

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Alison Siqueira da Silva

Fabício Prado de Jesus

**ANÁLISE EM FERRAMENTAS DE CORTE COM
REVESTIMENTO EMPREGADO NO PROCESSO DE
USINAGEM**

Taubaté - SP

2017

Alison Siqueira da Silva
Fabício Prado de Jesus

**ANÁLISE EM FERRAMENTAS DE CORTE COM
REVESTIMENTO EMPREGADO NO PROCESSO DE
USINAGEM**

Trabalho de graduação apresentada para
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia
Mecânica Departamento de Engenharia
Mecânica Universidade de Taubaté.
Área de Concentração: Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. Msc. Ivair Alves dos Santos

Taubaté - SP
2017

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado
de Bibliotecas / UNITAU - Biblioteca das Engenharias**

S586a

Silva, Alison Siqueira da

Análise em ferramentas de corte com revestimento empregado no processo de usinagem. / Alison Siqueira da Silva, Fabrício Prado de Jesus. - 2017.

39f. : il; 30 cm.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2017

Orientador: Prof. Me Ivair Alves dos Santos,
Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica.

1. Ferramenta de corte. 2. Revestimento. 3. Usinagem.
I. Título.

Alison Siqueira da Silva
Fabrcio Prado de Jesus

**ANÁLISE EM FERRAMENTAS DE CORTE COM REVESTIMENTO EMPREGADO
NO PROCESSO DE USINAGEM**

Trabalho de graduação apresentada para
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia
Mecânica Departamento de Engenharia
Mecânica Universidade de Taubaté.
Área de Concentração: Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. Msc. Ivair Alves dos Santos

Data: 24/10/2017

Resultado: APROVADO

BANCA EXAMINADORA

Prof. Msc. Ivair Alves dos Santos

Universidade de Taubaté

Assinatura: 

Prof. Msc. Fábio Henrique Fonseca Santejani

Universidade de Taubaté

Assinatura: 

Dedicamos este trabalho aos nossos familiares.

AGRADECIMENTOS

Aos nossos pais, irmãos e todos os familiares que nos apoiaram e contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Ao nosso orientador Prof. Msc. Ivair Alves dos Santos por ter nos conduzidos de forma impecável neste trabalho e fornecido todo o suporte em relação ao material utilizado e conhecimento adquirido.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté pela ajuda em responder as questões relacionadas a este trabalho.

Pelos colegas de classe que nos acompanharam e auxiliaram nesses cinco anos de uma agradável convivência em especial ao Elcídio de Oliveira Santos e Diego Aparecido Pereira Coelho.

As pessoas que contribuíram de forma direta e indiretamente, ajudando durante a trajetória para a conclusão do curso.

*“Procure ser uma pessoa de valor, em vez de procurar
ser uma pessoa de sucesso”
(Albert Einstein)*

RESUMO

Os processos de usinagem são de alto custo para as indústrias. Para aumentar a sua produtividade a utilização de revestimentos nas ferramentas de corte, está sendo cada vez mais utilizado. Esta pesquisa tem como finalidade o estudo do revestimento de TiAlN (Nitreto de Titânio Alumínio) em ferramentas de corte, comparando os dados encontrados com as ferramentas sem revestimento. Dos diversos tipos de revestimentos existentes no mercado, a liga TiAlN está entre os mais utilizadas. A pesquisa utilizou como base para criação dos gráficos a comparação entre a evolução do desgaste, rugosidade e a energia específica de corte das ferramentas. As análises dos dados encontrados apontam que o revestimento estudado tem uma vida útil maior e um melhor desempenho em relação às ferramentas normais. Esse desempenho superior se deve a alta dureza do revestimento que melhora suas características térmicas, reduz o atrito entre a peça e a ferramenta possibilitando um aumento na velocidade de corte. Após as comparações feitas pode-se concluir que o investimento feito em ferramentas com revestimento é de rápido retorno, pois a mesma possibilita um grande aumento nos parâmetros de corte.

Palavras-chave: Ferramenta de Corte, Revestimento, Usinagem.

ABSTRACT

The machining processes are of high cost to the industries. In order to increase productivity the use of coatings in cutting tools is becoming more and more frequent. This research has the purpose of studying the coating of TiAlN (Titanium Aluminum Nitride) in cutting tools, comparing the data found with uncoated tools. Of the various types of coatings available on the market, the TiAlN alloy is one within the most widely used. The research used as a basis for creating the graphics the comparison between the evolution of wear, roughness and the specific cutting power of the tools. The analysis of the data found that the tools with the coating studied has a longer life and a better performance compared to normal tools. This superior performance is due to the high hardness of the coating that improves its thermal characteristics, reduces the friction between workpiece and tool allowing increased cutting speed. After the comparisons made it can be concluded that the investment made in tools with a coating has short-term return, because it allows a large increase in cutting parameters.

Keywords: Cutting Tool, Coating, Machining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de um processo PVD	20
Figura 2 – Câmara PVD	21
Figura 3 – Inseto de metal duro com revestimento TiAlN	24
Figura 4 – Evolução da Energia Especifica de Corte	30
Figura 5 – Evolução do Desgaste	31
Figura 6 – Evolução da Rugosidade	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AlTiN</i>	-	Nitreto de Alumínio-Titânio
<i>Al₂O₃</i>	-	Óxido de Alumínio
<i>CVD</i>	-	Deposição Química de Vapor
<i>C₂H₂</i>	-	Acetileno
<i>GPa</i>	-	Giga Pascal
<i>O₂</i>	-	Oxigênio
<i>PIB</i>	-	Produto Interno Bruto
<i>PVD</i>	-	Deposição Física de Vapor
<i>TiAlN</i>	-	Nitreto de Titânio Alumínio
<i>TiC</i>	-	Carbeto de Titânio
<i>TiCN</i>	-	Carbonitreto de Titânio
<i>TiN</i>	-	Nitreto de Titânio
<i>TiAl</i>	-	Nitreto de Titânio Alumínio
<i>Zr</i>	-	Zircônio
<i>ZrN</i>	-	Nitreto de Zircônio
<i>μm</i>	-	Micro metro
<i>°C</i>	-	Graus Celsius

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivos	10
1.2 Justificativa.....	10
1.3 Delimitação.....	10
1.4 Estrutura do Trabalho.....	11
2 REVISÃO DA LITERATURA	12
2.1 Ferramenta.....	12
2.2 Revestimento	17
2.3 PVD.....	20
2.4 Titânio	22
2.5 TiAlN	23
3 METODOLOGIA.....	26
3.1 Métodos de pesquisa	26
3.1.1 Conforme a abordagem	26
3.1.2 Conforme o objetivo	26
3.1.3 Conforme os procedimentos técnicos	27
3.2 Procedimentos	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5 CONCLUSÕES	33
REFERÊNCIAS.....	34

1 INTRODUÇÃO

O setor industrial representa uma grande parcela no PIB mundial, segundo o Ministério da Fazenda. Dentro dos produtos fabricados pelas indústrias, é difícil citar um produto que não passe por um processo de usinagem, direta ou indiretamente. Define-se como usinagem a remoção de material durante um processo, e para que isso aconteça a utilização de ferramentas se faz necessária.

