

ANÁLISE DA SUPERFÍCIE USINADA NO TORNEAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS COM FERRAMENTA DE PCBN

Clarianne Natali de Campos

UNICEUMA - Rua Josué Montello, nº 1, São Luís-MA
clarianne.campos@gmail.com

Denis Boing

UNIFEBE - Centro Universitário de Brusque, Rua Dorval Luz, 123- Brusque-SC
denis.boing@gmail.com

Rolf Bertrand Schroeter

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, Florianópolis-SC
rolf.schroeter@ufsc.br

Resumo. A análise da superfície tem sido utilizada não somente para avaliar o nível de rugosidade, mas também na análise tribológica de um componente, de modo a prever seu desempenho funcional. Tal avaliação ganha maior importância quando a análise recai sobre aplicações críticas de engenharia, como em componentes de aços endurecidos submetidos a carregamentos cíclicos. Diante deste cenário, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o acabamento de superfícies torneadas em aços endurecidos com ferramentas de PCBN. Para isso foram selecionados três aços – AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2, em durezas de 35 HRC e 60 HRC. Os parâmetros de usinagem foram mantidos constantes. Verificou-se que com o aumento da dureza, menores são os valores de rugosidade, sendo tal comportamento válido para os três materiais. Entretanto, quando avaliados separadamente, o aço AISI 52100 obteve o menor valor de rugosidade $Ra = (0,17 \pm 0,05 \mu\text{m})$ em relação aos aços AISI 4340, $Ra = (0,31 \pm 0,03 \mu\text{m})$ e AISI D2 $Ra = (0,32 \pm 0,11 \mu\text{m})$. Além de variáveis como a cinemática da operação e o desgaste da ferramenta, os resultados mostraram que a resposta do material, quando submetido ao esforço localizado de cisalhamento, impactaram no acabamento e topografia da superfície usinada.

Palavras chave: Análise da superfície. Rugosidade. Topografia. PCBN. Torneamento de aços endurecidos.

1. INTRODUÇÃO

Aços endurecidos são utilizados na fabricação de engrenagens, rolamentos, matrizes e outros componentes críticos de engenharia, que exigem alta resistência ao desgaste. Ao longo da cadeia de fabricação, o processo de torneamento está se tornando uma alternativa à retificação nas operações de acabamento de componentes construídos em aços endurecidos, reduzindo consideravelmente os tempos e custos de fabricação. Comparando os processos, o torneamento produz uma superfície caracterizada pela simetria e periodicidade de variação dos picos e dos vales, sendo denominado de perfil de rugosidade periódico, enquanto que a retificação produz distribuições aleatórias dos picos e dos vales, chamada de perfil de rugosidade aperiódico (Waikar e Guo, 2008; Guo, *et al.*, 2010; Klocke, *et al.*, 2005).

A textura da superfície avalia os desvios repetitivos ou aleatórios da superfície nominal, a qual advém da geometria base da ferramenta e da cinemática da operação, que formam a topografia tridimensional de uma superfície. Fatores adversos do processo, como desgaste e vibrações também possuem impacto na geração da topografia e acabamento da superfície no processo de torneamento de aços endurecidos (Griffiths, 2001, Davim, 2010). Tais diferenças topográficas ocasionam, conseqüentemente, variações em relação aos comportamentos tribológicos da peça e do seu desempenho. Comparando, por exemplo, superfícies que possuem os mesmos valores de rugosidade no parâmetro Ra , a topografia gerada pelo processo de retificação apresenta um maior número de vales, o que proporciona a essa superfície maior potencial de lubrificação em decorrência da maior capacidade de armazenamento de fluidos (Waikar e Guo, 2008; Guo, *et al.*, 2010).

Atualmente, o torneamento de aços endurecidos de alta precisão é capaz de atingir valores de rugosidade em torno de $1 \mu\text{m}$ no parâmetro Rt e a tolerância padrão ISO equivalente a IT3 (Boing, 2016). Importante ressaltar que a eficiência desta operação necessita que todos as variáveis do processo sejam devidamente controladas, como parâmetros de corte, geometria e desgaste da ferramenta de corte, por exemplo, de modo que se obtenham valores reduzidos de rugosidade (Kumara, Pradhan, 2018). Whitehouse (2002) verificou que no primeiro minuto de usinagem, quando o gume da ferramenta de corte não sofreu nenhum desgaste, a superfície gerada é reflexo da própria cinemática da operação de torneamento, em que distância entre os picos principais representa o avanço por rotação utilizado. Entretanto, com o aumento do desgaste da ferramenta, os picos da topografia tendem a ficar mais elevados e os vales mais achatados.

