

ESTUDO SOBRE A MINIMIZAÇÃO DA ADESÃO NA USINAGEM EM ALUMÍNIO COM FERRAMENTAS DE HSS

Bruno Henrique Fernandes da Costa¹, Ramsés Otto Cunha Lima²

¹ Graduando do Curso Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, UFRSA, Mossoró – Rio Grande do Norte. E-mail: bruno.costa43469@alunos.ufrsa.edu.br

² Professor Doutor, CE – UFRSA, Mossoró – Rio Grande do Norte. E-mail: ramses.cunhalima@ufrsa.edu.br

Resumo: Na indústria de manufatura mecânica, ocorrem diversos problemas que levam a custos e perda de produtividade e qualidade, como o elevado padrão de acurácia exigido e realizar uma operação que não provoque danos ao meio ambiente. Com isso, vem a importância da usinagem a seco, que pode apresentar benefícios, como a redução de contaminação por fluidos de corte. Entretanto, a usinagem a seco provoca o aumento do desgaste das ferramentas de corte, especialmente em condições de baixa velocidade de corte. Um dos mecanismos de desgastes que ocorrem na usinagem é a adesão, que é um problema comum causado por diversos fatores. A adesão pode levar a problemas de qualidade superficial do produto e reduzir a vida útil da ferramenta de corte. O presente estudo visa analisar a adesão que ocorreu no torneamento a seco, realizando a usinagem do alumínio utilizando ferramentas de corte de aço rápido. O principal objetivo é observar a formação do mecanismo de desgaste por adesão, e obter conclusões a partir dos resultados que a literatura demonstra. Para isso, foi averiguada a adesão em seis ferramentas de corte após um passe de 150 mm no tarugo de alumínio, mantendo o mesmo valor para o avanço e profundidade, alterando apenas a velocidade de corte entre 25 e 50 m/min. Conforme esperado, o mecanismo de desgaste da adesão esteve presente em todas as ferramentas de corte.

Palavras-chave: Torneamento; Adesão; APC; Mecanismos de desgaste.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem está entre os principais processos de fabricação realizados no mundo, sendo um processo complexo e simples ao mesmo tempo, no qual se produzem peças removendo-se o excesso de material na forma de cavacos [1]. Existem vários tipos de usinagem, e um dos principais tipos é a usinagem por torneamento, que consiste em um processo que produz peças cilíndricas através da remoção de material da peça que está fixa em um eixo de rotação, enquanto a ferramenta de corte se desloca longitudinalmente para realizar o corte.

Por ser uma operação com altas rotações e de constante atrito superficial entre a interface cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, que irá sofrer desgaste, ocorrem problemas de qualidade, precisão e durabilidade da ferramenta de corte utilizada. Esses desgastes, que também afetam a vida útil da ferramenta de corte e geram mau acabamento na peça, são ocasionados devido aos vários tipos de mecanismos de desgastes [1]. Na usinagem, há diversos tipos de mecanismos de desgaste que prejudicam o procedimento, mas acaba sendo algo inevitável, pois se referem a um processo que leva à perda de material em uma superfície de contato em movimento, ocorrendo uma interação mecânica e térmica que poderá danificar a ferramenta de corte. Com a compreensão adequada do mecanismo de desgaste, é possível desenvolver e analisar métodos para minimizar o desgaste e aumentar a vida útil da ferramenta de corte e melhorar o acabamento da peça usinada. Existem vários tipos de desgastes na usinagem, sendo que o que descreve a causa subjacente é o mecanismo de desgaste, dentre esses está incluído o da adesão.

O desgaste por adesão envolve a deformação plástica do cavaco com a ferramenta de corte, havendo uma união superficial impedindo que a ferramenta usine o corpo de prova utilizando a aresta principal de corte devido ao material aderido durante o processo. A adesão ocorre quando o material a ser usinado se funde ou adere à superfície da ferramenta de corte, o que pode levar a danos na ferramenta, qualidade superficial ruim e redução da eficiência do processo de usinagem. Um dos exemplos de adesão na usinagem é a formação da Aresta Postiça de Corte (APC), que é um dos principais fenômenos causadores de desgaste da ferramenta [2]. O controle efetivo da adesão na usinagem é um desafio comum enfrentado pela indústria de manufatura, especialmente em processos de usinagem de materiais duros, como metais e ligas.

No presente estudo o mecanismo de desgaste a ser estudado é o da adesão. Tendo em vista esse problema, a finalidade do trabalho é analisar e identificar ações e fatores que provoquem esse mecanismo de desgaste no processo de usinagem por torneamento e, assim, estudar métodos e parâmetros de corte que minimizem a formação da adesão na ferramenta de corte.

Para tal, será necessário realizar usinagens por torneamento com a variação do parâmetro de velocidade de corte, mantendo taxa de avanço e profundidade de corte padronizados, utilizando ferramentas de corte de aço rápido com geometrias definidas, analisando se a alteração da velocidade de corte irá influenciar na formação da adesão e na Aresta Postiça de Corte (APC). Para assim, poder analisar juntamente com a literatura e definir se estes parâmetros realmente contribuem no mecanismo de desgaste adesivo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Usinagem por Torneamento

Usinagem é descrita como uma operação que verifica forma e acabamento a uma peça, ou uma combinação dessas, por meio da formação do cavaco, sendo comum a geometria irregular [1]. Este é o processo de modelação de peças metálicas mais empregado na indústria de manufatura mecânica [4]. Esta grande utilização vem devido à variedade de possibilidades que podem ser realizadas sem alterações das propriedades mecânicas da peça usinada, em um processo com alta precisão e alto acabamento superficial. Existem diversos tipos de operações na usinagem, que são divididas entre processos convencionais e não-convencionais. Os processos convencionais de usinagem se destacam mais devido ao amplo uso na indústria, os principais são fresamento, furação e torneamento. Neste estudo, foi utilizado apenas o torneamento que será abordado logo a seguir.

A operação de usinagem mais comum é o torneamento, que é amplamente utilizado em trabalhos de corte de metal e experimentais [5]. É um processo mecânico usado para produzir superfícies de revolução através da ferramenta de corte, que está fixa firmemente em um suporte, enquanto remove o material da peça que está fixo ao torno em constante rotação. A ferramenta deve se mover no plano que contém o eixo de rotação da peça usinada. A ferramenta é ajustada a uma certa profundidade de corte, ao mesmo tempo que a peça gira a ferramenta se desloca em uma velocidade constante, ocorrendo a formação do cavaco [6]. São possíveis várias operações de torneamento, é feita a fabricação de peças com diferentes tamanhos e geometrias tornando-o um processo bastante versátil. Para a realização deste processo, utiliza-se um torno convencional para criar uma variedade de formas, e também podendo ser usados diversos tipos de materiais.

