

## Efeito da textura superficial em insertos de metal duro revestidos de TiAlN e Mínima Quantidade de Lubrificação no torneamento do aço SAE 4340

### *Effect of surface texture on TiAlN coated carbide inserts tools and Minimum Quantity Lubrication (MQL) in turning of SAE 4340 steel*

Luiz Eduardo Rodrigues Vieira<sup>1</sup>; Rhander Viana<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4967-7867>. E-mail: [luizeduardodrigues@gmail.com](mailto:luizeduardodrigues@gmail.com)

<sup>2</sup>Professor do Curso de Engenharia Automotiva, Universidade de Brasília, Campus Gama, Distrito Federal, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2842-7455>. E-mail: [rhander@unb.br](mailto:rhander@unb.br)

**RESUMO:** A texturização a laser de superfícies é um método atualmente muito popular, a sua aplicação resulta em diversos benefícios em diferentes áreas, como a área de metal mecânica, especificamente, a usinagem. Na usinagem a texturização a laser pode aumentar a vida de ferramentas de corte por aumentar a adesividade dos revestimentos cerâmicos sobre o substrato. Além disso, a textura ordenada da superfície pode alterar a interação entre a ferramenta e a peça na zona de corte, tanto para a usinagem a seco quanto para usinagem com fluido de corte. O objetivo deste trabalho consiste em comparar por meio de ensaios de vida de ferramentas e acabamento superficial da peça usinada no torneamento do aço SAE 4340 a seco e com aplicação de fluido de corte por jorro e MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante), insertos de metal duro da classe ISO P modificados superficialmente, por meio de texturização a laser e jateamento, e posteriormente revestidos de TiAlN (Nitreto de Titânio). Os resultados mostraram um melhor desempenho nos ensaios de vida dos insertos texturizados por jateamento, e um melhor acabamento da peça torneada com a utilização do revestimento TiAlN, tanto para o substrato jateado quanto texturizado a laser em relação a ferramenta sem revestimento. A aplicação de fluido de corte por MQL mostrou-se eficiente nos ensaios de vida, aumentando a vida das ferramentas, excepcionalmente, na ferramenta TiAlN-jateada. Nos ensaios de acabamento superficial, medição da rugosidade média aritmética (Ra), a aplicação de MQL não se mostrou eficiente. A caracterização superficial por MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) mostrou que a ferramenta TiAlN-laser sofreu um destacamento precoce do revestimento, o que provavelmente justifica o seu pobre desempenho nos ensaios de vida.

**Palavras-chave:** Laser, Texturização, MQL, Torneamento, TiAlN

**ABSTRACT:** Laser surface texturing has become popular method in recent years, its application results in several benefits in different fields, such as machining. In machining, laser texturing can increase the life of cutting tools by increasing the adhesion of ceramic coatings on the substrate. In addition, the ordered texture of the surface can change the interaction between the tool and the part in the cutting zone, both for dry and for cutting fluid machining. The goal of this work is to compare through tool life tests and surface finishing of the machined part in dry turning of SAE 4340 steel and with application of flood cutting fluid and MQL (Minimum Quantity Lubrication), surface modified carbide inserts of ISO P grade by means of laser texturing and blasting, and then coated with TiAlN (Titanium Aluminium Nitride). The results showed a better performance in the life tests of the blasted textured inserts, and a better finish of the turned part with the use of the TiAlN coating, both for the sandblasted and laser textured substrate in relation to the uncoated tool. The application of cutting fluid by MQL proved to be efficient in life tests, increasing the tool life, exceptionally, in the TiAlN-sandblasted tool. In surface finishing tests, measuring the average arithmetic roughness (Ra), the application of MQL was not efficient. The superficial characterization by SEM (Scanning Electron Microscopy) showed that the TiAlN-laser tool suffered an early detachment of the coating, which probably justifies its poor performance in life tests.

**Keywords:** Laser, Texturing, MQL, Turning, TiAlN.

## INTRODUÇÃO

Atualmente é indispensável para a indústria metal mecânica a realização de operações de usinagem que ofereçam as melhores tecnologias com o intuito de aumentar a produtividade e reduzir o custo de fabricação. Essas tecnologias passam pela utilização de equipamentos mais flexíveis que abranjam uma maior gama de operações de usinagem, novos materiais de ferramentas de corte, substratos de ferramentas com texturas orientadas, uso de revestimentos cerâmicos, meios de lubrificação/refrigeração, dentre outros.

Os revestimentos cerâmicos compostos por carbeto de titânio ou nitretos de metais de transição, tais como TiC (Carbeto de Titânio), TaC (Carbeto de Tântalo), NbC (Carbeto de Nióbio), TiN (Nitreto de Titânio), TiCN (Carbonitreto de Titânio) e TiAlN (Nitreto de Titânio Alumínio), propiciam proteção ao desgaste, resistência ao calor, resistência à corrosão, boa adesão ao substrato, exibem elevada dureza e são aplicados em componentes mecânicos, ferramentas de corte, como revestimentos ópticos e decorativos (SUH; HWANG; MURAKAMI, 2003).

Em virtude da grande aplicabilidade industrial dos revestimentos, há uma necessidade crescente em compreender as propriedades fundamentais desses filmes duros, e como eles agem na proteção de uma superfície.

O estudo dos revestimentos tem um aspecto multidisciplinar, pois envolve o conhecimento de suas propriedades químicas, físicas e tribológicas (SANTOS, 2002).

A diferença no desempenho de ferramentas de corte revestidas e ferramentas sem revestimentos é resultado da interação entre essas propriedades, que, provavelmente, modificam a região de interface cavaco-ferramenta, aumentando o desempenho da ferramenta revestida. Na necessidade de entender como os revestimentos modificam o desempenho das ferramentas de corte é importante que o revestimento seja analisado tanto em ensaios de usinagem quanto em ensaios que possam caracterizar sua morfologia, sua microestrutura e principalmente sua adesividade sobre o substrato.

