

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA – FEMEC
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARIANE CARLA REZENDE SANTOS

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO REVESTIMENTO TiN EM FERRAMENTA DE
METAL DURO NO TORNEAMENTO DE AÇO 1050**

UBERLÂNDIA

2017

MARIANE CARLA REZENDE SANTOS

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO REVESTIMENTO TiN EM FERRAMENTA DE
METAL DURO NO TORNEAMENTO DE AÇO 1050**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

UBERLÂNDIA

2017

MARIANE CARLA REZENDE SANTOS

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO REVESTIMENTO TiN EM FERRAMENTA DE
METAL DURO NO TORNEAMENTO DE AÇO 1050**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Mecânica, Campus
Santa Mônica, da Universidade Federal de
Uberlândia, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Uberlândia, 31 de outubro de 2017

Banca Examinadora

Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva
Orientador

Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi
Membro da Banca

Prof. Dr. Mauro Paipa Suárez
Membro da Banca

**Uberlândia – MG
2017**

À minha avó Diná (em memória).

Aos meus pais, Dirce e Elmo.

À minha irmã, Daniela.

Ao meu namorado, Diego.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

À minha querida avó Diná (em memória), que sempre me apoiou, acompanhou minha luta para chegar até aqui e tinha o sonho de me ver formada, mas infelizmente faleceu no último período do meu curso.

À Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de fazer o curso.

Ao meu orientador Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho.

Aos alunos do LPU, Letícia Cristina Silva e Maksym Ziberov, pela ajuda nos testes.

Aos meus pais, irmã e namorado, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise do usinabilidade de aço 1050, variando a velocidade de corte, em ferramentas de metal duro com e sem revestimento de TiN, avanço de 0,1 mm/rev, profundidade de corte 2,0 mm e percurso de avanço 15 mm. A força média, adquirida com Dinamômetro plataforma piezoelétrica, foi maior com a ferramenta com revestimento TiN na maior parte do gráfico. O grau de recalque foi predominantemente maior para a ferramenta sem revestimento. A rugosidade média da peça usinada com a ferramenta sem revestimento é maior do que com a ferramenta com revestimento, adquirida com rugosímetro digital. Os gráficos e as imagens feitas com Microscópio Eletrônico de Varredura, mostraram que no teste de 30 m/min sem revestimento e no teste de 40 m/min com revestimento houve incidência de aresta postiça de corte (APC). Na velocidade de 60 m/min para a ferramenta com revestimento ainda tinha aresta postiça de corte. Porém, na velocidade de 60 m/min sem revestimento já não havia mais aresta postiça de corte. Assim, com o revestimento, a aresta postiça de corte esteve mais presente do que sem revestimento. Marcas decorrentes de vibração da máquina e desgaste da ferramenta foram encontradas nas imagens da superfície superior da amostra de cavaco da condição de velocidade de corte 60 m/min e ferramenta sem revestimento TiN. Essa amostra foi embutida com massa plástica, lixada, polida e atacada com ácido Nital 2% e sua microestrutura analisada. Conclui-se que a ferramenta com revestimento, apesar de apresentar mais aresta postiça de corte, apresentou mais vantagens no processo, pois a peça usinada teve melhor acabamento superficial.

Palavras-chave: Torneamento; Ferramenta de metal duro; Revestimento TiN; Usinagem de aço 1050; Embutimento de Cavaco; Microscópio Eletrônico de Varredura; Aresta Postiça de Corte.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the machinability of the AISI 1050 Carbon Steel machining, varying the cutting speed, in carbide tools with and without TiN coating, advance of 0.1 mm/rev, depth of cut 2.0 mm and travel of advance 15 mm. The average force, acquired with Piezoelectric platform Dynamometer, was higher with the TiN coated tool in most of the graph. The degree of repression was predominantly higher for the uncoated tool. The average roughness of the workpiece machined with the uncoated tool is greater than with the coated tool, acquired with a digital rugosimeter. The graphs and images made with Scanning Electron Microscope showed that in the 30 m/min uncoated test and the 40 m/min coated test there was an incidence of built up edge. At the speed of 60 m/min for the coated tool still had built up edge. However, at 60 m/min without coating there was no more built up edge. Thus, with the coating, the built up edge was more present than uncoated. Marks due to machine vibration and tool wear were found on the top surface images of the chip sample of the cutting speed condition 60 m/min and tool without TiN coating. This sample was mounted with plastic putty, sanded, polished and attacked with 2% Nital acid and its analyzed microstructure. It was concluded that the coated tool, although presenting more built up edge, presented more advantages in the process, because the machined part had superior surface finish.

Keywords: Turning; Carbide turning tools; TiN Coating; AISI 1050 Carbon Steel machining; Chip mounting; Scanning Electron Microscope; Built up edge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Operações realizadas no torno. (MACHADO et al., 2015)	2
Figura 2. Mecânica de formação do cavaco. (MACHADO et al., 2015)	3
Figura 3. Tipos de cavacos. (MACHADO et al., 2015)	4
Figura 4. Formas de cavaco produzidos por usinagem. (MACHADO et al., 2015)	4
Figura 5. Força de usinagem e suas componentes para o processo de torneamento. (MACHADO et al., 2015)	5
Figura 6. Formação de APC. (MACHADO et al., 2015)	7
Figura 7. Influência da velocidade de corte sobre a APC e a força de corte. (REIS, 2000)	8
Figura 8. Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados. (ROHDE, 2010)	11
Figura 9. Lixadeira e Politriz Metalográfica marca Fortel modelo PLF do LEPU.	12
Figura 10. Torno Revolution RV 220 com Dinamômetro plataforma piezoelétrica Kistler.	17
Figura 11. Peça de aço 1050, diâmetro 52,5 mm e comprimento 680 mm.	17
Figura 12. Rugosímetro Taylor Hobson Surtronic 3+.	18
Figura 13. Paquímetro digital Stainless Hardened.	18
Figura 14. Materiais de consumo em geral: a) Massa plástica, b) lixas, c) pratos com panos de polimento, pasta de diamante 3 μ m e 6 μ m, álcool etílico.	19
Figura 15. Influência da velocidade de corte na força de corte média para as duas ferramentas.	20
Figura 16. Influência da velocidade de corte no grau de recalque para as duas ferramentas.	21
Figura 17. Influência da velocidade de corte na rugosidade média para as duas ferramentas.	22
Figura 18. Influência da velocidade de corte na variação da força de corte para as duas ferramentas.	22
Figura 19. Velocidades onde provavelmente tem APC.	24
Figura 20. Gráfico da variação da força de corte no tempo para a) velocidade de 30 m/min em ferramenta sem revestimento e b) velocidade de 40 m/min em ferramenta com revestimento TiN.	24
Figura 21. a) cavacos da ferramenta sem revestimento e velocidade 30 m/min e b) cavacos da ferramenta com revestimento e velocidade 40 m/min.	25
Figura 22. Velocidade onde provavelmente houve desaparecimento de APC.	26
Figura 23. Gráfico das variações de força no tempo, para ferramenta sem revestimento e com revestimento, respectivamente.	26

Figura 24. a) Cavacos da ferramenta sem revestimento e velocidade 60 m/min e b) cavacos da ferramenta com revestimento e velocidade 60 m/min. _____ 27

Figura 25. Marcas observadas no cavaco da condição ferramenta sem revestimento 60 m/min. _____ 28

Figura 26. Amostra de cavaco embutida (ferramenta sem revestimento com velocidade de corte 60 m/min). _____ 29

Figura 27. Imagem MEV microestrutura da lateral do cavaco (60 m/min sem revestimento). 29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Identificação de ferramentas de metal duro. (ISO 513:2012)	6
Tabela 2. Métodos de ataque químico. (ROHDE, 2010)	13
Tabela 3. Reativos mais utilizados para ataque químico. (ROHDE, 2010)	13
Tabela 4. Dados para cálculo da velocidade do cavaco.	28

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
SUMÁRIO	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Torneamento.....	2
2.2 Formação de cavaco.....	2
2.3 Força de Usinagem	4
2.4 Ferramentas de Metal Duro.....	6
2.5 Aresta Postiça de Corte.....	7
2.6 Metalografia	9
2.6.1 Lixamento	10
2.6.2 Processo mecânico de polimento.....	11
2.6.3 Ataque Químico.....	13
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
5 CONCLUSÕES	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31

1 INTRODUÇÃO

Neste projeto será feita uma análise da usinabilidade do aço 1050, variando a velocidade de corte, com ferramentas de metal duro com e sem revestimento de TiN sem quebra cavaco, avanço de 0,1 mm/rev, profundidade de corte 2,0 mm e percurso de avanço aproximadamente 15 mm.

A ideia para realização deste projeto partiu de uma aula de formação de cavaco que o Professor Dr. Márcio Bacci da Silva ministrou para os alunos da pós-graduação, onde surgiu o questionamento sobre os reais efeitos do revestimento TiN da ferramenta na peça usinada.

Os objetivos deste trabalho são verificar a força de corte média e o comportamento da variação da força de corte no torneamento usando ferramentas de metal duro com e sem revestimento TiN, investigar presença de aresta postiça de corte, avaliar a rugosidade da peça torneada, e principalmente avaliar espessura, microestrutura, observar microscopicamente os cavacos e identificar o impacto desses fatores na qualidade superficial da peça.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Torneamento

Torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo (NBR 6175).

