

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

DESGASTES E VIDA DE FERRAMENTAS DE METAL-DURO CLASSES ISO-P E ISO-S
DURANTE O TORNEAMENTO DURO DO AÇO SAE 4140 NO CORTE A SECO E COM MQL

por

Gabriel Varela Centeno Hülsendeger

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, dezembro de 2017.

DESGASTES E VIDA DE FERRAMENTAS DE METAL-DURO CLASSES ISO-P E ISO-S
DURANTE O TORNEAMENTO DURO DO AÇO SAE 4140 NO CORTE A SECO E COM MQL

por

Gabriel Varela Centeno Hülsedeger

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

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientador: Matheus dos Santos Polly

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. Flavio José Lorini

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 21 de dezembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. André João de Souza, pela orientação.

Ao Matheus dos Santos Polly, pela coorientação.

Ao Técnico do Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS), Guilherme Vargas Schirmer, pelo auxílio nos experimentos.

Ao Adílio Felipe e Amália Mayrhofer por ajudar na realização dos ensaios.

À Empresa Temperatech, pela realização do tratamento térmico do aço SAE 4140.

Ao Centro de Microscopia e Microanálise (CMM-UFRGS), pelo auxílio na aquisição de imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

À Isabela Louise Bonatto, por estar sempre ao meu lado me incentivando e ajudando.

HÜLSENDEGER, G. V. C. **Desgastes e vida de ferramentas de metal-duro classes ISO-P e ISO-S durante o torneamento duro do aço SAE 4140 no corte a seco e com MQL.** 2017. 21 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

SAE 4140 é um aço de grande aplicação na indústria metal mecânica devido a sua alta tenacidade e alta capacidade de endurecimento. Devido a isso é usado em componentes que necessitam de alta resistência ao desgaste e à fadiga como rolamentos, engrenagens, parafusos, entre outros. Em sua grande maioria, aços endurecidos (acima de 55 HRC) são usinados com ferramentas de CBN, as quais são muito dispendiosas. Desta forma, almeja-se a substituição deste material de ferramenta por outro menos custoso e com desempenho similar. Assim, foram realizados ensaios comparativos de fim de vida utilizando insertos de metal-duro classes ISO-P (aplicada em aços com dureza até 48 HRC) e ISO-S (utilizada em superligas resistentes ao calor) no torneamento do aço SAE 4140 endurecido a (53 ± 2) HRC. Mantendo o avanço e a profundidade de corte constantes (0,15 mm/volta e 0,3 mm respectivamente), cada inserto com raio de ponta igual a 0,4 mm realizou o torneamento de corpos de prova combinando dois diferentes valores de velocidade de corte (60 e 120 m/min) e duas condições de lubrificação (a seco e com MQL). No comparativo de desempenho, avaliou-se o estado final da ferramenta (desgastes, mecanismos de desgastes e avarias) e o tempo de vida. Concluiu-se que o inserto de metal-duro classe ISO-S apresentou resultados muito superiores aos obtidos com a ISO-P.

PALAVRAS-CHAVE: SAE 4140 endurecido, Torneamento duro, Desgastes e mecanismos de desgaste, Vida da ferramenta.

HÜLSENDEGER, G. V. C. **Tool wear and tool life of ISO-P and ISO-S coated carbide tools in hardened SAE 4140 steel turning on dry and MQL conditions**. 2017. 21 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

SAE 4140 is a steel of large applicability in metalworking industry for having high tenacity and high capacity of hardening. Therefore, it is used in components that need high resistance to wear and fatigue such as bearings, gears, screws, etc. Hardened steels (above 55 HRC) are usually machined with CBN tools, which are very expensive. Hence, it is desired to substitute this tool material for another, less costly, material and with similar performance. Thus, a comparative tool life tests using ISO-P (applied to steels with hardness up to 48 HRC) and ISO-S (used in heat resistant super alloys) grades of coated carbide inserts in hard turning of SAE 4140 steel (53 ± 2) HRC were performed. Keeping the feed-rate and the depth of cut constants (0.15 mm/rev. and 0.3 mm respectively), each insert with a tip radius of 0.4 mm machined workpieces by combining two different cutting speed levels (60 and 120 m/min) and two lubri-cooling conditions (dry and MQL). In the performance comparison, the final tool state (tool wear, wear mechanisms and tool fractures) and lifetime were evaluated. It was concluded that the ISO-S class of carbide insert presented results much higher than those obtained with ISO-P class.

KEYWORDS: Hardened SAE 4140 steel, Hard turning, Tool wear and wear mechanisms, Tool life.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1	Ferramentas de Metal-Duro.....	2
3.2	Desgastes, Mecanismos de Desgaste e Vida da Ferramenta.....	3
3.2.1	Desgaste e avarias.....	3
3.2.2	Mecanismos de Desgaste.....	5
3.2.3	Vida da Ferramenta.....	6
3.3	Usinagem a Seco e com Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)	6
4	MATERIAIS E MÉTODOS	7
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	10
5.1	Análise da Vida das Ferramentas.....	10
5.2	Análise dos Desgastes das Ferramentas.....	12
6	CONCLUSÕES.....	14
	REFERÊNCIAS.....	14

1 INTRODUÇÃO

A pesquisa em usinagem de materiais endurecidos vem ganhando cada vez mais importância na indústria moderna devido à necessidade de se atender às especificações dimensionais. De acordo com Matsumoto e Diniz, 2000, e Bonandi, 2012, o torneamento duro (*hard turning*) vem sendo utilizado industrialmente como uma alternativa a alguns casos de retificação, pois o primeiro oferece maior flexibilidade e menor custo que o segundo. Os trabalhos de Bonfá, 2013, e Galoppi et al., 2005, afirmam que apenas se utilizava o processo de retificação para o acabamento, pois se tinha o domínio da tecnologia de rebolos cerâmicos desde a década de 1970. Contudo, mesmo com as vantagens da utilização de torneamento duro, faz-se necessário uma máquina-ferramenta rígida e com altas rotações, e ferramentas que possuam certas qualidades especiais, como as de nitreto cúbico de boro (CBN).

No torneamento de aços de difícil usinagem (aços endurecidos, ferros fundidos, superligas, entre outros) são comumente utilizados insertos de CBN [Sandvik, 2012]. Este material de ferramenta é considerado o melhor para o torneamento duro por resistir a altas temperaturas e às forças de corte, mantendo sua aresta de corte afiada e resultando em maior tempo de vida e melhor acabamento das peças usinadas [Korn, 2004]. Contudo, ao se escolher ferramentas de CBN, é indispensável realizar uma análise econômica do processo, visto que esse tipo de ferramenta apresenta, comparativamente, alto custo [Galoppi et al., 2005].

Devido ao alto custo das ferramentas de CBN, o processo de usinagem de materiais endurecidos torna-se muito dispendioso, resultando em valores finais muito elevados. Assim, torna-se necessário encontrar maneiras de prolongar o tempo de vida da ferramenta, ampliando, assim, o número de peças usinadas por ferramenta. De acordo com Ferraresi, 1977, todo o processo que visa a aumentar a produção durante a vida da ferramenta deve diminuir o desgaste sofrido por ela. Para isso, é recomendado o uso de fluidos de corte, os quais irão diminuir a severidade da ação abrasiva e, assim, diminuir o desgaste. Contudo, Teixeira Filho et al., 2001, mostraram que, ao usinar a seco, houve um aumento da vida do inserto de CBN. Isso ocorre devido à elevação da temperatura na região de corte, que provocou redução na deformação e na dureza do cavaco, facilitando sua formação. Conforme Pereira, 2006, a usinagem a seco com CBN é mais efetiva, além de evitar problemas e custos decorrentes de aquisição, manuseio e descarte do fluido de corte. Apesar disso, ainda é um processo custoso devido ao alto preço do inserto utilizado.

