



21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

AVALIAÇÃO DO ACABAMENTO GERADO NO TORNEAMENTO DO AÇO AISI 420C COM FERRAMENTA WIPER PARA DIFERENTES AVANÇOS E PROFUNDIDADES DE CORTE

André João de Souza, ajsouza@ufrgs.br
André Pieres, andre.pieres@ufrgs.br
Bruno Klahr, bruno.klahr@ufrgs.br
Giovani Luis Buseti, giovani.buseti@ufrgs.br
Guilherme Cortelini da Rosa, guilherme.cortelini@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) –
Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS), Rua Sarmento Leite, 425 – Porto Alegre, RS – CEP 90050-170.

Resumo: Pretende-se avaliar o acabamento da superfície torneada do aço inoxidável AISI 420C utilizando a ferramenta alisadora (wiper) com raio de ponta $r_e = 0,8$ mm sob diferentes combinações de avanço (f) e profundidade de corte (a_p). Para tanto, foram mensurados os parâmetros de rugosidade média (R_a) e total (R_t) e foi observada a aparência resultante da superfície usinada através de microscopia ótica. Na realização do experimento, a velocidade de corte foi mantida constante em $v_c = 290$ m/min e foram utilizados cinco valores de f (0,10; 0,12; 0,15; 0,20 e 0,30 mm/volta) e quatro de a_p (0,4; 0,8; 1,2 e 1,5 mm), resultando em vinte amostras. Através da análise da superfície foi possível constatar que a propriedade de alisamento da geometria wiper é parcialmente suprimida para $a_p = r_e = 0,8$ mm e $f \leq 0,15$ mm/volta, resultando em um pior acabamento com valores de $R_a > 1,25 \mu\text{m}$ e $R_t > 14,0 \mu\text{m}$. Observou-se também para $a_p = 0,8$ mm que os valores de R_a diminuem com $f \geq 0,20$ mm/volta. O pior acabamento para avanços menores se deve provavelmente pelas dificuldades de quebra e saída dos cavacos e o consequente esmagamento de parte destes sobre a superfície usinada. Por outro lado, os melhores resultados de rugosidade média e total foram obtidos com $a_p = 0,5 \cdot r_e = 0,4$ mm e $f = 0,15$ mm/volta ($R_a = 0,39 \mu\text{m}$ e $R_t = 2,73 \mu\text{m}$). Para as demais combinações de parâmetros, os valores de rugosidade média e total mantiveram-se em torno de $0,92 \mu\text{m}$ e $9,0 \mu\text{m}$ respectivamente. Com relação aos valores estimados teoricamente, estes ficaram distantes dos resultados práticos. As equações apresentadas por estudos anteriores não consideram a variação dos valores de rugosidade com a profundidade de corte, indicando não serem adequadas para o caso estudado.

Palavras-chave: Torneamento, Ferramenta wiper, Aço AISI 420C, Acabamento, Rugosidade.

1. INTRODUÇÃO

Gerar uma boa superfície em componentes torneados tornou-se uma demanda para operações de semiacabamento e até mesmo de desbaste. A tecnologia *wiper* tem permitido um novo meio para alcançar melhoria no desempenho da produção onde a chave é ser capaz de aumentar a velocidade de avanço (Sandvik, 2012).

Em geral, o acabamento superficial avaliado principalmente pela rugosidade tem significativa influência sobre a qualidade final do produto usinado. Ferramentas e parâmetros de corte devem ser escolhidos adequadamente para minimizar a ocorrência de defeitos nas peças e consequentes perdas econômicas. Estudos observam uma baixa qualidade em torneamento utilizando a ferramenta com geometria alisadora (*wiper*) empregando-se baixos avanços. Dentro deste contexto, buscaram-se meios para gerar superfícies com qualidade especificada e dentro do menor tempo de corte possível, eliminando especialmente operações futuras de acabamento como a retificação.

Em virtude da carência de informações sobre o desempenho da ferramenta de corte com geometria *wiper*, o objetivo deste estudo é avaliar o acabamento gerado no torneamento do aço inoxidável martensítico AISI 420C utilizando esta ferramenta em diferentes combinações de avanços e profundidades de corte. Como metodologia de análise, pretende-se verificar as rugosidades média (R_a) e total (R_t) e observar a superfície através de microscopia ótica.

1.1. Textura e Integridade Superficial

Segundo Machado *et al.* (2009), a condição superficial final de uma peça é o resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibrações, tensões residuais e, às vezes, reações químicas. A integridade superficial não pode ser definida em apenas uma direção e não abrange somente a textura da superfície ou sua forma geométrica, mas sintetiza de uma forma geral um grande número de alterações sofridas na superfície. Existem muitas maneiras de se avaliar uma superfície, a partir de ensaios adicionais de fadiga, tensões residuais, corrosão, entre outras. Essas técnicas podem ser destrutivas ou não destrutivas, de fácil execução e ter alto custo, já que dependem dos requisitos que a peça exige.

Operações de torneamento geralmente induzem tensões residuais nas camadas mais próximas à superfície usinada e o acabamento resultante se deve à combinação de vários fatores, entre eles rugosidade, ondulações e falhas. Esta qualidade do acabamento superficial tem de ser prevista em projeto e depende da função da peça.

As ondulações são erros geométricos com irregularidades maiores que as consideradas rugosidades. São causadas por vibrações, flexões devido à força de usinagem, erros de fixação da peça, entre outros.

A rugosidade de uma superfície são irregularidades finas ou erros microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte. Geralmente é utilizada como parâmetro de saída na usinagem para controlar um processo, sendo dependente de vários outros parâmetros como máquina-ferramenta, propriedades do material da peça e ferramenta, e operação de usinagem. Os fatores que têm grande influência sobre a rugosidade são principalmente: o avanço (f), o raio de ponta (r_e) da ferramenta de corte, a maneira como a peça está fixada na máquina e as condições da peça e da máquina operatriz. Ainda pode haver problemas com a remoção do cavaco, provocando o denominado fluxo lateral que ocorre na superfície de folga, onde somente uma porção de material é removida em forma de cavaco; o restante fica na peça em forma de rebarbas dos sulcos formados, prejudicando o acabamento (Machado *et al.*, 2009).

A rugosidade é de grande importância, podendo ser relacionada com vários fatores: precisão e tolerância dimensional, resistência à corrosão, resistência à fadiga, escoamento de fluidos, lubrificação e transferência de calor.

1.1.1. Parâmetros para a quantificação da rugosidade

Dentre os principais parâmetros que quantificam a rugosidade segundo a Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), destaca-se a rugosidade média (R_a), que é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas em relação à linha média no comprimento de amostragem. Este parâmetro é o mais comum devido à facilidade na medição, porém isoladamente não é suficiente para identificar algumas características importantes da superfície. Portanto, precisa-se de outro parâmetro. Outro que é bastante utilizado é a rugosidade total (R_t), que consiste na soma da maior altura de pico e maior profundidade de vale em relação a uma linha média no comprimento de amostragem (Machado *et al.*, 2009).

