

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA – CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA VIABILIDADE DE REDUÇÃO OU ELIMINAÇÃO DE
FLUIDO DE CORTE NO TORNEAMENTO DO AÇO MICROLIGADO PL30

por

Alexandre Kichler Martins

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2021.

CIP - Catalogação na Publicação

Martins, Alexandre
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA VIABILIDADE DE REDUÇÃO OU
ELIMINAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE NO TORNEAMENTO DO AÇO
MICROLIGADO PL30 / Alexandre Martins. -- 2021.
12 f.
Orientador: André João de Souza.

Coorientador: Júlia Caniçali.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. vida da ferramenta. 2. torneamento do aço PL30.
3. fluido de corte em abundância. 4. corte a seco. 5.
MQL. I. de Souza, André João, orient. II. Caniçali,
Júlia, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Alexandre Kichler Martins

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA VIABILIDADE DE REDUÇÃO OU ELIMINAÇÃO DE
FLUIDO DE CORTE NO TORNEAMENTO DO AÇO MICROLIGADO PL30

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA
DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientadora: Eng. Júlia Caniçali

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Porto Alegre, 16 de novembro de 2021.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ernani Kiesslich Martins e Sandra Helena Martins, por tornar tudo possível e me proporcionarem a tranquilidade e o suporte necessário para a realização deste trabalho e, também, para a conclusão do curso de Engenharia Mecânica.

À minha namorada Patrícia Leite, por estar comigo desde o início da minha graduação, me dar apoio sempre que necessitei e por me inspirar como um exemplo de disciplina e organização.

Ao meu irmão Daniel Kichler Martins pela amizade, companheirismo e apoio durante os momentos bons e ruins tanto no curso como na vida.

Aos meus amigos e colegas de graduação pelas experiências, conhecimentos e vivências compartilhados durante a passagem pelo curso de Engenharia Mecânica.

Aos professores e funcionários da escola de Engenharia Mecânica da UFRGS pelos esforços que possibilitam a existência de um curso gratuito e de excelência.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA VIABILIDADE DE REDUÇÃO OU
ELIMINAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE NO TORNEAMENTO
DO AÇO MICROLIGADO PL30**

MARTINS, Alexandre Kichler

e-mail: alexandrekmartins@gmail.com

Resumo: *O PL30 é um aço microligado ao boro usado na fabricação de fixadores que requerem alta resistência mecânica. Devido a sua alta resistência à tração e baixo custo, o PL30 é comumente utilizado em edifícios, ferramentas, navios, automóveis, máquinas e eletrodomésticos. Essa demanda é atendida devido às boas propriedades mecânicas, de conformabilidade, ductilidade e temperabilidade. Os pivôs de suspensão produzidos por alguns fabricantes de peças automotivas são feitos através do torneamento do PL30 com fluido de corte em abundância. Assim, o objetivo deste estudo é avaliar a viabilidade da aplicação da usinagem a seco e com mínima quantidade de lubrificante (MQL) neste processo. Foram analisados comparativamente o desgaste e a vida das ferramentas de corte, as forças de usinagem e a rugosidade das superfícies usinadas nas três situações (a seco, abundante e com MQL). Concluiu-se que o MQL obteve, em todos os parâmetros avaliados, os melhores resultados e é a melhor alternativa para usinagem do aço PL30.*

Palavras-chave: *vida da ferramenta; torneamento do aço PL30; fluido de corte em abundância; corte a seco; MQL.*

Experimental evaluation of the feasibility for cutting fluid reducing or eliminating on turning PL30 microalloy steel

Abstract: *PL30 is a boron microalloyed steel used in fasteners that require high mechanical strength. Due to its high tensile strength and low cost, the PL30 is commonly used in buildings, tools, ships, automobiles, machines, and home appliances. These demands are met due to their excellent mechanical properties, conformability, ductility, and hardenability. The suspension pivots produced by some autoparts manufacturers are made by turning PL30 steel with cutting fluid in abundance. Thus, this paper aims to evaluate the feasibility of applying dry cutting and minimum quantity lubrication (MQL) in this process. Tool wear and tool life, machining forces, and surface roughness were comparatively analyzed under these three lubricating conditions (dry, flood, and MQL). The conclusion was that MQL got the best results in all three conditions and is the best alternative for turning PL30.*

Keywords: *tool life, turning PL30 steel; abundant cutting fluid; dry cutting; MQL*

1 INTRODUÇÃO

A suspensão de um veículo tem como finalidade atenuar as trepidações resultantes do contato entre a roda e o solo. Ela compreende todos os elementos do veículo que participam na manutenção de sua estabilidade (Chollet, 2005). O pivô de suspensão, pino esférico ou junta esférica, é o componente articulado responsável por unir as partes suspensas (chassi e carroceria)

e as partes não suspensas (telescópio, manga de eixo, cubo da roda) nos veículos. É preciso muita atenção ao desgaste dos pivôs, pois a sua falha pode gerar acidentes graves (Toresan Jr., 2020). Assim, um bom candidato para esta aplicação é o aço PL30 (AISI 10B30).

O PL30 é um aço microligado ao boro que possui excelentes propriedades mecânicas para a produção de fixadores. Dentre as suas vantagens estão alta temperabilidade, facilidade de conformação a frio, elevada resistência mecânica, redução das falhas em ferramentas durante a estampagem e ser uma boa alternativa para substituir aços de ligados de maior custo (ArcelorMittal, 2019). O PL 30 também é usado na fabricação de arames para fixadores, pois eles possuem dureza uniforme ao longo do rolo, alta capacidade de recozimento e excelente desempenho para tratamentos térmicos (Bekaert, 2021). Em indústrias de peças automotivas, o aço microligado ao boro PL30 é muitas vezes adquirido em formato de barras trefiladas cilíndricas e deve passar por processos de conformação a frio, tratamento térmico e usinagem.