Assim, propõe-se usar dois insertos de metal-duro da classe ISO-S e ISO-P, os quais possuem um custo de cinco a sete vezes menor (cerca de R\$ 40,00 por inserto) que os de CBN (entre R\$ 200,00 e R\$ 300,00 por inserto). No entanto, as ferramentas de metal-duro não apresentam uma das características importantes para torneamento duro: alta dureza a quente. Desse modo, um sistema que permita reduzir a temperatura (e conseqüentemente aumentar a vida do inserto) torna-se importante. Contudo, como já dito, a utilização de fluidos de corte acarreta custos e outros problemas, que serão referidos adiante. Para reduzir o impacto dessas desvantagens, utiliza-se o método de aplicação por mínima quantidade de lubrificante (MQL). Com ele, é possível lubrificar a região de corte utilizando baixas vazões (0,05 a 0,50 l/h) e manter uma boa taxa de refrigeração devido à rápida evaporação das gotículas formadas.

2 OBJETIVO

Pretende-se realizar uma análise comparativa dos desgastes, dos mecanismos de desgaste e da vida de duas classes de ferramentas de metal-duro (ISO-P e ISO-S) no torneamento do aço SAE 4140 endurecido a (53 ± 2) HRC no corte a seco e com mínima quantidade de lubrificante (MQL a 0,2 l/h). Espera-se que a ferramenta ISO-S (grãos ultrafinos) possa ter excelente desempenho a ponto de, em trabalho posterior, ser comparada a uma ferramenta de cerâmica mista ou de CBN na usinagem desse aço.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata de fundamentos teóricos associados com: 1) características das ferramentas de metal-duro; 2) desgastes, mecanismos de desgaste e vida das ferramentas; 3) vantagens e limitações da usinagem a seco e com MQL em comparação com a aplicação de fluido em abundância.

3.1 Ferramentas de Metal-Duro

Ferramentas inteiriças e insertos intercambiáveis de metal-duro são amplamente utilizados em processos de fabricação por usinagem devido ao seu custo relativamente baixo e por apresentar combinação de boa dureza a quente (resistência ao desgaste) e boa tenacidade. Isso possibilita uma gama de aplicações com diversas combinações de parâmetros de corte [Diniz et al., 2013]. O corpo do inserto de metal duro é fabricado por meio da metalurgia do pó, podendo esse pó ser prensado ou, ainda, se usar técnicas de injeção em moldes o qual é, então, sinterizado. Esse pó é composto por partículas de carboneto de tungstênio (WC) e um ligante rico em cobalto (Co). O WC é um dos mais importantes parâmetros para se ajustar a relação dureza/tenacidade do inserto de uma certa classe. Para um mesmo teor do ligante, quanto mais fino o grão da ferramenta, maior será a sua dureza, e, assim, menor a tenacidade. Já a quantidade de ligante Co irá controlar a resistência e tenacidade da classe em relação à deformação plástica. Para um mesmo tamanho de grão, ao se aumentar a quantidade de ligante se terá uma ferramenta mais tenaz. No entanto, um teor de ligante muito baixo pode resultar em um material quebradiço [Sandvik, 2017]. A Figura 3.1a mostra diferentes tamanhos de grão para ferramentas de metal-duro.

Inicialmente, o metal-duro mostrou-se muito eficiente na usinagem de ferros fundidos cinzentos. Contudo, apresentava baixa resistência ao desgaste de cratera. Dessa maneira, deram-se início a pesquisas para superar tal problema. Como resultado, foram adicionados carbonetos (de titânio – TiC, de tântalo – TaC e de nióbio – NbC) ao substrato (WC + Co), os quais, conforme Machado et al., 2009, diminuem a craterização, pois:

- os carbonetos adicionados têm maiores durezas que o WC, portanto, apresentam maior resistência ao desgaste abrasivo;
- a solubilidade dos carbonetos adicionados é muito menor que o WC, o que inibe a difusão, um dos mecanismos de desgaste mais importantes a altas temperaturas, característica da superfície de saída;
- a estabilidade química dos carbonetos adicionados é maior que a do WC, o que implica maiores dificuldades de dissolução e de difusão desses elementos.

No grupo de ferramentas de metal-duro utilizados na indústria metal-mecânica para a usinagem de aços ao carbono, mais de 95% dessas possuem algum tipo de revestimento. Os revestimentos aplicados nesses tipos de ferramentas podem ser tanto CVD (Fig. 3.1b) quanto PVD (Fig. 3.1c). Ambos aumentam a vida e a resistência ao desgaste da ferramenta. O revestimento CVD (Deposição Química de Vapor) é gerado a partir de reações químicas entre 700-1050°C e pode ter uma, duas ou três camadas. É bastante utilizado em ferramentas de metal-duro, pois mantém a interface com o substrato intacta. O revestimento PVD (Deposição Física de Vapor) é formado por temperaturas relativamente mais baixas (400-600°C) e consiste na evaporação de um metal que reage, por exemplo, com nitrogênio para formar uma cobertura de nitreto dura na superfície da ferramenta de corte [Sandvik, 2012].

O PVD possui vantagem sobre o CVD, pelas tensões residuais de compressão geradas durante a aplicação do revestimento; com isso, a tenacidade da ferramenta é mantida (aumenta a capacidade de absorver impactos inerentes ao processo de remoção de material). No caso do CVD, tensões residuais de tração são geradas na sua aplicação; conseqüentemente, a tenacidade da ferramenta é reduzida. Entretanto, apresentam maior dureza a quente que o PVD [Machado et al, 2009].

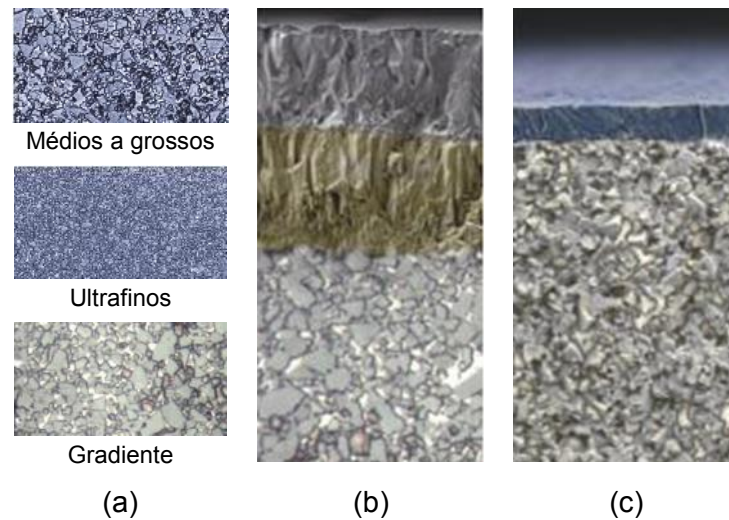


Figura 3.1 – Ferramentas de metal duro: (a) Tamanhos de grão; (b) revestimentos CVD; (c) revestimento PVD [Sandvik, 2017]

3.2 Desgastes, Mecanismos de Desgaste e Vida da Ferramenta

3.2.1 Desgaste e avarias

Pode-se dizer que existem dois fenômenos que causam perda de material e, conseqüentemente, necessidade de substituição das arestas de corte: avaria e desgaste. Desgaste é definido pela norma ISO 3685, 1993, como “a mudança da forma original da ferramenta, durante o processo de corte, como resultado da perda gradual do material da ferramenta ou pela sua deformação”. O desgaste nos processos tem vital importância no seu acompanhamento, pois caso ele chegue a valores muito altos pode haver quebra da ferramenta. Com isso se define, para uma dada ferramenta durante certo processo, o tempo de vida da mesma. A Figura 3.2 mostra os principais desgastes e avarias que podem surgir na ferramenta de corte durante a usinagem.

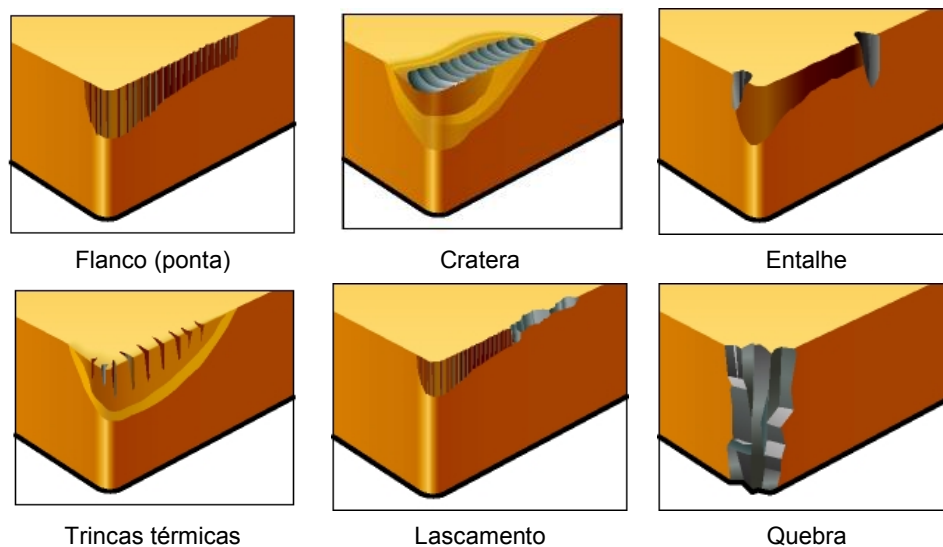


Figura 3.2 – Desgastes e avarias na ferramenta [Sandvik, 2017].

