

## **AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO AISI 410 NO TORNEAMENTO**

**Felipe Ayres Nascimento, felipe.ayres@power.alstom.com<sup>1</sup>**  
**Marcos Valério Ribeiro, mvalerio@feg.unesp.br<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ALSTOM Hydro Energia - Av. Charles Schneider, s/n – CEP 12040-000, Taubaté/SP – Brasil

<sup>2</sup>Laboratório de Estudo da Usinagem da Faculdade de Engenharia - UNESP - Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – CEP 12516-410, Guaratinguetá/SP - Brasil

**Resumo:** *O Aço Inoxidável Martensítico, geralmente é uma liga Fe-Cr-C contendo de 11,5% a 18% de cromo, e de 0,09 a 0,15% de carbono que é extensamente usado na fabricação de componentes de turbinas hidráulicas devido à alta resistência ao ataque de substâncias químicas através de diferentes modos, e também devido à resistência mecânica, quando comparado a outros aços inoxidáveis. A proposta deste trabalho é estudar a rugosidade da superfície de acabamento quando usinado o Aço Inoxidável Martensítico AISI 410 sob diferentes condições de cortes, pois esta exigência é essencial para o funcionamento de alguns componentes. Durante os testes foram então variados os parâmetros velocidade de corte, avanço e ferramentas de corte a rugosidade foi medida usando um equipamento portátil do Laboratório de Estudo da Usinagem. A influência do desgaste da ferramenta na rugosidade final não foi determinante, durante os pre-testes realizados não foi observado aumento no desgaste até mesmo para comprimentos de corte altos e para condições cortantes diferentes. Nos testes não se usou fluido de corte, depois de executar os testes, as ferramentas foram analisadas em um microscópio óptico, e as imagens mostraram somente um arredondamento na aresta de corte e a perda da deposição do recobrimento de TiN na superfície de folga. A ferramenta de geometria Wiper (WM) apresentou resultados melhores para valores altos de avanço e velocidade de corte, enquanto a ferramenta com 0,8 mm de raio de ponta mostrou resultados melhores para mais baixos valores de avanço e velocidade de corte.*

**Palavras-chave:** *usinagem, AISI410, rugosidade, desgaste, turbinas hidráulicas*

### **1. INTRODUÇÃO**

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas que contém cromo, comumente, níquel e, em vários casos, outros elementos de liga. O cromo é o principal responsável pela resistência à corrosão destes aços. Este elemento é um metal menos nobre que o ferro nas séries eletroquímicas, isto é, ele é, em princípio, menos resistente a corrosão que o ferro. Assim, uma liga de Fe e Cr deveria ser mais facilmente corroída do que o ferro puro, o que, de fato, pode ocorrer em situações em que a liga esteja “ativa”. Entretanto, em contato com o ar atmosférico ou outro meio oxidante, existe a tendência de se formar rapidamente uma camada de óxido de cromo na superfície destas ligas. Esta camada de óxido se torna uma barreira invisível, contínua, aderente, impermeável e praticamente insolúvel em numerosos reagentes. Nestas condições, a liga é considerada como “passiva”, pois o metal sob a camada de óxido está protegido contra o ataque de diversos meios corrosivos, particularmente aqueles oxidantes (Nascimento, 2008). São uma classe de material relativamente recente que surgiu no início do século XX, quase que simultaneamente em vários países: Inglaterra (1913), Estados Unidos (1915), Alemanha (1912) e França, (1917).

A camada protetora, ou filme passivo, é formado espontaneamente pela exposição do metal ao ar ou, mais rapidamente, pelo uso de um tratamento de passivação. Este tratamento consiste na imersão do material, por poucos minutos, em uma solução oxidante (por exemplo, uma solução de ácido nítrico com concentração de 10 a 50%). Quando esta camada é destruída, e as condições são tais que se opõem à sua regeneração espontânea (por exemplo, em presença de ácido redutor), um aço inoxidável se torna muito pouco resistente à corrosão.

O efeito favorável do cromo é aparente mesmo quando uma pequena quantidade deste elemento está presente na liga. Assim, aços com apenas 5% de cromo são muito mais resistentes à oxidação do que os aços comuns. Contudo, convencionalmente, o nome “aço inoxidável” é reservado para ligas de Fe – Cr ou Fe – Cr – Ni contendo pelo menos de 10 a 12% Cr. Esta concentração corresponde ao mínimo que é geralmente considerado como necessário para garantir a resistência à corrosão atmosférica razoável (Chiaverini, 1984).

