

INFLUÊNCIA DA MICROGEOMETRIA DO GUME E DO REVESTIMENTO DE FERRAMENTAS DE METAL-DURO NO TORNEAMENTO DO AÇO AISI 4340 COM 55 HRC

André Gonçalves¹

Denis Boing¹

¹Centro Universitário de Brusque (UNIFEBE), Rua Dorval Luz, 123 - Bairro Santa Terezinha - CEP: 88352-400 - Brusque - SC.

andre.goncalves@unifebe.edu.br, denis.boing@unifebe.edu.br

Resumo. O desenvolvimento de novas classes, métodos e materiais de revestimento podem viabilizar a aplicação do metal-duro no torneamento de aços endurecidos, aplicação tipicamente destinada às ferramentas de cerâmica e PCBN. O objetivo desta pesquisa é verificar o impacto do revestimento e da microgeometria na vida das ferramentas de metal-duro no torneamento em acabamento do aço AISI 4340 com 55 HRC. No maior patamar de velocidade de corte testado ($v_c = 150$ m/min), melhores resultados foram observados utilizando ferramentas revestidas com microgeometria positiva (com quebra cavaco), vida de 33,1 min; seguidas pela ferramenta com ângulo de saída negativo (sem quebra cavaco), que possuíam vida de 22,2 min. Em todos os patamares de velocidade de corte ensaiadas, ($v_c = 150, 120, 90, 60$ m/min), as ferramentas sem revestimento não possuem viabilidade de aplicação (considerando vida maior que 15 min). Os resultados mostram a importância do revestimento para a viabilização das ferramentas de metal-duro na usinagem de aços endurecidos, pois somente o substrato não é capaz de suportar as condições tribológicas impostas pelo processo.

Palavras chave: Torneamento de aços endurecidos, metal-duro, revestimento, microgeometrias.

1. INTRODUÇÃO

O torneamento de materiais endurecidos é amplamente aplicado nas operações de acabamento ao longo da cadeia de fabricação de componentes construídos em aços para construção mecânica, aços para rolamentos, aços-ferramentas e até mesmo em ferros fundidos brancos (Oliveira, *et al.*, 2016). Tipicamente são utilizadas ferramentas de PCBN (Nitreto de Boro Cúbico Policristalino) e de cerâmicas óxidas, pois possuem propriedades para suportar as condições tribológicas impostas pelo processo: temperatura na interface cavaco-ferramenta acima do limite de austenitização do aço e elevada tensão de compressão exercida ciclicamente sobre o gume (Boing, *et al.*, 2018). O processo de torneamento de materiais endurecidos é capaz de atingir níveis de rugosidade R_z de $1 \mu\text{m}$ e de tolerâncias ISO IT3 ($< 0,1 \mu\text{m}$), algo que só era possível através do processo de retificação (Byrne, *et al.*, 2003).

Diniz e Oliveira (2008) analisaram o desgaste e a vida de ferramentas de PCBN de baixo e alto teor no torneamento radial contínuo, semi-contínuo e interrompido do aço AISI 4340 (56 HRC), utilizando velocidade de corte (v_c) = 150 m/min, avanço (f) = 0,08 mm e profundidade de corte (a_p) = 0,15 mm. Ambas as ferramentas obtiveram vidas superiores a 100 min no corte interrompido. Enquanto que no corte contínuo, as ferramentas de baixo teor de PCBN resultaram em vidas de 60 min, e as ferramentas de alto teor de PCBN em torno de 20 min. Também no torneamento do aço AISI 4340 com 56 HRC, Oliveira, *et al.* (2009) mostraram a viabilidade da aplicação de ferramentas cerâmicas, que mesmo em corte interrompido atingiram tempo de vida maior que 150 min – semelhantes aos obtidos nas ferramentas de PCBN. No corte contínuo o desempenho das ferramentas foi menor, e as ferramentas de PCBN resistiram aproximadamente 3 vezes mais (vida ~60 min) em comparação as ferramentas de cerâmica (vida ~20 min).