Este trabalho tem como finalidade compreender a resposta de três ligas de aços endurecidos (AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2) quanto ao acabamento e topografia da superfície quando submetidos ao torneamento com ferramentas de PCBN.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Ensaio de torneamento foram realizados em um torno CNC de modelo Heynumat 10U do fabricante Heyligenstaed, 75 kW de potência no motor de fuso e faixa de rotação de velocidade de 4 a 4500 rpm. Os corpos de prova foram construídos em três ligas de aço: AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2 em dois diferentes níveis de dureza, 35±2 e 60±2 HRC. Os aços endurecidos foram caracterizados (Tab. 1) através da determinação da composição química.

A microestrutura do o aço AISI 4340, quando a 35 HRC, é formada principalmente por bainita em uma matriz ferrítica. Com o aumento da dureza para 60 HRC, a microestrutura é composta por martensita revenida. Já o aço AISI 52100 possui pequenos carbonetos eutéticos (1 - 2 µm), do tipo M₇C₃, distribuídos homogeneamente na matriz, sendo que a 35 HRC, o material apresenta microestrutura formada por martensita revenida, com precipitação de carbonetos em função da alta temperatura de revenimento. Já para a dureza de 60 HRC tem-se uma matriz formada por martensita refinada. Por fim, o aço AISI D2 é formado por carbonetos primários (≈ 15 µm) do tipo M₇C₃, os quais possuem forma e distribuição irregular. Além de carbonetos secundários (1-3 µm) também do tipo M₇C₃, porém, em perfil esférico. Considerando a dureza de 35 HRC para este aço, ocorre a presença de cementita e ferrita; por outro lado, a 60 HRC, a matriz do aço AISI D2 é formada por martensita, com presença de austenita retida em pequena quantidade.

Além das diferenças microestruturais, conforme Boing (2011), estes materiais também distinguem-se em relação a fração volumétrica de carbonetos, sendo o valor para o aço AISI 4340 inferior a 1%, enquanto que para o aço AISI 52100 varia entre 1% e 5% e para o aço AISI D2 estes valores estão na faixa entre 5% e 15%. Assim, para materiais com elevada fração volumétrica de carbonetos, como os aços-ferramenta, os carbonetos possuem grande impacto na dureza e, conseqüentemente, podem influenciar na usinabilidade destes materiais (Tönshoff, *et al.*, 2000).

Tabela 1. Composição química dos aço AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2 (% em massa).

Aço	C	Mn	P	Si	Ni	Cr	Mo	V
AISI 4340	0,39	0,67	0,02	0,27	1,74	0,76	0,22	-
AISI 52100	1	0,37	0,015	0,26	-	1,46	-	-
AISI D2	1,53	0,34	0,02	0,35	0,22	11,66	0,76	0,80

Corpos de prova para ensaios de tração foram confeccionados com as mesmas ligas de aço mostradas na Tab. 1 e, submetidos ao mesmo processo de tratamento térmico. Os ensaios de tração foram realizados uma Máquina Universal de Ensaio da marca INSTRON, modelo 5988 com capacidade de carga de 400 kN. Os dados dos corpos de prova utilizados nos ensaios de torneamento estão mostradas na Fig. 1, bem como a disposição do sistema de usinagem. A escolha desta geometria foi baseada em Diniz e Oliveira (2008), pois esta garante maior rigidez aos experimentos, já que o comprimento em balanço se torna pequeno.