O crescimento dos produtos fabricados a partir de polímeros nos últimos anos, os altos custos no processo de usinagem, a necessidade de obter características mecânicas superiores e o fato que durante o processo de usinagem as ferramentas de corte tem grande relevância, pois em grande medida são elas que ditam a velocidade de corte e o avanço. Estes aspectos vêm fazendo com que as indústrias invistam em desenvolvimentos tecnológicos na área de usinagem.

Dentre as tecnologias desenvolvidas podemos enfatizar os revestimentos em ferramenta de corte. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2006) o custo para se obter uma ferramenta com revestimento é bem superior que uma sem revestimento. Comparando-a e levando em consideração a vida útil da ferramenta, o período menor de corte em virtude das maiores velocidades de corte e avanço, obtém-se uma redução significativa no tempo total de usinagem, o fato de gerar menos parada da máquina para efetuar a substituição da ferramenta de corte também contribui para a redução do tempo de corte.

Os revestimentos são aplicados em diversos tipos de ferramentas de corte como broca, pastilha, alargador entre outras. O mercado disponibiliza uma grande variedade de revestimentos para os diversos tipos de ferramentas, portanto, é importante conhecer as características do processo, do material a ser usinado para que se possa escolher qual ferramenta terá maior eficácia naquele processo.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é fazer, a partir de uma pesquisa bibliográfica, uma análise entre ferramenta de corte sem revestimento e com revestimento de TiAlN, confrontando as diferenças e semelhanças do desgaste, a vida útil e do desempenho.

Para melhor compreensão dos dados obtidos, são necessários alguns conhecimentos prévios em relação ao tema, estes por sua vez serão relatados na revisão da literatura. Com o intuito de facilitar a análise dos resultados foram traçados gráficos comparativos entre as ferramentas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com o grande aumento na concorrência no setor industrial, a escolha certa da ferramenta no processo de usinagem gera um crescimento na eficácia do processo resultando no aumento da competitividade. A expansão da oferta de ferramentas revestidas no mercado possibilita uma escolha individual visando às particularidades de cada processo e de cada material, entretanto, também gera maiores dúvidas e incertezas na hora da escolha.

Esta pesquisa colabora para elucidar as possíveis dúvidas para a escolha de uma ferramenta com ou sem revestimento durante a usinagem do titânio, possibilitando assim ao leitor deste trabalho uma escolha adequada que irá gerar uma melhora no processo, no produto e uma redução de custo.

1.3 DELIMITAÇÃO

Nesta pesquisa será feito um estudo sobre revestimento em ferramentas de corte, mais especificamente o revestimento TiAlN. O estudo da ferramenta com revestimento será realizado em comparação a ferramenta sem revestimento na usinagem do titânio.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho estrutura-se em cinco capítulos, onde:

O capítulo 1 apresenta a introdução, objetivo, justificativa, delimitação e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura com os principais conceitos relacionados a usinagem e ao revestimento.

O capítulo 3 apresenta o procedimento metodológico adotado neste trabalho, onde são apresentadas a pesquisa realizada e a descrição dos instrumentos da pesquisa.

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões obtidos nas pesquisas.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões.

E por fim, as Referências.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos relacionado ao tema, e para o seu melhor entendimento e esclarecimento foi dividido em tópicos, sendo que no tópico ferramenta iremos abordar suas características, desgastes, entre outras; no tópico revestimento consiste em um breve relato de quando surgiu, seu desenvolvimento e alguns de seus tipos; no tópico PVD abrange uma sucinta explicação do processo e de suas características; no tópico Titânio foram descritos suas características de acordo com sua usinagem; por fim no tópico TiAlN engloba suas propriedades e vantagens.

2.1 FERRAMENTA

Conforme Machado *et al* (2009) em relação às ferramentas de corte há uma necessidade crescente de melhorias na resistência ao desgaste da mesma na usinagem. Ferramentas de corte que possuem resistência ao lascamento e à fadiga, boa condutividade térmica alta dureza mesmo com temperaturas elevadas e baixa reatividade com titânio são consideradas de boa qualidade.

Designa-se vida de uma ferramenta o período de trabalho que de fato ela é exigida, até que sua eficiência de corte ira desaparecer, incluso em um critério anteriormente estabelecido. A ferramenta precisa ser substituída ou reafiada, quando esse período for alcançado. Pois bem, vida de uma ferramenta é o período dentro de duas afiações sucessivas necessárias, nos quais realmente ela trabalha (FERRARESI, 1977).

Em um critério antecipadamente prescrito, o tempo efetivo de trabalho até que se perca a capacidade de corte, denomina-se vida de ferramenta. Ao atingir este período, a ferramenta precisa ser trocada ou reafiada (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006).

Diniz, Marcondes e Coppini (2006) relatam que a ferramenta precisa ser removida de utilização quando:

- os desgastes alcancem grandezas tão superiores que se teme a ruptura da aresta de corte. Isto é crucial em procedimentos de desbaste, por causa da não necessidade de obter tolerâncias apertadas e adequados acabamentos superficiais, permitindo que os desgastes alcancem valores elevados;
- a um crescimento muito elevado dos desgastes, onde a temperatura na qual a ferramenta perca seu fio de corte é ultrapassada pela temperatura da aresta de corte, com isso acaba-se decompondo a aresta de corte. Nas ferramentas de aço rápido acaba sendo grave, por apenas suportar temperaturas menores para ferramentas de outros materiais;
- acaba interferindo no andamento da máquina, por causa do acréscimo de força na usinagem, procedente dos grandes desgastes da ferramenta;
- não for mais capaz de obter tolerâncias reduzidas e/ou de apropriados acabamentos superficiais de peça devido ao desgaste da superfície de folga. Em procedimentos de acabamento, isto acaba sendo crítico.

Segundo Kalpakjian e Schmid (2009) as ferramentas de corte estão sujeitas a altas tensões posicionadas em sua ponta, grandes temperaturas, principalmente no decorrer da face de ataque, deslizando o cavaco por toda a extensão da face de ataque e com o deslize da ferramenta no decorrer da superfície pouco antes de ser cortada pela peça de trabalho. Tais situações levam a ferramenta ser desgastada, sendo que em procedimentos de usinagem é muito significativo, da mesma maneira que na metalurgia e fundição os moldes e matrizes se desgastem. Vida da ferramenta acaba sendo atingida por causa do seu desgaste, também afeta suas exatidões dimensionais, qualidade da face usinada, como resultado, prejudicando o procedimento de corte em relação à economia.

Kalpakjian e Schmid (2009) relatam que: fluidos de corte, geometria da ferramenta, parâmetros do processo, características da máquina-ferramenta e os materiais da ferramenta e da peça são considerados fatores para obter o índice de desgaste da ferramenta. A uma manifestação de diversas posturas ao decorrer do corte quando acontece desgaste da ferramenta e as alterações em sua geometria, regularmente denominadas como enorme fratura, desgaste da cratera, entalhe, desgaste do flanco, raspagem e alteração plástica da extremidade da ferramenta.

