

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

NORTON MARQUES MARCON

**ANÁLISE DOS DESGASTES DE FERRAMENTAS DE METAL DURO NO
PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL CF8M (316)**

BENTO GONÇALVES

2021

NORTON MARQUES MARCON

**ANÁLISE DOS DESGASTES DE FERRAMENTAS DE METAL DURO NO
PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL CF8M (316)**

Trabalho de conclusão de curso,
disciplina MEC0290, apresentado à
Universidade de Caxias do Sul, como
requisito obrigatório para obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Orientador Prof. Dr. Rodrigo Panosso
Zeilmann

BENTO GONÇALVES

2021

NORTON MARQUES MARCON

**ANÁLISE DOS DESGASTES DE FERRAMENTAS DE METAL DURO NO
PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL CF8M (316)**

Trabalho de conclusão de curso,
disciplina MEC0291, apresentado à
Universidade de Caxias do Sul, como
requisito obrigatório para obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Joel Vicente Ciapparini
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Rafael Dallegrave Conrado
Universidade de Caxias do Sul - UCS

AGRADECIMENTOS

Declaro meus agradecimentos:

Aos meus pais, Joel e Flora, por todo incentivo e apoio.

A minha namorada Jordana, pelo companheirismo e compreensão ao longo do tempo dedicado na realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann, pelos seus ensinamentos, amizade e dedicação ao me orientar no desenvolvimento deste trabalho.

À empresa MGA, por permitir e apoiar a realização do estudo em seu ambiente fabril.

Aos colegas de trabalho, pelo auxílio na realização dos ensaios experimentais.

A UCS, pela disponibilidade de seus laboratórios.

A todos os demais professores e colaboradores do curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul.

RESUMO

Neste trabalho, buscou-se analisar, avaliar e compreender os tipos de desgastes em ferramentas de metal duro revestido no processo de torneamento do aço inoxidável austenítico CF8M. Com os avanços tecnológicos na indústria, novas ferramentas foram desenvolvidas a fim de proporcionar melhoria na produção. Os desgastes precoces das ferramentas ocasionam a perda de produção por troca de inserto e perdas significativas na qualidade das peças. Por isso, busca-se cada vez mais compreender os mecanismos de desgastes das ferramentas para aplicá-las da maneira correta, garantindo a melhoria contínua dos processos de usinagem. No ambiente de produção da fábrica, foram realizados experimentos de usinagem de três diferentes classes de insertos de metal duro. Os parâmetros de corte e o lote de peças foram estabelecidos conforme catálogos e pré-testes, sendo igualmente aplicados para todas as ferramentas. Posteriormente avaliaram-se os desgastes das ferramentas em um microscópio óptico, buscando encontrar a mais eficiente. Os desgastes predominantes foram o desgaste de flanco, ocasionado pelo mecanismo de abrasão, e o mecanismo de adesão. A classe AC5025S apresentou desgaste de flanco acentuado em uma das amostras, devido às características do material microfundido da peça possuir porosidade. As ferramentas da classe AC6030M obtiveram os maiores valores de $V_{BMáx}$ devido a ocorrência de elevada taxa de abrasão. Já a classe AC6040M apresentou comportamento constante nas duas amostras testadas, resultando nos menores valores de $V_{BMáx}$ dentre as três classes analisadas.

Palavras-chave: Usinagem. Torneamento. CF8M. Desgaste de ferramentas.

ABSTRACT

In this work, we sought to analyze, evaluate and understand the types of wear in coated carbide tools in the CF8M austenitic stainless steel turning process. With technological advances in the industry, new tools were developed in order to provide improvement in production. The premature wear of the tools causes loss of production due to insert changes and significant losses in the quality of the parts. Therefore, there is an ever-increasing search for understanding the wear mechanisms of tools in order to apply them correctly, ensuring the continuous improvement of the machining processes. In the factory's production environment, machining experiments of three different classes of carbide inserts were carried out. The cutting parameters and the batch of parts were established according to catalogs and pre-tests, being equally applied to all tools. Subsequently, the wear of the tools was evaluated under an optical microscope, seeking to find the most efficient. The predominant wears were flank wear, caused by the abrasion mechanism, and the adhesion mechanism. The AC5025S grade presents accentuated flank wear in one of the samples, due to the characteristics of the microcast material of the piece, which has porosity. AC6030M class tools obtained the highest $V_{BM\acute{a}x}$ values due to the occurrence of high abrasion rate. The AC6040M class presented a constant behavior in the two tested samples, resulting in the lowest $V_{BM\acute{a}x}$ values among the three analyzed classes.

