram considerados normalmente distribuídos, conforme indicado pelo teste estatístico de Anderson-Darling. Além disso, a igualdade de variâncias entre os grupos foi verificada com um nível de confiança de 95%. Esses achados sugerem que não foram identificados valores discrepantes (*outliers*) de forma estatisticamente significativa e que as variações observadas entre os grupos podem ser atribuídas a variações aleatórias comuns. Portanto, é plausível inferir que as diferenças nas médias dos grupos refletem, principalmente, diferenças nas médias populacionais, ao invés de uma variação aleatória desproporcional entre os grupos.

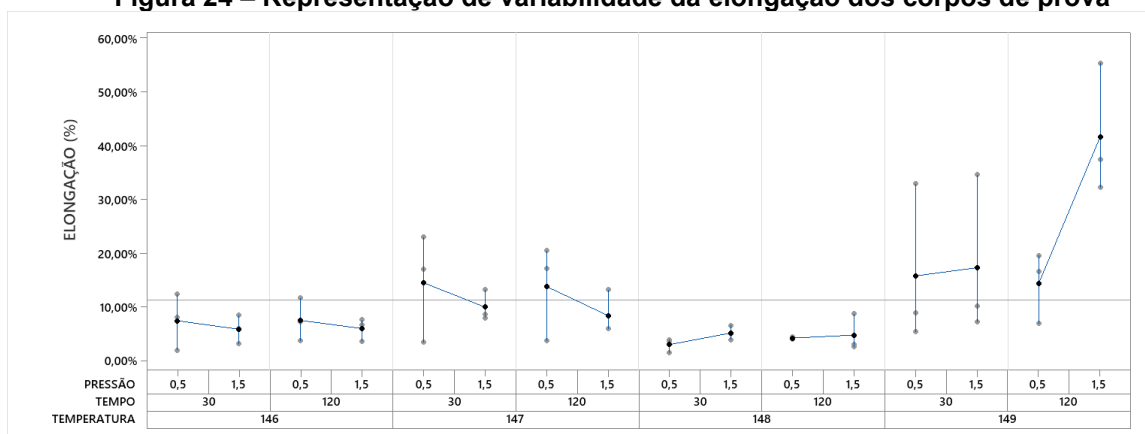
No que tange ao comportamento durante o ensaio, geralmente os corpos de prova apresentaram um descolamento nas extremidades da solda, conforme mostra a Figura 23.

Figura 23 – Foto de um dos corpos de prova soldados ensaiados, com detalhe ao descolamento de uma das extremidade da solda



Fonte: Autoria própria (2023)

No entanto, o corpo de prova continuava suportando tensão, alguns corpos de prova alcançaram alongação superior a 30% para ruptura. A Figura 24 traz uma visão do intervalo de alongações por parâmetro. Cada ponto cinza representa um ensaio, as barras representam a variação total naquela condição (temperatura, tempo e pressão), enquanto os pontos em preto expressam a média da triplicata.

Figura 24 – Representação de variabilidade da elongação dos corpos de prova

Fonte: Autoria própria (2023)

O que se observa é que a temperatura de 149°C foi relativamente mais efetiva em elongação que as demais, mas o comportamento observado nesta temperatura não é observado nas demais. Elongamentos na faixa de 10% estão em linha com os indicados pela literatura de soldagem por placas quentes (VENDAN et al., 2019).

Os intervalos de variação da tensão e da elongação sobrepostos, indiferentemente dos parâmetros e sem tendência na variação deles, pode indicar que o intervalo de temperaturas escolhido, bem como variação de pressão e tempo não foram suficientemente espaçados para causar variação nas propriedades mecânicas. Quando se avalia médias e desvio padrão da tensão máxima, mostrados na Tabela 1, observa-se uma sobreposição dos valores dentro do desvio experimental.

A Figura 25 ilustra as médias e desvio padrão, dentro das temperaturas, se observa que os parâmetros pressão e tempo não são suficientemente significativos para causar variação na tensão máxima.

