

USINABILIDADE DA LIGA Ti6Al4V FABRICADA POR FUSÃO SELETIVA A LASER

Saulo Melotti, saulo.melotti@yahoo.com.br^{1,3}

Gustavo Reis de Ascensão, gustavo.ascencao@sc.senai.br²

Alexsandro Rabelo, alexsandro.rabelo@sc.senai.br¹

Kassim S. Al-Rubaie, kassim.alrubaie@sociesc.com.br³

André Marcon Zanatta, andre.zanatta@sc.senai.br¹

Edson Costa Santos, edson.costa@sc.senai.br²

Bruno Paulo Zluhan, bruno.zluhan@sc.senai.br²

¹Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura, Rua Arno Waldemar Döhler, 957 - Zona Industrial Norte. Joinville – SC

²Instituto SENAI de Inovação em Laser, Rua Arno Waldemar Döhler, 957 - Zona Industrial Norte. Joinville – SC

³Centro Universitário SOCIESC, UNISOCIESC, Rua Albano Schmidt, 3333, Joinville, SC.

Resumo: Este trabalho apresenta o estudo da usinabilidade no processo de fresamento da liga Ti6Al4V produzida por fusão seletiva a laser (FSL) e aborda alguns aspectos relevantes para a integração entre plataformas de manufatura aditiva e subtrativa, combinação atualmente chamada de manufatura híbrida. A influência da forma de processamento do material na usinagem foi avaliada em termos do desgaste de ferramenta, forças de corte, forma dos cavacos e rugosidade superficial. Dados comparativos de usinabilidade para o Ti6Al4V processado de maneira convencional (conformado mecanicamente) e por FSL (tratado e não-tratado termicamente para alívio de tensões), foram gerados e correlacionados com as características microestruturais do material nas três condições. Como resultado, foi identificado que as alterações microestruturais, o aumento da dureza e as tensões residuais oriundas do processamento por FSL ocasionaram poucas diferenças no comportamento de usinagem. Assim não se fez necessária a otimização de parâmetros de corte para o fresamento da nova condição da liga no intervalo de parâmetros de corte utilizados.

Palavras-chave: Usinabilidade, Ti6Al4V, Fresamento, Fusão Seletiva a Laser, Manufatura Híbrida.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Olakanmi (2013) e Kempen et al. (2011), a Fusão Seletiva a Laser (FSL) é definida como processo de fabricação que permite construir peças funcionais com liberdade de forma através da fusão sequencial por feixe de laser de finas camadas de pó metálico, previamente depositadas sobre uma base de construção (substrato). As vantagens do emprego desta técnica relacionadas por Marques (2014) são: fabricação de peças inteiriças com elevada complexidade geométrica com simples preparação de máquina, capacidade para fabricação de peças com *design* customizado, peças com alívio de massa sem perda de resistência mecânica (otimização topológica) e possibilidade de redução do tempo de fabricação em vista da complexidade das peças e das restrições dos processos convencionais. Segundo Brinksmeier et al (2010), na FSL são processados materiais padronizados como aços inoxidáveis 316L, 17-4PH, aços maraging, aços para trabalho a quente (1.2709 e 1.2344), diferentes classes de alumínio, titânio e ligas a base de níquel e cobalto.

Vários autores (Rabelo, 2016; Marques, 2014; Kempen, 2011 e Brinksmeier et al. 2010) salientam que no processamento por FSL ocorrem altas taxas de resfriamento do material fundido. Estas são explicadas pelo grande diferencial de temperatura gerado entre camada fundida e substrato (camadas já construídas da geometria e placa de construção) em função do curto espaço de tempo de interação do laser com a matéria-prima. Este fenômeno contribui para uma estrutura cristalina refinada (pequenos tamanhos de grãos). Dependendo da estratégia e parâmetros de fabricação, dimensões da amostra pode haver o aparecimento de tensões residuais térmicas. Em alguns casos o valor da tensão residual ultrapassa a tensão limite de ruptura do material ocasionando trincas e deslocamento das camadas da peça já construídas.

Brinksmeier et al. (2010) mencionam que na fabricação por FSL, os parâmetros de processo, limitações e possibilidades de uso futuro das peças estão atrelados ao comportamento térmico da liga metálica. A precisão de fabricação é de aproximadamente 0,04 a 0,08mm, dependendo da geometria e posição da peça durante a produção. De acordo com a aplicação, pode ser necessária uma etapa de pós-processamento da peça, visando assegurar precisão da forma, dimensão, adequação de propriedade mecânica e qualidade superficial. Geralmente o pós-processamento é feito através de tratamentos térmicos e usinagem.

Rabelo (2016) estudou uma liga de ultra alta resistência (aço Maraging 300) produzida por FSL, no estado como fabricado e em diferentes condições de tratamento térmico, encontrando resistências mecânicas similares entre os aços Maraging 300 produzidos por FSL e os aços produzidos pelo processo convencional. Esta liga apresenta no estado como-fabricado, estrutura martensítica supersaturada de elementos de liga, podendo ser usinada no estado como-fabricado FSL, com dureza de aproximadamente 370HV e 1200MPa de limite de resistência. Estas características fazem com que o

material possa ser usinado sem grandes dificuldades. O tratamento térmico de envelhecimento, eleva a dureza e a resistência do material para cerca de 600HV e 2000MPa respectivamente, com baixas distorções dimensionais, visto a microestrutura inicial e final, ser martensítica.

Com relação à fabricação de peças de titânio por usinagem, Maia (2015) e Almeida Jr. (2011) explicam que este material apresenta algumas particularidades relacionadas às suas propriedades físicas e químicas. A baixa condutividade térmica dificulta a dissipação do calor gerado na usinagem, que contribui para o desgaste prematuro da ferramenta de corte, devido à temperatura excessiva. O baixo módulo de elasticidade, que durante a usinagem resulta em alta recuperação elástica do material, pode afetar a precisão das peças e gerar vibrações. Na usinagem de peças de parede fina ocorre que a peça sofre deflexão tornando a remoção de material ineficiente (volume de material removido é menor que o programado). Quanto menor a dureza e maior a reatividade da liga, maior a adesão de material na ferramenta de corte, podendo ocorrer difusão. Assim, a aplicação de técnicas aditivas para construção das pré-formas, proporciona melhor utilização dos processos e recursos, e reduz os desafios associados à usinagem em função da menor quantidade de material a ser removido.