De acordo com Machado *et al.*, (2009), o comprimento de amostragem (L_r) é definido, segundo a mesma norma citada anteriormente, como sendo o comprimento na direção x usado para identificar as irregularidades características do perfil sob avaliação. Já o comprimento de avaliação (L_n) é o comprimento na direção x usado para estabelecer o perfil em avaliação e pode conter um ou mais comprimentos de amostragem.

A Figura (1) mostra a esquematização gráfica dos parâmetros de rugosidade apresentados (R_a e R_t), onde L é a extensão da amostra, x é a abscissa do perfil $P(x)$ e LM é a linha média.

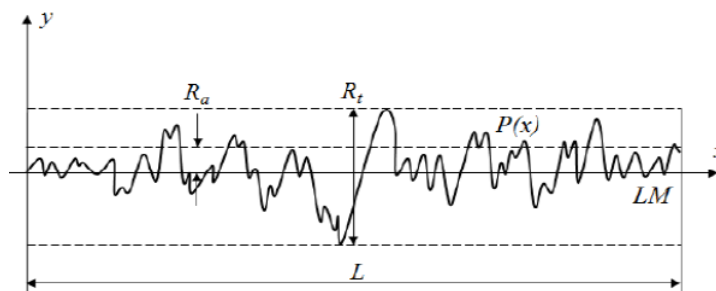


Figura 1. Rugosidade R_a e R_t em um perfil de superfície $P(x)$ (Mello *et al.*, 2012).

1.1.2. Cálculo da rugosidade no processo de torneamento com ferramenta wiper

Pode-se ter apenas uma estimativa teórica dos parâmetros R_a e R_t para a ferramenta com geometria wiper, já que os valores reais estarão acrescidos de diversos outros fatores. No processo de torneamento, quando o avanço (f) é menor que o raio de ponta (r_e), uma aproximação desses parâmetros pode ser dada respectivamente pelas Eq. (1) e (2) de acordo com Mello *et al.* (2012) e pelas Eq. (3) e (4) conforme Geier e Souza (2014):

$$R_a = 0,52 + 3,56 \cdot \left(\frac{f}{r_e} \right)^{2,12} \quad (1)$$

$$R_t = \frac{0,667}{f} + 282 \cdot f^{\left(4,4 - \frac{0,664}{r_\epsilon}\right)} \quad (2)$$

$$R_a = 0,25 \cdot r_\epsilon + 0,06 \cdot e^{\left(6,8 \cdot f + \frac{0,63}{r_\epsilon}\right)} \quad (3)$$

$$R_t = 3,5 \cdot \ln(r_\epsilon) + 1,12 \cdot e^{\left(3,9 \cdot f + \frac{0,53}{r_\epsilon}\right)} \quad (4)$$

1.2. A Família dos Aços Inoxidáveis

Desde que os aços começaram a ser fabricados e utilizados, vários meios de retardar ou prevenir corrosão têm sido largamente empregados. Métodos como pintura ou cobertura com outros materiais têm ajudado a inibição da corrosão dentro dos ambientes a que os metais estão sujeitos, contudo estas soluções possuem um tempo de vida útil muito limitado. Reaplicações destas coberturas se tornam necessárias com frequência, e ocasionalmente a corrosão consegue atacar o aço que se encontra sob esta camada protetora e causar danos irreversíveis. A mistura de elementos de liga ao aço tornou-se então uma opção mais inteligente para o processo de prevenção de corrosão, porque proporciona proteção não só na camada externa, mas também em toda a seção no interior do aço (ASM, 1995). Estes aços-liga são conhecidos como aços inoxidáveis, e são basicamente ligas de ferro, carbono, cromo e níquel, com teor de carbono comumente em torno de 0,15% (com variações para cada especificação) e teor de cromo de no mínimo 11,5% em sua composição (ASM, 1995). Outros elementos de liga auxiliam nas propriedades anticorrosivas e podem estar presentes, como manganês, molibdênio, titânio, selênio, vanádio e tântalo, entre outros. Todavia, o cromo quando ligado ao aço é o principal responsável pelo mecanismo de proteção, pois age na formação de uma camada de óxido na superfície do material, impedindo a passagem de oxigênio para o interior da seção. Ainda que seja removida uma porção deste aço, por exemplo, em um eventual processo de usinagem, uma nova camada “passiva” e impermeável de óxido se formará na superfície, protegendo a nova área exposta (ASM, 1998). Esta proteção também possui certos pontos fracos, pois o aço inoxidável, apesar do nome, ainda é capaz de ser atingido por corrosão em certas circunstâncias no ambiente em que se encontra; mas este tipo de defesa é relativamente muito mais eficiente para o objetivo a que se propõe.

De acordo com a American Society of Metals (1998) os aços inoxidáveis são divididos em cinco grupos, conforme a sua microestrutura: austeníticos, martensíticos, ferríticos, austeníticos-ferríticos (duplex) e endurecidos por precipitação. A Figura (2) ilustra estes grupos, relacionando a quantidade de cromo e de níquel em sua composição; mostra também a usinabilidade relativa destes materiais em relação ao ferrítico (similar à classe ISO P – Aços). Neste texto dar-se-á importância maior ao grupo martensítico, mais especificamente o aço inoxidável de designação AISI 420C. Segundo Bramfitt e Benschoter (2002) este grupo tem seu nome oriundo da capacidade de mudança de sua estrutura cristalina, já que quando temperado pode ter sua estrutura transformada completamente em martensita.

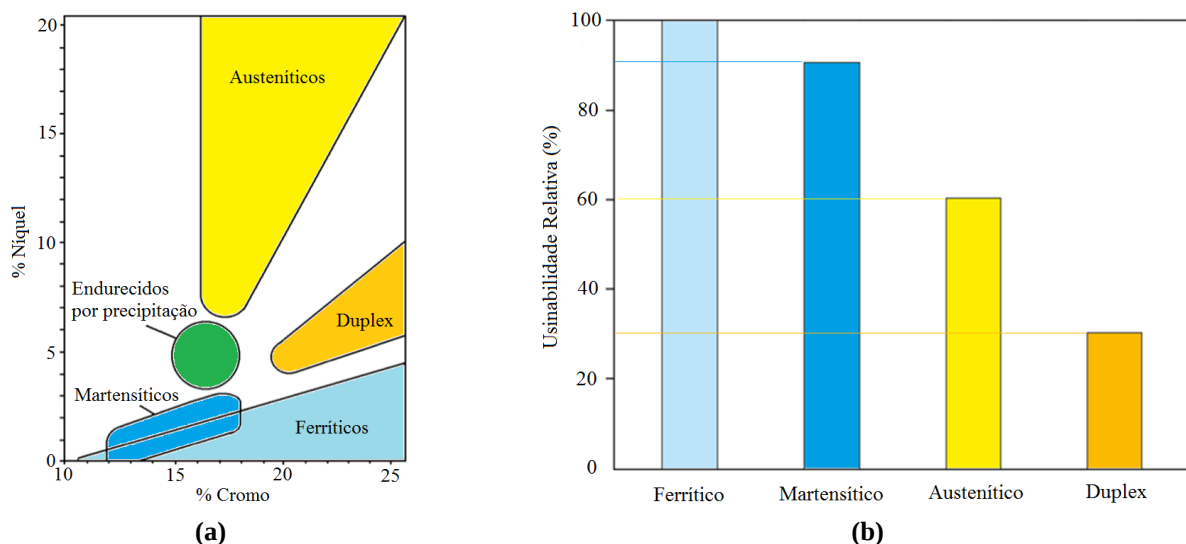


Figura 2. Aços inoxidáveis: (a) relações entre as diferentes famílias (ASM, 2003); (b) Usinabilidade relativa (Sandvik, 2014).

