

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO EM MANUFATURA ADITIVA SLM-PBF NAS TENSÕES RESIDUAIS E DISTORÇÕES TÉRMICAS EM PEÇAS IMPRESSAS DE LIGA DE TITÂNIO Ti6Al4V

André Solano Ferreira R. Maiolini ¹; Marcelo Otávio Dos Santos ²

¹Aluno de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

²Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo. *A manufatura aditiva tem se popularizado nos últimos anos devido a sua integração com a Indústria 4.0, assim como por viabilizar a produção de geometrias complexas e otimizadas. Porém, o processo leva a desvantagens como: as distorções térmicas e a geração de tensões residuais devido aos gradientes térmicos ao longo da produção das peças. Com base nessas características indesejáveis, o atual projeto visa modelar numericamente através do Método dos Elementos Finitos (MEF), assim como obter resultados experimentais, que relacionem o impacto dos diferentes parâmetros do processo na distribuição das tensões residuais e das distorções em peças geradas por Fusão Seletiva a Laser (SLM) de liga de titânio Ti6Al4V. Os ensaios experimentais, assim como as análises numéricas, obedeceram a um planejamento fatorial. Os resultados obtidos para as distorções térmicas se mostram excelentes com diferenças entre as peças fabricadas e simuladas inferiores a 4,5%. Já para os resultados de tensões residuais medidas em único ponto medido na face lateral para a maioria dos resultados a diferença foi inferior a 1%, porém, houve grande dispersão dos resultados.*

Palavras-chaves: *Manufatura aditiva SLM. Liga de Titânio Ti6Al4V. Simulação computacional. Distorções térmicas. Tensões residuais.*

1. Introdução

A indústria 4.0 é fruto da demanda do século XXI por inovação em direção à revolução nos produtos e nas cadeias produtivas. Sendo um conceito que vem se tornando amplamente difundido por entre a sociedade e evidenciado pelas transformações que os processos de manufatura têm sofrido. De acordo com (DILBEROGLU, 2017), esse novo formato de indústria integra sistemas físicos e digitais, dando origem às fábricas inteligentes. Dentre os conceitos que tangem o componente físico, tem-se como peça fundamental a manufatura – que, por outro lado, atua como agente limitante à capacidade dessas fábricas. Portanto, este cenário torna o desenvolvimento de novos métodos de manufatura não tradicionais um fator vital, entre eles, pode-se destacar a manufatura aditiva (MA), extensamente conhecida por “impressão 3D”.

Segundo (CHRYSSOLOURIS, 2009), essa tecnologia de manufatura tem potencial para suprir a demanda atual por flexibilidade das indústrias - sendo capaz de imprimir produtos customizados e com geometrias complexas de difícil manufatura através de técnicas convencionais. Ainda permitindo a integração com os sistemas digitais - usando de softwares CAD (Computer-Aided Design), CAE (Computer-Aided Engineering) e CAM (Computer-Aided-Manufacturing).

É fato que materiais metálicos são amplamente utilizados em diversos âmbitos da engenharia. Com isso há o surgimento também da tecnologia de MA por fusão de leito de pó metálico FLPM (MPBF - Metal Powder Bed Fusion), (VOLPATO, 2017). Dentre esses

materiais metálicos tem-se a liga de titânio Ti6Al4V – que será o material em foco nesta pesquisa.

Apesar de trabalhos anteriores indicarem a importância do entendimento da geração de tensão residual e distorções nos processos de Fusão Seletiva a Laser (SLM), os mecanismos subjacentes para a geração de tensão residual permanecem pouco compreendidos. A fim de melhor determinar os fatores que influenciam o acúmulo de tensão residual – assim como a prevenção de distorções, delaminações e fraturas (KUSHAN et al 2018), busca-se uma combinação de parâmetros para uma janela de processo ideal (que atenda aos requerimentos de desempenho do produto). Visto isso, os modelos termomecânicos para simulação por elementos finitos (MEF) de SLM são potencialmente valiosos, embora sejam um desafio devido à complexidade da física envolvida no processo (PARRY et al 2016).