Ainda que apresentem um excelente desempenho no torneamento de aços endurecidos, as ferramentas de PCBN possuem um elevado custo (chegando a 25 vezes o valor do inserto de metal-duro, e 20 vezes o valor do inserto de cerâmica), fato que pode limitar suas aplicações. O desenvolvimento de novas classes de metal-duro, métodos e materiais de revestimento podem viabilizar a aplicação do metal-duro no torneamento de aços endurecidos (Chincharikar e Choudhury, 2013a). Os principais limitadores da utilização das ferramentas de metal-duro para tal aplicação são a alta dureza, resistência mecânica e características microestruturais dos materiais (como os carbonetos), fatores limitantes que restringem os parâmetros de corte (Boing, *et al.*, 2018).

O revestimento das ferramentas de metal-duro é fundamental para o torneamento de aços endurecidos. Boing, *et al.* (2018) determinaram os limites de aplicação de duas classes de ferramentas de metal-duro: classe 1105 (ISO S15) com único revestimento PVD (TiAlN), e a classe 4315 (ISO P15) com revestimento em multicamadas MT CVD ($\text{TiCN}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$), na usinagem dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2. As condições de corte empregadas estão no mesmo patamar da aplicação das ferramentas de PCBN ($v_c = 150$ m/min, $f = 0,08$ mm e $a_p = 0,20$ mm). Os autores mostraram que a fração volumétrica de carbonetos na microestrutura impacta no limite de aplicação das ferramentas de

metal-duro (viabilidade de aplicação = vida maior que 15 min). Para o aço AISI 4340 o limite de aplicação é 55 HRC utilizando a ferramenta revestida com PVD (TiAlN). Para os aços AISI 52100 e AISI D2 o limite de aplicação é de 50 e 45 HRC, respectivamente – ambos utilizando as ferramentas com revestimento em multicamadas MT CVD (TiCN/Al₂O₃/TiN).

Chincharikar e Choudhury (2013a) analisaram o desempenho de ferramentas de metal-duro com duas técnicas de revestimento: CVD (MT-TiCN/Al₂O₃/TiN e PVD (TiAlN), ambas utilizadas no torneamento do aço AISI 4340 (35, 45 e 55 HRC). Os autores constataram um melhor resultado na ferramenta com revestimento CVD, sendo fortemente influenciado pela espessura do revestimento. Em outra pesquisa, Chincharikar e Choudhury (2013b) averiguaram uma baixa taxa de desgaste nas ferramentas de metal-duro com revestimento PVD (TiAlN), em comparação com o revestimento CVD (MT-TiCN/Al₂O₃/TiN), igualmente no torneamento do aço AISI 4340 (33-35 HRC).

Além das diferentes propriedades mecânicas e térmicas das ferramentas de metal-duro e PCBN, ambas também possuem diferenças quanto à microgeometria. As ferramentas de metal-duro tipicamente possuem um ângulo de cunha (β) menor que 90°, e com isso, possuem ângulo de saída (γ) positivo, o que tende a reduzir o índice de recalque e a força de usinagem, que por outro lado, reduz a resistência mecânica do gume. As ferramentas de PCBN e cerâmica são tipicamente frágeis e apresentam um chanfro de proteção (como mostrado na Fig. 1b), o que aumenta a resistência do gume. Como consequência, o índice de recalque é maior, que por sua vez, aumenta as componentes da força de usinagem e consequentemente a temperatura do processo (Klocke e König, 2011). A microgeometria típica de uma ferramenta de metal-duro e de uma de PCBN, considerando o plano normal ao gume (P_n), estão mostradas na Fig. 1.