A Figura 1 mostra as principais operações realizadas no torno, que são torneamento cilíndrico externo, torneamento cilíndrico interno, torneamento cônico interno, torneamento cônico externo, faceamento, perfilamento, sangramento e recartilamento (MACHADO et al., 2015).

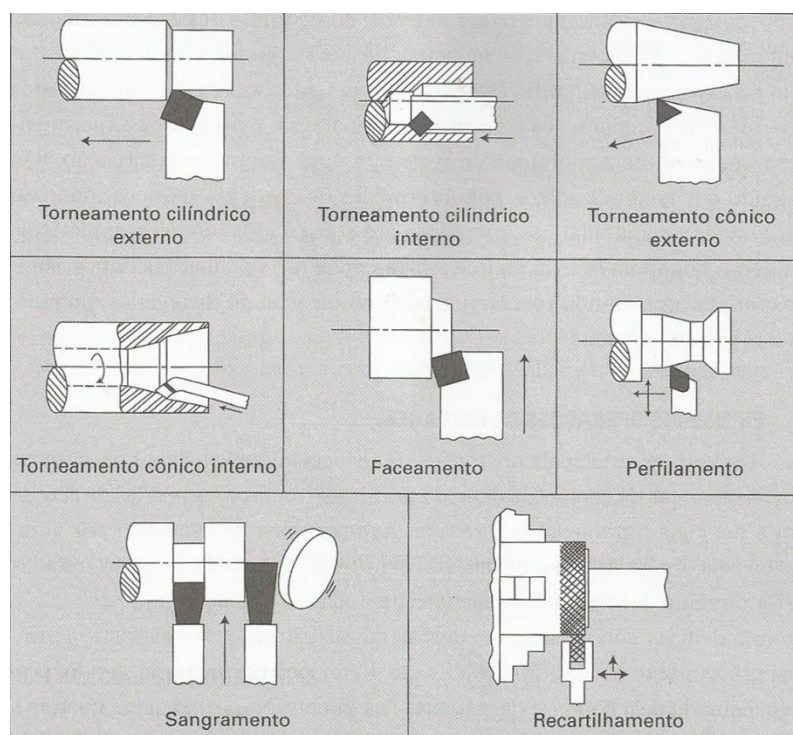


Figura 1. Operações realizadas no torno. (MACHADO et al., 2015)

2.2 Formação de cavaco

O fenômeno de formação de cavaco, nas condições normais de trabalho com ferramentas de metal duro ou de aço rápido é um fenômeno periódico, inclusive a formação de cavaco

contínuo tem-se uma fase de recalque e uma fase de escorregamento para cada porção de material removido (FERRARESI, 1977).

Divide-se esse processo em quatro eventos (MACHADO et al., 2015):

Recalque inicial: devido à penetração da cunha cortante no material da peça, uma pequena porção deste (ainda unido à peça) é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta.

Deformação e ruptura: o material sofre, de início, uma deformação elástica, e, em seguida uma deformação plástica, que aumenta progressivamente até o estado de tensões provocar a ruptura (cisalhamento). Após a ruptura há a formação de uma trinca que se propaga seguindo o critério de propagação de trincas do material.

Deslizamento das lamelas: continuando a penetração da ferramenta na peça, haverá uma ruptura parcial, ou completa, na região de cisalhamento, dependendo da extensão da propagação da trinca.

Saída do cavaco: devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformado e rompida - o cavaco – sobre a superfície de saída da ferramenta.

Um esquema da mecânica de formação de cavaco é mostrado na Figura 2 (MACHADO et al., 2015).

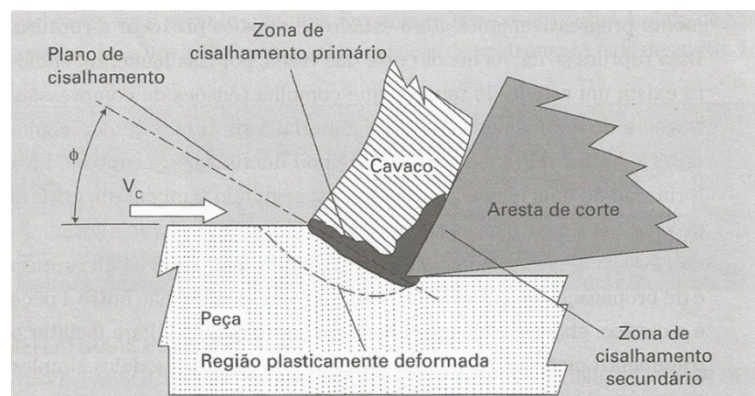


Figura 2. Mecânica de formação do cavaco. (MACHADO et al., 2015)

Na Figura 3 apresenta um esquema dos tipos de cavacos, que são cavaco contínuo, cavaco contínuo com APC, e cavaco descontínuo.

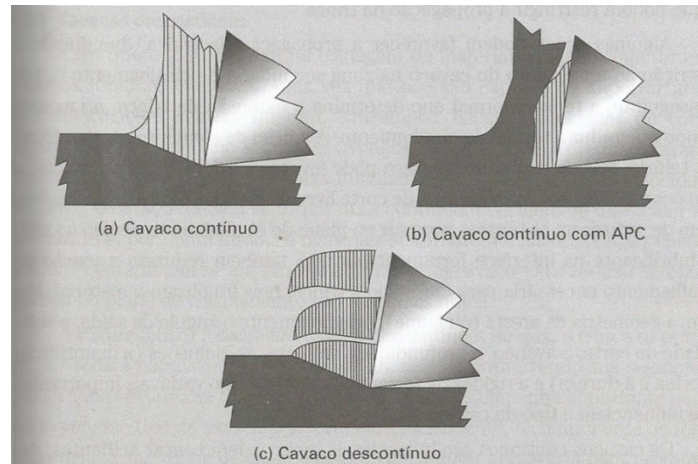


Figura 3. Tipos de cavacos. (MACHADO et al., 2015)

A Figura 4 indica as formas de cavacos, que são cavaco em fita, cavaco tubular, cavaco espiral, cavaco helicoidal cônico, cavaco em arco, cavaco tipo agulha e suas divisões.

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco helicoidal tipo arruela	5- Cavaco helicoidal cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conectado		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

Figura 4. Formas de cavaco produzidos por usinagem. (MACHADO et al., 2015)

2.3 Força de Usinagem

No livro do Ferraresi (1977), ele explica a Força de usinagem e suas componentes para o processo de torneamento, como está descrito a seguir. Para ilustrar a explicação, tem-se a Figura 5, que foi retirada do livro de Machado et al. (2015) que foi considerada mais didática.

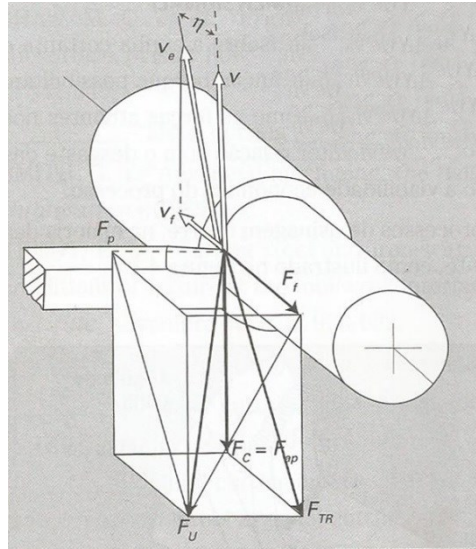


Figura 5. Força de usinagem e suas componentes para o processo de torneamento. (MACHADO et al., 2015)

Onde (FERRARESI, 1977):

F_u é a força de usinagem: força que a peça exerce sobre a ferramenta durante a usinagem.

F_c é a força de corte ou força principal de corte: projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte (v_c).

F_f é a força de avanço: projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção do avanço, dada pela velocidade de avanço (v_f).

F_p é a força passiva ou força de profundidade: projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.

F_{TR} é a força ativa: projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho.

F_n é a força de compressão: é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular à superfície principal de corte;

F_{ap} é a força de apoio: projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho.

$$F_u = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (1)$$

2.5 Aresta Postiça de Corte

Segundo Machado et al. (2015) a aresta postiça de corte (APC) é um fenômeno que ocorre na interface ferramenta/cavaco quando se usina em baixas velocidades de corte. Uma primeira camada do material da peça se une à ferramenta por meio de ligações atômicas e endurece a frio, aumentando o limite de escoamento, tornando a tensão de cisalhamento insuficiente para romper tais ligações. As deformações, então, continuam nas camadas superiores adjacentes, mais afastadas da interface, até que estejam também encruadas o suficiente. Pela repetição desse processo, uma sucessão de camadas forma a APC, cujo tamanho pode aumentar indefinidamente, portanto, quando o seu tamanho atinge um valor no qual a tensão de cisalhamento é suficiente para mudar a zona primária de cisalhamento (que até então acontecia acima da APC), partes de sua estrutura são cisalhadas e arrastadas entre as superfícies da peça e a superfície de folga da ferramenta. Essa ruptura e arrastamento podem ocorrer entre a superfície inferior do cavaco e a superfície de saída da ferramenta. O fenômeno de formação da APC está representado na Figura 6.