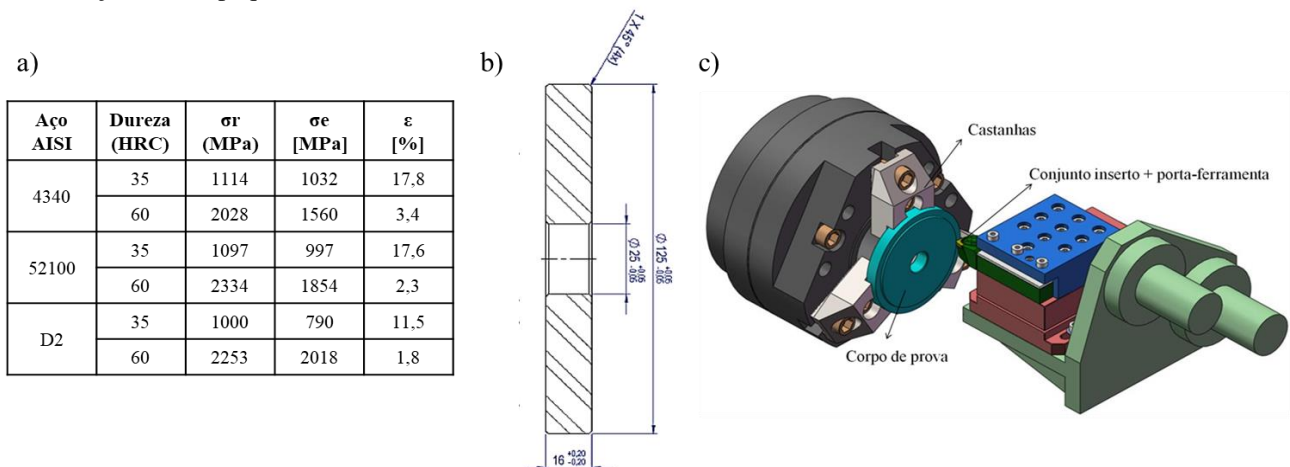


Figura 1. Propriedades mecânicas dos aços (a), geometria dos corpos de prova (b) e sistema de fixação (c) utilizados nos ensaios.

A ferramenta utilizada tem como material o PCBN, código SNGA 120408 S01030A – classe 7025 (ISO H20), possui baixo teor de CBN (60%) com uma distribuição bimodal de grãos (1 e 3 µm) em um ligante de cerâmica de Ti(C,N) e Al

(não possui revestimento). Essa ferramenta foi montada em um porta-ferramentas (código PSKNL-2020K-12). As condições de corte utilizadas foram: velocidade de corte (v_c) = 150 m/min, avanço (f) = 0,08 mm/rev e profundidade de corte (a_p) = 0,20 mm.

Após a fixação da peça de trabalho na máquina-ferramenta, a superfície a ser usinada foi preparada com um passe utilizando uma ferramenta específica. O objetivo deste procedimento foi criar uma superfície de referência para minimizar o batimento axial da peça após a fixação. As ferramentas foram então substituídas pelas definitivas para o teste final. Os testes ocorreram sem o uso de meios lubrificantes e foi realizado somente um único passe, para cada condição, como um gume novo da ferramenta. Foi realizada uma repetição nos experimentos.

Para obter os dados de topografia de superfície das peças usinadas, foi realizada a análise dos parâmetros de rugosidade 2D e a topografia 3D das superfícies geradas. Para a avaliação da rugosidade 2D, foi utilizado o rugosímetro do fabricante Mitutoyo®, modelo SJ-310. A medição da rugosidade 2D foi realizada em três regiões diferentes no corpo de prova, do maior para o menor diâmetro, conforme a norma ISO 4287/2002, usando um *cut-off* (λ_c) de 0,25 mm (Campos *et al.*, 2017). Para a análise 3D foi utilizado um Microscópio de Foco Infinito Alicona®. Os parâmetros básicos da configuração do equipamento foram: objetiva 100x; resolução vertical de 50 nm; resolução lateral de 2,13 μm ; área de medição de 325 x 325 μm .

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a avaliação da rugosidade, considerando um intervalo de confiança de 95%, foram extraídas a média do conjunto de medições e sua respectiva incerteza. Os valores de rugosidade Ra e Rz para os três tipos de material e nos dois níveis de dureza encontram-se na Fig. 2. A partir medições realizadas, verifica-se os valores de rugosidade obtidos estão concentrados na classe N5 (até 0,4 μm na escala Ra) e N6 (até 0,8 μm na escala Ra).

