

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FELIPE OLIVEIRA LONDERO

**AVALIAÇÃO DE DESGASTES EM FERRAMENTAS DE METAL DURO
REVESTIDO NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 5160 ESFEROIDIZADO**

CAXIAS DO SUL

2014

FELIPE OLIVEIRA LONDERO

**AVALIAÇÃO DE DESGASTES EM FERRAMENTAS DE METAL DURO
REVESTIDO NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 5160 ESFEROIDIZADO**

Relatório do trabalho de conclusão de curso desenvolvido na disciplina de Estágio II, código MEC0258, representando nota parcial para conclusão desta e como pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico na Universidade de Caxias do Sul - UCS.

Orientador: Prof. Rodrigo P. Zeilmann, Dr. Eng.

CAXIAS DO SUL

2014

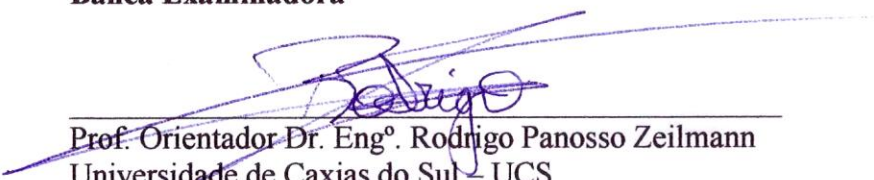
FELIPE OLIVEIRA LONDERO

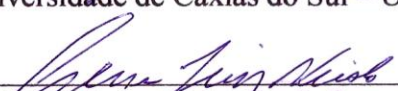
**AVALIAÇÃO DE DESGASTES EM FERRAMENTAS DE METAL DURO
REVESTIDO NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 5160 ESFEROIDIZADO**


Relatório do trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro Mecânico
na Universidade de Caxias do Sul - UCS.

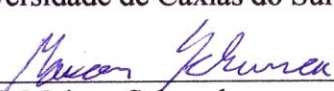
Aprovado em: 08 / 12 / 2014

Banca Examinadora


Prof. Orientador Dr. Engº. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul - UCS


Prof. Avaliador M.Sc./Engº. Gerson Luiz Nicola
Universidade de Caxias do Sul - UCS


Prof. Avaliador Dr. Engº. Evandro Paese
Universidade de Caxias do Sul - UCS


Engº. Maicon Schunck
SK Schunck Projetos e Equipamentos Ltda.

Dedico este trabalho aos meus Pais,
Maria Oliveira Londero (in memoriam) e
Sérgio Monteiro Londero.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mostrar-me o caminho correto, quando na verdade estava indo pelo caminho errado pensando que podia tudo.

A minha querida Mãe, Maria Oliveira Londero (in memoriam).

Ao meu querido Pai, Sérgio Monteiro Londero, por me estender a mão e me apoiar em momentos de grande dificuldade, desilusão e tristeza; bem como agradecê-lo, por todo aporte que me deu em casa e por todo seu carinho.

Ao Professor Dr. Eng.º Rodrigo Panosso Zeilmann, pelos seus ensinamentos, sua atenção, seu tempo e a oportunidade de me orientar na conclusão deste trabalho.

Ao Professor M.Sc. Eng.º Gerson Luiz Nicola pelas sugestões, dicas e ensinamentos.

Ao Professor Dr. Eng.º Evandro Paese pelas sugestões.

Aos bolsistas e membros do Grupo de Usinagem da Universidade de Caxias do Sul (GUS) pela colaboração e apoio durante o trabalho, em especial ao Guilherme Foquesato.

Ao Diretor e todos os demais funcionários da empresa SK SCHUNCK PROJETOS E EQUIPAMENTOS LTDA, em especial, ao Eng.º Maicon Schunck, pela oportunidade de realizar o estágio obrigatório de conclusão; assim como toda sua disponibilidade, apoio, incentivo e o aporte financeiro para aquisição dos materiais na realização dos ensaios.

Aos Médicos, Dr. Rovaldo José Neuwald e Dr. Caetano Fenner Oliveira.

Ao meu ex-colega da UCS, Eng.º Rafael de Matos Soares.

Ao meu colega da UCS, Dirceu Monteiro da Silva.

Aos meus grandes amigos, Leandro Krob Jordão e Rosana Rossi Barcellos.

Ao Movimento Cenáculo de Maria de Caxias do Sul.

A UCS, pela cessão dos laboratórios da Universidade.

A todos os demais professores e funcionários do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul.

RESUMO

Neste trabalho, buscou-se avaliar e melhorar a compreensão dos tipos e mecanismos de desgaste em ferramentas de metal duro revestido no torneamento do aço SAE 5160 esferoidizado. O avanço tecnológico contínuo das máquinas de usinagem e ferramentas tem proporcionado à utilização de parâmetros de corte cada vez maiores. No entanto, desgastes precoces nas ferramentas podem interromper a produção ocasionando tempo improdutivo devido à máquina parada. Por esta razão, busca-se cada vez mais minimizar os custos operacionais. Para isso, torna-se imprescindível saber avaliar corretamente o comportamento dos desgastes nas ferramentas através de uma metodologia prevenindo e evitando os desperdícios ligados aos processos de usinagem. Foram realizados ensaios de usinabilidade de curta duração utilizando diferentes classes de ferramentas de metal duro revestido com TiCN/Al₂O₃/TiN (CVD) e posteriormente através de microscópio óptico avaliou-se aquela que apresentou os menores desgastes e a maior vida. Utilizaram-se os mesmos parâmetros de corte para ambas as ferramentas, cujos valores foram fixados através de pré-testes e catálogos de ferramentas. A classe GC4215 foi a que apresentou a maior vida útil e os menores desgastes. Os tipos de desgastes predominantes foram o desgaste de flanco e o desgaste de cratera, causado pelos mecanismos de abrasão e difusão. Nas classes GC4225 e GC4235 ocorreu forte adesão de material da peça no flanco da ferramenta associada à baixa dureza do material esferoidizado. Constatou-se o bom desempenho do revestimento de Al₂O₃ na superfície de saída, dificultando o surgimento e a evolução do desgaste de cratera.

Palavras-chaves: usinagem, aço SAE 5160 esferoidizado, torneamento, desgaste de ferramentas.

ABSTRACT

In this study, we sought to evaluate and improve the understanding of the types and wear mechanisms in carbide tools coated in steel turning SAE 5160 spheroidized. The continuous technological advancement of machining and machine tools has provided the use of increasingly larger cutting parameters. However, early wear on tools can stop production causing downtime due to downtime. For this reason, we seek to increasingly minimize operating costs. For this, it is essential to know how to properly evaluate the behavior of wear on tools through a methodology preventing and avoiding waste related to machining processes. Machinability tests were performed using short different classes of carbide tools coated with TiCN/Al₂O₃/TiN (CVD) and subsequently evaluated by optical microscope is the one that had the lowest wear and longer life. We used the same cutting tools for both parameters, whose values were determined by pre-testing tools and catalogs. The GC4215 grade was the one with the longer life and lower wear. The predominant types of wear were flank wear and crater wear caused by abrasion and dissemination mechanisms. In GC4225 GC4235 classes and there was a strong part material for membership in the tool flank associated with low hardness of the material spheroidized tool. We found the performance of the Al₂O₃ coating on the exit surface, hindering the emergence and evolution of the crater wear.

Keywords: machining, steel SAE 5160 spheroidized, turning, tool wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Peças de Reposição SK Schunck.	19
Figura 2 – Organograma simplificado do setor de atuação do estágio.....	19
Figura 3 – Pinos travas e molas helicoidais utilizados nos tratores Massey Ferguson.	21
Figura 4 – Pinças utilizadas em operações de fresamento, furação e rosqueamento	22
Figura 5 – Pastilhas com diferentes geometrias e quebra-cavacos.....	24
Figura 6 – Gumes, ângulos e superfícies de corte de uma ferramenta de torneamento	25
Figura 7 – Geometria do inserto de metal duro e os revestimentos	28
Figura 8 – Deformação plástica do gume de corte	29
Figura 9 – Desgaste de flanco.....	29
Figura 10 – Desgaste de entalhe	30
Figura 11 – Desgaste de cratera.....	30
Figura 12 – Trincas.....	31
Figura 13 – Lascamentos	31
Figura 14 – Quebras	32
Figura 15 – Desgastes e avarias nas ferramentas de metal duro por torneamento	34
Figura 16 – Medição de desgastes nas ferramentas de corte	36
Figura 17 – Curva do comportamento de desgaste da ferramenta	37
Figura 18 – Fontes de geração de calor do cavaco	37
Figura 19 – Micrografia do aço SAE 5160 esferoidizado atacado com Nital a 2%	40
Figura 20 – Corpo-de-prova utilizado nos ensaios	41
Figura 21 – Torno Mazak Integrex 200 IV	41
Figura 22 – Dimensões, ângulos e geometria do suporte de ferramentas	42
Figura 23 – Estereoscópio de captação de imagens e medição dos desgastes	43
Figura 24 – Desgastes da classe GC4215	48
Figura 25 – Desgastes da classe GC4225	50
Figura 26 – Desgastes da classe GC4235	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química principal do aço SAE 5160.	20
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço SAE 5160.....	21
Tabela 3 – Principais tipos de desgastes, causas e ações para correção.....	33
Tabela 4 – Composição química do aço SAE 5160 conforme certificado do fornecedor.....	40
Tabela 5 – Dureza da amostra do aço SAE 5160 esferoidizado.....	40
Tabela 6 – Descrição das ferramentas	42
Tabela 7 – Descrição dos parâmetros de corte utilizados.....	44
Tabela 8 – Identificação dos gumes utilizados nos ensaios.....	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Vida das ferramentas entre as diferentes classes	45
Gráfico 2 – Evolução do desgaste de flanco para as diferentes classes	46
Gráfico 3 – Evolução do desgaste de flanco da ferramenta classe GC4215	48
Gráfico 4 – Evolução do desgaste de flanco da ferramenta classe GC4225	50
Gráfico 5 – Evolução do desgaste de flanco da ferramenta classe GC4235	52
Gráfico 6 – Volume de material usinado para as diferentes classes.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SAE 5160	Classificação do aço 5160 conforme norma SAE
C	Carbono
Si	Silício
Mn	Manganês
P	Fósforo
S	Enxofre
Cr	Cromo
Ni	Níquel
ASM	<i>American Society for Metals</i>
Mo	Molibdênio
IU	Índice de Usinabilidade
Fe ₃ C	Cementita ou Carboneto de Ferro
CERMETS	Ferramenta constituída de material cerâmico e metálico
CBN	<i>Cubic Boron Nitride</i>
PCD	<i>Polycrystalline Diamond Compact</i>
WC	Carboneto de Tungstênio
TiC	Carboneto de Titânio
TaC	Carboneto de Tântalo
NbC	Carboneto de Nióbio
Fe	Ferro
Co	Cobalto
TiN	Nitreto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiAlN	Nitreto de Titânio-Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
Al	Alumínio
Cu	Cobre
Ti	Titânio
SAE 4140	Classificação do aço 4140 conforme norma SAE

SAE 4340	Classificação do aço 4340 conforme norma SAE
PCBN	<i>Polycrystalline Cubic Boron Nitride</i>
AISI 4340	Classificação do aço 4340 conforme norma AISI
pH	potencial Hidrogeniônico
MD	Metal Duro
MQF	Mínima Quantidade de Fluido Refrigerante
MQL	Mínima Quantidade de Fluido Lubrificante
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
AISI H13	Classificação do aço H13 conforme norma AISI
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
O ₂	Oxigênio

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão máxima de ruptura (Mpa)
σ_e	Tensão de escoamento (Mpa)
\varnothing	Diâmetro (mm)
ε	Deformação específica (%)
HB	Unidade de dureza na escala Brinell
HRc	Unidade de dureza Rockwell em escala C
HV	Unidade de dureza na escala Vickers
T	Tempo de vida da ferramenta de corte (min)
VB_B	Desgaste de flanco médio (mm)
$\text{VB}_{B\text{máx}}$	Desgaste de flanco máximo (mm)
KT	Profundidade da cratera (mm)
KF	Distância frontal entre cratera e flanco (mm)
V_c	Velocidade de corte (m/min)
f	Avanço (mm/rev)
a_p	Profundidade de corte (mm)
Kr	Ângulo de posição da ferramenta ($^{\circ}$)
Pr	Ângulo de ataque da ferramenta ($^{\circ}$)
α_o	Ângulo de saída ($^{\circ}$)
γ_o	Ângulo de folga ($^{\circ}$)
Q	Taxa de remoção de material (cm^3/min)
V	Volume de material usinado (cm^3)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2	JUSTIFICATIVA DO ESTÁGIO	18
1.3	OBJETIVOS	18
1.4	PERFIL DA EMPRESA E AMBIENTE DO ESTÁGIO	18
1.5	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	AÇO SAE 5160	20
2.1.1	Características	20
2.1.2	Aplicações.....	21
2.2	USINABILIDADE DO AÇO SAE 5160	22
2.2.1	Ferramentas de corte	24
2.2.1.1	Metal duro	25
2.2.1.2	Metal duro revestido.....	26
2.2.2	Desgastes em ferramentas.....	28
2.2.2.1	Desgastes em ferramentas de metal duro no aço SAE 5160	34
2.2.2.2	Critérios de vida da ferramenta ao desgaste	35
2.2.3	Fluido lubrificador	37
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	39
3.1	ANÁLISE DA PROBLEMÁTICA DE OPERAÇÃO NA EMPRESA	39
3.2	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	40
3.2.1	Material ensaiado	40
3.2.2	Máquina-ferramenta	41
3.2.3	Ferramentas	42
3.2.4	Fluido lubrificador	43
3.2.5	Microscópio óptico	43
3.3	PARÂMETROS DE CORTE.....	43
3.4	METODOLOGIA IMPLEMENTADA	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	AVALIAÇÃO DAS DIFERENTES CLASSES DE FERRAMENTAS	45
4.1.1	Vida das ferramentas	45

4.1.2	Avaliação de desgastes	46
4.1.2.1	Classe GC4215	46
4.1.2.2	Classe GC4225	48
4.1.2.3	Classe GC4235	50
4.1.3	Volume de material usinado.....	52
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	54
	REFERÊNCIAS.....	55
	ANEXO A – EVOLUÇÃO DO DESGASTE DA CLASSE GC4215	59
	ANEXO B – EVOLUÇÃO DO DESGASTE DA CLASSE GC4225	60
	ANEXO C – EVOLUÇÃO DO DESGASTE DA CLASSE GC4235	61
	ANEXO D – TABELA DE DADOS DA CLASSE GC 4215.....	62
	ANEXO E – TABELA DE DADOS DA CLASSE GC 4225.....	63
	ANEXO F – TABELA DE DADOS DA CLASSE GC 4235	64
	ANEXO G – CERTIFICADO DO FORNECEDOR DO MATERIAL.....	65

1 INTRODUÇÃO

Conforme Trent e Right (2000), a usinagem é o processo de fabricação mais utilizado na indústria metalmeccânica, com custos superiores a 15% do valor de todos os produtos manufaturados entre os países industrializados.

Na usinagem, as ferramentas estão sujeitas as solicitações mecânicas e térmicas, ao atrito com o cavaco e com a superfície da peça. Esses fatores provocam o desgaste da ferramenta e diminuem a sua vida útil (KALPAKJIAN e SCHMID, 2001).

Na usinabilidade de um material, a vida da ferramenta de corte, é normalmente o critério de maior importância. A vida da ferramenta é o tempo que essa resiste do início ao fim do corte, está relacionada ao critério de fim de vida e ao desgaste. Os desgastes em ferramentas de corte significam custos adicionais e perda de produtividade, pois quando há fim de vida de uma ferramenta é necessária à parada no processo para troca da ferramenta ocasionando tempo improdutivo da mesma (ZEILMANN et al, 2007).

Por estas razões, apresenta-se uma proposta de avaliação dos mecanismos e dos tipos de desgaste que ocorrem em ferramentas de metal duro no processo de torneamento do aço SAE 5160. Este tipo de estudo permite conhecer o comportamento dos desgastes para determinados materiais e desta maneira controlar os seus efeitos sobre a peça usinada.

O trabalho proposto será realizado no período de março a dezembro de 2014, na empresa SK Schunck Projetos e Equipamentos Ltda.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A crescente concorrência no mercado de peças de reposição, manutenção e equipamentos, afetam diretamente os processos de usinagem. Para que as empresas destes setores possam continuar competitivas e até mesmo sobreviverem, torna-se fundamental controlar os custos inerentes ao processo de fabricação, entre eles, as ferramentas de corte.

Atualmente, os grandes avanços em termos de tecnologia das máquinas de usinagem e ferramentas têm proporcionado usinagens cada vez mais complexas, permitindo velocidades de corte e avanços cada vez maiores. No entanto, desgastes prematuros, quebras acidentais, colisões e qualidade superficial ruim podem interromper o fluxo de produção, acarretando em perdas de tempo e refugo de peças. Por esta razão, ao mesmo tempo em que se busca extrair o máximo de desempenho das máquinas e ferramentas, por outro lado, busca-se minimizar os

custos de operação dessas. Saber em que etapas do processo aplicar uma ferramenta de corte adequada, são indispensáveis para manter o controle dos custos de fabricação.

Segundo Favaretto, Valle e Canciglieri (2009), ainda existem pouca preocupação das empresas sobre o comportamento das ferramentas no desenvolvimento de novos produtos. E o mais interessante, é que há a participação direta dos fornecedores na seleção dessas ferramentas para o processo. Sendo assim, é importante que se fortaleça a parceria com os fornecedores para que haja uma cooperação mútua no sentido de buscar soluções e reduzir os custos.