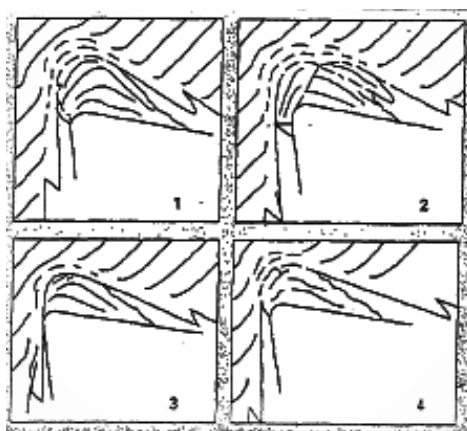


Figura 6. Formação de APC. (MACHADO et al., 2015)

Segundo Zorev (1966, apud Sukvittayawong e Inasaki, 1994), que por sua vez descreveu a influência típica da velocidade de corte sobre a APC e a força de corte, utilizando o gráfico mostrado na Figura 7. Inicialmente, para velocidades bem pequenas, a APC ainda está ausente e a tendência é a redução da força com o aumento da velocidade de corte devido ao aumento da geração de calor. Com o aparecimento da APC (V1), a força de corte diminui imediatamente porque o ângulo de saída real é consideravelmente aumentado e a área do plano de cisalhamento secundário é reduzida. À medida em que a velocidade de corte é

aumentada, as dimensões da APC também aumentam, até um valor máximo (V_2), onde a força de corte atinge um valor mínimo. O aumento da velocidade de corte além deste ponto faz com que a APC entre em regime instável e a força de corte comece a aumentar até o ponto de velocidade crítica (V_3), a partir do qual a APC desaparece. O aumento da velocidade de corte além deste ponto exerce pouca influência nos valores da força de usinagem. Pela maior geração de calor e consequente redução da resistência ao cisalhamento do material nas zonas de cisalhamento e pela ligeira redução na área de contato cavaco-ferramenta, a força de usinagem tende a sofrer uma pequena redução com o aumento da velocidade, notando-se que para valores mais altos de velocidades o comportamento da força é praticamente constante (REIS, 2000).

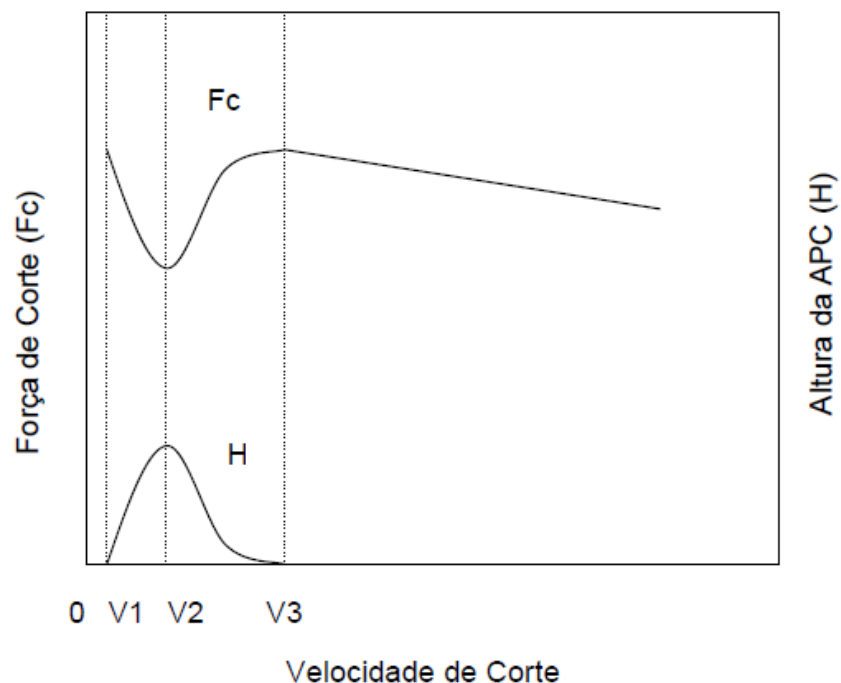


Figura 7. Influência da velocidade de corte sobre a APC e a força de corte. (REIS, 2000)

2.6 Metalografia

A Metalografia é o estudo das propriedades e da estrutura dos metais e das suas ligas. A metalografia pode ser dividida entre macrografia e micrografia (COLPAERT, 1974).

A macrografia consiste no exame do aspecto de uma peça ou amostra metálica, segundo uma seção plana devidamente polida e em regra atacada por um reativo apropriado. O aspecto, assim obtido, chama-se macro-estrutura. O exame é feito à vista ou com auxílio de lupa, com ampliação máxima de dez vezes. Para ampliações maiores, emprega-se o termo micrografia, por que são, em geral, obtidas com o microscópio (COLPAERT, 1974).

A micrografia estuda os produtos metalúrgicos, com auxílio de microscópio, visando a determinação de seus constituintes e de sua textura. Este estudo é feito com superfícies previamente polidas e, em geral, atacadas por um reativo adequado. Com o auxílio de uma técnica apropriada, consegue-se tornar visível a estrutura microscópica do material, pondo assim em evidência os diversos grãos de que são formados. A apreciação da natureza destes, suas respectivas porcentagens, suas dimensões, arranjo e formato, e a interpretação desses dados constituem o escopo do exame micrográfico dos metais. A importância deste exame decorre do fato de as propriedades mecânicas de um metal dependerem não só da sua composição química, como também de sua textura (COLPAERT, 1974).

Se por um lado, a análise química revela de que se compõe o metal, os exames macro e micrográfico fornecem preciosas informações sobre como o metal adquiriu as propriedades que apresenta (COLPAERT, 1974).

A produção do corpo de prova dos processos de macro e micrografia se dão por processos muito parecidos, acrescido de alguns cuidados especiais na micrografia, pois a superfície será examinada no microscópio. Nesse trabalho será utilizado o ensaio micrográfico. Dessa forma, serem descritas as fases de um ensaio micrográfico, que são as seguintes (COLPAERT, 1974):

- Escolha e localização da localização da seção a ser estudada;
- Realização de uma superfície plana e polida no lugar escolhido, sendo, quando necessário, limada e esmerilhada cuidadosamente, depois lixada com papéis de lixa comuns de oficina mecânica, em seguida o polimento prossegue então em lixas mais finas, até eliminar os riscos deixados pelas lixas mais grossas;

- Exame ao microscópio para a observação das ocorrências visíveis sem ataque, como inclusões, trincas, porosidades, veios ou partículas de grafita já visíveis nesse estado;
- Ataque da superfície por um reagente químico adequado, por imersão ou aplicação. Os reativos mais utilizados são: solução de ácido nítrico a 1% em álcool etílico, solução de ácido pícrico a 4% em álcool etílico, solução de picrato de sódio, e ataque oxidante por aquecimento. Terminado o ataque, lava-se a superfície com álcool, seca com algodão embebido com álcool e submete-se o corpo de prova à um jato de ar quente;
- Exame ao microscópio para observação da textura;
- Obtenção de documentos que reproduzam e conservem o aspecto observado (fotografia).

Quando a preparação do corpo de prova de pequenas dimensões não permite a adequada manipulação durante o lixamento e polimento, é necessário fazer o embutimento da amostra (SILVA, 1977).

As técnicas de embutimento mais utilizadas são:

- Embutimento à quente sob pressão, onde a amostra é colocada em uma prensa hidráulica com uma resina, levando em consideração a pressão utilizada, a temperatura de moldagem e tempo de polimerização da resina;
- Embutimento à frio, quando o corpo de prova é frágil e de pequena dimensão, a ponto de não resistir às pressões necessárias no embutimento sob pressão. A amostra é colocada em um molde que é preenchido com resinas sintéticas de polimerização rápida.

2.6.1 Lixamento

Operação que tem por objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície dando um acabamento a esta superfície, preparando-a para o polimento. Existem dois processos de lixamento: manual (úmido ou seco) e automático. A técnica de lixamento manual consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior, conforme Figura 8. (ROHDE, 2010)

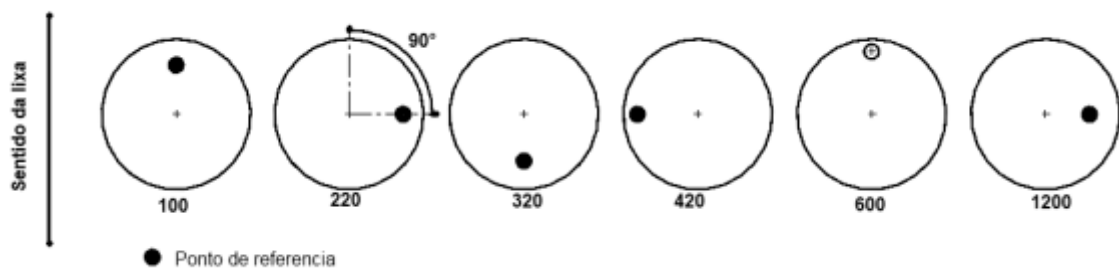


Figura 8. Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados. (ROHDE, 2010)

Segundo ROHDE (2010), para se conseguir um lixamento eficaz é necessário o uso adequado da técnica de lixamento, pois de acordo com a natureza da amostra, a pressão de trabalho e a velocidade de lixamento, surge deformações plásticas em toda a superfície por amassamento e aumento de temperatura. Esses fatores podem dar uma imagem falseada da amostra, por isso devem-se ter os seguintes cuidados:

- Escolha adequada do material de lixamento em relação à amostra e ao tipo de exame final;
- A superfície deve estar rigorosamente limpa, isenta de líquidos e graxas que possam provocar reações químicas na superfície;
- Riscos profundos que surgirem durante o lixamento deve ser eliminado por novo lixamento;
- Metais diferentes não devem ser lixados com a utilização da mesma lixa.