A usinabilidade de um material é um termo geralmente utilizado para quantificar a facilidade de usinar um material em função da vida da ferramenta, do acabamento superficial produzido ou da potência consumida (Shaw, 2005). Trent e Wright (2000) afirmam que a usinabilidade não é uma propriedade, mas sim um “modo” de o material se comportar durante a usinagem. Machado *et al.* (2015) citam que materiais de baixa dureza normalmente permitem usinar com maiores valores de parâmetros cinemáticos (velocidade de corte e avanço) e de profundidade de corte. Segundo o catálogo do fabricante do material (ArcelorMittal, 2019) o PL30 atinge um valor máximo de dureza de 197 HB, ou seja, trata-se de um material de baixa dureza. Apesar de a dureza ser um bom indicador da usinabilidade do material, ela não é o único. A usinabilidade pode ser determinada através dos cavacos produzidos durante a usinagem os quais são afetados diretamente pelo ângulo de posição da ferramenta. Shaw (2005) menciona que a usinabilidade do material pode ser definida através de três aspectos: vida da ferramenta, acabamento da superfície usinada e forças (e potências) geradas durante o corte. Embora o indicador de usinabilidade normalmente escolhido seja a vida da ferramenta, o ensaio de vida é complexo, pois é necessário especificar como e quais desgastes serão medidos, o tipo de ferramenta (material e geometria), os parâmetros de corte, o meio lubrificante etc. (Machado *et al.*, 2015). De acordo com a ABNT NBR ISO 3685 (2017), a vida da ferramenta no ambiente produtivo geralmente é determinada pela sua capacidade de produzir peças dentro das dimensões especificadas. Porém, a razão na qual a ferramenta atinge o fim de vida pode variar para cada caso. Para que a confiabilidade aumente e a comparação dos resultados seja possível, é necessário que o tempo de vida seja determinado em função do tempo total de corte que a ferramenta leva para atingir determinado critério. Assim, a referida norma estabelece uma série de critérios de fim de vida a serem adotados para variados tipos de ferramentas, sendo a medição da largura da marca de desgaste no flanco da mesma a mais usual.

Ao se usinar um determinado material, tem-se sobre o ponto (ou área infinitesimal) de superfície de contato entre ferramenta/peça forças de corte associadas. Estas forças são tão importantes quanto as propriedades mecânicas do material (Dib *et al.*, 2017), pois, segundo Trent e Wright (2000), elas auxiliam na estimativa da potência necessária para o projeto de máquinas, ferramentas e suportes com boa rigidez e ausente de vibrações. Além disso, a partir das forças, pode-se obter as energias consumidas durante o processo de usinagem que definem a dureza e a resistência à tração do material, os quais determinam a sua deformação plástica e a formação de cavaco (Shaw, 2005). Conforme as normas DIN 6584 (1982) e a NBR 12545 (1991), a força de usinagem (F_U) é a força resultante das forças existentes durante o processo de usinagem. Sua intensidade pode ser determinada matematicamente conforme a (Eq. 1), onde F_x , F_y e F_z são as componentes geradas nas direções ortogonais e cujas intensidades podem ser mensuradas em laboratório utilizando dinamômetros (Borba, 2016).

$$F_U = \sqrt{(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)} \quad (1)$$

O acabamento da superfície usinada, representado em projetos mecânicos geralmente pela rugosidade, consiste em um conjunto de irregularidades de padrão uniforme ou não, que formam a textura característica de uma superfície técnica. Tais irregularidades estão presentes em toda e qualquer superfície real, não importando quão perfeita a superfície pareça ser (Amorim, 2002). Para medir-se a rugosidade, o parâmetro amplamente utilizado é a rugosidade média. O valor teórico de R_a em torneamento pode ser obtido através da Eq. (2), onde f é o avanço [mm/volta] e r_ϵ é o raio de ponta da ferramenta de corte [mm] (Machado *et al.*, 2015). Em algumas situações, é importante obter informações sobre possíveis irregularidades presentes na superfície usinada (Carpinetti *et al.*, 1996). Nesses casos, a rugosidade média parcial (R_z) é utilizada por ser um parâmetro extremamente sensível a estes defeitos. De acordo com a norma DIN, R_z representa a média das cinco alturas máximas (distâncias entre o pico mais alto e o vale mais profundo do perfil) detectadas em cada comprimento de amostragem (Machado *et al.*, 2015). Portanto, o acabamento pode ser considerado como a qualidade tecnológica da peça usinada e, também, um indicador da produtividade de ferramentas e máquinas. Os valores desejados de acabamento geralmente são definidos pela resistência à fadiga necessária, resistência à corrosão e precisão das dimensões no componente usinado (Revankar, 2016).

$$R_a [\mu m] = \frac{1000 \cdot f^2}{18\sqrt{3} \cdot r_\epsilon} = 32,075 \left(\frac{f^2}{r_\epsilon} \right) \quad (2)$$

Um dos principais aspectos de gestão estratégica atual da indústria automotiva é sua relação com o meio ambiente. Indústrias que possuem a usinagem em seu processo produtivo, muitas vezes têm a necessidade de fazer uso de fluidos de corte que protegem as superfícies usinadas e as ferramentas dos desgastes causados por elevadas temperaturas e pela fadiga. Porém, estes fluidos tendem a ser prejudiciais ao meio ambiente e oferecem sérios riscos aos operadores (Zeilmann *et al.*, 2009). Embora a principal opção da usinagem ambientalmente amigável seja o de corte a seco (DRY), a usinagem com fluido de corte em abundância (WET) é muitas vezes utilizada em situações em que se busca elevar a vida útil da máquina e da ferramenta, além de melhorar a qualidade da superfície usinada. Com isso, o método de usinagem com mínima quantidade de lubrificação (MQL) tende a ser uma boa alternativa a estes casos (Urasato, 2019).

