

USINABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS NA OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO

Jorge Dayvison Celestino Duarte

Alexandre Mendes Abrão

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901, Brasil

jorgecduarte1@gmail.com

abrao@ufmg.br

Resumo. O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão bibliográfica sobre os aspectos críticos associados ao torneamento dos aços inoxidáveis, examinando os parâmetros de usinagem relevantes e sua influência na usinabilidade das principais classes de aços inoxidáveis. Os estudos indicam maiores adversidades no torneamento da classe austenítica devido às propriedades dessa classe, tais como condutividade térmica, forte tendência ao encruamento e formação de cavacos longos. Por sua vez, os aços inoxidáveis martensíticos exigem elevada força de usinagem por conta de sua alta dureza e resistência à tração, entretanto, o aumento da velocidade de corte resulta na redução da força de usinagem para todas as classes de aços inoxidáveis. O mecanismo de desgaste que apresenta maior relevância durante o torneamento dos aços inoxidáveis austeníticos e duplex foi o de aderência e arrastamento devido ao surgimento de aresta postiça de corte. Para a classe martensítica, o mecanismo de deformação sob tensão de compressão tem maior relevância. A temperatura de usinagem apresenta redução com o emprego de diferentes fluidos de corte, sendo que a utilização destes auxilia no prolongamento da vida da ferramenta de corte.

Palavras chave: Aços inoxidáveis, Usinabilidade, Torneamento.

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são materiais com elevada resistência à corrosão e são descritos como ligas de ferro e cromo que possuem no mínimo 10% de Cr, sendo este o elemento mais importante devido à sua alta resistência a corrosão CARBÓ (2008). A forma mais usual de classificação dos aços inoxidáveis é baseada em sua microestrutura que resulta diferentes classes, sendo elas: aços inoxidáveis ferríticos, martensíticos, austeníticos, duplex e endurecidos por precipitação.

Os aços inoxidáveis possuem grande variedade de aplicações e sua larga utilização é devido à sua elevada resistência à corrosão e outras características que variam de acordo com sua classificação. Segundo Aço Brasil (2019), dentre os aços planos especiais e ligados utilizados no mercado nacional, os aços inoxidáveis apresentam consumo aparente de 50%, aproximadamente. Com ampla aplicação em diversos setores da economia, a manufatura do aço inoxidável torna-se de extrema relevância para a obtenção do produto final.

De acordo com Diniz *et al.* (2013), entende-se como propriedades de usinagem de um material aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo. Entre estas propriedades se destacam as condições e temperatura de corte, utilização de fluido durante o processo de usinagem, força de usinagem, desgaste de ferramentas, entre outras. Assim, a compreensão das características e técnicas de usinagem para o torneamento de aços inoxidáveis é de grande relevância nos contextos industrial e acadêmico devido à complexidade da usinagem desta classe de materiais e de seu amplo emprego na indústria e nos itens de utilização diária.

2. Usinabilidade dos aços inoxidáveis

A usinabilidade de um material pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico, seja absoluto ou percentual, o comparativo de um conjunto de propriedades de usinagem em relação a outro considerado como padrão, FERRARESI (1970). De acordo com Santos e Sales (2007), as características de usinabilidade dos aços inoxidáveis são distintas, pois dependem das classes e tipos de materiais que se pretende usinar, de maneira que podem variar entre muito alta e muito baixa.

Em relação às características de usinabilidade entre as classes de aços inoxidáveis, os aços martensíticos apresentam usinagem difícil devido à elevada dureza, exigindo maior esforço de corte por causa da presença de partículas duras e abrasivas de carboneto de cromo (DINIZ *et al.* 2013; CORRÊA, 2014). Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam controle de cavacos razoável (COROMANT, 2017) e para melhorar sua usinabilidade podem ser adicionados enxofre, manganês e cobre. Entretanto, os maiores desafios na usinagem dos aços inoxidáveis estão concentrados na classe austenítica; os aços pertencentes a esta classe possuem difícil usinabilidade em razão de sua alta

ductilidade e forte tendência ao encruamento em condições de usinagem severas. Quando comparada aos ferríticos e martensíticos, esta classe apresenta taxa de endurecimento mais elevada e uma diferença acentuada entre o limite de escoamento e o limite de resistência (SANTOS; SALES, 2007).

2.1 Vida e desgaste de ferramenta

Durante a usinagem dos aços inoxidáveis ocorrem diferentes mecanismos de desgaste no inserto. Segundo Machado *et al.* (2015), por melhor que seja a usinabilidade do material da peça ou por mais duro e resistente que seja o material da ferramenta de corte, o desgaste ocorrerá e eventualmente será necessária a substituição da ferramenta de corte. De acordo com Coromant (2017), as formas de desgaste mais frequentes na ferramenta de corte e que resultam em uma perda gradativa de material, são: desgaste de cratera; desgaste de flanco e desgaste de entalhe. De acordo com Trent e Wright (2000), existem seis principais mecanismos de desgaste de ferramentas, os quais variam de acordo com o material da peça, a operação e os parâmetros de usinagem, a geometria da ferramenta e a utilização de fluidos de corte. Tais mecanismos são: cisalhamento plástico em altas temperaturas, deformação sob tensão de compressão, abrasão, desgaste de entalhe, difusão e aderência e arrastamento. A figura 1 apresenta um inserto de metal duro revestido após o torneamento a seco do aço inoxidável martensítico 13CrSS. Notam-se os desgastes de cratera e de flanco causados provavelmente por abrasão, além de material da peça aderido, que provavelmente resulta em desgaste por aderência e arrastamento.