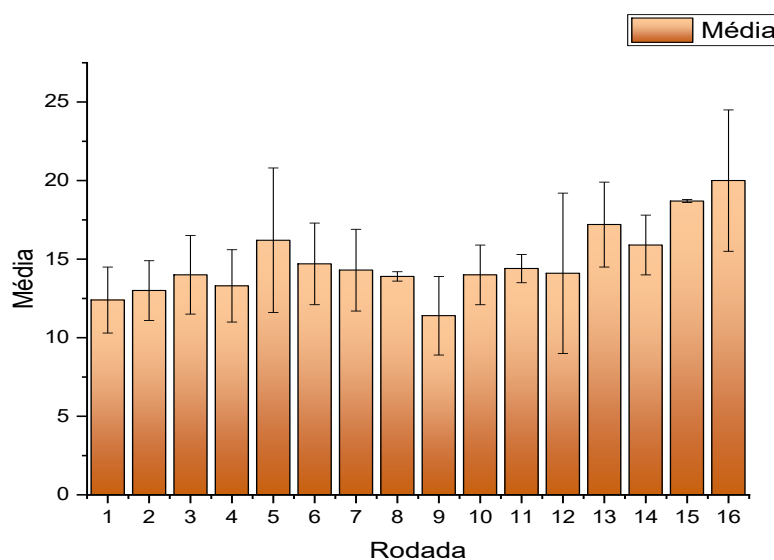
Aplicando-se a análise de variância (ANOVA) *one-way*, compara-se as médias dos grupos, permitindo investigar se existem diferenças estatisticamente significativas entre as médias. São consideradas tanto as variações entre os grupos quanto as variações dentro dos grupos, permitindo uma avaliação abrangente da variabilidade dos dados. Com 95% de confiança, a análise ANOVA *one-way* indicou que não há diferenças estatisticamente significativas entre as médias, ou seja, todos os tratamentos são iguais entre si.

Tabela 1 – Média da tensão máxima e desvio padrão cada rodada de triplicata

Rodada (n)	Temperatura (°C)	Pressão (ton)	Tempo (s)	Média (Mpa)	DesvPad (Mpa)
1	146	30	0,5	12,4	2,1
2	146	30	1,5	13,0	1,9
3	146	120	0,5	14,0	2,5
4	146	120	1,5	13,3	2,3
5	147	30	0,5	16,2	4,6
6	147	30	1,5	14,7	2,6
7	147	120	0,5	14,3	2,6
8	147	120	1,5	13,9	0,3
9	148	30	0,5	11,4	2,5
10	148	30	1,5	14,0	1,9
11	148	120	0,5	14,4	0,9
12	148	120	1,5	14,1	5,1
13	149	30	0,5	17,2	2,7
14	149	30	1,5	15,9	1,9
15	149	120	0,5	18,7	0,1
16	149	120	1,5	20,0	4,5

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 25 – Média da tensão máxima e desvio padrão cada rodada de triplicata



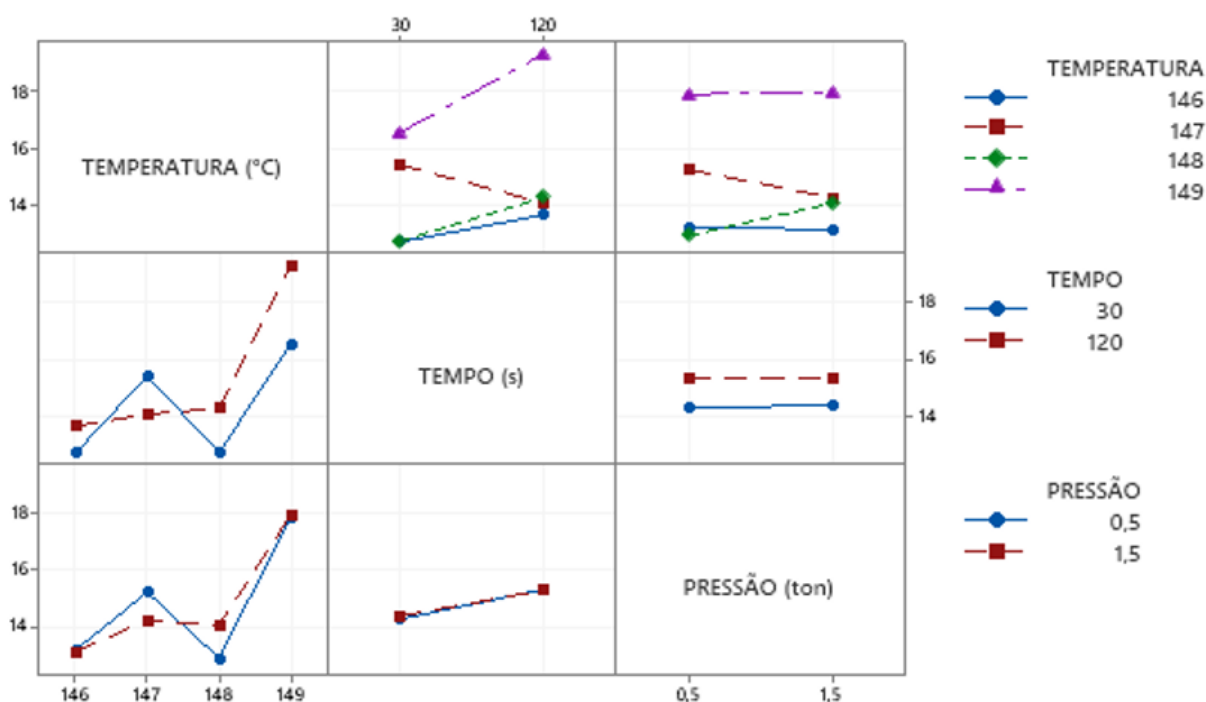
Fonte: Autoria própria (2023)