1.2.1. O Aço inoxidável martensítico AISI 420C

Este aço inoxidável pode ser endurecível por tratamento térmico, temperado ao óleo ou ao ar, é ferromagnético e possui em sua composição 0,40-0,45% de carbono (C), 12-14% de cromo (Cr), 1% de manganês (Mn), 1% de silício

(Si), 0,04% no máximo de fósforo (P) e 0,03% no máximo de enxofre (S). O sufixo “C” designa a quantidade maior de carbono neste aço frente ao AISI 420, o que confere maiores resistências mecânica e ao desgaste. Sua capacidade anticorrosiva suporta atmosferas brandas, água pura e algumas substâncias químicas, mas não é resistente a meios agressivos como o industrial e o marinho (Chiaverini, 1996). Possui razoável tenacidade e, depois de temperado e revenido, atinge altas durezas (52 a 60 HRC). Tem boa usinabilidade, que é ainda melhorada com a adição de elementos como o selênio (Se) e o enxofre (S) (ASM, 1998). Alguns campos de aplicações para este aço inoxidável são: cutelaria, instrumentos cirúrgicos e dentais, eixos de bombas, válvulas, peças de motores a jato, mancais esféricos, moldes plásticos, parafusos e buchas (Chiaverini, 1996).

1.3. A Ferramenta Alisadora (*Wiper*)

O acabamento em torneamento depende de uma variedade de fatores: tamanho do raio de ponta; velocidade de avanço; estabilidade do processo; peça de trabalho; fixação da ferramenta e a condição da máquina-ferramenta.

A relação convencional no torneamento é de que o acabamento da superfície está diretamente relacionado com o avanço por volta da ferramenta (f) e o tamanho do raio de ponta (r_e). Um alto f proporcionará menor tempo de usinagem, mas um acabamento pobre. Um grande r_e irá gerar uma superfície com melhor acabamento e garante maior resistência à quina da ferramenta; mas um excessivo r_e pode conduzir a vibrações devido ao maior atrito causado pela maior área de contato entre peça e ferramenta, insatisfatória quebra de cavaco e curto tempo de vida da ferramenta (Sandvik, 2012). Isso tem se tornado menos absoluto nos últimos anos com a introdução dos inserts *wiper* desenvolvidos para acabamento de alto f . A geometria única destes inserts reduz a interferência de f na qualidade da superfície, levando a uma usinagem mais produtiva para acabamentos superficiais finos (Production Machining, 2014).

Segundo American Machinist (2014), a tecnologia *wiper* para torneamento é baseada no cuidadoso desenvolvimento de uma série de raios que dão forma à quina da ferramenta. Em um inserto convencional (*standard*), o raio de ponta é formado por apenas um raio. A quina da *wiper*, entretanto, é composta por um grande raio principal (r_e) complementado por vários raios menores (r_w), como mostra a Fig. (3).

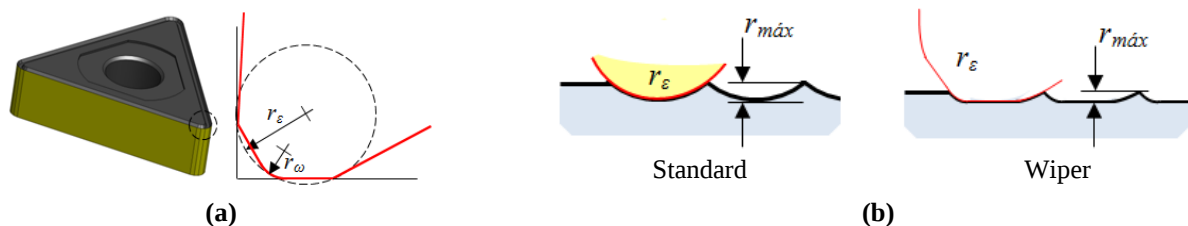


Figura 3. Geometria da ferramenta: (a) raios (r_e e r_w) e faces planas na ponta do inserto *wiper*, (b) comparação entre as geometrias *standard* e *wiper* (Mello, et al., 2012).

De acordo com Sandvik (2012), o raio de ponta em uma pastilha alisadora (*wiper*) tem sua construção utilizando de 3 a 9 raios diferentes. Isso aumenta o comprimento de contato das pastilhas de modo que tanto os valores de avanço (f) quanto de profundidade de corte (a_p) possam ser o dobro dos valores usados nas ferramentas convencionais sem depreciar o acabamento superficial da peça. Esta pequena alteração na geometria do raio de ponta, além de suas faces planas, permite que os minúsculos picos e vales encontrados na superfície do material, que seriam deixados para trás em função da utilização da geometria convencional, sejam eliminados, o que proporciona ganho produtivo com qualidade superficial superior (Sandvik, 2012; Production Machining, 2014).

Uma importante característica adicional é o aumento na capacidade de quebrar o cavaco. Geometrias *wiper* são também desenvolvidas para combinar bom controle do cavaco em baixo avanço e suave quebra do cavaco em altos e produtivos avanços (American Machinist, 2014).

Dependendo dos objetivos das empresas, os resultados no uso da ferramenta *wiper* podem variar de um grande aumento da produtividade até uma alta qualidade no acabamento da superfície (Sandvik, 2012; Production Machining, 2014). A Figura (4) ilustra as duas possibilidades vantajosas do uso da geometria *wiper* em relação à *standard*: dobrar a velocidade de avanço para minimizar o tempo de processamento mantendo o mesmo nível de rugosidade e acabamento, Fig. (4b); ou manter o mesmo avanço e aumentar em duas vezes o nível do acabamento da superfície, Fig. (4c).

