

JANAÍNA APARECIDA PEREIRA

**ANÁLISE DO EFEITO DA SEQUÊNCIA DE ARESTAS
E DO NÚMERO DE INTERRUPÇÕES PARA MEDIR
DESGASTE NA VIDA DA FERRAMENTA NO
TORNEAMENTO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2009

JANAÍNA APARECIDA PEREIRA

**ANÁLISE DO EFEITO DA SEQUÊNCIA DE ARESTAS E DO NÚMERO
DE INTERRUPTÕES PARA MEDIR DESGASTE NA VIDA DA
FERRAMENTA NO TORNEAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

Uberlândia - MG

2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- P436a Pereira, Janaína Aparecida, 1978-
Análise do efeito da seqüência de arestas e do número de interrupções para medir desgaste na vida da ferramenta no torneamento / Janaína Aparecida Pereira. - 2009.
125 f. : il.
- Orientador: Álisson Rocha Machado.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
- Inclui bibliografia.
1. Usinagem - Teses. 2. Ferramentas para cortar metais - Teses.
I. Machado, Álisson Rocha, 1956- II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
III. Título.

CDU: 621.9

JANAÍNA APARECIDA PEREIRA

**ANÁLISE DO EFEITO DA SEQUÊNCIA DE ARESTAS E DO NÚMERO
DE INTERRUPÇÕES PARA MEDIR DESGASTE NA VIDA DA
FERRAMENTA NO TORNEAMENTO**

Dissertação **APROVADA** pelo Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos
de Fabricação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Álisson Rocha Machado – UFU - Orientador

Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo - UFU

Prof. Dr. Durval Uchoas Braga - UFSJ

Prof. Dr. Jalon de Moraes Vieira – UFJF

Uberlândia, outubro de 2009

Aos meus pais,
ao meu irmão.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha família. A Minha mãe Dirce, sinônimo de doçura, fé, dignidade e sabedoria. Ao meu pai Martinho, exemplo de força de vontade. Ao meu irmão Marcos Vinícius, exemplo profissional e de determinação.

Ao Prof. Dr. Álisson Rocha Machado pelo incentivo, suporte, orientação, dedicação e atenção durante a realização deste trabalho de mestrado.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de realizar este curso.

À Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem - LEPU pela infra-estrutura essencial à realização deste trabalho de mestrado.

A todos os colegas membros do LEPU, em especial aos professores Fabio de Freitas Lima, Éder Silva Costa, Márcio Bacci da Silva.

Ao aluno de iniciação científica Sérgio Abrão Retes Júnior.

Ao responsável pelo nosso Bloco Cláudio Gomes do Nascimento.

Aos técnicos: Reginaldo F. Souza, Lázaro H. A. Vieira, Eurípedes B. Alves e Ângela M. S. Andrade pelo apoio na parte experimental.

Aos demais professores do Programa de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, em especial ao professor Marcus Duarte.

À empresa Aços Villares S.A. pelo material disponibilizado para a execução dos testes.

A CAPES, à FAPEMIG, ao CNPq e ao IFM pelo suporte financeiro.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho em especial ao meu amigo de hoje e sempre Douglas Bezerra de Araújo.

Ao querido professor Marcos Antônio de Souza Barrozo, pela valiosa ajuda no tratamento dos dados, pelas palavras de incentivo e pela paciência com que sempre me atendeu.

PEREIRA, J. A. **Análise do Efeito da Seqüência de Arestas e do Número de Interrupções para Medir Desgaste na Vida da Ferramenta no Torneamento.** 2009. 124 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia

RESUMO

Especialistas em usinagem se deparam com uma questão na utilização de insertos intercambiáveis: a utilização de uma aresta do inserto afeta o desempenho das demais arestas? Alguns desses especialistas afirmam que, em ferramentas quadradas, por exemplo, a seqüência das arestas utilizadas pode afetar o resultado final do teste de vida. A justificativa seria a de que uma aresta já desgastada afetaria o desenvolvimento do desgaste da aresta consecutiva, sendo, portanto, aconselhável a utilização de apenas as arestas diagonais, já que estas sofreriam menor interferência com relação ao desgaste. Baseados nesta premissa e no fato de que não há evidências científicas para confirmar esta hipótese foram testados insertos de metal duro quadrados, com oito arestas, avaliando a vida destes insertos, no torneamento de um aço microligado DIN 38MnSiVS5, fazendo-se combinações de rodízios das arestas utilizadas para verificar esta possível influência. Tanto o efeito da seqüência de testes em arestas de uma mesma face, como o efeito da seqüência de testes em faces opostas foram verificados, ou seja, foram utilizadas arestas adjacentes e diagonais, superiores e inferiores. Durante os testes foi monitorado o desgaste de flanco escolhido como critério de fim de vida. Foram feitas réplicas dos experimentos e os dados obtidos foram analisados com o auxílio do software Statistica 7.0 através da ferramenta diferença entre médias, com um nível de significância de 5%. O trabalho conta também com uma segunda etapa de execução de testes onde o objetivo é verificar e comparar a influência do número de paradas para se medir o desgaste na vida da ferramenta. Os resultados obtidos nesta investigação mostram que, estatisticamente, não se pode afirmar que o desgaste de uma aresta afeta o desenvolvimento do desgaste na aresta adjacente a ela, ou seja, indicam que a seqüência de utilização das arestas não exerce influência na vida de ferramentas de corte quadradas. Entretanto, deve-se citar que foi observada uma grande dispersão nos resultados investigados. Os resultados da segunda etapa da investigação mostraram-se influentes na vida da ferramenta, ou seja, o desgaste influencia o desenvolvimento do desgaste e, conseqüentemente, a vida da ferramenta quadrada.

Palavras-chave: *vida de ferramenta, desgaste de ferramenta de corte, torneamento, insertos de metal duro, seqüência de uso de arestas cortantes.*

PEREIRA, J. A. **Analysis of the Effect of the Sequence of Edges and Number of Interruptions to Measure Wear on Tool Life in Turning.** 2009. 124 f. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

ABSTRACT

Machining experts sometimes come across with a question when using tool tips inserts: The use of one of the edges of an insert affects the performance of the others? Some of them comment that in squares inserts, for instance, the sequence of the tool edges used could affect their lives when machining. The reason for this is that worn edges would adversely affect the wear progress in the next adjacent edges. In order to avoid this, it is recommendable to index only the diagonal sequence of the cutting edges. Based on this hypothesis and because there is no scientific evidence to support it, squared carbide inserts with negative rake angle with eight edges were tested in turning of a microalloyed (HSLA) DIN 38MnSiVS5 steel. Tests were performed using all the possible edges sequences of one tool face in order to verify the possible influences in the tool edge lives. After using the upper face edges, the bottom face edges of the inserts were also tested. Tool flank wear was monitored during machining, criterion chosen as end of life. Replicas were made and the data were analyzed using the software Statistica 7.0 by differences between means with a significance level of 5%. The work also has a second phase of testing where the objective is to verify and compare the influence of the number of stops to measure the wear on tool life. The results showed that, statistically, it cannot be said that the wear of an edge affects the development of the wear, once therefore its life, on the adjacent edge of a square insert, i.e., they showed that the sequence of use of the edges does not influence the tool life of square inserts. However, one should mention that there was a wide dispersion in the results investigated. The results of the second phase of the research showed influential in the tool life. This means that the number of stops conducted to measure the wear influences the development of wear and consequently the tool life of square inserts.

Keywords: *tool life, tool wear, turning, cemented carbide inserts, sequence of indexable tool edges.*

SIMBOLOGIA

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas
A.C – Antes de Cristo
ap – profundidade de corte
CNC – Comando numérico computadorizado
CVD – Chemical vapour deposition
DIN – Instituto alemão de normas
f – avanço de corte
F – Distribuição F de Fisher e Snedecor
 F_{cal} – F calculado
HV – Dureza Vickers
ISO – Organização internacional de padronização
KT – Desgaste de cratera
KM – Distancia da cratera ao gume
L – Comprimento útil do corpo de prova
MQF – Mínima quantidade de fluido
QMT – Quadrado médio de tratamentos
QMR – Quadrado médio de resíduos
 r_ϵ - raio de quina
 VB_B – Desgaste de flanco médio
 $VB_{Bmáx}$ – Desgaste de flanco máximo
 VB_c – Desgaste de entalhe na aresta secundária de corte
 VB_n – Desgaste de entalhe
 V_c – Velocidade de corte
 α_0 – ângulo de folga
 ϵ_r - ângulo de ponta
 χ_r - ângulo de posição
 λ_s - ângulo de inclinação
 γ_0 – ângulo de saída

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	13
INTRODUÇÃO	13
CAPITULO II	7
REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	7
2.1. Produção de ferramentas de corte.....	7
2.1.1. Origem e evolução.....	7
2.2. Ferramentas intercambiáveis.....	10
2.2.1. <i>Origem e evolução histórica</i>	10
2.2.2. <i>Tipos e formatos de insertos</i>	12
2.2.3. <i>Tipos de fixação</i>	15
2.2.4. Vantagens e deficiências	16
2.3 Ferramentas de metal duro.....	19
2.3.1 <i>Classificação</i>	19
2.3.2 <i>Produção de ferramentas de metal duro</i>	21
2.3.3. <i>Aplicações</i>	23
2.4. Desgaste e avarias das ferramentas de corte.....	25
2.4.1 Desgaste	25
2.4.2. <i>Avarias</i>	29
2.5. Os fatores que influenciam a vida da ferramenta.....	30
2.5.1 <i>Com relação ao material da peça</i>	31
2.5.2 <i>Com relação ao processo de usinagem</i>	35

2.5.3 Com relação ao fluido de corte.....	36
2.5.4 Com relação à ferramenta de corte.....	38
2.5.5. Material da ferramenta.....	41
2.5.6 Formato do inserto.....	42
2.6. Usinagem de metais.....	43
2.6.1. Ensaios de usinabilidade.....	44
2.7. Intercambio de arestas.....	46
2.8. Ferramentas estatísticas.....	47
2.8.1. Considerações sobre média, desvio padrão e variância.....	48
2.8.2. Comparação entre dois tratamentos.....	49
CAPÍTULO III.....	55
METODOLOGIA.....	55
3.1. Procedimento Experimental.....	55
3.1.1 Material utilizado.....	55
3.1.2 Equipamentos utilizados nos ensaios de usinagem.....	58
3.1.3. Metodologia utilizada nos testes experimentais.....	62
3.1.4 Critério de fim de vida.....	64
3.1.5 Seqüência de aresta para realização dos testes da primeira etapa.....	64
CAPÍTULO IV.....	67
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
4.1 Primeira etapa dos experimentos, $ap = 2,0$ mm.....	67
4.1.1 Comparação entre arestas consecutivas superiores.....	74
4.1.2 Comparação entre arestas consecutivas inferiores.....	75
4.1.3 Comparação entre as arestas diagonais.....	76

4.1.4 Comparação entre arestas superiores e inferiores.....	77
4.1.5 Evolução do desgaste nos testes com $ap = 2,0$ mm	79
4.2 Primeira etapa dos experimentos, $ap = 4,0$ mm.....	81
4.2.1 Comparação entre arestas consecutivas superiores, $ap = 4,0$ mm	91
4.2.2 Comparação entre arestas consecutivas inferiores, $ap = 4,0$ mm	92
4.2.3 Comparação entre as arestas diagonais, $ap = 4,0$ mm	93
4.2.4 Comparação entre arestas superiores e inferiores, $ap = 4,0$ mm	94
4.2.5 Evolução do desgaste nos testes com $ap = 4,0$ mm	96
4.3. Segunda etapa dos experimentos	99
CAPÍTULO V.....	104
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
5.1. Conclusões.....	104
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	105
CAPÍTULO VI.....	107
REFERÊNCIAS	107

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Analisar as ferramentas, notadamente no que diz respeito ao seu tempo de vida é essencial para compreender como se processa a sua capacidade de corte em determinado espaço de tempo. Neste contexto, percebe-se pela literatura existente um amplo arcabouço teórico sobre as ferramentas e o seu ciclo de vida.

A título de exemplificação citam-se os apontamentos de Ferraresi (1977) em relação a essa temática. Nas palavras do autor, a vida de uma ferramenta depende do tempo em que ela trabalha, bem como a sua capacidade de corte à medida que ocorre o desgaste da mesma. O autor chama a atenção para o fato de ser necessário, neste processo, de se avaliar a dedução do tempo passivo na capacidade de corte da ferramenta.

Outra definição do mesmo autor diz respeito ao torneamento. Para este processo, o autor assim preleciona: Ferraresi (1977) *“torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas”*. Continuando a sua explanação o autor explica que *“a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo”*.

Uma breve análise sobre a história e trajetória das ferramentas de corte, mostra que na era primitiva, por exemplo, poucas eram as ferramentas que o homem utilizava para garantir a sua sobrevivência e de sua prole. Segundo observações de Marcondes (1990), o homem primitivo era frágil, porque os instrumentos de subsistência e defesa do corpo

humano pouco ou nada podiam contra os ataques de animais e as vicissitudes da natureza. Porém, tudo indica que essa aparente fragilidade tenha feito com que o homem, nas palavras de Marcondes (1990) *“tenha conquistado sua razão de ser HOMEM, pois foi ele o único ser vivente que percebeu a necessidade de adicionar recursos e de buscar soluções”*.

Neste processo, o homem chegou a uma condição mais evoluída a partir do momento que começou a criar novas formas e matérias-primas, através de ferramentas rudimentares, para não apenas sobreviver, como também, complementar a sua fragilidade.

Na trajetória histórica da criação de ferramentas e sua evolução ao longo dos séculos é possível deduzir que, segundo afirma Gordon Childe apud Marcondes (1990) a cooperação entre os olhos e as mãos do homem foram decisivos na criação da mais rudimentar ferramenta até os equipamentos mais complexos.

Ainda, na história da humanidade é ponto pacífico na literatura que as mudanças na divisão do trabalho, o conceito de propriedade da terra, enfim, a necessidade de sobrevivência e, mais tarde, a obtenção de lucros foram aspectos essenciais na criação das ferramentas, conforme assinala Marcondes (1990).

Precisar a época em que surgiu a primeira ferramenta não é fácil e muito depende das pesquisas realizadas pelos historiadores. Neste sentido, o primeiro utensílio de alguma forma trabalhado pelo homem teria sido um machado de mão, produzido através de pedra lascada e núcleo de sílex toscamente desbastado, pontudo em uma das extremidades e com gume cortante (MARCONDES, 1990).

A origem das ferramentas e a utilização de instrumentos mais complexos estão relacionadas com as Eras que marcaram a trajetória da humanidade em prol da sobrevivência e melhoria de sua qualidade de vida. Segundo afirmações de Marcondes (1990) *“se hoje estamos na Era da informática, começamos, um dia, nossa história na Era da pedra Lascada no Paleolítico e Polida, no Neolítico”*.

Eis então que, à medida que o homem evoluiu, a criação de ferramentas de técnicas mais rudimentares para técnicas mais avançadas acompanhou este processo. No Paleolítico Superior (40.000 a 10.000 a.C.), por exemplo, teve início o processo de transformação de algumas matérias-primas que resultaram na criação do primeiro propulsor.

Por outro lado, na Era Neolítica (10.000 a 5.000 a.C) a técnica desenvolvida em era anterior permitiu, segundo afirmações de Inglês de Souza apud Marcondes, 1990) a obtenção de peças com boa qualidade de polimento. A criação de instrumentos a partir desta técnica pode ser descrita como o primeiro grande passo da humanidade rumo ao advento de instrumentos mais avançados. A criação do arado pode ser citada como exemplo.

A partir daí o homem deixou de ser um predador para, nas palavras de Marcondes (1990) se dedicar à agricultura. Outro evento de suma importância para a humanidade foi o aparecimento da cerâmica na Era neolítica.

A descoberta da metalurgia se deu por volta de 4.000 a 5.000 a. C., período este que coincidiu com a descoberta da escrita. Assim, o homem saiu da idade pré-histórica para ingressar na Idade dos Metais (5.000 a.C).

Não cabe aqui fazer uma narrativa de toda a trajetória da origem e vida das ferramentas. Porém, é importante destacar alguns eventos como, por exemplo, os primitivos processos de fundição no Peru e os processos de modelagem em regiões diferentes do mundo. Todas essas transformações, segundo Marcondes (1990) que fez uma análise detalhada e esclarecedora do “metal duro”, mostram o imenso potencial de criação do homem.

Este potencial para a criação aliado a eterna busca de alternativas e diferentes soluções para um mesmo problema acabou contribuindo para um campo fértil para a criação de ferramentas mais complexas, resultando, finalmente, na criação do metal duro. A satisfação das necessidades humanas, aliada à demanda crescente por produtos e/ou mercadorias resultou na Revolução Industrial, no século XVII. A máquina a vapor provou uma evolução sem precedentes em todos os campos da tecnologia.

A usinagem é fruto deste processo de evolução, sendo caracterizado pela literatura pertinente (MARCONDES, 1990; FERRARESI, 1977) como uma forma de alcançar a perfeição da matéria.

De acordo com Marcondes (1990) “*o formato final aproximado, a peça já tem quando entra na usinagem e foi adquirido pelos processos de conformação (forjamento, laminação e trefilação, etc.) ou na própria fundição*”. Deve ser dito que por motivos das crescentes necessidades humanas, bem como pela viabilidade econômica, a usinagem é uma área em constante evolução e o engenheiro tem papel fundamental no alcance da perfeição da matéria.

Os insertos quadrados de metal duro começaram a ser utilizados como ferramentas de corte na década de 70/80 (MARCONDES, 1990) com a vantagem da indexação rápida, contrapondo as brasadas, até então utilizadas. Esse tipo de ferramenta permite que até oito arestas (ou mais) podem ser disponibilizadas em um único inserto. Mas desde então (a partir de seu emprego) nenhuma referência bibliográfica estuda ou mesmo cita que ao se utilizar uma aresta, o desgaste desta afetaria o desenvolvimento do desgaste, e conseqüentemente a vida, na aresta adjacente. Entretanto, conversas com especialistas e fornecedores de ferramentas indicaram a possibilidade do problema.

Na literatura há diversas publicações sobre o uso de insertos quadrados ou mesmo de outras geometrias (ROGANTE, 2008; WANIGARATHNE ET.AL., 2005; DE MELO, 2001) mas em nenhum deles esse específico tema foi encontrado ou mesmo tratado como um possível problema.

Essa dúvida aliada à falta de referências bibliográficas que pudessem esclarecer ou mesmo mostrar tendências sobre tal tema instigou a realização de um trabalho voltado especificamente para tentar verificar o comportamento das arestas de corte em ferramentas de metal duro quadradas.

De acordo com Machado et al. (2009) estudar e compreender o desgaste das ferramentas de corte é importante porque ações coerentes e eficazes podem ser tomadas para tentar evitar danos e reduzir a taxa de desgaste, prolongando a vida das arestas cortantes.

Ainda segundo Machado et al. (2009) as ferramentas podem sofrer três tipos distintos de danos durante o processo de usinagem que são: avarias, desgaste e deformação plástica. Estes três tipos de danos podem levar a mudanças na geometria da ferramenta. Os dois primeiros promovem perda de massa, ao passo que a deformação plástica provoca deslocamento da massa na ferramenta de corte. Em condições normais de corte, ou seja, não utilizando condições de corte abusivas, normalmente quebra e deformações plásticas são evitadas predominando desgaste. A norma ISO 3685 (1993) define desgaste de ferramenta como "*uma mudança na sua forma original durante o corte, o que resulta na perda gradual de material*".

Vários autores (TRENT e WRIGHT, 2000; KÖNIG and KLOKE, 1997; DINIZ et al., 2000, MACHADO et al., 2009) classificam os mecanismos de desgaste como aqueles que são mais dependentes de temperatura (deformações plásticas, oxidação e difusão) e aqueles que são menos dependentes da temperatura (attrition e abrasão).

Se o desgaste de uma aresta cortante da ferramenta interfere no desenvolvimento do desgaste de uma aresta adjacente a ela (quer seja esta aresta lateral ou inferior), este muito provavelmente implicará na propagação de trincas, deformação plástica e/ou fenômenos de efeitos termo-químicos. No entanto, os dois primeiros citados (propagação de trincas e deformação plástica) são mais propensos a interferir uma vez que as ferramentas de metal duro não sofrem transformação de fase como no caso dos HSS e, conseqüentemente, não serão afetadas por temperaturas elevadas, a menos que a difusão seja tão elevada que poderia chegar à aresta adjacente, o que é muito improvável que aconteça.

Com estas observações a conclusão é de que somente experimentos práticos suportados estatisticamente poderiam elucidar a questão.

Devido à dúvida levantada, propõe-se aqui uma investigação para testar a vida de ferramentas de metal duro em peças de aço microligado DIN 38MnSiVS5, fazendo-se um rodízio das arestas utilizadas, para verificar se há realmente tal influência. Desta maneira, a escolha do tema se justifica por sua inegável contribuição científica, pois além de não haver publicações em relação a essa temática, os resultados obtidos com o presente estudo poderão atestar se as dúvidas levantadas procedem e ainda, tais resultados poderão ser utilizados em trabalhos futuros, que apresentem correlação com o tema.

Feitas essas considerações iniciais, a presente dissertação, sem a pretensão de esgotar o tema, tem por objetivo estudar o efeito da seqüência de arestas utilizadas nos testes de vida com ferramentas quadrada de metal duro e o efeito do número de interrupções da usinagem na vida da ferramenta no processo de torneamento.

Nesta pesquisa, o material da peça não é variável de entrada. Assim, a escolha deste seguiu alguns critérios, como material que apresente ao corte resistência suficiente para promover o desgaste da ferramenta em espaço de tempo relativamente pequeno e a disponibilidade do mesmo. Foi escolhido, portanto, um aço microligado (38MnSiVS5) que exigiu uma pequena abordagem deste grupo de aço na seqüência, em capítulo apropriado de revisão bibliográfica.

A escolha da ferramenta também seguiu critérios de disponibilidade, porém observou-se a exigência de uma geometria que proporcionasse oito arestas cortantes para que fosse atingido o mérito a que este trabalho se propôs, ou seja, investigar a influência da seqüência de uso dessas arestas cortantes na vida da ferramenta.

A investigação foi realizada em duas etapas. A primeira etapa corresponde aos testes de torneamento cilíndrico com paradas para monitoramento do desgaste da aresta a cada passe da ferramenta percorrendo o comprimento de corte estipulado no corpo de prova (em média onze paradas até atingir o critério de fim de vida selecionado), com o objetivo de verificar se o desgaste de uma aresta afeta o desenvolvimento do desgaste de outra aresta adjacente a ela. A segunda etapa dos testes experimentais foi executada também com testes de torneamento cilíndrico, porém com o diferencial das paradas para monitoramento do desgaste terem sido programadas de modo a verificar se a diferença entre o número dessas paradas exerce algum tipo de influência na vida da ferramenta.

Essa dissertação foi estruturada em seis capítulos subseqüentes a este. O segundo capítulo, à luz da literatura, faz um apanhado teórico geral necessário para a interpretação dos resultados obtidos. O capítulo três descreve a metodologia e os procedimentos experimentais empregados durante a realização dos testes. No capítulo quatro são apresentados e discutidos os resultados obtidos na análise dos experimentos. No quinto capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas com os resultados desta pesquisa

e sugestões para trabalhos futuros. As referências utilizadas na pesquisa bibliográfica e na elaboração do texto da dissertação são apresentadas no sexto capítulo.

CAPITULO II

REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Este capítulo tem por finalidade apresentar o Estado da Arte sobre a vida da ferramenta de corte, com foco para os seguintes pontos: origem das ferramentas e sua evolução histórica; tipos e formatos de insertos; ferramentas de metal duro e sua produção; fatores que exercem influência sobre a vida das ferramentas, dentre outros aspectos relacionados ao tema pesquisado.

2.1. Produção de ferramentas de corte

2.1.1. Origem e evolução

Antes de discutir sobre a vida da ferramenta é importante fazer um brevíssimo comentário sobre o surgimento da ferramenta. Apesar de isso ter sido tratado rapidamente na introdução deste trabalho, é preciso explicar em maiores detalhes quando surgiu a ferramenta e a sua evolução até os dias de hoje.

Trent e Wright (2000) cita em seu trabalho que a análise sobre a origem das ferramentas deve ser feita a partir da contextualização do processo de fabricação. Este teve

início, como já dito, na Era Primitiva com a transformação da madeira, da pedra, do metal, etc.

Quando o homem ainda não dispunha de meios para transformar o metal em utensílios, usualmente empregava-se a madeira, devido à facilidade de manipular este material na produção de utensílios. De acordo com Silva; Souto e Silva (2003), no começo da civilização eram raros a fabricação de utensílios através dos metais.

De acordo com Ferraresi (1977), a ferramenta foi um dos primeiros instrumentos a ser utilizado pelo homem, desde eras pré-históricas. Fosse feitas de pedra ou de madeira, elas constituíam para o ser humano uma espécie de suplemento à força de suas mãos e de seus braços, de modo a permitir-lhe a realização de tarefas pacíficas, como, por exemplo, lavrar a terra, cortar e conformar substâncias úteis à sua vida, de modo mais eficiente e conferir-lhe maior segurança para defender-se contra o meio ambiente que lhe era, de modo geral, adverso. Observação semelhante foi feita por Marcondes (1990) que afirma ser a ferramenta um meio para complementar a fragilidade do homem.

À medida que o tempo passou o homem, através de sua habilidade e criatividade, foi aperfeiçoando a qualidade dos materiais utilizados na fabricação desses instrumentos, pela utilização de madeiras cada vez mais duras, pedras mais rijas e melhor afiadas, até atingir-se a idade dos metais, quando utilizou pela primeira vez o cobre e aprendeu, quase que instintivamente, a torná-lo mais duro pelo martelamento a frio (FERRARESI, 1977).

Robert Mushet, em 1868, é tido pelos pesquisadores como o primeiro a dar uma contribuição decisiva na fabricação de aços a serem eventualmente utilizados em ferramentas (FERRARESI, 1977).

De outra parte, em 1898, surgiu outra importante contribuição no setor dos materiais para ferramentas, graças a Fred W. Taylor, o qual, juntamente com White, após inúmeras experiências tentando obter aços que permitissem condições de usinagem cada vez mais severas, chegou ao desenvolvimento de um tipo de aço recomendável para ferramentas de corte, um protótipo dos modernos aços rápidos (FERRARESI, 1977).

Em 1906 foi introduzido o processo de fabricação de aço em forno elétrico, permitindo, como é óbvio, o aperfeiçoamento não só do processo de fabricação como também do controle de qualidade. Novos elementos de liga, dentre os quais o vanádio e o cobalto foram introduzidos o que possibilitou o aumento de resistência dos aços rápidos. Em 1939 aços super rápidos foram desenvolvidos possuindo com altos teores de carbono e vanádio. Tal processo foi desenvolvido por J. P. Gill, segundo afirmações de Ferraresi (1977).

Em 1941, Haynes introduziu uma liga fundida, baseada em tungstênio, cromo e cobalto, de baixa usinabilidade e dureza muito elevada, com excelentes propriedades de

corte, possibilitando, pois, usinar com maiores velocidades de corte do que as admitidas pelos aços rápidos (FERRARESI, 1977).

Mais ou menos na mesma época, H. Voigtlander e H. Lohmann requeriam, na Alemanha, uma patente relativa à fabricação de materiais para ferramentas de corte e para matrizes de estiramento, baseados em pós de carboneto de tungstênio, carboneto de molibdênio ou mistura de ambos, comprimidos e sinterizados, empregando, pois processos de metalurgia do pó; originavam-se assim os carbonetos de tungstênio sinterizados, ou metais duros, que iriam provocar verdadeira revolução nos métodos de usinagem (FERRARESI, 1977).

De acordo com Rosa e Diniz (1999), o surgimento de novas ferramentas de corte, sobretudo nas duas últimas décadas do século, decorreu do desenvolvimento tecnológico da usinagem e da necessidade de se usinar novos materiais.

Além dos substratos, os tipos e processos de revestimento também acompanharam essa evolução das ferramentas de corte. De acordo com Grzesik (1999), atualmente mais de 50% das ferramentas de metal duro são revestidas pelo processo PVD (*physical vapor deposition*) ou CVD (*chemical vapor deposition*). Há uma variedade grande de revestimentos disponíveis no mercado cada qual com sua aplicação específica: TiC, TiN, TiAlN, Ti(C,N), etc.

Existe ainda outro fator que contribuiu para a evolução e expansão dos processos de fabricação em todo o mundo: a queda nos custos de fabricação dos metais.

Sabe-se que os processos de fabricação correspondem a um percentual significativo da economia mundial, seja em termos de produção de metais, seja em termos de consumo mundial desses metais. A demanda, bem como a necessidade de maior economia tem contribuído para que o processo de fabricação de metais, sobretudo o metal duro, melhore cada vez mais.

Quanto ao metal duro este, segundo Marcondes (1990), é composto por *“metais duros tais como carboneto de tungstênio, carboneto de titânio e carboneto de titânio nióbio, suportados num metal de liga, principalmente cobalto, que lhe confere tenacidade”*. O autor continua: *“sua dureza, resistência ao desgaste e tenacidade fazem dele o mais importante material para as ferramentas de corte, transformando-o no verdadeiro astro da usinagem”*.

Com efeito, a observação do autor está correta e bem apreende a importância deste material para a civilização contemporânea. Nesta seara, a despeito do metal duro ter sido uma descoberta considerada ainda recente para a humanidade, os materiais que existem para a sua composição já são conhecidos há muito tempo, em verdade, há séculos.

Esse material sofreu uma série de evoluções e melhoramentos, sob o ponto de vista de aplicabilidade às diversas ligas metálicas e com o objetivo de aumentar as velocidades de corte (FERRARESI, 1977).

Antes de comentar em maiores detalhes sobre a evolução e as classes deste material é preciso fazer uma revisão sobre a origem e a evolução histórica das ferramentas intercambiáveis, e demais aspectos relevantes sobre as mesmas.

2.2. Ferramentas intercambiáveis

2.2.1. Origem e evolução histórica

De acordo com Stoeterau (2007) as ferramentas com insertos intercambiáveis são largamente utilizadas em operações de torneamento. Neste processo, verifica-se que os insertos de metal duro predominam. Porém, insertos de aço rápido, cerâmicas, diamante e CBN são também usados para muitas aplicações. A Figura 2.1 traz um exemplo de ferramenta de torneamento com inserto intercambiável.

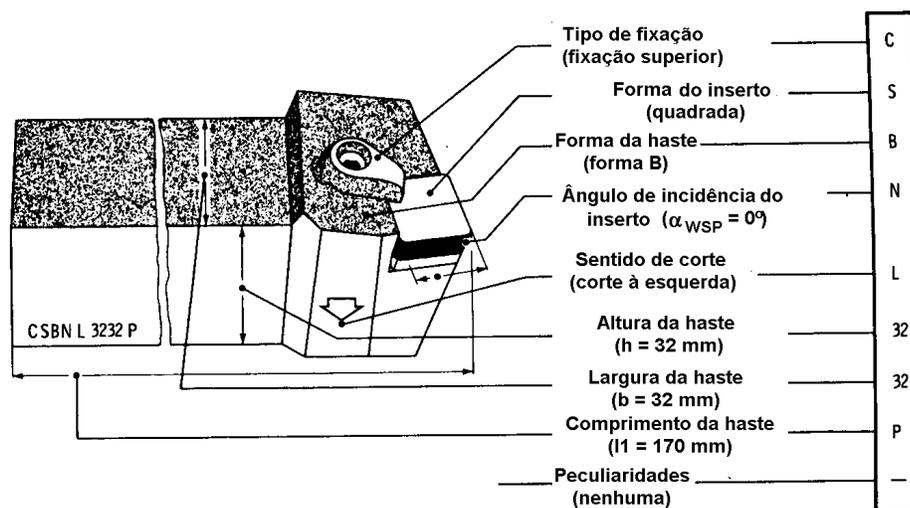


Figura 2.1 - Ferramenta de torneamento com inserto intercambiável. Fonte: Stoeterau (2007)

Conforme destacado em seção anterior, a criação da ferramenta percorreu um longo caminho. Da madeira ao aço se passaram séculos de aperfeiçoamento na produção de ferramentas, assim como a técnica para desenvolver o metal duro. Para compreender a evolução das ferramentas de corte intercambiáveis, nada melhor do que acompanhar o

desenvolvimento e lançamentos de classes, sistemas e ferramentas de um grande fabricante mundial. A listagem a seguir apresenta estes lançamentos em ordem cronológica (SANDVIK, 2008).

