

Influência dos Parâmetros de Usinagem na Rugosidade Superficial e no Perfil de Dureza do Aço AISI 316 L Submetido a Processo de Torneamento

Influence of Machining Parameters on the Surface Roughness and the Hardness Profile of AISI 316 L Steel Submitted to the Turning Process

Paulo Roberto Hoffmann^{*a}; Fernando Michelon Marques^a; Alexandre da Silva Rocha^b; Ariel Teixeira^a

^aInstituto Federal de Santa Catarina. SC, Brasil

^bUniversidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil

*E-mail: paulo.hoffmann@ifsc.edu.br

Resumo

A utilização de materiais resistentes a corrosão, e em substituição a materiais agredidos por agentes corrosivos, vem tomando proporções mundiais no setor industrial, alimentício e offshore, desde que estes possuam as mesmas características mecânicas dos materiais substituídos. O objetivo deste trabalho é abordar as relações existentes entre parâmetros de usinagem, geometria de ferramentas com a integridade superficial do aço inoxidável AISI 316L no processo de torneamento. Os testes realizados em torno CNC usando variações nos parâmetros de velocidade de corte e avanço da ferramenta. Enquanto no que diz respeito as ferramentas, foram variadas as dimensões dos raios de ponta dos inserts intercambiáveis, bem como a ausência de qualquer agente lubrificante. Onde, para cada condição foi realizada a medição da rugosidade média e a dureza do núcleo da amostra usinada e sua superfície, fazendo, posteriormente o comparativo dos testes. Foi verificado que o raio de ponta da ferramenta e o avanço tem uma maior influência na rugosidade superficial, enquanto a velocidade de corte não apresentou uma influência significativa. Os resultados também indicam que há uma variação de dureza da superfície usinada em relação ao núcleo das amostras, entretanto, cada condição indica diferentes valores de dureza, o que demonstra que a variação dos parâmetros de corte também altera a integridade superficial de peças submetidas ao processo de usinagem.

Palavras-chave: Parâmetros de Usinagem. Torneamento. Acabamento. Rugosidade. Aço AISI 316 L

Abstract

The use of materials resistant to corrosion, and in substitution of materials attacked by corrosive agents, has been taking on worldwide proportions in the industrial, food and offshore sectors, as long as these have the same mechanical characteristics as the replaced materials. The aim of this paper is to address the existing relations between machining parameters, tool geometry and the surface integrity of AISI 316 L stainless steel in the turning process. The tests performed on the CNC lathe using variations in the cutting speed and tool feed parameters. While with regard to the tools, the dimensions of the tip radius of the interchangeable inserts were varied, as well as the absence of any lubricant coolant. Where, for each condition, the measurement of the average roughness of the core of the machined sample and its surface was performed, subsequently making the comparison of the tests. It was verified that the tool tip radius and the feed have a greater influence on the surface roughness, while the cutting speed did not have a significant influence. The results also indicate that there is a variation in the hardness of the machined surface in relation to the core of the samples, however, each condition indicates different values of hardness, which shows that the variation in cutting parameters also changes the surface integrity of parts submitted to the machining process.

Keywords: Machining parameters. Turning. Finish. Roughness. AISI 316 L steel.

1 Introdução

Desde que os aços começaram a ser fabricados e empregados em equipamentos, inúmeros meios de impedir ou retardar a corrosão têm sido amplamente empregados. Métodos como pintura ou cobertura com outros materiais têm ajudado na inibição da corrosão em ambientes a que estes materiais estão sujeitos, entretanto, estas soluções possuem um tempo de vida reduzido (SOUZA et al., 2016). A combinação de elementos de liga ao aço transformou-se então numa escolha assertiva ao processo de prevenção da corrosão, pois possibilita proteção não só na camada externa, como também em toda a seção do aço (ASM, 1995). Aços que apresentam resistência à corrosão e à oxidação são denominados de aços inoxidáveis. Na literatura, há divergências quanto aos teores

mínimos de cromo (Cr) para considerá-lo aço inoxidável, variando de 10% p a 12% p (COSTA E SILVA; MEI, 2010; SHACKELFORD, 2008; SOUZA, 2001).

Conforme a aplicação, são imprescindíveis outras propriedades além da resistência à corrosão, tal como, propriedades mecânicas a temperaturas elevadas e tenacidade. Nestes casos, outros elementos de liga, além do Cr, são adicionados para satisfazerem as necessidades específicas da aplicação. Um exemplo de adição de elementos de liga para os aços inoxidáveis é o caso do níquel (Ni), agregado a liga quando ela demanda resistência a corrosão em altas temperaturas (SOUZA, 2001).

As ligas contendo Fe-Cr-Ni são denominadas de aços inoxidáveis austeníticos, pois são paramagnéticas e não

endurecem por tratamento térmico de têmpera. Na classe dos aços inoxidáveis austeníticos, aços com as melhores propriedades de resistência à corrosão entre as famílias de aços inoxidáveis, é justificável o uso do aço AISI 316 L por sua apreciável resistência à corrosão em diferentes meios. Essa característica deve-se também ao fato de contar com molibdênio em sua composição, que combinado ao cromo estabiliza o filme passivo na presença de cloretos aumentando a resistência à corrosão intergranular e corrosão por pites (ASM, 2005).

