

AVALIAÇÃO DO EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA DO ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA) PARA APLICAÇÃO EM PROCEDIMENTOS CIRÚRGICOS MINIMAMENTE INVASIVOS

Juliana de Guimarães e Queiroz, juuqrrz@gmail.com¹

Juan Carlos Campos Rubio, juan@ufmg.br¹

Augusto Moura Martins, augusto.mmartins@yahoo.com.br¹

¹Laboratório de Engenharia e Processos Avançados de Manufatura (LEPAM), Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627, Bloco 3 Engenharia, sala 3322 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901

Resumo: Estruturas geradas por manufatura aditiva, uma vez prontas, costumam ser estáticas, com poucas exceções. A Impressão 4D surge como alternativa quando esta característica é uma limitação: o objeto impresso, após pronto, sofre alterações quando exposto a estímulos externos como alta temperatura ou umidade. Uma potencial aplicação deste conceito é a inserção de componentes de máquinas ou dispositivos no interior do corpo humano através de cortes de dimensões mínimas e aplicação de estímulo para que a peça assuma nova geometria assim que convenientemente posicionada. O Ácido Polilático (PLA), por ser polímero com Memória de Forma, biodegradável e aprovado pelo órgão americano “The Food and Drug Administration (FDA)” para implantes médicos, é candidato a este tipo de aplicação. Este trabalho avalia qualitativamente o comportamento do Ácido Polilático (PLA) como material dotado de Memória de Forma submetido à dois testes que envolvem seu aquecimento e deformação. Os resultados obtidos constatarem nitidamente a ocorrência deste efeito e justificaram o planejamento de testes posteriores, quantitativos.

Palavras-chave: Ácido Polilático (PLA), Impressão 4D, Polímeros com Memória de Forma, Polímeros termo-responsivos, Grampos cirúrgicos.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, por vezes mencionada como sinônimo de prototipagem rápida ou Impressão 3D, baseia-se no princípio de materialização de geometrias tridimensionais correspondentes a modelos CAD, através da sobreposição de perfis bidimensionais, de acordo Hopkinson (2003). Segundo Raja e Fernandes (2008), a Fusão e Deposição de Material (FDM), desenvolvida pela Stratasys, é a segunda técnica de prototipagem rápida mais utilizada. Maidin (2012) menciona que estruturas geradas por manufatura aditiva, uma vez prontas, costumam ser estáticas, com poucas exceções de projetos que incluem dobradiças, rolamentos e juntas de encaixe. A Impressão 4D surge como alternativa quando esta característica é uma limitação.

Em definição de Pei (2014), a quarta dimensão é acrescentada quando a Impressão 3D é combinada com o tempo. O conceito não se refere ao tempo decorrido para a realização de uma impressão, mas à situação em que o objeto impresso, após pronto, sofre alterações quando exposto a estímulos externos como alta temperatura ou umidade. Segundo Sun (2010), uma potencial aplicação deste conceito é a inserção de componentes de máquinas ou dispositivos no interior do corpo humano através de cortes de dimensões mínimas e aplicação de estímulo para que a peça assuma nova geometria assim que convenientemente posicionada. Se constituídos por material biocompatível e biodegradável, a remoção do dispositivo do corpo é desnecessária e, ao longo do tempo, ele é absorvido pelo organismo. O Ácido Polilático (PLA), por ser polímero com Memória de Forma, biodegradável e aprovado pelo órgão americano “The Food and Drug Administration (FDA)” para implantes médicos (Zhou, 2015), é candidato a este tipo de aplicação.

