

AValiação da Tolerância Dimensional em Componentes de Aço Inoxidável 316L Obtidos por Manufatura Aditiva e Subtrativa

Thiago Fernandes, thiago_fernandes4@estudante.sc.senai.br
Renan da Silva, renan_silva2@estudante.sc.senai.br
Telmo Siqueira, telmo_siqueira@estudante.sc.senai.br
Anderson de Carvalho Fernandes, anderson.c.fernandes@edu.sc.senai.br
Bruna Zappelino Camillo, bruna.zappelino@edu.sc.senai.br
Andrea Loureiro Andrade, andrea.loureiro@edu.sc.senai.br
Alexandre Marcos Ferreira, alexandre.marcos@sc.senai.br

Centro Universitário SENAI/SC – UniSENAI Campus Joinville, R. Arno Waldemar Dohler, 957 - Zona Industrial Norte, Joinville - SC

Resumo. Este trabalho compara os processos de manufatura aditiva, por Fusão a Laser em Leito de Pó (L-PBF), e usinagem CNC, com foco na produção de componentes para transmissões de veículos elétricos. O objetivo principal é avaliar a precisão dimensional, o comportamento dos desvios e as implicações mecânicas e econômicas de cada técnica. A metodologia envolveu digitalização tridimensional das peças produzidas e análise estatística de nuvens de pontos com tolerância nominal de $\pm 0,1$ mm. Os resultados mostraram que a usinagem CNC apresentou maior conformidade com o modelo CAD (51,40% dos pontos dentro da tolerância), porém com desvios aleatórios. Já o processo L-PBF apresentou padrão de sobremetal sistemático, com 21,14% dos pontos dentro da tolerância, o que facilita a aplicação de correções direcionadas. Na caracterização mecânica, o L-PBF mostrou fragilidade estrutural, atribuída à baixa densidade das peças, passível de otimização com ajustes nos parâmetros do processo. Em termos de tempo e custo, a manufatura aditiva foi mais eficiente na produção de protótipos únicos, enquanto a usinagem se torna mais vantajosa a partir de pequenas séries. Conclui-se que ambos os processos têm potencial complementar, sendo a escolha dependente da escala de produção e dos requisitos funcionais das peças.

Palavras chave: Manufatura aditiva. Usinagem CNC. Precisão dimensional. Fusão a laser.

Abstract. This work compares the additive manufacturing process, Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), and CNC machining, with a focus on the production of components for electric vehicle transmissions. The main objective is to evaluate the dimensional accuracy, the behavior of deviations, and the mechanical and economic implications of each technique. The methodology involved three-dimensional scanning of the produced parts and statistical analysis of point clouds with a nominal tolerance of ± 0.1 mm. The results showed that CNC machining presented greater conformity with the CAD model (51.40% of the points within tolerance), albeit with random deviations. In contrast, the L-PBF process exhibited a systematic over-material pattern, with 21.14% of the points within tolerance, which facilitates the application of targeted corrections. In the mechanical characterization, L-PBF showed structural fragility, attributed to the low density of the parts, which can be optimized with adjustments to the process parameters. In terms of time and cost, additive manufacturing was more efficient for the production of unique prototypes, while machining becomes more advantageous from small series onwards. It is concluded that both processes have complementary potential, with the choice depending on the production scale and the functional requirements of the parts.

Keywords: Additive manufacturing. CNC machining. Dimensional accuracy. Electric vehicles. Laser powder bed fusion.

1. INTRODUÇÃO

O cenário industrial contemporâneo, impulsionado pelo avanço da manufatura digital e pela crescente demanda por soluções sustentáveis de mobilidade, tem favorecido a adoção de tecnologias de fabricação inovadoras. Nesse contexto, destacam-se a manufatura aditiva e os processos subtrativos tradicionais, como a usinagem CNC, ambos com potencial significativo para a produção de componentes com elevada complexidade geométrica, especialmente no setor de veículos

elétricos, que se configura como protagonista da atual transição energética na indústria automotiva (FRANCIS et al., 2021).