O desgaste de flanco pode ser considerado o mais comum em ferramentas de corte. Ocorre na superfície de folga da ferramenta (principal, lateral e ponta) devido ao contato entre a ferramenta e a peça usinada, resultando em aumento do atrito nesta interface (ferramenta-peça) [Diniz et al, 2013; Machado et al., 2009]. De acordo com a ISO 3685, 1993, um dos

critérios mais usados para determinar o fim de vida da ferramenta em torneamento é a largura média da marca de desgaste de flanco ($VB_B = 300 \mu\text{m}$) e/ou a largura máxima da marca de desgaste de flanco ($VB_{\text{max}} = 600 \mu\text{m}$). Nos casos onde a profundidade de corte é menor ou igual ao raio de ponta da ferramenta ($a_p \leq r_e$), costuma-se utilizar o desgaste de flanco na ponta da ferramenta (VB_C).

De acordo com Costa et al., 2003, o desgaste de cratera é o mais comum que ocorre na superfície de saída da ferramenta e está associado às altas temperaturas geradas na interface cavaco-ferramenta. Conforme a norma ISO 3685, 1993, a profundidade da cratera (KT) pode ser utilizada como uma medida do desgaste da ferramenta e um critério de fim de vida para a mesma. Ademais, pode-se também quantificar a distância do centro da cratera à aresta cortante (KM). Porém, são difíceis de serem quantificados e, por esta razão, VB é mais usado.

Já o desgaste de entalhe acontece de forma combinada nas superfícies de folga e saída da ferramenta e ocorre geralmente no contato das extremidades do cavaco com serrilhado nas bordas (comum em materiais endurecidos) com a ferramenta [Costa et al., 2003]. Contudo, o entalhe não afeta significativamente as propriedades da ferramenta, mas dependendo da intensidade, pode levar a mesma ao colapso.

A Figura 3.3 esquematiza a padronização típica dos desgastes.

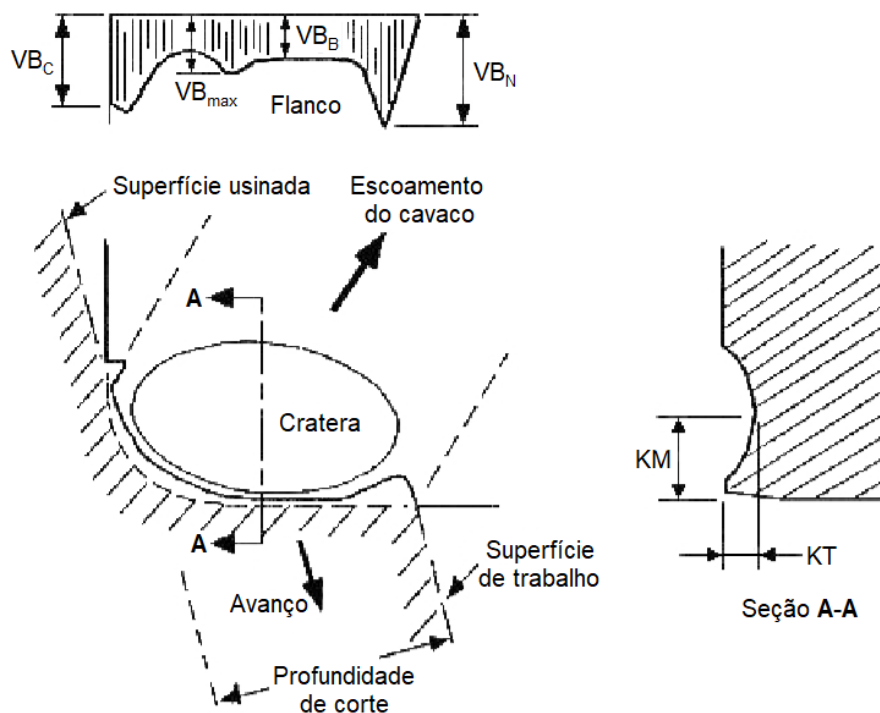


Figura 3.3 – Padrão de desgaste para uma ferramenta de corte [ISO 3685, 1993].

As trincas em uma ferramenta podem ter origem térmica ou mecânica.

As trincas térmicas se originam de bruscas variações da temperatura durante o corte. Durante a usinagem, a região da ferramenta que está em contato com o cavaco é a de maior temperatura. Contudo, nas partes da ferramenta mais afastadas dessa região a temperatura é muito inferior. E logo após atingir esse pico de temperatura, a aresta de corte irá se afastar da zona de contato e iniciar um resfriamento e, assim, manterá um ciclo de aumento e queda da temperatura da aresta durante todo o processo. Essa flutuação cíclica na interface ferramenta-cavaco gera tensões cíclicas na região de corte que resultam em trincas térmicas. Tais trincas propagam-se perpendicularmente à aresta de corte.

Já as trincas mecânicas surgem principalmente devido ao choque mecânico causado pela entrada da aresta de corte na peça. Ao entrar na peça, a ferramenta passa de uma situação de carga zero para a carga total. Em situações em que se tem altas rotações, combinadas com corte interrompido, a ferramenta irá sofrer um grande número de impactos por minuto [Machado et al., 2009].

Lascamentos e quebras acontecem, principalmente, em situações nas quais se tem ferramentas com alta resistência ao desgaste (alta dureza e baixa tenacidade), pois são sensíveis a bruscas solicitações, como podem ocorrer no caso de usinagem de materiais muito duros e/ou com incrustações duras [Ferraresi, 1977].

3.2.2 Mecanismos de Desgaste

Os diversos mecanismos (processos) de falhas em ferramentas de corte agem simultaneamente, de forma que tanto sua causa como seu efeito dificilmente podem ser distinguidos entre si. Todos eles são observados na prática, mas certamente um prevalecerá sobre os demais, dependendo principalmente do material da peça e da ferramenta, da operação de usinagem, das condições de corte, da geometria da ferramenta de corte e o do emprego do meio lubrificante. O conhecimento do mecanismo de desgaste é de grande interesse, pois permite uma seleção criteriosa da ferramenta mais indicada e das condições mais apropriadas de usinagem [Diniz et al, 2013; Machado et al., 2009]. A Figura 3.4 representa a ação desses mecanismos sobre o desgaste total da ferramenta em função do aumento da temperatura de corte.

