ANÁLISE DO CAVACO E DA SUPERFÍCIE USINADA POR TORNEAMENTO EXTERNO DE ACABAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO 304L

Costa, C. E.[1] – **carlos.c@uninter.com**

Polli, M.L.[2] – polli@utfpr.edu.br

Imbrunisio, E[3] – edilson@evo.info.br

Staff, M.[4] – marcelo.st@uninter.com

[1; 3 e 4] Centro Universitário Uninter, Escola Superior Politécnica, Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica, Av. Luiz Xavier, 103 – Centro, Curitiba – PR, 80020
[2] Universidade Tecnológica federal do Paraná, Departamento de Mecânica – UTFPR, R. Deputado Heitor Alencar Furtado, 500 – Cidade Industrial de Curitiba, Curitiba – PR, 81280-340

Áreas: MMe **–** Materiais metálicos; Temas Mcc **–** Materiais para construção civil e mecânica; Subtemas: 44 Usinagem

Resumo: Estima-se que 30% do volume dos aços produzidos, são transformados em cavaco, sendo que a geração e escoamento deste favorece ou dificulta o grau de rugosidade da superfície usinada, com ação direta sobre a vida da ferramenta, especialmente em materiais de baixa usinabilidade. Para o desenvolvimento, deste trabalho usinou-se o aço inoxidável austenítico 304L, em operação de torneamento de acabamento sob jorro abundante de lubrerefrigeração. Após a usinagem, analisou-se as superfícies geradas, o cavaco obtido (por meio do grau de recalque) e os desgastes de ferramenta e adesão de materiais, por meio de rugosímetro digital e microscópio eletrônico de varredura (MEV). Como principais conclusões, destaca-se uma relação direta da vida da ferramenta, com o número de peças e a espessura do cavaco gerado (maior grau de recalque); crescimento da rugosidade, em função do comprimento usinado, causado pelos desgastes e adesão de materiais da peça sobre as superfícies da ferramenta e arestas de corte.

Palavras-chave: Usinagem aço inoxidável; vida da ferramenta; rugosidade superficial; grau de recalque.

INTRODUÇÃO

A usinagem, é o processo de fabricação mais utilizado no meio metalmecânico visto a variedade de possibilidades, quanto a operações e grau de acabamento possíveis, ela se caracteriza pela remoção de material por uma ferramenta cortante com maior dureza e resistência que a peça (MACHADO *et al.*, 2015). Estima-se que 30% do volume dos aços produzidos, são transformados em cavaco sendo que grande parte não é reutilizado, sendo apenas oneroso ao processo. Os cavacos são pequenas lascas de materiais tendo por característica principal a forma irregular, (FERRARESI, *et al.* 2017) resultado da dinâmica do processo (parâmetros de usinagem – velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, além das propriedades do material). Além destas influências, outras também contribuem para a formação do cavaco, como a rigidez do sistema (máquina, peça e ferramenta) e a pressão e volume do sistema de lubrirefrigeração. As situações acima citadas, dependendo de adequações, contribuem ou não, para a remoção do cavaco, qualidade ou rugosidade da superfície usinada, assim como com a vida da ferramenta. Quanto ao acabamento superficial, teoricamente a rugosidade obtida no torneamento pode ser calculada meio da equação (1) (SANDVIK, 2012).

Equação 1: Rugosidade teórica

$$R_a = \frac{f^2}{18 \cdot \sqrt{3} \cdot r_\varepsilon} \qquad (1)$$

Sendo:

R_a (µm): Rugosidade da superfície acabada; f (mm/rot): Avanço por rotação;
$r\varepsilon$ (mm): Raio de ponta do inserto

Uma vez em contato, ferramenta e peça, durante a usinagem, iniciam-se os mecanismos de desgastes sendo que estes normalmente estão vinculados ao grau de usinabilidade do material e parâmetros empregados (EZUGWU e OKEKE, 2001). Estes desgastes são os principais determinantes da qualidade da peça. A prática tem mostrado, ser o aço inoxidável austenítico, um material de baixa usinabilidade devido principalmente à sua constituição (cromo, níquel, manganês e baixo teor de carbono) (COSTA e POLLI, 2021). Os austeníticos

representam mais de 70% da produção de aço inoxidável mundial (PAYLING, 2016). As propriedades físico-químicas destes aços explicam a tendência de formar nas ferramentas de corte uma aresta postiça quando sofrem processos de usinagem, devido ao encruamento do material de alta resistência que se opõe ao avanço da ferramenta (AKASAWA *et al.* 2003).