Os aços inoxidáveis não constituem um simples e único material, mas incluem várias ligas, cada uma tendo suas características microestruturais, elementos de liga e range de propriedades. As diferentes composições de cada família podem também produzir uma variedade de ligas destinadas a uma larga gama de aplicações.

Os aços inoxidáveis podem ser divididos em cinco famílias, sendo quatro delas baseadas nas características microestruturais: ferrítico, martensítico, austenítico ou duplex. A quinta família, as ligas com precipitados endurecidos, é baseada no tipo de tratamento térmico utilizado, ao invés da microestrutura.

Os aços inoxidáveis martensíticos têm estrutura cúbica/tetragonal de corpo centrado e são magnéticos. No estado recozido, eles têm a tensão de escoamento próxima a 275 MPa e podem ser moderadamente endurecidos por encruamento. Entretanto, ligas martensíticas são normalmente tratadas termicamente por têmpera para elevar a tensão de escoamento para 1900 MPa, dependendo principalmente do teor de carbono. Estas ligas têm boa ductilidade e resistência, as quais decrescem com o aumento da dureza (Chiaverini, 1984).

A martensita é uma fase metaestável, resultante da transformação da austenita. É uma solução sólida supersaturada de carbono, de estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), que é uma forma distorcida do ferro  $\alpha$  (ferrita). No entanto, aços com teores de carbono menores que 0,2% C, que é o caso do aço AISI 410 em estudo ( $< 0,1\%C$ ), não obedece à relação de que quanto maior o teor de carbono, maior é a tetragonalidade da martensita, tendo este aço uma estrutura cristalina CCC (Krauss, 1999).

Apesar das propriedades dos aços inoxidáveis, estes podem ser usinados sob condições apropriadas. Em geral, mais potência é requerida para usinar aços inoxidáveis que aços carbono, velocidades de corte devem geralmente ser menores e o sistema de fixação da ferramenta e da peça deve ser mais rígido. Quebra cavacos podem ser necessários nas ferramentas (Tekiner e Yelsilyurt, 2003).

A melhora da usinabilidade dos aços inoxidáveis geralmente está acompanhada de uma queda na resistência à corrosão. Nos últimos anos, tem-se utilizado a técnica de controle das inclusões óxidas para melhorar a usinabilidade, sem deterioração das outras propriedades. Isto é alcançado através de tratamento especial durante a fabricação do aço líquido. Além disso, a melhora na usinabilidade tem apresentado ainda algumas interferências nas propriedades mecânicas do aço. (Tessler e Barbosa, 2002).

A usinagem dos aços inoxidáveis pode produzir cavacos longos e fibrosos, os quais se tornam incômodo. A dificuldade pode ser reduzida utilizando ferramentas com quebra-cavacos que, além de controlar o comprimento do cavaco, diminuí o atrito entre a superfície de saída e o cavaco. Os quebra-cavacos para aços inoxidáveis com usinabilidade melhorada, os quais possuem enxofre e, algumas vezes, selênio, chumbo, telúrio e bismuto como elementos de liga, não precisam ser tão fundos quanto para os aços inoxidáveis convencionais. Por outro lado, a profundidade de corte e a taxa de avanço normalmente determinam a largura e altura do quebra-cavaco. Cavacos pesados necessitam de quebra-cavacos mais fundos, mas eles precisam ter a superfície de saída sem fragilidade (ASM, 1989).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios referentes a este trabalho foram de torneamento cilíndrico externo, e realizados considerando-se os parâmetros de usinagem para operações de acabamento. Inicialmente, esses parâmetros foram escolhidos de acordo com os valores normalmente utilizados pela indústria em processos de acabamento de componentes, fabricados a partir deste material. Para a realização dos ensaios, foram utilizadas barras de aço inoxidável martensítico AISI 410, cuja composição química está especificada na Tab (1).

**Tabela 1 - Composição química do aço inoxidável martensítico AISI 410.**

C	Cr	S	Mo	Si	Cu	Sn	Mn	Ni	Al	N	P
0,12	12,8	0,006	0,02	0,33	0,04	0,01	0,44	0,12	0,01	0,031	0,023

Os testes foram realizados em um torno CNC-CENTUR 30S, 25 a 3500 rpm, com potência de 10 KW, marca ROMI, do Laboratório de Estudo da Usinagem da UNESP de Guaratinguetá. Durante os ensaios não foi feita a aplicação de fluido de corte e foram utilizadas as seguintes pastilhas de metal de duro com recobrimento montadas no suporte PCLNR 2020K12:

- CNMG 120408 PM Sandvik Classe 4225 (ISO P2a5), denominada **PM**;
- CNMG 120412 MM Sandvik Classe 2015 (ISO M15), denominada **MM**;
- CNMG 120412 WM Sandvik Classe 2015 (ISO M15), denominada **WM**.

