



Artigo

Estudo da influência do método de lubri-refrigeração no acabamento da peça usinada e na vida da ferramenta de corte

Amanda Beatriz Barbosa Silva ^[1] e Ramsés Otto Cunha Lima ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semiárido, Engenharia Mecânica; aluno; amandabeatrizbs@outlook.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semiárido, Engenharia Mecânica; orientador; ramses.cunhalima@ufersa.edu.br

Recebido: 03/12/2021;

Aceito: 12/06/2022;

Publicado: 30/06/2022.

Resumo: Na indústria metal-mecânica é interessante que exista um gerenciamento envolvendo sustentabilidade, produtividade e qualidade, considerando sempre que o produto final deve ter um padrão de qualidade aceitável. No que diz respeito ao processo de usinagem, os fluidos de corte hoje são essenciais, pois desempenham algumas funções consideradas indispensáveis. Além disso, deve-se dar a devida importância a grande quantidade de calor desenvolvida durante o corte, o qual, precisa ser reduzido. Nesse contexto, considera-se uma alternativa promissora, a redução da utilização de fluidos. Como consequência do que foi exposto, será realizado a usinagem do aço carbono ABNT 1045 utilizando insertos de metal duro como ferramenta, tendo como principal objetivo atender a uma exigência de rugosidade superficial e aos padrões básicos para esse tipo de operação. A partir disso, uma avaliação será feita de maneira a discutir qual dos três métodos de lubrificação é mais adequado: a seco, fluido abundante e MQF (Mínima Quantidade de Fluido) e em como adequar o uso do fluido de corte para verificar a influência desses recursos na vida da ferramenta e no acabamento da peça, sempre considerando que os parâmetros de corte utilizados serão fixos para os três processos.

Palavras-chave: Fluidos de corte, MQF, usinagem, desgaste, rugosidade.

Abstract: In the metal-mechanic industry, management involving sustainability, productivity and quality is necessary, always considering that the final product must have an acceptable quality standard. Regarding to the machining process, cutting fluids are essential, as they perform some functions considered indispensable. In addition, Much importance must be given to the large amount of heat developed during cutting, which needs to be reduced. In this context, reducing the use of cutting fluids is considered a promising alternative. In this research, the machining of carbon steel ABNT 1045 will be carried out using carbide inserts as a tool, with the main objective of meeting a requirement for surface roughness and the basic standards for this type of operation. Therefore, an evaluation will be made in order to discuss which of the three lubrication methods is more suitable; dry, abundant fluid and MQF (Minimum Quantity of Fluid) and on how to adapt the use of cutting fluid to verify the influence of these application on the tool life and on superficial quality of workpiece, always considering that the cutting parameters used will be fixed for the three processes.

Key-words: Cutting fluids, MQF, machining, wear, roughness.

1. INTRODUÇÃO

O grande avanço tecnológico na indústria metal mecânica vem gerando altas demandas de diversos produtos, estimulando a competitividade no mercado, exigindo, portanto, uma maior qualidade no produto final. Em contrapartida, a sustentabilidade continua sendo uma das principais barreiras para a indústria fabricar peças de qualidade, e ambientalmente amigável [1]. Em se tratando de qualquer esforço para aumentar a produtividade e reduzir custos, deve-se considerar estudos com alternativas disponíveis e viáveis tanto nessa quanto em qualquer outra área. Na usinagem, o uso dos fluidos de corte, quando utilizados adequadamente, trazem benefícios, considerando que um dos fatores que influenciam diretamente na integridade da superfície de uma peça são as altas temperaturas durante o processo, necessitando, portanto, de um líquido refrigerante e/ou lubrificante [2].

Dessa maneira, muito se tem estudado para restringir a utilização dos fluidos de corte e reaproveitá-los de alguma forma, tentando manter tanto a qualidade da peça quanto a vida da ferramenta. Em virtude disso, assim como em qualquer processo, não se deve descartar a possibilidade de alguns inconvenientes, com o uso dos fluidos de corte não seria diferente. Entre alguns desses problemas causados pode-se citar a dificuldade de reciclagem do fluido de corte e dos cavacos molhados por ele, a poluição ambiental gerada, além de doenças causadas aos operadores das máquinas.

Ainda assim, de um modo geral, o tratamento dos óleos usados durante o processo quando associado com o método da Mínima Quantidade de Fluido (MQF) acabam se tornando aliados, já que o óleo ao final da sua vida útil seja por capacidade de lubrificação, por desenvolvimento de bactérias e fungos ou por excesso de contaminações devem ser tratadas para reciclagem dos seus componentes, descarte ou tratamento ambiental [5].

Essa técnica de diminuição do fluido de corte é conhecida também como MQF, que se trata basicamente de pulverizar uma pequena quantidade de fluido na zona de corte da peça afim de diminuir a quantidade de calor gerada devido ao atrito ferramenta-peça e cavaco-ferramenta, aumentando assim a vida da ferramenta e consequentemente um melhor acabamento/qualidade da peça usinada [3]. Sendo assim, o investimento em pesquisas busca desenvolver óleos com vida mais longa de forma que a aplicação dos métodos contribuam para diminuir o descarte e consequentemente causar um menor dano a saúde do operador ainda mantendo sua eficiência. Fundamentando-se nisso, as condições de usinagem e as variáveis envolvidas no processo são importantes para o estudo da influência dessa aplicação [2].

Considerando isso, o presente estudo discutirá os três modos de lubrificação diferentes existentes; a seco, fluido abundante e MQF, afim de verificar influência desses métodos na vida da ferramenta e no acabamento da peça, como também minimizar as agressões causadas por esse processo, já que o objetivo é minimizar o descarte e utilização desses óleos e ao mesmo tempo manter os ganhos alcançados com relação a vida útil da ferramenta e a qualidade da peça.

1.1 Revisão da Literatura

É interessante estudar a viabilidade de cada método de lubrificação, de forma a considerar fatores importantes que justifiquem a utilização de um determinado processo. O intuito dessa seção é principalmente esclarecer, conceituar e caracterizar componentes importantes que estão relacionados a usinagem, de forma a exemplificar com estudos, confrontar parâmetros aplicados e as possíveis melhorias de cada método. A necessidade de gerenciamento incluindo planejamento do processo, sustentabilidade e preservação da saúde do ser humano são temas que estão diretamente relacionados a indústria metal-mecânica, e por isso, também serão tratados como variáveis importantes em todo sistema.