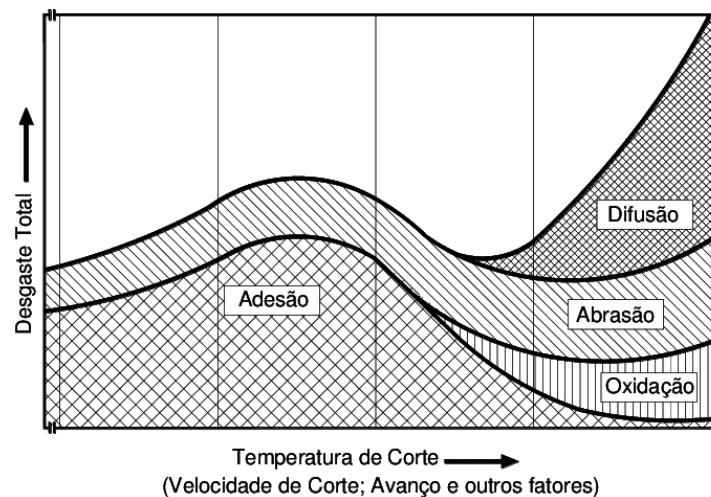


Figura 3.4 – Mecanismos de desgaste [Machado et al., 2009]

Diferentes autores apresentam variações na classificação dos mecanismos de desgastes em ferramentas de corte. Porém, Diniz et al, 2013, e Machado et al., 2009, consideram pelo menos quatro diferentes mecanismos:

- **Abrasão:** ocorre no momento em que há remoção de material de uma superfície por outra superfície ou algum material que se encontre entre elas por atrito. Para isso, é preciso que haja movimento relativo entre as superfícies.
- **Adesão:** provocado pela formação de um extrato metálico resistente no contato entre a ferramenta e o cavaco e/ou peça sob cargas moderadas a baixas velocidades de corte. Isso faz com que partículas do cavaco e/ou peça migrem para a superfície (de saída e/ou folga) da ferramenta gerando a aderência de material.
- **Difusão:** acontece quando há transferência de átomos de um material para outro, sendo altamente dependente da temperatura, tempo e afinidade química entre a ferramenta e material usinado. Esse mecanismo atua tanto na superfície de saída (mais) como na de folga (menos). Haverá um aumento na taxa de desgaste ao se aumentar a velocidade de corte e o avanço, pois assim haverá um aumento na temperatura de corte que é a fonte de energia para esse mecanismo.
- **Oxidação:** acontece na maioria dos metais, principalmente em altas temperaturas e na presença de ar e/ou água. O tungstênio (W) e o cobalto (Co) da ferramenta de corte formam filmes óxidos porosos sobre a ferramenta, que são facilmente removidos pelo atrito,

gerando desgaste. Assim, ferramentas de corte que não contêm Al_2O_3 (óxido de alumínio, duro e resistente) desgastam-se mais facilmente por oxidação. Esse óxido se forma geralmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso de ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe.

3.2.3 Vida da Ferramenta

Machado et al., 2009, definem o tempo de vida de uma ferramenta como “o tempo que uma aresta de corte trabalha efetivamente antes de ser reafiada ou substituída”. Para definir esse tempo de vida, deve-se determinar um critério de fim de vida. Esse critério será escolhido de acordo com as necessidades do processo, podendo ser desgaste muito alto, força de avanço excessiva, acabamento inferior, entre outros.

Normalmente, as arestas de corte se desgastam seguindo uma curva característica, representada pela Figura 3.5. Na ordenada, o desgaste pode ser representado por qualquer um dos parâmetros citados (VB_B , $VB_{máx}$, VB_C , KM ou KT).

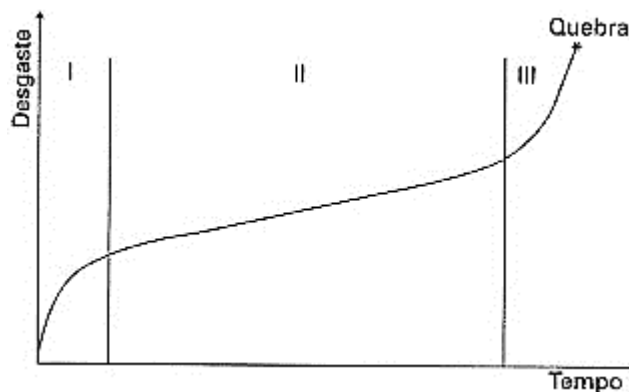


Figura 3.5 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta com o tempo de corte [Machado et al., 2009]

Na evolução do desgaste, podem-se distinguir três estágios:

- **Estágio I:** no início do corte, o desgaste aumenta rapidamente devido à adequação ao sistema tribológico envolvido (acomodação da cunha cortante).
- **Estágio II:** o desgaste se estabiliza e se mantém linear até perto de seu fim de vida; a ferramenta encontra-se totalmente adequada ao processo e os mecanismos de desgaste operam constantemente.
- **Estágio III:** o desgaste aumenta de forma acelerada e promove a quebra da ferramenta em um curto espaço de tempo. Isto acontece porque o desgaste atingiu níveis tão elevados que as temperaturas e as tensões envolvidas poderão promover o colapso da ferramenta.

3.3 Usinagem a Seco e com Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)

Durante o processo de corte em usinagem desenvolve-se uma grande quantidade de calor devido à energia necessária para deformação do cavaco e o atrito entre a ferramenta e a peça e o cavaco e a peça. Com isso, faz-se uso dos fluidos de corte que irão retirar, ou no mínimo diminuir, essa grande quantidade de calor gerada. Para conseguir realizar tais funções, ele deve ser aplicado de forma que chegue o mais próximo possível da aresta de corte nas interfaces ferramenta-peça e ferramenta-cavaco [Machado et al., 2009].

Diniz et al., 2013, dizem que, além de lubrificar e refrigerar o corte, é desejável que algumas vezes o fluido de corte possua algumas outras funções, como retirar o cavaco da região de corte, proteger contra corrosões, prevenção contra a soldagem cavaco-ferramenta, entre outras. Assim, o emprego de fluidos tem como objetivo a melhoria funcional e/ou econômica do processo.

Contudo, com o surgimento de novos materiais para ferramentas e a crescente severidade da legislação ambiental, cada vez mais se procuram alternativas ao uso de fluido. O uso de fluido de corte, mesmo com as vantagens de lubrificação, remoção de cavaco e refrigeração, acarreta custos referentes ao descarte, armazenamento, preparo e controle em serviço. No entanto, em alguns casos, não se consegue eliminar o uso de fluidos de corte, como no caso de usinagem de materiais endurecidos utilizando ferramentas com baixa dureza a quente. Em situações onde o uso de fluido de corte é necessário, comumente adota-se a técnica de redução ou minimização de lubrificantes (MQL) [Diniz et al., 2013].

A técnica MQL consiste, basicamente, na geração de uma névoa composta por ar comprimido e uma mínima quantidade de lubrificante direcionada para a região de corte. De acordo com Quimatic, 2016, a técnica de MQL consegue reduzir em até 50% a temperatura do processo de usinagem em relação à usinagem a seco, além de permitir que as gotículas de óleo lubrificante penetrem nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, reduzindo o atrito nestas interfaces.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Torno CNC Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II (Fig. 4.1), disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS). A máquina possui potência máxima de 23,5 kVA e rotação máxima de 6000 rpm.



Figura 4.1 – Torno CNC Mazak QTN 100-II.

Antes de serem endurecidos a (53 ± 2) HRC, os corpos de prova foram previamente usinados para chegar ao diâmetro de 75 mm e 93 mm, sendo que em uma de suas extremidades há um rebaixo com 51,5 mm de diâmetro e 19,5 mm de comprimento, estando no formato apropriado para posterior fixação no torno CNC Mazak QTN 100-II. Visando reduzir a severidade do impacto entre a ferramenta e o corpo de prova no início do corte, realizou-se um chanfro na extremidade inicial do corpo de prova. Com isso, a ferramenta teve uma entrada mais suave na peça, minimizando a ocorrência de avarias (trincas mecânicas e lascamentos do inserto próximo à aresta de corte). Na Tabela 4.1 são apresentados os principais elementos químicos do aço SAE 4140.

Tabela 4.1 – Principais elementos químicos do aço SAE 4140 (% Massa)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	H	Outros
0,400	0,230	0,850	0,016	0,024	1,01	0,180	0,180	0,013	0,150	1,40	1,09

Foram utilizados dois insertos de metal-duro com revestimento (ISO-P e ISO-S), ambos com geometria triangular e raio de ponta $r_\epsilon = 0,4$ mm.

O inserto ISO-P (TNMG 16 04 04-LC 4315), Figura 4.2a, apresenta substrato composto por um gradiente de grãos finos a grossos de WC e cobertura grossa MT-CVD composta por três camadas (Ti(C,N)+Al₂O₃+TiN). É indicado para tornear aços e ferros fundidos com dureza até 45 HRC. Como características principais, apresenta alta dureza e alta resistência ao desgaste por abrasão (reduz a ocorrência de desgaste de ponta).

O inserto ISO-S (TNMG 16 04 04-SF 1115), Figura 4.2b, possui substrato com grãos ultrafinos de WC e cobertura fina tipo Óxido-PVD de duas camadas (Ti,Al)N+ (Al,Cr)₂O₃. É indicado no torneamento de superligas resistentes ao calor e aços inoxidáveis. As principais características são inércia química e alta resistência ao desgaste de cratera.