Os autores também enfatizam, que a falta de critérios embasados em metodologias científicas para determinar a vida útil das ferramentas é um problema muito frequente dentro das fábricas. Na grande maioria das empresas o critério da vida útil da ferramenta é feito através da experiência do operador quando detecta ruídos, vibrações, faíscas, marcas e desgastes. Por esses motivos, é muito importante que os técnicos e usuários que trabalham com ferramentas, sejam capacitados para manuseá-las de forma correta, sabendo avaliar as condições de desgastes através de uma metodologia e com a vantagem de não ficar na adivinhação e às vezes até mesmo nas informações incorretas do fornecedor de ferramentas. Prevenindo assim, a ocorrência de quebras prematuras, evitando refugos, tempo de máquina parada, retrabalhos, manutenção, entre outros.

Além disso, é importante que os desenhos técnicos e planos de trabalhos com as especificações corretas das ferramentas forneçam os parâmetros necessários para a execução do produto. Conforme Stemmer (2006), os dados obtidos através de avaliações de desgastes em ferramentas enfocam principalmente para redução de custos, aumento da produtividade e melhora da qualidade.

Nesse contexto, observa-se a importância de avaliar os desgastes nas ferramentas através de métodos científicos, pois proporciona aos analistas de processos, conhecer o comportamento dos desgastes para determinados materiais e desta maneira controlar os seus efeitos sobre a peça usinada através da escolha adequada da ferramenta.

Trabalhos de pesquisas realizados tanto nas universidades, quanto nas indústrias, apontam por parte dos autores, uma maior preocupação quanto à durabilidade das ferramentas, geometrias específicas para cada tipo de trabalho, características de usinabilidade do material, correta seleção da máquina-ferramenta e parâmetros de usinagem adequados. Estes estudos e metodologias, certamente proporcionam às empresas, o aumento da competitividade, condições de atenderem a demanda de mercado e projetar seus produtos com custos mais baixos.

1.2 JUSTIFICATIVA DO ESTÁGIO

Este estudo foi motivado pela busca constante na redução de custos com ferramental utilizado nas máquinas de usinagem da empresa. Hoje em dia, cada vez mais as empresas procuram por ferramentas mais eficientes e adequadas para os seus processos, visando minimizar os desgastes e melhorar o rendimento dessas. Em conjunto com os profissionais e técnicos do setor de usinagem, verificou-se que o aço SAE 5160 no estado recozido e normalizado apresentava baixa usinabilidade devido a desgastes excessivos nas ferramentas de corte no processo de torneamento realizado na empresa SK Schunck Projetos e Equipamentos Ltda.

Por essas razões, uma avaliação criteriosa de desgastes em ferramentas baseada em um método científico torna-se muito importante, pois possibilita para a empresa, conhecer o comportamento dos desgastes das ferramentas em determinados materiais, controlar seus efeitos e fazer a escolha adequada da ferramenta a fim de evitar os desperdícios ligados ao processo.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral é realizar a avaliação do comportamento de desgaste em ferramentas de metal duro revestido na usinagem por torneamento do aço SAE 5160 esferoidizado.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Realizar uma revisão bibliográfica do aço SAE 5160, sua usinabilidade e o comportamento dos desgastes das ferramentas de metal duro no processo de torneamento deste aço;
- b) Descrição das condições atuais do processo de torneamento do aço SAE 5160;
- c) Descrição da proposta, planejamento e o procedimento experimental;
- d) Implementar o procedimento experimental;
- e) Avaliar os resultados obtidos na implementação realizada.

1.4 PERFIL DA EMPRESA E AMBIENTE DO ESTÁGIO

A empresa SK Schunck Projetos e Equipamentos Ltda foi fundada em 24 de Junho de 1987 e está localizada na cidade de Caxias do Sul/RS. Atualmente, a empresa conta com a colaboração de 12 funcionários, e está inserida no mercado de peças de reposição, cilindros hidráulicos, projetos, equipamentos e empilhadeiras. Devido aos investimentos e a grande quantidade de peças de reposição fabricadas, o setor de usinagem passou a ser essencial, pois além de proporcionar à empresa a abertura de novas oportunidades influi também nos resultados da empresa. Na Figura 1 são demonstradas algumas peças de reposição desenvolvidas pela empresa.

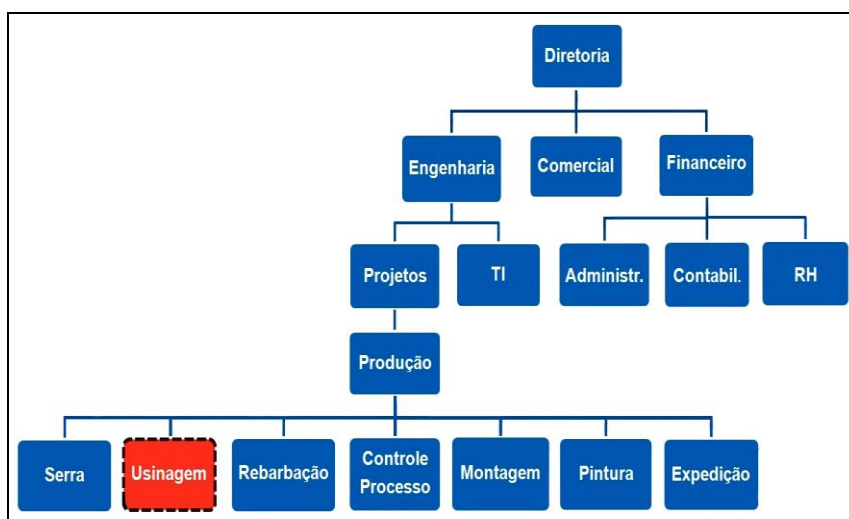
Figura 1 – Peças de Reposição SK Schunck.



Fonte: SK Schunck Projetos e Equipamentos Ltda (2014).

O presente trabalho será realizado no setor de usinagem. Este setor conta com a participação de três operadores capacitados e qualificados. Ao mesmo tempo terá auxílio dos responsáveis pela área de desenvolvimento de produtos e processos, com conhecimentos específicos de projeto e usinagem, de maneira a contribuir com dados e informações técnicas. A Figura 2 ilustra a estrutura organizacional da empresa, destacando o setor envolvido na atuação do estágio.

Figura 2 – Organograma simplificado demonstrando o setor de atuação do estágio.



Fonte: SK Schunck Projetos e Equipamentos Ltda (2014).

1.5 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

A proposta de trabalho limita-se a avaliar os mecanismos e os tipos de desgastes que ocorrem em ferramentas de metal duro revestido na usinagem por torneamento do aço SAE 5160 esferoidizado, identificando aquela que apresenta maior vida e menores desgastes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇO SAE 5160

2.1.1 Características

Segundo Callister (2002), os aços de médio teor de carbono apresentam na sua composição, concentrações que variam de 0,25% a 0,60% de carbono. A adição de elementos como o cromo, níquel e molibdênio melhoram sua capacidade de serem tratados termicamente, dando origem a uma excelente combinação de resistência mecânica, resistência à abrasão, ductilidade e tenacidade.

Com relação ao aço SAE 5160 especificamente, ele é classificado como um aço de médio teor de carbono e baixa liga, tendo o cromo como elemento ligante principal. É comumente conhecido no mercado como aço mola. A sua composição química pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química principal do aço SAE 5160.

Composição Química (%)								
<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>Outros</i>
0,56-0,64	0,15-0,35	0,75-1,00	0,03 máx.	0,04 máx.	0,70-0,90	-	-	-

Fonte: Gerdau (2014).

Conforme informações do ASM Handbook (1991), a adição do cromo (Cr) no aço SAE 5160 tem por finalidade, aumentar a resistência à corrosão e a oxidação, aumentar a capacidade de endurecimento, melhorar a resistência à alta temperatura, ou para melhorar a resistência à abrasão em composições de alto carbono. No entanto, há um inconveniente, o cromo é um forte formador de carbonetos, dificultando a usinagem. O cromo pode ser usado como um elemento de endurecimento, e é frequentemente utilizado com o níquel, produzindo aumento nas propriedades mecânicas. Em temperaturas elevadas, o cromo contribui para uma maior resistência e é normalmente utilizado para aplicações desta natureza em conjunto com molibdênio.

Segundo Zepter (2007), dentre as principais características deste aço, está o elevado limite de elasticidade, podendo recuperar sua forma ou posição inicial com facilidade, após sofrer deformação. Possui grande resistência à fadiga, devido aos componentes fabricados com este material estarem sujeitos a esforços repetidos e alternados. Possui ainda, alta temperabilidade, permitindo boa penetração em perfis bastante espessos. Também apresentam alta resistência mecânica e tenacidade. As propriedades mecânicas do aço laminado SAE 5160 normalizado, recozido e esferoidizado podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço SAE 5160.

<i>Aço</i>	<i>Condição</i>	<i>Temp. Austenit.</i> <i>[°C]</i>	<i>$\sigma_{máx}$</i> <i>[MPa]</i>	<i>σ_e</i> <i>[MPa]</i>	<i>Estric.</i> <i>ϕ [%]</i>	<i>Defor.</i> <i>ϵ [%]</i>	<i>Dur.</i> <i>[HB]</i>	<i>Impacto</i> <i>[J]</i>
SAE 5160	Normalizado	860	960	530	45	17,5	269	11
	Recozido	815	725	275	31	17,2	197	10
	Esferoidizado	723	561	383	68	31,3	178	3

Fonte: Gerdau (2014) e Aços Roman (2014).

2.1.2 Aplicações

Este tipo de aço conforme Chiaverini (2002), é utilizado principalmente na fabricação de molas planas e helicoidais, devido às condições severas as quais são submetidas, quer seja pela carga, tipos de esforços, vibrações, altas temperaturas, meios corrosivos, etc. Para aplicações industriais em geral e para maquinário usado em movimento terrestre, o aço SAE 5160 é o mais utilizado devido ao seu custo benefício e por ser tão eficiente quanto os aços de composições mais nobres como o das classes 86XX, 92XX e 61XX. Na Figura 3, aparece à ilustração de pinos trava e molas helicoidais fabricados em aço mola SAE 5160 utilizados na indústria automotiva.

Figura 3 – Pinos travas e molas helicoidais utilizados nos tratores Massey Ferguson.



Fonte: A. Camargo (2014).

Entre outras aplicações, podemos citar a fabricação de utensílios de corte como lâminas, facas, espadas, machados, punhais e navalhas. Na indústria automobilística além de molas, são usados na fabricação de barras estabilizadoras para suspensões de veículos, eixos, pinos e fixadores.

Nas indústrias metalmecânicas de manufatura são usados na fabricação de suporte para ferramentas de diversos tipos de máquinas e outras aplicações específicas. Na Figura 4 são mostradas pinças fabricadas em aço mola temperadas.

Figura 4 – Pinças utilizadas em operações de fresamento, furação e rosqueamento.



Fonte: WorldTools (2014).

2.2 USINABILIDADE DO AÇO SAE 5160

Há um consenso entre vários autores de que a usinabilidade é um termo bastante amplo e difícil de ser mensurado. No entanto, de uma forma mais generalizada pode-se atribuir ao termo usinabilidade, todas as propriedades de um material que têm influência sobre o processo de usinagem descrevendo as dificuldades que um material apresenta ao ser usinado. A usinabilidade depende do estado metalúrgico da peça, das propriedades mecânicas do material (dureza e tenacidade), da microestrutura (teor de carbono, elementos de liga e tratamentos térmicos), da composição química e das operações efetuadas anteriormente sobre o material. Além disso, ela depende também das condições de usinagem, das características da ferramenta, das condições de refrigeração, da rigidez da máquina, dispositivo de fixação e dos tipos de usinagem executados pela ferramenta (corte contínuo ou interrompido). Pelo fato de ser uma grandeza tecnológica implica também em condições econômicas, principalmente no custo de fabricação por peça (KÖNIG e KLOCKE, 2002 e DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008).

Segundo Stemmer (2006), há vários critérios para se avaliar o índice de usinabilidade de um material dependendo da escolha do experimentador ou das exigências específicas do trabalho que está sendo realizado. Os critérios fundamentais, utilizados isoladamente ou em conjunto, são:

- Vida da Ferramenta;
- Força de Usinagem;
- Qualidade Superficial da Peça;
- Formação do Cavaco.

O aço SAE 5160 se caracteriza por apresentar uma usinabilidade baixa mesmo no estado recozido onde a dureza é baixa. Conforme Stemmer (2006), o seu IU (índice de usinabilidade) é de baixo para médio, variando de 45 a 50%.

Para König e Klocke (2002), aços de médio teor de carbono como o SAE 5160 possui boa usinabilidade somente em relação aos critérios de qualidade superficial e formação do cavaco.

Peruch (2009) afirma que a usinagem é dificultada devido a sua microestrutura perlítica lamelar. As partículas de cementita lamelar (Fe_3C) presentes na perlita possuem uma área de superfície por unidade de volume de partícula muito grande e por consequência elevada energia interfacial. Essa dificuldade tende a aumentar ainda mais com o endurecimento, acarretando em desgastes mais acentuados da ferramenta de corte no estado normalizado e quando temperado.

Segundo Thelning (1984) e Krauss (1991), uma alternativa para minimizar os efeitos desta microestrutura é o recozimento por esferoidização, onde partículas de cementita lamelares (Fe_3C) muito grandes são quebradas em partículas menores, assumindo a forma de cementita esferoidal (Fe_3C), melhorando significamente a usinabilidade do aço SAE 5160 e deixando a microestrutura apta para receber tratamentos térmicos posteriores.

No tratamento térmico por esferoidização, obtêm-se dureza menor que no estado recozido, mas com a vantagem de proporcionar um aumento da usinabilidade e na vida da ferramenta na ordem de 93,4% em relação à microestrutura recozida.

2.2.1 Ferramentas de corte

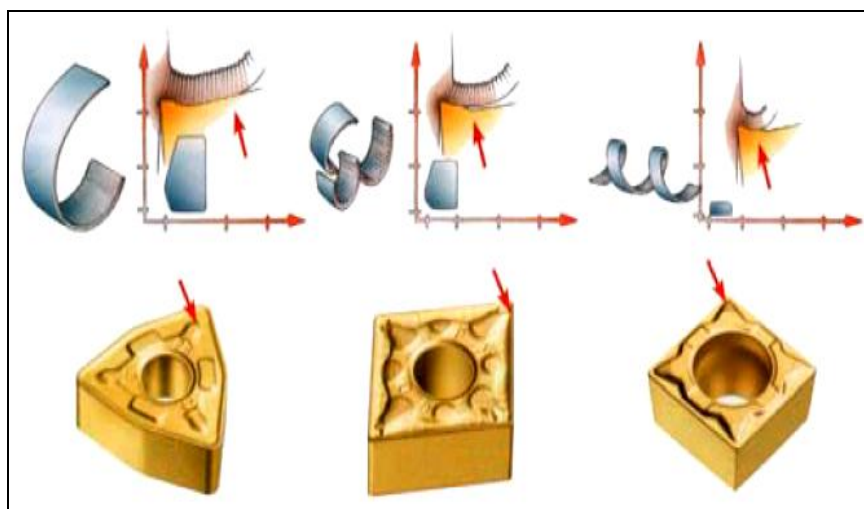
Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), os requisitos fundamentais para qualquer ferramenta de corte devem incluir: elevada dureza a quente, alta tenacidade (resistência ao impacto), boa resistência ao desgaste e ao choque térmico, estabilidade química em altas temperaturas e facilidade de escoamento do cavaco.

No entanto, é importante salientar, que essas propriedades podem ter maior ou menor importância em função de outros fatores como: operações de usinagem, material a ser usinado e parâmetros de corte utilizados.

Entre as ferramentas de corte mais utilizadas na usinagem de metais, pode-se citar em ordem crescente de dureza a quente os seguintes materiais: o aço-rápido (com e sem revestimento), o metal duro (com e sem revestimento), CERMETS (com e sem revestimento), cerâmicas (com e sem revestimento), CBN e PCD.

Um fator importante na escolha da ferramenta para prevenir os desgastes é a sua geometria. Pastilhas modernas atuais possuem uma combinação de ângulos, planos e raios para facilitar a formação do cavaco. É importante que a superfície de saída da ferramenta seja adequada, pois é nesta região que fluem os cavacos. Superfícies de baixa qualidade podem gerar prejuízos durante o corte como: desgastes e baixa qualidade superficial. A grande maioria das pastilhas têm ângulos positivos de saída em combinação com a inclinação negativa do porta-ferramentas para facilitar a formação do cavaco e a ação do corte. Pastilhas com ângulos negativos são mais utilizados para reforçar o gume de corte (ESPANHOL, 2008). Na Figura 5 conforme comentado acima, pode-se observar as diferentes combinações de geometrias, ângulos e raios para as ferramentas de corte.

Figura 5 – Pastilhas com diferentes geometrias e quebra-cavacos.



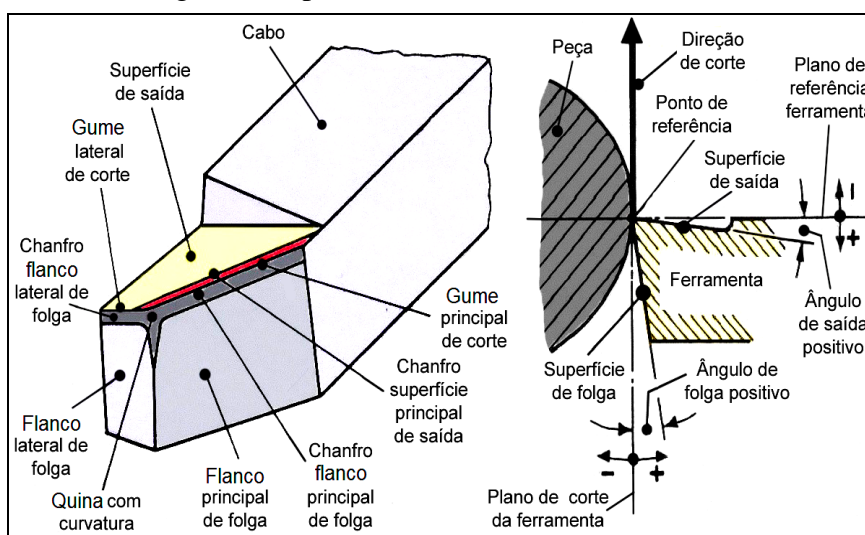
Fonte: Sandvik Coromant (2014).