Existem diferentes tipos de ferramentas de corte que podem ser utilizadas no processo de torneamento, como ferramentas feitas de aço rápido, cerâmica ou com revestimentos especiais que oferecem maior resistência ao desgaste. A descoberta do aço rápido no século XIX gerou uma grande revolução na usinagem, permitindo o aumento da velocidade de corte em cerca dez vezes o valor utilizado, e por causa desse avanço ficou conhecido com aço “rápido” ou HSS (*High Speed Steel*) [1]. Apesar de já existirem outras ferramentas que suportam maiores velocidades, o aço rápido continua sendo amplamente utilizado em diversas áreas na usinagem, sendo aplicável na fabricação de brocas e fresas.

Durante a operação de torneamento são apresentadas algumas características distintas, como corte contínuo, rotação da peça e translação da ferramenta simultaneamente, e a descrição do corte em coordenadas polares para a seção reta da peça em rotação e coordenadas de profundidade da ferramenta. Essas características são comuns a outros processos de usinagem, mas o torneamento é o processo que será abordado.

Existem vários tipos de operações dentro do torneamento, pode-se destacar algumas como: o torneamento longitudinal, que ocorre a diminuição do diâmetro externo da peça; a furação, possibilitando a realização de furos; e o rosqueamento, quando necessário realizar roscas internas ou externas. Em relação a forma da trajetória, o torneamento pode ser retilíneo ou curvilíneo [3]. Torneamento retilíneo consiste no deslocamento da ferramenta segundo uma trajetória retilínea, pode ser dividido em: cilíndrico, cônico, radial e perfilamento. Assim como o retilíneo, o torneamento curvilíneo é onde a ferramenta se desloca seguindo uma trajetória curvilínea. São condições da usinagem, o torneamento de desbaste e o torneamento de acabamento que são referentes à finalidade da usinagem [3].

Pode-se ter como um dos principais objetivos do torneamento, obter a alta qualidade superficial da peça, que pode ser alcançado por meio de técnicas de corte e geometria de ferramentas adequadas, bem como a seleção correta dos parâmetros de usinagem, como a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. A velocidade de corte (V_c) é a velocidade a que a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta, expressa em m/min. A V_c influencia diretamente na quantidade de calor gerada durante o corte [1]. Com uma V_c alta, pode ocorrer o aumento da temperatura, o que pode levar ao desgaste rápido da ferramenta e à redução de vida útil da mesma. Em contrapartida, a V_c baixa tem o potencial de ocasionar vibrações na usinagem, afetando a qualidade da peça usinada. O avanço (f) é a distância movida pela ferramenta de corte em uma direção axial a cada revolução da peça, expressa em mm/rev. Um avanço muito baixo tende a causar o excesso de calor, aumentando o desgaste da ferramenta e podendo acarretar na rugosidade da superfície da peça. Já o avanço muito alto é prejudicial à ferramenta, pois é capaz de provocar a ruptura da mesma, além de impedir a qualidade no acabamento da peça [1]. Sendo esse parâmetro o que tem menor influência no desgaste em relação aos outros. Por fim, a profundidade de corte (a_p) é a espessura ou profundidade da ferramenta sobre a peça medida em uma direção perpendicularmente ao plano de trabalho, expressa em mm [1]. Uma a_p muito alta pode originar vibrações e afetar a precisão da usinagem, além de aumentar o risco de quebrar a ferramenta de corte, assim como o avanço. No entanto, se a a_p for muito baixa, resulta em um processo que pode ser muito lento e ineficiente. O produto desses três parâmetros

forma a TRM (Taxa de Remoção de Material), que é uma importante variável no torneamento, frequentemente utilizada na medição da eficiência de uma operação de corte [5], como mostra a equação 1:

$$TRM = V_c * f * a_p \quad (1)$$

Além dessas variáveis, outro fator de grande influência no torneamento é a geometria de corte da ferramenta, que possui ângulos diferentes no plano de corte e no plano ortogonal. Neste trabalho, o que irá interessar são três ângulos no plano ortogonal, os ângulos de folga, cunha e de saída da ferramenta.

O processo de torneamento por usinagem envolve, o atrito entre a peça e a ferramenta de corte, movimento de rotação, remoção do material e geração de calor. Independentemente da dureza e resistência do material, a ferramenta de corte sofrerá desgaste durante a operação. Para garantir qualidade na usinagem, é necessário que a ferramenta de corte esteja em boas condições, mas o desgaste pode prejudicar o procedimento. Nas operações de usinagem, é possível diferenciar três fenômenos que resultam na diminuição da capacidade de corte da ferramenta: avaria, desgaste e deformação plástica [1]. O autor também cita sobre outro fenômeno, o mecanismo de desgaste. Há diversos tipos de desgastes que afetam a operação e podem acarretar em gastos que podiam ser evitados, portanto, faz-se necessário o estudo e a compreensão dos mecanismos de desgaste para tomar ações efetivas a fim de reduzir estes problemas, prolongando a vida útil da ferramenta de corte por causa do cuidado com a aresta de corte. Alguns estudos [13], se concentram na análise da influência dos parâmetros de usinagem no desempenho da ferramenta de corte, como a vida útil da ferramenta, a taxa de desgaste e o desgaste de aresta de corte. O monitoramento e controle adequados desses parâmetros de usinagem podem aumentar a eficiência e a produtividade do processo de torneamento.

2.2 Formação da Adesão

Basicamente há três tipos de desgastes nas ferramentas: desgaste de cratera (KT), desgaste de flanco (VB) e desgaste de entalhe (VB_N) [1]. Durante a vida útil da ferramenta, ela passa por alguns estágios que levam desde o começo acelerado do desgaste, passando por um momento considerado constante do desgaste e parte para a sua quebra, levando à necessidade de substituição da ferramenta para dar continuidade à operação. Existem vários fenômenos que causam estes desgastes da ferramenta, conhecidos como mecanismos de desgaste [2]. Mecanismo de desgaste é um termo que se refere a processos físicos e químicos que levam à perda de material em uma superfície de contato em movimento, como em peças que estão em contato com outras superfícies durante operações que ocorrem o desgaste, como a usinagem [7]. Em outras palavras, é o processo pelo qual o material de uma superfície é removido ou desgastado devido à interação com outra superfície em movimento. O desgaste acelerado da aresta de corte não apenas interrompe a operação, mas também aumenta os custos, uma vez que será necessário utilizar mais ferramentas para concluir o processo. Infelizmente, isso se torna um acontecimento inevitável, mas é justamente por isso que deve se realizar estudos e análises sobre os mecanismos e entender seus fenômenos envolvidos. A compreensão dos mecanismos de desgaste é importante para minimizar o desgaste, prolongar a vida útil da ferramenta de corte e melhorar a eficiência dos procedimentos de usinagem. Os mecanismos que causam desgastes e danos à ferramenta de corte incluem a adesão, principalmente quando há a presença de APC, abrasão, difusão, oxidação e variações na carga mecânica [8]. Cada mecanismo de desgaste é influenciado por diferentes fatores, como a natureza dos materiais em contato, a velocidade e a força do movimento, a temperatura e a presença de substâncias químicas. Este estudo irá abordar sobre o mecanismo de desgaste da adesão.