1.1.1 Desgaste de ferramentas de corte

Existem diversos tipos de desgastes e avarias que podem ocorrer em uma ferramenta de usinagem. No que diz respeito ao desgaste, trata-se da perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta durante o processo de corte [2]. Esse fenômeno [2] geralmente ocorre até a ferramenta perder sua capacidade de corte e normalmente desgasta-se mais na área com maior duração de solicitação térmica e mecânica na região de corte, ou seja, possui uma relação direta com a velocidade de corte além do avanço e da profundidade durante esse procedimento.

Na região de corte a grande quantidade de calor gerada é devido as elevadas pressões necessárias ao cisalhamento, esse excesso de aquecimento deforma a peça e produz imperfeições no trabalho. Além disso, a perda contínua de fragmentos se torna um problema quando a temperatura aumenta e as mesmas se soldam à parte cortada [6].

Sabendo disso, um dos motivos que diminuem a proporção do desgaste da ferramenta é o controle da temperatura na área mais afetada, nesse caso ferramenta-peça e cavaco-ferramenta. Essa diminuição da temperatura, geralmente, é feita através da utilização de auxiliares: os fluidos de corte, sendo assim analisado diversas variáveis para melhor escolha em uma determinada usinagem [2,4]. Como dito anteriormente, existem áreas específicas nas ferramentas que se desgastam mais rapidamente que outras, mas deve-se atentar que nesse setor tudo pode variar. Nesse caso, pode depender da forma da solicitação térmica, mecânica e química da região de corte. Por isso, a aplicação do fluido de corte a áreas previamente analisadas que, de certa forma são mais afetadas, é essencial.

À medida que a ferramenta é utilizada, o desgaste ocorre e, consequentemente, altera as dimensões da peça e conduz a um pior acabamento. Em alguns casos, durante o processo de corte, normalmente quando a ferramenta já se encontra com seu nível de desgaste bem elevado ocorre a geração de faíscas tornando a superfície usinada defeituosa. De modo geral, quando esse fenômeno ocorre, ela já extrapolou as medidas de desgaste que estabelecem o seu critério de fim de vida. Inteirando-se de fatos como esse, foram desenvolvidos critérios que definem o fim de vida de uma ferramenta, dentre eles tem-se: a exatidão dimensional e geométrica, o estado da ferramenta e a textura superficial [4].

1.1.2 Aplicação de fluidos de corte

Tendo conhecimento sobre as consequências que o desgaste pode causar e a forma como isso pode afetar a produtividade de uma indústria é interessante buscar o aprimoramento de qualquer processo sempre almejando o seu bom desempenho. Assim, busca-se utilizar produtos e meios que auxiliem no resultado desejado. Nesse sentido, no que diz respeito ao sistema de usinagem, existem diversos fluidos de corte que sustentam tanto um melhor acabamento quanto uma melhoria na vida útil da ferramenta. Isso também significa que, as exigências básicas desse processo são produzir peças dentro de tolerâncias exigidas e acabamentos dimensionados dentro do padrão, ao menor custo possível. A classificação desses fluidos conduz a uma escolha mais confiável acerca dos parâmetros, que são levados em consideração na hora de executar essa técnica, já que cada fluido possui características específicas [4,8]. Sabendo disso [2], os fluidos de corte podem ser definidos a partir de diferentes fluidos básicos, e ainda dividi-los em três tipos: oleosos, aquosos e gasosos.

Existem diversas formas de aplicação dos fluidos e é importante analisar as estratégias para cada caso e processo separadamente, significando que a escolha do método de como o fluido será aplicado está relacionado a máquina que está sendo utilizada, a ferramenta, peça e o processo. Tomando como exemplo e base os fluidos emulsionáveis considerando que será o componente utilizado no estudo [2,5] pode-se caracterizar como sendo a composição de uma pequena quantidade de óleo em água acompanhado pelo uso de agentes emulsificantes.

Acrescido a isso, pode-se mencionar também que são substâncias facilitadoras que contribuem para a dispersão do óleo na água, o que mantém disperso como uma emulsão estável. Dessa forma, esse fluido possui um alto poder refrigerante e é bastante utilizado no processo de usinagem a altas velocidades de corte, aliado ainda a fatores de lubrificação e retirada de cavaco, ou seja, a fase oleosa, por assim dizer, é responsável pela lubrificação e a água vai promover o resfriamento do local [2,5]. Essas características [5] podem ser balanceadas de acordo com a concentração de cada elemento que vai variar de acordo com a operação mecânica que será realizada.

Desse modo, a presença de óleo mineral ou vegetal, emulsificadores e inibidores da corrosão, se sobressaem às desvantagens do uso da água, que apesar de remover parte do calor gerado durante o processo de corte, possui ação corrosiva e baixo poder de umedecimento dos metais. Esses anticorrosivos, são aditivos que evitam os efeitos nocivos da água presente na emulsão. Portanto, apesar da água já ter sido muito utilizada como uma forma de resfriar a ferramenta, esse método foi sendo substituído com os anos devido ao desenvolvimento das pesquisas ao longo do tempo [2].

Não obstante, as emulsões possuem também desvantagens, dentre elas pode-se destacar o crescimento bacteriano nesse tipo de fluido, que conseqüentemente resulta em uma quebra das emulsões devido ao não tratamento periódico recomendado de biocidas adequados [6]. Além disso, existem situações específicas em que os fluidos emulsionáveis não são adequados, resultando na consideração de outros meios. Um grande exemplo são os óleos integrais que são conhecidos também como óleos puros. Dentre algumas dessas situações pode-se citar principalmente operações de desbaste pesado em condições mais críticas, podendo ser óleos minerais ou vegetais. A preferência desses auxiliares a situações mais particulares, está relacionada ao calor específico do fluido, considerando que a capacidade de refrigeração é muito menor do que os fluidos aquosos [2].

Em contrapartida, as qualidades lubrificantes são melhores o que acaba resultando em uma quantidade de calor menor a ser gerada na zona térmica. Aos óleos de características viscosa, é preferencialmente utilizado em situações em que a velocidade de corte seja menor e o avanço e a profundidade maiores. Considerando que a baixa velocidade de corte contribui para a penetração do fluido nas interfaces do processo [2].

Apesar das vantagens dos óleos, sua utilização tornou-se inviável devido ao alto custo e a rápida deterioração, porém, ainda são muito utilizados como aditivos, nos fluidos minerais, com objetivo de melhorar as suas propriedades lubrificantes [1]. É necessário compreender que mesmo com o melhor produto se o método de aplicação não for eficaz, ou seja, não alcançar efetivamente a região de corte, o produto não terá um bom desempenho e conseqüentemente não cumprirá as vantagens que são atribuídas ao seu uso.