Na Tabela (2) estão indicados os parâmetros de corte e ferramentas usadas durante a execução dos ensaios.

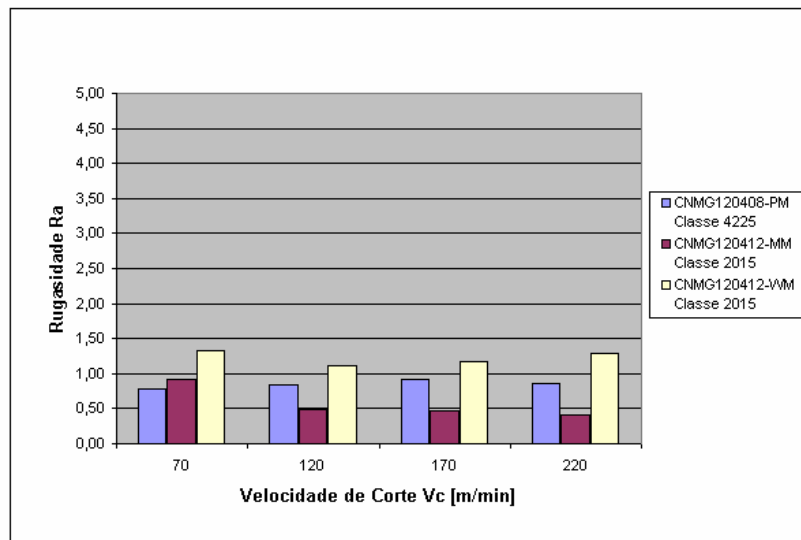
**Tabela 2. Valores dos parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios.**

Ferramentas	Vc (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)
<b>PM</b>			
<b>MM</b>	70, 120, 170 e 220	0,1; 0,2; 0,3 e	0,2
<b>WM</b>		0,4	

A rugosidade da peça foi avaliada após cada etapa do processo empregando-se um rugosímetro Mitutoyo SURFTEST SJ301. Por meio de microscopia óptica (microscópio Epiphot 200, Nikon) foi possível observar os aspectos da ferramenta de corte para cada condição avaliada. Quanto às fotografias digitais dos cavacos, estas foram feitas por meio da câmera digital Samsung S630 com 6.0 MP re resolução e lentes Samsung SHD.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A cada passe de usinagem realizado sobre o corpo de prova, mediu-se a rugosidade da superfície para o comprimento de avanço alcançado durante o mesmo. Foram feitas três medidas em torno do corpo de prova, dispostas a um ângulo de 120° ao final do passe de usinagem executado, foi utilizado um *cut-off* de 0,8mm para as medições. Os resultados para o avanço de 0,1 mm/v. são mostrados nos gráficos das Fig. (1) e (2).



**Figura 1. Rugosidade média Ra em função de Vc e da ferramenta, com ap = 0,2 mm e f = 0,1 mm/volta.**

Pode ser observado na Fig. (1) que o menor valor de Ra, para Vc = 70 m/min, é obtido com a utilização da ferramenta com raio de ponta 0,8 mm (PM), e o maior valor é resultante da usinagem com a pastilha WM. Isto ocorre possivelmente devido à formação da APC, que teve a sua ocorrência anotada diversas vezes durante os ensaios, já que a velocidade de corte é menor que o valor limite. Com um menor raio de ponta tem-se uma menor área de contato entre a ferramenta e peça, diminuído assim a formação da APC. A partir de Vc = 120 m/min, valor este próximo da velocidade limite, a ferramenta com raio de ponta 1,2 mm (MM), passa a apresentar o menor valor de Ra. A regra de que para um maior valor de raio de ponta têm-se menores valores de Ra não se mostrou verdadeira para baixas velocidades de corte, devido novamente à presença da APC, que faz com que o raio de ponta e o ângulo de saída da ferramenta tenham seus valores alterados.

Os valores de Ra, quando utilizada a pastilha WM, foram os maiores para estas condições. O avanço de 0,1 mm/volta foi o responsável por este resultado, já que estas pastilhas foram desenvolvidas para trabalhar com altos valores de taxa de avanço, aumentando assim a produtividade. Para baixos valores é possível observar muita dificuldade na formação do cavaco principalmente devido a maior área de contato entre peça e ferramenta, o qual prejudica a rugosidade. Como observado por Diniz (1999), o aumento do raio de ponta torna a ponta da ferramenta mais resistente, mas também aumenta a vibração da ferramenta devido ao acréscimo no atrito causado pela maior área de contato. O acabamento da superfície depende muito da relação entre avanço e raio de ponta.

