



# INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE AVANÇO DA FERRAMENTA DE USINAGEM NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AISI 304 E AISI 316

AMANDA DE OLIVEIRA MICHELON<sup>1</sup>, FERNANDO MICHELON MARQUES<sup>2</sup>,  
ALEXANDRE DA SILVA ROCHA<sup>3</sup>, KELI VANESSA SALVADOR DAMIN<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Extremo Sul Catarinense  
Av. Universitária, 1105 - Universitário, Criciúma - SC, 88806-000, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Federal de Santa Catarina  
Avenida Nereu Ramos, 3450 D - Seminário, Chapecó - SC, 89813-000, Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Av. Paulo Gama, 110 - Farroupilha, Porto Alegre - RS, 90040-060, Brasil

*(Recibido 29 de abril de 2020, para publicación 7 de marzo de 2022)*

**Resumo** – Este trabalho teve como objetivo investigar a influência do parâmetro de avanço da ferramenta de usinagem na resistência à corrosão de aços inoxidáveis austeníticos. Para esse fim, reproduziu-se o processo de torneamento dos aços AISI 304 e AISI 316 empregando dois avanços diferentes. Posteriormente, as superfícies torneadas foram submetidas à análise de rugosidade e a ensaio de corrosão por polarização linear. Concluiu-se que a rugosidade é diretamente proporcional ao parâmetro de avanço e que as superfícies mais irregulares, por apresentarem maior área de interface metal/meio, apresentam taxas de corrosão maiores do que aquelas com menores valores de rugosidade.

**Palavras-chave** – Aços inoxidáveis austeníticos, corrosão, parâmetros de corte, polarização.

## 1. INTRODUÇÃO

Os conceitos popularmente difundidos consideram a corrosão um fenômeno exclusivo dos materiais metálicos. Apesar da estreita relação com os metais, essas concepções mostram-se bastante limitadas, uma vez que processos corrosivos também ocorrem em materiais cerâmicos, poliméricos e compósitos. Nesse contexto, atualmente, procura-se conceituar a corrosão de maneira mais ampla.

De uma forma universalmente aceita, GENTIL [1] define corrosão como “a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos”. Essa deterioração provocada pela interação físico-química entre o material e o meio ao qual ele é submetido inclui modificações microestruturais, variações químicas e desgaste, frequentemente, prejudiciais à durabilidade e desempenho do material e, portanto, indesejáveis [1].

Sendo um processo destrutivo, a corrosão representa um grande problema para praticamente todos os setores da atividade humana. Diversos países, desenvolvidos ou não, tem estudado o problema da corrosão por uma ótica econômica. Os prejuízos estimados chegam a resultados da ordem de 1 a 5% do PIB. Na indústria siderúrgica, um quinto da produção mundial de aço é destinado a repor perdas causadas pela corrosão [2]. Além do impacto na economia, verificam-se perdas humanas irreparáveis provocadas por contaminações, poluição e falta de segurança pela falha de componentes em serviço [3].

A descoberta dos aços inoxidáveis, por meio de estudos realizados em 1911 nos Estados Unidos e em 1912 na Inglaterra e Alemanha, representou um grande avanço em direção ao desenvolvimento de materiais resistentes à corrosão. Os números de produção evidenciam o impacto que estes materiais representaram. Em 1934, foram produzidas 56 mil toneladas; em 1953, mais de 1 milhão de toneladas; em 1996, aproximadamente 10 milhões de toneladas [4]. Dados divulgados pelo Fórum Internacional de Aço Inox (ISSF:

International Stainless Steel Forum) relatam uma produção mundial de aproximadamente 41,5 milhões de toneladas de aços inoxidáveis em 2015, o que representa um crescimento de mais de 30% em cinco anos. De toda essa produção, cerca de 65 a 70% são austeníticos, fazendo deste o maior grupo de aços inoxidáveis em uso [5].

A expressão “aço inoxidável” transmite a ideia de um material que não se deteriora mesmo quando utilizado em meios agressivos. Entretanto, embora esse material apresente uma maior resistência à corrosão nessas condições, quando comparado aos aços carbono, essa resistência é limitada, por exemplo, em meios ricos em cloro [6]. Assim, o campo dos aços inoxidáveis ainda oferece a possibilidade de melhoramentos e desenvolvimentos de novas ligas, com base em conhecimentos científicos e exigências atuais [7].