Assim, o presente trabalho pretende avaliar comparativamente a influência do meio lubrificante (WET, DRY e MQL) na vida da ferramenta, na rugosidade da peça e na força de usinagem gerada durante o torneamento longitudinal externo do aço microligado PL30 com o intuito de encontrar dados que justifiquem a redução (ou eliminação) do fluido de corte.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O PL30 é um aço médio carbono microligado ao boro com boa temperabilidade, boa conformabilidade e baixa dureza (ArcelorMittal, 2019). A Tabela 1 mostra a composição química do PL30 obtida através do certificado de inspeção nº 0006331925 fornecido pela ArcelorMittal.

Tabela 1 – Composição química do aço PL30 (% massa).

Mn	Cr	C	Si	Cu	Al	Ni	P	S	B	Mo	Fe
0,842	0,3234	0,317	0,239	0,040	0,0219	0,0149	0,0148	0,009	0,0021	0,0018	Bal.

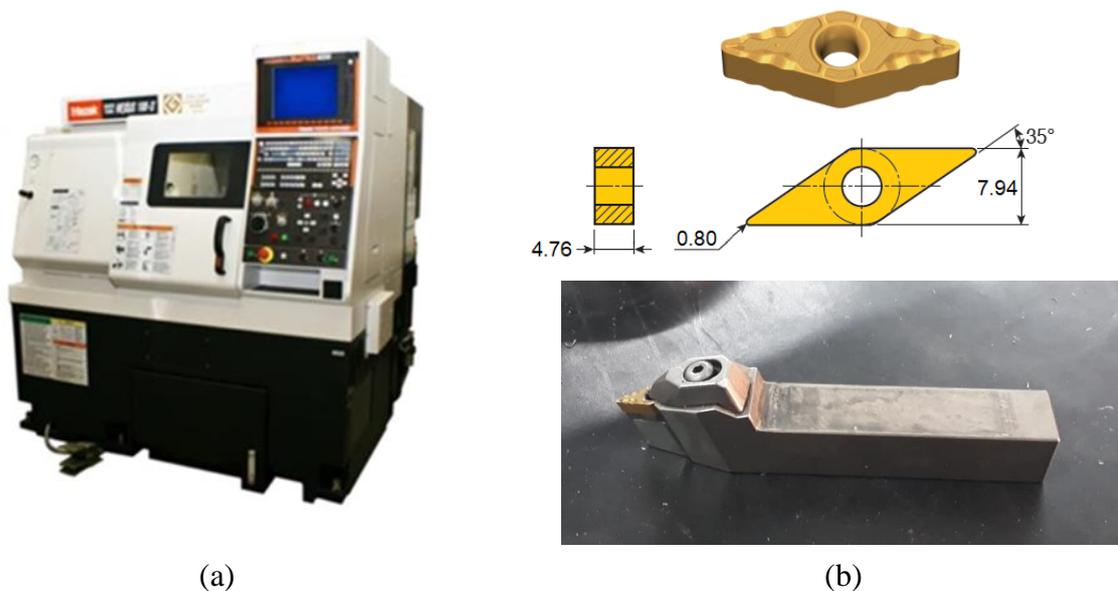
Fonte: ArcelorMittal (2019).

Em termos de usinabilidade do PL30, o baixo teor de carbono ($C < 0,55\%$) e a baixa dureza (< 200 HB) favorecem a formação de aresta postiça de corte (APC), resultando em vida curta da

ferramenta e pobre acabamento superficial. O cobre (Cu) afeta a ductilidade e facilita a produção de cavacos longos. O níquel (Ni) aumenta a dureza do aço, a sua resistência à corrosão e também a sua resistência mecânica, porém reduz a sua usinabilidade, pois tende a formar APC e desgaste de entalhe. O boro (B), em pequenas porcentagens, aumenta a dureza e dificulta a usinagem do material (Machado *et al.*, 2015). O cromo (Cr) e o molibdênio (Mo) são formadores de carbonetos e aumentam os desgastes por abrasão. O silício (Si) forma inclusões de óxidos que aumentam o desgaste. O manganês (Mn) e o enxofre (S), quando juntos, formam o MnS que gera uma camada de lubrificação entre o cavaco e a ferramenta e melhora a quebra de cavacos. O alumínio (Al) torna o aço mais tenaz e difícil de usar. Por outro lado, o fósforo (P) aumenta a resistência e reduz a ductilidade e a tenacidade do aço. (Sandvik, 2021).

Para a coleta de dados, 15 corpos de prova (cinco para cada condição lubrificante) com geometria cilíndrica e dimensões de 165 mm de comprimento e 34,92 mm de diâmetro, fixados entre placa e ponto, foram usinados em um torno CNC Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II (Fig. 1a) disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS/UFRGS). A ferramenta utilizada foi o inserto TaeguTec VNMX 130408 FX TT5080 (Fig. 1b) de metal-duro com revestimento PVD de TiAlN-TiN. Esta ferramenta apresenta substrato ultrafino para uma ampla gama de torneamento em ligas de alta temperatura com boa tenacidade à fratura e atinge excelente acabamento superficial (TaeguTec, 2021). O suporte negativo TaeguTec TVVNN 2020 K1304 permite um ângulo de posição $\chi_r = 72,5^\circ$.

Figura 1 - (a) torno CNC Mazak QTN 100-II; (b) inserto e suporte de ferramenta utilizados



Fonte: (a) Rovani (2019); (b) TaeguTec (2021) e do autor

No ensaio com fluido em abundância (WET) utilizou-se o fluido de corte sintético Synergy 905 (Blaser Swisslube) misturado com água na proporção 1:10 (recomendada pelo fabricante). No ensaio com MQL, o mesmo fluido foi aplicado na sua forma integral (sem mistura com água) a uma vazão de aproximadamente 500 ml/h. Na condição a seco (DRY), nenhum tipo de lubrificante foi aplicado no ensaio de vida.