Este trabalho pretende avaliar qualitativamente o comportamento do Ácido Polilático (PLA) como material dotado de Memória de Forma submetido à dois testes que envolvem seu aquecimento e deformação. Trata-se de abordagem preliminar para auxiliar o planejamento de testes posteriores, previstos para avaliar quantitativamente os parâmetros que descrevem o Efeito de Memória de Forma do PLA e sugerir procedimentos para a aplicação de estímulos térmicos ao material em procedimentos cirúrgicos minimamente invasivos. Optou-se pela utilização de instrumentos e equipamentos de fácil acesso e procedimentos de fácil reprodução, tanto em relação à fabricação das peças quanto aos procedimentos aos quais foram submetidas. A etapa de aquecimento, por exemplo, pode ser efetuada em qualquer contexto em que haja acesso a uma fonte de calor para aquecer água a cerca de 90°C. Considerou-se, ainda, a facilidade de compra do material experimentado.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

O aquecimento de peças já impressas em PLA, para alteração de sua geometria, é um processo que estende a fabricação à quarta dimensão. Em trabalho recente sobre a Impressão 4D, Zhou (2015) aponta o calor como um dos estímulos externos que ativam alterações nas características de um material termo responsivo, de forma reversível ou irreversível. Além dele, podem ser empregados exposição à luz, imersão em solvente, dentre outros. A escolha do estímulo depende dos fatores aos quais o material é sensível, dos recursos disponíveis para experimento e aplicação, e das condições nas quais espera-se que ele atue (no interior do corpo humano, por exemplo). Zhou (2015) menciona, ainda, que alguns polímeros podem sofrer cristalização se expostos ao superaquecimento. O PLA, se submetido à água em processo de ebulição (cerca de 100°C), se torna rígido, e deformações posteriores deixam de ser reversíveis. Este comportamento é vantajoso quando se almeja maior estabilidade da configuração final planejada para a peça.

Huang *et al.* (2010) definem que Materiais com Memória de Forma são dotados da habilidade de, após deformação plástica significativa, retornar à sua forma original quando determinado estímulo é aplicado. Tradicionalmente, o primeiro passo para deformar um material em configuração temporária é denominado “processo de programação”, enquanto o retorno às condições originais sob aplicação de estímulo é denominado “processo de recuperação de forma”.

O Efeito de Memória de Forma (do inglês Shape Memory Effect, SME) difere do Efeito de Mudança de Forma (do inglês, Shape Change Effect, SCE), para o qual, segundo Manzoor (2012) e Sun (2012), a magnitude da mudança de forma é proporcional ao estímulo aplicado. Os dois efeitos são observados para o PLA.

Ainda no trabalho de Zhou (2015), é realizado procedimento para visualizar o comportamento do PLA como material termo responsivo, ilustrado na Fig.1. Em (a), cartão impresso em PLA com letras em alto relevo. Em (b), após aquecimento, um ponto é marcado no cartão, mas some rapidamente, evidenciando a ocorrência de SCE sob alta temperatura. Em (c), após aquecimento, são feitas marcações com uma caneta e uma régua, porém mantém-se o estímulo durante o resfriamento e, nesse caso, as marcas permanecem. Em seguida, o mesmo cartão é aquecido e as marcas somem rapidamente (d): o material apresenta ótima memória de forma.

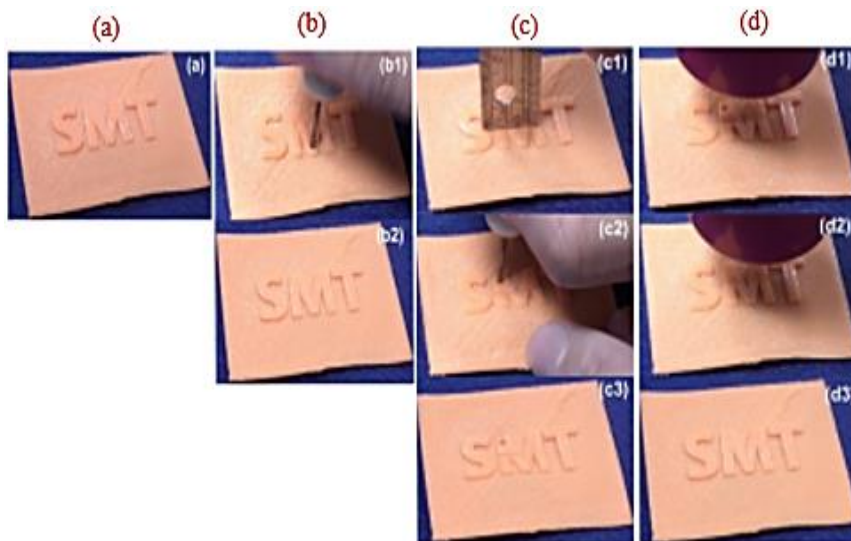


Figura 1. Avaliação do comportamento termo responsivo do PLA

Fonte: Zhou (2015)

