

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CLASSE DA FERRAMENTA DE METAL-DURO NO TORNEAMENTO DO AÇO AISI 4340 ENDURECIDO

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF METAL CARBIDE TOOL GRADE IN HARD TURNING AISI 4340 STEEL

Denis Boing¹

RESUMO: Com desenvolvimento dos materiais ultraduros para as ferramentas de usinagem (cerâmica e PCBN) combinadas com as máquinas-ferramentas com elevada rigidez e estabilidade dinâmica, o torneamento de materiais endurecidos adquiriu visibilidade no ambiente científico e industrial. Neste segmento, com o constante desenvolvimento das ferramentas de metal-duro, aprimoraram-se as ferramentas com grãos menores que $1\mu\text{m}$, as quais, comparadas às ferramentas com grãos convencionais, possuem maior dureza, maior resistência do gume e maior resistência ao desgaste abrasivo e difusivo. Associado ao refino do grão das ferramentas de metal-duro, o desenvolvimento de novas tecnologias de revestimento promovem propriedades adequadas às ferramentas de metal-duro para aplicação no torneamento de materiais endurecidos. Neste contexto, o principal objetivo desta pesquisa é estudar o comportamento das ferramentas de metal-duro de grãos finos e ultrafinos no torneamento do aço AISI 4340 endurecido com 55 HRC. Ensaios de torneamento foram realizados com parâmetros fixos de acabamento aplicando três diferentes classes de ferramentas de metal duro: uma classe com grãos ultrafinos e revestimento PVD de Al_2O_3 (C – 1125 – classe ISO P25) e duas classes com grãos finos e triplo revestimento de CVD ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$) com grãos epitaxiais da camada de alumina (A – 4315 – classe ISO P15) e (A – 4325 – classe ISO P25). Os resultados do trabalho foram avaliados em termos de vida da ferramenta e acabamento da superfície. A classe da ferramenta A – 4315 promoveu a melhor vida dentre as classes testadas, inclusive, com desempenho compatível para aplicação industrial. A classe da ferramenta C – 1125 promoveu maior dispersão dos resultados dentre as classes estudadas, atingindo de forma repentina o limite de vida estipulado – ou seja, o desgaste não foi progressivo. Todas as condições utilizadas nos experimentos promoverem rugosidades na classe N_6 , até $0,8\mu\text{m}$ na escala R_a – compatíveis com o torneamento de materiais endurecidos com ferramentas de PCBN e com o processo de retificação. Os resultados desta pesquisa indicam a possibilidade e a viabilidade da aplicação industrial das ferramentas de metal-duro no torneamento de materiais endurecidos.

¹ Professor, Coordenador dos cursos de Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção e Coordenador do Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação da UNIFEDE; Doutorado em Engenharia Mecânica (UFSC). E-mail: denisboing@unifebe.edu.br

PALAVRAS-CHAVE: Torneamento de materiais endurecidos; metal-duro, AISI 4340.

ABSTRACT: *With the development of ultrahard tools materials for machining (ceramic and CBN) combined with high rigidity and dynamics stability machine tools, hard turning acquired visibility in the scientific and industrial environment. In this industrial segment, the constant development of metal carbide tools, improved tools with grains smaller than 1 μm , which, compared tools conventional grains, have higher hardness, edge strength, toughness and low tendency to abrasive and diffusive wear. Associated with the grain refining, the development of new coatings technologies provide suitable properties for applying metal carbide tools in hard turning process. In this context, the main intention of this research is to study the behavior of metal carbide tools with fine and ultrafine grains in the hard turning of AISI 4340 steel with 55 HRC. Turning tests were performed with fixed finishing parameters applying three different grades of metal carbide tools – ultrafine grains with PVD Al_2O_3 coating (C – 1125 – grade ISO P25) and two grades of fine grains with triiple CVD coating ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$) - uni-directional crystal orientation alumina layers (A – 4315 – grade ISO P15) and (A – 4325 – grade ISO P25). The study results were assessed by the tool life and roughness surface. The tool grade A – 4315 promoted better life in this experiments, reaching performance compatible for industrial application. The tool grade C – 1125 promoted greater dispersion of results, reaching suddenly the end of tool life, in others words the wear was not progressive. All conditions used in the experiments promoted roughness surface in N6 grade, up to 0,8 μm in Ra scale - compatible with the hard turning with PCBN tools and the grinding process. These results show the possibility and viability of the industrial application of metal carbide tools in hard turning.*

KEYWORDS: *Hard turning; metal carbide, AISI 4340.*

1 INTRODUÇÃO

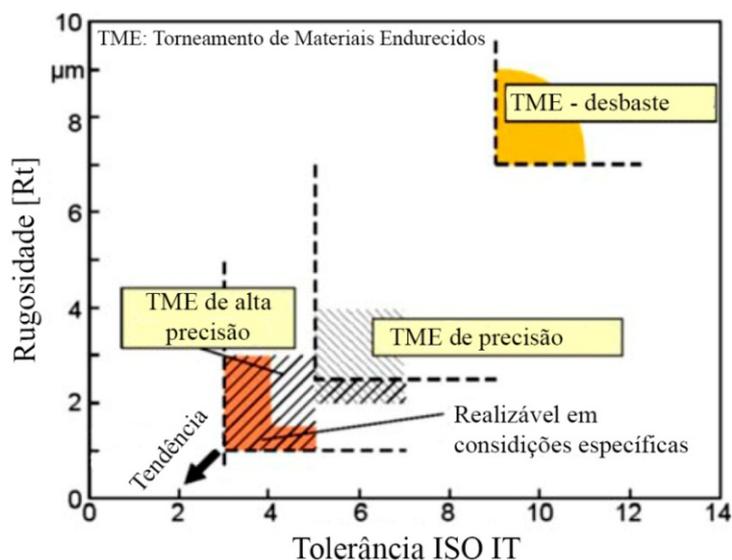
Inúmeros componentes funcionais e de suporte em um sem número de aplicações são tipicamente construídos em aços endurecidos com o objetivo de suportar as condições físicas de aplicação, principalmente quanto às solicitações de resistência ao desgaste e às tensões. Como exemplo, o sistema de transmissão em um automóvel, seja este mecânico ou automático, é composto por um conjunto de componentes dimensionados e especificados para possibilitar a transmissão da força e do torque do motor para as rodas, e para isso, os aços utilizados precisam ser endurecidos para garantir a resistência necessária.

