

ANÁLISE DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO ABNT 304L COM A UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTA DE METAL DURO REVESTIDO EM TiAlN+TiN

Alexandre Venturi^{1, 2}

Gil Magno Portal Chagas¹

Delcio Luis Demarchi¹

¹Instituto Federal de Santa Catarina, Rua dos Imigrantes, 445 – Rau, Jaraguá do Sul – SC

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000 – Cidade Industrial

alexandre.venturi92@gmail.com

gilchagas@ifsc.edu.br

delcio.demarchi@ifsc.edu.br

Resumo. Os aços inoxidáveis austeníticos possuem algumas características, como elevada resistência à corrosão e boa resistência mecânica. Estes aços são bastante utilizados em sistemas de geração de energias renováveis e em indústrias alimentícias. Entretanto, devido à sua elevada ductilidade e baixa condutividade térmica, é comum surgirem dificuldades no processo de usinagem, como adesão na ferramenta de corte, alto aquecimento na interface cavaco-ferramenta e formação de cavaco contínuo. Este trabalho apresenta um estudo do processo de torneamento do aço inoxidável austenítico ABNT 304L. Os ensaios foram realizados com uma ferramenta de metal duro revestida em multicamadas de TiAlN+TiN, aplicados por PVD em nanocamadas de até 50 nanômetros. Foram analisados os desgastes da ferramenta em diferentes velocidades de corte e de avanço, bem como as formas dos cavacos e as rugosidades superficiais das peças. Os resultados mostraram que a variação da velocidade de avanço não interferiu de forma significativa no desgaste da ferramenta; em contrapartida, quanto maior o avanço, maior a rugosidade superficial. Os menores desgastes de flanco ocorreram nas maiores velocidades de corte, indicando menor adesão do cavaco na ferramenta nessas condições. A ferramenta de corte utilizada mostrou-se eficaz, com pequeno desgaste e com geometria que favoreceu a quebra do cavaco.

Palavras-chave: Aço inoxidável. Torneamento. Usinagem. ABNT 304L. TiAlN.

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis estão cada vez mais presentes em sistemas de energias renováveis, cozinhas industriais, hospitais, indústrias alimentícias, bem como nos segmentos de cutelaria, em aparelhos domésticos, nas decorações de projetos de urbanização, nos equipamentos náuticos e na construção civil (Abinox, 2018). Os aços austeníticos representam entre 65% e 70% dentre todos os aços inoxidáveis utilizados (Grzesik, 2008). Estes aços são utilizados em diferentes áreas por oferecerem elevada resistência à corrosão, baixo custo de manutenção, serem resistentes à variação de temperatura e de um material totalmente reciclável (Abinox, 2018).

Apesar do seu grande uso, os aços inoxidáveis austeníticos são considerados de difícil usinagem (Shaw, 2005), uma vez que tendem a apresentar problemas como aderência na ferramenta, com formação de aresta postiça e desgaste, grande aquecimento, acabamento ruim, marcas de vibração na peça e problemas no controle de cavaco, tendendo à formação de emaranhados. Tais problemas estão diretamente relacionados às suas propriedades, como grande tenacidade e ductilidade, alto encruamento e baixa condutividade térmica (Stephenson, Agapiou, 2016; e Santos, Sales, 2007). A presença de Ni e Cr favorecem o endurecimento do material em temperaturas elevadas e podem causar problemas, como formação de desgaste de cratera, ativados pelos mecanismos de difusão e cisalhamento superficial (Santos, Sales, 2007).

Para minimizar os problemas de usinagem destes materiais, tem-se investido em geometrias de ferramentas que favorecem o processo de remoção e controle do cavaco e no desenvolvimento de revestimentos mais resistentes. O uso de uma ferramenta com um ângulo de saída positivo permite reduzir o encruamento no processo de formação do cavaco (Diniz, Marcondes, Coppini, 2014).

Uma ferramenta de metal duro comumente utilizada na usinagem de aços inoxidáveis possui um revestimento com três camadas (TiCN+Al₂O₃+TiN) pelo processo de deposição química a vapor (CVD). Segundo Sandvik (2021), a ferramenta com classe GC2025 (M25), com estas três camadas, é recomendada como escolha inicial para a usinagem desses aços. A primeira camada de TiCN proporciona uma adesão ao substrato da ferramenta. A segunda camada, de Al₂O₃, permite maior estabilidade química, baixa condutividade térmica, alta dureza a quente e resistência à oxidação. A

camada externa, de TiN, é utilizada para reduzir o atrito e a tendência de difusão com os aços (Diniz, Marcondes, Coppini, 2014).