2.6.2 Processo mecânico de polimento

Segundo Rohde (2010), polimento mecânico é quando o polimento é realizado através de uma Politriz, Figura 9.

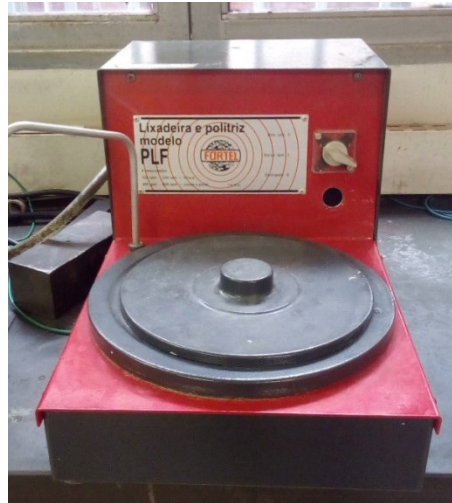


Figura 9. Lixadeira e Politriz Metalográfica marca Fortel modelo PLF do LEPU.

O polimento mecânico pode ser manual, quando a amostra é trabalhada manualmente no disco de polimento, e automática quando as amostras são lixadas em dispositivos especiais e polidas sob a ação de cargas variáveis. O agente polidor mais utilizado para o polimento mecânico é o diamante, devido as suas características de granulometria, dureza, forma dos grãos e poder de desbaste, porem a alumina também é um ótimo agente polidor sendo utilizada com concentração de 10% em várias granulometrias. Dependendo do tipo de agente polidor escolhido será escolhido o pano de polimento (ROHDE, 2010).

O procedimento para polimento descrito por ROHDE (2010) é o seguinte:

- Verificar se o pano da Politriz é adequado para o tipo de abrasivo, pois cada pano é para um tipo de abrasivo, e se encontra em condições de uso;
- Verificar se o pano de polimento está limpo, ou seja sem abrasivo de tipo diferente do que vai ser utilizado;
- Verificar se o motor está funcionando corretamente;
- Se for polir com alumina coloque a mesma sobre o pano de polimento e abra a água (bem pouco) para a lubrificação e eliminação de impurezas, se for polir com pasta de diamante espalhe a mesma sobre o pano e lubrifique com álcool;
- Segurar a amostra levemente em cima do pano de polimento, recomenda-se movimentar a amostra o no sentido inverso ao do movimento do pano, mas para iniciantes recomenda-se apenas segurar a amostra em cima do pano para não riscar.

2.6.3 Ataque Químico

Para visualização dos contornos de grãos e diferentes fases da microestrutura do material, um reagente ácido é colocado em contato com a superfície da peça por um tempo, causando sua corrosão. A Tabela 2 mostra os principais métodos de ataque químico (ROHDE, 2010).

Tabela 2. Métodos de ataque químico. (ROHDE, 2010)

Método	Descrição e notas
Ataque por imersão	A superfície da amostra é imersa na solução de ataque; o método mais usado.
Ataque por gotejamento	A solução de ataque é gotejada sobre a superfície da amostra. Método usado com soluções reativas dispendiosas.
Ataque por lavagem	A superfície da amostra é enxaguada com a solução de ataque. Usado em casos de amostras muito grandes ou quando existe grande desprendimento de gases durante o ataque.
Ataque alternativo por imersão	A amostra é imersa alternadamente em duas soluções. As camadas oriundas do ataque com a primeira solução são removidas pela ação do segundo reagente.
Ataque por esfregação	A solução de ataque, embebida em um chumaço de algodão ou pano, é esfregada sobre a superfície da amostra, o que serve para remover as camadas oriundas da reação.

Os reagentes são escolhidos em função do material e dos constituintes macroestruturais que se deseja contrastar na análise metalográfica microscópica. Os reativos mais utilizados para ataque químico estão na Tabela 3 (ROHDE, 2010).

Tabela 3. Reativos mais utilizados para ataque químico. (ROHDE, 2010)

Designação metalográfica	Composição	Aplicação
Cloreto de cobre-amônio em meio amoniacal	10 g cloreto de cobre-amônio 120 ml água destilada Amoníaco até dissolver o precipitado.	Reativo para micrografia de múltipla aplicação para ligas de cobre.
Cloreto de ferro III	5 g cloreto de ferro III 30 ml.	Reativo para micrografia de

	ácido clorídrico concentrado 100 ml de água destilada.	superfícies de grãos em liga de cobre, contrastes especialmente acentuados em cristais α .
Água oxigenada + Amoníaco	1 parte de água oxigenada a 3% 1 parte de amoníaco.	Reativos para micrografia de contornos dos grãos de cobre.
Lixívia de solda	10 g hidróxido de sódio 90 ml água destilada.	Reativo universal para micrografia de ligas de alumínio.
Ácido fluorídrico	0,5 ml ácido fluorídrico 99,5 água ml destilada.	
Adler	3 g cloreto de cobre II amoniacal 25 ml água destilada 15 g cloreto de ferro III 50 ml ácido clorídrico concentrado.	Reativo para Macrografia de aço cobre e ligas de cobre, cordões de solda, estruturas macroscópicas, camadas cementadas, zonas temperadas, segregações, estruturas primárias.
Oberhoffer	0,5 g cloreto de estanho II 1 g cloreto de cobre II 30 g cloreto de ferro III 42 ml ácido clorídrico concentrado 500 ml água destilada 500 ml álcool etílico.	Reativo para Macrografia de aço, segregações, estruturas primárias.
Reativo de ação profunda para aço	1 parte de ácido clorídrico concentrado 1 parte de água.	Reativo para Macrografia de aço, segregações, inclusões, fissuras, escórias, poros.
Fry	100 ml água destilada 120 ml ácido clorídrico concentrado 90g cloreto de cobre II.	Reativo para Macrografia a fim de tornar visíveis linhas de ação de forças em aços sensíveis ao envelhecimento.
Baumann	5 ml ácido sulfúrico concentrado 95 ml água destilada.	Revelação da distribuição de enxofre no aço, com auxílio de papel fotográfico para ampliações.
Reativo macrográfico Para alumínio e suas ligas	10 ml ácido clorídrico concentrado 10 ml ácido nítrico concentrado 10 ml ácido fluorídrico 2,5 ml água.	Cordões de solda e macroestruturas. Determinação microscópica do tamanho do grão no processo rápido.
Nital a 3%	97 ml álcool etílico 3 ml ácido nítrico concentrado.	Reativo para micrografia de aço e ferro não ligado e de baixa liga, metal branco, ligas de magnésio. Também para aços de alta liga com estrutura martensítica.
Nital a 10%	90 ml de álcool etílico 10 ml de ácido nítrico concentrado.	Em ataques microscópicos de ação profunda para tornar visível constituintes especiais da estrutura em aços e ferros

		(carbonetos, eutético fosforoso) não ligados e de baixa liga. Em casos isolados também como reativo para microscopia de alta liga. Em macroscopia para camadas cementadas respectivamente profundidade de endurecimento.
Reativo V2A de Goerens	100 ml ácido clorídrico concentrado 100 ml água destilada 10 ml ácido nítrico concentrado 0,3 ml de inibidor.	Reativo para micrografia de aços inoxidáveis.
Água Régia	8 ml ácido nítrico concentrado 12 ml ácido clorídrico concentrado 1 l álcool etílico.	Reativo para micrografia de aços inoxidáveis e outros aços de alta liga.
Reativo de Vilella	3 partes glicerina 1 parte de ácido nítrico concentrado 2 partes de ácido clorídrico concentrado.	Reativo para micrografia de aços ao manganês e aços liga com alto teor de cromo.
Picrato de sódio em meio alcalino (Picral)	25 g hidróxido de sódio 75 ml água destilada 2 g ácido pícrico.	Revelação de cementita.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho serão necessários os seguintes equipamentos e materiais, todos disponíveis no LEPU – Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da UFU:

- Torno Revolution RV 220 com Dinamômetro plataforma piezoelétrica Kistler (Figura 10);
- Ferramentas de Metal Duro sem revestimento e com revestimento de TiN (SPUN 120308 P25), sem quebra cavaco;
- Peça de aço 1050 de diâmetro externo 52,5 mm e comprimento 680 mm (Figura 11);
- Rugosímetro digital Taylor Hobson Surtronic 3+. (Figura 12);
- Microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca HITACHI, modelo TM 3000 – Tabletop Microscope, com ampliação máxima de 30.000 vezes, presente nas instalações do LEPU ;
- Paquímetro digital Stainless Hardened 6 in/150 mm, resolução 0,01 mm/.0005 in. (Figura 13);
- Lavadora Ultrassônica para limpezas de instrumentos;
- Lixadeira e Politriz Metalográfica marca Fortel modelo PLF, com quatro velocidades selecionadas duas a duas, pela chave comutadora e pela troca de correia na polia (em alumínio) dupla, sendo 125 e 250 rpm para lixamento e polimento com pasta de diamante e 300 e 600 rpm para lixamento e polimento com alumina (Figura 9);
- Materiais de consumo em geral: Massa plástica (Figura 14a), ácido Nital a 2% (98 ml de álcool etílico e 2 ml ácido nítrico concentrado), lixas (Figura 14b), álcool etílico, pasta de diamante 3 μ m e 6 μ m, pratos com panos de polimento (Figura 14c).