Nos processos de manufatura, as operações de acabamento de componentes fabricados em aços endurecidos são tradicionalmente realizadas pelo processo de usinagem de retificação. Somente a partir da década de 1980 com o desenvolvimento de máquinas-ferramentas com elevada rigidez e estabilidade dinâmica, associada ao desenvolvimento de ferramentas de usinagem construídas em materiais ultraduros (cerâmicas e PCBN), o processo de torneamento tornou-se capaz para realizar tais operações de acabamento. Desde então, o torneamento de

materiais endurecidos vem sendo extensivamente pesquisado e aplicado industrialmente em substituição, ou até mesmo, de forma híbrida com os processos de retificação (KOCH, 1996; KLOCKE, BRINKSMEIER e WEINERT, 2005; ASTAKHOV, 2011).

Inúmeras pesquisas evidenciam a aplicação das ferramentas de cerâmica e de PCBN no torneamento de diferentes tipos de materiais aplicados na indústria. Como exemplo, podem-se citar pesquisas nos aços de construção mecânica (AISI 4340) (DINIZ e OLIVEIRA, 2008; OLIVEIRA, DINIZ e URSOLINO, 2009), nos aços para rolamentos (AISI 52100) (SAHIN, 2009), nos aços-ferramentas (AISI D2) (POULACHON, BANDYOPADHYAY, et al., 2003; ARSECULARATNE, ZHANG, et al., 2006) e até mesmo nos ferros fundidos brancos (BOING, 2011). Nos diferentes materiais supracitados, o torneamento de materiais endurecidos de alta precisão é capaz de atingir rugosidade em torno de $1 \mu\text{m}$ na escala Rt e tolerância padrão ISO equivalente a IT3 (BYRNE, DORNFELD e DENDENA, 2003; GRZESIK, 2008), conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Rugosidade versus tolerância ISO IT para o torneamento de materiais endurecidos.

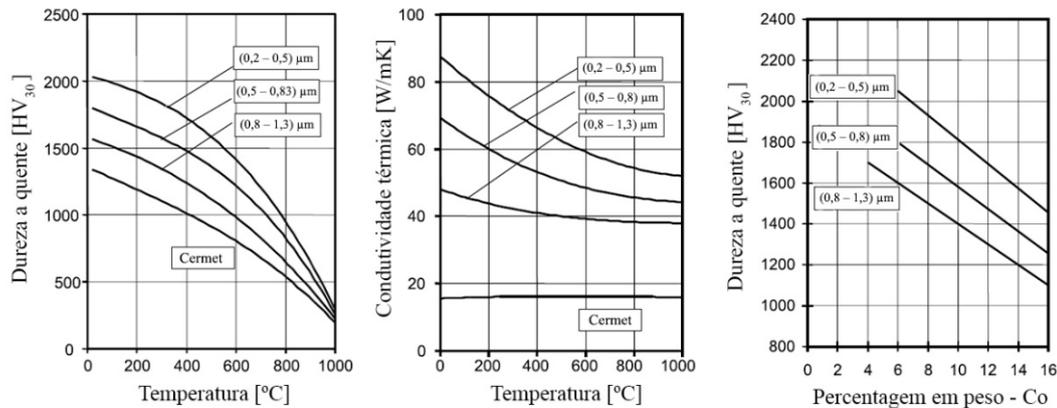


Fonte – Byrne, Dornfeld e Dendena (2003).

A capacidade do processo de torneamento de materiais endurecidos mostrada na Figura 1 é baseada quando ferramentas de PCBN e cerâmica são aplicadas. Apesar de tais ferramentas possuírem ótimo desempenho na operação específica, o processo de fabricação das ferramentas de cerâmica e PCBN ainda é dispendioso, limitando sua gama de aplicações. Neste contexto de aplicação industrial, o desenvolvimento das ferramentas de metal-duro com grãos menores que $1 \mu\text{m}$, as quais, comparadas às ferramentas de metal-duro de grãos convencionais, possuem valores superiores de dureza, resistência do gume e tenacidade, além de baixa tendência à aderência. Teoricamente, tais propriedades remetem à ferramentas de metal-duro de grãos finos e ultrafinos propriedades compatíveis com o torneamento de materiais endurecidos, e com isso, podem tornar-se uma alternativa às ferramentas cerâmicas e PCBN, desde que possibilitem a geração de padrões de tolerâncias compatíveis com as ferramentas cerâmicas e de PCBN (KLOCKE e

(KLOCKE e KÖNIG, 2008; FANG, XANG, et al., 2009; CHINCHANIKAR e CHOUDHURY, 2013). A Figura 2 mostra algumas propriedades do metal-duro comparando o tamanho do grão de carboneto e a percentagem de aglomerante.

Figura 2 - Propriedades do metal-duro

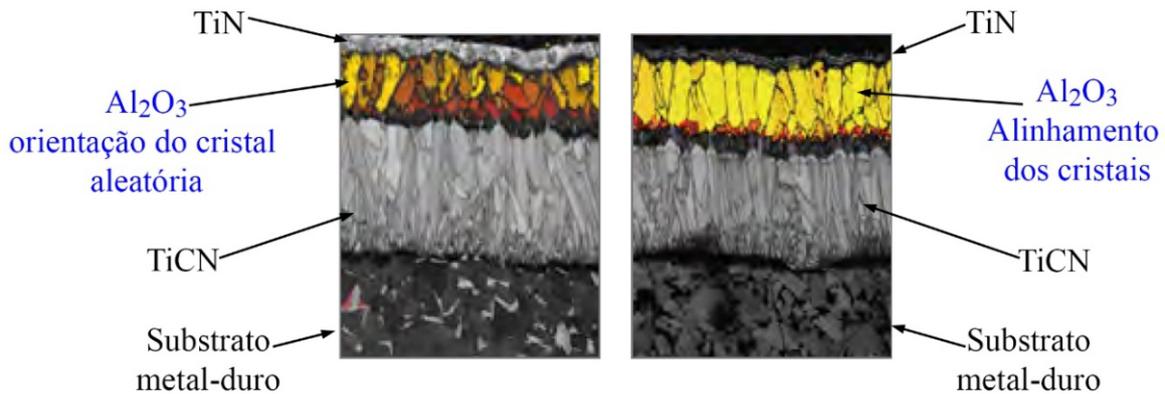


Fonte – Gille, Szesny, *et al.* (2002)

Como pode ser constatado na Figura 2, quanto menor o tamanho do grão e menor a percentagem de aglomerante, maior a dureza das ferramentas. A redução no tamanho do grão do metal-duro também possibilita maior resistência do gume (TRENT e WRIGHT, 2000; GILLE, SZESNY, et al., 2002; KLOCKE e KÖNIG, 2008). Apesar das propriedades compatíveis, as principais limitações para a aplicação das ferramentas de metal-duro no torneamento de materiais endurecidos devem-se à elevada dureza, resistência mecânica e os componentes microestruturais (como os carbonetos) do material usinado, os quais impõem restrições nas condições de corte empregadas e com isso, influenciam diretamente no rendimento do processo. No entanto, a associação do substrato das ferramentas de metal-duro com revestimentos específicos podem incrementar as propriedades de tais ferramentas e assim, viabilizar a operação.