Os aços inoxidáveis constituem um grupo de suma importância do ponto de vista tecnológico, tendo em vista que, devido às suas excelentes propriedades químicas como alta resistência à corrosão e resistência a temperaturas elevadas, eles são aplicados nas mais variadas áreas de produção industrial, principalmente em equipamentos de processo [4] [7].

Uma parcela significativa desses materiais é empregada no setor de usinagem, tendo em vista que mais da metade dos produtos fabricados em aço inoxidável são submetidos a algum tipo de operação de usinagem antes de chegarem a sua forma final [8]. Contudo, são materiais de difícil usinabilidade, principalmente os do tipo austeníticos. Os aços de usinabilidade melhorada podem ser uma alternativa, porém, algumas vezes, não possuem o mesmo campo de aplicação [7].

Quanto a relação entre resistência a corrosão e usinagem, o que ocorre é a mudança de microestrutura de austenita para algumas porcentagens de martensita, doravante denominadas como martensita induzido por deformação (TRIP), desta maneira diminuindo a resistência à corrosão por parte dos aços inoxidáveis austeníticos. Esta mudança pode ser explicada pelos esforços de remoção de material, originados pela combinação entre avanço de ferramenta e velocidade de corte. Contudo o avanço da ferramenta é o maior influenciador desta mudança de morfologia, haja visto que quanto maior o avanço da ferramenta, maiores são os esforços de corte durante o processo de torneamento [13].

Na indústria carbonífera os prejuízos provocados pela corrosão são expressivos. Eixos de bombas centrífugas empregados em mineradoras sofrem processo corrosivo, devido ao ambiente extremamente agressivo aos aços carbono convencionais. A utilização de aços inoxidáveis é uma alternativa relativamente eficaz para atenuar esses inconvenientes [9].

Tais componentes são produzidos por usinagem, processo largamente empregado na fabricação de componentes de máquinas. Assim, torna-se importante o estudo dos efeitos desse processo na resistência à corrosão e, conseqüentemente, na resistência mecânica desses componentes. Estudos anteriores [4] [8] [9] identificaram forte influência da variação da velocidade de avanço nessas propriedades.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais selecionados para este estudo correspondem a dois aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI 316, fornecidos por Favorit Aços Especiais, no estado solubilizado, na forma de barras redondas laminadas e trefiladas. As composições químicas de ambos os aços foram obtidas por espectroscopia de emissão óptica e são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1. Composições químicas médias (%) dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316 utilizados.

AISI	C (máx.)	Si (máx.)	Mn (máx.)	Cr	Mo	Ni	P (máx.)	S (máx.)	Outros (máx.)
304	0,08	0,75	2,00	19,00	-	9,00	0,045	0,030	N-0,10
316	0,08	0,75	2,00	17,00	2,50	12,00	0,045	0,030	N-0,10

A metodologia utilizada neste projeto consistiu, basicamente, na produção de corpos de prova por torneamento, análise da rugosidade das superfícies torneadas e ensaio de corrosão por meio da técnica eletroquímica de polarização linear.

A usinagem dos corpos de prova foi realizada por meio de torno convencional Nardini® modelo Nodus ND-250, utilizando suporte intercambiável com inserto de metalduro Iscar® modelo TNMG 332-TF IC 907

revestido com TiAlN+TiN, sem fluido de corte. Quanto ao inserto o mesmo possui raio de ponta da ferramenta de 0,8 mm, que ao ser montado no suporte, proporcionou um ângulo de folga de 6°, com ângulo de saída do cavaco de 12°, bem como o ângulo de posição da aresta de corte de 90°.

Para análise do efeito do parâmetro de avanço, cada material foi submetido a torneamento sob dois avanços diferentes ( $fn$ ) – 0,1 mm/rot e 0,3 mm/rot – totalizando quatro corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 20 mm e comprimento de 50 mm cada. A Tabela 2 apresenta os parâmetros de velocidade de corte ( $vc$ ) e profundidade de corte ( $ap$ ) utilizados no torneamento de cada corpo de prova.

Tabela 2. Parâmetros de corte utilizados.