Yamazaki (2016) menciona em seu trabalho que a integração dos processos aditivos e subtrativos em uma única máquina visa maior produtividade através da redução do *lead time* (tempo de transformação da matéria-prima em produto), *setup* de máquina e preparação de material. Este autor ainda explica que o método é mais eficiente na produção de pequenos lotes de peças cujo material é de difícil corte, tal como ligas aeroespaciais, materiais de alta dureza e resistência mecânica usados no setor energético, produção de ferramentas e componentes de alta precisão e ligas especiais comuns na fabricação de dispositivos médicos. Karunakaran et al. (2010) afirmam que os ganhos de tempo e redução de custos do processo híbrido podem ser atribuídos à redução do esforço de programação NC e à eliminação da usinagem de desbaste.

Assim, o presente artigo tem por objetivo estudar a usinabilidade no processo de fresamento da liga Ti6Al4V produzida por fusão seletiva a laser (FSL) e avaliar aspectos relevantes para a integração entre plataformas de manufatura aditiva e subtrativa.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido segundo o fluxograma de atividades apresentado na Fig. (1).

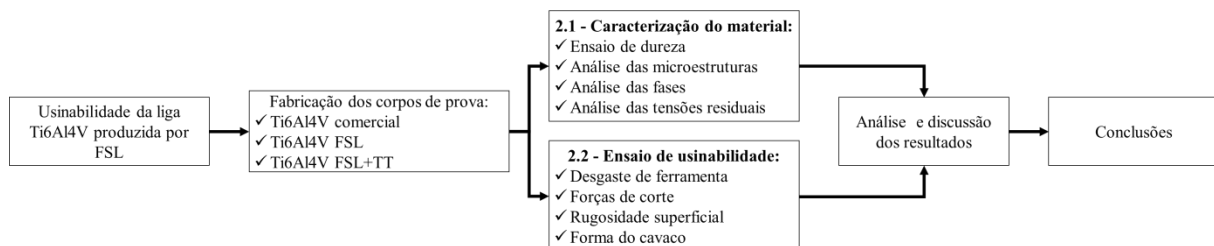


Figura 1. Fluxograma experimental.

Os corpos de prova para o ensaio de usinabilidade foram fabricados utilizando o material Ti6Al4V processado de três maneiras diferentes: Ti6Al4V comercial, Ti6Al4V produzido pelo processo de FSL e Ti6Al4V produzido por FSL seguido de tratamento térmico para alívio de tensões na forma e dimensões apresentadas na Fig. (2).

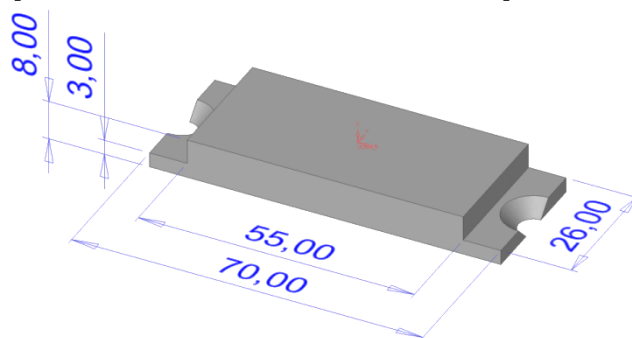


Figura 2. Corpo de prova utilizado nos ensaios de usinabilidade.

O tratamento térmico (TT) para alívio de tensões residuais do Ti6Al4V produzido por FSL foi realizado em câmara a vácuo na temperatura de 675°C mantida por 1 hora. O resfriamento também ocorreu em vácuo a uma taxa de $\leq 2,5$ °C/min.

2.1. Caracterização do material

A caracterização do material nos seus diferentes estados de processamento foi realizada através de ensaio de dureza micro Vickers, análise das microestruturas, fases e tensão residual.

A dureza dos três estados do material foi verificada por meio de perfis ao longo da seção transversal de cada amostra. A carga utilizada foi de 500 gramas e o sentido da sequência de dez medidas foi do topo para base das amostras, mantendo-se 0,2mm de distância da superfície ao centro da primeira indentação e 0,5mm entre indentações.

A análise microestrutural foi realizada via microscopia óptica e eletrônica de varredura nos respectivos equipamentos: microscópio óptico marca ZEISS modelo Axio Imager.M2m e microscópio eletrônico de varredura (FESEM) marca ZEISS modelo SUPRA 55VP. Utilizou-se reagente Kroll (solução composta por 10ml HF+5ml HNO₃+85ml H₂O₂) no ataque químico das amostras para revelação das microestruturas. Na Figura (3), a seção A-A indica a região dos corpos de prova onde foram analisadas a dureza e a microestrutura.

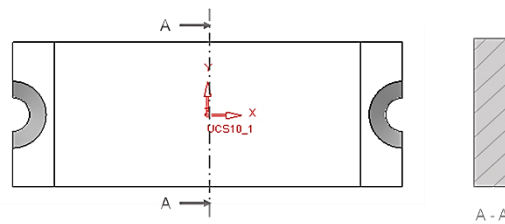


Figura 3. Seção transversal das amostras.

O estudo das fases e da tensão residual para cada condição do material foi realizado via difração de raios X (DRX) no equipamento da marca PANalytical modelo EMPYREAN utilizando um tubo de cobre (Cu). A preparação da amostra para estes ensaios consistiu na remoção de uma camada superficial de 0,1mm por fresamento e, posteriormente decapagem de uma região de 10mm² localizada no centro da amostra, (aproximadamente 0,2mm de profundidade) utilizando reagente Kroll como decapante. As medições foram realizadas apenas na região decapada para evitar efeitos de preparação da amostra. Nos dados de tensão residual capturados aplicou-se o método de GAUSS para ajustar a curva e caracterizar o pico de difração.