São mostrados nas Fig. (2), (3) e (4) os resultados para ap = 0,2 mm e f = 0,2; 0,3 e 0,4 mm/volta, respectivamente.

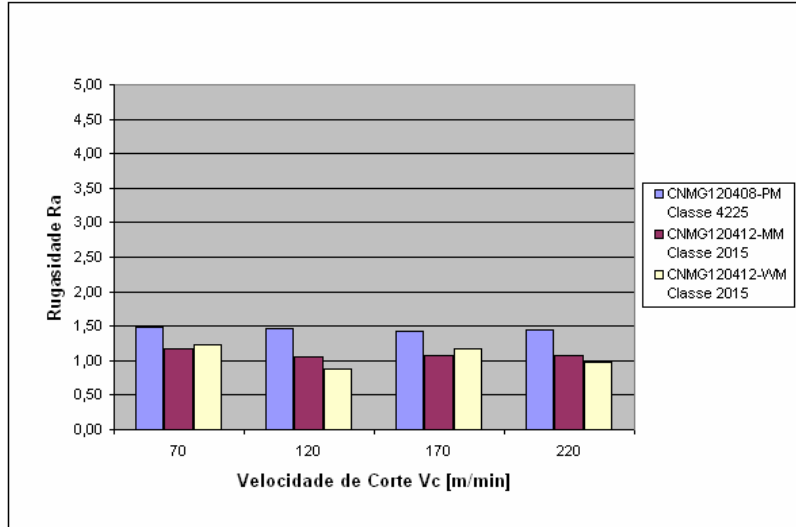


Figura 2. Rugosidade média Ra em função de Vc e da ferramenta, com  $a_p = 0,2$  mm e  $f = 0,2$  mm/volta.

Devido ao aumento do avanço para 0,2 mm/volta, a ferramenta WM passa a apresentar menores valores de Ra, com exceção de Ra obtido para as velocidades de 70 e 170 m/min, para as quais a ferramenta MM apresenta um valor pouco inferior ao obtido com a WM. Isto ocorre porque, com o crescimento do avanço ocorre um aumento da velocidade de avanço e, conseqüentemente, uma redução no atrito tornando o processo de corte mais dinâmico. O aumento do avanço também reduz o fluxo lateral de cavaco, que influencia positivamente na rugosidade, e reduz também a formação da APC pelo aumento da temperatura de corte e redução da velocidade crítica.

Para os valores de Vc = 170 m/min e 220 m/min tem-se a completa eliminação da formação da APC, daí a explicação para o fato da ferramenta MM ter seu desempenho muito próximo ao da WM nestas condições. Devido ao menor raio de ponta, a ferramenta Classe 4225 apresentou os maiores valores de Ra. A aresta postiça de corte se fez presente para Vc = 70 m/min e iniciou redução a partir de Vc = 120 m/min, valor aproximado da velocidade limite.

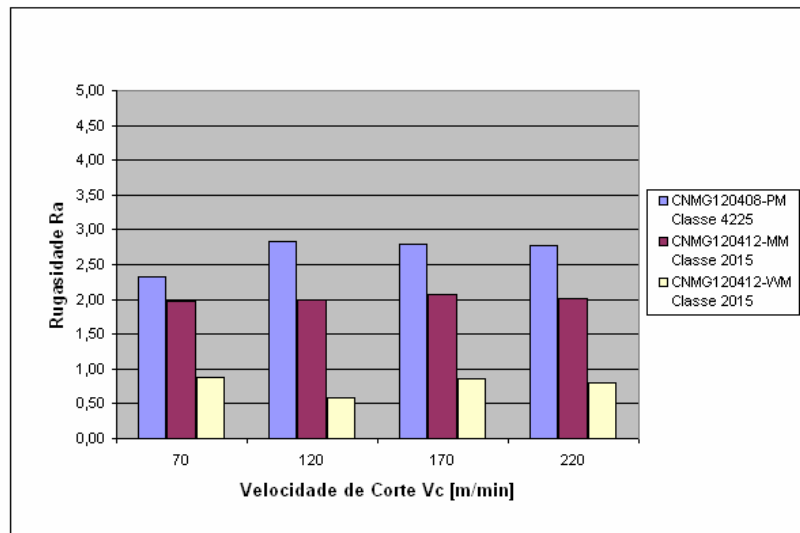


Figura 3. Rugosidade média Ra em função de Vc e da ferramenta, com  $a_p = 0,2$  mm e  $f = 0,3$  mm/volta.

