

## Determinação de parâmetros de fabricação por impressão 3D de peças de poliuretano termoplástico

### Designation of parameters for 3D printing processes of thermoplastic polyurethane parts

#### RESUMO

**Julio Matheus Castro Miranda Santos**  
[juliosantos@alunos.utfpr.edu.br](mailto:juliosantos@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

**Prof Dr. José Aguiomar Foggiatto**  
[foggiatto@utfpr.edu.br](mailto:foggiatto@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Este artigo tem por objetivo apresentar um estudo referente aos parâmetros escolhidos para a impressão 3D do poliuretano termoplástico (TPU). Este apresenta um breve cenário do papel da impressão 3D e da manufatura aditiva e o que se pode esperar dos avanços que essa área poderá atingir beneficiando a área médica através da produção de próteses e órteses para pessoas de baixa renda. Na metodologia, será descrito o processo de escolha dos fabricantes e parâmetros escolhidos para obter resultados esperados, além de demonstrar a realização de ensaios de tração dos corpos de prova impressos em TPU e a geração de gráficos de tensão por deformação. O trabalho apresenta os resultados obtidos durante os ensaios de tração e faz uma comparação dos mesmos com o observado na literatura. São apresentados, como resultado desse estudo, os parâmetros mais adequados para a impressão 3D utilizando o poliuretano termoplástico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Poliuretano termoplástico. Tensão. Deformação.

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



#### ABSTRACT

This paper aims to present a study regarding the parameters chosen for 3D printing of thermoplastic polyurethane (TPU). This presents a brief overview of the role of 3D printing and additive manufacturing and what can be expected from the advances that this area can achieve benefiting the medical field through the production of prosthetics and orthotics for low-income people. In the methodology, the process of choosing the manufacturers and parameters chosen to obtain expected results will be described, besides demonstrating the performance of tensile tests of the TPU printed specimens and the generation of stress strain graphs. The paper presents the results obtained during tensile tests and compares them with those observed in the literature. As a result of this study, the most suitable parameters for 3D printing using thermoplastic polyurethane are presented.

**KEYWORDS:** Thermoplastic polyurethane. Stress. Deformation.

#### INTRODUÇÃO

O poliuretano é uma classe de polímeros, que possuem em comum a presença do grupo uretano (-NHCO-O-), descoberto pelo químico alemão Otto Bayer e alguns colaboradores no ano de 1937. Os poliuretanos são sintetizados a partir da reação entre um isocianato e um grupo hidroxila, embora em casos especiais seja utilizado biscloroformatos e aminas. (VILLAR, 1993; PETROVIĆ; FERGUNSON, 1991)

Uma das variáveis do poliuretano é o elastômero termoplástico poliuretano (TPU) que apresenta propriedades como elevada resistência a abrasão, óleos, graxa e solventes, alta resistência a tração em comparação com borrachas e temperatura de transição vítrea abaixo de 0°C. O TPU é formado por segmentos flexíveis e segmentos rígidos sendo possível controlar a quantidades de segmentos tanto do flexível como o do rígido para obter variação de formatos e propriedades. (HA, Chang-Sik *et al.*, 1998)

Além da grande variedade de formas e propriedades que se pode obter com o TPU, é possível adicionar outros materiais para poder alterar os valores de suas propriedades. Quando misturado, por exemplo, com fibra de vidro os valores como resistência a abrasão e resistência ao impacto aumentam, além de apresentar melhoras na resistência a combustíveis e ao óleo e aumento da temperatura de fusão. Todas essas propriedades fazem o TPU ser utilizado em diversas áreas desde correias de transmissão até distintas áreas da medicina com a produção de próteses via impressão 3D. (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, 2018; JIA *et al.*, 2018)

O TPU é utilizado no formato de filamento para a impressão 3D através do aquecimento desse filamento que passa por um furo e é depositado em cima de uma superfície que sucessivamente formará camadas. Para evitar possíveis deformações do modelo impresso são utilizados suportes, impressos simultaneamente com o modelo, com o objetivo de servir como uma estrutura de sustentação para camadas que ficariam suspensas no ar sendo removidos após o fim da impressão. (DUMAS *et al.*, 2014)

Os suportes são gerados através de programas de fatiamento como o *Cura*, *ClonerGen 3D* e *Simplify 3D* onde são definidos os parâmetros da impressão que irão influenciar diretamente na qualidade de impressão e, também, simula dados como o tempo total da impressão, a quantidade de material utilizada e em alguns casos é possível obter o custo do modelo.