Entretanto, novos progressos têm sido feitos no desenvolvimento de ferramentas de metal duro com coberturas, que permitem trabalhar com maiores exigências em relação às suas características térmicas, mecânicas e químicas. Dentre estas, as ferramentas com coberturas de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN), aplicadas em processo de deposição física a vapor (PVD), possibilitam a obtenção de coberturas mais finas e arestas de corte mais afiadas, que favorecem a usinagem de materiais dúcteis, como os aços inoxidáveis (Diniz, Marcondes, Coppini, 2014).

Lungu (2020) relata o avanço nas melhorias das propriedades das ferramentas de metal duro com aplicação de revestimento de TiAlN em nanocamadas. Moreno *et al.* (2010) apresentaram um estudo da utilização de ferramentas de metal duro revestidas com nanocamadas de TiAlN/TiN na usinagem de um aço AISI 4140 temperado. Os resultados mostraram melhor resistência ao desgaste quando comparados a ferramentas revestidas com camadas de TiCN+Al₂O₃+TiN. Segundo Bobzin (2017), as ferramentas com revestimento por PVD, aplicadas em nanocamadas, vêm ganhando espaço no mercado devido a sua grande eficiência, e o revestimento por TiAlN tem sido base de numerosos desenvolvimentos recentes. As camadas de TiAlN, quando oxidam, formam uma camada de óxido de alumínio (Al₂O₃) e aumentam a resistência à difusão e à oxidação, bem como a estabilidade térmica da ferramenta.

Considerando as dificuldades apresentadas na usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos e a necessidade de promover uma boa produtividade e redução do custo do processo, este trabalho tem o objetivo de avaliar a utilização de uma ferramenta de metal duro moderna com revestimento de TiAlN+TiN por processo de CVD aplicada em nanocamadas. Dessa forma, o estudo apresentado visa a avaliar o comportamento da ferramenta no torneamento de um aço inoxidável austenítico ABNT 304L, considerando aspectos como desgaste, acabamento e formação do cavaco.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

O material utilizado para os ensaios de usinagem foi o aço inoxidável austenítico ABNT 304L. A Tab. 1 apresenta a composição química nominal do material utilizado. A dureza do material foi medida com o durômetro Equilam EQTRB-250.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável austenítico 304L (ASM Handbook, 2005)

Composição %						
Cr	Ni	Mn	Si	S	C	P
19,0-20,0	8,0-12,0	0-2,0	0-1,0	0-0,03	0-0,03	0-0,045

O valor obtido no ensaio de dureza foi de 181 HB, que é um valor muito próximo da especificação do material, dada por 180 HB.

2.2. Ferramentas de corte

Para a realização do torneamento nos corpos de prova foi selecionada uma ferramenta de metal duro com revestimento tipo PVD, com TiAlN+TiN. Esta ferramenta é do tipo TNMG160408 TF, classe IC807, do fabricante Iscar. A Figura 1(a) mostra a ferramenta utilizada e a Fig. 1(b) a geometria da superfície de saída da ferramenta, com um ângulo de saída positivo de 13° seguido de um ângulo negativo para a quebra do cavaco. Segundo a Iscar (2021), esta geometria favorece a quebra do cavaco e reduz problemas de craterização.

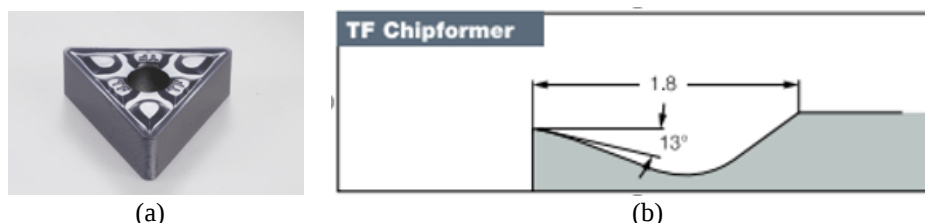


Figura 1. Ferramenta de corte (Iscar, 2021)

O revestimento da ferramenta é aplicado em nanocamadas de até 50 nanômetros, conforme apresentado na Fig. 2, classe que se enquadra no subgrupo M05-M20. A Figura 2(a) apresenta um detalhe do material-base da ferramenta e do revestimento e a figura 2(b) mostra uma ampliação das diversas nanocamadas de revestimento da ferramenta.