A atuação do revestimento depositado sobre a superfície da ferramenta em suportar mudanças constantes nas solicitações mecânicas e térmicas do processo de usinagem, dependerá, sobretudo, de uma boa adesividade sobre o substrato. Uma adesividade adequada do revestimento é muito importante, pois a ferramenta com revestimento com adesividade insuficiente pode se comportar pior que aquela sem revestimento. A formação de partículas duras e abrasivas, resultantes da destruição prematura do revestimento, acelera o desgaste das superfícies que estão em contato (LIMA; NEVES; DINIZ, 2005).

Daí advém a importância de se ter novos processos de deposição disponíveis, um melhor controle do processo de deposição, das fontes de suprimento dos materiais que constituem o revestimento, materiais de substrato com propriedades que ofereçam menor discrepância com as propriedades do revestimento e mesmo técnicas que possam modificar fisicamente o substrato sem alterar significativamente suas propriedades mecânicas, para melhorar a adesividade na interface substrato/revestimento.

O desenvolvimento de substratos de ferramentas com propriedades compatíveis com as propriedades do revestimento podem ser uma boa alternativa para melhorar a adesividade do revestimento sobre o substrato. Mas deve-se atentar, por exemplo, ao fato de que um aumento de dureza do substrato para se aproximar da dureza do revestimento, obtendo-se assim menor discrepância entre essas propriedades, pode ocasionar um

efeito um tanto indesejável ao substrato, que é a diminuição de sua tenacidade (LEYLAND; MATTHEWS, 2000). Isso pode ser indesejável nas ferramentas de corte para usinagem, principalmente, no corte intermitente, onde as ferramentas sofrem constantemente com os impactos na peça e solicitações de compressão e tração ao entrarem e saírem da peça, respectivamente.

Uma boa opção para aproximar as propriedades do substrato da ferramenta e do revestimento, sem causar prejuízo à tenacidade da ferramenta, é modificar as propriedades do substrato, somente em regiões próximas a interface com o revestimento (SUN; BLOYCE; BELL, 1995).

Dentro deste contexto um meio atualmente difundido é a texturização a laser da superfície. Nos últimos anos, a texturização a laser tem se apresentado como uma opção competitiva para a produção de furos e ou alteração da textura superficial prévia da superfície (LOW et al., 2001). Exemplos estão presentes na indústria aeronáutica, que tem empregado essa técnica em componentes de turbina (palhetas), na câmara de combustão (CORFE, 1983), e em microtecnologia, onde os problemas de lubrificação permanente de componentes miniaturizados, devido à mínima quantidade de lubrificante e à dificuldade de confiná-lo nas superfícies em contato, constituem um desafio (BLATTER et al., 1999; WATANABE et al., 2000).

Nos processos de usinagem, a texturização a laser é utilizada para a melhoria das propriedades de adesividade de revestimentos duros sobre superfícies de ferramentas de corte. No processo de texturização a laser, um laser de pulsos curtos e de alta taxa de repetição provoca uma texturização advinda da formação de poças líquidas. Após a solidificação dessas poças, ocorre a formação de nanoestruturas que permitem uma melhor ancoragem do revestimento.

A interação do laser com o material é influenciada por fatores como natureza do substrato, composição e estrutura da superfície, energia, frequência e largura do pulso laser, e interação com a atmosfera. Neste processo pode ocorrer a limpeza e a texturização simultâneas do substrato, o material recebe uma quantidade de energia adicional para refundir superficialmente. Macroscopicamente, a rugosidade da superfície aumenta, em geral devido à formação de crateras oriundas da fusão e ablação do material (LIMA; NEVES; DINIZ, 2005), o que provavelmente pode colaborar para aumentar a adesividade do revestimento no substrato.

Este meio de modificação da textura do substrato de ferramentas de corte através de feixes de laser com o intuito de melhorar a adesividade de revestimentos é relativamente novo na usinagem, e carece ainda de muitas investigações visto que são poucos os trabalhos publicados na área. Pelo seu potencial observa-se que é uma alternativa muito promissora para melhorar a adesividade de revestimentos em ferramentas de corte.

Outra frente de pesquisa relevante na usinagem nos últimos anos são os fluidos de corte e suas formas de aplicação, uma vez que são indispensáveis tecnicamente na usinagem de diversos materiais. No entanto, podem prejudicar o meio ambiente e também a saúde do operador da máquina. Consequentemente, a interação entre ferramentas texturizadas e o uso de fluidos de corte e sua forma de aplicação é outro tema interessante a se pesquisar na área de usinagem (MACHADO et al., 2021).

O uso de fluido de corte é significativo em qualquer operação de usinagem, para resfriar a ferramenta de corte e a superfície da peça, e/ou lubrificar a interface ferramenta-peça, e promover a remoção de cavacos da zona de corte. Recentemente, muitas

pesquisas têm focado na lubrificação com mínima quantidade de lubrificante ou fluido de corte (MQL ou MQF) entre os vários métodos existentes na aplicação de um refrigerante/lubrificante (SAID et al., 2019).

O MQL/MQF reduz o uso de refrigerante/lubrificante ao impelir na zona de corte uma mistura de ar comprimido e fluido de corte em quantidades reduzidas, na média até 50 ml/h. Para certas operações de usinagem, como no fresamento com ferramentas com diâmetros maiores do que 40 mm, essa quantidade pode ser maior do que 150 ml/h por um curto período de tempo (DGUV, 2010). O método MQL/MQF demonstra ser apropriado na usinagem, pois a aplicação de uma névoa fina de fluido de corte com ar comprimido na zona de corte atende às necessidades de uma usinagem “verde”, com solução ecológica e econômica (KAMATA; OBYKAWA, 2007; PERVAIZ et al., 2019; SAID et al., 2019).