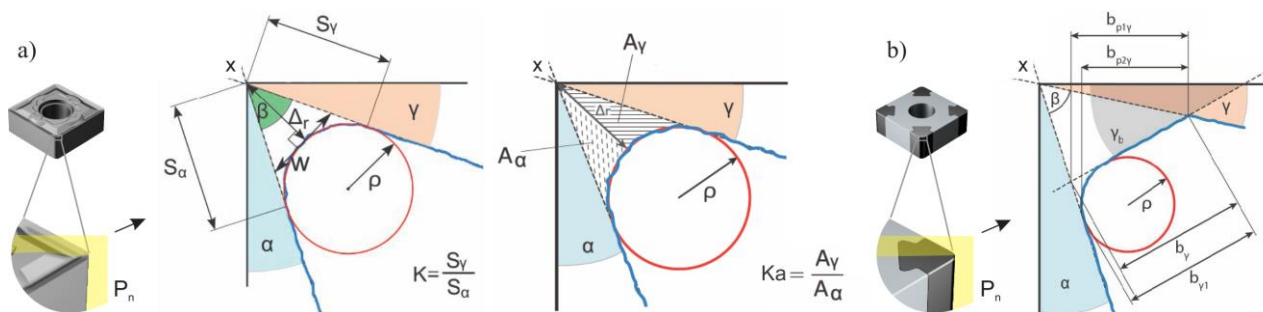


Figura 1. Microgeometrias das ferramentas: a) metal-duro e b) PCBN. Adaptado de Alicona-Imaging (2015).

Os parâmetros S_α e S_γ representam a distância tangencial do raio do gume (ρ) até a intersecção teórica (x) da face com o flanco da ferramenta. A relação K indica a simetria do gume, e o parâmetro K_a considera a área entre a linha Δr (mínima distância de x até ρ) e as linhas de S_α e S_γ . A geometria é complementada com o ângulo de incidência (α) e o parâmetro W , que é o comprimento que tangencia ρ e as linhas S_α e S_γ . Além dos parâmetros encontrados nas ferramentas de metal-duro (β - α - γ), as ferramentas de PCBN e cerâmica são também caracterizadas pelos parâmetros: $b_{p1\gamma}$ e $b_{p2\gamma}$, sendo o comprimento projetado do chanfro; b_γ e $b_{\gamma1}$, sendo os comprimentos reais do chanfro de proteção a partir do ponto de intersecção entre γ_b e o flanco da ferramenta, tangencialmente ao ρ ; e ângulo de saída do chanfro de proteção (γ_b), o qual representa o ângulo de saída efetivo (γ_{eff}), pois a maior parcela de contato cavaco-ferramenta durante a usinagem é sobre o γ_b .

No contexto descrito sobre os materiais de ferramentas utilizados no torneamento de aços endurecidos e suas características microgeométricas, o objetivo deste projeto é verificar o impacto do revestimento e da microgeometria na vida das ferramentas de metal-duro no torneamento do aço AISI 4340 com 55 HRC.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados em um centro de torneamento horizontal Romi, modelo GL-240, que possui um motor de 15kW e faixa de rotação 4-4500 RPM (Fig. 2a). Os corpos de prova foram fixados em uma placa com 3 castanhas (Fig. 2b) e foram construídos no aço AISI 4340 com 55 HRC (Fig. 2c).



Figura 2. a) Torno CNC Romi GL-240, b) sistema de fixação, e c) corpo de prova

Ao longo dos experimentos foram utilizadas quatro ferramentas de metal-duro: com e sem quebra cavaco; e com e sem revestimento: I. SNMA 12 04 08 - H13A - sem revestimento (SQ); II. SNMG 12 04 08-SM - H13A sem revestimento (CQ); III: SNMA 12 04 08 com revestimento PVD (TiAlN) (SQ-R); IV: SNMG 12 04 08-SM - 1105 com revestimento PVD (TiAlN) (CQ-R). As microgeometrias estão mostradas na Fig. 3. Destaca-se que o substrato das quatro ferramentas utilizadas é o mesmo. As ferramentas foram fornecidas pela empresa Sandvik Coromant. Apenas o revestimento da ferramenta SQ-R foi realizado em uma empresa especializada (ferramenta original SNMA 12 04 08 - H13A). O objetivo da utilização da geometria SNMA no torneamento de aços endurecidos é aproximar da microgeometrias das ferramentas de cerâmica e PCBN, como mostrado na Fig. 3. As ferramentas foram fixadas em um porta-ferramentas DSKNL 2020K 12, que possui um ângulo de saída de $\gamma = -6^\circ$.