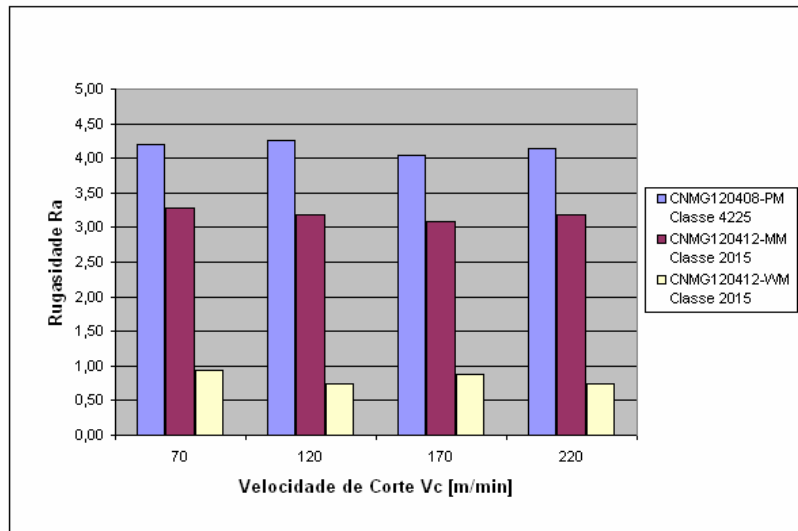
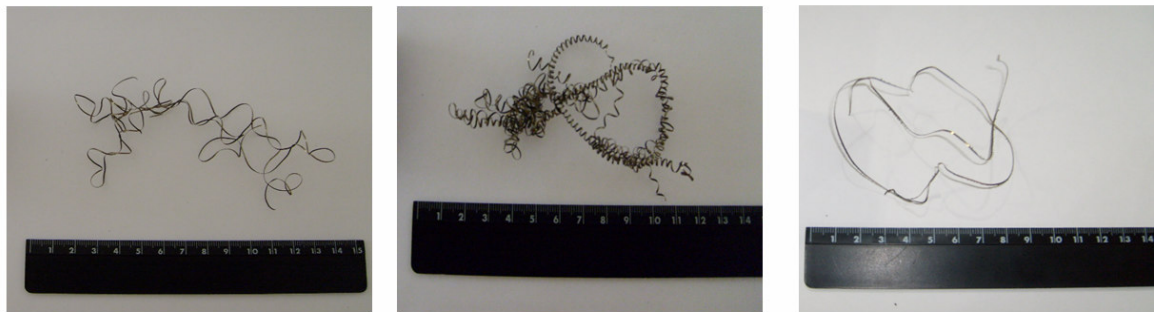


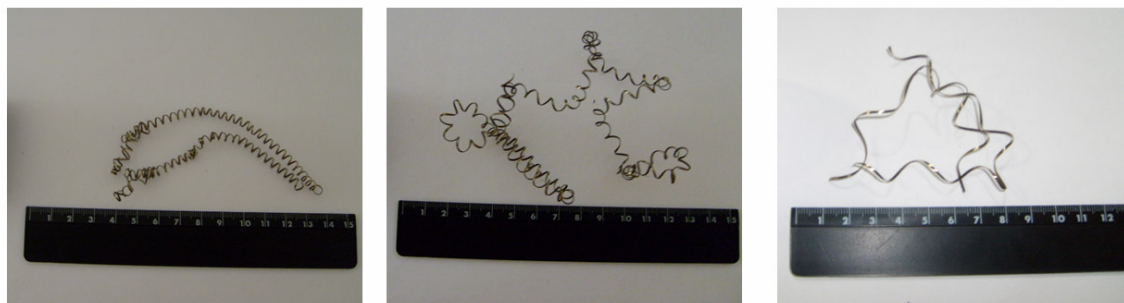
Figura 4. Rugosidade média Ra em função de  $V_c$  e da ferramenta, com  $a_p = 0,2$  mm e  $f = 0,4$  mm/volta.