Assim, a principal justificativa para realização deste trabalho é contribuir com novas investigações e fornecer dados que darão suporte técnico na viabilização da utilização da texturização superficial de ferramentas de corte utilizando feixe de laser com aplicação de mínima quantidade de lubrificante.

A princípio a contribuição deste trabalho teve o intuito de avaliar o desempenho de insertos de metal duro da classe ISO P jateados e revestidos de TiAlN (Nitreto de Titânio Alumínio) utilizados comercialmente, e insertos de metal duro da classe ISO P texturizados a laser e revestidos de TiAlN por meio de ensaios de vida de ferramentas e ensaios de acabamento superficial da peça usinada no torneamento do aço SAE 4340 com aplicação de MQL, usinagem a seco e com jorro de fluido de corte. O conjugado substrato/revestimento da ferramenta foi também avaliado por meio de ensaios de microscopia confocal a laser e eletrônica de varredura.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Ensaio de Vida**

A metodologia para execução dos ensaios de vida foi baseada na avaliação e comparação do desempenho de insertos de metal duro da classe ISO P texturizados por laser e jateamento mediante ensaios de torneamento do aço SAE 4340. A vida da ferramenta de corte foi avaliada por meio da medição do desgaste de flanco médio ( $VB_B = 0,3$  mm) utilizando-se um estereomicroscópio Zoom 645T - Koye. Os ensaios de vida foram realizados a seco, sem aplicação de fluido de corte, com jorro e MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante) para três ferramentas testadas - sem revestimento (SR), jateada e revestida de TiAlN, e laser e revestida de TiAlN. O fluido de corte utilizado foi o Rocol Ultracut 250 HW aplicado por jorro e MQL. Na aplicação MQL foi utilizado um nebulizador V da Quimatic com vazão de 50 ml/h com pressão de 6 bar, com apenas um bico de injeção inclinado a  $45^\circ$  em relação a superfície de saída da ferramenta. Na aplicação por jorro a vazão foi de 20 l/min.

Nos ensaios foram obtidas as médias de vida das três ferramentas testadas, para três repetições, ou seja, três arestas de corte foram utilizadas nos testes. As ferramentas utilizadas nos testes apresentam especificação CNMG 12 04 08 H13A classe P, fornecidas pela Sandvik

A ferramenta jateada e revestida de TiAlN foi preparada pela empresa Oerlinkon-Balzars pelo processo PVD. A texturização laser da outra ferramenta foi realizada na divisão de fotônica do Instituto de Estudos Avançados do Comando-Geral de Tecnologia

Aeroespacial (IEAv-CTA), utilizando-se um feixe de laser de vapor de cobre, Hidreto de Cobre e Bromo (CuHBr), com comprimento de onda de 510 nm, tempo de pulso de 30 ns, frequência de pulsação de 13,8 kHz, diâmetro focal de 30  $\mu\text{m}$  e irradiância de 638  $\text{MW}/\text{cm}^2$ . Posteriormente a ferramenta texturizada a laser foi revestida de TiAlN pela empresa Oerlinkon Balzers.

Os ensaios de vida foram executados em um Torno CNC modelo Diplomat Logic 195 VS. Os corpos de prova utilizados nos ensaios de vida foram tarugos cilíndricos do aço SAE 4340 com diâmetro de 50,8 mm e comprimento de 113 mm, as condições de corte utilizadas foram as seguintes:  $v_c = 200$  m/min,  $f = 0,5$  mm/rot,  $a_p = 2,0$  mm e  $l_f = 50$  mm. As condições de corte foram estabelecidas dentro dos parâmetros de uso fornecidos pelo fabricante dos insertos. O aço SAE 4340 foi fornecido pela empresa GGD Metals de São Paulo.

Os equipamentos utilizados nos ensaios de vida pertencem ao Laboratório de Processos de Fabricação da UnB-FGA. Nesta etapa utilizou-se também de microscopia eletrônica de varredura (MEV), modelo MEV Jeol JSM-7000F, para a caracterização do desgaste e análise superficial das ferramentas, equipamento pertencente ao Instituto de Biologia da UnB.

### Ensaio de Rugosidade

Os ensaios de rugosidade foram realizados utilizando-se um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210, pertencente ao Laboratório de Processos de Fabricação da UnB-FGA. Nos ensaios foram obtidas as rugosidades médias ( $R_a$ ) da superfície usinada sem aplicação de fluido de corte e com aplicação por jorro e MQL, com três medições para cada ferramenta ensaiada com varredura a 120° uma da outra na superfície torneada, utilizando um comprimento de amostragem (*cut-off*) de 0,8 mm. As aplicações de jorro e MQL seguem as mesmas condições dadas nos ensaios de vida, com aplicação de MQL numa vazão de 50 ml/h com pressão de 6 bar, bico de injeção inclinado a 45° em relação a ponta da ferramenta, e aplicação de fluido de corte por jorro com vazão de 20 l/min.

Os ensaios de rugosidade também foram executados no Torno CNC modelo Diplomat Logic 195 VS.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de rugosidade também eram de aço SAE 4340 com as mesmas dimensões dos corpos de prova dos ensaios de vida. As condições de corte utilizadas nos ensaios de rugosidade foram as seguintes:  $v_c = 200$  m/min,  $f = 0,1$  mm/rot,  $a_p = 1,0$  mm e  $l_f = 50$  mm.

### Análise Morfológica do Conjugado Substrato/Revestimento

Para a análise morfológica dos conjugados substratos/revestimentos das ferramentas foram realizados ensaios de microscopia confocal a laser.