A adesão ou *attrition*, forma convencional de chamar na língua inglesa [1], pode ser definida como o fenômeno no qual as superfícies da peça e da ferramenta de corte se unem sem a formação de fusão localizada, com força normal de contato e velocidade de deslizamento relativa entre a ferramenta e uma parcela residual do material usinado, e sob uma elevada temperatura poderá ocorrer a interação química entre os elementos. Esse processo pode ser descrito como aderência cíclica e deslizamento da peça e do material do cavaco nas superfícies da ferramenta [5]. O desgaste por adesão é causado pelas forças atrativas entre a superfície da ferramenta de corte e a parte retirada do material (cavaco), sendo ocasionada pelo calor e velocidade de corte a que o processo está submetido. Se houver algum tipo de vibração entre essas superfícies que faça com que o contato não seja regular, a remoção das partículas é intensificada [8].

A adesão geralmente é presente na usinagem com baixas velocidades de corte, em que a superfície de saída se torna irregular por causa do fluxo de material [1]. Quando a temperatura é elevada durante a usinagem, a adesão pode ocorrer, fazendo com que a interação química forme ligações em escala atômica que unem a ferramenta de corte e o material, mesmo sem atingir a fusão, impedindo que o movimento ocorra na superfície original. Se o fluxo de material pela superfície de folga, ou de saída, com altas velocidades for irregular, pode favorecer a formação da adesão, mesmo que o desgaste seja característico de baixas velocidades de corte, isso é relativo [1]. Nesse caso o que pode ocorrer é a predominância de outros mecanismos que sejam mais dependentes de temperaturas elevadas em altas velocidades do que a adesão. Quando observado junto com os outros mecanismos de desgastes, a adesão é predominante na fase inicial do desgaste total, onde se encontram as baixas temperaturas de corte. À medida que a temperatura aumenta, a adesão perde a predominância para novos mecanismos como

difusão e oxidação [1]. Parâmetros como velocidade de corte, temperatura, avanço, profundidade, número de rotações, entre outros, irão influenciar na formação do mecanismo de desgaste por adesão.

O exemplo mais comum do desgaste por adesão na usinagem é a formação da Aresta Postiça de Corte (APC). A APC pode ser definida como uma camada de material aderida a superfície de saída da ferramenta de corte, modificando o comportamento em relação à força de corte, acabamento e desgaste da ferramenta [2]. Por meio de ligações atômicas, parte do material da peça se une a ferramenta criando uma camada que é endurecida e faz com que a deformação de cisalhamento seja insuficiente para romper a mesma, a sucessão dessas camadas que forma a APC. Se a operação for contínua, ela irá atingir um tamanho até que o valor da tensão de cisalhamento seja suficiente para alterar a zona de cisalhamento, ocorrendo a quebra da APC, mas traz um grande dano à ferramenta. A parte inferior do cavaco que fica em constante aderência, mantém esse contato durante um espaço de tempo suficiente para se soldar a ferramenta, separando-se das outras porções do cavaco [2].

Quando a APC se rompe, ocorre uma perturbação dinâmica que pode arrancar partículas da superfície de folga da ferramenta juntamente com o cavaco. Embora a superfície de saída esteja em contato com o cavaco durante o processo de usinagem, sua camada superficial pode ser danificada e se soltar juntamente com a APC, causando possíveis defeitos na peça usinada [2].

Há alguns parâmetros que influenciam na formação da APC, porém, a velocidade de corte é o que mais influencia durante a operação. Em baixas velocidades de corte ocorre a formação da APC, que cresce até atingir seu valor máximo de dimensão. À medida que a V_c aumenta, a formação da APC diminui até que esteja em um valor que não há mais indícios de APC, o que significa que a velocidade crítica foi atingida [2]. Pois, é nesta velocidade que não há mais a formação da aresta postiça de corte. Não é apenas com a velocidade de corte que se pode obter a velocidade crítica. Parâmetros como o avanço, profundidade e geometria de corte na ferramenta, podem influenciar na variação da temperatura durante a usinagem e afetar a não formação da aresta postiça de corte [2].

Para controlar a formação da APC, é possível utilizar técnicas como o controle adequado da velocidade de corte, a utilização de fluidos refrigerantes para diminuir a temperatura, o desgaste da ferramenta e a escolha de materiais apropriado para a ferramenta de corte. Além disso, é importante que os operadores de máquinas estejam atentos ao desgaste da ferramenta de corte durante o processo de usinagem, a fim de realizar as devidas substituições e manutenções, evitando assim a formação excessiva da APC e a diminuição da vida útil da ferramenta de corte. Quando a operação é usinagem a seco, há uma maior tendência para a formação da APC, pois não tem nenhum meio externo que possa diminuir a temperatura do contato ferramenta-cavaco. A utilização dos fluidos de corte em operações de usinagem tem diminuído devido à saúde ambiental e humana, porém, sua utilização na maioria dos casos aumenta a vida útil da ferramenta e torna o processo mais barato [10]. Para aumentar a eficiência do processo, é necessário procurar meios que minimizem a diferença entre a usinagem com e sem fluidos, diminuindo a formação da APC e reduzindo o desgaste por adesão.

