



VERIFICAÇÃO DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO DE TERMOPLÁSTICO DE POLIURETANO EM MATRIZ METÁLICA DE SULCO NEGATIVO¹

VERIFICATION OF POLYURETHANE THERMOPLASTIC DEPOSITION PROCESS IN NEGATIVE GROOVE METALLIC MATRIX

Jhonatan Alves Machado², Ariana Gerondoli Alves³, Luiz Antônio Rasia⁴

¹ Projeto de pesquisa desenvolvido na Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, pelo Grupo de Materiais e Dispositivos (GPMaD) do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Modelagem Matemática e Computacional da linha de pesquisa de Modelagem Matemática Aplicada à Engenharia de Biosistemas.

² Engenheiro Mecânico, Estudante do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Modelagem Matemática e Computacional (Mestrado).

³ Engenheira Química, Mestre em Engenharia Química (UFF).

⁴ Professor Orientador.

RESUMO

A presente pesquisa realiza a verificação da deposição de polímero do tipo termoplástico de poliuretano (TPU) de forma manual por processo de *silkscreen* em matriz de sulco negativo a fim de quantificar a variação de espessura dos corpos de prova resultantes do processo.

Palavras-chave: Polímero. Deposição. Matriz. Termoplástico. Poliuretano.

ABSTRACT

The present research performs the verification of the deposition of polymer of the thermoplastic type of polyurethane (TPU) manually by silkscreen process in a negative groove matrix in order to quantify the thickness variation of the specimens resulting from the process.

Keywords: Polymer. Deposition. Matrix. Thermoplastic. Polyurethane.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o desenvolvimento da eletrônica flexível tem recebido uma atenção devido à utilização de polímeros como estrutura base ou mesmo como elementos sensores. De outro modo, os materiais de origem polimérica têm ganhado uma significativa importância em questão de aplicabilidade em diferentes áreas da engenharia pelo fato de terem como propriedade a resistência mecânica atrelada a sua baixa densidade e por características que os diferem de quaisquer outros materiais trabalhados pela humanidade até o seu surgimento.



Devido às necessidades econômicas e tecnológicas, os polímeros começaram a alcançar destaque como um dos materiais mais utilizados nos últimos 30 anos, pois os mesmos possuem características e propriedades que possibilitam a substituição dos materiais tradicionais. Por conta disso, a troca de utilização de materiais metálicos por deste tipo, tem acontecido de forma gradual (NETO et al., 2015; HEMAIS, 2013).

Os estudos científicos acerca da utilização de materiais de matriz polimérica têm sido cada vez mais ampliados, tanto em laboratórios acadêmicos, quanto em setores de pesquisa, desenvolvimento e inovação da indústria, a fim de verificar novos produtos e formas de fabricação para que seja possível inovar, reduzir custos e reduzir o dano ambiental.

Os estudos referentes ao efeito piezoresistivo realizado pelo GPMaD - Grupo de Pesquisa em Materiais e Dispositivos, busca soluções para a utilização de polímeros como base ou mesmo como encapsulamento para os elementos sensores de grafite produzidos em substrato flexível de papel. Com isso, o presente trabalho visa encontrar soluções em questão de materiais poliméricos e elastoméricos, forma de produção e caracterização desse polímero para a geração do elemento sensor a partir do mesmo.

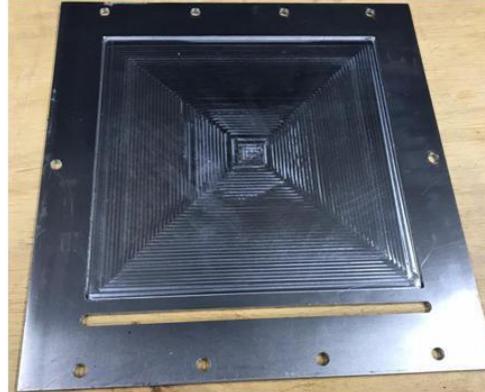
METODOLOGIA

A metodologia da pesquisa dá-se pela deposição de polímero elastomérico da família dos termoplásticos de poliuretano e confecção de corpos de prova conforme normativa vigente por meio de processo análogo ao processo de *silkscreen* em matriz de sulco negativo desenvolvido em trabalhos anteriores e testada por Heuser (2021).

