

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA DMLS DE PEÇAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L

Salomão Waisberg Gieremek

Marcelo Otávio dos Santos

Instituto Mauá de Tecnologia

salomaowg@gmail.com e marcelo.santos@maua.br

Nicholas Queiroz Avedissian

MSC Software, Part of Hexagon

nicholas.avedissian@hexagon.com

Vanessa Seriacopi

Instituto Mauá de Tecnologia

vanessa.seriacopi@maua.br

Gilmar Ferreira Batalha

Escola Politécnica da USP

gfbatalh@usp.br

Éd Claudio Bordinassi

Instituto Mauá de Tecnologia

ecb@maua.br

Resumo. A manufatura aditiva tem se popularizado devido a vantagens como rápida prototipagem, utilização de formas otimizadas e complexas, custo unitário reduzido e peças com pesos significativamente mais baixos. Porém, como principais desvantagens pode-se citar deformações, e geração de tensões residuais devido aos efeitos térmicos decorrentes do processo. Tendo em vista essas desvantagens, este trabalho tem por objetivo modelar numericamente através de simulações pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) a distribuição das tensões residuais e distorções em peças geradas por Fusão Seletiva em leito de pó a Laser (DMLS-Direct Metal Laser Sintering) em aço inoxidável AISI 316L, através do software MSC Simufact Additive e avaliar os resultados obtidos através de medições experimentais em peças previamente fabricadas. Foram simuladas peças geradas por DMLS, com medições experimentais das tensões residuais utilizando difração de raios-X para validação. Os resultados simulados ficaram muito próximos dos valores medidos experimentalmente utilizando a potência de laser de 160W, e apresentaram diferenças maiores para a potência de laser de 190W.

Palavras-chave: Manufatura aditiva DMLS Simulação numérica. Tensões residuais. Aço inoxidável AISI 316L.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva é definida pela ABNT NBR ISO/ASTM 52900 como um processo de consolidação de materiais, a partir de um modelo geométrico 3D, camada a camada. A fusão seletiva em leito de pó a laser é um processo de manufatura aditiva denominado por diferentes nomes comerciais como sintetização seletiva à laser (SLS), fusão seletiva à laser (SLM), sinterização direta do metal à laser (DMLS) e fusão direta do metal à laser (DMLM). Apesar dos diferentes nomes por questões comerciais, a técnica utilizada é a mesma (Kushan et al 2018). Para este trabalho, foi padronizado o termo DMLS.

Um problema significativo associado a componentes fabricados por Fusão Seletiva em leito de pó a Laser é o desenvolvimento de altas tensões residuais de tração em relação aos processos de fabricação tradicionais como usinagem (Casavola et al 2008). Apesar de trabalhos anteriores indicarem a importância do entendimento da geração de tensão residual no processo de manufatura aditiva por Fusão em Leito de Pó a Laser, 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, os modelos termomecânicos para simulação por elementos finitos de SLM são potencialmente valiosos, embora isso seja um desafio devido à complexidade das físicas envolvidas no processo (Parry et al 2016). Os modelos atuais não identificam a relação geométrica entre as escolhas da estratégia de varredura a laser com a geração de tensão residual.

Uma compreensão correta dos numerosos fenômenos físicos associados a este complexo processo de fabricação é necessária para controlá-lo (Verhaeghe et al. 2009). A utilização de parâmetros de processo incorretos para uma construção SLM pode levar a propriedades de peças inadequadas (por exemplo, alta porosidade interna) e concentração de tensão térmica excessivamente alta (Khairallah e Anderson 2014).

No trabalho de Kim et al (2019), a tensão residual do material aço inoxidável austenítico SS316L fundido foi analisada em detalhe por um modelo de *cantilever* tanto experimentalmente quanto numericamente. A média da tensão no plano em cada camada depositada aditivamente foi determinada diretamente da análise de distorção de corpos de prova do tipo *cantilever* e da formulação analítica proposta. Um modelo numérico de elementos finitos (MEF) foi desenvolvido para obter melhor compreensão do estado de tensão residual e foi comparado com os resultados experimentais. O objetivo do modelo, no entanto, não foi para previsão, mas para análise do campo de tensão residual do SS316L processado.