Historicamente, a aplicação de revestimento tem provado ser um meio eficaz para tratar as condições encontradas na usinagem, o qual promove melhor resistência ao desgaste da ferramenta e benefícios em relação a custos. Os materiais de revestimentos frequentemente utilizados para ferramentas de corte são compostos refratários binários ou ternários, tais como os clássicos TiN (Nitreto de Titânio), TiC (Carboneto e Titânico), TiCN (Carbonitreto de Titânio) e Al₂O₃ (Óxido de Alumínio), que são muitas vezes aplicados em camadas múltiplas, conforme mostra a Figura 3, e produzem um significativo aumento da vida da ferramenta (BUNSHAH, 2001; UPADHYAYA, 1998).

Figura 3 - Ferramentas de metal-duro com multicamadas.



Fonte – Adaptado de Sandvik Coromant (2015).

Cada camada possui uma função específica, normalmente o TiC ou o TiCN são utilizados como primeira camadas pois garantem uma coesão muito boa com o substrato. As principais vantagens do Al_2O_3 são inércia química e dureza, e com isso, possui alta resistência ao desgaste. Outra característica importante do Al_2O_3 é a redução na condutividade térmica com o aumento da temperatura, situação que garante uma barreira térmica para a superfície da ferramenta. Salienta-se que quanto menor a condutividade térmica do revestimento, melhor, pois menor será a quantidade de calor que chegará ao substrato (KLOCKE e KÖNIG, 2008).

Uma inovação recentemente incorporada ao mercado dos revestimentos das ferramentas trata-se da orientação dos cristais na camada de revestimento de Al_2O_3 (Figura 3), ou seja, camada com grãos epitaxiais. Os cristais de Al_2O_3 são orientados de forma unidirecional, com o plano atômico mais denso na direção da superfície de corte, possibilitando maior direcionamento de calor para o cavaco e para os meios lubrificantes. A parcela de calor absorvida pela ferramenta é conduzida pelos planos atômicos de menor densidade próximos da camada de revestimento de TiCN , onde é dissipada na própria camada de TiCN e no substrato. Em resumo, além da orientação dos cristais elevarem a dureza da camada de revestimento Al_2O_3 , também auxiliam na dissipação do calor, evitando maior parcela de carga térmica no substrato (SANDVIK-COROMANT, 2015).

No contexto do torneamento de materiais endurecidos, esta pesquisa objetiva mostrar o comportamento de três diferentes classes de ferramentas de metal-duro no torneamento do aço AISI 4340 endurecido, visando fornecer subsídios para aplicação industrial das ferramentas de metal-duro em operações de acabamento por torneamento de materiais endurecidos.

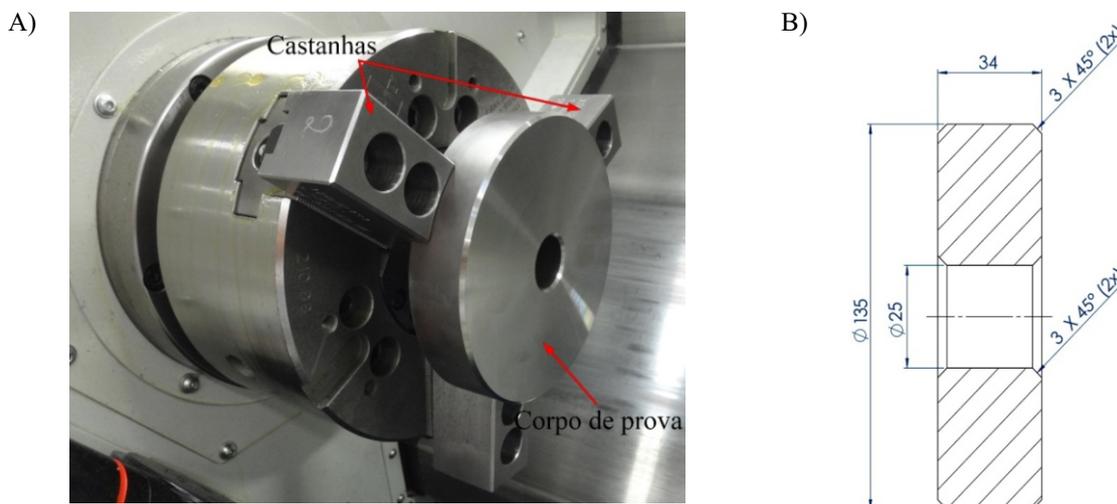
2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos foram realizados no Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação do Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE, utilizando os métodos, materiais e procedimentos especificados a seguir.

Os experimentos foram realizados em um Centro de Torneamento Horizontal da fabricante

ROMI, modelo GL240, com motor do eixo-árvore com 15 kW de potência. Com o objetivo de conferir rigidez e a estabilidade dinâmica do sistema de fixação do corpo de prova, e minimizar as distorções dimensionais ao longo dos experimentos, foram utilizadas castanhas endurecidas (28 ± 2 HRC). O material utilizado para os corpos de prova foi ao aço AISI 4340 com dureza de 55 ± 1 HRC. A Figura 4 mostra o sistema de fixação utilizado e as dimensões dos corpos-de-prova.

Figura 4 – A) sistema de fixação e B) dimensões do corpo-de-prova.



Fonte – Os Autores.

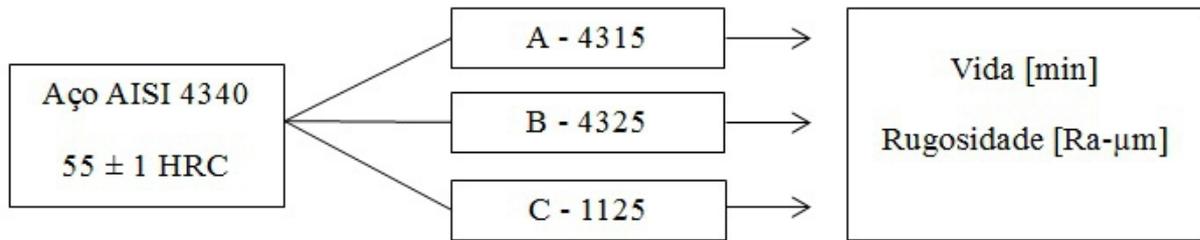
Com o objetivo de minimizar os choques na entrada e saída da ferramenta, foram confeccionados chanfros no diâmetro externo e interno do corpo de prova (dimensão de $3 \times 45^\circ$). Os chanfros foram reexecutados quando reduzidos a $0,5 \times 45^\circ$.