Para os avanços de 0,3 e 0,4 mm/v. a pastilha **WM** apresentou os menores resultados de rugosidade para todas as velocidades de corte. Isto vai de encontro com o proposto pelo fabricante, que é obter a mesma rugosidade que uma ferramenta de raio 1,2 mm (**MM**), porém utilizando o dobro do avanço. Se observarmos, por exemplo, o desempenho da pastilha **MM**, a qual possui 1,2 mm de raio de ponta, para  $V_c = 170$  m/min e  $f = 0,2$  mm/v. tem-se um Ra de aproximadamente  $1,0 \mu\text{m}$ . Quando utilizada a pastilha **WM**, para as mesmas condições de corte, apenas utilizando-se  $f = 0,4$  mm/volta, tem um valor de Ra de  $0,8 \mu\text{m}$ . Com isto é possível aumentar a produtividade em processos de acabamento, reduzindo pela metade o tempo efetivo de corte, sem com isso prejudicar a rugosidade final obtida.

Durante a execução destes ensaios foram coletados os cavacos para serem analisados. Os cavacos foram coletados para os avanços de 0,1 e 0,4 mm/volta, para com isso serem analisadas as condições iniciais e finais dos ensaios. Os cavacos oriundos da usinagem com as velocidades de corte utilizadas são mostrados nas Figuras (5), (6), (7) e (8).



PM MM WM  
Figura 5. Cavaco obtido com  $V_c = 70$  m/min,  $f = 0,1$  mm/volta,  $a_p = 0,2$  mm.



PM MM WM  
Figura 6. Cavaco obtido com  $V_c = 70$  m/min,  $f = 0,4$  mm/volta,  $a_p = 0,2$  mm.





Figura 7. Cavaco obtido com  $V_c = 220$  m/min,  $f = 0,1$  mm/volta,  $a_p = 0,2$  mm.

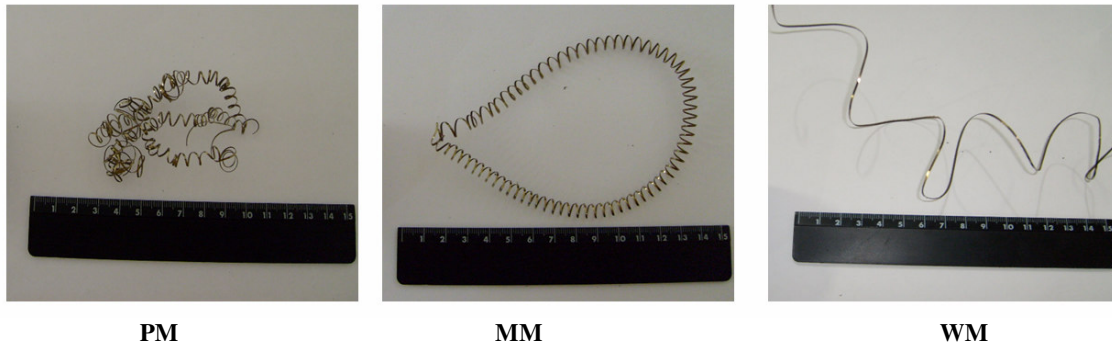


Figura 8. Cavaco obtido com  $V_c = 220$  m/min,  $f = 0,4$  mm/volta,  $a_p = 0,2$  mm.

Para  $V_c = 70$  m/min e  $f = 0,1$  mm/volta, o cavaco em fita obtido através da utilização da ferramenta classe **PM**, foi resultante das condições que propiciaram o menor valor de  $R_a$ . Aumentado o avanço para  $0,4$  mm/v., a grande alteração na forma do cavado e observada para a ferramenta de raio de ponta de  $0,8$  mm (**PM**), principalmente porque com o crescimento do avanço a velocidade de avanço aumenta e o coeficiente de atrito diminui, tornando o processo de corte mais dinâmico.

As alterações na forma dos cavacos não ocorrem de maneira significativa quando o avanço passa de  $0,1$  para  $0,4$  mm/volta para  $V_c = 220$  m/min, com exceção da ferramenta de raio de ponta  $0,8$  mm (**PM**). Isto se deve a um processo de corte mais dinâmico, para o qual o cavaco passa a apresentar uma forma mais definida.

Nas Figuras (9), (10) e (11) são apresentadas as ferramentas **PM**, **MM** e **WM**, respectivamente, utilizadas neste ensaio para o avanço de  $0,4$  mm/volta e  $V_c = 220$  m/min.