Segundo Espanhol (2008), o raio de ponta deve ser suficientemente grande para diminuir as marcas do avanço, melhorando assim o acabamento superficial. No entanto, raios muito grandes podem gerar vibrações no processo. Já o ângulo de folga deve ser adequado para prevenir o atrito entre a ferramenta e a superfície usinada.

Para Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012), a geometria da ferramenta pode melhorar a usinagem. Raios de ponta grandes, gumes chanfrados e ângulo de inclinação negativo ajudam a aumentar as forças de corte axiais (avanço). Por outro lado, ângulos diferentes mesmo com raios de ponta pequenos podem melhorar o acabamento superficial desde que haja controle das vibrações da ferramenta.

Biermann et al (2011) explicam que raios muito grandes nos gumes de corte apesar de terem estabilidade maior ocasionam desgastes mais rápidos em comparação com raios menores pelo fato de gerarem maiores cargas térmicas. Além disso, a estrutura do gume e a sua qualidade tem grande influência no surgimento de quebras e falhas prematuras. Esses aspectos podem ser melhores visualizados na Figura 6.

Figura 6 – Gumes, ângulos e superfícies de corte de uma ferramenta de torneamento.



Fonte: Adaptado de Ferraresi (2003).

2.2.1.1 Metal duro

Sabe-se atualmente, que as ferramentas de metal duro dominam o mercado devido à combinação de dureza a temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, as quais são obtidas pela variação da sua composição química.

As ferramentas de metal duro são obtidas através da metalurgia do pó (processo de sinterização), onde partículas finas e endurecidas de carbonetos de metais refratários como: WC, TiC, TaC e NbC são sinterizadas com um ou mais metais de efeito aglomerante, como o Fe, Ni ou Co, formando um corpo de alta dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008).

2.2.1.2 Metal duro revestido

Conforme Machado et al (2009), o uso de ferramentas de MD com revestimento abrange cerca de 90% do total de ferramentas de MD produzidas nas indústrias. Esse número é resultado dos avanços tecnológicos e o domínio cada vez maior das técnicas de revestimento, proporcionando custos mais atrativos que outros materiais como o CBN e ferramentas cerâmicas.

Hoje em dia existe a possibilidade de se revestir a superfície do metal duro com finas camadas onde cada uma delas exerce uma função específica a fim de conter os diferentes tipos de desgaste no processo de usinagem. Os principais revestimentos são o TiC, TiN, TiCN, Al_2O_3 e TiAlN. Estes revestimentos podem ser realizados tanto pelo processo de deposição química a vapor (CVD), quanto pelo processo de deposição física a vapor (PVD). O processo PVD garante a mesma tenacidade do substrato, sendo que isto não acontece no processo CVD. Um dos benefícios dos multirrevestimentos é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça, fazendo com que o núcleo permaneça com a tenacidade característica do metal duro mais simples (WC + Co), além da possibilidade de uma única pastilha de uma determinada classe ser usada tanto para o acabamento quanto para o desbaste. Outro benefício é o fato de proporcionar maior durabilidade ao fio de corte quando a ferramenta é submetida a altas forças e velocidades (MARCONDES, 2008).

Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2008), existem pastilhas com uma única camada, duas e até três camadas de cobertura. Geralmente a primeira camada, logo acima do substrato é o TiC ou o TiCN, que algumas vezes é a única camada de revestimento. As pastilhas com duas camadas de revestimento têm, em geral, uma camada de Al_2O_3 ou de TiN por cima da camada de TiC ou TiCN. Já as pastilhas com três camadas têm em geral, uma camada de TiN recobrendo uma camada intermediária de Al_2O_3 que por sua vez, recobre uma camada de TiC ou TiCN que está por cima do núcleo de metal duro (substrato). Abaixo são explicadas as características de cada camada de revestimento:

- TiC: possui excelente resistência ao desgaste por abrasão, além de funcionar como elemento que promove a adesão das camadas de cobertura com o metal duro do núcleo, já que o Al_2O_3 (camada que está por cima do TiC) não possui afinidade físico-química com o metal duro a fim de conseguir uma forte adesão com o núcleo. A dureza da camada de TiC é da ordem de 3000HV, maior que a dureza de todos os outros materiais de cobertura. Possui baixa tendência a soldagem por adesão e a formação de gume posição de corte.

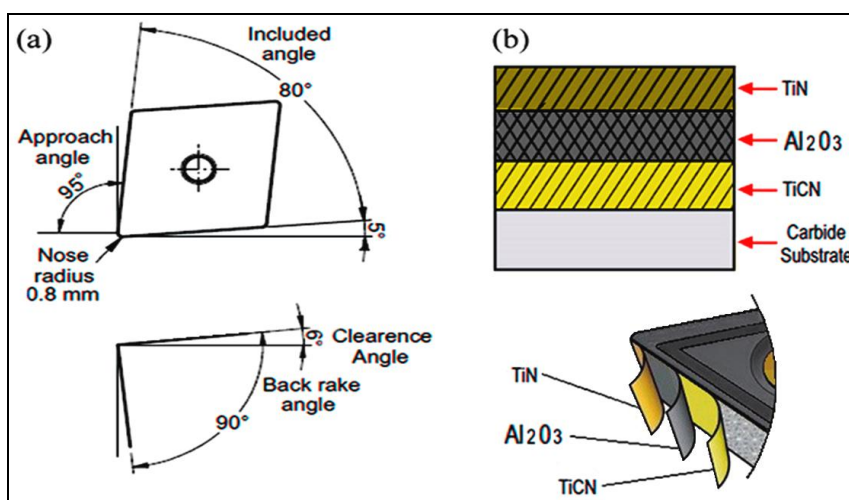
- TiN: indicado em casos em que peças de diferentes materiais são usinadas pela mesma ferramenta, proporciona baixos coeficientes de atrito entre cavaco e a ferramenta quando utilizado na usinagem de materiais ferrosos, com geração de cavacos curtos. É quimicamente estável com o ferro (Fe), tendo menor tendência a fenômenos de difusão. Já na usinagem de alumínio (Al) e cobre (Cu) ocorre o inverso, devido à alta afinidade química do titânio (Ti) com estes materiais, predominando a adesão e a difusão.
- TiCN: tem propriedades similares ao TiC a não ser pelo seu coeficiente de atrito, que é mais baixo. Tanto a camada de TiC quanto a de TiCN por conterem carbono (C), necessitam de uma barreira térmica para evitar o desgaste difusivo na usinagem. Por esta razão, muitas vezes, o Al_2O_3 é utilizado como cobertura sobre o TiC ou TiCN. Possuem a característica de não permitir a propagação de trincas em direção ao substrato, desenvolvendo-as ao longo de suas multicamadas.
- Al_2O_3 : garante estabilidade térmica em altas temperaturas por ser um material cerâmico refratário e por possuir alta resistência ao desgaste por abrasão, além de alta resistência a ataques químicos e à oxidação. É responsável pela baixa tendência ao desgaste por cratera nas ferramentas revestidas. Por outro lado apresenta baixa resistência a choques térmicos e mecânicos.
- TiAlN: maior resistência à oxidação, permitindo o uso de temperaturas mais altas quando esse material oxida, formando uma camada de Al_2O_3 que é inerte quimicamente e, por isso, muito resistente a difusão e à oxidação. Baixa condutividade térmica protegendo a resta de corte e aumentando a remoção de calor através do cavaco. Alta dureza a quente e a frio sendo cerca de 1,5 vez maior que as camadas de TiN, TiCN e TiC.

Segundo informações da Sandvik Coromant (2014) e Diniz, Marcondes e Coppini (2008), na usinagem de aços carbono de baixa liga como o aço SAE 5160 recozido ou esferoidizado onde se tem dureza baixa, o metal duro sem cobertura pode ser empregado em operações de desbastes com baixas velocidades de corte desde que o material da peça não ultrapasse 45HRc de dureza. Na usinagem de materiais endurecidos, o metal duro sem cobertura não cumpre um importante requisito que é a elevada dureza a quente, e não se recomenda quando a dureza da peça é maior que 45HRc. Sendo assim, uma alternativa seria o emprego do metal duro revestido.

Conforme Santana (2011), na usinagem por torneamento do aço laminado SAE 4140 recozido (médio carbono e baixa liga) e 197HB de dureza, o metal duro revestido com TiCN/Al₂O₃/TiN (CVD) apresenta menor desgaste e maior vida da ferramenta em comparação com a ferramenta de metal duro sem cobertura. Com isso, obteve-se uma economia de produção de 32% em um lote de apenas 100 peças. Sendo assim, conclui-se que a ferramenta de metal duro revestido obteve ganhos econômicos muito relevantes em relação à ferramenta de metal duro sem cobertura.

Para Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012) o benefício fundamental do revestimento com TiCN/Al₂O₃/TiN (CVD) no torneamento do aço AISI 4340 (médio carbono e baixa liga), é tirar proveito das maiores velocidades de corte e por consequência maior remoção de material durante a usinagem de materiais endurecidos. Entretanto, verifica-se pelo estudo de Santana (2011), que esta ferramenta também pode ser usada em materiais não endurecidos como os recozidos e esferoidizados com viabilidade econômica. Na Figura 7 é possível visualizar a geometria do inserto (a) e o revestimento de TiCN/Al₂O₃/TiN - CVD (b) utilizado nos ensaios de Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012).

Figura 7 – Geometria do inserto de metal duro e os revestimentos.



Fonte: Adaptado de Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012) e Sandvik Coromant (2014).

2.2.2 Desgastes em ferramentas

Segundo Almeida (2009), as falhas nas ferramentas de corte sejam elas tanto por desgaste ou por quebra, representam cerca de 20% da vida de uma ferramenta. Esses desgastes apresentados pelas ferramentas interferem diretamente na qualidade superficial, na precisão dimensional e consequentemente no custo final do produto.

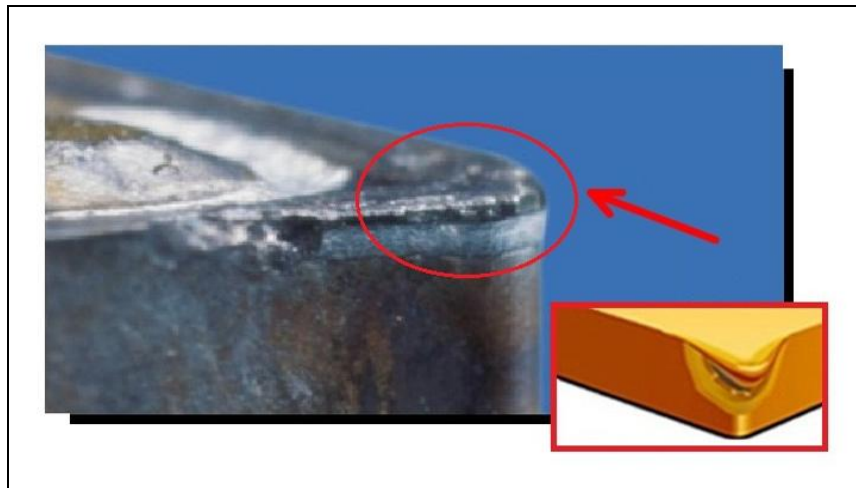
O desgaste é definido como a destruição de uma ou de ambas as superfícies que compõem um sistema tribológico (interação do atrito, desgaste e lubrificação), geralmente envolvendo perda progressiva de material (HUTCHINGS, 1992).

A quebra ou avaria torna-se uma consequência direta da evolução dos desgastes.

Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2008), os tipos de desgastes e avarias mais comuns nas ferramentas de corte são:

- Deformação plástica do gume de corte: estas avarias ocorrem devido às elevadas pressões e temperaturas geradas na ponta da ferramenta, são causadas por altas velocidades de corte e grandes avanços. Conforme se pode observar na Figura 8, essas deformações provocam deficiências no controle do cavaco e deterioração do acabamento superficial da peça (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008).

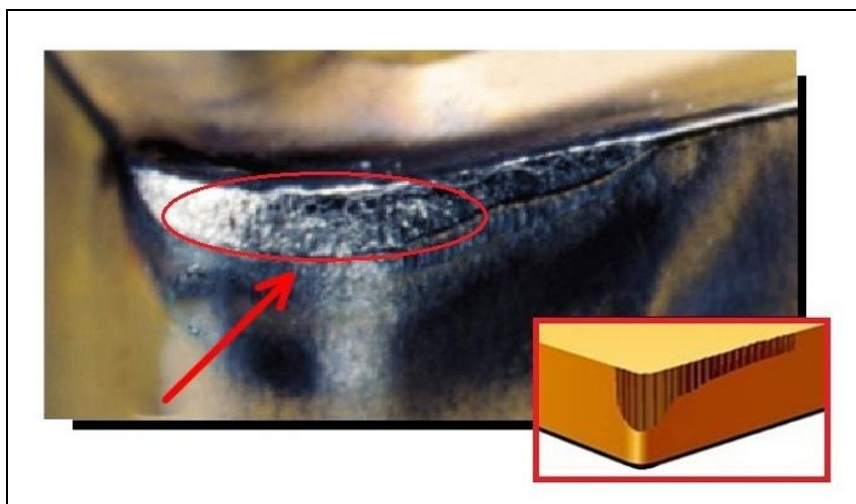
Figura 8 – Deformação plástica do gume de corte.



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2014).

- Desgaste de flanco: ocorre na superfície de folga e é causado pelo contato com a peça. É o desgaste mais comum em todos os processos de usinagem. Conforme Figura 9, a causa principal é pelo atrito (aderência com arrastamento) entre o flanco da ferramenta e a superfície da peça, além de tensões residuais, inclusões e alterações microestruturais. O aumento da velocidade de corte influencia este tipo de desgaste (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008).

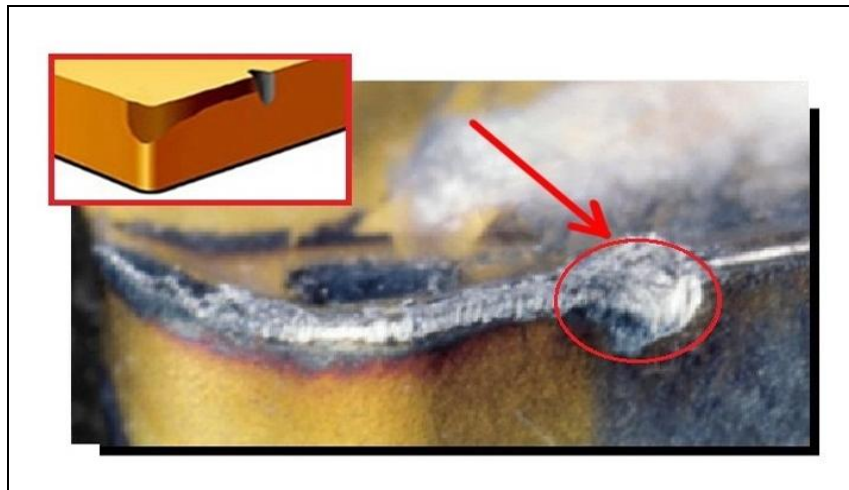
Figura 9 – Desgaste de flanco.



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2014).

- Desgaste de entalhe: este desgaste conforme Figura 10, ocorre sempre nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça. Muito provavelmente devido ao mecanismo de oxidação. Este tipo de desgaste é bastante prejudicial no acabamento superficial da peça e pode modificar totalmente a forma original do gume de corte (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008).

Figura 10 – Desgaste de entalhe.



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2014).

- Desgaste de cratera: conforme Figura 11, esse desgaste ocorre na superfície de saída da ferramenta e é causado pelo atrito com o cavaco devido à combinação dos mecanismos de difusão e adesão. Há uma correlação da condutividade térmica com o desgaste de cratera. Ferramentas com baixa condutividade térmica tendem a diminuir a largura quanto o comprimento da cratera, dissipando a maior parte do calor para o cavaco. O crescimento deste desgaste resulta na quebra da ferramenta quando este se encontra com o desgaste de flanco (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008 e AURICH, EYRISCH e ZIMERMANN, 2012).

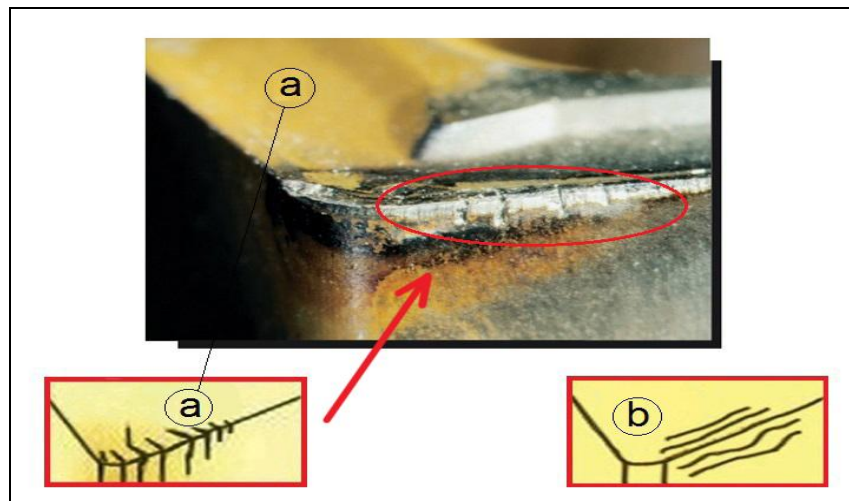
Figura 11 – Desgaste de cratera.



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2014).

- Trincas: são causadas pela variação excessiva de temperatura e esforço do gume de corte. Quando as trincas têm origem térmica, elas ocorrem perpendicularmente ao gume de corte conforme Figura 12a. Quando têm origem mecânica, é paralela ao gume de corte conforme Figura 12b. Entre os fatores responsáveis pela variação da temperatura e esforços mecânicos pode-se atribuir: o corte interrompido, ineficiência de fluido lubrificante, profundidade de corte e solda da pastilha no porta ferramentas (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008).