A metodologia para realização dos testes consiste em executar o torneamento, utilizando ferramentas com e sem revestimento TiN, em velocidades de corte diferentes (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 m/min) a cada 15 milímetros da peça, resultando em 20 testes. Foram analisadas a força média e a variação da força de corte (valor máximo menos valor mínimo) durante os testes, as espessuras e microestruturas (observação microscópica) dos cavacos, e a rugosidade da peça usinada.

Os sinais de força foram adquiridos com o Dinamômetro plataforma piezoelétrica Kistler, processados com auxílio de um Software, que vem junto com o Dinamômetro, e com esses valores foram calculadas as forças médias e a variação da força de corte (força de corte

máxima menos força de corte mínima) para cada velocidade de corte, desprezando, quando necessário, valores instáveis do início da aquisição dos sinais.



Figura 10. Torno Revolution RV 220 com Dinamômetro plataforma piezoelétrica Kistler.



Figura 11. Peça de aço 1050, diâmetro 52,5 mm e comprimento 680 mm.

A rugosidade foi determinada com o auxílio de um rugosímetro (Rugosímetro digital Taylor Hobson Surtronic 3+), onde os dados foram processados com auxílio de um Software que vem com o próprio rugosímetro, com a média do R_q (rugosidade quadrática média) para cada teste.

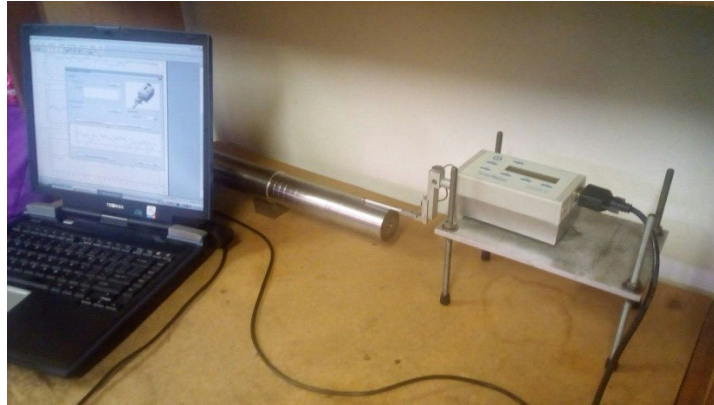


Figura 12. Rugosímetro Taylor Hobson Surtronic 3+.

O grau de recalque foi calculado com a equação (2).

$$Rc = \frac{h'}{h} \quad (2)$$

Onde h' é a espessura média do cavaco, onde usou-se o paquímetro para medir três valores de espessura de cada amostra de cavaco coletado, para cada teste, e calculou-se a média. O h é a espessura teórica do cavaco, calculado pela equação (3).

$$h = f \cdot \text{sen}(\chi) \quad (3)$$

Onde f é o avanço de corte (0,1 mm/rev) e χ é o ângulo de posição da ferramenta (75°). Dessa forma o h calculado é sempre 0,096593 mm.



Figura 13. Paquímetro digital Stainless Hardened.

As amostras de cavaco analisadas foram lavadas em uma Lavadora Ultrassônica, com a cuba preenchida com água e as amostra imersas em um béquer com acetona dentro da cuba por 5 minutos, secadas com ar quente, e analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). A amostra que foi embutida, o processo foi feito com Massa Plástica endurecida (Figura 14a), lixada, polida e atacada antes de ser analisada no microscópio novamente.

O lixamento foi feito de forma manual, com quatro lixas (granulometria 320, 400, 600 e 1000), Figura 14b e com água. Foi feito um ponto de referência na amostra, e a cada troca de lixa a amostra foi girada em 90°, e lixada até que só restassem riscos da última lixa utilizada.

O polimento foi feito de forma mecânica, com a Lixadeira e Politriz Metalográfica PLF da marca Fortel (Figura 9) com 250 rpm. Foi utilizado dois pratos com pano de polimento. O primeiro tinha agente polidor pasta de diamante 6 μm , e o segundo pasta de diamante 3 μm , espalhado e lubrificado com álcool etílico (Figura 14c).



Figura 14. Materiais de consumo em geral: a) Massa plástica, b) lixas, c) pratos com panos de polimento, pasta de diamante 3 μm e 6 μm , álcool etílico.

Para analisar a microestrutura do cavaco embutido no MEV, fez-se o ataque químico da amostra em ácido Nital a 2%, no tempo aproximado de 10 segundos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os dados coletados pelo Dinamômetro plataforma piezoelétrica Kistler calculou-se a força de corte média para cada velocidade e plotou-se o gráfico da Força de corte média em Newton e velocidade de corte em m/min, para os testes das ferramentas de metal duro com revestimento (CR) e sem revestimento (SR), Figura 15.

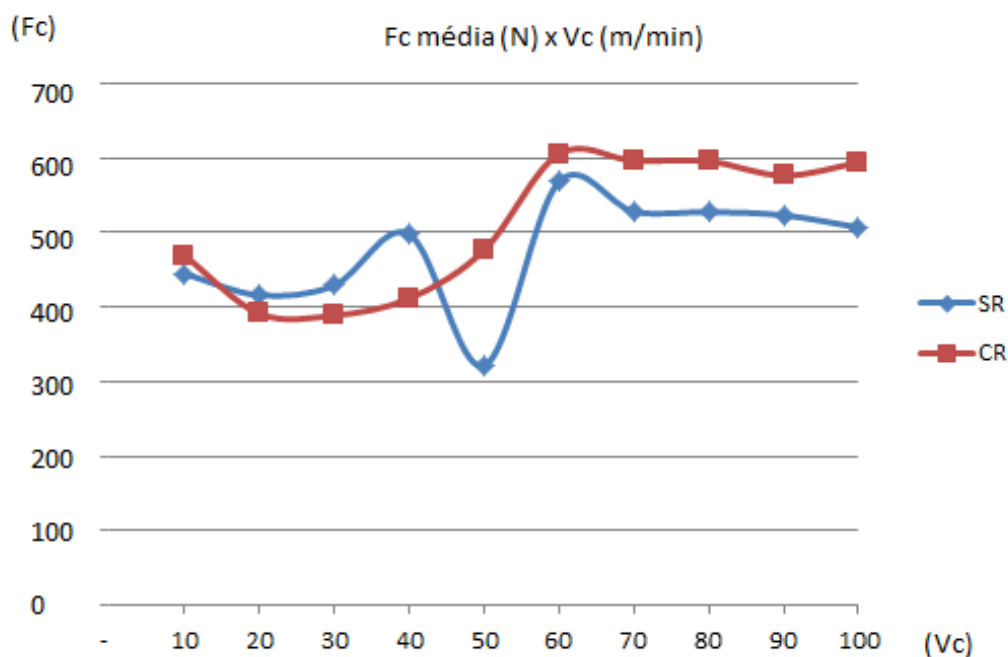


Figura 15. Influência da velocidade de corte na força de corte média para as duas ferramentas.

Era esperado que a força de corte média fosse maior para a usinagem com a ferramenta sem revestimento em todas as velocidades, o que foi observado em alguns pontos. Na maior parte do gráfico, a força média foi maior com a ferramenta com revestimento TiN. Possivelmente este resultado foi devido a presença de APC.

O gráfico da Figura 16 representa o grau de recalque calculado para cada teste das ferramentas com revestimento (CR) e sem revestimento (SR).

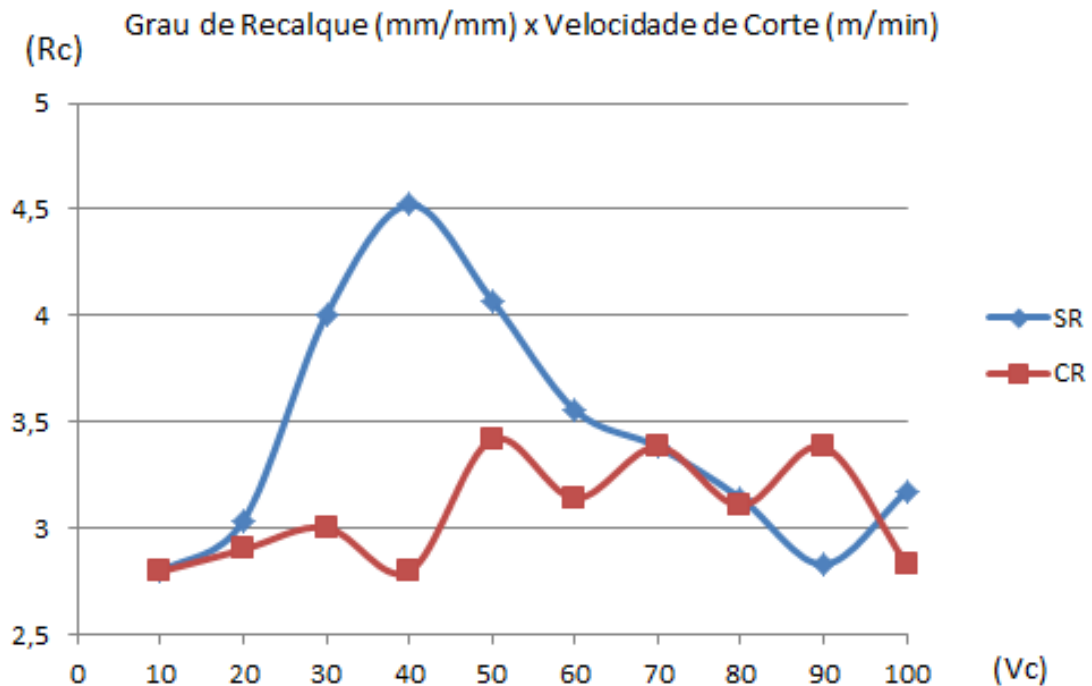


Figura 16. Influência da velocidade de corte no grau de recalque para as duas ferramentas.