A alta variação da resistência dentro de cada uma das triplicatas pode estar correlacionada com limitações experimentais relativas ao posicionamento correto do corpo de prova no aparato, dificuldade de controle do tamanho da superposição dos corpos de prova, talvez um contato não completo entre as partes no interior do aparato, que podem trazer ruídos para as análises e impossibilitar conclusões a respeito de quais fatores tem mais influência.

A análise de interação entre os parâmetros pode ser realizada ao plotar as médias do parâmetro máximo e mínimo, com a variação do outro indicada pela cor da

reta. Com linhas paralelas, têm-se que os parâmetros não tem interação entre si, quanto mais perpendiculares as linhas entre si, significa que a variação de um parâmetro influencia na variação do outro. A Figura 26 traz o gráfico de interações para os parâmetros ensaiados, no intervalo de variação adotado, não há interações significativas.

Figura 26 – Gráfico de interação entre os parâmetros variados no experimento



Fonte: Autoria própria (2023)

Na análise de tubos de calor, geralmente os autores não citam seus parâmetros de soldagem, como Ogata, Sukegawa e Kimura (2014a) e Hao, Ma e Ma (2019), ou então, não os justificam como Lim e Kim (2018) e Jung, Lim e Kim (2020). Ainda é importante citar que estes autores se utilizaram de filmes para selagem dos tubos de calor e não de placas como era o objetivo investigar aqui.

Em pesquisa recente, Uribe-Juárez, Corona-Lira e Ramírez-Reivich (2023) mostraram em filmes multicamadas de polipropileno (35 μm), alumínio (26 μm) e adesivo entre eles (4 μm), que em condição de selagem de alta velocidade, um aumento da temperatura da placa de selagem de 123°C para 168°C resultou em um aumento na resistência de selagem, de 1,98 N/mm para 2,45 N/mm. Além disso, foi observado que um tempo de permanência mais longo teve um efeito negativo na resistência da selagem, causando um aumento nos deslocamentos nos testes

de *T-peel* das amostras. O intervalo de variação foi de mais 40°C, o que talvez justifique porque num intervalo de 5°C não foi observado alterações significativas nos resultados acima expostos.

Em testes preliminares da metodologia aqui apresentada, em temperaturas de soldagem abaixo de 145°C, os corpos de prova soltavam na região da solda no momento de retirada do molde e em temperaturas acima de 150°C, o corpo de prova amolecia e deformava mesmo na região fora do contato com o aparato de solda, impactando a integridade do corpo de prova para ensaio. Isto indica que, se um maior intervalo de temperatura é necessário para produzir alterações na resistência, será necessário rever a metodologia aqui aplicada.

É importante salientar também que resultados de trabalho como os de Uribe-Juárez, Corona-Lira e Ramírez-Reivich (2023) geralmente são realizados para indústria de embalagens. Para tubos de calor, ainda ficam pendentes discussões mais aprofundadas sobre os parâmetros de soldagem que garantam a integridade do canal e ao mesmo tempo sejam robustas o suficiente para impedir vulnerabilidade de difusão pela solda.