Na escala industrial, o aço inoxidável austenítico é abundantemente utilizado em equipamentos com superfícies expostas à atmosfera, imersão em água salinizada, além de ser utilizada em equipamentos da indústria alimentícia tendo seu uso restrito a meios que levam a quebra da película passiva (NUNES, 2007). Durante a fabricação destes equipamentos, os componentes são submetidos a diversos tipos de processos de fabricação, sendo o torneamento o processo de fabricação predominante na manufatura desse tipo de aço.

De acordo com Ferraresi (1970) o torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Dessa forma, o processo de torneamento possui vasta aplicação na indústria metal mecânica. Há uma diversidade de operações possíveis de se executar em um torno mecânico, entre elas torneamento cilíndrico interno e externo, torneamento cônico interno e externo, faceamento, perfilamento, sangramento, recartilhamento (FERRARESI, 1970; MACHADO et al., 2015) Gerar uma boa superfície em componentes torneados tornou-se uma demanda para operações de semiacabamento e até mesmo de desbaste (SANDVIK, 2012). O acabamento da peça usinada é usualmente um parâmetro de interesse do processo. A textura superficial tem papel importante no atrito, o qual afeta muitas variáveis (incluindo as condições de trabalho, calor gerado e formação de detritos) de materiais em contato entre si sob condições de deslizamento.

Em relação à qualidade de produtos usinados, esta é diretamente relacionada à superfície final da peça trabalhada, portanto a sua rugosidade. Dependendo da aplicação de determinados componentes e suas características de montagem serão necessárias à aplicação de processos de acabamento posteriores como retificação e polimento. No processo de torneamento a rugosidade é diretamente influenciada pelo raio de ponta da ferramenta e pelo avanço da mesma, dentre outros parâmetros. Sendo assim, os parâmetros e ferramentas de corte devem ser escolhidos adequadamente para minimizar a ocorrência de defeitos nas peças e consequente perdas econômicas. A rugosidade também pode ser relacionada com vários fatores como: precisão e tolerância dimensional, resistência à corrosão, resistência a fadiga, escoamento de fluidos, transferência de calor e lubrificação.

Dessa forma, busca-se reduzir ao máximo a rugosidade

da peça, mas essa diminuição costuma implicar em aumento dos custos de fabricação. Sendo assim, a seleção adequada dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e raio de ponta da ferramenta) busca conciliar baixo custo com acabamento almejado (PANDA; BISWAL; SHARMA, 2016). Dentre eles, o avanço é o mais influente, pois a amplitude da rugosidade tende a aumentar na proporção quadrática deste (MACHADO et al., 2015) apresentando os modelos e conceitos imprescindíveis ao engenheiro envolvido com a matéria. A nomenclatura e a simbologia específicas da usinagem dos materiais são as mais atualizadas e a aplicação destas é claramente exemplificada. A obra mostra, de maneira clara e didática, a formação de cavacos, com modelos teóricos consagrados, os quais permitem não só o entendimento mas também a aplicação nos cálculos de força e potência de usinagem. Esses conceitos se aplicam a qualquer outro processo de usinagem, independentemente dos materiais usinados, mesmo em compósitos hoje largamente utilizados na indústria aeroespacial. Os modelos permitem a previsão de resultados, bem como a seleção de máquinas e equipamentos. O livro aborda também os mais recentes avanços em materiais para ferramentas de corte, suas aplicações e vantagens, proporcionando uma visão bastante atualizada das melhores práticas em usinagem de materiais. Além desses tópicos, o texto apresenta modelos para avaliação econômica das operações de usinagem, mostrando como as condições de corte, avanço, velocidade e profundidade de corte podem tornar os processos mais produtivos. Por último, os processos abrasivos são descritos e analisados com base nas mais recentes descobertas científicas nesta importante área de acabamento da usinagem (MACHADO et al., 2015).

A condição superficial final de uma peça é o resultado de um processo que envolve deformações plásticas, rupturas, recuperação elástica, geração de calor, vibrações, tensões residuais e, às vezes, reações químicas (MACHADO et al., 2015) apresentando os modelos e conceitos imprescindíveis ao engenheiro envolvido com a matéria. A nomenclatura e a simbologia específicas da usinagem dos materiais são as mais atualizadas e a aplicação destas é claramente exemplificada. A obra mostra, de maneira clara e didática, a formação de cavacos, com modelos teóricos consagrados, os quais permitem não só o entendimento mas também a aplicação nos cálculos de força e potência de usinagem. Esses conceitos se aplicam a qualquer outro processo de usinagem, independentemente dos materiais usinados, mesmo em compósitos hoje largamente utilizados na indústria aeroespacial. Os modelos permitem a previsão de resultados, bem como a seleção de máquinas e equipamentos. O livro aborda também os mais recentes avanços em materiais para ferramentas de corte, suas aplicações e vantagens, proporcionando uma visão bastante atualizada das melhores práticas em usinagem de materiais. Além desses tópicos, o texto apresenta modelos para avaliação econômica das operações de usinagem, mostrando como as

condições de corte, avanço, velocidade e profundidade de corte podem tornar os processos mais produtivos. Por último, os processos abrasivos são descritos e analisados com base nas mais recentes descobertas científicas nesta importante área de acabamento da usinagem (MACHADO et al., 2015). Existem muitas maneiras de se avaliar uma superfície, a partir de ensaios adicionais de fadiga, tensões residuais, corrosão, entre outros. Essas técnicas podem ser destrutivas ou não, de fácil execução e ter alto custo, já que dependem dos requisitos que a peça exige.