Keywords: Machining. Turning. CF8M. Tool wear.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Identificação Cr e Ni conforme padrão ACI.	17
Figura 2 – Torneamento retilíneo cilíndrico externo	18
Figura 3 – Parâmetros de corte.....	20
Figura 4 – Classificação dos metais duros conforme Norma ISO 513 (2004)	21
Figura 5 – Exemplos de geometrias de insertos de metal duro.....	22
Figura 6 – Comparação da usinagem das principais classes de aços inoxidáveis ...	24
Figura 7 – Desgaste de flanco.....	28
Figura 8 – Desgaste de cratera.....	28
Figura 9 – Deformação plástica da aresta de corte.....	29
Figura 10 – Desgaste de entalhe	29
Figura 11 - Trinca	30
Figura 12 - Quebra.....	30
Figura 13 - Lascamento	31
Figura 14 – Critérios de desgaste de ferramenta de corte	34
Figura 15 – Comportamento do desgaste da ferramenta de corte	35
Figura 16 – Curva de vida da ferramenta	36
Figura 17 – Peça Fabricada em aço CF8M.....	38
Figura 18 – Torno CNC Romi GL 350B.....	39
Figura 19 – Suporte MTJNR 2525M 16N	40
Figura 20 – Ensaio experimentais	44
Figura 21 – Fluxograma de atividades	45
Figura 23 – Porosidade nas peças usinadas.....	48
Figura 22 – Desgastes da amostra I classe AC5025S	48
Figura 24 - Desgastes da amostra II classe AC5025S.....	49
Figura 25 - Desgastes da amostra III classe AC6030M	50
Figura 26 - Desgastes da amostra IV classe AC6030M.....	51
Figura 27 - Desgastes da amostra V classe AC6040M.....	52
Figura 28 - Desgastes da amostra VI classe AC6040M.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das ligas de aços inoxidáveis	15
Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos principais aços inoxidáveis austeníticos em temperatura ambiente.	16
Tabela 3 – Composição química do aço CF8M (%)	38
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do aço CF8M.....	38
Tabela 5 – Ferramentas atuais utilizadas no processo de torneamento externo	39
Tabela 6 – Ferramentas testadas no processo de torneamento externo	41
Tabela 7 – Parâmetros de corte utilizados	42
Tabela 8 – Amostras do ensaio experimental	43

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação dos valores de $V_{B\text{Máx}}$ entre as diferentes classes de insertos	46
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACI	<i>Alloy Casting Institute</i> (Instituto de Fundição de Ligas)
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano de Ferro e Aço)
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
CFC	Cúbica de Face Centrada
CF8M	Aço Inoxidável Austenítico Fundido
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
Co	Cobalto
Cr	Cromo
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
MGA	Metalúrgica Golden Art's
NbC	Carboneto de Nióbio
Ni	Níquel
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
TaC	Carboneto de Tântalo
TiAlN	Nitreto de Titânio-Alumínio
TiC	Carboneto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
WC	Carboneto de Tungstênio

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p	Profundidade de Corte [mm]
D	Diâmetro [mm]
f	Avanço [mm/rot]
K_F	Distância entre flanco e cratera [mm]
K_T	Profundidade da cratera [mm]
K_M	Distância do centro da cratera à aresta cortante [mm]
L_c	Percurso de corte [km]
L_f	Percurso de avanço [mm]
n	Rotação da peça [rpm]
T	Vida da ferramenta [min]
T_c	Tempo de corte [min]
VB_B	Desgaste médio do flanco [mm]
$VB_{máx}$	Desgaste máximo do flanco [mm]
VB_N	Desgaste de entalhe na aresta principal de corte [mm]
VB_c	Desgaste de entalhe na aresta secundária de corte [mm]
V_c	Velocidade de Corte [m/min]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	12
1.2 TEMA.....	12
1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	13
1.4 OBJETIVO GERAL.....	13
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DOS AÇOS INOXIDÁVEIS.....	15
2.1.1 Aços inoxidáveis austeníticos	15
2.1.2 Aços inoxidáveis austeníticos fundidos	16
2.1.3 Aço inoxidável austenítico CF8M	17
2.2 PROCESSO DE TORNEAMENTO.....	17
2.2.1 Conceito de usinagem	18
2.2.2 Parâmetros de corte.....	18
2.3 FERRAMENTAS DE METAL DURO.....	20
2.4 USINABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS	24
2.4.1 Vida útil da ferramenta.....	27
2.4.2 Tipos de desgastes em ferramentas.....	27
2.4.3 Critérios de final de vida da ferramenta	32
2.4.4 Curva de vida de ferramenta	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	37
3.1.1 Material ensaiado	37
3.1.2 Máquina Ferramenta	39
3.1.3 Ferramentas de corte atual.....	39
3.1.4 Ferramentas de corte propostas para testes.....	40