2.2. Ensaio de usinabilidade

Os ensaios de usinabilidade foram realizados em um centro de usinagem HERMLE C42 U e utilizaram-se fresas toroidais da marca WIDIA, de 4 milímetros de diâmetro e 0,5 milímetros de raio de ponta, recobertas com TiAlN (uma para cada ensaio). O conjunto de parâmetros de corte, foi definido com base nas especificações do fabricante das ferramentas: profundidade de corte (a_p) de 2mm, penetração de trabalho (a_e) de 0,4mm, avanço por gume de corte (f_z) de 0,016mm/rev e velocidade de corte (v_c) de 55m/min. Na refrigeração da ferramenta utilizou-se emulsão em abundância composta de água e 10% de óleo QUAKER cool 7040 BF TP.

A condição de parada seguida durante os ensaios foi comprimento de corte (L_c) igual a 500 metros e as variáveis avaliadas foram: desgaste de ferramenta, forças de usinagem, rugosidade superficial e forma do cavaco. Todos os dados foram capturados a cada 50 metros de corte, com exceção dos cavacos para análise de forma, os quais foram coletados somente nos intervalos $0 < L_c < 50$ (início), $200 < L_c < 250$ (meio) e $450 < L_c < 500$ (fim). Com vistas a uma maior confiabilidade dos resultados, o planejamento experimental contemplou três repetições para cada condição do material e um conjunto de parâmetros, totalizando nove ensaios.

Analisou-se a evolução do desgaste de flanco nas arestas principal e secundária da ferramenta. Este foi quantificado no software Power Point 2016 com base em imagens capturadas no microscópio óptico marca KERN modelo KERN μ -view.

As forças de corte foram medidas com o dinamômetro multicomponente da marca Kistler modelo 9257B e o software para aquisição de forças Dynoware, em um comprimento de 78 milímetros divididos em três passes (em torno de 18 segundos de captura de dados). Obtiveram-se os gráficos das componentes da força de usinagem nas direções X, Y e Z utilizando uma taxa de aquisição de 5000 pontos por segundo, o que resulta na captura de aproximadamente 68 pontos por rotação da ferramenta. O tratamento dos dados de força foi feito no software MATLAB R2014a. Desconsiderou-se o primeiro passe para garantir que a força medida foi em relação ao a_e de 0,4mm e obteve-se a média da força e o desvio padrão em cada direção considerando apenas 8 segundos do total do tempo de aquisição.

A Figura (4) permite observar com detalhes a montagem do dinamômetro no centro de usinagem e todo o aparato complementar necessário para aquisição das forças de usinagem. A fixação do corpo de prova sobre o dinamômetro foi feita com um gabarito.

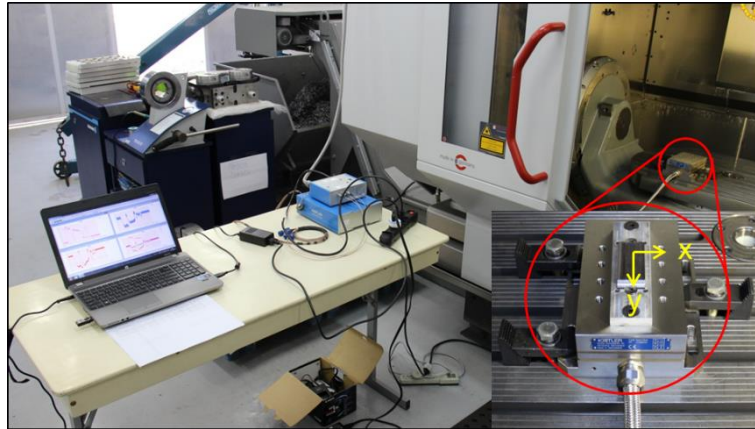


Figura 4. Montagem do aparato experimental.

A rugosidade das superfícies usinadas foi medida em um rugosímetro de bancada Taylor Hobson modelo FORM TALY SURF na mesma direção de avanço da ferramenta. A análise da forma dos cavacos foi baseada na observação de fotos obtidas por microscopia óptica no equipamento Estereoscópio marca ZEISS modelo Discovery.V8.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Brinksmeier et al. (2010) afirmam com base na norma AISI B211.1-1986, que a dureza e a tensão residual são duas das principais propriedades que influenciam a integridade superficial de peças durante a usinagem. A Figura (5) apresenta os perfis de dureza encontrados para as diferentes condições do Ti6Al4V.

Os autores Montevecchi et al. (2016) e Sartori et al. (2016) ressaltam que a maior dureza do material produzido por fusão seletiva a laser é justificada pela presença de estrutura α' (martensítica) decorrente do rápido resfriamento característico dos processos aditivos. Observa-se que quando submetido ao alívio de tensões, o Ti6Al4V FSL sofre uma pequena redução da dureza.

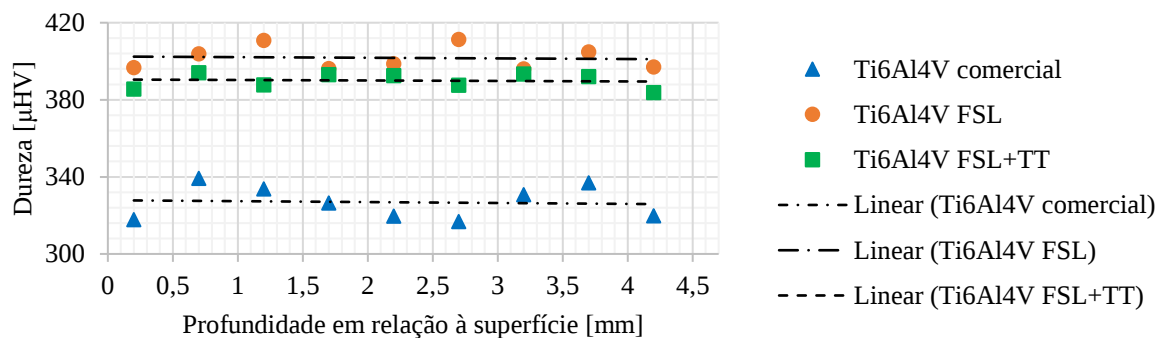


Figura 5. Perfis de dureza micro Vickers.

O Ti6Al4V é um material pertencente a classe das ligas $\alpha+\beta$. Maia (2015) salienta que, nesta categoria, as duas fases (α e β) estabilizadas pela adição de Alumínio (até 6%) e Vanádio (até 4%) coexistem na microestrutura do material.