A manufatura aditiva, conforme definição da ASTM, consiste na união de materiais camada por camada a partir de um modelo digital tridimensional, diferenciando-se substancialmente dos métodos convencionais de remoção de material (FRAZIER, 2014; VOLPATO, 2017). Dentre as técnicas aditivas, destaca-se a Fusão a Laser em Leito de Pó (L-PBF), que utiliza feixes de laser para fundir seletivamente camadas de pó metálico. Essa abordagem permite a fabricação de peças com alta liberdade de forma, sem a necessidade de ferramentas específicas, o que viabiliza a produção direta e eficiente de geometrias complexas (DENARDI, 2021; AHMED et al., 2022).

Por sua vez, a usinagem CNC, com ênfase no torneamento, permanece como uma das tecnologias mais consolidadas na manufatura industrial. Ela é amplamente reconhecida por oferecer elevada precisão dimensional e excelente acabamento superficial, sendo especialmente eficaz na produção de peças com geometrias cilíndricas (TZENG et al., 2009; PALANIAPPAN et al., 2020). No entanto, suas limitações incluem a menor adaptabilidade a formas complexas e os impactos ambientais relacionados ao uso de fluidos de corte e ao desperdício de material (SHANKAR; MOHANRAJ; PONAPPA, 2017).

Diante desse panorama, torna-se fundamental uma análise comparativa entre os processos de L-PBF e usinagem CNC, sobretudo em aplicações críticas, como a fabricação de componentes da transmissão de veículos elétricos. Nesses casos, a precisão dimensional e as propriedades mecânicas das peças são fatores determinantes para a confiabilidade e o desempenho do sistema. Eventuais desvios dimensionais podem comprometer o acoplamento entre componentes, reduzir a eficiência energética e até provocar falhas funcionais (ROCKENBACH et al., 2016).

Este estudo visa comparar a precisão dimensional e o comportamento mecânico de componentes fabricados em aço inoxidável AISI 316L por ambos os processos. A liga foi escolhida devido à sua ampla aplicação em ambientes industriais agressivos e ao seu bom desempenho em processos de manufatura aditiva (PAPKE e MERKLEIN, 2020; WANG et al., 2021). A investigação inclui também aspectos econômicos e produtivos de cada técnica, permitindo uma análise holística para a escolha do processo mais adequado à produção de protótipos ou peças finais para veículos elétricos.

2. EXPERIMENTAL

As peças utilizadas neste estudo foram fabricadas por dois diferentes processos de fabricação: a manufatura aditiva por fusão a laser em leito de pó (L-PBF) e a usinagem CNC. Em ambos os processos, foi empregado o mesmo material base, o aço inoxidável AISI 316L, com o objetivo de garantir a comparabilidade entre os resultados obtidos. Para a fabricação por L-PBF, utilizou-se pó metálico com composição química especificada pelo fornecedor, contendo predominantemente ferro, cromo, níquel e molibdênio. Já para a usinagem, foram adquiridas barras maciças do mesmo material, também com composição certificada.

Inicialmente, realizou-se a engenharia reversa do componente a ser produzido, por meio de digitalização tridimensional com o braço articulado Edge FaroArm. A nuvem de pontos capturada foi processada via software específico, gerando uma malha de referência no formato STL. A partir dessa malha, foi construído um modelo 3D no software CAD, que serviu tanto para o planejamento da manufatura aditiva quanto para a programação CAM da usinagem.

A fabricação por L-PBF foi realizada no Instituto SENAI de Inovação em Manufatura e Laser, localizado em Joinville-SC, utilizando uma máquina Concept Laser M2 Cusing. O planejamento do processo foi feito via software, incluindo o posicionamento das peças no substrato e a definição dos parâmetros de processo. Foi fabricado o corpo de prova, utilizando os seguintes parâmetros: potência do laser de 200 W, velocidade de varredura de 1200 mm/s, espessura de camada de 45 μ m, distância entre passadas (*hatching*) de 0,105 mm e estratégia de varredura em ilhas de 5 $\times$ 5 mm com rotação de 45°. Após a fabricação, as peças foram submetidas a tratamentos térmicos de alívio de tensões (540 °C por 6 horas) e solubilização (1050 °C por 2 horas). A separação da peça do substrato foi realizada por eletroerosão a fio, seguida de usinagem em torno e fresadora, conforme exigido pelas normas para a preparação dos corpos de prova.