Um estudo realizado sobre o efeito da aresta postiça de corte no desgaste da ferramenta [9], aborda a influência da adesão na usinagem a seco. É citado que a APC é formada em duas superfícies, de saída e de folga onde é presente o desgaste de flanco. Atribuindo o nome de “*The Edge Growth*”, para a APC formada na superfície de folga. Foi utilizado como ferramenta de corte o aço rápido (HSS), e utilizou velocidades de corte como 15m/min, 30 m/min, 35m/min e 40m/min, mostrando que durante a operação houve a formação da aresta postiça de corte em todas as velocidades. Com a V_c em 15m/min, ocorrendo uma deformação considerável na APC, a presença de fragmentos duros aderidos do cavaco foi um fator que contribuiu para o desgaste de cratera causando tanto o *attrition* quanto a abrasão. Sobre o desgaste de flanco, é citado que em baixas velocidades de corte o desgaste também é baixo, e o tamanho aumenta com a velocidade na mesma medida que a aresta postiça de corte também aumenta. Para a velocidade de corte até 30m/min o autor considera a APC de aresta positiva, após essa velocidade essa aresta postiça positiva obtém uma forma quadrática perdendo o seu ápice, pois, devido ao aumento de temperatura causado pela velocidade de corte a resistência mecânica diminuirá. Sendo uma tendência decrescente formando o APC com a aresta negativa e com o aumento da velocidade por uma ação de nivelamento é formada uma camada de fluxo que se permanece constante. Sendo os desgastes de abrasão e adesão os mais influenciados pela aresta postiça de corte.

Outro estudo realizando três tipos de usinagem [7], a seco e com dois tipos de fluido, também utilizando o HSS como ferramenta de corte, foi padronizado a velocidade de corte em 47,5 m/min. Mostrou que entre aproximadamente 5 minutos de torneamento, já ocorreu a formação da aresta postiça de corte com ou sem fluido. Realizando a comparação dos três tipos de torneamento além do mecanismo de desgaste por adesão, também foi observado que o desgaste de flanco máximo foi obtido no torneamento a seco causado justamente pela formação e destruição da APC. Com a análise da composição química da ferramenta após o torneamento a seco, foi observado que os elementos provenientes do substrato da ferramenta estavam presentes, porém houve a ausência de dois elementos. Supõe-se que a remoção local do material da peça de trabalho tenha sido a causa desse fenômeno, pois os elementos da ferramenta não continham esses dois elementos que foram encontrados. Pode ter acontecido devido ao mecanismo de desgaste adesivo que foi observado, e também ocasionado pela ruptura e recriação novamente da aresta postiça de corte.

Para meios de comparação, um estudo [11] que utilizou velocidades de corte entre 50,100,150 e 200 m/min. Apresentou a formação da aresta postiça de corte na ferramenta de metal duro, mas à medida que a velocidade e

profundidade de corte aumentavam o tamanho da camada de APC era menor, assim como à adesão, a área afetada pelo mecanismo de desgaste adesivo foi diminuindo a cada aumento de velocidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa, foi utilizado o torno Nardini modelo ND 220 Gold, com rotação máxima de 2360 RPM e mínima de 30 RPM, com avanço a partir de 0,042 mm/rot. Para realizar o torneamento cilíndrico externo a seco, em um tarugo de liga de alumínio 6351 com diâmetro de 1.½" e comprimento de 300 mm, sem acabamento superficial. Para a ferramenta de corte, foram utilizados 6 bits de aço rápido (HSS) com dimensões de ¼" x 4". A afiação das ferramentas foi feita em um esmeril de bancada, utilizando os ângulos $\alpha = 8^\circ$, $\beta = 62^\circ$ e $\gamma = 20^\circ$ medidos pelo plano ortogonal, que são ângulos no sistema de referência para ferramentas usadas no torneamento cilíndrico externo [1].

As ferramentas foram devidamente fixadas ao suporte apropriado, para assim, acoplar o suporte a torre do torno. Para atingir o ângulo de ataque da aresta de corte da ferramenta, foi preciso rotacionar a torre para que formasse um ângulo de aproximadamente 90° entre a aresta da ferramenta de aço rápido e o tarugo de alumínio, padronizou a torre porta ferramenta rotacionada a um ângulo de aproximadamente 30° . Os bits foram escolhidos para poder realizar a usinagem e analisar a adesão formada na ferramenta.

No processo, realizou-se o desbaste no tarugo ao longo de 150 mm para as seis ferramentas. Os parâmetros de corte para os ensaios foram definidos com base nos estudos [11] e [9], presentes na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de corte.

Velocidade de corte (V_c) [m/min]	25	50
Avanço (f) [mm/rev]	0,042	
Profundidade de corte (a_p) [mm]	0,5	

As usinagens foram realizadas utilizando a profundidade e o avanço com o mesmo valor, alterando apenas a velocidade de corte entre 25 m/min e 50 m/min. Foi efetuado o total de seis usinagens, sendo três ferramentas de aço rápido para cada condição de velocidade de corte. Em três bits, realizou a usinagem com a velocidade de corte de 25 m/min e com os outros três a velocidade de corte de 50 m/min. Inicialmente, a rotação estabelecida foi de $n = 190$ RPM para a velocidade de corte de 25 m/min e para a velocidade de corte de 50 m/min, utilizou-se a rotação de $n = 475$ RPM. As rotações foram definidas utilizando a equação 2, onde n é o número de rotações por minuto e d é o tamanho do diâmetro do tarugo usinado, em mm.

$$n = \frac{V_c * 1000}{\pi * d} \quad (2)$$

Para a adequação da metodologia foi realizado um pré-teste para garantir uma correta análise das seguintes usinagens. Na primeira usinagem efetuou dois passos com a ferramenta e foi analisado que gerou um desgaste bastante expressivo, sendo esta usinagem definida como o pré-teste. Após isso, o critério de parada foi definido com apenas um passe de 150 mm para todas as ferramentas de corte, e após as usinagens realizou-se as medições dos desgastes de flanco ocorridos nas ferramentas.

Para a análise do desgaste das ferramentas de corte, foi utilizado um microscópio com câmera digital USB de 1000x com resolução de 640 x 480, conectado ao computador pelo software AmScope. A calibração do microscópio foi realizada diariamente com o auxílio de um paquímetro, a fim de garantir que as imagens e os valores dos desgastes fossem exatos.

Para uma análise mais detalhada do que ocorreu durante a usinagem, as ferramentas de corte desgastadas foram levadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), que tem o aumento bem maior possibilitando observar a ferramenta e todos os detalhes de sua superfície desgastada. Foi necessário realizar um corte ao longo da seção transversal de cada ponta da ferramenta de HSS para ser observado pelo MEV. Além de realizar a limpeza com álcool isopropílico no sonificador em todas as ferramentas para serem levadas ao MEV. Foi pré-definido o aumento que seria utilizado, tomando como base a análise e o aumento usado em outros estudos [11], [14] e [15]. O valor do aumento ficou definido entre 80x a 100x, com a finalidade de obter a melhor visualização da ferramenta para a identificação da adesão.