Normalmente, a produção do titânio pelo método convencional inicia-se com a fusão da liga (processo de fundição), o que resulta em uma microestrutura característica de solidificação. Posteriormente o material passa por processos de conformação mecânica para ser transformado nos perfis comerciais (chapas, barras, tarugos). Na Figura (6a), observa-se que o material produzido por processos convencionais apresenta fases bem definidas, sendo α a fase de cor mais escura, componente da matriz, e β a fase de cor mais clara, em menor quantidade. A fase β é coerente com a matriz, explicando a menor dureza deste material. A Figura (6b), apresenta uma estrutura refinada, caracterizada pela presença da fase martensítica α' . Os pequenos pontos claros podem ser a fase β precipitada. Após o tratamento térmico, Fig. (6c), observou-se uma estrutura menos refinada, com aumento no tamanho das ripas de martensita e possivelmente da quantidade de fase β . Essas alterações são responsáveis pela redução da dureza do material tratado termicamente.



Figura 6. Microscopia eletrônica de varredura: (a) Ti6Al4V comercial - ampliação 5000X, (b) Ti6Al4V FSL - ampliação 30000X e (c) Ti6Al4V FSL+TT - ampliação 30000X.

Complementou-se a caracterização microestrutural do material com análises de fase via DRX. As fases foram identificadas com base nas cartas CIF COD 9008517 e 9008554. Nos difratogramas da Fig. (7) os picos destacados na cor verde são fase α e os picos na cor amarela podem ser α , β ou então uma junção das duas fases. De modo geral, ambas as fases coexistem nos três estados do material estudado.

As principais observações em relação as medições de fases são: o material comercial apresenta uma possível texturização, visto que o pico de maior intensidade deveria estar localizado em 2Theta igual a $40,18^\circ$. Considera-se que o pico situado em aproximadamente $38,32^\circ$, cuja intensidade não é máxima, é formado pela difração das fases α e β . Para o Ti6Al4V FSL, pode-se dizer que a forma de processamento do material alterou a forma e intensidade dos picos. Na posição $38,52^\circ$, tem-se uma redução na contagem do pico se comparado com o material comercial. Este resultado é coerente com o que foi observado na análise microestrutural: estrutura refinada e quantidade reduzida da fase β . Após o alívio de tensões, o difratograma do Ti6Al4V FSL+TT indicou maior contagem do pico localizado em $38,52^\circ$, comportamento que é explicado pelo aumento da quantidade de fase β .

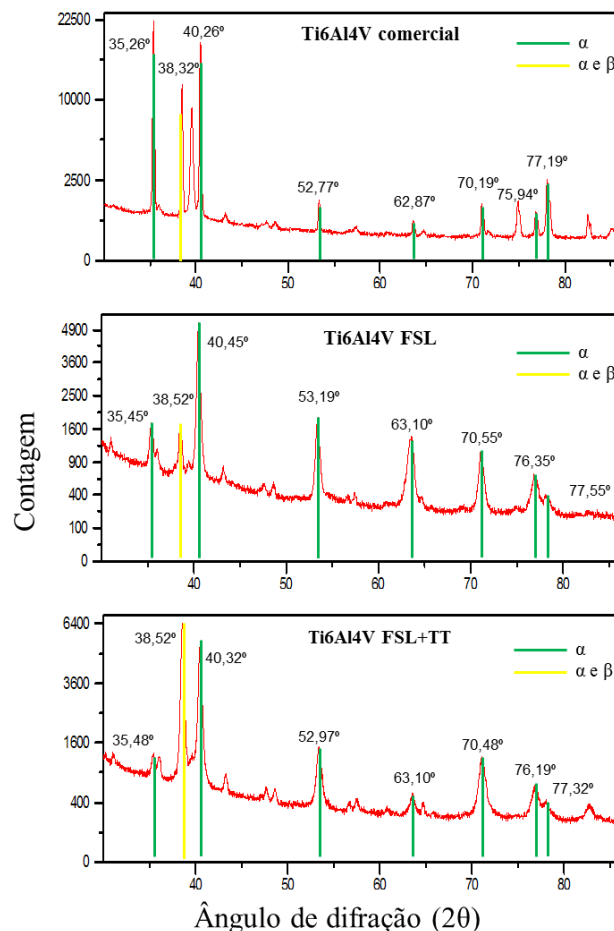


Figura 7. Difratorômetro das amostras: Comercial, FSL e FSL+TT.

O estado de tensões internas para as três condições da liga estudada é apresentado na Fig. (8). Os ângulos de 0° e 90° representam direções em que se mediu a tensão. A análise do Ti6Al4V comercial, comprovou o baixo nível de tensão residual, característico da forma de processamento deste material. Na direção 0° o valor da tensão residual foi -7,9MPa e para 90° mediu-se 7,2MPa com os respectivos desvios padrões de 6,1MPa e 8MPa. O titânio com estrutura cristalina bruta de fusão seletiva a laser apresentou na direção 0° tensões residuais trativas da ordem de 53,9MPa com desvio padrão de 23,7MPa. Em 90°, a tensão mostrou-se levemente compressiva (-3MPa), com desvio padrão de 27,1MPa. Para o Ti6Al4V FSL+TT, os valores de tensão residual medidos são de natureza compressiva e elevada intensidade. A tensão residual e desvio padrão para as direções 0° e 90° foram respectivamente: -163,2MPa, 49,6MPa e -152,6MPa, 42,8MPa.

As tensões compressivas, surgidas após o alívio de tensão, podem estar associadas a distorções na rede cristalina devido ao aumento da quantidade da fase β no material, citado anteriormente na identificação de fases via DRX. O volume da célula unitária cúbica de corpo centrado (titânio β) é maior se comparado com a célula unitária hexagonal compacta (titânio α), onde esta transformação de fase pode ter gerado tensões nos reticulados cristalinos, justificando estes valores encontrados. Estes estão sendo investigados em novos estudos.