A baixa dureza do PL30 e seu baixo teor de carbono indicam que parâmetros de corte mais elevados podem ser usados sem o desgaste excessivo da ferramenta, sem a formação de APC e sem perdas significativas na qualidade superficial da peça (Machado *et al.*, 2015). Assim, os parâmetros de corte foram mantidos constantes: rotação (n) em 3900 rpm, velocidade de avanço (v_f) em 819 mm/min (avanço $f = 0,21$ mm/volta) e profundidade de corte (a_p) em 1 mm. Foram realizados nove passes de 120 mm de comprimento com duração de 8,8 s cada, totalizando 1,08 m

por corpo de prova. Cada passe teve um valor diferente de velocidade de corte (v_c), sendo o primeiro com 403 m/min e o nono com 207 m/min. Finalizada a usinagem do corpo de prova, este teve um diâmetro final de 16,92 mm, garantindo uma relação comprimento/diâmetro usinado inferior a 7,5 (minimizar vibrações causadas pela força passiva gerada pelo ângulo de posição da ferramenta). O critério de fim de vida adotado foi o desgaste de flanco na ponta da ferramenta $VB_C \geq 0,20$ mm ou 5,40 m de comprimento usinado.

As componentes ortogonais da força de usinagem (F_x , F_y , F_z) foram adquiridas simultaneamente através do sistema monitor (Fig. 2) formado por um dinamômetro piezelétrico Kistler 9129A instalado no torno CNC, um condicionador de sinais Kistler 5070A e uma placa DAD conectada a um computador dedicado que, através do software LabVIEW 9.0, faz a interface com o usuário (Rovani, 2019). Após a aquisição dos sinais, a força resultante (F_U) foi calculada através da Eq. (1).

Figura 2 – Dinamômetro piezelétrico Kistler 9129A



Fonte: <https://www.iem.eu/article/modular-dynamometer/>.

Para medir o desgaste da ferramenta, utilizou-se um microscópio digital USB Dino-Lite modelo AM-413ZT com ampliação de 50x (Fig. 3a) As medições foram feitas retirando o inserto do suporte. Já a rugosidade da superfície após a usinagem foi mensurada através do rugosímetro Mitutoyo SJ-201P com resolução de 0,01 μm (Fig. 3b) sem retirar o corpo de prova da máquina; assim, realizaram-se três medições de rugosidade no início do comprimento do corpo de prova com defasagem de 120° entre cada medição. Os resultados das medições de R_a e R_z foram determinados calculando-se a média aritmética das três medições de cada passe. Por se tratar de um mensurando variável, as suas respectivas incertezas expandidas foram determinadas a partir da maior diferença entre o valor medido e o valor médio.

Os dados de força foram captados a cada passe considerando uma taxa de aquisição de 5200 Hz (80 pontos por volta), enquanto VB_C e os parâmetros de rugosidade foram mensurados a cada três passes.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste estudo foram analisados em três aspectos de forma comparativa: análise do desgaste de flanco da ferramenta, análise da rugosidade da superfície e as forças aplicadas durante a usinagem.

Figura 3 – (a) microscópio digital AM-413ZT; (b) rugosímetro portátil SJ-201P.

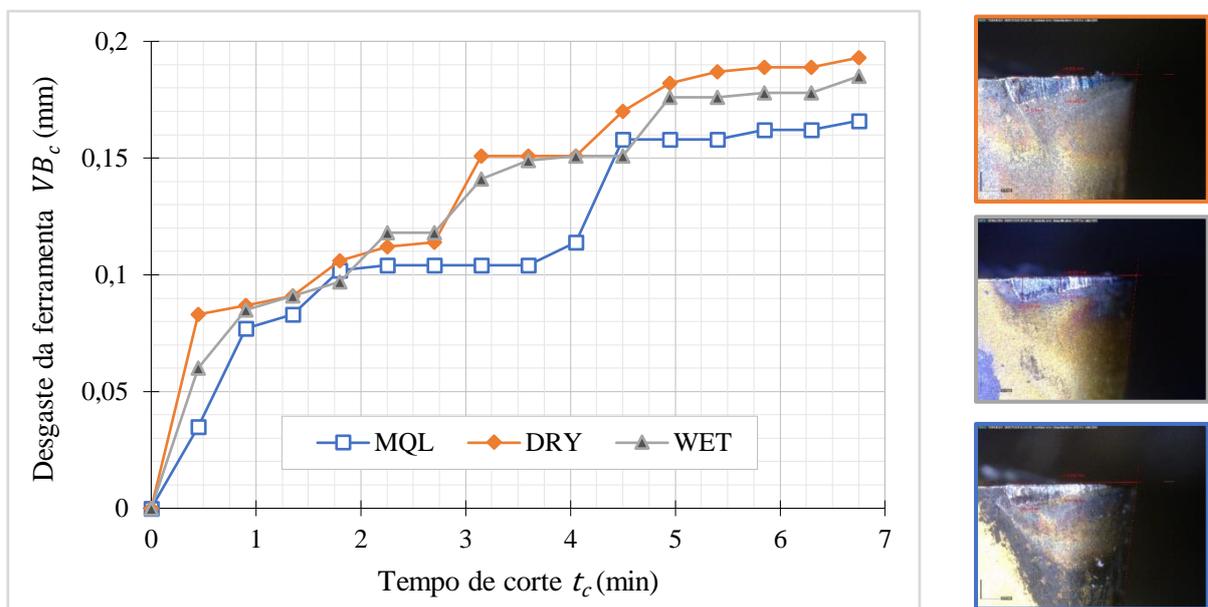


Fonte: Urasato (2019)

3.1 Desgaste de flanco da ferramenta

A Figura 4 mostra graficamente os valores de desgaste de ferramenta VB_c [mm] em função do tempo de corte t_c [s] conforme a norma ABNT NBR ISO 3685 (2017) nas três condições lubrificantes e as imagens do estado final da ferramenta após o 45° passe.

