

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA INTEGRADA PARA ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS EM MATERIAIS POLIMÉRICOS IMPRESSOS: INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA E HOLOGRAFIA DE SPECKLE

Aryadne de J. Picoli¹, ary.picoli@yahoo.com.br
Marcelo Camargo S. de Macêdo¹, marcelo.macedo@ufes.br
Edson Siqueira Nunes², snunes@ifes.edu.br

¹ Universidade Federal do Espírito Santo – UFES – Campus Vitória.

² Instituto Federal do Espírito Santo – IFES – Campus Aracruz.

Resumo. A manufatura aditiva do tipo Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) consolidou-se como uma tecnologia essencial para a produção de componentes poliméricos, devido à sua versatilidade e ao baixo custo de implementação. Contudo, a deposição termomecânica camada a camada induz tensões internas que podem comprometer o desempenho funcional das peças impressas. Este estudo investiga a formação e a distribuição de tensões residuais em dois dos termoplásticos mais amplamente utilizados na FDM, o poli(ácido láctico) (PLA) e o acrilonitrila butadieno estireno (ABS), impressos em diferentes temperaturas. A metodologia adotada combinou técnicas experimentais, como Nanoindentação Instrumentada e o Furo Cego integrado a Holografia Eletrônica de Speckle (ESPI), com simulação numérica por meio do método dos elementos finitos (FEA). Os resultados indicaram que as tensões residuais são mais acentuadas no PLA, com níveis elevados e distribuição heterogênea, especialmente quando processado em temperaturas mais baixas, em função de sua morfologia semicristalina. Em contraste, o ABS apresentou tensões mais uniformes devido à sua estrutura amorfa e maior resistência térmica, com menores tensões residuais quando impresso em temperaturas mais elevadas. A comparação entre os métodos revelou boa correlação entre os resultados experimentais obtidos pelo método do furo e pelas simulações em FEA. Entretanto, os dados provenientes da nanoindentação ainda necessitam ser refinados. Este estudo contribui para o entendimento dos mecanismos envolvidos na geração de tensões internas e auxilia no desenvolvimento de estratégias de controle térmico em peças poliméricas produzidas por FDM. A forte correlação entre os valores experimentais e os modelos numéricos reforça o potencial do FEA como ferramenta de predição e mitigação de tensões em componentes manufaturados por FDM.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Tensões Residuais. Nanoindentação. ESPI. FEA.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA) é uma das tecnologias centrais da Indústria 4.0, destacando-se pela capacidade de produzir peças com geometrias complexas, baixo desperdício de material e viabilidade econômica tanto para prototipagem quanto para produção em pequena escala (ZHOU et al., 2020). Entre as técnicas disponíveis, a Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) sobressai-se pelo seu baixo custo e adaptabilidade, especialmente na fabricação de peças poliméricas personalizadas, o que tem popularizado seu uso em aplicações domésticas, acadêmicas e industriais (RAHMAN et al., 2020).

No entanto, a natureza térmica do processo de impressão camada a camada promove a formação de tensões residuais que podem comprometer a integridade estrutural da peça, resultando em delaminação interlaminar, instabilidade dimensional e redução do desempenho mecânico (MOREIRA et al., 2022; ISSAMETOVA et al., 2024).

Os polímeros termoplásticos mais amplamente utilizados na técnica FDM são o poli(ácido láctico) (PLA) e o acrilonitrila butadieno estireno (ABS). O PLA é um polímero semicristalino, biodegradável e com boas propriedades mecânicas, mas sua baixa resistência térmica e tendência à cristalização parcial dificultam o controle dimensional, o que pode levar a problemas como *warping* (empenamento) (NETTO et al., 2023). Por outro lado, o ABS, um copolímero amorfo com alta resistência ao impacto, apresenta comportamento térmico mais uniforme, o que reduz gradientes de contração e delaminações durante a deposição (JABBARI; FAROUJI et al., 2015). Suas diferentes morfologias moleculares resultam em comportamentos distintos durante a solidificação e a formação de tensões internas. Apesar do amplo uso desses materiais, ainda existe uma lacuna na literatura quanto à avaliação quantitativa de tensões residuais sob diferentes condições de impressão, especialmente no que diz respeito à integração de técnicas experimentais e computacionais.

Este trabalho visa preencher tal lacuna analisando comparativamente a formação de tensões residuais em peças de PLA e ABS impressas por FDM em diferentes temperaturas. Para isso, são combinados métodos experimentais, Nanoindentação Instrumentada e Furo Cego com Holografia Eletrônica de Speckle (ESPI), com simulação numérica por elementos finitos (FEA), com o objetivo de compreender os efeitos viscoelásticos, anisotrópicos e térmicos característicos de cada material, bem como avaliar o impacto do pós-tratamento térmico no alívio de tensões residuais.

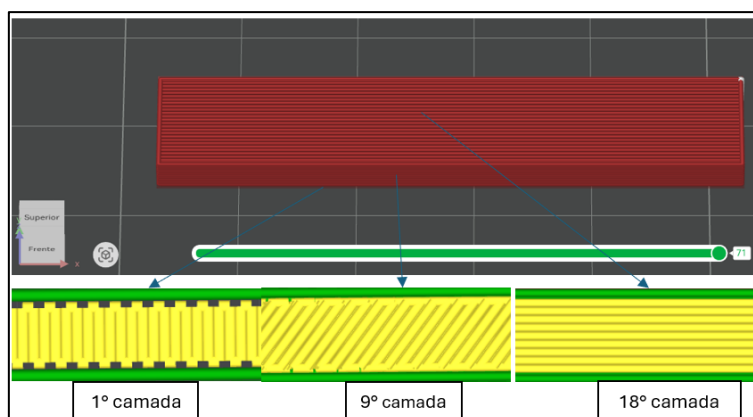
Estudos anteriores têm investigado o impacto dos parâmetros de impressão sobre deformações e propriedades mecânicas (CATTENONE et al., 2019; BUIJS et al., 2023), mas poucos integraram técnicas como nanoindentação, ESPI e FEA para estimar e comparar tensões residuais em PLA e ABS. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar comparativamente as tensões residuais formadas em ambos os materiais sob condições térmicas contrastantes de impressão, empregando métodos experimentais e modelagem numérica integrada.

2. METODOLOGIA

2.1 MATERIAIS E PROCESSO DE IMPRESSÃO

Foram utilizados filamentos poliméricos comerciais de PLA e ABS (diâmetro de 1,75 mm), ambos da empresa 3DLab. A impressão foi realizada em uma impressora FDM Creality, modelo K1 Max. As temperaturas de impressão adotadas corresponderam aos valores mínimos e máximos recomendados pelo fabricante: para o PLA, 190 °C e 220 °C; e para o ABS, 230 °C e 250 °C. Temperatura da mesa 60 °C para o PLA e 100 °C para o ABS, com velocidade de impressão de 50 mm/s e altura de camada de 0,2 mm. Os corpos de prova foram construídos com 18 camadas no eixo Z, de modo a minimizar a formação de vazios interlaminares e aumentar a anisotropia das peças impressas. A orientação das camadas foi rotacionada em 5° a cada deposição, iniciando com a primeira camada alinhada a 0° e última a 90°, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Perfil de deposição de cargas no processo FDM



Fonte: Elaborado pela autora.