Além do aumento, também foi utilizado dois modos de operação que o MEV disponibiliza, a visualização por Elétrons Secundários (SE) e por Elétrons Retroespalhados (BSE). O modo de imagem por Elétrons Secundários foi utilizado por ser bastante útil na visualização de topografia da superfície, pois fornece uma imagem detalhada das características e morfologia dos desgastes. Ele é capaz de captar as diferenças de composição e rugosidade da superfície, o que ajuda a identificar a presença de material aderido e desgastes de flanco. Já o modo por Elétrons Retroespalhados, ele é sensível às diferenças de densidade e também de composição, o que permite a análise da distribuição de elementos presentes na superfície. O BSE é útil para identificar as camadas de material aderido,

além de observar a intensidade do desgaste. Com os dois modos de imagens, obtém-se uma visão mais ampla e complementar do mecanismo de desgaste adesivo. As imagens foram tiradas perpendicularmente à superfície principal de folga a fim de analisar o mecanismo de desgaste adesivo e a formação da aresta postiça de corte.

Os resultados foram obtidos pela comparação dos tipos de desgastes apresentados nas literaturas e os desgastes analisados após o torneamento com as ferramentas de corte. Observando se o desgaste foi maior ou menor quando houve aumento da velocidade de corte, sendo comparado com o que é esperado que ocorra de acordo com as informações da literatura. Além de analisar se o mecanismo de desgaste adesivo esteve ou não presente durante a operação. As análises foram realizadas em cada uma das ferramentas de corte utilizadas, considerando as seis ferramentas que foram utilizadas com as duas velocidades de corte diferentes, sendo três ferramentas de corte para cada condição.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após as usinagens e as análises preliminares, determinou-se que ocorreu desgaste de flanco nas ferramentas de aço rápido. Sendo assim, primeiramente será abordado as discussões sobre os resultados apresentados com as imagens ópticas. Entretanto, é importante ressaltar que essas análises são consideradas preliminares devido à limitação óptica. A confirmação definitiva da formação da adesão só será possível com as imagens obtidas por MEV.

A Figura 1 apresenta os desgastes de flanco ocorridos nos três bits de aço rápido após as usinagens por torneamento a seco, utilizando a velocidade de corte de 25 m/min. Imagens obtidas através do microscópio digital.



Figura 1. Imagens das análises do *VB* das ferramentas utilizadas com V_c de 25 m/min obtidas pelo microscópio digital. (Autoria Própria)

Após a análise óptica, comparando com os desgastes apresentados na literatura. Na Figura 1 foi observado o *VB* na superfície de folga após um passe nas ferramentas 25a e 25c, com tamanhos de 1,09 mm e 1,78 mm, respectivamente. Na área após o raio de ponta, é possível perceber que há espécies de sulcos marcando a ferramenta. Isso pode ser um indicio de que ocorreu a *attrition* durante a usinagem, que pode ter acelerado a formação do desgaste de flanco. Na ferramenta 25b não houve desgaste, mesmo sendo usinado com os parâmetros iguais às outras ferramentas. Não ocorreu a formação de APC aparente em nenhuma das ferramentas, sendo algo inesperado, pois, foram várias usinagens a seco e em uma baixa velocidade de corte com um baixo avanço em 150 mm do tarugo de alumínio.

A Figura 2 apresenta os *VB* ocorridos nas três ferramentas de aço rápido usinadas utilizando a velocidade de corte de 50 m/min. Imagens obtidas através do microscópio digital.

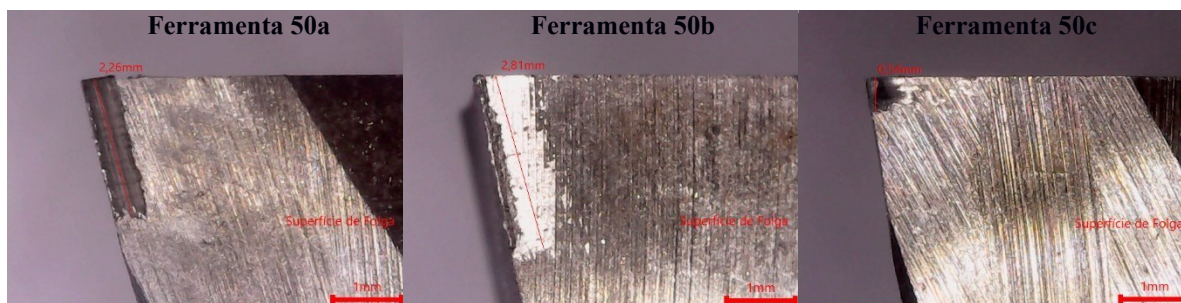


Figura 2. Imagens das análises do *VB* das ferramentas utilizadas com V_c de 50 m/min obtidas pelo microscópio digital. (Autoria Própria)

Diferentemente das três primeiras ferramentas, na Figura 2 pode-se observar que ocorreu desgaste de flanco em todas as ferramentas utilizando a velocidade de corte de 50 m/min, apresentando, respectivamente, 2,26 mm, 2,81 mm e 0,54 mm de *VB*. Na ferramenta 50b, apesar de apresentar um aspecto brilhoso na maior área afetada, percebe-se que no raio de ponta ocorreu algum tipo de desgaste que não é totalmente visível como o *VB* nas outras

ferramentas, mas que é possível que tenha sido uma ruptura do material aderido à ferramenta. Na área que apresenta o brilho, pode ter ocorrido o VB e/ou mecanismo de desgaste adesivo, que será identificado com a análise do MEV. Assim como as ferramentas usinadas com a $V_c = 25$ m/min, não houve a formação de APC em nenhuma das três ferramentas, mesmo com o aumento da velocidade de corte.

A Tabela 2 apresenta todos os valores dos VB ocorridos durante os ensaios de usinagem para cada condição de corte. Além de conter a média e desvio padrão para obter uma análise mais descritiva.

Tabela 2. Valores do VB com as velocidades de corte de 25 e 50 m/min, a média e o desvio padrão de todas as ferramentas em cada condição.

Bit	25 m/min	50 m/min
1	1,09 mm	2,26 mm
2	-	2,81 mm
3	1,78 mm	0,54 mm
Média (mm)	0,9567	1,87
Desvio padrão	0,8974	1,1841

Inicialmente, o formato do cavaco era circular e regular, diferente do formato quando a ferramenta estava na metade do tarugo. Nesta etapa, os cavacos eram mais finos, maiores e muito irregulares até o fim do processo. Isso pode ser possivelmente atribuído à adesão já presente na ponta da ferramenta de HSS durante a operação. Foi necessário ter cuidado durante a operação, pois os cavacos se enrolavam em torno da ferramenta de corte, o que poderia prejudicar a análise posterior com possibilidade de quebrar as camadas de uma futura APC ou levar alguma parte da microestrutura da ferramenta à ruptura.