Figura 4 – Desgaste de flanco (VB_c) em função do tempo de corte (t_c)



Para as três situações (WET, DRY e MQL), a ferramenta não atingiu o valor de VB_c previamente estabelecido como critério de fim de vida. Isto pode ser explicado pela baixa dureza do aço PL30 que varia, após laminado, de 149 a 197 HB (ArcelorMittal, 2019). Porém, comparando as três situações, observa-se que o MQL obteve melhor desempenho na redução da taxa de desgaste em relação às demais condições lubrificantes. A causa desta redução no desgaste da ferramenta pode ser atribuída à redução da temperatura causada pelo MQL que ajudou a reduzir o desgaste por abrasão, mantendo a dureza do inserto, além reduzir os desgastes por de adesão e difusão que são extremamente sensíveis à temperatura. Além disso, a capacidade do MQL de penetrar nas ranhuras da ferramenta permite que o jato reduza o contato entre a mesma e o

cavaco e, conseqüentemente, diminua a temperatura desta interface (Dhar *et al.*, 2006). As demais condições (WET) e (DRY) obtiveram resultados muito semelhantes.

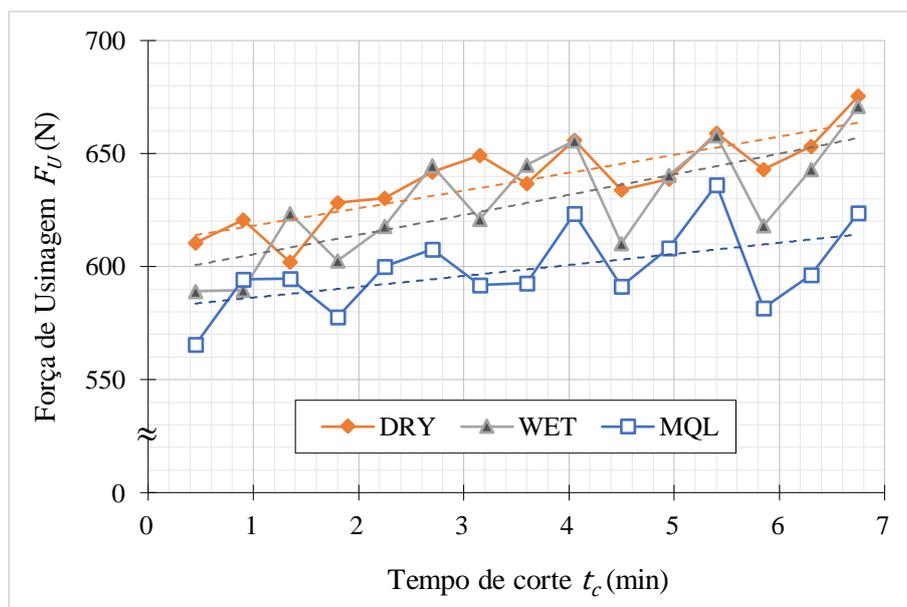
Durante o ensaio com MQL, no intervalo entre 2,7 min e 4,5 min, a ferramenta de corte obteve um desempenho superior em relação às demais condições lubrificantes. Isso pode ser explicado pelo fato de que, geralmente, as curvas de desgaste seguem um padrão. No período citado, a ferramenta entrou na Região II que, segundo Machado *et al.* (2015), é a região em que a ferramenta já se encontra totalmente adequada ao processo e os mecanismos específicos de desgaste operam em uma taxa constante até atingirem um novo ponto de inflexão. É válido ressaltar, também, que a condição (MQL) obteve um resultado final de desgaste VB_c 13% inferior quando comparado a situação (DRY) e 10% em relação à condição (WET).

As imagens dos desgastes presentes nas ferramentas de corte para as três condições lubrificantes ao final dos ensaios de vida (Fig. 4) mostra nitidamente a presença de marcas de desgaste na superfície de folga da ferramenta, caracterizadas por ranhuras verticais, e comprovando o efeito da abrasão mecânica no desgaste de flanco (Machado *et al.*, 2015).

3.2 Forças de usinagem

As componentes ortogonais da força de usinagem foram medidas através do dinamômetro piezelétrico e sua resultante foi calculada através da Equação (1). Dessa forma, a Figura 5 ilustra graficamente os valores da força de usinagem (F_U) gerados em função do tempo de corte (t_c) para as três condições lubrificantes. Linhas de tendência foram traçadas para evidenciar o comportamento dos gráficos. Observa-se que os menores valores de F_U foram obtidos com a condição MQL, pois a sua linha de tendência (linha tracejada), além de se manter abaixo das demais, manteve-se, também com uma acividade menor. Isto pode ser explicado pela menor taxa de desgaste da ferramenta com a utilização de MQL, uma vez que o desgaste tem influência direta nas componentes ortogonais (Amorim, 2002).

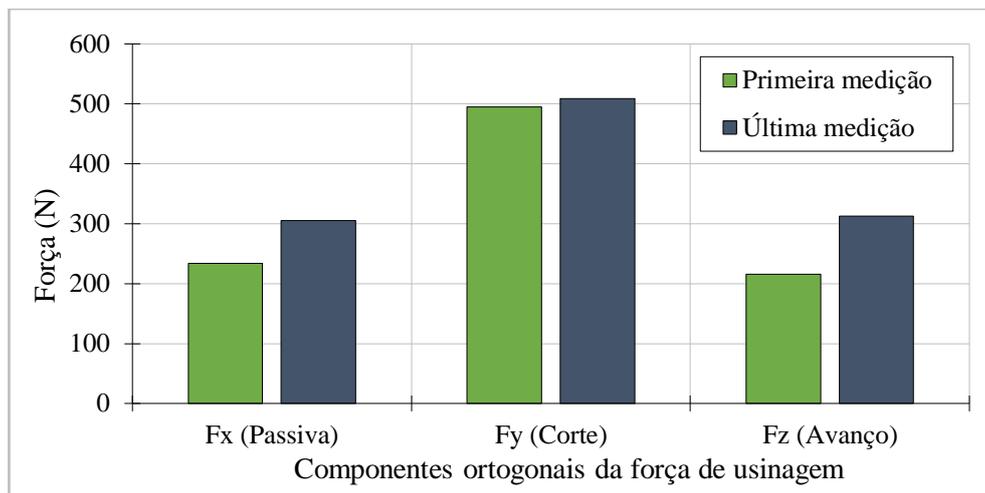
Figura 5 – Força de usinagem (F_U) gerada em função do tempo de corte (t_c).