1958 - Neste ano surgiu a técnica de pastilha intercambiável (suportes T-Max) introduzida na Europa;

1965 - Advento da Broca Ejector;

1967 - Surgimento das ferramentas para torneamento T-Max P e fresas com pastilhas intercambiáveis;

1969 - Primeira cobertura GC em uma pastilha de metal duro;

1973 - Surgimento da primeira ferramenta para corte com pastilhas intercambiáveis T - Max 150.2;

1974 - Surgimento das ferramentas GC015, primeiras pastilhas com cobertura Al_2O_3 ;

1977 - Lançamento da broca T-Max U para furação curta, com pastilhas intercambiáveis com fixação por parafuso;

1980 - Surgimento dos sistemas modulares Block tool e Varilock. Lançamento da classe GC 415 – segunda geração de pastilhas com cobertura Al_2O_3 , pastilhas e ferramentas T-Max U com fixação por parafuso;

1983 - Surgimento das pastilhas de cerâmica GC620/650/680, pastilhas e ferramentas T-Max U com fixação por parafuso;

1985 - Surgimento das ferramentas CT515, primeiro cermet à base de TiC; lançamento das pastilhas Q-Cut 151.2 para cortes e ranhuramento;

1990 - Introdução do Coromant Capto, o sistema universal de ferramentas modulares, de troca rápida;

1993 - Lançamento da T-Max 290, a fresa universal para cantos a noventa graus;

1994 - Surgimento da classe GC 4015 - terceira geração de pastilhas com cobertura Al_2O_3 . Início da nova geração de fresas - a família CoroMill;

1995 - Primeira empresa a introduzir, em escala industrial, pastilhas de metal duro com cobertura de diamante, CD 1810 – pastilhas com cobertura PCD para usinagem de Alumínio;

1996 - Lançamento da CoroMill 200, fresa multi-função com pastilhas redondas;

1997 - Lançamento da T-Max Wiper, pastilhas com arestas alisadoras para usinagem com altos avanços;

1998 - Lançamento da broca Delta-C Twin Grade, duas brocas em uma - a exclusiva Twin grade GC1030;

1999 - Lançamento do CoroCut, o novo sistema para cortar e ranhurar;

2000 - Lançamento do CoroGrip, mandril de arraste de alta precisão.

Essa breve descrição sobre a evolução de ferramentas intercambiáveis coloca em evidência os esforços dos fabricantes na busca do aperfeiçoamento contínuo das pastilhas intercambiáveis, que obteve maior proeminência na década de 1990 (SANDVIK, 2008).

2.2.2. Tipos e formatos de insertos

De acordo como os apontamentos de Stoeterau (2007) e Machado et al. (2009), quanto ao formato dos insertos percebe-se que a geometria da peça, suas tolerâncias, seu material e qualidade superficial definem o formato do inserto a ser utilizado. São seis formas comuns, com benefícios e limitações, em relação à resistência. A Figura 2.2 mostra essas seis formas, além de trazer uma indicação sobre os insertos que apresentam maior ou menor resistência.

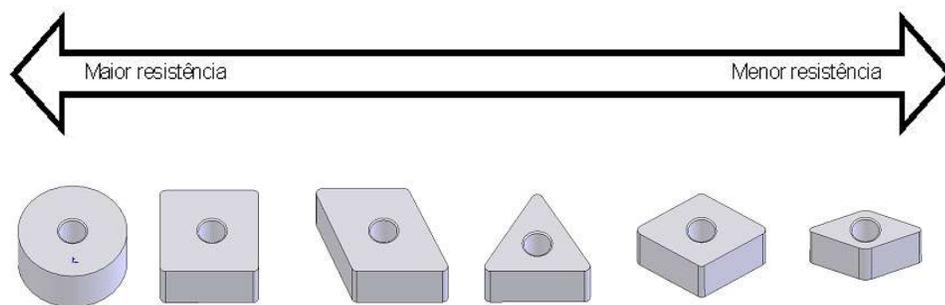


Figura 2.2. Tipos e formatos de insertos. Fonte: Stoeterau (2007)

Conforme demonstrado na Fig. 2.2, os três primeiros insertos apresentam maior resistência do que os três últimos. Nota-se que o ângulo de ponta da pastilha tem relação

direta com a sua resistência. Ela guarda também estreita relação com a combinação ângulos de saída negativos e positivos. Os ângulos negativos garantem maiores ângulos de cunha e, portanto, maiores resistências.

De acordo com dados do Portal Técnico (2008), que disponibiliza informações sobre as ferramentas intercambiáveis, é importante a seleção de uma geometria de cunha apropriada para cada aplicação. Neste contexto, insertos com ângulo de saída negativo possuem o dobro de arestas de corte e maior resistência, além de proporcionarem avanço e profundidade de corte maiores. Também proporcionam um aumento nas forças de corte e exigem maior potência e rigidez da máquina ferramenta. Os insertos com ângulo de saída positivos são considerados ideais para trabalho em materiais mais dúcteis, quais sejam: aços de baixo carbono, ligas leves e materiais que endurecem durante a usinagem.

Debiasi (2006) relatou em seu estudo que existe uma distinção na geometria da aresta de corte, ou seja, entre a geometria positiva e negativa da pastilha. Conforme suas observações, uma pastilha positiva possui um ângulo de cunha menor que 90 graus, e isso pode ser constatados através da seção transversal do formato básico da aresta de corte. Já uma pastilha negativa possui ângulo de cunha igual a 90 graus. A pastilha negativa precisa ser inclinada negativamente no porta-ferramenta, de forma a prover um ângulo de folga tangencial à peça, enquanto que a pastilha positiva possui sua própria folga incorporada. O ângulo de inclinação (λ) é um ângulo em que a pastilha é montada no porta-ferramenta, medido no plano de corte (DEBIASI, 2006).

Insertos positivo-negativos, por outro lado, combinam a ação de corte dos positivos com a resistência dos negativos, possuem gumes realçados ou sulcos na face. Em insertos revestidos, são capazes de remover material a altas velocidades e avanços, com aumento do volume de cavacos. Há diversos modelos, de diferentes fabricantes, com diferentes formas de sulcos, que atuam como quebra cavacos. Os porta ferramentas positivos são geralmente usados na usinagem de peças compridas e finas. Os porta ferramentas negativos são usualmente empregados na usinagem pesada, conforme dados do Portal Técnico (2008). A Tabela 2.1 especifica as geometrias usuais de ferramenta de corte.

Tabela 2.1. Geometrias usuais de ferramentas de corte. Fonte: Stoeterau (2007) - Modificado.

Geometria da Ferramenta Material da Ferramenta	Ângulo de saída γ	Ângulo de Incidência α	Ângulo de Inclinação λ	Ângulo de Posição χ	Ângulo de Ponta ϵ	Raio da Quina r_ϵ
Aço Rápido (HSS)	-6° até + 20°	6° até 8°	-6° até	10° até	60° até	0,4 até
Metal Duro	-6° até + 15°	6° até 12°	+6°	100°	120°	2mm

Como se observa, a Tab. 2.1 traz informações detalhadas sobre a geometria da ferramenta no que tange aos ângulos de saída, inclinação, posição, de ponta e raio de quina para o aço rápido e o metal duro.

Segundo afirmações de Stoeterau (2007), quanto ao tamanho dos insertos observa-se que, em sua maioria, este é especificado pelo diâmetro do maior círculo que pode ser inscrito no perímetro do inserto (chamado IC). O autor afirma que, em função de razões econômicas é preferível optar pelo menor inserto possível, com o qual possa ser empregada a profundidade de corte requerida na operação. De modo geral, o comprimento da aresta deve ser no mínimo o dobro da profundidade de corte (STOETERAU, 2007).

Em relação a sua espessura, o autor supracitado destaca que este depende essencialmente da profundidade do corte e do avanço utilizados. Ainda, segundo a explanação de Stoeterau (2007), a espessura do inserto é selecionada em tabelas de fabricantes, ou através de dados da literatura. De outra parte, o raio de quina dos insertos é determinado pela configuração da peça e pelos requisitos de qualidade superficial, sendo que cada uma possui as suas especificidades.

Raios de quina muito pequenos podem resultar em quinas fracas suscetíveis à quebras ou lascamento. Possuem melhor controle dos cavacos e produzem menos ruídos. Raios de quina muito grandes provocam ruídos ou vibrações (pequena espessura dos cavacos e aumento da força passiva F_p) e requerem rigidez suficiente da máquina ferramenta. A escolha de um raio de quina apropriado é um dos mais importantes fatores relacionados ao acabamento superficial.

Comparando as especificidades de cada um dos raios de quina aqui apresentados é possível concluir que os raios de quina maiores produzem melhores superfícies usinadas e que raios de quina menores geram menores forças (STOETERAU, 2007 e SANDVIK, 2008).

2.2.3. Tipos de fixação

A tolerância dos inserts define a precisão do acoplamento. Stoeterau (2007) descreve três classes de tolerância, que são as seguintes: usual: $\pm 0,1$ a $0,3$ mm; de precisão: $\pm 0,03$ a $0,05$ mm; de alta precisão: $\leq 0,013$ mm.

No que tange a fixação, a pastilha pode ser fixada mecanicamente por meio de parafuso, grampo ou alavanca, eliminando todas as desvantagens da solda. A pastilha é colocada sobre um calço de metal duro, de maneira a garantir coeficientes de dilatação idênticos ao do material cortante, não deixando que tensões prejudiciais que podem ocasionar rachaduras e quebras apareçam durante o trabalho. A título de ilustração, a Fig. 2.3 traz um exemplo de sistema de fixação de inserts intercambiáveis (grampo e parafuso respectivamente).

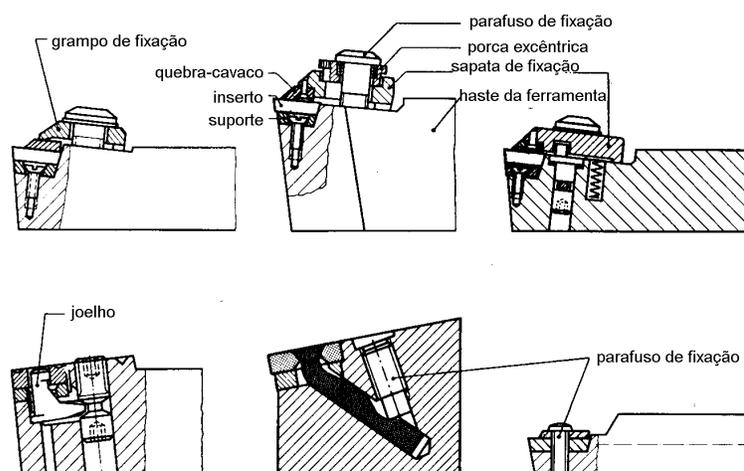


Figura 2.3. Sistemas de fixação para inserts intercambiáveis. Fonte: Stoeterau (2007).

Salienta-se que os inserts intercambiáveis apresentam vantagens e deficiências, conforme prediz a literatura. O item a seguir faz uma descrição sobre essas particularidades do inserto intercambiável.

2.2.4. Vantagens e deficiências

Segundo dados do Portal Técnico (2008), o suporte para metal duro intercambiável permite a troca da pastilha, de acordo com a necessidade de usinagem do usuário. Assim sendo, mediante a utilização de um “único suporte”, é perfeitamente possível utilizar vários tipos de pastilhas, como: negativa, positiva, com quebra cavaco, sem quebra cavaco, etc. Outras vantagens são o ganho de tempo e maior produtividade, devido à facilidade de manuseio e utilização, diminuindo o custo operacional.

Segundo explica Debiasi (2006), a grande maioria das pastilhas possuem ângulos de saída negativo, combinados com inclinação negativa do porta ferramentas e quebra cavacos do tipo cratera, sendo que isso visa promover uma boa formação de cavacos. No torneamento e furação o controle de cavaco é de suma importância. O autor observa que *“no fresamento e no madrilamento, o controle dos cavacos é vital devido ao limitado espaço dentro dos diâmetros que estão sendo usinados”* (DEBIASI, 2006).

Por sua vez, as vantagens do porta ferramenta intercambiável face às antigas ferramentas soldadas são as seguintes: este suporte não é descartável, tendo apenas que trocar a pastilha após desgaste de suas arestas; apesar de seu custo ser pouco maior, este suporte tem outras vantagens sobre a ferramenta soldada na relação custo/benefício, até porque, a ferramenta soldada só permite utilizar uma única aresta na operação enquanto que, com o suporte para pastilha intercambiável é possível utilizar várias arestas da pastilha; o porta ferramenta intercambiável para tornos e fresas, ainda possui uma outra vantagem, tendo em vista que quando a aresta é trocada, este mantém a repetibilidade das dimensões e do acabamento.

A despeito do custo inicial do porta ferramenta intercambiável ser relativamente maior do que uma ferramenta soldada é preciso atentar para o fato de que o porta ferramenta passa a ser um novo item da máquina, ao passo que a ferramenta soldada após perder o corte, deva ser retirada para uma nova afiação, ocasionando assim outra regulagem da nova ferramenta, e depois da pastilha completamente gasta a haste poderá ser descartada.

No intuito de reforçar as vantagens do porta ferramenta intercambiável, apresenta-se a seguir algumas comparações entre este e as ferramentas com as antigas pastilhas soldadas.

Na ferramenta soldada percebe-se que durante e após a solda, a pastilha é submetida a tensões e esforços. São diferentes os coeficientes de contração do metal duro e do aço. Por isso, o resfriamento rápido da pastilha produz uma tensão entre a haste e a pastilha, o que pode facilmente causar trincas e quebras durante a afiação ou mais tarde, durante o trabalho. Além disso, e embora questionável, a literatura cita que muitas vezes devido a um aquecimento demasiado e durante um tempo prolongado ao uso de soldas inadequadas, a pastilha sofre uma modificação em sua estrutura, o que pode levar a uma quebra prematura ou então a um desgaste maior do que o normalmente esperado para certo tipo de metal duro. Uma pastilha soldada de maneira inadequada pode também se soltar do seu assento durante o trabalho e causar a perda total da ferramenta depois de pouquíssimo tempo de trabalho (PORTAL TÉCNICO, 2008).

A maioria dos problemas relatados em relação à ferramenta soldada não são observadas quanto ao porta ferramenta intercambiável. Em primeiro lugar, não existe o problema de afiação na utilização desse tipo de ferramenta, dado que as pastilhas são fornecidas com as arestas dentro de padrões rígidos de qualidade adequada a cada tipo de aplicação. As pastilhas são fornecidas com geometria, raios e quebra cavacos adequados para cada tipo de material e operação, por isso a repetibilidade do acabamento e dimensões são mantidos dentro do especificado e o operador da máquina somente tem que trocar a pastilha quando a aresta não mais atende sua função (PORTAL TÉCNICO, 2008).

Por outro lado, comparando ambos os processos (ferramenta soldada e porta ferramenta intercambiável) na troca de ferramenta da máquina, uma vez mais é possível constatar a vantagem desta última sobre a primeira. Explicando melhor, em relação à ferramenta soldada nota-se que, alcançado o fim de vida da aresta, deve-se retirar a ferramenta da máquina e colocar outra. A ferramenta usada deverá ser novamente afiada e isso implica em um dispêndio de tempo maior, além da necessidade de uma quantidade maior de ferramentas, para que o trabalho não seja interrompido.

Já em relação ao porta ferramenta intercambiável tal processo não ocorre, pois depois de alcançado o fim de vida da aresta, basta soltar o parafuso e girar a pastilha para colocar uma nova aresta na posição de trabalho. O porta ferramenta após este processo está pronto para mais uma etapa de trabalho. A haste do porta ferramenta não é tirada da sua posição original, não sendo preciso uma nova regulagem da máquina. As pastilhas intercambiáveis são fornecidas com tolerâncias máximas de 0,13 mm, se a tolerância da peça for maior que essa, dispensa-se todo e qualquer novo ajuste da máquina. No caso de tolerâncias menores, é necessário a utilização de pastilhas de precisão, que são fornecidas

com tolerâncias máximas de 0,025 mm, o tempo necessário para girar ou trocar a pastilha é de apenas alguns segundos, representando assim uma sensível redução no tempo de parada da máquina e um proporcional aumento de produção diária. Outra vantagem diz respeito ao custo dessas pastilhas quando comparada às ferramentas com pastilhas soldadas (PORTAL TÉCNICO, 2008 e SANDVIK 2008).

Quanto a velocidade de corte e a produção horária, uma vez mais se verifica a supremacia do porta ferramenta intercambiável, posto que as velocidades e os avanços são sensivelmente superiores aos fixados para ferramentas soldadas. Ademais, tendo em vista a completa ausência de tensões de solda, é possível utilizar-se uma classe de metal duro mais resistente ao desgaste, porém com menor tenacidade. Uma pastilha cujo primeiro esforço efetivo é o trabalho, não tendo sido submetido a tensões da solda, obviamente suporta um esforço maior. Porém, não somente este fato concorre para utilização de maiores velocidades e avanços. As vantagens do porta ferramentas intercambiável encontram-se delimitadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Vantagens do porta ferramentas intercambiável. Fonte: Adaptado do Portal Técnico (2008)

Eliminação de afiação, uma vez que a pastilha já vem com todas as suas arestas de corte corretas, e a geometria de corte permanece sempre a mesma.
Utilização do porta ferramenta em diversos trabalhos, ou seja, troca-se somente a pastilha para outra classe de metal duro ou outro tipo de quebra cavaco, eliminando o problema de reafiação para cada trabalho.
Reduzido tempo de troca da aresta de corte, e conseqüentemente, um melhor aproveitamento do custo hora-máquina.
Ausência de tensões de solda, dado que a pastilha é fixada mecanicamente sobre um calço de metal duro.
Possibilidade de utilização de pastilhas mais resistentes ao desgaste.
Baixo custo da aresta de corte, bem como aumento de velocidade de corte normal resultando em mais um aumento da produção horária.
Padronização progressiva, isto é, a crescente utilização de porta ferramentas e pastilhas de tamanhos, formatos e classes padronizados resultam na redução progressiva de ferramentas estocadas.

2.3 Ferramentas de metal duro

2.3.1 Classificação

Conforme salientado anteriormente, o metal duro surgiu no início do século XX, como substituto aos aços rápidos que, até então, eram os materiais mais adequados à fabricação de ferramentas através do processo de usinagem. Com toda a certeza, a produção do metal duro foi um passo considerável na trajetória das ferramentas. Neste contexto, a literatura chama a atenção para o fato de que uma das grandes vantagens do metal duro é manter a afiação da ferramenta por mais tempo, mesmo quando submetida à velocidade de trabalho inúmeras vezes superior ao que suportaria o aço rápido (KOLASKA; DREYER, 1990).

Segundo Marcondes (1990), a produção do metal duro foi possível através do empenho do homem na investigação da matéria e na busca contínua de compor novas estruturas para a sua obtenção. O autor faz um comentário sobre a produção do metal duro que é de suma importância. Eis que, de acordo com a sua explanação, o primeiro passo para a produção do metal duro é a destruição do minério no qual se obtém o pó, mediante processo químico que se inicia com a obtenção do ácido tungstênico através da aplicação de ácido clorídrico. Tal processo perfaz ainda algumas etapas, quais sejam: obtenção do tungstênio, carbonetação e outros minérios que seguindo processos próprios são reduzidos a pó e que são misturados com pó de cobalto a fim de evitar o surgimento de fissuras e outros processos semelhantes.

Após essas etapas o pó é prensado em matrizes que tem por objetivo gerar briquetes de formatos variados no qual a pré-retificação transforma em pastilhas semi-acabadas. Essas, por sua vez, são submetidas a temperaturas de 700° a 800° C, sendo essa operação denominada de pré-sintetização. Depois disso tem-se o processo mais importante da obtenção do metal duro que é a sinterização (MARCONDES, 1990).

Machado et al. (2009) afirmam que o segundo grande impulso na área dos materiais de ferramenta de corte foi o surgimento do metal duro. Antes disso ocorreu o advento do aço-rápido. A passagem do aço-rápido para o metal duro aconteceu na década de 1920, na Alemanha.

O metal duro adquiriu uma popularidade muito grande a partir deste período e as melhorias no processo de obtenção do mesmo fizeram surgir à padronização e a classificação dos metais duros (FERRARESI, 1977).

A título de exemplificação, a Tab. 2.2 traz informações sobre a classificação do metal duro, relativas à velocidade, avanço, resistência ao desgaste e tenacidade.

Principais classes			Classes de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usados	Metais duros			
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, excetos aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	a ↑	b ↓
M	Amarelo	Aço Inoxidável: aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	a ↑	b ↓
K	Vermelho	Ferro Fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	a ↑	b ↓
N	Verde	Metais não-ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	a ↑	b ↓
S	Marron	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor a base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25	a ↑	b ↓
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	a ↑	b ↓
a – Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta b – Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta						

Tabela 2.2. Classificação do metal duro. Fonte: adaptado de Machado et al., (2009)

Essa classificação foi feita pela Norma ISO 513 (2004) e pode ser explicada da seguinte forma:

Classe P: Designada para exemplificar a classe de aços e cavacos Longos, tendo a cor azul como referência, sendo obtida pela adição do TiC, Tac e/ou Nbc;

Classe K: Classe de material que contém WC + Co, comumente conhecida como classe de ferro fundido ou ainda, de cavacos curtos e que apresenta coloração vermelha;

Classe M: Notabiliza-se por ser uma classe intermediária, quando o WC + Co possui adições do Tic. Também conhecida por classe de aços inoxidáveis, a sua coloração padrão é o amarelo.

Classe N: corresponde à classe das ferramentas aplicáveis aos materiais não ferrosos; classe identificada pela cor verde.

Classe S: corresponde às superligas; designada pela cor marrom.

Classe H: correspondem aos materiais endurecidos, aço e ferro fundido temperado. Classe designada pela cor cinza.

Às vezes, os fabricantes de ferramentas apresentam produtos sendo listados simultaneamente na classe P, M, K, N, S e H. Na realidade isto significa que os fabricantes estão enfatizando mais a aplicabilidade da ferramenta, do que propriamente o sentido da classificação original (MACHADO et al. 2009).

2.3.2 Produção de ferramentas de metal duro

Desde o princípio, o metal duro, por ser fruto da metalurgia do pó, foi desenvolvido em forma de barriletes ou pastilhas, que no começo eram soldadas a hastes ou cabeçotes metálicos para, deste modo, formar a chamada ferramenta.

Atualmente é comum encontrar nos catálogos dos fabricantes referências sobre o grau de dureza e tenacidade das distintas classes de metal duro, incluindo informações sobre os seus materiais constituintes. Essas informações são úteis para a escolha e adequação da ferramenta ao processo de usinagem que se deseja executar.

Segundo Ferraresi (1977); Marcondes (1990 e 2008) e Sandvik (2008), o metal duro é composto de carbonetos metálicos em forma de minúsculas partículas que são incrustadas em metal ligante. Seus componentes mais importantes são o carboneto de tungstênio (WC), denominado fase a e o metal ligante cobalto (Co) denominado fase b. A fase a determina a resistência ao desgaste, enquanto a fase b determina a tenacidade. Entre as duas propriedades existe uma relação inversamente proporcional, ou seja, uma alta resistência ao desgaste somente pode ser obtida com a redução da tenacidade e vice-versa.

No passado, as classes convencionais de metal duro eram limitadas quanto ao campo de aplicação. A relação entre a dureza e a tenacidade fazia com que as classes fossem mais específicas, pois uma classe que usinava bem um determinado material não usinava tão bem outro; se ela se adequasse bem ao desbaste, não era tão eficiente no acabamento. Sendo assim, uma indústria que possuísse uma grande diversidade de materiais e que usinasse desde o acabamento fino ao desbaste pesado, obrigatoriamente necessitava de uma grande variedade de classes e, por conseqüência, um inventário de ferramentas demasiadamente grande (MARCONDES, 2008).

A formação dos cavacos varia conforme o material usinado. Existem materiais como o ferro fundido cinzento que produz cavacos curtos e outros, como o aço carbono que produz cavacos longos. Os cavacos curtos causam principalmente desgastes frontais na face de folga, enquanto os cavacos longos causam particularmente craterizações na face de saída da ferramenta. O desgaste frontal se origina de um processo predominantemente abrasivo. A craterização é proveniente da combinação dos esforços de corte aliada ao atrito e à abrasão proporcionados pela formação dos cavacos. Essa combinação de fatores promove altas temperaturas na zona de corte que, por sua vez, contribuem para a ocorrência dos desgastes. O material constituinte da ferramenta, portanto, é desenvolvido de modo a prevenir desgastes que se originam nos processos de formação de cavacos particulares a cada tipo de material. Apesar de o carboneto de tungstênio (WC) e o cobalto (Co) serem os componentes mais importantes, com o tempo, outros componentes foram adicionados a essa composição básica.

A adição de carbonetos de titânio (TiC), tântalo (TaC) e nióbio (NbC) denominados fase g, melhoraram muito o desempenho das ferramentas de metal duro, desde quando utilizados pela primeira vez no final da década de 1960. Sua introdução proporcionou maior abrangência dos campos de aplicação das classes até então existentes, de forma que as novas classes passaram a conjugar propriedades de resistência ao desgaste e tenacidade ao mesmo tempo. Com propriedades mais equilibradas foi possível desenvolver classes que podiam se adequar a um leque maior de operações e materiais. Por serem carbonetos mais estáveis e duros, os carbonetos de titânio (TiC) foram adicionados para aumentar a resistência à craterização, enquanto os carbonetos de tântalo (TaC) e nióbio (NbC) deram mais tenacidade ao metal duro.

Um maior teor de carbonetos eleva a dureza da ferramenta e a torna mais adequada para operações de acabamento, que são operações mais leves, executadas em altas velocidades, pequenas profundidades de corte e avanços reduzidos, exigindo, portanto,

muito mais da dureza da ferramenta. Quanto maior o teor de cobalto da ferramenta, mais ela é adequada às operações de desbaste, que são operações executadas em velocidades de corte mais baixas, com altas profundidades e avanços maiores. Assim, essas operações geram grandes esforços sobre a ferramenta e por isso demandam maior tenacidade. Mais tarde, os pesquisadores descobriram a possibilidade de se revestir a superfície das pastilhas com finas camadas de fase g. Este revestimento pode ser obtido tanto pelo processo CVD (*Chemical Vapor Deposition*), quanto pelo processo PVD (*Physical Vapor Deposition*). Estas camadas, que medem de 3 a 5 μm de espessura, proporcionaram maior durabilidade ao fio de corte, pois a camada extrafina e extremamente dura sobre o núcleo tenaz permitiu que uma mesma pastilha suportasse tanto maiores esforços de corte, característicos das operações de desbaste, quanto às altas velocidades, necessárias às operações de acabamento (MACHADO et al. 2009).

Apesar de no início os revestimentos serem simples, a tecnologia do revestimento evoluiu até as pastilhas multirrevestidas, com camadas sobrepostas, onde cada uma delas exerce uma função específica a fim de conter os diferentes processos de desgastes que se desenvolvem durante a usinagem (KONYASHIN, 1995; DUCROS et al., 2003). Uma única pastilha em uma determinada classe pode ser aplicável tanto em acabamento quanto em desbaste de metais, que podem variar do aço ao ferro fundido. Se por um lado as classes mais abrangentes não são tão eficazes quanto às classes mais específicas, por outro lado não é necessário manter um inventário tão volumoso para dar conta da produção. A adoção de uma ou de outra solução é, portanto, uma questão de custo *versus* benefício. De modo geral, produções em massa de uma mesma peça estão mais para classes específicas, enquanto produções caóticas, com lotes variados em volume, forma e material de peças, estão mais para as classes de maior abrangência (MARCONDES, 2008).

2.3.3. Aplicações

Um dos questionamentos que se faz em relação às ferramentas de metal duro diz respeito à capacidade de suportarem ou não as altas temperaturas do processo. Como a zona de corte normalmente desenvolve elevadas temperaturas (podendo atingir temperatura de 1000 °C ou superiores) o uso de refrigerantes parece necessário para que seja atingida uma vida razoável das pastilhas.

A excessiva preocupação em elevar as taxas de remoção de metal nos últimos anos é resultado, principalmente, das contínuas melhorias das tecnologias de metal duro e de cobertura das ferramentas. Por outro lado, as novas tecnologias de materiais e processos têm permitido que as classes com cobertura também sejam aplicadas ampla e sucessivamente em operações onde se exige tenacidade. Determinados fabricantes de ferramentas desenvolvem classes e geometrias específicas, feitas sob medida, cujo objetivo é proporcionar o melhor desempenho em cada aplicação em usinagem. Tais classes também abrangem aquelas desenvolvidas para usinar materiais adicionais, sendo, por isso, otimizadas para aplicações ainda mais específicas. As classes de pastilhas assim desenvolvidas já provaram ser, de longe, o melhor caminho para que o usuário obtenha reduções significativas de custos de produção em razão de produtividade mais alta, qualidade melhorada do produto e uma vida útil confiável e previsível das ferramentas (MARCONDES, 2008).

À primeira vista, o rápido desenvolvimento das classes de metal duro com revestimento pode parecer surpreendente, uma vez que as coberturas multicamadas usadas hoje permaneceram as mesmas por mais de uma década. Uma pastilha moderna com cobertura é feita de combinações de óxido de alumínio (Al_2O_3), carboneto de titânio (TiC), nitreto de titânio (TiN) e carbonitreto de titânio (TiCN). Isso implica novas tecnologias de processo e um contínuo aperfeiçoamento dos métodos de fabricação. É esta a chave para o sucesso das atuais classes.

Esse tipo de evolução é o mesmo que tem sido bem sucedido em muitos outros ramos da engenharia, e um bom exemplo disso é o desenvolvimento de um motor de carro standard. O óxido de alumínio, também chamado de alumina, é ideal para muitas aplicações dentro da usinagem porque, como a cerâmica é muito duro, portanto resistente ao desgaste; com baixa condutividade térmica, ou seja, oferece boa barreira térmica; e alta estabilidade química, não reagindo prontamente com os materiais das peças (MARCONDES, 2008).

Conforme explicam Machado et al. (2009), as cerâmicas possuem algumas propriedades que ajudam em sua identificação, quais sejam: capacidade para suportar altas temperaturas, alta resistência ao desgaste, baixa condutividade térmica, boa estabilidade química e térmica, dentre outros. São, por natureza, quebradiças e não mostram evidências de deformação plástica antes da quebra. Como cobertura, porém, o óxido de alumínio tem bom desempenho, uma vez que é suportado por um tenaz substrato de metal duro. A cobertura de alumina tem sido aplicada em várias gerações de classes que hoje lideram a usinagem em termos de desempenho.

Várias são as aplicações das ferramentas de metal duro revestido encontradas na literatura (CORRÊA et al., 2005; DOBRZÁNSKI e GOLOMBEK, 2005; GONG et al., 2004). Estes estudos normalmente visam avaliar o desempenho dessas ferramentas, seja em termos de produtividade, de temperatura de corte, entre outros, e utilizando-se indiretamente o monitoramento do desgaste.

2.4. Desgaste e avarias das ferramentas de corte

2.4.1 Desgaste

Durante a usinagem dos metais, a ação do corte altera a forma e, portanto, a geometria original da ferramenta de corte, pois se verificam desgastes progressivos no flanco (incidência) e na face (saída) da ferramenta. A Figura 2.4 esquematiza os tipos de desgaste presentes na ferramenta, ao passo que a Figura 2.5 mostra uma padronização típica de parâmetro de desgastes de ferramentas de metal de corte. Observe que, o desgaste de cratera na face, a marca de desgaste no flanco e o entalhe são os desgastes típicos (CHILDS, T. H. C. et al, 2000).