De acordo com Ferraresi (1977) quando há o desgaste da ferramenta devido ao processo de fabricação, antes que a aresta cortante da ferramenta se rompa, deve ser retirada da máquina e então substituí-la ou afiada. Com isso deve-se obter um critério que possibilita a retirada da ferramenta tendo uma margem de segurança, antes que ela se quebre. Pelo fato da ferramenta possuir número de fatores muito grande sofrido pelo seu desgaste, não há como estabelecer uma única regra referente a sua vida ao decorrer da usinagem.

Ferraresi (1977) ainda cita que quando se trata de escolher a ferramenta de corte e de qual será o material da mesma, é importante sempre recordar que há uma gama de fatores que devem ser levados em consideração, dentre eles podemos citar:

- material que sofrera a usinagem;
- qual o tipo da operação de usinagem;
- utilização ou não de algum meio de refrigeração;
- condições da máquina operatriz;
- características da ferramenta de corte (dimensões e forma);
- custos da ferramenta.

Kalpakjian e Schmid (2009) relatam que no processo de corte os fatores fundamentais independentes que influenciam o processo são: velocidade de corte; características da máquina-ferramenta; fluidos de corte; nitidez e acabamento superficial; condição da peça e material; geometria da ferramenta; profundidade de corte; e dispositivos de fixação e realização de trabalho.

Alterações nas variáveis independentes indicadas acima influenciam na geração de variáveis dependentes que incluem: desgaste e falha na ferramenta, elevação de temperatura na peça de trabalho, a ferramenta, força e energia dissipada ao decorrer do corte, tipo de cavaco produzido e o acabamento superficial e sua integridade da peça (KALPAKJIAN E SCHMID, 2009).

Segundo Nabhani (2001) as ferramentas que geram melhores acabamentos superficiais e apresentam a menor taxa de desgaste são ferramentas de diamante. Porém ferramentas tidas como de alto desempenho apresentam um custo de aquisição mais elevado em comparação com as de carboneto de tungstênio.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2006) independente do material a ser utilizado na ferramenta de corte, é preciso que o material em questão demonstre um conjunto de características de maior ou menor relevância, algumas das principais são:

- resistência ao desgaste - consiste sobre tudo a resistência que o material possui ao desgaste por abrasão, desgaste gerado pelo atrito. Essa característica é diretamente ligada à dureza a quente do material;
- dureza a quente – as temperaturas das ferramentas durante o processo de usinagem podem transcender os 1000 °C. Sendo assim, está ocorrendo uma busca por material que sejam capazes de alcançar essa temperatura e ainda possuírem uma dureza que seja suficiente para resistir às tensões de corte da operação;
- estabilidade química – para prevenir o desgaste por difusão, transferência de átomos de um material metálico para outro, o que se de grande importância quando se trabalha em altas velocidades de corte;
- tenacidade – é o quanto de energia um material pode absorver antes que venha se romper. Ferramentas com alta tenacidade demonstram grande resistência a choques inerentes gerados pelo processo.

Ao longo do processo de corte, ou seja, quando está havendo o cisalhamento da peça, a ferramenta de corte encontra-se sujeita a cargas térmicas, mecânicas, tribológicas e dinâmicas tão variadas e numerosas que material nenhum disponível é capaz de resistir a essa combinação de carga tão complexa. Ao decorrer do processo de corte aparecem variantes que requisitam que o material cortante disponha de propriedades como resistência ao choque térmico, abrasão, adesão, a altas temperaturas, dureza, ductilidade, resistência contra a propagação de trincas e formação de crateras e a ruptura. Essas propriedades somente são encontradas em

ferramentas de corte com revestimento, em especial em metais duros e cermets, ainda assim com ressalvas (LUGSCHEIDER *et al*, 1997).

Rodrigues (2005) cita que dentro da fenomenologia da usinagem uma das grandezas físicas mais relevantes é a energia específica de corte, é oportuno lembrar de outros parâmetros importantes como desgaste da ferramenta, temperatura de corte, força, tempo de usinagem e etc.

Energia específica de corte pode ser definida como a energia necessária para remover uma unidade de quantidade de material. Pode-se encontrar a energia específica de corte dividindo as forças de usinagem pela área do cavaco. Mesmo que no processo de fresamento as forças de usinagem a área momentânea do cavaco variem durante o curso de cada faca da ferramenta, a média da energia de corte pode ser estimada com base na equivalência das forças médias pela área média do cavaco, isto é, produto do avanço dividido pelo produto da profundidade de usinagem (FILIZ *et al*, 2007).

Segundo Filiz *et al* (2007) com menores avanços observam-se valores mais elevados de energia específica de corte. O chamado efeito escala explica esta ponderação. O fator preponderante para o efeito escala em microfresamento é o processo chamado de “ploughing” (deformação lateral), a microestrutura do material e o grande ângulo de saída. Com baixos avanços também se pode notar que a energia específica apresenta da mesma forma uma necessidade da velocidade de corte.

De acordo com Ferraresi (1977) as pastilhas de metal duro em relação às ferramentas de aço rápido, precisam ser distinguidas uma da outra no procedimento de desgaste das ferramentas. Inicialmente os valores chegam até que o gume cortante se quebre por haver um desgaste progressivo, em ferramentas de aço rápido, para que a quebra ocorra, antes irá acontecer à destruição da aresta cortante, por causa do aumento da temperatura de corte e a redução da dureza da aresta.

2.2 REVESTIMENTO

No final dos anos 60 apareceu o revestimento em metal duro. Na época foi empregada no substrato de metal duro uma fina camada de carboneto de titânio. Esta camada por sua vez possibilitou um aumento significativo no desempenho da ferramenta, uma vez que se constatou maior eficiência em velocidades de corte elevadas, melhor tolerância às altas temperaturas, maior vida útil e por consequência maiores avanços (TELES, 2007).

Machado *et al* (2009) relata que os revestimentos em ferramentas de metal duro adquiriram grande relevância, porque tais revestimentos são capazes de assegurar um desempenho muito à cima das ferramentas de metal duro tradicionais, nas indústrias mecânicas estes são os materiais mais comumente usados. Outro motivo que faz, a aplicação de revestimento em metal duro, ter grande crescimento é o conhecimento superior das técnicas de revestimento, tal como o custo mais baixo dos processos. É possível aplicar revestimento em qualquer substrato de metal duro independente da classe do mesmo. Na atualidade o revestimento está presente em 95% de todo o metal duro utilizado nas indústrias mecânicas, com tendência de expansão constante.

A tecnologia de corte vem recebendo uma grande colaboração das empresas que utilizam processos de usinagem para geração de seus produtos. A evolução na área de materiais vem proporcionando um aumento constante na velocidade de corte, pois os materiais utilizados nas ferramentas de corte como: aço rápido, metal duro, cerâmica, cermets entre outros junto com o avanço na tecnologia de revestimentos, processos PVD e CVD, vem gerando camadas e superfícies mais resistentes ao desgaste. Fato este que leva os fabricantes de máquinas a acompanharem o avanço produzindo maquinários que possam trabalhar com o potencial completo das novas ferramentas (YUHARA, 2000).