Um problema significativo associado a componentes SLM é o desenvolvimento de alta tensão residual interna (CASAVOLA et al 2008). Os repetidos ciclos de aquecimento e resfriamento de camadas sucessivas da matéria-prima em pó durante o processo de construção SLM são responsáveis pelas altas taxas de resfriamento e pelos elevados gradientes de temperatura associados ao processo. Essas altas taxas de resfriamento e gradientes de temperatura resultam em acúmulo de tensão residual nos componentes SLM. As peças podem falhar durante a construção SLM ou mais tarde em serviço, devido a essas altas tensões residuais internas (ELAMBASSERIL et al 2012).

De maneira que, o presente trabalho visa entender a forma como alguns parâmetros do processo como potência do laser, velocidade de varredura e *hatch* afetam a geração de tensões residuais e distorções na peça impressa – tanto numericamente (através do software comercial *Simufact Additive 2020 FPI* da *MSC Softwares*) quanto experimentalmente. Usando-se de um planejamento fatorial, para seleção da variação dos parâmetros, e análises de variância para relacionar os resultados obtidos (de tensão residual e distorção) com as variáveis selecionadas.

2. Materiais e Métodos

2.1 Equipamentos

A fabricação das amostras de liga de titânio Ti6Al4V via técnica de manufatura aditiva por fusão seletiva a laser será realizada em um equipamento SLM OmniSint-160, módulo laser de fibra de itérbio, fonte Rycus 500 W de potência nominal, da empresa brasileira OMNITEK (Figura 1).

Figura 1 - Máquina de manufatura aditiva OmniSint-160



Fonte: próprios autores

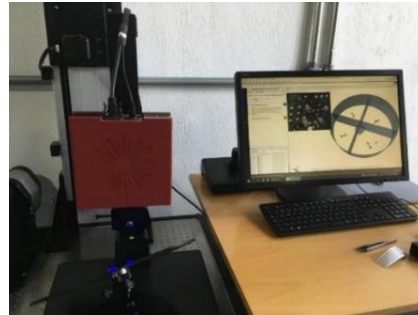
As medições de tensões residuais das peças de titânio serão realizadas através do equipamento de difração de Raio-x marca RIGAKU, modelo Ultima IV (Figura 2a) localizado no IPEN. Para a medição das distorções térmicas será utilizado o equipamento de medição

óptica ATOS Core 80 – CP40/MV100, com resolução de 5 Megapixels. O tratamento dos dados é feito no software GOM Inspect 2021 – em parceria firmada com a empresa Vtech (Figura 2b).

Figura 2 – (a) Difratômetro marca RIGAKU, modelo Ultima IV, (b) Medidor óptico ATOS Core 80.



(a)



(b)

Fonte: próprios autores

2.2 Metodologia experimental

Com o objetivo de avaliar o impacto da variação dos parâmetros de processo da manufatura SLM como a distância dentre feixes (*hatch*), velocidade de varredura e potência do laser no surgimento de tensões residuais e distorções térmicas, serão fabricadas 16 corpos de prova cilíndricos com 11,3 mm de diâmetro e 10 mm de altura, segundo um planejamento fatorial com os seguintes fatores variáveis:

- Potência (100 W – 200 W)
- Velocidade (500 mm/s – 1500 mm/s)
- *Hatch* (50 μm – 90 μm)