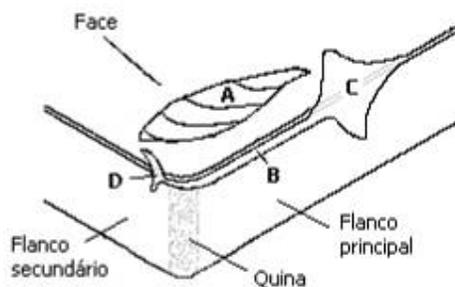


Figura 2.4. Esquema dos tipos de desgaste da ferramenta de corte: (A) desgaste de cratera; (B) desgaste de flanco; (C) e (D) entalhe. Fonte: Machado et al. (2009)

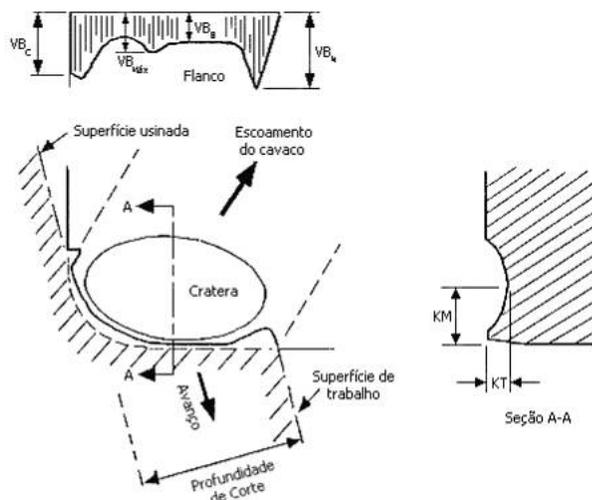


Figura 2.5. Padrão de desgaste para uma ferramenta de metal-duro. Fonte: ISO 3685 (1993)

A norma ISO 3685 determina os parâmetros de medida dos desgastes gerados no flanco e na face da ferramenta. No flanco mede-se a largura da marca de desgaste (VB), sendo: VB_B o desgaste médio de flanco, VB_{Bmax} o desgaste máximo de flanco, VB_N o desgaste de entalhe no flanco principal e VB_C , o desgaste de entalhe no flanco secundário. Na face mede-se a profundidade da cratera (KT) e a distância do centro desta ao gume (KM).

Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, a ferramenta de corte sofrerá um processo de destruição que mais cedo ou mais tarde exigirá a sua substituição. (MACHADO et al., 2009).

Mesmo se a ferramenta de corte tiver a tenacidade suficiente para evitar uma avaria, infelizmente ela não está salva. Durante a usinagem dos metais, a ação do corte muda a forma e, portanto, a geometria original da ferramenta de corte. Verifica-se um desgaste progressivo tanto na superfície de folga como na superfície de saída da ferramenta. O desgaste, conforme Machado et al.(2009), pode ser de três tipos, quais sejam: I. Desgaste de cratera; II. Desgaste de flanco; III. Desgaste de entalhe (Vide Figura 2.4).

Em condições normais de corte, uma das formas de desgaste apresentada vai prevalecer e elas se desenvolvem por vários mecanismos de desgaste.

A literatura apresenta variações na classificação dos mecanismos de desgaste, porém, grande parte dos trabalhos existentes considera pelo menos seis mecanismos diferentes (TRENT e WRIGHT, 2000). Tais mecanismos são os seguintes: deformação

plástica a altas temperaturas; deformação sob tensão de compressão; difusão; attrition; abrasão; desgaste de entalhe.

No primeiro mecanismo de desgaste, ou seja, deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas há na verdade um processo de destruição da ferramenta de corte. Ele ocorre mais provavelmente na usinagem de metais com alto ponto de fusão, em ferramentas de aço rápido. As tensões cisalhantes na interface cavaco-ferramenta nestes casos são suficientemente grandes para causar deformação plástica na superfície de saída da ferramenta de corte. Devido às altas temperaturas ali desenvolvidas, a resistência ao escoamento do material próximo à interface é reduzida. Como consequência, material é cisalhado juntamente com o cavaco e arrancado da superfície da ferramenta, formando-se assim uma cratera, explicam Machado et al (2009).

Outro mecanismo que não é propriamente um mecanismo de desgaste, e sim mais uma forma de destruição da ferramenta é a deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão. Este mecanismo ocorre na usinagem dos metais de elevada dureza. As combinações de altas tensões de compressão com altas temperaturas na superfície de saída podem causar a deformação plástica da face das ferramentas de aço rápido ou metal duro. Geralmente ocorre a altas velocidades de corte e avanço e leva a uma falha catastrófica. As tensões compressivas são máximas na face, nas proximidades da aresta de corte e decrescem exponencialmente até zero, no ponto em que o cavaco perde contato com a superfície de saída. Infelizmente, nas proximidades da aresta de corte a região em que a cunha é menos resistente, e dependendo da tensão promovida pelo material da peça, a ferramenta pode não oferecer resistência, e entrar em colapso (MACHADO et al., 2009).

Já o terceiro mecanismo apresentado, o difusivo, envolve a transferência de átomos de um material para outro e é fortemente dependente da temperatura, do tempo e da solubilidade dos elementos envolvidos (afinidade) na zona de fluxo (zona de cisalhamento secundário). Conceitos como energia de ativação (coeficiente difusivo) e tamanho de átomos são de grande importância para este mecanismo de desgaste uma vez que favorecem ou alteram a difusão (MACHADO et al., 2009).

Nas ferramentas de metal duro usinando aço, o desgaste difusivo, segundo explicam KÖNIG e KLOCKE (1997), ocorre da seguinte maneira: nas temperaturas elevadas (da ordem de 900-1000 °C), o carbono se satura na fase cobalto com apenas 0,7%. O ferro tem solubilidade total no cobalto. Assim, o ferro do aço tende a se difundir para a fase cobalto da ferramenta, fragilizando-a e aumentando a solubilidade do carbono para 2,1%. Esta maior

solubilidade do carbono na fase ferro-cobalto promove a dissociação de carbonetos de tungstênio, formando um carboneto complexo do tipo $(FeW)_{23}C_6$, liberando carbono. Este carboneto complexo de ferro e tungstênio tem uma resistência à abrasão muito menor que o carboneto de tungstênio original, fragilizando, portanto, a ferramenta de corte. Logicamente, cada par ferramenta-peça irá apresentar suas reações particulares, mas todos tendem a enfraquecer a ferramenta de corte. Não só pela perda de elementos importantes da ferramenta para a peça pelo transporte atômico difusivo, mas também pela combinação com elementos da peça que irão envolver perda de carbonetos duros e abrasivos, em troca de outros menos resistentes ao desgaste.

Quando a abrasão é a principal causa do desgaste de flanco, os padrões de desgaste são relativamente uniformes e fáceis de mensurar. Por exemplo, o tempo necessário para que a largura média da marca de desgaste de flanco (VB_B) atinja 0,3 mm é um padrão usual de fim de vida, embora esta abordagem esteja mais ligada às falhas na ferramenta que propriamente aos problemas de acabamento e/ou tolerância da peça. Porém, quando lascamentos gerados por adesão ou solicitações mecânicas mais rigorosas e/ou solicitações térmicas são a causa do desgaste de flanco, o padrão é geralmente irregular, resultante principalmente da usinagem de materiais de difícil corte. Neste caso, VB_B não mais determina a vida. Recomenda-se que seja considerada a largura máxima da marca de desgaste de flanco ($VB_{Bmáx}$). A zona onde $VB_{Bmáx}$ ocorre pode fornecer informações úteis sobre o mecanismo de desgaste e como ele pode ser reduzido (CHILDS et al., 2000). Em geral, para caracterizar fim de vida, $VB_{Bmáx} \geq 0,6$ mm (ISO 3685, 1993).

O desgaste de cratera se manifesta sob a forma de cavidade na face da ferramenta. O desenvolvimento deste tipo de desgaste está diretamente ligado à temperatura e à pressão de corte. Ao contrário do desgaste de flanco, o desgaste de cratera não influencia na rugosidade ou na tolerância, mas sim na geometria do ângulo de saída (γ_0) e no comprimento de contato cavaco-ferramenta. Ele pode, em condições térmicas inadequadas e para alguns tipos de materiais (peça), resultarem em fraturas na ferramenta devido à fragilidade do gume. A profundidade de cratera KT entre 0,05 e 0,1 mm é geralmente usada como critério de fim de vida (CHILDS et al., 2000).

2.4.2. Avarias

No caso das avarias, elas podem ser subdivididas em: trincas e fraturas (lascamentos e quebra). Segundo Machado et al. (2009), as trincas térmicas (devido ao aumento do gradiente de temperatura a cada entrada da ferramenta na peça) são a maior causa das falhas da ferramenta em altas velocidades de corte no fresamento de metal duro. Já as trincas mecânicas (por causa dos choques mecânicos na entrada e/ou na saída da ferramenta na peça – principalmente em operações de fresamento) são as principais responsáveis pelas falhas (geralmente lascamentos) em baixas velocidades de corte.

Stemmer (1995), afirma que o lascamento é uma falha acidental e prematura, que pode ocorrer quando a ferramenta é pouco resistente (ângulo de ponta “ ϵ_r ” muito pequeno pastilha muito dura e pouco tenaz) ou quando acontecem sobre-solicitações de origem mecânica (impactos ferramenta- peça, peça com inclusões duras, vibrações) ou térmica (resfriamento brusco). Já Ferraresi (1977) classifica a quebra como a ruptura da quina ou do gume pela ação de grandes forças de usinagem. Diei e Dornfeld (1987), por sua vez, explicam que a diferença entre microlascamento, lascamento e quebra está na dimensão da fratura, definida pelo volume de material perdido na ferramenta.

Em geral, os desgastes se apresentam como falhas contínuas, isto é, possuem comportamento determinístico (podem ser modeladas matematicamente) ao longo de sua progressão até a deterioração completa da ferramenta. Isto permite um controle maior da vida. Por outro lado, as avarias (ou fraturas) são falhas transitórias que ocorrem aleatoriamente (não podem ser descritas por uma função matemática explícita), levam a ferramenta ao colapso (quebra total) e freqüentemente são detectadas somente após o ocorrido (WEINGAERTNER e SOUZA, 2002). No lascamento da aresta, a superfície usinada pode ficar bastante danificada (UEHARA e TAKESHITA, 1989) sem falar na quebra, que pode acarretar danos irreversíveis à peça (COLGAN et al., 1994).

Feitas essas considerações, é preciso fazer comentários sobre outro fator de suma importância para essa pesquisa: a vida da ferramenta e os fatores que exercem influência sobre ela.

2.5. Os fatores que influenciam a vida da ferramenta

Ao longo da evolução das ferramentas procurou-se uma definição que viesse a explicar a vida de uma ferramenta de corte. A seguir, são apresentados apontamentos de alguns autores que se dedicaram à elaboração deste conceito.

Assim, para o autor Kalpakjian (1995), a vida de uma ferramenta pode ser definida como o tempo em que ela trabalha efetivamente, sem perder a capacidade de corte, dentro de um critério de tempo previamente estabelecido. Em outras palavras, a ferramenta trabalhando em condições normais de corte é usada até que o seu desgaste, previamente fixado, seja tal que exija a sua substituição. Seguindo as explicações do autor supracitado é possível averiguar que uma ferramenta deve ser substituída quando forem observados os seguintes fatores: valores elevados de desgaste podendo levar à quebra da ferramenta; temperaturas excessivas atingidas pela ferramenta durante o processo de corte; tolerâncias dimensionais fora da faixa de controle; acabamento superficial fora da faixa de controle; componentes da força de usinagem aumentam excessivamente. Além disso, dos fatores aqui citados, outros também podem definir a fixação de determinado grau de desgaste. A título de exemplificação cita-se o fator econômico.

Segundo explicam Machado et al. (2009), por meio do controle dos fatores acima citados é perfeitamente possível em uma operação de usinagem determinar se uma ferramenta deve ou não ser substituída, ou ainda, reafiada.

Ainda em relação ao conceito de vida da ferramenta, observa-se que Ferraresi (1977), faz comentário semelhante à de Kalpakjian (1995). Assim, pode-se deduzir que é o tempo de trabalho de uma ferramenta que vai determinar o fim da vida. Além disso, a forma como a ferramenta é manipulada também pode interferir em sua vida.

Um dos primeiros critérios empregados na determinação da vida da ferramenta foi através do desgaste na superfície de folga. Acredita-se que a razão para o emprego de tal critério foi a facilidade de medida desse desgaste (KALPAKJIAN, 1995).

Segundo Silva; Souto e Silva (2003), em ferramentas de corte uma das principais causas que leva à substituição é a ocorrência de uma avaria, ou seja, o surgimento de trinca, lascamento ou quebra na ferramenta. Isso ocorre com maior frequência em cortes do tipo interrompido. Neste contexto, os autores afirmam em seu artigo que a avaria é, com toda a certeza, um fato que pode comprometer substancialmente o ciclo de vida de uma ferramenta, sobretudo se ocorrer em proporções elevadas.

Portanto, ferramentas utilizadas em cortes interrompidos apresentam uma tendência muito maior para avarias. Porém estas serão mais amenas se a ferramenta de corte em questão possuir tenacidade suficiente para suportar os choques mecânicos e térmicos, conforme explicam Machado et al. (2009).

2.5.1 Com relação ao material da peça

A influência do fator material sob usinagem é, obviamente, decisiva, pois o tipo de liga metálica ou material a ser submetido à operação de usinagem depende não só da classe de material para ferramenta, como também da própria máquina operatriz, tipo e forma de ferramenta (FERRARESI, 1977).

Segundo explica Stemmer (1995), existe uma correlação, ainda que grosseira, entre a dureza e a vida da ferramenta, o qual pode ser observado através da tendência nítida de uma maior dureza do material determinar um maior desgaste da ferramenta. O autor também chama a atenção para o fato de que a encruabilidade do material também representa um papel importante na vida da ferramenta.

De outra parte, Machado et al. (2009) comentam em seu estudo que a alta resistência com suficiente tenacidade é desejável nas ferramentas de corte, no sentido de garantir a elas uma vida razoável. Do ponto de vista do material da peça, os papéis se invertem, ou seja, para se obter uma vida razoável na ferramenta de corte, o material da peça deve possuir, geralmente, baixa resistência e tenacidade.

A adição de elementos/componentes como sulfetos, chumbo, selênio, telúrio e grafite, sempre aumentam a usinabilidade enquanto que a adição de partículas abrasivas duras como carbonetos, nitretos ou carbonitretos, são sempre prejudiciais, pois eles aumentarão o desgaste abrasivo da ferramenta de corte; a presença de elementos ou inclusões de livre corte, tais como Pb, Se, Bi, Te, MnS, MoS no aço ou em outro material metálico funcionam como lubrificantes internos e formam um filme na interface, com resistência ao cisalhamento menor que a resistência da matriz, eliminando por completo a zona de aderência, prevalecendo totais condições de escorregamento, diminuindo assim, as temperaturas das ferramentas;

Machado et al. (2009) e Trent e Wright (2000) ainda fazem as seguintes ponderações em relação à vida da ferramenta de corte:

» Adições de Enxofre, Selênio e Telúrio sempre melhoram a usinabilidade dos aços inoxidáveis;

» Fósforo: Teores de 0,15% nos ferros fundidos promovem o aparecimento do eutético fosforoso chamado Steadita. Ela está presente, independentemente, nos ferros fundidos cinzentos ou nodulares, ou associada com os carbonetos no ferro fundido branco. Possui extrema dureza, com alta resistência à abrasão. A usinabilidade é reduzida, principalmente, em teores de fósforo acima de 2%. O aparecimento da Steadita nos ferros fundidos perlíticos promove a transformação de parte da perlita em ferrita, o que pode compensar o efeito na usinabilidade;

» Estanho: Teores de 0,05 a 0,15% no ferro fundido cinzento aumentam a usinabilidade e a vida da ferramenta. Promove uma menor faixa de dureza ao longo do material fundido (mais uniforme);

» Carbonetos: Alta dureza e diminuem a vida da ferramenta, mesmo em pequenas quantidades. A vida da ferramenta cai drasticamente com o aumento da velocidade de corte. As forças de usinagem são elevadas;

» Óxidos: São inclusões duras (Al_2O_3 , MgO, TiO, etc.) diminuem a vida da ferramenta e aumentam as forças de usinagem;

» Sulfetos: Inclusões de sulfetos de Manganês aumentam a vida da ferramenta. Diminuem a resistência ao cisalhamento e atuam como lubrificantes na interface cavaco-ferramenta;

» Silicatos e Nitretos: Possuem dureza e abrasividade, diminuindo a vida da ferramenta, aumentando o desgaste abrasivo;

» Cobre: É um suave grafitizador e anti-ferritizador durante as transformações no estado sólido, logo, elimina pontos duros (carbonetos) e elimina pontos moles (ferrita), formando uma mistura mais homogênea, aumentando a usinabilidade e a vida da ferramenta;

» Magnésio: A presença do magnésio nos ferros fundidos nodulares aumenta a usinabilidade destes, por promover a grafitização. A usinabilidade vai depender, assim, da dureza da matriz do ferro fundido nodular;

» Enxofre: Adições de Enxofre (juntamente com o manganês), chumbo ou telúrio, levam à produção de aços de livre corte (ou aços de corte fácil);

» Cálcio: Os aços desoxidados com cálcio geram menos desgaste nas ferramentas de corte, do que quando a desoxidação é feita com o Silício.

» Tamanho do grão: O tamanho dos grãos influencia a usinabilidade. Perlitas grossas, por exemplo, geralmente são mais usináveis que as perlitas finas.

De acordo com Black (1961) apud Ferraresi (1977), durante a solidificação de uma liga, ou mesmo após a solidificação, em certas ligas, quando se forma uma discordância, os átomos maiores do elemento de liga tendem a se colar a uma discordância, devido ao fato de aí encontrar maior espaço do que em outro lugar. Por isso se afirma que as discordâncias têm atração pelos elementos de liga, assim como pelas impurezas. Nestes casos, depois da liga atingir a temperatura ambiente, e então sofrer uma tensão, o movimento da discordância será bloqueado pelo elemento de liga (ou impureza). Assim a resistência ao escoamento da liga fica aumentada, significando isso à necessidade de uma maior tensão para produzir o movimento da discordância.

Conforme explicações de Ferraresi (1977), quanto maior o átomo do elemento de liga, maior será o acréscimo de resistência na liga. Se o átomo do elemento de liga fosse da mesma dimensão do átomo do elemento base da liga, a disposição final pouco ou nada alteraria e a estrutura cristalina teria a mesma resistência. Entretanto, se houver átomos de dimensões diversas como nos casos de aço-liga, ou se houver inclusões ou precipitados endurecidos, o movimento das discordâncias poderá ser bloqueado.

Quanto à fusão e processo de fundição, a literatura descreve que quando o aço é vazado em lingoteiras, produzindo lingotes, estes são submetidos, posteriormente à solidificação e a processos diversos de conformação mecânica. Nestes casos, os aços podem ser classificados em quatro tipos, de acordo com a prática empregada na desoxidação do aço, ou alternativamente pela quantidade de gás desprendido durante a solidificação (VAN VLACK, 1981). O autor tece os seguintes comentários quanto à classificação dos aços:

» Aços acalmados: Verifica-se apenas um pequeno desprendimento de gases durante a solidificação e para alcançar essa situação, são adicionados elementos desoxidantes, principalmente silício e alumínio e, eventualmente, titânio e zircônio;

» Aços semi-acalmados: O desprendimento de gases é maior que nos aços acalmados, mas menor que nos aços efervescentes e semi-desoxidados;

» Aços efervescentes: Não se utilizam elementos desoxidantes e, por esse motivo, apresentam uma diferença acentuada de composição química através da secção transversal e do fundo ao topo do lingote, em função do processo de solidificação e desprendimento de gases;

» Aços semi-desoxidados: Apresentam características semelhantes aos aços efervescentes, porém em menor grau. Neles pode-se eventualmente acrescentar um desoxidante para controlar o desprendimento de gases.

Ainda, segundo apontamentos de Van Vlack (1981), sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, admite-se geralmente que o aço fundido seja de qualidade inferior ao trabalhado. Além disso, é freqüente as peças fundidas apresentarem alguns defeitos superficiais ou internos, típicos dos processos de fundição. A rigor, portanto, as peças de aço fundido devem possuir certos requisitos, quais sejam: homogeneidade (seção sã em toda a sua extensão); granulação fina; completa isenção de tensões internas.

O método mais comum de se alterar microestruturas é através dos vários tratamentos térmicos, cada qual destinado a produzir uma estrutura específica. Os tratamentos térmicos mais comuns para materiais metálicos são os seguintes: recozimento, a normalização, a têmpera e o revenido (VAN VLACK, 1981).

Abaixo é dada uma breve explicação desses tratamentos térmicos com base nas observações de Van Vlack (1981) e Machado et al. (2009):

» Recozimento: O recozimento tem a finalidade de remover o encruamento e aumentar a ductilidade nos metais, aliviar tensões residuais e amolecer o material. O procedimento consiste em aquecer o material acima da temperatura de recristalização. A palavra recozimento tem uma conotação específica quando utilizada para designar um tratamento térmico para os aços, o qual é feito aquecendo-se o aço até o campo austenítico e, em seguida, resfriando-o lentamente;

» Recristalização: Qualquer metal cujas superfícies são deformadas plasticamente durante a operação de usinagem, pode sofrer recristalização quando aquecida a temperaturas superiores às temperaturas de recristalização;

» Normalização: Tem por objetivo a homogeneização e alívio de tensões. O tratamento térmico mais simples consiste no aquecimento do aço, até formação de austenita, seguido pela sua remoção do forno para que se esfrie ao ar. Esse processo denominado normalização, é semelhante ao recozimento comum, diferindo apenas na

velocidade de resfriamento que, no primeiro caso é maior, originando uma estrutura mais fina;

» Têmpera: O objetivo é endurecer o material; consiste em resfriar bruscamente do campo austenítico para o martensítico. É seguido pelo revenido;

» Revenido: O objetivo é aumentar a tenacidade após o tratamento de têmpera aquecendo em temperatura alta durante um período curto ou em temperatura baixa para começar a reação $M \rightarrow \alpha + \text{cementita}$.

De acordo com as observações de Machado et al. (2009), as altas temperaturas desenvolvidas durante a usinagem podem promover a transformação de fase na superfície dos componentes usinados. Na usinagem dos aços, pode ocorrer a formação de martensita frágil e não-revenida.

Segundo Mills e Redford (1983), para usinar com baixas forças de corte, baixas tensões, baixas temperaturas de corte e, portanto, pequenas taxas de desgaste e boa usinabilidade são desejáveis as seguintes propriedades nos materiais da peça: baixa dureza, baixa ductilidade, baixo limite de escoamento, baixo índice de encruabilidade, alta condutividade térmica, baixa reatividade química com a ferramenta e com a atmosfera, baixa tenacidade, e sem tendência à formação de APC.

A alta dureza requer mais esforço da ferramenta para a formação do cavaco, a alta ductilidade é indesejável, pois promove grandes comprimentos de contato cavaco-ferramenta e grandes forças de usinagem, desta forma deve haver um equilíbrio entre essas duas propriedades, pois geralmente, quando um material possui baixa dureza, ele possui alta ductilidade. A baixa condutividade térmica contribui para o desenvolvimento de altas temperaturas e com isso para o desgaste das ferramentas.

2.5.2 Com relação ao processo de usinagem

De acordo com as observações de Stemmer (1995), a severidade dos processos de usinagem varia desde os mais pesados cortes de brochamento até os mais leves de retífica. Neste contexto, um dos fatores de redução da vida da ferramenta, especialmente no que tange ao metal duro e à cerâmica é a vibração. Esta, mesmo que de pequena intensidade já produz micro lascamentos do gume, reduzindo a durabilidade de ferramentas de materiais

frágeis. Ferramentas de aço rápido são menos sensíveis. O autor explica que as vibrações do sistema peça-ferramenta podem ser classificados em dois grupos: vibrações forçadas e vibrações auto-excitadas.

Vibrações forçadas, segundo Stemmer (1995) são as que decorrem de forças variáveis, atuando ciclicamente e obrigando a ferramenta ou a peça a vibrar com uma frequência igual ao destas forças, podem ser causadas por uma fonte externa, pela própria máquina ou devido à ação de forças geradas durante o corte do material. A amplitude de vibração depende em grande parte da relação entre a frequência da força perturbadora e a frequência própria da peça ou da ferramenta. Já as vibrações auto-excitadas são as que decorrem de uma instabilidade dinâmica do sistema peça-ferramenta, é a vibração relativa entre ferramenta e peça, exercendo influência significativa na vida da ferramenta.

Outra causa de vibrações é o atrito entre a superfície usinada e o flanco (superfície de incidência) da ferramenta. A tendência à vibração cresce com o aumento da largura da marca de desgaste e com o comprimento ativo do gume (STEMMER, 1995).

A vida da ferramenta é evidentemente influenciada pelas dimensões do corte. Como regra geral, a combinação de uma profundidade de corte (ap) máxima possível e de um grande avanço (f) com uma baixa velocidade de corte (vc) determina uma alta taxa de remoção de material durante uma dada vida da ferramenta. A aplicação desta regra é bastante vantajosa na usinagem de desbaste de peças estáveis em máquinas rígidas, que permitem operações de corte pesadas. Os limites de aplicação desta regra são dados pela progressiva piora do aspecto da superfície usinada e pelo aumento das forças atuantes na ferramenta, na peça e na máquina. No limite há, pois, problemas de qualidade de acabamento, dificuldade de sujeição da peça que escorrega na placa, empenamento da peça, quebra da ferramenta, deformações elásticas na máquina-ferramenta, dentre outros (STEMMER, 1995).

2.5.3 Com relação ao fluido de corte

O primeiro pesquisador que constatou e mediu a influência de fluido de corte durante o processo de usinagem foi o americano F. W. Taylor (1894). Tal constatação partiu da observação dos efeitos de uma grande quantidade de água na região peça-ferramenta-cavaco, no qual foi possível aumentar a velocidade de corte de 33% sem prejuízo para a

ferramenta de corte. Naturalmente a idéia da água surgiu em função da necessidade de minorar o indesejável efeito da alta temperatura sobre a ferramenta – o jorro de água levaria consigo parte do calor gerado durante o corte do material (FERRARESI, 1977).

Os fluidos de corte aumentam a vida das ferramentas por suas propriedades lubrificantes e/ou refrigerantes. As principais funções são, segundo Machado et al. (2009): a lubrificação a baixas velocidades de corte; e refrigeração a altas velocidades de corte. Ele deve ser aplicado usando um método que permita que ele chegue o mais próximo possível da aresta de corte, dentro da interface cavaco-ferramenta, para que ele possa exercer suas funções apropriadamente. As propriedades refrigerantes e lubrificantes são as seguintes:

» Propriedades refrigerantes: Como refrigerantes, os fluidos de corte diminuem a temperatura de corte, tanto pelo aumento da dissipação de calor (refrigeração), como também pela redução da geração de calor (lubrificação);

» Propriedades lubrificantes: Como lubrificante o fluido de corte age para reduzir a área de contato cavaco-ferramenta, e sua eficiência vai depender de sua habilidade de penetrar na interface cavaco-ferramenta, no pequeno espaço de tempo disponível, e de formar um filme, seja por ataque químico ou por adsorção física, com a resistência ao cisalhamento menor que a resistência do material da interface.

A Figura 2.6 mostra as direções possíveis de aplicação do fluido de corte.

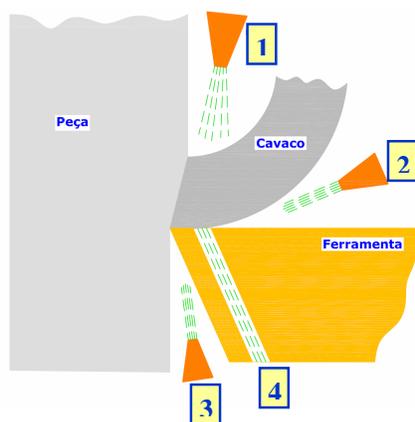


Figura 2.6 - Vias de aplicação do fluido de corte: 1) sobre-cabeça; 2) na superfície de saída do cavaco; 3) na superfície de folga e 4) pelo interior da ferramenta Fonte: Adaptado de Almeida, (2008).

Micaroni (2006) estudou a viabilização do corte a seco, da aplicação do fluido de corte em fluxo abundante ou convencional e em alta pressão em diferentes direções no torneamento do aço ABNT 1045, empregando-se ferramentas de metal duro em operação de acabamento, tendo como variáveis de saída o desgaste e vida da ferramenta, rugosidade da peça, potência e temperatura de corte. Foi observado que a redução da vazão e o aumento da pressão do fluido de corte aumentaram a vida da ferramenta em relação às outras condições de refrigeração, e que a redução da vazão não alterou significativamente a temperatura de corte da ferramenta.

Ezugwu e Bonney (2004) avaliaram a possibilidade de se utilizar fluido em alta pressão no torneamento do Inconel 718 com velocidades de corte 20, 30 e 50 m/min, avanço de 0,25 e 0,3 mm/rot., profundidade de corte de 2,5 e 3,0 mm, vazão do fluido de 20 a 50 l/min e pressão de 11, 15 e 20,3 MPa, com direção de aplicação entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta e utilizando ferramenta de metal duro revestido. Os autores concluíram que a baixa pressão o fluido não é eficaz para penetrar na região onde acontece o corte em razão das altas temperaturas e propensão à aderência do material. Concluíram ainda que com $v_c = 20$ m/min, $f = 0,25$ e $0,3$ mm/rot e pressão de 20,3 MPa, a vida da ferramenta aumentou em 740% quando comparada à aplicação de maneira convencional. Foi notado que, para qualquer velocidade de corte, a temperatura na interface cavaco-ferramenta diminuiu.

2.5.4 Com relação à ferramenta de corte

Tem influência ponderável na velocidade de corte admissível, sendo que, para metal duro, a velocidade admissível é, em média, 4 a 5 vezes superior ao aço rápido (STEMMER, 1995).

As ligas fundidas, metais duros e cermets possuem durezas maiores que as ferramentas de aço rápido e, portanto, suportam trabalhar a temperaturas mais elevadas. Como a taxa de remoção do material, quando se utiliza essas ferramentas, é alta, a aplicação de um refrigerante se torna necessário para o aumento da vida.

Segundo Machado et al. (2009) e Yen et al. (2004), a geometria da ferramenta de corte exerce influência na usinagem dos metais, mais especificamente na zona de deformação da peça, distribuição de tensão, temperatura e esforços de corte.

De acordo com Rodrigues (2005), a geometria do inserto também representa uma variável de extrema relevância na fenomenologia da usinagem, uma vez que pequenas alterações dimensionais e angulares causam respostas distintas quanto ao comportamento do material da peça sobre a aresta de corte da ferramenta.

Diversos elementos constituintes da geometria das ferramentas de corte podem ser modificados visando aperfeiçoar seu desempenho. Os seguintes elementos da ferramenta podem ser combinados: raio de ponta r_ϵ , ângulo de saída γ_0 , ângulo de folga α_0 , ângulo de inclinação λ , ângulo de posição χ , quebra cavaco, chanfro da aresta de corte, raio de arredondamento, entre outros (RODRIGUES, 2005).

Conforme Machado et al. (2009), o ângulo de saída influi decisivamente na força e potência necessária ao corte, no acabamento superficial e no calor gerado. Werthein et al. (1994), por sua vez, afirmam que o ângulo de saída de até 25° em insertos utilizados em fresamento facilitam a deformação do cavaco e minimizam as forças de corte.

De acordo com Kaldor e Malkin (1986), o ângulo de folga é um dos elementos mais negligenciados pela literatura. Na tentativa de contribuir para o entendimento deste processo, os autores afirmam que se o ângulo de folga for pequeno, a ferramenta não penetra convenientemente no material. Ademais, a ferramenta perde o corte, há grande geração de calor e o acabamento superficial é prejudicado. Por outro lado, se o ângulo de folga for demasiadamente grande provoca fragilidade da cunha cortante, conduzindo a ferramenta à falha. Dessa maneira, existe um valor ótimo que maximiza a vida da ferramenta e sua principal função é minimizar o atrito entre a superfície da peça e a superfície de folga da ferramenta e garantir a folga quando a velocidade de avanço for significativa.