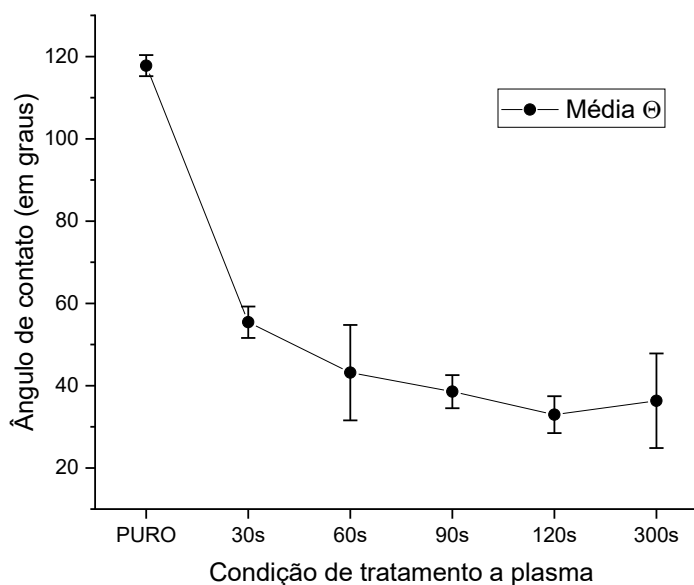
Poder-se-ia, por fim, com os resultados aqui apresentados, utilizar a menor temperatura de soldagem, com o menor tempo, o que maximizaria o tempo de produção de OHPs, e utilizar o mesmo recobrimento de Índio como exposto por Lim e Kim (2018), o que garantiria uma região de solda consistente e de qualidade.

4.3 ANÁLISE DA TENSÃO SUPERFICIAL DO PPR

4.3.1 Teste do ângulo de contato

O teste realizado no goniômetro com corpos de prova expostos a plasma resultou no gráfico apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Ângulo de contato do PPR puro e tratado a plasma

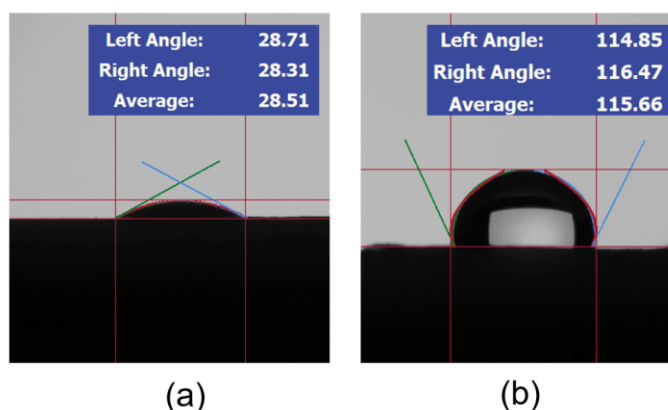


Fonte: Autoria Própria (2023)

Os resultados encontrados para o PPR puro, $117,7 \pm 2,8^\circ$ mostrou-se condizentes com os apresentados por Sanchez (2022) que analisou o mesmo material por meio do ângulo de contato em filmes $0,097\mu\text{m}$, $114,96^\circ$. Enquanto, o comportamento da curva tratada por plasma se mostra condizente com o discutido por Morent *et al.* (2008) de que o tratamento por plasma cria uma camada oxidada de tamanho nanométrico na superfície do filme de PP, uma vez que o tratamento por plasma não é capaz de alterar as propriedades internas do filme de polímero, após alguns segundos, a curva se estabiliza em um valor de saturação. Os tempos acima de 30s nesse trabalho corroboram com essa conclusão.

Uma vez que apenas um lado do corpo de prova era exposto ao plasma, o outro lado do corpo de prova deveria manter suas propriedades. Isso se mostrou conforme mostra a Figura 28, para uma das medidas do corpo de prova após 300s em tratamento.