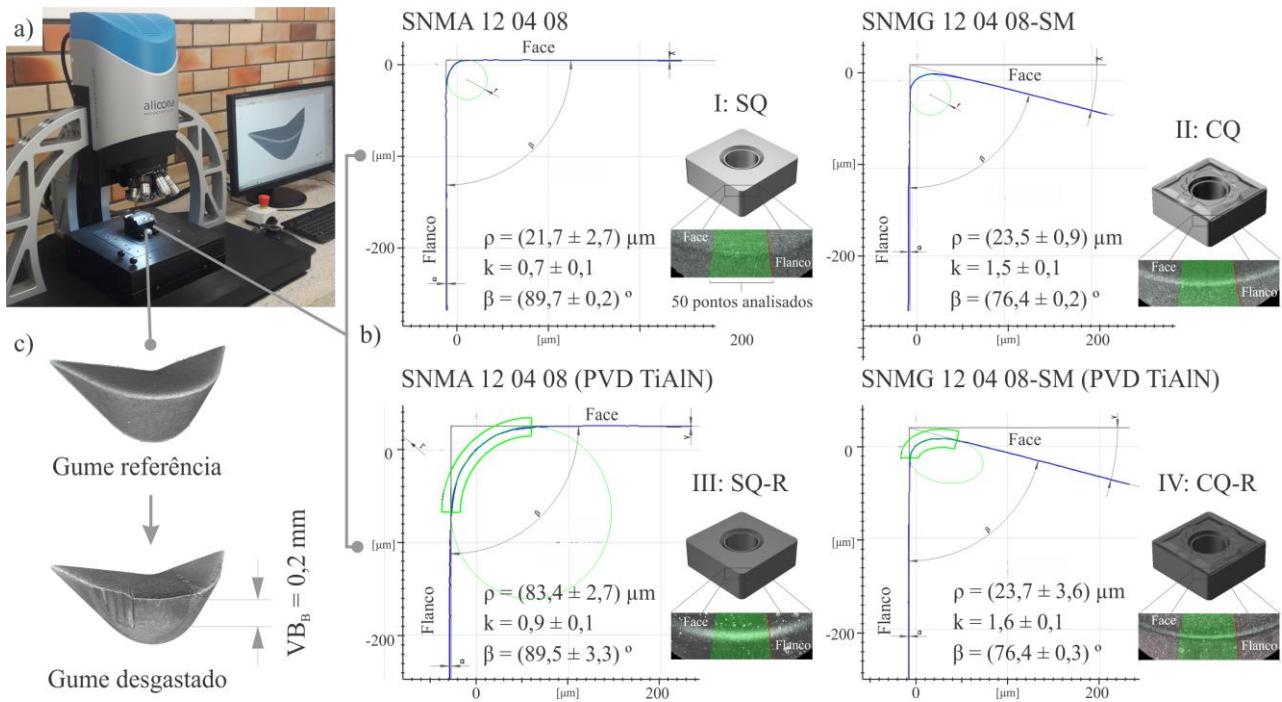


Figura 3. a) Alicona Infinity Focus G5, b) caracterização das microgeometrias dos gumes, c) medição do VB_B

Os ensaios de vida das ferramentas foram realizados até o limite de $VB_B = 0,2 \text{ mm}$ (Fig. 3c), consistindo em sucessivos passes na direção radial, do maior para o menor diâmetro. A cada passe de faceamento, as ferramentas foram removidas para executar a medição do desgaste no microscópio óptico Alicona Infinity Focus G5 (Fig. 3a). Como parâmetros de usinagem, foram utilizados: $a_p = 0,20 \text{ mm}$ e $f = 0,08 \text{ mm}$. Os ensaios foram iniciados a uma velocidade de corte de $(v_c) = 150 \text{ m/min}$. O critério adotado para definir a viabilidade de aplicação das ferramentas de metal-duro no torneamento de aços endurecidos foi de 15 min de vida. Caso a ferramenta não alcance o tempo mínimo de vida estabelecido, os ensaios eram reiniciados com uma redução de 30 m/min na velocidade de corte inicial. Ao total, foram ensaiadas quatro velocidades de corte $(v_c) = 150, 120, 90$ e 60 m/min . As ferramentas que demonstraram viabilidade de aplicação no maior patamar de velocidade de corte, não foram ensaiadas nos menores patamares.