1.1.3 Métodos de Lubri-refrigeração

As autoridades sindicais e ambientais referindo-se a indústria de transformação metal mecânica a partir da década de 1970, firmaram uma legislação mais rígida no controle de produtos utilizados na área de usinagem dos materiais [7]. Esses produtos, os fluidos de corte já não podem ser descartados deliberadamente, devido a busca constante pela redução dos danos ambientais causados. Por isso, surge a necessidade de aumentar a vida útil do fluido de corte de forma a cumprir a legislação vigente de controle ambiental. O principal objetivo é reduzir o descarte prematuro do fluido e controlar os fatores que afetam o seu desempenho [6]. Para isso, a associação do método MQF e a reciclagem ou tratamentos utilizados durante o processo acaba se tornando uma solução viável para obtenção de uma relação mais amigável entre o meio ambiente e a indústria metalúrgica.

Apesar da proposta acima como forma de amenizar o problema, uma parte desse produto ainda é descartada no próprio ambiente de trabalho por emissões e evaporação gerado devido ao contato entre as peças e cavacos. Além disso, durante a realização da limpeza do chão fabril com água o risco de poluição do solo, ar e água são

altos. Devido a esses problemas surge o conceito MQF, seguido do método a seco e a necessidade de um estudo mais detalhado acerca disso [7].

1.2.1 Fluido abundante

Considerando a responsabilidade ambiental que vem sendo constantemente cobrada nas últimas décadas pelas autoridades sindicais e ambientais, esse método de lubrificação é um pouco complicado de se utilizar, já que a intenção é evitar o descarte deliberado do fluido no ambiente assim como preservar a saúde do operador e esse processo como o próprio nome já diz ‘fluido abundante’, utiliza o fluido de corte ostensivamente. Apesar disso, [2] não se pode esquecer os inúmeros benefícios do uso desses auxiliares na usinagem. A lubri-refrigeração permite uma redução do coeficiente de atrito entre o cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, facilitando o fluxo de cavaco, reduzindo a força e a potência de corte e conseqüentemente, a temperatura. Por esse motivo ainda é um dos métodos mais utilizados na indústria metalúrgica.

Em operações com baixas velocidades de corte a lubrificação é essencial já que evita a formação da aresta postiça de corte, nesse tipo de operação é recomendável utilizar um fluido a base de óleo, enquanto em operações com altas velocidades, é mais interessante o uso de um fluido a base de água, o que garante uma melhor refrigeração [11]. Além disso, deve-se considerar também que a resistência a pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar, boas propriedades antifricção e antisolantes são algumas das características essenciais para que um fluido seja um bom lubrificante.

Nesse contexto [12] pode-se apresentar com a intenção de esclarecer, um estudo realizado recentemente utilizando o método de fluido abundante, também conhecido como usinagem inundada. Consistia basicamente em analisar o desgaste progressivo e a rugosidade, após o torneamento de um material específico (15-5 PH SS) com uma vazão preestabelecida de 3,75 L/min de fluido de corte. Esse produto utilizado foi preparado com uma mistura de 5% da concentração de óleo mineral em água. A partir disso, concluiu-se que a progressão do desgaste é mais estável no fluido abundante seguido do método da mínima quantidade de fluido, fazendo com que o método a seco se destaque de maneira negativa devido as altas temperaturas atingidas no experimento.

Sabendo disso, analisando de forma geral e relacionando os custos necessários para manter os fluidos pronto para uso e em quantidade considerável, logicamente é mais interessante que nessa indústria específica (metal-mecânica), essa técnica seja substituída por métodos e processos mais viáveis que atendam de forma mais ampla, considerando todos os requisitos com cuidados ambientais necessários.

1.2.2 Mínima Quantidade de Fluido (MQF)

Apesar da exigência na redução da problemática do uso do fluido de corte, assim como a usinagem a seco, o método MQF está entre os temas de maior estudo na área de usinagem, pelo motivo que essa técnica de usinagem ecológica também possui atrativos econômicos no que diz respeito a redução das despesas associadas [7]. Nessa técnica, a função de lubrificação é feita pelo óleo e a refrigeração principalmente pelo ar comprimido, apesar de existir várias outras vantagens, apenas essas duas já conduzem a um avanço nesse setor e conseqüentemente leva a obtenção de bons resultados. Existem três diferentes e importantes tipos de sistemas de aplicação com mínimo volume de óleo, são eles: baixa pressão, bombas dosadoras e pressão.

Na primeira forma de aplicação os sistemas de pulverização a baixa pressão, em que o refrigerante é aspirado por uma corrente de ar e levado à superfície ativa como uma mistura. Esse processo se distingue por um fluxo volumétrico de refrigerante, podendo variar a quantidade com o tempo. O segundo tipo, utiliza bombas dosadoras com alimentação pulsatória de uma quantidade de lubrificante previamente definida para a superfície ativa, sem ar. Geralmente, utiliza-se esse método quando os processos são descontínuos, ou seja, não existe um sequenciamento de procedimentos. O terceiro e mais comumente utilizado é o de pressão, em que o refrigerante é bombeado para o local através de um componente de suprimento que está separado. Ali ele é misturado com o ar comprimido fornecido separadamente, de maneira que as quantidades de ar e lubrificante podem ser ajustadas independentemente [8].

É interessante salientar que existe uma diferença entre usinagem com quantidade reduzida de fluido e com mínima quantidade de fluido. A utilização desse auxiliar envolve diretamente o sistema como um todo; máquina, ferramenta, peça e processo. Assim, tanto os benefícios quanto os inconvenientes gerados pelo processo são alterados de acordo com a mudança dos parâmetros de usinagem [4].

A furação é um processo que exige um certo cuidado e possui particularidades, por isso pode-se tomar como exemplo esse recurso sendo realizado em um material como o alumínio, de forma a entender que esse esquema não pode ser realizado a seco já que o alumínio possui problemas com aderência e por isso, recomenda-se neste caso o uso da usinagem a mínima quantidade de fluido. Nesse sentido, o método de MQF destaca-se em alguns casos e a usinagem de alguns materiais específicos acaba se tornando mais viável através desse método, considerando os recursos e o acabamento exigido. Assim, devido a casos como esse o método de lubri-refrigeração varia de acordo com o material usinado, as dimensões exigidas da peça e a ferramenta escolhida [4]. Já no caso do aço, o desempenho da furação vai variar de acordo com as propriedades do material, por exemplo, a adição de

alguns elementos de liga desfavorece a aplicação dessa técnica na usinagem. Aços sem elementos de liga e de médio carbono apresentam bons resultados quando usinados tanto a seco quanto a MQF.