3.1.5 Parâmetros de corte	42
3.1.6 Microscópio Óptico	42
3.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1 ANÁLISES DAS DIFERENTES CLASSES DE INSERTOS	46
4.1.1 Avaliação dos desgastes	46
4.1.1.1 Classe AC5025S	47
4.1.1.1.1 <i>Amostra I</i>	47
4.1.1.1.2 <i>Amostra II</i>	49
4.1.1.2 Classe AC6030M	50
4.1.1.2.1 <i>Amostra III</i>	50
4.1.1.2.2 <i>Amostra IV</i>	50
4.1.1.3 Classe AC6040M	51
4.1.1.3.1 <i>Amostra V</i>	51
4.1.1.3.2 <i>Amostra VI</i>	52
5 CONCLUSÃO	54
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS	56
ANEXO A – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DOS INSERTOS DE METAL DURO TNMG 160412 EM-AC5025S	60
ANEXO B – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DOS INSERTOS DE METAL DURO TNMG 160412N EM AC6030M/AC6040M	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Com a crescente concorrência no mercado de trabalho, as empresas precisam criar soluções e melhorias de processos para continuar competitivas. Por isso, é fundamental para empresas do ramo metalmeccânico controlar os custos inerentes do processo de fabricação. Por exemplo, as ferramentas de corte de usinagem, pois, conforme Trent e Right (2000), o processo de usinagem é o mais utilizado em empresas desse ramo, com custos superiores a 15% do valor de todos os produtos manufaturados entre países industrializados.

Com os grandes avanços tecnológicos aplicados nas máquinas de usinagem e aperfeiçoamento das ferramentas de corte, cada vez mais pode-se desenvolver usinagens mais complexas. Assim permitindo novas aplicações, e também melhorias contínuas nos processos já existentes, visando o melhor desempenho das ferramentas, a redução de custo com ferramental e conseqüentemente o ganho de produtividade.

O desgaste das ferramentas de corte na usinagem é um fator importante de ser monitorado. É preciso analisar os desgastes dos insertos nos processos de usinagem, a fim de identificar se o uso da ferramenta está correto. Com o estudo do desgaste, pode-se encontrar a ferramenta mais adequada para determinado processo, assim reduzindo custos e ganhando produtividade.

Outro fator importante para empresas é utilizar o maquinário da melhor forma, extraíndo o melhor que ele oferece, pois muitas vezes a máquina pode ser um gargalo da linha de produção. Juntamente com isso, segundo Favaretto, Valle e Canciglieri (2009), é preciso utilizar ferramentas que possibilitem aplicação de velocidades de corte e avanço maiores, de forma a aumentar a capacidade de produção, mantendo a qualidade superficial da peça e tendo como maior desafio manter o custo sob controle.

1.2 TEMA

Estudo comparativo dos desgastes de ferramentas de corte de usinagem no processo de torneamento cilíndrico de peças fabricadas em aço inoxidável

austenítico CF8M microfundido pelo método de cera perdida, visando reduzir o tempo de usinagem.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA

Na indústria, a competitividade é fundamental para conseguir ter sucesso no mercado de trabalho. O gerenciamento dos equipamentos e processos de fabricação é muito importante para conseguir eficiência de produção, extraindo o máximo de produtividade das máquinas, assim, evitando gargalos de produção em determinado setor e/ou máquina.

O processo de usinagem é fundamental para conseguir fabricar peças acabadas. Com o desenvolvimento e melhorias contínuas dos processos industriais e equipamentos, a usinagem precisa caminhar junto ao desenvolvimento e otimização de seus processos, visando produtividade, qualidade e baixo custo.