Por conta dos resultados obtidos das fases de deposição manual dos polímeros em Heuser, Rasia e Pedrali (2018), optou-se que a matriz fosse produzida a partir de uma chapa de liga de alumínio ABNT 5052-O, visando garantir o processo de retirada do material após solidificação, conforme mostra Figura 1.



Figura 1 - Matriz Metálica de Sulco Negativo Produzida.



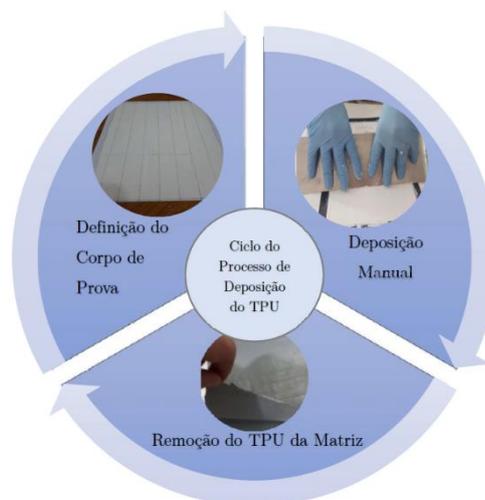
Fonte: Própria do Autor (2022).

A área de deposição é de $62.495,55 \text{ mm}^2$ e, por conta de seu sulco de 2 mm rebaixados na chapa, cria um volume útil de formação de corpos de $124.991,1 \text{ mm}^3$, ou 124,991 ml por processo de trabalho.

A deposição do polímero acontece no sulco da matriz de alumínio, a qual dará a limitação em dois eixos do formato de conformação do material. Após a deposição, ocorre o procedimento de delimitação do eixo faltante por processo manual, análogo ao processo de *silkscreen*, onde o mesmo se dá por meio de espátula de aço inoxidável.

Após a secagem do material (tempo de cura) de 48 h entre cada ciclo, o mesmo é retirado da matriz e dividido em corpos de prova conforme normativa para testes de tração na máquina desenvolvida por Andrades (2019). Tal ciclo de deposição é mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Ciclo de Deposição do TPU.



Fonte: Própria do Autor (2022).



O polímero termoplástico de poliuretano selecionado e utilizado na deposição e na confecção dos corpos de provas foi o Parabond PU 240, um selante e adesivo elástico de poliuretano híbrido, monocomponente, de alta viscosidade. Esse tipo de material apresenta propriedades físicas que compreendem a elasticidade, resistência a óleos, graxos e abrasão (SONNENSCHNEIN et al., 2015).

A Tabela 1 mostra os dados técnicos do fabricante do material.

Tabela 1 – Propriedades Técnicas do Parabond PU 240.

Base	Poliuretano Híbrido	ASTM 920C
Sistema de Cura	Cura com umidade do ar	
Dureza Shore A	35	+/- 40 (C661)
Densidade	1,55 g/ml	
Alongamento de Ruptura	> 400%	> 100% (D412)
Resistência à Tração	0,94 MPa	> 0,68 (D412)
Resistência ao Rasgo	3,8 N/mm	> 1,95 (D624 estampo C)
Formação da Pele	40 min (23° C e 50% UR)	
Taxa de Cura	3 mm/dia (23° C e 50% UR)	
VOC	> 0,5% de voláteis	
Resistência à Temperatura	-40° C a 90° C	
Temperatura de Aplicação	5° C a 45° C	

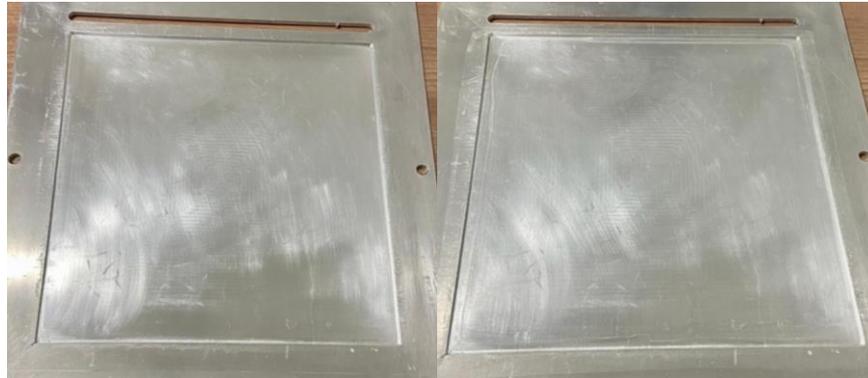
Fonte: Macroflex (2022).