Devido aos problemas econômicos, ambientais e ocupacionais associados ao uso de fluidos lubrificantes, buscou-se neste trabalho uma usinagem amigavelmente ecológica, sem uso de qualquer tipo de fluido (DIXIT; SARMA; DAVIM, 2012).

Quadro 1 - Composição química do aço AISI 316 L.

AISI 316 L	Cr	Ni	Mo	C	Mn	P	S	Si
Norma	16,00 - 18,00	10,00 - 14,00	2,00 - 3,00	máx. 0,03	máx. 2,00	máx. 0,045	máx. 0,030	máx. 0,75
Amostras	16,97	10,66	2,19	0,017	1,46	0,03	0,026	0,34

Fonte: Dados da pesquisa.

Para garantir uma confiabilidade os testes foram realizados em etapas com a troca dos insertos em cada etapa, desta maneira garantindo as mesmas condições para ambos os corpos de prova. Os três corpos de prova existentes em cada peça, foram usinados com os mesmos parâmetros, sendo efetuado apenas a troca da ponta do inserto.

2.2 Ferramentas

Os insertos empregados para esta análise são classificados para aplicações de acabamento e desbaste em materiais considerados aços inoxidáveis. Insertos de geometria triangular (TNMG), possuindo quebra-cavacos com ângulo de saída positivo e cobertura PVD (do inglês *Physical Vapor Deposition*) de TiAlN+TiN. A Tabela 2 exhibe as especificações indicadas pelo fabricante para os insertos empregados, necessárias para estipular os parâmetros aplicados no experimento.

Quadro 2 - Especificações das ferramentas utilizadas

Especificação do inserto ISO	Parâmetros de corte		
	v_c [m/min]	f_n [mm/volta]	a_p [mm]
TNMG 16 04 04R-K 2035	170 (145 - 195)	0,22 (0,14 - 0,30)	2,5 (0,7 - 5,0)
TNMG 16 04 08R-K 2035	145 (110 - 195)	0,30 (0,14 - 0,50)	3,0 (0,8 - 5,0)

Fonte: Dados da pesquisa.

2.3 Parâmetros Utilizados

Foram adotados como parâmetros para o ensaio de usinabilidade os valores de avanço e velocidade de corte sugeridos pelo fabricante das ferramentas, sendo que os valores empregados estão dentro da faixa de variação admitida para cada uma delas. A Tabela 3 indica os valores aplicados

Diante deste contexto, foram analisados os parâmetros de rugosidades (R_a) e (R_z) e o perfil de dureza resultante em função da variação de velocidade de corte (v_c), do avanço da ferramenta (f_n) e do raio de ponta da ferramenta (r_e) no processo de torneamento cilíndrico externo do material AISI 316 L.

2 Material e Métodos

2.1 Corpos de Prova (CP)

No presente trabalho, o material estudado foi o aço inoxidável austenítico AISI 316 L em formato de barra cilíndrica maciça, com diâmetro de 25,4mm com 200 mm de comprimento. A composição química do material é apresentada no Quadro 1.

de velocidade de corte, avanço da ferramenta e raio de ponta da ferramenta utilizados (v_c , f_n e r_e , respectivamente). A profundidade de corte (a_p), foi mantida constante (1 mm) em todas as situações, pois a influência deste parâmetro não era objetivo deste estudo, assim como também não foi empregado nenhum tipo de fluido ou solução lubrificante, obtendo assim uma usinagem amigavelmente ecológica.

Quadro 3 - Parâmetros de corte utilizados em cada amostra.

Condição	v_c [m/min]	f_n [mm/volta]	r_e [mm]
A 01	145	0,15	0,4
A 02	145	0,30	0,4
A 03	195	0,15	0,4
A 04	195	0,30	0,4
A 05	145	0,15	0,8
A 06	145	0,30	0,8
A 07	195	0,15	0,8
A 08	195	0,30	0,8

Fonte: Dados da pesquisa.

