

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE DESGASTE DA FERRAMENTA DE METAL DURO REVESTIDA POR TiAlN
NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 420C ENDURECIDO

por

Elizeu Vicente Possamai

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2016

ANÁLISE DE DESGASTE DA FERRAMENTA DE METAL DURO REVESTIDA POR TiAlN
NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 420C ENDURECIDO

por

Elizeu Vicente Possamai

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Coorientador: M. Eng. Guilherme Cortelini da Rosa

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Porto Alegre, 24 de Junho de 2016.

AGRADECIMENTOS

À minha família, principalmente aos meus pais, Paulinho e Nilce, e irmã, Sâmia. Por todo apoio, compreensão, incentivo e amor incondicional durante todo o tempo. Entre tantos ensinamentos, devo a vocês o meu generoso agradecimento por tudo.

Ao professor Patric Daniel Neis, pela orientação, compartilhamento de seus conhecimentos e tempo, por sua disponibilidade de discutir e desenvolver o trabalho. Agradeço a confiança em mim depositada. O meu muito obrigado por me ajudar a concluir esta etapa.

Ao doutorando e coorientador Guilherme Cortelini da Rosa pelo grande apoio e disponibilidade de tempo, pelo compartilhamento de experiências e conhecimento que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho

Ao professor André João de Souza pela ajuda disponibilizada e compartilhamento de seus conhecimentos ao longo deste trabalho.

À Sandvik do Brasil S.A., pelo fornecimento dos insertos de metal-duro utilizados nos experimentos.

Ao LATRIB, pela disponibilização de equipamentos e conhecimento.

Aos integrantes, fixo e não fixos, da Casa Amarela, que me proporcionaram momentos de lucidez, desconcentração e amizade.

A família AAEE, que teve forte presença durante minha graduação e que me proporcionou uma grande paixão.

A todos os meus amigos, antigos ou novos, que de alguma forma se fizeram presentes durante o período em que desenvolvi minha graduação. Muito obrigado pelo apoio, incentivo, ajuda nos momentos difíceis e, acima de tudo, pela amizade que construímos.

POSSAMAI, E. V. **Análise de desgaste da ferramenta de metal duro revestida por TiAlN no torneamento do aço inoxidável AISI 420C endurecido**. 2016. 15. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

O aço inoxidável AISI 420C endurecido é utilizado em materiais cirúrgicos e odontológicos devido a suas propriedades mecânicas, aliado a resistência a corrosão. No entanto, apesar de suas vantagens, esse material apresenta baixa usinabilidade. Além disso, se encontram dificuldades em utilizar este material devido à falta de informação sobre seu comportamento em processos de fabricação, especialmente após tratamento térmico. O presente trabalho analisa os desgastes e os mecanismos de desgaste envolvidos no torneamento do aço inoxidável AISI 420C endurecido utilizando um inserto de metal duro de grãos ultrafinos revestido por TiAlN sob diferentes condições de corte. Testes de vida útil foram desenvolvidos utilizando diferentes velocidades de corte e avanço. Os testes foram interrompidos periodicamente para se avaliar o desgaste de flanco. A superfície usinada foi avaliada ao longo da vida da ferramenta utilizando microscópio óptico, e as ferramentas foram analisadas por microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura (MEV/EDS). Os resultados dos testes indicaram que existe a influência da velocidade de corte na vida da ferramenta. Após alcançar o critério de 0,2 mm de desgaste de flanco, o MEV evidenciou desgaste abrasivo e desprendimento de fragmentos da ferramenta para todas as condições de teste. A análise de EDS revelou quantidades significantes de ferro e cromo aderido nas superfícies das ferramentas. Ambos, adesão de material e abrasão, indicam desgaste por *attrition* como o mais influente mecanismo de desgaste sobre a vida da ferramenta.

PALAVRAS-CHAVE: Torneamento, Ferramenta de metal-duro, Aço inoxidável AISI 420C, Mecanismos de desgaste.

POSSAMAI, E. V. **Wear analysis of ultra-fine TiAlN coated carbide tools in hard turning of AISI 420C stainless steel**. 2016. 15. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

Hardened AISI 420 stainless steel is a material used in surgical and dental tools due to its mechanical properties, allied with corrosion resistance. However, despite its advantages, this material presents poor machinability. Also, practitioners have often found difficulties using this material due to the lack of information concerning its behavior in machining processes, especially after heat treatment. The present paper investigates tool wear and wear mechanisms involved in hard turning of AISI 420C stainless steel with TiAlN coated ultra-fine grain carbide tool under different cutting conditions. Tool life tests were carried out using different feed rate and cutting speed levels. Machining tests were periodically interrupted in order to evaluate flank wear. Machined surfaces were evaluated throughout tool life using optical microscopy, and the tools were analyzed through both optical and scanning electronic microscopy (SEM/EDS). Test results indicate influence of cutting speed on tool life. After reaching the tool life criterion of 0.2 mm flank wear, SEM microscopy evidenced abrasive wear and tool spalling for all tested conditions. EDS analysis revealed significant amounts of iron and chrome adhered on all tool surfaces. Both material adhesion and tool spalling indicate attrition wear as a significant wear mechanism over tool life.

KEYWORDS: Hard turning, Carbide tool, AISI 420C stainless steel, Wear mechanism.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
3.1. Aço Inoxidável	1
3.2. Área da Seção Transversal do Cavaco	2
3.3. Grau de Recalque	2
3.4. Taxa de Remoção de Material	3
3.5. Desgastes, Vida e Mecanismos de Desgaste da Ferramenta	3
4. MATERIAIS E MÉTODOS	5
4.1. Preparação dos Corpos de Prova	5
4.2. Medição e Cálculo do Grau de Recalque	6
4.3. Análise Qualitativa da Superfície Usinada	7
4.4. Análise dos Insertos de Metal Duro	7
5. RESULTADOS E ANÁLISES	8
5.1. Avaliação do Grau de Recalque do Cavaco	8
5.2. Curva de Desgaste da Ferramenta	9
5.3. Análise dos Insertos de Metal Duro	10
5.4. Análise do Material Usinado	13
6. CONCLUSÕES	13
7. BIBLIOGRAFIA	14
APÊNDICES	16

1. INTRODUÇÃO

A busca por uma maior eficiência em processos de fabricação e a procura pelas condições ideais de corte de cada tipo de aço são constantes, sendo as ferramentas e os parâmetros utilizados (avanço f , profundidade de corte a_p e velocidade de corte v_c) determinantes para cada processo.

Atualmente o tempo gasto na troca de insertos de usinagem, a geração de sucata e inconformidades na peça usinada (marcas de ferramenta, diâmetro fora do especificado, dentre outras) devido ao desgaste precoce da ferramenta são motivos de constante preocupação em empresas que buscam minimizar perdas em seus processos produtivos. Todo e qualquer inserto será, cedo ou tarde, afetado por desgaste, ainda que o mesmo apresente elevada dureza e que a peça de trabalho seja considerada relativamente macia e de fácil usinabilidade. Com o surgimento de desgaste, fator que afeta as condições de corte, se faz necessária a troca da ferramenta. Embora o custo do inserto represente apenas um dos custos no processo de usinagem ele deve ser sempre reduzido ao máximo. Logo, procura-se o menor desgaste possível nos insertos, sem, entretanto, deixar de atender as especificações de projeto de cada peça usinada.

Existem alguns estudos a respeito do torneamento ao aço inoxidável AISI 420C. No estudo conduzido por Rosa e Souza, 2014, os autores analisaram a rugosidade da superfície usinada realizando comparações entre dois tipos de ferramentas de acabamento: geometria alisadora (*wiper*) e convencional (*standard*). Este estudo levou a conclusão de que as forças e rugosidades geradas pela ferramenta *wiper* são, geralmente, menores. Em estudos referentes a tensões residuais na peça e forças de usinagem, [Silva, 2013], mostrou que a tensão residual aumenta para peças endurecidas e que o mesmo não pode ser afirmado para as forças de usinagem. Stefenon, 2014 avaliou a temperatura durante o processo de usinagem, constatou que quanto maior a velocidade de corte e maior o avanço menor é a variação de temperatura devido, principalmente, ao tempo de usinagem menor.

O presente trabalho tem grande relevância, visto que o aço analisado não possui uma literatura específica sobre suas melhores características de usinagem. Com o conhecimento adquirido, espera-se poder aumentar a eficiência dos insertos, reduzir o retrabalho de peças, melhorar o acabamento das peças usinadas e reduzir os custos de produção, contribuindo para que o torneamento do AISI 420C endurecido seja eficiente e econômico.

2. OBJETIVO

Investigar como os parâmetros de corte influenciam o desgaste e a vida de insertos intercambiáveis de metal-duro classe “S” no torneamento a seco de peças de aço inoxidável AISI 420C endurecido a (53 ± 2) HRC.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta parte do trabalho serão demonstrados dados e métodos de avaliações, que serão utilizadas para as análises posteriores. Dentre eles destacam-se características do aço inoxidável utilizado nos experimentos, métodos de cálculo de grau de recalque e por último a avaliação de desgaste e de mecanismos de desgaste de insertos.

3.1. Aço Inoxidável

Utiliza-se o nome aço para designar uma liga constituída por ferro e carbono, sendo este o principal material usado na indústria mecânica. É comum a adição de outros elementos químicos a esta liga, o que leva a modificações importantes no material, como, por exemplo,

na sua tenacidade, resistência, temperabilidade, usinabilidade e até alteração da cor. Quando o elemento cromo está presente na liga com mais de 10,5%, o aço recebe o nome de inoxidável. O aço inoxidável é conhecido por apresentar considerável resistência à corrosão atmosférica e bom aspecto visual [Abinox, 2016].

O aço inoxidável é um dos principais materiais utilizados atualmente para fabricar peças críticas para modernas indústrias de químicos e de energia, por possuir uma combinação de boas propriedades mecânicas aliado à elevada resistência à corrosão [Jang *et al.*, 1996]. No entanto, estas propriedades adequadas para a indústria também geram empecilhos em sua usinagem, reduzindo consideravelmente a vida da ferramenta de corte. Sendo assim, é necessário estudar os processos de modificação deste material para se obter os mais adequados parâmetros de corte que possam evitar esta redução na vida útil dos insertos, ou até mesmo, aumentá-la. Este trabalho justifica-se por ter entre seus objetivos contribuir com os estudos deste tipo.

O aço inoxidável AISI 420C vem sendo muito empregado na fabricação de peças onde há necessidade de alta resistência mecânica aliada à ductilidade e resistência à corrosão e desgaste. São exemplos de aplicação do aço AISI 420C: moldes de injeção de plásticos, instrumentos cirúrgicos e dentários, válvulas para água e vapor, turbinas a gás, eixos, entre outros [Favorit, 2012].

3.2. Área da Seção Transversal do Cavaco

Considerando uma ferramenta sem raio de ponta (r_e), ângulo de saída (γ) igual a 0° e ângulo de inclinação (λ) também igual a 0° , a área da seção transversal de corte (A) é medida no plano normal à direção de corte e pode ser calculada conforme a Equação (1) [Machado *et al.*, 2011, p. 36].

$$A = a_p \cdot f \quad (1)$$

onde f é o avanço [mm/volta] e a_p é a profundidade de corte [mm].

3.3. Grau de Recalque

Na análise da formação do cavaco é possível realizar planos e relações geométricas que são importantes para o equacionamento matemático do fenômeno. Sendo assim, define-se o grau de recalque (R_c) pela Equação (2) [Ferraresi, 1990, p. 110].

$$R_c = h'/h \quad (2)$$

onde h a espessura do corte [mm] e h' é a espessura do cavaco [mm].