A tensão residual tem sido amplamente investigada em processamentos a laser de metais, e vários métodos experimentais (Method e Liu, 2018) foram introduzidos para caracterizar a tensão residual nesses corpos de provas impressos em 3D. Por exemplo, métodos mecânicos, incluindo corte, contorno, furação, curvatura, foram usados para avaliar macro tensões, enquanto esses métodos refletem apenas a tensão residual em algumas regiões locais. Métodos não-destrutivos “físicos”, como a análise de difração, são mais relevantes para avaliar a tensão residual no nível dos grãos ou na escala atômica, mas esse método “físico” requer uma amostra muito fina que é difícil de imprimir. Diferentemente dos métodos acima, o método de curvatura mede a deflexão ou curvatura de uma peça causada por tensões residuais, refletindo tensões térmicas dentro das camadas. Portanto, este método é mais adequado para componentes impressos em 3D, porque o DMLS é baseado na fusão de camadas sucessivas, e a variação de parâmetros de processamento (como estratégia de varredura, espessura da camada, pré-aquecimento) tem um efeito significativo sobre as tensões residuais (Kruth et al 2004).

Alvarez et al. (2016) estabeleceram um modelo MEF para estimar a distorção em uma estrutura de *cantilever* e investigaram a influência da malha, ativação de camada e cargas térmicas equivalentes na capacidade de predição e no custo computacional. Li et al. (2017) desenvolveram uma abordagem de modelagem multiescala de temperatura para prever a tensão residual e a distorção de um *cantilever* fabricado por SLM, conforme Fig. 1 (a). Parry et al. (2016) construíram um modelo termomecânico para analisar o efeito da estratégia de varredura a laser na geração de tensão residual em peças fabricadas por SLM.

Uma simulação pelo método dos elementos finitos realizada por Cheng et al. (2016), previu a menor tensão residual e a menor deformação para as peças de IN-718 usando a varredura de linha de 45°, alguns os ângulos e tipos de varredura podem ser verificados na Fig. 1 (1b, 1c e 1d).

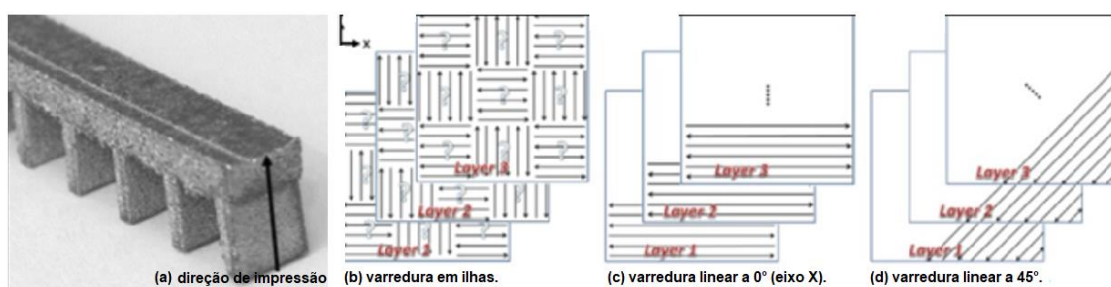


Figura 1 – Representação de cantilêver, (a) direção de impressão, (1a) e padrões de varredura comumente utilizados (b) ilha, (c) linear 0° - eixo x e (d) linear a 45°.

Fonte (1a) - Kim et al (2019) e Fonte (1b, 1c e 1d) – Cheng et al. (2016)

Dunbar et al. (2016), relataram uma diminuição na distorção da construção e do substrato quando o padrão de varredura foi rotacionado em cada camada. Outro fenômeno importante de acordo com a literatura publicada é a diferença nas tensões direcionais nas peças SLM. Cheng et al. (2016), relataram a maior diferença em tensões direcionais para varredura de linha, enquanto a rotação da área de varredura resultou na redução dessa diferença. A tensão residual na direção do vetor de varredura é muito maior do que na direção transversal (Cheng et al 2016).

Para cada material manufaturado por SLM, uma combinação de parâmetros irá satisfazer os requisitos de projeto e produzirá a menor tensão residual. O intervalo de parâmetros otimizado é determinado predominantemente experimentalmente e algumas abordagens são utilizadas (Laakso et al 2016). É comum determinar uma faixa de trabalho para uma variável como a densidade energética volumétrica (VED) (Spierings et al 2011), e estudar experimentalmente os parâmetros que alteram a VED a fim de identificar a combinação que resultará na menor tensão residual causada pela impressão da peça. Laakso et al. (2016) determinou que as melhores qualidades de impressão estão em valores de VED entre 50 e 100 J.mm⁻³. É válido mencionar que o VED é apenas utilizado como referência, pois seu valor absoluto possui muita variação entre diferentes máquinas, considerando os diferentes conjuntos óticos, geração do laser, distribuição cáustica do feixe, condição do pó, reflexividade das partículas, distribuição de pó no leito e porosidade. Sendo muito limitado e não englobando muitas grandezas envolvidas no processo, é utilizado apenas como referência e não deve ser tomado como um fator absoluto para controle do processo. Além disso, o VED não contabiliza as janelas de processamento, que resultam na presença de defeitos como poros, seja pelo aprisionamento de gases ou falta de fusão.