Os experimentos consistiam em passes de faceamento no sentido radial. Com isso, o furo no centro do corpo de prova ($\varnothing = 25$ mm) foi desenvolvido para permitir a manutenção da velocidade de corte constante programada.

Os ensaios foram realizados com ferramentas e porta-ferramentas fornecidos pela empresa Sandvik Coromant®. Foram utilizadas três ferramentas de metal-duro SNMG 120408-MF: A – 4315 classe ISO P15 – ferramenta com substrato de metal-duro com grãos finos e triplo revestimento CVD ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$). A camada de revestimento de Al_2O_3 possui a tecnologia de alinhamento dos grãos conforme mostrado na Figura 3; B – 4325 classe ISO P25 – ferramenta com substrato de metal-duro com grãos finos e mesmo triplo revestimento CVD ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$) com grãos epitaxiais da classe A – 4315; C – 1125 classe ISO P25 – ferramenta de metal-duro com grãos ultrafinos e revestimento PVD de Al_2O_3 .

As variáveis de entrada dos experimentos foram justamente as três classes de ferramentas supracitadas. A Figura 5 mostra as variáveis de entrada e as variáveis de saída dos experimentos.

Figura 5 – Variáveis de entrada e saída dos experimentos.



Fonte - Os autores.

O experimento consistia em passes de torneamento na face do corpo de prova em sentido radial (do diâmetro maior para o diâmetro menor), utilizando interrupções em intervalos regulares (a cada 1,29 min de corte contínuo – ou seja, um passe na face do corpo de prova) com o objetivo de analisar os valores de desgaste de flanco (VB_B) e rugosidade da superfície usinada, até que o critério de fim de vida da ferramenta fosse atingido (desgaste de flanco médio $VB_B = 0,2$ mm). Para confiabilidade dos resultados, foram realizadas três réplicas dos experimentos.

O desgaste de flanco médio (VB_B) foi monitorado com o auxílio de um microscópio digital da marca Insize® modelo ISM-P200, com ampliação máxima de 200 vezes, acoplado ao software Insize® ISM-PRO. Para a análise da rugosidade, utilizou-se o rugosímetro Mitutoyo® SJ-310, ajustado para medir 5 comprimentos de amostragem (λ_c) de 0,8 mm – comprimento de avaliação de 4 mm. As medições foram realizadas sobre a superfície usinada na direção do avanço (sentido radial do corpo de prova). Antes do início de cada experimento, a calibração foi verificada com o auxílio de um padrão de calibração.

Durante os experimentos, o corpo de prova era retirado da máquina-ferramenta para executar as medições da rugosidade. Com o objetivo de minimizar as fontes de variabilidade no reposicionamento na castanha, o batimento radial do corpo de prova foi analisado com um relógio apalpador da marca Insize® com resolução de 0,01 mm, montado em um suporte magnético.

Os parâmetros de usinagem foram mantidos fixos ao longo dos experimentos, sendo: velocidade de corte (v_c) = 150 m/min; profundidade de corte (a_p) = 0,2 mm; e avanço por volta (f) 0,08 mm. Antes do início do ensaio, a superfície a ser usinada foi preparada com uma ferramenta de corte dedicada. O objetivo desta preparação era tornar uma superfície de referência para minimizar o batimento radial do corpo de prova após a fixação. Na sequência à criação da superfície de referência, a ferramenta utilizada na regularização da superfície foi substituída e se iniciava o experimento.

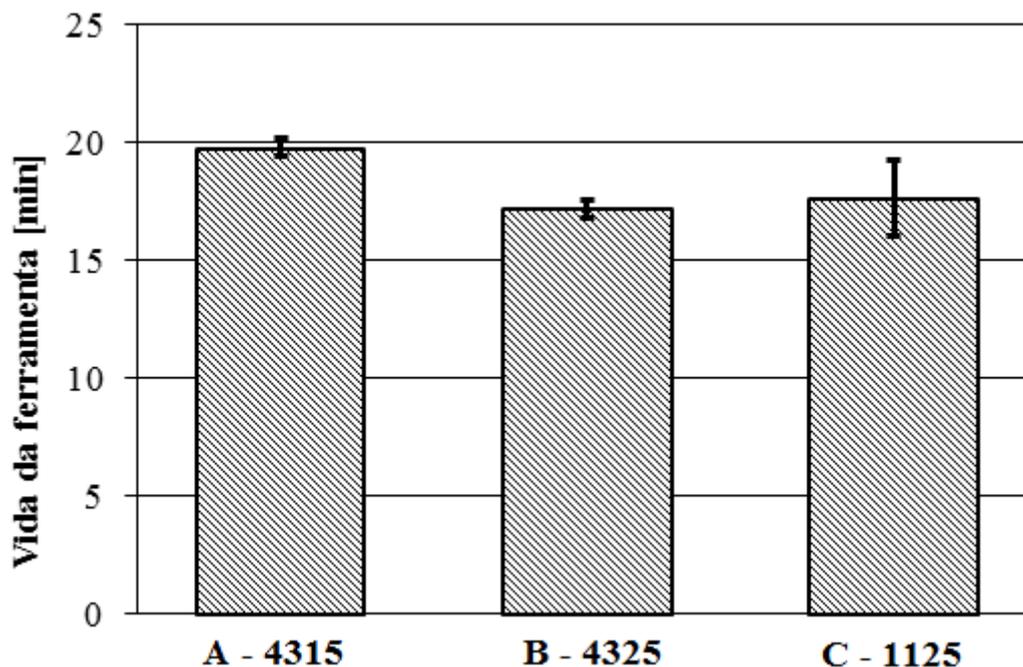
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 VIDA DAS FERRAMENTAS

A Figura 6 mostra os resultados da vida das ferramentas utilizadas nos experimentos. Os resultados mostrados representam a média das três réplicas realizadas, sendo que, o desvio padrão

para as médias está mostrado pela barra de erros das colunas.