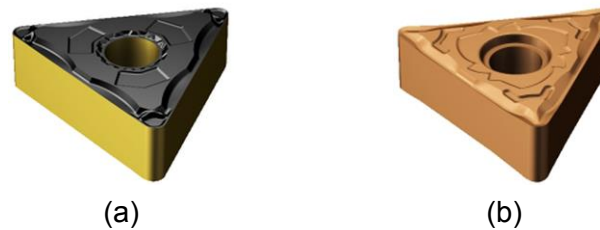


Figura 4.2 – Insertos utilizados nos ensaios: (a) classe ISO-P; (b) classe ISO-S.

Os ensaios em MQL foram realizados aplicando o fluido Quimatic Jet por meio do Nebulizador Quimatic IV com uma vazão regulada de 200 ml/h a uma pressão de 4 bar. O Quimatic Jet caracteriza-se por não possuir solventes ou metais nocivos à natureza, não ataca a pele e evita perda de dureza da ferramenta. A regulagem da vazão foi feita fazendo uso de uma bureta e de um cronômetro; assim, registrou-se o tempo necessário (18 s) para o fluido ocupar o volume de 1 ml da bureta. A pressão foi ajustada diretamente na válvula que se encontra no início da linha de suprimento de ar comprimido do LAUS. Após posicionar o nebulizador no interior do torno, garantiu-se que o bico aspersor estivesse a uma distância de 20 mm e a um ângulo de 45° da ponta da ferramenta.

A Figura 4.3 mostra o sistema experimental, indicando o corpo de prova, o inserto ISO-P e o nebulizador Quimatic IV no interior do Torno CNC Mazak QTN 100-II.

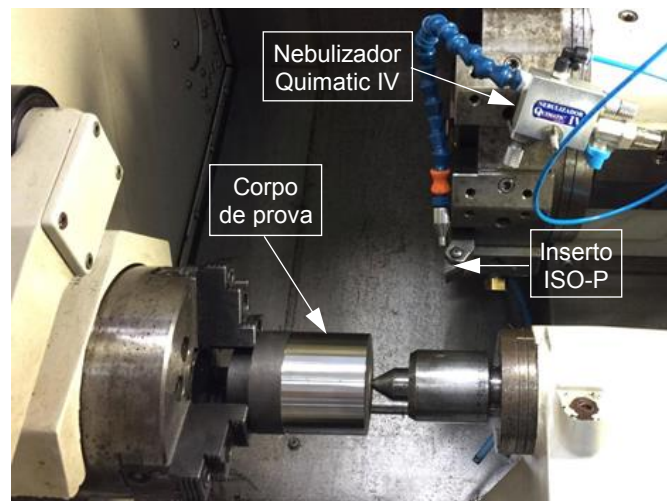







Figura 4.3 – Sistema experimental.

Oito ensaios de fim de vida foram realizados, mantidos constantes o avanço ($f = 0,15$ mm/volta) e a profundidade de corte ($a_p = 0,3$ mm). Como $a_p < r_s$ (0,4 mm), então a largura da marca de desgaste de ponta (VB) foi medida na ponta do inserto (VB_C).

Para cada um dos ensaios foram variados os seguintes parâmetros de entrada: ferramenta, meio lubrificante e velocidade de corte. A combinação desses parâmetros é mostrada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros de entrada utilizados em cada ensaio de vida.

Ensaio	Ferramenta Classe ISO	Meio Lubrirrefrigerante	Velocidade de corte v_c [m/min]
1 	ISO P (LC 4315)	A Seco	120
2 			60
3 		Com MQL	120
4 			60
5 	ISO S (SF 1115)	A Seco	120
6 			60
7 		Com MQL	120
8 			60

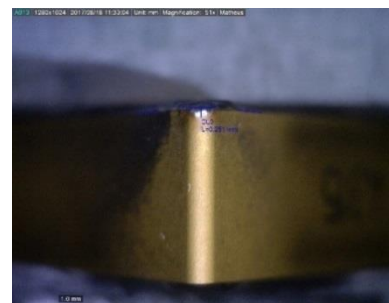
Para cada uma dessas oito combinações de parâmetros foi utilizado um corpo de prova de aço SAE 4140 endurecido e uma aresta de corte diferente do inserto (que tem seis arestas). Assim como em Costa et al., 2003, Oliveira et al., 2007, e Pereira, 2006, foram estabelecidos dois critérios diferentes para o término de cada ensaio. O primeiro seria o desgaste de ponta (VB_C) atingir um valor igual ou superior a 300 μm ; o segundo, um comprimento usinado de 3000 mm ou 50 passes de 60 mm (limitações dimensionais do corpo de prova).

Antes de iniciar os testes de avaliação com as ferramentas para as análises, usou-se, para o primeiro passe em cada corpo de prova, um inserto de metal-duro ISO-H, já utilizado em outros ensaios, com a mesma geometria das que seriam analisadas. Isso teve como objetivo remover a carepa da camada externa (resíduo da têmpera) e referenciar a máquina em relação ao corpo de prova, para, assim, garantir que o primeiro passe seja na profundidade de corte correta. Os passes posteriores foram realizados com as ferramentas ISO-S e ISO-P.

Para medir a largura da marca de desgaste na ponta dos insertos (VB_C) foi utilizado o microscópio digital USB Dino-Lite modelo AM-413ZT, o qual esteve conectado a um computador com software dedicado Dino Capture 2.0, permitindo a visualização da imagem adquirida pelo microscópio. Com esse software é possível editar as imagens adquiridas permitindo, junto com os recursos oferecidos, efetuar a medição da largura da marca de desgaste. A Figura 4.4a mostra o microscópio usado e a Figura 4.4b um exemplo de medição de VB_C na ponta no inserto.



(a)



(b)

Figura 4.4 – Sistema de aquisição de imagens: (a) microscópio digital Dino-Lite AM-413ZT; (b) imagem via Dino Capture 2.0.

Para que se pudesse ter uma referência da evolução do desgaste que a ferramenta iria sofrer depois de usada, registrou-se a condição inicial dos insertos traçando duas linhas de referência em uma aresta nova. Tais linhas serviram para posicionar o inserto na mesma posição em todas as vezes que o desgaste foi mensurado. Uma terceira linha foi traçada na ponta da ferramenta, e dela feita a medição de VB_C .

Inicialmente, realizou-se a medição de VB_C nas pontas dos insertos a cada passe realizado (60 mm de comprimento usinado), principalmente pelo fato de o inserto ISO-P

apresentar um desgaste bastante acelerado. Com um desgaste bem mais lento, a partir do 6º passe, o inserto ISO-S foi verificado a cada 5 passes (ou 300 mm de comprimento usinado).

Após o término dos ensaios, os insertos passaram por um processo de decapagem química em uma solução de HCl (ácido clorídrico a 10%), o ISO-S por duas horas e o ISO-P por quatro horas, para retirar o material aderido às superfícies dos mesmos. Depois, analisou-se qualitativamente a face, a ponta e o flanco das ferramentas para garantir se não havia mais material aderido e a qualidade dessas superfícies.

Em seguida, os insertos foram avaliados quanto aos mecanismos de desgastes atuantes em cada ferramenta com uso do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) JEOL modelo JSM-6060, disponível no Centro de Microscopia e Microanálise (CMM-UFRGS). A Figura 4.5 mostra o equipamento utilizado.



Figura 4.5 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Por serem condutores, os insertos não precisaram passar pelo processo de metalização, sendo apenas necessário realizar uma limpeza das amostras com acetona. Em seguida, ambos foram posicionados lado a lado no suporte do MEV, com o objetivo de adquirir o maior número possível de imagens devido à demora no posicionamento dos insertos. Assim, calibrou-se o microscópio com uma voltagem de 15 kV e uma ampliação de 200x.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados a seguir os gráficos comparativos de desempenho das ferramentas classe ISO-P e ISO-S, os efeitos do corte a seco e com MQL sobre a vida da ferramenta e a análise dos estados finais dos insertos a partir de imagens captadas pelo microscópio digital óptico (ampliação 50x) e pelo microscópio eletrônico de varredura (200x).