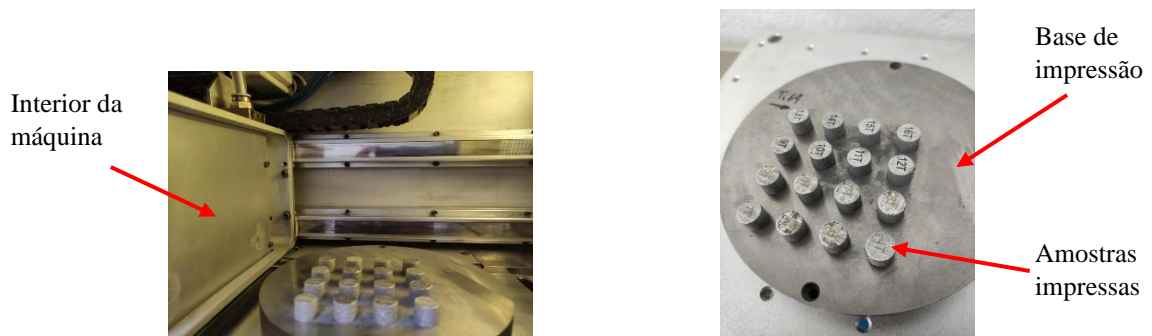
A Tabela 1 apresenta a ordem dos ensaios e os parâmetros considerados para cada peça fabricada pela manufatura SLM.

Tabela 1 - Parâmetros de manufatura durante a etapa experimental

Ordem Ensaio	Potência	Velocidade	Hatch
	W	mm/s	μm
1	150	1000	50
2	150	1000	90
3	100	1000	70
4	150	500	70
5	200	1000	70
6	150	1500	70
7	200	1500	90
8	150	1000	70
9	200	500	50
10	100	1500	50
11	150	1000	70
12	200	1500	50
13	100	1500	90
14	100	500	90
15	200	500	90
16	100	500	50

A Figura 3 mostra as 16 amostras de titânio Ti6Al4V impressas na base de impressão.

Figura 3 - Amostras de titânio Ti6Al4V impressas



Fonte: próprios autores

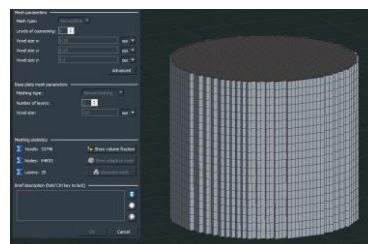
As peças foram cortadas da base de impressão através de eletroerosão a fio, que minimiza bastante a possibilidade de geração de tensões residuais durante o corte.

2.3 Metodologia computacional

A análise numérica foi feita através do software *Simufact Additive 2020 FPI* da *MSC Softwares*, que se utiliza de modelos CAD para aplicação das mesmas condições da manufatura, definindo uma simulação termomecânica. Tais configurações são estabelecidas diretamente através da interface gráfica de usuário e do processo de calibração do software. Este processo de calibração consiste em uma etapa preliminar - marcada pela definição do fator de expansão volumétrica (VEF - *volume expansion factor*).

O VEF é responsável por corrigir os efeitos de dilatação e contração térmicas - uma vez que o elemento gerado, através da discretização do domínio em *voxels* (elementos finitos hexaédricos - Figura 4), será constituído de mais de uma camada de material. Para seleção deste fator, é geralmente usada uma geometria pré-selecionada pelo aplicativo, o *cantiliever* (o qual facilitará a caracterização do estado de deformações). No entanto, como tais especificações já viriam a ser fornecidas pelo estudo experimental, foi realizada uma análise de convergência do fator para uma amostra arbitrária, através da relação com os dados obtidos numericamente e experimentalmente – visando a aproximação das distorções térmicas, de forma que, havendo uma equivalência nos deslocamentos pode-se afirmar que a deformação térmica foi capturada da maneira correta pelo software e desta forma, as tensões residuais podem ser calculadas, uma vez que são decorrentes das deformações causadas pelo gradiente de temperatura.

Figura 4 - Discretização do domínio contínuo da geometria



Fonte: próprios autores.