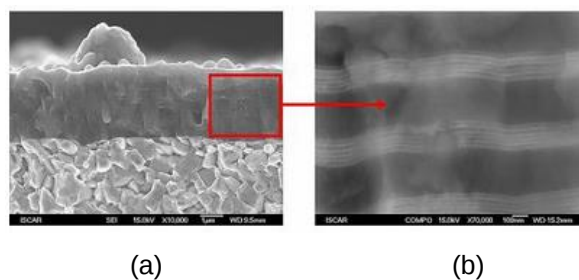


Figura 2. Nanocamadas da ferramenta classe IC807 (Iscar, 2021)

O fabricante indica, para esta ferramenta, a velocidade de corte de 100 a 200 m/min para os aços inoxidáveis austeníticos. Dessa forma, neste trabalho foram adotados valores dentro da faixa de velocidades recomendada.

2.3. Métodos

Para a usinagem dos corpos de prova foi utilizado o torno CNC ROMI GL 240. A usinagem foi com jorro de lubrificador semissintético Lub Kort do fabricante Ayvore, com diluição de 10%.

O número de ensaios e parâmetros de corte utilizados estão descritos na Tab. 2.

Para cada velocidade de corte foram utilizados três avanços diferentes, e para cada ensaio foi realizada uma réplica, dessa forma totalizando 18 ensaios. O tempo de corte foi fixado em dois minutos e meio para reduzir os custos dos ensaios. Apesar do tempo de corte ser relativamente baixo, é possível ter um indicativo do comportamento da ferramenta na usinagem.

Tabela 2. Parâmetros de corte

Número do ensaio	Velocidade de corte (v_c), em metros por minutos	Avanço (f), em milímetros por rotação	Profundidade de corte (a_p), em milímetros	Tempo de corte em minutos
1	100	0,18	1,5	2,5
2	100	0,24	1,5	2,5
3	100	0,3	1,5	2,5
4	150	0,18	1,5	2,5
5	150	0,24	1,5	2,5
6	150	0,3	1,5	2,5
7	200	0,18	1,5	2,5
8	200	0,24	1,5	2,5
9	200	0,3	1,5	2,5

Para a medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da marca TESA, modelo Rugosurf 20. O aparelho foi configurado conforme as orientações contidas em seu manual, de acordo com a norma ISO 3274, que indica, para uma rugosidade teórica, entre dois e dez microns um percurso de medição, *cut-off* de 2,5 milímetros e comprimento total (Lt) de 12,5 milímetros. Foram medidas a rugosidade Ra e rugosidade Rz.

Foram efetuadas medições de rugosidade em três diferentes pontos do diâmetro do corpo de prova, a partir de uma distância de 90 mm da face, conforme mostra a Fig. 3. Essas medições ocorreram após 2,5 minutos de usinagem, totalizando três medições de rugosidade por ensaio, e efetuando a média das medições.

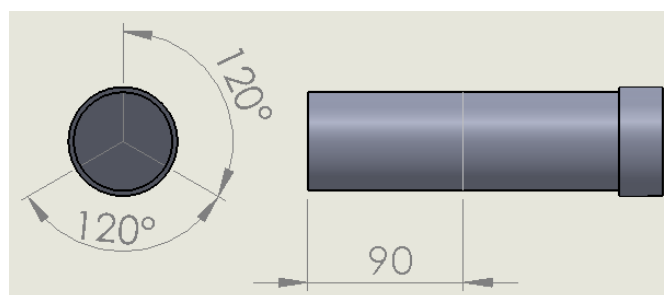


Figura 3. Posições das medições da rugosidade

Foi efetuada uma análise de variância (ANOVA) utilizando o *software* Minitab. O *software* foi alimentado com a média dos valores das rugosidades das duas repetições. Para cada ensaio, foram retiradas amostras de cavacos para analisar o seu formato. As amostras de cavacos geradas foram separadas para comparação.