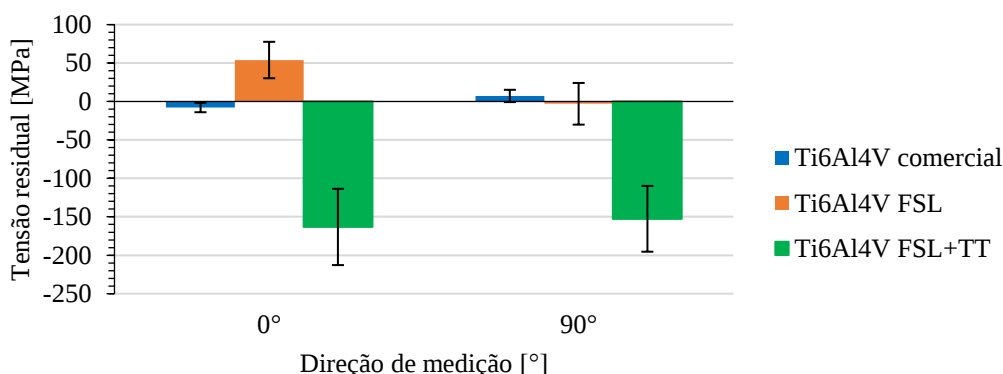


Figura 8. Gráfico com a tensão residual da amostra: Comercial, FSL e FSL+TT.

O trabalho efetivo de corte do material realizado pela ferramenta, acarreta em desgaste e sua progressão implica na perda de qualidade durante a usinagem. A Figura (9) demonstra a evolução do desgaste de flanco na aresta principal da ferramenta (lateral da fresa) em função do comprimento usinado. Cada ponto no gráfico corresponde à média do desgaste dos três ensaios realizados e a barra de erros representa o desvio entre as repetições. O desvio padrão mostrou-se maior para ambos os materiais produzidos por fusão seletiva a laser. O maior desvio padrão verificado para ambos os materiais produzidos por FSL, justifica-se pelo método utilizado e o erro humano associado ao processo de quantificação do desgaste e pelas características microestruturais, pois, segundo Vrancken et al (2012), a estrutura cristalina do material influencia no desgaste da ferramenta, uma vez que o processo de FSL confere ao material uma microestrutura refinada, metaestável, e com tensões térmicas residuais.

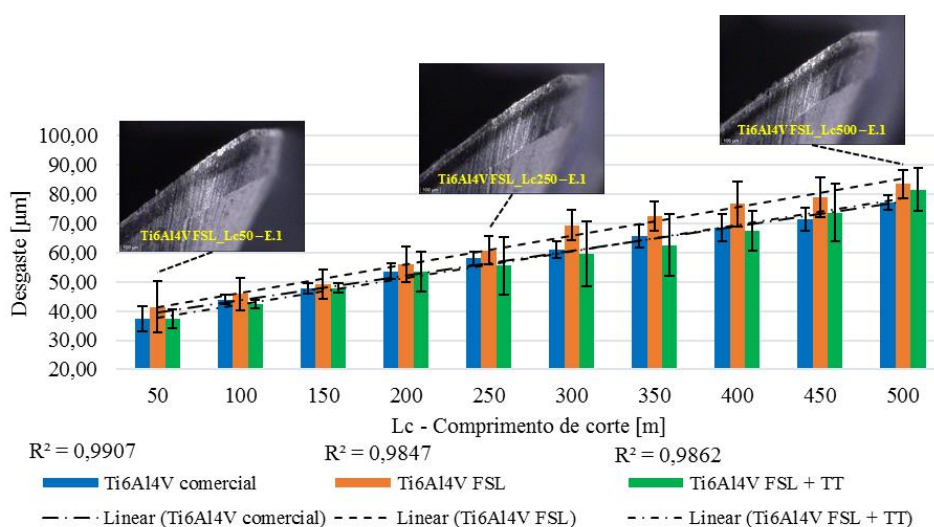


Figura 9. Comparativo da evolução do desgaste de flanco na aresta principal da ferramenta em função do comprimento de corte para as três condições do material.

O parâmetro R^2 (coeficiente de determinação) obtido diretamente no software Excel, fornece a relação da variação entre as variáveis Desgaste e Comprimento de corte. Quanto mais regular for a variação do desgaste com o comprimento de corte, mais próximo de 1 será o valor de R^2 e mais bem representado pela regressão linear será a evolução do desgaste. A taxa de crescimento do desgaste representada pela regressão linear, mostra-se levemente superior para o Ti6Al4V FSL. Quando realizado o alívio de tensões, o coeficiente angular da reta que representa o aumento do desgaste da ferramenta é reduzido e torna-se muito próximo ao do material comercial. Com o intuito de verificar se há realmente diferença entre as médias do desgaste na aresta principal das ferramentas, realizou-se uma análise estatística dos dados com aplicação do teste t, considerando significância de 5%. A análise não revelou diferença entre as médias do desgaste para as três condições do titânio.

Os resultados obtidos para o desgaste de flanco na aresta secundária (topo da ferramenta) são apresentados na Fig. (10). Em função do alto desvio padrão, não podem ser consideradas diferenças significativas na progressão do desgaste para os três estados do material.

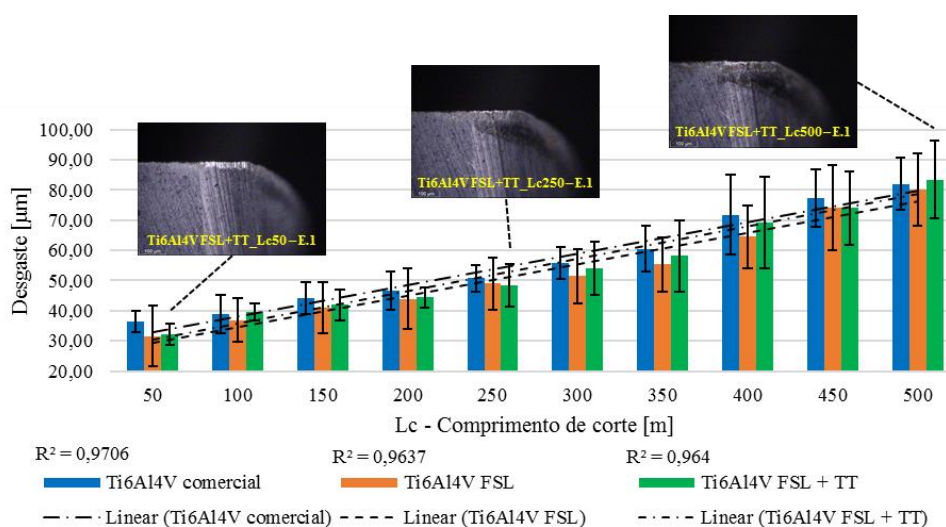


Figura 10. Comparativo da evolução do desgaste de flanco na aresta secundária da ferramenta em função do comprimento de corte para as três condições do material.