Figura 28 – Medidas do ângulo de contato para um corpo de prova após 300s de tratamento em plasma: (a) face tratada (b) face oposta



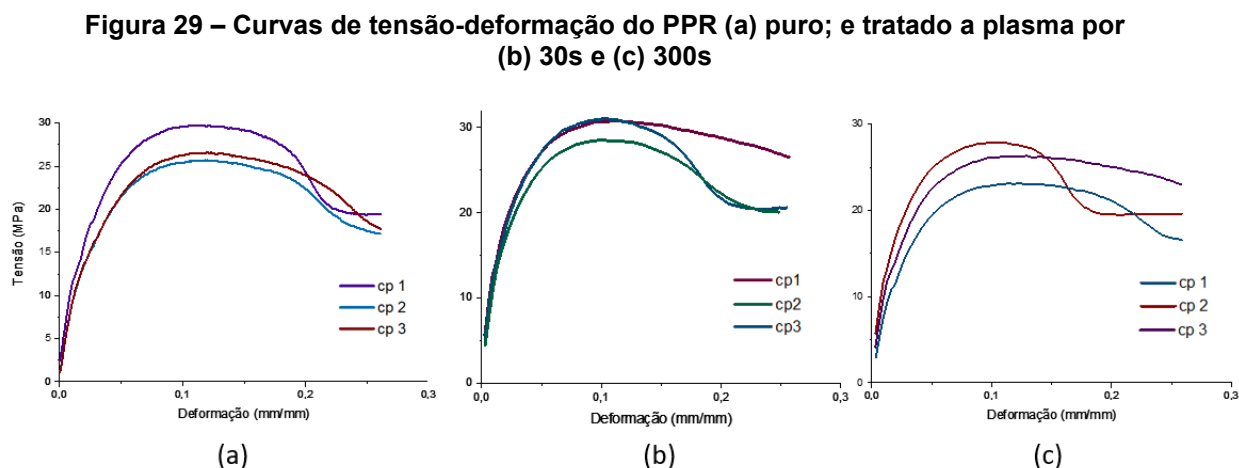
Fonte: Autoria Própria (2023)

Como pode-se verificar, a face não tratada se manteve dentro da média dos corpos de prova puros ($117,7 \pm 2,8^\circ$). O tratamento se mostrou eficaz ao aumentar a hidrofiliabilidade do PPR, em que o estado ionizado excitado da molécula de nitrogênio é consumido durante o tratamento do PP, levando a oxidação da superfície. Strobel, Lyons e Mittal (1994) mostraram com espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente, que na presença de PP, o estado ionizado excitado da molécula de nitrogênio N_2^+ é consumido. Suas análises também mostraram que, em termos da degradação, PP em um plasma de nitrogênio apresenta 3 características: (i) baixa degradação; (ii) diminuição dos grupos metil; e (iii) reticulação superficial.

A formação de uma cor levemente amarela na superfície dos corpos de prova tratados indica a formação de ligações dupla em carbono $C=C$, mas o efeito de não alteração do ângulo da gota na face oposta, mostra que o processo de reticulação e degradação foram locais. O estudo da variação da resistência à tração pode validar essa teoria.

4.3.2 Variação da resistência à tração

A Figura 29 traz o comportamento das curvas de tração para o PPR puro e para o corpos tratados em plasma, na velocidade de 50 mm-min.



Fonte: Autoria Própria (2023)

Como observado, o limite de resistência à tração não teve variação significativa quando comparados os corpos de prova puros com os corpos de prova tratados a plasma, isto leva a ratificar a teoria de que a degradação do polímero por exposição a plasma foi localizada e limitada à superfície.

Os resultados aqui apresentados, indicam que o tratamento por plasma de nitrogênio pode ser utilizado para preparação da superfície de invólucros de tubo de calor, uma vez que ao deixá-los hidrofílicos, causam uma diminuição da resistência térmica e uma antecipação do *start-up* do fluxo, como exposto por Ji *et al.* (2012) e Ma (2015).

Jung, Lim e Kim (2020) utilizaram policarbonato, enquanto Lim e Kim (2018) utilizaram polipropileno e Ogata *et al.* (2009) utilizou polietileno tereftalato (PET). Tanto PC, quanto PE e PET são polímeros hidrofóbicos. O tratamento de plasma poderia ser utilizado a fim de maximizar a eficiência térmica dos dispositivos.