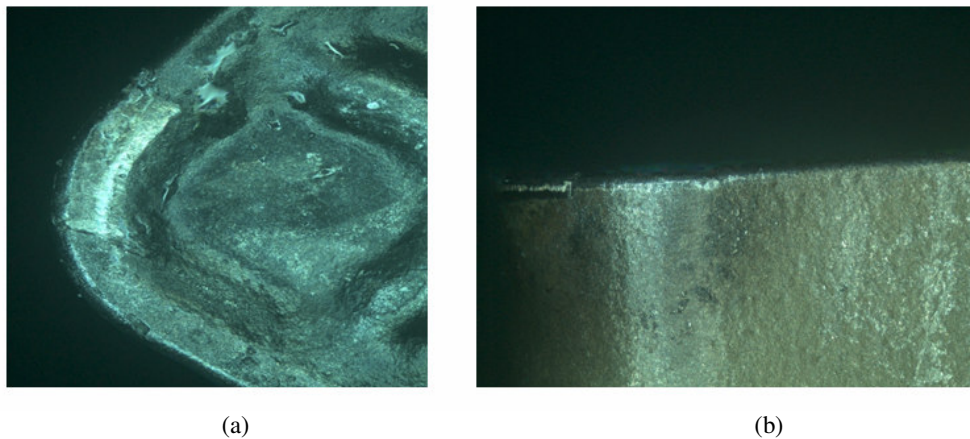


Figura 9. Ferramenta CNMG 120412 PM Classe 4225 (ISO P25) (a) superfície de saída e (b) aresta de corte.

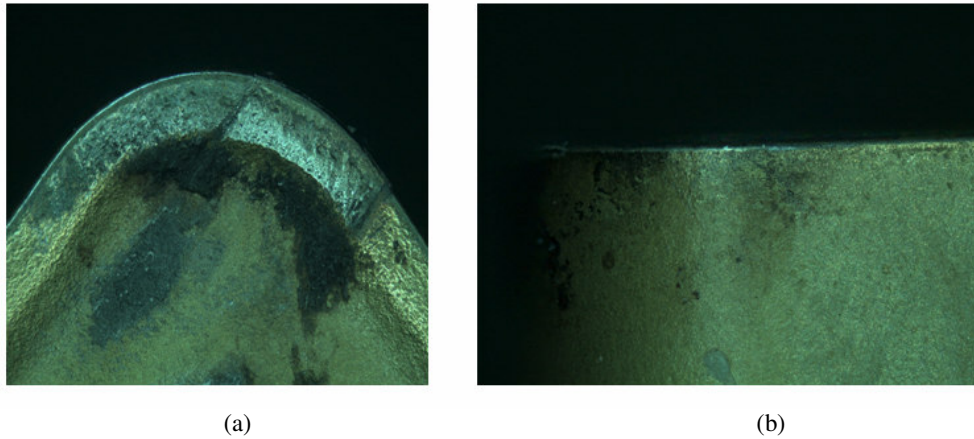


Figura 10. Ferramenta CNMG 120408 MM Classe 2015 (ISO M15) (a) superfície de saída e (b) aresta de corte.

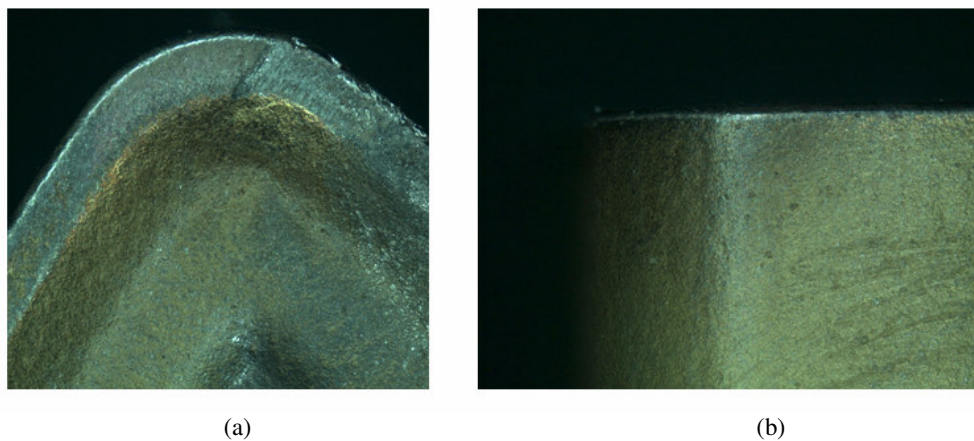


Figura 11. Ferramenta CNMG 120408 WM Classe 2015 (ISO M15) (a) superfície de saída e (b) aresta de corte.

Nas imagens das Fig. (9), (10) e (11), fica explícito que não houve evolução dos desgastes de flanco e cratera nas ferramentas utilizadas para os ensaios com velocidade de 220 m/min e avanço de 0,4 mm/v, ocorrendo apenas o arredondamento da aresta de corte. Fato este explicado principalmente devido à baixa severidade dos esforços de corte, já que os parâmetros de corte são para acabamento com baixos valores de  $a_p$  e  $f$ , e por último ao aparecimento da APC, que protege a aresta da ferramenta. O desgaste de cratera, que possui como principal mecanismo a difusão, não ocorreu porque não foram atingidas temperaturas suficientemente elevadas a ponto de propiciar a troca de átomos entre a ferramenta e o cavaco.