O ângulo de inclinação, sendo negativo, controla a direção de saída do cavaco, protege a quina da ferramenta contra impactos no fresamento frontal e atenua vibrações geradas pelo processo. O ângulo de posição distribui as tensões de corte de forma favorável no início e no fim do corte e gera a força passiva na ferramenta, contribuindo para a redução dos níveis de vibração.

Vários estudos sobre otimização da geometria de corte já foram realizados, especialmente em operações de torneamento, fresamento e furação. Geralmente, as pesquisas realizadas avaliam à maximização da vida da ferramenta e indicam que pequenas modificações na aresta cortante podem aumentar a resistência mecânica, prolongando a vida da ferramenta (RODRIGUES, 2005).

Atualmente, os fabricantes de ferramenta têm preparado a aresta cortante inserindo basicamente três pequenas modificações: raio de aresta, chanfro de aresta e aresta chanfrada com raio. O raio de aresta tem como principal característica aumentar a resistência mecânica da própria aresta de corte. Costuma variar de centésimos a décimos de milímetros. Dependendo do material usinado e da magnitude do raio, esse tipo de geometria gera alterações microestruturais na superfície da peça e produzem maiores tensões residuais de compressão, favoráveis à integridade superficial do componente trabalhado (RODRIGUES, 2005).

O chanfro de aresta representa outro elemento importante da geometria. Sua ação vai do fortalecimento da aresta, reduzindo as ocorrências de falha prematura, até melhor distribuição de tensão e mais eficiente dissipação de calor (RODRIGUES, 2005).

Sikdar et al. apud Silva (2002), concluíram que arestas de corte chanfradas são mais resistentes ao lascamento quando comparadas às arestas arredondadas, mas causam aumento das forças de avanço.

Silva et al. (2001) apud Rodrigues (2005) fizeram uma análise sobre o comportamento de diversas geometrias de ferramentas cerâmicas e de PCBN no torneamento com HSM (High Speed Machining) do Inconel 718, material com elevada resistência mecânica, à fadiga, à corrosão, à fluência e alta dureza a quente. Conforme sublinha Rodrigues (2005), no estudo desenvolvido por Silva et al (2001), foram testadas as ferramentas de cerâmica com *Whiskers*, cerâmica mista e PCBN, associadas aos formatos quadrado, redondo e triangular. As arestas de corte foram modificadas inserindo-se um raio de aresta de 0,03mm e chanfro de aresta de 0,15x15°. O inserto sem modificação não possui raio de aresta e o chanfro de aresta mede 0,10x20°. A Figura 2.9 ilustra as modificações realizadas por Silva et al (2001) para os testes com medição de força e temperatura.

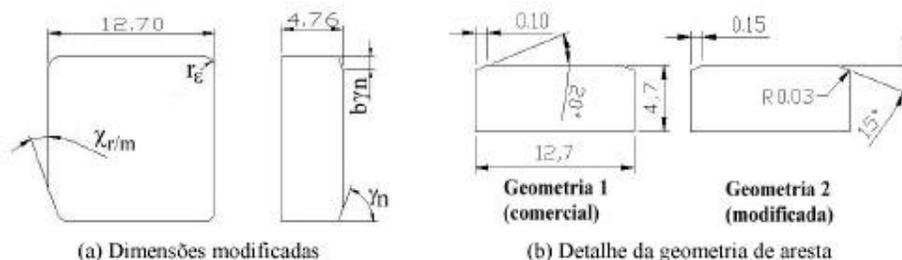


Figura 2.9. Alterações na geometria dos inserts feitas por Silva et al (2001). Fonte: Rodrigues (2005)

Tomando como exemplo as observações de Rodrigues (2005), constata-se que os testes realizados por Silva et al (2001), tomaram como parâmetro velocidades de corte de 300, 400, 500 e 600 m/min e avanço de 0,05; 0,10 e 0,15mm/rot., sob profundidade de corte constante de 0,35mm. No presente estudo algumas investigações puderam ser concretizadas, dente elas Rodrigues (2005) comenta que o raio de aresta acabou por não influenciar nos esforços do processo e que a geometria otimizada, decorrente da geometria original do fabricante da ferramenta, apresentou-se mais eficiente.

2.5.5. Material da ferramenta

De acordo com Christoffel (2001), existem aprimoramentos alcançáveis tecnologicamente hoje em dia. Segundo ele, alterando os substratos das ferramentas e diminuindo o tamanho médio dos grãos para ordens nanométricas, é possível aumentar substancialmente a dureza e a resistência mecânica da ferramenta de corte.

Para Rodrigues (2005), essa pode ser uma nova tendência a ser seguida pelos fabricantes de ferramentas, já que estes buscam sempre investir em técnicas mais avançadas de aprimoramento da ferramenta de corte. A Figura 2.10 ilustra graficamente e estatisticamente o futuro para o desenvolvimento de substratos de ferramenta de corte.

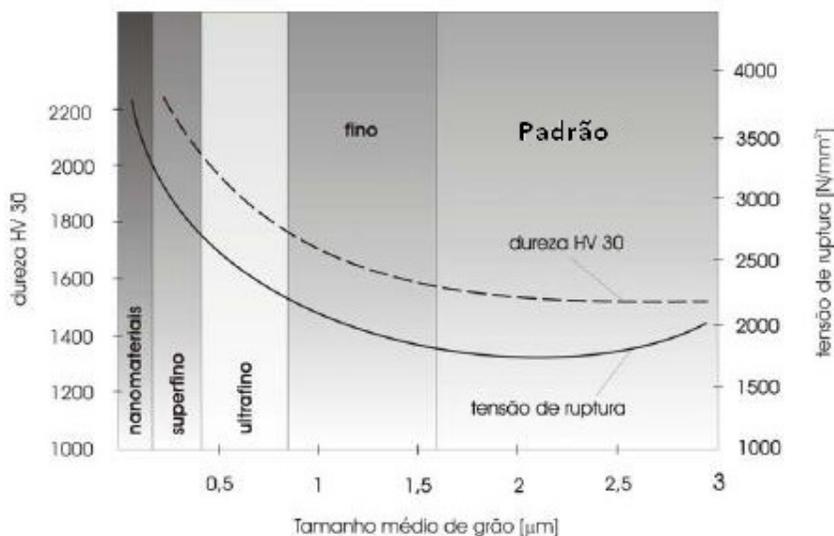


Figura 2.10. Desenvolvimento de substratos para ferramentas de corte com relação do tamanho de grão. Fonte: Rodrigues, 2005, (adaptado de Christoffel, 2001)

2.5.6 Formato do inserto

Segundo Nascimento e Abrão (2000), a geometria da ferramenta exerce influência decisiva em seu desempenho. Os autores referenciados no trabalho de Rodrigues (2005) afirmam que é praticamente impossível prever qual geometria é ideal para um determinado caso. Isso ocorre porque as variáveis envolvidas são muitas, pois além da geometria da ferramenta, existem os parâmetros de corte, os materiais da peça e da ferramenta e o processo. Observação semelhante é feita por Debiasi (2006) quanto à geometria da ferramenta.

De acordo com as observações de Rodrigues (2005), os pesquisadores Nascimento e Abrão (2000) investigaram o comportamento de três ferramentas intercambiáveis no processo de torneamento do aço SAE 1045. Uma análise preliminar deste estudo coloca em evidência que os ângulos de posição, saída, folga e o raio de ponta eram iguais, porém com diferentes formatos dos insertos.

A Figura 2.10 mostra os formatos diferenciados das ferramentas no processo de torneamento do aço SAE 1045. Fixando a profundidade de corte igual a 1mm, os pesquisadores variaram as velocidades de corte e avanço.

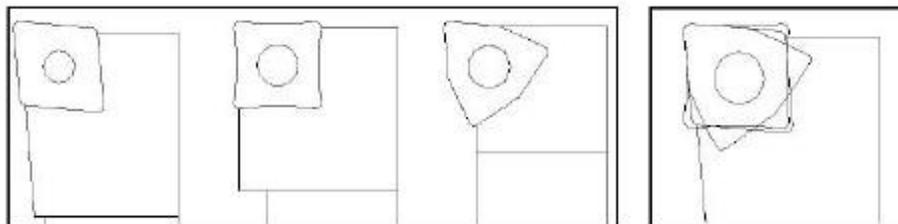


Figura 2.10. Formatos das ferramentas de corte utilizados por Nascimento e Abrão (2000).
Fonte: Rodrigues (2005)

Para Rodrigues (2005), o experimento efetuado por Nascimento e Abraão (2000) os levou a concluir que o formato do inserto afeta o desempenho da usinagem, mesmo utilizando geometrias iguais entre os insertos.

2.6. Usinagem de metais

Segundo Luis (2001) a operação de usinagem pode ser entendida como um processo que visa conferir à peça a forma, dimensões ou acabamentos, ou ainda, a combinação dessas variáveis na produção do cavaco. Cavaco, segundo apontamentos de Machado et al., (2009) pode ser definido como a porção de material da peça, que é retirada pela ferramenta e que tem como uma de suas características forma geométrica irregular. O processo de fabricação encontra-se descrito na Fig. 2.11.

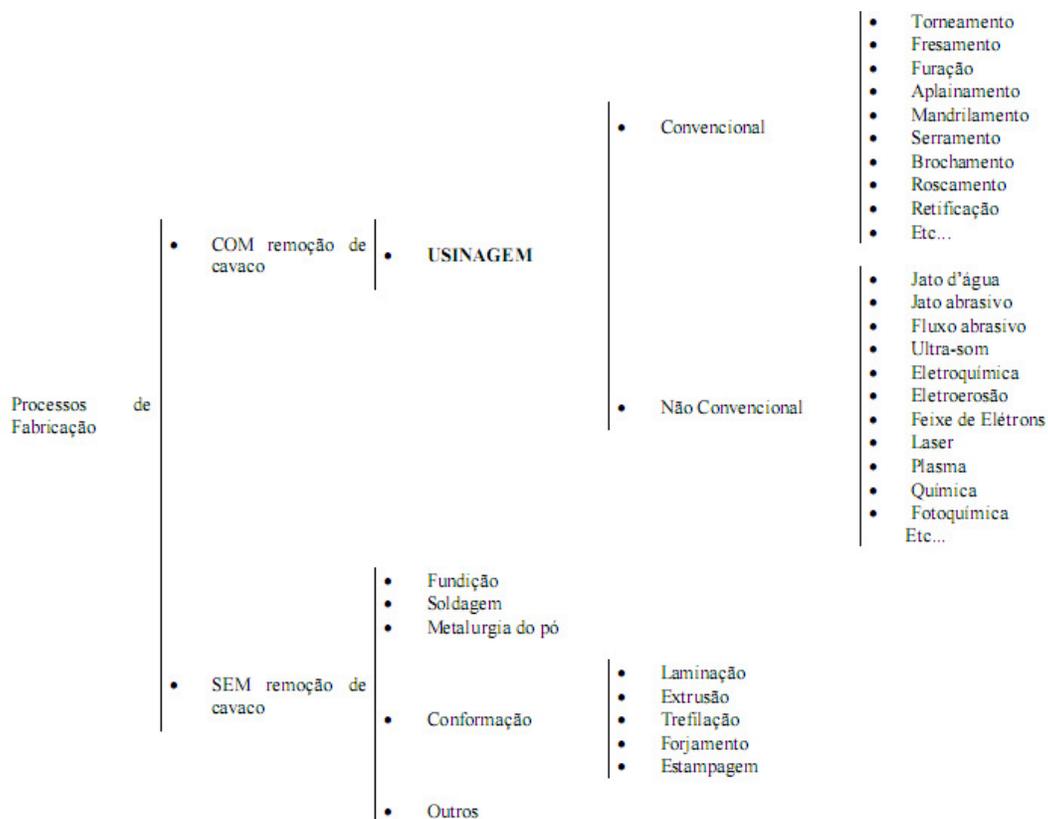


Figura 2.11: Classificação dos processos de fabricação. Fonte: adaptado de Machado et al (2009)

Conforme apontamentos de Luis (2001) os dados explicitados na Fig. 2.11, coloca em evidência a classificação dos processos de fabricação. Chama a atenção para dois fatores: o torneamento, que utiliza uma ferramenta de geometria definida, bem como a retificação que utiliza abrasivos sem geometria específica.

Não cabe aqui fazer uma análise detalhada sobre todo o processo de usinagem. Porém, importa saber, conforme afirmações de Trent e Wright (2000), Machado et al. (2009) e Luis (2001) que a usinagem é, sem dúvida alguma, um dos processos de fabricação mais conhecidos em todo o mundo. Conforme Luis (2001), nos Estados Unidos, os gastos com usinagem são gigantescos e isso, de certa forma, revela a importância da usinagem na era contemporânea.

De outra, parte Marcondes (1990) também destaca em seu trabalho a importância da usinagem de metais, em suas palavras *“parte do mundo é subsidiado pela usinagem de metais.”* O autor afirma que a usinagem perfeita é possível mediante a utilização de máquinas e equipamentos para cada tipo de aplicação.

Trent e Wright (2000); Luis (2001), em suas afirmações sobre a usinagem esclarecem que a sua eficácia guarda estreita correlação com vários fatores, dentre os quais: a classe de metal duro, a geometria das arestas, os parâmetros de corte, o sistema de fixação, etc. Mesma observação foi relatada por Marcondes (1990).

2.6.1. Ensaios de usinabilidade

Rodrigues (2005) ao fazer uma análise sobre os ensaios de usinabilidade concluiu que a usinabilidade de metais pode ser definida como uma grandeza tecnológica, sendo que essa expressa um conjunto de propriedades da usinagem dos metais em relação a outro tomado como padrão. O autor afirma que a dificuldade ou facilidade de se usinar um metal é uma das características da usinagem.

Na usinagem de metais algumas variáveis estão presentes, quais sejam: vida da ferramenta, força do corte, energia despendida no processo de usinagem, dentre outros. Sobre este tema, Rodrigues (2005) em referência as observações de Diniz et al (2000), comenta que a usinabilidade não depende apenas da combinação dos materiais da peça e da ferramenta, pois existem ainda outros fatores a serem considerados, quais sejam: as características da ferramenta, as condições de refrigeração, a rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça-dispositivo de fixação.

Os fatores que influenciam na determinação da usinabilidade dos metais já foram estudados por vários pesquisadores, dentre os quais Diniz et al. (2000). Neste contexto, observa-se que eles estão relacionados ao material da peça, ao processo mecânico e

condições de usinagem e critérios empregados na avaliação. Este processo, por sua vez, encontra-se explicitado no trabalho de Rodrigues (2005):

a) Material da peça

- » Composição química
- » Microestrutura
- » Dureza
- » Propriedades de tensão e deformação
- » Rigidez da peça

b) Processo mecânico e condições de usinagem

- » Material da ferramenta
- » Condições de usinagem (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, geometria da ferramenta)
- » Fluidos de corte
- » Rigidez da máquina-ferramenta e sistema de fixação
- » Tipo de trabalho executado pela ferramenta (corte contínuo ou intermitente, condições de entrada e saída da ferramenta)

c) Critério básico empregado na avaliação

- » Baseado na vida da ferramenta
- » Baseado na força de usinagem
- » Baseado no acabamento superficial
- » Baseado na produtividade

d) Critério específico empregado na avaliação

- » Baseado na análise dimensional
- » Baseado na temperatura de corte
- » Baseado nas características do cavaco
- » Baseado na energia fornecida de corte

Ainda, segundo Rodrigues (2005), a maioria dos ensaios de usinabilidade converge para análises sobre o comportamento do material diante da combinação peça-ferramenta, relacionadas às grandezas características da usinagem, como desgaste da ferramenta, força de corte, acabamento superficial e temperatura de corte, entre outras.

Segundo Mills e Redford (1983), os testes de usinabilidade podem ser classificados em dois grupos, ou seja, os testes que requerem usinagem e os testes que não requerem usinagem. Podem ser classificados ainda, segundo os autores, em dois subgrupos que são os ranking testes, ou seja, testes ranqueadores, que indicam a usinabilidade relativa de duas ou mais combinações de pares ferramenta/peça, para uma dada condição de corte e os testes absolutos, geralmente válidos para uma faixa de condições de corte.

Os testes que não requerem usinagem são sempre ranking testes. Os que requerem usinagem podem ser ranqueadores ou absolutos. De acordo com o tempo eles podem ser classificados em testes de longa duração ou curta duração. Os testes ranqueadores são sempre de curta duração, os absolutos são quase sempre de longa duração (MACHADO et al., 2009).

A figura 2.12 traz um esquema didático da classificação dos testes de usinabilidade.

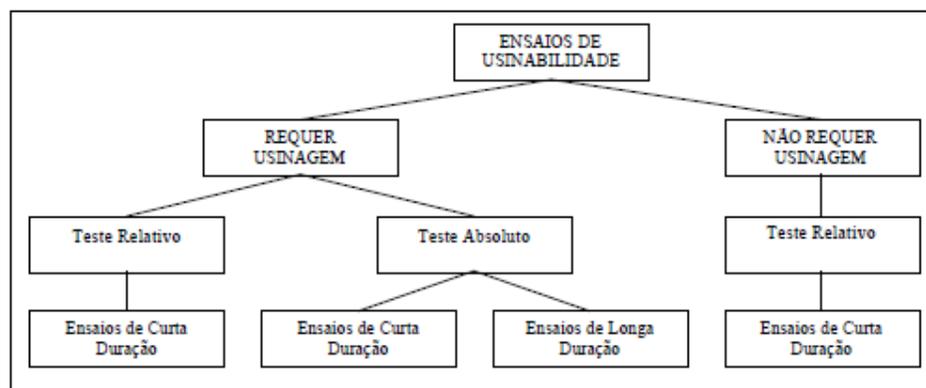


Figura 2.12. Classificação dos ensaios de usinabilidade Fonte: Mills e Redford (1983)

2.7. Intercambio de arestas

As buscas realizadas neste trabalho não levaram a literatura alguma que estudasse direta ou indiretamente o problema tratado nesta dissertação, ou que pelo menos comentasse ou citasse a existência da influencia de testes previamente realizados em uma aresta de corte sobre outros realizados em arestas adjacentes.

Na literatura pesquisada foram encontrados artigos que apresentam estudos sobre insertos intercambiáveis, mas estes focavam em fenômenos diversos, como efeitos da aresta postíça de corte, temperatura, força, entre outros temas (VENKATESH E SHUE, 1996; GRZESIK, 1998 E 1999).

O trabalho, portanto, partiu do pressuposto que a afirmação feita por alguns especialistas em usinagem teria que ser comprovada cientificamente, ou seja, que a seqüência de uso das arestas de um inserto influenciaria na vida dessas arestas.

2.8. Ferramentas estatísticas

Segundo Meyer (2003), a estatística tem por finalidade contribuir para a investigação e a solução de problemas de várias áreas do conhecimento humano. No século XX estudos envolvendo métodos estatísticos ganharam proeminência, tornando-a uma ciência cada vez mais respeitada e que inclui, em seu bojo, princípios da tecnologia e lógica para a resolução e a investigação de problemas.

Para Costa Neto (2004), a estatística moderna traz várias vantagens para os experimentos em várias áreas do conhecimento humano (engenharia, economia, administração, etc.) e pode ser entendida como uma ciência experimental e observacional que permite avaliar e estudar as incertezas e seus efeitos, bem como interpretar fenômenos da natureza e da sociedade.

Estatística, na visão de Are (2001) vai além de cálculos matemáticos, da construção de gráficos e tabelas. Trata-se de uma ciência multidisciplinar, que pode ser utilizada para fazer o levantamento de dados em outros ramos da ciência.

Para Rao (1999), a estatística é uma ciência ao mesmo tempo ampla e complexa que ajuda no levantamento de dados acerca de um determinado problema, sempre com a máxima quantidade de informação possível. Ela pode, perfeitamente, trazer a resposta para um determinado problema que está sendo investigado.

O que leva um pesquisador a fazer experimentos é o desejo de encontrar a solução de determinados problemas. Assim, conhecer a metodologia utilizada em planejamento experimental é de grande relevância para o pesquisador, à medida que reduz as possibilidades de conclusões duvidosas sobre o experimento (BARROS et al., 1995).

A essência de um bom planejamento consiste em projetar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer exatamente o tipo de informação que o pesquisador busca. Para isso é preciso considerar alguns fatores dentre os quais: o que vai ser investigado no experimento. Conforme explicam Barros et al. (1995), um bom experimentador é, antes de tudo, uma pessoa que sabe o que quer.

A realização de testes de hipótese é de fundamental importância para a realização de inferências estatísticas. Uma hipótese estatística é uma afirmação sobre uma população. Sua validade é avaliada a partir da informação obtida da amostra da população. Das hipóteses consideradas, a primeira pode ser chamada de hipótese de nulidade (H_0) e a outra é chamada de hipótese alternativa (H_1).

Segundo Barrozo (2006), a escolha de H_0 e H_1 toma como base uma investigação, estando essa relacionada a um fato baseado na amostra. A negação deste fato é considerada como hipótese de nulidade (H_0) e o fato a ser comprovado pelos dados é considerado como a hipótese alternativa (H_1).

No planejamento experimental, a diferença entre médias é um teste estatístico amplamente difundido entre os analistas, e visa, fundamentalmente, verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Os fatores propostos podem ser de origem qualitativa ou quantitativa, mas a variável dependente necessariamente deverá ser contínua.

2.8.1. Considerações sobre média, desvio padrão e variância

Nessa linha de pensamento a estatística tem alguns conceitos interessantes e estes, por sua vez, são à base desta ciência. No presente item pretende-se tão somente apresentar os conceitos sobre a média, desvio padrão e variância.

Segundo Costa Neto (2004), Are (2001) e Meyer (2003), média em estatística é o valor dos dados de uma distribuição, sendo também considerada o ponto de equilíbrio de uma frequência. Existem vários tipos de média: a média ponderada, geométrica, aritmética, harmônica, dentre outras. Cada uma dessas médias é obtida por meio de um cálculo específico. Em suma, a média é utilizada para representar todos os valores de uma distribuição.

Quanto ao desvio padrão Meyer (2003) explica que, no estudo da probabilidade e da estatística, é uma das medidas mais comuns da dispersão estatística. Em termos de definição é a raiz quadrada da variância, sendo o seu conceito introduzido na estatística através da publicação da obra “sobre a dispersão de curvas de frequência assimétrica”, pelo pesquisador Karl Pearson no ano de 1894. A equação para o cálculo do desvio padrão é a seguinte:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (1)$$

O Desvio padrão, na estatística é uma medida que assume tão somente valores positivos. Em outras palavras, o desvio padrão assume valores não negativos e o seu valor é diretamente proporcional à variabilidade de dados. Portanto, quanto maior for essa variabilidade, maior será o desvio padrão (COSTA NETO, 2004).

Variância, por outro lado é definido na estatística como uma variável aleatória se consubstanciando em uma medida de dispersão estatística e pode ser utilizada para fazer o cálculo de um conjunto de observações.

2.8.2. Comparação entre dois tratamentos

Na comparação de dois tratamentos tem-se a comparação com amostras grandes e comparação com amostras pequenas.

Para comparar dois tratamentos com amostra grandes deve-se se ter as seguintes suposições (Barrozo, 2006):

- i) Seja x_1, x_2, \dots, x_{n_1} uma a.a. de tamanho n_1 da população 1 com média populacional η_1 e desvio-padrão populacional σ_1
- ii) Seja y_1, y_2, \dots, y_{n_2} uma a.a. de tamanho n_2 da população 2 com média populacional η_2 e desvio-padrão populacional σ_2
- iii) As amostras são independentes. Em outras palavras, as medidas dos dois tratamentos, não são relacionados entre si.

Na comparação de dois tratamentos utiliza-se o teste de hipótese, que é realizado seguindo as etapas:

- (i) Identificar a hipótese de nulidade (H_0) e a hipótese alternativa (H_1) em termos de parâmetros populacionais.
- (ii) Escolher o teste estatístico
- (iii) Estabelecendo um nível de significância α , determinar a região de rejeição

- (iv) Calcular o valor observado do teste estatístico a partir dos dados da amostra selecionada. Verificar se este valor observado está incluído na região de rejeição ou não.

H_0 : A hipótese nula propõe que qualquer diferença observada entre as amostras é considerada como uma ocorrência casual, mero resultado do erro amostral. Portanto, uma diferença, entre duas ou mais medias não representam, à luz da hipótese nula, uma verdadeira diferença entre as medias amostrais.

H_1 : A hipótese alternativa que afirma existir uma verdadeira diferença populacional.

Os processos que permitem aceitar ou rejeitar uma determinada hipótese são denominados teste de hipótese ou teste de significância e tem-se que grandes valores de F_{cal} favorecem H_1 , pois QMT excederá QMR quando H_1 é verdadeira e por outro lado, valores de H_1 próximo de 1 beneficiam H_0 , tendo dessa forma QMT e QMR aproximadamente o mesmo valor esperado quando H_0 é verdadeira. Porém ao tomar a decisão de rejeitar ou aceitar uma hipótese, se sujeita a incorrer em um dos seguintes erros: erro tipo 1 que se comete ao rejeitar uma hipótese H_0 verdadeira, que deveria ser aceita, e erro tipo 2 que é cometido ao aceitar uma hipótese H_0 falsa, que deveria ser rejeitada. O erro tipo 1 é sempre o erro considerado como sendo o mais grave ou o menos desejado.

De um modo geral, controla-se apenas o erro tipo 1, através do nível de significância do teste, representado por α , e que consiste na probabilidade máxima com que sujeita-se a ocorrer o risco de cometer um erro tipo 1 ao se testar uma dada hipótese.

Na pratica, é comum (embora não seja obrigatório) fixar o nível de significância em 5% e 1%, isto é, $\alpha = 0.01$ ou $\alpha = 0.05$. Se, por exemplo, for escolhido o nível de 5% ($\alpha = 0.05$), isto indica que haverá 5 possibilidades em 100 de rejeitar a hipótese quando ela deveria ser aceita, ou seja, existe uma confiança de 95% de que tenhamos tomado uma decisão correta.

Utiliza-se a seguinte regra para controlar o nível de significância α do teste:

Se $F_{cal} \leq F_{(1-\alpha; i-1, l(j-1))}$, então não se rejeita H_0 .

Se $F_{cal} \geq F_{(1-\alpha; i-1, l(j-1))}$, então se rejeita H_0 , e se aceita H_1 .

Onde $F_{(1-\alpha; i-1, l(j-1))}$ é o $(1-\alpha)100\%$ percentil de uma distribuição F com $(l-1)$ e $l(j-1)$ grau de liberdade.

A figura 2.13 apresenta a região de aceitação de H_0 , RA e a, região crítica de rejeição de H_0 , R_c .

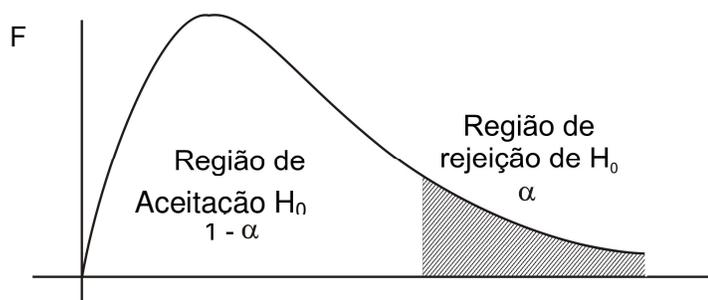


Figura 2.13. Região de aceitação de H_0 RA e região crítica de rejeição R_c de H_0 .

O teste estatístico utilizado para determinar a diferença entre dois tratamentos deve seguir uma distribuição aproximadamente normal, Z, para amostras grandes, com média

$$E(\bar{x} - \bar{y}) = \eta_1 - \eta_2 \text{ e variância } \text{var}(\bar{x} - \bar{y}) = \frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2} .$$

Para a comparação de dois tratamentos com amostras pequenas n_1 e n_2 , além de considerar as suposições anteriores, devem-se também considerar o seguinte:

- (i) Ambas as populações são normais
- (ii) Os desvios padrões das populações 1 e 2 são iguais, isto é, $\sigma_1 = \sigma_2$
- (iii) x_1, x_2, \dots, x_{n1} é uma amostra aleatória de distribuição $N(\eta_1, \sigma^2)$
- (iv) y_1, y_2, \dots, y_{n1} é uma amostra aleatória de distribuição $N(\eta_2, \sigma^2)$
- (v) x_1, x_2, \dots, x_{n1} e y_1, y_2, \dots, y_{n1} são duas amostras independentes.

Depois de confirmado as suposições mencionadas utiliza-se o teste estatístico t de Student para amostras pequenas $n_1 + n_2 - 2$ graus de liberdade dado pela equação:

$$t = \frac{(\bar{x} - \bar{y}) - (\eta_1 - \eta_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \sim t_{n_1+n_2-2} \quad (2)$$

Onde s_p é um estimador comum para as variâncias dos dois tratamentos e é dado pela equação:

$$s_p = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (3)$$

Após calcular o valor de t , estipula-se um nível α de significância para verificar se rejeita ou não a hipótese nula através de teste bilateral ou unilaterais.

Teste Bilateral: Apresentam duas regiões de rejeição da hipótese nula H_0 , situadas nos extremos da distribuição amostral, é utilizado para testar hipótese do tipo.

$$H_0 : \eta_A - \eta_B = 0$$

$$H_1 : \eta_A - \eta_B \neq 0$$

A figura 2.14 mostra as regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância α em um teste bilateral.

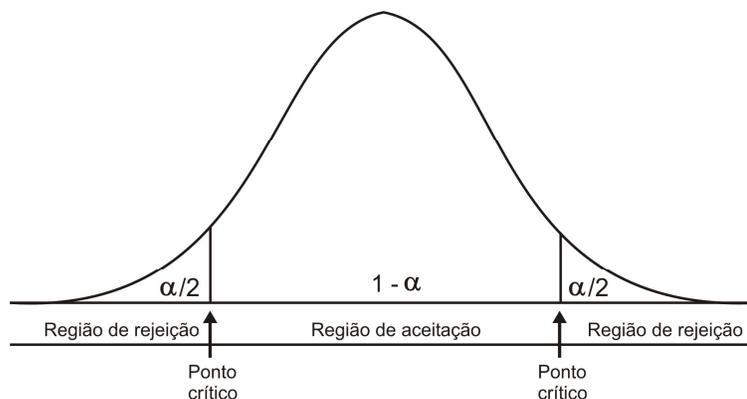


Figura 2.14. Regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância α em um teste bilateral.

Teste Unilateral a Direita: Apresenta uma única região de rejeição da hipótese nula H_0 , sendo utilizado para testar as hipóteses do tipo:

$$H_0 : \eta_A - \eta_B = 0$$

$$H_1 : \eta_A - \eta_B > 0$$

A figura 2.15 mostra as regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância α em um teste unilateral à direita.

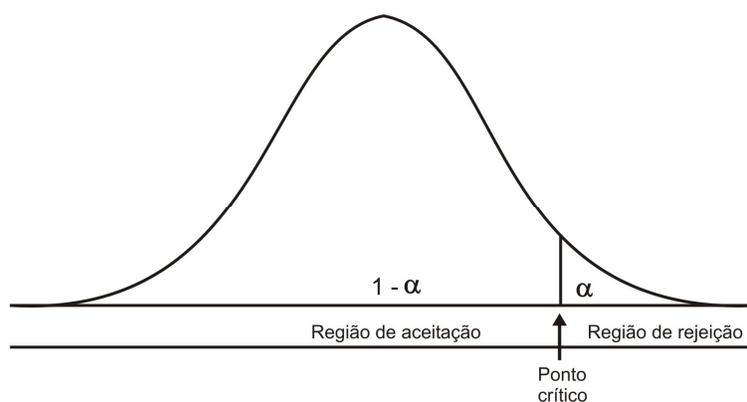


Figura 2.15. Regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância α em um teste unilateral à direita.

Teste Unilateral a Esquerda: Apresenta uma região de rejeição da hipótese nula H_0 , situada no extremo inferior da distribuição amostral, é utilizado para testar as hipóteses do tipo:

$$H_0 : \eta_A - \eta_B = 0$$

$$H_1 : \eta_A - \eta_B < 0$$

A figura 2.16 mostra as regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância α em um teste unilateral a esquerda.