Segundo Lendlein (2010), um polímero com memória de forma ideal para aplicações cirúrgicas deve apresentar as seguintes propriedades: processos de fabricação e embalagem de baixos custos, nenhuma restrição para armazenamento ou esterilização (nenhum risco de ser “ativado” antes do planejado), permanecer em boas condições após armazenamento superior a 2 anos, possibilidade de ativação diante de pequeno (ou nenhum) estímulo térmico externo, ativação apenas diante de comando do cirurgião, ausência de retenção de umidade, início da degradação apenas quando a estrutura orgânica de interesse estiver praticamente curada. Algumas destas propriedades são observadas no PLA, outras representam desafios à sua aplicação. Ele é, por exemplo, fabricado e embalado a baixos custos. No entanto, ainda não foram desenvolvidas técnicas que garantam total controle sobre sua ativação.

Quando comparado aos polímeros com Memória de Forma candidatos a aplicações médicas, o PLA é material conveniente. Além de ser aprovado para implantes médicos pela “The Food and Drug Administration (FDA), USA”, sua resposta a estímulos térmicos é observada a partir de temperaturas relativamente próximas às do corpo humano: 45°C, segundo Huang (2013). Um grampo cirúrgico produzido em PLA, poderia ser “programado” diante de aquecimento, e posteriormente submetido ao mesmo estímulo para retornar à configuração original. Durante o retorno de forma, as tensões exercidas pela peça não ultrapassam poucos MPa, o que reduz a possibilidade de danificar as estruturas biológicas nas quais é projetada para atuar. Características como as supracitadas não são observadas para os demais materiais

disponíveis no Laboratório de Engenharia e Processos Avançados de Manufatura (LEPAM/UFGM), como o ABS ou o PETG.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram construídas, com o auxílio do Software “Autodesk Meshmixer”, duas peças com geometrias inspiradas na configuração de grampos cirúrgicos metálicos e uma peça em forma similar à testada por Yang (2014). Estes elementos e suas dimensões, em milímetros, são ilustrados na Fig.2. As dimensões das amostras foram escolhidas arbitrariamente, por se tratar de etapa de avaliação qualitativa do comportamento do material. Os resultados desta primeira avaliação têm a finalidade de validar a escolha do PLA como material alvo desta pesquisa e evidenciar parâmetros relevantes a serem investigados por experimentos posteriores.

Por meio do processo FDM de manufatura aditiva, foram fabricadas três amostras de cada geometria em Ácido Polilático (PLA) na cor branca. A impressão foi realizada segundo os parâmetros indicados na Tab.1, pelo equipamento “Impressora Sethi3D S2”.

Tabela 1. Parâmetros de Impressão para Amostras

Velocidade de impressão (mm/s)	Temperatura do bico extrusor (°C)	Temperatura da mesa de impressão (°C)	Espessura de camadas (mm)	Tipo de preenchimento
60	215	60	0,2	50% Retilíneo

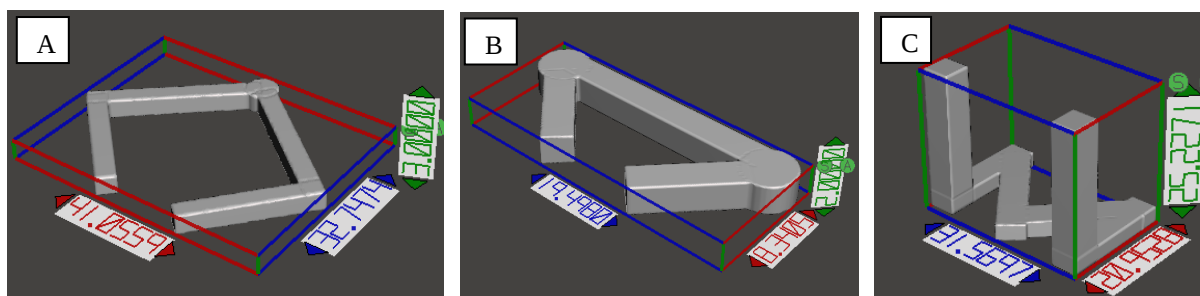


Figura 2. Geometrias e dimensões das amostras. Da esquerda para a direita: amostras A e B inspiradas em grampos cirúrgicos metálicos e amostra C similar à criada por Yang (2014)