Este trabalho investiga o torneamento de acabamento do aço inoxidável austenítico 304L, sob jorro abundante de lubrerefrigeração. São considerados aspectos como a qualidade das superfícies geradas, o cavaco obtido (por meio do grau de recalque) e os desgastes de ferramenta e adesão de materiais, por meio de rugosímetro digital e microscópio eletrônico de varredura (MEV).

MATERIAIS E METÓDOS EXPERIMENTAIS

A metodologia deste trabalho foi baseada no desenvolvimento experimental de ensaios sistemáticos partindo de indicações de catálogo e situações utilizadas no meio industrial. Os ensaios foram realizados em empresa metalúrgica localizada no Hauer cidade de Curitiba. Para os experimentos utilizou-se a mesma máquina-ferramenta, classe de ferramenta, material do mesmo lote de fabricação e parâmetros de usinagem.

Os experimentos foram realizados em um torno CNC ROMI Centur 30D comando Siemens com a rotação máxima de 4000 rpm. A ferramenta utilizada para a usinagem, é característica para o acabamento, pertencente à Classe M com revestimento PVD, classe GC 1020. Os parâmetros de usinagem empregados são característicos de operação de acabamento, conforme indicados na sequência: V_c = 150 m/min; n = 1800 rpm; f= 0,05 mm/rot; a_p= 0,5 mm. Os ensaios foram realizados com o emprego de meio lubrirefrigerante.

O material usinado foi o aço Inoxidável Austenítico 304L. Sua composição química e propriedades mecânicas encontram-se nas tabelas 1 e 2, sendo que a caracterização do material está de acordo com a norma ASTM A276/16. Os corpos de prova eram cilíndricos com diâmetro 16 mm e comprimento 200 mm, tendo sido usinado 180 mm, e o sistema de fixação placa e contraponto.

Tabela 1: Composição química

C	Cr	Mn	Mo	N	Ni	P	S	Si	Fe
0.024	18.25	1.570	0.500	0.085	8.040	0.037	0.028	0.280	bal.

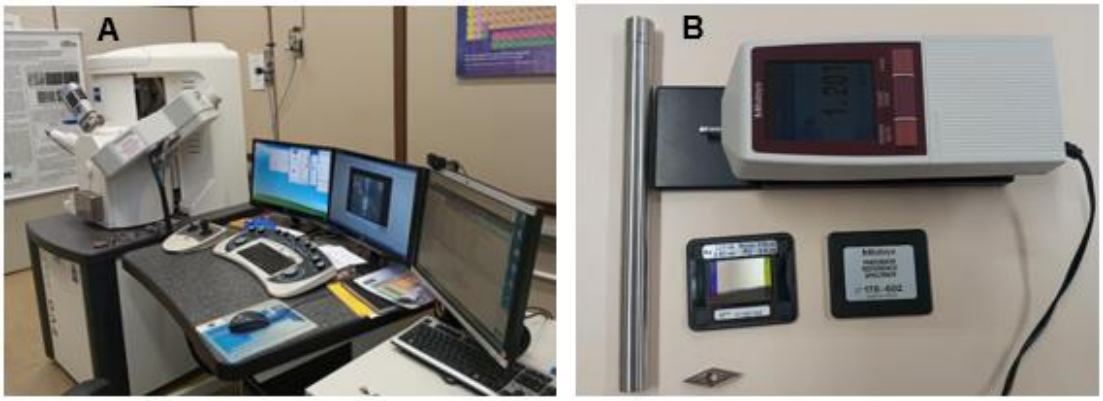
Fonte: COSTA e POLLI (2021).

Tabela 2: Propriedades mecânicas

Característica	Valores
Dureza	218 HB
Limite de escoamento	629 MPa
Limite de resistência	737 MPa
Alongamento	42 %

Durante o processo de usinagem, paradas estratégicas foram realizadas, para a tomada de cavacos, troca do corpo de prova e ferramenta, para posterior análise. As Figuras 1 A e B ilustram os ambientes utilizados nesta etapa dos experimentos. Para análises detalhadas e a caracterização qualitativa superficial da peça, desgastes na ferramenta e morfologia do cavaco amostras foram preparadas e imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise química por Difratômetro de raios-X (DRX), modelo EVO MA 15 FABRICADO PELA Zeiss, equipamento disponível no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR e Rugosímetro Digital: Surftest SJ-210 – 178-561-12ª, disponível no laboratório de metrologia da UNINTER.