A principal vantagem da impressão por filamento é o baixo custo tanto do filamento quanto da impressora, em relação aos processos de impressão disponíveis atualmente, o que possibilita que pessoas com baixa renda tenham acesso a produtos como próteses por um preço mais baixo. Entretanto, existe algumas dificuldades na impressão com o TPU por ser um material muito flexível pois ele deforma muito facilmente sendo necessário a determinação de parâmetros específicos para a impressão.

Outra dificuldade está relacionada com a impressão do material flexível e com características especiais que o cabeçote precisa ter. Nem todas as impressoras conseguem imprimir esse material visto que, se o cabeçote não tiver algum dispositivo que consiga empurrar o material para dentro do bico extrusor sem ele flambar, o mesmo acabará impossibilitando a impressão.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado utilizando corpos de prova de tração (ASTM D3039). Os parâmetros de impressão dos corpos de prova foram definidos através do programa *Simplify 3D* sendo definido os valores de quantidade de preenchimento, a orientação de impressão, suporte, velocidade de impressão entre outros parâmetros. Sendo adotados parâmetros variados para cada quantidade dos corpos de prova com fim de escolher quais

seriam os melhores parâmetros para a impressão utilizando o TPU. Para o primeiro grupo de 11 corpos de prova foi adotado 100% de preenchimento mudando somente a orientação de impressão de cada um, sendo que, foram impressos em pé, de lado e deitado, e o ângulo de preenchimento interno de 45°.

Os parâmetros adotados para o segundo grupo foram os mesmo com exceção do ângulo de preenchimento interno que foi utilizado 30° com o objetivo de obter uma maior resistência a tração. No último grupo foi escolhido o ângulo de 15° para observar se os valores de tração obtidos no ensaio divergem de maneira significativa dos ângulos adotados anteriormente.

Determinados os parâmetros de impressão, foram modelados os corpos de provas. A geometria do corpo de prova foi criada em um programa de modelagem 3D (SOLIDWORKS) e então impressos em uma impressora 3D da UTFPR, no NUFER (Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental), que possuía o extrusor adequado para a impressão com material flexível. Foram utilizados filamentos de três fabricantes diferentes: GRAVAPLAST, F3DB e 3DFila. Os filamentos possuíam algumas propriedades diferentes sendo que não foi possível encontrar os valores das propriedades do material da 3DFila.

Após a impressão dos corpos de prova, foram realizados os ensaios de tração para posteriormente comparar os resultados obtidos através da análise de gráficos gerados no final de cada ensaio. No primeiro ensaio, foram testadas onze amostras com três parâmetros diferentes das fabricantes já mencionados, sendo 4 amostras de cor verde da fabricante F3DB, todas marcadas com “FLEX” e enumeradas de um a quatro.

Das outras sete amostras, cinco eram da GRAVAPLAST sendo que foram marcadas com a sigla TPU e foram enumeradas de um a cinco. Os outros dois corpos de prova foram impressos com o material 3DFila, sendo que um foi marcado com a sigla TPU seguida de uma reta na vertical e o outro com uma reta na horizontal.

Os ensaios foram realizados em uma máquina da EMIC da Linha DL no laboratório de ensaios destrutivos da UTFPR, no qual foi utilizada uma célula de carga de 50 kgf e uma velocidade de ensaio de 100 mm/min. Feitos os primeiros ensaios de tração, foram selecionados dois novos ângulos de preenchimento: 15° e 30°. Esses ângulos foram escolhidos a partir da constatação que, quanto menor o ângulo entre o sentido do esforço, na vertical, e a orientação do preenchimento, maior será a resistência do corpo de prova naquele sentido e será menor no sentido perpendicular, portanto, o corpo de prova com orientação de 90°, supostamente deverá apresentar maior resistência ao ensaio de tração no sentido vertical, porém será mínimo na horizontal. Por fim, foram impressos cinco CPs para cada ângulo, no material da GRAVAPLAST. Os demais parâmetros de impressão como preenchimento e velocidade de impressão continuaram os mesmos assim como a carga e a velocidade de ensaio. No total foram realizados dez ensaios sem apresentar nenhuma perda de CPs. Foi utilizada a norma ASTM D3039.