O ensaio de microscopia confocal a laser teve como objetivo estudar de forma mais realística e precisa as características das superfícies das ferramentas texturizadas e revestidas, com a utilização de um microscópio óptico Zeiss Axio Imager 2 acoplado a um sistema de varredura laser Zeiss LSM 700, equipado com laser de diodo (405 nm) e lente objetiva EC PLAN-NEOFLUAR 40x0,75. As imagens foram geradas a partir de mosaicos de 5 x 5 imagens totalizando uma área de varredura de 800x800  $\mu\text{m}$ .

Com as imagens obtidas foi possível comparar a topografia das ferramentas por meio da medição dos parâmetros de amplitude das rugosidades ( $S_q$ ,  $S_a$  e  $S_z$ ) e parâmetros de distribuição de amplitude ou estatísticos ( $S_{sk}$  e  $S_{ku}$ ), variação da forma, irregularidades e alterações provocadas pelas texturizações a laser e jateada. A microscopia Confocal a Laser foi realizada no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (Crti-UFG).

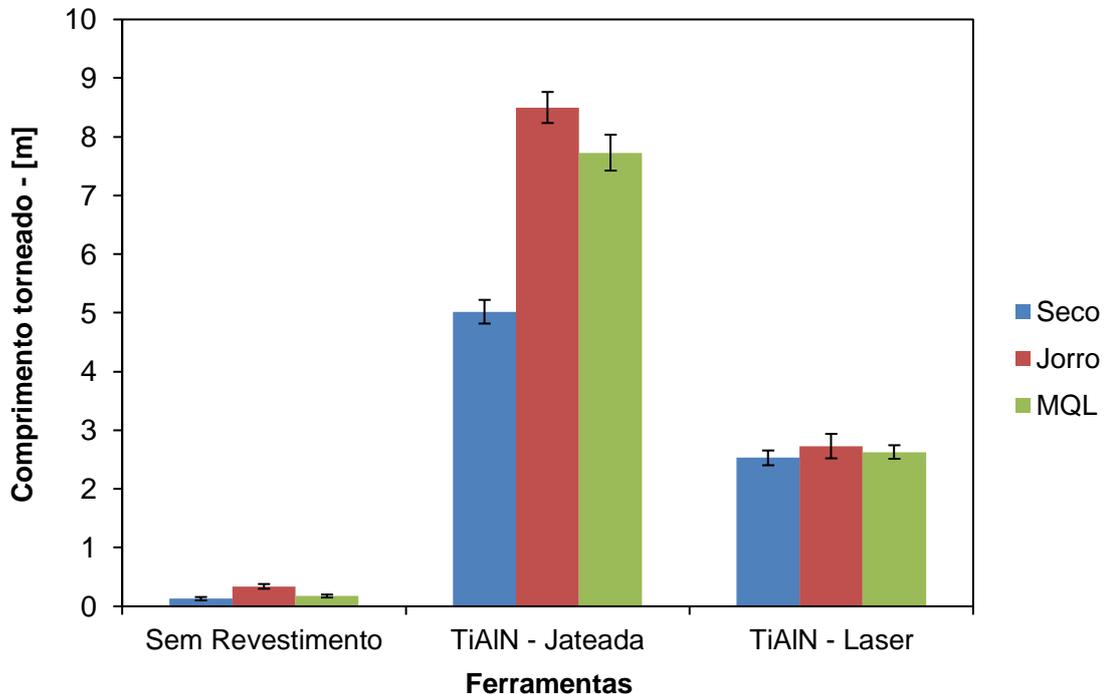
## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Ensaio de Vida e Caracterização das Ferramentas

A **Figura 1** mostra os resultados obtidos nos ensaios de vida das ferramentas testadas. A ferramenta com pior desempenho foi a sem revestimento, tanto a seco quanto com aplicação de fluido de corte por jorro e MQL, com uma média de vida de aproximadamente 0,13 m de usinagem, equivalente a três passadas.

A ferramenta com melhor desempenho nos ensaios de vida foi a ferramenta revestida de TiAlN com substrato jateado, tanto a seco quanto com aplicação de fluido de corte por jorro e MQL, com uma média de vida de aproximadamente 7,08 m, equivalente a 140 passadas até atingir o desgaste de flanco médio de 0,3 mm, chegando ao fim de vida.

**Figura 1.** Ensaio de vida no torneamento a seco do aço SAE 4340 (Condições de corte:  $v_c = 200$  m/min,  $f = 0,5$  mm/rot e  $a_p = 2,0$  mm)



Na avaliação quanto à usinagem com fluido de corte, observa-se na **Figura 1**, que a utilização de jorro e MQL aumentaram a vida das ferramentas, com maior destaque para a ferramenta de TiAlN-jateada.