Para a obtenção de amostras livres de tensões residuais, foi realizado um pós-tratamento térmico nas peças impressas. Semelhante ao processo de recozimento aplicado a metais, o pós-tratamento consistiu em aquecer o material a temperatura acima da transição vítrea (T_g), 80°C para o PLA e 103°C para o ABS, por 120 minutos, seguido de resfriamento lento em leito de areia fina, com o objetivo de reduzir deformações e aliviar tensões internas, processo conhecido como annealing. O tratamento foi conduzido em um forno de convecção do tipo mufla, com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

2.2 ANÁLISE TÉRMICA E TERMOMECÂNICA

A Análise Termogravimétrica (TGA) e a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) foram realizadas em um equipamento STA 449 F3 Jupiter (NETZSCH), localizado no Laboratório de Caracterização de Materiais do IFES – Campus Vitória. As amostras ($\sim 20 \pm 1$ mg) foram retiradas diretamente dos rolos de filamentos e acondicionadas em cadinhos de alumina. O ensaio foi conduzido em atmosfera de argônio, com fluxo de 60 mL/min no forno e 20 mL/min na linha de proteção, sob taxa de aquecimento de 10 °C/min, no intervalo de temperatura de 0 a 1000 °C.

Foram realizados dois ciclos térmicos: o primeiro teve como objetivo eliminar o histórico térmico dos polímeros, enquanto o segundo foi utilizado para determinar parâmetros característicos, como a temperatura de transição vítrea (T_g), a temperatura e entalpia de fusão (T_m e ΔH_m), a temperatura de cristalização e a estabilidade térmica, além da temperatura de decomposição. As informações obtidas nas análises térmicas foram fundamentais para subsidiar a Análise Dinâmico-Mecânica (DMA) e para o estabelecimento dos parâmetros de pós-tratamento térmico aplicados aos corpos de prova impressos.

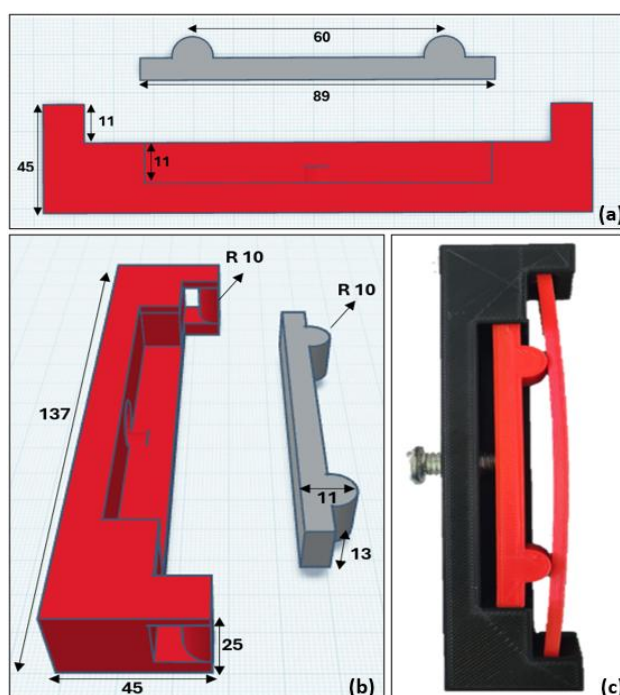
Os ensaios para Análise Dinâmico-Mecânica (DMA) foram realizados no Núcleo de Competência em Química de Petróleo (UFES), em equipamento Perkin Elmer DMA 8000, em modo de flexão para amostras de $1 \times 10 \times 50$ mm. Os parâmetros de ensaio foram: frequência de 10 Hz, atmosfera inerte de argônio, faixa de -20 °C a 250 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min. O procedimento seguiu a norma ASTM E1640-23.

2.3 TENSÕES COMBINADAS

As amostras foram avaliadas em três condições distintas, identificadas como, Impressa, Flexionada e Tratada. As amostras flexionadas foram necessárias devido à técnica de Holografia Eletrônica de Speckle (ESPI) requerer a aplicação de uma carga que gere um campo de tensões definido e controlado, obtendo assim de forma direta as tensões residuais.

Para a flexão, foi projetado um dispositivo de ensaio em quatro pontos, conforme Figura 2, desenvolvido no software Tinkercad e produzido por manufatura aditiva. O procedimento experimental seguiu as especificações da norma ASTM D6272-17, que estabelece os parâmetros para ensaios de flexão em plásticos e compósitos.

Figura 2 – Suporte projetado utilizado para ensaios pelo método do furo cego e para nanoindentação



Fonte: Elaborado pela autora.

A utilização desse suporte garante condições de deformação uniformes durante a realização dos ensaios de nanoindentação e de furo cego com ESPI, permitindo mensurar e classificar as tensões residuais em tratativas ou compressivas. Para as amostras na condição “Flexionada”, as indentações foram realizadas na superfície localizada acima da linha neutra do corpo de prova, de modo a submeter a região analisada a um estado de tração controlado. Nessa configuração, a flexão induziu tensões máximas de $12,75$ MPa para o PLA e $15,94$ MPa para o ABS.

2.4. NANOINDENTAÇÃO INSTRUMENTADA

Os ensaios de nanoindentação foram realizados no Laboratório de Ensaios Não-Destrutivos (LABENDEM – CPID), utilizando um nanoindentador Anton Paar MH3. O procedimento experimental seguiu as diretrizes da norma ISO 14577-1:2015. Foi utilizado um indentador do tipo Berkovich, com carga máxima de 10 mN e tempo de retenção da carga de 360 segundos, conforme metodologia adaptada por Giannakopoulos e Suresh (1998) e Conte e Frank (2021).

Os corpos de prova utilizados para os ensaios de Nanoindentação e Furo Cego com Holografia Speckle (ESPI) possuíam as mesmas dimensões, com 127 mm \times $6,35$ mm \times $3,6$ mm, e foram confeccionados com cinco réplicas por condição, realizando-se cinco indentações e cinco furos em cada amostra.