De acordo com Teles (2007) finalidade da aplicação de revestimento em ferramentas de corte é inicialmente gerar uma dureza mais elevada em comparação a do seu substrato e conseqüentemente garantindo uma diminuição do desgaste abrasivo. Outra finalidade do revestimento é gerar uma diminuição da tendência de

aderência, o que por sua vez resulta em uma diminuição do coeficiente de atrito e do desgaste por aderência e, portanto, em temperaturas e forças de corte mais amenas.

Segundo Hong *et al* (2001) a utilização do revestimento, proporciona um aumento significativo na dureza superficial da ferramenta, reduz a deformação plástica e o encruamento da peça que está sendo usinada, gerando assim uma superfície mais integrada, pelo fato de normalmente diminuir o atrito na interface cavaco ferramenta.

Hogmark *et al* (2000), cita que em procura de uma performance superior das ferramentas de corte tem-se concentrado na aplicação de finos revestimentos sobre o substrato (metal de base da ferramenta). A colocação do revestimento tem a finalidade de modificar as propriedades da superfície da ferramenta. No meio das características alteradas podemos ressaltar as propriedades ópticas, químicas, magnéticas, eletrônicas, resistência mecânica e ao desgaste.

Conforme Schroeter e Weingaertner (2001), a estratégia atual da usinagem consiste no revestimento das ferramentas de corte. Segundo pesquisas, a maioria dos metais duros utilizados nos dias de hoje possuem algum tipo de revestimento o que vem possibilitar uma grande produtividade.

Abele e Dörr (2002) relatam que ferramentas cujos revestimentos foram feitos pelo processo PVD possibilitam uma aresta de corte mais afiada. Na atualidade os revestimentos podem ser tanto quanto de camada única como de multicamadas, as espessuras oscilam de 3 a 7 μm . Conforme são empregadas temperaturas menos elevadas (200 a 500 °C) nos revestimentos de PVD, o substrato fica melhor protegido contra difusões mecânicas ou térmicas. Por outro lado, as inconveniências deste processo são o alto custo do equipamento e uma produção inferior do revestimento na parte de cavidade e rebaixas.

O principal atributo para aumentar a vida útil da ferramenta de corte é a aplicação de revestimentos com filmes nanoestruturados. Para funções tribológicas, os filmes nanoestruturados constatarem desempenho superior perante circunstâncias

severas de corte e estamparia, apresentando também resistência à umidade, elevadas temperaturas e ambientes corrosivos. As características pretendidas podem ser obtidas através de revestimentos duros com base em boretos, carbonetos e nitretos de transição através da junção das ligas com outros elementos, entre eles Cromo, Alumínio e Silício (SHTANSKY *et al*, 2010).

Recentemente as pastilhas de metal duro com revestimento nitreto de titânio, carbonitreto de titânio, carboneto de titânio e/ou óxido de alumínio tornando-se cada vez mais comum à sua utilização (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2006), o propósito mais fundamental é proporcionar a camada externa, parte da ferramenta que entra em atrito com a peça, um aumento na resistência ao desgaste mantendo o núcleo com a tenacidade padrão de um metal duro mais corriqueiro. Podendo então muitas vezes gerar um aumento significativo na vida útil da ferramenta e reduzir os esforços de corte.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2006), assim sendo pode se realizar uma integração de características em um único material, propriedades que antes eram incompatíveis, ou seja, resistência ao desgaste com a tenacidade e a dureza a quente.

Conforme Kaiser (1995) cita as camadas TiN, TiCN e TiAlN vem ganhando destaque dentro dos revestimentos de ferramentas de corte. Camadas essas que tem como características: elevada dureza, alta estabilidade química e térmica, alta aderência, baixa porosidade e etc.

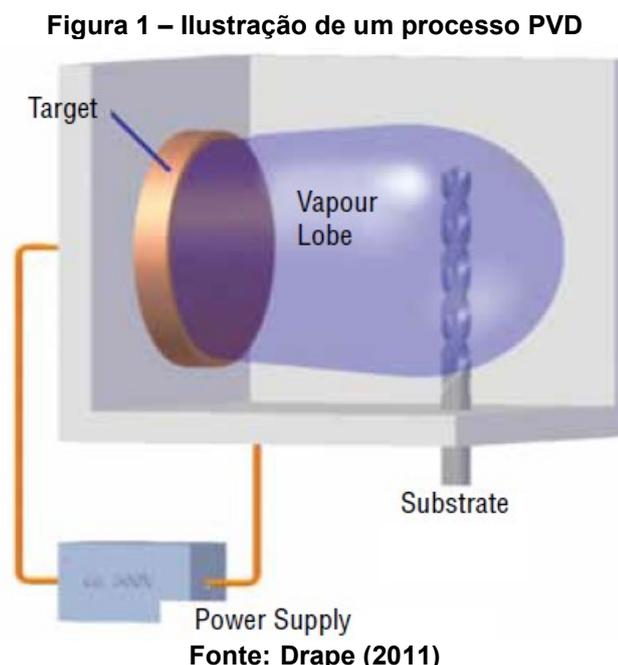
Holleck (1986) relata que em trabalhos atuais, feitos em camadas nanométricas e multicamadas a tenacidade e alta dureza vem apresentando vantagens extras como: revestimento contra corrosão, desgaste da ferramenta e desgastes de peças usinadas. Em alguns destes sistemas de multicamadas tem em seu material uma alternância periódica de suas camadas de vários cristais, tendo como exemplo, TiN/TiAlN, Zr/ZrN e ZrN/TiN, tem eficiência superior em usinagem de altas velocidades e podem viabilizar uma dureza acima de 30 GPa.

2.3 PVD

No processo PVD as temperaturas entre 200 e 600 °C é onde se situa a deposição do revestimento, sendo que no aço-rápido é amplamente utilizado no recobrimento de ferramentas. Além do mais, por causa da baixa temperatura a resistência à flexão do substrato acaba não sendo afetada. No processo PVD a aderência do revestimento acaba sendo mais bem obtida quando aplicado em sua superfície um pré-trabalho (KÖNIG, 1997).

Segundo Drape (2011) o processo PVD tem a vantagem de possuir uma variedade de materiais aptos para o revestimento, às temperaturas do processo são relativamente baixas, em torno de 450 °C, o revestimento proporciona uma aresta de corte bem afiada. A inconveniências são as exigências muito mais elevadas da superfície do substrato e a dificuldade de revestir superfícies internas (o revestimento necessita de uma linha de visão desde o material laminado para o substrato).

O processo para deposição do revestimento é o PVD, este processo existe duas tecnologias básicas, na Figura 1 a seguir ilustra como é uma câmara para a deposição do revestimento no substrato de uma ferramenta.



Drape (2011) cita que o processo PVD tem duas tecnologias básicas utilizadas para revestimento de diversos substratos: o método de evaporação e o método de sputtering.