Sartori et al. (2016) explicam que uma pequena variação na porcentagem de fases ou tamanhos de grão para produtos fabricados por diferentes técnicas aditivas, representa uma variação significativa nas propriedades térmicas e mecânicas da liga. As forças de usinagem foram avaliadas e os resultados são apresentados no gráfico da Fig. (11).

Durante o fresamento do material comercial, a intensidade das forças no corte do material não aumenta significativamente com o comprimento usinado e o desvio padrão é de aproximadamente 5N para mais e para menos. Este comportamento é justificado pela homogeneidade microestrutural (fases bem distribuídas) e pela ausência da fase α' .

A tendência de aumento da força para fresar o material Ti6Al4V FSL mostra-se semelhante à do material obtido de forma convencional, porém com intensidade mais elevada em todos os pontos. O desvio padrão alterna de uma medição para outra e em alguns pontos, como, por exemplo: para Lc igual a 250 metros, chega perto de 25% da intensidade média da força no determinado comprimento. Isso demonstra o efeito da heterogeneidade da microestrutura do material produzido por fusão seletiva a laser na usinagem. A maior dureza deste material, faz com que as forças necessárias para seu cisalhamento sejam maiores.

Corroborando com os resultados descritos acima, Montevecchi et al. (2016) estudaram as forças de corte na operação de fresamento perimetral do aço AISI H13. Variaram o parâmetro de corte f_z (avanço por dente) e compararam o material produzido pelas técnicas aditivas LENS (Fabricação da Forma Final a Laser) e WAAM (Manufatura Aditiva por Soldagem a Arco com Arame) com o mesmo material forjado. Os autores também evidenciaram para todos os ensaios, aumento significativo das forças de usinagem no fresamento dos materiais processados pelas técnicas não convencionais.

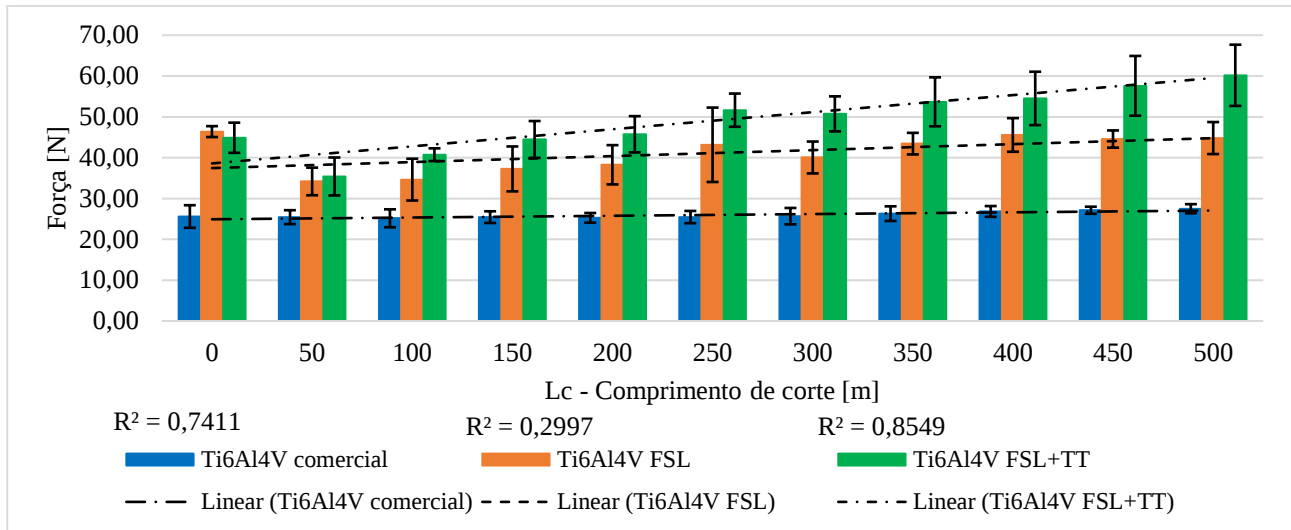


Figura 11. Força de usinagem.

Um fato interessante que ocorreu para o material fabricado por FSL com e sem alívio de tensões é a elevada intensidade da força nos 0 metros, ou seja, quando se fresou apenas 1,2mm. Sabe-se que mesmo com a injeção de gás inerte na câmara de fabricação da máquina de FSL, ainda existe uma pequena concentração de oxigênio na atmosfera e isso pode ocasionar óxidos na superfície do material durante a fusão. O mesmo fenômeno pode ocorrer durante o tratamento térmico realizado em vácuo. Este fenômeno pode ocasionar endurecimento da superfície das amostras, sendo uma hipótese plausível para a explicação dos valores elevados das forças no início de cada corpo de prova.

Os coeficientes angulares das linhas de tendência para os materiais convencional e Ti6Al4V FSL são muito próximos, alterando-se apenas a intensidade das forças. No entanto, quando comparados os materiais produzidos por FSL, verifica-se nos 0 metros de corte, com a ferramenta nova, que a energia necessária para remover material é praticamente a mesma. No entanto, nos 500 metros essa energia aumenta significativamente para o Ti6Al4V FSL que passou pelo tratamento de alívio de tensões. Para o titânio fabricado por fusão seletiva a laser vê-se que a força de usinagem é cerca de 80% maior ao longo de todo o ensaio se comparado com o material comercial. Para o caso do titânio produzido por FSL e tratado termicamente o acréscimo inicial é de 80% e nos 500 metros de usinagem a força necessária para cortar o material é aproximadamente 140% maior do que para o Ti6Al4V comercial. Supõem-se que este fenômeno possa estar relacionado ao estado de tensões residuais das peças e também à microestrutura, uma vez que a caracterização microestrutural mostrou, para o material com alívio de tensões, aumento da quantidade de fase β e presença de tensão residual de natureza compressiva com intensidade significativa.