PROCESSO DE DEPOSIÇÃO

O processo de deposição iniciou-se com a limpeza da matriz metálica com solução alcoólica e solvente aguarrás para retirada de possíveis imperfeições e resíduos da base metálica. Após a secagem, utilizou-se uma lâmina de PVC autoadesiva para realizar o revestimento da matriz para que o material polimérico possa ser retirado com mais facilidade. Tal procedimento pode ser verificado na Figura 3.



Figura 3 – Início do Processo de Deposição com a Limpeza da Matriz (a) e Revestimento com Lâmina de PVC Autoadesiva (b).



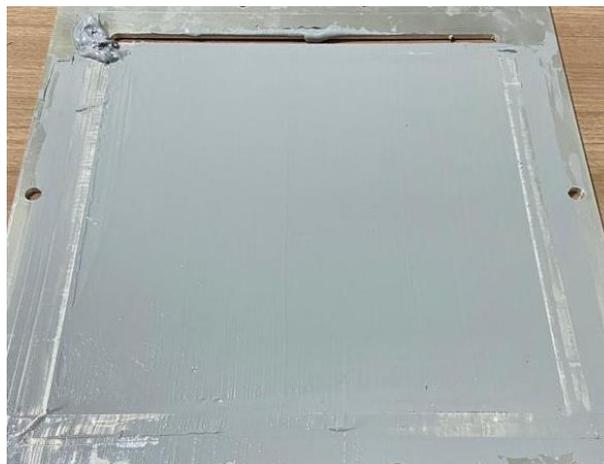
(a)

(b)

Fonte: Própria do Autor (2022).

Uma vez havendo o revestimento da matriz metálica, iniciou-se o processo de deposição do TPU na região do sulco negativo. O material disponível estava encapsulado em bisnagas de 600 mililitros, de onde foi retirado e posto no local da deposição. Após o procedimento anterior, utilizou-se uma espátula em aço inoxidável de 300 mm para a realização do processo análogo ao *silkscreen*, onde a passagem da mesma delimitou o eixo superior da deposição, conformando, assim, o polímero nas três dimensões, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – TPU Depositado na Matriz Metálica.



Fonte: Própria do Autor (2022).



O período de cura e secagem após as deposições serem realizadas foram de, no mínimo, 48 h, para que o TPU passasse do seu estado viscoso para o sólido. Após esse tempo, o mesmo era removido manualmente da matriz, formando uma película fina do material, de onde, na sequência, serão retirados os corpos de prova, como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – TPU Removido da Matriz Metálica Após Período de Cura.



Fonte: Própria do Autor (2022).

Fora criado um gabarito para o auxílio no corte dos corpos de prova das películas geradas. Tal material fora criado a partir de aço inoxidável AISI 304 com as dimensões de 180 mm x 15 mm, conforme sugerido no trabalho de Andrades (2019) e conforme mostra a Figura 6. A partir deste gabarito, os corpos de prova foram cortados com estilete sobre uma superfície vítrea.

Figura 6 – Gabarito para auxílio do corte dos corpos de prova.



Fonte: Própria do Autor (2022).



De cada película gerada, foram possíveis serem retirados quinze corpos de prova com as dimensões estabelecidas, cortadas no sentido longitudinal à deposição manual, com a numeração crescente da esquerda para a direita.

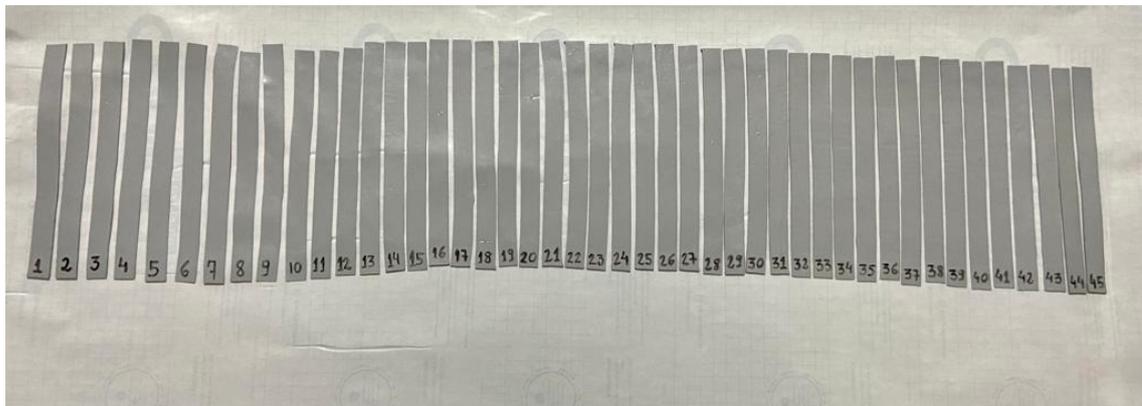
A Tabela 2 mostra os corpos de prova gerados de cada deposição (Figura 7), além da temperatura e umidade relativa do ar existentes na deposição.