Através de análises realizadas em laboratório [14] verificou-se que a quantidade de calor gerada durante a usinagem com mínima quantidade de fluido é menor quando equiparada a usinagem a seco e maior quando relacionada a usinagem por inundação. Os testes foram realizados a operações de torneamento com ligas de alumínio (6061) a 5000rpm, utilizando pastilhas de metal duro, variando o fluido em duas taxas de 50 mL/h para 100 mL/h, com profundidade de corte e taxa de avanço fixadas em 1,0mm e 0,15mm/rev. Considerando que a variação do fluido é específica para o método abordado nesse tópico. Observou-se também que a rugosidade da superfície pode ser melhorada com aplicação de refrigeração, essa melhora é atribuída a redução na transferência de material para a superfície usinada.

Além disso, em outro estudo, através de ensaios experimentais foram encontrados resultados positivos com a utilização dessa técnica visando a viabilidade ambiental no processo através da mínima quantidade de fluido utilizada. Como por exemplo, pode-se citar um ensaio conduzido em um centro de torneamento utilizando o aço AISI 1045 com a ferramenta CNMG 432 com revestimento CVD, velocidade de corte de 225m/min, taxa de alimentação de 0,1mm/rev e profundidade de corte de 1,2mm. Os resultados mostram que não ter aplicação de fluido de corte tende a produzir maiores tensões residuais de tração. A aplicação de MQF para o mesmo processo reduziu consideravelmente a magnitude das tensões residuais [10].

1.2.3 Usinagem a seco

Os custos referentes aos fluidos de corte utilizados durante o processo de usinagem podem ser superiores a 15% dos custos de fabricação, além do perigo direcionado ao operador e a severidade imposta pela legislação a respeito dos descartes ambientais. Tais despesas referem-se à aquisição do produto, ao armazenamento, manutenção e despejo. Assim, considerando esses fatores, uma das soluções estudadas para reduzir estes inconvenientes é a usinagem a seco que pode ser considerada a tecnologia mais limpa e de baixo custo já que os fluidos de corte são eliminados do processo [8].

Para usufruir desse método é necessária uma análise específica para cada situação, já que a não utilização do fluido significa, conseqüentemente, a ausência das suas vantagens [8]. Apesar do estudo particular de cada caso, [2] pode-se otimizar as condições de corte e tornar mais adequado o corte a seco, estabelecendo condições como: o aumento do avanço e a diminuição da velocidade de corte. Apenas esses dois parâmetros podem manter o volume de cavaco removido na unidade de tempo constante e assegurar aproximadamente a mesma quantidade de calor gerado na unidade de tempo.

Em estudos recentes, [13] observaram que a usinagem a seco apresenta o maior número de ocorrências para mecanismos de desgaste em ferramentas. Para comprovar foram realizados ensaios, utilizando uma liga de titânio Ti-6Al-4V como material, o qual, todos os experimentos foram realizados em uma fresadora a altas velocidades de corte; 50 m/min. Deve-se considerar também a variação de parâmetros como; avanço e profundidade de corte, sendo 0,1; 0,3; e 0,5 (mm/rev) e 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5 (mm) respectivamente. Assim, após a análise das ferramentas concluiu-se que, como não existe lubrificação fornecida para reduzir as forças de corte, o desgaste nesse caso, acaba sendo maior quando comparados a usinagem por fluido abundante e MQF.

Uma das maiores vantagens desse método é com relação a saúde do ser humano, o contato entre operador e fluido de corte não vai existir, já que o processo não utiliza esse auxiliador. Além de que o cavaco que é gerado já está seco o que facilita a sua venda ou reciclagem, diferente de um cavaco molhado que requer processamento e filtração. A usinagem a seco resolve parte desses problemas, porém, cada técnica possui vantagens e desvantagens. Após estudos acerca dos materiais de ferramentas que podem ser utilizados de forma a não prejudicar a qualidade superficial de uma peça a ser produzida, concluiu-se que: ferramentas de aço rápido são inadequadas já que a partir de 400°C começam a perder dureza e nesse caso, a ferramenta deve apresentar elevada dureza para suportar o aumento intenso da temperatura na área da aresta de corte da ferramenta [8].

A usinagem sem fluido de corte na maioria das vezes não é possível ou não é viável, é muito restrito a situações bem específicas. Por exemplo: materiais cerâmicos para ferramentas apresentam boa dureza mas sua utilização é limitada pela baixa tenacidade, devido a tendência de lascamentos e quebras [8]. No que diz respeito a geometria da ferramenta de corte recomenda-se a utilização de um ângulo de saída menor, ou seja, positivo, no entanto, existem certas situações que devem ser analisadas com cautela. No torneamento do aço endurecido, por exemplo, não recomenda-se geometria positiva, já que fragiliza a aresta de corte tendendo a lascamentos e quebras [8].

Com a ausência do fluido de corte deve-se considerar também que o calor produzido pelos cavacos pode aquecer componentes específicos da máquina-ferramenta causando mudanças no dimensionamento da peça. Por esse motivo, a máquina deve possuir um sistema específico de transporte de cavacos eficiente [9]. Em todo caso, cada método deve possuir o seu planejamento, de forma a tentar prever situações que possam vir a ocorrer considerando que uma falha ou erro pode acarretar em uma grande perda tanto financeira quanto na diminuição do processo produtivo.

2.MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção foram caracterizados todos os materiais e equipamentos utilizados durante o experimento, com o objetivo de detalhar o procedimento. Esse processo foi realizado no Laboratório de Usinagem do Centro de Engenharias da UFERSA campus Mossoró-RN.

2.1 Materiais

Para os ensaios de usinagem, utilizou-se o torno da marca Nardini e modelo NODUS 220, com rotação máxima de 2360rpm e avanço de 0,042mm/rot, disponível no laboratório.

O material utilizado foi o aço carbono ABNT 1045 laminado, no qual, foram obtidos corpos de prova por tarugos redondos, com diâmetro inicial de 36mm, sem acabamento superficial. Em seguida, antes do procedimento, em si, realizou-se um desbaste prévio de 2mm, afim de padronizar a superfície do material removendo a camada de óxido e descartando qualquer problema de desbalanceamento que interfira nos dados que serão coletados. Como critério de padronização a primeira análise de desgaste da aresta de corte foi observada após 14 passes e em seguida estabeleceu-se um padrão de análise a cada 5 passes até que o desgaste atingir um valor de 0,3mm conforme [1,2].

Para monitorar o desgaste e a vida da ferramenta utilizou-se um microscópio óptico com Câmera Digital USB 1000x com resolução máxima de 640 x 480, fabricante Nova Digital. O equipamento foi conectado ao computador pelo software AmScope. Em seguida, foi verificado se a câmera do microscópio estava calibrada com o auxílio de um paquímetro de modo a obter imagens do desgaste dos insertos de corte.