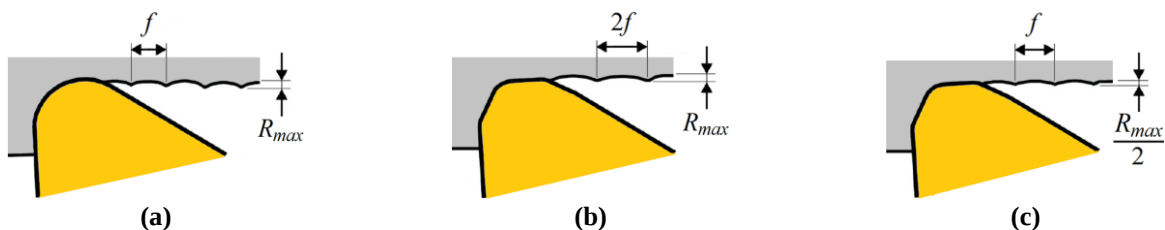


Figura 4. Esquema da formação da rugosidade na superfície durante o torneamento: (a) geometria *standard*; (b, c) geometria *wiper* (Nassif et al., 2013).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O inserto utilizado para esta investigação tem aplicação específica para usinagem de acabamento ou desbaste leve em aços inoxidáveis. Possui geometria triangular (TNMX), com formato básico negativo (TMax-P), quebra-cavacos para torneamento de acabamento (WF), raio de ponta (r_e) de 0,8 mm e cobertura CVD (do inglês *Chemical Vapor Deposition*) de TiN-Al₂O₃-TiCN (GC2015). Além disso, segundo Sandvik (2012), seu substrato é desenvolvido para suportar elevadas temperaturas e velocidades de corte. A cobertura multicamada de 5,5 μ m fornece boa proteção contra calor e desgaste, reduz o atrito e a formação de arestas postiças (APC).

A Tabela (1) mostra as especificações recomendadas pelo fabricante para o inserto utilizado para definir os parâmetros da máquina (v_c , f e a_p) utilizados no experimento.

Tabela 1. Especificações da ferramenta utilizada.

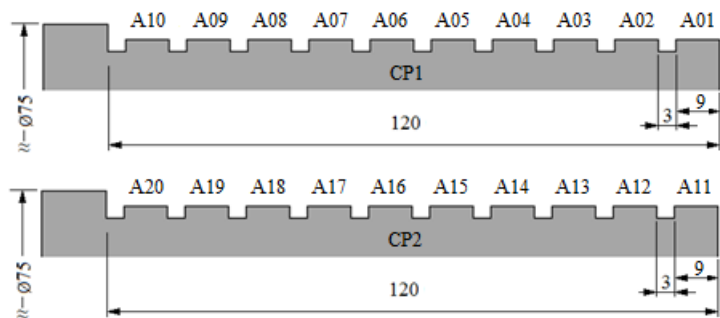
Geometria	Especificação do inserto	Parâmetros de corte		
		v_c [m/min]	f [mm/volta]	a_p [mm]
wiper	TNMX 160408-WF	270 (240 – 290)	0,30 (0,10 – 0,40)	1,50 (0,20 – 3,00)

A usinagem dos corpos de prova foi realizada no torno CNC Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II, Fig. (5a).

O procedimento experimental constitui-se no torneamento de acabamento a seco de dois corpos de prova de aço AISI 420C dividido em 10 seções com comprimento médio de 9 mm cada, Fig. (5b), totalizando 20 amostras (de A01 a A20). A velocidade de corte (v_c) foi mantida constante a 290 m/min. O avanço por volta (f) e a profundidade de corte (a_p) foram variadas segundo a Tab. (2).



(a)



(b)

Figura 5. (a) Torno CNC Mazak QTN 100-II; (b) Desenho esquemático dos corpos de prova para o procedimento experimental com 10 seções (amostras) cada.

Tabela 2. Parâmetros de corte utilizados e amostras geradas.

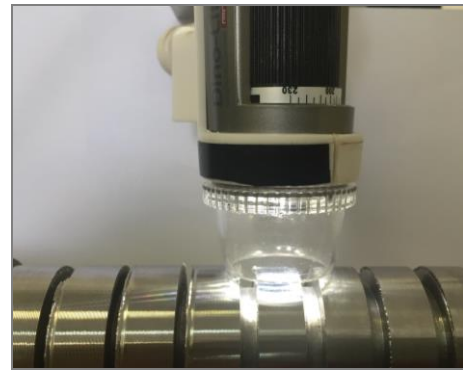
		a_p [mm]			
		CP1		CP2	
		0,4	0,8	1,2	1,5
f [mm/volta]	0,10	A10	A05	A20	A15
	0,12	A09	A04	A19	A14
	0,15	A08	A03	A18	A13
	0,20	A07	A02	A17	A12
	0,30	A06	A01	A16	A11

Para a medição dos parâmetros de rugosidade média (R_a) e total (R_t) foi utilizado um rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201P com resolução de 0,01 mm. Para realizar a medição, o corpo de prova foi retirado do torno CNC e fixado em uma base magnética. As medições foram realizadas em três planos defasados em 120°, utilizando um comprimento de amostragem (*cut-off*) de 0,8 mm e um comprimento de medição $L = 0,8 \times 5 = 4$ mm (Fig. 6a).

Para examinar a superfície das amostras, foi utilizado o microscópio digital USB Dino-Lite modelo AM-413ZT, com resolução de 1024 x 768 e ampliação de 215x (Fig. 6b). Para a obtenção das imagens, o corpo de prova foi retirado da máquina-ferramenta e colocado sobre um suporte adaptado.



(a)



(b)

Figura 6. (a) Procedimento de medição de R_a da amostra A05; (b) Procedimento de avaliação da textura.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores medidos de rugosidade R_a e R_t para os vinte segmentos do corpo de prova são apresentados na Tab. (3) para as diferentes configurações de avanço e profundidade de corte.

Através dos dados da Tab. (3) foram gerados os gráficos dos valores médios de rugosidade com os respectivos valores de erros inerentes à medição, calculados sob um índice de confiança de 95% e mostrados nas Fig. (7) e (8).

Tabela 3. Valores médios medidos de R_a e R_t para o corpo de prova

		Profundidade de corte a_p [mm]							
		0,4		0,8		1,2		1,5	
		R_a [μm]	R_t [μm]	R_a [μm]	R_t [μm]	R_a [μm]	R_t [μm]	R_a [μm]	R_t [μm]
Avanço f [mm/volta]	0,10	0,58	10,84	1,51	14,44	1,05	9,50	0,91	9,96
		0,64	9,16	1,68	20,61	1,13	11,27	1,08	18,51
		0,58	4,81	1,73	17,65	0,91	10,15	0,71	10,01
	0,12	0,68	10,92	1,12	12,05	1,04	11,42	0,89	11,10
		0,74	8,85	1,47	17,60	1,05	12,96	0,94	11,14
		0,43	3,82	1,30	13,67	1,29	14,53	1,28	14,96
	0,15	0,45	2,44	1,26	15,16	0,98	10,31	1,23	11,95
		0,35	2,85	1,29	12,35	1,05	11,61	0,84	9,05
		0,37	2,91	1,22	16,56	1,13	12,79	1,16	13,72
	0,20	0,59	4,67	1,07	9,42	0,97	6,35	1,01	7,58
		0,66	4,21	1,03	10,38	0,98	6,28	1,05	7,48
		0,62	4,89	0,95	9,06	0,96	6,81	1,09	8,40
	0,30	0,70	5,78	0,62	5,22	0,80	8,71	0,98	6,48
		0,81	6,70	0,85	7,15	1,08	7,48	1,10	7,81
		0,90	6,45	1,06	10,01	0,98	5,85	1,10	7,41

3.1. Análise dos Valores Empíricos

A Figura (7) mostra o gráfico dos valores médios de rugosidade R_a determinados a partir do cálculo da média aritmética das três medições realizadas para cada amostra da Tab. (3). As barras de erros representam a incerteza expandida em função do desvio padrão das três medições com uma confiança de 95%.