Para a análise de desgaste do inserto, foi utilizado um Microscópio óptico KOZ-004 e o estereoscópio do fabricante Zeiss, modelo Stemi 2000-C, com uma câmera acoplada Axio Cam ER 5s e ampliação de 5x.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise das rugosidades

Optou-se por avaliar a rugosidade média (R_a) por ser o parâmetro mais utilizado na usinagem. Com os dados da rugosidade, foi efetuada a ANOVA (análise de variância), cujos resultados são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3 - ANOVA – 95% de Confiança

Fonte de Variação	g.l.	SQ	MQ	F	Valor-p
Avanço - f (mm/rot)	2	85,415	42,707	211,48	< 0,001
Velocidades de Corte - v_c (m/min)	2	0,373	0,187	0,92	0,404
Erro	49	9,895	0,202		
Total	53	95,684			

Conforme pode ser verificado na Tab. 3, o valor “p” para o avanço ficou inferior a 0,05. Este resultado indica com 95% de confiança que há diferenças significativas na rugosidade quando é alterado o avanço.

Pela análise da ANOVA, pode-se afirmar com 95% de confiança que nestes ensaios a velocidade de corte não interfere na rugosidade superficial da peça, pois o valor “p” ficou superior a 0,05.

A partir dos resultados, foi gerado o gráfico da relação entre a velocidade de corte e o avanço com a rugosidade apresentado na Fig. 3. Por meio dos intervalos de variação apresentados nesta figura, pode-se garantir que não há mudanças significativas na rugosidade quando se altera a velocidade de corte ensaiada (100-200 m/min). Tais resultados e as observações diretas indicam que provavelmente não ocorreu a formação de APC, nem problemas de vibração, que, segundo Machado *et al.* (2015), influenciam diretamente na rugosidade superficial.

Ao analisar os intervalos de variação apresentados na Figura 3, é visível que o avanço interfere na rugosidade. Esses resultados estão de acordo com os autores Machado *et al.* (2015) e Diniz, Marcondes e Coppini (2014), que afirmam que quanto maior é o avanço, maior é a rugosidade superficial da peça.

Por outro lado, é possível observar, na Fig. 4, que não há variação significativa da rugosidade com a velocidade de corte para um mesmo valor de avanço.

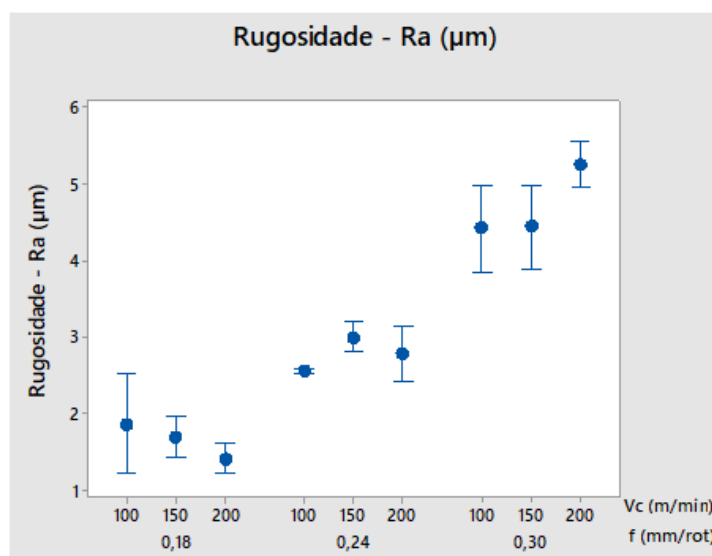


Figura 4. Relação entre velocidade de corte e avanço com a rugosidade

3.2. Análise de desgaste da ferramenta

A ferramenta apresentou uma boa integridade, com ausência de desgaste de cratera visível nas condições testadas. Os valores das medições dos desgastes de flanco de cada aresta foram analisados, de modo a comparar a velocidade de corte com o desgaste da ferramenta. Esta comparação pode ser observada na Fig. 5, que permite analisar a influência da velocidade de corte no desgaste supracitado.