Fonte: Autores

Em seguida, traçou-se em folha branca o contorno de cada uma das amostras em suas formas originais. A folha de papel representa plano paralelo àquele no qual as peças foram deformadas. Como primeiro teste, o seguinte procedimento (ilustrado em Fig.3 e Fig.4) foi realizado para cada uma das peças, separadamente:

- I. Aquecimento por imersão em água com temperatura pouco inferior a 90°C, por cerca de 10 segundos;
- II. Remoção da amostra da água, seguida por imediata deformação manual em temperatura ambiente, em plano paralelo ao do contorno previamente traçado no papel como referência inicial (processo de programação);
- III. Comparação entre configuração temporária obtida e contorno da configuração original;
- IV. Novo aquecimento em imersão em água nas mesmas condições do item “I” (processo de recuperação de forma sob aplicação de estímulo térmico);
- V. Comparação entre configuração final e contorno da configuração original.

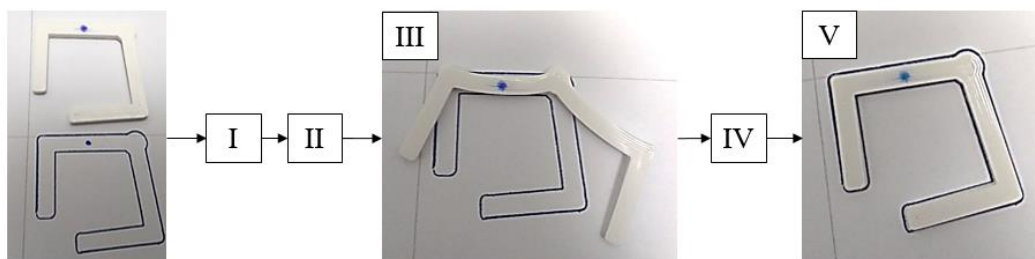


Figura 3. Procedimento realizado em primeiro teste, peça A

Fonte: Autores

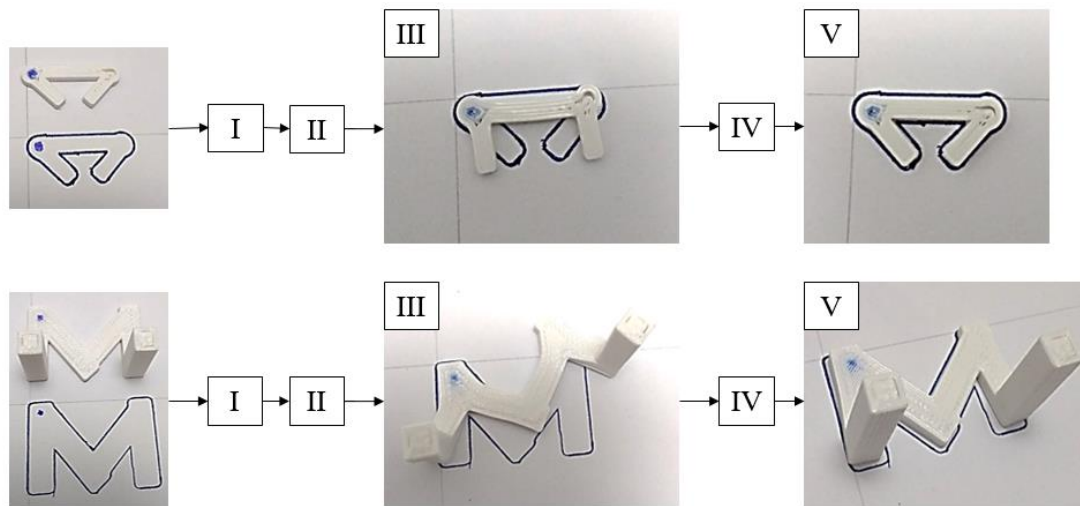


Figura 4. Procedimento realizado em primeiro teste, peças B e C
Fonte: Autores

Em um segundo teste, intendeu-se avaliar a capacidade de cada uma das geometrias de unir dois fragmentos de esponja, dado o comportamento de memória de forma já constatado no primeiro teste. A montagem simula a interação dos grampos com tecido orgânico a ser suturado. O seguinte procedimento (ilustrado em Fig.5) foi realizado para cada uma das peças, separadamente:

- I. Aquecimento por imersão em água com temperatura pouco inferior a 90°C, por cerca de 10 segundos;
- II. Remoção da amostra da água, seguida por imediata deformação manual em temperatura ambiente, em plano paralelo ao do contorno previamente traçado no papel como referência inicial (processo de programação);
- III. Fixação de fragmentos de esponja nos “grampos” em configuração temporária;
- IV. Novo aquecimento em imersão em água nas mesmas condições do item “I”;
- V. Comparação entre configuração final e contorno da configuração original (processo de recuperação de forma sob aplicação de estímulo térmico);

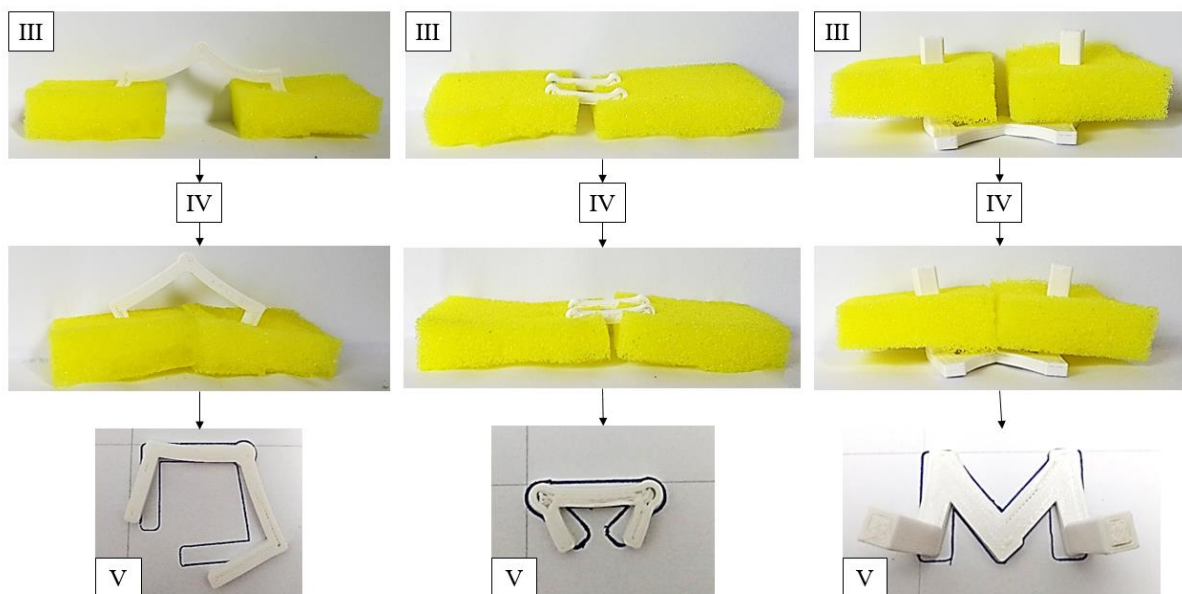


Figura 5. Procedimento realizado em segundo teste
Fonte: Autores

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Ácido Polilático (PLA) apresentou comportamento satisfatório quanto à sua recuperação à configuração original pelo Efeito de Memória de Forma. Observou-se que, para o primeiro teste, no qual as peças foram imersas livremente em água para aquecimento, as amostras A e B retornaram perfeitamente à geometria original, enquanto a amostra C sofreu

leve “empenamento”. Por outro lado, no segundo teste, nenhuma das três amostras retornou completamente à sua configuração inicial. A Fig.6 ilustra comparação entre as formas finais das amostras A e C obtidas para os dois testes.