Figura 1: Em A – aquisição das imagens, e em B verificação da rugosidade



Fonte: Autoria própria (2024).

O desgaste de flanco médio (VB) de 0,3 mm é geralmente considerado como o critério de vida da ferramenta de acordo com a Norma ISO 3685. Porém para usinagem em operação de acabamento, normalmente valor menor é

considerado para evitar o comprometimento da qualidade da superfície usinada. Neste trabalho foi considerado como limite R_a = 2,5 µm.

Durante a operação de usinagem, a cada passada o processo era interrompido e coletados os cavacos. Posteriormente estes cavacos tiveram a medição da espessura utilizando-se micrômetro digital para o cálculo do grau de recalque (*Rc*) por meio da equação (2). Uma média de cinco medidas para cada conjunto de cavaco foi realizado.

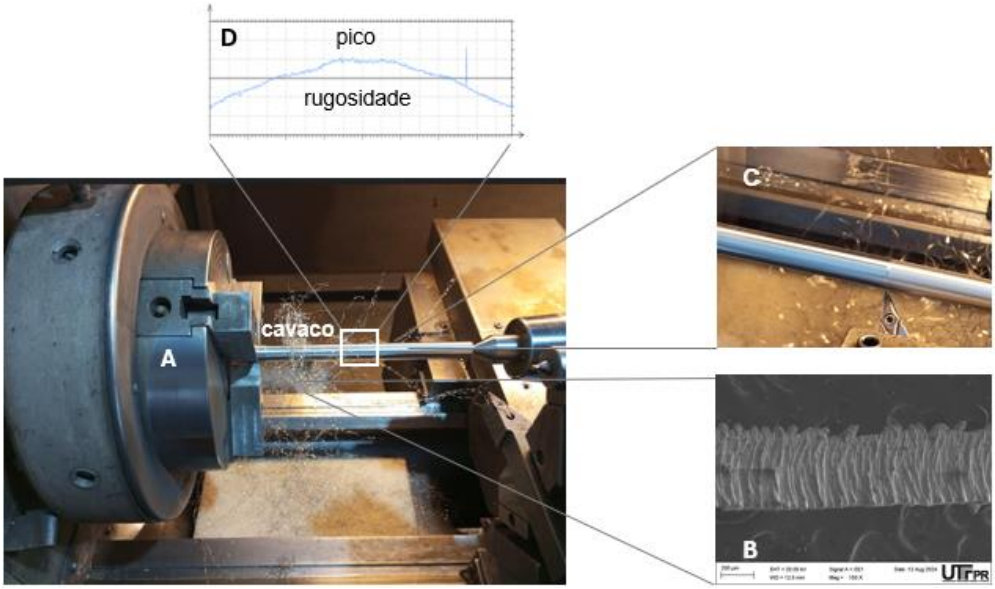
$$Rc = \frac{h'}{h} \qquad (2)$$

Sendo *h* = espessura de corte; *h'* = espessura do cavaco

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2, ilustra detalhes do ambiente de usinagem. Em A, a visão geral do mesmo, mostrando o sistema de fixação da peça. Em C detalhe da ferramenta durante início do processo, em B o cavaco gerado, e em D detalhe do perfil obtido pelo rugosímetro (*cutoff* = 0,25 µm; L = 4 mm). Nota-se que o pico do gráfico, coincide com a parte central da peça usinada. O fato indica, que além dos desgastes da ferramenta, adesão de materiais, riscos provocados pela passagem dos cavacos emaranhados, também pode-se sugerir que houve vibração da peça, ou possível deslocamento da peça, devido a esbeltez da mesma e distância entre os pontos de fixação (placa e contraponto). Salienta-se ainda, que o torneamento de acabamento é a operação final, sendo em alguns casos a única operação, cujas prioridades são a qualidade final da superfície e as tolerâncias dimensionais da peça. Quanto ao cavaco verifica-se a formação de perfil rugoso e serrilhado da borda na sua morfologia microscópica, observando considerável volume de cavaco emaranhado principalmente próximo ao final do mesmo passe, agindo contrário ao bom acabamento superficial. A situação quando comparada aos desgastes da ferramenta, indicaram o fim da vida da mesma.