As ferramentas apresentaram alguns desgastes expressivos mesmo com apenas um passe de 150 mm. Conforme a literatura, com o aumento da velocidade de corte foi observado que o desgaste de flanco nas ferramentas utilizadas com 50 m/min foram maiores em relação aos bits com 25 m/min porém, a última ferramenta apresentou o contrário, com o desgaste de flanco maior na usinagem de $V_c = 25$ m/min e o menor na ferramenta usinada com 50 m/min. Nas seis usinagens, não foi perceptível a clara formação da APC. Vale lembrar que a processo foi feito no torneamento a seco e com apenas um passe em cada ferramenta de aço rápido (HSS).

A partir da média do VB na Tabela 2, é possível observar que o valor na $V_c = 50$ m/min é maior que na $V_c = 25$ m/min, apresentando maior VB com o aumento da velocidade, assim como ocorreu no estudo [9] citado anteriormente. Mesmo a ferramenta 25b não apresentando desgaste de flanco, é possível que tenha ocorrido o mecanismo de desgaste adesivo. Porém, só poderá ser confirmado com a análise da imagem obtida pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Os desgastes de flanco expressivos podem ter tido sua formação acelerada em decorrência da adesão gerada no processo, uma vez que durante a usinagem houve a junção de fatores contribuintes para ocorrer este mecanismo de desgaste, tais como os parâmetros de corte utilizados, tipo de ferramenta de corte e material da peça usinada. Neste caso, foi usinado alumínio, que em comparação com o aço, é menos duro e possui menor resistência à deformação plástica, além de ser um bom condutor térmico. Isso pode gerar mais calor durante o processo, facilitando a formação de camadas de material aderido na superfície da ferramenta de aço rápido, principalmente no ângulo de folga.

Os bits de aço rápido não possuem revestimentos para serem tão resistentes ao calor quanto outros tipos de ferramentas, o que pode levar ao aumento da temperatura de corte. Como mencionado anteriormente, um avanço baixo pode gerar maior desgaste, e foi utilizado o menor avanço disponível do torno. E principalmente, as baixas velocidades de corte utilizadas durante a operação. Sendo a adesão o mecanismo de desgaste predominante em baixas temperaturas [1], e todos esses fatores levam a isso.

Para analisar se a adesão realmente está associada aos desgastes de flanco ocorridos, e obter uma possível explicação para a não formação da Aresta Postiça de Corte (APC), foi necessário levar as ferramentas ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para poder levantar hipóteses sobre esses acontecimentos. Utilizando os dois modos de operação do MEV, por Elétrons Secundários e por Elétrons Retroespalhados. As imagens obtidas por SE, por realizarem uma análise topográfica, ajudarão a observar a presença de material aderido, evidenciando a existência de uma camada adicional sobre a superfície da ferramenta. Já o BSE, irá apresentar uma imagem com a diferença de material na superfície, através das tonalidades de cores resultantes das diferentes densidades, permitindo a fácil visualização da adesão. A Figura 3 mostra a vista da superfície de folga das ferramentas que foram usinadas com a $V_c = 25$ m/min onde ocorreu o VB . Imagens obtidas pelo MEV.

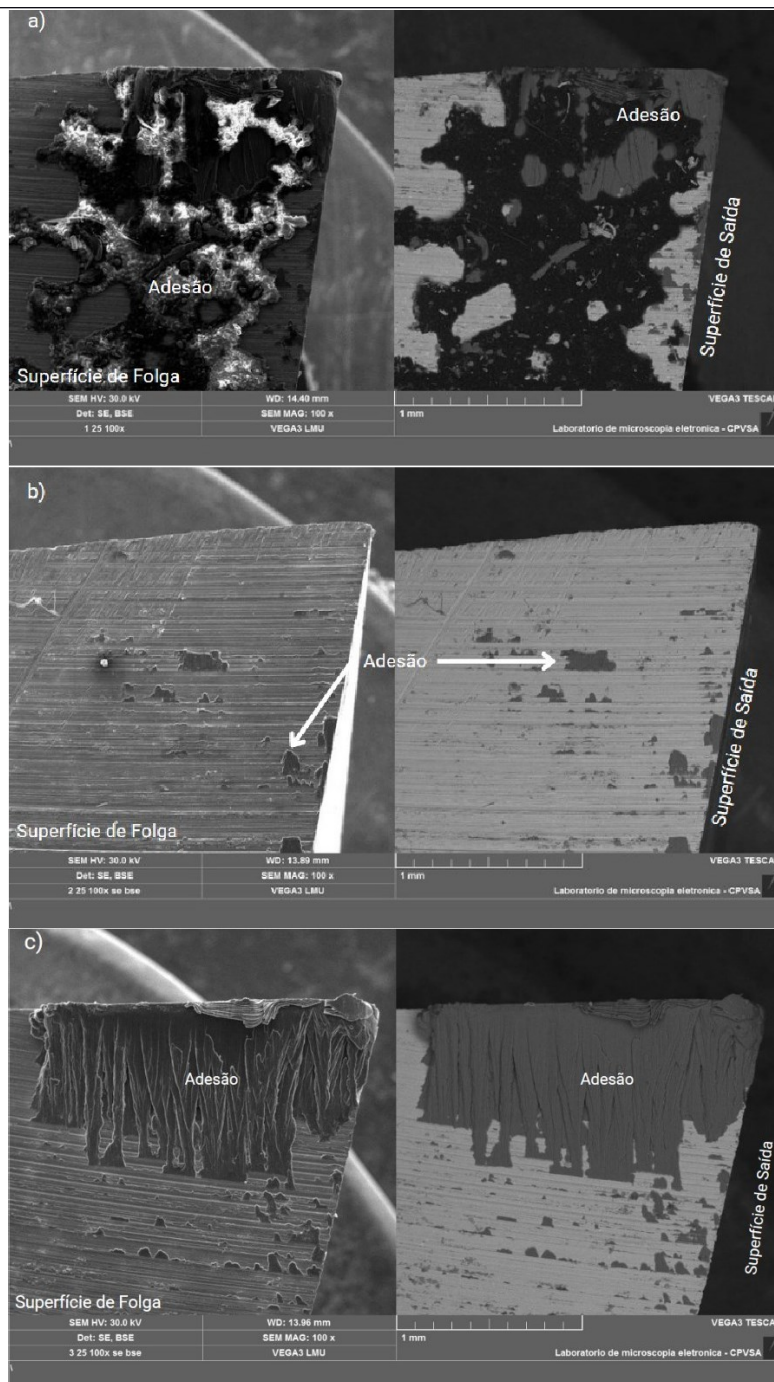


Figura 3. Imagens da superfície de folga das ferramentas de aço rápido utilizadas com a velocidade de corte de 25 m/min. Obtidas através do MEV utilizando elétrons secundários e retro espalhados, permitindo a análise dos aspectos do mecanismo de desgaste adesivo. a) Ferramenta 25a, b) Ferramenta 25b e c) Ferramenta 25c. (Autoria própria)