Sendo assim, a Metalúrgica Golden Art's, conhecida como MGA, visa aperfeiçoar cada vez mais seus processos, dentre eles, a usinagem de seus componentes, para se manter competitiva no ramo de válvulas industriais e acompanhar as tendências de tecnologias.

Como a usinagem é um processo de fabricação que está presente em grande parte dos produtos da marca MGA, o fluxo de produção nesse setor é grande, gerando gargalos de produção em determinadas máquinas do setor da usinagem, como é o caso do torno CNC que produz esferas. Por essa razão, se faz necessário analisar o processo de torneamento de esferas, para avaliar possíveis melhorias de parâmetros de usinagem, bem como a troca da ferramenta utilizada no processo, visando reduzir o tempo de usinagem, mantendo o processo economicamente viável.

1.4 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é analisar os desgastes das ferramentas no processo de torneamento de esferas em aço inoxidável CF8M.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atender ao objetivo geral do trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Compreender os parâmetros de usinagem do processo de torneamento em aços inoxidáveis austeníticos;
- b) Identificar as condições atuais do processo de torneamento de esferas;
- c) Buscar na literatura científica as ferramentas com melhor desempenho no torneamento de aços inoxidáveis austeníticos;
- d) Realizar ensaios experimentais;
- e) Avaliar os desgastes; e
- e) Comparar os resultados das ferramentas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Com ampla aplicação na indústria siderúrgica, os aços inoxidáveis são uma classe de ligas metálicas que exigem adição de alguns elementos de liga em sua composição, como o Cromo, com o principal intuito de ter resistência à corrosão. Estão separados em quatro principais grupos de microestruturas, sendo elas, austenítica, ferrítica, martensítica e endurecidos por precipitação (SHACKELFORD, 2008). A Tabela 1 ilustra a classificação dos aços inoxidáveis.

Tabela 1 - Classificação das ligas de aços inoxidáveis

Tipo	Número SNU	Composição (% p)*							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
<i>Tipos austeníticos</i>									
201 ^b	S20100	0,15	5,5–7,5	1,00	16,0–18,0	3,5–5,5			
304	S30400	0,08	2,00	1,00	18,0–20,0	8,0–10,5			
310	S31000	0,25	2,00	1,50	24,0–26,0	19,0–22,0			
316	S31600	0,08	2,00	1,00	16,0–18,0	10,0–14,0	2,0–3,0		
347 ^c	S34700	0,08	2,00	1,00	17,0–19,0	9,0–13,0			
<i>Tipos ferríticos</i>									
405	S40500	0,08	1,00	1,00	11,5–14,5				0,10–0,30
430	S43000	0,12	1,00	1,00	16,0–18,0				
<i>Tipos martensíticos</i>									
410	S41000	0,15	1,00	1,00	11,5–13,0				
501	S50100	0,10 mín	1,00	1,00	4,0–6,0		0,40–0,65		
<i>Tipos endurecidos por precipitação</i>									
17-4 PH ^d	S17400	0,07	1,00	1,00	15,5–17,5	3,0–5,0		3,0–5,0	
17-7 PH	S17700	0,09	1,00	1,00	16,0–18,0	6,5–7,75			0,75–1,5

Fonte: Adaptado de Shackelford (2008).

2.1.1 Aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são amplamente utilizados na indústria mundial. Esse tipo de aço possui baixo limite de escoamento, tem alta resistência mecânica e tem elevada ductilidade à temperatura ambiente (SILVA, 2013). A Tabela 2 mostra as propriedades mecânicas dos principais aços inoxidáveis austeníticos.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos principais aços inoxidáveis austeníticos em temperatura ambiente.

Classificação AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Outros
301	0,15	2,00	1,00	16,0–18,0	6,0–8,0	0,045	0,03	...
303	0,15	2,00	1,00	17,0–19,0	8,0–10,0	0,20	0,15 mín	0,6 Mo
304	0,08	2,00	1,00	18,0–20,0	8,0–10,5	0,045	0,03	...
310	0,25	2,00	1,50	24,0–26,0	19,0–22,0	0,045	0,03	...
316	0,08	2,00	1,00	16,0–18,0	10,0–14,0	0,045	0,03	2,0–3,0 Mo

Fonte: Adaptado de Barbosa (2014).