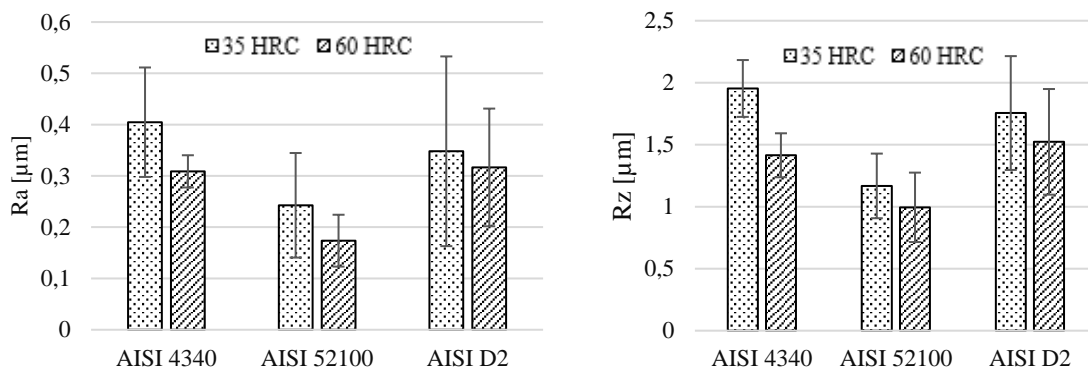


Figura 2. Rugosidade Ra e Rz para os aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2, nas durezas 35 e 60 HRC.

Analisando a Fig. 2, pode-se observar que há uma tendência da redução da rugosidade com o aumento da dureza do material. Este comportamento, o qual já era previsto antes da realização dos ensaios, está diretamente relacionado às características e propriedades desses materiais. Conforme consta na Fig. 1, a 35 HRC os materiais possuem um regime plástico bem definido, enquanto que a 60 HRC, o limite de ruptura do material é próximo ao limite de escoamento. Pensando tal fenômeno dentro da cinemática do processo de usinagem, para um nível de dureza menor, a após o trabalho de formação de cavacos, os segmentos de material deformado da peça (principalmente nas regiões periféricas de corte) e que não foram escoados juntamente com o cavaco, permanecem aderidos à superfície (Boing, 2016). Para maiores valores de dureza, considerando a mesma região deformada, o retorno elástico é muito mais pronunciado, reduzindo o efeito da deformação plástica nos cavacos, e com isso também os valores de rugosidade.

Considerando as propriedades dos materiais usinados e sua influência na superfície obtida, verifica-se que dentre os três materiais avaliados, o aço AISI 52100 foi o que resultou em menores valores de rugosidade. Este comportamento pode estar relacionado ao fato deste material ter a capacidade de suportar elevadas tensões de contato e possuir maior estabilidade dimensional e térmica em condições mais severas – como pode ser considerada a tensão de cisalhamento necessária no corpo de prova para a formação dos cavacos (Beswick, 1987, Wadsworth e Sherby, 1978).

Para o caso específico do aço AISI D2, observa-se que os valores de rugosidade foram maiores quando comparados com os outros dois aços. Este material é difícil de ser usinado por apresentar carbonetos eutéticos do tipo M_7C_3 , os quais possuem dureza quase três vezes maior que a dureza da matriz dos aços-rápidos. Além disso, como aponta Oliveira, *et al.*, (2016), esses carbonetos podem ficar aderidos à superfície, gerando topografias com irregularidades e maior presença de picos. Complementando a avaliação, a Fig. 3 mostra a topografia das superfícies torneadas.

Comparando as topografias mostradas, pode-se observar que a correspondente ao aço AISI 4340 (Fig. 3 a, b) tem uma definição mais clara da cinemática da operação. Tal comportamento pode estar associado a natureza deste material que, quando comparado com os demais que foram analisados, apresenta um menor nível de carbono na composição, bem como

a ausência de carbonetos, o que facilita o processo de remoção de material, já que a ferramenta de corte pode vir a sofrer menos desgaste. Um caso semelhante pode ser observado em relação ao aço AISI D2, (Fig. 3 e,f), porém a aleatoriedade da superfície é ligeiramente maior, comportamento esse que está associado a presença de carbonetos eutéticos dispersos em sua superfície, ocasionando tais variações na superfície obtida, bem como a maior mudança de formato das ferramentas, especialmente na região de corte secundário quanto a influência dos carbonetos presentes na microestrutura do aço AISI D2 (Boing, 2016).