No entanto, o desgaste da ferramenta, assim como outros fatores, influencia as componentes ortogonais da força em diferentes proporções. Segundo Machado *et al.*, (2015), experimentos demonstram que um desgaste de flanco da ferramenta de 0,1 mm gera um aumento de 7% a 12% na força de corte (F_y), de 18% a 26% na força de avanço (F_z) e de 20% a 32% na força passiva

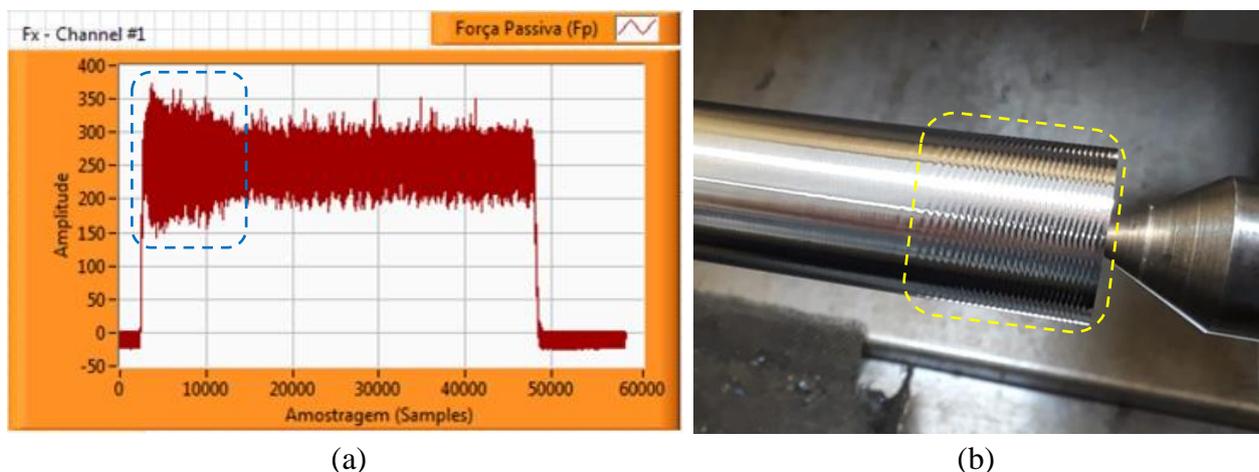
(F_x). Para exemplificar, a Figura 6 mostra a diferença dos valores das componentes da força de usinagem durante a primeira e a última medição para a situação WET (maior inclinação da linha de tendência da Fig. 5). O gráfico demonstra que, conforme previsto, as forças F_x e F_z são mais sensíveis aos desgastes da ferramenta. Os aumentos dos valores para as forças F_x , F_y e F_z foram, respectivamente, 30%, 2% e 45%.

Figura 6 – Componentes ortogonais da força de usinagem no início e final do ensaio de vida para a condição WET.



Durante a usinagem do corpo de prova na condição DRY, o terceiro passe (27 s de usinagem), gerou uma vibração tipo *chatter*. Esta vibração tem a propriedade de extrair e depois aumentar a energia do sistema por meio da interação da ferramenta com a peça. Como a peça vibra, a força passiva (F_x) sofre uma elevação abrupta de valor durante esse período (Altintas, 2000). A Figura 7a ilustra este efeito e a Fig. 7b a imagem da superfície usinada após a ocorrência do fenômeno.

Figura 7 – (a) Detecção de *chatter* no gráfico da força passiva (F_x); (b) Imagem da superfície usinada com a presença do *chatter* registrada aos 27 s de usinagem na condição DRY.



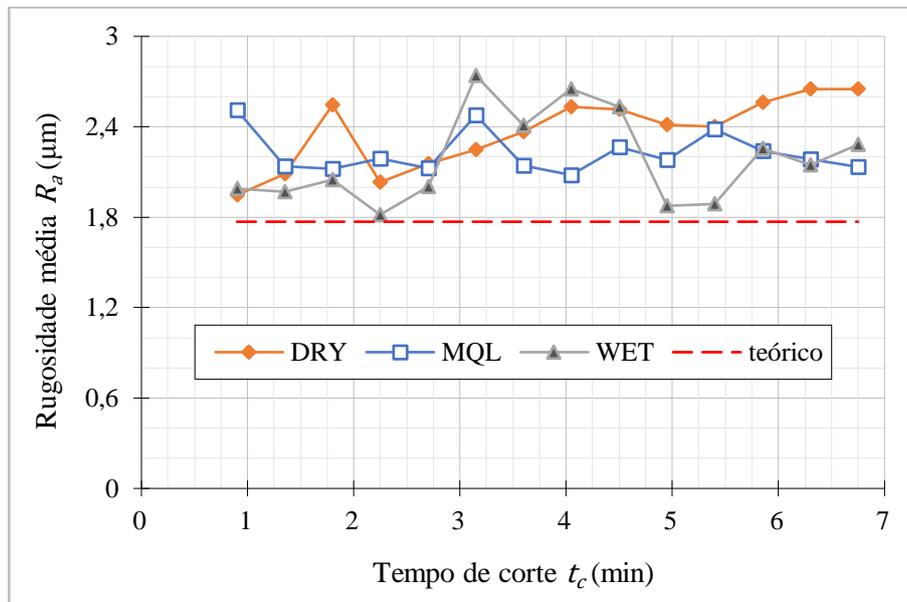
Como o *chatter* é um efeito bastante complexo que depende de diversos fatores (Quintana e Ciurana, 2011), possivelmente esta vibração ocorreu devido ao efeito combinado do atrito causado

pela falta de lubrificação na interface peça/ferramenta, da presença da componente passiva da força de usinagem (F_x) e das condições de corte (principalmente altos valores de v_f e v_c). Como isso não ocorreu nas demais situações, o fato foi considerado como um evento isolado.