Tabela 2 – Temperatura e Umidade Relativa do Ar na Deposição e Corpos de Prova Obtidos.

Ciclo de Deposição	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Corpos de Prova
1	28	72.2 – 100	1 a 15
2	16	71.8 – 100	16 a 30
3	17	61.8 – 88.1	31 a 45

Fonte: Própria do Autor (2022).

Figura 7 – Corpos de Prova Gerados nas Deposições.



Fonte: Própria do Autor (2022).

COLETA DE DADOS EXPERIMENTAIS

A partir dos corpos de prova criados, foram gerados dados a respeito das espessuras encontradas a partir da deposição manual. Para tanto, fora utilizada uma furadeira-fresadora para o auxílio com os equipamentos de medição e no movimento de sua mesa para percorrer os corpos.

No primeiro momento, fora limpa a área onde o polímero seria acondicionado com álcool isopropílico, para a retirada de quaisquer rugosidades que poderiam ser causadas por resíduos existentes.



Após a limpeza, com o auxílio de um relógio comparador de 0,01 mm de resolução, foi verificada a planicidade superficial da mesa onde serão acomodados os corpos de prova (Figura 8). Tal aferição não encontrou variações na superfície da mesa, acarretando em um erro menor que a resolução do instrumento.

Figura 8 – Verificação da planicidade superficial da mesa da furadeira-fresadora.



Fonte: Própria do Autor (2022).

A aferição das espessuras dos corpos de prova se deu com o auxílio de um relógio apalpador de resolução 0,01 mm, onde o mesmo percorria longitudinalmente o sentido dos mesmos, como pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Aferição das Espessuras dos Corpos de Prova com Relógio Apalpador.



Fonte: Própria do Autor (2022).



RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os corpos de prova foram analisados separadamente, conforme o ciclo de deposição realizado. Os dados gerados verificam as espessuras mínimas e máximas encontradas, bem como, as variações existentes em cada polímero gerado.

Os dados gerados dos corpos de prova do primeiro ciclo de deposição estão presentes na Tabela 3.

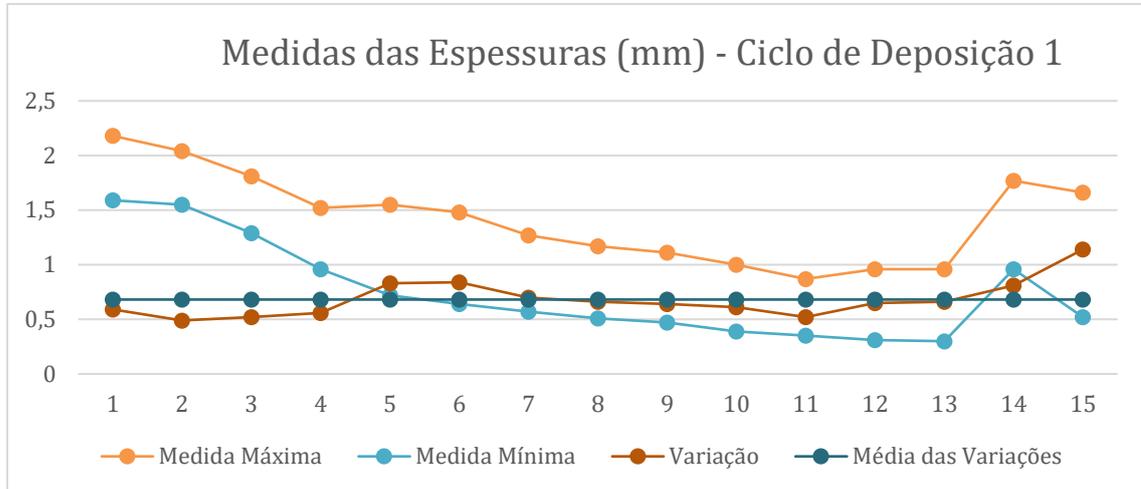
Tabela 3 – Dados Obtidos nos Corpos de Prova do Ciclo de Deposição 1.