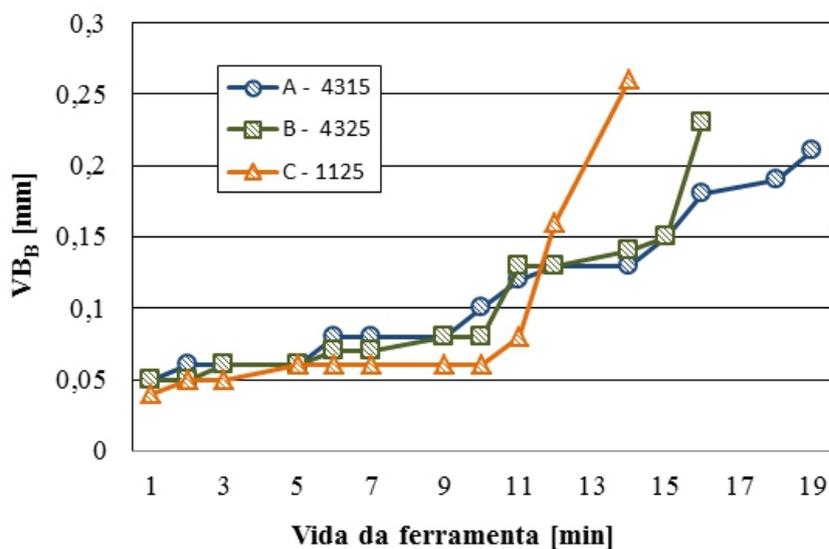
Figura 6 – Vida das ferramentas.



Fonte – Os autores.

Analisando os resultados mostrados na Figura 6, verifica-se que ambas as classes de metal-duro possuíam rendimentos satisfatórios na usinagem do aço AISI 4340 com 55 HRC. Sendo, o melhor resultado obtido pela classe A – 4315, seguido pelas classes B – 4325 e C – 1125. Para as últimas, não se pode inferir com um intervalo de confiança de 95% que possuíam resultados diferentes. Entretanto, a classe C – 1125 apresentou maior dispersão dos resultados entre as réplicas dos experimentos em comparação as classes A e B. A Figura 7 mostra a evolução do desgaste de flanco médio (VB_B) das três classes das ferramentas em uma das réplicas dos experimentos.

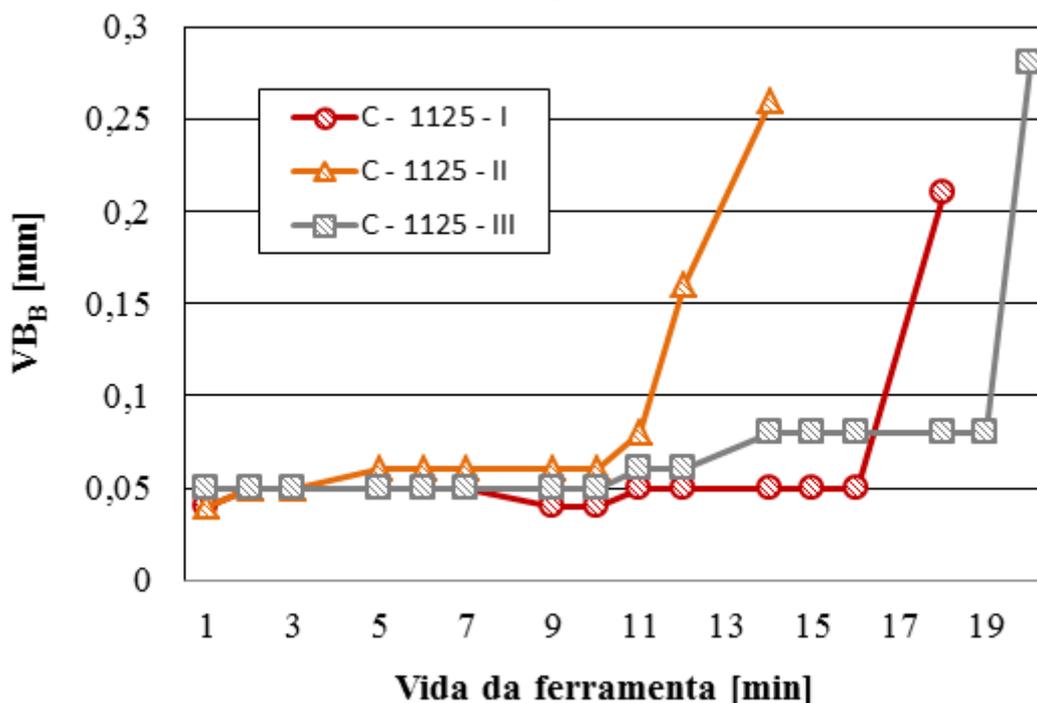
Figura 7 – Evolução do desgaste de flanco médio (VB_B) ao longo da vida das ferramentas.



Fonte – Os autores.

Analisando a Figura 7 verifica-se que o desgaste das ferramentas A – 4315 e B 4325 foram progressivos em uma taxa de desgaste praticamente c até atingir o limite de vida de $VB_B = 0,2$ mm. Porém, analisando a curva de vida da ferramenta C – 1125 verifica-se que a partir de certo ponto (aproximadamente 11 minutos de vida), ocorre um súbito aumento do desgaste, e com isso, o limite de vida é atingido de forma repentina. A Figura 7 mostra o ocorrido em apenas uma réplica dos experimentos. No entanto, conforme mostrado na Figura 8, tal fenômeno ocorreu em todas as réplicas para a ferramenta C – 1125.

Figura 8 - Evolução do desgaste de flanco médio (VB_B) ao longo da vida das ferramentas classe C – 1125 nas três réplicas dos experimentos.



Fonte - Os autores.

Analisando as curvas de vida mostradas na Figura 8, verifica-se que para todas as réplicas o desgaste da ferramenta é praticamente linear até certo limite crítico. Após, ocorre um súbito aumento do desgaste e as ferramentas ultrapassam o limite de desgaste de vida pré-estabelecido de $VB_B = 0,2$ mm, tal situação promove uma instabilidade do processo conforme, acarretando na maior dispersão mostrada na Figura 6. Uma hipótese para explicar tal situação é a proteção térmica que o revestimento promove na ferramenta. A partir do ponto que o revestimento é totalmente consumido na interface cavaco-ferramenta, e com isso, o substrato da ferramenta de metal-duro está diretamente em contato com o fluxo do cavaco na face da ferramenta. As condições de corte praticadas ao longo do experimento acarretam em elevadas temperaturas na interface cavaco-ferramenta, possivelmente maior que a temperatura de austenitização do material (geralmente acima de 800°C) e com isso, o substrato da ferramenta perde consideravelmente suas propriedades (ver Figura 2) acarretando, desta forma, a atuação severa dos mecanismos de desgaste.