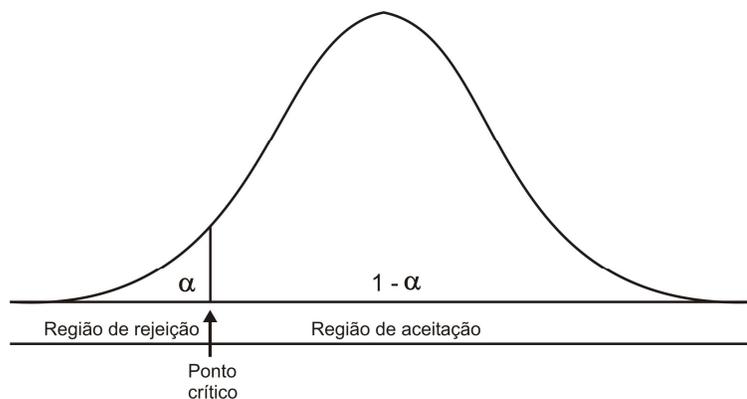


Figura 2.16. Regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância α em um teste unilateral à esquerda.

Neste trabalho, onde as amostras são pequenas, será utilizado o teste t de Student bilateral.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Este capítulo tem por finalidade descrever a metodologia empregada no procedimento experimental para a os testes de usinabilidade que foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (LEPU – FEMEC – UFU), visando atingir os objetivos propostos neste trabalho. Relata-se, portanto, os procedimentos adotados, os materiais e descrições dos equipamentos e métodos utilizados nos experimentos.

3.1. Procedimento experimental

A seguir faz-se um relato dos principais passos do procedimento experimental.

3.1.1 Material utilizado

Foram utilizados como corpos de prova barras de seção circular de aço microligado DIN 38MnSiVS5, de dureza média 256 HV com 450 mm de comprimento e 100 mm de diâmetro, fabricado pela Aços Villares S.A.. A composição do material pode ser visualizada na Tabela 3.1, através das porcentagens mínimas e máximas de cada elemento que podem ser encontrados na sua matriz.

Tabela 3.1. Composição do Aço Microligado DIN 38MnSiVS5 (Aços Villares S.A.)

<i>Composição</i>	<i>% C</i>	<i>% Si</i>	<i>% Mn</i>	<i>% P</i>	<i>% S</i>	<i>% Cr</i>	<i>% Ni</i>	<i>% Mo</i>	<i>% Al</i>	<i>% Cu</i>
Mín.	0,36	0,60	1,30	0,000	0,020	0,100	0,000	0,000	0,0100	0,000
Máx.	0,40	0,75	1,50	0,025	0,040	0,200	0,150	0,050	0,0250	0,200

<i>Composição</i>	<i>% Sn</i>	<i>% Ti</i>	<i>% V</i>	<i>% B</i>	<i>ppmH</i>	<i>% N2</i>
Mín.	0,0000	0,0100	0,0800	0,0000	0,00000	0,0130
Máx.	0,0300	0,0300	0,1300	0,0004	3,00000	0,0200

A escolha do aço microligado DIN 38MnSiVS5 foi por motivo de se usar um material que oferecesse uma maior resistência ao corte, visando exigir mais das cunhas cortantes da ferramenta e pela disponibilidade do mesmo.

Uma amostra do material dos testes foi preparada para fazer os testes de dureza e as imagens da micrografia do material.

Na Tabela 3.2 são apresentados os resultados de Dureza Vicker's 40 Kg de cada ensaio, bem como a média e o desvio padrão. Os dados apresentados são relativos à dureza da borda, do centro e de uma zona intermediária da amostra.

Tabela 3.2. Dureza do Aço Microligado DIN 38MnSiVS5

<i>Ensaio de Dureza Vicker's 40 kg</i>			
Regiões	Borda	Intermediária	Central
Ensaio 01	254,0	254,0	254,0
Ensaio 02	264,0	254,0	245,0
Ensaio 03	264,0	259,0	254,0
Ensaio 04	264,0	254,0	245,0
Ensaio 05	264,0	254,0	254,0
MEDIA	262,0	255,0	250,4
DESVPAD	4,5	2,2	4,9

A micrografia do material utilizado nos testes é mostrada nas Fig. 3.1, 3.2 e 3.3 que apresentam respectivamente as regiões da borda, intermediária e central dos corpos de prova, compostas basicamente por perlita e ferrita.

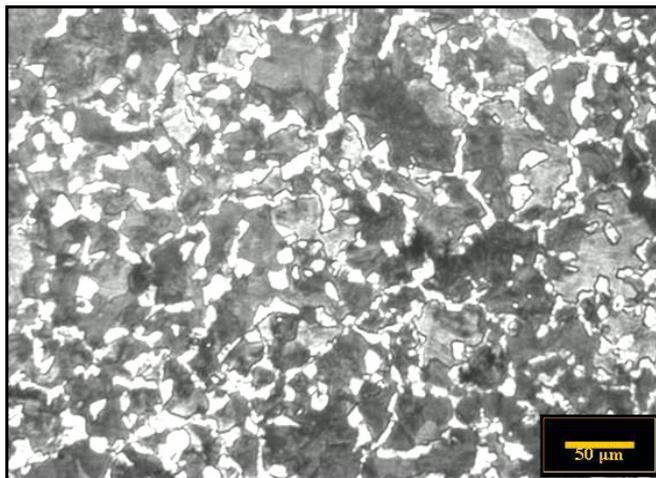


Figura 3.1: Microestrutura da Borda do Aço Microaligado DIN 38MnSiVS5 (atacado com Nital na concentração de 2%)

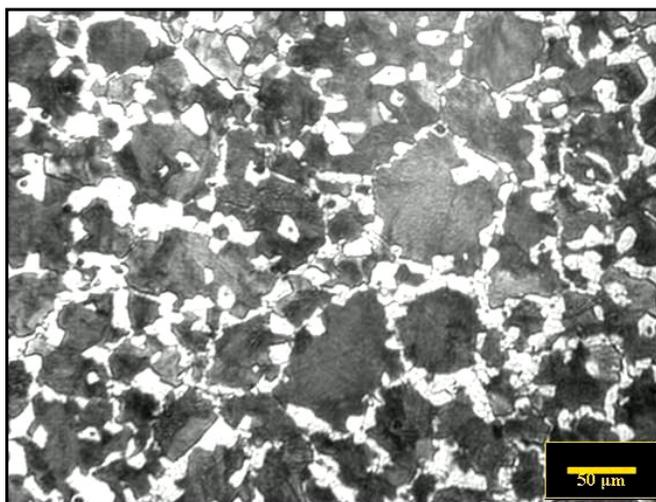


Figura 3.2: Microestrutura da região Intermediária do Aço Microaligado DIN 38MnSiVS5 (atacado com Nital a 2%)

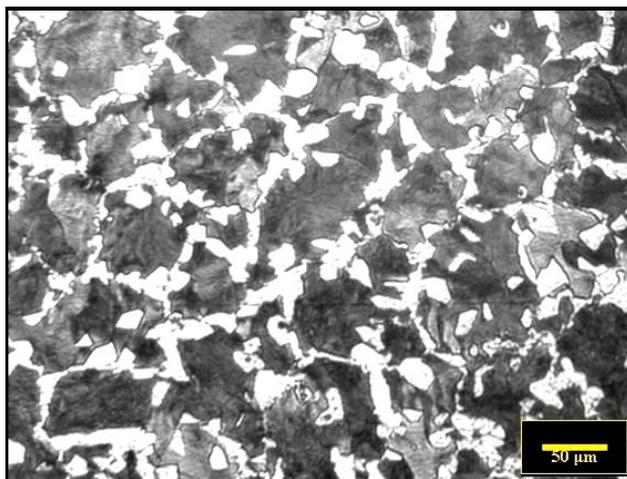


Figura 3.3: Microestrutura da região Central do Aço Microligado DIN 38MnSiVS5 (atacado com Nital a 2%)

3.1.2 Equipamentos utilizados nos ensaios de usinagem

Os ensaios de torneamento foram realizados em um torno Romi CNC modelo Multiplic 35D, fabricado pelas indústrias Romi S.A., com 11Kw de potência, rotação variável de eixo de 3 a 3.000 rpm, equipado com comando numérico GE FANUC Series 21i - TB. A Figura 3.4 traz a imagem do torno utilizado e na figura 3.5 pode ser observado o painel do mesmo equipado com comando numérico citado.



Figura 3.4. Torno CNC Romi Multiplic 35D utilizado nos testes de torneamento



Figura 3.5. Comando numérico GE FANUC Series 21i – TB

As ferramentas utilizadas foram insertos quadrados de metal duro SNMG 120404-PM 4235 com oito arestas de corte, ISO P35 revestidas com TiCN/Al₂O₃/TiN na superfície de folga e com TiCN/Al₂O₃ na superfície de saída (a camada de TiN foi extraída por jateamento com o objetivo de impingir tensões compressivas e com isso aumentar a resistência do inserto) (Sandvik Coromant classe GC4235), com quebra-cavacos integrados, recomendadas para operações que vão desde semi-acabamento até desbaste médio. Essas ferramentas foram fotografadas e apresentadas na Fig. 3.6 a e b.

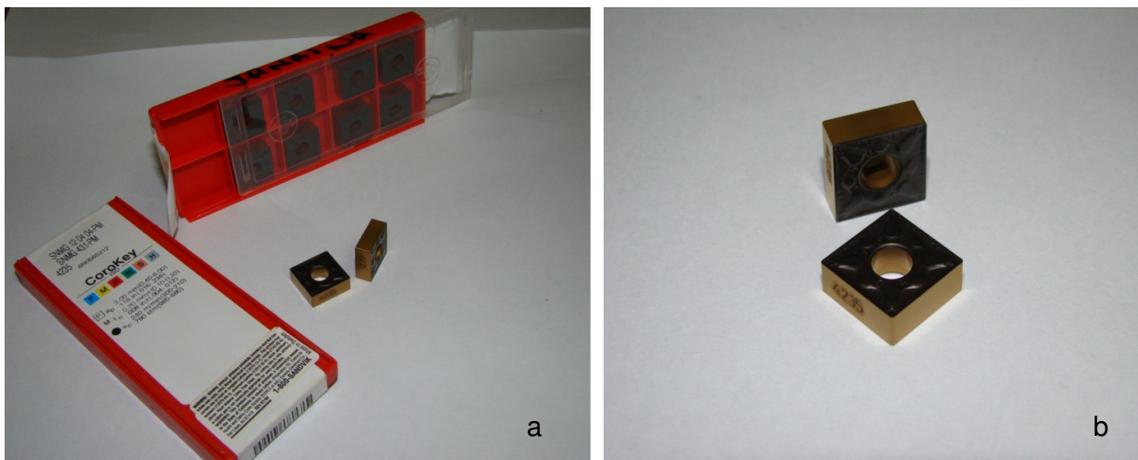


Figura 3.6. Insertos utilizados nos testes de torneamento. a) Ferramenta Sandvik utilizadas, b) detalhe dos insertos

O suporte para as ferramentas utilizado possui a designação ISO, DSBNR 2525M 12 M12. Este suporte pode ser observado na Fig. 3.7.



Figura 3.7. Suporte utilizado nos experimentos

Quando um dos insertos é fixado no suporte (fixação por grampo) resulta a seguinte geometria: ângulo de saída (γ_0) de -6° , ângulo de folga ou incidência de 6° , ângulo de posição de 75° (ângulo lateral de corte de 15°). O inserto fixado ao suporte com as características de geometria citadas no texto pode ser observado na Fig. 3.8.

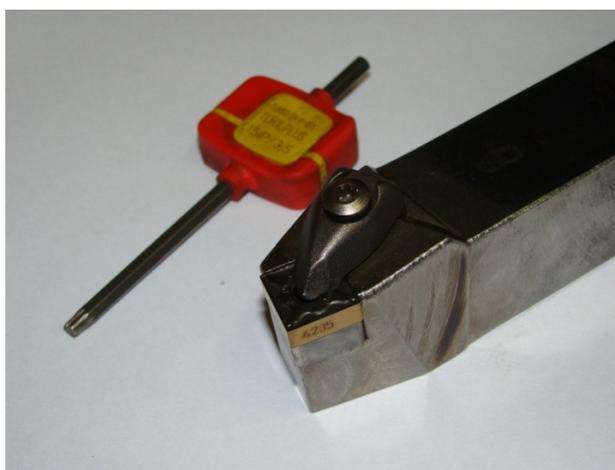


Figura 3.8. Inserto fixado ao suporte pelo método de grampo

A peça e a ferramenta fixadas na máquina-ferramenta podem ser visualizadas na Fig. 3.9.

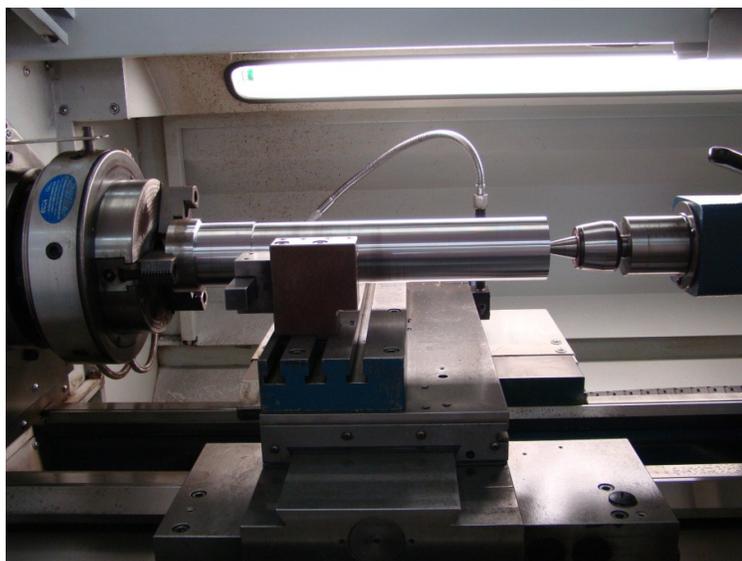


Figura 3.9. Conjunto utilizado na execução dos testes de torneamento

Para a análise das imagens e monitoramento do desgaste utilizou-se um Estéreo Microscópio SZ6145TR - OLYMPUS e analisador de imagens Image Pro-Express, sistema de captura e análise de imagens para medição do desgaste na ferramenta. A Figura 3.10 traz a montagem do equipamento utilizado para o monitoramento do desgaste conectado a um computador.



Figura 3.10. Microscópio SZ6145TR – OLYMPUS

Na Figura 3.11a pode ser observado o Estéreo Microscópio e na Fig. 3.11b a tela principal do software analisador de imagens.



Figura 3.11. Sistema de aquisição de imagens. a) Estéreo Microscópio; b) Software

3.1.3. Metodologia utilizada nos testes experimentais

Os testes experimentais foram divididos em duas etapas. Na primeira etapa o objetivo foi verificar a influência da seqüência de uso das arestas na vida da ferramenta. Na segunda etapa o objetivo foi verificar a influência do número de interrupções do teste para medições de desgaste na vida da ferramenta.

Na primeira etapa foram utilizadas as seguintes condições de corte: velocidade de corte $v_c = 250$ m/min, avanço $f = 0,2$ mm/volta e dois valores de profundidade de corte que são $a_p = 2,0$ mm e $a_p = 4,0$ mm.

Com a profundidade de corte $a_p = 2,0$ mm, o desgaste foi medido ao final de cada passe dado no comprimento total L do corpo de prova. Para que fossem realizados as medições do desgaste foi necessária a retirada do inserto do porta ferramenta ao final de cada passe, colocando-o na mesa de referência do microscópio.

As medições do desgaste para os testes com profundidade de corte $a_p = 4,0$ mm, por se tratar de condições mais severas de corte, foram feitas parando-se na metade do percurso de avanço, ou seja, ao final de cada $L/2$.

Além dos testes originais, realizaram-se quatro réplicas para cada teste da primeira etapa com $ap = 2,0$ mm e três réplicas para $ap = 4,0$ mm.

Com o objetivo de se verificar a possível influência do número de paradas (em outras palavras, do tempo de operação) na vida da ferramenta, foram desenvolvidos alguns testes específicos na segunda etapa do trabalho. Foi planejada a interrupção do teste de usinagem para se fazer a medição do desgaste no momento em que o teste atingisse uma determinada quantidade de passes pré-fixada. Esta quantidade de passes foi calculada tomando-se por base os resultados da primeira etapa dos testes experimentais da seguinte forma: foi verificado que a média de passes que uma aresta conseguiu completar até chegar ao seu fim de vida foi 11 passes, ou seja, durante a realização dos testes da primeira etapa a usinagem foi interrompida, em média, 11 vezes para se fazer a medição do desgaste e o valor de vida médio da ferramenta encontrado foi de 18,25 minutos (1095,0 segundos). A pergunta que se faz é: *Haverá variação na vida da ferramenta ao se diminuir este número de paradas?* Os testes desenvolvidos objetivam responder esta pergunta.

O número de paradas foi calculado dividindo-se o tempo médio de vida das arestas obtido nos testes da primeira etapa (18,25 min) pela quantidade de paradas que se pretendia fazer (2, 3 e 5 paradas), admitindo-se previamente que a vida esperada seria aproximadamente a mesma (ou seja, não haveria tal influência). O resultado dessa divisão apontou em que momento (tempo) o teste deveria ser interrompido para se fazer a medição do desgaste. A sistematização dos testes da segunda etapa pode ser visualizada na Tab. 3.3.

Tabela 3.3. Programação dos testes da segunda etapa de experimentos

Programação dos Testes		
Teste	Nº de paradas programadas	Cálculo do tempo de parada
1	5 paradas	$18,25/5 = 3,65$ min (219,0 s)
2	3 paradas	$18,25/3 = 6,08$ min (364,8 s)
3	2 paradas	$18,25/2 = 9,12$ min (547,2 s)

Estes testes foram realizados com duas réplicas, além dos testes originais, a fim de conferir confiabilidade estatística, utilizando as seguintes condições de corte: velocidade de corte $vc = 250$ m/min, avanço $f = 0,2$ mm/volta e a profundidade de corte $ap = 2,0$ mm.

A análise dos dados obtidos foi feita utilizando-se o software Statistica 7.0, através da ferramenta diferença entre médias com uma confiabilidade estatística de 95% e com uma significância $\alpha = 0,05$. Estes resultados são mostrados no capítulo IV.

3.1.4 Critério de fim de vida

Com base na norma ISO 3685 (1993) estabeleceram-se os seguintes critérios de fim de vida, observando-se, através de pré-testes, qual deles prevaleceria:

- a) $VB_B = 0,3$ mm; (desgaste de flanco médio);
- b) $VB_{B_{\text{máx}}} = 0,6$ mm; (desgaste de flanco máximo);
- c) $KT = 0,06 + 0,3 f$; (desgaste de cratera);
- d) VB_N e $VB_C = 1,0$ mm; (desgaste de ponta);

Na realização dos pré-testes foi possível observar que prevaleceu o desgaste de flanco máximo, com tendência a se acentuar mais perto da ponta da aresta. O critério de desgaste adotado para as duas etapas dos testes foi $VB_{B_{\text{máx}}} = 0,6$ mm.

3.1.5 Seqüência de aresta para realização dos testes da primeira etapa

A seqüência de arestas utilizadas para realização dos ensaios de usinagem para os dois conjuntos de condições de corte da primeira etapa dos testes obedeceram à seguinte ordem, indicada na Fig. 3.12.

- 1) Teste na aresta 1;
- 2) Teste na aresta 2, depois de realizado o teste na aresta 1;
- 3) Teste na aresta 3, depois de realizados testes nas arestas 1 e 2;
- 4) Teste na aresta 4, após terem sido realizados testes nas arestas 1, 2 e 3.

5) Teste na aresta 3, após ter sido realizado o teste na aresta 1 (este último somente caso fosse detectado influência nas seqüências iniciais);

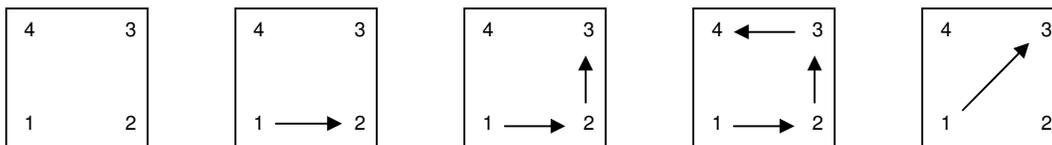


Figura 3.12. Seqüência de arestas utilizadas na realização dos testes na face superior do inserto.

Completada a seqüência descrita, já com todas as arestas superiores desgastadas segundo o critério de fim de vida adotado ($VB_{Bmax} = 0,6 \text{ mm}$), passou-se à seqüência seguinte, que correspondeu aos testes com arestas de corte inferiores seguindo a seqüência ilustrada na Fig. 3.13.

6) Teste na aresta 5, após terem sido realizados testes nas arestas da parte superior do inserto;

7) Teste na aresta 6, após terem sido realizados testes nas arestas da parte superior e aresta 5;

8) Teste na aresta 7, após terem sido realizados testes nas arestas da parte superior e arestas 5 e 6;

9) Teste na aresta 8, após terem sido realizados testes nas arestas da parte superior e arestas 5, 6 e 7;

10) Teste na aresta 7, após terem sido realizados testes nas arestas da parte superior e aresta 5 (este último somente caso fosse detectado influência nas seqüências iniciais)

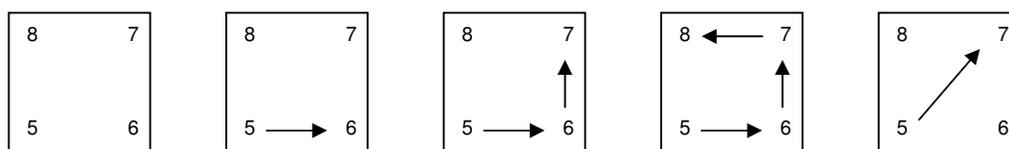


Figura 3.13. Seqüência de realização dos testes nas arestas inferiores do inserto

Todos os testes, tanto da primeira quanto da segunda etapa do trabalho foram executados sem presença de fluido de corte (usinagem a seco).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem por finalidade apresentar os resultados dos testes experimentais, bem como analisá-los e discuti-los.

Os dados gerados pelos testes foram comparados e analisados através do *software* Statistica 7.0, sendo que foi utilizada a ferramenta diferença entre médias, com uma confiabilidade de 95% e um nível de significância de 5%.

A seguir comentam-se cada uma dessas etapas e os resultados obtidos com as mesmas.

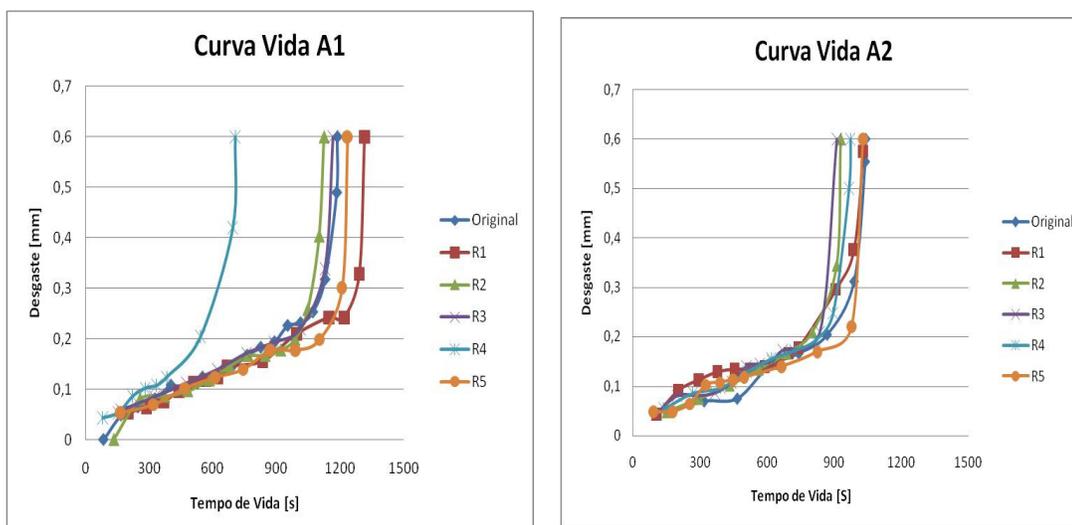
4.1 Primeira etapa dos experimentos, $ap = 2,0$ mm.

A Tabela 4.1 traz os resultados dos testes de vida (em segundos) das arestas superiores para a primeira etapa dos experimentos com as respectivas médias, variâncias e desvios. Vale salientar que estes resultados são médias de cinco testes (1 teste e 4 réplicas), a não ser pelas arestas 1 e 2 que apresentam média de seis testes (1 teste e 5 réplicas).

Tabela 4.1. Resultados dos testes de vida das ferramentas, $ap = 2,0$ mm

Arestas Superiores	Média	Desvio Padrão	Variância
Aresta 1	1124	214,4	45987,2
Aresta 2	989	56,0	3135,06
Aresta 3	1110	197,6	39050,3
Aresta 4	1261	337,3	113782,3

A Figura 4.1 traz as curvas de vida obtidas nos testes das arestas superiores com a condição de profundidade de corte de 2,0 mm. Observando-se estas curvas, nota-se a ocorrência de grande dispersão nos resultados. Os possíveis motivos que levaram à ocorrência dessas dispersões serão discutidos após a apresentação das tabelas com os resultados de média e desvio padrão destes testes. Os altos desvios podem ser melhor visualizados na Fig.4.2.



(a)

(b)

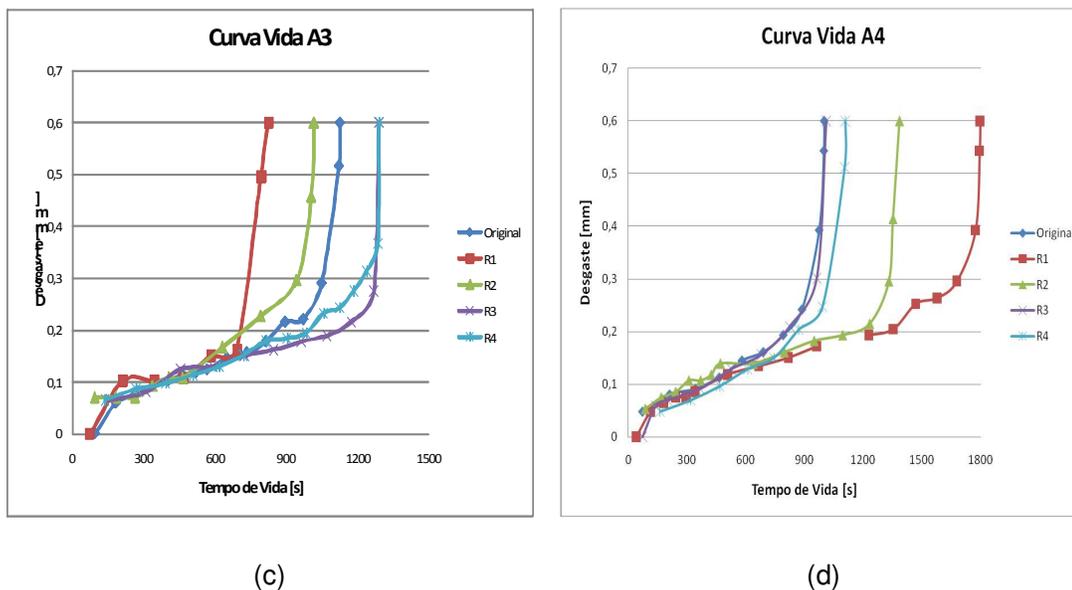


Figura 4.1. Curvas de vida para as arestas superiores, $ap = 2,0$ mm. a) Aresta 1; b) Aresta 2; c) Aresta 3; d) Aresta 4

Para os testes das arestas superiores do inserto com a profundidade de 2,0 mm, realizou-se o teste original e pelo menos mais 4 réplicas. As arestas 1 e 2 foram testadas mais uma vez na tentativa de diminuir a dispersão.

Ao observar os dados apontados pela Tab. 4.1 pode-se notar altos valores de desvio padrão, indicando que nos testes houve grande dispersão nos valores de vida encontrados no teste original e nas quatro réplicas realizadas para este ensaio das arestas superiores. Os altos valores observados na coluna dos desvios padrões apontam a dificuldade de se obter repetibilidade nos experimentos ao se executar as réplicas. Os resultados obtidos na aresta 2 indicam o menor valor de desvio padrão. Nas outras arestas observa-se que esses valores foram bem maiores, sendo o maior desvio padrão apresentado pela aresta 4.

Não se pode afirmar que a falta de repetibilidade nas réplicas deveu-se por instabilidades na máquina ferramenta, pois, apesar de não ter sido monitorado a vibração do conjunto, trata-se de uma máquina nova, suficientemente rígida e potente (11kw). Deve-se ressaltar ainda, que o torneamento é o processo de usinagem que propicia melhores condições de repetibilidade em réplicas por não se tratar de processo intermitente, como o fresamento, por exemplo. Outros fatores, portanto, podem ser responsáveis por esta dispersão, podendo-se citar (MACHADO et al., 2009; TRENT e WRIGHT, 2000): heterogeneidade do material da peça (propriedades, distribuição de fases, defeitos, tamanhos de grãos, entre outros); condições de corte (quando são abusivas); má qualidade do material das ferramentas; utilização de fluido de corte (má qualidade ou aplicação

irregular); condições da interface cavaco-ferramenta (que depende de vários fatores, incluindo os já citados).

A busca da definição da real causa destas dispersões exigiria um esforço investigativo enorme, que vão além do escopo desta dissertação. Entretanto, algumas discussões indutivas são inevitáveis, e serão apresentadas ao longo da apresentação dos resultados.

Na coluna referente à média de vida das arestas, ainda na Tab. 4.1, pode-se notar que houve uma diminuição do tempo de vida médio da aresta 2. Isso não evidencia que ocorreu influência do teste realizado na aresta 1 no desenvolvimento do desgaste e, portanto, no tempo de vida da aresta 2, uma vez que os resultados obtidos para as arestas 3 e 4 mostram que os valores médios da vida para estas arestas aumentaram. Mostram ainda que o tempo médio de vida da aresta 4 foi maior que os tempos médios de vida de todas as arestas anteriores a ela. Porém, devido à grande dispersão dos dados não se pode afirmar que esse fato comprova a ausência de influência do desgaste de uma aresta superior em outra aresta consecutiva a ela localizada também na face superior do inserto, apenas que este fato indica uma tendência.

A Figura 4.2 mostra graficamente a média de vida das arestas superiores com os respectivos desvios padrão.

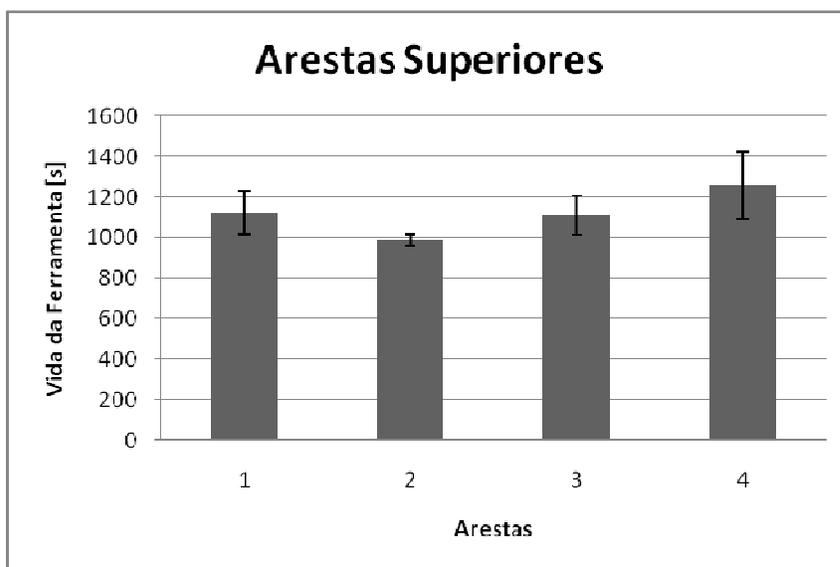


Figura 4.2. Média de vida para cada aresta superior com $a_p = 2,0$ mm

É sabido que o processo de fabricação dos insertos de metal duro proporciona a obtenção de insertos bastante homogêneos, característica do processo criterioso de

seleção, mistura, moagem, lavagem e processamento dos pós e da sinterização do inserto. Isto garante uma repetibilidade muito grande nas propriedades dos insertos, o que de certa forma, isenta as ferramentas da responsabilidade pelos resultados encontrados, mesmo observando-se variações consideráveis na vida entre insertos e entre arestas. Aliás, a variabilidade dos resultados entre arestas de um mesmo inserto é um forte indicativo que o problema não pode recair diretamente nos insertos.