2.4 Análise Superficial e Microestrutural

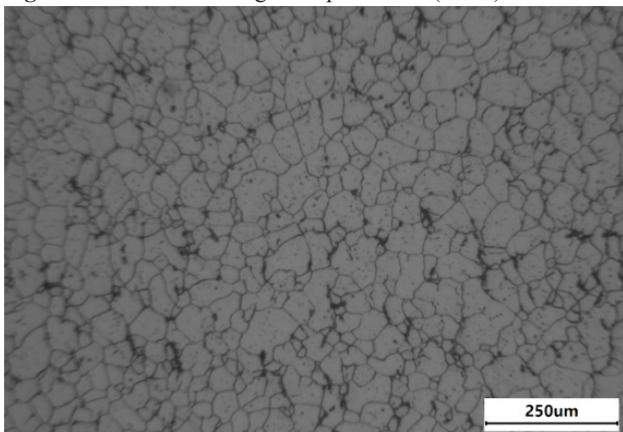
Para realizar a medição dos parâmetros de rugosidade (R_a) e (R_z), foi utilizado um rugosímetro digital portátil marca Time modelo TR-210. Para executar as medições, os corpos de prova após usinados em torno CNC da marca Romi modelo GL 240, foram fixados em uma base magnética, na qual foram submetidos a medições em três planos defasados a 120° nos três corpos de prova de cada amostra. O rugosímetro foi ajustado para trabalhar com um comprimento de amostragem (*cut-off*) de 0,8 mm e comprimento de medição $L = 4$ mm ($L = 0,8 \times 5$).

Após a medição da rugosidade, foi dado início a produção das análises metalográficas dos corpos de prova, sendo retiradas amostras no sentido transversal das barras para

análise do tamanho dos grãos e microestrutura. A sequência de lixas aplicadas na preparação foi 80, 120, 160, 220, 320, 400, 600, 800, 1200 e 2000, seguido de polimento com alumina com grãos de tamanho de 3 μm e posteriormente submetidas ao ataque eletroquímico em solução contendo 60% HNO_3 e 40% H_2O , por um tempo de 120 segundos com passagem de corrente e tensão.

Na Figura 1 é apresentada a microestrutura do material, de acordo com a qual, realizando procedimento de contagem de grãos, verifica-se que o tamanho de grão do material utilizado é TG 7, confirmando estar dentro dos padrões estabelecidos em norma (ABNT, 1990).

Figura 1 - Análise metalográfica preliminar (400X)



Fonte: Os autores.

Quadro 4 - Valores da rugosidade média R_a teórico e real das amostras

Condição	v_c [m/min]	f_u [mm/volta]	r_c [mm]	R_a teórico [μm]	R_a real [μm]
A 01	145	0,15	0,4	2,34	2,02
A 02	145	0,30	0,4	9,37	9,51
A 03	195	0,15	0,4	2,34	2,27
A 04	195	0,30	0,4	9,37	9,27
A 05	145	0,15	0,8	1,17	1,56
A 06	145	0,30	0,8	4,68	4,69
A 07	195	0,15	0,8	1,17	1,33
A 08	195	0,30	0,8	4,68	4,58

Fonte: Os autores.

Podemos verificar através dos dados demonstrados no Quadro 4, que o valor teórico obtido através da Equação (1) pode servir como base para estabelecer parâmetros de usinagem com a finalidade de obter uma determinada rugosidade média R_a , pois os valores obtidos são muito semelhantes com os encontrados nas amostras usinadas, sendo que na maioria dos casos, estes ficaram ligeiramente abaixo dos valores teóricos calculados.

3.2 Análise dos Gráficos de Rugosidade

O gráfico da Figura 2 exibe os valores reais do parâmetro de rugosidade R_a determinados através do cálculo da média aritmética das três medições realizadas em cada amostra. As barras de erros correspondem a incerteza em função do desvio padrão das três medições.

Para verificar o perfil de dureza das amostras, foi utilizado o ensaio Vickers (HV), com o emprego de um durômetro digital da marca Future-Tech modelo FM-800, pertencente ao laboratório de Materiais do Instituto Federal de Santa Catarina, campus Araranguá, aplicando uma carga de 10 gf em um tempo de impressão de 10 segundos. A análise constituiu-se de 20 medições na seção transversal de cada amostra com espaçamento de 20 μm , iniciando com a primeira indentação a uma distância de 20 μm da superfície usinada, até atingir a profundidade total de 0,4 mm.

3 Resultados e Discussões

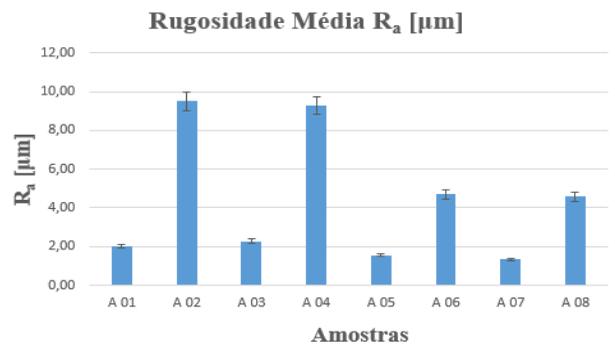
3.1 Cálculo da Rugosidade no Processo de Torneamento

No processo de torneamento é possível ter uma estimativa teórica do parâmetro de rugosidade média R_a através do cálculo utilizando para tal a fórmula representada pela Equação (1). Os valores reais podem ter variações, já que estarão acrescidos de outros fatores diversos.

$$R_a = 41,66.(f^2/r) \quad (1)$$

Os valores teóricos encontrados para R_a nas condições analisadas, juntamente com os valores reais encontrados nas amostras com as diferentes condições de velocidade de corte, avanço e raio de ponta da ferramenta são apresentados no Quadro 4.