A diferença entre os resultados dos experimentos indica que a capacidade de retorno de peças em PLA à sua configuração original pelo efeito de Memória de Forma é limitada pela força a ser vencida pela peça. Esta restrição retoma a informação de que as tensões exercidas pelo PLA no processo de recuperação de forma são pequenas. Uma possibilidade para superar o inconveniente seria empregar maior número de grampos para atuação em uma mesma estrutura orgânica. Este é um procedimento atualmente utilizado para grampos cirúrgicos de titânio e aço inoxidável. Para o emprego de dispositivos de PLA em aplicações cirúrgicas minimamente invasivas, é necessário estudo cuidadoso acerca das estruturas do organismo humano, quanto às forças e pressões por elas exercidas.

Planeja-se, em testes futuros, investigar modelos que descrevam a força aplicada, em objetos externos (tais como a espuma para o segundo teste), por estruturas de Ácido Polilático (PLA) durante seu processo de recuperação de forma sob aplicação de estímulo externo. A partir destes resultados, intende-se decidir pelas melhores dimensões e geometria para que este material seja empregado como grampo cirúrgico. Sugere-se, ainda, que seja proposto método para aplicação do estímulo térmico externo que não exponha o paciente a temperaturas elevadas como as da água utilizada neste experimento.

Uma possível solução foi estudada e publicada pelo grupo de pesquisa “Maitland”, mencionado por Lendlein (2010). O laser foi testado como ferramenta de aquecimento de polímeros com memória de forma. A técnica, no entanto, apresenta dificuldades quanto ao equipamento necessário, barreiras regulatórias, e possibilidade de danos aos tecidos biológicos ao redor do alvo.

Outra possibilidade ressaltada por Lendlein (2010) é que a temperatura de transição vítrea de materiais biodegradáveis pode ser aproximada à temperatura do corpo humano. No entanto, esta manipulação pode acelerar a taxa de degradação do material. Já foram propostos, por investigadores, materiais cuja ativação é desencadeada pela temperatura do corpo humano. Vantajosamente, o corpo é uma fonte de calor naturalmente regulada, e neste caso a geração do estímulo não depende de equipamento externo. Na prática, a condição apresenta diversos desafios: possibilidade de ativação prematura, já que a temperatura de transição vítrea seria próxima da temperatura ambiente; a temperatura do corpo humano pode ser menor do que a planejada, em uma sala de operação; o clínico pode necessitar de controle imediato da ativação, dependendo da aplicação, e o aquecimento por condução ou convecção com calor transmitido do corpo humano demanda tempo mínimo.

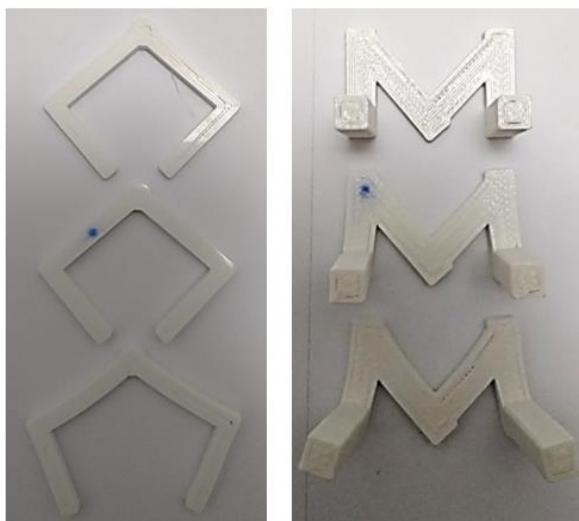


Figura 6. (a)Peças em geometria original; (b)Configuração ao final do primeiro teste; (c)Configuração ao final do segundo teste

Fonte: Autores

5. CONCLUSÃO

O Ácido Polilático (PLA) apresentou comportamento satisfatório em avaliação qualitativa do Efeito de Memória de Forma. O efeito foi alcançado através de procedimento simples, rápido e de fácil acesso. Os resultados justificam testes posteriores para levantamento de dados quantitativos sobre o fenômeno e sugestão de aplicação de estímulo térmico externo que não afete o paciente em caso de procedimento cirúrgico minimamente invasivo. Quanto aos parâmetros a serem estudados, enfatizam-se as dependências entre tensões de retorno das peças à configuração de origem, geometria e dimensões das peças.