O processo de usinagem foi conduzido nos laboratórios do Centro Universitário SENAI/SC campus Joinville, em um centro de torneamento CNC ROMI GL 250M com ferramenta acionada. A programação CAM foi desenvolvida utilizando o mesmo modelo CAD gerado na engenharia reversa. As peças foram usinadas a partir de barras cilíndricas de AISI 316L, com dimensões adequadas para a produção do componente e dos corpos de prova. Para a usinagem dos dentes da engrenagem, foi necessária a fabricação de uma ferramenta específica.

Na etapa de análise dimensional, ambas as peças foram digitalizadas utilizando uma nuvem de 850.000 pontos, garantindo alta precisão e eficiência estatística na comparação com o modelo CAD. A tolerância nominal adotada foi de $\pm 0,1$ mm, sendo os desvios representados por cores: mais quentes (do amarelo ao vermelho) indicam excesso de material, e mais frias (do verde ao azul), ausência de material.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1a apresenta a análise dimensional do componente fabricado por L-PBF, enquanto a Figura 1b mostra os resultados da peça produzida pela usinagem CNC. Observa-se que o componente usinado apresenta menor quantidade de pontos fora da tolerância, evidenciado pela baixa presença de regiões com coloração extrema. No entanto, os desvios ocorrem de forma aleatória ao longo da peça, sem um padrão definido. Por outro lado, a peça obtida por L-PBF apresenta um comportamento distinto: praticamente todos os pontos exibem sobremetal, independentemente da geometria, caracterizando um desvio sistemático típico da manufatura aditiva.

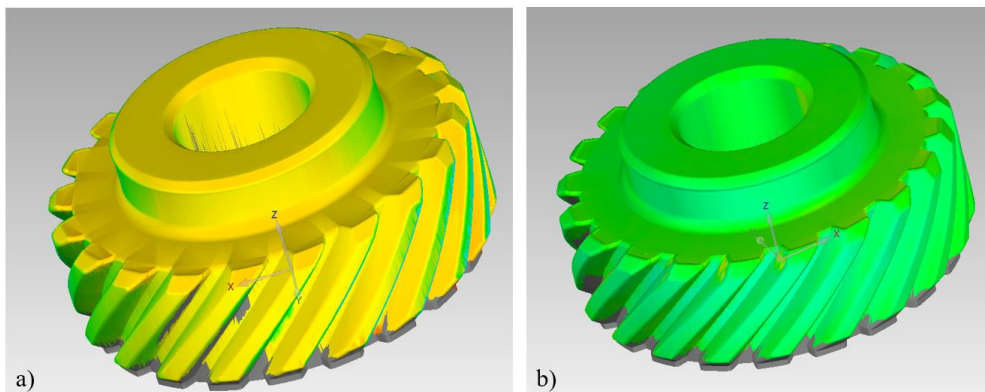


Figura 1 – Análise dimensional dos corpos de prova: a) componente fabricado por L-PBF e b) componente fabricado por torneamento CNC

A análise evidencia que, embora a usinagem apresente melhor aderência à tolerância dimensional, seus desvios são mais imprevisíveis, dificultando ajustes corretivos. Ademais, os desvios mais críticos concentram-se em regiões funcionais, como os dentes da engrenagem, o que pode comprometer o desempenho da peça. Em contraste, os desvios no componente aditivo são previsíveis e seguem um padrão, o que pode favorecer a aplicação de correções direcionadas no processo.

A Figura 2 reforça essas observações. Na Figura 2a, referente ao L-PBF, apenas 21,14% dos pontos estão dentro da tolerância, mas 70,55% concentram-se em uma faixa estreita de sobremetal entre +0,20 mm e +0,30 mm. Já a Figura 2b, relativa à usinagem CNC, indica 51,40% dos pontos dentro da tolerância, com uma dispersão significativa: 11,94% apresentam sobremetal e 36,62% indicam ausência de material. Essa distribuição reforça a maior variabilidade dos desvios na usinagem.