Ao contrário da classe C -1125, tanto a classe A – 4315 como a B – 4325 possuíram elevada

estabilidade do processo (ver dispersão na Figura 6), para ambas, o desgaste foi progressivo em todas as réplicas dos experimentos. Uma hipótese para explicar tal resultado está relacionada com as propriedades do revestimento aplicado em ambas às classes (idêntico). Além do maior número de camadas de revestimento (três), os grãos epitaxiais promovem com maior eficiência uma barreira térmica entre o substrato do metal-duro e o fluxo de cavaco na face da ferramenta, e com isso, o desgaste foi progressivo até o limite de vida da ferramenta ($VB_B = 0,2 \text{ mm}$). Além disso, as classes A – 4315 e B – 4325 podem ter composição mais adequado no substrato para a usinagem do aço específico. Não se pode descartar, que se o limite de vida fosse ampliado, poderíamos também visualizar nas classes A – 4315 e B – 4325 o súbito aumento do desgaste como o verificado para a classe C – 1125.

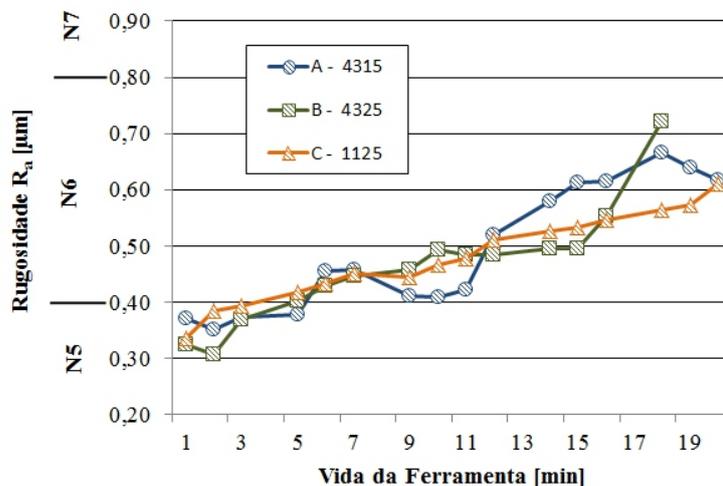
A explicação para a ferramenta A – 4315 possuir maior vida em comparação à classe B – 4325 está na própria classificação ISO das ferramentas. A ferramenta A – 4315 (ISO P15) é uma ferramenta com maior dureza e o substrato foi configurado para trabalhar em operações de acabamento com condições boas de usinagem – como as praticadas ao longo destes experimentos. A ferramenta B – 4325 (ISO P25) possui valor de dureza relativamente menor em comparação a A – 4315. Tal condição promoveu a pequena diferença na vida entre ambas as ferramentas.

Como conclusão parcial do item, verificou-se que, para as condições aplicadas nestes experimentos, a classe A – 4315 promoveu o melhor desempenho – inclusive com vida compatível para aplicação industrial da classe. Para isso, torna-se preciso analisar o padrão de acabamento da superfície gerada por tais ferramentas, situação que será discutida no próximo item.

3.2 ACABAMENTO DA SUPERFÍCIE

A Figura 9 mostra a evolução do parâmetro de rugosidade R_a ao longo da vida das ferramentas em uma das réplicas dos experimentos. A Figura 9 mostra a evolução do acabamento em apenas uma das réplicas, pois o comportamento foi extremamente similar nas demais.

Figura 9 – Evolução da rugosidade no parâmetro R_a ao longo da vida das ferramentas.



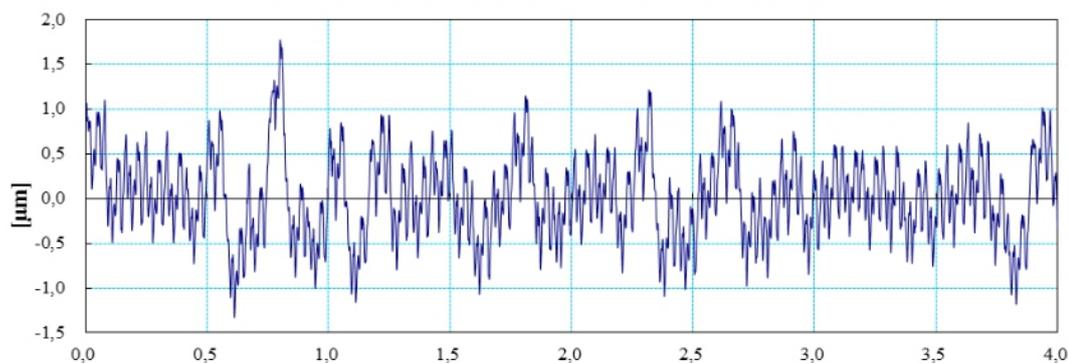
Fonte – Os autores.

Conforme pode ser verificado na Figura 9, os padrões de acabamento gerado nos experimentos desta pesquisa correspondem aos acabamentos gerados pelo torneamento de materiais endurecidos utilizando ferramentas cerâmica e de PCBN, e ainda, equivalem aos processos de acabamento gerados. No início da vida das ferramentas, a rugosidade manteve-se na classe N5, ou seja, até $R_a = 0,4 \mu\text{m}$. No início da vida das ferramentas, quando o desgaste ainda não promoveu uma alteração significativa na forma das ferramentas, a rugosidade é formada basicamente pela cinemática da operação de acabamento. Com a evolução do desgaste das ferramentas, a rugosidade evoluiu para a classe N6, até $R_a = 0,8 \mu\text{m}$.

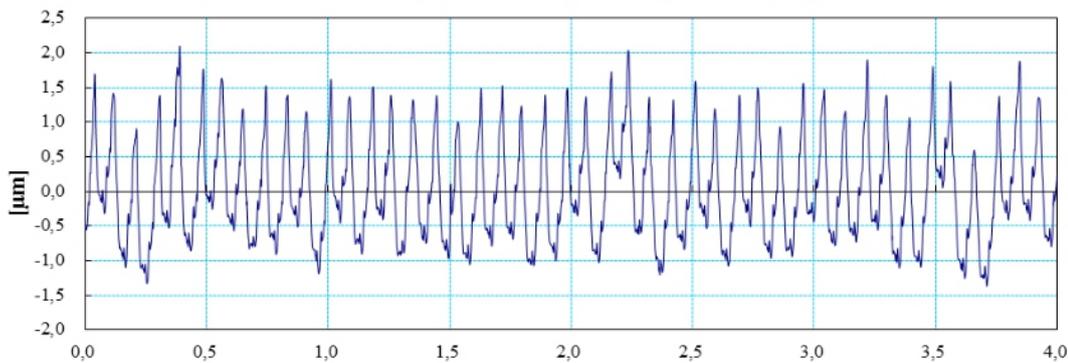
As Figuras 10, 11 e 12 mostram o perfil da rugosidade para as classes de ferramentas utilizadas nos experimentos no início e no final da vida das ferramentas.