3.3 Rugosidade da superfície usinada

A Figura 8 mostra graficamente os valores de rugosidade média R_a [μm] em função do tempo de corte t_c [s] nas três situações de lubrificação. A linha tracejada no gráfico é referente ao valor teórico calculado através da (Eq. 2) e é igual a $1,77 \mu\text{m}$. De forma análoga, a Fig. 9 mostra os valores de rugosidade média parcial R_z [μm] em função do tempo de corte (t_c). Em ambos os casos, as barras de erros não foram adicionadas para facilitar a visualização. Vale dizer que a primeira medição realizada aos 27 s de usinagem foi suprimida dos gráficos da Fig. 8 e Fig. 9 devido à ocorrência da vibração *chatter* que afetou negativamente a superfície usinada (Fig. 7b) na condição DRY, gerando valores muito elevados de rugosidade ($R_a = 9,61 \pm 0,34 \mu\text{m}$ e $R_z = 37,96 \pm 1,76 \mu\text{m}$).

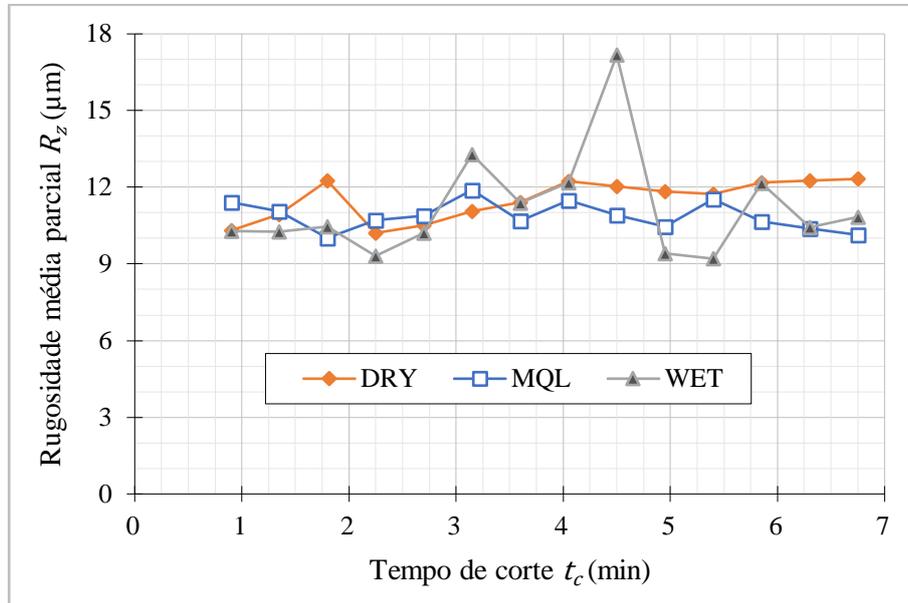
Figura 8 – Rugosidade média (R_a) do corpo de prova em função do tempo de corte (t_c).



Em um primeiro momento, observa-se na Fig. 8 que as rugosidades médias ficaram com valores muito semelhantes e próximas ao valor teórico previsto variando, nas três situações, entre $1,9 \mu\text{m}$ e $2,5 \mu\text{m}$. Essas diferenças entre os valores teórico e real são esperados, visto que o teórico é apenas um indicativo que depende apenas de f e r_ϵ . No caso dos reais, os valores estão acrescidos de diversos outros fatores intrínsecos ao processo como vibração, desgaste da ferramenta, rebarbas (aresta não afiada) dentre outros (Machado *et al.*, 2015). Estes valores de rugosidade, segundo a norma ABNT NBR 8404 (1984), pertencem a classe de rugosidade N8. Esta classe é indicada para superfícies usinadas em geral, eixos, chavetas de precisão, alojamento de rolamentos, superfícies de referência, de apoio etc. Nesta classe, os valores de R_a variam entre $1,6$ e $3,2 \mu\text{m}$ e estes valores estão dentro da faixa prevista para o processo de torneamento (Ferraresi, 1970). Assim, o MQL ($R_a = 2,22 \pm 0,31 \mu\text{m}$) obteve uma estabilidade maior nos valores de rugosidade em relação a demais situações. Além disso, a condição WET ($R_a = 2,17 \pm 0,60 \mu\text{m}$) obteve um resultado mais favorável que a condição DRY ($R_a = 2,85 \pm 1,88 \mu\text{m}$), visto que a menor dispersão indica uma manutenção mais longa da rugosidade desejada. Isso pode ser explicado pela menor taxa de

desgaste da ferramenta pela ação do MQL (principalmente) e do WET em relação ao DRY, uma vez que as ferramentas de corte tendem a causar rugosidades mais elevadas conforme o desgaste aumenta (Amorim, 2002; Ferreira *et al.*, 2016).

Figura 9 – Rugosidade média parcial (R_z) em função do tempo de corte (t_c).



Para a rugosidade média parcial (Fig. 9), observa-se novamente que a situação MQL obteve um valor mais estável ($R_z = 10,87 \pm 1,42 \mu\text{m}$) em relação as outras duas situações. Porém, diferentemente do caso anterior, a situação WET ($R_z = 11,18 \pm 5,42 \mu\text{m}$) obteve um desempenho inferior em relação a situação DRY ($R_z = 11,52 \pm 1,86 \mu\text{m}$). Como supracitado, o parâmetro R_z é diretamente influenciado por defeitos ou irregularidades na superfície usinada, e a medição aos 4,5 min de usinagem com WET pode ter sido influenciada por alguma falha não intencional, inesperada e indesejável que surgiu durante o corte e alterou a topografia típica da superfície (Machado *et al.*, 2015).