Os resultados de rugosidade superficial medidos para cada comprimento de corte e na direção do avanço da ferramenta, assim como a análise de forma dos cavacos não proporcionaram interpretações satisfatórias. Os valores de rugosidade apresentaram altos desvio padrão e não possuíam tendência de crescimento. A forma dos cavacos foi muito semelhante para todos os comprimentos analisados. Entretanto, nos comprimentos de corte em que foram coletados os cavacos, capturaram-se fotos da superfície usinada, as quais são apresentadas na Fig. (12).

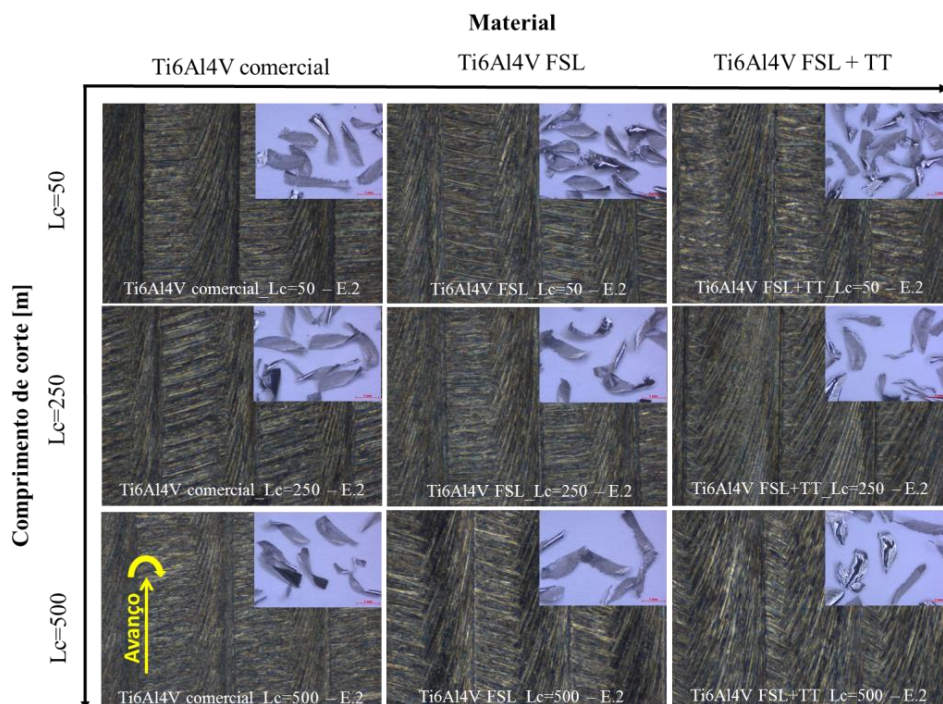


Figura 12. Superfície fresada pela aresta secundária da ferramenta e cavacos formados em cada situação.

A textura das superfícies explica o alto desvio dos valores de rugosidade, uma vez que dependendo da trajetória da ponteira do rugosímetro, podia se estar medindo apenas sobre as linhas verticais, inclinadas ou sobre ambas. A relação entre as marcas deixadas pela ferramenta na superfície usinada e o comportamento da força de corte foi melhor estudada. Na Figura (13), o perfil transversal (90° em relação ao sentido de avanço da fresa) das superfícies vistas na Fig. (12) para L_c igual 500 metros é analisado. As verificações do perfil foram realizadas no rugosímetro de bancada Taylor Hobson modelo FORM TALY SURF com uma ponteira específica para captura de ondulações.

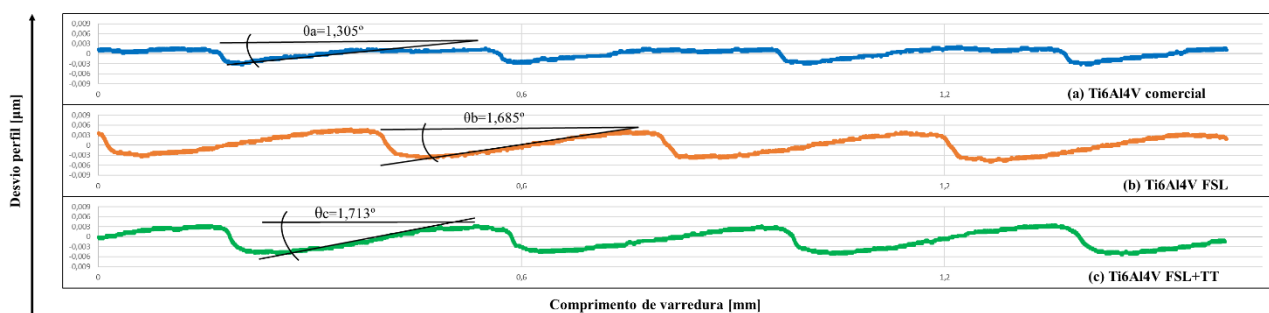


Figura 13. Perfil transversal da superfície fresada pela aresta secundária da ferramenta: $L_c = 500$ m.

As marcas deixadas pelo topo da ferramenta mostram-se diferentes em cada material. Na Figura (13), θ_a , θ_b e θ_c representam a deflexão aproximada da ferramenta durante o fresamento de cada material. Observou-se que quanto maior a força de usinagem, maior a deflexão da ferramenta e mais prejudicada é a rugosidade da superfície no sentido transversal. A rugosidade R_a medida 90° em relação a direção de avanço foi 1,0961 μm para o titânio comercial, 2,2838 μm para o titânio FSL e 2,4892 μm para o titânio FSL+TT. Na Tabela (1) são relatados para os três estados do material os valores do desvio total, sendo este a distância do pico mais alto ao vale mais profundo.