A falta de uniformidade no comportamento das arestas se deve, portanto, a outros fatores, sendo o material da peça possivelmente o maior deles. Neste tipo de material (HSLA – High Strength Low Alloy Steel, aço de alta resistência e baixa liga) a resistência é garantida pela precipitação de finos carbonetos durante o trabalho mecânico de deformação e a usinagem pode promover esta precipitação (METALS HANDBOOK, 1993). Ele não sofreu nenhum tratamento térmico previamente. A Tabela 3.2 mostra uma variação na dureza do material e isso pode estar ocorrendo com outras propriedades. Somando-se a isto, há o fato de que os corpos de prova utilizados nos ensaios possuíam diâmetros iniciais de 100 mm e com a evolução das passadas, adquiriam diâmetros cada vez menores, o que afeta a rigidez. Tudo isso pode ter contribuído pela variabilidade dos resultados entre as arestas.

Além disso, os experimentos não foram bloqueados, ou seja, não foram testados exatamente os mesmos pontos dos corpos de prova com as mesmas arestas. Os testes ocorreram de modo contínuo. Usinava-se com uma aresta até esta atingir o critério de fim de vida estabelecido e então se passava ao próximo teste com outra aresta, no mesmo corpo de prova, caso este ainda oferecesse condições de usinagem. Este procedimento exemplifica a ausência de bloqueio nos experimentos que, se por um lado aleatoriza de certa forma os testes, por outro pode ter influenciado o comportamento das arestas.

A Tabela 4.2 traz os resultados dos testes de vida das arestas inferiores, também obtidos na primeira etapa dos testes com $a_p = 2,0$ mm, esses resultados são médias para 5 testes (1 teste e 4 réplicas).

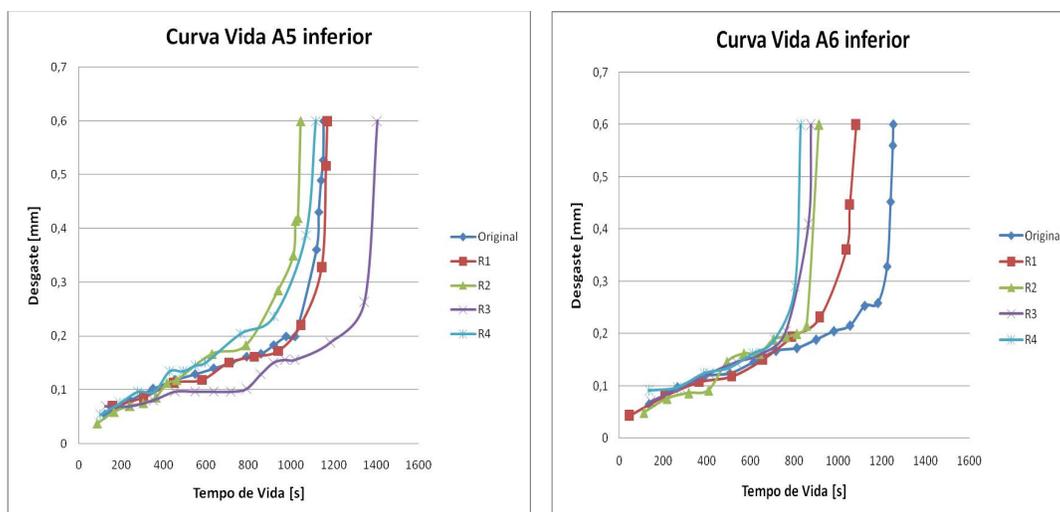
Tabela 4.2. Resultado dos testes de vida das ferramentas, $ap = 2,0$ mm

Arestas Inferiores	Média	Desvio Padrão	Variância
Aresta 5	1177,6	136,03	18504,3
Aresta 6	990,4	174,07	30300,8
Aresta 7	1046,8	348,91	121744,7
Aresta 8	1079	158,38	25086

Novamente na Tab. 4.2 podem-se notar os altos valores de desvios padrão.

Esta tabela indica que o maior valor de vida médio pertence à aresta 5, sendo maior inclusive que o valor médio de vida para a aresta 1 da face superior. O menor valor médio é o da aresta 6.

A Figura 4.3 traz as curvas de vida obtidas através dos testes das arestas inferiores com $ap = 2,0$ mm.



(a)

(b)

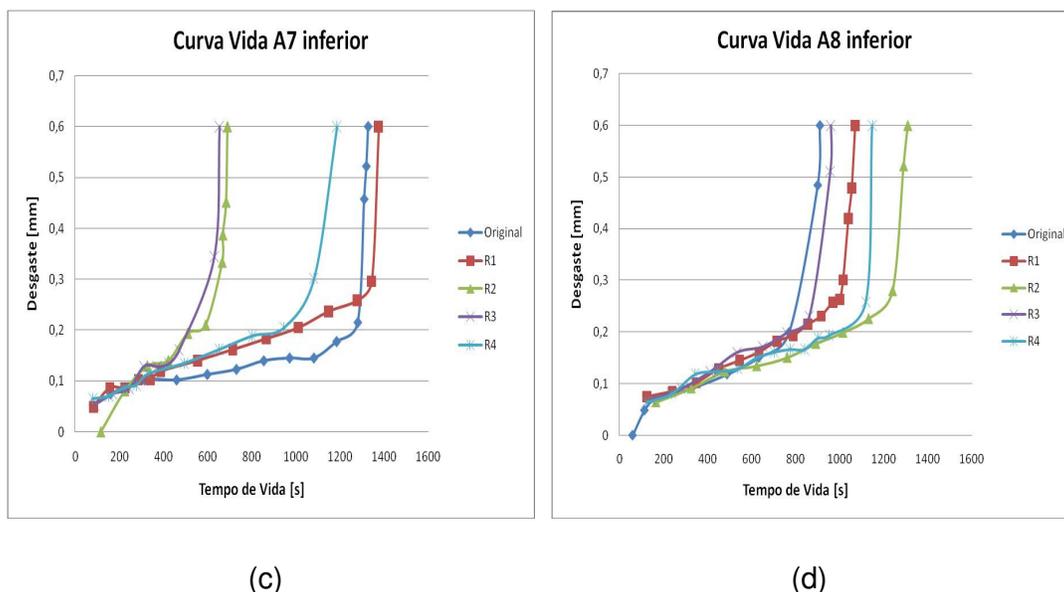


Figura 4.3. Curvas de vida para as arestas inferiores, $ap = 2,0$ mm. a) Aresta 5; b) Aresta 6; c) Aresta 7; d) Aresta 8

Assim como nas arestas superiores, a Fig. 4.3 aponta altas discrepâncias entre as curvas de vida para as arestas inferiores do inserto, ocasionando altos valores de desvios padrões, sendo mais crítico na aresta 7, como pode ser melhor visualizado na Figura 4.4.

Nos testes com as arestas inferiores e $ap = 2,0$ mm foram realizados 1 teste original e 4 réplicas para todas as arestas.

Aqui fica um pouco mais clara a tendência que leva a crer na ausência de influência do desgaste de uma aresta previamente usinada no desenvolvimento do desgaste de outra consecutiva a ela, pois mesmo após todas as arestas superiores terem sido testadas, a aresta 5 ainda assim apresentou valor de vida média superior ao de todas as arestas superiores do inserto. Ressalta-se, porém, que isso mostra uma tendência, uma vez que todos os outros valores de vida média para as arestas 6, 7 e 8 apresentaram-se menores que os valores das arestas 3 e 4 na face superior.

A Figura 4.4 reproduz graficamente a média de vida das arestas inferiores com seus respectivos desvios padrão.

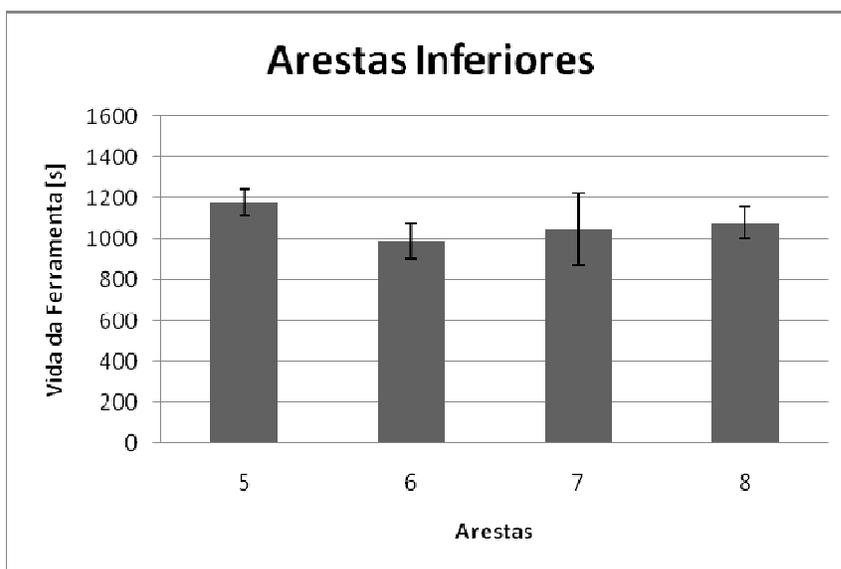


Figura 4.4. Média de vida para cada aresta inferior com $ap = 2,0$ mm

Nota-se que os desvios para este grupo de testes continuam altos, mas, desta vez, pôde-se notar menor discrepância nesses desvios quando comparados aos desvios apresentados na Fig. 4.3. Aqui eles se mantiveram em valores mais próximos um do outro, sobressaindo a aresta 7 que apresentou o valor mais alto de desvio.

4.1.1 Comparação entre arestas consecutivas superiores

Este subitem traz de maneira objetiva os resultados das comparações realizadas entre as arestas consecutivas superiores, utilizando-se a ferramenta estatística diferença entre médias para um nível de significância de 5%, ou seja, $\alpha = 0,05$.

A tabela 4.3 mostra os p-values encontrados quando se compara as arestas superiores consecutivas do inserto.

Tabela 4.3. Comparação da vida entre as arestas superiores, $ap = 2,0$ mm

Comparação entre arestas	p-value
A1 e A2	0, 2102
A2 e A3	0, 2242
A3 e A4	0, 4129
A4 e A1	0, 4654

De acordo com os p-values resultantes, pode-se dizer, com 95% de confiabilidade, que não foi encontrado diferença estatística entre a vida das arestas superiores do inserto testadas em ordem consecutiva, pois todos os p-values ficaram acima do valor 0,05. Isto equivale a dizer que não se pode afirmar, estatisticamente, que o desgaste de uma aresta que atingiu o critério de fim de vida esteja afetando o desenvolvimento do desgaste de sua aresta consecutiva, localizada na face superior do inserto de metal duro.

4.1.2 Comparação entre arestas consecutivas inferiores

Procede-se agora a análise comparativa entre as arestas consecutivas localizadas na face inferior do inserto de metal duro, utilizando-se a mesma ferramenta estatística e conservando os valores dos níveis de significância e confiabilidade.

Os resultados obtidos dessa etapa de comparações são trazidos pela Tab.4.4, confeccionada com os valores de p-values calculados pela ferramenta estatística, em resposta aos dados experimentais inseridos.

Tabela 4.4. Comparação da vida entre as arestas inferiores, $ap = 2,0$ mm

Comparação entre arestas	p-value
A5 e A6	0, 0947
A6 e A7	0, 7547
A7 e A8	0, 8556
A8 e A5	0, 3218

Novamente, os resultados obtidos levam a concluir que não foi observada diferença estatística entre a vida das arestas inferiores consecutivas, uma vez que todos os p-values apontados nos resultados resultaram maiores que o valor 0,05 e indicam ausência de influência do desgaste de uma aresta inferior no desgaste de uma aresta consecutiva localizada também na face inferior do inserto.

Após as considerações interpretativas tecidas com base nos dados apresentados pelas Tab. 4.1 e 4.2, pode-se dizer que estes valores de p-values (Tab. 4.3 e 4.4) eram esperados e que a ausência de influência do desgaste de uma aresta no desenvolvimento do desgaste de uma aresta consecutiva a ela localizada na mesma face do inserto passou de mera suspeita para fato, tendo em vista a elevada confiabilidade estabelecida nas análises estatística.

4.1.3 Comparação entre as arestas diagonais

Para a investigação ficar completa, realizou-se comparações através do *software* Statistica 7.0 entre as arestas diagonais, tanto na face superior quanto na face inferior do inserto e também entre as arestas inferiores e superiores do inserto, que serão mostradas no próximo subitem.

A Tabela 4.5 mostra o resultado das comparações entre as arestas diagonais superiores do inserto. São possíveis duas combinações de arestas diagonais em cada face do inserto.

Tabela 4.5 Comparação entre arestas diagonais superiores, $ap = 2,0$ mm

Comparação entre arestas	p-value
A1 e A3	0,9171
A2 e A4	0,1132

Nas comparações entre as arestas diagonais superiores também não foram observados, estatisticamente, com 95% de confiabilidade, influência do desgaste de uma aresta no desenvolvimento do desgaste, e conseqüentemente na vida, de sua respectiva

aresta diagonal consecutiva, como aponta os p-values trazidos pela Tab. 4.5, ambos acima do valor de 0,05.

Os resultados das comparações entre as arestas diagonais inferiores do inserto são apresentados na Tab. 4.6 para as duas combinações possíveis de diagonais para esta face do inserto quadrado de metal duro.

Tabela 4.6. Comparação entre as arestas diagonais inferiores, $ap = 2,0$ mm

Comparação entre arestas	p-value
A5 e A7	0,4573
A6 e A8	0,4243

Pode-se dizer que o resultado mostrado na Tab. 4.6 era previsto, uma vez que a distância que separa as arestas diagonais inferiores é a mesma que separa as arestas diagonais superiores e nestas (superiores), não foi observado influência entre elas, daí se esperar o mesmo comportamento daquelas (inferiores).

Há que se comentar também que, devido à referida distância que separa as arestas diagonais, tanto inferiores quanto superiores, ser maior do que a distância que separa as arestas consecutivas, sejam estas localizadas na face superior ou na face inferior do inserto, não poderia apresentar resultados diferentes, confirmando a ausência de influência do desgaste de uma aresta no desenvolvimento do desgaste da sua diagonal.

4.1.4 Comparação entre arestas superiores e inferiores

Este subitem traz a comparação entre as arestas superiores e inferiores subseqüentes do inserto.

Após comparar a vida das arestas superiores e, depois, das arestas inferiores, as vidas obtidas com os testes nas arestas superiores foram comparadas com as vidas obtidas com as correspondentes arestas localizadas na face inferior do inserto. A Tabela 4.7 traz os resultados de p-values obtidos dessa comparação, utilizando-se da mesma ferramenta estatística com os mesmos níveis de confiabilidade e significância (95% e 5% respectivamente).

Tabela 4.7. Comparação entre as arestas superiores e inferiores do inserto, $ap = 2,0$ mm

Comparação entre arestas	p-value
A1 e A5	0, 6495
A2 e A6	0, 9868
A3 e A7	0, 7336
A4 e A8	0, 3066

Durante a fase de análise dos testes, ocorreu forte suspeita de que, caso fosse possível uma aresta já desgastada afetar o desenvolvimento e, conseqüentemente a vida de uma outra aresta em teste, essa influência seria tanto maior quanto fossem menores as distâncias que separam as arestas em questão.

Pode-se observar que, mesmo as distâncias entre as arestas superiores e suas respectivas arestas adjacentes localizadas na face inferior do inserto serem muito pequenas, ainda assim não foi observada influência do desgaste de uma no desenvolvimento do desgaste da outra.

O que se pretende enfatizar com esses comentários é o fato de que uma aresta localizada da face superior do inserto (aresta 1, por exemplo), tem a distância até sua aresta adjacente localizada na face inferior do inserto (aresta 5) muito menor do que qualquer distância entre as arestas diagonais, superiores e inferiores, e também menor que as distâncias que separam as arestas consecutivas, superiores e inferiores, e ainda assim não foi observada a influência levantada pelos especialistas em usinagem que motivou este trabalho.

Esta é a evidência mais forte que sustenta os argumentos deste trabalho de que não se pode afirmar que ocorre influência do desgaste de uma aresta que chegou ao fim de vida no desenvolvimento do desgaste de outra aresta que esteja sendo utilizado, o que provocaria com isso um menor tempo de vida.

4.1.5 Evolução do desgaste nos testes com $ap = 2,0$ mm

A Figura 4.5 traz a evolução do desgaste de flanco da aresta 4 superior de um dos insertos de metal duro testados na condição de $ap = 2,0$ mm.

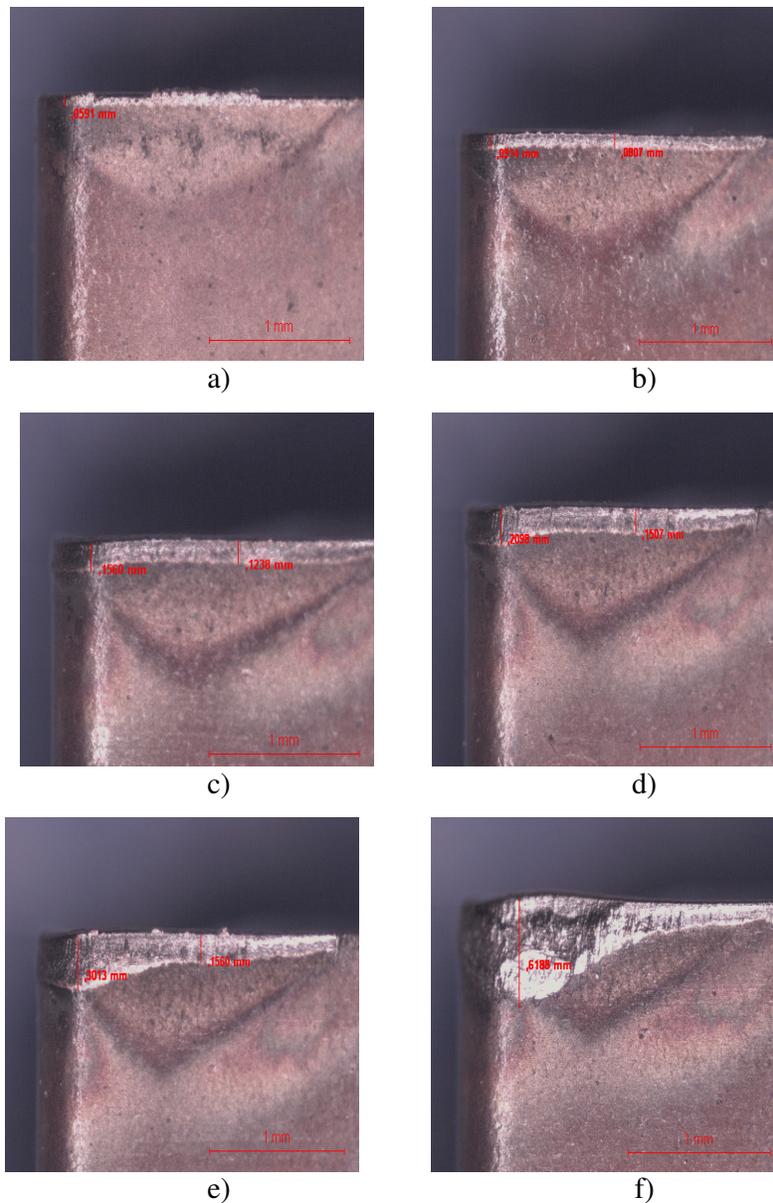
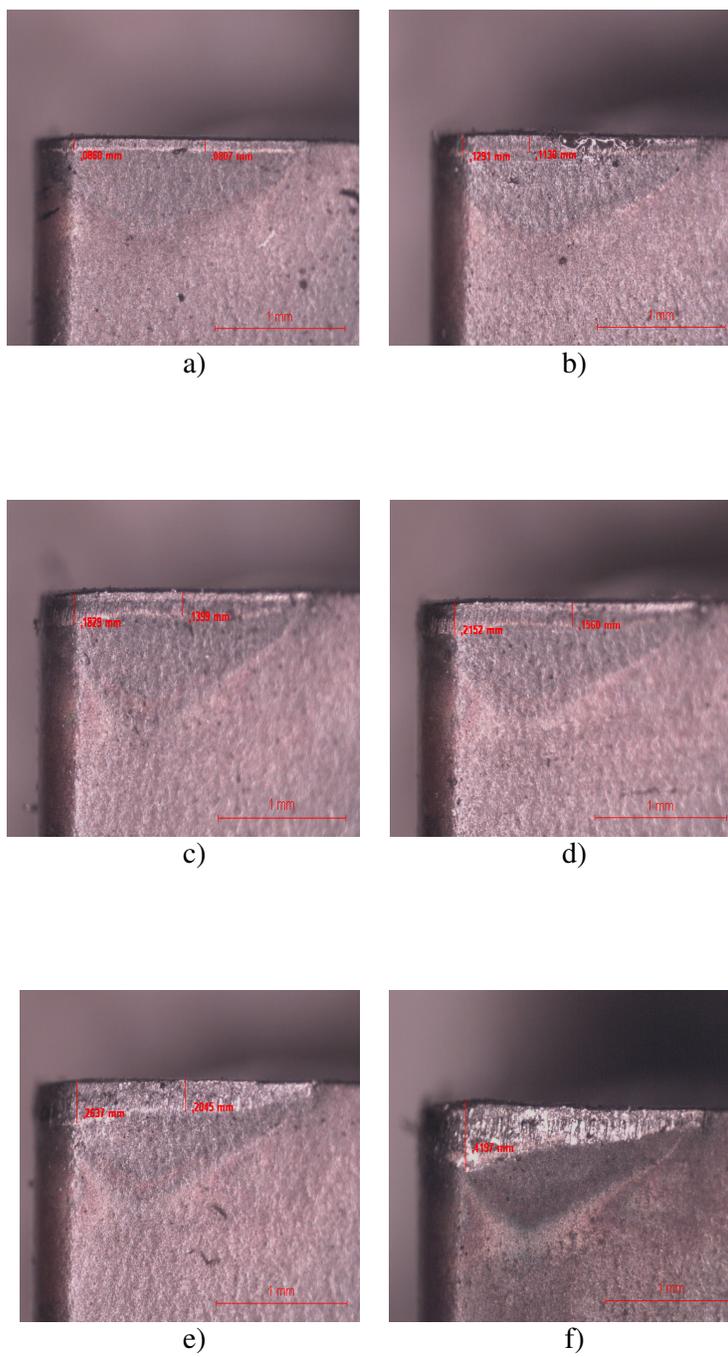


Figura 4.5. Evolução do desgaste de flanco da aresta 4 superior de um dos insertos, após: a) 2 passadas, b) 4 passadas, c) 6 passadas, d) 7 passadas, e) 8 passadas e f) 9 passadas, chegando ao fim de vida.

A Figura 4.6 traz imagens da evolução do desgaste de flanco observadas na aresta 8 localizada na face inferior do inserto, adjacente à aresta 4, mostrada na Fig. 4.5.



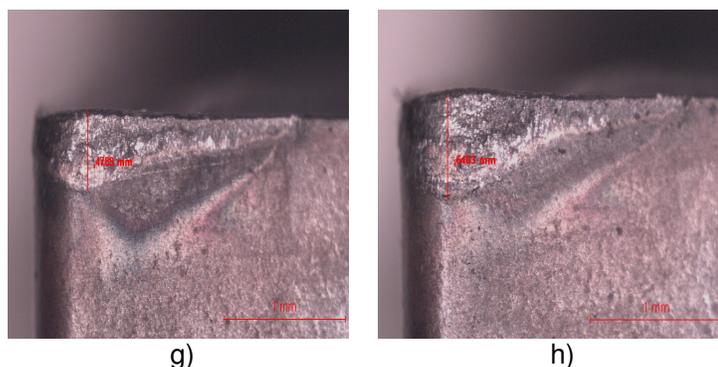


Figura 4.6. Evolução do desgaste de flanco da aresta 8 inferior do mesmo inserto da figura 4.5, após: a) 2 passadas, b) 4 passadas, c) 7 passadas, d) 9 passadas, e) 12 passadas, f) 14 passadas, g) 15 passadas e h) 16 passadas, chegando ao fim de vida

Observando-se as imagens das Fig. 4.5 e 4.6 nota-se que o desgaste de flanco tanto na aresta superior quanto na inferior segue o mesmo padrão de evolução. Nas primeiras passadas um desgaste de flanco pequeno e uniforme, que evolui, com tendência a acentuar-se da ponta da aresta e, finalmente, a ferramenta chega ao fim de vida com um desgaste de flanco bem acentuado na proximidade da ponta do inserto, caracterizando um desgaste de flanco máximo, VB_{Bmax} , crítico. A diferença está apenas no número de passadas, com a aresta inferior tendo uma vida maior que a superior, neste caso.

Essa semelhança no padrão de evolução do desgaste é mais um indício de que não está ocorrendo influência do desgaste de uma aresta já desgastada (nas imagens mostradas a aresta 4) em uma aresta adjacente a ela (no caso a aresta 8).

4.2 Primeira etapa dos experimentos, $ap = 4,0$ mm

Seguindo o mesmo raciocínio de apresentação dos resultados da primeira etapa com $ap = 2,0$ mm, expõem-se nos subitens a seguir os resultados obtidos na análise dos testes com $ap = 4,0$ mm, com as devidas considerações e comentários.

A Figura 4.5 traz as curvas de vida obtidas nos testes das arestas superiores com profundidade de $4,0$ mm.

Observam-se também, pela Fig. 4.5 altos valores de desvios para as arestas superiores com profundidade de corte de 4,0 mm.

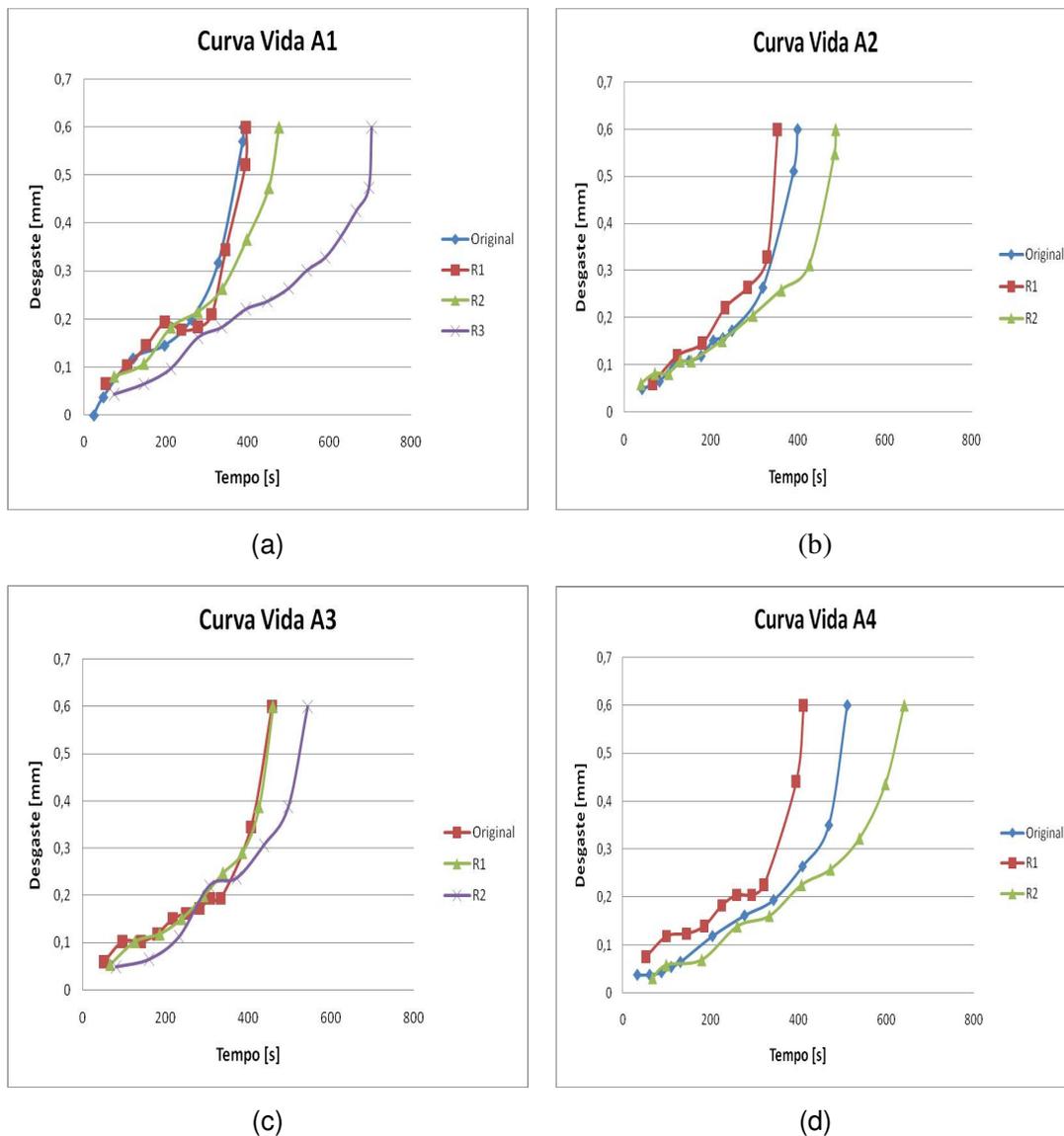


Figura 4.5. Curvas de vida para as arestas superiores, $ap = 4,0$ mm. a) Aresta 1; b) Aresta 2; c) Aresta 3; d) Aresta 4

Durante a execução dos testes com profundidade de corte de 4,0 mm, os testes com as arestas 2, 3 e 4 estes foram prejudicados por danos causados pelo cavaco gerado

durante os testes com as arestas de outros testes. Isto pode ser observado pelas curvas de vida trazidas pela Figura 4.5 onde a aresta 1 apresenta o teste original e três réplicas, enquanto que nos testes com as arestas 2, 3 e 4 executou-se somente o teste original e duas réplicas, pois o inserto que seria utilizado para produzir a terceira réplica já se apresentou com lascamento ocasionado pelo cavaco do teste com as arestas anteriores testadas.

A Figura 4.6 traz as curvas de vida obtidas nos testes com as arestas inferiores na profundidade de corte de 4,0 mm.