Corpo de Prova	Medida Máxima (mm)	Medida Mínima (mm)	Variação (mm)
1	2,18	1,59	0,59
2	2,04	1,55	0,49
3	1,81	1,29	0,52
4	1,52	0,96	0,56
5	1,55	0,72	0,83
6	1,48	0,64	0,84
7	1,27	0,57	0,7
8	1,17	0,51	0,66
9	1,11	0,47	0,64
10	1	0,39	0,61
11	0,87	0,35	0,52
12	0,96	0,31	0,65
13	0,96	0,3	0,66
14	1,77	0,96	0,81
15	1,66	0,52	1,14

Fonte: Própria do Autor (2022).

Os resultados foram tabulados e gerado elemento gráfico para a melhor interpretação dos dados, conforme Figura 10.

Figura 10 – Gráfico das Medidas de Espessuras do Ciclo de Deposição 1.



Fonte: Própria do Autor (2022).

Os dados gerados dos corpos de prova do segundo ciclo de deposição estão presentes na Tabela 4.

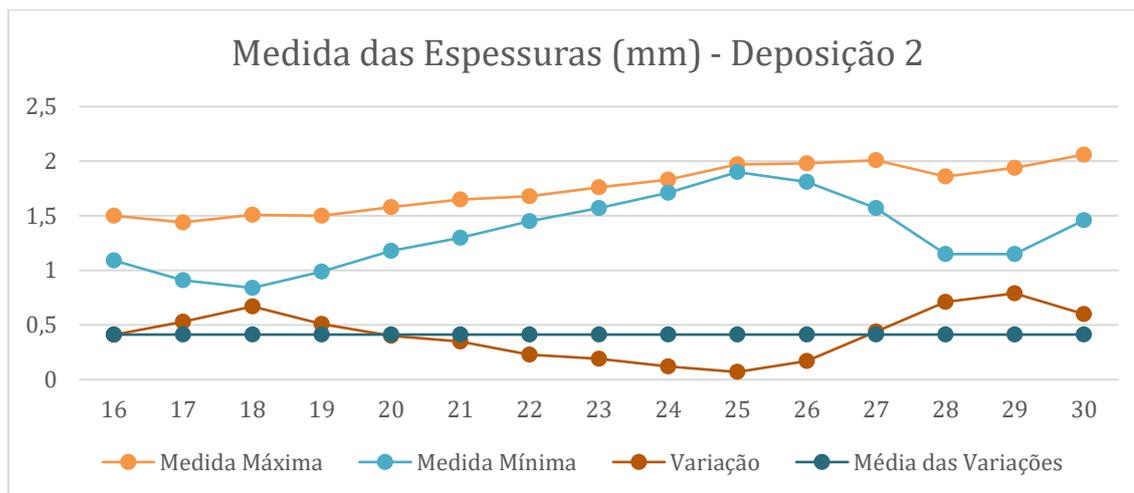
Tabela 4 – Dados Obtidos nos Corpos de Prova do Ciclo de Deposição 2.

Corpo de Prova	Medida Máxima (mm)	Medida Mínima (mm)	Variação (mm)
16	1,5	1,09	0,41
17	1,44	0,91	0,53
18	1,51	0,84	0,67
19	1,5	0,99	0,51
20	1,58	1,18	0,4
21	1,65	1,3	0,35
22	1,68	1,45	0,23
23	1,76	1,57	0,19
24	1,83	1,71	0,12
25	1,97	1,9	0,07
26	1,98	1,81	0,17
27	2,01	1,57	0,44
28	1,86	1,15	0,71
29	1,94	1,15	0,79
30	2,06	1,46	0,6

Fonte: Própria do Autor (2022).

Os resultados foram tabulados e gerado elemento gráfico para a melhor interpretação dos dados, conforme Figura 11.

Figura 11 – Gráfico das Medidas de Espessuras do Ciclo de Deposição 2.



Fonte: Própria do Autor (2022).

Os dados gerados dos corpos de prova do terceiro ciclo de deposição estão presentes na Tabela 5.