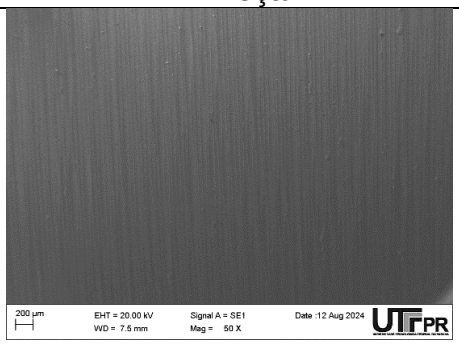
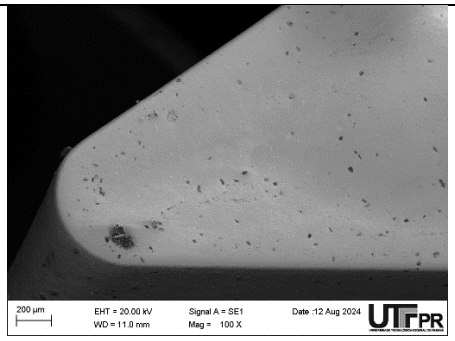
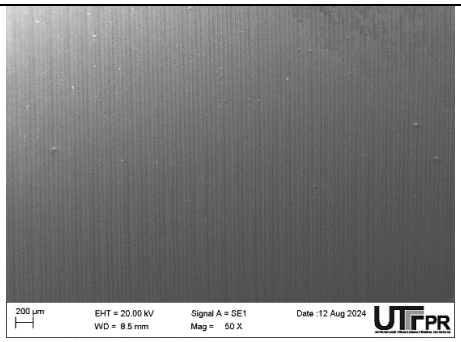
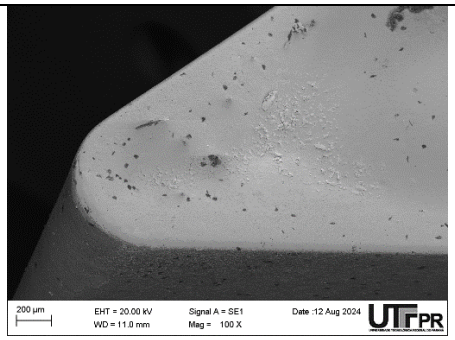
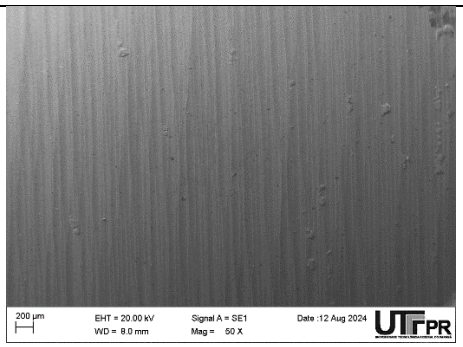
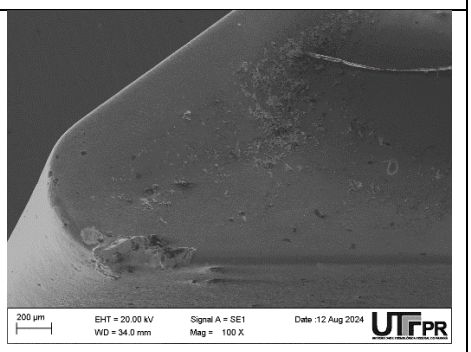
Figura 2: Ambiente e resultados da usinagem



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 3, mostra imagens da ferramenta e das respectivas superfícies geradas em diferentes estágios ao longo da usinagem das peças, tendo sido considerados os estágios inicial, intermediário e final. Para o estágio inicial, foram usinadas 4 peças com a mesma aresta de corte, neste caso praticamente não houve desgaste da ferramenta. Sendo, portanto, a rugosidade, resultante apenas dos parâmetros empregados e possíveis contatos do cavaco com a superfície já usinada. O estágio intermediário iniciou com a usinagem de 8 peças, com a mesma aresta de corte. Neste caso, pequeno desgaste de flanco e na ponta da ferramenta foram observados, além de adesões, situações que provocaram maior rugosidade quando comparada ao estágio inicial. O estágio final foi considerado depois de 13 peças usinadas pela aresta de corte. Quando da última peça, maior rugosidade foi verificada, causada pelo desgaste da ferramenta que se encontrava em estágio de fim de vida. Observa-se que a superfície gerada nesta condição apresenta mais irregularidades quando compara a superfície do estágio inicial.