Figura 2 - Gráfico da rugosidade média " R_a " após usinagem do AISI 316 L.



Fonte: Os autores.

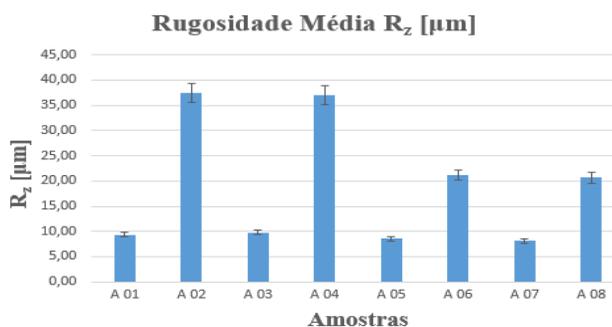
Podem-se observar que mesmo utilizando uma ferramenta com raio de ponta pequeno ($r_c = 0,4$ mm) com avanço

relativamente baixo ($f_n = 0,15$ mm/volta), os valores da rugosidade média R_a ficaram em torno de $2,0 \mu\text{m}$ (amostras A 01 e A 03). No entanto, quando se utiliza este mesmo raio de ponta da ferramenta, combinado a um valor de avanço duas vezes maior ($f_n = 0,30$ mm/volta), se obtém valores de rugosidade média R_a próximo de $10 \mu\text{m}$ (amostras A 02 e A 04).

Também é possível visualizar que quando se utiliza uma ferramenta com raio de ponta maior ($r_e = 0,8$ mm) combinado com avanço baixo ($f_n = 0,15$ mm/volta), os valores de rugosidade média R_a tiveram uma leve redução (amostras A 05 e A 07) se comparadas com as amostras A 01 e A 03, apresentando valores de R_a próximos de $1,5 \mu\text{m}$ e $1,3 \mu\text{m}$ respectivamente. Entretanto, quando se utiliza um avanço mais elevado ($f_n = 0,30$ mm/volta), com pastilha de raio $0,8$ mm, obteve-se rugosidades médias de $4,5 \mu\text{m}$, o que representa exatamente a metade da rugosidade média das amostras A 02 e A 04.

O gráfico da Figura 3 exibe os valores do parâmetro de rugosidade R_z determinados através do cálculo da média aritmética das três medições realizadas em cada amostra. As barras de erros correspondem a incerteza em função do desvio padrão das três medições.

Figura 3 - Gráfico da rugosidade média “ R_z ” após usinagem do AISI 316 L.



Fonte: Os autores.

Constata-se que para a ferramenta com raio de ponta $r_e = 0,4$ mm combinada com pequeno avanço ($f_n = 0,15$ mm/volta), os valores da rugosidade R_z ficaram abaixo de $10 \mu\text{m}$ (amostras A 01 e A 03). No entanto, pode-se observar maiores amplitudes e maiores dispersões dos valores obtidos para o parâmetro de rugosidade R_z , quando se utiliza um avanço maior ($f_n = 0,30$ mm/volta), combinado com pequeno raio de ponta da ferramenta ($r_e = 0,4$ mm), isso ocorreu com as amostras “A 02 e A 04”, nas quais o valor de R_z ultrapassou os $37 \mu\text{m}$.

Verifica-se também neste gráfico que a utilização de ferramenta com raio de ponta maior ($r_e = 0,8$ mm) combinado com avanço baixo ($f_n = 0,15$ mm/volta) não revela grandes mudanças na rugosidade média R_z (amostras A 05 e A 07) se comparado a ferramenta com raio de ponta ($r_e = 0,4$ mm). Nestas amostra a rugosidade média R_z também ficou ligeiramente abaixo dos $10 \mu\text{m}$. Entretanto, uma maior

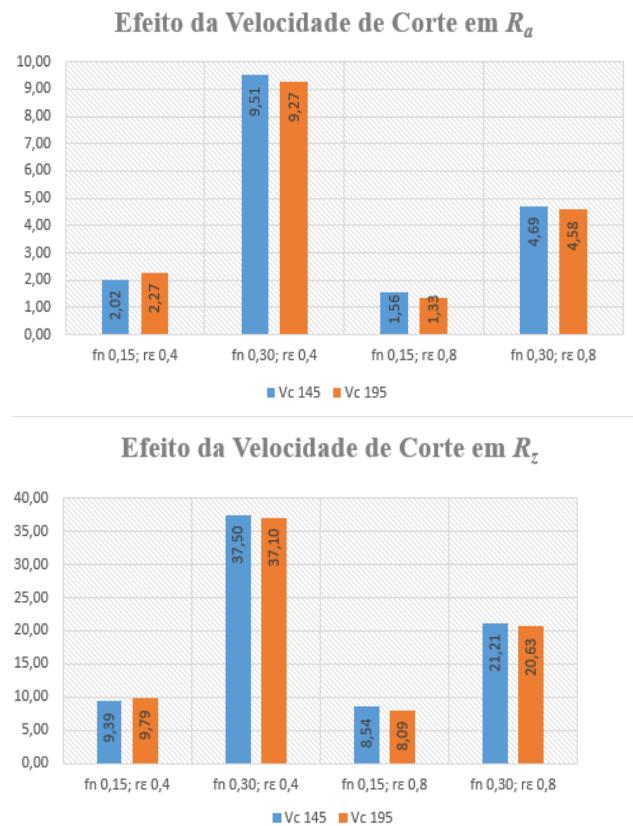
diferença pode ser observada quando se utiliza a ferramenta de ($r_e = 0,8$ mm) combinado com um maior avanço ($f_n = 0,30$ mm/volta), situação na qual se consegue obter uma rugosidade média R_z em torno de $20 \mu\text{m}$ (amostras A 06 e A 08).