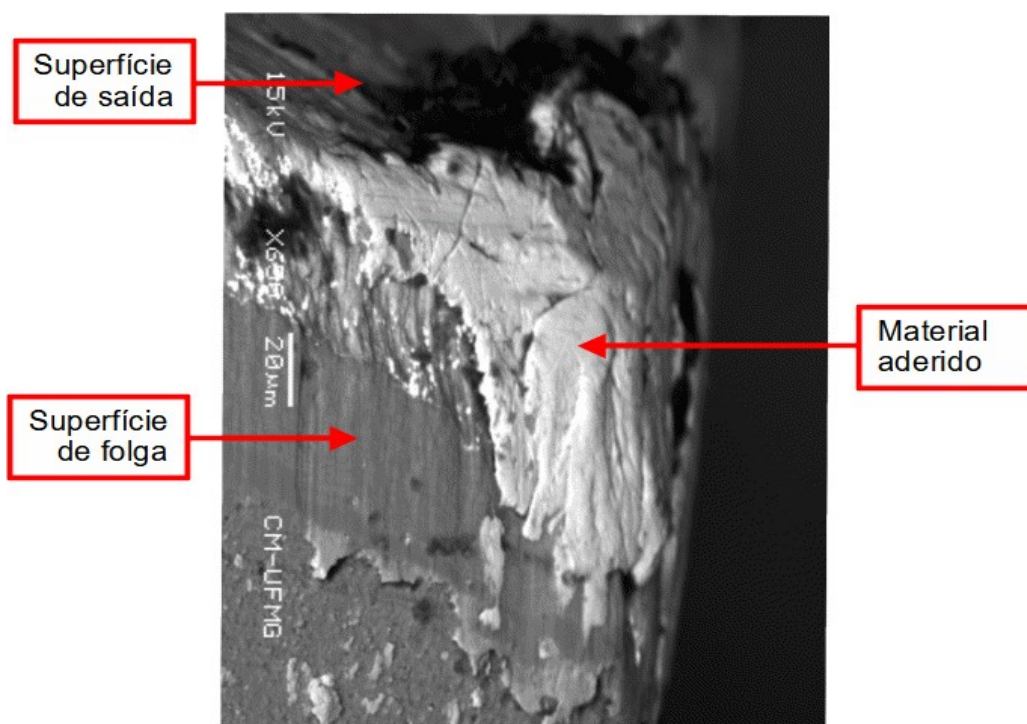


Figura 1. Desgaste em ferramenta de metal duro após o torneamento do aço inoxidável martensítico 13 CrSS

No torneamento a seco do aço inoxidável austenítico AISI 304 com inserto de metal duro P10, Tekiner e Yeşilyurt (2004) avaliaram o desgaste de flanco para cinco diferentes velocidades de corte (120, 135, 150, 165 e 180 m/min) e três diferentes avanços (0,2; 0,25 e 0,3 mm/rev). Foi constatado que com o aumento da velocidade de corte, o desgaste de flanco foi reduzido, resultado que diverge de vários estudos que relacionam o aumento da velocidade de corte com a elevação da temperatura e do desgaste de flanco. Ademais, verificou-se que o surgimento da aresta postiça de corte (APC), foi reduzido com a elevação da velocidade de corte, destacando-se que o surgimento da APC geralmente ocorre em baixas velocidades de corte, de maneira que a parte inferior do cavaco em contato com o inserto sob a pressão de corte na zona de aderência mantém este contato sem movimento relativo em um espaço de tempo suficiente para promover a adesão do material da peça sobre a ferramenta. Em relação ao avanço, o menor desgaste de flanco foi observado com 0,25 mm/rev para todas as velocidades de corte, exceto 120 m/min que apresentou melhores resultados para o avanço de 0,3 mm/rev. Sugere-se que a elevação do avanço afeta o gradiente de temperatura e o desgaste da ferramenta de forma mais branda se comparado ao aumento da velocidade de corte.

Durante o torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 304 conduzido por Mahdavinejad e Saeedy (2011), foi avaliado o desgaste de flanco para os seguintes parâmetros de corte: velocidade de corte (100, 125, 150, 175 e 200 m/min) avanço (0,2; 0,3 e 0,4 mm/rev) e profundidade de usinagem constante (2 mm). Todos os experimentos foram

realizados a seco e com aplicação de fluido de corte. Concluiu-se que o aumento da velocidade de corte e do avanço contribuíram para a redução do desgaste de flanco. Os resultados destoam da bibliografia que associa o desgaste da ferramenta com o aumento de v_c , f e consequentemente, da temperatura. A aplicação do fluido de corte mitigou os efeitos da temperatura sobre o desgaste da ferramenta, porém apresentou menor relevância se comparada aos demais parâmetros de usinagem.

No torneamento do aço inoxidável martensítico AISI 420 realizado por Elmunafi, Yusof e Kurniawan (2015), foram utilizados os seguintes parâmetros de usinagem: velocidades de corte de 100, 135 e 170 m/min, avanços de 0,16; 0,20 e 0,24 mm/rev e profundidade de usinagem constante de 0,2 mm. A névoa de MQL foi produzida por meio de óleo de mamona e empregada em todos os experimentos. Pode-se constatar que o aumento da velocidade de corte e do avanço influenciaram negativamente a vida da ferramenta. Entretanto, a elevação da velocidade de corte apresentou maior influência sobre o desgaste da ferramenta, pois resultou no acréscimo de temperatura e na deterioração do inserto de corte.

Durante o torneamento do aço inoxidável supermartensítico ASTM CA6NM conduzido por Santos e Abrão (2020), foram utilizados insertos de corte de metal duro das classes ISO M10 e ISO M10-20, ambos com revestimento de TiCN/Al₂O₃/TiN depositado por CVD. Também foram utilizados insertos da classe ISO M30-40 com revestimento de (Ti,Al)N com alto teor de Al depositado por PVD. Pôde-se observar que, com o aumento da velocidade de corte, ocorreu a elevação do desgaste de flanco na ferramenta em decorrência das temperaturas de usinagem mais elevadas, as quais propiciaram oxidação e deformação plástica dos insertos, levando-os a taxas mais elevadas de desgaste. Quanto à influência dos revestimentos no desgaste das ferramentas, o desgaste acelerado do inserto M30-40 foi atribuído à sua cobertura monocamada, de forma que uma possível falha prematura do revestimento (Ti,Al)N levaria à maior exposição do substrato e, consequentemente, a um desgaste mais severo. Além disso, este revestimento tem a capacidade de transformar-se em um novo composto (Al₂O₃), que possui afinidade química com a camada passivadora de Cr₂O₃, promovendo adesão e contribuindo para o desgaste do inserto.