Figura 10 – Perfil da rugosidade gerada pela ferramenta A – 4315 no início (A) e no final da vida (B).

A) A - 4315 - Início da vida da ferramenta: $R_a = 0,377 \mu\text{m} / R_z = 2,529 \mu\text{m} / R_t = 3,109 \mu\text{m}$



B) A - 4315 - Final da vida da ferramenta: $R_a = 0,610 \mu\text{m} / R_z = 3,087 \mu\text{m} / R_t = 3,471 \mu\text{m}$

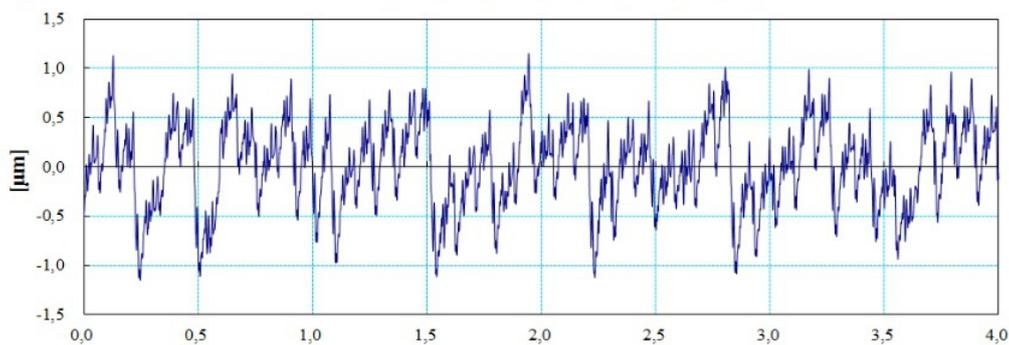


Comprimento de avaliação [mm]

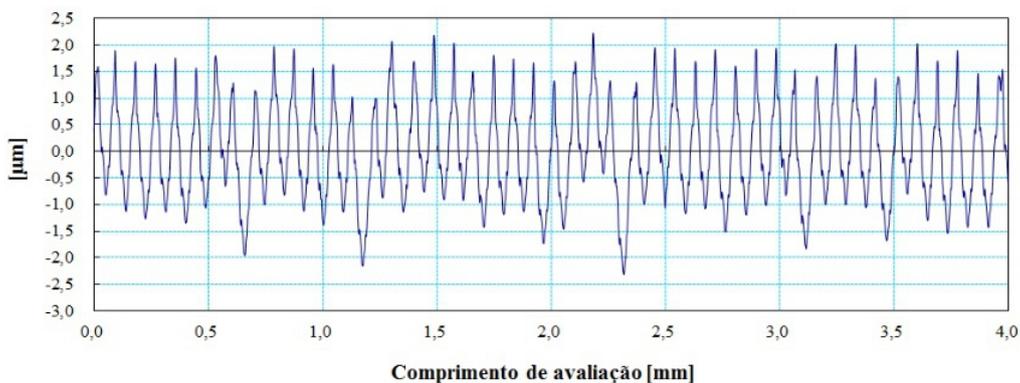
Fonte – Os autores.

Figura 11 – Perfil da rugosidade gerada pela ferramenta A – 4325 no início (A) e no final da vida (B).

A) B - 4325 - Início da vida da ferramenta: $R_a = 0,344 \mu\text{m} / R_z = 2,114 \mu\text{m} / R_t = 2,305 \mu\text{m}$



B) B - 4325 - Final da vida da ferramenta: $R_a = 0,766 \mu\text{m} / R_z = 4,060 \mu\text{m} / R_t = 4,537 \mu\text{m}$

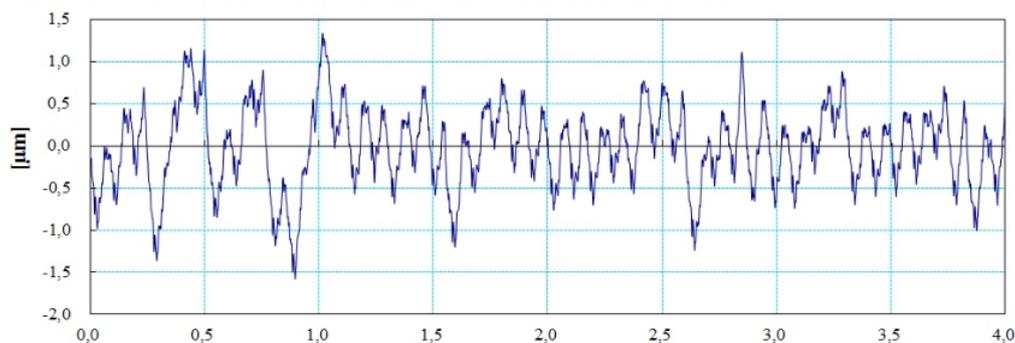


Comprimento de avaliação [mm]

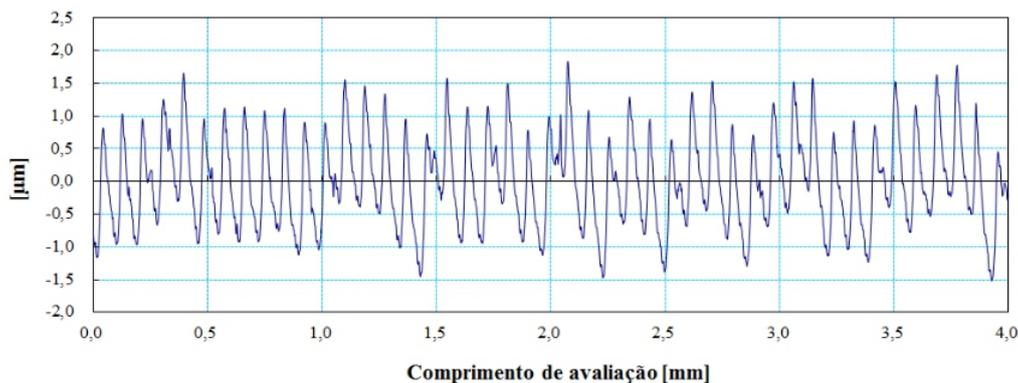
Fonte 1 – Os autores.