Comparando os processos, conclui-se que, enquanto a usinagem oferece maior precisão pontual, ela apresenta desvios aleatórios, especialmente problemáticos em geometrias complexas. Em contrapartida, o processo L-PBF, mesmo com maior quantidade de pontos fora da tolerância, revela um padrão sistemático e previsível. Essa diferença pode ser atribuída à natureza dos processos: a usinagem é diretamente influenciada pelas condições operacionais da ferramenta de corte, enquanto a manufatura aditiva, por operar em camadas, tende a apresentar desvios mais consistentes e repetitivos.

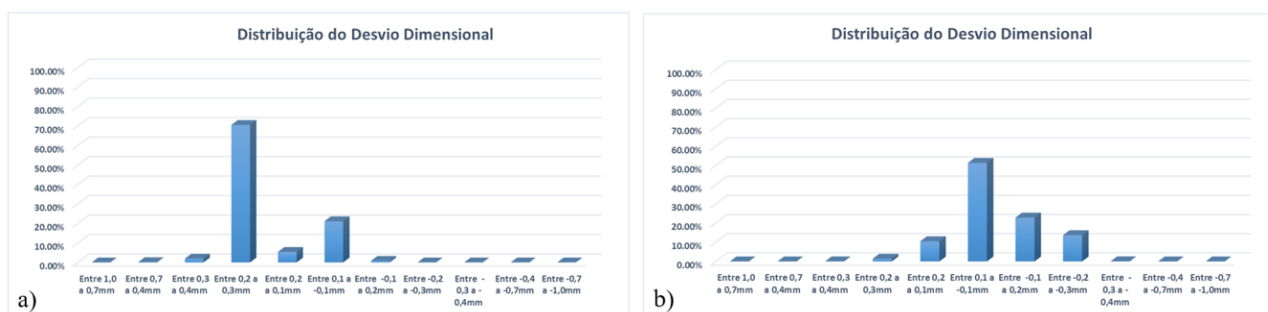


Figura 2 - Distribuição percentual dos desvios dimensionais dos componentes em relação à tolerância nominal: (a) componente fabricado por L-PBF; (b) componente fabricado por torneamento CNC.

A Figura 2a, apresenta a distribuição percentual dos pontos do componente fabricado por L-PBF em diferentes faixas de tolerância dimensional. Observa-se que apenas 21,14% dos pontos estão dentro da faixa nominal de $\pm 0,1$ mm. Entretanto, uma análise detalhada revela que a maior parte dos desvios (70,55%) está concentrada em uma faixa restrita de sobremetal, entre +0,20 mm e +0,30 mm, o que reforça as observações visuais previamente discutidas.

Por sua vez, a Figura 2b, referente ao componente produzido por usinagem CNC (torneamento), mostra que 51,40% dos pontos permanecem dentro da tolerância especificada. No entanto, destaca-se uma dispersão significativa dos desvios:

11,94% dos pontos excedem o limite superior (indicando sobremetal), enquanto 36,62% estão abaixo do limite inferior (indicando falta de material). Essa distribuição evidencia uma maior variabilidade nos erros dimensionais quando comparada ao processo aditivo.

Ao se comparar os dois métodos de fabricação, observa-se que, apesar de a usinagem CNC demonstrar maior conformidade com o modelo CAD, os desvios se apresentam de maneira aleatória ao longo da peça. Essa variabilidade é particularmente crítica em áreas de maior complexidade geométrica, como os dentes da engrenagem, onde foram registradas tanto adições quanto remoções de material fora dos limites aceitáveis.

Em contraste, o processo aditivo por L-PBF, ainda que resulte em uma maior quantidade de pontos fora da tolerância, apresenta um comportamento dimensional mais sistemático. A predominância de sobremetal em uma faixa específica sugere um padrão previsível de desvio, o que pode ser explorado de forma positiva para a implementação de estratégias de correção direcionadas ao longo do processo de fabricação.