Assim, o processo de usinagem foi dividido em três fases, cada fase com sua respectiva condição de lubrificação: a seco, fluido abundante e MQF. Para cada condição foi destinado 1 aresta de corte do inserto. A medição da rugosidade do corpo de prova só foi realizada quando o desgaste de cada aresta atingiu no mínimo 0,3mm como estabelecido anteriormente, ocasionando, a sua substituição para continuação do processo das condições seguintes.

Utilizou-se para verificar a rugosidade da superfície um rugosímetro portátil com sensor destacável ISRC300 da marca INSIZE, com faixa de mensuração do parâmetro Ra, variando de 0,005 μ m à 32 μ m e uma mesa de desempenho de fabricante Mitutoyo.

A temperatura do sistema foi medida com o auxílio de um termômetro digital infravermelho com mira a laser – 50 a 800°C – MINIPA- MT – 350A. Assim, para a mensuração adequada da temperatura convencionou-se utilizar uma emissividade de $\epsilon=0,77$, Conforme [23].

Os tarugos possuíam em média 150mm de comprimento. No qual, para diminuir a inflexão do tarugo durante a usinagem e as vibrações do sistema foi realizado o desbaste longitudinal até que o tarugo atingisse 25mm de diâmetro. A partir disso, pode-se selecionar a ferramenta utilizada, nesse caso, insertos de metal duro com ângulo reto de 90 graus de marca e referência Iscar TNMG 160404 - TF e um suporte de ferramentas fabricado pela Masterfer, tipo MTJNR 2020 K16. Considerando que o torneamento é um processo contínuo e que a ferramenta necessita ter uma dureza maior do que o material utilizado.

O fluido selecionado foi uma emulsão composta de 95% água e 5% óleo, feita no próprio laboratório, utilizando o óleo lá disponível de marca e referência Lubrax 148145/357173 para as três condições (A seco, MQF e Abundante).

Com base na escolha do material, a ferramenta de corte selecionada, do conhecimento adquirido através da fundamentação teórica e da comparação entre parâmetros utilizados com a literatura base, pode-se estabelecer que serão fixados os seguintes parâmetros: Profundidade de corte de 1mm, avanço de 0,19mm/rot e uma rotação de 1500rpm, de forma que existe a necessidade de buscar valores compatíveis com que a máquina que será utilizada dispõe.

2.2 Métodos

Nesta seção, serão detalhados os métodos para a realização dos ensaios, como por exemplo, a vazão do fluido (emulsão) utilizada durante a usinagem mediante a duas das três condições (Fluido Abundante e MQF). No que diz respeito ao MQF o torno não possui nenhum mecanismo que realize a lubri-refrigeração. Assim, realizou-se alguns testes afim de determinar a vazão mais adequada, ou seja, que se aproximasse da literatura empregada, já que não existe uma faixa de fluxo pré-definida.

Para esses testes, foi utilizado uma proveta para medir a quantidade correta de óleo e água da emulsão (95% água e 5% de óleo), o fluido foi colocado dentro de um recipiente de plástico com borrifador em spray. Nesse sentido, um becker e um cronometro foi utilizado para auxiliar na coleta das amostras. A medida que o fluido ia sendo borrifado dentro do becker tentava-se controlar a velocidade do fluxo com que o fluido estava sendo borrifado para que fosse determinado a média do fluxo do fluido no momento da usinagem. Esse processo foi repetido durante um minuto e repetido 10 vezes para coletar amostras suficientes e calcular a média do fluxo de MQF.

Essa verificação foi amparada pela comparação entre a literatura e os testes de vazão realizados em laboratório. Sendo assim, obteve-se 0,01 l/min, considerando as limitações de um procedimento realizado manualmente.

Na etapa de Fluido Abundante, o próprio torno já possui um mecanismo que realiza a lubri-refrigeração no processo de usinagem, ou seja, a vazão já foi pré-definida considerando a disposição dessa ferramenta. Assim, a vazão considerada é de 38 L/min, operando com o mesmo fluido utilizado no MQF (emulsão). Na usinagem a seco como o próprio nome já sugere, não foi necessária definição de vazão, pois nenhum fluido foi utilizado.

2.2.1 Rugosidade

Para avaliação da rugosidade média (R_a), os tarugos foram inicialmente limpos e preparadados com o auxílio de uma flanela de maneira que não fosse possível observar nenhum resquício de pelos na superfície. Em seguida, utilizou-se um rugosímetro portátil da empresa INSIZE, modelo ISR - C300, no qual, foram dispostos em uma mesa de desempenho. As medições foram realizadas longitudinalmente à peça em quatro pontos equidistantes de 35mm no comprimento do corte e que facilitasse o movimento do apalpador, considerando o parâmetro de amplitude R_a e o comprimento de medição cut-off de 2,5mm.

É importante e interessante salientar que apesar da medição da rugosidade ser um processo aplicável e adequado a maioria dos processos de fabricação também possui algumas desvantagens. Uma delas, é aparentar uma imagem errônea da superfície, ou seja, avalia erros que muitas vezes não representam a superfície como um todo. Porém, ainda sim a rugosidade da superfície usinada é um dos principais parâmetros para determinar a qualidade da superfície usinada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aumento da vida útil da ferramenta tem um impacto notável na produtividade, esse fato acaba suggestionando a questionar quais métodos de lubrificação se tornam mais viáveis, considerando algumas variáveis, como: produtividade, descarte dos fluidos de corte e acabamento. Por isso, nessa seção foi analisado em cada condição os seguintes critérios: temperatura, desgaste da ferramenta e a média da rugosidade (R_a).

3.1 Análise da temperatura

A Tabela 1 a seguir apresenta as temperaturas máximas e mínimas coletadas durante os ensaios de usinagem para as três condições. Além disso, foi calculada a média e o desvio padrão para uma análise mais descritiva e aprofundada.

TABELA 1. Temperaturas máximas, mínimas, média e desvio padrão das três condições (A seco, MQF e abundante) (autoria própria).

Condições	Temperatura	Temperatura	Média (°C)	Desvio Padrão
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		
<i>A seco</i>	69	42,7	51,4	5,13
<i>MQF</i>	56,4	40,7	47,85	3,04
<i>Abundante</i>	56,3	34,9	44,84	8,02

Com relação a análise da temperatura na condição a seco, coletou-se as temperaturas a cada passe até atingir os 24 passes, no qual, se deu o fim de vida da ferramenta. Em seguida calculou-se a média da temperatura durante os ensaios, obtendo-se assim 51,4°C. A temperatura foi examinada como sendo um dos principais fatores que influenciam no desgaste sendo, conseqüentemente, um causador que limita a vida da ferramenta. Considerando a ausência do fluido de corte nesse método, pode-se dizer que nessa fase o processo irá atingir temperaturas mais elevadas quando comparado ao MQF e ao abundante, já que não há nada que proporcione a diminuição da temperatura nas 3 principais zonas geradoras de calor: contato da peça-ferramenta, cavaco-ferramenta e a deformação plástica do cavaco. Nessa etapa, a temperatura máxima atingida ainda durante a usinagem a seco foi de 69°C, tornando-se necessário controlar ao máximo o processo para que a peça final esteja dentro da tolerância geométrica desejada e com o acabamento desejado. Destaca-se que durante as verificações das temperaturas o termômetro foi direcionado no sentido da direção do corte, de maneira a tentar estabelecer a mesma distância para todas as análises, o que pode ter ocasionado uma variação nas obtenções das temperaturas.