Ao definir o processo de fusão de leito de pó metálico, foram também definidos os estágios do processo, sendo eles: construção da peça e a separação da base. A separação da base

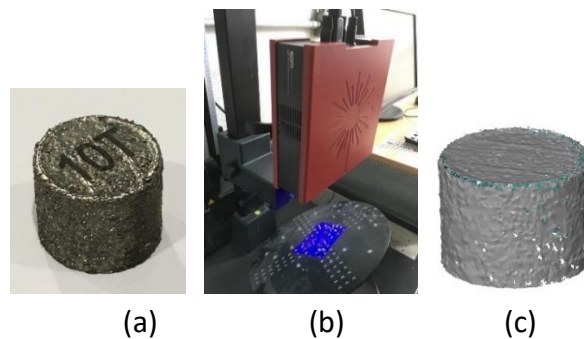
foi configurada de maneira imediata. Já para a construção da peça são necessárias as inserções dos parâmetros constantes (a largura do feixe de laser e a estratégia de varredura) e variáveis para o estudo, sendo: potência do laser, velocidade de varredura e distância entre vetores de varredura (*hatch*) - sendo os mesmos parâmetros variados para a parte experimental.

3. Resultados e Discussão

3.1 Distorções térmicas experimentais

Inicialmente a amostra (Figura 5(a)) é submetida ao escaneamento no equipamento ATOS Core 80 de toda a sua superfície externa (Figura 5(b)) resultando na geometria da Figura 5(c) que será tratada através do software GOM Inspect.

Figura 5 - (a) Amostra impressa 10T, b) processo de medição óptica, (c) geometria escaneada da amostra.

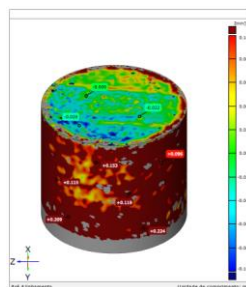


Fonte: próprios autores

Após a realização do escaneamento de cada peça impressa, utiliza-se o software GOM *Inspect* para realização da análise de parâmetros metrológicos. Inicialmente é feita a sobreposição da geometria escaneada por um cilindro com as dimensões nominais da peça, o que irá permitir avaliar as distorções decorrentes do processo de fabricação. Para esta pesquisa, apenas o diâmetro médio foi definido como parâmetro de resposta da distorção.

A Figura 6 mostra uma comparação dimensional de toda a superfície escaneada da amostra 10T em relação ao corpo cilíndrico nominal, de dimensões nominais 10 mm de altura por 11,3 mm de diâmetro. As cores quentes indicam dimensões maiores e as cores frias indicam dimensões menores que o valor nominal.

Figura 6 – Representação de distorções da amostra impressa 10T

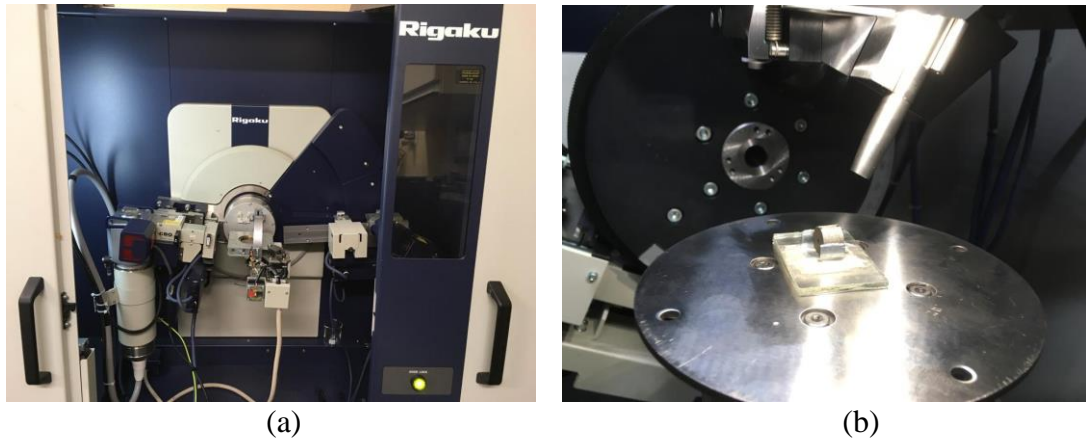


Fonte: próprio autor

3.2 Tensões residuais experimentais

Nesta etapa as amostras tiveram suas tensões residuais medidas. As medições foram feitas na lateral de cada peça. Na Figura 7 (a) e (b) é possível visualizar a peça sendo medida pelo difratômetro marca RIGAKU, modelo Ultima IV, na posição lateral.