2.5. FURO CEGO COM HOLOGRAFIA ELETRÔNICA (ESPI)

O método do Furo Cego integrado à Holografia Eletrônica (ESPI) foi aplicado para a avaliação das tensões residuais internas. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos (LABENDEM – CPID), utilizando o

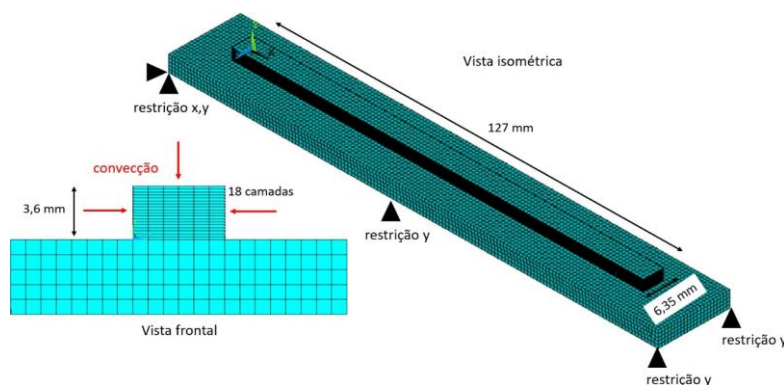
equipamento Stresstech Prism 3, em conformidade com a norma ASTM E837-25. Foram realizados furos de 0,8 mm de diâmetro e 0,4 mm de profundidade, com 20 incrementos de 20 μm cada. Com cinco réplicas, com cinco furos por amostra, abrangendo as condições com e sem tensões induzidas por flexão e material tratado.

2.6. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO FDM

A análise numérica foi realizada no software ANSYS® APDL (ANSYS, 2018), com o objetivo de simular os gradientes de temperatura gerados durante o processo de deposição, bem como as tensões residuais e os deslocamentos resultantes. O modelo considerou uma análise termomecânica sequencial, avaliando a distribuição de temperatura, as tensões internas e os deslocamentos nos corpos de prova com dimensões de $127 \times 6,35 \times 3,6$ mm. Foram modeladas 18 camadas de 0,2 mm cada, com orientação alternada de deposição ($90^\circ/0^\circ$), reproduzindo as condições do processo experimental. A malha hexaédrica adotada possuía elementos de 1 mm², e as condições de contorno incluíram restrições estruturais e convecção térmica para simular o ambiente da câmara de impressão, conforme ilustrado na Figura 3.

As condições térmicas foram definidas de acordo com os parâmetros experimentais: para o PLA, temperaturas de extrusão entre 190 e 220 °C e mesa aquecida a 50 °C; e para o ABS, temperaturas entre 220 e 240 °C, com mesa a 105 °C. O fenômeno de convecção de calor foi aplicado em todas as faces do modelo a fim de representar as perdas térmicas para o ambiente. A temperatura ambiente interna da impressora foi considerada de 35 °C para o PLA e 45 °C para o ABS.

Figura 3 – Geometria, Malha, Condições de contorno (térmico e estrutural)



Fonte: Elaborado pela autora.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE IMPRESSÃO E PÓS-TRATAMENTO

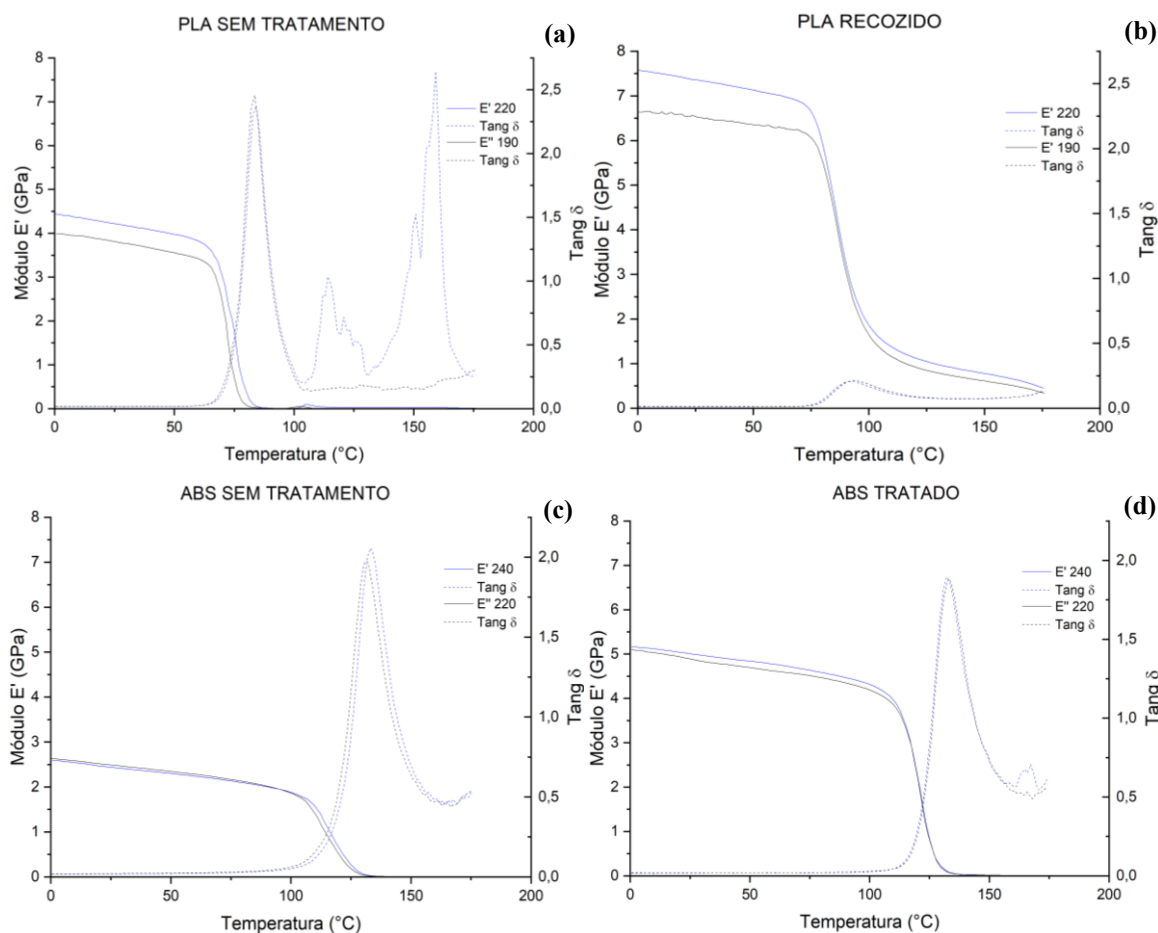
Para a obtenção de boa imprimibilidade com materiais poliméricos como PLA e ABS, é essencial que o processo seja conduzido dentro dos limites mínimo e máximo de temperatura recomendados. Esses limites estão relacionados às mudanças de fase necessárias ao processo FDM, evitando-se a degradação térmica do polímero causada pela quebra das ligações químicas das cadeias poliméricas em temperaturas elevadas.

Na Figura 4(a), que apresenta os resultados obtidos por Análise Dinâmico-Mecânica (DMA), observa-se que, em temperaturas próximas a 25 °C, o módulo de armazenamento (E') aumentou de 3,81 GPa para 4,21 GPa quando a temperatura de impressão do PLA passou de 190 °C para 220 °C. Esse incremento pode ser atribuído à melhor adesão entre camadas e/ou ao aumento da cristalinidade da estrutura, resultante de temperaturas de extrusão mais elevadas.