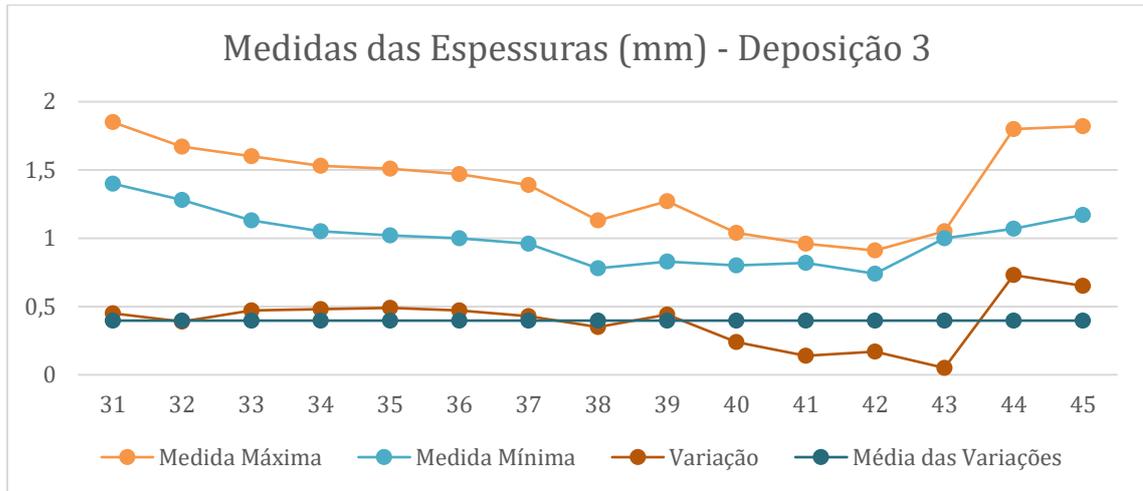
Tabela 5 – Dados Obtidos nos Corpos de Prova do Ciclo de Deposição 3.

Corpo de Prova	Medida Máxima (mm)	Medida Mínima (mm)	Variação (mm)
31	1,85	1,4	0,45
32	1,67	1,28	0,39
33	1,6	1,13	0,47
34	1,53	1,05	0,48
35	1,51	1,02	0,49
36	1,47	1	0,47
37	1,39	0,96	0,43
38	1,13	0,78	0,35
39	1,27	0,83	0,44
40	1,04	0,8	0,24
41	0,96	0,82	0,14
42	0,91	0,74	0,17
43	1,05	1	0,05
44	1,8	1,07	0,73
45	1,82	1,17	0,65

Fonte: Própria do Autor (2022).

Os resultados foram tabulados e gerado elemento gráfico para a melhor interpretação dos dados, conforme Figura 12.

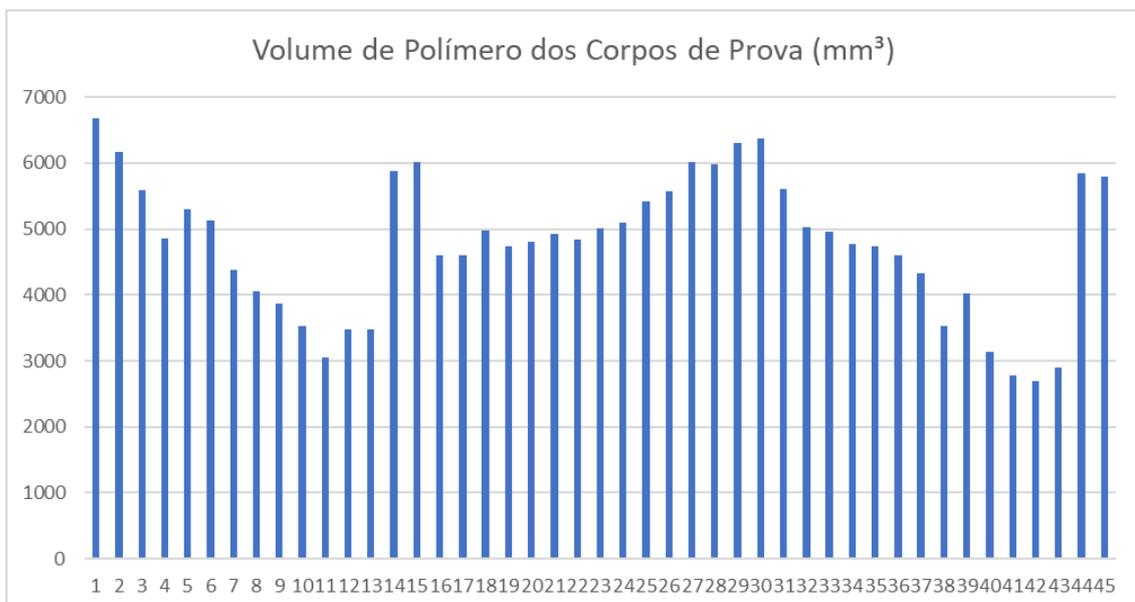
Figura 12 – Gráfico das Medidas de Espessuras do Ciclo de Deposição 3.