O grau de recalque representa a dificuldade do cavaco ser retirado da peça durante o torneamento. O ideal seria que o grau de recalque fosse 1, o que significaria que não haveria atrito entre a ferramenta e o cavaco. Dessa forma, o grau de recalque sendo predominantemente maior para a ferramenta sem revestimento significa que o revestimento diminuiu o atrito entre a ferramenta e o cavaco.

Os valores de rugosidade média coletados deram origem ao gráfico da Figura 17, para os testes das ferramentas com revestimento (CR) e sem revestimento (SR).

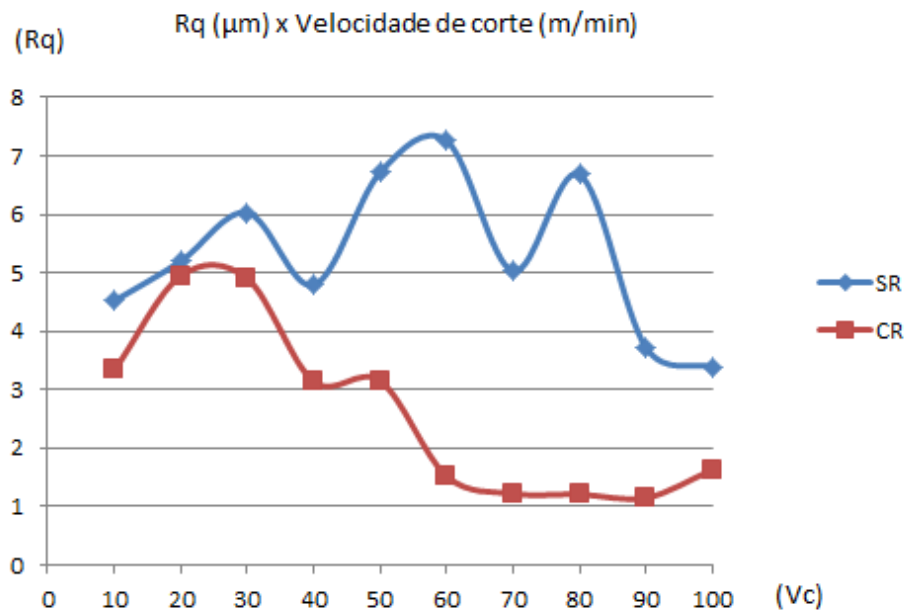


Figura 17. Influência da velocidade de corte na rugosidade média para as duas ferramentas.

Como esperado, a rugosidade média da peça usinada com a ferramenta sem revestimento é maior do que com a ferramenta com revestimento. O que significa que o atrito entre a ferramenta e a peça foi baixo, resultando em um acabamento superficial melhor;

A variação da força de corte para cada teste gerou o gráfico da Figura 18.

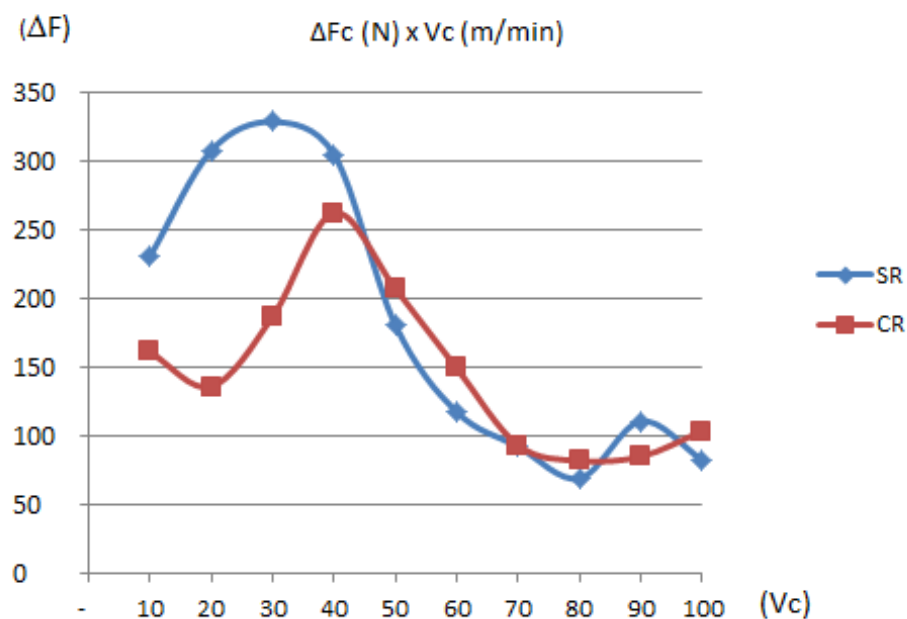


Figura 18. Influência da velocidade de corte na variação da força de corte para as duas ferramentas.

A variação da força de corte é a diferença entre o maior valor e o menor valor de força de corte média adquiridos em cada velocidade. Para as baixas velocidades, a variação da força de corte é maior para a ferramenta sem revestimento, e para velocidades acima de 50 m/min as duas ferramentas apresentaram valores próximos.

Analisando os gráficos anteriores, e considerando que a formação de aresta postiça ocorre em baixas velocidades, causando redução da força de corte, aumento da variação da força de corte, aumento da rugosidade e grau de recalque, foi observado na Figura 19 que utilizando ferramenta com revestimento, a variação da força de corte atingiu o valor máximo e a força de corte atingiu valor mínimo na velocidade de 40 m/min. Da mesma forma, nos testes da ferramenta sem revestimento a variação da força de corte atingiu valor máximo e a força de corte atingiu o valor mínimo em 30 m/min. Teoricamente, o valor mínimo da força de corte a baixas velocidades indicam o valor máximo da dimensão da aresta postiça de corte. Dessa forma, supõe-se que nessas condições havia presença de APC.

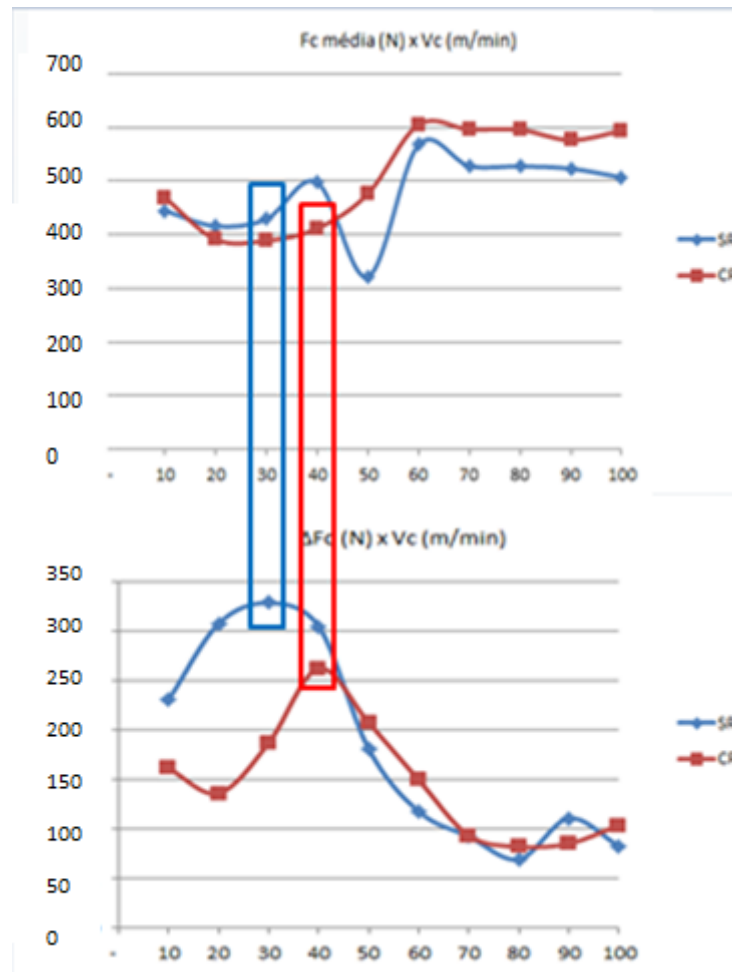


Figura 19. Velocidades onde provavelmente tem APC.

O gráfico de variação da força de corte no tempo para a ferramenta com revestimento e velocidade de 40 m/min e para a ferramenta sem revestimento e velocidade de 30 m/min está representado na Figura 20.