Para complementar a interpretação dos resultados, foram realizadas simulações 2D por elementos finitos no software AdvantEdge® utilizando os dados da microgeometria caracterizados e mostrados na Fig. 3. As simulações do processo de usinagem possibilitaram a análise de forma relativa do impacto das diferentes microgeometrias na força de corte (F_c) e força de avanço (F_f), além da temperatura na interface cavaco-ferramentas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 4 mostra a vida das ferramentas para as condições ensaiadas. Para a $(v_c) = 150 \text{ m/min}$, ambas as ferramentas revestidas tiveram uma vida superior a 15 min, demonstrando viabilidade de aplicação no torneamento de aços endurecidos, resultados que evidenciam a importância do revestimento em ferramentas de metal-duro quando aplicadas no torneamento de aços endurecidos. As duas ferramentas não-revestidas falharam antes da conclusão do primeiro passe de faceamento, evidenciando que somente o substrato do metal-duro não é capaz de suportar as condições tribológicas impostas pelo processo no torneamento de aços endurecidos.

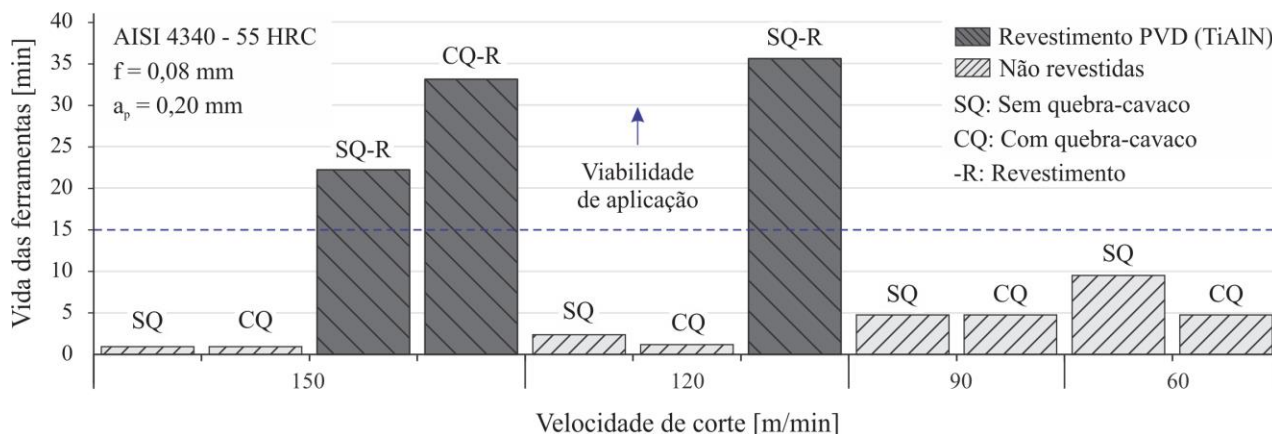


Figura 4. Vida das ferramentas SQ e CQ (com e sem revestimento) no torneamento radial do aço AISI 4340

Verifica-se na Fig. 4 uma diferença entre as duas ferramentas revestidas na $v_c = 150 \text{ m/min}$, onde CQ-R resistiu por $\sim 33,1 \text{ min}$ e SQ-R por $\sim 22,2 \text{ min}$, fato influenciado pelas diferentes microgeometrias. A ferramenta CQ-R possui menor ângulo de cunha (β) e ângulo de saída efetivo (γ_{eff}) positivo de $82,4^\circ$ (microgeometria + porta-ferramenta), situação que, conforme os dados de simulação mostrado na Fig. 5b, reduziu a força de corte (F_c) e força de avanço (F_f), além da temperatura na interface cavaco-ferramenta, em comparação a ferramenta SQ-R (Fig. 5a), que possui um ângulo de saída (γ) negativo de $95,5^\circ$. O raio do gume (ρ) da ferramenta SQ-R é aproximadamente 3 vezes maior que a ferramenta CQ-R, gerando assim uma maior área de contato entre peça-ferramenta, o que contribui com os resultados de força e temperatura obtidos.