6. REFERÊNCIAS

- Hopkinson, N., Dickens, P., 2003, "Analysis of rapid manufacturing—using layer manufacturing processes for production", Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Loughborough University.
- Huang, W.M., Ding, Z., Wang, C.C., Wei, J., Zhao, J., Purnawali, H., 2010, "Shape memory materials", *Materials Today*, Volume 13, Issues 7–8, Pages 54-61, ISSN 1369-7021, [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(10\)70128-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70128-0). (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702110701280>)
- Huang, W. M., et al., 2013, "Shaping tissue with shape memory materials", *Advanced Drug Delivery Reviews*, 65 (4) 515-535.
- Lendlein, A., 2010, "Shape-memory Polymers", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- Maidin, S., Campbell, R.I. And Pei, E., 2012, "Development of a design feature database to support design for additive manufacturing", *Assembly Automation*, Vol. 32 No. 3, pp. 235-244.
- Manzoor, T., Shabbir, G., Khalid, F., 2012, "Analytical technique for the two-dimensional stress wave model of memory alloy dampers", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26 (10) 3059-3066.
- Pei, E., 2014, "4D Printing – revolution or fad?", *Assembly Automation*, Vol. 34 Iss 2 pp. 123 – 127.
- Raja, V., Fernandes, K. J., 2008, "Reverse Engineering: an industrial perspective", Londres, Ed. Springer.
- Sun, L., Huang, W.M., 2010, "Thermo/moisture responsive shape-memory polymer for possible surgery/operation inside living cells in future", *Materials & Design* (1980-2015), Volume 31, Issue 5, Pages 2684-2689, ISSN 0261-3069, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.036>.
- Sun, L. Et Al., 2012, "Stimulus-responsive shape memory materials: a review", *Materials and Design*, 33 577-640.
- Yang, W.G. Et Al., 2014, "Advanced Shape Memory Technology to Reshape Product Design", *Manufacturing and Recycling, Polymers*, 6 (8) 2287-2308.
- Zhou, Y., Huang, W.M., Kang, S.F. Et Al, 2015, "From 3D to 4D printing: approaches and typical applications", *J Mech Sci Technol* 29: 4281. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0925-0>

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho.

EVALUATION OF THE POLYLACTIC ACID (PLA) SHAPE MEMORY EFFECT FOR APPLICATION IN MINIMALLY INVASIVE SURGICAL PROCEDURES

Juliana de Guimarães e Queiroz, juuqrz@gmail.com¹
Juan Carlos Campos Rubio, juan@ufmg.br¹
Augusto Moura Martins, augusto.mmartins@yahoo.com.br¹

¹Laboratório de Engenharia e Processos Avançados de Manufatura (LEPAM), Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627, Bloco 3 Engenharia, sala 3322 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901

Abstract. Structures generated by additive manufacturing, once ready, are usually static, with few exceptions. 4D Printing comes up as an alternative when this feature is a limitation: the printed object, after printing, changes when exposed to external stimuli such as high temperature or humidity. A potential application of this concept is the insertion of components of machines or devices inside the human body through minimum dimensions cuts and posterior application of stimulus so that the part assumes new geometry as soon as conveniently positioned. Polylactic Acid (PLA), as a polymer with shape memory, biodegradable and approved by the US Food and Drug Administration (FDA) for medical implants, is a candidate for this type of application. This work qualitatively evaluates the behavior of Polylactic Acid (PLA) as a material endowed with Memory of Form submitted to two tests involving its heating and deformation. The results obtained clearly verified the occurrence of this effect and justified the planning of subsequent, quantitative tests.

Keywords: Polylactic Acid (PLA), 4D Printing, Shape Memory Polymers, Termo-responsive Polymers, Surgical Staples