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Houveram algumas dificuldades durante os ensaios de tração e dos corpos de prova marcados com “FLEX” somente os CPs de número 2 e 4 forneceram dados úteis visto que os demais CPs desse conjunto foram ensaiados a uma velocidade de 10 mm/min, enquanto esta deveria ser de 100 mm/min.

Os gráficos que apresentaram uma divergência de valores muito grandes (corpos de prova “TPU” 1 e 5), foram desconsiderados por causa dos seus dados não serem confiáveis. Provavelmente houve algum erro durante o processo de impressão que resultou nessa diferença de valores de deformação.

Felizmente, nos ensaios dos corpos de prova com ângulo de preenchimento de 30° todos os gráficos apresentaram resultados muito semelhantes apresentando de 20% a menos de diferença de deformação e, aproximadamente, 2 MPa de divergência da tensão máxima. Portanto, todos os gráficos foram utilizados e apresentaram resultados convergentes.

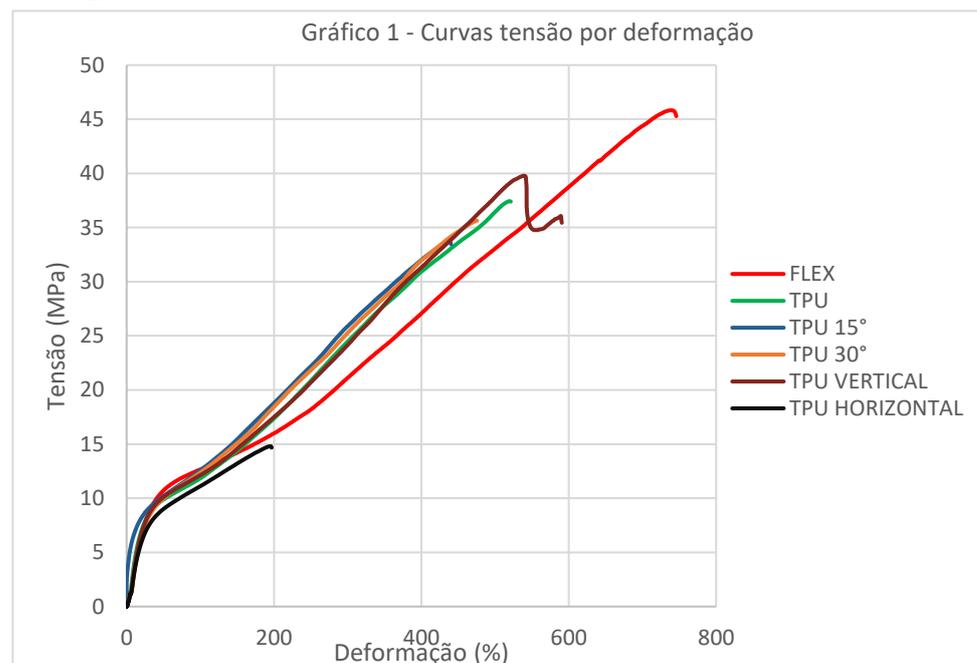
O CP de prova impresso horizontalmente apresentou uma característica diferente dos demais ensaios que foi uma queda da tensão que voltou a crescer antes do final do ensaio. Isso deve-se ao fato de que antes de romper completamente, o corpo de prova se partiu em três partes.

O Gráfico 1 apresenta 6 (seis) curvas que demonstram a tendência do comportamento de cada corpo de prova impressos com materiais e parâmetros de fabricação diferentes. Todavia, para a obtenção dos valores de tensões de escoamento ( $\sigma_y$ ), máxima ( $\sigma_{máx}$ ) e ruptura ( $\sigma_{rup}$ ) e deformação ( $\epsilon$ ), foi feita uma média aritmética entre todos os valores respectivos de cada curva de tensão por deformação.

Existe uma influência entre os parâmetros de impressão e origem do material no resultado. O gráfico do corpo de prova “TPU HORIZONTAL” mostra um resultado esperado, tanto de resistência a tração como deformação, entre os demais valores obtidos, pelo fato das fibras do corpo de prova se encontrarem em uma direção perpendicular ao esforço, exigindo uma carga mínima para rompê-lo.