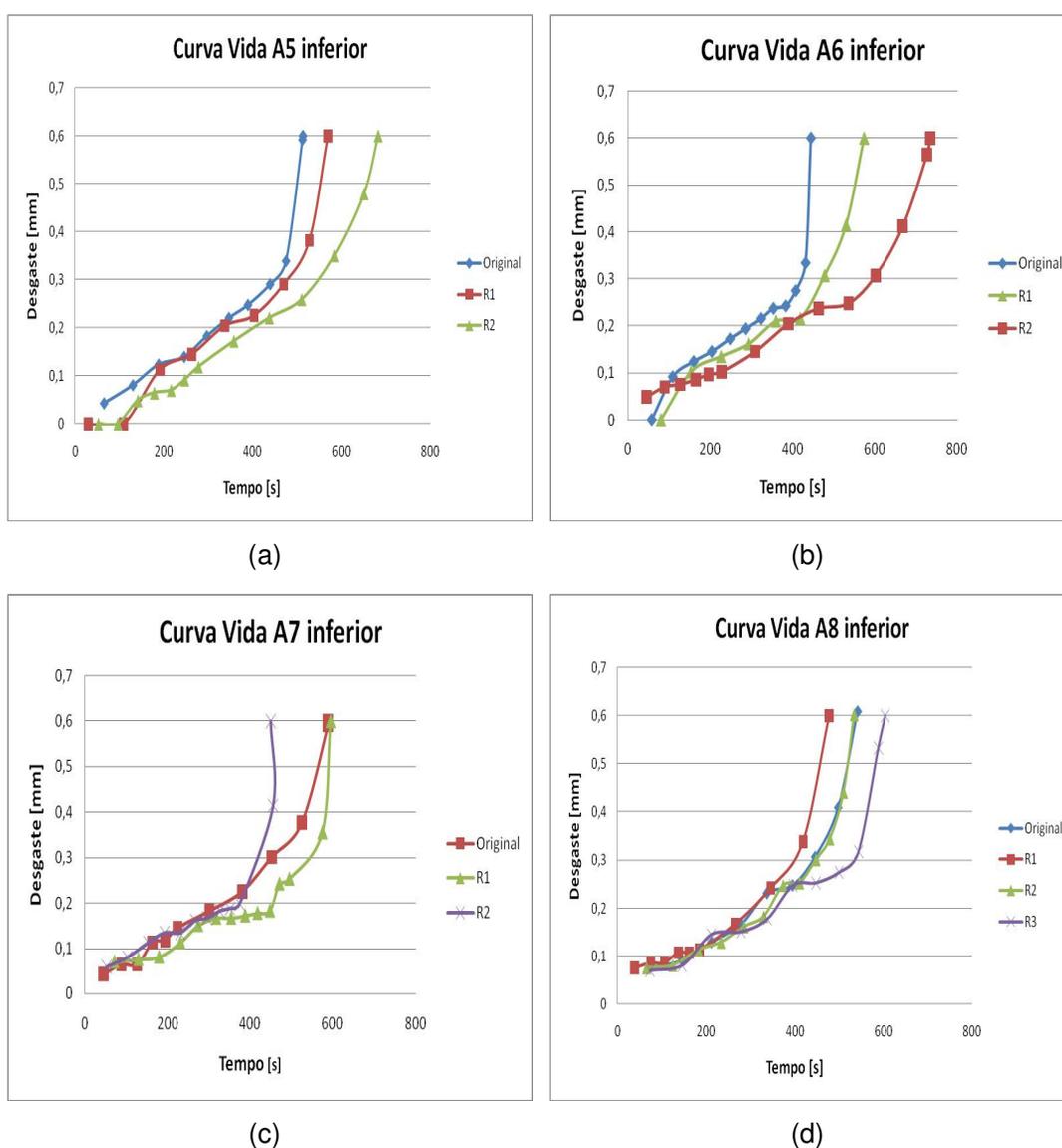


Figura 4.6. Curvas de vida para as arestas inferiores, $ap = 4,0$ mm. a) Aresta 5; b) Aresta 6; c) Aresta 7; d) Aresta 8

Nos testes com as arestas inferiores, as arestas prejudicadas foram a 5, 6 e a 7, onde nota-se pela Fig. 4.6 a realização do teste original e apenas duas das réplicas previstas devido ao mesmo problema descrito para as arestas superiores. Com a aresta 8 conseguiu-se a execução do teste original e das três réplicas como previsto.

A Tabela 4.8 traz o resultado dos testes de vida (em segundos) das arestas superiores para os experimentos com $ap = 4,0$ mm com as respectivas médias, variâncias e desvios.

Tabela 4.8. Média, desvio padrão e variância para as arestas superiores, $ap = 4,0$ mm

Arestas Superiores	Média	Desvio Padrão	Variância
Aresta 1	491,500	147,188	21664,333
Aresta 2	412,667	67,545	4562,333
Aresta 3	487,333	49,085	2409,333
Aresta 4	521,333	114,849	13190,333

Novamente ocorre o mesmo padrão de comportamento com relação às médias de vida das arestas observado nos testes da primeira etapa com $ap = 2,0$ mm.

Como mostra a Tab.4.8, na análise dos resultados dos testes ocorreu situação semelhante aos testes com $ap = 2,0$ mm, etapa para as arestas superiores, ou seja, houve um decréscimo no tempo médio de vida da aresta 1 para a aresta 2 superiores. Este decréscimo novamente não pode levar a deduzir que o desgaste da aresta 1 esteja afetando o desenvolvimento do desgaste da aresta 2, pois o mesmo não ocorre com as arestas seguintes, onde o valor de vida médio volta a aumentar.

A grande dispersão dos dados pode ser notada também, pelos altos valores de desvios que são mostrados na Tab. 4.8.

Por se tratarem de condições de corte mais severas, uma vez que a profundidade de corte passou de 2,0 mm para 4,0 mm, observa-se que a discrepância nos valores dos desvios nestes testes ($ap = 4,0$ mm) foi ainda maior que a dos testes anteriores ($ap = 2,0$ mm).

Além do comportamento não uniforme das arestas, ocorreram ainda sérios problemas com o tipo de cavaco formado. O cavaco formado sob esta condição mais severa de profundidade de corte foi da forma de fita longa emaranhada, fazendo com que o quebra cavaco integrado da ferramenta tivesse ação prejudicada não conseguindo cumprir a sua função de quebrar, ou pelo menos facilitar a quebra deste cavaco. Este fato ocasionou diversos contratempos que afetaram nos resultados finais desta etapa como, por exemplo, o cavaco se prender ao corpo de prova, girando em grande volume junto com a peça e muitas vezes danificando arestas que seriam testadas em outra bateria de testes. Este com certeza foi o maior problema trazido por este tipo de cavaco, pois foi o responsável direto pelo menor número de réplicas realizadas para esta etapa uma vez que várias arestas foram danificadas durante o teste com outras arestas. A título de ilustração do problema a Fig. 4.7 traz uma foto do problema citado.

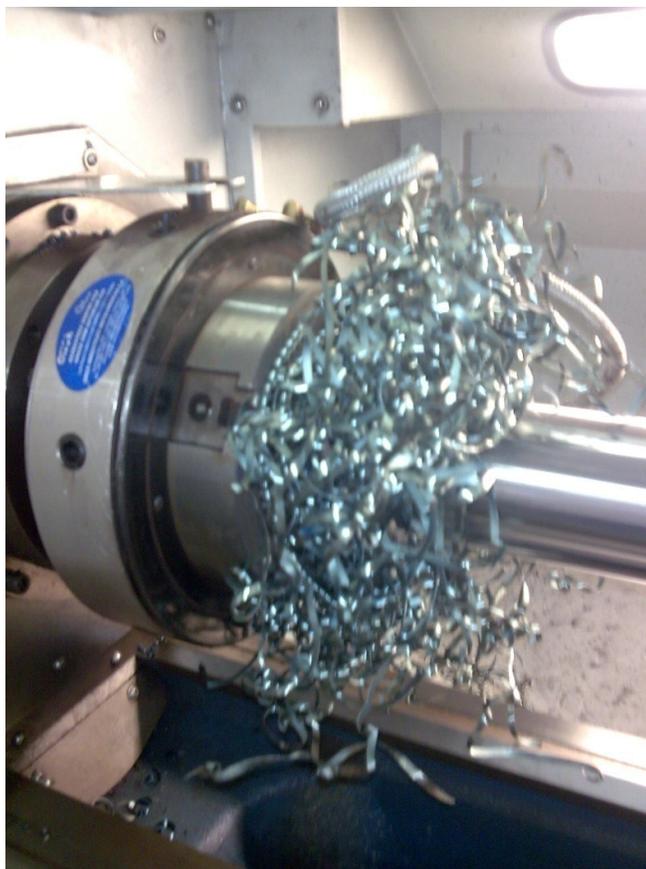


Figura 4.7. Cavaco problemático formado com $ap = 4,0$ mm

Sabe-se da teoria de controle dos cavacos (MACHADO et al., 2009) que o aumento da profundidade de corte tende a aumentar a capacidade de quebra dos cavacos, pois o raio de curvatura natural dos mesmos é reduzido (SALES et al., 1995). Ter a capacidade de quebra dos cavacos aumentada não significa, entretanto, que o cavaco terá a forma curta e quebradiça. Se o material tiver resistência suficiente, as condições de corte podem imprimir uma deformação (ϵ) inferior à necessária para a sua quebra (ϵ_f). Neste caso, um quebra-cavaco deve ser usado para aumentar esta deformação (ϵ), para que esta se iguale ou supere a deformação (ϵ_f). Para que isto ocorra um projeto de quebra-cavaco eficiente deve ser desenvolvido.

A ferramenta utilizada nos experimentos possui um quebra-cavaco que se mostrou eficiente para igualar ou superar a deformação (ϵ_f) para $ap = 2$ mm, mas não teve o mesmo sucesso para a profundidade de corte maior de 4,0 mm.

Os quebra-cavacos são projetados levando-se em consideração diversos fatores, mas principalmente o avanço e a profundidade de corte (MACHADO et al., 2009). O avanço vai influir mais na distância do anteparo em relação à aresta de corte e a profundidade de corte na distribuição deste anteparo (obstáculo) ao longo da largura de corte, b . A ferramenta utilizada possui um anteparo bem projetado para este material (aço microligado DIN 38MnSiVS5) para a menor profundidade de corte de 2,0 mm, mas não tão eficiente para a maior profundidade de corte de 4,0 mm. Deve-se ressaltar que as profundidades de corte utilizadas (2,0 mm e 4,0 mm) estão dentro da faixa de utilização recomendada pelo fabricante da ferramenta que vai de 0,4 mm a 6,0 mm.

A menor quantidade de réplicas nesta etapa com $ap = 4,0$ mm em relação aos testes em $ap = 2,0$ mm, como dito anteriormente, deveu-se ao fato do cavaco girando preso à peça, atingir arestas que ainda não haviam sido testadas, provocando arrancamento ou lascamento de toda aresta principal de corte, impossibilitando a execução do teste programado para ela, ou então o cavaco danificar a aresta secundária de corte, também causando arrancamento, diminuindo drasticamente a resistência da aresta principal de corte correspondente e impossibilitando a complementação dos testes.

As figuras 4.8 a 4.11 ilustram este fato. As figuras 4.8 e 4.9 trazem fotos representativas de danos causados pelos cavacos sobre a aresta 6 localizada na face inferior de um inserto quando se testava outra aresta. A figura 4.8 mostra a aresta principal de corte e a Fig. 4.9 mostra a aresta secundária de corte deste inserto.

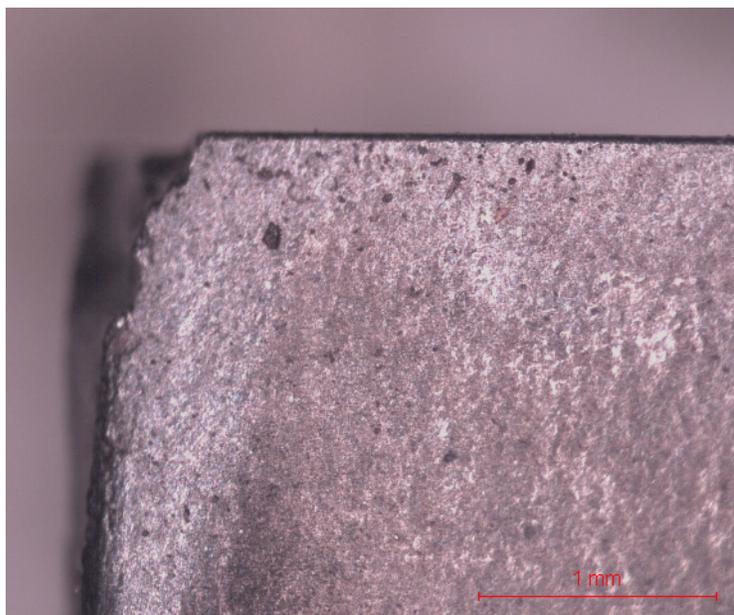


Figura 4.8. Aresta de corte principal (A6) de um inserto, danificada pelo cavaco

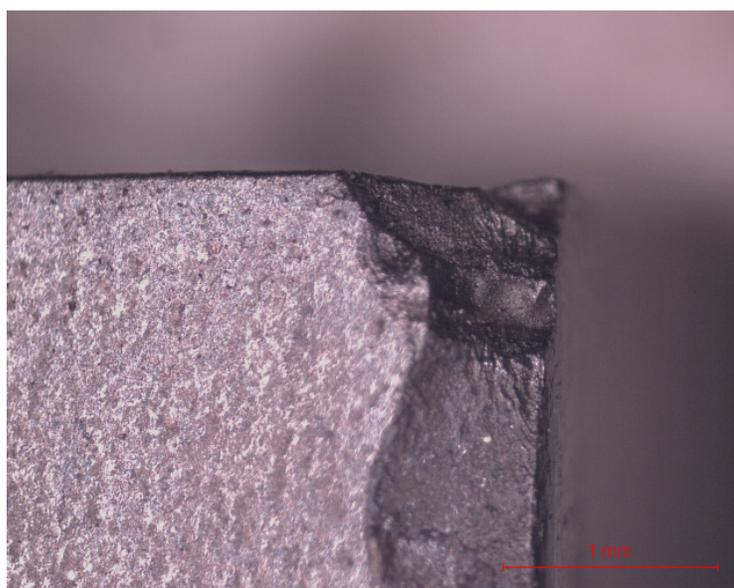


Figura 4.9. Aresta secundária de corte (A6) de um inserto, danificada pelo cavaco

A Figura 4.10 mostra a aresta principal de corte da aresta 7 inferior de um outro inserto utilizado na réplica do experimento e a Fig.4.11 mostra a aresta secundária correspondente a ela desse mesmo inserto, ambas danificadas pelo cavaco gerado quando se testava outra aresta.

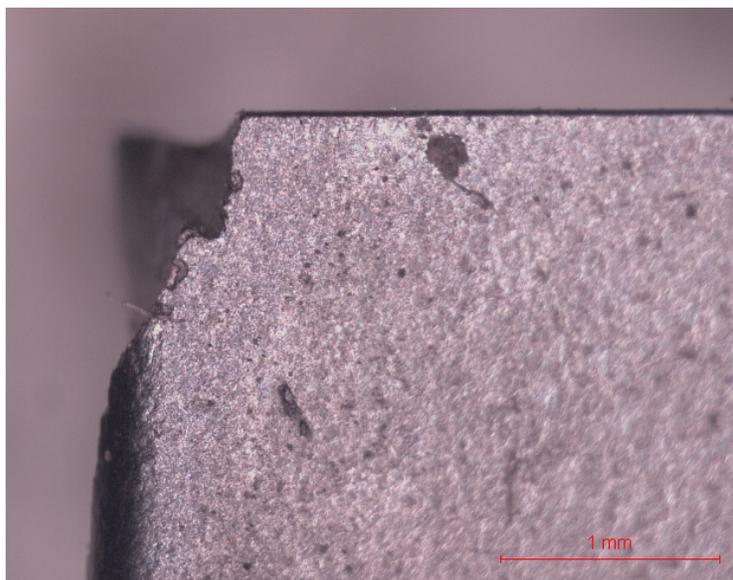


Figura 4.10. Aresta principal de corte (A7) inferior de um inserto, danificada pelo cavaco

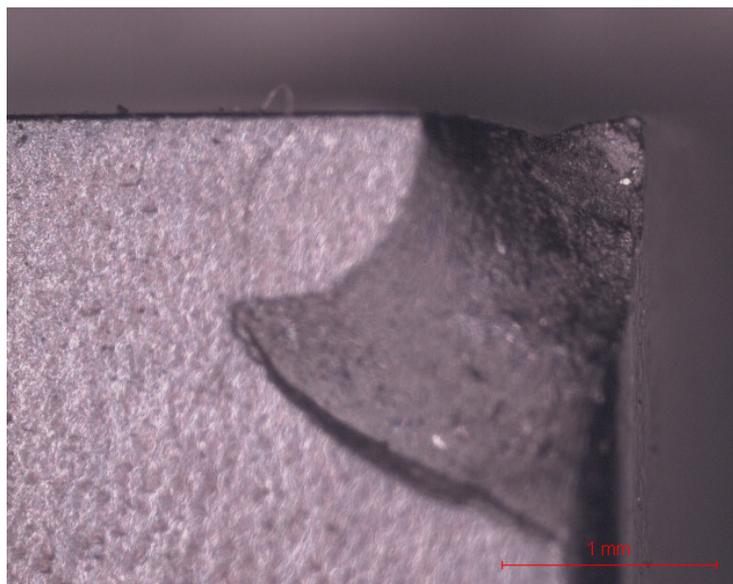


Figura 4.11. Aresta secundária de corte (A7) inferior do inserto, danificada pelo cavaco

Como já comentado, com a gravidade dessas avarias não foi possível a realização de maiores números de réplicas com essas arestas, no entanto conseguiu-se a realização de pelo menos uma para cada experimento desta etapa com $a_p = 4,0$ mm além do teste original, sem a ocorrência dos danos citados. Infelizmente não sobrou corpos de prova para se tentar obter outras réplicas nesta condição. Apesar do grande número de corpos de

prova disponível inicialmente (mais de 40 nas dimensões de 10 mm de diâmetro por 450 mm de comprimento), a grande dispersão observada desde o início exigiu quantidades de réplicas com $ap = 2,0$ mm maiores do que as programadas (1 teste e 2 réplicas). Em algumas situações houve 5 testes (1 teste e 4 réplicas). Isto consumiu muito material, não sobrando corpos de prova para estes testes com $ap = 4,0$ mm, que foram realizados depois dos testes com $ap = 2,0$ mm.

A Figura 4.12 mostra graficamente a média de vida das arestas superiores com os respectivos desvios padrões para a profundidade de corte de 4,0 mm.

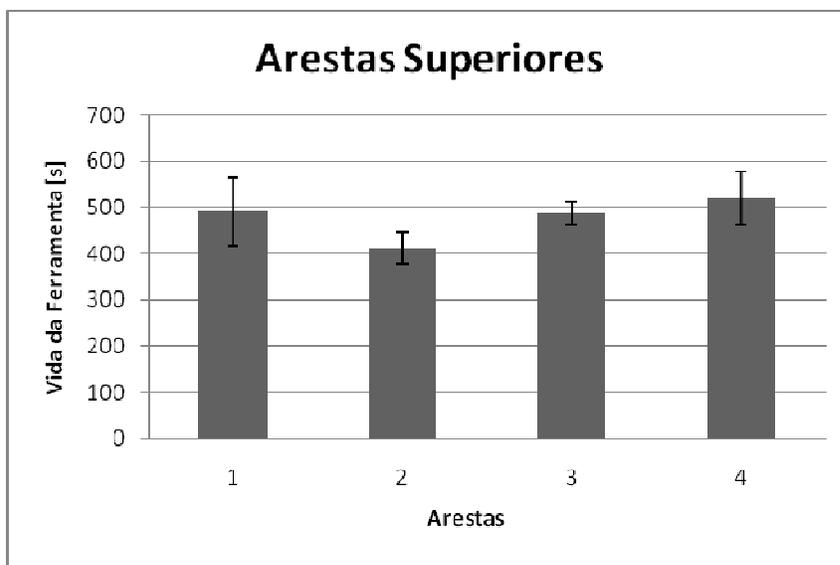


Figura 4.12. Média de vida para cada aresta superior com $ap = 4,0$ mm

Também nesta bateria de testes, como observado nas anteriores, nota-se a ocorrência da grande dispersão nos dados. Podem-se observar pela Fig.4.12 valores maiores de desvios para as arestas 1 e 4 e menores para as arestas 2 e 3. A vida média da aresta 2 foi nitidamente menor que as demais arestas.

A Tabela 4.9 traz o resultado dos testes de vida das arestas inferiores para os testes da primeira etapa com $ap = 4,0$ mm.

Tabela 4.9. Média, desvio padrão e variância para as arestas inferiores, $ap = 4,0$ mm

Arestas Inferiores	Média	Desvio Padrão	Variância
Aresta 5	589,0	85,434	7299,0
Aresta 6	583,0	145,812	21261,0
Aresta 7	545,0	82,310	6775,0
Aresta 8	538,75	51,990	2702,9

A Tabela 4.9 mostra que, com exceção da aresta 6, os valores dos desvios das demais arestas não foram tão discrepantes quanto os observados para as arestas superiores. Isso mostra que, apesar dos problemas listados, ao se executar os testes com $ap = 4,0$ mm com as arestas inferiores, o nível de repetibilidade das réplicas foi maior do que quando testando as arestas superiores.

Pode-se observar também que os valores de vida médios estão decaindo da aresta 5 para a aresta 8. Esse fato não pode ser encarado como uma possível influência de uma aresta já desgastada na sua aresta consecutiva uma vez que, apesar dos tempos de vida se comportarem de maneira decrescente, todos os tempos apresentados na Tabela 4.9 são maiores do que os trazidos pela Tab.4.8 que representa os testes com as arestas superiores.

Para que este comportamento decrescente pudesse ser tomado como uma tendência, o mesmo teria que ter ocorrido também nas arestas superiores, o que não ocorreu. Além disso, para se constatar uma possível influência do desgaste nas arestas superiores nas vidas das arestas inferiores as vidas destas últimas deveriam ser menores e foi o contrário o que ocorreu (vidas médias das arestas inferiores são maiores que as vidas médias das arestas superiores).

A Figura 4.13 apresenta graficamente a média de vida das arestas inferiores com seus respectivos desvios padrões e o comportamento decrescente dos tempos de vida médios.

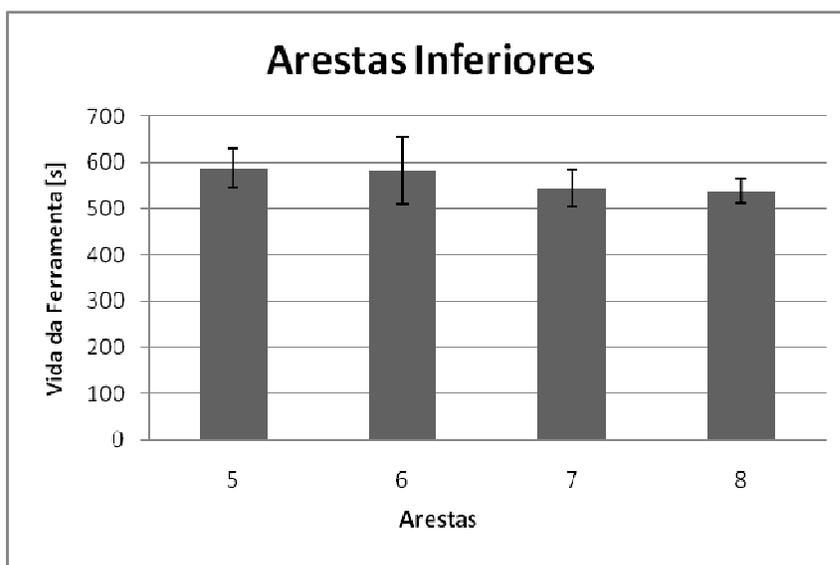


Figura 4.13. Média de vida para cada aresta inferior com $ap = 4,0$ mm

Esta figura, com dados representativos da Tab.4.13, mostra mais claramente o decréscimo do tempo de vida da aresta 5 para a aresta 8 e um valor de desvio padrão mais discrepante da aresta 6 que, das arestas inferiores testadas, foi a que apresentou menor repetibilidade das réplicas.

4.2.1 Comparação entre arestas consecutivas superiores, $ap = 4,0$ mm

Para as condições de corte utilizadas na primeira etapa com $ap = 4,0$ mm, utilizando-se do software Statistica 7.0, com os mesmos níveis de confiabilidade (95%) e significância (5%) utilizados anteriormente, foram comparadas as arestas consecutivas superiores com o mesmo intuito de verificar a ocorrência de alguma influência do desgaste de uma aresta no desenvolvimento do desgaste da respectiva aresta consecutiva a ela, localizada também na face superior do inserto quadrado de metal duro.

A Tabela 4.10 traz o resultado das comparações realizadas entre as arestas superiores consecutivas.

Tabela 4.10. Comparação da vida entre as arestas superiores, $ap = 4,0$ mm

Comparação entre arestas	p-value
A1 e A2	0,4520
A2 e A3	0,2012
A3 e A4	0,6619
A4 e A1	0,7957

A razão da realização dos testes da primeira etapa com condições mais severas foi segundo o raciocínio de que, se houvesse algum tipo de influência de uma aresta na sua consecutiva localizada na mesma face, esta influência seria diretamente proporcional à possibilidade do mecanismo que estivesse atuando em uma aresta alcançar e influenciar a aresta consecutiva. Dessa forma aumentou-se a profundidade de corte de 2,0 mm para 4,0 mm, o que aumentaria o raio de ação de um possível mecanismo que estivesse atuando em uma aresta, possibilitando maiores chances de alcance à aresta consecutiva.

Pelos resultados explicitados na Tab.4.10 pode-se notar que isso não ocorreu. Os dados apresentados pelos p-values mostram, com 95% de confiabilidade, que não se pode dizer, mesmo com o dobro da profundidade de corte utilizada, que o desgaste de uma aresta localizada na face superior do inserto influencie o desenvolvimento do desgaste, e conseqüentemente a vida, de sua consecutiva, também localizada na face superior do inserto, pois, os valores estão todos acima de 0,05.

4.2.2 Comparação entre arestas consecutivas inferiores, $ap = 4,0$ mm

O mesmo raciocínio foi tido em relação às arestas inferiores, ou seja, ao levantar-se a possibilidade de um aumento no raio de ação de um mecanismo que estivesse atuando em uma aresta superior ele viesse a influenciar sua consecutiva localizada na mesma face, essa influência ocorreria também entre as arestas consecutivas da face inferior, por uma questão de simetria do inserto. Os resultados da comparação são mostrados na Tab.4.11.

Tabela 4.11. Comparação da vida entre as arestas inferiores, $ap = 4,0$ mm

Comparação entre arestas	p-value
A5 e A6	0,9539
A6 e A7	0,7143
A7 e A8	0,9168
A8 e A5	0,4333

Nesta tabela pode-se ver claramente que todos os valores listados na coluna relativa ao p-value estão acima do valor de 0,05. Isto infere que também não há diferenças significativas nos resultados de vida entre as arestas consecutivas inferiores.

4.2.3 Comparação entre as arestas diagonais, $ap = 4,0$ mm

A Tabela 4.12 mostra o resultado das comparações entre as arestas diagonais localizadas na face superior do inserto seguindo o mesmo raciocínio de comparação utilizado ao longo do que já foi exposto até aqui.

Tabela 4.12. Comparação entre arestas diagonais superiores, $ap = 4,0$ mm

Comparação entre arestas	p-value
A1 e A3	0,9651
A2 e A4	0,2342

Pode-se notar pela Tab.4.12 que o aumento do valor da profundidade de corte de 2,0 mm para 4,0 mm também não provocou indícios de influência do desgaste de uma aresta na sua respectiva diagonal localizada na mesma face do inserto como mostra os valores de p-values, todos acima de 0,05. O mesmo, como já era de se prever, ocorreu com as comparações trazidas pela Tab.4.13, feitas entre as diagonais da face inferior do inserto.

Tabela 4.13. Comparação entre as arestas diagonais inferiores, $ap = 2,0$ mm

Comparação entre arestas	p-value
A5 e A7	0,5556
A6 e A8	0,6465

Os resultados das análises das arestas diagonais com $ap = 4,0$ mm seguiu a lógica dos resultados encontrados com $ap = 2,0$ mm, ou seja, comparando-se as arestas consecutivas tanto superiores quanto inferiores não se pôde detectar a influência de uma aresta na sua consecutiva localizada na mesma face do inserto, logo, ao analisar os resultados e comparar as arestas diagonais era de se esperar o mesmo, pois as distâncias que as separam são maiores que as distâncias que separam as arestas consecutivas, dificultando ainda mais o alcance de algum tipo de mecanismo que pudesse influenciá-las.

4.2.4 Comparação entre arestas superiores e inferiores, $ap = 4,0$ mm

Essa comparação, como feita com $ap = 2,0$ mm, foi a que mais trouxe expectativa uma vez que são o conjunto de arestas que estão mais próximas uma das outras e, portanto, mais vulneráveis aos efeitos dos fenômenos que ocorrem entre elas. A Tabela 4.14 traz os resultados obtidos dessa comparação utilizando-se da mesma ferramenta estatística, com os mesmos níveis de confiabilidade e significância.

Tabela 4.14. Comparação entre arestas superiores e inferiores do inserto, $ap = 4,0$ mm

Comparação entre arestas	p-value
A1 e A5	0,3772
A2 e A6	0,1420
A3 e A7	0,3561
A4 e A8	0,8226

Os resultados apontados pela Tab.4.14 mostram, assim como os resultados para esta espécie de comparação realizada na primeira etapa do trabalho, com $a_p = 2,0$ mm, que não se pode afirmar que o desgaste de uma aresta localizada na face superior do inserto influencie o desenvolvimento do desgaste e, conseqüentemente a vida, de uma aresta adjacente a ela, localizada na face inferior do inserto. Os valores de p-values indicam essa conclusão com 95% de confiabilidade estatística.

Seguindo o raciocínio de que as cunhas cortantes de uma ferramenta de corte se danificam por avarias (lascas, quebras e trincas), por deformação plástica ou por desgaste (de flanco, de cratera e entalhe) ou pela combinação destes, o aumento da severidade do corte, neste caso, promovido pelo aumento da profundidade de corte (de 2,0 mm para 4,0 mm), aumenta a sensibilidade da comparação. Este aumento da largura de corte implica em aumentar a área ou o comprimento da aresta envolvidos no corte e, conseqüentemente, a região de altas temperaturas da cunha cortante, bem como aumenta as forças de usinagem e a vibração do sistema (MACHADO et al., 2009). Tudo isto contribui para tornar a aresta de corte mais vulnerável aos possíveis danos. Se um teste vai afetar o resultado de outro realizado com uma aresta adjacente (seja consecutiva, diagonal ou inferior) é porque este altera a resistência ao dano desta aresta adjacente, e isto é mais provável ocorrer quanto mais severas forem as condições de corte.

O desgaste e a deformação plástica são fortemente dependentes da temperatura (TRENT & WRIGHT, 2000; MACHADO et al., 2009; DINIZ et al., 2000). Para que um teste seja afetado pelo antecessor, a geração de calor durante a realização deste teria que ser alterada. Em ferramentas de metal duro isto é praticamente impossível de ocorrer, uma vez que estas não sofrem mudanças de fases e o aquecimento durante um teste é muito localizado, com um gradiente de temperaturas muito grande. Se na interface cavaco-ferramenta as temperaturas podem atingir $900^\circ\text{C} - 950^\circ\text{C}$ na usinagem de aço comum ao carbono ou aço baixa liga (TRENT & WRIGHT, 2000), a 0,5 mm abaixo ou de distância lateral, estas temperaturas já caíram para $550^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C}$ (RODRIGUES, 2005).

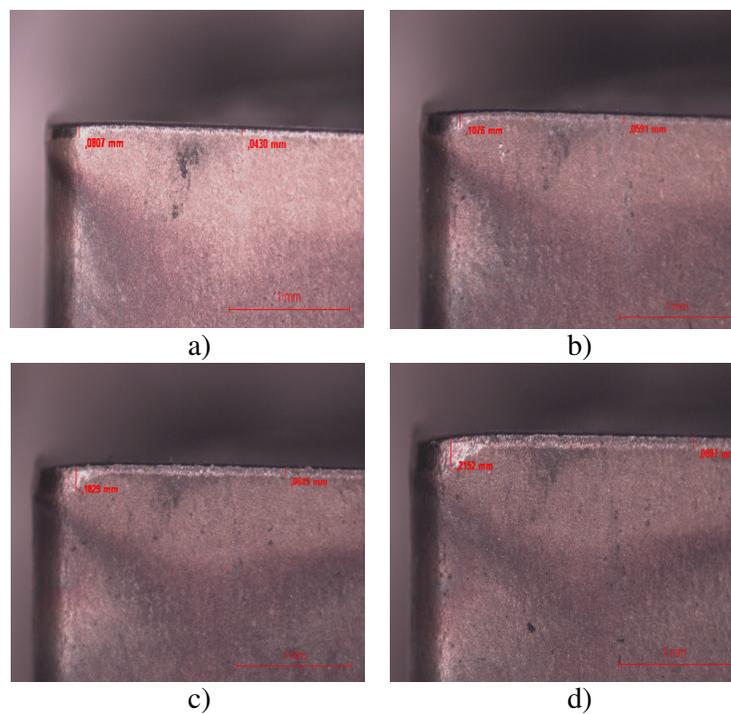
Portanto, as temperaturas atingidas nas arestas adjacentes são muito baixas, não devendo exceder 100°C , possivelmente (RODRIGUES, 2005; DOS SANTOS, 2008). Estes valores não são suficientes para qualquer alteração na resistência da cunha cortante.