Material	$vc$ (m/min)	$fn$ (mm/rot)	$ap$ (mm)	Corpo de prova
AISI 304	63,0	0,1	1,0	304/F0,1
	63,0	0,3	1,0	304/F0,3
AISI 316	63,0	0,1	1,0	316/F0,1
	63,0	0,3	1,0	316/F0,3

As medições de rugosidade da superfície torneada de cada corpo de prova foram realizadas por meio de rugosímetro Mitutoyo® modelo SJ-310. Foram obtidos resultados de rugosidade média ( $R_a$ ) conforme a norma ISO 4287:1997.

Para a realização dos ensaios de corrosão, uma célula eletroquímica constituída de três eletrodos (eletrodo de referência, contra eletrodo e eletrodo de trabalho) foi construída em um béquer com capacidade de 250 ml. A Fig. 1 mostra a célula montada, utilizando um eletrodo de calomelano saturado como eletrodo de referência (a), uma malha de platina como contraeletrodo (b) e o corpo de prova a ser analisado como eletrodo de trabalho (c). Ainda foi utilizada uma solução em meio salino constituída de cloreto de sódio, NaCl, a 3,5% em peso em 250 ml de água destilada.

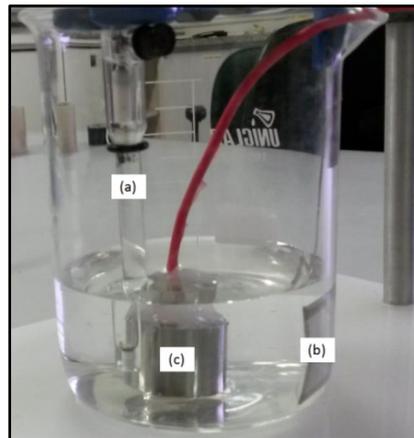


Fig. 1. Célula eletroquímica construída para a realização dos ensaios de corrosão.

Para cada corpo de prova empregado como eletrodo de trabalho, foi calculada a área de superfície exposta. Todos os potenciais foram referenciados em relação ao eletrodo de calomelano saturado.

Por meio de um potenciostato/galvanostato da marca Bio-Logic Science Instruments® modelo SP 200 foram realizadas as medidas de polarização linear e a leitura e análise dos resultados foi realizada com auxílio do software EC-Lab V10.23. A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados na técnica de polarização linear.

Tabela 3. Parâmetros utilizados na polarização linear.

Parâmetro (Unidade)	304/F0,1	304/F0,3	316/F0,1	316/F0,3
Área de superfície do eletrodo de trabalho (cm <sup>2</sup> )	9,4908	12,5463	10,2070	10,9208
Eletrodo de referência: calomelano saturado (V)	0,241	0,241	0,241	0,241
Peso equivalente [aço] (g/eq.)	27,925	27,925	27,925	27,925
Densidade [aço] (g/cm <sup>3</sup> )	7,850	7,850	7,850	7,850
E <sub>inicial</sub> (V)	-0,390299	-0,521783	-0,351738	-0,487761
E <sub>final</sub> (V)	-0,245846	-0,122329	-0,177292	-0,0325332
Velocidade da variação de potencial [dE/dt] (mV/s)	5	5	5	5
Tempo (s)	500	500	500	500

### 3. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nos procedimentos experimentais anunciados anteriormente. As Fig. 2, 3, 4 e 5 trazem as curvas adquiridas nos testes de polarização linear das amostras 304/F0,1, 304/F0,3, 316/F0,1 e 316/F0,3, respectivamente.

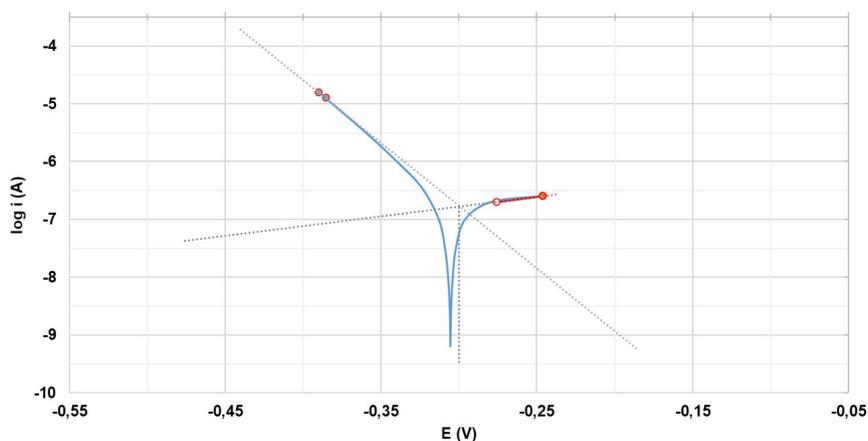


Fig. 2. Curva de polarização do aço AISI 304/ F0,1.