Para o torneamento do aço inoxidável duplex UNS 1.4462 (equivalente ao AISI 2205), Krolczyk, *et al.* (2015) utilizaram os seguintes parâmetros de corte: velocidades de corte de 50 a 150 m/min; avanços de 0,2 a 0,4 mm/rev e profundidades de usinagem de 1 a 3 mm. Concluiu-se que no processo de atrito entre ferramenta e peça, algumas partículas do material da peça foram transferidas para a superfície de saída da ferramenta, originando assim a APC. Este fenômeno foi documentado no torneamento com os seguintes parâmetros: $v_c = 100$ m/min, $f = 0,3$ mm/rev, $a_p = 2$ mm no corte a seco e com fluido de corte. O mesmo fenômeno ocorreu no torneamento a seco com os seguintes parâmetros: $v_c = 150$ m/min, $f = 0,3$ mm/rev, $a_p = 2$ mm, sendo que para esta velocidade de corte foi observada uma pequena deformação plástica na superfície de saída. Tal evento pode ser atribuído à deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas, visto que a elevação da velocidade de corte é fundamental para a elevação da temperatura, reduzindo a resistência ao escoamento do material da ferramenta próximo a interface. A redução da velocidade de corte para 50 m/min no corte a seco resultou no desgaste de cratera. Esta ocorrência pode ser explicada pelo mecanismo de aderência e arrastamento que propicia o surgimento de APC em baixas velocidades de corte e que pode acarretar na remoção de material da superfície da ferramenta com o cavaco. Para o torneamento a seco com $v_c = 100$ m/min, $f = 0,3$ mm/rev, $a_p = 2$ mm, ocorreu o desgaste de cratera, enquanto para o corte com fluido de corte, com os mesmos parâmetros, o desgaste predominante na ferramenta foi de origem abrasiva.

Na avaliação do desgaste da ferramenta de corte durante o torneamento a seco do aço inoxidável duplex 1.4462 (DIN EN 10088-1), Królczyk *et al.* (2013) aplicaram os seguintes parâmetros de usinagem: $v_c = 50$ e 150 m/min, $f = 0,3$ mm/rev e $a_p = 2$ mm. Os mecanismos de desgaste identificados, para velocidade de usinagem de 150 m/min, são similares ao estudo anterior, ou seja, durante o torneamento algumas partículas do material da peça foram transferidas para a superfície de saída da ferramenta, originando a APC e causando deformação plástica na superfície de saída da ferramenta e o aumento do desgaste de flanco foi atribuído ao aumento da velocidade de corte que influenciou na elevação da temperatura.

Durante o torneamento com resfriamento criogênico do aço inoxidável endurecido por precipitação 17-4 PH foram utilizados por Sivaiah e Chakradhar (2018), os seguintes parâmetros: velocidades de corte de 25, 85 e 132 m/min; avanços de 0,048; 0,143 e 0,238 mm/rev e profundidades de usinagem de 0,2; 0,6 e 1 mm. Foi constatado que o aumento da velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem resultaram em maior desgaste de flanco. Estes resultados estão de acordo com a literatura, na qual se verifica que a elevação dos valores de parâmetros de usinagem resulta em um maior desgaste de flanco devido ao aumento da temperatura de usinagem.

Os resultados obtidos nos estudos analisados indicam uma acentuada influência da velocidade de corte sobre o desgaste de flanco para todas as classes de aços inoxidáveis. A elevação desse parâmetro contribuiu, de forma geral, para a elevação da temperatura de corte e, consequentemente, para o aumento do desgaste, tendo em vista sua influência sobre a dureza a quente da ferramenta de corte. Por sua vez, a elevação do avanço contribuiu para o aumento do desgaste de maneira mais branda em comparação à velocidade de corte. No torneamento dos aços inoxidáveis martensíticos, o aumento da temperatura associado às elevadas tensões em função da alta desta dureza da classe contribuiu para o surgimento do mecanismo de deformação sob tensão de compressão, tendo ocorrido, em alguns casos, o deslocamento do material do inserto. Os mesmos fatores também contribuíram para que o mecanismo de desgaste por

difusão fosse presente em alguns estudos, visto que ocorreu transferência em nível atômico do cavaco para a superfície de saída do inserto de metal duro.

Nos estudos que abordaram o torneamento dos aços austenítico e duplex, o surgimento da aresta postiça de corte foi presente em uma ampla faixa de velocidades de corte, incluindo as mais altas, nas quais esse fenômeno não é recorrente. A ocorrência da APC pode estar associada à ductilidade do aço inoxidável e sua tendência ao empastamento e à elevada tensão de corte na zona de aderência. Sob baixas velocidades de corte, o mecanismo de desgaste predominante na usinagem dos aços inoxidáveis é o de aderência e arrastamento, sendo frequente o surgimento de APC e a presença de crateras na superfície de saída em razão da remoção e arrastamento de material da ferramenta. A Tabela 1 apresenta os principais mecanismos de desgaste observados nos estudos analisados. Verifica-se que os mecanismos de desgaste com maior presença entre todas as classes são aderência e arrastamento, difusão e abrasão.

Tabela 1. Principais mecanismos de desgaste para as diferentes classes de aços inoxidáveis.

Classes	Principais mecanismos de desgaste
Austenítico	Difusão / Aderência e arrastamento
Martensítico	Difusão / Deformação sob tensão de compressão
Duplex	Aderência e arrastamento / Abrasão
Endurecidos por precipitação	Difusão / Abrasão

2.2 Força de usinagem

O conhecimento da força de usinagem que atua sobre a cunha de corte e o estudo de suas componentes são relevantes para estimar a potência necessária de corte e as forças que agem nos elementos da ferramenta, além de manter relação com o desgaste das ferramentas de corte, influenciando a viabilidade econômica do processo, MACHADO *et al.* (2015). A força de usinagem (F_u) é definida como a resultante da soma vetorial de suas componentes sobre a cunha cortante, quais sejam: força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p).

As componentes da força de usinagem no corte de metais fornecem uma riqueza de informações sobre o processo de remoção de metal. Mudanças nessas forças indicam mudanças nos parâmetros de usinagem, como profundidade de usinagem, avanço, velocidade de corte e condição da ferramenta (SIKDAR; CHEN, 2002). A pressão específica de corte (K_s) pode ser definida como a razão entre a força principal de corte (F_c) e a área da seção de corte. Segundo Santos e Sales (2005), todos os fatores que facilitam o escoamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta colaboram com a redução das forças de usinagem. Portanto, fatores como o material da ferramenta e da peça a ser usinada, velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem, geometria e afiação da ferramenta e o uso de fluido de corte possuem influência direta nas forças de usinagem.