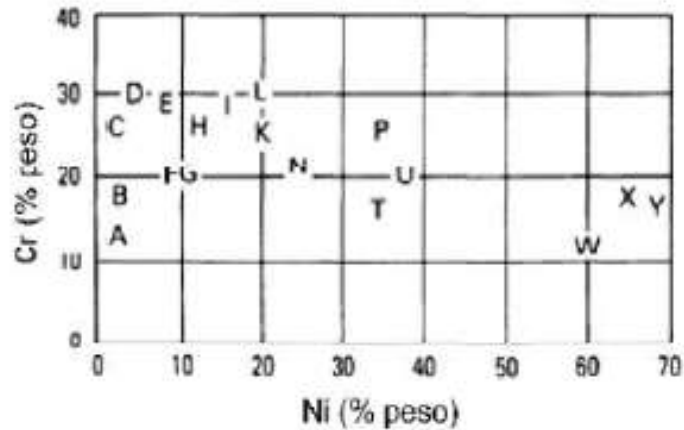
Por ter boa resistência à corrosão e oxidação, e facilidade na fabricação e limpeza, os aços inoxidáveis austeníticos são utilizados na indústria química e alimentícia (SILVA, 2013).

Para dar certas características e melhor resistência à corrosão, elementos de liga tais como cobre, molibdênio, silício, titânio e nióbio podem ser adicionados na composição química. Já com a função de melhorar a usinabilidade, enxofre e selênio podem ser adicionados (BARBOSA, 2014).

2.1.2 Aços inoxidáveis austeníticos fundidos

A identificação dos aços inoxidáveis fundidos é realizada através da interpretação de sua sigla, através da classificação Alloy Casting Institute (ACI). Desde modo, a primeira letra indica em qual meio a liga pode ser utilizada, para líquido corrosivo (C), ou para trabalhar em alta temperatura (H). A segunda letra indica quais os teores de cromo e níquel da liga, podendo ir do A ao Z, conforme a Figura 1. O terceiro caractere é formado por um número, o qual dividido por 100 indica o valor percentual máximo de carbono na liga. Caso existir outro elemento químico na liga, é adicionado um quarto caractere indicando qual é esse componente. A indicação do componente da liga é realizada pela letra inicial do elemento (por exemplo, letra “M”, sendo Molibdenio) (BARBOSA, 2014)

Figura 1 – Identificação Cr e Ni conforme padrão ACI.



Fonte: Adaptado de Barbosa (2014).

2.1.3 Aço inoxidável austenítico CF8M

O aço inoxidável CF8M está no grupo de microestruturas austeníticas, similares à classe AISI 316. A qual tem boa resistência à corrosão, principalmente por ter em sua composição cromo, níquel e molibdênio como elementos principais (BARBOSA, 2014).

Seguindo a classificação da ACI, a liga CF8M é recomendada para ambientes que necessitam resistência a corrosão (C), tem valores de 19%Cr-9%Ni (F), pode ter em sua liga no máximo 0,08% de Carbono (número 8) e tem em sua composição química o elemento molibdênio (M) (BARBOSA, 2014).

2.2 PROCESSO DE TORNEAMENTO

Processo mecânico de usinagem onde a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina, enquanto a ferramenta de corte se desloca seguindo diversas trajetórias, entrando em contato com a peça e retirando material através do atrito, assim obtendo superfícies de revolução. O formato da peça é construído conforme a trajetória percorrida pela ferramenta, podendo ser trajetória do tipo retilínea ou curvilínea. No retilíneo há o torneamento cilíndrico externo, interno, radial e o perfilamento, os quais têm como principal característica a trajetória retilínea paralela ao eixo principal de rotação da máquina que a ferramenta se desloca. A máquina para realizar o torneamento é chamada de torno (FERRARESI, 1970). A Figura 2 ilustra o torneamento retilíneo cilíndrico externo.

Figura 2 – Torneamento retilíneo cilíndrico externo



Fonte: adaptado de Freitas (2013)

As operações de torneamento podem ser classificadas em duas principais etapas, o desbaste, tendo como principal objetivo a remoção de material em elevada taxa, e o acabamento, onde o sobremetal deixado na operação de desbaste é retirado, assim garantindo a qualidade superficial da peça (MACHADO et al., 2015).