Figura 12 – Perfil da rugosidade gerada pela ferramenta A – 1125 no início (A) e no final da vida (B).

A) C - 1125 - Início da vida da ferramenta: $R_a = 0,377 \mu\text{m} / R_z = 2,304 \mu\text{m} / R_t = 2,917 \mu\text{m}$



B) C - 1125 - Final da vida da ferramenta: $R_a = 0,574 \mu\text{m} / R_z = 3,089 \mu\text{m} / R_t = 3,360 \mu\text{m}$



Comprimento de avaliação [mm]

Fonte 1 – Os autores.

Analisando o perfil da rugosidade gerada pelas ferramentas nas Figuras 10,11 e 12, verifica-se que no início da vida das ferramentas o perfil de rugosidade não segue uma frequência tão bem definida como no final da vida das ferramentas. Apesar de no início da vida da ferramenta o perfil de rugosidade ser formado basicamente pela cinemática da operação, pode ocorrer um fenômeno chamado de fluxo lateral de material. As operações de acabamento no torneamento de materiais endurecidos adotam profundidades de usinagem pequenas (tipicamente $a_p = 0,05$ a $0,20$ mm), restringindo a espessura do cavaco na região secundária de corte. Com isso, a ferramenta torna-se incapaz de cisalhar, e o material é deformado para a superfície de folga da ferramenta, gerando o fluxo lateral do cavaco.

Ao final da vida das ferramentas, o perfil da rugosidade gerada por ambas foi extremamente similar, mostra uma típica variação dos picos em uma frequência bem definida. A principal diferença do perfil das rugosidades em relação ao início da vida está no perfil de formação do vale. Pode-se verificar que nos perfis mostrados para o final da vida das ferramentas, as espessuras dos vales são mais largas e possuem a um pequeno intervalo (degrau) ou uma outra pequena depressão (detalhes na parte inferior do perfil da rugosidade ao final da vida das ferramentas). Tal perfil refere-se justamente ao padrão de desgaste das ferramentas, principalmente na região secundária de corte – região que transfere a topografia do desgaste para a topografia da peça.

4 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados dos experimentos desta pesquisa apontam-se as seguintes conclusões:

- a classe da ferramenta A – 4315 promoveu a melhor vida dentre as classes testadas, inclusive, com desempenho compatível para aplicação industrial;
- a classe da ferramenta C – 1125 promoveu maior dispersão dos resultados dentre as classes estudadas, atingindo de forma repentina o limite de vida estipulado – ou seja, o desgaste não foi progressivo;
- todas as condições utilizadas nos experimentos promoverem rugosidades na classe N6, até $0,8 \mu\text{m}$ na escala R_a – compatíveis com o torneamento de materiais endurecidos com ferramentas de PCBN e com o processo de retificação.

Os resultados mostrados nos experimentos desta pesquisa indicam a possibilidade e a viabilidade da aplicação industrial das ferramentas e metal-duro no torneamento de materiais endurecidos. Para viabilizar com confiabilidade tal aplicação, sugere-se continuar a pesquisa com identificação dos mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas e realizar avaliações mais completas quanto à textura e integridade da superfície.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradem as seguintes instituições, órgãos de fomento e programas públicos pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa:

- Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE;
- FAPESC – Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina;
- Sandvik Coromant®;
- UNIEDU – Programa de Bolsas Universitárias de Santa Catarina;

6 REFERÊNCIAS

ARSECULARATNE, J. A. et al. On machining of hardened AISI D2 steel with PCBN tools. **Journal of Materials Processing Technology**, 171, 2006. 244-252.

ASTAKHOV, V. P. Machining of Hard Materials - Definitions and Industrial Applications. In: DAVIM, J. D. **Machining of Hard Materials**. Springer-Verlag London Limited, 2011. p. 211.

BOING, D. **Análise da vida de ferramentas de PcBN no torneamento do ferro fundido branco com alto teor de cromo**. Instituto Superior Tupy - IST/SOCIESC. Joinville, p. 149. 2011.

BUNSHAH, R. F. **Handbook of Hard Coatings - Deposition Technologies, Properties and Applications**. Norwich: Noyes Publications / William Andrew Publishing, LLC, 2001. 550 p. ISBN: 0-8155-1438-7.

BYRNE, G.; DORNFELD, D.; DENDENA, B. Advancing Cutting Technology. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 52, n. 2, 2003. 483-507.

CHINCHANIKAR, S.; CHOUDHURY, S. K. Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: An optimization approach. **Measurement**, 46, 2013. 1572–1584.

DINIZ, A. E.; OLIVEIRA, A. J. D. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. **Journal of Materials Processing Technology**, 195, 2008. 275-281.

FANG, Z. Z. et al. Synthesis, sintering, and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide - A review. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, 27, 2009. 288-299.

GILLE, G. et al. Submicron and ultrafine grained hardmetals for microdrills and metal cutting inserts. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, 20, 2002. 3-22.

GRZESIK, W. **Advanced Machining Processes of Metallic Materials - Theory, Modelling and Applications**. Elsevier, 2008.

KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; WEINERT, K. Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 54, 2005. 22-45.

KLOCKE, F.; KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren 1 - Drehen, Fräsen, Bohren**. [S.l.]: Springer, 2008. 547 p.

KOCH, K. F. **Technologie des Hochpräzisions-Hartdrehens**. Aachen, p. 169. 1996. Dr.-Ing. Dissertation (RWTH-Aachen).

OLIVEIRA, A. J. D.; DINIZ, A. E.; URSOLINO, J. D. Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools. **Journal of Materials Processing Technology**, 209, 2009. 5262-5270.

POULACHON, G. et al. The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. **International Journal of Machine tools & Manufacture**, 43, 2003. 139-144.

SAHIN, Y. Comparison of tool life between ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools when machining hardened steels. **Journal of Materials Processing Technology**, 209, 2009. 3478-3489.

SANDVIK - COROMANT. Steel turning endurance. **http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/pages/default.aspx**, 2015. Disponível em: <<http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/campaigns/cutting-steel-inserts/assets/white-paper-eng.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2015.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. Butterworth-Heinemann, 2000.

UPADHYAYA, G. S. **Cemented Tungsten Carbide: Production, properties and testing**. 1. ed. ed. New Jersey: Editora Noyes Publications, 1998.