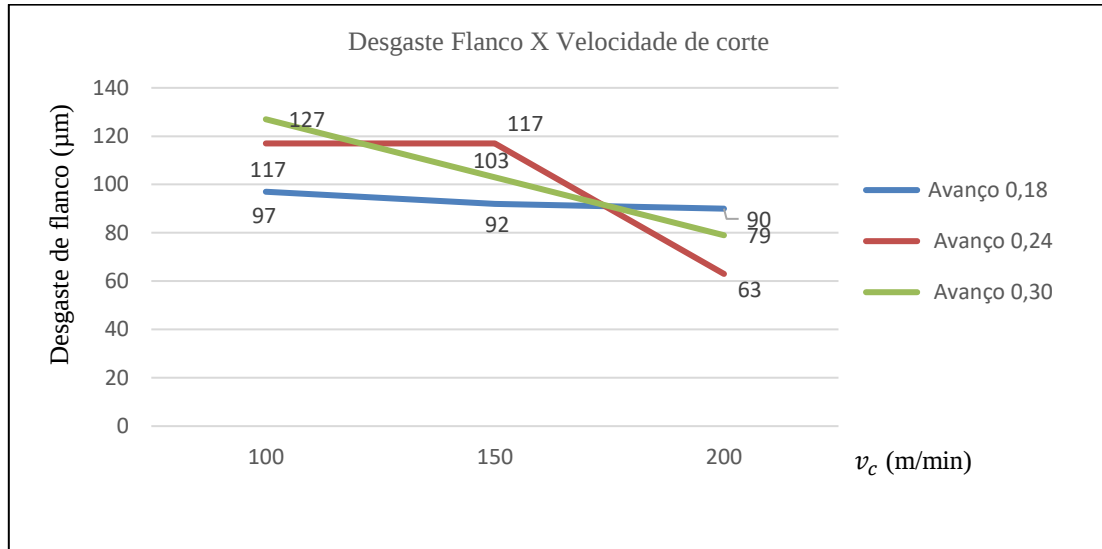


Figura 5. Desgaste de flanco com a velocidade de corte

Os resultados mostram uma redução de desgaste com o aumento da velocidade de corte para os três avanços avaliados. Este resultado é diferente do apresentado por Kulkarni, Joshi e Sargade (2013), que obtiveram um aumento no desgaste quando a velocidade de corte foi aumentada. Entretanto, os autores realizaram usinagem do aço AISI 304 a seco, que pode aumentar a temperatura de corte e o desgaste em velocidades maiores.

Possíveis explicações para a redução do desgaste entre as velocidades de 100 a 200 m/min neste trabalho é que, em velocidades menores, a ferramenta fica maior tempo em contato com o cavaco que está sendo formado e tem-se uma predominância dos mecanismos de adesão e abrasão na ferramenta, o que reduz sua resistência ao desgaste (Korkut *et al.* 2004). Para velocidades maiores, como 200 m/min, tem-se uma menor adesão e a ocorrência de outros mecanismos de desgaste, como a oxidação e a difusão, além da abrasão. Desta forma, o revestimento da ferramenta proporcionou uma boa resistência nestas condições. Os valores aqui obtidos estão coerentes com o trabalho de Mahdaviinejad e Saeedy (2011), que mostra uma redução no desgaste na ferramenta ao usinar o aço 304 com o aumento da velocidade de corte de 100 m/min para 180 m/min, e um aumento do desgaste entre as velocidades de 180 a 200 m/min.

Os resultados obtidos neste trabalho não permitem afirmar qual é o efeito do aumento do avanço no desgaste da ferramenta. Os valores do desgaste para o avanço de 0,18 mm/rot e 0,3 mm/rot ficaram aproximadamente constantes, nas velocidades de corte de 150 e 200 m/min. Por outro lado, houve um aumento do desgaste com o avanço para uma velocidade de corte de 100 m/min. Esses resultados mostram um pequeno efeito do avanço no desgaste da ferramenta e estão de acordo com a afirmação de Machado *et al.* (2015), de que o avanço não é o maior causador do desgaste da ferramenta, mas sim a velocidade de corte.

3.3. Análise dos cavacos

Os cavacos gerados no processo de torneamento para cada velocidade de corte e avanço testados foram separados para comparação e são apresentados na Fig. 6. A geometria da superfície de saída da ferramenta, com ângulo positivo de 13°, seguido de ângulo negativo, facilitou a quebra dos cavacos.