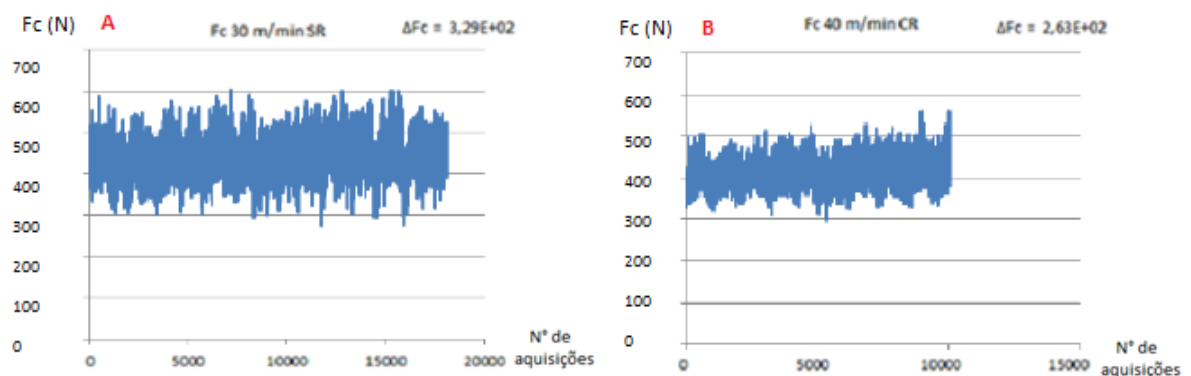


Figura 20. Gráfico da variação da força de corte no tempo para a) velocidade de 30 m/min em ferramenta sem revestimento e b) velocidade de 40 m/min em ferramenta com revestimento TiN.

Com as imagens obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura das superfícies inferiores dos cavacos, Figura 21, para as amostras citadas acima, observou-se a presença de aresta postiça de corte, como era esperado. É possível verificar, nos dois cavacos, irregularidades parecidas com escamações, características da ruptura e arrastamento das camadas que formam a APC.

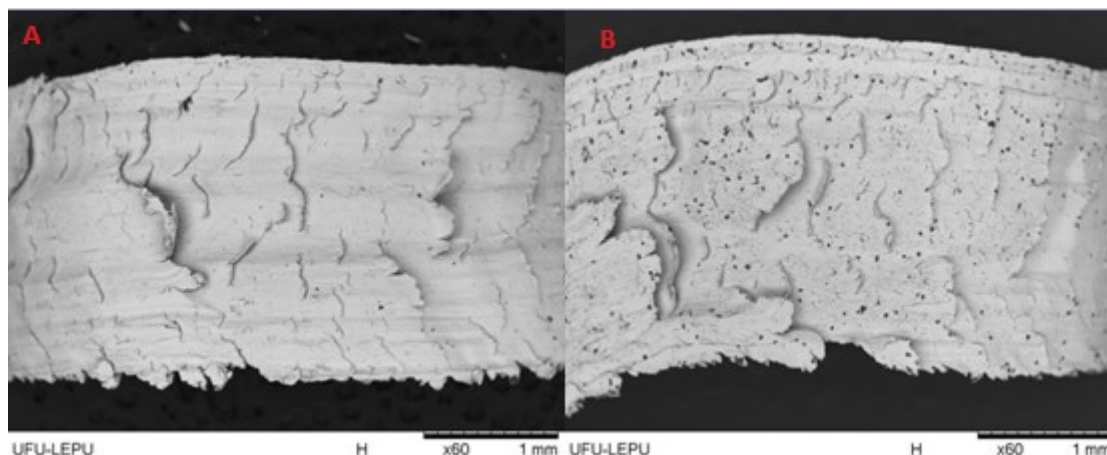


Figura 21. a) cavacos da ferramenta sem revestimento e velocidade 30 m/min e b) cavacos da ferramenta com revestimento e velocidade 40 m/min.

Analisando novamente os gráficos de força média, rugosidade, recalque e variação da força de corte em função da velocidade, observou-se o aumento da força média após 30 m/min para a ferramenta sem revestimento, e 40 m/min para a ferramenta com revestimento, e a redução da variação da força de corte, na Figura 22. Dessa forma supõe-se que em 60 m/min (para ambas ferramentas) há o desaparecimento da APC, pois nessa velocidade força de corte as forças médias apresentam valores máximos e a variação da força de corte apresenta valores mínimos.

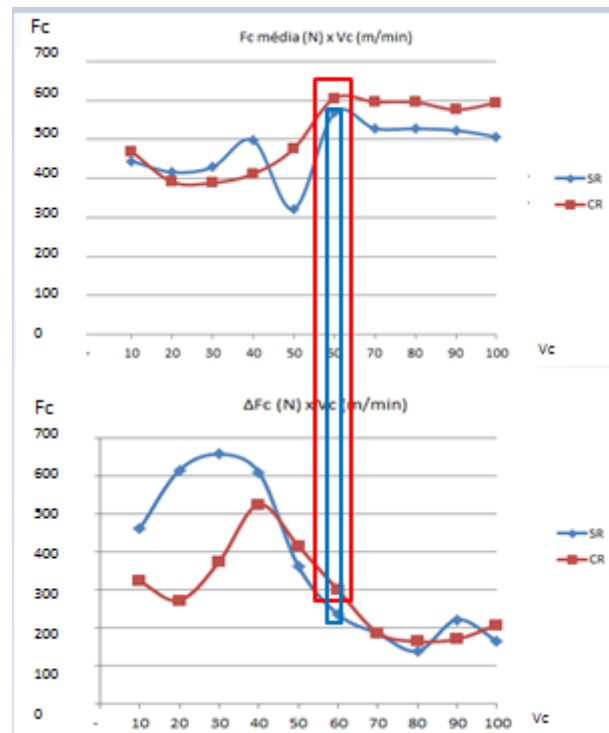


Figura 22. Velocidade onde provavelmente houve desaparecimento de APC.

Os gráficos das variações de força com o tempo para 60 m/min, para ambas ferramentas, estão representados na Figura 23.

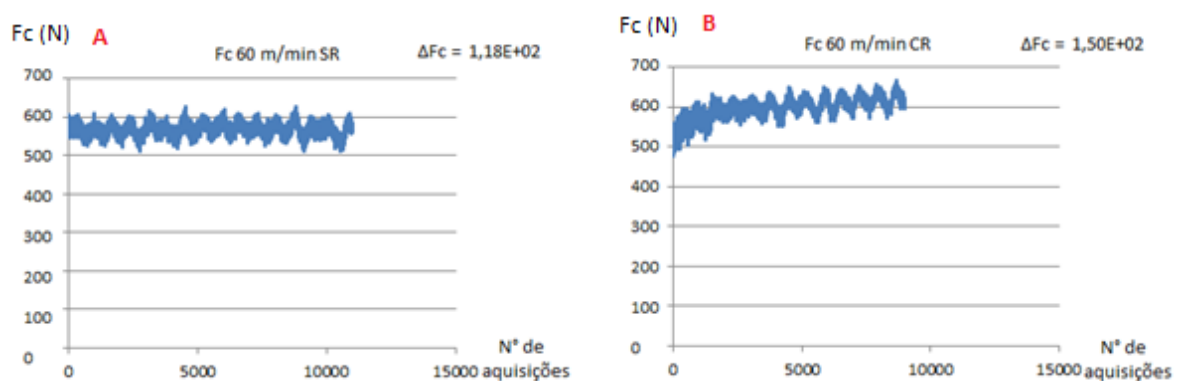


Figura 23. Gráfico das variações de força no tempo, para ferramenta sem revestimento e com revestimento, respectivamente.

Analisando as imagens da superfície inferior dos cavacos dessas amostras, verificou-se que, na amostra da ferramenta sem revestimento, realmente houve o desaparecimento da APC

na velocidade de 60 m/min. Na amostra da ferramenta com revestimento, na velocidade de 60 m/min, ainda havia algumas marcas, não tão acentuadas como na velocidade de 40 m/min, como pode ser visto na Figura 24. Dessa forma, conclui-se que, para a condição de velocidade de corte 60 m/min e ferramenta com revestimento TiN, ainda não há desaparecimento completo da aresta postiça de corte.

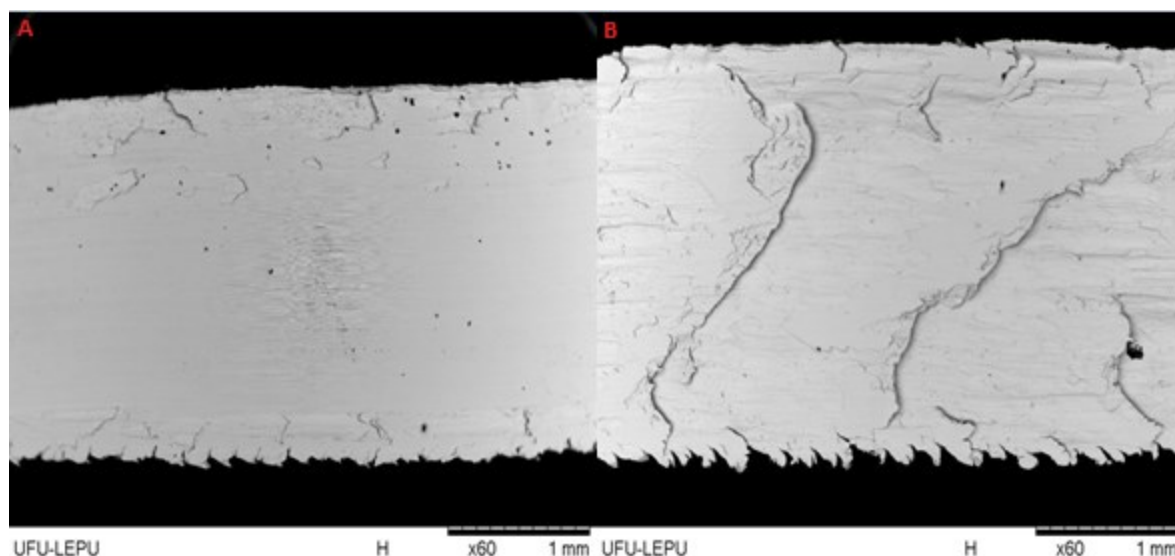


Figura 24. a) Cavacos da ferramenta sem revestimento e velocidade 60 m/min e b) cavacos da ferramenta com revestimento e velocidade 60 m/min.