4.4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram abordados os parâmetros de soldagem e a tensão superficial do polipropileno copolímero como requisitos de projeto para tubos de calor oscilante. A pesquisa envolveu a análise de diferentes parâmetros em placas de polipropileno copolímero conformadas por prensagem, bem como a variação da tensão superficial por meio da análise do ângulo de contato da gota séssil em corpos de prova puros e tratados com plasma de nitrogênio.

O material Esenttia 01R25 foi caracterizado por DSC, indicando a presença de formas β de PP no material puro e uma cristalinidade de 20%, o que significa que a presença do monômero etileno no copolímero reduziu sua cristalinidade em 66%. Com esse grau de cristalinidade e temperatura de fusão de 143°C, o copolímero não deve contar com fração molar maior que 7% de etileno.

Quanto à soldagem, os resultados obtidos indicaram que, nos intervalos estudados, os parâmetros não representaram diferenças significativas em relação à resistência da solda, por meio de testes de tração. Constatou-se que a metodologia utilizada no estudo deve ser modificada para abranger faixas de temperaturas mais elevadas, conforme apontado pela literatura. Os resultados obtidos indicam que esse fator não é essencial para melhores resultados térmicos em OHP e que a proteção da região soldada para impedir difusão de gases não condensáveis já é assaz no que tange às preocupações com a metodologia e/ou característica de solda.

A análise da variação da tensão superficial por plasma de nitrogênio, por sua vez, foi efetiva ao mostrar que uma exposição de 30 segundos foi suficiente para reduzir a tensão superficial do PPR, por meio de uma constatação da redução do ângulo de contato da gota séssil, em mais de 50%. Além disso, a análise do corpo de prova e a comparação com as discussões encontradas na literatura indicaram que o tratamento por plasma foi eficaz em alterar a tensão superficial local sem causar degradação severa no polímero.

Os ensaios de tração realizados nos corpos de prova tratados com plasma corroboraram a conclusão anterior, uma vez que não houve variação significativa na tensão de estricção dos materiais. Portanto, é possível afirmar que o tratamento por plasma de nitrogênio pode ser utilizado para modificar a superfície de polímeros hidrofóbicos, aumentando assim a eficiência térmica de tubos de calor oscilantes.

REFERÊNCIAS

AKACHI, H. **Structure of a heat pipe**. Depositante: Hisateru Akachi. US Patent 4921041. Depósito: 15 jun. 1988. Concessão: 1 maio 1990.

A Vida Secreta de Walter Mitty. Ben Stiller. EUA: 20th Century Fox, 2013. Starplus (114 min).

AMANATA, N.; JAMES, N. L.; MCKENZIE, D. R. Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices. **Medical Engineering & Physics**, v. 32, n. 7, pp. 690-699, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-03**: Standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken: ASTM International, 2003. 16 p.

ASHBY, M. F. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2012, 673 p.

ASHBY, M. F.; JOHNSON, K. **Materials and design**: the art and science of material selection in product design. Amsterdam: Elsevier, 2010, 327 p.

BIRDI, K. S. **Surface chemistry essentials**. Nova York: CRC Press, 2014, 267 p.

BROWN, L. S.; HOLME, T. A. **Química geral aplicada à engenharia**. 3. ed. Boston: Cengage Learning, 2016, 612 p.

BRYDSON, J. A. Aliphatic polyolefins other than polyethylene, and diene rubbers: Polypropylene. In: _____. **Plastic Materials**. Oxford: Butterworth Heinemann, 1999, pp. 247-268.

BUCKNALL, C. B.; DRINKWATER, I. C.; SMITH, G. R. Hot plate welding of plastics: factors affecting weld strength. **Polymer Engineering and Science**, v. 20, n. 6, pp. 432-440, 1980.

BUTT, H.; GRAF, K.; KAPPL, M. **Physics and chemistry of interfaces**. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, 361 p.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2016, 882 p.

CANEVAROLO JÚNIOR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo: Artliber, 2002. 183 p.

CHAN, C. W. et al. Heat utilization technologies: A critical review of heat pipes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, pp. 615-627, 2015.

CHAROENSAWAN, P. et al. Closed loop pulsating heat pipes: Part A: parametric experimental investigations. **Applied Thermal Engineering**, v. 23, n.16, pp. 2009-2020, 2003.