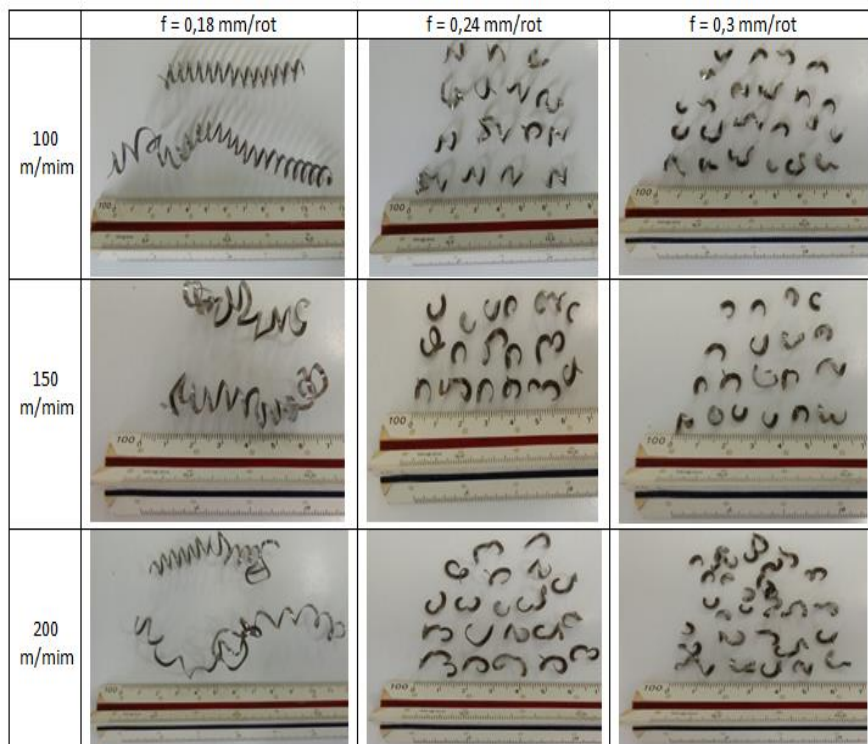


Figura 6. Amostra dos cavacos

Como pode ser verificado, com a utilização do avanço de 0,18 mm/rot a forma dos cavacos é helicoidal arruela, curto e longo. Com a velocidade de corte de 150 e 200 m/min, além da forma helicoidal arruela, os cavacos também tiveram a tendência de formar um pequeno emaranhado. Esse resultado está de acordo com Machado *et al.* (2015), que afirmam que o cavaco tende a ser em forma de fita para baixos avanços e de pequenos arcos para avanços maiores.

À medida que o avanço é aumentado, os cavacos tendem a quebrar mais facilmente. Segundo Machado *et al.* (2015) e Santos e Sales (2007), esta é uma das formas utilizadas para o controle do cavaco de materiais mais dúcteis, como o aço inoxidável austenítico 304L. Para os avanços de 0,24 e 0,3 mm/rot, os cavacos tiveram a forma de arco conectado e solto.

A Fig. 7 mostra, de forma perceptível, a formação dos cavacos do tipo segmentado, que é característico dos aços inoxidáveis.



Figura 7. Cavacos segmentados

Os resultados obtidos mostram que, apesar das obras apresentadas na bibliografia relatarem certa dificuldade na usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos, a ferramenta de corte utilizada neste trabalho mostrou-se eficaz, dentro das condições avaliadas. O desgaste verificado foi bastante reduzido e o formato da geometria da ferramenta favoreceu a formação e quebra do cavaco. Dessa forma, esta ferramenta pode ser uma alternativa para o processo de torneamento dos aços inoxidáveis austeníticos. Para isso, deve ser feita uma avaliação da sua viabilidade econômica durante o processo.

4. CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados obtidos, a fim de avaliar o processo de torneamento do aço inoxidável austenítico ABNT 304L, pode-se concluir que:

- a) A ferramenta de corte testada apresentou uma boa eficiência nas condições avaliadas, com ausência de problemas como desgaste acentuado, dificuldade de controle do cavaco e vibrações.
- b) O revestimento de TiAlN+TiN da ferramenta teve um bom desempenho na análise realizada, pois resistiu ao teste sem apresentar desgaste de flanco acentuado.
- c) Os resultados apresentaram uma redução no desgaste com o aumento da velocidade de corte dentro da faixa avaliada.
- d) Os valores de rugosidade obtidos foram dentro do esperado para condições normais de trabalho e o parâmetro de corte que mais influenciou foi o avanço. Quanto maior o avanço, maior tende a ser a rugosidade da peça.
- e) A forma do cavaco mais favorável encontrada foi do tipo arco conectado, com os avanços de 0,24 e 0,3 mm/rot. Para o menor avanço, de 0,18mm/rot., foi obtido um cavaco do tipo helicoidal, com tendência à formação de emaranhados, conforme relatado pela bibliografia.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul – Rau, pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho, e à WIFER, pelo fornecimento das ferramentas de metal duro.