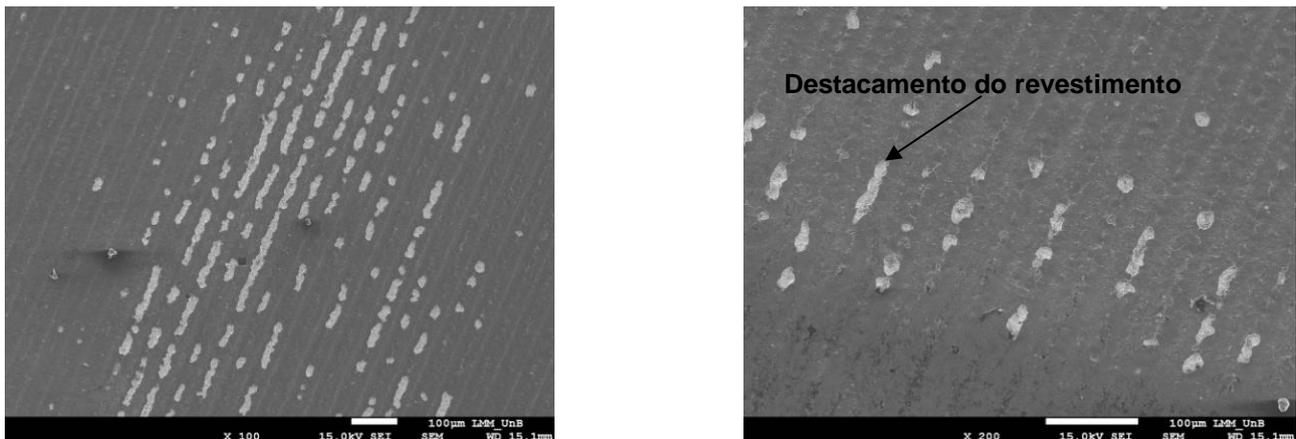
Provavelmente, a aplicação do fluido de corte, por jorro e MQL, modificou a zona de corte, particularmente, a zona de cisalhamento secundário na usinagem, ocasionando uma diminuição no atrito na interface cavaco-ferramenta e no calor gerado, possibilitando um aumento na vida da ferramenta.

Quanto ao comportamento dos substratos testados, jateado e laser, observa-se que a ferramenta TiAlN-jateada teve um desempenho muito superior, tanto a seco quanto com aplicação de jorro e MQL, em relação a ferramenta TiAlN-laser. A justificativa para este resultado pode estar na adesão do revestimento TiAlN sobre os substratos jateado e laser.

A **Figura 2** mostra imagens da superfície de saída da ferramenta TiAlN-Laser. Nas imagens observa-se nitidamente o destacamento precoce do revestimento TiAlN depositado.

O destacamento precoce do revestimento TiAlN na ferramenta texturizada a laser, pode estar relacionado com diferentes graus de fragilidade do revestimento, as suas propriedades elasto-plásticas, as tensões residuais internas do filme depositado e mesmo uma baixa adesividade do filme depositado sobre o substrato de metal duro com textura laser.

**Figura 2.** MEV da superfície de saída da ferramenta TiAlN-Laser



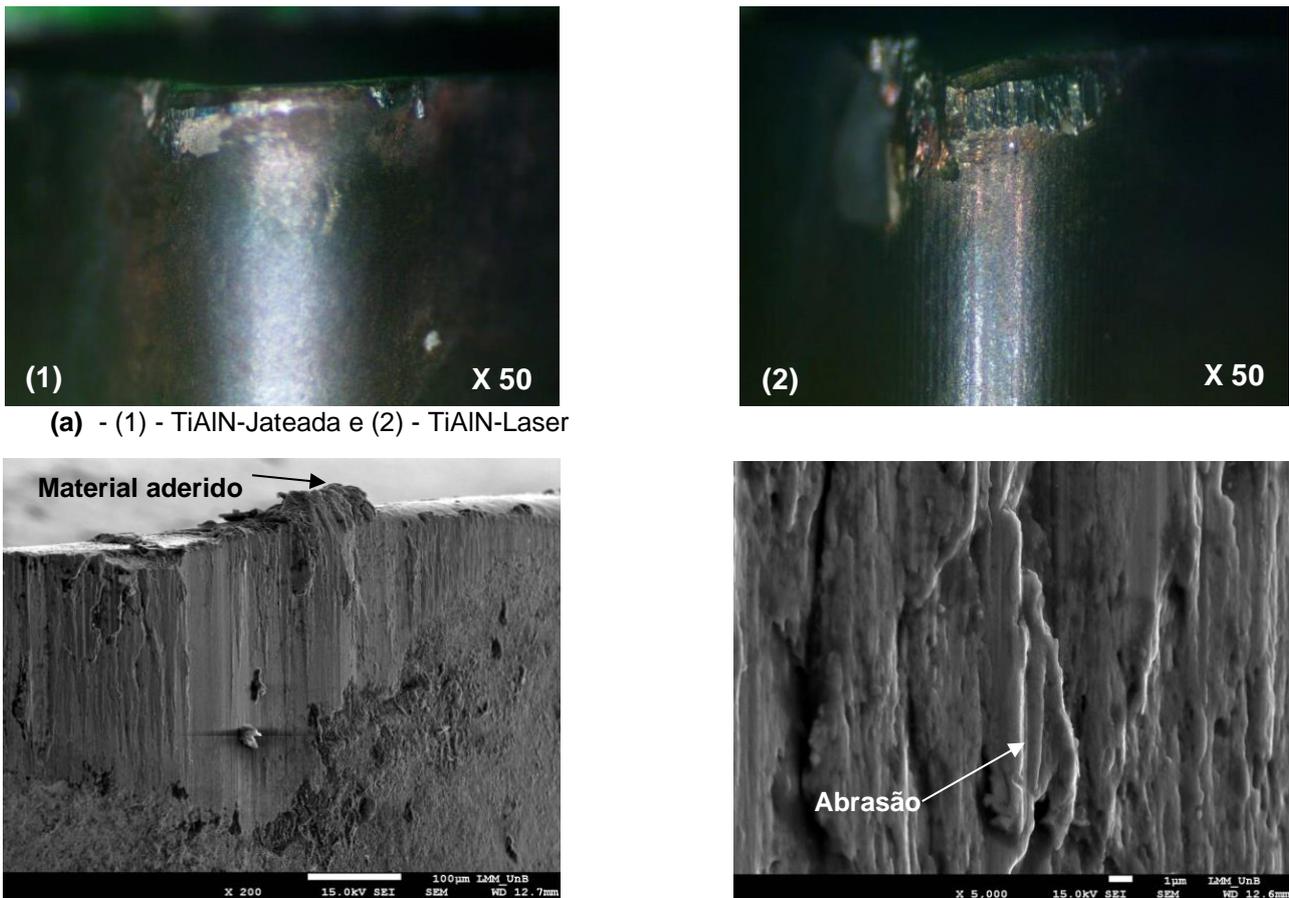
Uma baixa adesividade do revestimento sobre o substrato interfere claramente no comportamento da ferramenta durante o corte, pois a delaminação da camada leva ao contato prematuro do metal duro do substrato com a peça. Além disso, a fragmentação do revestimento gera partículas duras e abrasivas que interagem com o sistema tribológico peça-ferramenta, podendo acelerar ainda mais o desgaste da ferramenta (NEVES; DINIZ; LIMA, 2006).