Pode-se observar que para a profundidade de corte $a_p = 0,4$ mm e todos os avanços (amostras A06 a A10), os valores médios de R_a ficaram abaixo de $1,0 \mu\text{m}$. Segundo Souza *et al.* (2013), este valor indica uma operação de acabamento fino em torneamento, pois fica abaixo de $1,25 \mu\text{m}$. No entanto, observou-se uma grande dispersão dos valores medidos, principalmente para o avanço $f = 0,12$ mm/volta (amostra A09). Vale destacar a qualidade da rugosidade média gerada na amostra A8: $R_a = (0,39 \pm 0,13) \mu\text{m}$.

Também é possível visualizar que para profundidades de corte maiores (1,2 e 1,5 mm), praticamente não houve modificação dos valores de rugosidade com a alteração do avanço, ou seja, as amostras de A11 a A20 apresentaram valores médios de R_a próximos de $1,0 \mu\text{m}$. Mesmo assim, ainda manteve-se um nível aceitável de acabamento segundo Souza *et al.* (2013). E novamente houve uma maior tendência a maiores dispersões dos valores registrados para avanços menores ($f \leq 0,15$ mm/volta) – exceção para o passe A16 ($f = 0,30$ mm/volta).

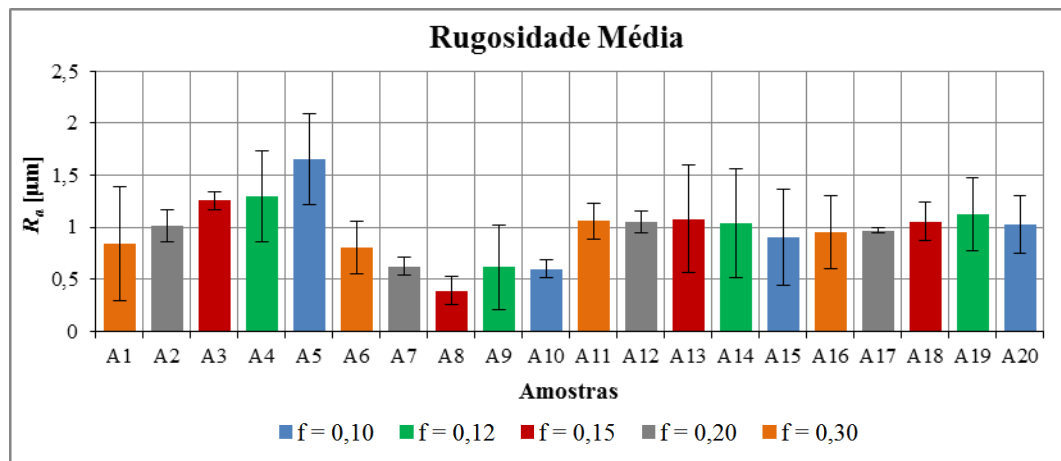


Figura 7. Gráfico de rugosidade média “ R_a ” após a usinagem do AISI 420C.

Os resultados mais negativamente expressivos foram os encontrados com $a_p = r_e = 0,8$ mm (amostras A01 a A05), onde se observou pela Fig. (7) que os valores médios de R_a aumentam com a diminuição do avanço. Outra constatação foram as dispersões para avanços menores ($f \leq 0,12$ mm/volta) – exceto para o passe A01 ($f = 0,30$ mm/volta).

Uma possível explicação para o aumento da dispersão para $f = 0,30$ mm/volta nos passes A1 ($a_p = 0,8$ mm) e A16 ($a_p = 1,2$ mm) seria a vibração gerada na ação do corte com a ferramenta *wiper* para esta combinação de parâmetros.

A Figura (8) mostra o gráfico dos valores médios de rugosidade R_a determinados a partir do cálculo da média aritmética das três medições realizadas para cada amostra da Tab. (3). As barras de erros representam a incerteza expandida em função do desvio padrão das três medições com uma confiança de 95%.

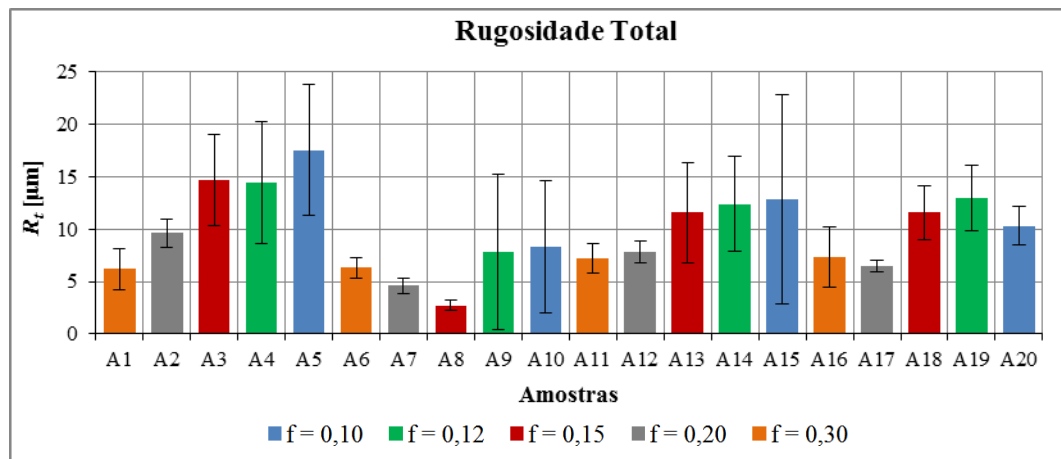


Figura 8. Gráfico de rugosidade total “ R_t ” após a usinagem do AISI 420C.

Verifica-se que para a profundidade de corte $a_p = 0,4$ mm e todos os avanços (amostras A06 a A10), os valores médios de R_t ficaram abaixo de $10 \mu\text{m}$. No entanto, observou-se maiores amplitudes médias e maiores dispersões dos valores coletados, principalmente para avanços menores, ou seja, para $f \leq 0,12$ mm/volta (amostras A09 e A10). Novamente vale destacar a qualidade da rugosidade total gerada na amostra A8: $R_t = (2,73 \pm 0,64) \mu\text{m}$.