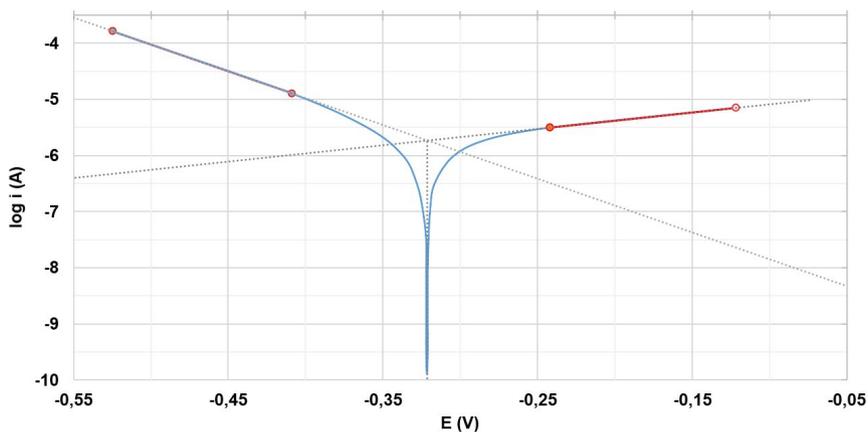


Fig. 3. Curva de polarização do aço AISI 304/ F0,3.

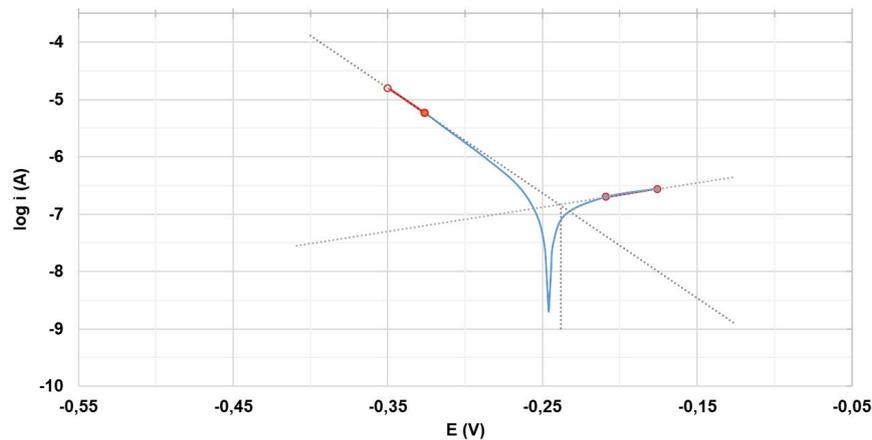


Fig. 4. Curva de polarização do aço AISI 316/ F0,1.

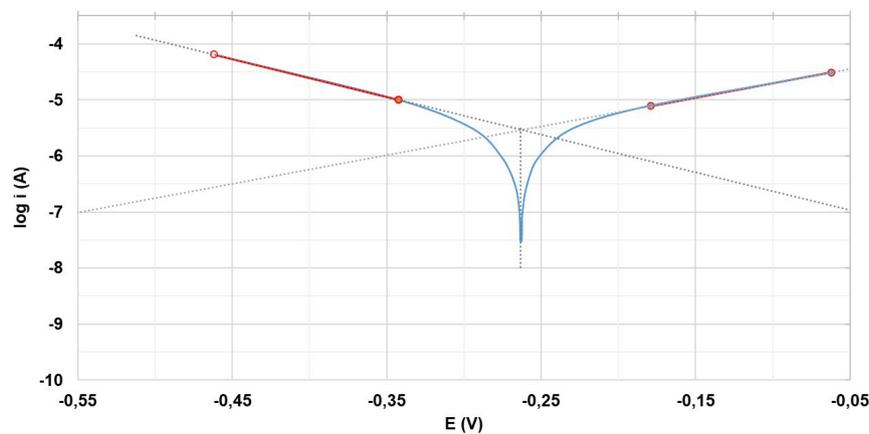


Fig. 5. Curva de polarização do aço AISI 316/ F0,3.