Com as imagens da Figura 3, é apresentado a adesão que ocorreu nas ferramentas de HSS após o torneamento do alumínio, devido ao atrito entre o cavaco e a ferramenta. Isso é comprovado tanto pela imagem com SE, que se revela a presença de relevo na superfície de folga da ferramenta, quanto pela imagem com BSE, que mostra variações de densidade na superfície. Na imagem BSE, o material aderido é identificado pela tonalidade mais escura, enquanto o material original da ferramenta é visualizado em tonalidade cinza. Nas ferramentas 25a e 25c estão presentes os mecanismos de desgaste adesivo. Isso comprova que a análise feita para a Figura 1 em ambas as ferramentas, estava correta. As duas ferramentas demonstrando bastante adesão, tanto que é possível observar que apresenta várias densidades com tonalidades diferentes. Apesar de ser a única ferramenta que não apresentou desgaste, ainda ocorreu uma leve aderência de alumínio na ferramenta 25b.

A Figura 4, apresenta as imagens do MEV com a adesão gerada na superfície de folga principal das ferramentas de corte que foram usinadas utilizando a $V_c = 50$ m/min.

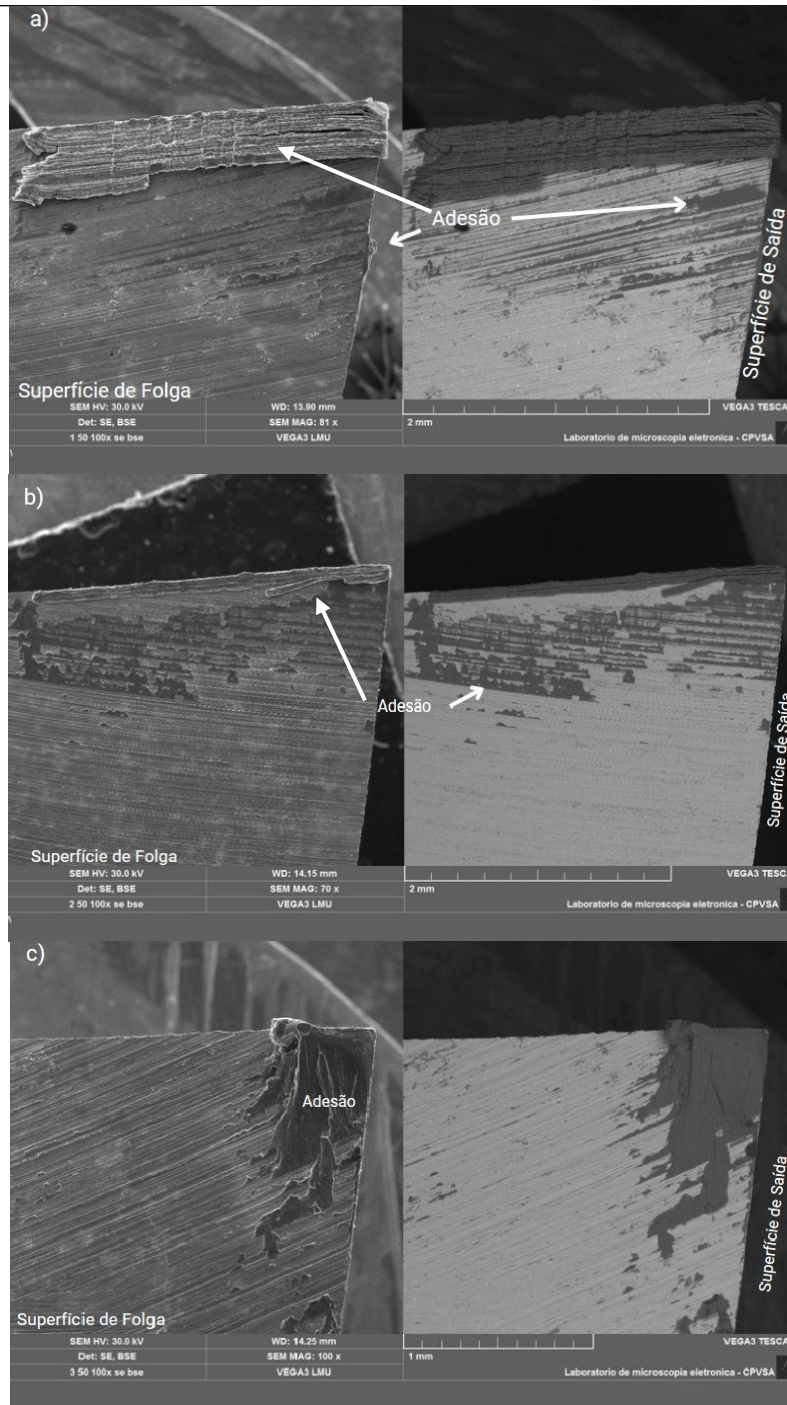


Figura 4. Imagens da superfície de folga das ferramentas de aço rápido utilizadas com a velocidade de corte de 50 m/min. Obtidas através do MEV utilizando elétrons secundários e retro espalhados, permitindo a análise dos aspectos do mecanismo de desgaste adesivo. a) Ferramenta 50a, b) Ferramenta 50b e c) Ferramenta 50c. (Autoria própria)

Na Figura 4, a adesão presente nas ferramentas utilizadas com $V_c = 50$ m/min não é tão evidente quanto nas ferramentas da Figura 3. Isso está de acordo com a literatura, que confirma a presença mais significativa de adesão em velocidades de corte menores, como no estudo mencionado [11]. O aspecto brilhoso aparente na ferramenta 50b, é o mecanismo de desgaste adesivo. O material ficou aderido depois do raio de ponta, que apresenta uma adesão, porém com alto relevo. O mesmo acontece com a ferramenta 50a, mas esse relevo possui uma espessura bem maior comparado com a 50b. Já a ferramenta 50c apresenta a adesão mais concentrada na aresta principal de corte e no ponto de corte, diferentemente das outras ferramentas que a adesão se demonstrou mais espalhada por toda superfície de folga primária.