- o método de evaporação - inclui uma fonte de energia elétrica que atinge o material laminado e o converte em estado sólido para líquido e posteriormente para o estado gasoso. Os benefícios deste processo é alta deposição de material na camada em comparação ao sputtering e uma construção relativamente fácil da câmara de revestimento. Entretanto, uma vez que o material laminado já esteve nos três estados, sólido, líquida e gasoso existe a possibilidade de formação de gotículas. Gotículas estas não chegam ao estado gasoso.
- método sputtering - necessita de uma fonte de energia térmica, para transformar instantaneamente o material laminado sólido em gasoso. Este assim como o outro tem a construção da câmara relativamente fácil. O sputtering tem a vantagem de não ocorrer à formação de gotículas de quando o material está na fase líquida. Contudo a taxa de deposição de material na camada é menor devido aos longos ciclos.

Na Figura 2 mostra a imagem de uma câmara utilizada para deposição de revestimento no processo PVD, junto com Figura 1 podendo compreender melhor o ferramental utilizado num processo PVD.

Figura 2 – Câmara PVD



Fonte: Schulz (2017)

De acordo com Vencovsky (1999) o material metálico tem seus átomos ionizados positivamente e vaporados que são direcionados a um substrato com um potencial negativo. Para que se realize a geração de camadas com alta dureza, normalmente são inseridos na câmara de revestimento gases reativos como, por exemplo, O_2 , C_2H_2 . O processo PVD ocorre perante o vácuo e os gases reativos e os átomos metálicos ionizados formam o ambiente denominado de plasma. O revestimento é realizado com uma temperatura em torno de $500\text{ }^\circ\text{C}$. As ferramentas de corte são produzidas a partir de matérias cortantes resistem a essa temperatura, não há a ameaça de alteração em suas dimensões e nem na redução da dureza, além disso, o tratamento térmico do substrato não é comprometido pelo processo PVD.

Teles (2007) cita que o processo PVD possui as seguintes características: a temperatura por volta dos $500\text{ }^\circ\text{C}$; não consegue revestir geometrias complexas e gera tensões residuais de compressão.

Os revestimentos com maior espessura permitem maior resistência ao desgaste, porém existe um limite prático para a espessura, por causa da tensão, o que gera neles uma redução na aderência e comecem a descascar. O recomendado é uma espessura máxima em cerca de $15\text{ }\mu\text{m}$ no processo CVD e $6\text{ }\mu\text{m}$ para o PVD. Devido à grandiosa resistência da aresta de corte e boa Tenacidade à fratura os revestimentos feitos pelo processo PVD são indicados na utilização de torneamento e fresamento com corte interrompido (MASON, 2003).

2.4 TITÂNIO

É apontado como extremamente árduo a fabricação de titânio e suas ligas. Considera-se baixa sua usinabilidade, porém há diversas propriedades inerentes propícia, tais como: alta resistência à corrosão, associação de peso de resistência baixa, etc. Com a maior parte dos materiais de ferramenta de corte acessíveis, o titânio e suas ligas tem elevada reatividade química. Assim como à baixa condutividade térmica de tais ligas o calor constituído no decorrer da usinagem segue acumulado próximo da zona de usinagem. Portanto são mais predispostas ao mecanismo de desgaste térmico as ferramentas de corte relacionado como difusão,

desgaste aderente. Por isso, na usinagem, em consequência da alta temperatura de corte e à forte aderência da ferramenta e o material da peça de trabalho, as ferramentas se desgastam rapidamente. Além disso, torna-se ainda mais dificultoso a usinagem de ligas de titânio, devido a sua alta resistência a temperaturas elevadas e o baixo módulo de elasticidade (NARASIMHULU, 2012).

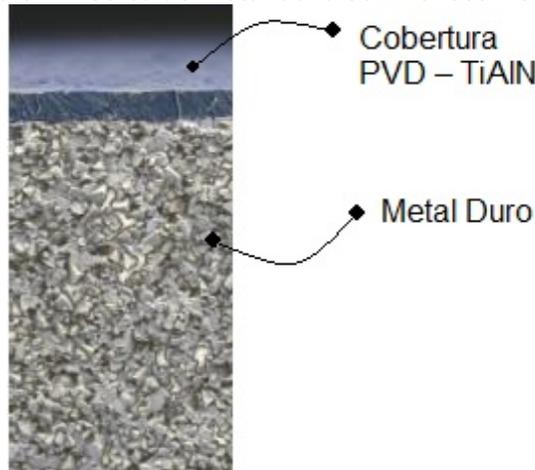
De acordo com Narasimhulu *et al* (2012), em grande parte, os critérios de usinagem para o titânio e suas ligas também são usados em materiais metálicos comuns. Precisa ser considerada restrição em comparação aos aços de elevada resistência, sendo elas, às propriedades químicas e físicas exclusivamente do titânio e suas ligas. Com a baixa condutividade térmica da liga de titânio, ocorre a dificuldade de dissipação acelerada do calor gerado pela usinagem.

2.5 TiAlN

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2006) numerosos avanços vêm sendo realizados no ramo de revestimento de ferramentas de corte, com destaque para revestimentos em metal duro. Com a tendência de se corta através do processo de fresamento e/ou torneamento peças endurecidas e a busca de realizar a usinagem sem a utilização de fluidos de corte (corte a seco), a cobrança em volta das propriedades: químicas, térmicas e mecânicas das ferramentas vêm crescendo. Entre os resultados desses avanços, com maior importância que podem ser usados para essas aplicações, aparecem aos novos revestimentos para o metal duro, alguns ainda podendo ser utilizados em aços rápidos, nitreto de alumínio–titânio (AlTiN) ou nitreto de titânio–alumínio (TiAlN), variando a quantidade de titânio ou alumínio presente.

Na Figura 3 a baixo ilustra pode-se observar claramente a parte do inserto que é composto de metal duro comprimido e a parte composta pelas multicamadas de revestimento de TiAlN.

Figura 3 – Inseto de metal duro com revestimento TiAlN



Fonte: Sandvik Coromant (2010) – adaptado pelo autor

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2006) o processo PVD é utilizado para a aplicação desses revestimentos ao metal duro, o que tem grande importância quando se pretende usinar com materiais com alta ductibilidade, como aço inoxidável austenítico e o alumínio ou se necessita de acabamentos superficiais de melhor qualidade.

Os revestimentos de TiAlN ou AlTiN tem como propriedades essenciais:

- alta dureza a quente e a frio – a camada de AlTiN pode alcançar uma dureza 50% maior que as outras camadas. A camada TiAlN por sua vez demonstra dureza semelhante as camadas de TiC, TiN e TiCN.
- maior resistência a oxidação – possibilita a utilização de elevadas temperaturas na usinagem. Quando ocorre a oxidação há a formação de uma camada de Al₂O₃ que é quimicamente inerte, por consequência gera uma resistência muito alta a difusão e a oxidação.
- alta estabilidade química – diminui consideravelmente o desgaste por cratera, desgaste gerado pelo atrito do cavaco com a ferramenta.
- baixa condutividade térmica – o que intensifica o escoamento do calor através do cavaco e preserva a aresta de corte.