Investigando outras imagens do cavaco da amostra de cavaco da condição de velocidade de corte 60 m/min e ferramenta sem revestimento TiN, notou-se a presença de marcas na superfície superior do cavaco, Figura 25, que não estavam presentes nas outras amostras, e que aparentemente se formam periodicamente.

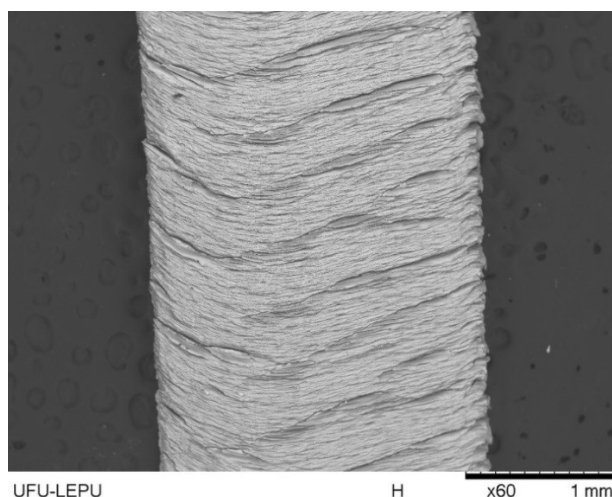


Figura 25. Marcas observadas no cavaco da condição ferramenta sem revestimento 60 m/min.

A distância entre essas marcas são de aproximadamente 0,40 mm. A velocidade do cavaco é calculada com a equação (4).

$$V_{cav} = \frac{V_c}{R_c} = \frac{D}{t} \quad (4)$$

Onde V_{cav} é a velocidade do cavaco, R_c é o grau de recalque, V_c é a velocidade de corte, D é a distância entre as marcas e t é o intervalo de tempo em que as marcas se formam. Com essa equação 4, foi calculado o intervalo de tempo. Os dados para calcular o intervalo de tempo estão na Tabela 4.

Tabela 4. Dados para cálculo da velocidade do cavaco.

Ferramenta sem revestimento										
V_c (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)	n (rpm)	$h'1$ (mm)	$h'2$ (mm)	$h'3$ (mm)	h' (mm)	χ (rad)	h (mm)	R_c
60	0,1	2	360	0,32	0,34	0,37	0,343333	1,308997	0,096593	3,5544

Onde f é o avanço de corte, ap é a profundidade de corte, n é a rotação, $h'1$, $h'2$ e $h'3$ são as espessuras do cavaco medidas com paquímetro e h' é a média aritmética desses três valores, χ é o ângulo de posição da ferramenta e h é a espessura teórica do cavaco.

Calculando, a velocidade do cavaco é de 16,88 m/min. Usando $D = 0,40$ mm, que foi a média calculada da distância entre as marcas (usando a escala), o intervalo de tempo em que as marcas se formam é de $2,3696 \times 10^{-5}$ minutos ou $1,4218 \times 10^{-3}$ segundos.

As causas prováveis dessas marcas são vibração da máquina e desgaste da ferramenta.

Essa mesma amostra (torneada com ferramenta sem revestimento com velocidade de corte 60 m/min) foi embutida, Figura 26, e superfície lateral observada no MEV, Figura 27.



Figura 26. Amostra de cavaco embutida (ferramenta sem revestimento com velocidade de corte 60 m/min).

A Figura 27 representa a microestrutura da superfície lateral do cavaco da condição 60 m/min com ferramenta sem revestimento.

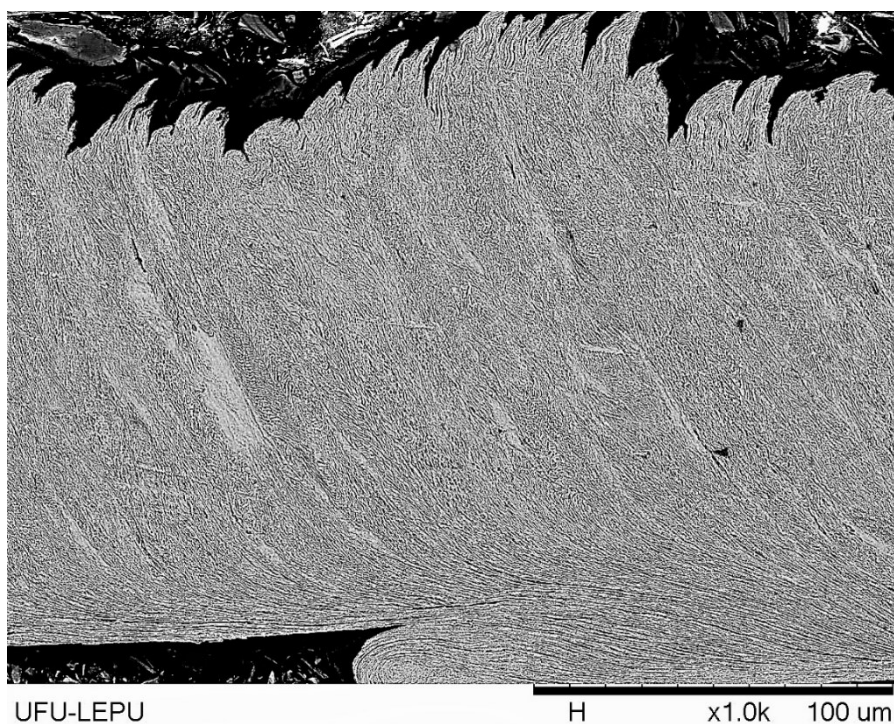


Figura 27. Imagem MEV microestrutura da lateral do cavaco (60 m/min sem revestimento).

5 CONCLUSÕES

Conclui-se que o revestimento teve maior importância em relação ao parâmetro rugosidade média, sendo que a peça usinada apresentou menores valores na usinagem com revestimento TiN em todas as velocidades. Já para a força média, na maioria do teste os valores da ferramenta com revestimento foram maiores do que nos testes sem revestimento. O grau de recalque foi predominantemente maior para a ferramenta sem revestimento, como esperado. A variação da força de corte nas velocidades baixas, até 40 m/min, foi maior para a ferramenta sem revestimento. Após esse valor, a ferramenta com revestimento e sem revestimento apresentaram valores muito próximos.

A respeito da APC, as análises mostraram que o revestimento não fez muita diferença até a velocidade de 100 m/min. Os gráficos e as imagens mostraram que no teste de 30 m/min sem revestimento e no teste de 40 m/min com revestimento houve incidência de APC, provavelmente na sua maior dimensão. Na velocidade de 60 m/min sem revestimento já não havia mais APC. Porém, para a ferramenta com revestimento na velocidade de 60 m/min ainda tinha APC. Assim, com o revestimento, a aresta postiça de corte esteve mais presente do que sem revestimento.

Marcas foram observadas na superfície superior do cavaco da condição ferramenta sem revestimento 60 m/min, essas marcas provavelmente são consequência de vibração na máquina e desgaste da ferramenta. Embutindo, fazendo ataque químico e observando no microscópio a superfície lateral desse cavaco, foi possível observar claramente a microestrutura e a deformação dos contornos de grão na direção do corte.

Dessa forma, a ferramenta com revestimento, apesar de apresentar mais APC, apresentou mais vantagens no processo, pois a peça usinada teve melhor acabamento superficial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6175:2015. Usinagem - Processos mecânicos. Rio de Janeiro, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 513:2012. Classificação e aplicação de metais duros para a usinagem com arestas de corte definidas – Designação dos grupos principais e grupos de aplicação. Rio de Janeiro, 2012.

Colpaert, Hubertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 3ª ed. São Paulo: Blucher, 1974.

Ferraresi, D. Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Blucher, 1977.

Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Da Silva, M. B.; Coelho, R. T. Teoria da usinagem dos materiais. São Paulo: Blucher, 2015.

Reis, A. M. Influência do ângulo de posição secundário da ferramenta, rio de ponta e lubrificação na usinagem em presença de aresta postiça de corte. 2000. 88f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

Rohde, R. A. METALOGRAFIA PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS, Uma abordagem prática. Santo Ângelo, 2010. Disponível em: <<http://www.urisan.tche.br/~lemm/metalografia.pdf>>. Acesso em: 26 set. de 2017.

Silva, U. M. C. Técnicas e procedimentos na metalografia prática: preparação de corpos de prova ara exames metalográficos. São Bernardo do Campo, SP: I. Rossi, 1977.

Sukvittayawong, S.; Inasaki, I. Detection of Built-up Edge in. Turning Process. Int. J. Mach, Tools Manufact. vol. 34, pp, 1994.

Zorev, N. Metal cutting mechanics. Pergamon Press: Oxford, 1966.