Em seu estudo sobre o torneamento do aço inoxidável martensítico AISI 420C com amostras de dureza distintas (220 e 275 HB), Rosa e Souza (2014) utilizaram velocidade de corte constante de 180 m/min, avanços de 0,1 e 0,2 mm/rev e profundidades de usinagem de 0,4 e 0,8 mm. Todos os parâmetros foram testados a seco e com fluido de corte. As ferramentas utilizadas apresentavam o mesmo raio de ponta de 0,4 mm, embora o modelo de ambas fosse diferente (aresta convencional e alisadora). As ferramentas com arestas alisadoras possuem geometria com raio de ponta modificado, o qual é composto, geralmente, de três ou mais raios, além de suas fases planas. Para a ferramenta convencional, a elevação do avanço e da profundidade de usinagem provocou a elevação de todas as componentes da força de usinagem, principalmente da força de corte, o que pode estar relacionado ao aumento da área de seção de corte, pois estes valores estão associados a esta variável. A elevação da dureza causou um pequeno acréscimo nos valores das componentes da força de usinagem, pois em geral a elevação da dureza acarreta o aumento da resistência ao cisalhamento. A utilização de fluido de corte não causou mudanças significativas nos resultados. Os resultados obtidos para a ferramenta com aresta alisadora apresentaram uma redução significativa da força de corte, atribuída aos diversos raios da ferramenta alisadora que possibilitaram uma melhor distribuição das forças na superfície da ferramenta.

No estudo conduzido por Freitas *et al.* (2017), foi realizado o torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 304L com sistemas de refrigeração distintos (MQL e ar refrigerado). Foram utilizados os seguintes parâmetros de corte: velocidades de corte de 215 e 290 m/min, avanços de 0,15 e 0,30 mm/rev e profundidade de usinagem constante em todos os testes. Foi observado que a variação da velocidade de corte e o emprego de refrigeração não promoveram mudanças significativas nos resultados das forças de usinagem. O aumento do avanço resultou na elevação de todas as componentes da força de usinagem, sendo que a força de corte aumentou 43,7%, força passiva 31,17% e força de avanço 29,86%. O comportamento das componentes de F_u foi atribuído ao aumento da seção de corte devido à elevação considerável do avanço, pois tal parâmetro teve seu valor duplicado se comparado ao primeiro teste. Fernandez-Abia *et al.* (2011) estudaram o torneamento a seco do aço inoxidável austenítico AISI 303 e utilizaram nove diferentes velocidades de corte (37, 75, 150, 300, 450, 600, 750, 845 e 870 m/min), enquanto o avanço e a profundidade de usinagem foram mantidos constantes. Observou-se que a força de corte apresentou valores duas vezes maiores do que a

força de avanço e a força passiva. Para velocidades de corte de até 450 m/min, os valores de força de corte reduziram devido ao amaciamento térmico e da diminuição da deformação e da dureza do cavaco.

No estudo de otimização do torneamento dos aços inoxidáveis duplex 1.4462 e 1.4410 realizado por Koyee *et al.* (2014), foram realizados ensaios de torneamento de faceamento com velocidade de corte entre 75 a 200 m/min, avanço de 0,1 a 0,25 mm/rev, profundidade de usinagem entre 0,5 a 1,5 mm, comprimento de corte de 3 a 12 mm e condição de corte a seco e com fluido lubri-refrigerante. Para o corte a seco, quando velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem foram mantidos em valores constantes, esperava-se que a força de usinagem aumentasse segundo o aumento do comprimento de corte, o que de fato aconteceu devido ao desgaste da ferramenta de corte. Além disso, os valores de força de usinagem apresentaram aumento significativo devido à elevação da velocidade de corte. Este resultado está associado ao crescimento da taxa de desgaste da ferramenta durante o torneamento. Logo, quando os materiais são usinados a seco, é preferível reduzir a velocidade de corte e o avanço a fim de minimizar F_u . Para a usinagem com utilização de fluido de corte, os valores de força de usinagem foram reduzidos se comparados ao corte a seco. Esse comportamento pode ser atribuído à redução do atrito entre cavaco e ferramenta devido ao efeito lubrificante do fluido sintético a uma concentração de 5%. Entre os materiais, os valores de força de usinagem para o aço 1.4410 foram maiores do que para o aço 1.4462, o que pode ser explicado maior resistência mecânica e menor concentração de elementos de corte fácil, como enxofre e fósforo, no primeiro aço.

Durante o torneamento a seco de dois tipos de aços inoxidáveis duplex com liga de nitrogênio (ASTM A995 tipos 4A e 5A), os experimentos foram conduzidos sob três velocidades de corte (80, 100 e 120 m/min) e três avanços (0,04, 0,08 e 0,12 mm/rev), mas com profundidade de usinagem constante (0,5 mm). Os resultados apontaram uma redução da força de usinagem com o aumento de v_c e redução de f . Nesses casos, o aumento na velocidade de corte contribui para o aumento de temperatura, que torna o material menos resistente ao cisalhamento e favorece a remoção do material com forças de corte mais baixas. O aumento do avanço afeta diretamente os valores da força de usinagem por acarretar a elevação da área da seção de corte. Em razão do maior volume de material a ser deformado e removido, a força de usinagem é elevada. O aumento da velocidade de corte associado ao menor avanço resulta na redução da força de usinagem, ou seja, utilizando-se avanço de 0,04 mm/rev e velocidade de corte de 120 m/min foram obtidos os menores resultados para força de usinagem em ambos os materiais (SELVARAJ; CHANDRAMOHAN; MOHANRAJ, 2014).

No torneamento a seco do aço inoxidável semiaustenítico Cr12Mn5Ni4Mo3Al endurecido por precipitação, Jianxin *et al.* (2011) utilizaram ferramentas com substrato de WC/Co e WC/TiC/Co, velocidade de corte entre 100 a 160 m/min e avanço e profundidade de usinagem constantes. Todas as componentes da força de usinagem foram menores quando empregada a ferramenta a base de WC/TiC/Co, fator atribuído à maior resistência ao desgaste do TiC, pois à medida que o desgaste da ferramenta aumenta, a pressão específica de corte também aumenta. O gradiente de temperatura devido à elevação da velocidade de corte não teve influência na redução das componentes da força de usinagem. No torneamento a seco do aço inoxidável superduplex UNS S32750, Vogel *et al.* (2013) utilizaram quatro avanços diferentes (0,109; 0,199; 0,293 e 0,496 mm/rev), porém mantiveram velocidade de corte e profundidade de usinagem constantes. Notou-se que com a elevação do avanço ocorreu o aumento das componentes da força de usinagem devido ao aumento da área da seção de corte.