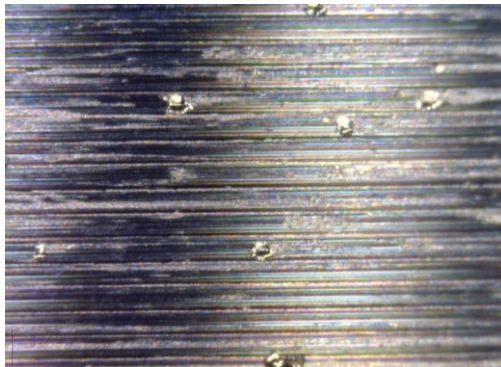
Pode-se visualizar para as amostras de A11 a A20 da Fig. (8) que os valores médios de rugosidade R_t tendem a aumentar com a diminuição do avanço e sofrem pouca variação com o aumento da profundidade de corte. Ao aumentar a profundidade de corte de $a_p = 1,2$ mm para $a_p = 1,5$ mm, notam-se maiores dispersões dos valores registrados para avanços menores ($f \leq 0,15$ mm/volta) – novamente exceção para o passe A16 ($f = 0,30$ mm/volta). Chama a atenção a grande dispersão dos resultados do passe A15 ($a_p = 1,5$ mm e $f = 0,10$ mm/volta), possivelmente pela detecção de uma rebarba (pico elevado) ou um risco profundo (grande vale) na superfície durante a segunda medição (vide Tab. (3)).

Assim com para R_a , os resultados mais insatisfatórios de R_t foram os encontrados com $a_p = r_e = 0,8$ mm (amostras A01 a A05), onde se vê que os valores médios de R_t crescem com a redução do avanço. Outra constatação foi as dispersões para avanços menores ($f \leq 0,15$ mm/volta).

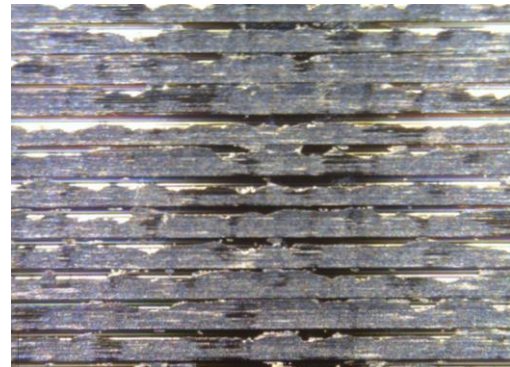
Para melhor avaliar os estados da superfície (rebarbas, riscos, marcas etc.), optou-se por analisar as amostras através do microscópio. As observações revelaram que as superfícies das amostras apresentam pouco ou quase nenhum cavaco aderido ou esmagado e possuem um bom aspecto em termos de riscos e marcas do processo. Isto se deve ao fato da usinagem ser executada com uma profundidade de corte pequena, característica dos processos de acabamento em que baixas taxas de remoção de material são alcançadas e onde pouca superfície do inserto é empregada.

Uma maior profundidade de corte da ferramenta gera sulcos mais profundos na superfície, o que consequentemente gera grandes amplitudes de picos e vales. Este parâmetro de entrada implica em uma maior área de contato do inserto com a peça, permitindo que a propriedade de alisamento da geometria *wiper* se apresente de forma mais efetiva.

As imagens no microscópio confirmam o efeito de alisamento da superfície pela atenuação dos picos, porém os altos níveis de rugosidade total supõem a permanência dos vales (Fig. 9).



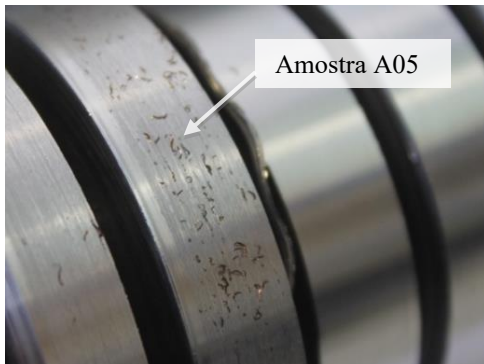
(a) $a_p = 0,4 \text{ mm}$; $f = 0,12 \text{ mm/volta}$



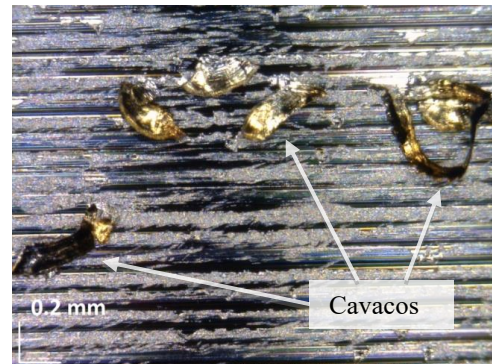
(b) $a_p = 1,5 \text{ mm}$; $f = 0,15 \text{ mm/volta}$

Figura 9. Imagens da superfície usinada (ampliação 200 x): (a) Amostra A09; (b) Amostra A13.

A Figura (10) mostra uma composição de imagens macro e microgeométricas do pior resultado relativo de acabamento superficial encontrado no experimento (amostra A05), que consiste no menor avanço empregado ($f = 0,10 \text{ mm/volta}$) e profundidade de corte igual ao raio de ponta da ferramenta ($r_e = 0,8 \text{ mm}$). É nítida pela Fig. (10b) a quantidade de cavacos aderidos à superfície, assim como os sulcos resultantes da passagem da ferramenta onde, nas zonas entre estes (áreas cinza-claro), houve o processo de esmagamento de material.



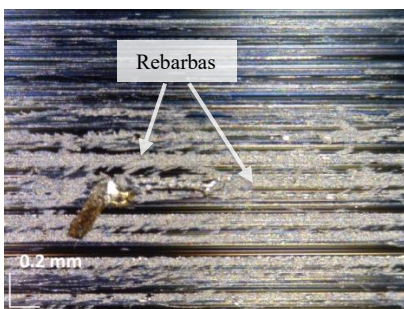
(a) Imagem macrogeométrica (ampliação 50x).



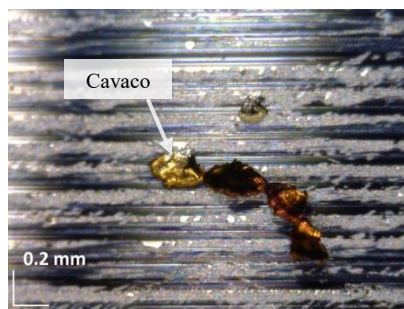
(b) Imagem microgeométrica (ampliação 200x).

Figura 10. Superfície da amostra A05 ($a_p = 0,8 \text{ mm}$; $f = 0,10 \text{ mm/volta}$) observada após usinagem.