De acordo com Schulz *et al* (2000) o emprego do revestimento de TiAlN é vantajoso na usinagem a seco, porque, este revestimento fornece uma elevada resistência em altas temperaturas. A inserção do alumínio de estrutura de superfície cúbico centrado do TiN aumentou a resistência a oxidação (GEY, 2006).

Segundo Manera *et al* (2011) a elevada geração de calor devido a usinagem do titânio e tendo sua dissipação feita somente pelo baixo coeficiente de condutividade térmica fazem ocorrer um crescimento das ocorrências de desgastes prematuras. A ferramenta sem revestimento por possuir tanto uma grande estabilidade térmica quanto química, tendo também uma matriz com maior resistência da camada superficial ao deslocamento, não foi tão afetada em comparação com as que possuem revestimento.

Segundo Schroeter e Weingaertner (2001) o revestimento de Nitreto de Titânio Alumínio (TiAlN); devido ao desgaste por oxidação esse revestimento possibilita maior resistência na ferramenta, relacionado aos dois revestimentos apresentado acima. Na existência de altas temperaturas de corte durante a usinagem ela é indicada, bem como para usinagem em materiais abrasivos, tanto quanto o ferro fundido.

Os resultados nos estudos obtidos demonstram que o revestimento de Nitreto de Alumínio Titânio e o de multicamadas são superiores, na dureza a quente, na resistência à abrasão (no ferro fundido, por exemplo, quando relacionado ao ferro vermicular é excessivamente abrasivo) e na resistência à oxidação, assim sendo bastante indicado nas pertinentes solicitações térmicas quando aplicado na usinagem (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2001).

3 METODOLOGIA

3.1 MÉTODOS DE PESQUISA

De acordo com Creswell (1994) inicia-se a elaboração de um trabalho científico com a escolha do âmbito da pesquisa, que inicialmente será estudada, composta por meio de um extenso estudo de revisão da bibliografia, orientação de pesquisadores, amigos ou investigado com base no conhecimento, que ampara a definição da metodologia.

3.1.1 Conforme a abordagem

Segundo Pereira (2007) estabelecido o foco, a etapa subsequente que conduzira as seguintes ações é a seleção do modelo de pesquisa. A pesquisa pode ser de modelo qualitativo ou quantitativo, conforme o ponto de vista da forma da abordagem do problema (PEREIRA, 2007; DA SILVA, 2005).

A pesquisa qualitativa considera a existência de uma correlação através do indivíduo e o mundo real, isto é, uma ligação intrínseca entre aquilo que não pode ser tocado pelo indivíduo e o mundo objetivo, não solicitando a exposição de números nem precisando de recursos e técnicas estatísticas. A pesquisa quantitativa considera tudo aquilo que pode ser quantificável, a análise de opiniões e informações são classificadas referindo-se à tradução em números, utilizando recursos técnicos e estatísticos (DA SILVA, 2005).

3.1.2 Conforme o objetivo

Segundo os objetivos, as pesquisas são classificadas em Pesquisa Exploratória, Pesquisa Descritiva e Pesquisa Explicativa (GIL, 1991).

Para tornar um problema melhor compreendido a Pesquisa Exploratória tem o intuito de favorecer maior intimidade e oferecer um sólido conceito para a formação das suposições, incluindo investigação bibliográfica, podendo estimular o conhecimento pela compreensão dos modelos e entrevistas com indivíduos que

participaram de experiências práticas através de problema de pesquisa, sendo reveladas geralmente em estudos de caso e pelas pesquisas bibliográficas (GIL, 1991; MALHOTRA, 2004).

A Pesquisa Descritiva relata as características em uma definida população ou acontecimentos ou a definição das associações entre variáveis, com a aplicação de práticas padronizadas de coleta de informações, como análises e questionários ordenados, sendo assumidas normalmente na forma investigação (GIL, 1991).

A pesquisa Explicativa contribui no acontecimento dos fenômenos ou descreve os princípios que constituem, esclarecendo a razão das coisas correspondente ao aprofundamento intelectual. O procedimento experimental necessita ser utilizado em ciências naturais, e nas ciências sociais, se utiliza o método observacional, admitindo habitualmente, a forma de Pesquisa Ex-Post-Facto e Pesquisa Experimental.

3.1.3 Conforme os procedimentos técnicos

De acordo com Gil (1991) procedimentos técnicos podem ser categorizados em 7 tipos:

- pesquisa bibliográfica – realizada por meio de referências teóricas anteriormente publicada, formada principalmente por artigos de periódicos, livros e atualmente teorias divulgadas na Internet;
- pesquisa documental – desenvolvida com base em materiais sem a realização de análise críticas;
- pesquisa experimental – estabelece um objeto de estudo, identifica-se os fatores que agem sobre o objeto, define-se as formas de observação e controle dos fatores;
- levantamento –por meio de questionamentos feitos diretamente aos indivíduos que se pretende conhecer;
- estudo de caso – estudo aprofundado em um ou mais elementos, proporcionado uma ampliação relevante e mais detalhada do conhecimento destes elementos;
- pesquisa ex-post-facto – depois dos fatos são realizando experimentos;

- pesquisa ação – elaborada em consonância com a solução de um problema global ou com uma ação e conta com a participação de pesquisadores e participantes representantes da situação ou da pesquisa e o problema, realizada com a inter-ação mútua entre os membros participantes.

3.2 PROCEDIMENTOS

Inicialmente foi realizada uma breve pesquisa para definir o revestimento que seria estudado, com a definição, foi realizada uma pesquisa mais aprofundada sobre a mesma. A pesquisa realizada foi feita em variadas fontes tais como, meios eletrônicos, artigos, livros, publicações em congressos e revistas.

Todo material utilizado para a elaboração desse trabalho foi obtido na biblioteca da Universidade de Taubaté no Campus da Juta, fornecimento de artigos e monografias cedidos pelo Orientador para obter os assuntos específicos ao tema e acesso aos computadores da própria Universidade para formatação, procura de artigos e publicações disponíveis nos meios virtuais.

Durante as pesquisas bibliográficas iniciais para a escolha do tema, diversos tipos de revestimentos foram observados. O TiAlN mostrou-se interessante pelas suas características de trabalho a seco e capacidade de usinar materiais de alta dureza. Por isto foi escolhido o tema deste trabalho e levantada as informações para a construção do mesmo.

As informações encontradas foram estudadas, analisadas e separadas conforme seu conteúdo. Com a finalização da separação dessas informações, foram filtradas para elaboração de uma revisão literária dividida em tópicos para a melhor compreensão e entendimento do leitor. Por meio de dados secundários foram então feitos comparativos de ferramentas com e sem revestimento com o intuito de avaliar o desgaste, vida útil e o desempenho das ferramentas.