O objetivo deste trabalho é simular através do MEF as tensões residuais e distorções geradas em uma peça prismática, obtido por manufatura aditiva DMLS em AISI 316L, e comparar os resultados com algumas peças impressas e medidas experimentalmente, visando validar e verificar as vantagens e limitações da simulação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A simulação numérica permitiu a modelagem das tensões e distorções em peças de AISI 316L que posteriormente foram manufaturadas por impressora modelo EOS EOSINT M280. Nas simulações realizadas foram consideradas as seguintes potências de impressão em Watts: 55, 70, 85, 100, 151, 130, 145, 160, 175 e 190. As dimensões dos corpos de prova são: 20x20x15mm de altura (Fig. 2). Na etapa experimental de impressão, foram utilizados os parâmetros: potência do laser: 160W e 190W apenas; velocidade do laser: 1000 mm/s; espessura da camada: 20 μ m. As peças foram geradas em uma base e separadas depois, por corte realizado por eletroerosão a fio, utilizando a máquina V650G da Excetek. As tensões residuais nestas peças foram medidas pelo equipamento PULSTEC μ -X360s, utilizando difração de raios-X, pelo método do $\cos\alpha$. Para traçar a reta que define o valor de tensão, foram utilizados aproximadamente 120 pontos, o que melhora significativamente a precisão da medição quando comparado a outros equipamentos que também utilizam difração. As tensões verificadas neste caso foram na face superior da peça, que segundo estudos prévios apresentam valores maiores que as laterais.

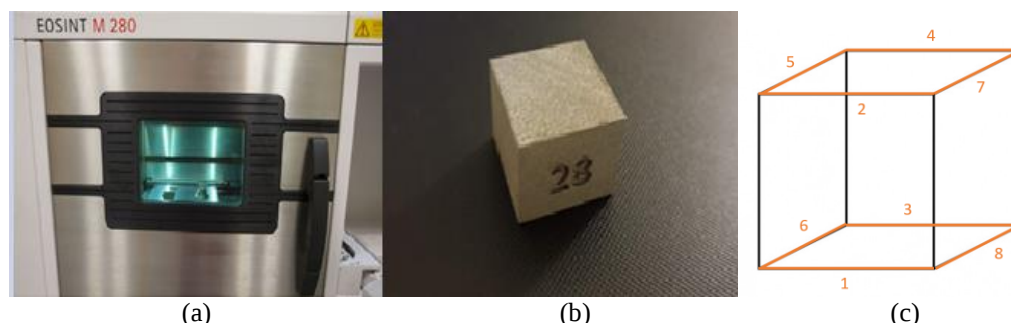


Figura 2 - Imagem da impressora utilizada na fabricação (a), de uma das peças fabricadas (b) e representação das arestas onde foram feitas as medições das peças (c)

O software utilizado para realização das simulações numéricas foi o MSC *Simufact Additive 2020*. Inicialmente o software foi configurado com base no parâmetro fator de expansão volumétrica (VEF) que consiste em uma relação dos dados das deformações das peças impressas causados pelo encolhimento devido aos gradientes de temperatura, a temperatura de fusão do material impresso, eficiência do laser e do tempo de impressão. Com essas informações definidas e implementadas, o software alcança uma maior precisão e confiabilidade nas respostas das simulações.

A simulação foi do tipo termomecânica pois é mais abrangente e leva em consideração alguns parâmetros da fabricação como espessura da camada e a potência utilizada, além do VEF citado anteriormente. Foi realizada uma etapa inicial de simulações, onde as distorções resultantes foram comparadas às distorções medidas experimentalmente por um micrômetro analógico não calibrado em algumas das peças impressas, apenas para as potências de 160 W e 190 W, como mostra a Tab. 1 e a Fig. 2 (c). As peças possuem dimensão nominal das arestas da face de 20 mm.