O grau de recalque indica a quantidade de deformação sofrida pelo cavaco. Além disso, analisando a Figura 3.1 para dois ângulos de saída (γ) diferentes, valores altos de R_c são gerados por baixos valores de ângulo de cisalhamento (ϕ) e se referem à alta deformação ocorrida no processo. Ainda mais, geralmente quanto maior a dureza do material usinado, o grau de recalque R_c tende a aumentar. Considerando que o ângulo de saída (γ) tem uma pequena faixa de variação (na prática, entre -8° e 20°), a maior dependência do ângulo de cisalhamento (ϕ) fica por conta do grau de recalque (R_c) [Machado *et al.*, 2011]. Assim, a Equação (3) relaciona de maneira aproximada o ângulo de cisalhamento com o grau de recalque (Figura 3.1).

$$\phi \cong tg^{-1}\left(\frac{1}{R_c}\right) \quad (3)$$

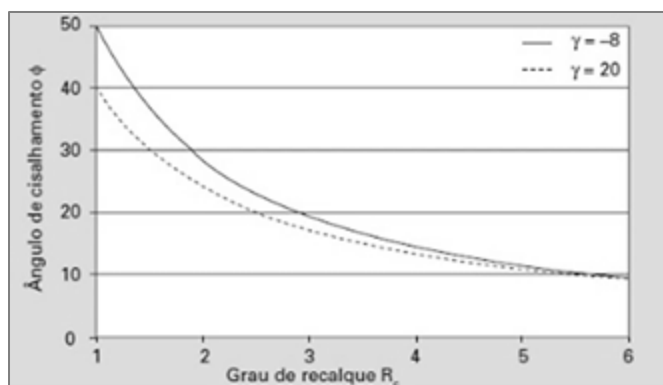


Figura 3.1 – Ângulo de cisalhamento em função do grau de recalque [Machado *et al.*, 2011].

3.4. Taxa de Remoção de Material

A taxa de remoção de material (Q) representa o volume de cavaco removido [cm^3] por unidade de tempo [min], conforme a Equação (4) [Souza, 2011].

$$Q = v_c \cdot a_p \cdot f \quad (4)$$

onde a velocidade de corte (v_c) é expressa em [m/min]; o avanço (f) em [mm/volta] e a profundidade de corte (a_p) medida em [mm].

3.5. Desgastes, Vida e Mecanismos de Desgaste da Ferramenta

Segundo Machado *et al.*, 2011, podem ser considerados três fenômenos principais pelos quais uma ferramenta de corte perde sua eficácia na usinagem: deformação plástica, avaria e desgaste. Estes fenômenos causam transformações na geometria da aresta de corte. A deformação plástica faz com que o material do inserto seja deslocado. Os outros dois geralmente estão associados à perda de material do inserto.

No desgaste de um inserto ocorre a mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material. Esse desgaste ocorre de forma contínua e progressiva e, às vezes, em proporções muito pequenas, ao nível dos grãos do material. Para o desenvolvimento do desgaste, a temperatura na qual a aresta está submetida tem uma importância considerável. O desgaste de insertos pode ser de 3 tipos: desgaste de flanco (VB), desgaste de cratera e desgaste de entalhe, conforme ilustrado na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Desgaste de ferramenta de corte. (a) Desgaste de flanco, (b) desgaste de cratera e (c) desgaste de entalhe [adaptada de UFRJ, 2014].

Em condições normais de usinagem, é comum que todas as formas de desgaste apontados na Figura 3.2 estejam presentes nas pastilhas. Entretanto, um deles irá prevalecer, sendo a que irá impactar na necessidade de troca de ferramenta [Machado *et al.*, 2011]. Durante o processo de usinagem é necessário não deixar os desgastes atingirem grandes proporções, o que pode danificar a peça e até a máquina-ferramenta. Logo, é comum realizar a substituição da aresta desgastada quando os níveis de desgaste se tornam críticos. O

operador deve estar atento ao desgaste, uma vez que próximo ao seu fim de vida a quebra da ferramenta pode ocorrer de forma repentina.

A Figura 3.3 ilustra, de forma qualitativa, os principais mecanismos de desgaste (abrasão, adesão, difusão e oxidação) presentes para diferentes faixas de temperatura do processo de usinagem.

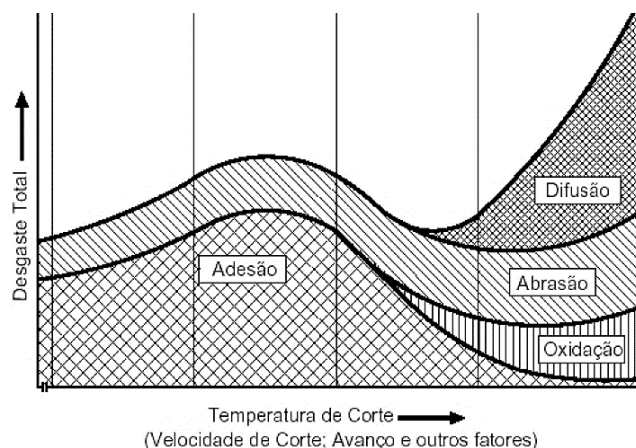


Figura 3.3 - Diagrama dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura [Souza, 2011].

O diagrama da Figura 3.3 vale para todos os parâmetros que influenciem a temperatura, em especial a velocidade de corte. Um aspecto evidenciado no gráfico é que, com o aumento dos fatores de corte, e da temperatura por consequência, o desgaste total da ferramenta cresce de forma significativa. Na literatura existem variações na classificação dos mecanismos de desgaste. Na maior parte dos trabalhos descritos na literatura, considera-se pelo menos seis mecanismos diferentes [Machado *et al.*, 2011]: cisalhamento plástico em altas temperaturas, deformação plástica sob tensão de compressão, difusão, *attrition*, abrasão e desgaste de entalhe.

Geralmente o desgaste abrasivo ocorre quando o material é removido ou deslocado da superfície por partículas duras que podem estar soltas entre duas superfícies com movimento relativo, ou que pertencem a uma das superfícies [Diniz *et al.*, 2010]. O desgaste gerado pela abrasão é potencializado pela temperatura, que reduz a dureza da pastilha, e pela presença de partículas duras no material da peça. Já a combinação de altas temperaturas na presença de ar e água geram oxidação para a maioria dos metais. Normalmente, este mecanismo é acelerado nas extremidades de contato, devido ao acesso do ar nesta região [Machado *et al.*, 2011].

Um mecanismo que depende intensamente da temperatura é a difusão. Neste mecanismo, a transferência de material desenvolve-se a um nível atômico. A combinação de altas velocidades relativas entre ferramenta e cavaco, com um tempo curto de contato, poderia tornar desprezível este mecanismo. No entanto, existe uma zona de aderência (zona morta ou zona de fluxo). Um gradiente de velocidade, existente dentro desta zona, garante o tempo necessário para haver difusão. Por existir uma renovação constante de material nesta zona, promovida pela alta taxa de deformação, garante-se assim um fluxo difusivo constante. Para ocorrer difusão, é preciso haver um contato entre o cavaco e a ferramenta e entre a peça e a ferramenta. Para ferramentas de metal-duro, a difusão ocorre pela dissociação de carbonetos de tungstênio, formando outro carboneto do tipo $(FeW)_{23}C_6$ e liberando carbono. Este novo carboneto tem uma resistência à abrasão muito menor que o original, fragilizando a ferramenta de corte. Nas ferramentas da classe P, que possuem titânio, os carbonetos são muito mais estáveis dificultando assim a formação de carbonetos mais complexos e logo o enfraquecimento da ferramenta., citaram que cada ferramenta apresentará suas reações particulares e a mesma tende a enfraquecer, não só pela perda de elementos importantes da ferramenta para o cavaco, mas também pela combinação com elementos do cavaco que irão

envolver perda de carbonetos duros e abrasivos em troca de outros menos resistentes ao desgaste [Machado *et al.*, 2011].

O mecanismo denominado *attrition*, que por muitas vezes na literatura é chamado de “adesão”, geralmente ocorre em baixas velocidades de corte. A resistência do extrato metálico é elevada até o ponto onde ocorre a ruptura de um dos metais. Conjuntamente pode haver o surgimento de aresta postiça de corte, quando fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao material usinado. Na Figura 3.3, o *attrition*, ali denominado por adesão, ocorre principalmente em baixas velocidades. Este fenômeno atua tanto no desgaste de cratera quanto no desgaste de flanco [Diniz *et al.*, 2010]. Procurando diminuir a sua influência, o uso de lubrificante e de ferramentas de classe mais dura é recomendado para o processo de usinagem.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Todos procedimentos realizados nos experimentos, materiais utilizados e como as análises foram realizadas são descritos nos capítulos seguintes. Espera-se que com estas informações seja possível replicar o mesmo trabalho com grande fidelidade sem grandes alterações nos resultados obtidos.

4.1. Preparação dos Corpos de Prova

Ao todo foram preparados nove corpos de prova (CP) a partir de barras metálicas do material AISI 420C. As barras de aço inoxidável foram submetidas ao processo de têmpera em óleo a 1050 °C por uma hora e meia. Em seguida, elas foram revenidas a 300 °C com duas horas de resfriamento no ar, processo realizado na empresa Temperatech. Obteve-se assim um material com uma dureza homogênea de (53 ± 2) HRC.

Para realização dos testes foi estipulado paradas para coleta dos dados de desgaste de flanco (VB) da ferramenta e das amostras de cavaco removidos a cada cinco passes realizados. A curva de desgaste não é estável, e quando os valores estavam próximos dos critérios estabelecidos para coleta de dados ($VB = 0,1$ mm e $VB = 0,2$ mm), foi então reduzido o número de passes para a coleta, muitas vezes coletando a cada dois passes.

Na Figura 4.1 apresenta a geometria dos corpos de prova antes e após serem submetidos ao processo de usinagem por torneamento.

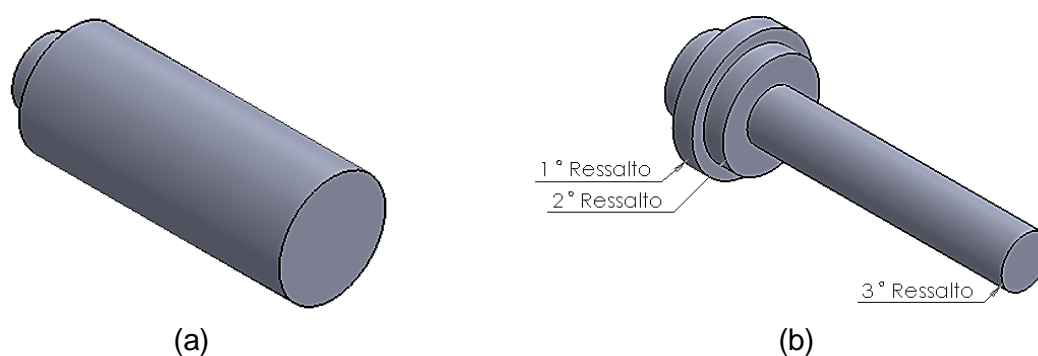


Figura 4.1 – Formato dos corpos de prova: (a) antes da usinagem; (b) após a usinagem.

Em seu formato após a usinagem, a indicação do primeiro ressalto corresponde a ferramenta nova (sem desgaste), enquanto o segundo e o terceiro ressalto correspondem ao desgaste de flanco $VB = 0,1$ mm e $VB = 0,2$ mm respectivamente. Então pode-se afirmar que os diâmetros do segundo e do último ressalto variam para cada teste, pois cada ferramenta atingiu os respectivos valores de desgaste em diferentes números de passes.

A composição química do aço inoxidável AISI 420C é demonstrada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química aproximada do aço inoxidável AISI 420C (em % de massa) [adaptada de Favorit, 2012].

Elemento	Fe	Cr	C	Mn	Mo	Ni	Si	P	S	Outros
Média [%]	85,00	13,00	0,35	1,00 máx.	1,00 máx.	1,00 máx.	1,00 máx.	0,04 máx.	0,03 máx.	-

A pastilha ou inserto utilizada no processo, vista na Figura 4.2, é de metal-duro classe “S”, recomendado para torneamentos externos de desbaste ou acabamento de ligas especiais resistentes ao calor (à base de Fe, Ni e Co), titânio e suas ligas. Os insertos empregados neste estudo pertencem à classe 1105, que é composta por grãos ultrafinos de carboneto de tungstênio (WC), possuindo também uma cobertura de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN). De acordo com o fabricante [Sandvik, 2016], esta cobertura garante um desgaste de flanco uniforme, e sua tenacidade é adequada para usinagem de superligas que apresentam excelente resistência mecânica e à corrosão.

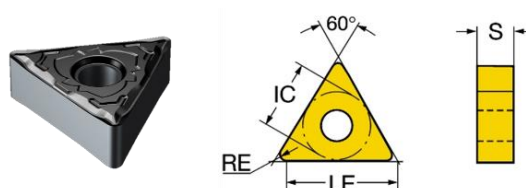


Figura 4.2 – Inserto TNMG 16 04 04-SF 1105 [Sandvik, 2016].

O porta ferramenta utilizado nos experimentos foi o modelo DTJNL 2020K16, fabricado pela Sandvik. Na fixação dos nove corpos de prova para processo de usinagem foi utilizado contra ponto, reduzindo assim a deflexão das peças durante a execução do torneamento. Para realizar a operação de torneamento foi utilizado nos ensaios o Torno CNC Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II.

Na Tabela 4.2 se encontram os parâmetros de usinagem empregados para cada um dos corpos de prova: velocidade de corte e avanço. Para cada CP foi utilizado um inserto diferente. A profundidade de corte (a_p) foi mantida constante e igual ao raio de ponta da ferramenta ($r_\epsilon = 0,4$ mm). Para o material AISI 420C não existe ferramenta indicada em catálogos. A ferramenta escolhida é indicada para usinagem de superligas, pois o 420C endurecido se enquadraria melhor nesta categoria.

Tabela 4.2 – Parâmetros de usinagem utilizados em cada corpo de prova

Parâmetros	Corpos de Prova								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
v_c [m/min]	60	60	60	70	70	70	50	50	50
f [mm/rev]	0,12	0,10	0,08	0,10	0,08	0,12	0,12	0,10	0,08

4.2. Medição e Cálculo do Grau de Recalque

A realização das medições da área da seção transversal do cavaco foi desenvolvida através do microscópio digital USB Dino-Lite modelo AM-413ZT, sendo a resolução de 1,3 Megapixels e ampliação total de até 250x. Para efetuar tais medidas foram fixadas cada amostra de cavaco em uma base de massa de modelar, permitindo assim que se ajustasse o cavaco para deixá-lo paralelo em relação ao plano do microscópio. Após a calibração do equipamento, foi possível desenhar um polígono nas bordas do cavaco e o mesmo representa a área da seção. As imagens foram processadas por meio do programa computacional DinoCapture 2.0 da empresa Dino-Lite versão 2015. Um exemplo do procedimento de medição é mostrado na Figura 4.3.

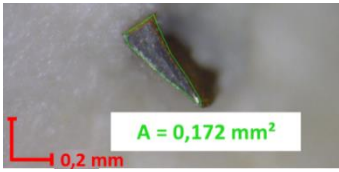
CP III	
v_c 60 m/min	
f 0,08 mm/rev	
$VB = 0$ [mm]	

Figura 4.3 – Medição da área da seção transversal do cavaco gerado para a combinação III com a ferramenta nova.

Para o cálculo do grau de recalque, foram admitidas algumas simplificações, sendo que para um ângulo de posição (χ_r) de aproximadamente 90° , uma espessura de corte (h) equivale ao avanço (f) e a mesma é suficientemente pequena em relação à largura de corte (b), a qual equivale à profundidade de corte (a_p). Logo, pode-se modificar a Equação (2), deixando a relação de grau de recalque em função da área [Equação (5)].

$$R_c = A'/A \quad (5)$$

Com a modificação, a Equação (5) representa a razão entre a área medida do cavaco A' [mm²] e a área da seção transversal de corte A [mm²] calculada pela Equação (1). Utilizou-se a área pela dificuldade de se estimar h' .

4.3. Análise Qualitativa da Superfície Usinada

Para análise qualitativa das superfícies dos CPs depois de usinadas, amostras do aço inoxidável foram submetidas ao corte por eletroerosão a fio, FANUC Robocut alfa-OiD, Séries 310iS-WA. Cortou-se amostras do corpo de prova em cada condição de desgaste do inserto proposta (1^o, 2^o e 3^o Ressaltos), como pode ser visto na Figura 4.4.

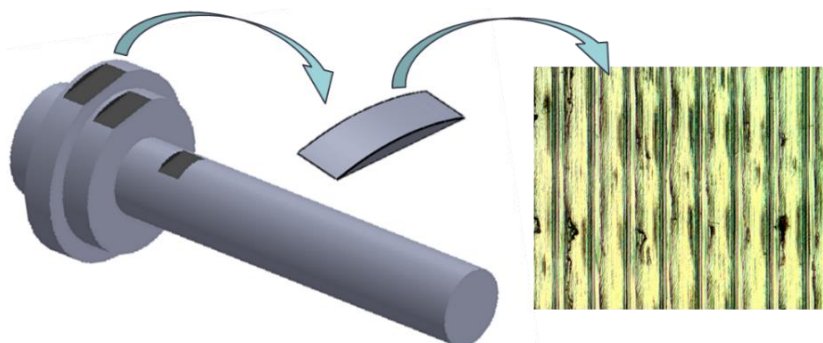


Figura 4.4 – Demonstração dos cortes por eletroerosão realizados nos CPs e posterior análise via microscopia óptica.

Logo, foram executados 3 cortes por CP. A etapa seguinte foi a análise via microscópio óptico, onde o equipamento utilizado foi o microscópio óptico ZEIS Axio Lab.A1, equipado com a câmera Axio Cam ERc5s 5mb. Para realizar a interface entre a câmera e o computador foi utilizado o programa AxioVision 4.9.1. A ampliação óptica empregada foi de 100x, obtendo-se uma área de 0,955 mm² por micrografia.

4.4. Análise dos Insertos de Metal Duro

A fim de se verificar os mecanismos de desgaste das superfícies dos insertos utilizados foi realizada uma análise via microscópio eletrônico de varredura (MEV) e EDS (*Energy*

Dispersive System). Os insertos foram analisados nas regiões de flanco como pode ser visto na Figura 4.5. Em virtude do tamanho da câmara do equipamento, somente coube 6 pastilhas por vez. O equipamento utilizado foi MEV EVO MA10, do Centro de Microscopia e Microanálise (CMM), localizado do campus do Vale da UFRGS.

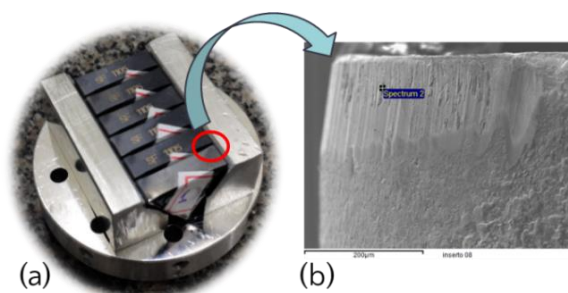


Figura 4.5 – (a) Suporte preparado para ser inserido no MEV, com as pastilhas posicionadas para análise de flanco, (b) exemplo de análise via MEV.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Unindo-se a revisão bibliográfica juntamente com os procedimentos realizados, foram gerados resultados e suas respectivas análises. Os capítulos seguintes demonstram todas as informações que puderam ser geradas neste experimento.

5.1. Avaliação do Grau de Recalque do Cavaco

As medidas das áreas das seções transversais dos cavacos produzidos pelos corpos de prova que foram realizadas em três momentos:

- (i) após primeiro passe sobre a superfície da peça usinada;
- (ii) após o inserto atingir uma largura de desgaste de flanco $VB = 0,1$ mm;
- (iii) após o inserto atingir $VB = 0,2$ mm.

Os valores das medidas de áreas dos cavacos, juntamente com os cálculos das áreas das seções transversais de corte conforme Equação (5), são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores das áreas das seções transversais dos cavacos.

		Corpos de Prova									
		VB [mm]	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Área Medida A' [mm ²]	0		0,298	0,156	0,172	0,168	0,203	0,097	0,277	0,313	0,280
	0,1		0,191	0,184	0,191	0,126	0,181	0,181	0,210	0,160	0,157
	0,2		0,205	0,110	0,224	0,151	0,180	0,092	0,222	0,185	0,209
Área Calculada A [mm ²]			0,048	0,040	0,032	0,040	0,032	0,048	0,048	0,040	0,032

A partir da Equação (5) calculou-se o grau de recalque (R_c). Os valores obtidos desta razão estão mostrados na Figura 5.1 em ordem crescente do grau de recalque médio da área. Juntamente, na mesma figura, são demonstrados os valores do grau de recalque para os três diferentes estágios (ferramenta nova, $VB = 0,1$ mm e desgaste final da ferramenta $VB = 0,2$ mm). Também são mostrados os parâmetros de corte e os valores do ângulo de cisalhamento calculados pela Equação (3), ajustados em uma curva polinomial de grau 3.

Nota-se na Figura 5.1 que em todos os casos analisados o grau de recalque sempre é maior que 1, geralmente na ordem de 4 vezes. Isso significa que o cavaco apresenta maior deformação e conseqüentemente maior área que a calculada. Pode-se afirmar que existe uma correlação entre os parâmetros de corte e o grau de recalque (R_c). Como o grau de recalque

é diretamente ligado à quantidade de deformação sofrida pelo cavaco, maiores avanços, combinados com maiores velocidades de corte, geram menores deformações do cavaco. O grau de recalque não apresentou um padrão definido em função dos desgastes (0 [mm], 0,1 mm e 0,2 mm) analisados durante o processo de usinagem (vide Figura 5.1).

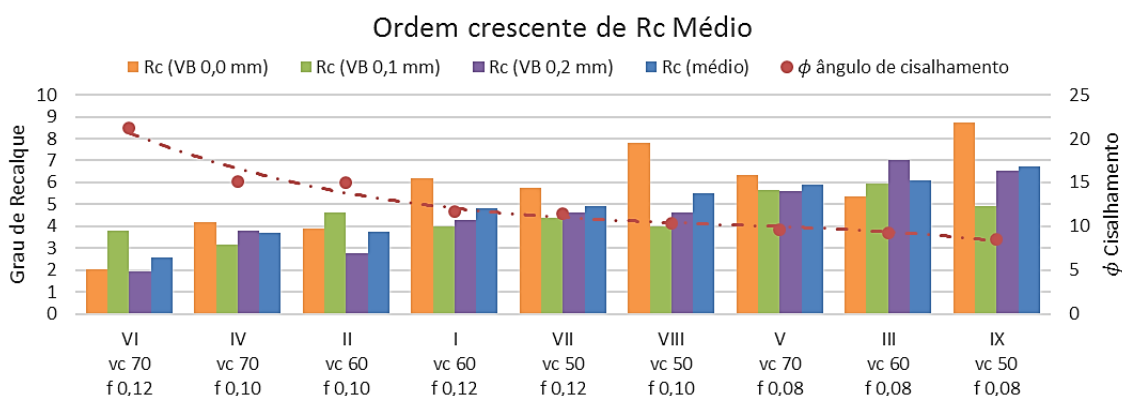


Figura 5.1 – Valores do grau de recalque médio em ordem crescente, juntamente com valores de grau de recalque para os três estágios de desgaste da ferramenta.

Já o ângulo de cisalhamento teve o comportamento semelhante ao demonstrado na Figura 3.1: com o aumento do grau de recalque, o mesmo diminuiu.

5.2. Curva de Desgaste da Ferramenta

Com base nos dados que foram coletados nos testes, construiu-se o gráfico de tempo de usinagem da ferramenta em função do desgaste de flanco. As curvas foram ajustadas a polinômios de ordem 3 para cada caso, conforme mostra a Figura 5.2.

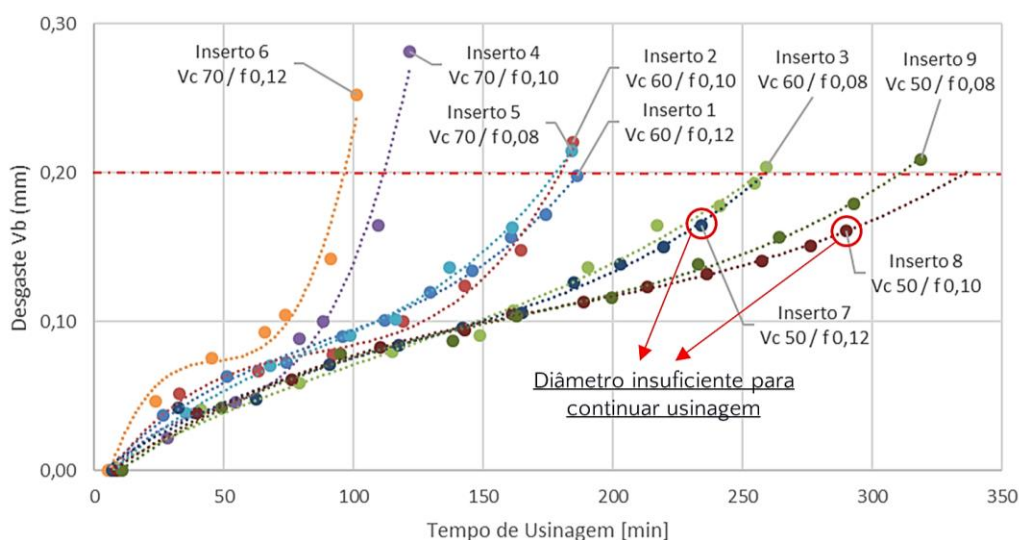


Figura 5.2 - Curva de desgaste obtida no torneamento do aço inoxidável AISI 420C endurecido a (53 ± 2) HRC para ferramentas de metal-duro classe “S”.

Em virtude de dois CPs já estarem com um diâmetro insuficiente para se continuar a usinagem, os inserts 7 e 8, circulos na imagem, não atingiram $VB = 0,2$ mm. Para estes mesmos inserts, considerando que manteriam o mesmo comportamento, suas curvas foram projetadas até o critério de fim de vida. Já os inserts 6 e 4 tiveram seu desgaste acelerado ultrapassando o critério de fim de vida.

Observando a Figura 5.2, pode-se identificar que os parâmetros que foram variados para cada inserto tiveram influência no comportamento da vida útil dos insertos. Pelas combinações empregadas, verifica-se que a velocidade de corte teve maior importância no processo de desgaste, visto que as curvas tendem a seguir um padrão, onde a mais adequada dentre as três utilizadas é a de 50 m/min, visto que os três insertos que demoraram mais para atingir o seu fim de vida (7, 8 e 9) foram usinados nesta condição, e os dois piores resultados (insertos 4 e 6), utilizaram da velocidade de 70 m/mm. Já o avanço não demonstrou um padrão o qual se pudesse obter.

A partir da Equação (4) se calculou a taxa de remoção de material (Q) que os insertos causaram até os mesmos atingirem o critério de fim de vida. Esta taxa, multiplicada pelo tempo (T) despendido para se realizar o processo, define o volume de material removido. Este pode ser visto em azul na Figura 5.3; na mesma figura, em roxo, está demonstrado o tempo demandando para o processo.

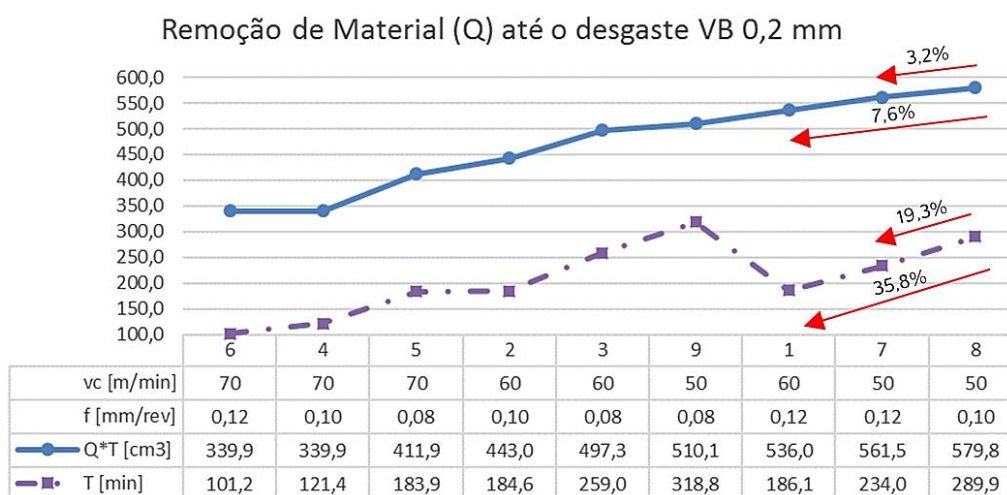


Figura 5.3 – Remoção e tempo realizados por cada inserto até atingirem o desgaste final.

Levando-se em conta um volume de material removido aceitável, a análise mais criteriosa engloba somente os últimos 3 insertos (1, 7 e 8), devido aos seus maiores volumes e menores tempos despendidos. Realizando uma comparação, sempre com base no que apresentou maior volume removido (inserto 8), os insertos 1 e 7 obtiveram bons resultados: pequenas diferenças na taxa de remoção e redução significativa no tempo demandando (reduções percentuais indicadas pelas setas vermelhas na Figura 5.3).

O principal fator considerado foi o tempo, o qual quanto menor gera um processo mais eficiente, demonstrando que o melhor resultado dentre todos foi desenvolvido com a velocidade de corte $v_c = 60$ m/min e avanço $f = 0,12$ mm/rev. No caso, $v_c = 50$ m/min também obteve bons resultados de taxas de remoção de material, aliado a um menor desgaste de ferramenta, sendo assim uma boa opção de escolha no processo de torneamento dos testes.

5.3. Análise dos Insertos de Metal Duro

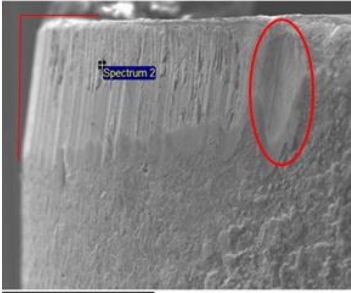
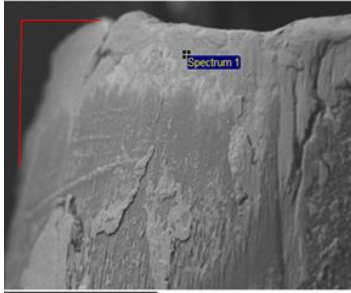
Realizou-se, via EDS, a análise da superfície de folga de todos os insertos utilizados. Nestes locais foi verificado mais de um ponto por região, a fim de descobrir quais os elementos químicos que estavam presentes sobre a superfície do inserto quando o mesmo alcançou seu fim de vida ($VB = 0,2$ mm).

Os resultados revelaram forte presença de Fe e Cr na região de flanco de todos os insertos (ver apêndices). Visto que tais constituintes não eram originais de composição da ferramenta e dado que estes são elementos presentes no aço inoxidável, houve transferência de material da peça para a superfície do inserto. Possivelmente estes processos foram

gerados pelo mecanismo de desgaste por aderência e arrastamento (*attrition*). Em alguns casos, como na usinagem dos CPs 1, 2, 6 e 9 foram encontrados Ni e Si, também provenientes da peça (ver apêndices).

A Tabela 5.2 mostra as pastilhas 8 e 4 com suas análises via MEV/EDS. Tais ferramentas foram utilizadas com o mesmo avanço (0,10 mm/volta) mas com velocidades de corte distintas (respectivamente 50 e 70 m/min).

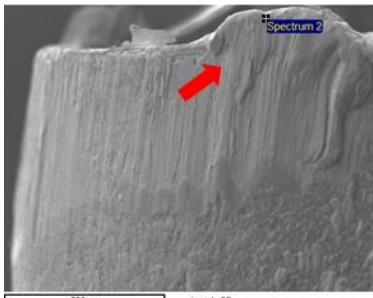
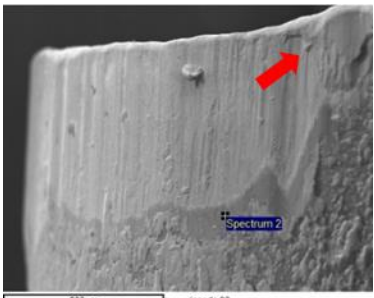
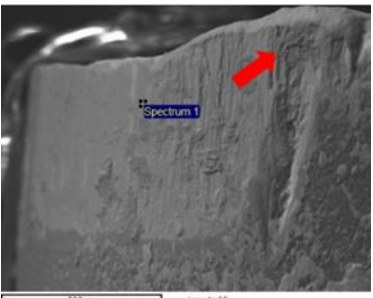
Tabela 5.2 – Pastilhas 8 e 4 com suas análises MEV/EDS ($f = 0,10$ mm/volta).

Inserto 8		Inserto 4																																					
50 m/min		70 m/min																																					
Análise MEV	Análise EDS	Análise MEV	Análise EDS																																				
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Spectrum 2</th> </tr> <tr> <th>Elemento</th> <th>Peso %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td>49,43</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>30,46</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>10,61</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>5,08</td> </tr> <tr> <td>W</td> <td>3,92</td> </tr> <tr> <td>Ca</td> <td>0,19</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>0,17</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>0,14</td> </tr> </tbody> </table>	Spectrum 2		Elemento	Peso %	C	49,43	Fe	30,46	O	10,61	Cr	5,08	W	3,92	Ca	0,19	Al	0,17	S	0,14		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Spectrum 1</th> </tr> <tr> <th>Elemento</th> <th>Peso %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fe</td> <td>62,59</td> </tr> <tr> <td>W</td> <td>10,54</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>10,42</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>8,84</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>7,19</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>0,42</td> </tr> </tbody> </table>	Spectrum 1		Elemento	Peso %	Fe	62,59	W	10,54	Cr	10,42	C	8,84	O	7,19	Al	0,42
	Spectrum 2																																						
Elemento	Peso %																																						
C	49,43																																						
Fe	30,46																																						
O	10,61																																						
Cr	5,08																																						
W	3,92																																						
Ca	0,19																																						
Al	0,17																																						
S	0,14																																						
Spectrum 1																																							
Elemento	Peso %																																						
Fe	62,59																																						
W	10,54																																						
Cr	10,42																																						
C	8,84																																						
O	7,19																																						
Al	0,42																																						

Nota-se que houve uma mudança de inclinação da região de corte (linhas vermelhas) evidenciando o desgaste das ferramentas e, com o EDS, observa-se que nos pontos de análise não foi encontrado Ti constituinte da cobertura do inserto, o que demonstra que a mesma foi arrancada. Nestes locais foi detectado a presença de W, proveniente do substrato dos insertos, comprovando que os mesmos tiveram sua cobertura de Ti removida. Possivelmente, este desgaste tenha ocorrido por abrasão. Na região abrangida pela elipse vermelha (inserto 8) e também nas figuras mostradas nos apêndices, pode-se notar que a maioria das pastilhas em sua região final do raio de ponta apresentaram desgaste de entalhe. O mecanismo gerador deste desgaste provavelmente foi o próprio *attrition*.