Em um estudo comparativo observou-se analisando as três condições de usinagem (a seco, MQF e abundante) que a adesão do material de trabalho a ferramenta durante um processo de torneamento era mais elevada durante o corte a seco (atingindo temperaturas maiores), especialmente quando se é aumentada a velocidade de corte de 250

para 400 m/min. Bem como as forças de corte também foram maiores devido ao efeito de adesão. O material utilizado foi uma liga de alumínio 6061 e os parâmetros de profundidade (0,5 a 1,5mm) e avanço (0,2 a 0,8) variaram [21].

Já a temperatura média e máxima atingida durante a condição MQF foi de 47,85°C e 56,4°C respectivamente. Nesse sentido, pode-se observar que tanto a temperatura máxima atingida quanto a média calculada são menores quando comparadas com a condição a seco. A redução da média e da temperatura máxima foram de 6,91% e de 18,27%, respectivamente.

Através de análises realizadas em laboratório, [12] na usinagem com MQF em uma operação de torneamento a condição é menos severa em contraste com a usinagem a seco devido as partículas do fluido na interface ferramenta-peça e ferramenta-cavaco, o que conseqüentemente, reduz o atrito e uma menor quantidade de calor é produzido na região de corte. Nesses ensaios foi utilizado uma ferramenta de metal duro com profundidade, velocidade de corte e avanço de respectivamente, 1mm, 24m/min e 0,22 mm/rev.

A viabilidade dessa condição propicia a redução de custos, não somente de aquisição, mas também de armazenamento e movimentação de resíduos. Também é facilitado o atendimento às legislações ambientais e os danos à saúde dos trabalhadores, são reduzidos significativamente além dos operadores passarem a trabalhar em um ambiente mais limpo [20].

Na análise de usinagem com fluido abundante, calculou-se a temperatura médias e coletou-se a temperatura máxima atingida durante os ensaios. Assim, obtém-se 44,84°C e 56,3°C respectivamente.

Estudos corroboram que a presença do lubri-refrigerante promove a redução da força de usinagem e de suas componentes (força de corte e força passiva). Isso pode aumentar a vida útil da ferramenta, o que conseqüentemente, gera uma redução de custos principalmente com relação ao ferramental utilizado. Para esses ensaios de torneamento foram coletadas 24 amostras com as condições dos parâmetros de corte variando $v_c=1$ e 2, $V_c=240$ e 290m/min e $f=0,1$ e 0,2mm/volta [19].

Nesse sentido, análises feitas em laboratório em uma operação de torneamento confirmam que a combinação ideal para minimizar a temperatura de corte é a da condição abundante quando comparada com o método a seco e MQF. Para isso, foi utilizado uma velocidade de corte a 1100rpm, taxa de avanço a 0,2mm/rev, profundidade de corte a 0,5mm e com uma ferramenta revestida por PVD. Apesar disso, a diferença é muita pequena relacionando com a condição MQF [21].

4.2 Análise do Desgaste

A Figura 1 a seguir mostra o avanço do desgaste da aresta de corte no decorrer da usinagem a seco (Figura 1a, b e c).

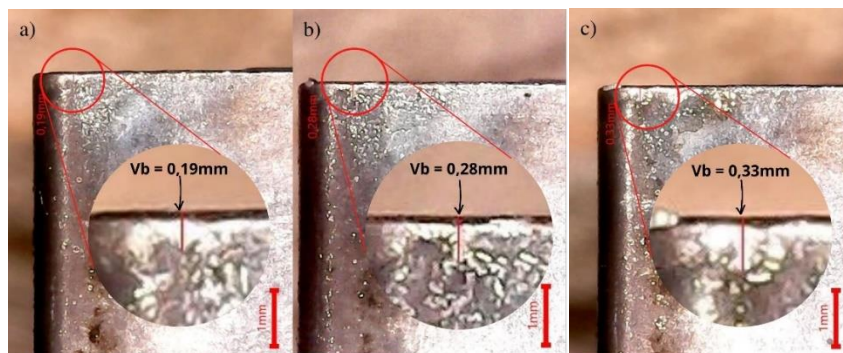


FIGURA 1. Acima pode-se verificar o desgaste progressivo da ferramenta, ou seja, após 14 passes já se podia verificar um desgaste de 0,19mm (a). Em seguida, foi possível encontrar 0,28mm (b) e 0,33mm (c) respectivamente (autoria própria).

Nessa condição o desgaste ultrapassou o limite pré-estabelecido e o fim da vida útil dessa aresta se deu após 24 passes. Assim, tomando como exemplo um processo de usinagem mais longo, em que se deve realizar várias vezes o desbaste longitudinal, pode entender-se que a troca da ferramenta será feita com uma frequência maior, devido o desgaste da ferramenta ocorrer mais rapidamente e o tempo de usinagem por peça resultará em uma produtividade reduzida.

A partir da quantidade total de passes em que se deu o fim de vida da aresta de corte e com o comprimento do tarugo que corresponde a 150mm, obtém-se um L_f de aproximadamente 3600mm.

A Figura 2 a seguir apresenta o avanço do desgaste da aresta de corte no decorrer da usinagem a MQF (Figura 2a, b, c e d).

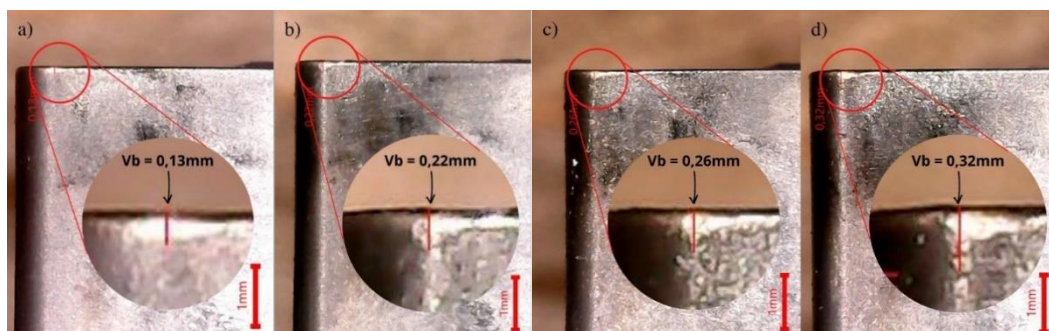


FIGURA 2. Análises do desgaste da ferramenta na condição MQF, após os 14 passes verificou-se um desgaste de 0,13mm (a). Em seguida, foi possível encontrar 0,22mm (b); 0,26mm (c) e 0,32mm (autoria própria).