Figura 3: Acabamento superficial e desgastes da ferramenta em função dos estágios inicial, intermediário e final

Estágio	Peça	Ferramenta
Inicial		
Intermediário		
Final		

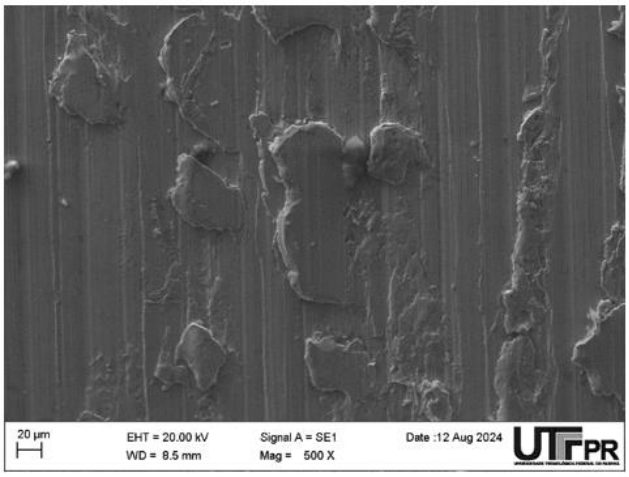
Fonte: Autoria própria (2024).

A qualidade superficial influencia diretamente sobre a vida da peça usinada, pois quanto maior a rugosidade, maior será a possibilidade de concentração de tensões sobre a superfície, abrindo caminho para fissuras e propagação de trincas, podendo culminar com a fratura da peça. Deste modo, deve-se sempre buscar atender aos requisitos de acabamento, de acordo com a necessidade da aplicação da peça.

A Figura 4, ilustra detalhe da superfície da décima terceira peça usinada, ou seja, após atingido o fim de vida considerado para o acabamento desejado, que foi considerado, portanto, na décima segunda peça. Importante salientar que o desgaste de flanco da ferramenta, apesar de dominante, não foi o único causador do acabamento deteriorado. Na figura, verificam-se linhas paralelas

características do processo de torneamento e partículas deformadas e aderidas, resultantes de micropartículas soltas e pressionadas entre peça e ferramenta durante o processo.

Figura 4: Superfície última peça



Fonte: Autoria própria (2024).

A Tabela 5, apresentam valores de rugosidade obtidos por meio do rugosímetro digital. Por meio de análise aos dos valores anotados, verifica-se coerência quanto ao grau de acabamento, quando confrontado com a superfície obtida através do MEV (microscópio eletrônico de varredura) considerando os mesmos estágios de vida da ferramenta. O crescimento da rugosidade ocorreu a cada peça usinada, mas não de forma linear.

Tabela 5: Valores da rugosidade obtida por meio de rugosímetro digital de contato

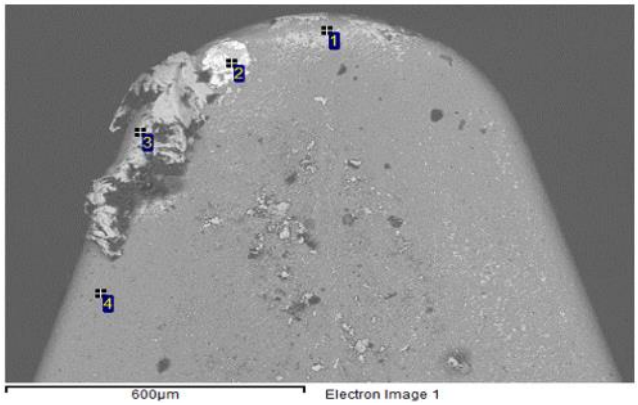
Estágio	**Peça Número**	
Inicial	Peça 1	0,3
	Peça 4	0,7
Intermediário	Peça 5	1,9
	Peça 8	2,1
Final	Peça 12	2,4
	Peça 13	2,8

Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 6, ilustra a ferramenta em estágio de fim de vida após a usinagem da décima terceira peça. Através da análise EDS observa-se que o Ponto 1 apresenta material do substrato da ferramenta Co (25,49%) sendo sobreposto

pelos materiais da peça destacando o Mn (30,29%) o Ni (16,53%) e o Cr (11,28%). O Ponto 2 se destacou com a adesão do Ni (59,25%) o Cr (15,86%) e o N (7,79%). Sob o Ponto 3, se sobressaiu a adesão do N (59,43%) o Cr (16,25%) e o Ni (11,59%). Já no Ponto 4, se destacaram os materiais da ferramenta Co (38,43%) e a Al (20,08%), sendo também neste caso verificado a adesão de materiais da peça destacando o Cr (22,4%). Diante do exposto verifica-se o desgaste na região do raio de ponta da ferramenta culminando com a sobreposição de materiais da peça.