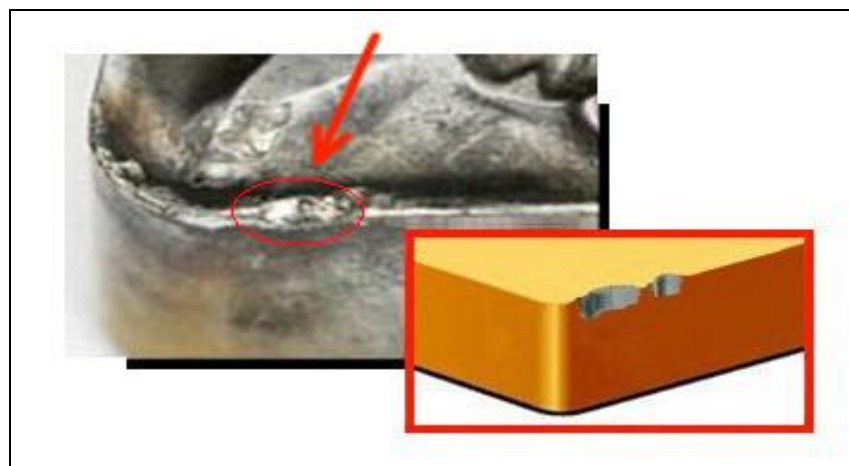
Figura 12 – Trincas.



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2014) e Diniz, Marcondes e Coppini (2008).

- Lascamento: esta avaria mostrada na Figura 13 ocorre devido aos choques entre a ferramenta e a peça, onde partículas relativamente grandes são retiradas de uma só vez. Acontece principalmente em ferramentas com material frágil ou quando o gume de corte é pouco reforçado. Prejudica o acabamento superficial da peça e pode levar a quebra da ferramenta. É mais comum de ocorrer no corte interrompido (FERRARESI, 2003 e DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008).

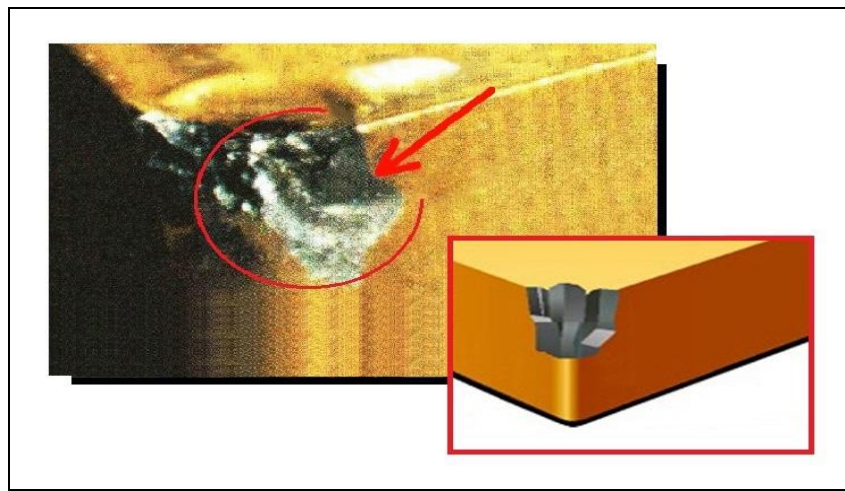
Figura 13 – Lascamentos.



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2014).

- Quebras: esta avaria conforme Figura 14, pode ocorrer inesperadamente devido a ferramenta muito dura, carga excessiva, raio e ângulos de ponta pequenos, corte interrompido e parada brusca no movimento de corte. Uma quebra de ferramenta não detectada, sem que haja interrupção na operação de usinagem, pode acarretar danos severos na máquina, peça e no porta-ferramentas (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008).

Figura 14 – Quebras.



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2014).

Para Stemmer (2006), esses desgastes que são muito comuns nas ferramentas de corte, são causados principalmente por alguns fenômenos. São eles:

- **Abrasão:** é considerada a principal causa de desgaste de uma ferramenta, tanto o desgaste de flanco quanto o desgaste de cratera. Ocorre devido ao arrancamento de partículas finas de material, decorrentes do escorregamento sob alta pressão e temperatura entre a peça e a ferramenta.
- **Aderência:** quando o material da peça entra em contato com a ferramenta sob baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, criando entre elas um extrato metálico que provoca um atrito tão elevado que, na tentativa de separar as superfícies, ocorre a ruptura em um dos metais. Dessa forma as partículas rompidas de um metal migram para a superfície do outro causando a formação de outro tipo de desgaste chamado gume postiço. O gume postiço é mais comum na usinagem de materiais pastosos, como aços com baixo teor de carbono, aços inoxidáveis e alumínio. A baixa velocidade de corte aumenta a formação de gume postiço.

- **Difusão:** consiste na transferência de átomos de um metal para o outro ativado pela alta temperatura na zona de corte. Essa transferência tem a ver com a afinidade físico-química dos metais envolvidos na zona de cisalhamento do cavaco com a ferramenta. Diferentes tipos de revestimento de metal duro, por exemplo, podem favorecer a adesão como dificultar este mecanismo de desgaste.
- **Oxidação:** a principal causa de oxidação são as elevadas temperaturas em contato com o ar e a água contida nos fluidos de corte. Ele é formado especialmente nas extremidades do cavaco com a ferramenta, tendo livre acesso do ar atmosférico, sendo este fator uma possível explicação para o desgaste de entalhe.

Na Tabela 3, são apresentadas as principais causas dos tipos de desgastes e avarias das ferramentas, e as ações a serem tomadas para corrigi-las.

Tabela 3 – Principais tipos de desgastes, causas e ações para correção.

Tipo de Desgaste e/ou Avaria	Possíveis Causas	Ações de Correção
Desgaste de Flanco	<ul style="list-style-type: none"> • Abrasão; • Gume postiço; • Velocidade de corte muito alta; • Velocidade de corte muito baixa se for por gume postiço. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução velocidade de corte; • Classe ferramenta mais resistente; • Aumento velocidade de corte se for por gume postiço.
Desgaste de Entalhe	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluido de corte com antioxidantes; • Redução velocidade de corte.
Desgaste de Cratera	<ul style="list-style-type: none"> • Difusão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Classe ferramenta que possua óxido de alumínio.
Deformação Plástica	<ul style="list-style-type: none"> • Altas temperaturas em combinação com altas pressões de corte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução velocidade de corte; • Classe ferramenta com maior dureza a quente.
Trincas (Mecânica)	<ul style="list-style-type: none"> • Variação excessiva de esforço no gume de corte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Classe ferramenta mais tenaz; • Redução do avanço; • Aumento Estabilidade.
Trincas (Térmica)	<ul style="list-style-type: none"> • Excessiva variação de temperatura; 	<ul style="list-style-type: none"> • Classe ferramenta mais tenaz; • Aplicar fluido de corte em abundância ou não aplicar.
Lascamento	<ul style="list-style-type: none"> • Classe da ferramenta muito frágil; • Geometria da ferramenta muito fraca; • Choques da ferramenta com a peça. 	<ul style="list-style-type: none"> • Classe ferramenta mais tenaz; • Aumento ângulo de ponta raio de ponta e/ou do ângulo de cunha (chanfro do gume).

Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2008).

2.2.2.1 Desgastes em ferramentas de metal duro no aço SAE 5160

Na usinagem por torneamento de aços de médio teor de carbono e baixa liga, na qual se inclui o SAE 5160 entre outros, se pode atribuir uma maior ocorrência para o desgaste de flanco e o desgaste por cratera. Segundo Marcondes (2008), a craterização é resultado da combinação dos esforços de corte aliada ao atrito e o mecanismo de abrasão proporcionado pelo escoamento do cavaco. Já o desgaste de flanco segundo Luo et al (2005), é causado pelo atrito e aderência entre a interface do flanco da ferramenta e a superfície da peça.

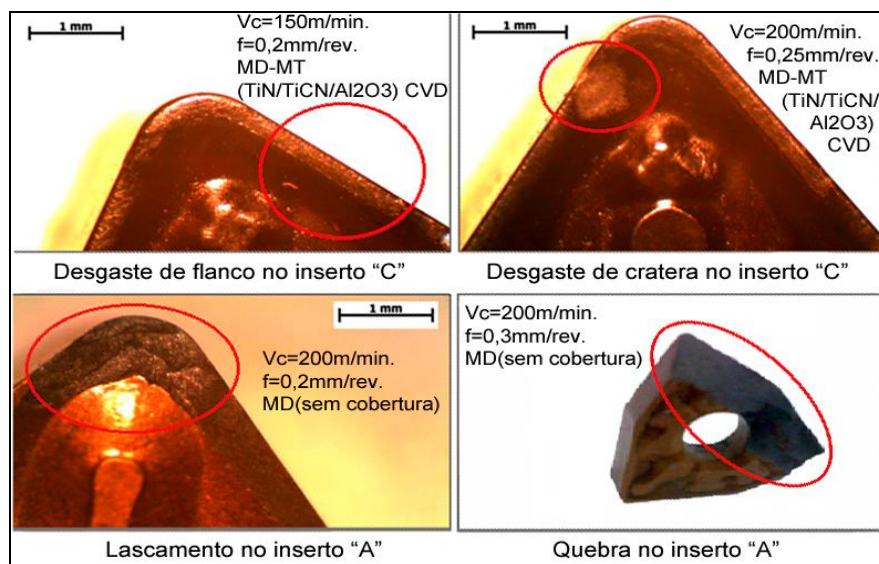
Podem-se constatar estes tipos de desgastes pelo estudo de Santana (2011), onde é avaliado o desgaste em ferramentas de metal duro no torneamento do aço SAE 4140 recozido (médio teor de carbono e baixa liga), cuja microestrutura é bastante similar a do aço SAE 5160 recozido e de baixa dureza.

Através de ensaios com três ferramentas de metal duro diferentes contactou-se nos ensaios de Santana (2011), que o inserto A (sem cobertura) apresentou desgastes de crateramento e desgastes de flanco em 55,5% dos gumes, quebras em 33,4% e lascamentos em 11,1%. Somando-se a porcentagem de quebras com a de lascamentos, obtêm-se um valor de 44,5% de avarias não desejadas.

O inserto B (sem cobertura), apresentou desgastes de crateramento e desgastes de flanco em 77,8% dos gumes, quebras em 11,1% e lascamentos em 11,1%.

O inserto C (com revestimento de TiCN/Al₂O₃/TiN - CVD), apresentou desgastes de crateramento e desgastes de flanco em 100% dos gumes, porém não apresentou avarias como quebras e lascamentos. É importante salientar, que nesses ensaios utilizou-se fluido lubrificante em emulsão solúvel em água da marca Sidorsol 501 com concentração entre 5% a 10% e pH de 9,0. Na Figura 15, visualizam-se alguns desgastes e avarias que ocorreram nos ensaios de Santana (2011).

Figura 15 – Desgastes e avarias nas ferramentas de metal duro por torneamento.



Fonte: Adaptado de Santana (2011).

Conforme Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012), no torneamento do aço AISI 4340 (médio carbono e baixa liga) constata-se que o desgaste de flanco é mais estável do que o desgaste de cratera. Segundo o autor, a formação da cratera é altamente influenciada por condições térmicas associadas ao desgaste químico. O aumento da velocidade de corte faz com que o desgaste progrida devido ao mecanismo de abrasão. Para todas as condições de corte testadas o principal mecanismo de desgaste foi o de abrasão. Constatou-se que com o aumento progressivo da velocidade de corte fez com que a camada de revestimento fosse removida em curto espaço de tempo, fazendo com que o substrato de metal duro fosse exposto. No entanto, segundo os autores, o efeito individual de cada mecanismo depende da composição do material da peça, da geometria da ferramenta e dos parâmetros de corte.

2.2.2.2 Critérios de vida da ferramenta ao desgaste

Segundo Amorin (2002), o fato das ferramentas de corte apresentar desgastes progressivos, torna-se indispensável definir até onde ela pode ser útil. Quando a ferramenta começa a perder suas características operacionais, deve-se reafiá-la ou substituí-la a fim de evitar danos causados por falhas catastróficas e gastos excessivos por operação inadequada da máquina.

Pode-se avaliar os desgastes das ferramentas através de métodos diretos e indiretos. Pelo método direto, mede-se a geometria da ferramenta através de dispositivos óticos como microscópio e lupas. Pelo método indireto, utilizam-se valores das variáveis do processo como, força de corte, temperatura, vibração, emissão acústica e a relação entre o desgaste da ferramenta e esses parâmetros (ALMEIDA, 2009).

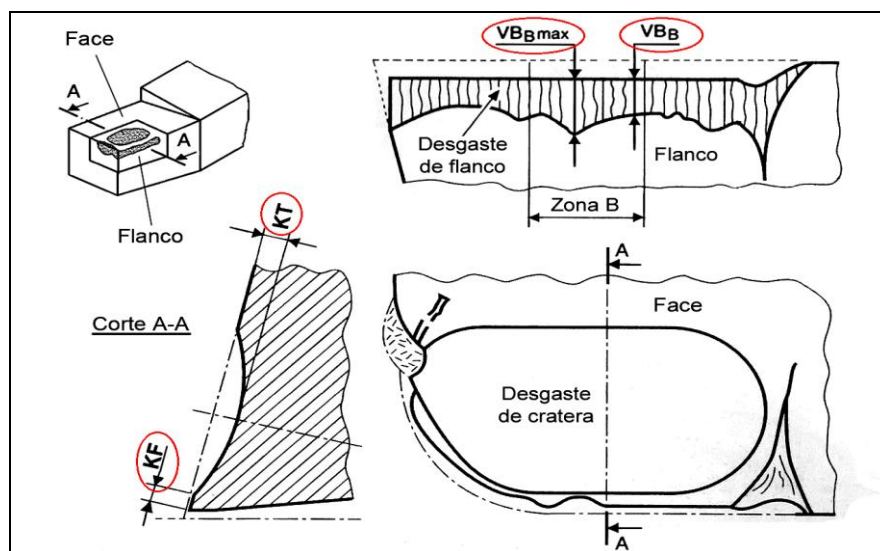
Para Amorin (2002), o método mais usual é dado pela norma ISO 3685 (1993) onde ela estabelece ensaios de usinabilidade para determinar o período de tempo no qual a ferramenta de corte pode trabalhar, até que seja necessária sua substituição. Este período é determinado através do tempo de trabalho necessário para que se desenvolva um defeito crítico. Representa-se pela letra T, o tempo de vida da ferramenta de corte.

Segundo a norma ISO 3685 (1993), os critérios que devem ser adotados para o tempo de vida das ferramentas de metal duro são:

- Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3\text{mm}$;
- Desgaste de flanco máximo, $VB_{B\text{máx}} = 0,6\text{mm}$, no caso do desgaste não ocorrer de forma regular ao longo do flanco;
- Profundidade da cratera, $KT = 0,06+0,3f$, (onde f representa o avanço);
- Distância frontal entre cratera e flanco, $KF = 0,02\text{mm}$;
- Falha catastrófica.

Para avaliar o tempo de vida da ferramenta, mede-se o desgaste de flanco e o de cratera. O desgaste de flanco é medido na superfície de folga da ferramenta, o desgaste de cratera é medido na superfície de saída. O critério de controle de vida de uma ferramenta de corte para torneamento, é quando o desgaste de flanco atinge um limite de $VB_B = 0,30$ mm ou $VB_{B\text{máx}} = 0,60$ mm. Ao se atingir qualquer um destes limites, à norma recomenda a reafiação ou substituição da ferramenta. Na Figura 16, é mostrado o local para medição desses desgastes.

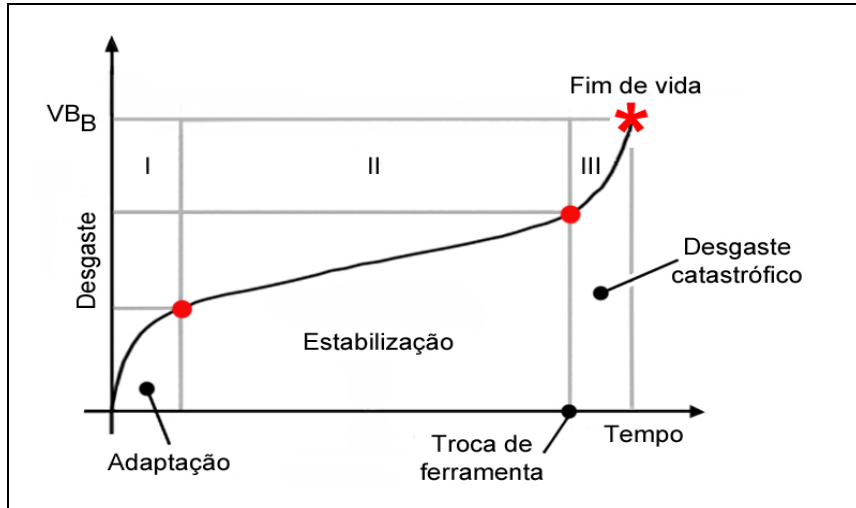
Figura 16 – Medição de desgastes nas ferramentas de corte.



Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2008) e norma ISO 3685 (1993).

Segundo Machado et al (2009), a evolução do desgaste da ferramenta até atingir o final de vida, segue na maioria das vezes, um padrão de comportamento. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 17, onde mostram-se três estágios claros no desenvolvimento do desgaste de uma ferramenta. No estágio I, a ferramenta apresenta um rápido crescimento do desgaste, resultado da adaptação da ferramenta no sistema. Ao final deste estágio, percebe-se uma inflexão da curva que mostra a diminuição da taxa de desgaste. No estágio II, nota-se que a evolução do desgaste cresce lentamente a uma taxa praticamente constante. Já no início do estágio III, surge uma nova inflexão na curva, indicando que a taxa de desgaste começa a aumentar. Neste estágio, a ferramenta atinge rapidamente o seu final de vida. Se a ferramenta não for reafiada ou substituída rapidamente, inevitavelmente ela irá falhar, pois a sua geometria está comprometida devido ao caráter progressivo de desgaste.

Figura 17 – Curva do comportamento de desgaste da ferramenta.