Tabela 1 - Dimensões finais das peças impressas

Identificação da peça		20	8	26	33	1	3	44	32	Dimensão média (mm)	
potência (W)		160	160	190	190	160	160	190	190	190 W	160 W
medida (mm)	frontal inferior (1)	19,95	20,02	19,98	19,99	19,99	19,99	19,97	19,98	19,98	19,99
	frontal superior (2)	19,98	20,01	19,99	19,98	20,01	20,01	19,99	19,99	19,99	20,00
	traseira inferior (3)	19,98	-*	19,96	19,98	20,03	20,00	19,97	19,97	19,97	20,00
	traseira superior (4)	19,94	20,02	19,97	20,00	20,02	20,00	19,99	19,99	19,99	20,00
	esquerda superior (5)	19,99	20,01	19,99	19,99	20,01	20,00	19,99	19,99	19,99	20,00
	esquerda inferior (6)	19,99	19,94	19,96	19,94	19,96	19,94	19,94	19,99	19,96	19,96
	direita superior (7)	19,94	19,99	19,99	19,99	20,00	19,99	19,99	19,97	19,99	19,98
	direita inferior (8)	19,97	19,96	19,95	19,93	19,95	19,96	19,96	19,95	19,95	19,96

* - dimensão não utilizada pois se mostrou significativamente diferente das outras

De posse dos resultados da simulação inicial, foi feita uma aproximação das distorções obtidas da simulação, para as distorções médias medidas experimentalmente nas peças, pois tendo uma equivalência nos deslocamentos, pode-se afirmar que a contração térmica foi capturada da maneira adequada pelo software e desta forma, as tensões residuais podem ser calculadas, uma vez que são decorrentes das deformações causados pelo gradiente de temperatura.

Após confirmada a captura correta da contração térmica, uma série de simulações considerando outras potências foram realizadas a fim de encontrar a menor tensão residual em suas faces, na chamada etapa 2. Mantendo os mesmos parâmetros, a potência foi alterada a cada simulação, de forma em que o VED da simulação percorra o espectro estudado por Laakso (2016). O VED é calculado através da Eq. (1).

$$VED = \frac{P}{V \cdot h \cdot t} \quad (1)$$

Onde P é a potência do laser (*power-Watts*), V é a velocidade de varredura do laser (*speed-mm/s*), h é distância entre os filetes (*hatch distance-mm*) e t é a espessura da camada (*layer thickness-mm*). Os valores das potências utilizadas e o VED resultante podem ser verificados na Tab. 2.

Tabela 2 - Potências utilizadas nas simulações e seus respectivos VED

Potência (W)	190	175	160	145	130	115	100	85	70	55
VED (J.mm ⁻³)	135,71	125,00	114,29	103,57	92,86	82,14	71,43	60,71	50,00	39,29

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente serão apresentados os resultados comparativos obtidos pela simulação numérica com os resultados experimentais para os mesmos parâmetros de processo, obtidos na primeira etapa de simulações. Depois de realizada a aproximação dos deslocamentos pelo método “*best fit*”, presente no *Simufact Additive*, onde é possível colocar os deslocamentos como parâmetros de entrada, foi obtida uma equivalência de 99% nos deslocamentos, tanto para a simulação de 160 W como para a de 190 W de potência. Dada a equivalência, é possível confirmar que os efeitos térmicos foram captados corretamente. Uma vez validado o efeito térmico, as tensões são dadas como confiáveis pelo modelamento numérico no software.

Podem ser visualizados na Fig. 3(a) as medidas resultantes da simulação realizada com a potencia de 160 W, enquanto as medidas da simulação com 190 W de potencia (Figura 3b).

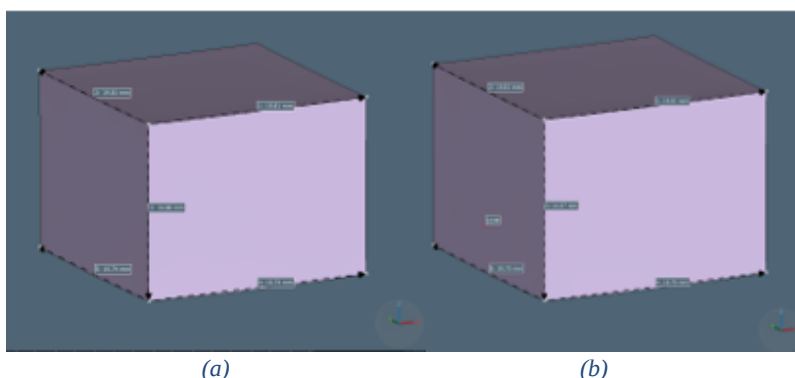


Figura 3 - Medidas da peça impressa por simulação com potências de 160 W (a) e 190 W (b).