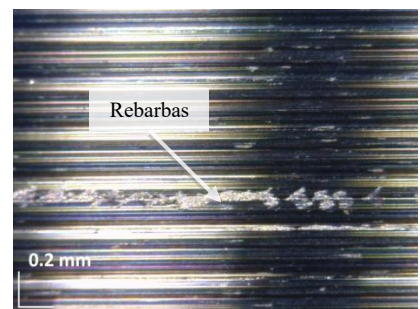
A Figura (11) mostra a superfície do corpo de prova usinada com profundidade de corte igual ao raio de ponta da ferramenta ($a_p = r_e = 0,8 \text{ mm}$), porém com avanços diferentes, mostrando a evolução da qualidade de acabamento através da diminuição de cavaco aderido na superfície e das rebarbas entre os sulcos com o aumento do avanço.



(a) $f = 0,12 \text{ mm/volta}$



(b) $f = 0,15 \text{ mm/volta}$



(c) $f = 0,30 \text{ mm/volta}$

Figura 11. Superfícies do corpo de prova observadas no microscópio após a usinagem (ampliação 200x): (a) Amostra A04; (b) Amostra A03; (c) Amostra A01.

Um primeiro aspecto a ser abordado consiste na dificuldade da quebra e consequente saída do cavaco, pois como o avanço é pequeno, tem-se uma espessura reduzida proporcional a este. O fato de a ponta da ferramenta com geometria *wiper* ser composta por microsegmentos de arestas retilíneas faz com que o contato entre a superfície da peça e o inserto ocorra sob uma área maior e, por conseguinte, um tempo de contato maior. Algumas destas arestas, diferentemente orientadas, eventualmente se encontram paralelas à trajetória do avanço da ferramenta, podendo atuar de maneira a dificultar a saída do cavaco gerado. Para menores avanços esta situação se agrava, pois com a menor velocidade de deslocamento o tempo de contato da ponta com a área usinada é maior.

Em segundo lugar, no processo de torneamento, o corte se dá por cisalhamento do cavaco que acontece na interface ferramenta/peça. Ao se deslocar pela superfície, a ferramenta gera na peça um sulco visível semelhante ao de uma rosca, pois os movimentos combinados de rotação e avanço geram uma helicóide. Ao mesmo tempo em que forma o sulco com a ponta, as arestas de corte adjacentes provocam o arrancamento do material próximo, resultando em uma superfície áspera que não possui mais sua integridade inicial. Com baixo avanço, é plausível inferir que ocorra a sobreposição do trabalho de usinagem, ou seja, a ferramenta atua sobre a região que anteriormente foi cisalhada; somando-se o fato da dificuldade da quebra do cavaco, é possível dizer que nesta região trabalhada se encontram cavacos ainda aderidos. No momento em que a ferramenta passa sobre esta área, pode ocorrer o esmagamento destes cavacos restantes; o efeito de alisamento característico da ferramenta *wiper*, que é propício ao acabamento da peça em outras situações, atua de uma forma contrária e prejudicial ao alisar uma superfície inconstante com resíduos de trabalho. Tal fato é evidenciado pela irregularidade das zonas alisadas (rebarbas) nas Fig. (10b) e (11b) e pelos valores de rugosidade total que confirmam a hipótese de que o efeito de alisamento não é satisfatório. Já com o aumento do avanço, a espessura do cavaco é incrementada e a sua deformação facilita o cisalhamento do material, pois o AISI 420C é muito dúctil e tem uma dureza da ordem de 220 HB.

3.2. Estimação dos Valores de Rugosidade

Nas Tabelas (4) e (5) podem ser visualizados os resultados de rugosidade estimados utilizando as equações de Eq. (1) a Eq. (4) e, respectivamente, os valores calculados de R_a e R_t a partir da média de todos os valores medidos (Tab. (3)) para os diferentes avanços e suas respectivas incertezas expandidas com 95% de confiança. Na medida em que estas equações são funções apenas dos valores de avanço (f) e raio de ponta da ferramenta (r_e), as tabelas não apresentam a variação da profundidade de corte (a_p), que é um parâmetro variável durante o experimento. Outra informação é que os autores consideraram nas equações $a_p > 1,5 \cdot r_e$.

Tabela 4. Valores teóricos de R_a para os parâmetros de corte utilizados.

	Avanço f [mm/volta]				
	0,10	0,12	0,15	0,20	0,30
R_a [μm] pela Eq. (1)	0,56	0,58	0,62	0,71	0,97
R_a [μm] pela Eq. (3)	0,46	0,50	0,57	0,71	1,21
R_a [μm] pela Tab. (3)	$1,04 \pm 0,52$	$1,02 \pm 0,38$	$0,94 \pm 0,45$	$0,92 \pm 0,23$	$0,92 \pm 0,21$

Comparando os resultados teóricos de rugosidade média da Tab. (4) com os resultados medidos indicados na Tab. (3), nota-se uma discrepância entre os valores. Isto se deve, pois a maior parte das amostras da Tab. (3) apresenta em média rugosidade R_a em torno de 0,92 μm , enquanto que ambas as equações geraram valores que oscilaram em uma faixa situada entre 0,46 e 1,21 μm .

Tabela 5. Valores teóricos de R_t para os parâmetros de corte utilizados.

	Avanço f [mm/volta]				
	0,10	0,12	0,15	0,20	0,30
R_t [μm] pela Eq. (2)	6,73	5,68	4,72	4,12	5,70
R_t [μm] pela Eq. (4)	2,87	3,13	3,56	4,40	6,66
R_t [μm] pela Tab. (3)	$12,2 \pm 5,8$	$11,9 \pm 4,4$	$10,1 \pm 6,2$	$7,1 \pm 2,5$	$7,1 \pm 1,7$

De forma semelhante ao caso da rugosidade média, comparando-se resultados teóricos de rugosidade total da Tab. (5) com os resultados medidos indicados na Tab. (3), pode-se notar uma diferença entre os valores apresentados. As equações retornaram resultados que oscilaram de 2,87 a 6,73 μm , enquanto que as amostras da Tab. (3) mostram em média valores de R_t próximos de 9 μm .

Para complementar, mesmo se fossem desconsiderados os resultados gerados pelas amostras A3, A4 e A5, os valores das rugosidades média e total seriam ainda menores [$R_a = (0,89 \pm 0,11) \mu\text{m}$ e $R_t = (8,7 \pm 1,4) \mu\text{m}$] e se aproximariam um pouco mais dos dados calculados pelas equações.

Portanto, nas duas análises de rugosidade, os resultados das equações ficaram distantes dos resultados práticos, o que pode indicar que estas não são adequadas para estimar a rugosidade para o par “ferramenta wiper / aço AISI 420C”. Também é notável a grande variação da rugosidade com a alteração da profundidade de corte, parâmetro que não é considerado pelas equações descritas, justificando, provavelmente, as diferenças acentuadas.