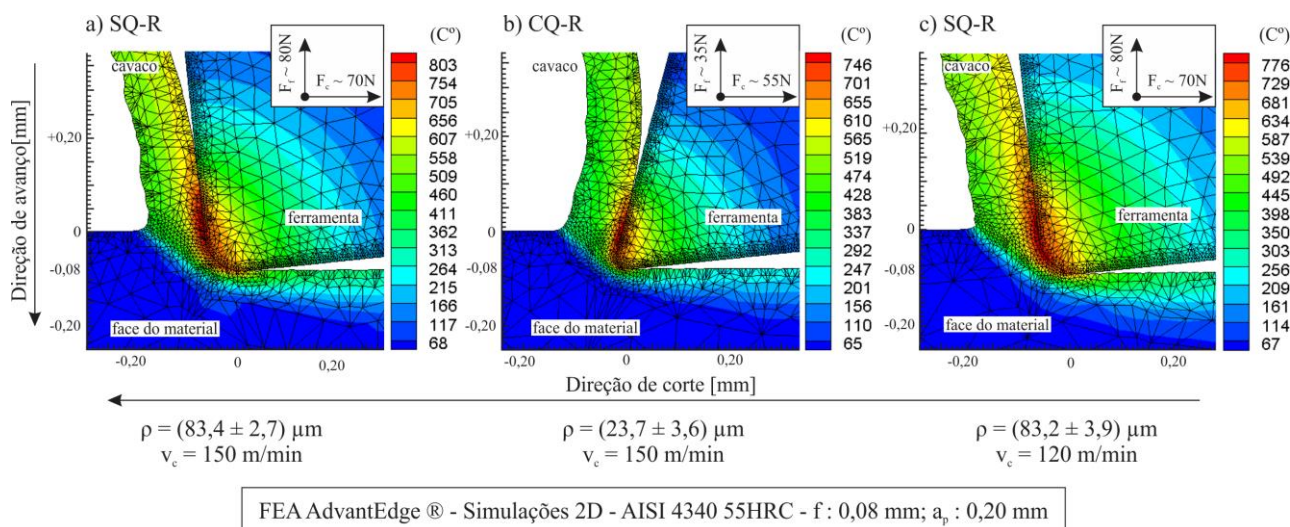


Figura 5. Simulações 2D do impacto da microgeometria sobre a força de corte (F_c) e força de avanço (F_f)

Apesar de ter ultrapassado o limite mínimo de vida estipulado (15 min) na velocidade de corte ($v_c = 150 \text{ m/min}$), a ferramenta SQ-R demonstrou uma diferença de $\sim 33\%$ em relação a ferramenta CQ-R. Com isso, realizou-se um novo ensaio com a ferramenta SQ-R a uma velocidade de corte ($v_c = 120 \text{ m/min}$), atingindo assim uma vida de $\sim 35,6 \text{ min}$. O resultado da simulação mostrado na Fig. 5c, apesar dos mesmos valores de força F_c e F_f , indica uma redução na temperatura na interface cavaco-ferramenta com a redução da velocidade de corte de ($v_c = 150 \text{ m/min}$ para ($v_c = 120 \text{ m/min}$), fato que pode ser associado a maior vida da ferramenta no menor patamar de velocidade de corte.