6. REFERÊNCIAS

- Abinox (Brasil) 2018. “O aço inoxidável e sua importância na indústria”. 10 jan. 2021 <www.abinox.org.br/site/agenda-inox-noticias-detalhes.php?cod=5815&q=O+a%25C3%25A7o+inoxid%25C3%25A1vel+e+sua+import%25C3%25A2ncia+na+ind%25C3%25BAstria>.
- ASM Handbook. AMERICAN SOCIETY FOR METALS. 2005. *Properties and selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*. 10. ed, v.1, 1618p.
- Bobzin, K., 2017. “High-performance coatings for cutting tools”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 18, p. 1–9.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C. e Coppini, N. L., 2014. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. Artliber, São Paulo, 9ª edição. 270 p.
- Grzesic, W., 2008. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications*. [s.l.]: Elsevier, 478 p.
- ISCAR. “Torneamento ISO: principais aplicações”. 28 fev. 2021 <<https://www.iscar.com/eCatalog/MoreInfo.aspx?mapp=IS&fnum=448&app=0&item=5504912&isoD=-1>>.
- Korkut, Ihsan *et al.*, 2004. “Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel”. *Materials & Design*, [S.L.], v. 25, n. 4, p. 303-305, jun. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2003.10.011>.
- Kulkarni, Atul P., Joshi, G. G. e Sargade, V. G., 2013. “Dry Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Using AlTiCrN Coated Insert Produced by HPPMS Technique”. *Procedia Engineering*, v. 64, p.737-746, Elsevier BV.
- Lungu, M. V., 2020. “An Insight into TiN, TiAlN and AlTiN Hard Coatings for Cutting Tools”. *Material Science Research India*, v. 17, n. 2, p. 87–89.
- Machado, A. R., Abrão, A. M, Coelho, R. T. e Silva, M. B., 2015. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Blucher, São Paulo, 2ª edição. 397 p.
- Mahdavinejad, R. A., Saeedy, S., 2011. “Investigation of the influential parameters of machining of AISI 304 stainless steel”. *Sādhanā*, v. 36, p. 963-970.
- Moreno, L. H. *et al.*, 2010. “Wear evaluation of WC inserts coated with TiN/TiAlN multilayers”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 32, n. 2, p. 114–118.
- SANDVIK. Pastilhas e classes para torneamento de aços inoxidáveis. 06 fev. 2021 <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/turning-inserts-grades-stainless-steel/pages/default.aspx>>.
- Santos, S. C., Sales, W. F., 2008. *Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais*. Artliber, São Paulo, 246 p.
- Shaw, M. C., 2004. *Metal Cutting Principles*. OUP, New York, 2ª edição.
- Stephenson, D. A., Agapiou, J. S., 2016. *Metal Cutting Theory and Practice*. CRC Press, 3ª edição.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

Analysis of the turning processes of austenitic stainless steel ABNT 304 L using a carbide tool coated with TiAlN+TiN

Alexandre Venturi^{1,2}

Gil Magno Portal Chagas¹

Delcio Luis Demarchi¹

¹Instituto Federal de Santa Catarina, Rua dos Imigrantes, 445 – Rau, Jaraguá do Sul – SC

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000 – Cidade Industrial

alexandre.venturi92@gmail.com

gilchagas@ifsc.edu.br

delcio.demarchi@ifsc.edu.br

Abstract. Austenitic stainless steels have characteristics such as high resistance to corrosion and good mechanical resistance. These steels are widely used in renewable energy generation systems and in the food industries. However, due to its high ductility and low thermal conductivity, difficulties in the machining process are common, such as adhesion on the cutting tool, high heating at the chip tool interface and continuous chip formation. This work presents a study of the turning process of ABNT 304L austenitic stainless steel. The tests were carried out with a carbide tool coated in multilayer TiAlN + TiN, applied by PVD in nanolayers up to 50 nanometers. Tool wear at different cutting and feed speeds, as well as chip shapes and surface roughness of parts were analyzed. The results showed that the variation of the feed speed did not significantly interfere in the tool wear, on the other hand, the greater the feed, the greater the surface roughness. The lowest flank wear occurred at the highest cutting speeds, indicating less chip adhesion to the tool under these conditions. The cutting tool used proved to be effective, with little wear and geometry shape that favored chip breaking.

Keywords: Austenitic Stainless steel, turning, machining, ABNT 304L, TiAlN.

RESPONSIBILITY NOTICE

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