Considerando os resultados apresentados nesta seção, observa-se que, para todas as classes de aços inoxidáveis, a força de usinagem reduz com o aumento da velocidade de corte. A redução pode ser atribuída a redução da resistência ao cisalhamento na zona de corte, que provoca a redução da dureza e da deformação do cavaco. A elevação dos valores de avanço e profundidade de usinagem ocasionam o aumento de todas as componentes da força de usinagem, elevação que pode ser explicada pelo aumento da área da seção de corte.

O torneamento do aço inoxidável martensítico exige força de usinagem mais elevada, o que pode estar relacionado à maior dureza dos materiais dessa classe. Entre os aços inoxidáveis duplex, observa-se que materiais com valores superiores de tensão de ruptura, dureza e concentração de Ni e Cr apresentam maiores valores de força de usinagem. A Figura 2 apresenta a pressão específica de corte em função do avanço para os trabalhos discutidos no presente tópico. Nota-se que valores baixos de avanço resultam em uma elevada pressão específica de corte, isso ocorre devido a ação do raio de ponta da ferramenta que atua como uma ferramenta com ângulo de saída negativo. Além disso, observa-se que os aços inoxidáveis duplex e endurecidos por precipitação apresentam maiores valores de pressão específica de corte se comparados às demais classes. Tal fator pode estar associado à alta dureza, elevada tensão de ruptura e pela presença de elementos de liga que podem formar carbonetos de dureza aproximada à da ferramenta.

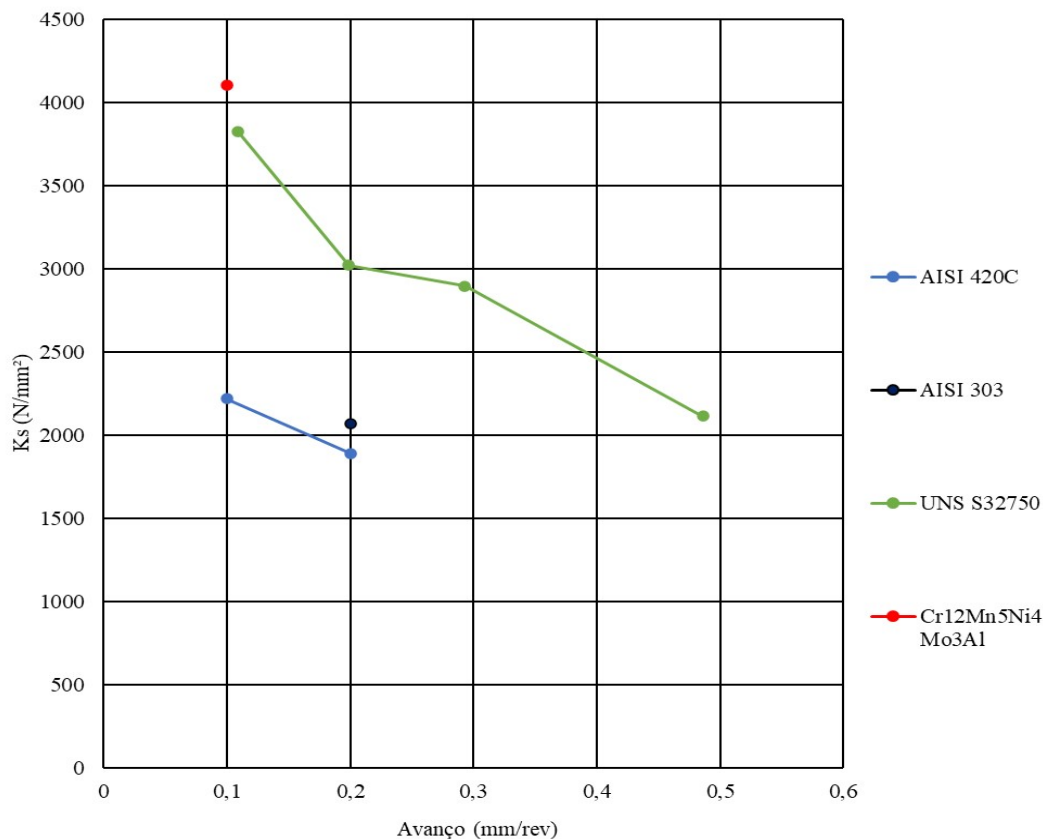


Figura 2. Pressão específica de corte em função do avanço para diversas classes de aços inoxidáveis

2.3 Temperatura no torneamento e fluidos de corte

Durante a usinagem dos metais, quase toda a energia consumida é transformada em energia térmica e segundo Santos e Salles (2005), o calor gerado nas zonas de cisalhamento é conduzido para a ferramenta e para o cavaco. De acordo com Bagetti (2009), as elevadas temperaturas do processo de usinagem possuem influência na formação do cavaco, na integridade superficial da peça e no desgaste da ferramenta. Segundo Sousa e Sousa (2012), as temperaturas resultantes do processo de usinagem aceleram os mecanismos de desgaste termicamente ativados, reduzindo o limite de escoamento das ferramentas, o que torna esse fator controlador da taxa de remoção.

Para mitigar os efeitos da temperatura de usinagem na ferramenta, os fluidos de corte são amplamente utilizados para refrigerar e lubrificar a região de corte. Por meio da remoção de calor da ferramenta e peça e da redução do atrito por meio da lubrificação, os fluidos de corte elevam a produtividade e a vida da ferramenta em várias operações de usinagem. O transporte dos cavacos e a redução da dilatação térmica da peça são outras importantes funções exercidas por essa técnica, KLOCKE (2013). De acordo com Shaw (2005), as principais funções dos fluidos de corte são a lubrificação em baixas velocidades de corte, como nas operações de roscamento com machos e cossinetes, e de refrigeração em velocidades de corte elevadas, como no fresamento, torneamento e retificação.

Segundo Micaroni (2006), não existe uma padronização para a classificação dos fluidos de corte, todavia, uma classificação de grande aceitação é descrita a seguir: fluidos gasosos, fluidos aquosos e fluidos integrais. Diferentes direções de aplicação do fluido de corte podem ser empregadas. A aplicação sobre o cavaco (na superfície de saída da ferramenta) é a mais tradicional. Sua aplicação não é recomendada no torneamento quando cavacos emaranhados são produzidos. O fluido de corte também pode ser aplicado na interface cavaco/ferramenta no sentido contrário a saída do cavaco, direção indicada apenas para fluidos de corte sob alta pressão. Por derradeiro, o fluido de corte pode ser aplicado diretamente na interface cavaco/ferramenta (superfície de folga da ferramenta), de modo a reduzir desgaste de flanco e melhorar a qualidade da superfície produzida, MACHADO *et al.* (2015).