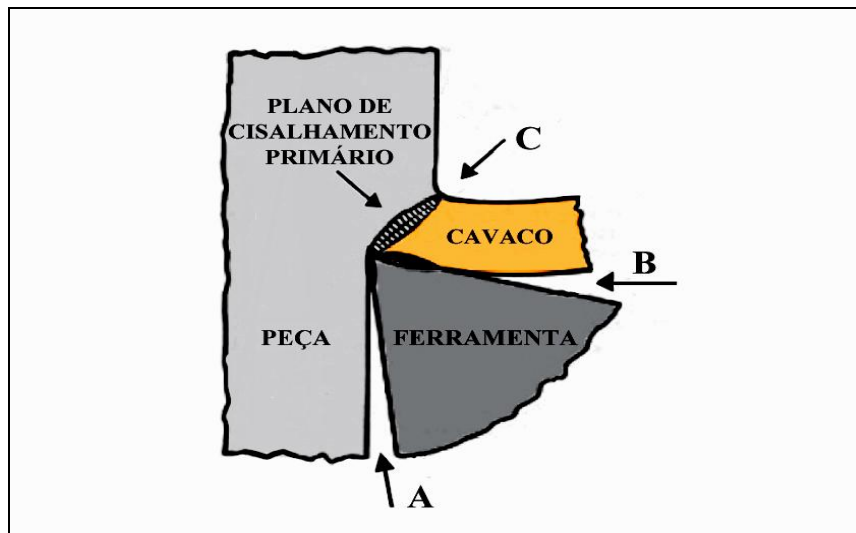


Fonte: Adaptado de Machado et al (2009).

2.2.3 Fluido lubrificante

Conforme Ferraresi (2003), a principal função do fluido lubrificante nos processos de usinagem, é a redução da temperatura na zona de corte, seja ela por lubrificação ou por refrigeração. Existem três fontes distintas de calor. Uma entre a ferramenta com a peça (A), a outra entre o cavaco com a ferramenta (B), e uma terceira no plano de cisalhamento do cavaco (C). A Figura 18 ilustra essas três fontes de calor na formação do cavaco. A diminuição do calor gerado nessas regiões diminui significativamente o desgaste da ferramenta. O fluido de corte pode auxiliar a expulsão do cavaco e proteger a peça contra a corrosão.

Figura 18 – Fontes de geração de calor do cavaco.



Fonte: Adaptado de Ferraresi (2003).

Nos últimos anos diversas pesquisas têm sido realizadas no sentido de introduzir sistemas de lubrificação mais eficientes e restringir ao máximo o uso desses fluidos, fazendo-se quando necessária à aplicação de mínima quantidade de fluido refrigerante (MQF) ou mínima quantidade de fluido lubrificante (MQL). Entre algumas razões que explicam esse procedimento, estão: custos operacionais do produto, questões ecológicas, questões legais ligadas a preservação do meio ambiente e a preservação da saúde humana (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008).

Segundo Novaski e Dörr (1999), os custos com fluidos lubrificantes indicam 17% contra 2 a 4% em ferramentas de corte.

Conforme Rieger, Strebinger e Bragoni (2010), para que sistemas mais eficientes como o MQF funcione de maneira eficiente, o bico refrigerante deve estar muito bem posicionado e direcionado na região de corte. Em caso onde a refrigeração é mais difícil, a alta pressão pode ser o modo mais adequado de atingir pontos de difícil alcance aumentando-se significativamente a vida da ferramenta.

Outra alternativa para o uso excessivo de fluido lubrificante, é o uso do nebulizador. Na usinagem, a região do cisalhamento dos cavacos é o local de maior aquecimento no processo de corte, podendo chegar a temperaturas muito elevadas em poucos segundos. Este alto aquecimento pode comprometer a resistência da ferramenta, causar desgaste precoce, e alterar as dimensões da peça usinada. Por isso, torna-se importante que este processo tenha uma refrigeração eficiente. O nebulizador trata-se de um equipamento pneumático que pulveriza gotículas de óleo diretamente nos pontos mais aquecidos da usinagem, a fim de proporcionar benefícios econômicos e se adequar as normas ambientais. Segundo o autor, este sistema proporciona tanta economia em relação ao processo de refrigeração convencional, que a amortização do investimento neste equipamento pode ser alcançada em apenas duas semanas de operação (RIEGER, STREBINGER e BRAGONI, 2010).

Sendo assim, a usinagem a seco torna-se uma meta a ser alcançada na fabricação. No entanto, ao se abrir mão dos fluidos de corte o efeito positivo que ele proporciona também se perde. A redução total ou parcial do refrigerante ocasiona elevação das temperaturas, aumento do atrito e como consequência para ferramenta, maior desgaste por abrasão e adesão (MARTINEZ e SARULS, 2002).

Ribeiro e Monqueiro (2013) estudaram a influência de MQF na usinagem por torneamento de uma liga de Ti-6Al-4V utilizando ferramentas de metal duro e cerâmica e posteriormente comparando com ensaios que utilizaram fluido de corte de modo convencional e abundante. Segundo os autores, pode-se constatar que a usinagem através do uso de MQF

apresentou desgaste de flanco máximo em um comprimento de 1233 metros, sendo praticamente o dobro do valor atingido pelo uso de refrigerante abundante. Além disso, constataram-se menores valores de rugosidade em cerca de 800 metros aproximadamente e melhor formação do cavaco.

Nos materiais de difícil usinagem, a função de refrigeração do fluido de corte torna-se praticamente ineficaz devido à rápida evaporação que ocorre a altas temperaturas na região de corte. Os resultados com sistemas de refrigeração eficientes tais como MQF, MQL e a seco são otimistas, mas ainda há necessidade de fazer mais estudos e pesquisas, para ter um entendimento mais claro desta nova tecnologia (EZUGWU, BONNEY e YAMANE, 2003).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, são relatados às condições atuais de operação na empresa, os materiais, as descrições dos equipamentos e a metodologia executada no procedimento experimental para os ensaios de usinabilidade, visando atingir os objetivos propostos neste trabalho.

3.1 ANÁLISE DA PROBLEMÁTICA DE OPERAÇÃO NA EMPRESA

Inicialmente, o aço SAE 5160 era fornecido no estado normalizado e submetido a tratamento térmico de recozimento para diminuir a dureza. Mesmo após este procedimento, o aço SAE 5160 continuava com baixa usinabilidade e desgastes excessivos nas ferramentas devido a sua microestrutura peculiar e por apresentar elevado teor de carbono. Neste processo, eram utilizados insertos de metal duro revestido com TiCN/TiN (CVD) da marca Sandvik Coramant, código WNMG 080408-PM4025. Após pesquisa e troca de ideias com o fornecedor de ferramentas, implementou-se um novo inserto de metal duro com três camadas de revestimento de TiCN/Al₂O₃/TiN (CVD) da marca Sandvik Coramant, código WNMG 080408-PM4225 a fim de reduzir os desgastes nas ferramentas. Além disso, também foi implementado o material SAE 5160 esferoidizado no sentido de melhorar a usinabilidade e os desgastes, pois é nesta microestrutura que você tem a maior vida da ferramenta e os menores desgastes para o aço SAE 5160. Após estas ações, constatou-se melhora significativa na usinagem do material cabendo comprovar qual a melhor classe este novo inserto se ajusta na usinagem do aço SAE 5160 na condição esferoidizada.

3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.2.1 Material ensaiado

Para confecção dos corpos-de-prova foram utilizados 6 barras de seção circular do aço laminado SAE 5160 esferoidizado, nas dimensões de Ø101,6mm x 553mm de comprimento e com dureza de 178HB. A composição química deste material é apresentada na Tabela 4, de acordo com o certificado emitido pelo fornecedor.

Tabela 4 – Composição química do aço SAE 5160 conforme certificado do fornecedor.

Composição Química (%)								
<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>Outros</i>
0,60	0,22	0,82	0,025	0,015	0,75	0,12	0,03	-

Fonte: Aços Roman Ltda (2014).

Para a confiabilidade e credibilidade do ensaio, através de uma amostra do material certificado, foi feito ensaio de dureza e metalografia. Na Tabela 5, são apresentados os resultados de dureza em cinco pontos da amostra em escala Brinell com esfera de Ø10mm e carga de 3000kgf.

Tabela 5 – Dureza da amostra do aço SAE 5160 esferoidizado.

Ensaio de Dureza Brinell (HB)					
Pontos	1	2	3	4	5
Ensaio 1	160	160,5	160,5	161	160,5
Dureza Média dos Pontos	160,5				

Fonte: UCS (2014).

A imagem da micrografia do material utilizado nos ensaios é mostrada na Figura 19, onde em pontos distintos da amostra, apresentou ferrita com cementita esferoidal.

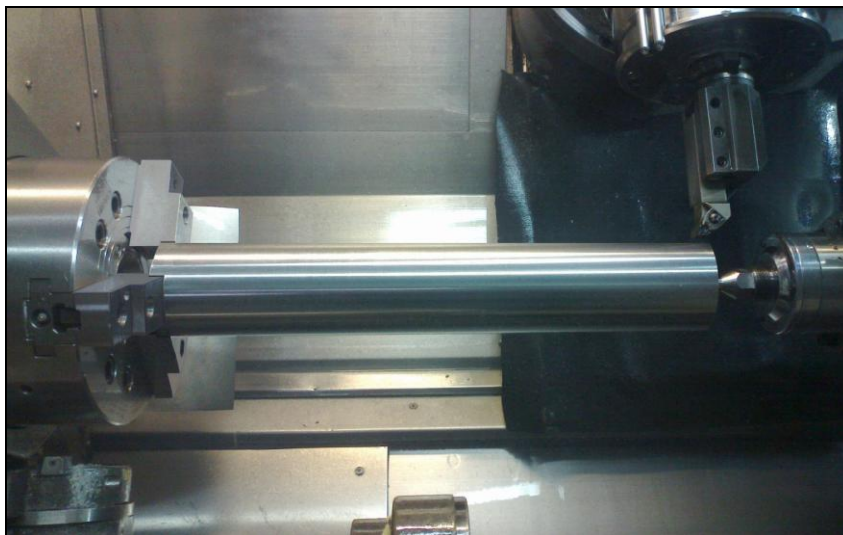
Figura 19 – Micrografia do aço SAE 5160 esferoidizado atacado com Nital a 2%.



Fonte: UCS (2014).

Na preparação dos corpos-de-prova foi retirado aproximadamente 3mm no raio para eliminação da superfície proveniente da laminação do material, apresentando dimensões finais de $\varnothing 95\text{mm}$ x 550mm de comprimento. Para fixação dos corpos-de-prova na máquina, foi utilizado uma placa de três castanhas e contra-ponto rotativo na extremidade, garantindo boa rigidez e minimizando o excesso de vibrações. Na Figura 20 é mostrado o corpo-de-prova fixado na máquina.

Figura 20 – Corpo-de-prova utilizado nos ensaios.



Fonte: SK Schunck Projetos e Equipamentos Ltda (2014).

3.2.2 Máquina-ferramenta

Os ensaios de torneamento foram realizados em um torno multitarrefas CNC da marca Mazak, modelo Integrex 200 IV, potência de 18,5kW, rotação máxima na placa de 5000rpm e aplicação de fluido lubrificante externo através de motobomba com vazão de 11L/min a pressão de 6 bar. Na Figura 21 é mostrada a máquina-ferramenta.

Figura 21 – Torno Mazak Integrex 200 IV.















Fonte: SK Schunck Projetos e Equipamentos Ltda (2014).

3.2.3 Ferramentas

Para realização dos ensaios foram utilizadas ferramentas de metal duro revestido disponível comercialmente, com variações de classe, conforme a Tabela 6.

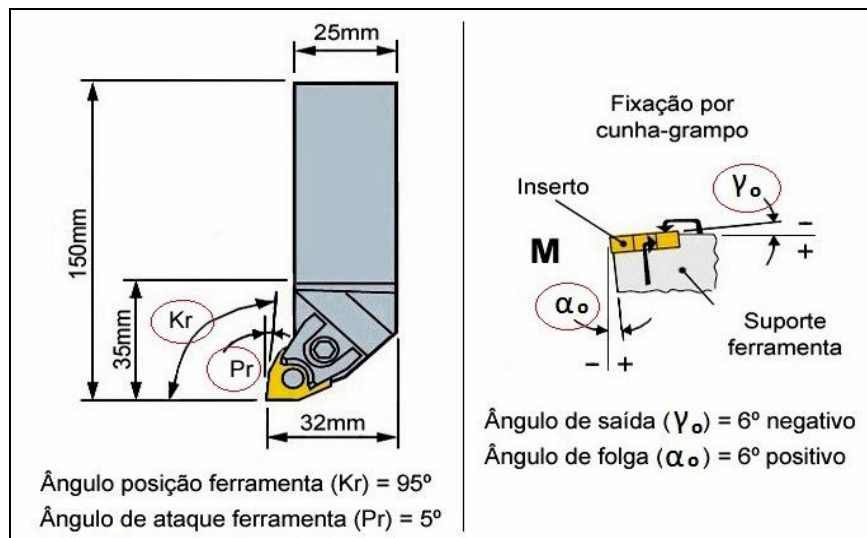
Tabela 6 – Descrição das ferramentas.

Marca	Sandvik Coromant	Sandvik Coromant	Sandvik Coromant
Material	MD-MT	MD-MT	MD-MT
Código	WNMG 08 04 08 PM 4215	WNMG 08 04 08 PM 4225	WNMG 08 04 08 PM 4235
Imagem			
Classe	GC4215	GC4225	GC4235
Revestimento	TiCN–Al ₂ O ₃ –TiN	TiCN–Al ₂ O ₃ –TiN	TiCN–Al ₂ O ₃ –TiN
Deposição	CVD	CVD	CVD
Formato			
Ângulo de folga			
Raio de ponta	0,8	0,8	0,8
Quebra-Cavaco			

Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2014).

Para fixação das ferramentas será utilizado o suporte código MWLNL-2525-M08, além de grampos de fixação para inserts com furo central conforme Figuras 22.

Figura 22 – Dimensões, ângulos e geometria do suporte de ferramentas.



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2014).

3.2.4 Fluido lubrificadorrefrigerante

Foi utilizado fluido lubrificadorrefrigerante sintético marca Yushiro Ken SH-30R solúvel em água, com pH de 8,7 a 9,7 e concentração de 7% a 8%, indicado para usinagens severas em metais ferrosos e não ferrosos, sendo aplicado na parte externa do inserto com uma vazão de 11 L/min e pressão de 6 bar, visando minimizar o calor gerado sobre a ferramenta.

3.2.5 Microscópio óptico

Para a medição dos desgastes das ferramentas ao longo do tempo, foi utilizado um estereoscópio trinocular de medição universal do laboratório da Universidade de Caxias do Sul (UCS), modelo TNE-10B, da marca Entex, com resolução de 600 x 480, ampliação máxima de 90x, câmera CCD conectada a um computador contendo um software responsável pela captura das imagens. Na Figura 23 é possível visualizar o equipamento.

Figura 23 – Estereoscópio de captura de imagens e medição dos desgastes.





Fonte: UCS (2014).

3.3 PARÂMETROS DE CORTE

Para os ensaios foram utilizados os mesmos parâmetros de corte para os três tipos de ferramentas de acordo com valores recomendados pelo catálogo do fabricante e através dos pré-testes realizados nas ferramentas conforme Tabela 7. Neste caso, a variável de entrada foi somente a classe do metal duro revestido. A geometria da ferramenta, o revestimento, os parâmetros de corte, fluido lubrificadorrefrigerante, máquina-ferramenta, material da peça e fixação foram os mesmos para ambas as classes de ferramentas.

Tabela 7 – Descrição dos parâmetros de corte utilizados.

Insertos	WNMG 08 04 08 PM 4215	WNMG 08 04 08 PM 4225	WNMG 08 04 08 PM 4235
Parâmetros			
Vc (m/min.)	300		
f (mm/rev.)	0,35		
ap (mm)	2,5		

Fonte: Autor (2014).

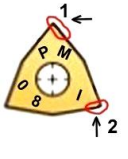

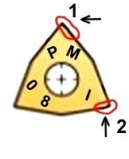

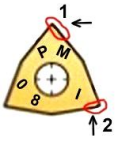

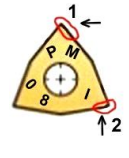

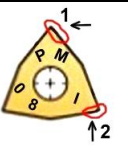

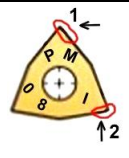

3.4 METODOLOGIA IMPLEMENTADA

Após a fixação do corpo-de-prova no torno, foram utilizados os parâmetros de corte conforme descritos na Tabela 7 para cada classe de inserto e foram realizados passes no diâmetro externo do corpo-de-prova no sentido longitudinal ao longo do comprimento de 530mm cujo tempo de usinagem máximo no diâmetro maior de 95mm foi de aproximadamente 1min e 30s.

Ao final de cada dois passes o inserto era retirado e submetido à análise microscópica para medição e avaliação dos prováveis tipos e mecanismos de desgastes que estavam ocorrendo. Este procedimento foi executado até atingir o fim da vida da ferramenta, determinado pela norma ISO 3685 (1993), onde através de pré-testes realizados anteriormente prevaleceu o desgaste de flanco máximo, $VB_{Bmáx} = 0,6\text{mm}$.

Para cada classe de ferramenta foi ensaiado um gume do inserto original (2) e um gume do inserto réplica (2), conforme Tabela 8. O gume (1) do inserto original e o gume (1) do inserto réplica foi utilizado nos pré-testes para definição dos parâmetros de corte.

Tabela 8 – Identificação dos gumes utilizados nos ensaios.

Classes	Inserto (Original)	Inserto (Réplica)
GC4215	  Refer. para identif. gume	  Refer. para identif. gume
GC4225	  Refer. para identif. gume	  Refer. para identif. gume
GC4235	  Refer. para identif. gume	  Refer. para identif. gume

Fonte: Autor (2014).