Porém, o corpo de prova “TPU VERTICAL” também não apresentou os melhores resultados como o esperado. Isso ocorreu devido ao esforço cisalhante existente em um ensaio de tração, ou seja, por apresentar uma resistência mínima em qualquer direção e sentido fora do eixo vertical, esse corpo de prova possui uma menor resistência ao esforço cisalhante, que é responsável pelo rompimento do corpo de prova.

A partir desse raciocínio, os modelos “TPU 30°” e “TPU 15°” deveriam apresentar resultados maiores que o “TPU VERTICAL”. Não é o caso por se tratar de materiais de fabricantes diferentes, que apresentam propriedades distintas. Se forem utilizados os mesmos materiais, normas e se o ensaio for realizado nas mesmas condições, os resultados seriam mais favoráveis ao “TPU 30°” e ao “TPU 15°”, respectivamente, como mostra o Gráfico 1.



Fonte Autoria própria (2019)

Assim sendo, os melhores resultados esperados seriam os corpos de prova com o ângulo de preenchimento mais próximo ao ângulo do esforço cisalhante, que no caso foram os de 45°, possivelmente por apresentarem a mesma resistência à tração tanto no sentido vertical como no horizontal. O que se destaca é que os corpos de prova “FLEX” fornecidos pela F3DB apresentaram características de propriedades mecânicas superiores ao material fornecido pela GRAVAPLAST.

A Tabela 1 mostra os valores de: tensões de escoamento ( $\sigma_y$ ), máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ), ruptura ( $\sigma_{rup}$ ) e deformação ( $\epsilon$ ):

Tabela 1 – Propriedades mecânicas ods materiais

	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\sigma_{rup}$ (MPa)	$\epsilon$ (%)
FLEX	8,06	47,73	47,13	751,17
TPU	6,93	37,43	37,33	524,83
TPU 15°	5,92	34,11	34,12	436,87
TPU 30°	6,39	35,32	35,04	473,20
TPU VERTICAL	5,70	39,39	35,99	591,06
TPU HORIZONTAL	5,45	14,79	14,75	196,00

Fonte: Autória própria (2019)

## CONCLUSÃO

Tendo em vista dos resultados apresentados, percebe-se a influência da origem do material utilizado na impressão assim como a influência dos parâmetrode fabricação utilizados em uma impressão 3D. Isso não se restringe somente ao TPU e materiais flexíveis, mas sim a todos os materiais utilizados nessa área. Destaca-se que peças de TPU impressas com orientação de preenchimento no mesmo sentido do esforço aplicado terão valores de resistência máxia. Todavia, na direção perpendicular sua resistência será mínima. Desta forma, para casos gerais um ângulo de preenchimento ideal seria o de 45° por apresentar a mesma resistência ao esforço tanto na vertical como na horizontal.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio financeiro do CNPq, à UTFPR e aos meus colegas de trabalho do NUFER (Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental).

## REFERÊNCIAS

AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL. **Introduction to Polyurethanes: Thermoplastic Polyurethane**. Disponível em: <<https://polyurethane.americanchemistry.com/polyurethanes/Introduction-to-Polyurethanes/Applications/Thermoplastic-Polyurethane/>>. Acesso em: 19 Set. 2018

DUMAS, Jérémié. *et al.* **Bridging the Gap: Automated Steady Scaffoldings for 3D Printing**, 2014. Disponível em:  
<<https://members.loria.fr/JDumas/files/papers/scaffoldings/bridging-the-gap.pdf>>.  
Acesso 07 Fev. 2019

HA, Chang-Sik. *et al.* **Fracture toughness and proprieties of plasticized PVC and thermoplastic polyurethane blends**, 1998. Disponível em:  
<file:///V:/Pesquisas/Thermoplastic%20polyurethane.pdf>. Acesso em: 06 Fev. 2019

JIA, Shikui. *et al.* **Composites of poly (latic) acid/thermoplastic polyurethane/ mica with compatibilizer: morphology, miscibility and interfase**. **Royal Society of Chemistry**, 2015. Disponível em: < <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2015/ra/c5ra17938f>>.  
Acesso em: 15 Out. 2018.

PETROVIĆ, Zoran S.; FERGUNSON, James. **POLYURETHANE ELASTOMERS**, 1991. Disponível em:< file:///V:/Pesquisas/Polyurethane%20Elastomers.pdf>. Acesso em 06 Fev. 2019

VILLAR, Walter Dias. **QUÍMICA E TECNOLOGIA DOS POLIURETANOS**. Rio de Janeiro: Pronor, 1993.