No estudo do torneamento do aço inoxidável martensítico AISI 422 a seco e com fluido de corte, Galanis *et al.* (2008) realizaram a usinagem com diferentes parâmetros de corte, sendo $v_c = 252; 273; \text{ e } 306 \text{ m/min}$, $f = 0,2 \text{ e } 0,5 \text{ mm/rev}$ e $a_p = 0,5 \text{ e } 1,0 \text{ mm}$. As medições de temperatura foram realizadas por meio de um pirômetro posicionado de forma que a temperatura encontrada representasse 20% da temperatura na aresta de corte. Observou-se que o aumento da velocidade de corte provocou o aumento da temperatura, porém, em comparação às condições a seco e com fluido de corte, constatou-se uma redução na temperatura de corte em 75% no segundo caso. A temperatura durante o

torneamento foi reduzida de modo satisfatório pelo fluido de corte, que extinguiu o processo de difusão entre ferramenta e peça. A elevação do avanço provocou ligeiro aumento na temperatura de usinagem.

Durante o torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 304, Dhananchezian *et al.* (2011) utilizaram diferentes métodos de refrigeração. A comparação entre a aplicação de fluido emulsionável com concentração de 5% e refrigeração criogênica foi realizada utilizando-se os seguintes parâmetros de usinagem: velocidades de corte de 61, 94 e 145 m/min, avanço de 0,159 mm/rev e profundidade de usinagem de 1 mm. O inserto utilizado no experimento com resfriamento criogênico possuía um furo na superfície de saída que se conectava a outros furos realizados na superfície de folga, modificação que foi implementada para a aplicação do fluido criogênico. Enquanto para o torneamento com fluido emulsionável utilizou-se o inserto convencional. Constatou-se uma redução da temperatura de usinagem em até 51% com a utilização do método criogênico. Tal resultado é atribuído ao modo como o nitrogênio líquido foi aplicado, de forma que esse pudesse atingir diretamente as superfícies de folga e de saída da ferramenta, o que resultou na redução da temperatura na zona de corte. Para ambos os métodos de aplicação de fluido de corte, o aumento da velocidade de corte proporcionou um significativo aumento da temperatura de usinagem e a elevação da temperatura abrandou o efeito refrigerante dos fluidos utilizados.

Durante o estudo do desempenho de um nanofluido à base de óleo de coco como fluido de corte para o torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 304, Sodavadia e Makwana (2014) realizaram testes com diferentes concentrações (0,25; 0,5 e 1,0% em peso) de partículas de lubrificantes sólidos de ácido bórico. Para a realização do experimento, adotaram-se os seguintes parâmetros: velocidade de corte de 40, 60 e 100 m/min, avanço de 0,20; 0,25 e 0,28 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,5; 1,0 e 1,2 mm. A temperatura foi medida por meio de termopar do tipo K instalado na face inferior da ferramenta. Constatou-se que com a concentração de 0,5% de ácido bórico ocorreu a maior redução da temperatura de usinagem, resultado mantido para todas as variações de velocidade de corte e avanço empregadas no experimento. Ressalta-se que tal concentração apresentou melhor desempenho em comparação ao óleo base e outros nanofluidos em termos de temperatura de corte. Os resultados para as concentrações de 0,25 e 1,0% foram similares, entretanto, a concentração de 1,0% apresentou ligeira redução na temperatura de usinagem se comparada a concentração de 0,25%.

Durante a análise comparativa entre as técnicas de refrigeração para o torneamento do aço inoxidável endurecido por precipitação 15-5 PH, Khanna *et al.* (2020) empregaram as seguintes técnicas: a seco, jorro com fluido emulsionável com concentração de 5%, MQL com névoa de fluido sintético e por último o método criogênico com aplicação de CO₂. Para a realização dos experimentos foram utilizados os seguintes parâmetros: velocidade de corte de 130 m/min, avanço de 0,222 mm/rev e profundidade de usinagem de 1,0 mm. Constatou-se que a usinagem a seco ocasionou severo desgaste do inserto, enquanto o emprego de MQL apresentou progressão de desgaste mais estável. A redução do desgaste foi de aproximadamente 44% e 68% na usinagem criogênica em comparação com a usinagem por jorro e MQL, respectivamente. A redução do desgaste é atribuída à diminuição da temperatura na zona de corte que contribui para a preservação da ferramenta.

Na avaliação do desempenho de ferramentas texturizadas com aplicação de MQL durante o torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 304, Sivaiah (2019) utilizou os seguintes parâmetros de usinagem: velocidades de corte de 44, 66, 88, 110 e 132 m/min, avanço de 0,12 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,3 mm. A névoa de MQL foi produzida por meio de fluido emulsionável com concentração de 5%. As ferramentas utilizadas possuíam diferentes texturas na superfície de saída: pequenas depressões circulares (ferramenta T1) ou as mesmas depressões circulares e sulcos em formato de oblongos (ferramenta T2). Diante dessas modificações na superfície de saída, uma redução significativa na temperatura da zona de corte foi encontrada na ferramenta T2 quando comparada à ferramenta T1. O armazenamento e a passagem contínua do fluido de corte aplicado por MQL pela zona de corte foram considerados os responsáveis pela lubrificação mais eficiente da ferramenta T2, o que resultou em temperaturas mais baixas na zona de corte. À medida que a velocidade de corte foi elevada, o efeito refrigerante do fluido de corte diminuiu, o que comprovou que a ação do fluido de corte diminui com a elevação de v_c .

No estudo comparativo do torneamento do aço inoxidável endurecido por precipitação 17-4 PH, foram utilizados como refrigeração o método criogênico com aplicação de nitrogênio líquido e jorro com fluido emulsionável na concentração de 5%. Os parâmetros de usinagem aplicados foram: velocidades de corte de 33,75; 51,03; 78,5; 120,89 e 188,4 m/min com avanço e profundidade de usinagem constantes para todos os testes. Para medição da temperatura, utilizou-se o método de radiação infravermelha. Observou-se que com o aumento da velocidade de corte houve a elevação da temperatura para ambos os métodos de refrigeração, ressaltando, todavia, a redução na temperatura de usinagem entre 63,5 a 73,4% quando utilizado o método criogênico. A redução pode ser relacionada às baixas temperaturas do nitrogênio líquido, que é aplicado diretamente na superfície de saída da ferramenta e que acarreta a redução de temperatura em toda a extensão do inserto e absorve o calor da zona de corte (SIVAIAH; CHAKRADHAR, 2018).