FAGHRI, A. Review and Advances in Heat Pipe Science and Technology. **Journal of Heat Transfer**, v. 134, n. 12, pp. 1-18, 2012.

HAN, X. et al. Review of the development of pulsating heat pipe for heat dissipation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, pp. 692-709, 2016.

HAN, Z.; CHANG, C. Fabrication and thermal performance of a polymer-based flexible oscillating heat pipe via 3D printing technology. **Polymers**, v. 15, n. 2, pp. 414-425, 2023.

HAO, T.; MA, H.; MA, X. Heat transfer performance of polytetrafluoroethylene oscillating heat pipe with water, ethanol, and acetone as working fluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 131, pp. 109-120, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 19403-2**: Paints and varnishes — Wettability: Part 2: Determination of the surface free energy of solid surfaces by measuring the contact angle. E ed. Geneva: Iso, 2017. 14 p.

JI, Y. et al. Hydrophobic surface effect on heat transfer performance in an oscillating heat pipe. **Journal of Heat Transfer**, v. 134, n. 7, p. 502-506, 2012.

JI, Y. et al. An experimental investigation of heat transfer performance in a polydimethylsiloxane (PDMS) oscillating heat pipe. **Applied Thermal Engineering**, v. 61, n. 2, pp. 690-697, 2013.

JUNG; C.; LIM, J.; KIM, S. J. Fabrication and evaluation of a high-performance flexible pulsating heat pipe hermetically sealed with metal. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. v. 149, pp. 119180-119188, 2020.

KARGER-KOCSIS, J. **Polypropylene**: Structure and Morphology. Londres: Champman&Hall, 1995, 345 p.

KHANDEKAR, S.; GROLL, M. On the definition of pulsating heat pipes: an overview. In: Minsk International Conference Heat Pipes, Heat Pumps and Refrigerators, 5., 2003, Minsk, Belarus. **Proceedings...** Minsk: Scientific Association Heat Pipes: 2003, pp. 707-719.

KISSEL, W. J.; HAN, J. H.; MEYER, J. A. Polypropylene: structure, properties, manufacturing processes and applications. In: KARIAN, H. G (org.). **Handbook of polypropylene an polypropylene composites**. Nova York: Marcel Dekker, 1999, pp 15-38.

LEE, J.; KIM, S. J. Effect of channel geometry on the operating limit of micro pulsating heat pipes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 107, pp. 204-12, 2017.

LIM, J.; KIM, S. J. Fabrication and experimental evaluation of a polymer-based flexible pulsating heat pipe. **Energy Conversion and Management**, v. 156, pp. 358-364, 2018.

LIM, Y.; KANG, S.; WU, T. Fabrication of polydimethylsiloxane (PDMS) pulsating heat pipe. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 156, pp. 573-580, 2009.

LIPS, S. et al. Overview of heat pipe studies during the period 2010-2015. *Interfacial Phenomena an Heat Transfer*, Begell House, 2016, v. 4, n.1, pp. 33-53, 2016.

LIU, S.; CHENG, H. The influence of interface geometry on the joint strengths of hot plate welded composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 29, n. 4, pp. 497-509, 2009.

MA, G. et al. Surface modification of polypropylene by ethylene plasma and its induced β -form in polypropylene. **Chinese Journal of Polymer Science**, v. 33, n. 5, pp. 669-673, 2015.

MA, H. **Oscillating Heat Pipes**. New York: Springer, 2015. 427 p.

MANRICH, Silvio. **Processamento de termoplásticos**: Rosca única, extrusão e matrizes, injeção de moldes. 2 ed. São Carlos: Artliber, 2013.

MIYAZAKI, Y. Cooling of notebook PCs by flexible oscillating heat pipes. In: IPACK, 5., 2005, California. **Proceedings...** São Francisco: ASME, 2005, pp 73055-73060.

MORENT, R. et al. Comparison between XPS- and FTIR-analysis of plasma-treated polypropylene film surfaces. **Surface and Interface Analysis**, v. 40, n. 3-4, pp. 597-600, 2008.

NAZARI, M. A. et al. A review on pulsating heat pipes: From solar to cryogenic applications. **Applied Energy**, v. 222, pp.475-484, 2018.