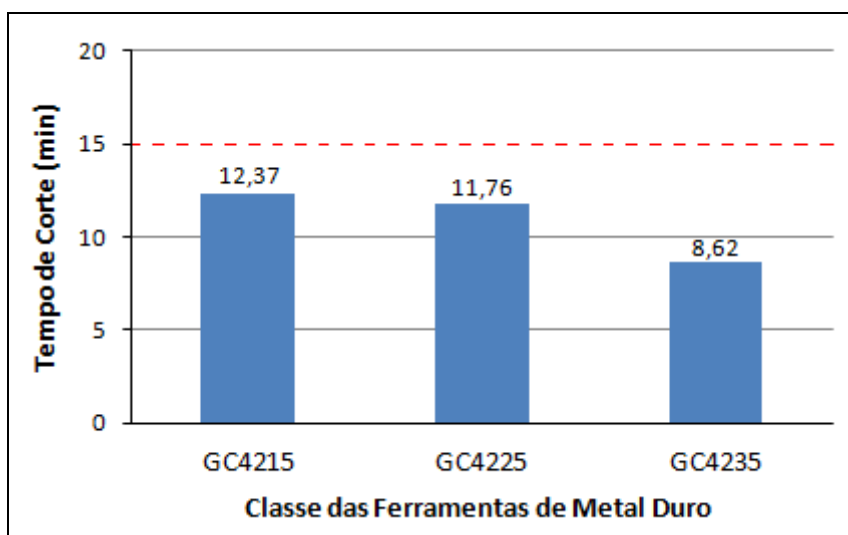
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AVALIAÇÃO DAS DIFERENTES CLASSES DE FERRAMENTAS

4.1.1 Vida das ferramentas

Os resultados de vida para as diferentes classes de ferramentas de metal duro revestido são apresentados no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Vida das ferramentas entre as diferentes classes.



Fonte: Autor (2014).

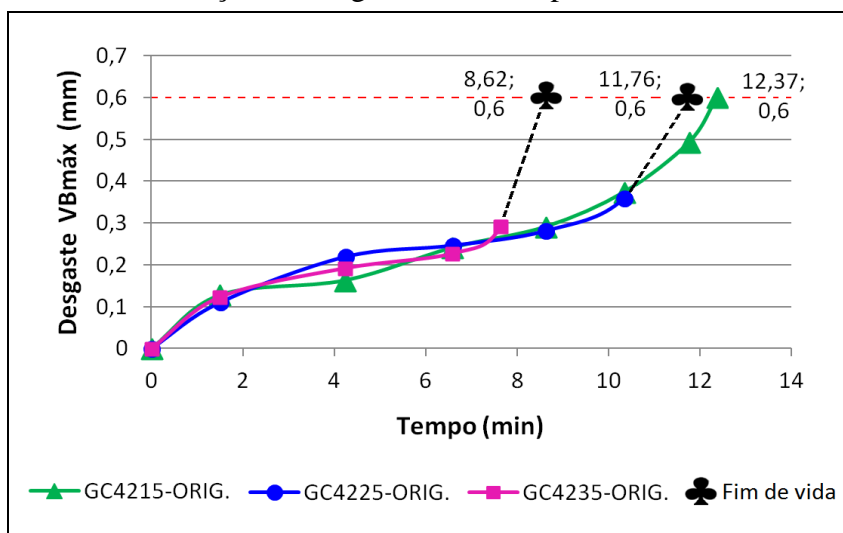
Pela análise do Gráfico 1, constatou-se que a classe GC4215 apresentou uma vida de 12,37 minutos, a maior vida entre todas as classes testadas. A classe GC4225 apresentou uma vida de 11,76 minutos, um pouco abaixo da classe GC4215. Já a classe GC4235 apresentou uma vida de 8,62 minutos, sendo a vida mais baixa entre as três classes.

O melhor desempenho da classe GC4215 pode ser explicado pela alta dureza do substrato da ferramenta em comparação com as classes GC4225 e GC4235, onde a tenacidade é aumentada de forma gradual. O baixo desempenho da classe GC4235 pode-se atribuir a maior tenacidade do material aliado aos parâmetros de corte agressivos que foi submetida, principalmente pela velocidade de corte muito elevada para essa classe, que não suportou a abrasividade do material e a elevada temperatura na região de corte degradando-se mais rapidamente.

Com relação à questão econômica, nenhuma das classes teve um desempenho economicamente aceitável levando em consideração uma vida mínima de 15 minutos para os padrões industriais. Isto pode ser explicado pelo fato dos parâmetros de corte indicados pelo fabricante para cada ferramenta serem diferentes entre si. O ideal seria fazer testes favorecendo um inserto e depois alterar os parâmetros para favorecer o outro inserto. Desta

forma, certamente as ferramentas atingiriam os 15 minutos indicados pelo catálogo do fabricante. Contudo, isso não foi possível devido à falta de tempo e disponibilidade da máquina. Optou-se, portanto, pela realização de um ensaio com parâmetros de corte que fosse comum para ambas as classes. No Gráfico 2 são plotadas as curvas de vida para as três classes de ferramentas de metal duro revestido (inserto original), obtidas nos ensaios de usinabilidade de acordo com os parâmetros de corte pré-estabelecidos. Pela análise das curvas é possível constatar o melhor desempenho da classe GC4215. A classe GC4225 também apresentou bom desempenho e sua vida ficou muito próxima da classe GC4215, no entanto, juntamente com a classe GC4235 entrou em colapso não havendo a possibilidade da continuação do ensaio.

Gráfico 2 – Evolução do desgaste de flanco para as diferentes classes.



Fonte: Autor (2014).

4.1.2 Avaliação de desgastes

4.1.2.1 Classe GC4215

Nesta classe de ferramenta foram observados quatro tipos de desgastes, entre eles: desgaste de flanco, entalhe, cratera e trincas. É importante salientar, que não houve avarias, somente desgastes. Na Figura 24, é possível visualizar os desgastes que ocorreram nos ensaios com os insertos da classe GC4215. O desgaste de flanco (a) ocorreu pelo mecanismo de abrasão, causado pelo atrito entre a ferramenta e o material da peça a altas temperaturas. Foi possível notar que esse tipo de desgaste foi crescendo de uma forma quase que constante. Esta explicação pode ser constatada por Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012), onde no torneamento do aço AISI 4340 (médio carbono e baixa liga), a remoção do revestimento de

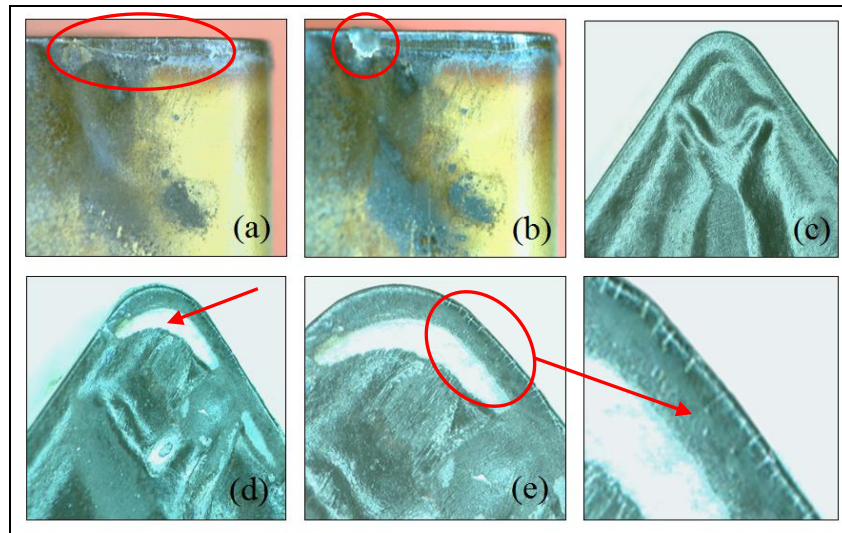
TiCN/Al₂O₃/TiN (CVD) do flanco principal ocorreu em curto espaço de tempo pelo atrito e a redução da dureza devido a alta temperatura ocasionada pela alta velocidade de corte.

O desgaste de entalhe (b) ocorrido na extremidade do gume desta classe provavelmente é uma consequência do mecanismo de oxidação. A superfície de folga na extremidade da ferramenta fica em maior contato com o ar e o fluido lubrificante no momento do corte e as altas temperaturas da região acabam favorecendo o surgimento da oxidação, principal mecanismo deste tipo de desgaste. Segundo Melo, Franco e Machado (2005), nas periferias da região de corte do material com a superfície de saída não ocorre o mecanismo de aderência. Dessa forma, essas regiões ficam mais suscetíveis a reações químicas com o ar atmosférico ocasionando o surgimento de entalhes. Ainda conforme os autores, um aspecto importante no controle da oxidação é a concentração de O₂ no ambiente de corte. Quanto maior for a concentração desse gás, maior será a taxa de oxidação. Para Teles (2007), o desgaste de entalhe sofre grande influência do uso de fluido lubrificante. Nos seus ensaios, a usinagem a seco provocou maior desgaste de entalhe para diferentes ferramentas de metal duro revestido. Neste caso, o fluido lubrificante contribuiu para lubrificar e refrigerar a região de corte do corpo-de-prova.

O desgaste de cratera foi ocasionado provavelmente pelo mecanismo de difusão já que não ocorreu adesão devido à maior dureza desta classe. Para comparação das imagens, mostra-se a superfície de saída intacta do inserto (c). O revestimento de Al₂O₃ na superfície de saída da ferramenta favoreceu para que o desgaste de cratera não fosse tão acentuado (d). Segundo Chinchankar e Choudhury (2013), o aumento da vida da ferramenta no torneamento do aço AISI 4340 pode ser atribuído à sua espessura e o revestimento de Al₂O₃ que durante o corte protegeu a ferramenta do mecanismo de abrasão severa e elevadas temperaturas.

O surgimento de trincas (e) foi ocasionado provavelmente pela variação excessiva da temperatura com o uso de fluido lubrificante juntamente com a dureza da classe. Segundo Melo, Franco e Machado (2005), as trincas térmicas em ferramentas de metal duro revestido acontecem em situações onde o acesso de fluido lubrificante na ferramenta é irregular, ocasionando variações térmicas excessivas. Uma forma de verificar que uma ferramenta sofreu trincas térmicas é o aparecimento de diversas trincas perpendicular ao gume de corte da ferramenta.

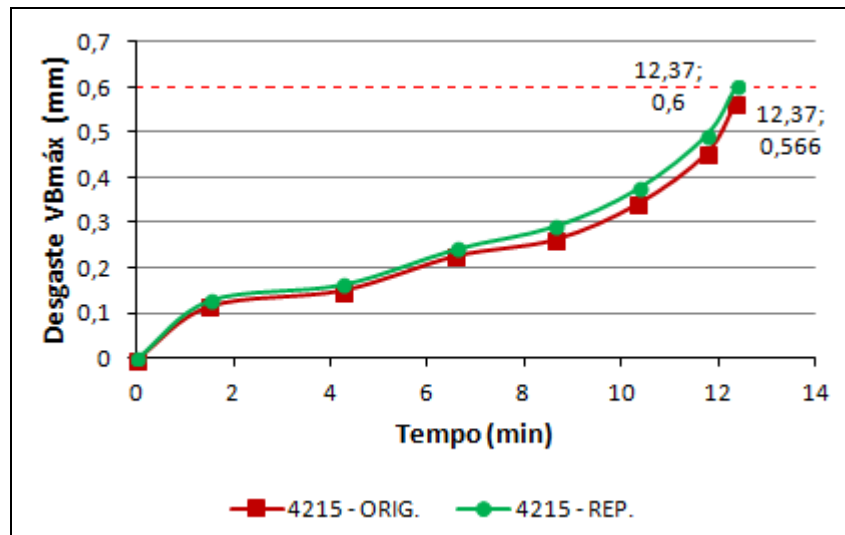
Figura 24 – Desgastes da classe GC4215.



Fonte: Autor (2014).

O inserto desta classe apresentou uma vida de 12,37 minutos e um comprimento linear usinado de 6,36 metros. O Gráfico 3 mostra as curvas de vida para os insertos da classe de metal duro GC4215.

Gráfico 3 – Evolução do desgaste de flanco da ferramenta classe GC4215.



Fonte: Autor (2014).

4.1.2.2 Classe GC4225

Nesta classe de ferramenta foram observados alguns desgastes, a saber: desgaste de flanco, cratera, adesão e trincas. Na Figura 25, é possível visualizar a avaria e os desgastes na ferramenta da classe GC4225. O desgaste de flanco (a) causado pelo mecanismo de abrasão foi mais acentuado em relação à classe GC4215. Uma explicação para esse comportamento pode ser o material da ferramenta da classe G4225 que é mais tenaz. Segundo Luo et al

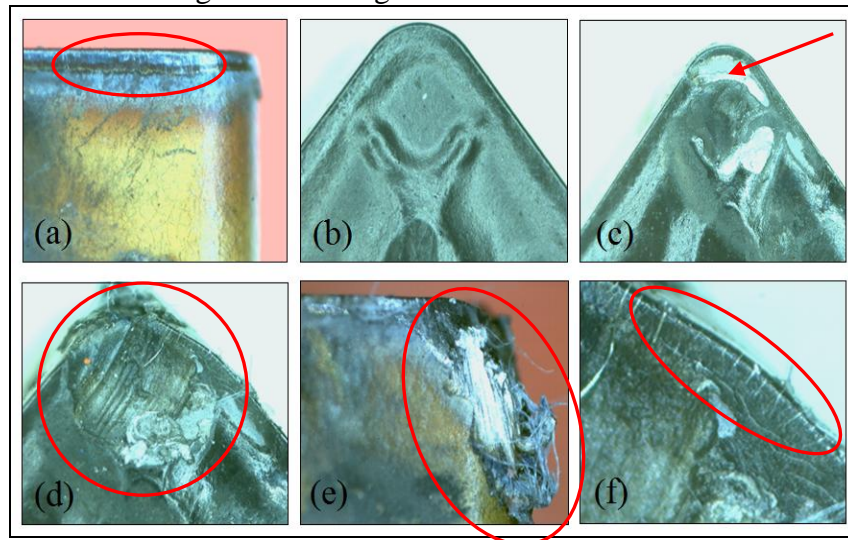
(2005), a velocidade de corte influencia diretamente este tipo de desgaste, sendo mais acentuado quando a velocidade de corte se aproxima do limite estabelecido pelo fabricante de ferramentas.

O desgaste de cratera desta classe foi mais acentuado, e desta vez, ocasionada pelos mecanismos de difusão e adesão. Para comparação das imagens, mostra-se a superfície de saída intacta do inserto (b). Nos primeiros passes (c), é possível observar o início da cratera ainda pequena. Segundo Aurich, Eyrisch e Zimmermann (2012), no torneamento do aço AISI 4140 existe uma relação da condutividade térmica com o desgaste de cratera. Tipos de revestimentos de metal duro que possuem baixa condutividade térmica como o Al_2O_3 tende a diminuir o desgaste de cratera. Isso ocorre porque a baixa condutividade térmica do Al_2O_3 diminui o fluxo de calor na ferramenta em cerca de 30% dissipando a maior parte do calor para o cavaco. Além disso, a sensibilidade para adesão do material da peça de trabalho propicia maior incidência de desgaste de cratera pelos mecanismos de difusão e adesão devido à sensibilidade à temperatura. Ao final do ensaio foi possível observar que o desgaste de cratera aumentou de forma muito acentuada fazendo com que o gume fosse arrancado (d) pelos mecanismos já citados acima, inviabilizando a continuação do ensaio devido ao colapso da ferramenta. Conforme já explicado, segundo Aurich, Eyrisch e Zimmermann (2012), a sensibilidade para adesão do material da peça de trabalho propicia maior incidência de desgaste de cratera pelos mecanismos de difusão e adesão devido à sensibilidade à temperatura e alta velocidade de corte.

Foi possível perceber a adesão de material da peça na quina da ferramenta (e), supostamente causado pela baixa dureza do material e tenacidade haja vista que isso não ocorreu na classe de ferramenta de maior dureza.

Nesta classe também puderam ser observadas trincas de origem térmica (f), ocasionadas pela variação excessiva da temperatura com o uso de fluido lubrificante. Segundo Melo, Franco e Machado (2005), essas trincas são provocadas pela alternância de expansão e contração das camadas superficiais de revestimento da ferramenta quando ela é aquecida e resfriada durante o processo de usinagem, causando choque térmico pela variação de temperatura. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), uma alternativa para resolver este problema seria a escolha de uma classe de ferramenta mais tenaz.

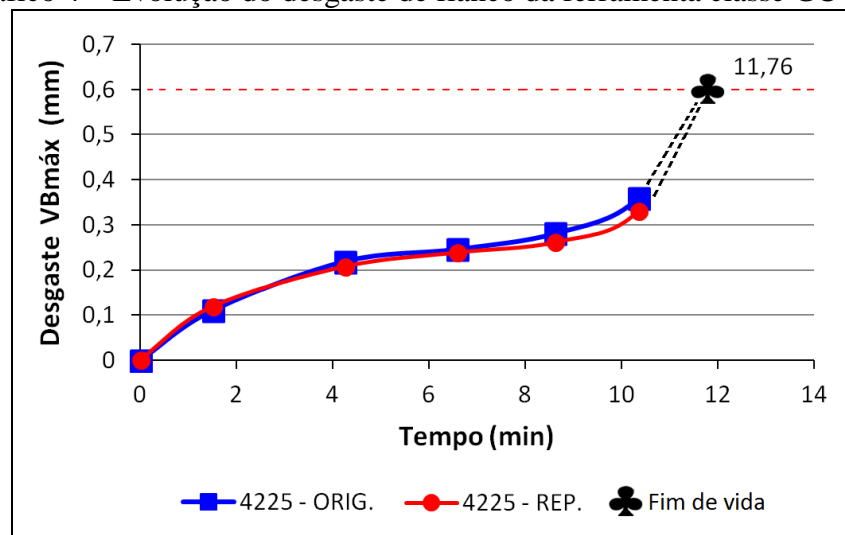
Figura 25 – Desgastes da classe GC4225.



Fonte: Autor (2014).