As preocupações ambientais juntamente com a necessidade de eficiência ecológica são normalmente associadas a redução dos fluidos de corte utilizados durante o processo de usinagem. Assim, o MQF se torna uma parte importante na diminuição dos impactos ambientais [17].

Na Figura 2 a aresta destinada ao MQF, a emulsão foi direcionada no sentido da região de corte, sendo borrifado uma vez a cada 5 segundos durante o tempo que durasse a usinagem. Nesse ponto, pode-se afirmar que é a etapa mais complexa, devido o processo ter sido feito manualmente não se pode afirmar com certeza que durante a usinagem o fluido atingiu a região desejada. Assim como na usinagem a seco o desgaste limite pré-estabelecido foi ultrapassado e o fim de vida da ferramenta foi determinado após o passe de número 59, obtendo-se um Lf de 8850mm. Quando comparado essa etapa com a condição a seco, bem como com a literatura, a durabilidade da ferramenta foi maior, constatando-se que a danificação da ferramenta ocorreu de forma progressiva e estável, já que a principal causa do desgaste rápido é a temperatura elevada gerada na zona de corte devido à ausência de refrigerantes e/ou lubrificantes.

A Figura 3 a seguir apresenta o avanço do desgaste da aresta de corte no decorrer da usinagem a fluido abundante (Figura 3a, b, c e d).

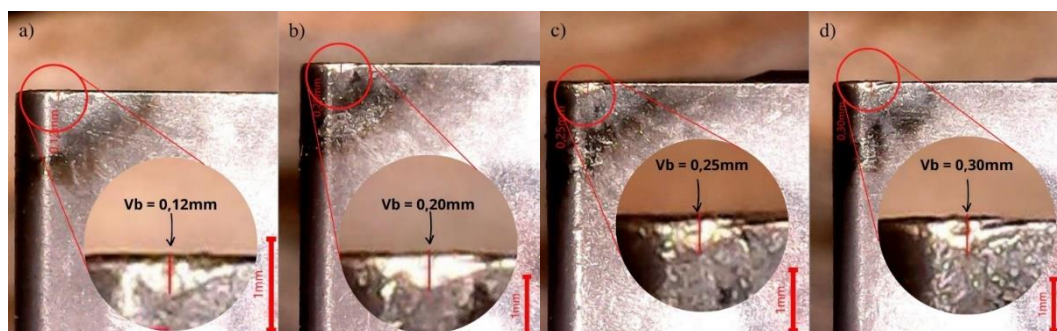


FIGURA 3. Análises do desgaste da ferramenta na condição a fluido abundante : (a) após 14 passes constatou-se um desgaste de 0,12mm; (b) após 44 passes, o desgaste foi de 0,20mm; (c) após 74 passes, o desgaste foi de 0,25mm; (d) e em 114 passes, 0,30mm (autoria própria).

Observa-se na Figura 3 que com aplicação de maior quantidade de fluido e, conseqüentemente, a redução do calor na zona de cisalhamento obtém-se um desgaste lento e progressivo como se pode observa nas Figuras 3 a,b,c e d. Diferente das outras condições nessa etapa o desgaste não ultrapassou o limite. Como pressuposto inicialmente, nesse método a vida útil da ferramenta seria prolongada devido a lubri-refrigeração, no qual, foram necessários 114 passes para que a ferramenta atingisse o limite de 0,3mm pré-estabelecido na literatura. Nessa circunstância a condição fluido abundante apresenta um valor de Lf superior, ou seja, 17100mm.

O Figura 4 a seguir apresenta o desgaste em milímetros ao longo do tempo mediante as três condições estudadas.

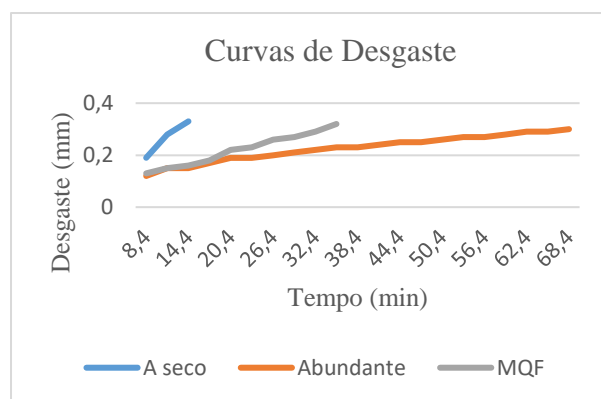


FIGURA 4. Desgaste ao longo do tempo das três condições (autoria própria)

Na Figura 4 observa-se que apesar das três condições serem executadas com os mesmos parâmetros de usinagem a condição a que o processo está submetido tem uma influência significativa na vida útil da ferramenta. A aresta que foi destinada a condição de fluido abundante esteve em operação por mais tempo com um desgaste mais estável e destaca-se das outras duas condições. Porém, a quantidade de fluido utilizado foi maior e a condição MQF acaba se tornando promissora em relação a redução dos fluidos de corte utilizados durante o processo.

4.3 Análise da Rugosidade

A Tabela 2 a seguir apresenta 4 amostras da rugosidade (R_a) coletadas para cada condição (A seco, MQF e Abundante).

TABELA 2. Média das rugosidades coletadas para as três condições (autoria própria).

Amostras	Condição 1 A seco (μm)	Condição 2 MQF (μm)	Condição 3 Abundante (μm)
1	13,233	12,465	9,231
2	11,231	9,649	8,608
3	9,641	7,987	8,130
4	8,551	7,742	7,354
Média (R_a)	10,664	9,460	8,330

Na Tabela 1 é possível notar que apesar das três condições estarem submetidas aos mesmos parâmetros de usinagem (rotação, avanço e profundidade de corte) a condição 3 apresentou a menor média de rugosidade ($8,33\mu m$), ou seja, possui um melhor acabamento. Isso ocorre principalmente devido a presença da emulsão em abundância utilizada no processo o que, conseqüentemente, acarreta na diminuição da temperatura na área de cisalhamento da peça com a ferramenta. É importante considerar que o aumento do desgaste progressivo da ferramenta impacta negativamente no acabamento da peça [22].

