

# TORNEAMENTO DA SUPERLIGA DE NÍQUEL VAT32<sup>®</sup> UTILIZANDO FERRAMENTAS DE METAL DURO REVESTIDOS COM TI(C,N) + AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PELO MÉTODO CVD E TI-AL-SI-N PELO MÉTODO PVD.

Marcel Yuzo Kondo, yuzokondo@gmail.com<sup>1</sup>

Manoel Cléber de Sampaio Alves, manoelcsa@feg.unesp.br<sup>1</sup>

Marcelo Antunes de Paula, marcelo13.antunes@yahoo.com.br<sup>1</sup>

Taise Azevedo de Sousa, taiseazevedo.sousa@yahoo.com.br<sup>1</sup>

José Vitor Cândido de Souza, candido@feg.unesp.br<sup>1</sup>

Marcos Valério Ribeiro, mvalerio@feg.unesp.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Guaratinguetá, Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – Pedregulho CEP – 12.516-410 CAIXA POSTAL – 205

**Resumo:** A superliga de níquel Vat32<sup>®</sup> foi desenvolvida como um substituto da liga UNS N07751 na fabricação de válvulas automotivas de combustão interna de alto desempenho. A formação de carbonetos de nióbio confere a liga Vat32<sup>®</sup> elevada resistência ao desgaste, desejada na aplicação em válvulas automotivas, criando-se, porém, uma maior dificuldade na usinagem deste material. Este trabalho estudou o torneamento da liga VAT32<sup>®</sup> com dois tipos de ferramentas de metal duro, uma com revestimento Ti(C,N) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> feito pelo processo de deposição química de vapor (chemical vapor deposition – CVD), e a outra com revestimento de Ti-Al-Si-N feita pelo processo de deposição física de vapor (physical vapor deposition – PVD). Analisou-se o desgaste das ferramentas, a qualidade superficial das peças usinadas e a potência de usinagem. A análise foi feita utilizando-se planejamento experimental pelo método de Taguchi, através de arranjo ortogonal L<sub>8</sub>. Os fatores avaliados foram velocidade de corte, avanço da ferramenta, profundidade de corte e tipo de lubrificação, a seco e lubrificação abundante. Para o torneamento com a ferramenta de CVD encontrou-se que o desgaste de flanco da ferramenta sofreu influência da velocidade de corte, do avanço e do tipo de lubrificação usados, sendo os menores valores obtidos para velocidade de corte de 150 m/min, avanço de 0,3 mm/rotação e lubrificação abundante. Velocidade de corte, avanço e tipo de lubrificação também influenciaram o desgaste de flanco no torneamento com a ferramenta de PVD, sendo os menores valores obtidos para velocidade de corte de 90 m/min, avanço de 0,25 mm/rotação e torneamento a seco.

**Palavras-chave:** CVD, PVD, desgaste de ferramenta, usinagem a seco, Método de Taguchi

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com Farina *et al.* (2013), as normas ambientais cada vez mais rigorosas exigem o desenvolvimento de motores de combustão interna que emitam cada vez menos particulados, óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e monóxidos de carbono. Novas tecnologias relacionadas aos sistemas de combustão são desenvolvidas, ocasionando maiores temperaturas de trabalho, maiores cargas mecânicas e diferentes condições de queima, exigindo dos materiais das válvulas maiores resistências a quente, resistência à corrosão e resistência à abrasão. A superliga VAT32<sup>®</sup> foi desenvolvida para poder substituir a superliga UNS N07751 na confecção de válvulas de motores de combustão interna, sendo desenvolvida para ter um custo menor, retirando-se níquel e aumentando as quantidades de nióbio e carbono. Maiores teores de carbonetos de nióbio (NbC), promovem um aumento na resistência mecânica e a resistência ao desgaste, porém maior dificuldade na usinagem do material é encontrada. Na Tabela 1 encontram-se as composições das ligas UNS N07751 e VAT32<sup>®</sup> (FARINA *et al.*, 2013).

**Tabela 1 – Composição química nominal das ligas em porcentagem em peso.**

| Liga                | C    | Si   | Mn   | Ni      | Nb   | Al   | Ti   | Cr   | Fe      |
|---------------------|------|------|------|---------|------|------|------|------|---------|
| VAT 32 <sup>®</sup> | 0,30 | 0,20 | 0,30 | 32,00   | 3,90 | 1,80 | 2,00 | 15,5 | Balanço |
| UNS N07751          | 0,02 | 0,20 | 0,30 | Balanço | 1,00 | 1,20 | 2,30 | 15,5 | 7,00    |

A liga VAT32<sup>®</sup> mostrou qualidades como resistência à fadiga, dureza a 760 °C, resistência mecânica e de impacto Charpy iguais ou superiores as da liga UNS N07751 sendo possível sua utilização na confecção de válvulas para motores de combustão interna (FARINA *et al.*, 2013).

A combinação de baixa condutividade e difusividade térmica, resistência em alta temperatura, alta afinidade química, alta resistência ao cisalhamento e tendência à formação de aresta postiça tornam as ligas de níquel de difícil usinagem (BHATT *et al.*, 2010; YAZID *et al.*, 2011 e ANTONIALLI *et al.*, 2016). De acordo com Bhatt *et al.* (2010),

ferramentas de metal duro revestidas podem ser usadas para aumentar as velocidades de corte, visando o aumento de produtividade.

De acordo com Costa (2016), dois métodos de revestimento de metal duro são comuns, os métodos CVD e o PVD. No processo de revestimento CVD (*Chemical Vapor Deposition* – Deposição Química de Vapor) ocorre a formação de um revestimento através de uma reação química do elemento a ser depositado com o substrato, reações essas que podem incluir decomposição térmica, redução, hidrólise, oxidação, carbonização e nitretação. O revestimento de TiC (3200 HV) é o de maior dureza entre os revestimentos de CVD, propriedade esta que aumenta a resistência ao desgaste de flanco da ferramenta. A formação de uma camada “eta” ( $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ ), pode acarretar no revestimento de TiC a formação de micro lascas levando ao desgaste por quebra da ferramenta. Este tipo de problema pode ser resolvido utilizando-se carbonitreto de titânio (TiCN), que também possui alta dureza (3000 HV), onde parte dos átomos de C é substituído por N durante a deposição.

No processo PVD (*Physical Vapor Deposition* – Deposição Física de Vapor) forma-se uma camada no substrato por deposição física de átomos, íon ou moléculas do elemento a ser depositado. Evaporação, *Sputtering* e Íons são técnicas de PVD. Trabalha-se com temperaturas mais baixas (500°C), o que previne a formação de camada “eta”, há a possibilidade de revestir aços-rápidos, obtém-se revestimentos com granulometrias mais finas e possibilita o revestimento de cantos vivos. Entre as vantagens e desvantagens dos processos de CVD e PVD podem ser citados que (COSTA, 2016):

- No processo CVD, a adesão do revestimento ao substrato é maior que na PVD, o que permite também camadas mais espessas de cobertura;
- Revestimentos CVD oferecem resistências a temperaturas mais elevadas quando comparado com revestimentos PVD. Óxidos são difíceis de serem obtidos através do processo de revestimento PVD;
- Maiores substratos podem ser revestidos no PVD do que CVD devido às temperaturas dos processos que no CVD, são em torno de 1000 °C, e no PVD, em torno de 700 °C.

Bhatt *et al.* (2010) estudaram o torneamento do Inconel<sup>®</sup> 718 (32 HR<sub>C</sub>) com ferramentas de metal duro sem revestimento, revestido com TiAlN por PVD e revestido com TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN por CVD. Diferentes velocidades de corte  $v_c$  (50, 75 e 100 m/min) e de avanço  $f$  (0,075, 0,1 e 0,125 mm/rev) foram utilizadas, e como critério de vida das ferramentas, foi adotado comprimento de desgaste de flanco  $V_b$  médio de 300  $\mu\text{m}$ . Na velocidade de corte 50 m/min, a ferramenta de metal duro sem revestimento obteve maior vida, enquanto que nas velocidades de 75 e 100 m/min os melhores desempenhos foram obtidos, respectivamente, pela ferramenta revestida por PVD e pela ferramenta revestida por CVD. Na maior  $v_c$  a ferramenta de PVD sofreu lascamento, atribuído a vibrações, o que prejudicou o desempenho da ferramenta. Na maioria dos casos os desgastes por abrasão e por adesão foram os encontrados nas ferramentas.

O uso de fluidos de corte na usinagem de superligas de Níquel possibilita o aumento da produtividade de usinagem das peças e também um aumento na qualidade superficial dessas peças. O uso desses fluidos geralmente aumentam a vida das ferramentas, diminuem a potência necessária para o corte e aumentam a acurácia dimensional, pois o uso de fluido aumenta a troca de calor no processo e diminui o atrito entre o cavaco formado e a ferramenta de corte. Efeitos negativos também ocorrem quando do uso de fluidos de corte tais como poluição no descarte desses fluidos, riscos a saúde dos trabalhadores e piora nas condições ambientais de trabalho, o que torna a usinagem a seco desejável sempre que possível. Yazid *et al.* (2011) estudaram o torneamento do Inconel<sup>®</sup> 718 usando metal duro revestido de TiAlN pelo método PVD. Utilizaram diferentes tipos de lubrificação, a seco e MQF (mínima quantidade de fluido). Variaram as velocidades de corte (90,120 e 150 m/min), avanço  $f$  (0,10 e 0,15 mm/rev) e profundidade de corte  $a_p$  (0,3 e 0,5 mm). Foram avaliados rugosidade e microestrutura da superfície e das camadas sub superficiais. Melhores rugosidades foram obtidas no sistema de MQF e foi constatado mudança na dureza das subcamadas superficiais na usinagem a seco.

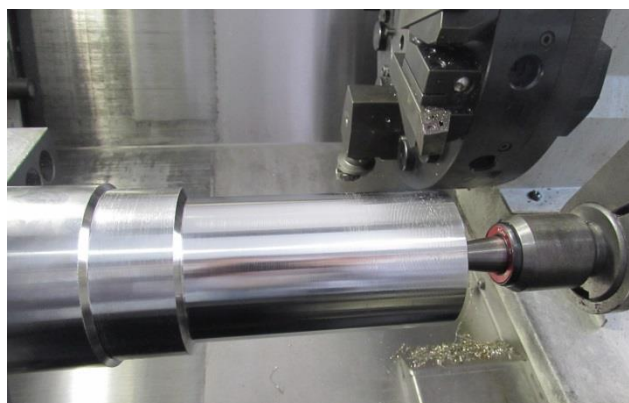
Este trabalho tem como objetivo estudar o torneamento da superliga de níquel VAT32<sup>®</sup> com o uso de pastilhas de metal duro recobertas com diferentes materiais e por técnicas diferentes, PVD e CVD. Também foi avaliado o uso de lubri-refrigeração em abundância e usinagem a seco, variando-se velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. As respostas observadas foram o desgaste de flanco das ferramentas, a potência de corte e a rugosidade da peça usinada.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para os ensaios de torneamento foi utilizado um corpo de prova da liga VAT32<sup>®</sup> de forma cilíndrica de comprimento 250 mm e diâmetro inicial de 95 mm. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP no Torno CNC ROMI modelo GL 240M. As ferramentas utilizadas foram a ferramenta de metal duro revestido com Ti(C,N) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pelo método CVD, código CNMG120412-MF5 da Seco Tools, e a ferramenta de metal duro revestido com Ti-Al-Si-N pelo método PVD, código CNMG120412-MF5 da Seco Tools. O ensaio do corpo de prova pode ser visto na Fig. (1).

A influência dos fatores velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f$ ), profundidade de corte ( $a_p$ ) e tipo de lubrificação foram investigados através de um planejamento de experimento pelo método de Taguchi, sendo usado para cada tipo de ferramenta um arranjo ortogonal L<sub>8</sub>. Na Tabela (2) são encontrados os valores dos níveis utilizados nos experimentos.

Os valores de  $v_c$ ,  $f$  e  $a_p$  foram selecionados para abranger faixas dentro da recomendação do fabricante de ferramentas, motivo pelo qual os valores trabalhados são diferentes para cada ferramenta. Na usinagem com lubrificação com fluido em abundância, utilizou-se uma solução de óleo de base vegetal (VASCO 1000 da Blaser) com concentração de 5% em água e fluxo de 91 L/min. Os comprimentos usinados ( $l_c$ ) em cada combinação experimental foram de 30 mm.



**Figura 1 - Torneamento do VAT32(R) com ferramenta de metal duro revestido pelo método PVD.**

**Tabela 2 - Valores dos níveis dos fatores utilizados no experimento.**

| Fatores                          | Ferramenta          |                   |
|----------------------------------|---------------------|-------------------|
|                                  | CVD                 | PVD               |
| Vel. de corte $v_c$ (m/min)      | 120; 130; 140 e 150 | 80; 90; 100 e 110 |
| Avanço $f$ (mm/rev)              | 0,3; 0,5            | 0,25; 0,4         |
| Profundidade de corte $a_p$ (mm) | 0,25; 0,5           | 0,15; 0,25        |
| Tipo de lubrificação             | Seco; Abundante     | Seco; Abundante   |

As matrizes experimentais, de acordo com o arranjo ortogonal  $L_8$  de Taguchi, podem ser vistas na Tab. (3), onde se encontram as combinações dos fatores para cada ensaio. Duas repetições foram realizadas para cada combinação experimental.

**Tabela 3 – Arranjo ortogonal  $L_8$  dos fatores para os ensaios de torneamento do VAT32®.**

| ENSAIO | Ferramenta CVD   |                 |               |              | Ferramenta PVD   |                 |               |              |
|--------|------------------|-----------------|---------------|--------------|------------------|-----------------|---------------|--------------|
|        | $v_c$<br>(m/min) | $f$<br>(mm/rev) | $a_p$<br>(mm) | Lubrificação | $v_c$<br>(m/min) | $f$<br>(mm/rev) | $a_p$<br>(mm) | Lubrificação |
| 1      | 140              | 0,3             | 0,5           | Seco         | 90               | 0,25            | 0,25          | Seco         |
| 2      | 130              | 0,5             | 0,5           | Seco         | 110              | 0,25            | 0,15          | Seco         |
| 3      | 150              | 0,5             | 0,25          | Seco         | 100              | 0,25            | 0,15          | Convencional |
| 4      | 120              | 0,3             | 0,25          | Seco         | 110              | 0,4             | 0,25          | Convencional |
| 5      | 130              | 0,3             | 0,25          | Convencional | 80               | 0,25            | 0,25          | Convencional |
| 6      | 140              | 0,5             | 0,25          | Convencional | 90               | 0,4             | 0,15          | Convencional |
| 7      | 120              | 0,5             | 0,5           | Convencional | 100              | 0,4             | 0,25          | Seco         |
| 8      | 150              | 0,3             | 0,5           | Convencional | 80               | 0,4             | 0,15          | Seco         |

Como variáveis respostas, os valores de potência de corte, os valores de desgaste de flanco ( $V_b$ ) dividido pelo comprimento  $l_c$  e as rugosidade  $R_a$  e  $R_t$  das peças foram obtidos. A potência de corte foi mensurada em tempo real durante os ensaios através de um sensor de efeito Hall Lem AT 50 B10 ligado à alimentação dos motores do torno. O sensor estava então acoplado a um sistema de aquisição e os dados foram obtidos com o auxílio do software LABVIEW® da National Instruments. Para o tratamento e processamento destes dados foram desenvolvidas rotinas no software MATLAB®. Os desgastes de flanco foram obtidos depois de cada ensaio com auxílio do microscópio da MAHR modelo MarVision MM200 com movimento micrométrico. O comprimento de corte  $l_c$  variava em cada ensaio de acordo com o diâmetro do corpo de prova, então se adotou como critério de avaliação de desgaste a razão  $V_b/l_c$ , razão entre desgaste médio de flanco  $V_b$  da ferramenta e comprimento usinado  $l_c$ . As rugosidade  $R_a$  e  $R_t$  foram obtidas nas peças depois de cada ensaio com o auxílio do rugosímetro portátil da MAHR modelo MarSurf M300 + RD18, com *cut-off* de 0,8 e comprimento de amostragem de 4 mm, sendo as medições realizadas na direção paralela ao avanço da ferramenta.

As influências dos fatores nas respostas, bem como as análises estatísticas, através de análises de variância ANOVA, foram realizadas no software estatístico MINITAB® 17.0.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados da influência dos fatores velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e tipo de lubrificação nas respostas de potência de corte, na razão  $V_b/l_c$  e na rugosidade das peças. Como os parâmetros de usinagem não são iguais para as diferentes ferramentas, há a impossibilidade de comparação de desempenho entre os diferentes tipos de pastilhas de metal duro revestidos.

#### 3.1 Potência de corte

Os efeitos dos fatores sobre a média de potência de corte, em Watts, para o torneamento com a ferramenta CVD podem ser encontrados na Fig. (2).

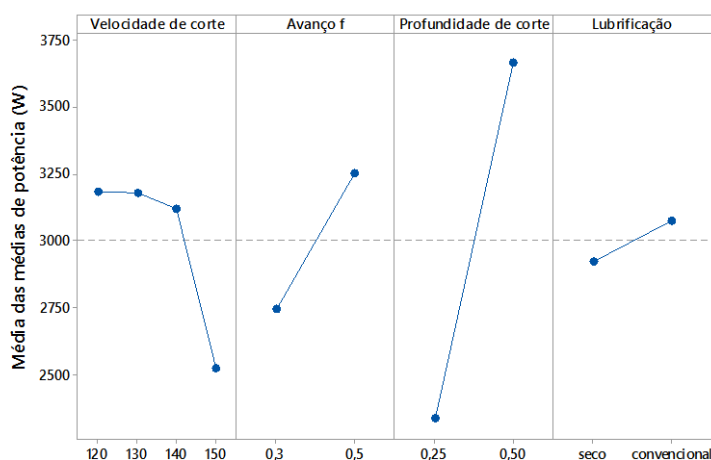


Figura 2 - Efeitos dos fatores na média das médias de potência de corte da ferramenta de CVD.

Os menores valores de potência de usinagem foram encontrados para a combinação dos fatores  $v_c = 150$  m/min,  $f = 0,3$  mm/rev,  $a_p = 0,25$  mm e tipo de lubrificação a seco. Para confirmar se há diferença significativa entre as respostas de um fator nos diferentes níveis, é apresentada, na Tab. (4), a análise de variância para a resposta potência de corte com a ferramenta CVD.

Tabela 4 - ANOVA dos fatores para a resposta de potência de corte para a ferramenta CVD.

| Fonte         | GL | Seq SS  | Adj MS  | F     |
|---------------|----|---------|---------|-------|
| $v_c$         | 3  | 609685  | 203228  | 2,58  |
| $f$           | 1  | 515769  | 515769  | 6,55  |
| $a_p$         | 1  | 3528970 | 3528970 | 44,80 |
| Lubrificação  | 1  | 47627   | 47627   | 0,60  |
| Erro residual | 1  | 78763   | 78763   | -     |
| Total         | 7  | 4780814 | -       | -     |

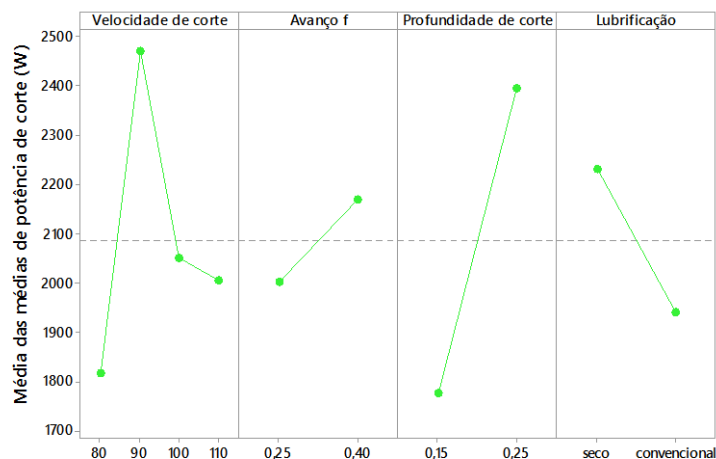
De acordo com Phadke (1989), o valor da taxa de variância F no método de Taguchi pode ser utilizado para realizar uma análise qualitativa dos efeitos dos fatores sobre a resposta. Com o valor de F menor que um, temos que o efeito daquele fator é menor que o erro das medições e que não há significância daquela variável sobre a resposta. Valores maiores que dois significam que o efeito do fator não é tão pequeno e já pode ser considerado, qualitativamente, como um efeito relevante, pois seu efeito é duas vezes maior que os erros. Se o valor de F é maior que quatro significa que o efeito daquele fator é relativamente grande sobre a resposta.

É então possível discutir que o avanço  $f$  e a profundidade de corte  $a_p$  possuem efeitos relativamente grandes nas respostas de potência de usinagem e que o efeito da velocidade de corte sobre a potência é algo que, qualitativamente, é significativo. Um fato interessante de ser observado é que não há diferença significativa entre o uso de sistema de lubri-

refrigeração em abundância com relação à usinagem a seco, dentro das condições de usinagem testadas. Debnath *et al.* (2014) nos mostra que o uso de fluidos de corte durante a usinagem diminui as potências de corte devido as suas capacidades de lubrificação, pois seu uso diminui o coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça e entre o cavaco e a ferramenta. O que se evidencia nos resultados encontrados é que para velocidades de corte superiores a 120 m/min, o fluido em abundância não penetra nas áreas de contato ferramenta/peça e cavaco/peça, não exercendo bem o papel de lubrificação da operação.

Na Figura (3) encontram-se os efeitos dos fatores na potência de corte com o uso da pastilha de metal duro revestida pelo método PVD.

Através do gráfico de efeitos percebe-se que os menores valores médios de potência de corte foram obtidos quando os fatores eram  $v_c = 80$  m/min,  $f = 0,25$  mm/ver,  $a_p = 0,15$  mm e lubrificação convencional. Os valores da análise de variância para o efeito dos fatores na potência com o uso da ferramenta PVD se encontram na Tab. (5).



**Figura 3 – Efeitos dos fatores na média das médias de potência de corte da ferramenta de PVD.**

**Tabela 5 - ANOVA dos fatores para potência de corte com a ferramenta PVD.**

| Fonte         | GL | Seq SS  | Adj MS | F     |
|---------------|----|---------|--------|-------|
| $v_c$         | 3  | 458012  | 152671 | 2,90  |
| $f$           | 1  | 54868   | 54868  | 1,04  |
| $a_p$         | 1  | 769862  | 769862 | 14,61 |
| Lubrificação  | 1  | 169902  | 169902 | 3,22  |
| Erro residual | 1  | 52699   | 52699  | -     |
| Total         | 7  | 1505343 | -      | -     |

A maior influência nos valores de potência, com a ferramenta de PVD, se da para o fator profundidade de corte. Os fatores velocidade de corte e lubrificação exerceram certa influência na potência e o fator avanço tem seu efeito muito próximo ao erro, não tendo, para a ferramenta PVD, diferença significativa nas respostas. O uso de fluido de corte em abundância auxiliou o processo de torneamento com relação aos esforços de corte.

### 3.2 Razão desgaste/comprimento de corte ( $V_b/l_c$ )

As medições de desgaste de flanco podem ser vistas na Fig. (4), onde o desgaste de flanco da ferramenta de CVD, Fig. (4)(a), foi  $V_b = 0,063$  mm e comprimento  $l_c = 12,48$  m, e para a ferramenta de PVD, Fig. (4)(b), o desgaste de flanco foi de  $V_b = 0,100$  mm e  $l_c = 65,03$  m.

Os valores encontrados na Fig. (5) se referem aos efeitos dos fatores no torneamento do VAT32® com o uso da ferramenta CVD para a resposta  $V_b/l_c$ .

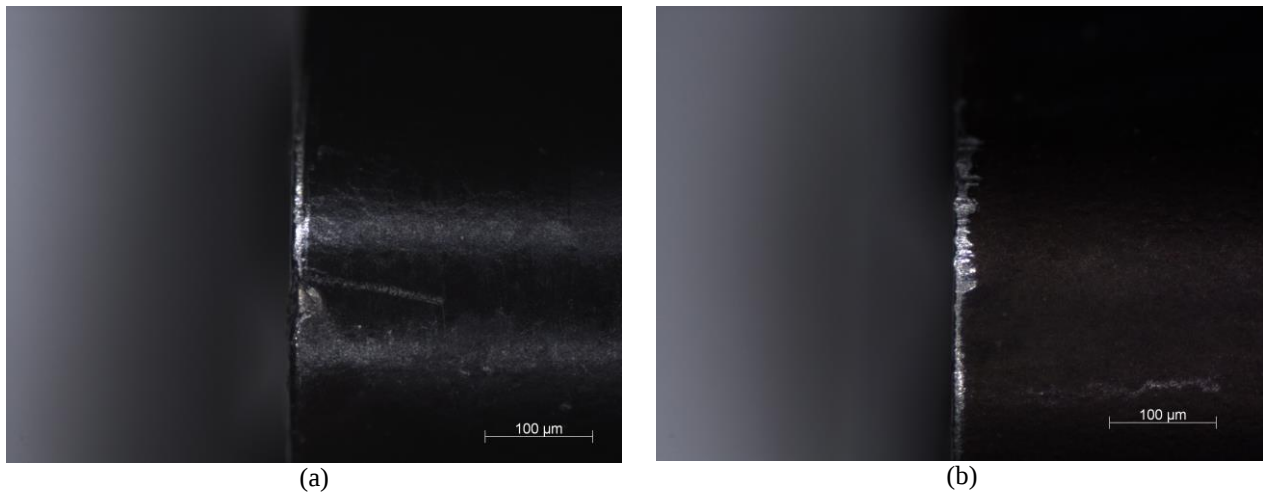


Figura 4 - Medição dos desgastes de flanco da (a) Ferramenta CVD e (b) Ferramenta PVD.

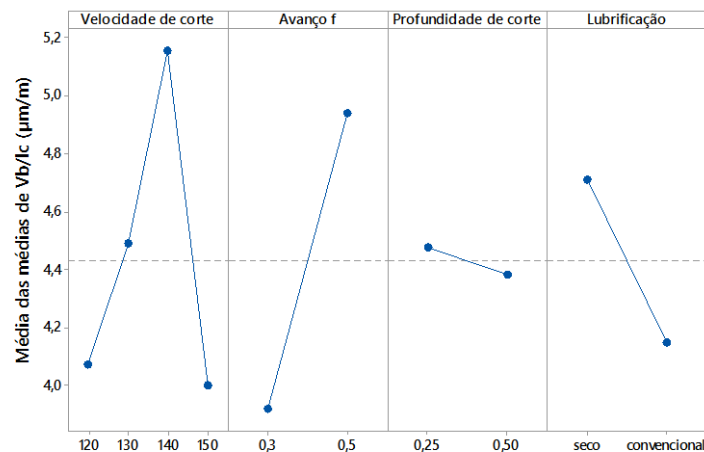


Figura 5 - Efeitos dos fatores na média das médias da razão desgaste de flanco/ comprimento de usinagem ( $V_b/l_c$ ) com a ferramenta de CVD.

Os menores desgastes de flanco por comprimento usinado foram obtidos para  $v_c = 150$  m/min,  $f = 0,3$  mm/rev,  $a_p = 0,50$  mm e lubrificação convencional. Na Tabela (6) podem ser vistos a análise de variância dos fatores para a resposta  $V_b/l_c$  utilizando-se a ferramenta CVD.

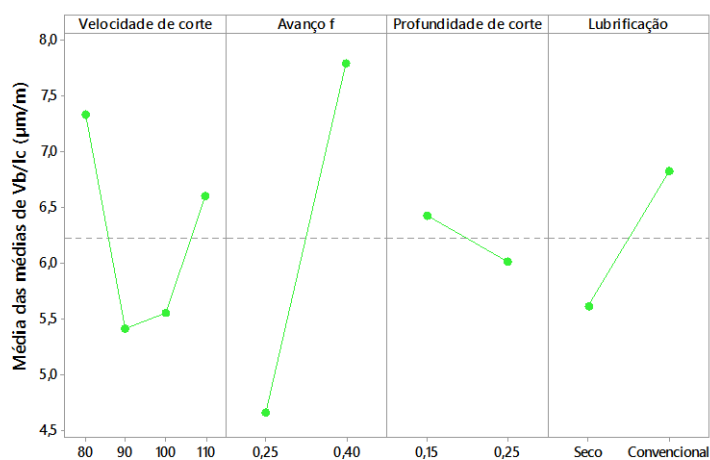
Os fatores velocidade de corte e tipo de lubrificação exerceram pequena influência sobre a razão  $V_b/l_c$ , enquanto que o avanço exerceu uma grande influência. Apesar do fator tipo de lubrificação não exercer influência nas potências de corte, notou-se, com relação ao desgaste, um maior valor quando adotado a usinagem a seco. Então, o uso fluído na lubri-refrigeração abundante resultou em melhorias com relação ao desgaste da ferramenta CVD. De acordo com Debnath *et al.* (2014) o fluido de corte possui duas funções, a de lubrificação e de refrigeração. A solução de óleo com água usado neste trabalho não desempenhou a função de lubrificação bem, fato este comprovado pela análise de potência de corte. Porém a função de refrigeração foi bem exercida pelo fluido, uma vez que se diminuiu o desgaste da ferramenta, o que pode ser explicado por uma menor temperatura da operação já que o fluido interfere na absorção da energia térmica gerada na operação de usinagem diminuindo o calor para a ferramenta de corte.

Os efeitos dos fatores sobre a razão desgaste/comprimento com o uso da ferramenta PVD podem ser vistos na Fig. (6).

A configuração que apresentou os menores desgastes por comprimento usinado foi  $v_c = 90$  m/min,  $f = 0,25$  mm/rev,  $a_p = 0,25$  mm e lubrificação a seco. A ANOVA para os efeitos dos fatores na média das médias da relação  $V_b/l_c$  se encontra na Tab. (7).

**Tabela 6 - ANOVA dos fatores para a razão  $V_b/l_c$  da ferramenta CVD.**

| Fonte         | GL | Seq SS  | Adj MS  | F    |
|---------------|----|---------|---------|------|
| $v_c$         | 3  | 1,68742 | 0,56247 | 2,40 |
| $f$           | 1  | 2,09462 | 2,09462 | 8,95 |
| $a_p$         | 1  | 0,01648 | 0,01648 | 0,07 |
| Lubrificação  | 1  | 0,63868 | 0,63868 | 2,73 |
| Erro residual | 1  | 0,23391 | 0,23391 | -    |
| Total         | 7  | 4,67111 | -       | -    |



**Figura 6 - Efeitos dos fatores sobre a razão  $V_b/l_c$  com a ferramenta PVD.**

**Tabela 7 - ANOVA do efeito dos fatores sobre a média das médias da razão  $V_b/l_c$  para a ferramenta PVD.**

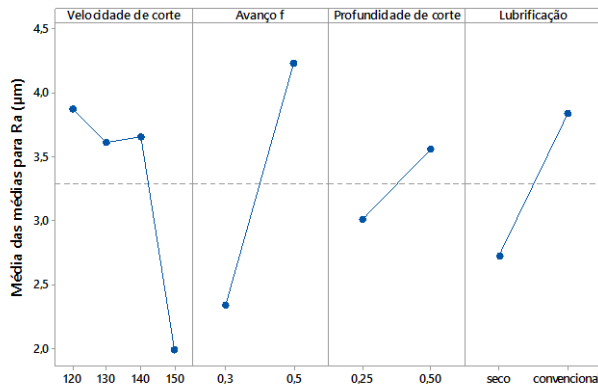
| Fonte         | GL | Seq SS  | Adj MS  | F     |
|---------------|----|---------|---------|-------|
| $v_c$         | 3  | 4,9765  | 1,6588  | 4,59  |
| $f$           | 1  | 19,6036 | 19,6036 | 54,21 |
| $a_p$         | 1  | 0,3331  | 0,3331  | 0,92  |
| Lubrificação  | 1  | 2,9384  | 2,9384  | 8,13  |
| Erro residual | 1  | 0,3616  | 0,3616  | -     |
| Total         | 7  | 28,2132 | -       | -     |

Os fatores que exerceram grande influência, ou seja, F maiores que quatro, foram velocidade de corte, avanço e tipo de lubrificação utilizado. O fluido de corte exerceu uma influência negativa no desgaste das ferramentas revestidas pelo método PVD, sendo indicada, dentro das condições de usinagem propostas nos experimentos realizados, a usinagem a seco do VAT32®.

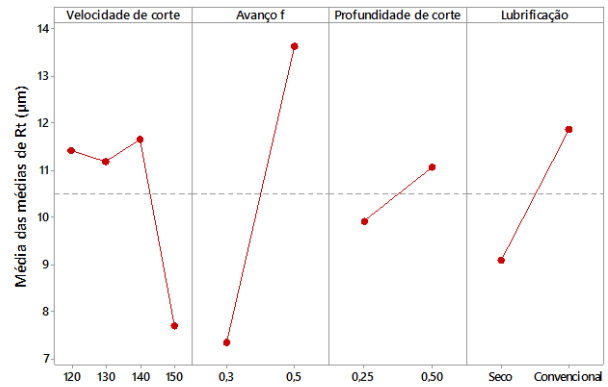
### 3.3 Rugosidades $R_a$ e $R_t$

Na Fig. (7)(a) encontram-se os efeitos dos fatores sobre a média das médias da rugosidade  $R_a$  com o uso da ferramenta de CVD, enquanto que os valores para a rugosidade  $R_t$  podem ser vistos na Fig (7) (b).

Para ambas as rugosidades, as peças com melhor acabamento superficial foram usinadas com a ferramenta de CVD sob as condições de  $v_c = 150$  m/min,  $f = 0,3$  mm/rev,  $a_p = 0,25$  mm e usinagem a seco. As respostas de  $R_a$  e  $R_t$  tiveram o mesmo comportamento com relação aos efeitos dos fatores, como observado na Fig. (7). Na Tabela (8) podem ser vistos a ANOVA para os efeitos dos fatores sobre a rugosidade.



(a)



(b)

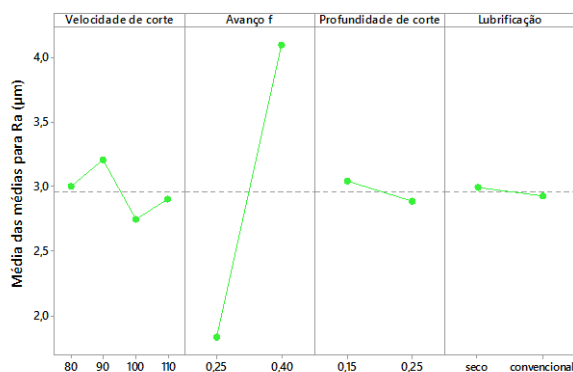
Figura 7 – Efeito dos fatores na média das médias de (a) Rugosidade  $R_a$  e (b) Rugosidade  $R_t$  para a ferramenta CVD.

Tabela 8 - ANOVA dos efeitos dos fatores sobre  $R_a$  e  $R_t$  para a ferramenta CVD.

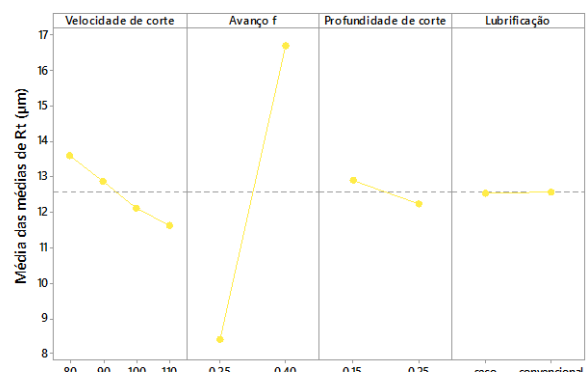
| Fonte         | $R_a$ |         |        |       | $R_t$ |         |        |       |
|---------------|-------|---------|--------|-------|-------|---------|--------|-------|
|               | GL    | Seq SS  | Adj MS | F     | GL    | Seq SS  | Adj MS | F     |
| $v_c$         | 3     | 4,5144  | 1,5048 | 2,39  | 3     | 21,039  | 7,013  | 2,94  |
| F             | 1     | 7,1882  | 7,1882 | 11,41 | 1     | 79,521  | 79,521 | 33,34 |
| $a_p$         | 1     | 0,6136  | 0,6136 | 0,97  | 1     | 2,678   | 2,678  | 1,12  |
| Lubrificação  | 1     | 2,4987  | 2,4987 | 3,96  | 1     | 15,511  | 15,511 | 6,50  |
| Erro residual | 1     | 0,6302  | 0,6302 | -     | 1     | 2,385   | 2,385  | -     |
| Total         | 7     | 15,4451 | -      | -     | 7     | 121,134 | -      | -     |

O fator que exerceu grande influência sobre  $R_a$  e  $R_t$  foi o avanço, e o fator velocidade teve um F maior que dois para ambas as respostas. O tipo de lubrificação exerceu grande influência sobre os valores de  $R_t$ , enquanto que para  $R_a$  a influência não foi tão pequena ( $F > 2$ ). Para ambos os casos o efeito da profundidade de corte é muito próximo do erro residual, o que indica pouca influência. Na usinagem a seco com pastilha CVD obteve-se melhores acabamentos superficiais das peças.

Na Figura (8)(a) se encontram os efeitos dos fatores sobre  $R_a$  na usinagem com pastilha de metal duro revestido pelo processo PVD, enquanto que na Fig. (8)(b) se encontram as respostas para  $R_t$ .



(a)



(b)

Figura 8 - Efeitos dos fatores sobre (a)  $R_a$  e (b)  $R_t$  com uso da ferramenta PVD.

As melhores qualidades superficiais foram obtidas na usinagem com a ferramenta PVD sob as condições de  $f = 0,25$  mm/rev e  $a_p = 0,25$  mm. Para  $R_a$  a  $v_c = 100$  m/min e usinagem com fluido em abundância demonstraram melhores acabamentos, enquanto que para  $R_t$  o uso de  $v_c = 110$  m/min e usinagem a seco deram melhores resultados. Na Tabela (9) se encontram as ANOVAs realizadas para  $R_a$  e  $R_t$  dado o uso da ferramenta PVD.

**Tabela 9 - ANOVA dos efeitos dos fatores sobre  $R_a$  e  $R_t$  para a ferramenta PVD.**

| Fonte         | $R_a$ |         |         |       |                | $R_t$ |         |         |       |                |
|---------------|-------|---------|---------|-------|----------------|-------|---------|---------|-------|----------------|
|               | GL    | Seq SS  | Adj MS  | F     | Influência (%) | GL    | Seq SS  | Adj MS  | F     | Influência (%) |
| $v_c$         | 3     | 0,2279  | 0,0706  | 0,31  | 2,11           | 3     | 4,515   | 1,505   | 0,62  | 3,10           |
| F             | 1     | 10,2948 | 10,2948 | 45,15 | 95,27          | 1     | 137,736 | 137,736 | 56,92 | 94,61          |
| $a_p$         | 1     | 0,0462  | 0,0462  | 0,20  | 0,43           | 1     | 0,908   | 0,908   | 0,38  | 0,62           |
| Lubrificação  | 1     | 0,0091  | 0,0091  | 0,04  | 0,08           | 1     | 0,003   | 0,003   | 0,00  | 0,00           |
| Erro residual | 1     | 0,228   | 0,228   | -     | 2,11           | 1     | 2,42    | 2,42    | -     | 1,66           |
| Total         | 7     | 10,806  | -       | -     | -              | 7     | 145,582 | -       | -     | -              |

Para a ferramenta PVD, somente o fator avanço exerceu uma influência grande com relação à qualidade superficial sendo que não há diferenças significativas dada nos efeitos quando se altera os níveis de velocidade de corte, profundidade de corte e tipo de lubrificação.

#### 4. CONCLUSÕES

Para o uso da ferramenta de metal duro revestido de  $Ti(C,N) + Al_2O_3$  pelo método CVD recomenda-se a velocidade de corte  $v_c = 150$  m/min e avanço  $f = 0,3$  mm/rev, pois haverá um ganho com relação a potência de corte, em relação ao desgaste de flanco da ferramenta e em relação a qualidade superficial da peça. Se o interesse for aumentar a vida da ferramenta recomenda-se o uso de fluido de corte em abundância. Porém, se o foco for rugosidade das peças, recomenda-se a usinagem a seco.

Para a ferramenta de metal duro revestido de  $Ti-Al-Si-N$  pelo método de PVD, recomenda-se o uso do avanço  $f = 0,25$  mm/rev visando ganhos com relação ao desgaste ferramental e da qualidade superficial das peças usinadas. As menores potências foram obtidas a velocidade de corte  $v_c = 80$  m/min, porém nesta configuração alcançaram-se também os maiores desgastes de flanco. Para menores desgastes de flanco por comprimento de corte recomenda-se usinagem a seco e  $v_c = 90$  m/min com a ferramenta PVD.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Villares Metals pela doação do material para o desenvolvimento desta pesquisa, bem como à Seco Tools pelo fornecimento das pastilhas utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. Agradecimentos também a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelas bolsas de pós-graduação fornecidas.

#### 6. REFERÊNCIAS

ANTONIALI, A. Í. S.; MAGRI, A.; DINIZ, A. E. Tool life and tool wear in taper turning of a nickel-based superalloy. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, p. 1–10, 2016. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8568-6>>..

BHATT, A.; ATTIA, H.; VARGAS, R.; THOMSON, V. Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718. Tribology International, v. 43, n. 5–6, p. 1113–1121, 2010. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.053>>..

COSTA, Anderson Figueiredo da. Análise comparativa de ferramentas revestidas por PVD e CVD no torneamento do aço ABNT 8620. 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A review. Journal of Cleaner Production, v. 83, p. 33–47, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.071>>..

FARINA, A., LIBERTO, R., and BARBOSA, C., "Development of New Intermediate Nickel Alloys for Application in Automotive Valves of High Performance Engines," SAE Technical Paper 2013-01-1153, 2013, doi:10.4271/2013-01-1153.

PHADKE, Madhav Shridhar. Quality engineering using robust design. New Jersey: P T R Prentice-hall, 1989. 342 p.

YAZID, M. Z. A.; IBRAHIM, G. A.; SAID, A. Y. M.; CHEHARON, C. H.; GHANI, J. A. Surface integrity of Inconel 718 when finish turning with PVD coated carbide tool under MQL. Procedia Engineering, v. 19, p. 396–401, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.131>>.

**Title: Turning of nickel super alloy VAT32 using carbide tools coated with Ti(C, N) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by CVD method and Ti-Al-Si-N by PVD method.**

Marcel Yuzo Kondo, yuzokondo@gmail.com<sup>1</sup>

Manoel Cléber de Sampaio Alves, manoelcsa@feg.unesp.br<sup>1</sup>

Marcelo Antunes de Paula, marcelo13.antunes@yahoo.com.br<sup>1</sup>

Taise Azevedo de Sousa, taiseazevedo.sousa@yahoo.com.br<sup>1</sup>

José Vitor Cândido de Souza, candido@feg.unesp.br<sup>1</sup>

Marcos Valério Ribeiro, mvalerio@feg.unesp.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>São Paulo State University (Unesp), School of Engineering, Guaratinguetá

#### Abstract:

The nickel super alloy VAT32<sup>®</sup> was developed as substitute of UNS N07751 alloy in manufacturing of automotive internal combustion valves of high performance. The formation of niobium carbides gives to VAT32<sup>®</sup> super alloy a high wear resistance, desirable for application in automotive valves. This creates, however, a higher difficulty in machining this material. This paper studied the turning of VAT32<sup>®</sup> with two types of coated carbides tools, Ti(C,N) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by the process of chemical vapor deposition (CVD) and Ti-Al-Si-N by the process of physical vapor deposition (PVD). Was analyzed wear of the tools, the surface quality of machined parts and machining potency. The analyses were made using a Taguchi's method of design of experiments, through L<sub>8</sub> orthogonal array. The factors evaluated were cutting speed, tool feed, depth of cut and type of lubrication, dry and abundant lubrication. In turning with CVD tool, flank wear was influenced by cutting speed, tool feed and lubrication type used, been lowest values found in turning with cutting speed of 150 m/min, tool feed of 0.3 mm/rotation and abundant lubrication. Cutting speed, feed rate and type of lubrication also influenced the flank wear in turning with PVD tool, with the lowest values found in cutting speed of 90 m/min, feed 0.25 mm/rev and dry turning.

Key-words: CVD, PVD, tool wear, dry machining, Taguchi's method

## 7. DIREITOS AUTORAIS

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

Os trabalhos escritos em português ou espanhol devem incluir (após direitos autorais) título, os nomes dos autores e afiliações, o resumo e as palavras chave, traduzidos para o inglês e a declaração a seguir, devidamente adaptada para o número de autores.