O inserto desta classe apresentou uma vida de 11,76 minutos antes de entrar em colapso e um comprimento linear usinado de 5,83 metros. O Gráfico 4 mostra a curva de vida para a classe de metal duro GC4225.

Gráfico 4 – Evolução do desgaste de flanco da ferramenta classe GC4225.



Fonte: Autor (2014).

4.1.2.3 Classe GC4235

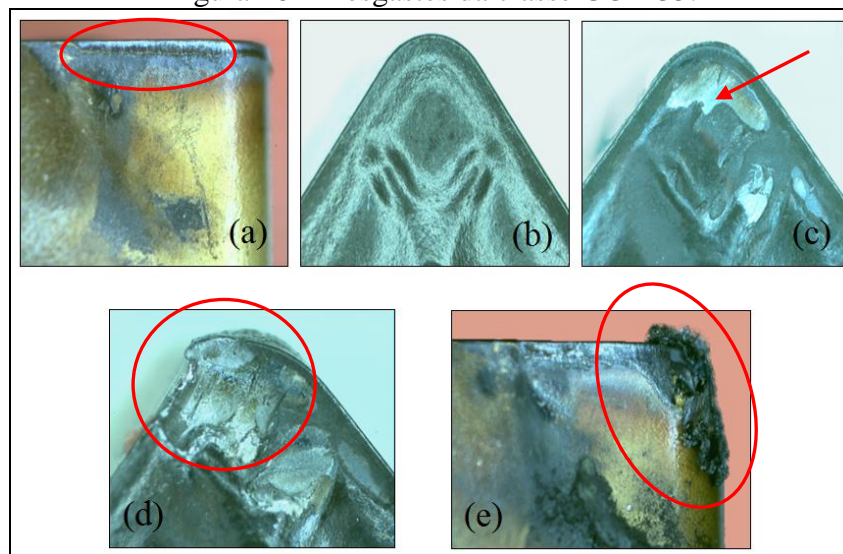
Nesta classe de ferramenta foram observados os seguintes desgastes: desgaste de flanco, cratera e adesão. Na Figura 26, é possível visualizar os desgastes que ocorreram nos ensaios da classe GC4235. O desgaste de flanco (a) também causado pelo mecanismo de abrasão foi ainda mais acentuado em relação às classes anteriores provavelmente por ser a classe mais tenaz em comparação com as classes GC4215 e GC4225 e por consequência baixa dureza a quente. Notou-se que quando o $VB_{máx}$ passou de 0,3mm o desgaste progrediu de forma muito rápida. Segundo Luo et al (2005), a velocidade de corte influencia

diretamente este tipo de desgaste sendo mais acentuado devido a alta velocidade de corte. Nesta classe em especial, a velocidade de corte imposta ultrapassou o limite estabelecido pelo fabricante de ferramentas. No entanto, isso se fez necessário para que os parâmetros de corte pudessem ser comuns para ambas às classes.

Para comparação das imagens, mostra-se a superfície de saída intacta do inserto (b). No início do ensaio é possível perceber o desgaste de cratera ainda pequeno (c), que evoluiu muito rapidamente especialmente nesta classe. Esse desgaste também foi ocasionado pelos mecanismos de difusão e adesão associado à alta temperatura e velocidade de corte. Conforme Azevedo (2003), o início e a evolução do desgaste de cratera na superfície de saída da ferramenta é fortemente dependente da máxima temperatura que ocorre na superfície de saída. Ao final do ensaio verificou-se uma cratera bastante acentuada fazendo com que o gume fosse arrancado (d) não permitindo a continuação do ensaio pelo colapso da ferramenta.

Nesta classe também é possível visualizar a adesão de material da peça na ferramenta (e) também provavelmente causada pela baixa dureza do material esferoidizado e a ferramenta muito tenaz sendo que isso não ocorreu na classe de ferramenta mais dura. Segundo Chinchankar e Choudhury (2013), em pouco tempo de usinagem o material da peça adere na ferramenta e ao se soltar juntamente com o revestimento resulta na corrosão do flanco, faces inclinadas e exposição do substrato da ferramenta.

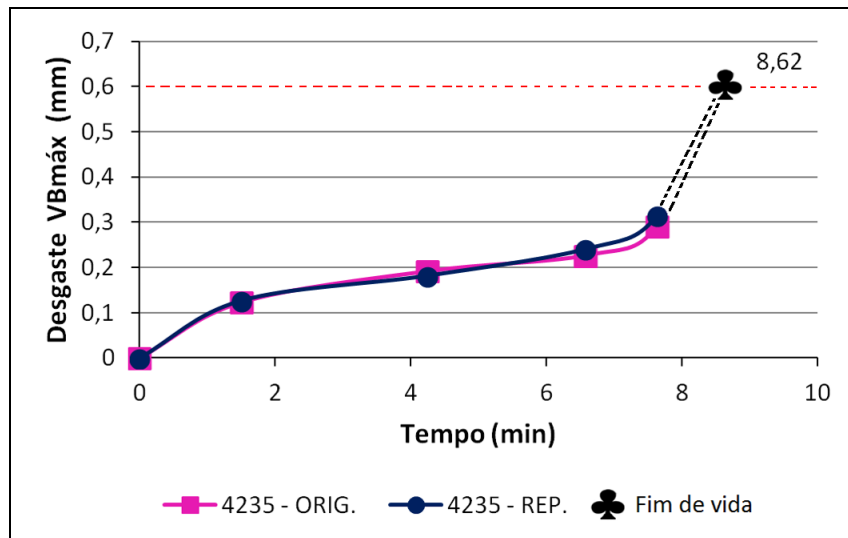
Figura 26 – Desgastes da classe GC4235.



Fonte: Autor (2014).

O inserto desta classe apresentou uma vida de 8,62 minutos e um comprimento linear usinado de 3,71 metros. O Gráfico 5 mostra a curva de vida para a classe de metal duro GC4235.

Gráfico 5 – Evolução do desgaste de flanco da ferramenta classe GC4235.



Fonte: Autor (2014).

4.1.3 Volume de material usinado

Uma ferramenta cujo volume de material removido é maior proporciona a redução nos tempos e nos custos do processo de usinagem desde que a análise econômica da ferramenta comprove que ela sege viável para o processo a ser realizado. Para o cálculo da taxa de remoção de material no processo de torneamento utilizou-se a fórmula 1:

$$Q = V_c \cdot a_p \cdot f \text{ [cm}^3\text{/min]} \quad (1)$$

Onde:

Q = Taxa de remoção de material para torneamento [cm³/min]

V_c = Velocidade de corte [m/min]

a_p = Profundidade de corte [mm]

Aplicando a fórmula 1 para o cálculo da taxa de remoção de material para os parâmetros de corte utilizados nos ensaios conforme Tabela 7, temos:

$$Q = 300 \cdot 2,5 \cdot 0,35 = 262,5 \text{ cm}^3\text{/min}$$

Para determinação do volume de material usinado utilizou-se a fórmula 2:

$$V = Q \cdot T \text{ [cm}^3\text{]} \quad (2)$$

Onde:

V= Volume de material usinado [cm³]

Q = Taxa de remoção de material para torneamento [cm³/min]

T = Tempo de vida apresentado por cada ferramenta de corte conforme Gráfico 1 [min]

Aplicando a fórmula 2 para o cálculo do volume de material usinado, temos:

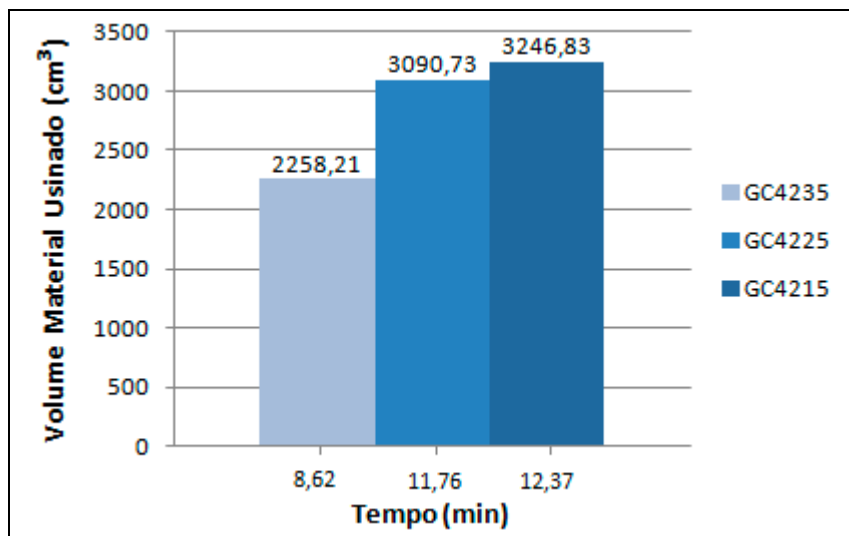
$$V = 262,5 \text{ cm}^3/\text{min} \cdot 8,62 \text{ min} \cong 2258,21 \text{ cm}^3 \text{ (para a classe GC4235);}$$

$$V = 262,5 \text{ cm}^3/\text{min} \cdot 11,76 \text{ min} \cong 3090,73 \text{ cm}^3 \text{ (para a classe GC4225);}$$

$$V = 262,5 \text{ cm}^3/\text{min} \cdot 12,37 \text{ min} \cong 3246,83 \text{ cm}^3 \text{ (para a classe GC4215).}$$

Através da análise do Gráfico 6 é possível perceber que a ferramenta da classe GC4215 conseguiu remover o maior volume de material, seguido pela classe GC4225 e por última a classe GC4235.

Gráfico 6 – Volume de material usinado para as diferentes classes.



Fonte: Autor (2014).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentro dos parâmetros de corte estabelecidos para os ensaios, concluiu-se que o inserto de metal duro revestido com TiCN/Al₂O₃/TiN (CVD), classe GC4215, apresentou maior vida e menores desgastes para o torneamento do aço SAE 5160 esferoidizado.

Constatou-se que, mesmo com a microestrutura mais favorável de usinagem do aço SAE 5160, obtida pela esferoidização, as classes mais tenazes de ferramenta GC4225 e GC4235 apresentaram grande adesão de material no flanco da ferramenta. Isso pode ter acontecido pelo fato do material esferoidizado apresentar baixa dureza, favorecendo este tipo de mecanismo.

O revestimento de Al₂O₃ apresentou bom desempenho na superfície de saída da classe de ferramenta GC4215 mais dura, dificultando os mecanismos de difusão e adesão responsável pelo desgaste de cratera. Já nas classes mais tenazes GC4225 e GC4235 o revestimento de Al₂O₃ conseguiu estabilizar o desgaste de cratera somente até certo período de tempo.

As classes GC4215 e GC4225 por serem mais duras apresentaram trincas ocasionadas pela variação excessiva da temperatura com o uso de fluido lubrificante-refrigerante.

Tanto a classe GC4225 quanto a classe GC4235 entraram em colapso devido à progressão do desgaste de cratera que arrancou parte do gume de corte inviabilizando a continuação do ensaio.

Através de análise visual, sem a utilização de rugosímetro, percebeu-se que a rugosidade do corpo-de-prova não mudou de forma significativa ao final dos ensaios, avaliando o desgaste de flanco máximo, $VB_{Bmáx} = 0,6\text{mm}$, como o critério responsável pelo fim de vida da ferramenta.

A melhoria nos desgastes com a troca de ferramenta de TiCN/Al₂O₃/TiN (CVD) também está ligada a uma melhoria no processo de usinagem, neste caso a implementação do aço SAE 5160 esferoidizado.

Devido à limitação de tempo e disponibilidade da máquina não foi possível realizar uma investigação mais ampla. Sendo assim, como sugestão para trabalhos futuros seria interessante testar um maior número de réplicas de ferramentas, testar diferentes fornecedores de ferramentas, testar diferentes parâmetros de corte e realizar ensaios com MQF e MQL.

REFERÊNCIAS

- A. CAMARGO. **Catálogo de Produtos**. 2014. Disponível em: <<http://busca.acamargo.com/?busca=pino%2520trava%2520e%2520mola>>. Acesso em: 30 mar. 2014.
- AÇOS ROMAN. Aços Especiais. **Catálogo de Produtos**. 2014. Disponível em: <<http://www.acosroman.com.br/acosroman/index.html>>. Acesso em: 12 set. 2014.
- ALMEIDA, C. M. **Avaliação do Desgaste da Ferramenta de Metal Duro Revestida com TiN no Fresamento do Aço ABNT 4140 Laminado a Quente e Temperado/Revenido**. 2009. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Minas Gerais, 2009. Disponível em: <http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/EngMecanica_AlmeidaCM_1.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2014.
- AMORIN, H. J. **Estudo da Relação entre Velocidade de Corte, Desgaste de Ferramenta, Rugosidade e Forças de Usinagem em Torneamento com Ferramenta de Metal Duro**. 2002. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/3791>>. Acesso em: 27 abr. 2014.
- ASM HANDBOOK. In: **ASM Handbook** - Vol. 1: Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys. 10th. Edition. Washington: ASM International, 1990. Pages 245-247.
- AZEVEDO, G. M.; ANDRADE, A. C.; ABRÃO, A. M. Análise da Temperatura Durante Torneamento de Aço Temperado. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 40 (455), p. 100-111, dez. 2003.
- AURICH, J. C.; EYRISCH, T.; ZIMMERMANN, M. Effect of The Coating System on The Tool Performance When Turning Heat Treated AISI 4140. **5th. CIRP Conference on High Performance Cutting**, v. 1, p. 214-219, 2012. Kaiserslautern, Germany. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827112000388>>. Acesso em: 27 abr. 2014.
- BIERMANN, D.; WEINERT, K.; TERWEY, I.; DENKENA, B.; HAUBROCK, J. Comportamento de Ferramentas Complexas com Arestas de Corte Preparadas. **Revista Máquinas e Metais**, n. 47 (546), p. 34-45, 2011.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 5º. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589p.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7º. Ed. São Paulo: ABM, 2002. 599p.

CHINCHANIKAR, S.; CHOUDHURY, S.K. Investigations on Machinability Aspects of Hardened AISI 4340 Steel at Different Levels of Hardness Using Coated Carbide Tools. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 38, p. 124-133, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436813000279>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 6º. Ed. São Paulo: Artliber, 2008. 262p.

ESPANHOL, V. **Análise dos Esforços de Corte e Acabamento Superficial no Torneamento de Aço com Ferramenta de Superfície Lisa e com Quebra-Cavaco**. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/14374>>. Acesso em: 27 abr. 2014.

EZUGWU, E.O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An Overview of The Machinability of Aeroengine Alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v.74, n. 134, p. 233-253, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602010427>>. Acesso em: 09 mai.2014.

FAVARETTO, A. S.; VALLE, P. D.; J. CANCEGLIERI, O. O Gerenciamento de Ferramentas de Corte na Indústria Automotiva: Um Estudo de Caso na Região Metropolitana de Curitiba. **Revista Produto&Produção**, Porto Alegre, vol. 10, n. 3, p. 45-60, out. 2009.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 9º. Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2003. 751p.

GERDAU. Manual de Aços Especiais. **Catálogo Técnico**. 2014. Disponível em: <<http://www.gerdau.com.br/produtos-e-servicos/produtos-por-aplicacao-detalhe-produto.aspx?familia=307>>. Acesso em: 14 mar. 2014.

HUTCHINGS, I.M. 1992. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 2th. Edition. London: Butherworths-Heinemann, 1992. 280pages.

ISO 3685:1993. **Tool-Life Testing With Single-Point Turning Tools**. 2. Ed. Geneva, 1993. 48p. Disponível em: <http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=9151>. Acesso em: 07 jun. 2014.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID. S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 4th. Edition. Prentice Hall, 2001. 1148pages.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren - Drehen, Fräsen, Bohren**. Springer-Verlag. 7º. Ed. Berlin, 2002. 471p.

KRAUSS, G. Annealed Structures for Machining. In: **ASM Handbook** - Vol. 4: Heat Treating. 1th. Edition. Washington: ASM International, 1991. Pages 49-50.

LUO, X.; CHENG, K.; HOLT, R.; LIU, X. Modeling Flank Wear of Carbide Tool Insert in Metal Cutting. **Wear**, v. 259, p. 1235–1240, 2005.

Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164805001535>>.

Acesso em: 27 abr. 2014.

MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 9º. Ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009. 384p.

MARCONDES, F. C. O Metal Duro Passado a Limpo. **Revista O Mundo da Usinagem**, São Paulo, n. 44, p. 20-23, fev. 2008.

MARTINEZ, F. G.; SARULS, R. Usinagem Com e Sem Refrigeração - Verdades, Mitos e Tendências. **Revista O Mundo da Usinagem**, São Paulo, n.4, p. 16-17, 2002.

MELO, A. C. A.; FRANCO, S.D.; MACHADO, A. R. Desgastes e Avarias em Ferramentas de Metal Duro. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 41 (478), p. 118-155, dez. 2005.

NOVASKI, O.; DÖRR, J. Usinagem Sem Refrigeração. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, v. 35, n. 398, p. 18-27, fev. 1999.

PERUCH, F. **Influência do Ciclo de Recozimento para Esferoidização nas Propriedades Mecânicas do Aço ABNT 5160**. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/18589>>. Acesso em: 12 abr. 2014.

RIBEIRO, M. V.; MONQUEIRO, L. H. Aplicação de MQF no Torneamento de Ti-6Al-4V. **ABCM - Anais do 7º. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Penedo e Itatiaia, Rio de Janeiro, 2013.

Disponível em: <<http://www.cobef.com.br/anais/PDFS/COBEF2013-0371.PDF>>.

Acesso em: 01 mai. 2014.

RIEGER, J. O.; STREBINGER, J.; BRAGONI, P. R. Refrigeração: Soluções Dedicadas a Necessidades Específicas. **Revista O Mundo da Usinagem**, São Paulo, n. 63, p. 6-16, jan. 2010.

SANDVIK COROMANT. **Catálogo de Produtos**. 2014.

Disponível em: <<http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/pages/default.aspx>>.

Acesso em: 19 mar. 2014.