Tabela 4. Resultados de rugosidade, potencial, corrente e taxa de corrosão obtidos experimentalmente.

Corpo de prova	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ecor (V vs. REF.)	Icor ( $\mu\text{A}$ )	Taxa de corrosão ( $\times 10^{-3}$ mm/ano)
304/F0,1	1,162	-0,306385	0,244	0,299
304/F0,3	6,073	-0,321571	2,089	2,291
316/F0,1	1,435	-0,246095	0,289	0,329
316/F0,3	5,954	-0,263191	3,079	3,955

A Tabela 4 apresenta os valores de rugosidade média (Ra), potencial de corrosão (Ecor), corrente de corrosão (Icor) e taxa de corrosão obtidos experimentalmente para cada corpo de prova.

Observa-se que todas as curvas obtidas apresentaram aspecto de curva de polarização por ativação, em ambas as regiões, anódica e catódica. Os valores de Ecor ditam o potencial necessário para ativar o processo de corrosão, já os valores de Icor ditam a velocidade de corrosão. Quanto mais positivo o valor de Ecor mais nobre é o material e quanto menor o Icor menor é a velocidade de corrosão. A taxa de corrosão está ligada principalmente ao valor Icor sendo por isso que os menores valores de taxa de corrosão foram encontrados para as amostras que obtiveram menores valores de Icor.

Analisando os dados referentes aos corpos de prova constituídos de aço inoxidável AISI 304, pode-se observar que, o corpo de prova usinado com menor avanço (304/F0,1), 0,1 mm/rot, apresentou rugosidade  $Ra = 1,162 \mu\text{m}$ . Usinando este mesmo material com maior avanço, 0,3 mm/rot, como realizado no corpo

de prova 304/F0,3, foi obtida uma superfície mais irregular, com rugosidade  $R_a = 6,073 \mu\text{m}$ . Com o aço inoxidável AISI 316, esse comportamento se repete. Comparando os corpos de prova 316/F0,1, usinado com 0,1 mm/rot de avanço, e 316/F0,3, usinado com 0,3 mm de avanço, a rugosidade aumentou de 1,435  $\mu\text{m}$  para 5,954  $\mu\text{m}$ .

Esses resultados confirmam uma tendência já observada por [12] [13]: considerando um mesmo material usinado nas mesmas condições (raio de curvatura da ponta da ferramenta, velocidade e profundidade de corte), um aumento no parâmetro de avanço da ferramenta de usinagem produz uma superfície com maior rugosidade.

Ainda comparando os dados referentes aos corpos de prova constituídos de aço AISI 304, pode-se observar que aquele com maior rugosidade (304/F0,3), obtido a partir do torneamento com maior parâmetro de avanço, 0,3 mm/rot, apresentou uma taxa de corrosão mais acentuada,  $2,291 \times 10^{-3}$  mm/ano. Da mesma forma, comparando os corpos de prova constituídos de aço AISI 316, aqueles com superfície mais irregular (316/F0,3), também obtidos a partir do torneamento com maior parâmetro de avanço, apresentaram uma maior taxa de corrosão,  $3,955 \times 10^{-3}$  mm/ano.

Tais resultados condizem com a teoria descrita por [9] [14] acerca da influência da rugosidade na resistência à corrosão de superfícies usinadas. Superfícies com rugosidades mais protuberantes apresentam maiores quantidades de picos e vales, aumentando a área de contato da superfície com o meio, favorecendo um maior acúmulo de impurezas (neste caso, impurezas originadas da mistura água + NaCl) nessa interface, acelerando o processo de corrosão [9] [10].

O aumento na taxa de corrosão dos corpos de prova usinados com maior avanço pode ser atribuído também ao fato de o aço inoxidável perder suas características de resistência à corrosão à medida que sofre deformação plástica, pois a sua estrutura cristalina passa de austenítica para martensítica [9].

Já comparando os corpos de prova 304/F0,1 e 316/F0,1, usinados nas mesmas condições (0,1 mm/rot de avanço), pode se observar que o último, constituído de aço AISI 316, apresentou rugosidade superficial um pouco maior. Tal fato pode ser explicado pela presença de aproximadamente 2,5% de molibdênio no aço que prejudica a usinabilidade do material, reduzindo o acabamento superficial da peça usinada [11].