Figura 7 - Medição da amostra 10T por difratômetro RIGAKU em (a) vista externa da máquina, (b) posição de medição da peça.

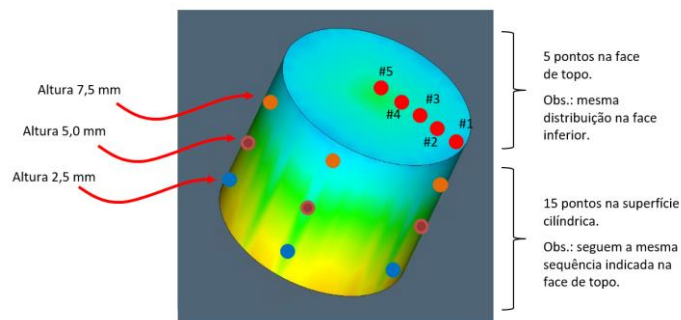


Fonte: próprio autor

3.3 Simulações computacionais

Após as etapas de *setup* dos parâmetros de impressão conforme planejamento fatorial para cada amostra, foi possível medir as distorções térmicas e calcular as tensões residuais. As distorções foram medidas num total de 15 pontos distribuídos na superfície cilíndrica, sendo cinco pontos na altura de 2,5 mm a partir da base, cinco pontos na altura de 5,0 mm e finalmente, 5 pontos na altura de 7,5 mm da amostra. A Figura 8 mostra alguns dos pontos que foram medidos na etapa de simulações. Já a medição da tensão residual foi feita através de um único ponto de mesma coordenada que foi considerada na etapa experimental numa primeira fase, e posteriormente foram considerados os demais pontos como será explicado mais a frente.

Figura 8 - Pontos de medições das distorções na etapa de simulação.



Fonte: próprio autor

A Tabela 2 apresenta os resultados de distorção e de tensões residuais obtidos através das etapas experimentais e de simulações para cada um dos 16 corpos de prova com os respectivos desvios percentuais relativos entre os valores obtidos.

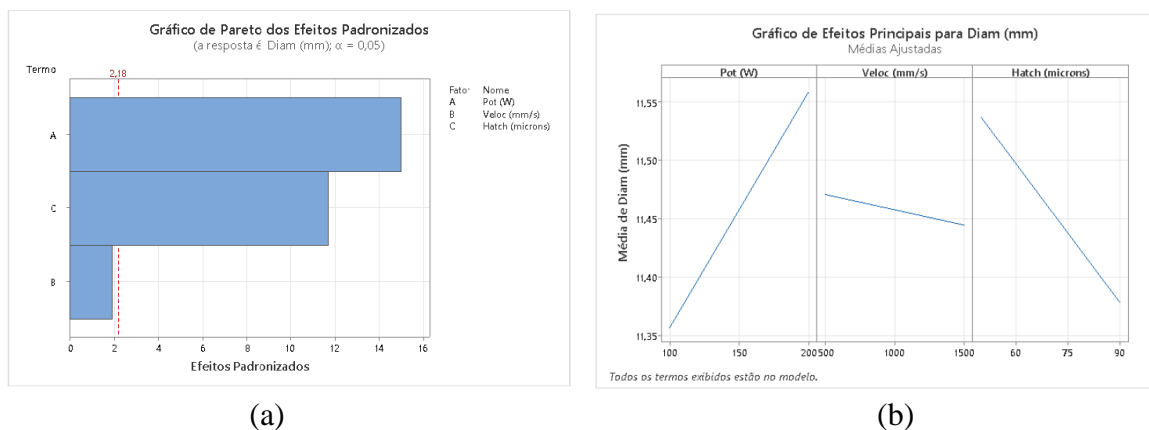
Tabela 2 – Resultados de distorções e tensões residuais experimentais versus simulados