Para facilitar a compreensão dos resultados construíram-se gráficos através dos dados obtidos da comparação das ferramentas com e sem revestimento para

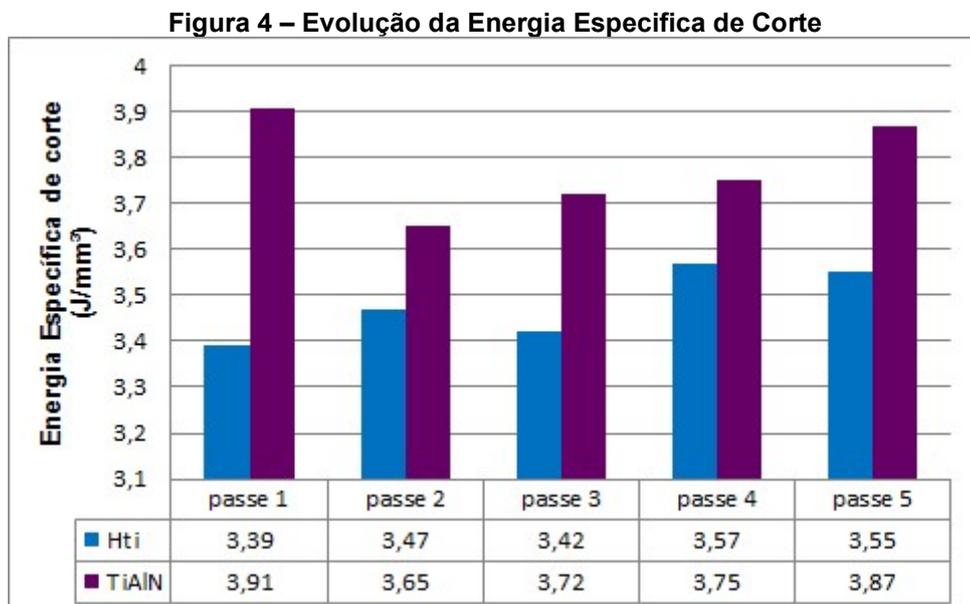
então definir: as vantagens do revestimento para a ferramenta e para o processo de usinagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Quando se fala em ferramentas de corte, o que ela pode proporcionar em relação ao desempenho está ligada à sua vida útil, seu custo, acabamento superficial, sua capacidade em trabalhar em altas velocidades, etc.

As ferramentas analisadas para comparação, possuem o mesmo substrato diferenciando apenas que uma possui revestimento de TiAlN pelo processo PVD e a outra ferramenta não possui revestimento. Assim podemos observar a seguir a comparação entre elas na evolução da energia específica de corte.

Pode ser notado na Figura 4 que a ferramenta com revestimento necessita de uma energia de corte superior tanto no primeiro passe como nos demais realizados para análise. Isso se dá justamente por causa das camadas de revestimento, que por sua vez ajuda a proteger a ferramenta, diminuindo a deformação plástica, reduzindo o atrito entre interface cavaco ferramenta, aumentando a dureza superficial, maiores avanços, etc.

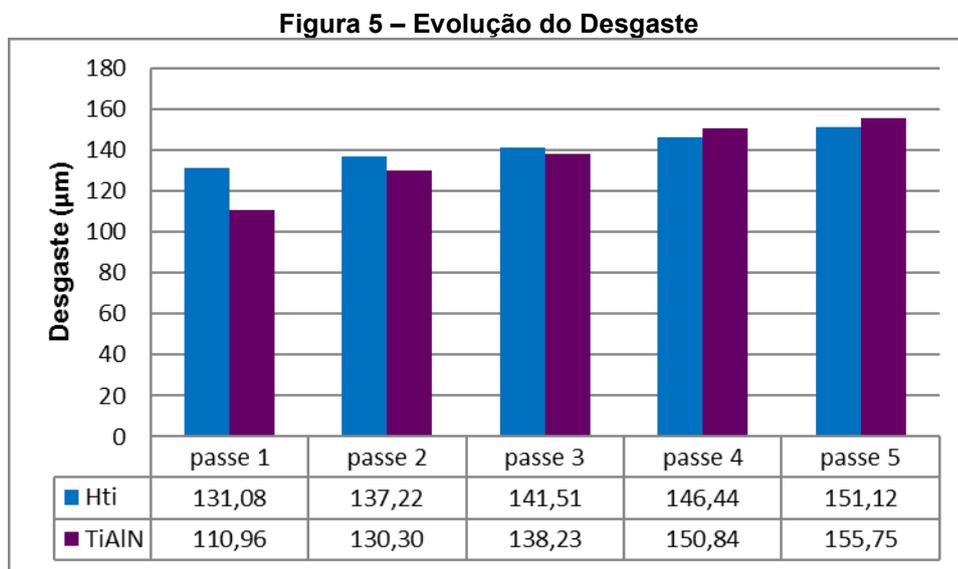


Fonte: Manera et al (2011) – adaptado pelo autor

O aumento da dureza gerado pelo revestimento além de aumentar a energia específica de corte, ela também gera uma redução ao desgaste da ferramenta pela diminuição do atrito entre a interface cavaco ferramenta. Estas melhorias foram

identificadas nas pesquisas e na comparação dos resultados entre as ferramentas. As multicamadas depositadas no inserto devido ao seu revestimento garantem as características superiores durante o processo de usinagem e prolongando sua vida útil.

Na Figura 5 pode-se observar que o desgaste inicial tem um diferencial considerável, nos passes seguintes 2 e 3 começa a se notar uma redução desse diferencial e já no passe 4 a ferramenta com revestimento gera um desgaste maior do que a ferramenta sem revestimento e no passe 5 a diferença se manteve praticamente a mesma.



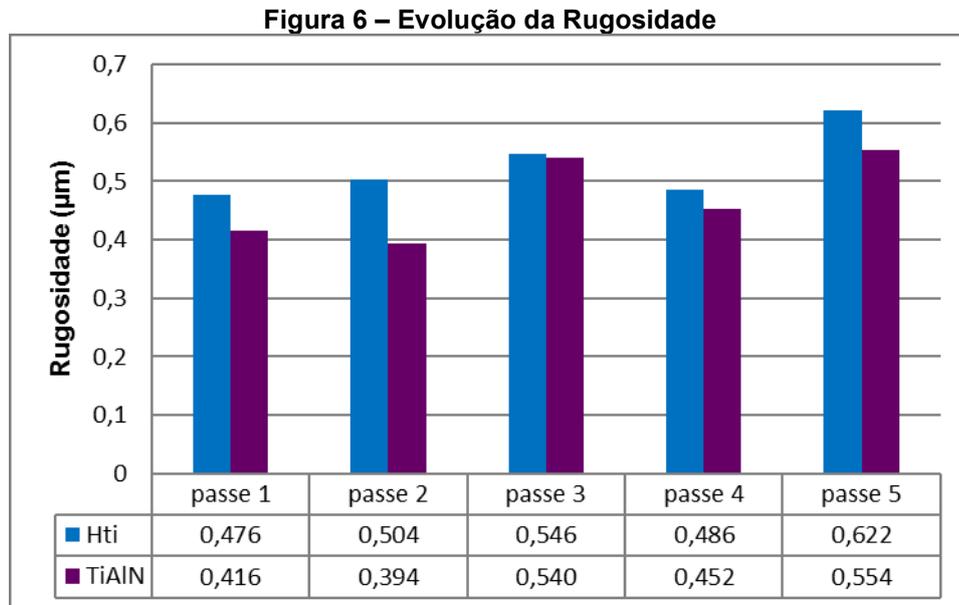
Fonte: Manera et al (2011) – adaptado pelo autor

Analisando individualmente as ferramentas, seu comportamento muda de acordo com os valores de desgaste para cada passe, com uma variação pequena na ferramenta sem revestimento e uma variação maior na ferramenta com revestimento.