#### 4. CONCLUSÕES

O processo de corrosão, como ocorre na interface metal/eletrólito, está intimamente ligado às condições superficiais do metal. Assim, as condições de corte, por interferirem nas propriedades superficiais, também influenciam na resistência à corrosão.

De acordo com os resultados obtidos, o aumento de 0,1 para 0,3 mm/rot de avanço, tanto na usinagem do aço inoxidável AISI 304 quanto do aço inoxidável AISI 316, provocou aumentos significativos na rugosidade das superfícies usinadas. Conclui-se, então, que o parâmetro de avanço é diretamente proporcional à rugosidade, ou seja, um aumento no avanço da ferramenta durante o processo de usinagem produz uma superfície mais irregular.

As superfícies mais irregulares, por apresentarem maior área de interface metal/meio, apresentaram taxas de corrosão maiores do que aquelas com menores valores de rugosidade. Assim, conclui-se que, submetidas às mesmas condições, as superfícies mais rugosas apresentam maior susceptibilidade à corrosão do que aquelas com menores rugosidades.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Gentil, V., *Corrosão*, 3 ed., Rio de Janeiro, LTC (1996)
- [2] Duperron, M., “Os danos da corrosão na economia” [http://www.diariodocomercio.com.br/noticia.php?tit=os\\_danos\\_da\\_corrosao\\_na\\_economia\\_&id=101214](http://www.diariodocomercio.com.br/noticia.php?tit=os_danos_da_corrosao_na_economia_&id=101214). Acessado em: março de 2016.
- [3] Merçon, F., Guimarães, P.I., Mainier, F.B., “Corrosão: Um Exemplo Usual de Fenômeno Químico”, *Química Nova na Escola*, 19, 11-14 (2004)
- [4] Gomes, J.O., Weingaertner, W.L., “Análise da Usinabilidade do Aço Inoxidável Austenítico SAE 304 com Variação dos Parâmetros Metalúrgicos”, *Máquinas e Metais* 1, 57-68 (1996)

- [5] Camargo, R., “Verificação da Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos através do Processo de Furação”, Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas (2008)
- [6] Sousa, L., “Avaliação dos efeitos dos parâmetros de usinagem e dos tratamentos térmicos no torneamento de três aços inoxidáveis austeníticos”. Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (2006)
- [7] Sousa e Silva, F.C., “Diagnóstico do processo de torneamento do aço inoxidável ABNT 304 a partir do estudo da formação do cavaco”. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia (2007)
- [8] Barbosa, P.A. Machado, I.F., “Strain Rate Effect on the Mechanical Behavior of Austenitic Stainless Steel during Machining”, *Advanced Materials Research*, 223, 332-339 (2011)
- [9] Souza, C.A.B., “Análise da Resistência ao Desgaste e a Corrosão do Aço AISI 304 Utilizados em Mineradoras de Carvão”. Trabalho de conclusão de curso, Faculdade SATC, Criciúma (2015)
- [10] Amorim, H.J., Mombru, R.G., Ribeiro, J.L.D., Kunrath Neto, A.O., “Estudo da relação entre desgaste de flanco, rugosidade e forças de corte em torneamento com ferramenta de metal duro”. *Máquinas e Metais*, Brasil, 440, 70-81 (2002)
- [11] Padinha, A.F., Guedes, L.C., “Aços inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades” São Paulo, Hemus (1994)
- [12] Ferraresi, D., *Fundamentos da usinagem dos metais*, São Paulo, Edgard Blucher LTDA (1970)
- [13] Suyma, D.I., “Efeito do fresamento com alta velocidade de corte na integridade superficial de aços ferríticos com grãos ultrafinos” Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira (2010)
- [14] Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L., *Tecnologia da usinagem dos materiais*, São Paulo, MM editora (1999)

## **INFLUENCE OF THE FEED RATE ON THE CORROSION RESISTANCE OF STAINLESS STEEL AISI 304 AND 316**

**Abstract** – The aim of this work was to investigate the influence of the machining tool 's feed parameter on the corrosion resistance of austenitic stainless steels. The AISI 304 and AISI 316 steels were machined using two different feed. Subsequently, the turned surfaces were subjected to roughness analysis and linear polarization corrosion testing. It was concluded that the advance parameter is directly proportional to roughness and that the more irregular surfaces, due to the greater area of metal/environment interface, present higher corrosion rates than those with lower roughness values.

**Keywords** – Austenitic Stainless Steels, Corrosion, Cutting Parameters, Polarization.