2.2.1 Conceito de usinagem

Operações de usinagem caracterizam-se em produzir cavaco ao conferir à peça, a forma ou as dimensões e acabamento, ou uma combinação desses fatores. Cavaco define-se por uma porção de material retirado da peça por meio de uma ferramenta de corte (FERRARESI, 1970).

A usinagem é um processo simples, e ao mesmo tempo complexo. Simples por ser apenas o contato da ferramenta de corte com a peça, e complexo por necessitar parametrizar diversos comandos para executar as condições ideais de corte, sendo elas, produzir conforme especificações, bons acabamentos, qualidade superficial e menos custo possível (MACHADO et al., 2015).

2.2.2 Parâmetros de corte

Para obter a superfície desejada utilizando uma máquina-ferramenta, é necessário determinar os movimentos adequados entre a peça e a ferramenta de corte. Esses movimentos podem ser de dois tipos, os que causam diretamente saída de cavaco, e os que não causam saída de cavaco diretamente (MACHADO et al., 2015).

Existem três movimentos importantes para destacar que influenciam diretamente na qualidade do torneamento, tais quais são: Velocidade de corte (V_c) [m/min], Avanço (f) [mm/rot] e Profundidade de Corte (a_p) [mm].

“A velocidade de corte (V_c) é definida por ser a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte.” (FERRARESI, 1970). A velocidade de corte pode ser calculada através da Equação 1.

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

V_c : velocidade de corte [m/min]

D : diâmetro da peça [mm]

n : rotação da peça [rot/min]

O avanço (f) é o movimento que ocorre entre a peça e a ferramenta simultaneamente com o movimento do corte da peça. A ocorrência do avanço origina o cavaco durante as revoluções (FERRARESI, 1970). O cálculo do avanço pode ser encontrado através da Equação 2.

$$f = \frac{l_f}{n t_c} \quad (2)$$

Onde:

f : avanço por rotação [mm/rot]

n : rotação da peça [rot/min]

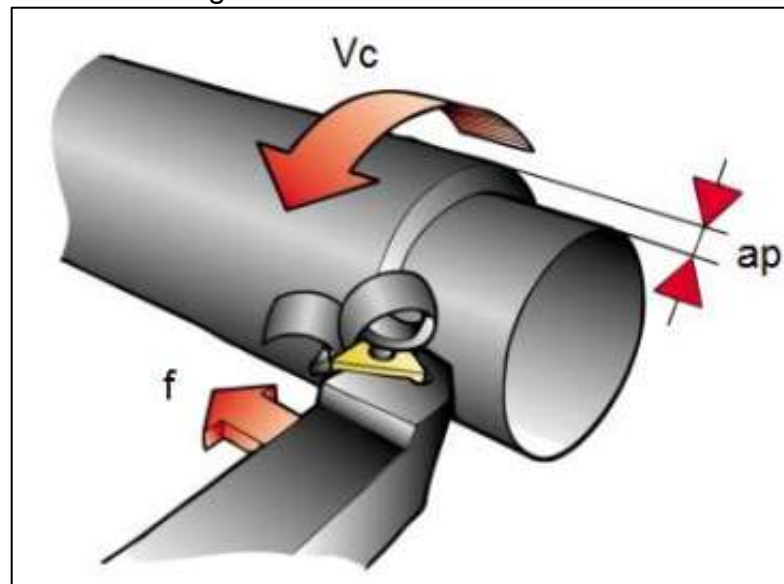
l_f : percurso de avanço [mm]

t_c : tempo de corte [min]

A profundidade de corte (a_p) é a medida na direção perpendicular ao plano de trabalho que a ferramenta penetra na peça (FERRARESI, 1970).

A Figura 3 ilustra os parâmetros de corte.

Figura 3 – Parâmetros de corte



Fonte: Adaptado de Araujo e Sousa (2017)

2.3 FERRAMENTAS DE METAL DURO

As ferramentas de metal duro surgiram por volta de 1920, na Alemanha quando o carboneto de tungstênio (WC) foi produzido em pó pela primeira vez. (MACHADO et al., 2015). São muito utilizadas na indústria, pelo fato de ter variações em sua composição. Assim, podendo oferecer boas combinações de dureza à temperatura ambiente, dureza a quente, tenacidade e resistência ao desgaste. São produzidas através da metalurgia do pó, passando por processos de compressão, sinterização, retificação entre outros. Características de resistência mecânica, dureza e tenacidade são resultado desse processo de fabricação (FERRARESI, 1970).