Acredita-se que a aleatoriedade dos desvios na usinagem esteja relacionada à ação direta da ferramenta de corte, cujas variações operacionais — como desgaste, vibração ou parâmetros de corte — afetam de forma não uniforme o acabamento da peça. Já na manufatura aditiva, a construção em camadas favorece uma repetibilidade maior dos desvios, gerando resultados mais consistentes e característicos do próprio método.

4. CONCLUSÃO

Ao comparar o resultado dimensional obtido em ambos os componentes avaliados, percebe-se uma porcentagem maior de pontos dentro da faixa de tolerância determinada no componente usinado. No entanto, considerando que ambos os processos requerem correções para atingir a precisão dimensional desejada, o componente fabricado por L-PBF demonstra maior potencial de ajustabilidade, uma vez que os desvios apresentados seguem um padrão sistemático, o que favorece a aplicação de estratégias corretivas mais direcionadas.

Durante a caracterização mecânica, observou-se que as amostras produzidas por L-PBF apresentaram baixa densidade volumétrica, o que resultou em comportamento frágil nos ensaios de tração e impacto. Com base em estudos prévios conduzidos por pesquisadores da instituição responsável pelo trabalho, recomenda-se o aumento da potência do feixe laser de 200W para 400W e a redução da velocidade de varredura de 1200 mm/s para 900 mm/s, a fim de melhorar a qualidade das peças produzidas por esse processo.

Em termos de custo e tempo de fabricação, o processo de usinagem mostrou-se 12,7% mais caro e 359% mais lento em comparação ao processo de L-PBF. Esses valores se justificam pela necessidade de aquisição de uma ferramenta específica para a usinagem dos dentes da engrenagem analisada.

Assim, o processo de manufatura aditiva por L-PBF se mostrou uma alternativa mais ágil e econômica para a fabricação de protótipos e amostras únicas. Contudo, para produções em maior escala, os custos da ferramenta de usinagem seriam diluídos ao longo das unidades fabricadas. Estima-se que, a partir de duas unidades, o custo total da usinagem se tornaria inferior ao da manufatura aditiva, e a partir de quatro unidades, o tempo de fabricação também passaria a ser mais vantajoso no processo subtrativo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão pela participação ativa dos estudantes e professores do UniSENAI/SC – Campus Joinville, cuja dedicação e entusiasmo foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. O comprometimento de todos contribuiu de forma decisiva para os resultados alcançados e para a concretização deste estudo.

6. REFERÊNCIAS

- Ahmed, N. et al. 2022. Effect of laser power and scanning speed on porosity and microstructure in laser powder bed fusion. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 75, p. 572–580.
- Denardi, R. A. 2021. “Estudo de parâmetros de manufatura aditiva por L-PBF para fabricação de componentes em AISI 316L”. Joinville: Instituto SENAI de Inovação em Manufatura e Laser.
- Frazier, W. E. 2014. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 23, n. 6, p. 1917–1928, 2014.
- Francis, C. et al. 2021. Environmental impact of ICE vs EV conversions: A lifecycle assessment study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 138, p. 110598.
- Palaniappan, S. et al. 2020. Investigation on the effects of machining parameters in CNC turning of stainless steel using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, v. 33, p. 1148–1153.
- Papke, T.; Merklein, M. 2020. Processing of 316L stainless steel using selective laser melting and post heat treatment for high-performance applications. *Additive Manufacturing*, v. 32, p. 101029.
- Rockenbach, M. et al. 2016. Avaliação dimensional de próteses cranianas fabricadas por usinagem e manufatura aditiva. *Revista Matéria*, v. 21, n. 3, p. 896–908.

Shankar, K.; Mohanraj, T.; Ponappa, K. 2017. Environmental effects of machining processes: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 165, p. 701–717.

Tzeng, Y. et al. 2009. Optimization of precision turning with CNC machines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 45, n. 11–12, p. 1196–1204.

Volpato, N. 2017. *Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D*. São Paulo: Blucher.

Wang, P. et al. 2021. Micro gear manufacturing by laser powder bed fusion of 316L stainless steel: Design, fabrication, and characterization. *Additive Manufacturing*, v. 48, p. 102366.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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