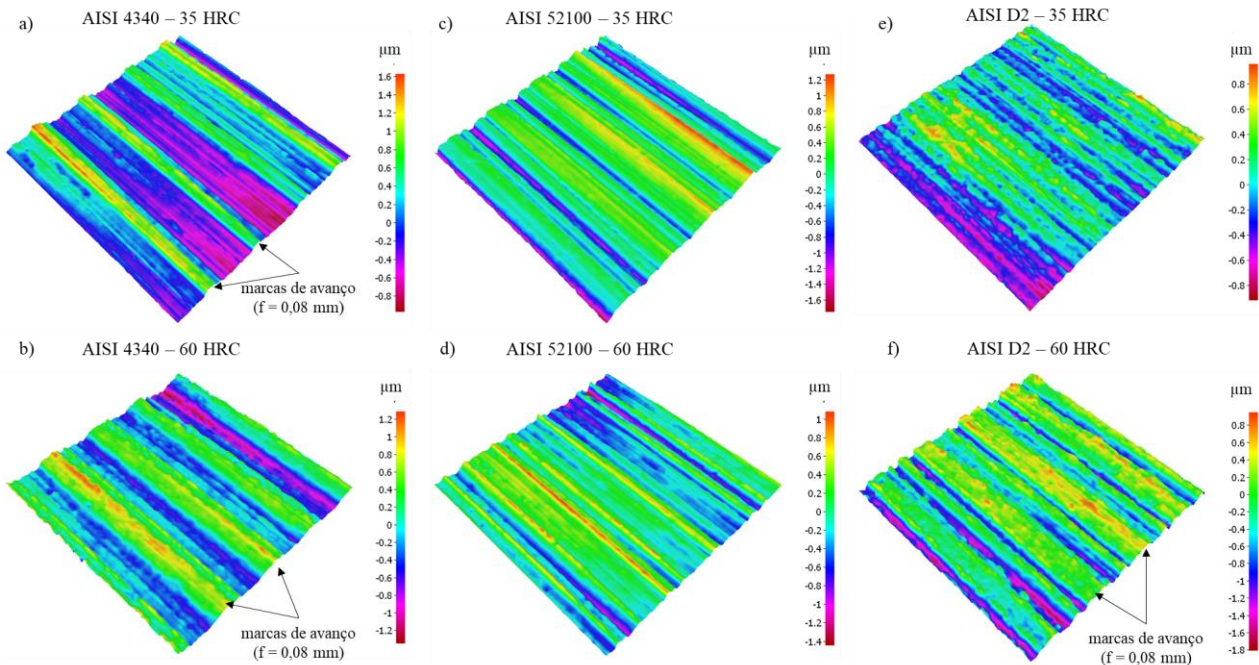


Figura 3. Comparação da topografia das superfícies geradas nos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2, nas durezas 35 e 60 HRC.

Conforme evidenciam as propriedades do aço AISI 52100 (Fig. 3 c, d), descritas por Beswick, 1987, Wadsworth e Sherby, 1978, a definição da cinemática da operação não é clara, dificultando a identificação das marcas principais. A situação mostrada evidencia a hipótese de que a estabilidade dimensional e térmica, mesmo considerando a escala microscópica, contribui para os menores valores de rugosidade gerada no aço AISI 52100.

A partir das topografias analisadas e dos valores de rugosidade obtidos, pode-se afirmar que, quando tange a análise do torneamento de materiais endurecidos, cada condição em específico deve ser analisada, pois, como visto, pequenas alterações ocasionam respostas muito distintas entre si.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que, nas condições dos ensaios realizados, os valores de rugosidade mantiveram-se entre as classes N5 (até 0,4 µm na escala Ra) e N6 (até 0,8 µm na escala Ra). Verificou-se que o aumento da dureza tende a acarretar redução dos valores de rugosidade. Este resultado pode estar diretamente relacionado ao comportamento elástico dos materiais nos diferentes patamares de dureza.

Verificou-se que o aço AISI 52100 resultou nos menores valores de rugosidade. Além disso, após a análise das topografias das superfícies usinadas, observou-se que, apesar das condições dos ensaios de usinagem serem iguais para os três materiais e os valores de rugosidade encontram-se dentro dos mesmos patamares, as respostas dos três materiais diferem entre si.