Já na condição 1, considerada a mais severa devido a ausência de fluido, observa-se a maior média de rugosidade ($10,66\mu m$), ou seja, comparado com as duas outras condições é a que possui o pior acabamento. Nesse sentido, as altas temperaturas atingidas durante a usinagem desse método é um dos principais fatores que ocasionam esse tipo de resultado. Além disso, a medida que o desgaste da ferramenta evolui a rugosidade apresenta uma tendência maior a aumentar [22].

Em relação a condição 2, observa-se que ela apresenta o valor da média calculada bem próximo a da condição 3 ($9,46\mu m$) o que se torna um ponto positivo, já que nessa condição especificamente se é utilizada uma quantidade mínima de fluido de corte e se obteve um acabamento razoável. É importante salientar que fatores da máquina, como por exemplo, problemas de vibração influenciam tanto no desgaste quanto no acabamento da peça.

4. CONCLUSÃO

Considerando as informações apresentadas é possível afirmar que o uso do MQF é viável em um processo de torneamento para o aço ABNT 1045. O sistema MQF apresenta valores de rugosidade promissores quando comparados aos valores obtidos com fluido abundante utilizando uma quantidade mínima de fluido, o que possibilita um processo de corte estável, além de proporcionar vantagens econômicas e uma redução significativa nos impactos ambientais.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela saúde, força de vontade e dedicação que me possibilitou chegar até aqui. Ao meu orientador, Dr. Ramses Otto Cunha Lima, pela paciência, conhecimento compartilhado e orientação. A minha família e namorado pelo apoio, paciência e compreensão, eu amo vocês.

REFERÊNCIAS

- [1] MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. Teoria da usinagem dos materiais. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2012. 397 p.
- [2] DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. Tecnologia da usinagem dos materiais. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013. 270 p.
- [3] GARCIA, Ubirajara. Estudo da aplicação de mínima quantidade de fluido no fresamento de acabamento da liga Ti-6Al-4V. 2015. 178 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Guaratinguetá, 2015.
- [4] CASTRO, Pablo Ricardo Amarante de. Aspectos tecnológicos da usinagem a seco e com Mínima quantidade de fluido de corte na furação com broca helicoidal. 2001. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [5] MARIA, Débora Aline Soares et al. Fluidos de Corte: Novas formulações e recuperabilidade: grupo de pesquisa em separações por adsorção. 2007. 10 f. Artigo - Curso de Engenharia Mecânica, Campus do Pici - UFC, São Paulo, 2007.
- [6] MUNIZ, Cláudia Alves de Sousa. Novas formulações dos fluidos de corte: otimização, propriedades e recuperação do óleo usado: programa de pós-graduação em química. 2008. 177 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- [7] ZEILMANN, Rodrigo Panosso. Furação da liga de titânio Ti6Al4V com mínima quantidade de fluido de corte: pós graduação em engenharia mecânica. 2003. 210 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- [8] TEIXEIRA FILHO, Fernando. A utilização de fluido de corte no fresamento do aço inoxidável 15-5PH: usinagem. 2006. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia de Fabricação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- [9] MIRANDA, Gilberto Walter Arenas. Uma contribuição ao Processo de Furação sem Fluido de Corte com Broca de Metal Duro Revestida com TiAlN: comissão de pós graduação em engenharia mecânica. 2003. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, De Engenharia de Fabricação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- [10] RAKURTY, CS. et al. Efeitos da aplicação alvo de fluido de quantidade mínima (MQF) em integridade da superfície. 2013. Artigo (ScienceDirect, publicado por: Elsevier) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Utah, Salt lake city, 2013.
- [11] TOMAZ, Ítalo do Valle. Estudo das Tensões Residuais e forças de usinagem no fresamento de topo de aço maraging 300: pós graduação em engenharia mecânica. 2019. 108 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019.
- [12] Análise comparativa de seca, inundação, MQL e cocriogênico 2 técnicas durante a usinagem da liga SS 15-5-PH: Tribology International - Volume 146, 106196. Índia, jun. 2020.
- [13] KHATRI, Ashutosh; JAHAN, Muhammd P. Investigating tool wear mechanisms in machining of TI-6AL-4V in flood coolant, dry and MQL conditions: Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Miami University, Oxford, OH 45056, USA. Texas - Usa, abr. 2018.
- [14] SREEJITH, Ps. Usinagem de liga de alumínio 6061 com MQL, condições de lubrificante seco e inundado: sciencedirect. 2007. 3 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Ciência e Tecnologia de Cochin, Kerala, Índia, 2007.
- [15] KHAN, M. M A., MITHU, M A. H., DHAR, N., 2009, "Effects of Minimum Quanty Lubrication on Turning AISI 9310 Alloy Steel Using Vegetable Oil-Based Cutting Fluid", Journal Materials Processing Tecnology, v. 209, pp. 5573-5583;
- [16] MICARONI, Ricardo. Influência do Fluido de Corte sob Pressão no Torneamento do aço ABNT 1045: materiais e processos de fabricação. 2006. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Engenharias, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- [17] ESPINDOLA, Elias Samuel Cristo. Aplicação de Técnicas de Usinagem Ambientalmente Amigáveis no Processo de Torneamento Radial do Aço SAE 1045. 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- [18] AMORIM, Heraldo José de. Estudo da relação entre velocidades de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro: pós-graduação em engenharia mecânica.

2002. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- [19] SOUZA, André João de. RODRIGUÊS. et al. Verificação das forças geradas no torneamento a seco, com fluido em abundância e em quantidade reduzida do aço AISI 420C utilizando ferramenta wiper. CONEN, Fortaleza – CE, p(1-10) 2016.
- [20] ZEILMANN, Rodrigo P. et al. Redução da utilização de fluidos de corte: uma abordagem ecológica na gestão de processos de usinagem. 2º Congresso internacional de tecnologias para o meio ambiente, Bento Gonçalves – RS. p(1-8), 04,2010.
- [21] VISHNU, A. Venkata. et al. Comparação entre condições secas, inundadas e MQL na usinagem de ligas de aço EN 353 - uma investigação experimental. Elsevier: Sciencesirect. Índia, Departamento de Engenharia Mecânica. p(1-9), 2018.
- [22] CANDIDO, Luiz Otavio. Análise do desgaste da Pastilha de Metal duro WNMG080408-UG na usinagem do aço 1045: usinagem. 2020. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2020.
- [23] PIOTR, Kieruj. et al. Determinação do coeficiente de emissividade de super ligas resistentes ao calor e metal duro. Arquivos de tecnologia mecânica e materiais. Departamento de Engenharia Mecânica. p(1-5), 2016.