Ensaio	Diâmetro Simulado [mm]	Diâmetro Experimental [mm]	Desvio %	Tensão residual (MPa) Simulado	Tensão residual (MPa) Experimental	Desvio %
1	11,185	11,561	3,3	536,8	538,0	0,2
2	11,203	11,383	1,6	650,2	629,2	-3,3
3	11,200	11,346	1,3	553,8	528,9	-4,7
4	11,183	11,471	2,5	588,0	586,3	-0,3
5	11,197	11,542	3,0	345,3	345,1	-0,1
6	11,205	11,463	2,3	281,8	268,2	-5,1
7	11,203	11,430	2,0	493,0	495,5	0,5
8	11,199	11,479	2,4	502,3	502,8	0,1
9	11,178	11,670	4,2	471,5	463,8	-1,7
10	11,203	11,415	1,9	360,8	353,2	-2,1
11	11,199	11,459	2,3	498,7	518,9	3,9
12	11,221	11,623	3,5	273,0	280,5	2,7
13	11,209	11,281	0,6	514,3	513,1	-0,2
14	11,188	11,298	1,0	435,9	442,1	1,4
15	11,180	11,495	2,7	449,5	321,4	-39,8
16	11,188	11,409	1,9	447,1	352,8	-26,7

3.4 Análise de variância

As Figuras 9(a) e 9(b) apresentam o resultado da análise de variância para a etapa experimental. Na Figura 9(a) observa-se o gráfico de Pareto do diâmetro médio com a linha de referência para significância estatística ($\alpha = 0,05$). Os fatores que apresentam valores inferiores à linha de referência (à esquerda da linha) não apresentam significância estatística no resultado da resposta estudada. Na Figura 9 (b) é possível verificar os efeitos principais dos fatores no diâmetro médio

Figura 9 – (a) Gráfico de Pareto para o diâmetro médio, (b) Gráfico dos efeitos principais para o diâmetro médio – etapa experimental



Fonte: Arquivo do autor (2022)

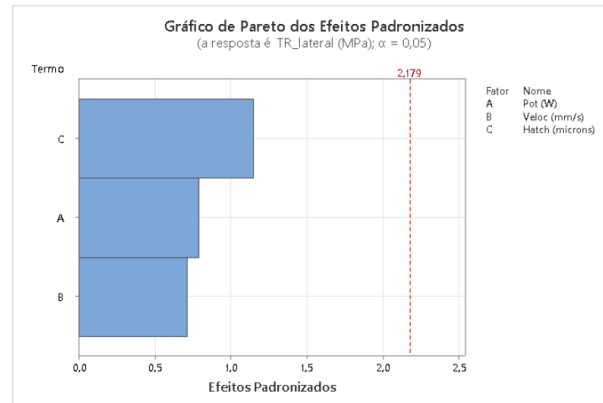
O resultado da análise indicou que os fatores Potência e *Hatch*, respectivamente, influenciam na variação do diâmetro médio das peças impressas ao nível de confiança de 95%. O fator Velocidade não apresentou significância estatística, a um nível de confiança adequado (95%), para qualquer discussão ou correlação com o resultado da variação do diâmetro médio.

Analisando a Figura 9 (b) pode-se verificar uma tendência de aumento do diâmetro com o aumento da potência, que pode estar relacionado com um aumento de temperatura local no

momento da fusão do pó na camada. Entretanto com o aumento da velocidade de varredura e aumento do *hatch* (*hatch* em maior intensidade) o diâmetro médio diminuiu. A variação destes dois fatores muda a taxa de resfriamento da camada, que pode ter causado um efeito de redução na dimensão final do diâmetro.

A Figura 10 apresenta o gráfico de Pareto da tensão residual medida em único ponto na face lateral das peças impressas na etapa experimental com a linha de referência para significância estatística ($\alpha = 0,05$).