Assim, pode-se afirmar que não é apenas a cinemática da operação e desgaste da ferramenta, por exemplo, que impactam na condição final da superfície, mas também o comportamento do material quando submetido ao esforço localizado de cisalhamento, ou seja, quando o mesmo é usinado. Desta forma, quando se considera o torneamento de materiais endurecidos, cada condição específica deve ser analisada, levando em consideração que pequenas alterações nas propriedades dos materiais induzem a diferentes topografias das superfícies.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o financiamento e apoio da FAPESC (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina), Sandvik e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

6. REFERÊNCIAS

- Beswick, J. M. “The effect of chromium in high carbon bearing steels”. *Metall Mater Trans*, 1987. 1987-1906.
- Boing, D. *Transição da aplicação do metal-duro revestido e do PCBN no torneamento de aços endurecidos em função da dureza e do teor de carbonetos*. p. 287. 2016. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- Boing, D. *Análise da vida de ferramentas de PcBN no torneamento do ferro fundido branco com alto teor de cromo*. p. 149. 2011. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior Tupy - IST/SOCIESC. Joinville.
- Campos, C. N. de. *Análise da integridade da superfície no torneamento de materiais endurecidos com ferramentas de PCBN e metal-duro*. p. 149. 2016. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- Campos, C. N. de, Boing, D., Schroeter, R. B. “Discussões sobre a determinação do comprimento de amostragem (λ_c) para avaliação da rugosidade no torneamento de materiais endurecidos”. In *Anais no 9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF2017*. Joinville, Brasil.
- Davim, J. *Surface Integrity in Machining*. 1. ed. Londres: Springer, 2010.
- Diniz, A. E.; Oliveira, A. J. de. “Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools”. *Journal of materials processing technology*, v. 195, p. 275-281. 2008.
- Griffiths, B. *Manufacturing Surface Technology*. Londres: Penton Press, 2001.
- Guo, Y. B.; Warren, A. W.; Hashimoto, F. “The basic relationships between residual stress, white layer, and fatigue life of hard turned and ground surfaces in rolling contact”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2, 2010. 129–134.
- Klocke, F., Brinksmeier, E., Weinert, K. “Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 54, p. 22-45. 2005.
- Kumara, A., Pradhan, S. K. “Investigations into hard turning process using wiper tool inserts”. *Materials today: proceedings*, v. 5, p. 12579–12587. 2018.
- Oliveira, A. J.; Boing, D.; Schroeter, R. B. “Effect of PCBN tool grade and cutting type on hard turning of highchromium white cast iron”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82, n. 5, 2016. 797- 807.
- Tönshoff, H. K.; Arendt, C.; Amor, R. B. “Cutting of Hardened Steel”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 49, 2000. 547-566.
- Wadsworth, J.; Sherby, O. D. “Influence of chromium on superplasticity in ultra-high carbon steels”. *Journal of Materials Science*, 13, 1978. 2645-2649.
- Waikar, R. A.; Guo, Y. B. “A comprehensive characterization of 3D surface topography induced by hard turning versus grinding”. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 197, p. 189-199. 2008.
- Whitehouse, D. *Surfaces and their measurement*. 2. ed. Londres: HPS - Hermes Penton Science, 2002.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

ANALYSIS OF THE MACHINED SURFACE IN HARD TURNING WITH PCBN TOOL

Clarianne Natali de Campos

UNICEUMA - Rua Josué Montello, nº 1, São Luís-MA

clarianne.campos@gmail.com

Denis Boing

UNIFEBE - Centro Universitário de Brusque, Rua Dorval Luz, 123- Brusque-SC

denis.boing@gmail.com

Rolf Bertrand Schroeter

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, Florianópolis-SC

rolf.schroeter@ufsc.br

Abstract. The surface analysis has been used not only to evaluate the level of roughness, it has also aided in the tribological evaluation of a component, in order to predict its functional performance. Such an evaluation becomes more important when the analysis falls on critical engineering applications, as in the hardened steels components subjected to cyclic loading. Given this scenario, the present work aims to evaluate the finishing of surfaces in hard turning with PCBN tool. Three different steels - AISI 4340, AISI 52100 and AISI D2 - in 35 HRC and 60 HRC of hardness. The machining parameters were kept constant. It was verified that with the increase of hardness, the lower the values of roughness, being such behavior valid for the three materials. However, when evaluated separately, AISI 52100 steel obtained the lowest roughness value $R_a = (0.17 \pm 0.05 \mu\text{m})$ when compared to AISI 4340, $R_a = (0.31 \pm 0.03 \mu\text{m})$ and AISI D2 $R_a = (0.32 \pm 0.11 \mu\text{m})$. In addition to variables such as kinematics of the operation and wear of the tool, the results showed that the response of the material when subjected to localized shear stress impacted the machining surface finish and topography.

Keywords: *surface analysis, roughness, topography, PCBN, hard turning.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.