Com o grau de dureza elevado tende-se a ter um aumento no acabamento superficial da peça e na sua qualidade, devido a menor rugosidade gerada pela ferramenta com revestimento.

A Figura 6 mostra que a rugosidade da ferramenta com revestimento é sempre menor comparada com a outra ferramenta em todos os passes. A

ferramenta sem revestimento tende a ser mais constante na evolução da rugosidade, mesmo a ferramenta com revestimento tendo um maior desgaste nos 2 últimos passes, conforme mostrado na Figura 5, ela se manteve com uma melhor qualidade superficial ao longo dos 5 passes.



Fonte: Manera et al (2011) – adaptado pelo autor

5 CONCLUSÕES

Durante o processo de usinagem foi possível observar que a energia específica de corte utilizada pela ferramenta com revestimento de TiAlN empregando os parâmetros de usinagem semelhantes do inserto sem revestimento, no primeiro passe realizado no corpo de prova apresentou valores superiores em relação a ferramenta sem revestimento e assim sucessivamente para os demais passes. Pode-se concluir que a ferramenta com revestimento necessita de parâmetros de corte superiores para haver uma redução dos valores de energia específica de corte.

Avaliando a evolução do desgaste ambas as ferramentas tiveram desempenho similares e a ferramenta com revestimento tendo valores maiores de desgaste nos últimos passes, com bases nesses dados podemos deduzir que ambas as ferramentas terão vida útil equivalente, e evidência uma tendência de a ferramenta com revestimento aumentar seu desempenho caso seja possível aumentar seus parâmetros de corte.

Analisando a evolução da rugosidade a ferramenta com revestimento possibilita resultados melhores em relação ao inserto sem revestimento utilizando os mesmos parâmetros de corte ao contrário das análises de desgaste e energia de corte onde a ferramenta com revestimento não obteve resultados superiores.

Se os parâmetros de corte da ferramenta com revestimento forem aumentados pode-se obter diminuição do desgaste e assim aumentando sua vida útil, uma melhora na rugosidade e redução da energia de corte como já mencionado anteriormente. Concluindo que os benefícios gerados pelo aumento dos parâmetros têm um ganho da eficiência do processo, ou seja, uma diminuição de tempo no processo, aumento na qualidade superficial da peça e redução da rugosidade, contribuindo para melhoria do tempo de ciclo.

REFERÊNCIAS

ABELE, E.; DÖRR, J. **Ferramentas de corte protegidas contra a defasagem tecnológica**, Máquina e Metais, Ago, 2002, 38-53p.

DA SILVA, E. L. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 138 p. 4 ed. rev. Atual – Florianópolis: UFSC, 2005.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 5ª ed. Artliber editora, São Paulo, Brasil, 2006, 78-93 p.

DRAPE D. **Cutting Tool Coating Production**. Disponível em: <<http://www.productionmachining.com/articles/cutting-tool-coatingproduction>>. Acesso em 25 de abril de 2017, 591-614.

CRESWELL, J. W. **Research Design: qualitative & quantitative approaches**. Resumofeitopor Elisabeth Adriana Dudziack. London: Sage, 1994.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. 1ª ed. Blucher, São Paulo, Brasil, 1977, 280-426 p.

FILIZ, S.; *et al.* **An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-end mills**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Amsterdam, v. 47, 2007, 1088-1100 p.

GEY, C. **Novos revestimentos dão origem a ferramentas mais eficientes**. Máquinas e Metais, Jun, 2000, 52-67 p.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 1991.

HOGMARK, S.; *et al.* **Design and evaluation of tribological coatings**. Wear, Uppsala, Sweden, V. 246, 2000, 20–33 p.

HOLLECK, H. **Material selection for hard coatings**. J. Vac. Sci. Technol., Vol. 4, 1986, 2661-2666 p.

HONG, S. Y.; *et al.* **Friction and Cutting Forces in Cryogenic Machining of Ti-6Al-4V**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.41, 2001, 2271-2285 p.

KAISER, O. **Pvd-Beschichtungen schützen Werkzeug und Schmelze**. Kunststoffe, vol 85, 1995, 898-904 p.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6^a ed. Pearson editora, Janeiro de 2009.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 5^a ed Springer editora, Aachen, Alemanha, 1997.

LUGSCHEIDER, E.; *et al.* **Arc PVD – coated cutting tools for modern machining applications**. Surface and Coatings Technology, vol 94/95, 1997, 351-362 p.

MACHADO, A. R.; *et al.* **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1^aed, São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA., 2009, 371 p.

MALHOTRA, N. K. **Pesquisa de Marketing: Uma Orientação Aplicada**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

MANERA, R., *et al.*, **Avaliação do Desempenho do Revestimento da Ferramenta de Corte na Usinagem da Liga Ti6Al4V**. Caxias do Sul, 6^o Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011.

MASON, F. **Os conceitos que guiam a indústria no desenvolvimento de pastilhas indexáveis**. Máquinas e Metais, Dez, 2003, 134-143 p.

NABHANI, F. **Machining of Aerospace Titanium Alloys**. Robots and Computer Integrated Manufacturing, Vol.17, 2001, 99-106 p.

NARASIMHULU, A.; *et al.* **Dry Machining of Ti-6Al-4V using PVD Coated TiAlN Tools**. London, Proceedings of the World Congress on Engineering, 2012.

PEREIRA, V. R. **Necessidades do cliente do setor automobilístico: um estudo das percepções de agentes dos elos da cadeia automotiva**. – 112p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

RODRIGUES, A. R. **Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte**. 227 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SANDVIK COROMANT. **Manual técnico de usinagem, torneamento, fresamento, furação, mandrilhamento e sistemas de fixação**. 2ª ed. São Paulo: Elanders, 2010.

SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida**. – Parte I. Apostila – Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

SHTANSKY, D. V.; *et al.* **Multicomponent nanostructured films for various tribological applications**, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, V. 28, Moscou, Rússia, 2010, 32–39 p.

SCHULZ, H., *et al.* **Quais são e para que servem os revestimentos**. Máquinas e Metais, Set, 2000, 38-45 p.

SCHULZ, B. **Horn Continues Growth Path**. Disponível em: <<http://www.mmsonline.com/blog/post/horn-continues-growth-path>>. Acesso em 22 de junho de 2017.

TELES, J. **Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro**. 124 f. Tese (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2007.

VENCOVSKY, P. **Revetimentos em Ferramentas – Processo PVD**. Informação técnica, 1999, 1-5 p.

YUHARA, D. A. **Aplicação de Revestimentos PVD em Ferramentas de Corte**. Proceedings of the USINAGEM 2000 - FEIRA E CONGRESSO, S.Paulo, Brazil, 2000.