Figura 10 - Gráfico de Pareto para tensão residual lateral – etapa experimental



O resultado da análise indicou que nenhum dos fatores Potência, Velocidade e Hatch influenciam estatisticamente na tensão residual na lateral da peça ao nível de confiança de 95%. Isso se deve muito provavelmente a dificuldade de se obter uma condição homogênea de distribuição de tensões em uma peça de geometria tão pequena.

Para permitir uma verificação mais confiável, uma vez que a relação entre a peça impressa e a peça simulada foi comprovada para o ponto medido apresentado na Tabela 2, decidiu-se fazer a medição de mais pontos ao longo do raio e também na altura da peça, o que possibilitara trabalhar com um valor médio de tensão residual (Figura 8).

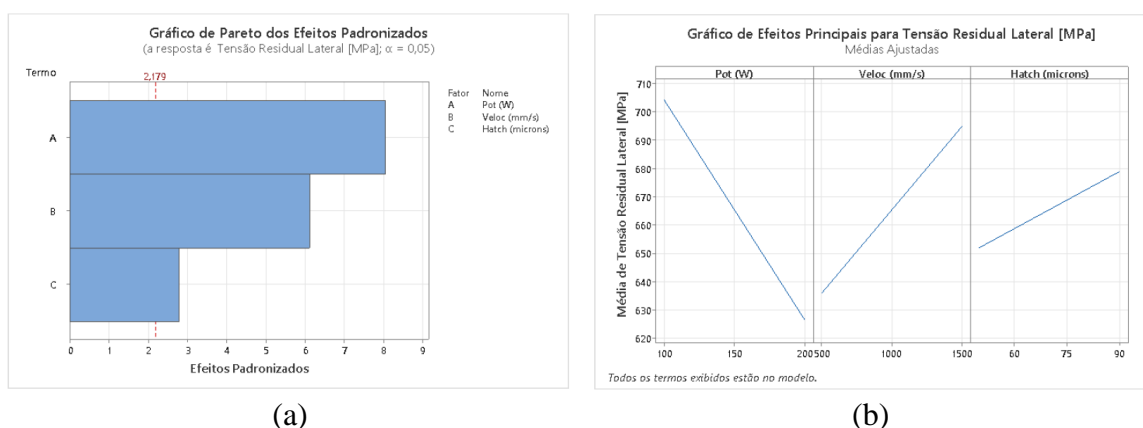
Os valores de tensões residuais médias podem ser vistos na Tabela 3 e comparadas com os valores da tensões medida em único ponto. Observa-se que a diferença é grande, o que torna a etapa de simulação computacional ainda mais importante neste processo de caracterização das amostras. As tensões residuais, na lateral, apresentaram seus valores mais baixos, quando suficientemente próximos da base e do topo. A partir destes resultados foi possível realizar a análise de variância, observando-se desta vez significância nos resultados.

Tabela 3 – Resultados de distorções e tensões residuais simulados

Ensaio	Tensão residual (MPa) Simulado (Média)	Tensão residual (MPa) Simulado (1 ponto)	Desvio %
1	631,7	536,8	-17,7
2	691,3	650,2	-6,3
3	721,3	553,8	-30,2
4	625,1	588,0	-6,3
5	639,3	345,3	-85,2
6	691,7	281,8	-145,5
7	671,9	493,0	-36,3
8	679,8	502,3	-35,3
9	569,6	471,5	-20,8
10	724,1	360,8	-100,7
11	679,4	498,7	-36,2
12	645,7	273,0	-136,5
13	716,6	514,3	-39,3
14	689,3	435,9	-58,1
15	603,7	449,5	-34,3
16	667,4	447,1	-49,3

As Figuras 11 (a) e 11 (b) apresentam o gráfico de Pareto da tensão residual obtida na face lateral das peças simuladas na etapa numérica considerando o valor médio medido. A Figura 11 (b) apresenta os gráficos dos efeitos principais dos fatores nos parâmetros no resultado da tensão residual.