Em todos os patamares de velocidade de corte ensaiadas, ($v_c = 150, 120, 90, 60 \text{ m/min}$), as ferramentas sem revestimento não mostraram viabilidade de aplicação, o que deixa clara a importância do revestimento para a viabilização das ferramentas de metal-duro na usinagem de aços endurecidos, pois somente o substrato não é capaz de suportar as condições tribológicas impostas pelo processo de torneamento de aços endurecidos.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados demonstrados acima no torneamento radial do aço AISI 4340 com 55 HRC, utilizando ferramentas de metal-duro revestidas em PVD (TiAlN), não revestidas e com diferentes microgeometrias, conclui-se que:

- A ferramenta revestida com quebra cavaco (CQ-R) teve melhor desempenho na velocidade de corte (v_c) = 150 m/min, tendo uma vida ~33% superior em relação a ferramenta revestida sem quebra cavaco (SQ-R);
- A ferramenta revestida sem quebra cavaco (SQ-R) teve uma vida de ~35,6 min na velocidade de corte (v_c) = 120 m/min, resultado ~38% superior em relação a sua vida na velocidade de corte (v_c) = 150 m/min. Os dados de simulação mostraram uma redução da temperatura na interface cavaco-ferramenta, fato que contribuiu com a maior vida no menor patamar de velocidade de corte.
- Em todos os patamares de velocidade de corte ensaiadas, (v_c = 150, 120, 90, 60 m/min), as ferramentas sem revestimento não possuem viabilidade de aplicação no torneamento de aços endurecidos.

5. REFERÊNCIAS

- Alicona-Imaging. IF-Edge Master Module. Graz, p. 75. 2015.
- Boing, D., Oliveira, A. J., Schroeter, R. B., 2018. "Limiting conditions for application of PVD (TiAlN) and CVD (TiCN/Al₂O₃/TiN) coated cemented carbide". *Wear* 416-417, 54-61.
- Byrne, G., Dornfeld, D., Denkena, B., 2003. "Advancing Cutting Technology". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 52, n. 2, 483-507.
- Chinchani, S., Choudhury, S. K., 2013a. "Investigations on machinability aspects of hardened AISI 4340 steel at different levels of hardness using coated carbide tools". *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 38, 288-299.
- Chinchani, S., Choudhury, S. K., 2013b. "Wear behaviors of single-layer and multi-layer coated carbide inserts in high speed machining of hardened AISI 4340 steel". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27, n. 5.
- Diniz, A. E., Oliveira, A. J. D., 2008. "Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools". *Journal of Materials Processing Technology*, 195, 275-281.
- Klocke, F., König, W., 2011. "Manufacturing Processes 1 - Cutting". 1ª ed. Springer, 524 p.
- Oliveira, A. J., Boing, D., Schroeter, R. B., 2016. "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, 797-807.
- Oliveira, A. J. D., Diniz, A. E., Ursolino, J. D., 2009. "Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools". *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 5262-5270.

INFLUENCE OF THE CEMENTED CARBIDE TOOL CUTTING EDGE MICROGEOMETRY AND THE COATING IN THE HARD TURNING OF THE AISI 4340 STEEL WITH 55 HRC

André Gonçalves¹

Denis Boing²

University Center of Brusque (UNIFEBE) – 123 Dorval Luz St, Brusque, SC, 88352-400.
andre.goncalves@unifebe.edu.br¹, denis.boing@unifebe.edu.br²

Abstract. The development of new grades, methods and coating materials can enable the application of the cemented carbide tools in the hard turning processes, an application typically for ceramic and PCBN tools. The aim of this research is to verify the impact of the cemented carbide tool coating and microgeometry on the tool life in hard turning of AISI 4340 steel with 55 HRC. At the highest cutting speed tested (v_c = 150 m / min), better results were observed using coated tools with positive microgeometry (with chip break), tool life of 33.1 min; followed by the tool with negative rake angle (without chip breaking), tool life of 22.2 min. For all cutting speeds tested (v_c = 150, 120, 90, 60 m / min), the uncoated tools have no application feasibility (considering tool life greater than 15 min). The results show that the coating in the cemented carbide tools is mandatory to its application in hard turning process. The tool substrate is not able to withstand the tribological conditions imposed by the process.

Key words: Hard turning, cemented carbide, coating, tool microgeometry.