4. CONCLUSÕES

Notoriamente existe um grande problema na aplicação da tecnologia revolucionária de inserto com múltiplos raios: a execução de processo de usinagem em baixos avanços com profundidade de corte adequada às operações de acabamento. Entretanto, a questão se agrava quando a profundidade de corte (empregada se aproxima do raio de ponta da ferramenta (r_ϵ). Resultados altamente insatisfatórios ocorreram quando $a_p = r_\epsilon = 0,8$ mm.

Verificou-se que a propriedade de alisamento da geometria *wiper* é parcialmente suprimida quando outros fatores influenciam o processo de usinagem, resultando em valores elevados de rugosidade que, de certa forma, não seriam esperados pela forma singular deste tipo de ferramenta. As hipóteses levantadas para explicar tal fato estão concentradas sob os aspectos da dificuldade de quebra e saída dos cavacos do aço inoxidável AISI 420C (altamente dúctil) e o consequente esmagamento de parte destes sobre a superfície usinada, indo contra a concepção original da geometria que seria de reduzir a rugosidade através do processo de alisamento dos picos.

Pelos ensaios realizados, em toda a faixa de avanço, tanto com baixa (0,4 mm) quanto com elevada (1,5 mm) profundidades de corte, a qualidade de acabamento foi adequada sendo comprovada pelos valores de rugosidade média e pelas fotografias de microscopia.

Ao compararem-se os resultados experimentais com os resultados teóricos obtidos via equações, ficou claro uma discrepância entre os valores encontrados tanto para a rugosidade média (R_a) quanto para a rugosidade total (R_t). Enquanto que os valores teóricos oscilaram em faixas amplas, os valores medidos permaneceram estáveis em torno de um único valor, cerca de 1,0 μ m para R_a e 10 μ m para R_t . Observam-se variações dos valores de rugosidade com a profundidade de corte, o que não é considerado pelas equações descritas, podendo indicar que estas não são adequadas para o caso estudado.

REFERÊNCIAS

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 2002, “NBR ISO 4287 – Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade”, São Paulo.
- American Machinist. “What is a wiper insert?”. Disponível em: <http://americanmachinist.com/cutting-tools/what-wiper-insert>. Acesso em: 26 Set. 2014.
- ASM (American Society of Metals), 1998, “Metals Handbook Desk Edition”. 2ª ed. ASM International.
- _____, 1995, “Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels”. ASM International.
- ASM (Atlas Specialty Metals), 2003, “Technical Handbook of Stainless Steels”. ASM Technical Services Department.
- Bramfitt, B. L., Benscoter, A. O., 2002, “Metallographer's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels”. ASM.
- Chiaverini, V., 1996, “Aços e Ferros Fundidos”. 7ed. Abm, São Paulo, 576 p.
- Geier, M.; Souza, A. J., 2014, “Empirical determination of roughness parameters using wiper tool inserts in finish turning of AISI 4140”, Advanced Materials Research, vol. 845, p. 929-933, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.845.929.
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., da Silva, M. B., 2009, “Teoria da Usinagem dos Materiais”, Edgard Blücher, São Paulo, 397 p.
- Mello, M. S., Souza, A. J., Geier, M., 2012, “Determinação empírica dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t aplicando ferramenta alisadora no torneamento a seco de acabamento do aço AISI 4140”, 7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Anais do VII CONEM), 31 Jul - 03 Ago., São Luís, MA.
- Nassif, F. B., Rosa, G. C., Souza, A. J., 2013, “Analysis of the resulting machining forces by using standard and wiper cutting tools in dry finish turning of AISI 420”. 22nd International Congress of Mechanical Engineering (Annals of the XXII COBEM), 3-7 Nov, Ribeirão Preto, SP.
- Production Machining. “Implementing wiper inserts to maximize productivity”. Disponível em: <http://www.productionmachining.com/articles/implementing-wiper-inserts-to-maximize-productivity>. Acesso em: 26 Set. 2014.
- Sandvik, 2012, “Manual Técnico de Usinagem, Parte A: Torneamento Geral”, Sandvik Coromant, São Paulo, 156 p.
- Souza, A. J., Azambuja, A. S., Mello M. S., Rosa, G. C., 2013. “Análise comparativa da vida das ferramentas de corte alisadora (wiper) e convencional (standard) no torneamento de acabamento do aço SAE 4140”. VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (7º Cobef), 15-19 Abr, Itatiaia, RJ.

RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EVALUATION OF SURFACE FINISH GENERATED IN THE AISI 420C TURNING WITH WIPER TOOL FOR DIFFERENT FEED RATES AND DEPTHS OF CUT

André João de Souza, ajsouza@ufrgs.br

André Pieres, andre.pieres@ufrgs.br

Bruno Klahr, bruno.klahr@ufrgs.br

Giovani Luis Buseti, giovani.buseti@ufrgs.br

Guilherme Cortelini da Rosa, guilherme.cortelini@ufrgs.br

Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS) –Department of Mechanical Engineering (DEMEC)
Laboratory of Machining Automation (LAUS), Rua Sarmento Leite, 425 – Porto Alegre, RS – CEP 90050-170.

Abstract: The finish of the machined surface of AISI 420C stainless steel using the wiper tool with corner radius $r_c = 0.8$ mm under different feed combinations (f) and depth of cut (a_p) aims to assess. For this, the average (R_a) and total (R_t) roughness parameters were measured and the appearance of the resulting machined surface was observed by optical microscopy. Five feed-rates (0.10, 0.12, 0.15, 0.20 and 0.30 mm/rev.) and four depths of cut (0.4, 0.8, 1.2 and 1.5 mm) values were used in the experiment, resulting in 20 samples. The cutting speed was kept constant at $v_c = 290$ m/min. Through the analysis of the surface it was found that the smoothing property of wiper geometry is deleted partially for $a_p = r_c = 0.8$ mm and $f \leq 0.15$ mm/rev., resulting in a poor surface finish with $R_a > 1.25$ μm and $R_t > 14.0$ μm . Moreover, R_a values decrease with $f \geq 0.20$ mm/rev. to $a_p = 0.8$ mm. The worst finish surface for less feed-rates occurred probably due to the difficulties of chips breaking and removal, and the consequent crushing of these chips on the machined surface. On the other hand, the best results for the average and total roughness were obtained with $a_p = 0.5 \cdot r_c = 0.4$ mm and $f = 0.15$ mm/rev. ($R_a = 0.39$ μm and $R_t = 2.73$ μm). For other parameters combinations, the average and total roughness values remained around 0.92 μm and 9.0 μm respectively. In the case of theoretically estimated values, they were far from practical results. The equations presented in previous studies do not consider the variation of the roughness values with the depth of cut indicating that they are not suitable for the case study.

Keywords: Turning, Wiper tool, AISI 420C stainless steel, Surface finish, Surface roughness.