Figura 6: Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para última peça



Fonte: Autoria própria (2024).

A Tabela 4 apresenta os valores do grau de recalque de usinagem para algumas peças usinadas. Por meio da Tabela observa-se que os valores do grau de recalque cresceram em função do número de peças usinadas. O crescimento do Grau de Recalque, está relacionado a maior dificuldade na formação do cavaco devido à adesão de materiais, desgastes na ferramenta e o encruamento natural do aço inoxidável austenítico quando sujeito ao processo de usinagem.

Tabela 4: Grau de recalque para cada passe de usinagem

Estágio	Peça Número	Grau de Recalque
Inicial	Peça 1	0,41
	Peça 4	1,22
Intermediário	Peça 5	1.37
	Peça 8	1,88
Final	Peça 12	1,93
	Peça 13	2,47

Fonte: Autoria própria (2024).

CONCLUSÕES

Durante o torneamento do aço inoxidável 304 L em operação de acabamento, sob jorro abundante de fluido lubrirefrigerante, foram gerados cavacos abrasivos, encruados e contínuos. Com o aumento do desgaste da ferramenta, o cavaco muitas vezes enroscava-se sobre a peça, situação adversa à qualidade da superfície usinada.

Além do desgaste da ferramenta, houve aderência de materiais da peça sobre a sua superfície. Somando-se a estes fatores, micropartículas entre ferramenta e peça dificultaram o fluxo do cavaco, influenciando sobremodo o grau de recalque do cavaco, e também provocaram aumento da rugosidade da peça.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais – CMCM da UTFPR - Curitiba, por possibilitar a captação das imagens por meio do MEV.

Ao Centro Universitário UNINTER – Curitiba, através do Grupo de Pesquisa da Escola Superior Politécnica, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

AKASAWA, T.; SAKURAI, H.; NAKAMURA, M.; TANAKA, T.; TAKANO, K. Effect of free-cutting additives on the machinability of austenitic stainless steel, **Journal of Materials Processing**, Technology, p. 143–144, 2003; (https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00321-2)

COSTA, C. E., POLLI, M. L. **Effects of the infeed method on thread turning of AISI 304L stainless steel,** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43, 253 (2021); https://doi.org/10.1007/s40430-021-02978-7

EZUGWU, E. O.; OKEKE, C. I. **Tool life and wear of TiN coated tools in the intermittent cutting operation**, Journal of Materials Processing Tecnhology 116 (2001) 10 – 15.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**, São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 2017.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T. e DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais,** São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 2011

PAYLING, R.: **Considerações sobre a usinagem do aço inoxidável**, Artigos Técnicos, http://www.usinagem-brasil.com.br/10562-consideracoes-sobre-a-usinagem-de-acos-inoxidaveis/, Usinagem Brasil, Acesso em 21/06/2024, 20:30.

SANDVIK: **Manual Técnico de Usinagem**. Sandvik Coromant, São Paulo, 2012.

ANALYSIS OF CHIPS AND SURFACE MACHINED BY EXTERNAL FINISHING TURNING OF 304L AUSTENITIC STAINLESS STEEL

Abstract: It is estimated that 30% of the volume of steel produced is transformed into chips, and the generation and flow of these chips favors or hinders the surface roughness of the machined surface, with a direct effect on the tool life, especially in materials with low machinability. For the development of this work, austenitic stainless steel 304L was machined in a finishing turning operation under flood cooling. After machining, the generated surfaces, the chips obtained and the tool wear and adhesion of materials were analyzed by means of a digital roughness meter and scanning electron microscope (SEM). The main conclusions include a direct relationship between tool life and the number of parts and the thickness of the chip generated; and an increase surface in roughness, as a function of the machined length, caused by wear and adhesion of materials from the part on the tool surfaces and cutting edges.

Keywords: Machining stainless steel; tool life; surface roughness; degree of settlement.