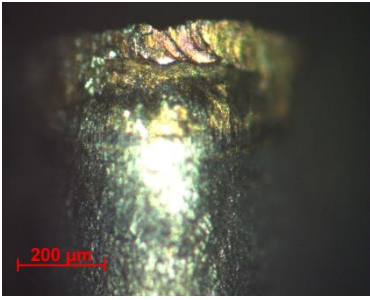
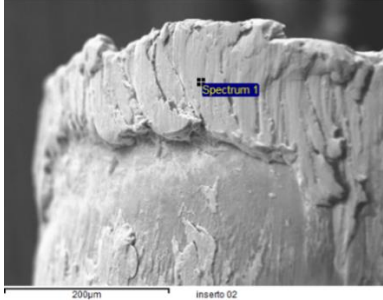
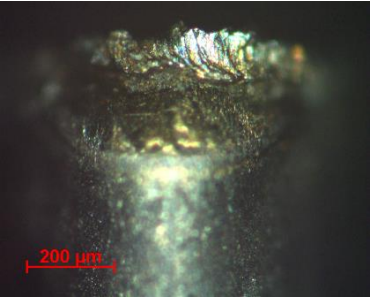
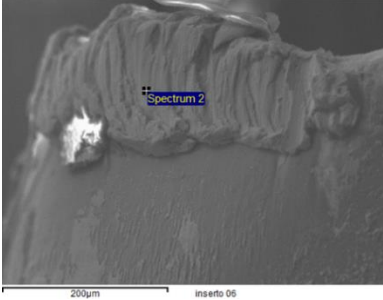
Observa-se possivelmente adesão de material na região do flanco (superfície de folga) nas pastilhas 9, 3 e 5 (Tabela 5.3) que utilizaram o mesmo avanço (0,08 mm/volta). As regiões estão demarcadas pelas setas vermelhas.

Tabela 5.3 – Imagens do MEV para os insertos 9, 3 e 5 ($f = 0,08$ mm/volta).

Inserto 9	Inserto 3	Inserto 5
50 m/min	60 m/min	70 m/min
		

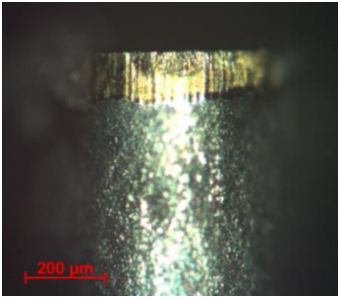
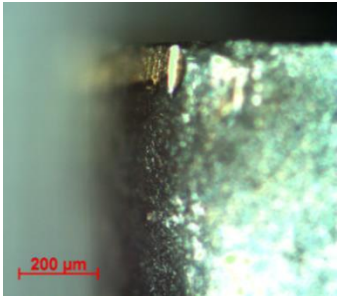
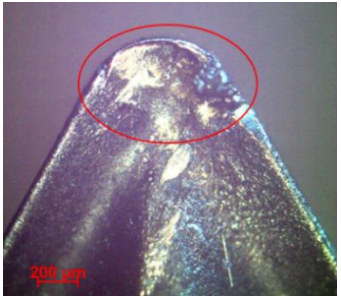
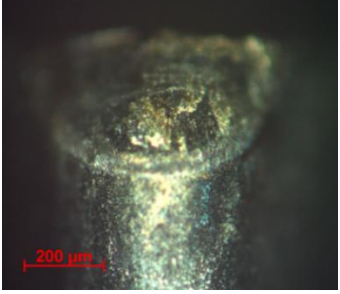
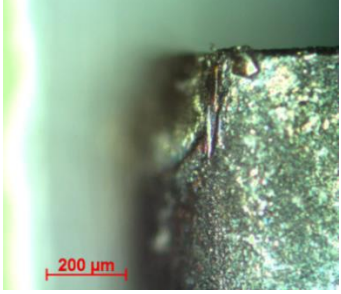
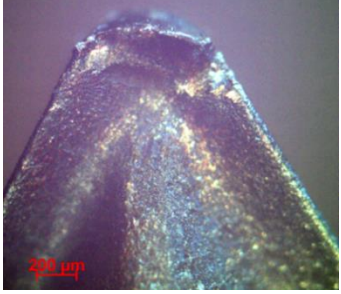
Nos insertos 2 e 6 (Tabela 5.4), observa-se a presença de material aderido à ponta. A adesão pode ser observada pelas imagens coletadas via microscopia óptica e MEV. Este processo é decorrente de um forte atrito entre o corpo de prova e a pastilha (*attrition*).

Tabela 5.4 - Imagens dos insertsos 2 e 6 de sua microscopia óptica de ponta e MEV/EDS.

		Microscópio óptico	Análise MEV	Análise EDS																		
Inserto 2	60 m/min			<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Spectrum 1</th> </tr> <tr> <th>Elemento</th> <th>Weight%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td>6,83</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>3,41</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>0,65</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>0,43</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>11,89</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>76,22</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>0,57</td> </tr> </tbody> </table>	Spectrum 1		Elemento	Weight%	C	6,83	O	3,41	Al	0,65	Si	0,43	Cr	11,89	Fe	76,22	Ni	0,57
	Spectrum 1																					
Elemento	Weight%																					
C	6,83																					
O	3,41																					
Al	0,65																					
Si	0,43																					
Cr	11,89																					
Fe	76,22																					
Ni	0,57																					
	0,10 mm/rev																					
Inserto 6	70 m/min			<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Spectrum 2</th> </tr> <tr> <th>Elemento</th> <th>Weight%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td>23,15</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>14,36</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>1,08</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>0,34</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>10,62</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>50,45</td> </tr> </tbody> </table>	Spectrum 2		Elemento	Weight%	C	23,15	O	14,36	Al	1,08	Si	0,34	Cr	10,62	Fe	50,45		
	Spectrum 2																					
Elemento	Weight%																					
C	23,15																					
O	14,36																					
Al	1,08																					
Si	0,34																					
Cr	10,62																					
Fe	50,45																					
	0,12 mm/rev																					

Através da microscopia óptica, foram captadas imagens das pontas de todos insertsos, também em sua condição final de desgaste. A Tabela 5.5 ilustra esta exemplificação para os insertsos 8 e 4 ($f = 0,10$ mm/volta).

Tabela 5.5 – Análise da ponta dos insertsos 8 e 4 via microscópio óptico

		Flanco Frontal	Flanco Lateral	Face
Inserto 8	50 m/min			
Inserto 4	70 m/min			

Na superfície de saída (face) do inserto 8, na região da ponta, a qual está circulada (Tabela 5.5), tem-se variações geométricas e de cor. Estas variações provavelmente são devido à formação de uma cratera, que possivelmente surgiu devido à ação do mecanismo de difusão associado ao de abrasão. Todos insertsos apresentaram desgaste de ponta, conforme mostram os apêndices.

5.4. Análise do Material Usinado

As imagens realizadas via microscópio óptico das amostras cortadas por eletroerosão a fio dos corpos de prova (CP) VIII e IV podem ser vistas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Evolução da superfície do Aço Inoxidável AISI 420C usinada dos CPs VIII e IV (imagens com ampliação de 100x).

		$VB = 0$ [mm]	$VB = 0,1$ mm	$VB = 0,2$ mm
CP VIII	50 m/min			
	0,10 mm/rev			
CP IV	70 m/min			
	0,10 mm/rev			

Nota-se nas imagens que com o crescimento do desgaste na pastilha, a superfície usinada começa a apresentar linhas grossas no final do raio de ponta (retângulos vermelhos nas figuras do desgaste final com $VB = 0,2$ mm), e elas provavelmente estão ligadas ao desgaste de entalhe da ferramenta (demonstrado pela elipse vermelha na Tabela 5.2), que ocorre justamente ao final do raio de ponta, onde estão estas linhas escuras.

Comparando a progressão da usinagem na Tabela 5.6, nota-se nas amostras o aparecimento de regiões escuras que se destacam. Estas regiões mais pontuais (como nos círculos vermelhos) podem ser de material aderido na superfície torneada, normalmente o próprio cavaco. Outra possibilidade para as manchas escuras que aparecem de forma contínua (elipse vermelha), na mesma direção dos sulcos, deva ser justamente ligada ao desgaste da pastilha de usinagem por abrasão, que, ao perder sua afiação, começa a realizar um processo de “arrancamento” de material.

6. CONCLUSÕES

Foi identificado na análise de EDS a presença significativa de ferro e cromo aderido em todas as pastilhas. O MEV evidenciou desgaste abrasivo e desprendimento de fragmentos também em todas as pastilhas. Pode-se concluir que os mecanismos por abrasão e por aderência e arrastamento (*attrition*) foram os principais causadores dos desgastes em todas as pastilhas de metal-duro classe “S” empregadas no torneamento a seco do aço inoxidável AISI 420C endurecido utilizado neste estudo.

É possível dizer que os parâmetros de corte têm influência no desgaste da ferramenta, e que para a menor velocidade de corte empregada ($v_c = 50$ m/min), teve-se a maior vida útil do inserto, bem como uma maior remoção de material dentre as combinações utilizadas. Contudo, justamente na menor velocidade é onde mais se observou o mecanismo de

desgaste por *attrition*. Sendo assim, recomenda-se o uso adequado de fluido de corte (principalmente com efeito lubrificante) para esta operação de corte em torneamento, diminuindo assim a influência do *attrition*. Dentre as combinações de corte utilizadas, o melhor parâmetro a ser utilizado é o de velocidade de corte em 50 m/min, que alia um menor desgaste da ferramenta com alta taxa de remoção de material. O avanço $f = 0,08$ mm/rev. demonstrou via análise MEV/EDS uma grande adesão de material na região do flanco do inserto; logo, o mesmo não é recomendado para este tipo de usinagem.

Como um posterior trabalho, sugere-se analisar a superfície da peça usinada, verificando o comportamento que o inserto desenvolve. Também sugere-se repetir os testes com maior número de corpos de prova, aumentando assim a fundamentação estatística dos resultados obtidos neste trabalho.

7. BIBLIOGRAFIA

Abinox. "**Abinox - Associação Brasileira do Aço Inoxidável**", 2016. Disponível em: <<http://www.abinox.org.br/aco-inox-abc-do-aco-inox.php>>. Acesso em: 24 Abril 2016.

Ashley, S.; Greenemeier, L. 9 Materials That Will Change the Future of Manufacturing. "**Scientific American**", 22 Abril 2013. Disponível em: <<http://www.scientificamerican.com/article/9-materials-that-will-change-manufacturing/>>. Acesso em: 05 Abril 2016.

Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L. "**Tecnologia da usinagem dos materiais**". 7ª ed. São Paulo: Artliber, 2010.

Favorit. "**Favorit Aços Especiais**", 2012. Disponível em: <www.favorit.com.br>. Acesso em: 5 Abril 2016.

Ferraresi, D. "**Fundamentos da Usinagem dos Metais**", 8ª ed. SP: Edgard Blücher, v. 1, 1990. 671 p.

Jang, D.Y.; Watkins, T. R.; Kozaczek, K. J.; Hubbard, C. R.; Cavin, O. B. "**Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel**", Wear 194, 1996. 168-173.

Machado, Á.R.; Abrão, A.M.; Coelho, R.T.; Silva, M.B. "**Teoria da Usinagem dos Materiais**", 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

Rosa, G. C. D.; Souza, J. D. Estudo comparativo das ferramentas alisadora e convencional através das forças e rugosidades resultantes do processo de torneamento de acabamento do aço inoxidável AISI 420C. "**8º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**", Uberlândia - MG, 2014. 10.

Sandvik. "**Sandvik Coromant Catálogo Online**", 2016. Disponível em: <<http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=TNMG%2016%2004%2004-SF%201105&m=5909077>>. Acesso em: 23 Abril 2016.

Silva, G. C. "**Estudo da influência dos parâmetros de usinagem nas tensões residuais geradas na peça torneada de aço inoxidável AISI 420**". Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2013.

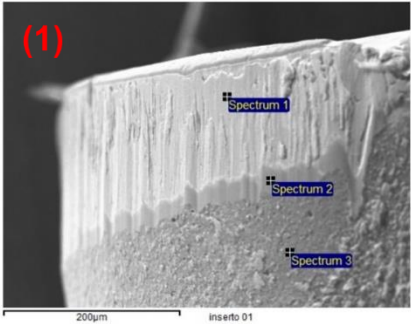
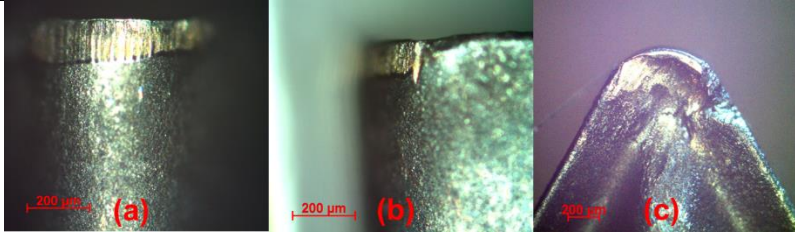
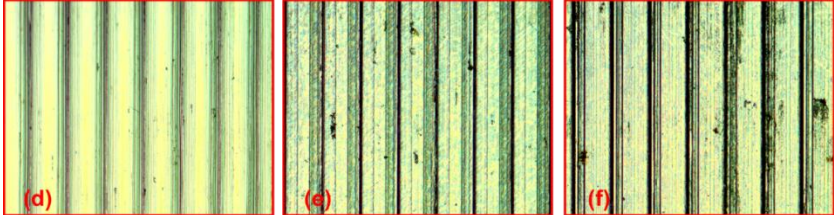
Souza, A. J. D. "**ENG03343 - Parte 1 - Fundamentos da usinagem dos materiais**". Porto Alegre: [s.n.], 2011.

Stefenon, A. "**Análise qualitativa da influência dos parâmetros de corte na temperatura em torneamento do aço inoxidável AISI 420C**". Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2014.

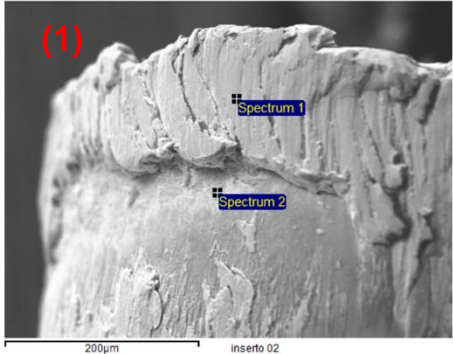
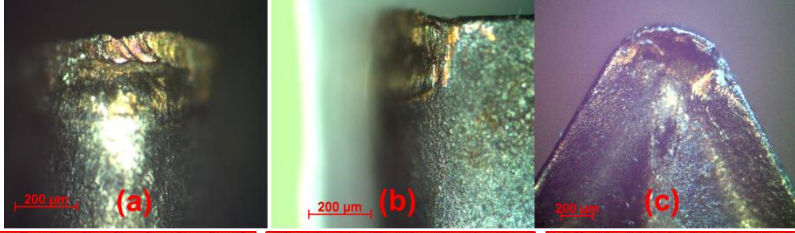
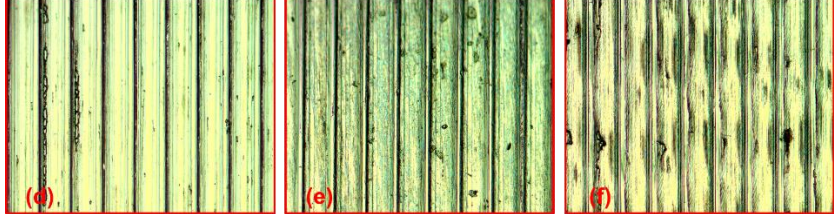
UFRJ Apostila de aula , 2014. Disponível em:
<<http://www.mecanica.scire.coppe.ufrj.br/util/b2evolution/media/blogs/annacarla/Usinagem/Aula16-Desgaste.pdf>>. Acesso em: Abril 2016.

APÊNDICES

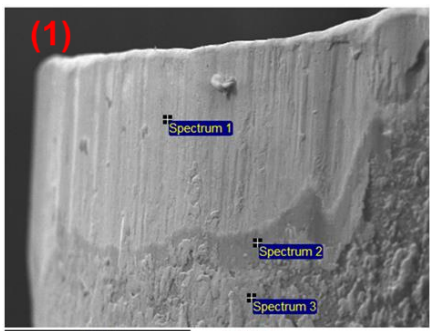
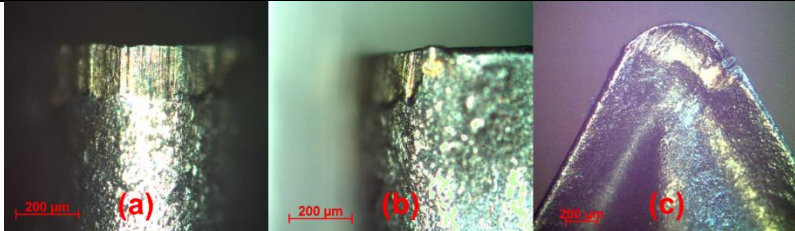
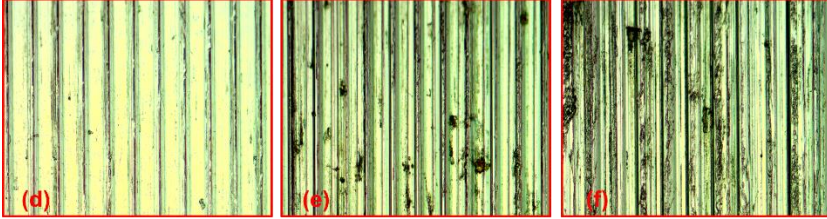
I - Inseto 1 / CP I | Em (1): MEV; (a) até (f): microscopia óptica

$v_c = 60$ m/min	$f = 0,12$ mm/rev.	Ferramenta: WC + Co	Cobertura: Ti-Al-N																																												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Spectrum 1</th> <th>Spectrum 2</th> <th>Spectrum 3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Element</td> <td>Weight%</td> <td>Weight%</td> <td>Weight%</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>7,25</td> <td>3,31</td> <td>6,61</td> </tr> <tr> <td>N</td> <td>-</td> <td>39,17</td> <td>24,16</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>2,19</td> <td>3,39</td> <td>22,97</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>0,64</td> <td>29,04</td> <td>24,54</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>0,46</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Ti</td> <td>-</td> <td>23,82</td> <td>19,55</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>9,29</td> <td>-</td> <td>0,95</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>80,01</td> <td>0,31</td> <td>1,17</td> </tr> <tr> <td>W</td> <td>0,17</td> <td>0,97</td> <td>0,06</td> </tr> </tbody> </table>			Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Element	Weight%	Weight%	Weight%	C	7,25	3,31	6,61	N	-	39,17	24,16	O	2,19	3,39	22,97	Al	0,64	29,04	24,54	Si	0,46	-	-	Ti	-	23,82	19,55	Cr	9,29	-	0,95	Fe	80,01	0,31	1,17	W	0,17	0,97	0,06
			Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3																																										
Element	Weight%	Weight%	Weight%																																												
C	7,25	3,31	6,61																																												
N	-	39,17	24,16																																												
O	2,19	3,39	22,97																																												
Al	0,64	29,04	24,54																																												
Si	0,46	-	-																																												
Ti	-	23,82	19,55																																												
Cr	9,29	-	0,95																																												
Fe	80,01	0,31	1,17																																												
W	0,17	0,97	0,06																																												
Material: Fe 0,4% - C 13% - Cr 1% - Si 1% - Mn - P- S																																															
			Fotos do inserto em (a), (b) e (c), 100x.																																												
			Fotos da superfície do Aço Inoxidável AISI 420C (d), (e) (f), 100x.																																												

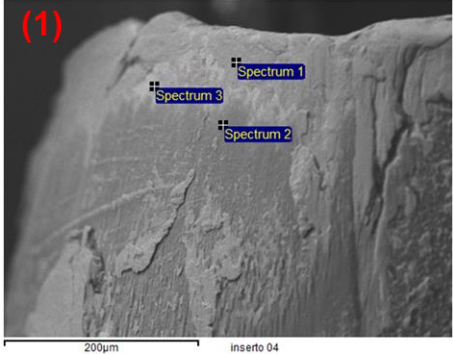
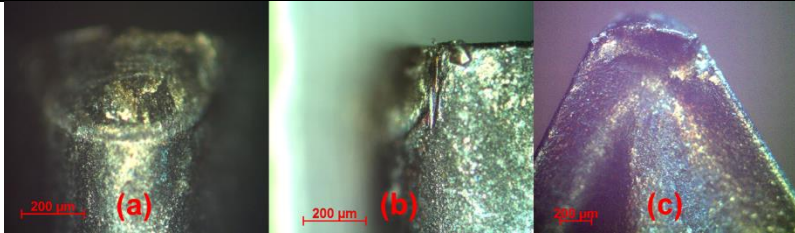
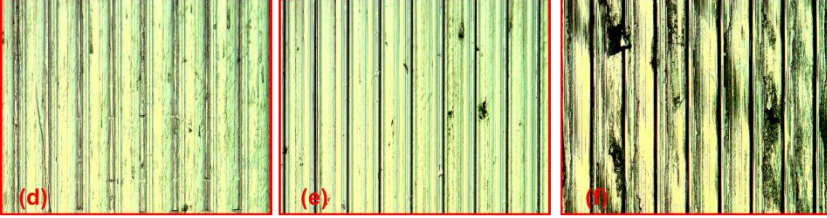
II - Inseto 2 / CP II | Em (1): MEV; (a) até (f): microscopia óptica

$v_c = 60$ m/min	$f = 0,10$ mm/rev.	Ferramenta: WC + Co	Cobertura: Ti-Al-N																														
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Spectrum 1</th> <th>Spectrum 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Element</td> <td>Weight%</td> <td>Weight%</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>6,83</td> <td>12,99</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>3,41</td> <td>3,56</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>0,65</td> <td>0,50</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>0,43</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>11,89</td> <td>27,01</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>76,22</td> <td>43,74</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>0,57</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>W</td> <td>-</td> <td>12,19</td> </tr> </tbody> </table>			Spectrum 1	Spectrum 2	Element	Weight%	Weight%	C	6,83	12,99	O	3,41	3,56	Al	0,65	0,50	Si	0,43	-	Cr	11,89	27,01	Fe	76,22	43,74	Ni	0,57	-	W	-	12,19
			Spectrum 1	Spectrum 2																													
Element	Weight%	Weight%																															
C	6,83	12,99																															
O	3,41	3,56																															
Al	0,65	0,50																															
Si	0,43	-																															
Cr	11,89	27,01																															
Fe	76,22	43,74																															
Ni	0,57	-																															
W	-	12,19																															
Material: Fe 0,4% - C 13% - Cr 1% - Si 1% - Mn - P- S																																	
			Fotos do inserto em (a), (b) e (c), 100x.																														
			Fotos da superfície do Aço Inoxidável AISI 420C (d), (e) (f), 100x.																														

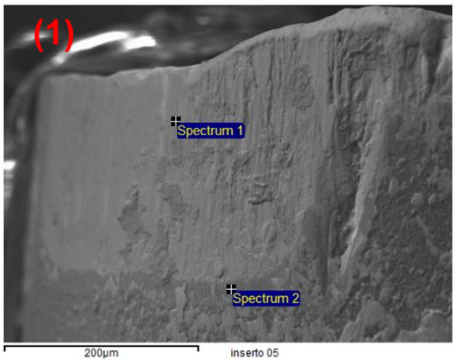
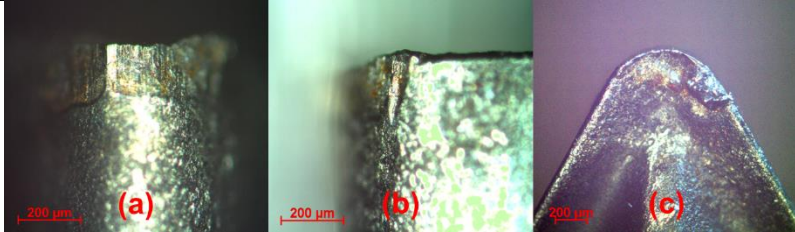
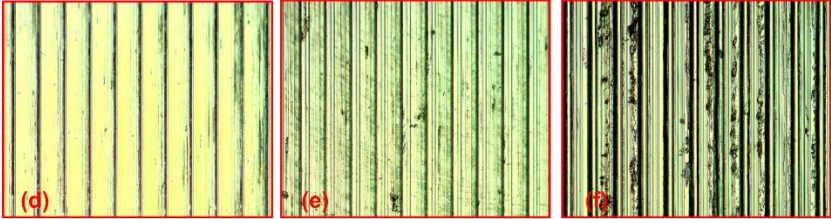
III - Inseto 3 / CP III | Em (1): MEV; (a) até (f): microscopia óptica

$v_c = 60$ m/min	$f = 0,08$ mm/rev.	Ferramenta: WC + Co	Cobertura: Ti-Al-N																																																								
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Spectrum 1</th> <th>Spectrum 2</th> <th>Spectrum 3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Element</td> <td>Weight%</td> <td>Weight%</td> <td>Weight%</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>21,17</td> <td>3,57</td> <td>10,08</td> </tr> <tr> <td>N</td> <td>-</td> <td>39,55</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>8,99</td> <td>2,99</td> <td>17,90</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>0,44</td> <td>27,70</td> <td>4,28</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>0,36</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>0,44</td> </tr> <tr> <td>Ti</td> <td>-</td> <td>21,57</td> <td>5,08</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>9,21</td> <td>-</td> <td>6,93</td> </tr> <tr> <td>Mn</td> <td>0,49</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>42,31</td> <td>0,33</td> <td>55,30</td> </tr> <tr> <td>Co</td> <td>-</td> <td>0,26</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>W</td> <td>17,02</td> <td>4,01</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>			Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Element	Weight%	Weight%	Weight%	C	21,17	3,57	10,08	N	-	39,55	-	O	8,99	2,99	17,90	Al	0,44	27,70	4,28	S	0,36	-	-	Si	-	-	0,44	Ti	-	21,57	5,08	Cr	9,21	-	6,93	Mn	0,49	-	-	Fe	42,31	0,33	55,30	Co	-	0,26	-	W	17,02	4,01	-
			Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3																																																						
Element	Weight%	Weight%	Weight%																																																								
C	21,17	3,57	10,08																																																								
N	-	39,55	-																																																								
O	8,99	2,99	17,90																																																								
Al	0,44	27,70	4,28																																																								
S	0,36	-	-																																																								
Si	-	-	0,44																																																								
Ti	-	21,57	5,08																																																								
Cr	9,21	-	6,93																																																								
Mn	0,49	-	-																																																								
Fe	42,31	0,33	55,30																																																								
Co	-	0,26	-																																																								
W	17,02	4,01	-																																																								
Material: Fe 0,4% - C 13% - Cr 1% - Si 1% - Mn - P- S																																																											
			Fotos do inserto em (a), (b) e (c), 100x.																																																								
			Fotos da superfície do Aço Inoxidável AISI 420C (d), (e) (f), 100x.																																																								

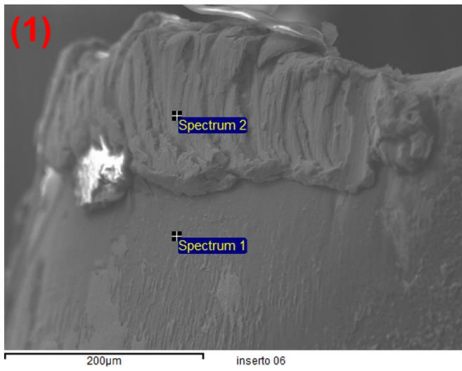
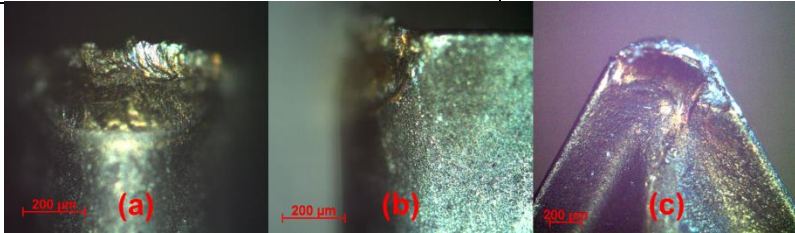
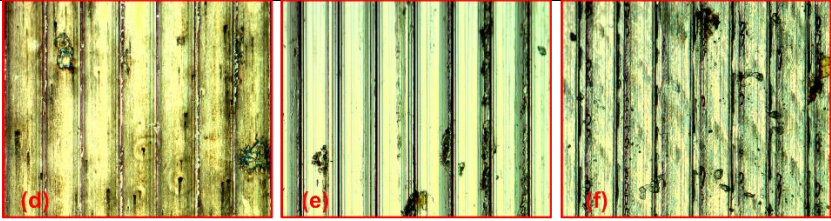
IV - Inseto 4 / CP IV | Em (1): MEV; (a) até (f): microscopia óptica

$v_c = 70$ m/min	$f = 0,10$ mm/rev.	Ferramenta: WC + Co	Cobertura: Ti-Al-N																																																
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Spectrum 1</th> <th>Spectrum 2</th> <th>Spectrum 3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Element</td> <td>Weight%</td> <td>Weight%</td> <td>Weight%</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>8,84</td> <td>2,52</td> <td>8,92</td> </tr> <tr> <td>N</td> <td>-</td> <td>27,70</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>7,19</td> <td>19,49</td> <td>10,20</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>0,42</td> <td>20,42</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>-</td> <td>0,15</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Ti</td> <td>-</td> <td>14,45</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>10,42</td> <td>0,54</td> <td>8,60</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>62,59</td> <td>1,13</td> <td>21,88</td> </tr> <tr> <td>Co</td> <td>-</td> <td>0,99</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>W</td> <td>10,54</td> <td>12,60</td> <td>50,40</td> </tr> </tbody> </table>			Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Element	Weight%	Weight%	Weight%	C	8,84	2,52	8,92	N	-	27,70	-	O	7,19	19,49	10,20	Al	0,42	20,42	-	O	-	0,15	-	Ti	-	14,45	-	Cr	10,42	0,54	8,60	Fe	62,59	1,13	21,88	Co	-	0,99	-	W	10,54	12,60	50,40
			Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3																																														
Element	Weight%	Weight%	Weight%																																																
C	8,84	2,52	8,92																																																
N	-	27,70	-																																																
O	7,19	19,49	10,20																																																
Al	0,42	20,42	-																																																
O	-	0,15	-																																																
Ti	-	14,45	-																																																
Cr	10,42	0,54	8,60																																																
Fe	62,59	1,13	21,88																																																
Co	-	0,99	-																																																
W	10,54	12,60	50,40																																																
Material: Fe 0,4% - C 13% - Cr 1% - Si 1% - Mn - P- S																																																			
			Fotos do inserto em (a), (b) e (c), 100x.																																																
			Fotos da superfície do Aço Inoxidável AISI 420C (d), (e) (f), 100x.																																																

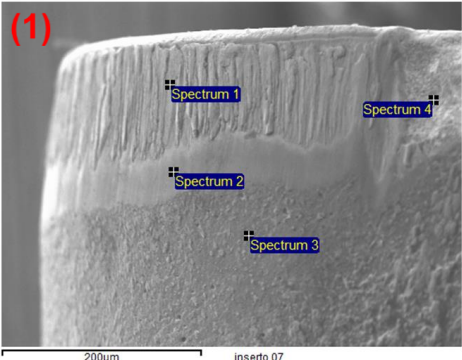
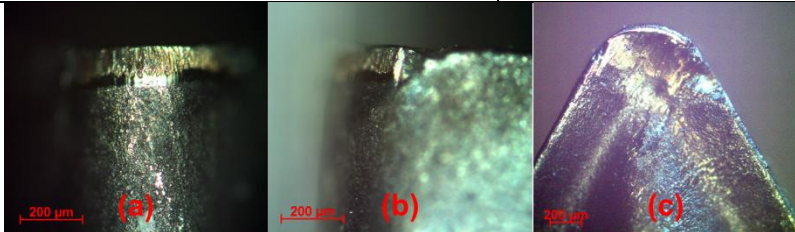
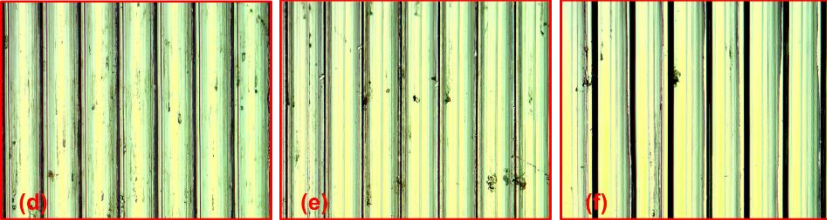
V - Inseto 5 / CP V | Em (1): MEV; (a) até (f): microscopia óptica

$v_c = 70$ m/min	$f = 0,08$ mm/rev.	Ferramenta: WC + Co	Cobertura: Ti-Al-N																																							
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Spectrum 1</th> <th>Spectrum 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Element</td> <td>Weight%</td> <td>Weight%</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>7,79</td> <td>4,13</td> </tr> <tr> <td>N</td> <td>-</td> <td>24,59</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>20,26</td> <td>19,10</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>0,27</td> <td>21,68</td> </tr> <tr> <td>Ti</td> <td>-</td> <td>18,04</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>0,35</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Cl</td> <td>0,48</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>9,33</td> <td>1,11</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>30,88</td> <td>5,01</td> </tr> <tr> <td>Co</td> <td>2,85</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>W</td> <td>27,81</td> <td>6,36</td> </tr> </tbody> </table>			Spectrum 1	Spectrum 2	Element	Weight%	Weight%	C	7,79	4,13	N	-	24,59	O	20,26	19,10	Al	0,27	21,68	Ti	-	18,04	S	0,35	-	Cl	0,48	-	Cr	9,33	1,11	Fe	30,88	5,01	Co	2,85	-	W	27,81	6,36
	Spectrum 1	Spectrum 2																																								
Element	Weight%	Weight%																																								
C	7,79	4,13																																								
N	-	24,59																																								
O	20,26	19,10																																								
Al	0,27	21,68																																								
Ti	-	18,04																																								
S	0,35	-																																								
Cl	0,48	-																																								
Cr	9,33	1,11																																								
Fe	30,88	5,01																																								
Co	2,85	-																																								
W	27,81	6,36																																								
Material: Fe 0,4% - C 13% - Cr 1% - Si 1% - Mn - P - S																																										
			Fotos do inserto em (a), (b) e (c), 100x.																																							
			Fotos da superfície do Aço Inoxidável AISI 420C (d), (e) (f), 100x.																																							

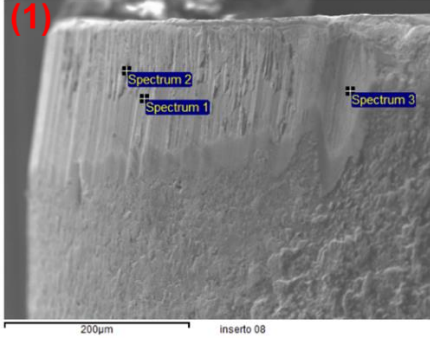
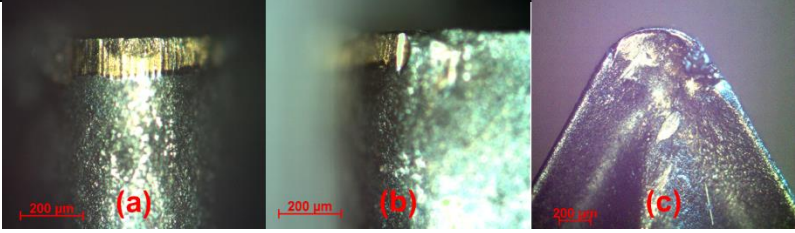
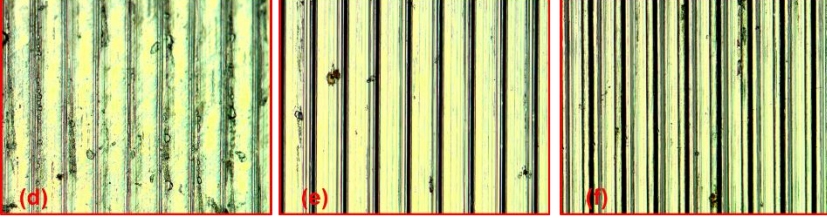
VI - Inseto 6 / CP VI | Em (1): MEV; (a) até (f): microscopia óptica

$v_c = 70$ m/min	$f = 0,12$ mm/rev.	Ferramenta: WC + Co	Cobertura: Ti-Al-N																																										
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Spectrum 1</th> <th>Spectrum 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Element</td> <td>Weight%</td> <td>Weight%</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>3,26</td> <td>23,15</td> </tr> <tr> <td>N</td> <td>-0,46</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>53,19</td> <td>14,36</td> </tr> <tr> <td>Mg</td> <td>0,29</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>28,87</td> <td>1,08</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>0,31</td> <td>0,34</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>0,16</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Ca</td> <td>0,18</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Ti</td> <td>8,01</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>1,18</td> <td>10,62</td> </tr> <tr> <td>Mn</td> <td>0,39</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>4,62</td> <td>50,45</td> </tr> </tbody> </table>			Spectrum 1	Spectrum 2	Element	Weight%	Weight%	C	3,26	23,15	N	-0,46	-	O	53,19	14,36	Mg	0,29	-	Al	28,87	1,08	Si	0,31	0,34	S	0,16	-	Ca	0,18	-	Ti	8,01	-	Cr	1,18	10,62	Mn	0,39	-	Fe	4,62	50,45
	Spectrum 1	Spectrum 2																																											
Element	Weight%	Weight%																																											
C	3,26	23,15																																											
N	-0,46	-																																											
O	53,19	14,36																																											
Mg	0,29	-																																											
Al	28,87	1,08																																											
Si	0,31	0,34																																											
S	0,16	-																																											
Ca	0,18	-																																											
Ti	8,01	-																																											
Cr	1,18	10,62																																											
Mn	0,39	-																																											
Fe	4,62	50,45																																											
Material: Fe 0,4% - C 13% - Cr 1% - Si 1% - Mn - P - S																																													
			Fotos do inserto em (a), (b) e (c), 100x.																																										
			Fotos da superfície do Aço Inoxidável AISI 420C (d), (e) (f), 100x.																																										

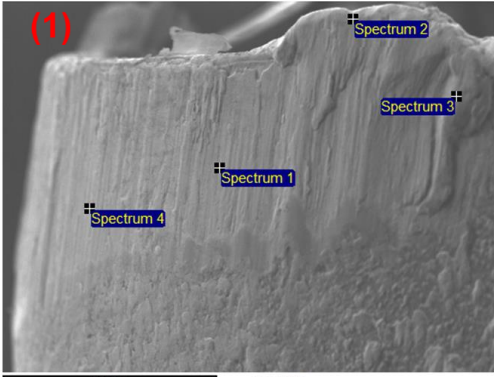
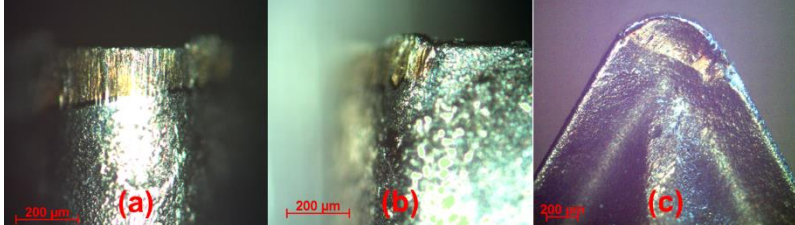
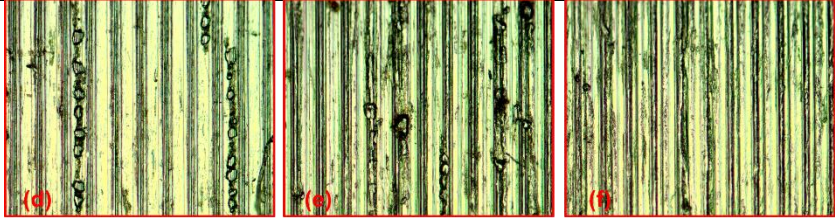
VII - Inseto 7 / CP VII | Em (1): MEV; (a) até (f): microscopia óptica

$v_c = 50$ m/min	$f = 0,12$ mm/rev.	Ferramenta: WC + Co	Cobertura: Ti-Al-N																																												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Spectrum 1</th> <th>Spectrum 2</th> <th>Spectrum 3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Element</td> <td>Weight%</td> <td>Weight%</td> <td>Weight%</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>18,58</td> <td>3,90</td> <td>6,50</td> </tr> <tr> <td>N</td> <td>-</td> <td>42,77</td> <td>33,68</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>8,41</td> <td>4,01</td> <td>13,75</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>1,67</td> <td>24,34</td> <td>25,63</td> </tr> <tr> <td>Ti</td> <td>-</td> <td>18,64</td> <td>19,31</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>8,58</td> <td>-</td> <td>0,55</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>62,75</td> <td>-</td> <td>0,59</td> </tr> <tr> <td>Co</td> <td>-</td> <td>0,35</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>W</td> <td>-</td> <td>6,00</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>				Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Element	Weight%	Weight%	Weight%	C	18,58	3,90	6,50	N	-	42,77	33,68	O	8,41	4,01	13,75	Al	1,67	24,34	25,63	Ti	-	18,64	19,31	Cr	8,58	-	0,55	Fe	62,75	-	0,59	Co	-	0,35	-	W	-	6,00	-
		Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3																																											
Element	Weight%	Weight%	Weight%																																												
C	18,58	3,90	6,50																																												
N	-	42,77	33,68																																												
O	8,41	4,01	13,75																																												
Al	1,67	24,34	25,63																																												
Ti	-	18,64	19,31																																												
Cr	8,58	-	0,55																																												
Fe	62,75	-	0,59																																												
Co	-	0,35	-																																												
W	-	6,00	-																																												
Material: Fe 0,4% - C 13% - Cr 1% - Si 1% - Mn - P - S																																															
			Fotos do inserto em (a), (b) e (c), 100x.																																												
			Fotos da superfície do Aço Inoxidável AISI 420C (d), (e) (f), 100x.																																												

VIII - Inseto 8 / CP VIII | Em (1): MEV; (a) até (f): microscopia óptica

$v_c = 50$ m/min	$f = 0,10$ mm/rev.	Ferramenta: WC + Co	Cobertura: Ti-Al-N																																																							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Spectrum 1</th> <th>Spectrum 2</th> <th>Spectrum 3</th> <th>Spectrum 4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Element</td> <td>Weight%</td> <td>Weight%</td> <td>Weight%</td> <td>Weight%</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>10,78</td> <td>49,43</td> <td>7,23</td> <td>15,05</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>5,44</td> <td>10,61</td> <td>3,94</td> <td>4,60</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>1,59</td> <td>0,17</td> <td>0,64</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>-</td> <td>0,14</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Ca</td> <td>-</td> <td>0,19</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>10,81</td> <td>5,08</td> <td>4,48</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>71,38</td> <td>30,46</td> <td>35,58</td> <td>1,17</td> </tr> <tr> <td>Co</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>1,00</td> </tr> <tr> <td>W</td> <td>-</td> <td>3,92</td> <td>48,13</td> <td>78,17</td> </tr> </tbody> </table>				Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Spectrum 4	Element	Weight%	Weight%	Weight%	Weight%	C	10,78	49,43	7,23	15,05	O	5,44	10,61	3,94	4,60	Al	1,59	0,17	0,64	-	S	-	0,14	-	-	Ca	-	0,19	-	-	Cr	10,81	5,08	4,48	-	Fe	71,38	30,46	35,58	1,17	Co	-	-	-	1,00	W	-	3,92	48,13	78,17
		Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Spectrum 4																																																					
Element	Weight%	Weight%	Weight%	Weight%																																																						
C	10,78	49,43	7,23	15,05																																																						
O	5,44	10,61	3,94	4,60																																																						
Al	1,59	0,17	0,64	-																																																						
S	-	0,14	-	-																																																						
Ca	-	0,19	-	-																																																						
Cr	10,81	5,08	4,48	-																																																						
Fe	71,38	30,46	35,58	1,17																																																						
Co	-	-	-	1,00																																																						
W	-	3,92	48,13	78,17																																																						
Material: Fe 0,4% - C 13% - Cr 1% - Si 1% - Mn - P - S																																																										
			Fotos do inserto em (a), (b) e (c), 100x.																																																							
			Fotos da superfície do Aço Inoxidável AISI 420C (d), (e) (f), 100x.																																																							

IX - Inseto 9 / CP IX | Em (1): MEV; (a) até (f): microscopia óptica

$v_c = 50 \text{ m/min}$	$f = 0,08 \text{ mm/rev.}$	Ferramenta: WC + Co	Cobertura: Ti-Al-N			
			Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Spectrum 4
		Element	Weight%	Weight%	Weight%	Weight%
		C	11,53	9,84	10,68	7,87
		O	-	2,52	5,92	5,74
		Al	2,15	0,84	0,58	3,23
		Si	-	0,48	0,38	0,45
		S	0,91	-	-	-
		Cr	17,26	10,39	10,69	13,18
		Mn	0,86	-	-	0,70
	Fe	54,03	75,30	71,23	68,83	
	W	13,26	-	-	-	
	Ni	-	0,62	0,52	-	
Material: Fe 0,4% - C 13% - Cr 1% - Si 1% - Mn - P - S						
			Fotos do inserto em (a), (b) e (c), 100x.			
			Fotos da superfície do Aço Inoxidável AISI 420C (d), (e) (f), 100x.			