OGATA, S.; SUKEGAWA, E.; KIMURA, T. Performance Evaluation of Ultra-thin Polymer Pulsating Heat Pipes. In: INTERSOCIETY CONFERENCE ON THERMAL AND THERMOMECHANICAL PHENOMENA IN ELECTRONIC SYSTEMS (ITHERM), 14., 2014, Orlando. **Proceedings...** Las Vegas: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2014a. pp. 519 - 526.

_____. Lifetime Evaluation of Ultra-thin Polymer Pulsating Heat Pipe. In: INTERSOCIETY CONFERENCE ON THERMAL AND THERMOMECHANICAL PHENOMENA IN ELECTRONIC SYSTEMS (ITHERM), 14., 2014, Orlando. **Proceedings...** Las Vegas: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2014b. pp. 15 - 18.

OLIVEIRA, M. J.; HEMSLEY, D. A. The microstructure of polypropylene welds as a guide to processing history. **British Polymer Journal**, v. 17, n. 3, pp. 269-274, 1985.

PAPAGEORGIU, D. G.; BIKIARIS, D. N.; CHRISAFIS, K. Effect of crystalline structure of polypropylene random copolymers on mechanical properties and thermal degradation kinetics. **Thermochimica Acta**, v. 543, p. 288-294, 2012.

PETERSON, G. P. **An Introduction to heat pipes**: modeling, testing, and applications. New York: Wiley, 1994, 368 p.

QU, J. et al. Design and experimental study on a hybrid flexible oscillating heat pipe. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 107, pp. 640-645, 2017.

QU, J. et al. Heat transfer performance of flexible oscillating heat pipes for electric/hybrid-electric vehicle battery thermal management. **Applied Thermal Engineering**, v. 135, pp. 1-9, 2018.

RAMKUMAR, M.C. et al. Polymer coatings for biocompatibility and reduced nonspecific adsorption. **Functionalised Cardiovascular Stents**, [s.v], p. 155-198, 2018.

SANCHES, V. S. **Análise do teor de agente deslizante e a influência da temperatura de processamento em filmes flexíveis para embalagens**. 2023. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2023.

SCHIFINO, J. **Tópicos de Físico-química**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2013, 344 p.

SENJAYA, R.; INOUE, T. Effects of non-condensable gas on the performance of oscillating heat pipe, Part I: theoretical study. **Applied Thermal Engineering**, v. 73, n. 1, pp. 1387–1392, 2014.

SHI, H.; VILLEGAS, I. F.; BERSEE, H. N. Strength and failure modes in resistance welded thermoplastic composite joints: effect of fiber matrix adhesion and fiber orientation. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 55, pp. 1-10, 2013.

STROBEL, M; LYONS, C.S.; MITTAL, K. L. Plasma surface modification of polymers: relevance to adhesion. Nova York: CRC Press, 1994, 290 p.

TETLOW, K. Polypropylene-Random (PPR) Piping Systems Serve Multiple Applications. **Continuous Education**. 2015: pp 1-14.

TROUGHTON, M. **Handbook of Plastics Joining: A practical guide**. 2. Ed. Norwich: William Andrew Inc, 2008, 590 p.

ÜLKER, A. et al. Optimization of welding parameters of hot plate welded PC/ABS blends by using the Taguchi experimental design method. **Journal of Elastomers & Plastics**, v. 50, n. 2, pp. 162-181, 2017.

URIBE-JUÁREZ, J. E.; CORONA-LIRA, M. P.; RAMÍREZ-REIVICH, A. C. A study of the impact of high-speed sealing parameter gradients on the seal strength in a multilayer polypropylene film. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 37, n. 2, pp. 2343-2352, 2023.

VENDAN, S. A. et al. **Confluence of multidisciplinary sciences for polymer joining**. Bangalore: Springer, 2019, 147 p.

WATSON, M. N.; MURCH, M. G. Recent developments in hot plate welding of thermoplastics. **Polymer Engineering and Science**, v. 29, n. 19, pp. 1382-1386, 1989.

ZHANG, Y.; FAGHRI, A. Advances and Unsolved Issues in Pulsating Heat Pipes. **Heat Transfer Engineering**, v. 29, n. 1, pp. 20-44, 2008.