#### 4. CONCLUSÕES

Através dos resultados apresentados foi possível observar que para este conjunto de parâmetros, o desgaste da ferramenta não é um fator preponderante para a qualidade superficial, pois as ferramentas testadas não apresentaram níveis perceptíveis de desgaste mesmo para as condições mais severas, possivelmente em função da presença da APC, em pelos menos um estágio da operação fazendo com que a aresta ficasse momentaneamente protegida associado ao fato dos baixos valores de profundidade de usinagem utilizados. Quanto a influência na velocidade nos resultados esta foi praticamente imperceptível, proporcionando poucas alterações nas tendências dos valores de rugosidade.

O controle da forma do cavaco foi muito prejudicado em função dos parâmetros utilizados, os quais não permitiram a utilização do quebra-cavaco da ferramenta de forma mais adequada, porém os parâmetros estão associados a um problema real, de usinagem de um determinado componente. Assim sendo observou-se o cavaco variando no máximo de fita para helicoidal.

A ferramenta WM passou a ser uma opção viável desde que possa se trabalhar com altos avanços ( $> 0,3$  mm/v.) e velocidades de corte na faixa dos 120 m/min, onde se encontram os menores valores de rugosidade apresentados. Cabe acrescentar também que a não aplicação de fluido de corte favoreceu a operação como um todo, pois os resultados obtidos em termos de rugosidade e desgaste foram bem adequados.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido da FUNDUNESP, ALSTOM Hydro Energia e SANDVIK.

## 6. REFERÊNCIAS

- ASM Handbook, 1989, “ASM Handbook Volume 16: Machining”.
- Chiaverini, V. Aços e ferros fundidos. Associação Brasileira dos Metais, 420 p., 1984.
- Diniz, E. D.; Marcondes, F.C.; Coppini, N.L., 1999, “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”, Editora MM.
- Krauss, G., 1999, “Martensite in steel: strenght and structure”, Materials Science and Engineering, Vol. A, No 273-275, pp. 40-57.
- Nascimento, F.A. 2008, “Avaliação da usinabilidade do aço inoxidável AISI 410”, Dissertação, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá – UNESP.
- Teniker, Z., Yelsilyurt, S. 2003, “Investigation of the cutting parameters depending on process sound during turning of AISI 304 austenitic stainless steel”, Materials And Design, Vol. 25, pp. 507-513.
- Tessler, M.B., Barbosa, C.A., 2002, “Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis”, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Villares Metals.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# MACHINABILITY EVALUATION OF MARTENSITIC STAINLESS STEEL AISI 410 IN TURNING

Felipe Ayres Nascimento, felipe.ayres@power.alstom.com<sup>1</sup>

Marcos Valério Ribeiro, mvalerio@feg.unesp.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ALSTOM Hydro Energia - Av. Charles Schneider, s/n – CEP 12040-000, Taubaté/SP – Brazil

<sup>2</sup>Laboratory of Machining Study - São Paulo State University - UNESP - Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – CEP 12516-410, Guaratinguetá/SP - Brazil

**Abstract:** *The Martensitic Stainless Steel are generally Fe-Cr-C alloys containing from 11,5% to 18% of chromium, and from 0,09 to 0,15% of carbon, which are widely used in manufacturing of Hydraulic Turbines components due to the high resistance when chemical attacked by different ways, and also due to the mechanical resistance, when compared to others stainless steels. The work proposal is to study the superficial roughness in finishing machining of Martensitic Stainless Steel Grade 410 under different cutting conditions, since this requirement is essential for the functioning of some components. During the tests were varied the cutting parameters, which are the cutting speed, the feed rate and the tool designation, then the superficial roughness was measured by using a portable equipment existed at the Machining Studies Laboratory. The influence of the tool wear on the final roughness were disrespected, since during the pre-tests were not observed wear increasing even for high cutting lengths and for different cutting conditions. The tests were performed not using cutting fluid. After tests performing, the tools were analyzed on an optical microscope, and the images shown only roundness on the cutting edge and the loss of the TiN deposition on the rake face. The Wiper tool shown the better results for high values of feed rate and cutting speed, while the tool with 0,8 mm of nose radius shown the better results for lower values of feed rate and cutting speed.*

**Keywords:** *machining, AISI 410, wear, roughness, hydraulic turbines.*