Assim como acontece com a rugosidade média R_a , os resultados mais insatisfatórios da rugosidade média R_z (amostras A 02 e A 04) também foram encontrados quando se utiliza a ferramenta com o menor raio de ponta ($r_e = 0,4$ mm) e o maior avanço ($f_n = 0,30$ mm/volta), sendo que estas mesmas amostras, também apresentam as maiores dispersões.

3.3 Influência da Velocidade de Corte na Rugosidade

No gráfico da Figura 4 apresentado à seguir, podemos analisar a variação da rugosidade em função da alteração da velocidade de corte. Os gráficos foram construídos com as amostras usinadas utilizando os mesmos parâmetros de usinagem, exceto a velocidade de corte.

Figura 4 - Gráficos da rugosidade média “ R_a e R_z ” variando a v_c .



Fonte: Os autores.

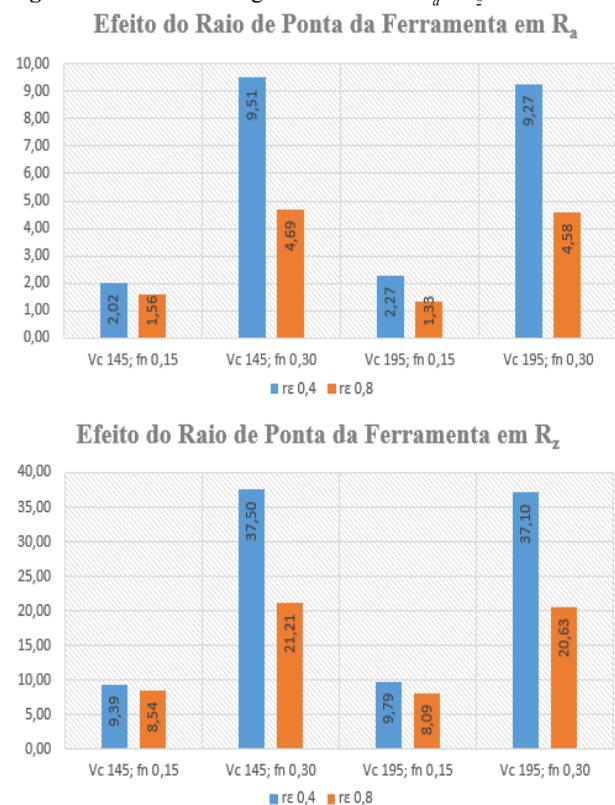
Podemos observar que em três das quatro condições de usinagem analisadas houve uma mínima redução das rugosidades com o aumento da velocidade de corte. Apenas nas condições de ($f_n = 0,15$ mm/volta e $r_e = 0,4$ mm) é que houve um pequeno aumento nas rugosidades R_a e R_z mesmo com o aumento da velocidade de corte. Uma possível explicação para este aumento da rugosidade nestas condições pode ser a vibração gerada na ação de corte, em função de estar utilizando a velocidade de corte (v_c) no limite máximo recomendado pelo fabricante e o avanço (f_n) no limite mínimo.

No entanto, estas variações causadas pela variação da velocidade de corte, são muito pequenas, na maioria dos casos menor que 10%, ou seja, tendo suas variações dentro dos desvios padrão que estão indicados nos gráficos.

3.4 Influência do Raio de Ponta da Ferramenta na Rugosidade

Podemos observar no gráfico da Figura 5 que o raio de ponta da ferramenta (r_e) é o fator que mais influenciou na melhoria do acabamento superficial, quando comparado aos demais fatores analisados neste trabalho. Pode-se notar, que ao variar o raio de ponta da ferramenta, a variação da rugosidade é menos impactante quando o avanço utilizado é pequeno ($f_n = 0,15$ mm/volta).

Figura 5 - Gráficos da rugosidade média “ R_a e R_z ” variando o r_e .



Fonte: Os autores.

Observa-se que ocorreu uma maior variação da rugosidade ao variar o raio de ponta da ferramenta nas amostras usinadas utilizando o maior avanço ($f_n = 0,30$ mm/volta). Nestas condições, pode-se observar uma diminuição de 50% na rugosidade média R_a quando se utiliza uma ferramenta com raio de ponta de $r_e = 0,8$ mm se comparado a ferramenta com raio de ponta de $r_e = 0,4$ mm, e uma variação de até 44% para o valor da rugosidade média R_z .