Verifica-se na Fig. 3 (a), referente a peça impressa simulada com 160 W, a distorção de 0,19 mm em ambas as arestas superiores, tanto na direção “X” como na direção “Y”. As arestas inferiores apresentam distorção de 0,26 mm nas direções “X” e “Y”. A aresta vertical, na direção “Z”, a distorção apresentada é de 0,14 mm.

Pode-se observar na Fig. 3 (b), referente a peça impressa com 190 W, a distorção de 0,19 mm nas arestas superiores nas direções “X” e “Y”. Nas arestas inferiores a distorção é de 0,27 mm tanto na direção “X” como na direção “Y”. A aresta na direção “Z” é de 0,13 mm.

As medições de tensões residuais foram realizadas experimentalmente na região central da face superior do prisma por difração de raios-X, onde também foram levantados valores através da simulação MEF. Os resultados comparativos são mostrados na Tab. 3.

Tabela 3 – Comparação das tensões residuais obtidas por difração de raios X e por simulação MEF.

Potência do laser (W)	Difração de raios-X		Simulação	
	Direção X (MPa)	Direção Y (MPa)	Direção X (MPa)	Direção Y (MPa)
160	286	356	354	352
190	225	331	392	391

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que eles são mais próximos na direção Y para ambas as potências, apresentando uma diferença de 1 % para a potência de 160 W e 18 % para a potência de 190 W. Na direção X, as diferenças entre os resultados experimental e numérico são maiores, como 24 % de diferença na potência de 160 W. Essa diferença pode ser atribuída ao fato de o software *Simufact Additive* apresentar resultados muito semelhantes para ambas as direções no centro da face superior, mudando apenas a distribuição das tensões próximas às arestas e a imprecisão de cerca de 50 MPa da solução pelo método de difração de raios-X.

Podem ser visualizados na Figura 4 duas imagens dos resultados obtidos para as tensões normais pela simulação para as direções “X” e “Y” considerando a peça gerada com potência de laser de 160 W.

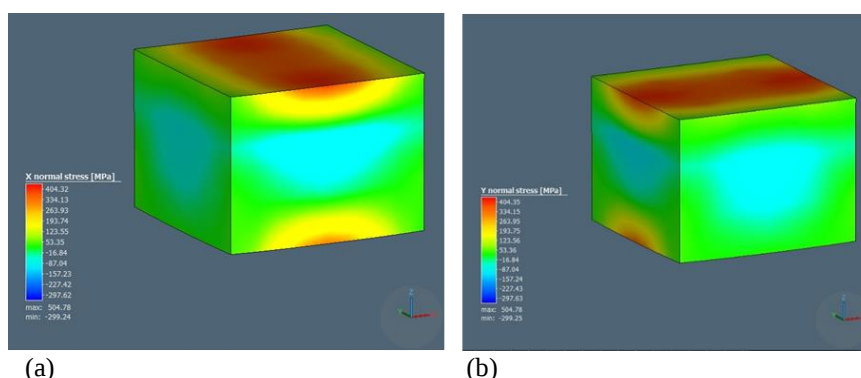


Figura 4 - Tensões residuais para potência de 160 W obtidas por simulação MEF nas direções (a) X e (b)Y.

Os resultados para a potência de laser de 160W ficaram bastante próximos dos valores reais, considerando que a própria medição por difração de raios-X apresenta incertezas na ordem de 50 MPa. Para uma direção o valor foi exato e para outra houve diferença de 20%.

Quando a maior potência de laser foi simulada, os resultados foram inversos. As medições mostraram que as tensões de tração foram menores, por volta de 15%, enquanto que para a simulação os valores aumentaram 10% com relação à potência menor. Na média, considerando os valores medidos e simulados, para a potência de 190W houve uma diferença na faixa de 40%.

A simulação possui muitas variáveis de configuração, a maioria oriundas do processo e outras que precisam ser estimadas de maneira mais acertiva para que os resultados se aproximem ainda mais da realidade. O processo se mostra promissor para futuras análises.

Estão apresentados na Tabela 4 os resultados da segunda etapa de simulações, para diferentes valores de potências, das temperaturas máximas atingidas pelas simulações, as distorções causadas pelo processo, as tensões residuais nas direções “X” e “Y” e a tensão equivalente por von Mises.

Tabela 4 – Resultados obtidos nas simulações da etapa 2

Potência (W)	55	70	85	100	115	130	145	160	175	190
Temperatura máxima (°C)	857	1072	1264	1423	1491	1566	1629	1745	1912	2084
Variação dimensional ΔL (mm)	0,01	0,01	0,01	0,14	0,13	0,16	0,16	0,18	0,19	0,19
Tensão direção X (MPa)	0,43	0,47	0,56	518	508	521	509	514	542	533
Tensão direção Y (MPa)	0,4	0,46	0,56	518	508	521	509	514	542	533
Tensão de von Mises (MPa)	5,63	5,66	5,74	587	562	582	566	567	586	586

Embora as simulações realizadas com 70 e 85 W possuam valores de VED dentro do parâmetro ideal sugerido por Laakso (2016), com valores de 50 e 60,71 J.mm⁻³, o processo não apresentou energia suficiente para que ocorresse a fusão do material. A fusão do aço inoxidável 316L ocorre em aproximadamente 1400°C, e como demonstrado na Tab. 4, as temperaturas máximas atingidas nas simulações de 55 a 85 W foram menores.

Uma vez que a temperatura máxima atingida é menor que o ponto de fusão do material, não ocorre o processo de impressão e, consequentemente, as tensões residuais e as distorções obtidas não podem ser utilizadas para efeito de comparação. Considerou-se, portanto, válidos os resultados simulados obtidos para a potência de 100 W até 190 W, com observação ao aumento gradativo das distorções e variações nos níveis de tensões na ordem de 4,5%.

Nota-se que a temperatura máxima obtida aumenta gradualmente de acordo com a potência aplicada, além disso, percebe-se que a temperatura atingida não ultrapassa o ponto de evaporação do material, garantindo a qualidade da simulação. Considerando apenas os processos onde ocorreram, de fato, a fusão do material, a potência aumentou 90% enquanto a temperatura máxima variou 46%.

Na Figura 5 é possível observar o aumento praticamente linear das distorções em relação às medidas nominais em função da potência de trabalho. Desconsiderou-se os valores obtidos pelas simulações com potências entre 55 e 85 W.

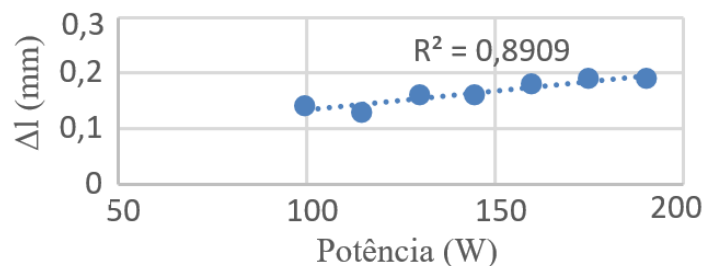


Figura 5 – Distorções das medidas obtidas em relação às medidas nominais em função da potência do laser

Nota-se que as distorções são pequenas, apresentando uma variação menor que 1% em relação às medidas nominais. As simulações válidas apontaram um aumento da distorção conforme o aumento da potência utilizada no laser. Constatou-se uma variação de 36% entre as distorções.

A Figura 6 apresenta as distorções obtidas para as simulações que obtiveram o menor e o maior desvio em relação a dimensão nominal, respectivamente com 115 W e 175 W de potência de laser. A simulação com 190 W obteve a mesma dimensão simulada para 175W.

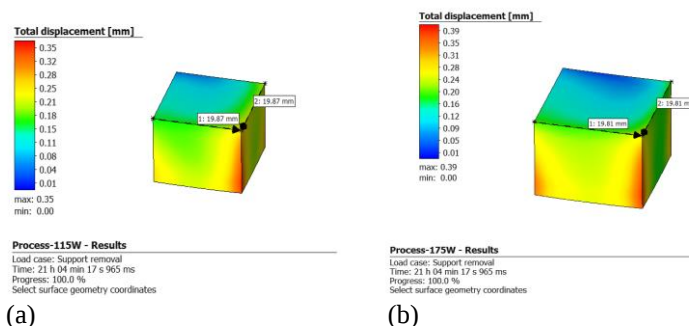


Figura 6 - Representação da menor e maior distorção obtidas na simulação MEF para potências: (a) 115 W e (b) 175 W.

A Figura 7 apresenta as tensões equivalentes para duas simulações que se provaram corretas quando comparadas com o processo de impressão realizado (160 e 190W) e para uma simulação cuja potência de laser não se mostrou suficiente para a fusão do material (85W).

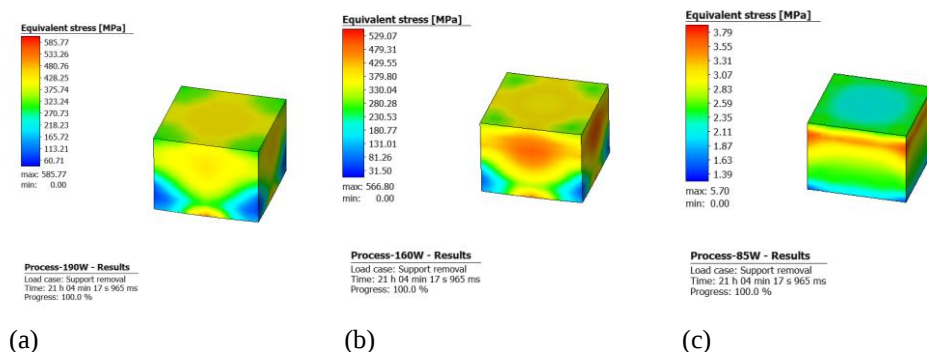


Figura 7 - simulação da tensão equivalente para (a) 190W, (b) 160 e (c) 85 W.

Verifica-se um nível elevado de tensões presentes nas peças impressas com 160 W e 190 W, que são próximos dos valores medidos, e um nível de tensões praticamente desprezível na peça impressa com 85 W, o que confirma a não configuração adequada de manufatura para este caso por não atingir a temperatura mínima de fusão do material. Nota-se também que para a simulação onde não ocorreu a fusão do material, o padrão de distribuição das tensões ocorre de maneira bem diferente dos casos onde processo ocorreu corretamente.

De forma geral, observa-se que a variação da tensão equivalente de von Mises é menor que a variação das tensões nas direções X e Y, de aproximadamente 4%. Contudo, a intensidade das tensões equivalentes, que leva em consideração as tensões cisalhantes, em todos os casos, são maiores que as tensões nas direções X e Y.

4. CONCLUSÕES

Realizados os estudos, percebe-se que o modelamento de tensões residuais e suas medições apresentam significativas incertezas, dependendo dos equipamentos utilizados. Desta forma conclui-se que o software conseguiu prever de maneira qualitativa as tensões residuais medidas nas superfícies estudadas.

Estudos anteriores apontam que a face superior apresenta tensão residual superior à encontrada nas faces laterais, conforme o resultado obtido pelas simulações numéricas.

Na simulação utilizando a potência do laser de 160 W, os resultados da simulação mostraram-se muito próximos dos resultados obtidos experimentalmente, com uma variação média de 12,5 %. Porém utilizando a potência de 190 W houve uma diferença média considerável na ordem de 114 MPa. Isso deve-se provavelmente ao fato de o software apresentar uma solução idêntica para ambas as direções enquanto a solução pela difração de raios-X apresentou resultados diferentes para as direções estudadas, observando uma possível anisotropia do material.

Embora os parâmetros da simulação estejam de acordo com a faixa estipulada de VED, é de suma importância a análise das variáveis e dos resultados de forma individual, a fim de garantir a qualidade da impressão.

A variação da potência do laser (90% na faixa onde o processo realmente ocorre), apesar de ocasionar um aumento significativo da temperatura máxima atingida (46%), não apresenta grande variação das tensões residuais (7% nas direções X e Y, e 4% na tensão equivalente).

Apesar da distorção das medidas nominais se manterem abaixo de 1% para todas as potências do laser simuladas, ocorre uma variação de 36% das distorções para 90% do aumento da potência.

Essa análise tem caráter apenas primário, uma vez que os métodos de medição e impressão não foram precisos, devido a falta de calibração do micrômetro e a não impressão de cantiléver. Além disso, uma análise mais profunda sobre conjunto ótico, geração do laser, distribuição da cáustica do feixe, condição do pó, reflexividade das partículas, distribuição de pó no leito, porosidade, aprisionamento de gases, falta de fusão e defeitos internos não foi realizada.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa MSC Software pela disponibilização e suporte dos softwares utilizados neste trabalho e ao Instituto Mauá de Tecnologia pelo apoio com infraestrutura e recursos de Laboratórios.

4. REFERÊNCIAS

- Alvarez, P.; Ecenarro, J.; Setien, I.; Sebastian, M.S.; Echeverria, A.; Eciolaza, L. Computationally eficiente distortion prediction in Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Int. J. Eng. Res. Sci.* 2, 2395–6992, 2016.
- ASTM 52900 - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM International, West Conshohocken, PA.EUA, 2018.
- 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.
- Cheng, B. Shrestha, S. Chou, K. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting, *Addit. Manuf.* (12, Part B). 240–251. 2016.
- Dunbar, A. J. et al., Development of experimental method for in situ distortion and temperature measurements during the laser powder bed fusion additive manufacturing process, *Additive Manuf.* (12, Part A) 25–30. 2016.
- Khairallah, S. A.; Anderson, A. Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel powder, *J. Mater. Process. Technol.* 214 (11) 2627–2636, 2014.
- Kim, T.; Ha K.; Cho, Y.; Jeon, J. B.; Lee, W. Analysis of residual stress evolution during powder bed fusion process of AISI 316L stainless steel with experiment and numerical modeling. (2019) *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2019) 105(1-4) 309-323 DOI: 10.1007/s00170-019-04204-0
- Kruth, J. P.; Froyen, L.; Van Vaerenbergh, J.; Mercelis, P.; Rombouts, M.; Lauwers, B. Selective laser melting of iron-based powder. *J. Mater. Process. Technol.* 2004, 149, 616–622, 2004.
- Kuşhan, C.; Poyraz, M.; Uzunonut, Ö.; Orak, Y. S. Systematical review on the numerical simulations of laser powered bed additive manufacturing. *Sigma J Eng & Nat Sci* 36 (4), 1197-1214, 2018

- Laakso, P.; Riipinen, T.; Laukkanen, A.; Andersson, T.; Jokinen, A.; Revuelta, A.; Ruusuvaori, K. Optimization and simulation of SLM process for high density H13 tool steel parts, Proc. 9th International Conference on Photonic Technologies – LANE. 2016. 19-22 Setembro 2016, Furth, Alemanha. Physics Procedia V. 83. Ed. Schmidt et al. Ed. Elsevier, UK, ISBN 9781510830424.
- Li, C.; Liu, J.F.; Fang, X.Y.; Guo, Y.B. Efficient predictive model of part distortion and residual stress in selective laser melting. Additive Manuf. 17, 157–168, 2017.
- Method, M. C.; Liu, C. Experimental investigation on the residual stresses in a thick joint with a partial repair weld using. Materials 2018, 11, 633.
- 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. Additive Manufacturing. 12, 1–15, 2016.
- Spierings, A.; Herres, N.; Levy, G. Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in additive manufactured stainless steel parts. Rapid Prototyping Journal. 17 3, 195-202, 2011.
- Verhaeghe, F. et al., A pragmatic model for selective laser melting with evaporation, Acta Mater. 57 (20) 6006–6012, 2019.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

NUMERICAL SIMULATION OF THE DMLS ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS OF AISI 316L STAINLESS STEEL PARTS.

Salomão Waisberg Gieremek

Marcelo Otávio dos Santos

Instituto Mauá de Tecnologia

salomaowg@gmail.com e marcelo.santos@maua.br

Nicholas Queiroz Avedissian

MSC Software,- Hexagon

nicholas.avedissian@hexagon.com

Vanessa Seriacopi

Instituto Mauá de Tecnologia

vanessa.seriacopi@maua.br

Gilmar Ferreira Batalha

Escola Politécnica da USP

gfbatalh@usp.br

Éd Claudio Bordinassi

Instituto Mauá de Tecnologia

ecb@maua.br

Abstract. Additive manufacturing has become popular in recent years due to advantages such as rapid prototyping, use of optimized and complex shapes, reduced unit cost and parts with significantly lower weights. However, the main disadvantages include deformations and generation of residual stresses due to the thermal effects resulting from the process. In view of these disadvantages, this work aims to model numerically through simulations by the Finite Element Method (FEM) the distribution of residual stresses and distortions in parts generated by Direct Metal Laser Sintering (DMLS) in AISI stainless steel 316L, through the MSC Simufact Additive software and evaluate the results obtained through experimental measurements on previously manufactured parts. Parts generated by DMLS were simulated, with experimental measurements of residual stresses using X-ray diffraction for validation. The simulated results were very close to the values measured experimentally using the laser power of 160W and showed greater differences for the laser power of 190W.

Keywords: DMLS additive manufacturing, Numerical simulation, Residual stresses, AISI 316L stainless steel.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.