Com a análise de todas as imagens do MEV, serão discutidas as análises preliminares mencionadas no início deste tópico. O resultado foi conforme o esperado, de acordo com o que é relatado na literatura, ou seja, a formação de adesão e attrition em baixas velocidades de corte e com os parâmetros utilizados. O mecanismo de desgaste

adesivo esteve presente em todas as ferramentas nas duas condições de corte. No entanto, além da presença de adesão, também foi identificado que em algumas das ferramentas pode não ter ocorrido desgaste de flanco, apenas a aderência de material na superfície de folga. Isso leva a uma análise incorreta das imagens obtidas por meio do microscópio digital, o que pode ser explicado. O trabalho foi realizado com base no que é apresentado pela literatura. Assim, com a imagem da ferramenta no microscópio digital após um passe no torno e tendo conhecimento de como seria o desgaste de flanco, foi determinado um critério de parada, uma vez que os valores ultrapassaram o que é estimado como o fim de vida da ferramenta. Portanto, considerou-se que, naquela área da ferramenta, de fato ocorreu desgaste de flanco devido aos fatores presentes no momento após o torneamento e também pela coincidência desses fatores com o que é explicado na literatura. Após levar as ferramentas de corte desgastadas ao MEV, observou-se que é possível que na maioria das ferramentas não tenha ocorrido desgaste de flanco. Isso pode explicar por que a ferramenta 25b não apresentou desgaste, pois teve pouca aderência durante a operação, permitindo que a ferramenta desbastasse o alumínio com apenas um passe, o qual não foi suficiente para gerar desgaste.

Outra análise constatou a ausência de formação da aresta postiça de corte, mesmo utilizando os parâmetros que normalmente contribuem para o seu surgimento, porém não foram suficientes para ocorrer esse fenômeno. Provavelmente pelo mesmo motivo de não ter apresentado desgaste, foram poucas usinagens com a mesma ferramenta, impedindo a formação da APC na aresta principal de corte. No entanto, com as imagens obtidas do MEV, é possível observar que nas ferramentas 50a e 50b há a presença de um revelo acentuado na superfície de folga principal, indicando claramente a ocorrência da adesão. Essa característica pode ser uma possível indicação da presença da aresta postiça de corte. Ramaswami [9], ao discutir sobre os tipos de APC, menciona dois tipos de aresta postiça de corte: uma presente na superfície de saída e outra formada na área de desgaste de flanco da superfície de folga, conhecida como "*The Edge Growth*". Com base nisso, leva-se a uma análise tendenciando que seja possível que isso tenha ocorrido nas ferramentas de corte 50a e 50b. Apesar de existir um indicativo dessa aresta postiça, para confirmar essa análise, seria necessário novas imagens do MEV mostrando a superfície de folga secundária a fim de analisar a geometria da formação nessa aresta.

5. CONCLUSÕES

A minimização da adesão na usinagem é importante para garantir a qualidade do produto final e reduzir os custos de produção. Com base nos resultados obtidos e na literatura, pode-se concluir que um dos principais fatores que influenciam no mecanismo de desgaste adesivo na usinagem de alumínio com ferramentas de aço rápido é a velocidade de corte.

O estudo obteve resultados que condizem com o que é explicado na literatura. A metodologia utilizada não ocasionou na formação da APC, sendo necessário realizar mais passes na usinagem para que esse fenômeno ocorra.

A adesão pode levar à interpretação equivocada de que houve desgaste na ferramenta, quando na realidade trata-se apenas de uma camada de material aderido na superfície de folga. Sem a análise por microscopia eletrônica, pode-se cometer o erro de inferir que houve desgaste na ferramenta.

O torneamento a seco utilizando alumínio e bits de aço rápido em baixas velocidades de corte, provoca a formação da adesão. Portanto, caso seja necessário realizar esse tipo de usinagem, será preciso adotar medidas para reduzir a adesão, como aumentar a velocidade de corte e utilizar fluidos de corte durante o processo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B.; "Teoria da Usinagem dos Materiais", Edgard Blücher, 3ª edição, 2015.
- [2] DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 3ª edição, Ed. Artliber. São Paulo/SP, nov. 2001.
- [3] FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. São Carlos: EDGARD BLÜCHER, 1969.
- [4] CHILDS, T; MAEKAWA, K.; OBIKAWA, T.; YAMANE, Y. Metal Machining: Theory and Applications. London: Arnold, 2000. 411 p.
- [5] TRENT, E.; WRIGHT, P. Metal cutting. 4.ed. Oxford: Butterworth – Heinemann, 2000. 446 p.
- [6] PIRES, F.B.; UEMURA, L.C.; ZANGHETTIN, L. Energia mecânica com ênfase em processos de usinagem – torneamento. REGRAD, UNIVEM/Marília-SP, v. 10, n. 1, p 325 - 338, outubro de 2017
- [7] OZIMINA, D., MADEJ, M., KOWALCZYK, J., OZIMINA, E. and PLAZA, S. (2018), "Tool wear in dry turning and wet turning with non-toxic cutting fluid", Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 70 No. 9, pp. 1649-1656.
- [8] DINIZ, A.E., MACHADO, Á.R. & CORRÊA, J.G. Tool wear mechanisms in the machining of steels and stainless steels. Int J Adv Manuf Technol 87, 3157–3168 (2016).
- [9] RAMASWAMI, R., The effect of the built-up-edge (BUE) on the wear of cutting tools, Wear, Volume 18, Issue 1, 1971, Pages 1-10,
- [10] DINIZ, A. & MICARONI, R. (2002). Cutting conditions for finish turning process aiming: the use of dry cutting. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 42. 899-904. 10.1016/S0890-6955(02)00028-7.

-
- [11] BATISTA PONCE M., DEL SOL ILLANA I., FERNANDEZ-VIDAL SR., SALGUERO GOMEZ J. Experimental Parametric Model for Adhesion Wear Measurements in the Dry Turning of an AA2024 Alloy. Materials (Basel). 2018 Sep 3;11(9):1598.
- [12] WEILL, R. "Techniques d'usinage". Duod,1971.
- [13] KASHKOOL LH. Optimization of Machining Parameters of AISI 1045 Steel for Better Surface Finish and Tool Life Using TiN Coated Carbide Insert. Tikrit Journal of Engineering Sciences 2022; 29(2): 1- 6.
- [14] SILVA, L. R., SILVA, O. S., CEZAR, A. H., & SANTOS, F. V. Mecanismos de desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte na liga ti-6Al-4V. ABCM, 2016.