Conclui-se que, apesar de não ser claro como o fluido chega à interface, sua aplicação no torneamento de aços inoxidáveis é amplamente realizada devido à capacidade de reduzir o atrito e a temperatura na região. De acordo com a Fig. 3 observa-se que a aplicação de fluidos de corte aquosos e gasosos possuem larga aplicação nos experimentos que abordam o torneamento dos aços inoxidáveis, embora a aplicação de fluidos gasosos no âmbito industrial ainda não seja viável. O torneamento com fluidos de corte sólidos não apresenta relevância devido à sua difícil aplicação.

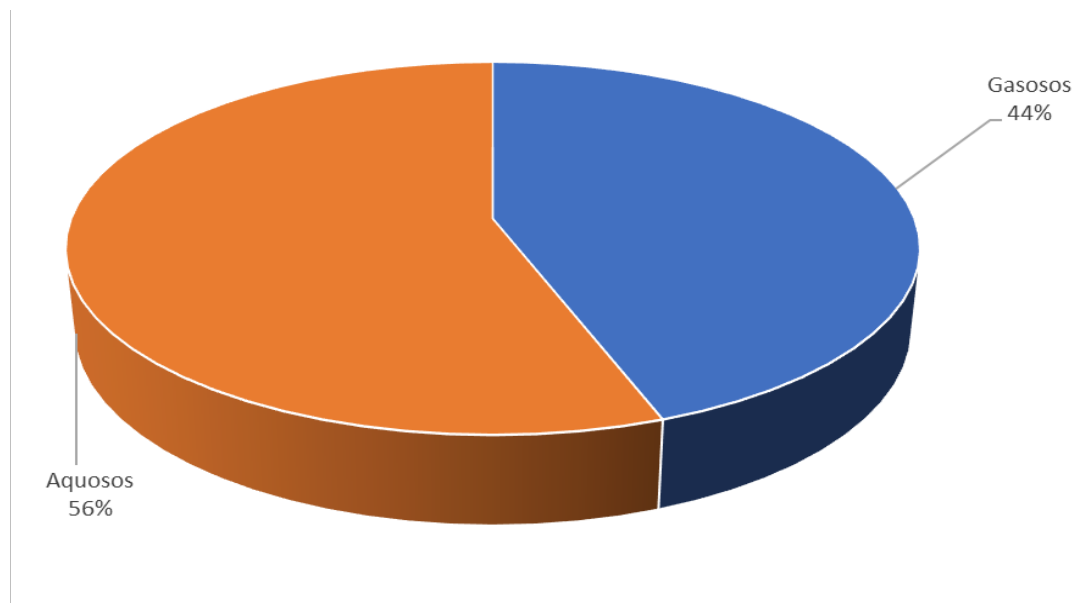


Figura 3. Classificação dos fluidos de corte utilizados nos experimentos

Em relação as classificações, diversos estudos sobre torneamento utilizaram emulsões e soluções, em razão de suas boas características de refrigeração, antioxidantes e até mesmo por sua capacidade lubrificante, apesar da alta velocidade de corte empregada. Para todos os estudos analisados, os resultados obtidos para o torneamento utilizando-se fluido de corte apresentaram redução da temperatura em até 75% se comparado ao torneamento a seco. Essa redução pode ser vinculada à excelente propriedade refrigerante dos fluidos de corte e à capacidade de acessar a interface cavaco ferramenta, seja por meio das laterais, seja por capilaridade.

3. CONCLUSÃO

Diante das análises realizadas neste trabalho, cujo objetivo principal foi apresentar o estado da arte sobre o torneamento de aços inoxidáveis, apresentam-se as seguintes conclusões:

- O desgaste em forma de flanco foi o mais investigado nos estudos analisados. A elevação da velocidade de corte e do contribuíram para a elevação da temperatura de corte e, como efeito, aceleraram a degradação da ferramenta de corte. Durante o torneamento dos aços inoxidáveis da classe martensítica, ocorreu deformação sob tensão de compressão devido às elevadas tensões em função da alta dureza. Durante o torneamento dos aços austenítico e duplex, o surgimento de APC foi observado em uma ampla faixa de velocidades de corte, incluindo as mais altas, nas quais esse fenômeno não é recorrente. A ocorrência da APC pode estar associada à ductilidade do aço inoxidável e sua tendência ao empastamento e à elevada tensão de corte na zona de aderência.
- A força de usinagem diminuiu com a elevação da velocidade de corte, que contribuiu para a redução da resistência ao cisalhamento na zona de corte e provocou a redução da dureza e da deformação do cavaco. A elevação dos demais parâmetros de usinagem, como avanço e profundidade de usinagem, ocasionaram o aumento da força de usinagem devido ao aumento da área da seção de corte. O torneamento dos aços inoxidáveis martensíticos resultou em força de usinagem mais elevada, o que pode estar relacionado à maior dureza dos materiais dessa classe que, geralmente, representam a elevação de K_s .
- A utilização de fluido de corte reduziu a temperatura e o atrito durante o torneamento. A redução da temperatura mediante a aplicação do fluido de corte pode ser associada à excelente propriedade refrigerante dos fluidos de corte e à capacidade de acessar a interface cavaco-ferramenta, seja por meio das laterais, seja por capilaridade. O método criogênico apresentou desempenho melhor se comparado aos demais fluidos de corte, o que se deve não somente à forma de aplicação do fluido, mas também às modificações implantadas na ferramenta que permitiram a aplicação do N_2 diretamente na região de corte.

REFERÊNCIAS

ATO BRASIL, 2020. “Anuário estatístico 2020”. <https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2020/06/Anuario_Completo_2020.pdf>.