Figura 11 – (a) Gráfico de Pareto para tensão residual lateral média, (b) Gráfico dos efeitos principais para tensão residual lateral média – etapa numérica.



Fonte: Arquivo do autor (2022).

O resultado da análise indicou que todos os três fatores, sendo Potência, Velocidade e Hatch influenciam estatisticamente na tensão residual da peça ao nível de confiança de 95%.

Analisando a Figura 11(b) pode-se verificar uma tendência de diminuição da tensão residual na face lateral com o aumento da potência. Entretanto, com o aumento da velocidade de varredura e do Hatch a tensão residual da face lateral aumentou.

4. Conclusões

Realizados os estudos, percebe-se que o modelamento das distorções apresentou boa repetibilidade enquanto das tensões residuais e suas medições em único ponto apresentam significativas incertezas. Desta forma conclui-se que o software conseguiu prever de maneira precisa a distorção e qualitativamente as tensões residuais medidas nas superfícies estudadas.

Verificou-se também que o diâmetro médio das peças de titânio Ti6Al4V foi bastante influenciado pela potência seguida pelo *hatch*. O aumento da potência aumentou o diâmetro médio das amostras, enquanto o aumento da velocidade e do *hatch* diminuiram o diâmetro.

A tensão residual medida na face lateral através de um único ponto apresentou bastante variação quando comparados os resultados experimentais e numéricos. Isso se deve a imprecisão na coordenada medida e também a dificuldades de estabilização no foco Raio-X durante aquisição das medidas nas etapas experimentais. Acredita-se que as dimensões reduzidas das peças impressas e alta porosidade geraram essa dificuldade de medição.

Já a tensão residual média simulada medida na face lateral das peças de titânio Ti6Al4V apresentou comportamento estatístico, sendo bastante influenciada pela potência, seguido pela velocidade de varredura e pelo *hatch*. O aumento da potência diminuiu a tensão residual, enquanto o aumento da velocidade e do *hatch* tendem a aumentar a tensão residual longitudinal média.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa Omnitek e ao sr. Marcello Mergulhão pela fabricação das amostras, a empresa MSC Software pela disponibilização e suporte dos softwares utilizados neste trabalho, ao IPEN pela disponibilidade de recursos e medições e ao Instituto Mauá de Tecnologia pelo apoio com infraestrutura e recursos de Laboratórios, a Fundação de Amparo Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) Proc. 20/09163-3, VINCULADO À RTI 2019/25707-6).

6. Referências Bibliográficas

CASAVOLA, C.; Campanelli, S. L.; Pappalettere, C. **Experimental analysis of residual stresses in the Selective Laser Melting process**, in: Proceedings of the XIth International Congress and Exposition, Orlando, Florida, USA, 2008.

CHRYSSOLOURIS, George et al. **Digital manufacturing: history, perspectives, and outlook**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, v. 223, n. 5, p. 451-462, 2009.

DILBEROGLU, Ugur M. et al. **The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0**. Procedia Manufacturing, v. 11, p. 545-554, 2017.

ELAMBASSERIL J. S. F.; BRINGEZU, M.; BRANDT, M. **Influence of process parameters on selective laser melting of Ti-6Al-4V components**, RMIT University School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering (SAMME), 2012.

KUŞHAN, C.; POYRAZ, M.; UZUNONAT, Ö.; ORAK, Y. S. **Systematical review on the numerical simulations of laser powered bed additive manufacturing**. 2018. Sigma J Eng & Nat Sci 36 (4), 2018, 1197-1214.

PARRY, L.; ASHCROFT, I.A.; WILDMAN, R.D. **Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation**. Addit. Manuf. 2016, 12, 1–15. ISSN 2214 8604.

VOLPATO, N. et al. **Manufatura aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blücher, 2017. 400 p. ISBN 978-85-212-1150-1.