Fonte: Própria do Autor (2022).

Dos dados colhidos nas medições realizadas, fora possível mensurar, também, o volume das amostras, conforme pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 – Volume de Polímero nos Corpos de Prova Gerados.



Fonte: Própria do Autor (2022).



A partir dos resultados obtidos, primeiramente, pode-se verificar que a temperatura e a umidade relativa do ar realizam variações significativas no processo de deposição, tornando mais dificultoso o controle do processo, bem como nos corpos de prova gerados, com os polímeros tendo a maior máxima e mínima das deposições realizadas, 2,18 mm e 0,3 mm (variação de 2,15 mm), respectivamente, além da maior variação de espessura dentro do mesmo sólido (1,14 mm).

Os corpos de prova do primeiro ciclo de deposição tiveram as maiores variações de espessura entre as três deposições, tendo como média 0,6813 mm, ao mesmo tempo que houve a maior variação entre volumes dentre todos os experimentos (3631,5 mm³).

O segundo ciclo de deposição obteve resultados mais satisfatórios, quando comparados ao primeiro. A variação entre as espessuras máximas foi de 0,62 mm (enquanto o do primeiro ciclo foi de 1,31 mm) e entre as mínimas foi de 1,06 mm (contra os 1,29 mm da primeira deposição). A média de variações da espessura dos corpos foi de 0,4126 mm. Percebe-se que os corpos de prova retirados de locais mais centrais da película apresentam as menores taxas de variação (0,23, 0,19, 0,12, 0,07, 0,17 mm), demonstrando que, para os futuros testes de tração, estas posições tendem a gerar os sólidos que serão utilizados.

O terceiro ciclo de deposição obteve resultados semelhantes ao do segundo ciclo, porém, com a melhor média de variação e a menor média volumétrica das amostras, 0,3967 mm e 4315,5 mm³, respectivamente. Verifica-se, que as menores taxas de variação estão alocadas entre a região central e a direita da deposição.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a análise dos resultados, verifica-se a necessidade da modificação da metodologia de deposição. Faz-se necessário o controle da temperatura e umidade do ambiente de deposição em primeiro momento.

Outra necessidade é a alteração nos processos de deposição, tal como a inserção de uma prensagem prévia no TPU no sulco da matriz anterior à silcagem. Tal procedimento aumentaria a compactação do polímero e o processo seguinte resultaria somente no acabamento superficial do filme polimérico.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADES, C. E. **Modelagem Matemática e Aperfeiçoamento das Técnicas de Caracterização de Elementos Sensores de Grafite**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí: 2019.

HEMAIS, C. **Polímeros e a indústria automobilística**. *Polímeros*, v. 13, n. 2, p. 107–114, 2013.

HEUSER, J. L. **Teste de uma Matriz Metálica de Conformação de Polímeros e Elastômeros**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí: 2021.

HEUSER, J. L.; RASIA, L. A.; PEDRALI, P. C. **Estudo sobre tipos de adesivos estruturais e aplicações como substratos para deposição de elementos sensores**. In: *Salão do Conhecimento - UNIJUI*. [S.l.: s.n.], 2018.

PARABOND PU 240. **Macroflex**, 2022. Disponível em: <<https://macroflex.net/wp-content/uploads/2021/01/52-FT-PARABONDPU240.pdf>>. Acesso em: 09 de agosto 2022.

NETO, C. M. et al. **A utilização dos polímeros na indústria automobilística**. In: *IX Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 67–69.

SONNENSCHNEIN, M. F. et al. **Reactively dispersed olefins in polyurethanes: A new class of polymer/polymer composite**. *Polymer*, Elsevier, v. 76, p. 80–88, 2015.