5.1 Análise da Vida das Ferramentas

A Figura 5.1 mostra os gráficos dos desgastes de ponta (VB_C) obtidos em função do comprimento usinado para ambas as classes, e a Figura 5.2, os gráficos de VB_C em função do tempo de corte para ambas as velocidades de corte empregadas, conforme os dados da Tabela 4.1. Os Ensaios 1, 2, 5 e 6 foram realizados a seco e os Ensaios 3, 4, 7 e 8 com MQL.

Como mostrado por Pereira, 2006, menor velocidade de corte combinada com MQL aumenta expressivamente o tempo de vida da ferramenta ISO-P na usinagem do aço SAE 4140 endurecido a (53 ± 2) HRC. Isso pode ser visto na Figura 5.1a, em que o Ensaio 4 foi o único a alcançar o comprimento usinado de 3000 mm (ou 50 passes) sem a largura de desgaste atingir $300 \mu\text{m}$. O valor final mensurado foi $VB_C = 175 \mu\text{m}$. Isso se deve à ação lubrificante do MQL que penetra nas interfaces peça-ferramenta e ferramenta-cavaco, reduzindo o atrito e a temperatura na região de corte e, conseqüentemente, aumentando a vida da ferramenta, como constatado por Bonfá, 2013, e Paula, 2012.

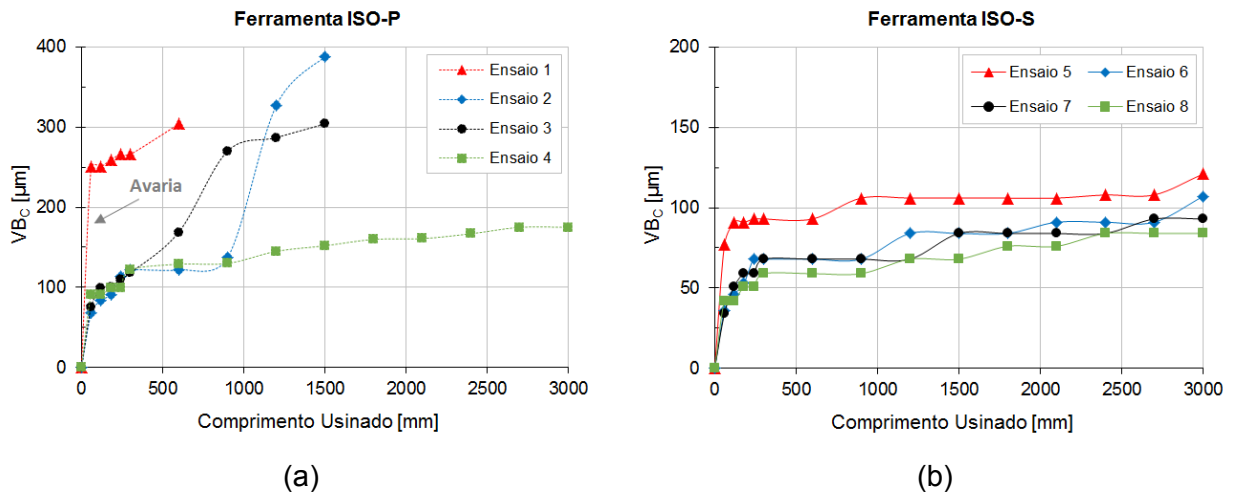


Figura 5.1 – VB_C versus comprimento usinado: (a) inserto ISO-P; (b) inserto ISO-S.

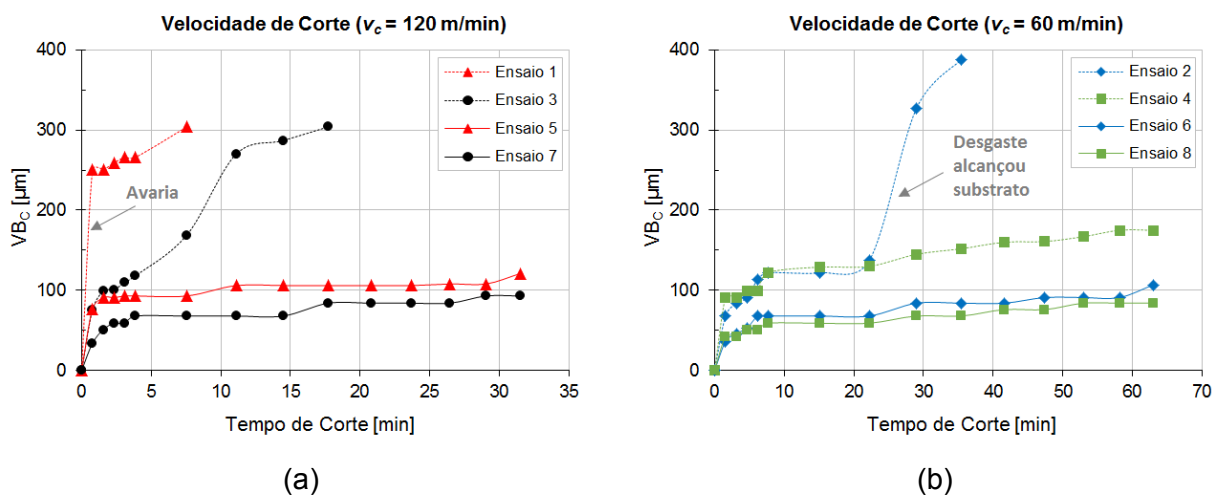


Figura 5.2 – VB_C versus tempo de corte: (a) $v_c = 120$ m/min; (b) $v_c = 60$ m/min.

Nos demais ensaios com o inserto ISO-P, a ferramenta ultrapassou os 300 μm de desgaste de ponta antes de atingir os 50 passes. Ao observar a situação de corte a seco aplicando a maior velocidade de corte (Ensaio 1), observa-se que o inserto quase atingiu o valor máximo logo no primeiro passe. Possivelmente houve uma falha prematura da ferramenta durante o passe que acelerou o desgaste. Por se tratar de uma ferramenta com revestimento MT-CVD de baixa tenacidade, é provável que uma ou mais camadas da cobertura tenham sido arrancadas (avaria) pela severidade das condições de usinagem (efeitos térmicos e mecânicos), acelerando o desgaste por abrasão na ponta do inserto. O que diferencia o Ensaio 1 do Ensaio 3 é a presença de MQL, que retardou as implicações causadas pelas condições severas de usinagem, visto a capacidade refrigerante do MQL minimizar os efeitos térmicos. Conclusão análoga pode ser citada para as diferenças entre os Ensaios 2 e 4. O Ensaio 2, a seco, também apresenta falha precoce da ferramenta; no entanto, como a velocidade de corte é menor que no Ensaio 1, os efeitos térmicos também são menores, mas os efeitos mecânicos permanecem pela baixa tenacidade do inserto. Por isso que essa falha ocorreu entre os passes 15 e 20 e não no primeiro passe como no Ensaio 1.

Diferente da ferramenta ISO-P, em todos os ensaios a ferramenta ISO-S chegou aos 3000 mm de comprimento usinado (50 passes). Além disso, o maior valor de desgaste de ponta mensurado ao término de cada ensaio foi $VB_C = 121 \mu\text{m}$ (Ensaio 5) e o menor foi $VB_C = 84 \mu\text{m}$ (Ensaio 8). A hipótese que comprova a maior eficácia do inserto ISO-S são suas características: substrato com grãos ultrafinos de WC e cobertura Óxido-PVD com inerência

química (evita difusão). Isso tudo combinado a uma maior tenacidade – tensões compressivas, as quais aumentam a resistência a efeitos térmicos e mecânicos – em comparação à ISO-P – tensões trativas, as quais geram avarias na ferramenta precocemente – como mostrado por Chinchankar e Choudhury, 2013. Observando a Figura 5.2, percebe-se uma sutil contribuição do MQL em relação ao corte a seco. Ao comparar os Ensaio 5 e 7 ($v_c = 120$ m/min), têm-se menores valores de desgaste no Ensaio 7 (com MQL); o mesmo vale para os Ensaio 6 e 8 ($v_c = 60$ m/min), em que o Ensaio 8 (com MQL) gera menores valores de VB_C ao longo do tempo de corte. Observa-se que as diferenças são maiores para a situação com maior velocidade de corte, mostrando que o MQL reduziu bastante os efeitos térmicos gerados pela severidade do processo.