Medida / Material	Ti6Al4V comercial	Ti6Al4V FSL	Ti6Al4V FSL+TT
Mínimo (vale) [μm]	-3,35989	-4,99267	-4,79425
Máximo (pico) [μm]	2,02463	4,74026	5,05445
Desvio total [μm]	5,38452	9,73293	9,84870

Tabela 1. Desvio total nas medições do perfil superficial apresentados na Fig. (13).

4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como propósito estudar a usinabilidade da liga Ti6Al4V produzida por fusão seletiva a laser e verificar se a forma de processamento do material promove alterações no comportamento da usinagem. Os resultados dos ensaios de usinabilidade mostraram que: o desgaste de flanco na aresta principal de corte da fresa (lateral da ferramenta), com uma significância de 5% na análise dos dados, não apresenta diferença para as três condições de processamento do Ti6Al4V. O desgaste de flanco na aresta secundária de corte (topo da ferramenta), também não apresentou diferenças entre os estados do material estudado.

As forças de corte foram superiores para o Ti6Al4V produzido por FSL e tratado termicamente. Este comportamento necessita de estudos mais aprofundados para ser justificado, porém algumas hipóteses foram levantadas como, por exemplo: aumento na quantidade de fase β e presença de tensões residuais compressivas após o alívio de tensões, que dificultam o corte do material. A avaliação da rugosidade superficial não permitiu conclusões em função dos altos valores no desvio padrão das medições. Na análise dos cavacos não foram identificadas alterações significativas de forma, em comparações entre os comprimentos de corte para um mesmo material e nem nas comparações entre materiais.

Visto que as alterações microestruturais, de aumento da dureza e tensões residuais oriundas da forma de processamento, não promoveram no comprimento de corte avaliado, diferenças suficientemente grandes no comportamento de usinagem, não se fazendo necessária a otimização dos parâmetros de corte testados.

Conclui-se que os parâmetros de corte especificados pelo fabricante de ferramentas para a usinagem da liga Ti6Al4V processada de maneira convencional são também válidos para usinar esta mesma liga produzida pelo processo de fusão seletiva a laser.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os Institutos SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura e Laser pelo apoio na realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Almeida Jr. A. R., 2011. Fresamento em 5 eixos de impelidores de Ti6Al4V: Análise do processo em operação de desbaste e acabamento. Tese de mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- Brinksmeier, E., Levy, G., Meyer, D., Spierings, A.B., 2010. Surface integrity of selective-laser-melted components. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 59, pp. 601–606.
- Karunakaran, K.P., Suryakumar, S., Pushpa V., Akula, S., 2010. Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing. Journal Elsevier - Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Vol. 26, pp. 490–499.
- Kempen, K., Yasa, E., Thijs, L., Kruth, J. P., Van Humbeeck, J., 2011. Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel. Physics Procedia, Vol. 12, pp. 255–263.
- Maia, A. H., 2015. Titanium milling with minimum quantity lubrication and flood of coolant and impacts on the surface integrity. Dissertação (Mestrado), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- Marques, S., 2014. Estudo da influência da espessura da camada e velocidade do laser na microestrutura e propriedades de peças fabricadas por Fusão Seletiva a Laser em aço Maraging 300. Dissertação (Mestrado), Instituto Superior Tupy, Joinville.
- Montevecchi, F., Grossi, N., Takagi, H., Scippa, A., Sasahara, H., Campatelli, G., 2016. Cutting forces analysis in additive manufactured AISI H13 alloy. 7th HPC 2016 - CIRP Conference on High Performance Cutting, pp. 476 – 479.
- Olakanmia, E.O., 2013. Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al–Mg, and Al–Si powders: Effect of processing conditions and powder properties. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 213, pp.1387– 1405.
- Rabelo, A., 2016. Influência do tratamento térmico sobre a microestrutura e propriedades mecânicas do aço maraging C300 obtido por fusão seletiva a laser (FSL). Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis.
- Sartori, S., Bordin, A., Moro, L., Ghiotti, A., Bruschi, S., 2016. The influence of material properties on the tool crater wear when machining Ti6Al4V produced by Additive Manufacturing technologies. 7th HPC 2016 - CIRP Conference on High Performance Cutting, pp. 587 – 590.
- Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J. P., Humbeeck, J. V., 2012. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and Mechanical properties. Journal of Alloys and Compounds, pp. 177-185.
- Yamazaki, T., 2016. Development of A Hybrid Multi-tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining. 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII), pp. 81 -86.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

MACHINABILITY OF Ti6Al4V ALLOY FABRICATED BY SELECTIVE LASER MELTING

Saulo Melotti, saulo.melotti@yahoo.com.br^{1,3}

Gustavo Reis de Ascensão, gustavo.ascencao@sc.senai.br²

Alexsandro Rabelo, alexsandro.rabelo@sc.senai.br¹

Kassim S. Al-Rubaie, kassim.alrubaie@sociesc.com.br³

André Marcon Zanatta, andre.zanatta@sc.senai.br¹

Edson Costa Santos, edson.costa@sc.senai.br²

Bruno Paulo Zluhan, bruno.zluhan@sc.senai.br²

¹SENAI Innovation Institute for Manufacturing Systems, Rua Arno Waldemar Döhler, 957 - Zona Industrial Norte. Joinville – SC

²SENAI Innovation Institute for Laser, Rua Arno Waldemar Döhler, 957 - Zona Industrial Norte. Joinville – SC

³SOCIESC University Center, UNISOCIESC, Rua Albano Schmidt, 3333, Joinville, SC.

Abstract: This work presents a machinability study on the milling process of the Ti6Al4V alloy produced by selective laser melting (SLM) and conducts an analysis of the relevant aspects for the integration of additive and subtractive manufacturing platforms. The influence of the material's fabrication technique on the machining process was assessed in terms of tool wear, cutting forces, chip geometry and surface roughness. Comparative machinability data for the Ti6Al4V alloy produced by conventional techniques (formed mechanically), SLM with and without stress relief heat treatment were generated and correlated with the material's microstructural characteristics in all three conditions. As a result, it was identified that the microstructural changes and increase in hardness and residual stresses from the SLM process caused no significant changes on the material's machining behavior. Therefore, an optimization of the milling parameters for the new alloy condition was not necessary.

Key words: Machinability, Ti6Al4V, Milling, Selective Laser Melting, Hybrid Manufacturing.