A **Figura 3**, letras (a) e (b), mostra as ferramentas TiAlN-Jateada e TiAlN-Laser após o fim de vida. Observa-se claramente nas imagens da **Figura 3(a)** um acentuado desgaste de flanco nas ferramentas. Considera-se o desgaste de flanco o mais comum entre as formas de desgaste que ocorrem em ferramentas de usinagem. Sendo até uma forma de desgaste preferível, pois indica uma vida útil da ferramenta previsível e estável. O desgaste de flanco ocorre, principalmente, devido aos mecanismos de desgaste por abrasão e *attrition*, causado por elementos duros, como carbonetos presentes no material da peça ou mesmo pelo destacamento ou delaminação precoce dos revestimentos utilizados, neste estudo TiAlN. A **Figura 3(b)** mostra por meio de MEV, uma área

deformada plasticamente na região do desgaste de flanco da ferramenta TiAlN-Jateada, presença de microsulcos e material da peça aderido na ferramenta, caracterizando nitidamente a atuação dos mecanismos de desgaste por abrasão e *attrition*, cujo último tem como característica marcante a aderência e o arrastamento de material da peça durante a usinagem.

Os mecanismos de desgaste por abrasão e *attrition* também foram predominantes nas ferramentas sem revestimento e TiAlN-laser

**Figura 3.** Imagens de estereomicroscópio em (a) e MEV em (b) do desgaste de flanco das ferramentas no fim de vida



## Ensaio de Rugosidade

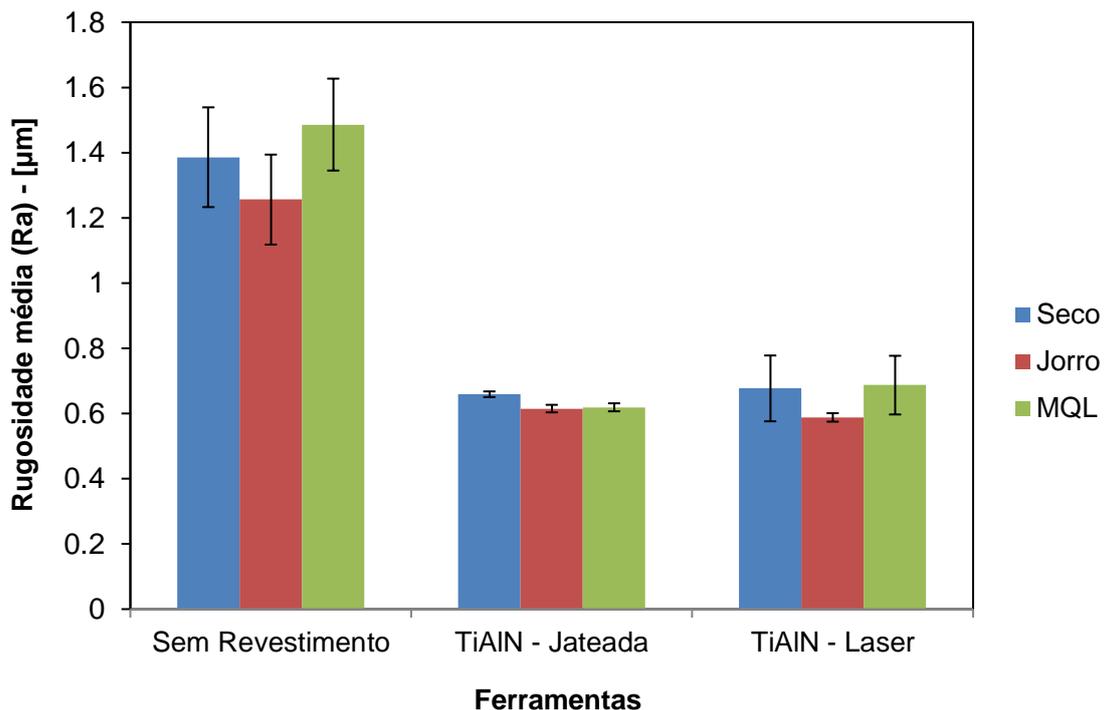
A **Figura 4** mostra os resultados obtidos nos ensaios de rugosidade do aço SAE 4340 no torneamento a seco e com utilização de fluido de corte por jorro e MQL, utilizando-se as ferramentas - Sem Revestimento, TiAlN-jateada e TiAlN-laser. De maneira geral, os resultados mostram que a utilização do revestimento cerâmico, TiAlN, afeta sensivelmente o valor da rugosidade média ( $R_a$ ) da superfície torneada.

A utilização do revestimento TiAlN, possivelmente, modifica a interface ferramenta/peça, uma vez que interfere nos esforços de corte durante o torneamento.

Com a diminuição dos esforços de corte, a tendência é que haja uma diminuição das micro irregularidades formadas na superfície usinada, melhorando o acabamento.

Quanto à diferenciação do acabamento obtido em relação ao torneamento a seco, jorro e MQL, não se observa diferença estatisticamente significativa, mostrando que o uso de fluido de corte para a operação realizada nas condições de corte dadas, não influencia na interface ferramenta/peça ao ponto de causar uma modificação nas micro irregularidades da peça torneada.