A presença de um pico na curva de $\tan \delta$ indica a ocorrência de relaxações ou transições moleculares no material. Em ambas as condições de impressão, a transição ocorre de forma semelhante; contudo, para 220 °C, o pico endotérmico associado à fusão é ligeiramente mais intenso, sugerindo que o aumento da temperatura de impressão eleva, ainda que sutilmente, a energia necessária para promover a mobilidade das cadeias poliméricas. Consequentemente, temperaturas de impressão mais altas tendem a conferir maior rigidez ao objeto impresso.

A curva de $\tan \delta$ apresenta picos principais em temperaturas próximas, com comportamento semelhante para ambas as amostras, havendo um pequeno deslocamento do pico de 83,56 °C para 84,15 °C. Além disso, são observados picos secundários nas amostras impressas em temperaturas mais baixas, possivelmente associados ao fato de que a temperatura de impressão, próxima à temperatura de transição de pico ($\approx 181,9$ °C), não teria sido suficiente para completar a transição molecular. Essa limitação pode gerar instabilidade térmica em temperaturas superiores a 100 °C, devido à mobilidade residual de cadeias parcialmente cristalizadas.

Figura 4 – Resultados Análise Dinâmica Mecânica (DMA) para o PLA e ABS



Fonte: Elaborado pela autora.

Verifica-se que a temperatura de impressão exerce um impacto mais significativo no módulo de elasticidade (E') do PLA, influenciando diretamente sua cristalinidade, rigidez e fluência. Para o ABS, conforme Figura 4 (c), os efeitos são mais sutis em função da temperatura de impressão, uma vez que sua estrutura amorfa confere maior tolerância térmica e menor dependência do processo de fusão.

Os efeitos dos tratamentos de pós-processamento sobre as propriedades mecânicas de ambos os materiais são relevantes, promovendo melhorias consideráveis em seu desempenho para diversas aplicações. Para o PLA, que apresenta estrutura semicristalina, o recozimento tende a modificar o comportamento mecânico durante a indentação devido às mudanças estruturais associadas à cristalização. Essas alterações induzem um pequeno, porém consistente, aumento na resistência mecânica, na resistência à fratura, na resistência ao impacto, no módulo de elasticidade e na dureza do material, embora também reduzam sua plasticidade. O pós-tratamento conferiu ao PLA um incremento de aproximadamente 60% no módulo E' , evidenciando a eficácia do processo, conforme pode ser observado na Figura 4 (b).

No caso do ABS, Figura 4 (d), a temperatura de impressão não apresentou influência significativa sobre os resultados após o pós-tratamento. Embora o ABS, por ser amorfo, não sofra cristalização durante o recozimento, observou-se um incremento de aproximadamente 49% no módulo de perdas (E''). Esse ganho pode estar relacionado à relaxação de tensões internas e a um possível rearranjo das cadeias moleculares na vizinhança da temperatura de transição vítrea (T_g).

Tais alterações são confirmadas pelos resultados obtidos por nanoindentação, que demonstram a influência direta da temperatura de impressão e do recozimento nas propriedades mecânicas e estruturais dos materiais estudados.

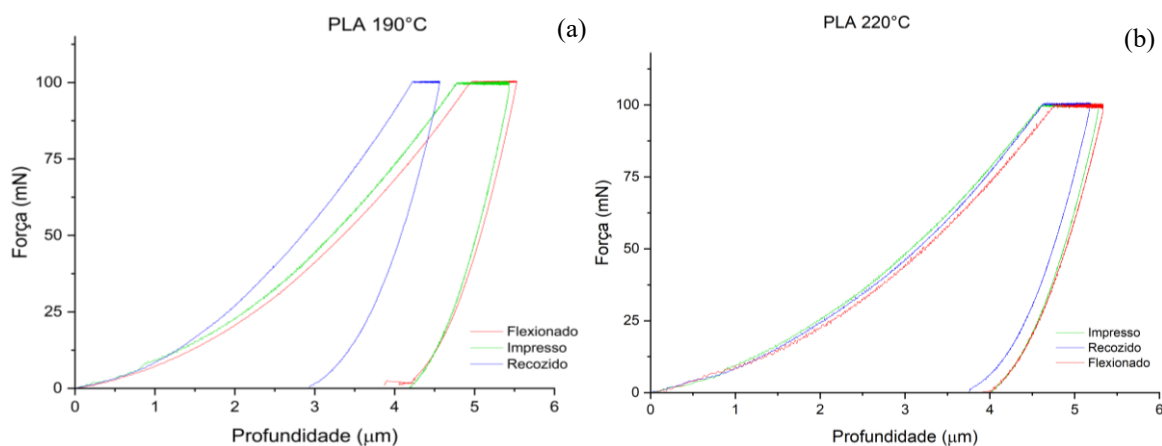
Os tratamentos de pós-processamento exercem efeitos significativos sobre as propriedades mecânicas dos materiais ABS e PLA, resultando em melhoria do desempenho em diversas aplicações. O pós-tratamento térmico promove modificações estruturais importantes: no PLA, favorece o aumento da cristalinidade, reduzindo as restrições impostas à fase amorfa pelos domínios cristalinos; já no ABS, atua principalmente no relaxamento viscoelástico das cadeias poliméricas, aliviando tensões internas e aprimorando o comportamento mecânico do material.

3.2 AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS PRESENTES

Um fator relevante para a determinação das tensões residuais por meio de indutores pontiagudos é a obtenção precisa da área de contato entre o penetrador e a amostra durante o ensaio. Na literatura, ainda não há uma técnica direta e plenamente confiável para quantificar tensões residuais utilizando esse tipo de indutor. Assim, é necessárias as informações obtidas durante o carregamento e descarregamento para estimar indiretamente as tensões residuais presentes no material. Segundo Giannakopoulos e Suresh (1998), o deslocamento das curvas $P \times h$ (força versus profundidade) para a direita ou esquerda, quando comparadas a materiais livres de tensão, é um indicativo da presença de tensões residuais tratativas ou compressivas, respectivamente.

Na Figura 5 (a) e (b), observa-se que o tratamento térmico promoveu o deslocamento da curva azul para a esquerda em aproximadamente 13%, em relação ao material impresso (curva verde), o que indica o alívio das tensões residuais tratativas do PLA como impresso. Tal comportamento, pode ser atribuído à interação entre as regiões cristalinas e amorfas da matriz polimérica. Além disso, o pós-tratamento conferiu maior elasticidade ao PLA, evidenciada pelo aumento da recuperação elástica após a indentação, que passou de 25% (sem tratamento) para 36% e 39% para as amostras de PLA recozido impressas a 190 °C e 220 °C, respectivamente. O recozimento aumentou a cristalinidade do material, restringindo a mobilidade das cadeias poliméricas, em contrapartida, regiões amorfas permitiriam maior flexibilidade.

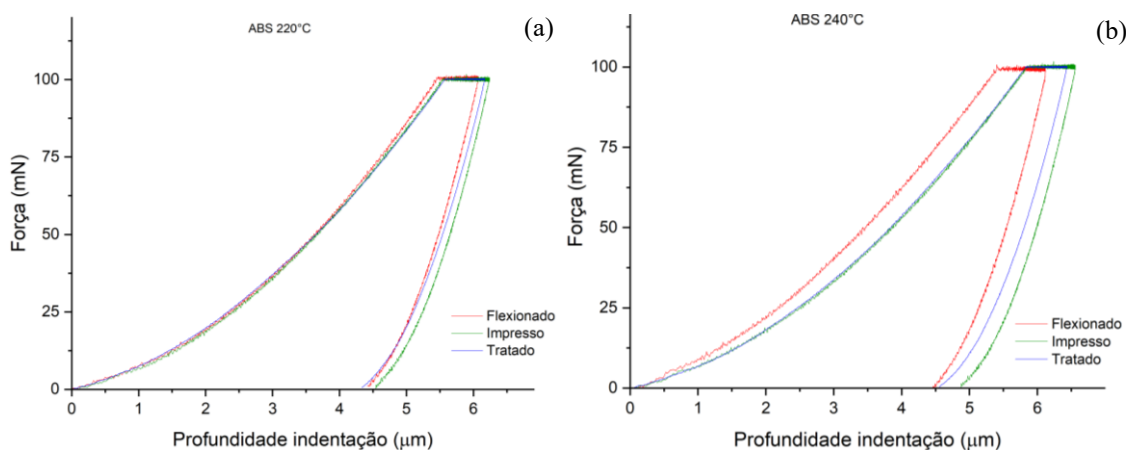
Figura 5 – Comportamento do PLA com tensões induzidas, livre de tensões residuais e como impresso



Fonte: Elaborado pela autora.

Para o PLA, a aplicação de flexão induz uma força tratativa na superfície, o que reduz a resistência do material à indentação, especialmente durante a etapa de carregamento, resultando em maiores profundidades máximas. Esse comportamento é um indicativo da presença de tensões residuais tratativas geradas pelo processo FDM, e é também característico de sua estrutura semicristalina, na qual o percentual cristalino restringe a mobilidade das cadeias poliméricas. As tensões residuais compressivas tendem a aumentar a dureza do material, resultando em menores profundidades de indentação para uma mesma deformação plástica total. Já as tensões residuais tratativas reduzem a dureza, exigindo maiores profundidades de indentação para atingir níveis equivalentes de deformação.

Figura 6 – Comportamento do ABS com tensões induzidas, livre de tensões residuais e como impresso.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para o ABS, as solicitações externas com efeito trativo na superfície foram rapidamente relaxadas devido à presença de tensões residuais compressivas, o que gerou maior resistência à deformação e deslocou a curva de carga-deslocamento para a esquerda, conforme ilustrado na Figura 6(a) e (b). Esse comportamento de tensão compressiva atua na mesma direção da carga de indentação, dificultando o avanço do penetrador e, conseqüentemente, o processo de deformação, nas quais se observa o aumento da resistência superficial do material e a redução da profundidade de indentação em relação ao estado sem tratamento.

No ABS, que possui estrutura amorfa, o pós-tratamento térmico atua de forma distinta, uma vez que esse material não apresenta cristalização. Entretanto, a exposição a temperaturas acima de 91,3 °C promove um relaxamento viscoelástico das cadeias poliméricas, permitindo o alívio das tensões internas sem provocar alterações químicas significativas. Esse processo resulta na redução das tensões trativas residuais geradas durante a impressão e confere ao material uma leve melhora na resistência à deformação.

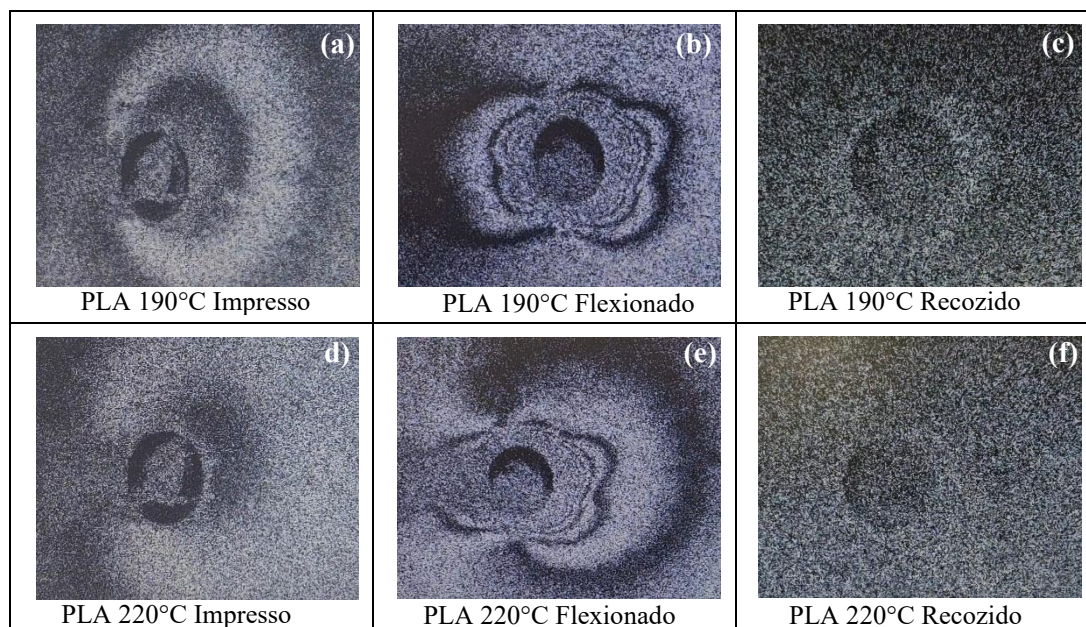
Conforme mostrado na Figura 6(b), observa-se um incremento discreto, de aproximadamente 2%, na resistência à deformação do material tratado, em ambas as condições de estudo. Não foram verificados ganhos expressivos na recuperação elástica, que passou de 27% para 29,5% após o tratamento térmico.

Os resultados obtidos por meio da avaliação experimental das tensões residuais utilizando o método do Furo Cego e (ESPI) confirmam os dados quantitativos obtidos nas demais análises. Essa metodologia permite avaliar as perturbações superficiais geradas ao redor do furo a partir de imagens interferométricas, fornecendo informações precisas sobre os campos de deformação associados ao alívio das tensões internas.

A análise foi conduzida nas três condições experimentais, impresso, flexionado e tratado. A Figura 7 (a, b e c) apresenta as imagens dos campos de deformação em amostras de PLA, nas duas temperaturas de impressão avaliadas. Observa-se a presença de padrões mais intensos de deslocamento nas amostras impressas e flexionadas a 190 °C, conforme Figura 7 (a) e (b), indicando maiores deslocamentos ao redor do furo, consequência direta de níveis mais elevados de tensões residuais. Em contrapartida, as amostras impressas a 220 °C, conforme Figura 7 (d) e (e) exibem campos de deformação menos pronunciados, sugerindo alívio parcial das tensões devido à melhor coesão entre camadas e maior homogeneidade térmica durante o processo de impressão.

Em todas as condições analisadas, os deslocamentos observados estão associados a maiores concentrações de tensões trativas superficiais. Em contrapartida, as amostras recozidas apresentaram campos praticamente neutros: tanto as amostras tratadas a 190 °C quanto a 220 °C exibiram padrões difusos, com quase nenhuma franja de interferência, evidenciando que os deslocamentos radiais foram praticamente inexistentes. Tal comportamento confirma que as tensões residuais foram eficientemente aliviadas após o tratamento térmico.

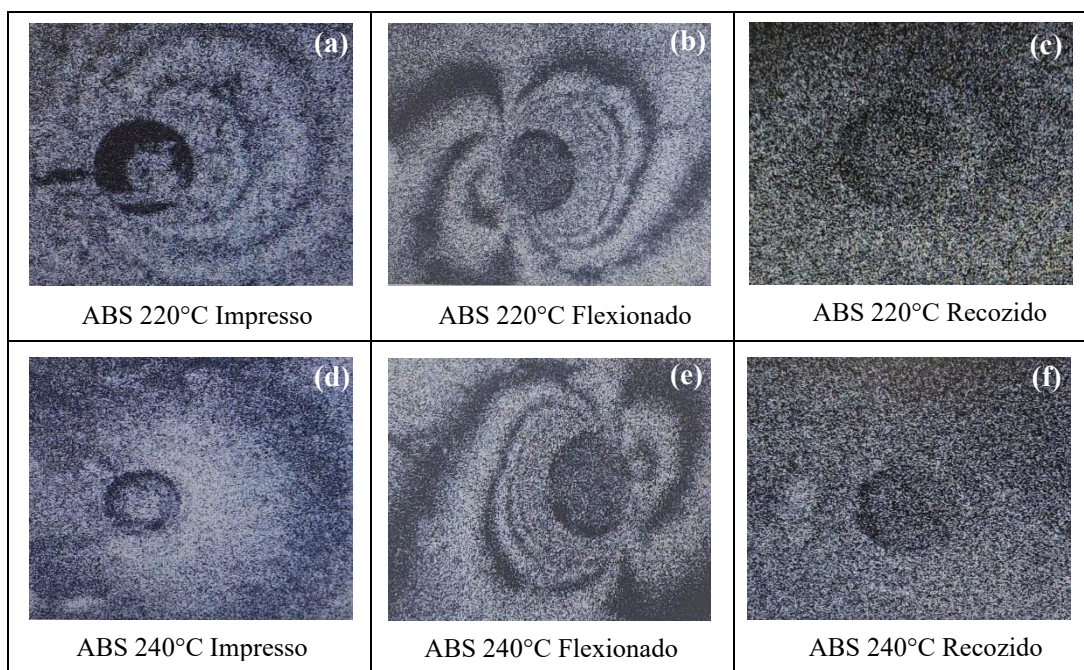
Figura 7 – Campo de deslocamentos medido na profundidade 0,04 mm no PLA impresso a 190° C e 220°C



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 8 apresenta os perfis de tensão residual na superfície do ABS, obtidos a partir do padrão de franjas de interferência gerado pelo alívio de tensões ocasionado pela perfuração.

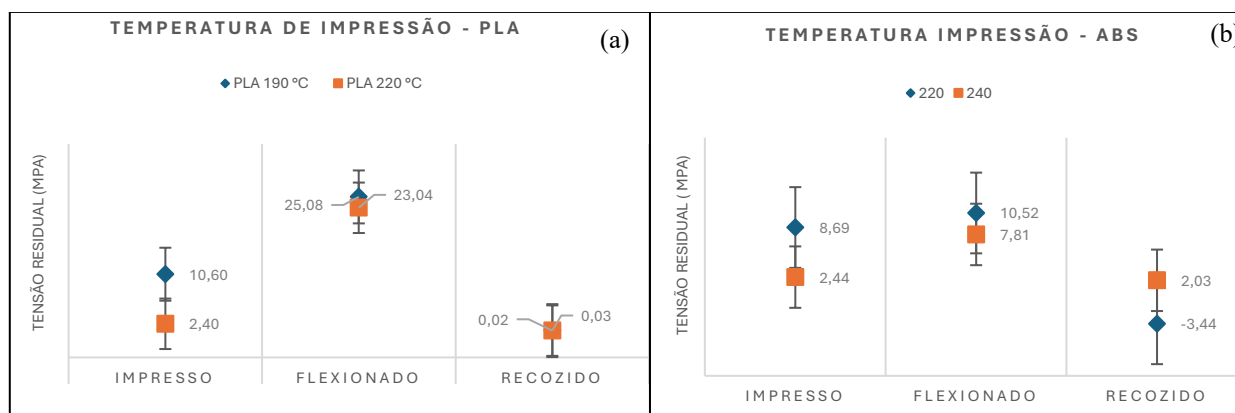
Figura 8 – Campo de deslocamentos na profundidade 0,04 mm no ABS impresso a 220° C e 240° C



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 8, (a), (b), (d) e (e) observa-se campos de deslocamento, com formação de franjas, indicativas de tensões internas presentes, principalmente no material flexionado, como esperado, aqui o resultado difere do visualizado na nanoindentação, onde o material flexionado teve a curva deslocada para esquerda, indicando a presença de tensões compressivas. Observa-se que com o aumento da temperatura de impressão, Figura 8 (d) o campo é menos intenso, indicando que temperaturas maiores de impressão geram menos tensões internas de origem térmica ao material. Na Figura 8 (c) e (f), pode observar que as amostras recozidas mostram franjas muito suaves ou praticamente ausentes, em ambas as temperaturas, isso demonstra que, mesmo sendo amorfo, o ABS teve suas tensões aliviadas de forma efetiva devido ao relaxamento viscoelástico das cadeias, como não há cristalização envolvida, o alívio decorre apenas da mobilidade térmica das cadeias poliméricas, permitindo reorientação interna e dissipação das tensões. De acordo com o estudo desenvolvido por Casavola et al. (2016), ao serem aquecidos acima da T_g, polímeros amorfos adquirem maior mobilidade segmentar, permitindo a reorganização parcial das cadeias moleculares e, conseqüentemente, o alívio das tensões internas, mesmo sem a ocorrência de cristalização.

Figura 9 – Influência da temperatura de impressão na geração de tensões residuais para o PLA e ABS



Fonte: Elaborado pela autora.

As tensões apresentadas na Figura 9 (a) e (b), correspondem às obtidas no início da perfuração, a uma profundidade de 0,04 mm, referente ao segundo incremento de perfuração. O primeiro incremento foi desconsiderado, uma vez que pode apresentar instabilidades de medição associadas ao início do processo de remoção de material, não refletindo de forma confiável o estado real de tensão residual na superfície.

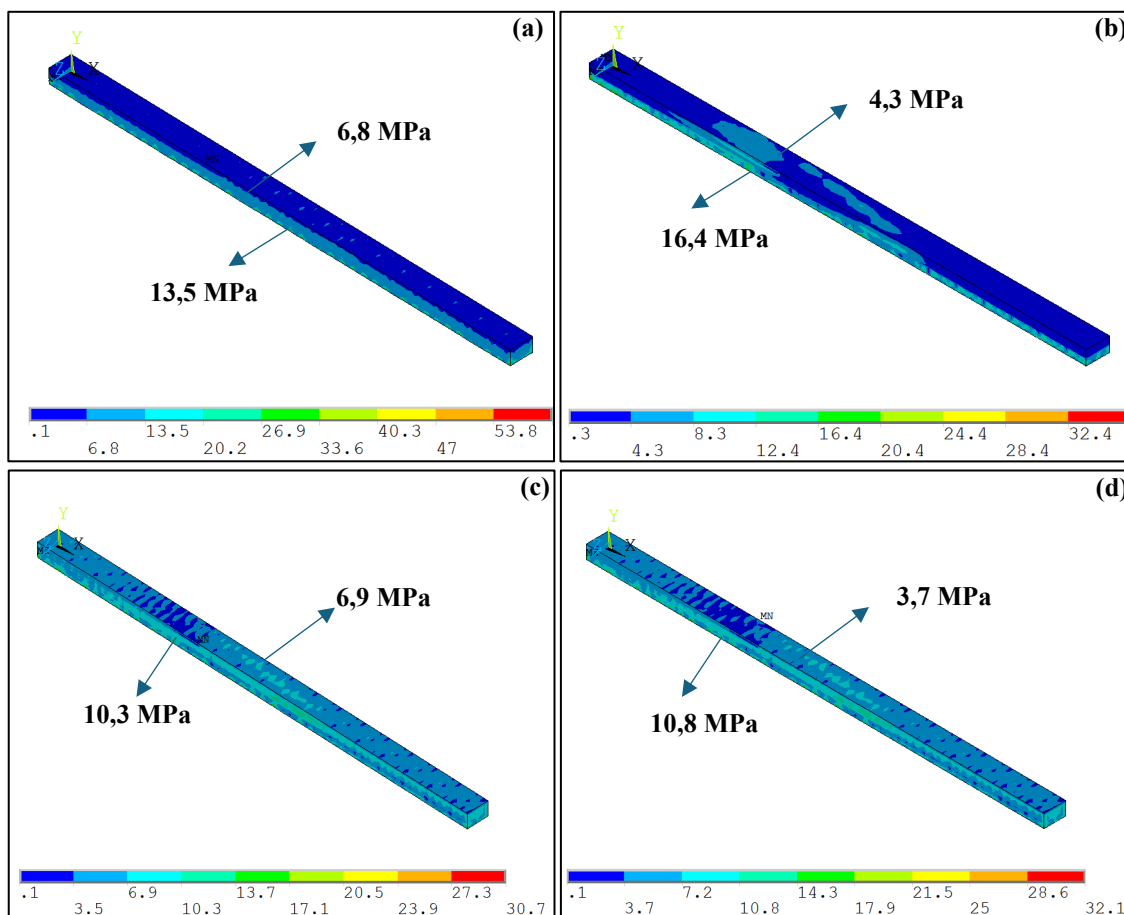
Ao comparar os resultados obtidos para o ABS e o PLA, observa-se uma diferença significativa nas respostas térmica e estrutural desses materiais. O PLA, por ser semicristalino, apresenta tensões residuais mais elevadas no estado “como impresso” e maior sensibilidade tanto à temperatura de impressão quanto ao recozimento. As curvas de tensão residual do PLA exibiram picos mais acentuados e variações mais intensas com a profundidade, indicando que o pós-tratamento térmico promove um alívio parcial das tensões, possivelmente associado à cristalização induzida.

No caso do ABS, a ausência de cristalinidade impede a formação de estruturas cristalinas durante o aquecimento, mas o material ainda demonstra eficiência na redução das tensões internas devido ao relaxamento viscoelástico das cadeias poliméricas. Enquanto o PLA tende a reduzir sua ductilidade em função do aumento da cristalinidade, o ABS mantém propriedades mecânicas mais estáveis após o recozimento, indicando que ambos os materiais se beneficiam dos tratamentos térmicos, porém por mecanismos distintos: a cristalização induzida no PLA e a reorganização molecular no ABS.

Observa-se na Figura 10, o perfil das tensões geradas a partir da simulação do processo de manufatura aditiva em material como impresso. O mapa de tensões equivalentes de Von Mises apresenta os valores distribuídos sobre a superfície do objeto, permitindo identificar as regiões de maior concentração de esforços.

Verifica-se que as maiores tensões estão associadas à interface entre o objeto e a mesa de impressão, especialmente nas amostras impressas em temperaturas máximas, Figura 10 (b) e (d). Nessas condições, as tensões são mais expressivas devido ao fato de que, durante a adesão inicial das camadas à mesa, ocorre uma restrição à contração térmica, o que gera tensões residuais elevadas na base do componente. Por outro lado, observa-se que nas camadas superiores as tensões residuais são menores, comportamento que pode ser explicado pela redução do gradiente térmico nas regiões finais do processo de deposição, onde o equilíbrio térmico entre as camadas já formadas é mais estável. Verifica-se que temperatura de impressão menores geram tensões residuais menores na interface mesa/material, porém, ligeiramente maiores na superfície, como pode ser observado na Figura 10 (a) e (c).

Figura 10 – Simulação das tensões residuais. (a) PLA impresso a 190°C; (b) PLA impresso a 220°C, (c) ABS impresso a 220°C e (d) ABS impresso a 240°C



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao comparar os resultados obtidos na avaliação das tensões residuais pelos diferentes métodos, o método indireto proposto por Suresh e Giannakopoulos (1998) e o método direto do Furo Cego com ESPI, observa-se uma discrepância

entre os valores comparativos. Essa diferença pode ser atribuída ao fato de que a metodologia indireta proposta por Suresh e Giannakopoulos baseia-se em parâmetros sensíveis, como a área real de contato e o módulo reduzido (E^*), cuja determinação prática, em escala nanométrica, ainda apresenta limitações experimentais e demanda aprimoramentos para obtenção de resultados mais reprodutíveis.