Desta forma, pode-se dizer que as alterações no raio de ponta da ferramenta (r_e) serão mais perceptíveis no acabamento superficial quando os avanços são maiores, sendo que quanto mais se diminui o avanço, menores são os efeitos da variação do raio de ponta da ferramenta.

3.5 Influência do Avanço da ferramenta na Rugosidade

O gráfico da Figura 6 nos mostra a variação dos parâmetros de rugosidade R_a e R_z em função da modificação do avanço da ferramenta (f_n). Consta-se que ao aumentar o avanço ocorre um aumento significativo nos valores das rugosidades, tanto para o parâmetro de R_a quanto para R_z . Pode-se reparar no gráfico, que o aumento do avanço ($f_n = 0,15$ mm/volta para $f_n = 0,30$ mm/volta) ocasionou um aumento de 350% para o parâmetro R_a quando se utilizou pastilha com raio de ponta ($r_e = 0,4$ mm) e um aumento de 275% para o parâmetro R_z .

Observa-se que ocorreu uma maior variação da rugosidade ao variar o raio de ponta da ferramenta nas amostras usinadas utilizando o maior avanço ($f_n = 0,30$ mm/volta). Nestas condições, pode-se observar uma diminuição de 50% na rugosidade média R_a quando se utiliza uma ferramenta com raio de ponta de $r_e = 0,8$ mm se comparado a ferramenta com raio de ponta de $r_e = 0,4$ mm, e uma variação de até 44% para o valor do parâmetro de rugosidade R_z .

Figura 6 - Rugosidade média “ R_a e R_z ” variando o f_n .



Fonte: Os autores.

No entanto, ao aumentarmos o avanço (f_n) utilizando uma ferramenta com raio de ponta ($r_e = 0,8$ mm), a diferença nos parâmetros de rugosidade R_a e R_z teve uma intensidade menor que para a ferramenta com raio de ponta ($r_e = 0,4$ mm). O parâmetro de R_a teve um aumento de 200% ao dobrar o valor do avanço, enquanto o parâmetro de R_z teve um aumento de 150% em comparação ao menor avanço analisado.

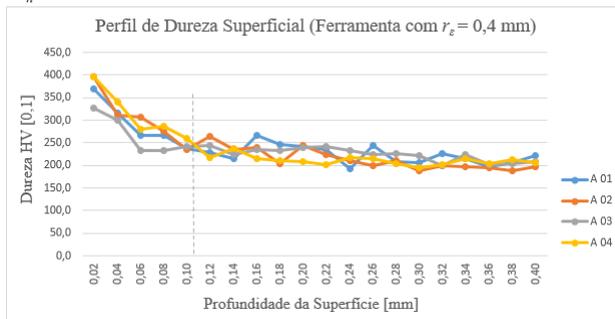
Ao analisar os dados representados no Gráfico 5, podemos constatar que os resultados são coerentes com a teoria, pois a influência do avanço da ferramenta já foi demonstrada por

outros autores como (MACHADO et al., 2015; MARQUES et al., 2016; REVEL et al., 2016; RIBEIRO FILHO et al., 2016) 9º Congresso Latino-Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais (9º Colaob afirma que a rugosidade média R_a é diretamente proporcional ao quadrado do avanço, para valores de avanço maiores que $1/2$ do raio de arredondamento da ferramenta.

3.6 Perfis de Dureza Vickers obtidos com as Amostras

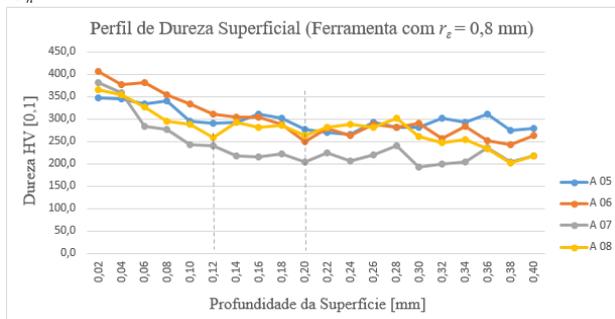
Os gráficos das Figura 7 e 8 representam os perfis de microdureza obtidos com a aplicação da carga de 10g (0,1 N) e de acordo com as condições de corte estabelecidas e apresentadas no Quadro 3)

Figura 7 - Perfil de microdureza variando os parâmetros de v_c e f_n .



Fonte: Os autores.

Figura 8 - Perfil de microdureza variando os parâmetros de v_c e f_n .



Fonte: Os autores.

Conforme o gráfico da Figura 7, pode-se observar que os valores de dureza encontrados se mantiveram acima de 250 HV até a profundidade de 0,10 mm, sendo que após este ponto ocorreu a atenuação da queda de dureza, para as amostras usinadas com ferramenta de raio de ponta $r_e = 0,4$ mm, com exceção da amostra 03, que atingiu o valor de 250 HV de dureza a uma profundidade de 0,06 mm. Esta exceção pode ser explicada em função desta amostra (03) ter sido usinada com a maior velocidade de corte e o menor avanço por volta, gerando assim uma menor deformação na camada sub-superficial desta amostra.