4 CONCLUSÕES

A análise das três condições de lubrificação (DRY, MQL, WET) nos ensaios de vida da ferramenta de corte durante o torneamento do aço microligado ao boro PL30 resultou nas seguintes conclusões:

- A análise da vida da ferramenta mostrou que o MQL obteve ligeiramente melhores resultados. As condições DRY e WET apresentaram resultados semelhantes.
- A condição MQL também produziu os menores valores de força de usinagem resultante. Novamente DRY e WET geraram resultados semelhantes.
- Os valores de rugosidade obtidos foram semelhantes para as três condições. No entanto, o MQL gerou resultados de rugosidade média e média parcial com menores variações com o tempo de usinagem.
- Além da manutenção da rugosidade, não se encontrou outra justificativa que evidencie alguma vantagem no uso da condição WET em relação ao DRY ou ao MQL.

Portanto, de maneira geral, conclui-se que o MQL, das três condições lubrificantes estudadas, obteve os melhores resultados em todos os parâmetros avaliados e, sendo assim, é a

melhor alternativa para a usinagem do aço PL30 considerando a ferramenta e a janela operacional utilizadas.

4.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Ensaios de vida considerando um maior volume de material usinado a fim de que a ferramenta atinja o fim de vida ($VB_C \geq 0,20$ mm).
- Para os parâmetros utilizados neste trabalho, avaliar o desgaste de flanco médio da ferramenta (VB_B), uma vez que a profundidade de corte (1,0 mm) é maior que o raio de ponta da ferramenta (0,8 mm).
- Monitorar a temperatura do processo com o intuito de avaliar a sua influência na variação das dimensões dos corpos de prova.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), por tornar possível a realização deste trabalho. À empresa Viemar Automotivo, pela generosa doação do fluido de corte, suporte de ferramenta, insertos e matéria-prima. Ao técnico do Laboratório de Automação e Usinagem (LAUS-UFRGS), Guilherme Vargas Schirmer, pela ajuda durante a experimentação.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 3685, 2017. **Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- ALTINTAS, Y. **Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design**, Cambridge University Press, 2012.
- AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal-duro**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2002.
- ARCELORMITTAL. **Guia do Aço – Aços Longos**. 2019.
- BELGO BEKAERT ARAMES. **Folder Fixadores Paginado**. 2021. Disponível em <https://www.belgobekaert.com.br/wp-content/uploads/2019/06/BB-086-16-FOLDER-FIXADORES-PAGINADO-v3.pdf>. Acesso em 14/11/2021.
- BORBA, V. R. **Análise da força de usinagem e da rugosidade no torneamento de aços endurecidos com ferramentas de PCBN e de metal-duro**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, 2016.
- CARPINETTI, L. C. R.; FILHO, E. V. G.; PORTO, A. J. V.; JASINEVICIUS, R. G. **Rugosidade Superficial: Conceitos e Princípios de Medição**. Apostila, EESC-USP, São Carlos, SP, 1996.
- CHOLLET, H. M. **Curso Prático e Profissional para Mecânicos de Automóveis – O Veículo e seus Componentes Mecânicos**. Editora Hemus, São Paulo, 2005.
- DHAR, N.R.; M. KAMRUZZAMAN.; MAHIUDDIN AHMED. “Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel”. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 172, p. 299-304, 2006.
- DIB, M. H. M.; DIAS, D. G.; JASINEVICIUS, R. G. **Análise das Forças de Usinagem durante a Formação de Cavaco em Microfresamento**. 9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Santa Catarina, 2017.

- DIN 6584, 1982, **Begriffe Der Zerspantechnik: Kräfte, Energie, Arbeit, Leistung**, Berlin: Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Beuth Verlag.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1ª ed. São Paulo, Editora Blucher, 1970.
- FERREIRA, D.; CAROU, C.; LAURO, C. H.; DAIM, J. P. “Surface roughness investigation in the hard turning of steel using ceramic tools”. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 31, n. 5, p. 648-652, 2016.
- MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; SILVA, M.B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3ª ed. São Paulo, Editora Blucher, 2015.
- NBR 12545, 1991, **Conceitos da técnica de usinagem - Forças, energia, trabalho e potências**, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- NBR 8404, 1984. “**Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos**”. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- QUINTANA, G.; CIURANA, J. “Chatter in machining processes: A review”. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 5, p. 363-376, 2011.
- REVANKAR, G. D., SHETTY, R., RAO, S. S.; GAITONDE, V. N. “Analysis of surface roughness and hardness in titanium alloy machining with polycrystalline diamond tool under different lubricating modes”. **Materials Research**, v. 17, n. 4, p. 1010-1022, 2014.
- SANDVIK COROMANT. **Materiais da Peça**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx> Acesso em 27/10/2021.
- SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles Second Edition**. Oxford University Press, 2005.
- TAEGUTEC **Catálogo Grade TT5080 - Item 6166696**. Disponível em www.imc-companies.com/TaeguTec/ttkCatalog/Grade.aspx?grade=TT5080&item=6166696&fnum=10328&mapp=IS&app=0. Acesso em 15/09/2021.
- TORESAN Jr., W. “A importância do exame pericial nos pinos esféricos (pivôs) para articulações de direção e suspensão de veículos automotores – análise de casos”. **Associação dos Peritos Criminais do Rio Grande do Sul**, 2020.
- TRENT, E.; WRIGHT, P. **Metal Cutting 4h Edition**. Butterworth-Heinemann, 2000.
- URASATO, W.T. **Influência da aplicação de MQCL sobre a vida da ferramenta durante o torneamento do Hastelloy C-276**. Trabalho de conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS, 2019.
- ZEILMANN, R. P.; VACARO, T.; BORDIN, F. M.; SONDA, V. “Processos de usinagem e responsabilidade ambiental através da redução da utilização de fluidos de corte”. **Anais do XVII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva**, São Paulo, 2009.