Na Tabela 1, apresenta-se o comparativo entre os valores obtidos pelas três técnicas empregadas: Furo Cego com ESPI (método direto), simulação numérica por elementos finitos (FEA) e método indireto de Suresh e Giannakopoulos. Observa-se que os resultados provenientes do método do Furo Cego e da simulação FEA são bastante compatíveis, validando ambos como ferramentas adequadas para a estimativa das tensões residuais. Entretanto, nota-se divergência significativa em relação aos valores obtidos pelo método indireto de Suresh e Giannakopoulos.

Essa diferença ocorre porque o modelo de Suresh e Giannakopoulos é mais apropriado para materiais com elevada rigidez de contato, nos quais fenômenos locais de deformação plástica e variações na área de contato entre o indentedor e a amostra exercem influência reduzida. Em materiais poliméricos, especialmente na escala nanométrica, esses efeitos podem interferir de forma expressiva na determinação da área de contato efetiva, comprometendo a precisão na estimativa das tensões residuais.

Tabela 1 – Comparativo das tensões internas obtidas pelos métodos propostos

MATERIAL	TEMPERATURA °C	Suresh Giannakopoulos	Furo Cego c/ ESPI	Simulação FEA
		σ_{res} (MPa)	σ_{res} (MPa)	σ_{res} (MPa)
PLA	190	28,28	10,6	6,8
	220	29,38	2,4	4,3
ABS	220	7,22	8,69	6,9
	240	11,63	4,01	3,7

Fonte: Elaborado pela autora.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que o processo de manufatura aditiva por modelagem por fusão e deposição (FDM), gera tensões residuais significativas que influenciam diretamente o comportamento mecânico e térmico de materiais poliméricos como PLA e ABS. A combinação de técnicas experimentais, Nanoindentação Instrumentada, método do furo cego associada a Holografia Eletrônica de Speckle (ESPI) e simulação numérica por elementos finitos (FEA), permitiu avaliar de forma integrada os efeitos térmicos, viscoelásticos e estruturais envolvidos na geração e no alívio dessas tensões.

O PLA, devido à sua natureza semicristalina, apresentou tensões residuais mais elevadas e maior sensibilidade à temperatura de impressão. O aumento da temperatura de processamento contribui para melhor adesão entre camadas e maior rigidez estrutural, mas também acentua os gradientes térmicos internos. O recozimento se mostrou eficaz no alívio parcial das tensões, promovendo aumento da cristalinidade, elevação do módulo de elasticidade (E') e melhoria na recuperação elástica, embora com redução moderada da ductilidade.

O ABS, por sua vez, exibiu comportamento distinto. Por ser amórfico, o material não apresentou mudanças cristalinas durante o pós-tratamento, mas o relaxamento viscoelástico das cadeias acima da temperatura de transição vítrea ($T_g \approx 91$ °C) resultou em redução expressiva das tensões residuais, alcançando valores próximos de zero em toda a profundidade avaliada. As análises confirmaram que o recozimento promove reorganização molecular e alívio de tensões internas sem alterar a integridade química do material, mantendo estáveis suas propriedades mecânicas.

As simulações FEA reproduziram com fidelidade os perfis experimentais, indicando maiores concentrações de tensão na interface com a mesa de impressão e menores tensões nas camadas superiores, corroborando as observações feitas por ESPI. A boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais valida o uso da modelagem computacional como ferramenta preditiva eficaz para a análise e mitigação de tensões em peças fabricadas por FDM.

O método do furo cego com ESPI mostrou-se o mais consistente e confiável na determinação direta de tensões residuais, enquanto a metodologia indireta de Suresh e Giannakopoulos, baseada em nanoindentação, apresentou discrepâncias atribuídas à dificuldade de determinar com precisão a área real de contato em escala nanométrica. Assim, para materiais poliméricos, recomenda-se a utilização de técnicas híbridas que combinem avaliações diretas como (ESPI) e modelagem numérica (FEA) para resultados mais robustos.

5. REFERÊNCIAS

BUIJS, J. JESSE; FIX, RAOUL; VAN DER KOOIJ, HANNE M.; KODGER, THOMAS E. Real-time imaging of bonding in 3D-printed layers. **Journal of Visualized Experiments**, v. 199, e65415, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3791/65415>.

CASAVOLA, C.; CUDENNEC, Y.; LUCIANO, G.; MORANO, M. Residual stress measurement in polymer parts produced by fused deposition modeling. *Procedia CIRP*, v. 45, p. 299–302, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.01.003>

CATTENONE, ALBERTO et al. Finite element analysis of additive manufacturing based on fused deposition modeling: distortion prediction and comparison with experimental data. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 141, n. 1, p. 011010, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4041626>.

CONTE, M. & FRANK, E. (2021). Indentation Testing. Corcelles: Anton Paar Tritec SA. Publisher: **Anton Paar TriTec SA**. ISBN: 978-2-9701543-0-3

GIANNAKOPOULOS, A.E., SURESH, S. “Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation,” *Scr. Mater*, vol. 40, no. 10, pp. 1191-1198, 1999.

ISSAMETOVA, MADINA et al. Determination of residual stresses in 3D-printed polymer parts. *Polymers*, v. 16, n. 14, p. 2067, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16142067>.

JABBARI-FAROUJI, S. et al. Plastic deformation mechanisms of semicrystalline and amorphous polymers. *ACS Macro Letters*, v. 4, n. 2, p. 147–150, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1021/mz500754b>.

MOREIRA, R. S.; GOMES, R. L. F.; SILVA, W. L. Geração de tensões residuais em protótipos impressos por FDM. *Revista Polímeros*, v. 32, n. 1, e2022008, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20220008>.

NETTO, J. M. J.; URUEÑA, G. D.; LUCAS, A. de A.; SILVEIRA, Z. de C. Caracterização de filamentos de PLA usados em impressão 3D por extrusão. *Revista Plástico Industrial*, abr. 2023. Disponível em: https://www.arandanet.com.br/revista/pi/artigo_tecnico/270-Characterizacao-de-filamentos-de-PLA-usados-em-impressao-3D-por-extrusao.html. Acesso em: 1 jul. 2025.

RAHMAN, MUHAMMAD MONIRUZZAMAN et al. A study of interlayer adhesion in FDM 3D printed parts via fracture mechanics. *Additive Manufacturing*, v. 34, p. 101385, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101385>.

ZHOU, Xing et al. Additive manufacturing of CNTs/PLA composites and the correlation between microstructure and functional properties. *Journal of Materials Science & Technology*, v. 60, p. 27–34, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.038>.

6. AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos aos responsáveis pelos Laboratório de Caracterização de Materiais do IFES – Campus Vitória e professores e técnicos do Núcleo de Competência em Química de Petróleo (UFES), aos responsáveis pelo Laboratório de Ensaio Não-Destrutivo (LABENDEM – CPID) e ao LabTecMec-UFES por patrocinar o evento.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.