**Figura 4.** Ensaios de rugosidade média (Ra) do aço SAE 4340 no torneamento a seco, com jorro e MQL. (Condições de corte:  $v_c= 200$  m/min,  $f= 0,1$  mm/rot e  $a_p= 1,0$  mm)



## Microscopia Confocal a Laser

Para a análise morfológica dos conjugados substratos/revestimentos foram realizados ensaios de microscopia confocal a laser.

A **Figura 5** mostra os resultados dos ensaios de microscopia confocal a laser para as ferramentas TiAlN-Jateada e TiAlN-Laser.

As imagens foram adquiridas por varredura laser por meio de microscopia confocal, após a varredura as imagens foram tratadas utilizando o *software MountainsMap*® 8.2.

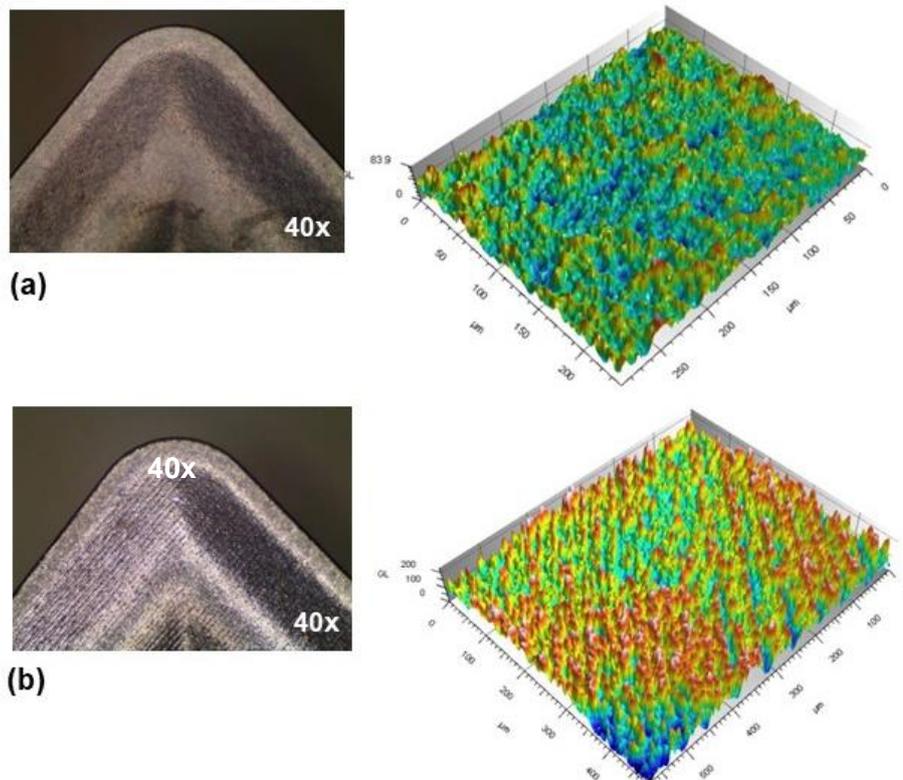
Nas imagens é possível observar claramente que a textura jateada mostra-se aleatória, ao passo que a textura laser apresenta notoriamente uma distribuição ordenada de picos, a qual provavelmente pode alterar as condições de contato na interface cavaco-ferramenta, e ocasionalmente modificar a vida da ferramenta.

Nas ferramentas jateadas não há uma ordenação macroscópica da textura, como o arranjo paralelo de linhas visualizado na ferramenta TiAlN-laser. Essa ordenação diferenciada entre os revestimentos, provavelmente, foi crucial para o desempenho das ferramentas nos ensaios de vida.

Essencialmente a ordenação da textura na ferramenta laser foi pouca efetiva, a degradação precoce do revestimento leva a formação de “microlaschas” de revestimentos de TiAlN com dureza de aproximadamente 3000 HV. Essas “microlaschas” de TiAlN se tornam então parte de um sistema tribológico, causando, provavelmente, desgaste abrasivo à três corpos: peça, ferramenta e as “microlaschas” de TiAlN como elemento interfacial. As “microlaschas” de TiAlN são pressionadas contra a peça e a ferramenta concomitantemente, causando microtrincas, e, principalmente, microsulcos de desgaste no flanco da ferramenta, como observado na **Figura 3**.

Os resultados das medições dos parâmetros de amplitude das rugosidades ( $S_a$ ,  $S_q$  e  $S_z$ ) e parâmetros de distribuição estatísticos ( $S_{sk}$  e  $S_{ku}$ ), obtidos na varredura laser da superfície das ferramentas por meio de microscopia confocal, foram os seguintes: TiAlN-Jateada -  $S_a = 1,221 \mu\text{m}$ ,  $S_q = 1,505 \mu\text{m}$ ,  $S_z = 13,729 \mu\text{m}$ ,  $S_{sk} = -0,698$  e  $S_{ku} = 3,245$ ; TiAlN-Laser -  $S_a = 0,959 \mu\text{m}$ ,  $S_q = 1,305 \mu\text{m}$ ,  $S_z = 16,748 \mu\text{m}$ ,  $S_{sk} = -1,620$  e  $S_{ku} = 7,203$ . Basicamente a texturização a laser provocou uma diminuição nos parâmetros de amplitude  $S_a$  e  $S_q$  das superfícies das ferramentas, o que pode corroborar para uma diminuição da rugosidade média da peça usinada. Quanto à assimetria ( $S_{sk}$ ), a distribuição da textura mostra-se enviesada moderadamente, com uma curtose acima de 3 para todas as texturas das ferramentas ensaiadas.