Outra possibilidade é a ocorrência de algum tipo de avaria. Neste caso os esforços de corte são muito importantes. Uma trinca pode se desenvolver por fadiga mecânica (sendo impossível de ocorrer por fadiga térmica nestas faixas de temperatura) e, neste caso, um teste em uma aresta pode ser possível de afetar a sua adjacente e isto é mais provável

quanto maior for a severidade do corte. Os resultados aqui apresentados mostram que, mesmo na maior profundidade de corte (4,0 mm), as arestas adjacentes não foram afetadas de forma alguma por um teste anterior em outra aresta. Isto significa dizer que a aleatorização de arestas no meio produtivo é uma prática segura, pelo menos na faixa de condições de corte aqui utilizadas.

4.2.5 Evolução do desgaste nos testes com $a_p = 4,0$ mm

A Figura 4.14 apresenta a evolução do desgaste de flanco para a aresta 1 da face superior do inserto para o teste com profundidade de corte de 4,0 mm.



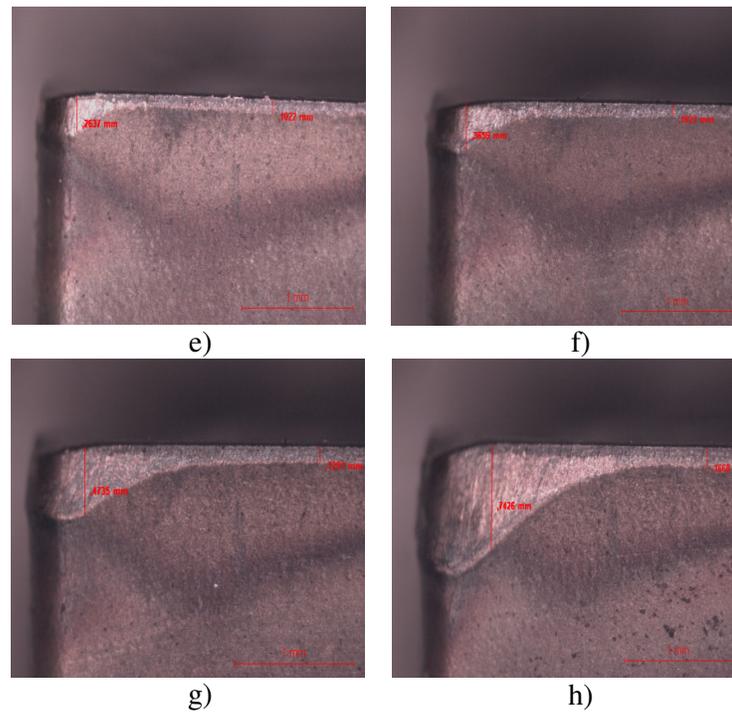
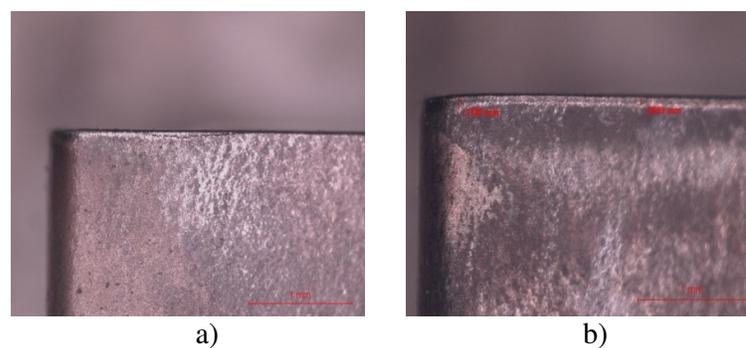


Figura 4.14. Evolução do desgaste na aresta 1 superior de um inserto, após: a) 0,5 passada, b) 1 passada, c) 1,5 passadas, d) 2 passadas, e) 2,5 passadas, f) 3 passadas, g) 3,5 passadas e h) 4 passadas, chegando ao fim de vida

A Figura 4.15 apresenta a evolução do desgaste de flanco para a aresta 5 da face inferior do mesmo inserto mostrado na Fig.4.14, para o teste com profundidade de corte de 4,0 mm. Esta aresta de número 5 é adjacente inferior à aresta de número 1 superior.



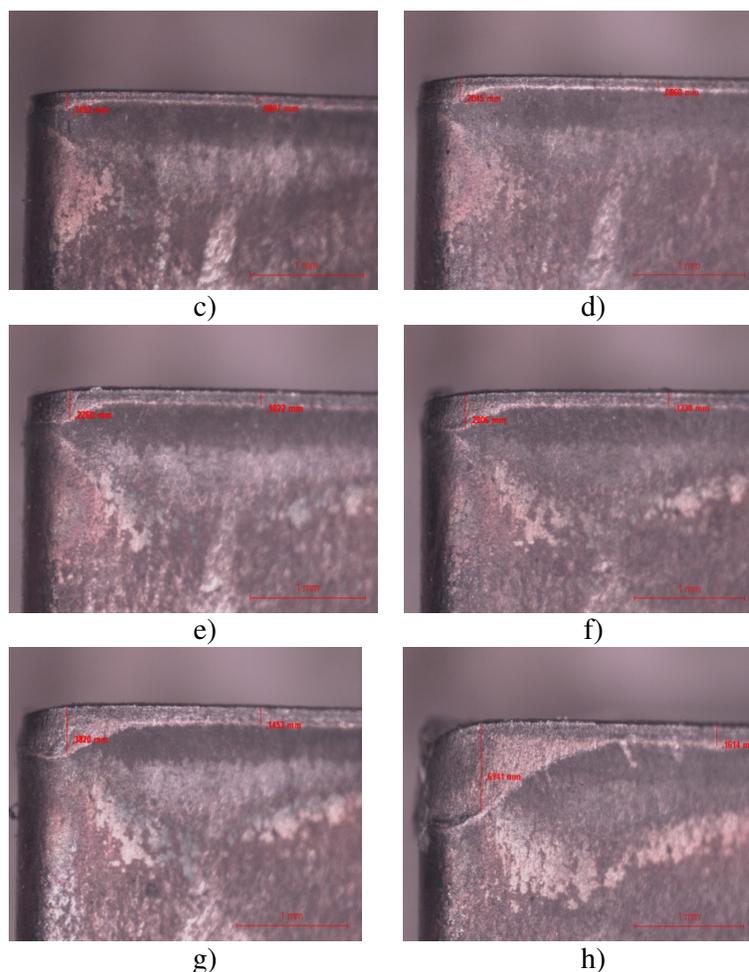


Figura 4.15. Evolução do desgaste de flanco na aresta 5 inferior do inserto da figura 4.14, após: a) 0,5 passada, b) 1 passada, c) 1,5 passadas, d) 2 passadas, e) 2,5 passadas, f) 3 passadas, g) 3,5 passadas e h) 4 passadas, chegando ao fim de vida

Observa-se que o padrão de desgaste das arestas 1 e 5 são muito similares, iniciando com um pequeno desgaste de flanco regular na primeira meia passada, e logo apresentado uma tendência de evidenciar um desgaste de flanco máximo, VB_{Bmax} , que vai evoluindo e se acentuando até o final do teste na quarta passada. Mais uma vez, o padrão do desgaste similar corrobora com o resultado encontrado de que nenhuma influência estatística foi observada entre vidas de arestas adjacentes de um mesmo inserto.

A severidade dos testes com $ap = 4,0$ mm promove a aceleração do destaque do desgaste de flanco máximo, já no final da primeira passada. Nos testes menos severos, com $ap = 2,0$ mm, este destaque do desgaste de flanco máximo só ocorreu próximo ao final de vida da aresta.

Ao usar uma profundidade de corte mais severa, como no caso dos testes da primeira etapa com profundidade de 4,0 mm, as vidas desse grupo de arestas tiveram uma vida média menor do que as observadas nas arestas testadas sob as condições da primeira etapa com profundidade de 2,0 mm.

4.3. Segunda etapa dos experimentos

São apresentados neste subitem do capítulo IV os resultados de vida obtidos com os testes desenvolvidos com diferentes números de paradas para medição do desgaste. Importante lembrar que o objetivo desta etapa é verificar se a vida da ferramenta sofre influência quando se varia o número de paradas para medir o desgaste. Foram feitos testes desde 2 paradas, isto é, usinando até o final da vida com duas interrupções para se medir o desgaste até 11 paradas em média (testes da primeira etapa).

Uma observação importante é que o número de paradas para medir o desgaste não implica necessariamente num corte ininterrupto, pois o comprimento útil do corpo de prova (450 mm) não permite atingir o tempo de vida diretamente em uma única passada. Para se atingir o tempo de final de vida da ferramenta em uma única passada (considerando a vida de 18,53 min) seria necessário um corpo de prova com comprimento útil de 3.066 mm (~ 3,1 m). Para um comprimento útil de 450 mm do corpo de prova, no diâmetro maior de 100 mm e com as condições de corte utilizadas, o tempo máximo possível em uma passada é de apenas 2:47 min (148,2 s). Portanto, um corte contínuo com poucas paradas para medir o desgaste implica em testes com interrupções inevitáveis de deslocamento da ferramenta em avanço rápido (G00) do ponto final de uma passada até o início do corpo de prova para continuidade do corte até uma parada para se medir o desgaste.

A tabela 4.15 apresenta os valores obtidos de tempo de vida, em segundos, assim como os respectivos desvios padrões e as variâncias para número de paradas programadas de 11, 5, 3 e 2 vezes e a Fig.4.16 apresenta estes resultados graficamente.

Tabela 4.15. Média, desvio padrão e variância para diferentes números de paradas para medição do desgaste.

Nº de Paradas	Média (s)	Desvio Padrão	Variância
11	1095	218,214957	47617,76771
5	925,0	35,355339	1250,0
3	802,5	71,41778	5100,5
2	686,4	5,9396969	35, 28

Existe uma tendência clara à diminuição do tempo médio de vida da ferramenta à medida que diminui a quantidade de vezes que se interrompe a usinagem para medição do desgaste.

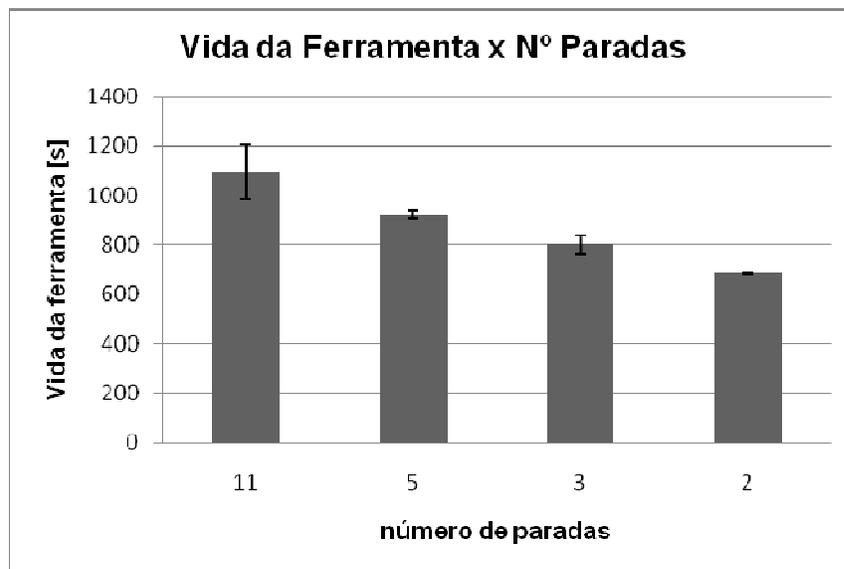


Figura 4.16. Vida média da ferramenta pelo número de paradas.

Os resultados obtidos dessas comparações, feitas utilizando-se o *software* Statistica 7.0 com uma confiabilidade de 95% e um nível de significância de 5%, são mostrados na Tab.4.16.

Tabela 4.16. Comparação entre as médias de vidas obtidas em função do número de paradas para medição de desgaste.

Comparação entre N° de Paradas	p-value
Média de 11 x 5 paradas	0,2765
Média de 11 x 3 paradas	0,0663
Média de 11 x 2 paradas	0,0118
5 x 3 paradas	0,1618
5 x 2 paradas	0,0111
3 x 2 paradas	0,1491

Observando-se os valores dos p-values da Tab.4.16 nota-se que houve influência na vida da ferramenta apenas nos casos em que foi comparada a média de 11 paradas com 2 paradas (11x2) e 5 paradas com 2 paradas (5x2), pois os valores de p para estas comparações estão abaixo do nível de significância de 0,05.

Quando se reduz o número de paradas para realizar a medição do desgaste espera-se um aumento na temperatura média da ferramenta devido a um menor tempo de refrigeração. Ao analisar os resultados apresentados na Tab. 4.16 e Fig. 4.16, certifica-se que este efeito da temperatura é cada vez mais crítico, à medida que o número de paradas vai diminuindo. Quando se fez apenas 2 paradas para se medir o desgaste, observa-se as condições mais críticas. Tanto que as comparações 11x2 e 5x2 apresentaram os p-values como sendo influentes na vida da ferramenta.

Além disso, as condições comparadas que apresentaram valores de p abaixo de 0,05 estão proporcionalmente (ou estatisticamente) entre as com maior probabilidade de se encontrar diferença na vida da ferramenta ao se variar o número de paradas, pois são as que apresentam maior redução percentual no número de paradas, podendo gerar com isso maiores temperaturas a serem suportadas nas arestas sob estas condições.

A Tabela 4.17 traz as porcentagens aproximadas de redução do número de paradas e do tempo médio de vida para cada condição comparada da Tab. 4.16.

Tabela 4.17. Porcentagem aproximada de redução do número de paradas das comparações

Paradas	Porcentagem de redução nas paradas	Porcentagens de redução na vida da ferramenta
De 11 para 5	54,5%	15,5%
De 11 para 3	73%	26,7%
De 11 para 2	82%	37,3%
De 5 para 3	40%	13,2%
De 5 para 2	60%	25,8%
De 3 para 2	33%	14,5%

A porcentagem de redução nas paradas e na média de vida da ferramenta foi maior quando se passa de 11 paradas para apenas 2 paradas, com isso espera-se um maior aquecimento da ferramenta devido à queda de tempo de refrigeração ocasionado por esta diminuição no número de paradas. A segunda maior redução percentual nas paradas e nas médias de vida foi encontrada quando se passa de 11 paradas para 3 paradas. Embora a Tab. 4.17 aponte esta condição como a segunda mais crítica em relação a diminuição das paradas, as comparações estatísticas mostradas na Tabela 4.16 não apontam diferença dessa redução na vida da ferramenta de corte, considerando 95% de confiabilidade. Entretanto, observas-se que o p-value é muito próximo de 0,05. Caso a confiabilidade fosse reduzida para 93%, este caso seria estatisticamente influente.

Para a condição de 5 paradas para 2 paradas observa-se a terceira maior redução na quantidade de paradas (60% menos) e da média de vida da ferramenta (25,8% menos). De acordo com a Tabela 4.16 esta redução percentual foi suficiente para afetar a vida da ferramenta de modo a diminuí-la.

Foi feita, também, uma comparação geral dos efeitos da redução no número de paradas na vida da ferramenta. Deste modo, comparou-se a diferença entre parar em média 11 vezes e parar menos que 5 vezes (tomando as médias de vida de todos os testes com paradas menores ou iguais a 5). O resultado desta comparação, mostrado na Tabela 4.18, revela que, de modo geral, quando se diminui o número de interrupções da usinagem para fazer medições de desgaste, a vida da ferramenta é afetada por esta diminuição.

Tabela 4.18. Comparação entre as médias de vidas obtidas em função do número de paradas para medição de desgaste.

Comparação números de paradas	entre	Média	Desvio Padrão	p-value
Média de 11 paradas		1095	218,2	0,0150
Máximo de 5 paradas		840,45	145	

Como pode ser observado pelo valor de p-value conclui-se com 95% de confiabilidade que a influência da quantidade de paradas na vida do inserto ocorre, pois o p-value encontrado está abaixo do valor de 0,05.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Da análise dos testes executados no trabalho foram tiradas várias conclusões e este capítulo tem por objetivo listá-las de forma sintética, uma vez que as devidas observações, discussões e comentários foram feitos no capítulo apropriado de resultados e discussões.

A primeira e imediata conclusão que se pode tirar, analisando os testes, é a de que, embora os testes de vida de ferramenta sejam demasiadamente onerosos, uma vez que demandam grande quantidade de hora-máquina, material, ferramentas, energia elétrica, entre outros, é fato que uma maior quantidade de réplicas dos testes melhora significativamente a confiabilidade dos resultados, pois a repetibilidade dos ensaios diminuem os grandes desvios que foram encontrados nos testes deste trabalho.

Pôde-se concluir também que, quanto ao intercâmbio de arestas em insertos quadrados de metal duro, nas condições de corte utilizadas nos experimentos e para uma confiabilidade de 95% ocorre o elencado a seguir:

- Não foi observada influência estatisticamente significativa do desgaste de uma aresta localizada na face superior do inserto no desenvolvimento do desgaste da aresta consecutiva a ela localizada também na superfície superior do inserto quadrado de metal duro;

- Não foi observada influência estatisticamente significativa do desgaste de uma aresta localizada na face inferior do inserto no desenvolvimento do desgaste da aresta consecutiva a ela também localizada na face inferior do inserto quadrado de metal duro;
- Quando comparadas as arestas diagonais, as duas combinações de diagonais possíveis para cada face, também não se observou influência estatisticamente significativa da aresta já desgastada no desenvolvimento do desgaste da aresta diagonal a ela. Isso ocorreu nas arestas diagonais superiores e inferiores;
- Ao se comparar uma aresta localizada na face superior do inserto com uma aresta localizada na face inferior do inserto imediatamente adjacente a ela, a ausência de influência estatisticamente significativa também foi demonstrada pela ferramenta estatística.

Os resultados mostraram em geral, que ao se usar com condições de profundidade de corte mais severas há a produção de cavacos em fita emaranhados, possíveis de causar danos em outras arestas ainda não testadas, como foi observado no trabalho, e ainda causar danos à própria máquina ferramenta uma vez que há a possibilidade desses cavacos embolarem nas mangueiras de ar comprimido, na placa e na mangueira do fluido de corte.

Conclui-se, também, que o número de vezes que se interrompe o teste para fazer a medição do desgaste tem influência estatística significativa na vida da ferramenta, reduzindo-a à medida que a quantidade de paradas diminui.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com o propósito de dar continuidade a esta mesma linha de pesquisa, aprofundar a investigação e introduzir novos elementos a serem investigados, sugere-se os seguintes temas para trabalhos a serem realizados futuramente:

1. Realizar os testes selecionando condições de corte diversas das que foram utilizadas. Um maior aumento na velocidade de corte, por exemplo, poderia aumentar a temperatura atingida pelo inserto quadrado de metal duro e então poder-se-ia analisar se a condução desse calor através do inserto chegaria a afetar outra aresta. Além da velocidade

de corte, aumentar a profundidade de corte, mas para tanto, usar uma ferramenta apropriada para desbaste pesado com quebra cavacos eficiente para tais condições.

2. Investigar a influência do intercâmbio de arestas de corte em ferramentas de outra geometria que não as quadradas negativas com oito arestas cortantes;

3. Aumentar a quantidade de réplicas realizadas em cada teste para promover maior confiabilidade estatística e diminuir os elevados desvios encontrados;

4. Realizar este tipo de investigação em outros materiais, com durezas e propriedades diferentes para analisar a influência do material no desenvolvimento do desgastes das arestas intercambiadas;

5. Estudar parâmetros fenomenológicos do processo de torneamento associados ao intercâmbio das arestas, como temperatura e força, potência e vibração, utilizando os vários sistemas lubri-refrigerantes e utilizando as ferramentas de corte aqui utilizadas ou disponíveis no mercado;

6. Utilizar insertos com diferentes tipos e técnicas de revestimentos e verificar se ocorre influência desses revestimentos na vida das arestas, mas sempre realizando o intercâmbio delas;

7. Fazer o monitoramento do acabamento da superfície do corpo de prova utilizado, através de um rugosímetro, adquirindo-se os diversos parâmetros de rugosidade e fazer uma correlação ente o critério de fim de vida dos insertos com a piora no acabamento do corpo de prova, tentando estabelecer uma correlação entre os critérios.

8. Variar em maior número de vezes as interrupções da usinagem, inclusive realizar testes sem interrupção para medição de desgaste, comparando-se as médias de vida obtidas nestes testes.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. O., 2008. **Investigação de desvios geométricos no alargamento de ferro fundido com ferramentas revestidas**. 117 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

ARE, AB. **Introdução à estatística**. 2001, São Paulo: Edgar Bluger, 345 p.

BARROS NETO, B, SCARMINIO, I.S. E BRUNS, R.E., 1995, **Planejamento e Otimização de Experimentos**. Editora da Unicamp. 2. Edição, Campinas - SP, 229p.

BARROZO, MAS. 2006. **Planejamento de Experimentos**. Programa de Pós-Graduação Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia – PPG-EQ/UFU, julho.

BOEHS, L.; BORGES, R. 1991. **Ferramentas para Usinagem – Materiais, Avariais e Desgastes**. Apostila Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Mecânica. Florianópolis - SC.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G. & HUNTER, J. S, 1978.**Statistics for Experimenters**. New York: John Wiley & Sons.

CHILDS, THC. et al., 2000. **Metal machining** : theory and applications. London: Butterworth-Heinemann, 406p.

CHRISTOFFEL, K. 2001. High-speed Machining from a Tool Manufacturer's Perspective. Seminário Internacional de Alta Tecnologia e Manufatura Avançada, Piracicaba – SP. Anais UNIMEP, p. 121 – 151.

COLGAN, J. et al., 1994. On-line Tool Breakage Detection in Turning: A Multi-Sensor Method. **ASME Journal of Engineering for Industry**, v.116, n.1, p.117-123.

CORRÊA, D. C.; SALES, W. F.; SANTOS, S. C.; PALMA, E. S., Machinability of Bimetallic Bearings Using Cemented Carbide Tools: Evaluation of the Wear Mechanisms. **Journal of Materials Processing Technology**. V.159, 2005, p. 435–444.

COSTA NETO, P. L. O. 2004. **Estatística**. 2 ed. São Paulo: Edgar Blucher.

DA MOTA, P. R. 2006. **Investigação do Comportamento de Ferramentas de Aço Rápido no Processo de Rosqueamento Interno em Alta Velocidade de Corte**. 142 f. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia –MG.

DEBIASI, I. L. **Dossiê técnico sobre pastilhas**. Centro Tecnológico de Mecatrônica. SENAI – RS, 2006, 25p.

DE MELO, A.C.A. 2001. **Estudo das Trincas de Origem Térmica Geradas em Ferramentas de Metal Duro Durante o Fresamento Frontal**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, FEMEC – UFU, Uberlândia – MG, Dezembro, 174 pgs.

DIEI, EN.; DORNFELD, DA. 1987. A Model of Tool Fracture Generated Acoustic Emission During Cutting. **Journal of Engineering for Industry**, v.109, n.3, p.234-240.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 2ª ed., 2000. Editora Artliber, 244 p.

DOBRZÁNSKI, L.A.; GOŁOMBK, K., Structure and Properties of the Cutting Tools Made from Cemented Carbides and Cermets with the TiN + mono-, gradient- or multi (Ti, Al, Si)N + TiN Nanocrystalline Coatings. **Journal of Materials Processing Technology** 2005. P. 805–815

DOS SANTOS, M. R. 2008. **Modelo Térmico para a Solução de Problemas Inversos em Transferência de Calor com Aplicação em um Processo de Usinagem por Torneamento**. Dissertação de Mestrado, Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, FEMEC – UFU, Uberlândia – MG.

DUCROS, C.; BENEVENT, V.; SANCHETTE, F.; Deposition, Characterization and Machining Performance of Multilayer PVD Coatings on Cemented Carbide Cutting Tools. **Surface and Coatings Technology**. v. 163 –164, 2003. p. 681–688.

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; Effect of High-Pressure Coolant Supply When Machining Nickel-Base, Inconel 718, Alloy With Coated Carbide Tools. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 153-154, p. 1045-1050, 2004.

FERRARESI, D. 1977. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 12ª reimpressão, (2006), 751p.

GONG, W.; LI, W.; HIRAKASHI, T.; OBIKAWA, T., An Active Method of Monitoring Tool Wear States by Impact Diagnostic Excitation. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v 44 ,2004. p. 847–854

GRZESIK, W. Experimental Investigation of the Cutting Temperature when Turning with Coated Indexable Inserts. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** v. 39, 1999, p. 355–369.

GRZESIK, W. The Role of Coatings in Controlling the Cutting Process when Turning with Coated Indexable Inserts. **Journal of Materials Processing Technology**. v.79, 1998, p.133–143.

KALDOR, S.; MALKIN, S. A common denominator for optimal cutting tool geometry. *Annals of the CIRP*, 1986, p 41-44.

KALPAKJIAN, S. 1995. **Manufacturing Engineering and Technology**. 3ª ed., Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1296p.

KOLASCKA, H. And DREYER, K. 1990. Metal Duro, Cermets e Cerâmica. **Metal Mecânica**, set/out, p.62-70.

KÖNIG, W.; Klocke, F.1997. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen und Bohren**. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg, 5 Auflage, Band 1, 471 pgs.

KONYASHIN, I. Y. PVD/CVD Technology for Coating Cemented Carbides. **Surface and Coatings Technology**. v.71, 1995, p. 277-283.

International Organization for Standardization, 1993. **ISO 3685: Tool-life Testing with Single-Point Turning Tools**. 2ª ed. Genève, 48p.

International Organization for Standardization, 2004. **ISO 513: Classification and Application of Hard Cutting Materials for Metal Removal with Defined Cutting Edges- Designation of the Main Groups and Groups of Application**.

LUIS, NE. 2001. **Comparação entre o Ensaio de Usinabilidade de Curta Duração e o ensaio de Usinabilidade de Longa Duração**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, p.86.

MACHADO, AR.; DA SILVA, M. B. 2004.**Usinagem dos Metais**. Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. 8ª Versão, 257p.

MACHADO, A.R., ABRÃO, A.M., COELHO, R.T. and DA Silva, M.B., 2009. **Teoria da Usinagem dos Materiais** Vol.1, Ed. Edgard Blücher, S.Paulo, Brasil, 371p.

MARCONDES, F. C. **A História do Metal Duro**. Publicado por Sandvik Coromant, 1990, 234 p.

MARCONDES, F. C., 2008. **O Metal Duro Passado a Limpo**. O Mundo da Usinagem, n.44, 2ª edição.

MATSUMOTO, H., DINIZ, A. E. Torneamento de Aços Endurecidos Utilizando Ferramentas Cerâmicas. **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2000, Natal – RN, UFRN.

METALS HANDBOOK. 1993, **Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys**. 2. Edition. ASM International, vol.1.

MEYER, P. L. 2003. **Probabilidade: Aplicações à Estatística**. Ed. LTC, 2ª ed. 426 p.

MICARONI, R. **Influencia do Fluido de Corte sob Pressão no Torneamento do Aço ABNT 1045**. tese de doutorado, 2006, Universidade Estadual de Campinas, 167 p.

MILLS, B.; REDFORD, A. H. **Machinability of Engineering Materials**. Applied Science Publishers, U.K., 1983, 174p.

NASCIMENTO, G., ABRÃO, A. M. Influência da Geometria da Ferramenta de Corte na Usinabilidade do Aço ABNT 1045. **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2000, Natal – RN, UFRN.

PAIVA, A. P. 2006. **Metodologia de Superfície de Resposta Multivariada – Uma proposta de otimização para processos de manufatura com múltiplas respostas correlacionadas**. 279p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá. Faculdade de Engenharia Mecânica.

PONTES, FJ. 2007. Aplicação de um Arranjo Fatorial Completo ao Projeto dos Parâmetros de uma Rede Neural Artificial RBF para Predição da Rugosidade em Processo de Torneamento. **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Foz do Iguaçu, PR, outubro.

PORTAL TÉCNICO. Disponível em: <<http://www.programastecnicos.com.br>> Acessado em 22/09/2008.

RAO, C.R. **Statistics: A technology for the millennium** International Journal of Mathematics & Statistic. Vol. 8, No. 1, June 1999, p. 5-25.

RODRIGUES, A. R. **Estudo da Geometria de Arestas de Corte Aplicadas em Usinagem com Altas Velocidades de Corte**. 2005, 249 p., Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP.

ROGANTE, M., 2008. Wear Characterisation and Tool Performance of Sintered Carbide Inserts During Automatic Machining of AISI 1045 steel. **Journal of Materials Processing Technology**. doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.12.004.

ROSA, AB.; DINIZ, AE. Influência das Condições de Usinagem na Rugosidade de Peças de Aço Fresadas com Fresas de Topo de Metal Duro e Coronite. **Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**. N° 15, 1999, Águas de Lindóia – SP, Anais ABCM, 1999.

SALES, W. F.; DUARTE, M. A. V.; MACHADO, A. R.; LEPORE NETO, F. P.. **Relação Experimental Entre O Raio de Curvatura Natural do Cavaco e Os Principais Parâmetros de Usinagem**. In: XII COBEM-CIDIM, 1995. Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte.

SANDVIK. **Manual Coromant. Catalogo de Ferramentas de corte**. Disponível em <<http://www.sandvik.com.br/>> acesso em 05/09/2008.

SILVA, LR. Estudo da Geometria da Aresta de Corte de Ferramentas Aplicadas ao Torneamento com Alta Velocidade de Corte da Superliga INCONEL 718. **Revista Máquinas e Metais**, v. 37, n. 427, p. 32-55, 2001.

SILVA, LR. **Estudo da Geometria da Aresta de Corte de Ferramentas Aplicadas ao Torneamento de Superligas à base de Níquel com Alta Velocidade de Corte**. 2002, 211p., Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP.

SÖDERBERG, S. Até que Ponto as Pastilhas de Metal Duro são Aplicáveis? **O Mundo da Usinagem**, n. 1, 1ª edição, 2000. Disponível em <<http://www.omundodausinagem.com.br/edicoes/2000/1/25.pdf>>. Acesso em 22/08/2008 12:08.

STEMMER, C. E.. **Ferramentas de corte I**. 4ª ed., 1995. Florianópolis: Editora da UFSC, 249p.

STOETERAU, R. L. **Processos de Usinagem**. Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina, 2007. Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/Stoterau/Aula-04-U-2007-1-materiais.pdf>>. Acessado em: 17/09/2008.

TRENT, E. M., Wright, P. K. **Metal Cutting**. 4th Edition, 2000. Butterworth Heinemann, Boston, USA.

UEHARA, K.; TAKESHITA, H., 1989. Prognostication of the Chipping of Cutting Tools. **Annals of the CIRP**, v.38, n.1, p.95-98.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciência dos Materiais**. 12. ed. Brasil: Ed. Edgard Blucher, 1981. 427p.

VENKATESH, V. C.; SHUE, W. Study of the Built-up Edge in Drilling with Indexable Coated Carbide Inserts. **Journal of Materials Processing and Technology**. V.58, p.379-384. 1996.

WANIGARATHNE, P. C.; KARDEKAR, A. D.; DILLON, O. W.; POULACHON, G.; JAWAHIR, I.S., 2005, Progressive Tool-wear in Machining with Coated Grooved Tools and its Correlation with Cutting Temperature. *Wear* 259, p.1215–1224.

WEINGAERTNER, W. L.; SOUZA, A. J. Aplicação de um Sistema de Monitoramento Inteligente no Diagnóstico de Falhas em Ferramentas de Corte: Uma Abordagem Teórica. In: **II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2002, João Pessoa - PB, 10p.

WERTHEIM, R.; SATRAN, A.; BER, A. Modifications of the edge geometry and chip and chip formation in milling. **Annals of the CIRP**. p 63-68. 1994.

YEN, Y. C., JAIN, A., ALTAN, T. A Finite Element Analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries. **Journal of Materials Processing and Technology**. V.146, p. 72-81. 2004.