5.2 Análise dos Desgastes das Ferramentas

A Figura 5.3 mostra as imagens obtidas por microscopia óptica do estado final da ponta da ferramenta classe ISO-P e a Figura 5.4, as da ferramenta ISO-S, conforme Tabela 4.1.

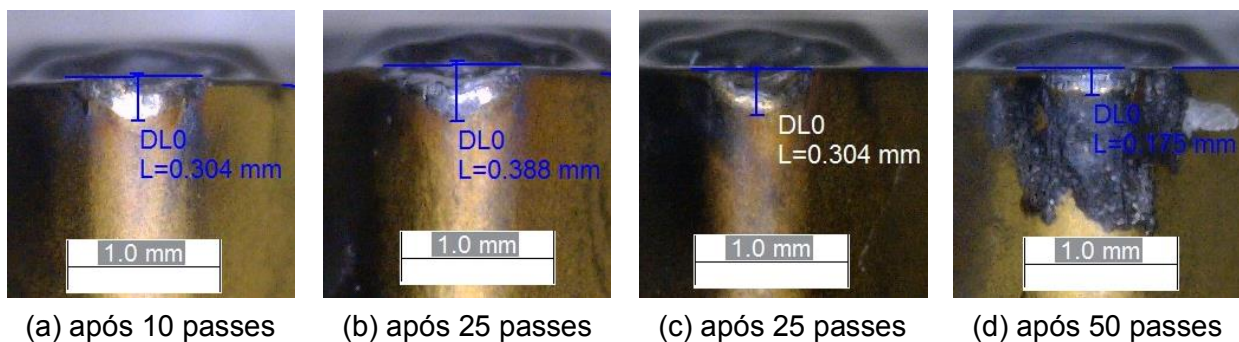


Figura 5.3 – Imagens da ponta do inserto obtidas por microscopia óptica dos estados da ferramenta ISO-P ao fim de vida: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3; (d) Ensaio 4

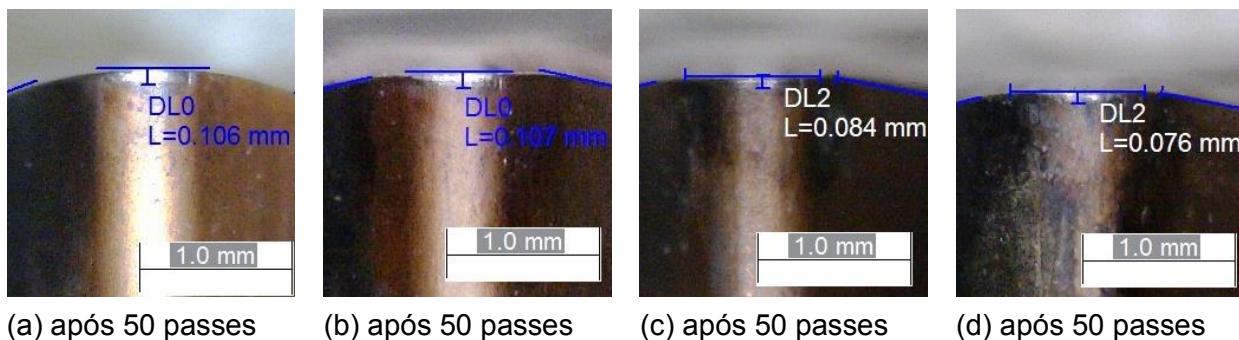


Figura 5.4 – Imagens da ponta do inserto obtidas por microscopia óptica dos estados da ferramenta ISO-S ao fim de vida: (a) Ensaio 5; (b) Ensaio 6; (c) Ensaio 7; (d) Ensaio 8

Apenas no Ensaio 4 a ferramenta ISO-P conseguiu atingir o comprimento máximo de 3000 mm, apresentando um desgaste máximo de ponta $VB_C = 175$ μm , reforçando o que foi dito anteriormente sobre os efeitos benéficos que aplicação de MQL e redução de velocidade de corte têm sobre o desgaste da ferramenta. Fica visível, também, que a cobertura da ferramenta foi arrancada principalmente nos Ensaio 1, 2 e 3, em que tal efeito foi tão severo que gerou uma fratura na ferramenta. Já no Ensaio 4 é possível perceber que o desgaste foi causado por abrasão mecânica (ver Fig. 3.3), gerando o desgaste de ponta (VB_C). Deve-se ressaltar, nesse mesmo ensaio, que a camada escura presente na ponta da ferramenta consiste na formação de um óxido devido ao efeito da queima do lubrificante, posteriormente, removido com a decapagem química com HCl. Provavelmente isso não ocorreu no Ensaio 3 devido à maior velocidade de corte, que pode ter impedido uma melhor penetração do fluido entre a ferramenta e a peça. Talvez uma redução da vazão de MQL possa solucionar isso.

Mesmo em condições severas de usinagem, o inserto ISO-S conseguiu manter um desgaste máximo de ponta ($VB_C = 121 \mu\text{m}$) menor que o mínimo sofrido pela ferramenta ISO-P ($VB_C = 175 \mu\text{m}$) após um comprimento máximo de 3000 mm. Ficou evidenciado em todos os ensaios o desgaste de ponta por abrasão.

A Figura 5.5 mostra as imagens obtidas por MEV do estado final da ponta da ferramenta classe ISO-P e a Figura 5.6 as da ferramenta ISO-S, conforme os dados da Tabela 4.1. Nas imagens, considera-se 1 – abrasão, 2 – delaminação da cobertura, 3 – entalhe.

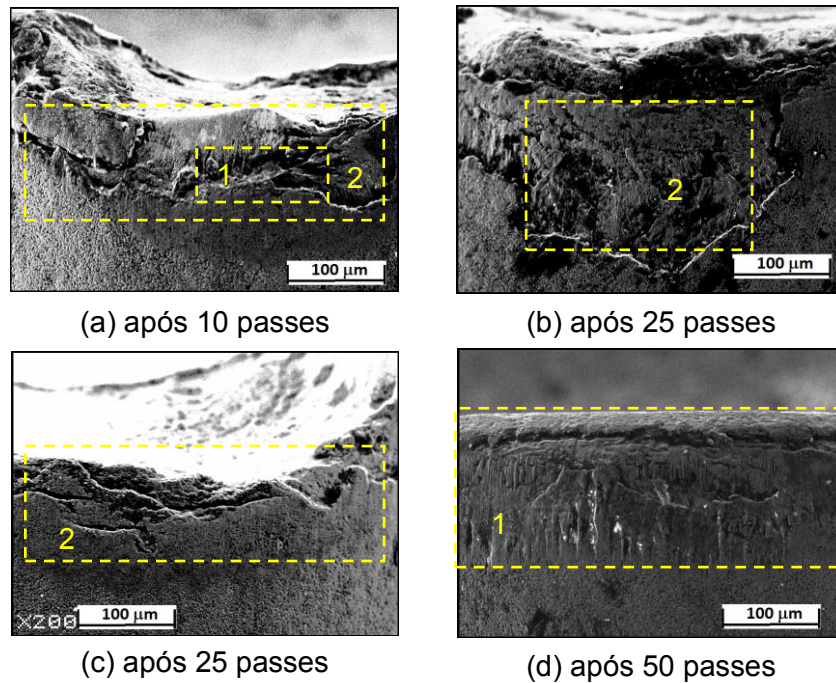


Figura 5.5 – Imagens obtidas por MEV dos estados da ferramenta ISO-P ao fim de vida: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3; (d) Ensaio 4