**Figura 5.** Texturas das ferramentas TiAlN-Jateada (a) e TiAlN-Laser (b)



## CONCLUSÕES

Neste estudo, as superfícies de insertos de metal duro foram texturizadas: (i) por feixe de laser, especificamente, ablação a laser utilizando uma fonte de CuHBr (Hidreto

de Cobre e Bromo), e (ii) jateamento (processo comercial), posteriormente os insertos texturizados foram revestidos de TiAlN. O desempenho das diferentes texturas, laser e jateamento, foram testadas em ensaios de vida de ferramenta e acabamento da superfície usinada no torneamento do aço SAE 4340 a seco e com aplicação de fluido de corte por jorro e MQL. As diferentes texturas também foram caracterizadas por meio de microscopia óptica e confocal a laser. Conforme os resultados anteriormente apresentados e discutidos, as seguintes conclusões foram obtidas:

- Nos ensaios de vida, o revestimento TiAlN aumentou significativamente o comprimento torneado em relação a ferramenta sem revestimento, tanto a seco quanto com aplicação de jorro e MQL;
- A ferramenta TiAlN-jateada apresentou o melhor resultado nos ensaios de vida, seguida pela ferramenta TiAlN-laser;
- Provavelmente o destacamento precoce do TiAlN depositado no substrato com textura laser, foi o fator preponderante para o seu baixo desempenho nos ensaios de vida;
- A utilização do TiAlN diminuiu a rugosidade aritmética média (Ra) da superfície torneada em relação a ferramenta sem revestimento;
- A aplicação de fluido de corte por jorro e MQL aumentou a vida das ferramentas em relação a usinagem a seco, excepcionalmente, para a ferramenta TiAlN-jateada;
- A aplicação de fluido de corte por jorro e MQL não alterou significativamente o acabamento superficial da superfície torneada em relação a usinagem a seco.

## AGRADECIMENTOS

Ao Decanato de Pesquisa e Inovação da UnB (DPI-UnB) por meio dos editais de financiamento a pesquisa DPI/UnB 04/2019 e DPI/DPG 03/2020, e a Fundação de Apoio a Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) pelo financiamento a pesquisa por meio do edital 03/2016, processo 0193.001259/2016.

## REFERÊNCIAS

BLATTER, A.; MAILLAT, M.; PIMENOV, S. M.; SHAFEEV, G. A.; SIMAKIN, A. V.; LOUBNIN, E. N. Lubricated sliding performance of laser-patterned sapphire. **Wear**, v. 232, n. 2, p. 226-230, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00150-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00150-7).

CORFE, A. G. Laser drilling of aero engine components. *In: Proceedings of the First International Conference on Lasers in Manufacturing*. Brighton, U.K., 1983.

DGUV. **Minimum quantity lubrication for machining operations**. Publisher Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Edition November, 2010. 84 p.

KAMATA, Y.; OBIKAWA, T. High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 192-193, p. 281-286, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jimatprotec.2007.04.052>.

LEYLAND, A.; MATTHEWS, A. On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimized tribological behavior. **Wear**, v. 246, n. 1-2, p. 1-11, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00488-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00488-9).

- LIMA, M. S. F.; NEVES, D.; DINIZ, A. E. Machining with a laser treated tool steel drill: surface and tool life aspects. *In: I International Conference on Heat Treatment and Surface Engineering of Tools and Dies*, Pula-Croatia, 2005.
- LOW, D. K. Y.; LI, L.; CORFE, A. G.; BYRD, P. J. Spatter-free laser percussion drilling of closely spaced array holes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 41, n. 3, p. 361-377, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00078-X](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00078-X).
- MACHADO, A. R.; SILVA, L. R. R.; SOUZA, F. C. R.; DAVIS, R.; PEREIRA, L. C.; SALES, W. F. *et al.* State of the art of tool texturing in machining. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 293, p. 1-23, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jimatprotec.2021.117096>.
- NEVES, D.; DINIZ, A. E.; LIMA, M. S. F. Efficiency of the laser texturing on the adhesion of the coated twist drills. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 179, n.1-3, p. 139-145, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jimatprotec.2006.03.068>.
- PERVAIZ, S.; ANWAR, S.; QURESHI, I.; AHMED, N. Recent advances in the machining of titanium alloys using minimum quantity lubrication (MQL) based techniques. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, v. 6, p. 133-145, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00033-4>.
- SAID, Z.; GUPTA, M.; HEGAB, H.; ARORA, N.; KHAN, A. M.; JAMIL, M. *et al.* A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 105, p. 2057-2086, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04382-x>.
- SANTOS, S. C. **Estudo da Influência de Revestimentos e da Aplicação de Fluido de Corte no Desempenho de Brocas de Aço-Rápido e de Metal Duro Integral na Usinagem de Ferro Fundido Cinzento**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, 2002. 192 p.
- SUH, C. M.; HWANG, B. W.; MURAKAMI, R. I. Behaviors of residual stress and high temperature fatigue life in ceramic coatings produced by PVD. *Materials Science and Engineering A*, v. 343, n. 1-2, p. 1-7, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00327-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00327-1).
- SUN, Y.; BLOYCE, A.; BELL, T. Finite element analysis of plastic deformation of various TiN coating/substrate systems under normal contact with a rigid sphere. *Thin Solid Films*, v. 271, n. 1-2, p. 112-131, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(95\)06942-9](https://doi.org/10.1016/0040-6090(95)06942-9).
- WATANABE, K.; NATSUME, J.; HASHIZUME, K.; OZASA, T. O.; NADA, T.; MASUDA, Y. Theoretical analysis of bearing performance of microgrooved bearing. *JSAE Review*, v. 21, n. 1, p. 29-33, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(99\)00073-9](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(99)00073-9).

Recebido em: 30/04/2021

Aprovado em: 22/04/2022