- BAGETTI, J. H., 2009. “Análise da Usinabilidade, Deformação e Temperatura no Fresamento dos Ferros fundidos vermicular e cinzento”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- COROMANT. 2017. Manual técnico de usinagem. São Paulo: Sandvik Coromant.
- CORRÊA, J. G. 2014. Usinabilidade de aços inoxidáveis martensíticos aplicados na indústria de petróleo, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.
- DHANANCHEZIAN, M.; KUMAR, M. P.; SORNAKUMAR, T., 2011. “Cryogenic turning of AISI 304 stainless steel with modified tungsten carbide tool inserts”. *Materials and Manufacturing Processes*, 26(5), 781-785.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L., 2013. “Tecnologia da usinagem dos materiais”. 8. ed. São Paulo: Artliber, 270 p. ISBN 8587296019.
- ELMUNAFI, M. H. S.; YUSOF, N. M.; KURNIAWAN, D. 2015. “Effect of cutting speed and feed in turning hardened stainless steel using coated carbide cutting tool under minimum quantity lubrication using castor oil”. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(8), 1687814015600666.
- FERNÁNDEZ-ABIA, A. I.; BARREIRO, J.; DE LACALLE, L. L.; MARTINEZ, S., 2011. “Effect of very high cutting speeds on shearing, cutting forces and roughness in dry turning of austenitic stainless steels”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57(1-4), 61-71.
- FERRARESI, D., 1970. “Fundamentos da Usinagem dos Metais” Vol 1. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA.
- FREITAS, S. A.; FREITAS, T. C.; COELHO, W. A.; TEIXEIRA, L. M.; & BRANDÃO, L. C., 2017. “Análise da rugosidade e esforços no corte ortogonal do aço 304L com diferentes sistemas de lubrificação”. COBEF- Congresso Brasileiro de Engenharia de fabricação, Joinville.
- GALANIS, N. I.; MANOLAKOS, D. E.; VAXEVANIDIS, N. M., 2008. “Comparison between dry and wet machining of stainless steel”. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN)* (Vol. 3, pp. 91-8).
- JIANXIN, D.; JIANTOU, Z.; HUI, Z.; PEI, Y., 2011. “Wear mechanisms of cemented carbide tools in dry cutting of precipitation hardening semi-austenitic stainless steels”. *Wear*, 270(7-8), 520-527.
- KHANNA, SHAH, CHETAN. 2020. “Comparative analysis of dry, flood, MQL and cryogenic CO2 techniques during the machining of 15-5-PH SS alloy”. *Tribology International*, v. 146, p. 106196.
- KLOCKE, F., 2011. “Manufacturing process 1: cutting”. RWTH.
- KOYEE, R. D.; HEISEL, U.; EISSELER, R.; SCHMAUDER, S., 2014. “Modeling and optimization of turning duplex stainless steels”. *Journal of Manufacturing Processes*, 16(4), 451-467.
- KRÓLCZYK, G.; LEGUTKO, S.; RAOS, P., 2013. “Cutting Wedge Wear Examination During Turning of Duplex Stainless Steel”. *Tehnički Vjesnik-Technical Gazette*, v. 20, n. 3, p. 413-418.
- KRÓLCZYK, G. M.; NIESLONY, P.; LEGUTKO, S., 2015. “Determination of tool life and research wear during duplex stainless steel turning”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, v. 15, n. 2, p. 347-354.
- MACHADO, Á. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B., 2015. “Teoria da usinagem dos materiais”. Editora Blucher.
- MAHDAVINEJAD, R. A.; SAEEDY, S. 2011. “Investigation of the influential parameters of machining of AISI 304 stainless steel”. *Sadhana – Indian Academy of Sciences*. 36(6), 963-970.
- MICARONI, R., 2006. Influência do fluido de corte sob pressão no torneamento do aço ABNT 1045. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas.
- ROSA, G. C.; SOUZA, A. J., 2014. “Estudo comparativo das ferramentas alisadora e convencional através das forças e rugosidades resultantes do processo de torneamento de acabamento do aço inoxidável AISI 420C”. In: 8º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2014).
- SANTOS, D. V.; ABRÃO, A. M.; SANTOS, A. J. 2020. “Avaliação da usinabilidade do aço inoxidável supermartensítico na operação de torneamento”. *Matéria* (Rio de Janeiro),
- SANTOS, S. C.; SALES, W. F., 2007. “Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais”. São Paulo: Artliber Editora.
- SELVARAJ, D. P.; CHANDRAMOHAN, P.; MOHANRAJ, M. 2014. “Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method”. *Measurement*, v. 49, p. 205-215.
- SHAW, M. C., 2005. “Metal cutting principles”. 2 ed. New York: Oxford University Press.
- SIVAIAH, P. 2019. “Evaluation of hybrid textured tool performance under minimum quantity lubrication while turning of AISI 304 steel”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 41, n. 12, p. 571.
- SIVAIAH, P.; CHAKRADHAR, D. 2018. “Comparative evaluations of machining performance during turning of 17-4 PH stainless steel under cryogenic and wet machining condition”. *Machining Science and Technology*, v. 22, n. 1.
- SODAVADIA, K. P.; MAKWANA, A. H. 2014. “Experimental investigation on the performance of coconut oil based nano fluid as lubricants during turning of AISI 304 austenitic stainless steel”. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 4(1), 55-60.
- SOUSA, J. A. G.; SOUSA, M. N., 2012. “Análise da temperatura de usinagem no corte ortogonal de alumínio”. Simpósio do programa de pós-graduação em engenharia mecânica universidade federal de Uberlândia.
- TEKINER, Z.; YEŞİLYURT, S., 2004. “Investigation of the cutting parameters depending on process sound during turning of AISI 304 austenitic stainless steel”. *Materials & Design*, v. 25, n. 6, p. 507-513.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K., 2000. "Metal Cutting". Butterworth-Heinemann.
VOGEL, J. P.; NERY, W. S.; ARAUJO, A. C., 2013. "Estudo do efeito do avanço nas forças e no acabamento de um torneamento de aço superduplex". COBEF-Congresso Brasileiro de Engenharia de fabricação, Itatiaia.

RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

THE MACHINABILITY OF STAINLESS STEELS IN TURNING

Jorge Dayvison Celestino Duarte

Alexandre Mendes Abrão

Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901, Brasil

jorgecduarte1@gmail.com

abrao@ufmg.br

***Abstract.** The aim of this work is to present a survey on turning of stainless steels, examining the relevant machining parameters and their influence on the machinability of the main grades. The studies indicate greater adversities in turning the austenitic grade due to the properties of this class, such as thermal conductivity, strong tendency to work hardening and formation of long chips. Martensitic stainless steels present high hardness and tensile strength, thus promoting high cutting force, however, the increase in cutting speed resulted in a reduction in the turning force for all grades of stainless steels. The wear mechanism that showed greater relevance during the turning of austenitic and duplex stainless steels was attrition due to the presence of built-up edge. For the martensitic grade, deformation mechanism under compression was more relevant. The cutting temperature decreased with the use of different cutting fluids, thus helping to increase the life of the cutting tool.*

***Keywords:** Stainless steels, Machinability, Turning.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.