SANTANA, M. S. **Estudo de Parâmetros de Usinagem do Aço SAE 4140 no Torneamento CNC**. 2011. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia Núcleo de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011. Disponível em: <<http://nmc.webnode.com.br/tcc/>>. Acesso em: 23 abr. 2014.

SK SCHUNCK PROJETOS E EQUIPAMENTOS LTDA. **Banco de Dados**. 2014.

STEMMER C. R. **Ferramentas de Corte I**. 6º. Ed. Florianópolis: Editora Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 249p.

SURESH, R.; BASAVARAJAPPA, S.; SAMUEL, G.L. Some Studies on Hard Turning of AISI 4340 Steel Using Multilayer Coated Carbide Tool. **Measurement**, v. 45, p. 1872-1884, 2012.

Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224112001443>>.

Acesso em: 27 abr. 2014.

TELES, J. M. **Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro**. 2007. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá, 2007.

Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp053828.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

THELNING, K. E. **Steels and Its Heat Treatment**. 2th. Edition. London: Butherworths-Heinemann, 1984. 696 pages.

TRENT, E. M.; RIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4th. Edition. London: Butherworths-Heinemann, 2000. 464 pages.

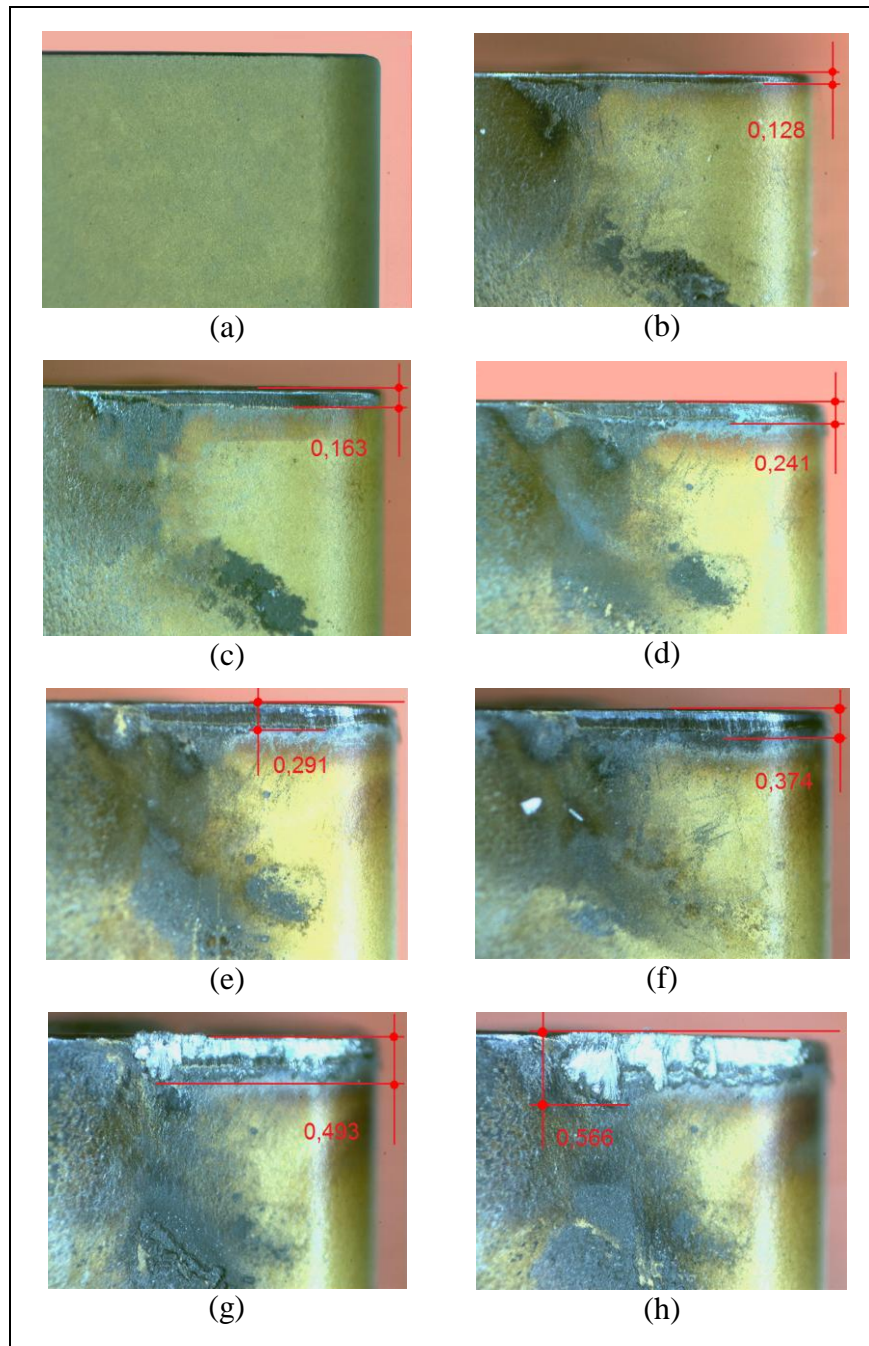
WORLDTOOLS. **Catálogo de Produtos**. 2014.

Disponível em: <<http://www.worldtools.com.br>>. Acesso em: 29 mar. 2014.

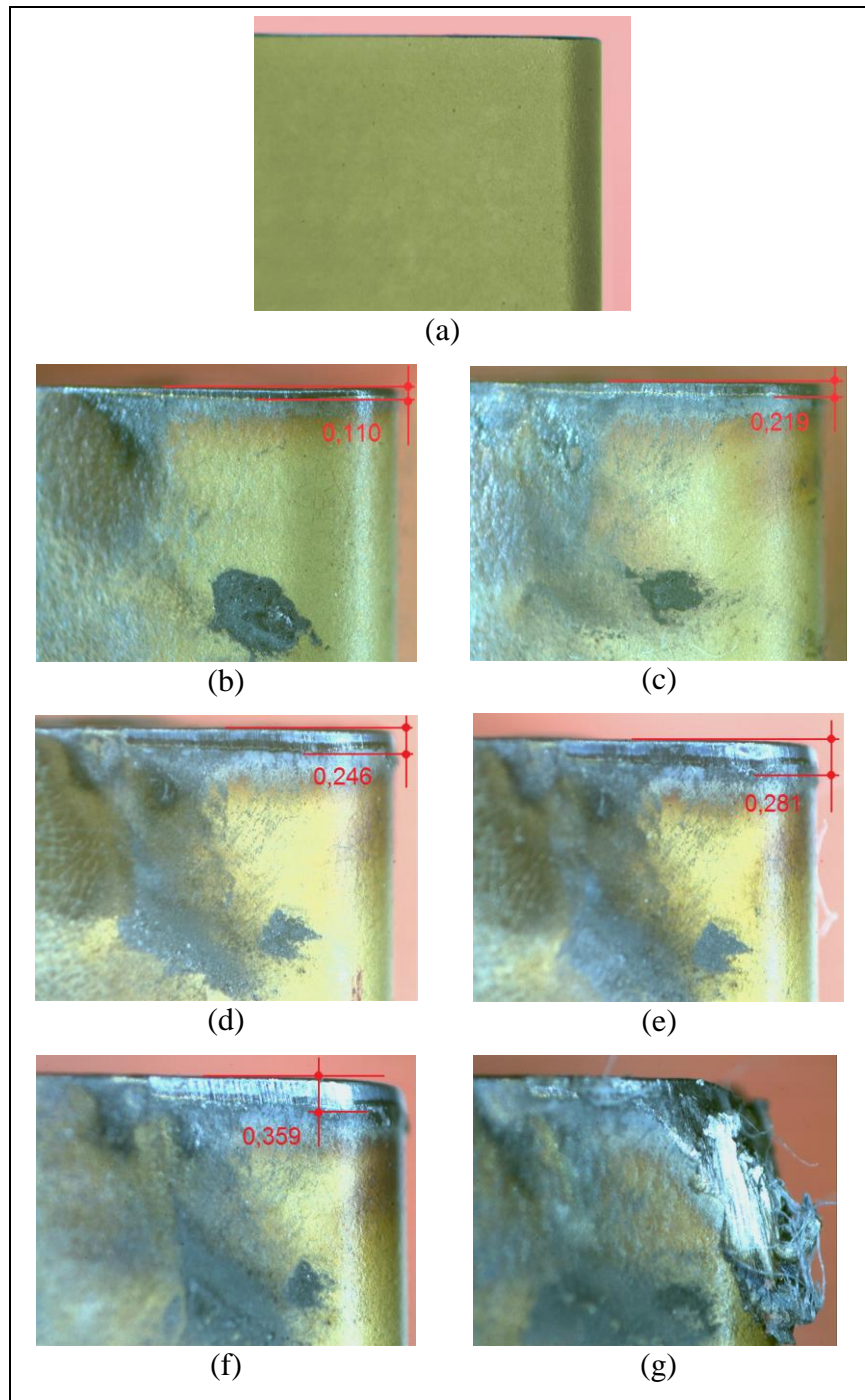
ZEILMANN, R. P.; CALZA, M.; SANTIN, R.; NICOLA, G. L. Desgaste de Brocas de Aço-Rápido Sob Diferentes Condições de Aplicação de Fluidos Lubrificador-refrigerantes. **ABCM - Anais do 4º. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Estância de São Pedro, São Paulo, 2007. Disponível em:

<<http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/cobef/2007/files/node010.html>>. Acesso em: 16 jun 2014.

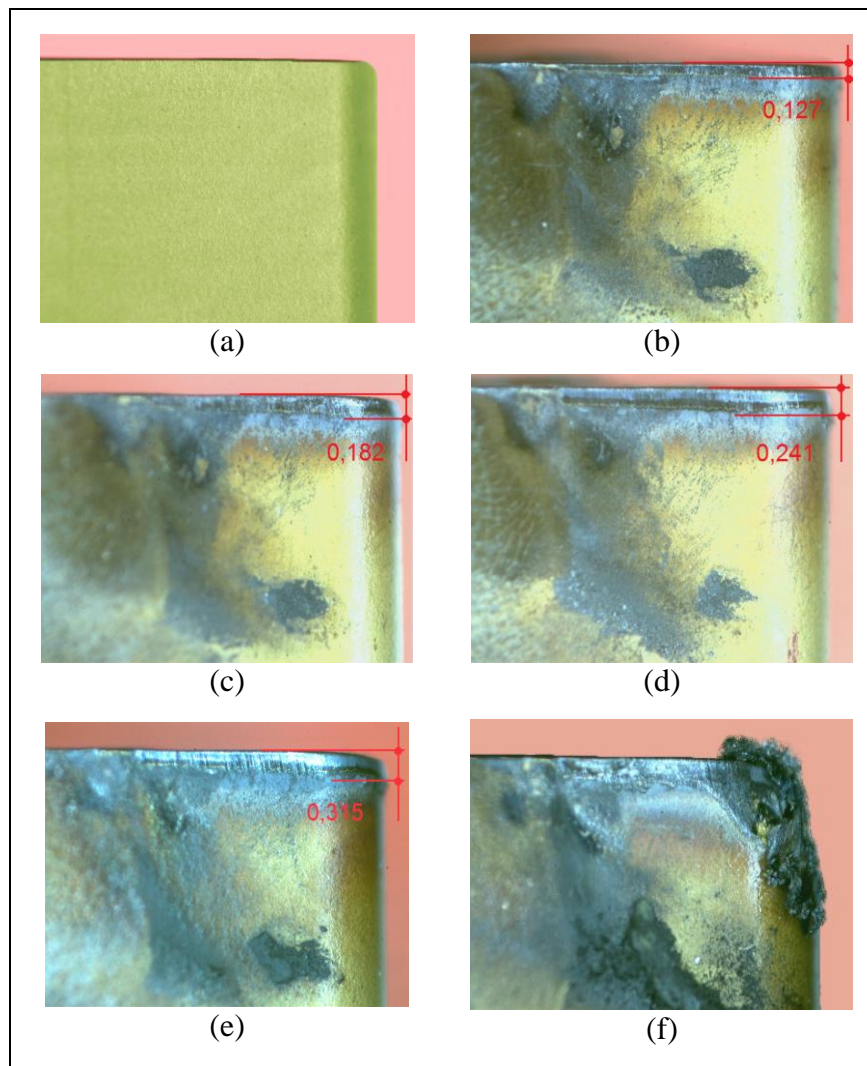
ZEPTER, P. G. **Influência das Microestruturas nas Propriedades Mecânicas do Aço ABNT 5160 em Condições de Carregamento Monotônico e Cíclico**. 2007. 101 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-17062008-155625/>>. Acesso em: 12 abr. 2014.

ANEXO A – EVOLUÇÃO DO DESGASTE DA CLASSE GC4215.

Evolução do desgaste de flanco no gume do inserto original: (a) intacto, (b) 1 passe, (c) 3 passes, (d) 5 passes, (e) 7 passes, (f) 9 passes, (g) 11 passes e (h) 12 passes chegando ao fim da vida.

ANEXO B – EVOLUÇÃO DO DESGASTE DA CLASSE GC4225.

Evolução do desgaste de flanco no gume do inserto original: (a) intacto, (b) 1 passe, (c) 3 passes, (d) 5 passes, (e) 7 passes, (f) 9 passes e (g) 11 passes chegando ao fim da vida devido ao colapso da ferramenta.

ANEXO C – EVOLUÇÃO DO DESGASTE DA CLASSE GC4235.

Evolução do desgaste de flanco no gume do inserto réplica: (a) intacto, (b) 1 passe, (c) 3 passes, (d) 5 passes, (e) 6 passes e (f) 7 passes chegando ao fim da vida devido ao colapso da ferramenta.

ANEXO D – TABELA DE DADOS DA CLASSE GC 4215.

Tempo (min)	Nº. de Passes	VB_B máx. (Original)	VB_B máx. (Réplica)	Ø (mm)	Lc (mm)	Vol. Inicial (cm³)	Vol. Final (cm³)	Vol. Usinado (cm³)
0	0	0	0	95	0	3756,75	3756,75	0
1,5	1	0,116	0,128	90	530	3756,75	3371,71	385,04
4,24	3	0,151	0,163	80	1590	3756,75	2664,07	1092,68
6,58	5	0,227	0,241	70	2650	3756,75	2039,68	1717,07
8,62	7	0,263	0,291	60	3710	3756,75	1498,54	2258,21
10,34	9	0,342	0,374	50	4770	3756,75	1040,65	2716,10
11,76	11	0,454	0,493	40	5830	3756,75	666,02	3090,73
12,37	12	0,566	0,6	35	6360	3756,75	509,92	3246,83


ANEXO E – TABELA DE DADOS DA CLASSE GC 4225.

Tempo (min)	Nº. de Passes	VB_B máx. (Original)	VB_B máx. (Réplica)	Ø (mm)	Lc (mm)	Vol. Inicial (cm³)	Vol. Final (cm³)	Vol. Usinado (cm³)
0	0	0	0	95	0	3756,75	3756,75	0
1,5	1	0,110	0,118	90	530	3756,75	3371,71	385,04
4,24	3	0,219	0,207	80	1590	3756,75	2664,07	1092,68
6,58	5	0,246	0,238	70	2650	3756,75	2039,68	1717,07
8,62	7	0,281	0,261	60	3710	3756,75	1498,54	2258,21
10,34	9	0,359	0,330	50	4770	3756,75	1040,65	2716,10
11,76	11	X	X	40	5830	3756,75	666,02	3090,73

ANEXO F – TABELA DE DADOS DA CLASSE GC 4235.

Tempo (min)	Nº. de Passes	VB_B máx. (Original)	VB_B máx. (Réplica)	Ø (mm)	Lc (mm)	Vol. Inicial (cm³)	Vol. Final (cm³)	Vol. Usinado (cm³)
0	0	0	0	95	0	3756,75	3756,75	0
1,5	1	0,123	0,127	90	530	3756,75	3371,71	385,04
4,24	3	0,192	0,182	80	1590	3756,75	2664,07	1092,68
6,58	5	0,227	0,241	70	2650	3756,75	2039,68	1717,07
7,64	6	0,292	0,315	65	3180	3756,75	1758,70	1998,05
8,62	7	X	X	60	3710	3756,75	1498,54	2258,21

ANEXO G – CERTIFICADO DO FORNECEDOR DE MATERIAL.

 <p>Aços Roman aços especiais AÇOS ROMAN LTDA.</p>		<p>Nota Fiscal: 27865 Cliente: SCHUNCK EMPILHADEIRAS LTDA</p>		<p>Certificado de Qualidade N°: 12992</p>		
<p>RUA HENRIQUE ONGARI, 156 - AGUA BRANCA - CEP: 05037-150 - SÃO PAULO - SP FONE:(11) 3613.2211 - FAX:(11) 3613.2212 - WWW.ACO.COM.BR - ACO@ACO.COM.BR</p>						
Material	Análises Químicas	Prop. Mecânicas	An. Metalográficas	E. N. D.	Trat./Acab.	Obs.
<p>Desc.: ACO - SAE 5160 - Ø 4" - Lam. - Ester. Item: MP039-106-04-10 Lote: 7449 Qtd: 352 Kg Cert.: CERT. N. 345658 Corrida: 12.313.114</p>	<p>Al = 0,018 Cr = 0,750 Mn = 0,820 Ni = 0,120 S = 0,015 Ti = 0,002</p> <p>C = 0,600 Cu = 0,220 Mo = 0,030 P = 0,025 Si = 0,220 V = 0,004</p>	<p>Dureza = 178 HB Temp. Austenit. = 723 °C Tensão Máx. = 561 MPa Tensão Esc. = 383 MPa Estricção = 68 % Deformação = 31,3 % Impacto = 3 J</p>	<p>Tamanho de Grão = 7 ASTM</p>			
<p>ESFEROIDIZADO LAMINADO</p>						
<p>ELPRINT FORMULÁRIOS - FONE: 5188-8286 - WWW.ELPRINT.COM.BR</p>						
<p>DATA EMISSÃO: 20/08/2014</p>						
<p>Certificado aprovado eletronicamente pela Aços Roman.</p>						
<p>FAR 245 - REV. 23/07/2012</p>						