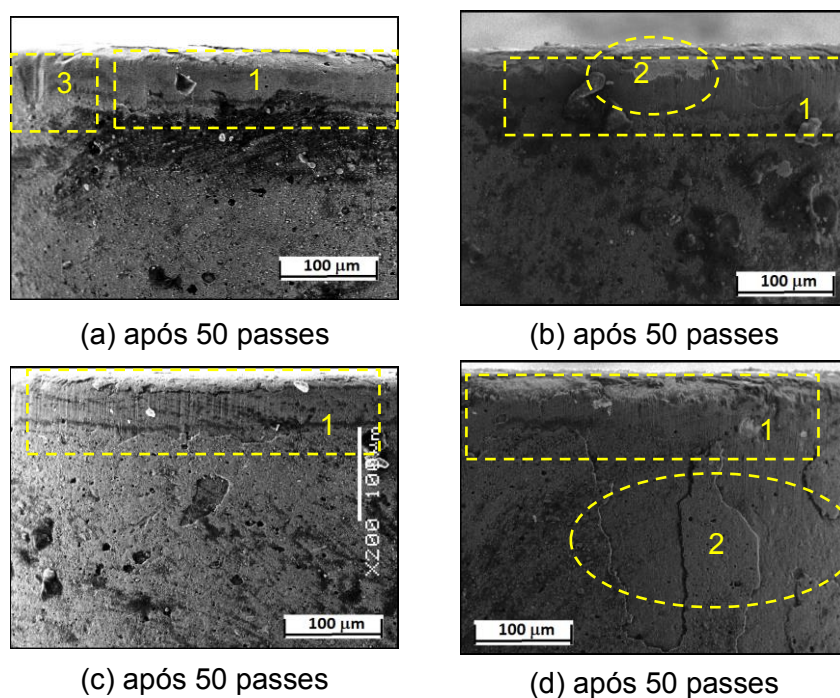


Figura 5.6 – Imagens obtidas por MEV dos estados da ferramenta ISO-S ao fim de vida: (a) Ensaio 5; (b) Ensaio 6; (c) Ensaio 7; (d) Ensaio 8

Analisando as imagens da Figura 5.5, novamente é mostrado como o uso de MQL em baixa velocidade de corte (Ensaio 4) influencia na marca de desgaste deixada na ferramenta. A severidade dos parâmetros para essa ferramenta fica mais evidente, visto a aresta ter sofrido abrasão mecânica tão forte ao ponto de arrancar não apenas a cobertura, mas parte do substrato, formando as visíveis crateras mostradas nas imagens. Nota-se, também, que há em todas as arestas uma predominância do arranque do material da ferramenta, reforçando o quão severos os parâmetros selecionados foram para a ferramenta ISO-P.

Não se consegue diferenciar claramente os efeitos dos parâmetros utilizados sobre as imagens obtidas para a ferramenta ISO-S. Porém, é notória a diferença entre os estados finais das ferramentas ISO-S e ISO-P. Na primeira tem-se uma predominância do mecanismo de abrasão e em segundo plano a delaminação da cobertura. Observa-se também a presença de um pequeno entalhe (Fig. 5.6a) indicando a ação do mecanismo de oxidação.

Vale dizer que não foi possível fazer uma análise mais criteriosa dos mecanismos de desgastes das ferramentas (como caracterizar o mecanismo de adesão) pela não disponibilidade do Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no momento das medições no Centro de Microscopia e Microanálise da UFRGS.

6 CONCLUSÕES

Ao realizar ensaios de vida de ferramentas de metal-duro classes ISO-P (TNMG 16 04 04 LC 4315) e ISO-S (TNMG 16 04 04 SF 1115) no torneamento do aço SAE 4140 endurecido a (53 ± 2) HRC nas situações de corte a seco e com MQL (0,2 l/h) foram feitas análises comparativas das vidas, dos desgastes nas pontas das ferramentas (VB_C) e dos mecanismos de desgaste, cujas principais conclusões podem ser citadas:

- A ferramenta ISO-P (MT-CVD) mostrou-se capaz de usinar o SAE 4140 endurecido apenas na condição com menor velocidade de corte $v_c = 60$ m/min e aplicando MQL. Nas demais condições, a ferramenta ultrapassou $VB_C = 300$ μ m. Isso demonstra a capacidade de o MQL atenuar os efeitos térmicos causados pela severidade do processo. Já os efeitos mecânicos do processo foram fundamentais para a aceleração da falha da ferramenta devido a sua baixa tenacidade.
- Após 3000 mm (50 passes), o valor final de desgaste de ponta do inserto ISO-P obtido na condição com $v_c = 60$ m/min e MQL foi $VB_C = 175$ μ m.
- A ferramenta ISO-S (Óxido-PVD), nos parâmetros utilizados, mostrou ser adequada para usinar o SAE 4140 endurecido mantendo um baixo valor de desgaste de ponta (VB_C) mesmo em condições severas. Além disso, o MQL foi capaz de diminuir os efeitos térmicos e a composição da ferramenta (grãos ultrafinos e cobertura PVD) os efeitos mecânicos.
- Após 3000 mm (50 passes), o valor final de desgaste de ponta do inserto ISO-S obtido na condição menos severa ($v_c = 60$ m/min e MQL) foi $VB_C = 84$ μ m; para a condição mais severa ($v_c = 120$ m/min e corte a seco), $VB_C = 121$ μ m.

Como trabalho futuro, pretende-se comparar o desempenho da ferramenta ISO-S (grãos ultrafinos) ao de uma ferramenta de cerâmica mista ou de CBN na usinagem deste material.

REFERÊNCIAS

Bonandi, M., 2012, **Estudo das condições de corte no torneamento do aço AISI M4 endurecido, utilizando a metodologia de projeto de experimentos**. 123f. Dissertação (Mestrado) em Engenharia de Produção, UNINOVE: São Paulo, SP.

Bonfá, M. M., 2013, **Torneamento do aço endurecido AISI D6 utilizando mínima quantidade de fluido de corte**. 77 f. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, UFU: Uberlândia, MG.

Chinchanikar, S., Choudhury, S., 2013, **Wear behaviors of single-layer and multi-layer coated carbide inserts in high speed machining of hardened AISI 4340 steel**, Journal of mechanical science and technology, v.27, n.5, p.1451-1459.

Costa, L. A., Sales, W. F., Santos, S. C., 2003, **Torneamento de matrizes de aço AISI H10 para trabalho a quente com ferramentas de metal duro**, II COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 18-21 maio, Uberlândia, MG, 8p.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., 2013, **Tecnologia de usinagem de materiais**, 8.ed., São Paulo: Artliber, 272p.

Ferraresi, D., 1977, **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, São Paulo: Edgar Blücher, 800p.

Teixeira Filho, F., Ferreira, J. R., Santos, J. N., Diniz, A. E., 2001, **Influência da refrigeração no torneamento do aço ABNT 52100 temperado**, I COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 02-04 abril, Curitiba, PR, 8p.

Galoppi, G. S., Filho, M. S., Batalha, G. F., 2005, **Torneamento de aço 100Cr6 temperado com inserto de CBN com e sem cobertura**, III COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 12-15 abril, Joinville, SC, 10p.

ISO 3685, 1993, **Tool-life testing with single point turning tools**, 2.ed., Genève: International Organization for Standardization, 48p.

Korn, D., 2004, **Hard turning might not be as hard as you think**, Modern Machine Shop. Disponível em www.mmsonline.com/articles/hard-turning-might-not-be-as-hard-as-you-think.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B., 2009, **Teoria da Usinagem dos Materiais**, São Paulo: Edgar Blücher, 247p.

Matsumoto, H., Diniz, A. E., 2000, **Torneamento de aços endurecidos utilizando ferramentas cerâmicas**, I CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 07-11 agosto, Natal, RN, 8p.

Oliveira, V. V., Santos, M. T., Beltrão, P. A. C., Andrade, C. L. F., 2007, **Análise do comportamento de desgaste de ferramentas de corte no torneamento de ferro fundido nodular austemperado**, IV COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 15-18 abril, Águas de São Pedro, SP, 9p.

Paula, A. R., 2012, **Estudo da usinabilidade do aço ABNT 4340 endurecido com alta velocidade de corte sob diferentes condições de lubrificação**, 154 f. Dissertação (mestrado) em Engenharia de Materiais, CEFET-MG, Minas Gérias,

Pereira, J. C. C., 2006, **Determinação de modelos de vida de ferramenta e rugosidade no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido utilizando a metodologia da superfície de resposta (DOE)**, 140 f. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, UNIFEI: Itajubá, MG.

Quimatic, 2016, **Técnica MQL reduz em até 50% temperatura nos processos de usinagem**. Quimatic Tapmatic, Disponível em www.quimatic.com.br/blog/2016/06/tecnica-mql-reduz-em-ate-50-temperatura-nos-processos-de-usinagem/

Sandvik, 2012, **Manual Técnico de Usinagem**, Parte A – Torneamento Geral. São Paulo: Sandvik Coromant, p.A40-A45.

Sandvik, 2017, **Desgaste de ferramenta**. Disponível em https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear/