

MODELAGEM NUMÉRICA DAS TENSÕES RESIDUAIS EM PEÇAS DE AÇO OXIDÁVEL AISI 316L FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA

Salomão Waisberg Gieremek ¹; Marcelo Otavio dos Santos ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *A manufatura aditiva tem se popularizado nos últimos anos devido às vantagens como rápida prototipagem, utilização de formas otimizadas e complexas, custo unitário reduzido e peças com pesos significativamente mais baixos. Porém como principais desvantagens podemos citar deformações e a 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 em peças geradas por Fusão Seletiva a Laser (SLM) em aço inoxidável AISI 316L, através do software MSC Simufact Additive e avaliar os resultados obtidos através de medições experimentais em peças previamente fabricadas.*

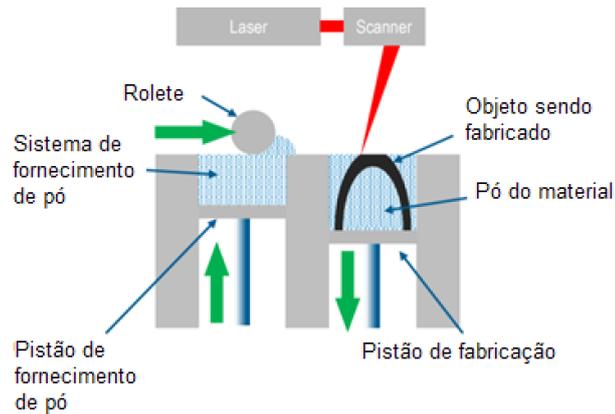
Introdução

O mercado está em constante procura por processos mais eficientes, e impulsionado pela Indústria 4.0, o crescimento no uso de manufatura aditiva em metais tem se dado em diversas áreas, por exemplo, a automotiva e aeroespacial, visando peças otimizadas, leves e resistentes, e médica, tendo em vista a possibilidade de criação de diversos formatos complexos, considerando a anatomia de cada paciente.

A manufatura aditiva é definida pela ASTM F2792-12a como um processo de união de materiais, a partir de um modelo 3D, camada à camada. A fusão seletiva à laser em cama de pó (Figura 1) é um processo de manufatura aditiva denominado por diferentes nomes comerciais como sintetização seletiva à laser (SLS), fusão seletiva à laser (SLM), sintetização 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 (KUŞHAN et al 2018).

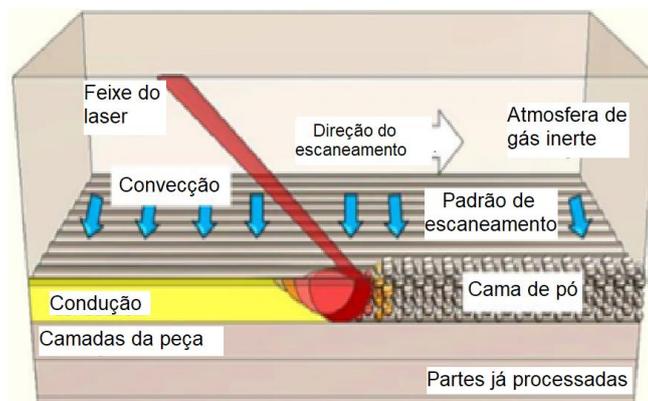
Um problema significativo associado a componentes fabricados por Fusão Seletiva a Laser (SLM) é o desenvolvimento de alta tensão residual interna (CASAVOLA et al 2008). Os repetidos ciclos de aquecimento e resfriamento de camadas sucessivas da matéria-prima em pó durante o processo de construção SLM são responsáveis pelas altas taxas de resfriamento e pelos elevados gradientes de temperatura associados ao processo (Figura 2). Essas altas taxas de resfriamento e elevados 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).

Figura 1- representação esquemática do funcionamento de SLM.



Fonte: Webinar: ANSYS Solutions to Metal Additive Manufacturing

Figura 2 – representação da transferência de calor do processo



Fonte: KUŞHAN et al 2018

Apesar de trabalhos anteriores indicarem a importância do entendimento da geração de tensão residual nos processos de manufatura aditiva por Fusão Seletiva 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 (MEF) de SLM são potencialmente valiosos, embora isso seja um desafio devido à complexidade da física envolvida no processo (PARRY et al 2016). Os modelos atuais não identificaram a relação geométrica entre as escolhas da estratégia de varredura a laser com a geração de tensão residual. Além disso, há uma falta de conhecimento relacionado ao campo de temperatura criado com a tensão residual gerada pela escolha da estratégia de varredura a laser. Atualmente, essa informação não está disponível de forma a permitir a previsão de distorção e falha e, conseqüentemente, a fabricação confiável de componentes no processo SLM.

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 peça 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 de encolhimento 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.

Em Safronov et al (2017), um modelo numérico MEF foi desenvolvido para investigar os detalhes da formação de tensão residual. O modelo numérico considerou o processo de deposição de camada por camada semelhante ao modelo analítico, mas levou em consideração a resposta elásto-plástico do material usando a curva tensão-deformação obtida experimentalmente. O modelo também incluiu o efeito geométrico pelas pernas *cantilever* nas experiências. As simulações MEF baseiam-se no fatiamento de parte do feixe da amostra em camadas iguais e finas e no cálculo sequencial do efeito de encolhimento de cada camada durante a manufatura aditiva.

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 etc., foram usados para avaliar macrotensões, 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 SLM é baseado na fusão de camadas sucessivas, e a variação de parâmetros de processamento (como estratégia de escaneamento, espessura da camada, pré-aquecimento, etc.) tem um efeito significativo sobre as tensões residuais (KRUTH et al 2004). Assim, alguns pesquisadores (BUCHBINDER et al 2014) usaram um corpo de prova do tipo *cantilever* suspenso para investigar a influência dos parâmetros do processo na distorção ou para validar o modelo de previsão de distorção.

Além disso, o MEF foi introduzido para prever e reduzir a tensão residual dos componentes fabricados por SLM nos últimos anos (MATSUMOTO et al 2002). 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 previsão 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. 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), previram a menor tensão residual e a menor deformação para as peças de IN-718 usando a varredura de linha de 45 °. 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).

O objetivo deste trabalho é simular através do MEF as tensões residuais geradas em um prisma, obtido por manufatura aditiva SLM em AISI 316L.

Materiais e Métodos

A simulação modelou as tensões em peças reais de AISI 316L, manufaturadas por uma impressora modelo EOS EOSINT M280. As dimensões dos corpos de prova são: 20x20x15mm. Foram utilizados os parâmetros: potência do laser: 160W e 190W; 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.

Inicialmente, o software da MSC chamado *Simufact Additive* 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, o software alcança uma maior precisão nas simulações.

A simulação desenvolvida foi do tipo termomecânica pois é mais abrangente e levou em consideração alguns parâmetros da fabricação como espessura da camada e a potência utilizada, além do VEF. Após essa simulação inicial, as distorções resultantes foram comparadas as distorções medidas em algumas das peças impressas, como mostra a Tabela 1. As peças possuem dimensão nominal de 20 mm.

Tabela 1 - dimensões das peças impressas

peça	20	8	26	33	1	3	44	32	Média	
potência (W)	160	160	190	190	160	160	190	190	190 W	160 W
frontal inferior	19,95	20,02	19,98	19,99	19,99	19,99	19,97	19,98	19,98	19,99
frontal superior	19,98	20,01	19,99	19,98	20,01	20,01	19,99	19,99	19,99	20,00
traseira inferior	19,98	-*	19,96	19,98	20,03	20,00	19,97	19,97	19,97	20,00
traseira superior	19,94	20,02	19,97	20,00	20,02	20,00	19,99	19,99	19,99	20,00
esquerda superior	19,99	20,01	19,99	19,99	20,01	20,00	19,99	19,99	19,99	20,00
esquerda inferior	19,99	19,94	19,96	19,94	19,96	19,94	19,94	19,99	19,96	19,96
direita superior	19,94	19,99	19,99	19,99	20,00	19,99	19,99	19,97	19,99	19,98
direita inferior	19,97	19,96	19,95	19,93	19,95	19,96	19,96	19,95	19,95	19,96

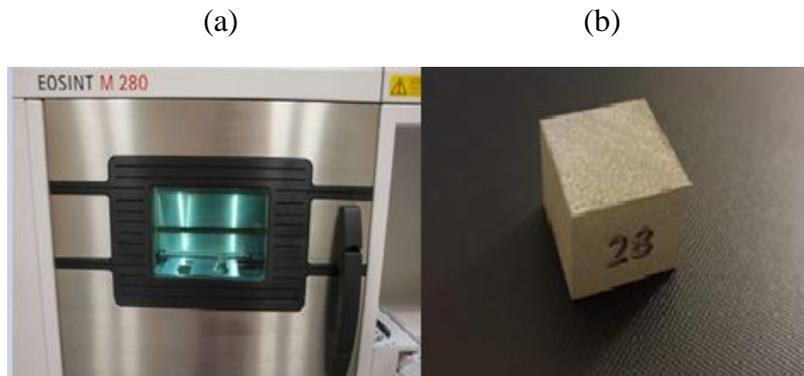
* - dimensão não utilizada pois se mostrou muito diferente das outras

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

Resultados e Discussão

Como discutido no item anterior, a impressora utilizada está disposta na Figura 3 (a) enquanto a Figura 3 (b) mostra uma das peças impressas.

Figura 3 - Imagem da impressora utilizada na fabricação (a) e de uma das peças fabricadas (b)



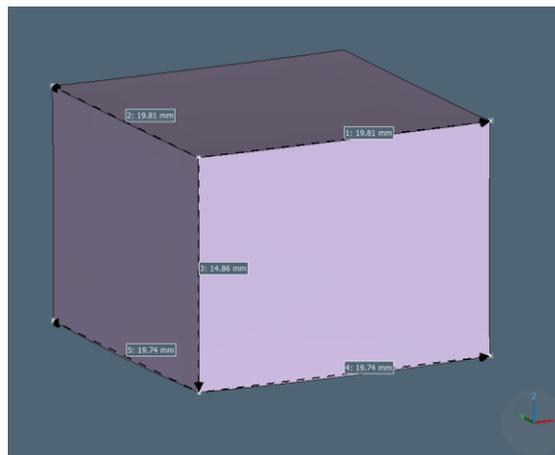
Fonte (a): WIT: South Eastern Applied Materials Research Centre

Fonte (b): foto tirada pelo Prof. Dr. Ed Claudio Bordinassi

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.

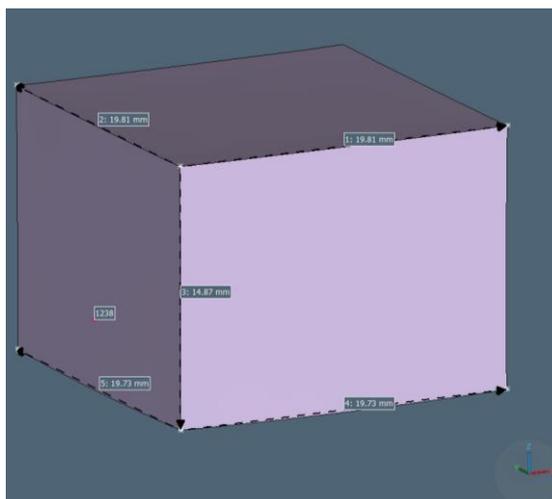
A Figura 4 mostra as medidas resultantes da simulação realizada com a potencia de 160 W enquanto a Figura 5 apresenta as medidas da simulação com 190 W de potencia.

Figura 4 - medidas da simulação com potência de 160 W



Verifica-se da Figura 3 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.

Figura 5 - medidas da simulação com potência de 190 W



Verifica-se da Figura 4 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 no centro da face superior do prisma por difração de raios-X e pelo software *Simufact Additive* e apresentaram os resultados mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Tensões residuais obtidas

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

Os resultados obtidos 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 são maiores: 24 % para a potência de 160 W e 74 %. Essa diferença pode ser atribuída ao fato do 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.

A Figura 6 mostra os resultados obtidos pela simulação para as direções “X” e “Y” para a peça gerada com potência de laser de 160 W, enquanto a Figura 6 e a Figura 7 apresentam o mesmo conteúdo para a potência de 190W.

Figura 6 - Tensões residuais simuladas nas direções X e Y com 160 W de potencia

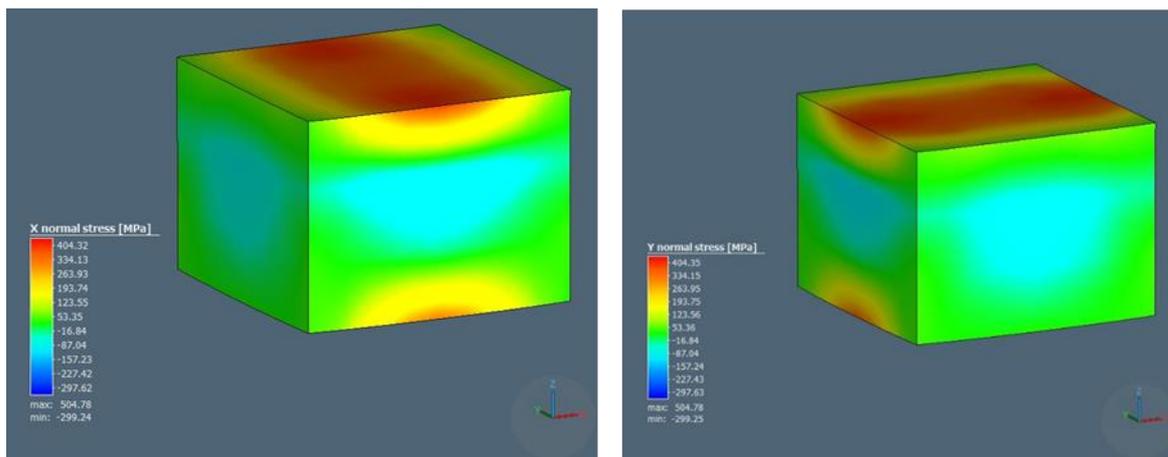
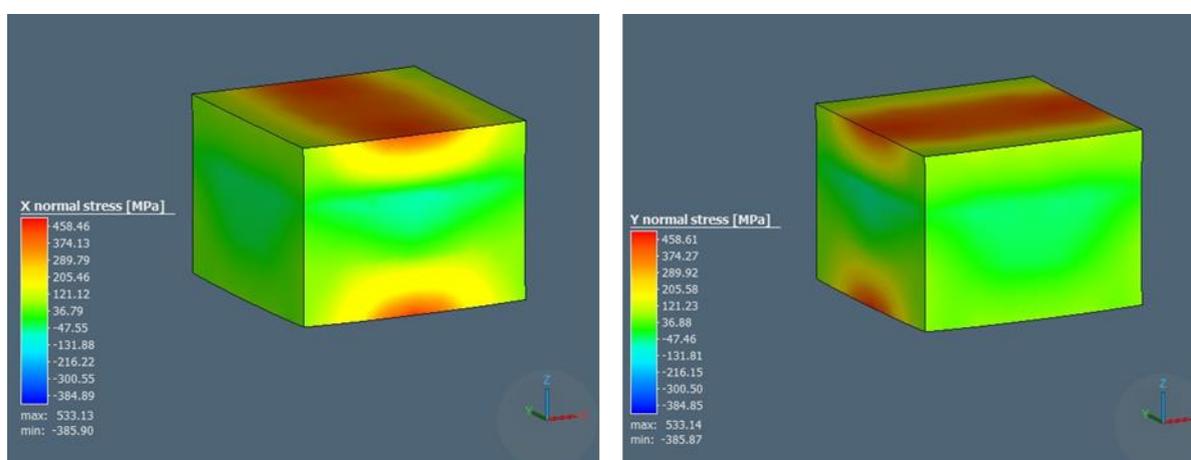


Figura 7 - Tensões residuais simuladas nas direções X e Y com 190 W de potencia



Os resultados para a potência de laser de 160W ficarão 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 de 40%, por volta de 114 MPa, um erro considerável.

Maiores análises precisam ser feitas para entender os efeitos do aumento da potência do laser na simulação, e melhorar a precisão das aproximações. 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 da realidade. O processo de mostra promissor para futuras análises.

Conclusão

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 reais, 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 provavelmente ao fato do software apresentar uma solução idêntica para ambas as direções enquanto a solução pela difração de raios-X apresentou resultados diferentes para as direções estudadas.

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.

Referências Bibliográficas

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 F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2012.

Buchbinder, D.; Meiners, W.; Pirch, N.; Wissenbach, K.; Schrage, J. **Investigation on reducing distortion by preheating during manufacture of aluminum components using selective laser melting**. J. Laser Appl. 26, 012004, 2014.

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**, Addit. Manuf. (12, Part A) 25–30. 2016.

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.

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, 2019.

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**. 2018.

Laakso, P.; Riipinen, T.; Laukkanen, A.; Andersson, T.; Jokinen, A.; Revuelta, A.; Ruusuvoori, K. **Optimization and simulation of SLM process for high density H13 tool steel parts**, 9th International Conference on Photonic Technologies – LANE. 2016.

Li, C.; Liu, J.F.; Fang, X.Y.; Guo, Y.B. **Efficient predictive model of part distortion and residual stress in selective laser melting**. Addit. Manuf. 17, 157–168, 2017.

Matsumoto, M.; Shiomi, M.; Osakada, K.; Abe, F. **Finite element analysis of single layer forming on metallic powder bed in rapid prototyping by selective laser processing**. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 42, 61–67. 2002.

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**. Addit. Manuf. 12, 1–15, 2016.

Safronov, V. A.; Khmyrov, R. S.; Kotoban, D. V.; Gusarov, A. V. **Distortions and residual stresses at layer-by-layer additive manufacturing by fusion**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 139(3), 031017, 2017.

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.