Podemos observar também que as duas amostras (A 02 e A 04) que foram usinadas com maior avanço da ferramenta ($f_n = 0,30$ mm/volta), apresentaram maiores valores de dureza próximos à superfície (0,02 mm), atingindo aproximadamente

400 HV, valores levemente superiores às amostras usinadas com menor avanço ($f_n = 0,15$ mm/volta).

Ao ser efetuada a mudança no raio de ponta da ferramenta, aumentando o mesmo de $r_e = 0,4$ mm para $r_e = 0,8$ mm, temos as condições apresentadas no Gráfico 7, no qual os valores de dureza próximo a superfície (0,02 mm) também ficaram na faixa de 350 a 400 HV, ocorrendo variação em relação a profundidade que os valores de dureza se atenuaram.

Podemos observar também que as duas amostras (A 07 e A 08) as quais foram usinadas com maior velocidade de corte ($v_c=195$) se aproximam da faixa de dureza de 250 HV a uma profundidade de 0,12 mm. Entretanto, as amostras (A 05 e A 06), mantém os valores de dureza acima de 250 HV até a profundidade de 0,2 mm, estas duas amostras citadas foram usinadas com menor velocidade de corte ($v_c=145$) que em conjunto com o maior raio de ponta da ferramenta ($r_e = 0,8$ mm) provocando assim uma maior deformação na microestrutura do material.

4 Conclusão

Devido à importância e demanda do aço inoxidável AISI 316 L, ter conhecimento sobre as influências dos parâmetros de usinagem no torneamento desta liga se torna de fundamental importância e relevância para as indústrias. Sendo assim, utilizando como resposta a rugosidade e o perfil de dureza, as principais conclusões obtidas foram:

- A partir da variação do avanço, significantes alterações na rugosidade foram notadas, sendo os menores valores de rugosidade nos parâmetros de R_a e R_z proporcionados pelos menores valores de avanço.
- A velocidade de corte mostrou ser um parâmetro de pouca influência sobre a rugosidade, tanto para os parâmetros de R_a e R_z .
- A utilização de um maior raio de ponta da ferramenta apresenta menores valores para os parâmetros de rugosidade R_a e R_z no entanto, esta situação gera alterações nos valores de dureza em maiores profundidades.
- A variação da velocidade de corte mostrou variações no perfil de dureza, sendo que maiores velocidades causam alteração de dureza em menores profundidades.

Agradecimentos

A UFRGS e ao IFSC, campus Araranguá e Chapecó, pela estrutura utilizada na condução desta pesquisa.

Referências

- 1323, A. N. Determinação do tamanho de grão em materiais metálicos. 1990
- ASM - American Society of Metals. Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels. ASM International, 1995.
- ASM - American Society of Metals. Corrosion: materials. Ohio: Materials Park, 2005.
- COSTA E SILVA, A.L.V.; MEI, P.R. *Aços e ligas especiais*. São Paulo: Blucher, 2010.
- DIXIT, U.S.; SARMA, D.K.; DAVIM, J.P. *Environmentally friendly machining*. New York: Springer, 2012.

- FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo: Edgard Blucher, 1970.
- MACHADO, Á.R. et al. *Teoria da usinagem dos materiais*. São Paulo: Blucher, 2015.
- MARQUES, F.M. et al. Influência do processo de usinagem na integridade superficial e propriedades da liga de aço inox austenítico F138 e AISI 316L. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ÓRGÃOS ARTIFICIAIS E BIOMATERIAIS (9º Colaob), 24-27 ago, Foz do Iguaçu, Paraná, 2016.
- NUNES, L.P. *Fundamentos de resistência à corrosão*. Rio de Janeiro: Interciência, 2007.
- PANDA, M.R.; BISWAL, S.K.; SHARMA, Y.K. Experimental analysis on the effect of process parameters during CNC turning on Nylon-6/6 using tungsten carbide tool. *Int. J. Eng. Scie. Res. Technol.*, v.5, n.4, p.79-84, 2016.
- REVEL, P. et al. High precision hard turning of AISI 52100 bearing steel. *Precision Engineering*, v.43, p.24-33, 2016.
- RIBEIRO FILHO, S. L. M. et al. Influence cutting parameters on the surface quality and corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy in synthetic body environment (SBF) using Response Surface Method. *Measurement*, v. 88, p.223-237, 2016.
- SANDVIK. *Manual técnico de usinagem, Parte A: Torneamento Geral*. São Paulo: Sandvik Coromant, 2012
- SHACKELFORD, J.F. *Ciência dos materiais*. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- SOUZA, A. J. et al. Avaliação do acabamento gerado no torneamento do aço AISI 420C com ferramenta wiper para diferentes avanços e profundidades de corte. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA (CONEM), 21-25 Ago, Fortaleza, 2016.
- SOUZA, S.A. *Composição química dos aços*. São Paulo: Edgard Blucher, 2001.