Basicamente as ferramentas possuem dois constituintes principais, sendo um carboneto com elevada dureza e resistência ao desgaste, tal como o carboneto de tungstênio. O outro constituinte é um elemento aglomerante do grupo do ferro, geralmente utilizado o cobalto (Co), por possuir função de aglomerar as partículas duras dos carbonetos e dar tenacidade à ferramenta (FERRARESI, 1970). Outros carbonetos podem ser utilizados para atribuir características específicas, tais como, carboneto de Titânio (TiC), carboneto de tântalo (TaC) e o carboneto de Nióbio (NbC) (REBEYKA, 2016).

A classificação dos metais duros segundo a Norma ISO 513 (2004) está representada na Figura 4.

Figura 4 – Classificação dos metais duros conforme Norma ISO 513 (2004)

Letra de identificação	Cor de identificação	Matérias a serem usinados	Grupo de aplicação	
P	Azul	Aço: Todos os tipos de aço e aço fundido, com exceção de aço inoxidável com uma estrutura austenítica.	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45
M	Amarela	Aço inoxidável: Aço inoxidável austeníticos, ferríticos e aço fundido.	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35
K	Vermelha	Ferro fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafite esferoidal e ferro fundido maleável.	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35
N	Verde	Materiais não ferrosos: Alumínio e outros materiais não ferrosos, materiais não metálicos.	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25
S	Marrom	Super ligas e titânio: Ligas especiais resistentes a altas temperaturas, baseadas em ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio.	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25
H	Cinza	Materiais com alta dureza: Aço temperado, material de aço fundido temperado, aço fundido em coquilha.	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25

A = Aumentar a velocidade de corte, aumentando a resistência ao desgaste do material cortante.
B = Aumentar o avanço, aumentando a tenacidade do material cortante.

Fonte: Adaptado de Machado et al., (2015).

A letra de identificação dos metais sempre é acompanhada de um número que informa a resistência ao desgaste e a tenacidade. Normalmente o número varia de 01 até 50, sendo que quanto maior o número, maior a tenacidade e menor a resistência ao desgaste (MACHADO et al., 2015).

Outro fator importante que classifica a aplicação das ferramentas de metal duro é o tamanho do grão na microestrutura. Quanto maior o tamanho do grão do carboneto de tungstênio, maior a tenacidade. E quanto menor o grão, maior dureza (REBEYKA, 2016).

As ferramentas de metal duro podem ser utilizadas com ou sem cobertura. Atualmente, as ferramentas de metal duro com cobertura representam aproximadamente 90% das ferramentas de corte utilizadas na indústria (SANDVIK COROMANT, 2021). O revestimento das ferramentas garante um melhor desempenho da usinagem de metais ferrosos. (MACHADO et al., 2015).

Um fator de escolha das ferramentas para evitar desgastes é o tipo de geometria. Com o avanço da tecnologia envolvida na produção de insertos, atualmente, encontra-se diversas combinações de raios, ângulos e planos para

facilitar a remoção do cavaco, conforme Figura 5. Como é na região de saída da ferramenta que os cavacos fluem, é importante ter uma superfície adequada. Grande parte dos insertos tem ângulo positivo de saída, que quando combinado com o ângulo negativo do porta-ferramentas, facilita a formação e remoção do cavaco (ESPANHOL, 2008).

Figura 5 – Exemplos de geometrias de insertos de metal duro



Fonte: adaptado de Sandvik Coromant

Conforme Fracaro (2017), o processo de revestimento pode ser realizado de duas maneiras, sendo o processo CVD (deposição química de vapor) e o processo PVD (deposição física de vapor).

Os principais revestimentos utilizados são: Carboneto de Titânio (TiC), Nitreto de Titânio (TiN), Óxido de Alumínio (Al_2O_3), Carbonitreto de Titânio (TiCN) e Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN). Esses revestimentos podem ser aplicados tanto pelo processo CVD e PVD. O processo PVD garante a mesma tenacidade do substrato, sendo que no processo CVD isso não ocorre (MARCONDES, 2008).

A aplicação de mais de um revestimento em determinado inserto é realizada, pois aumenta a resistência ao desgaste da última camada, a qual entra em contato com a peça, deixando o núcleo da ferramenta com boa tenacidade. Essa técnica também facilita a utilização da mesma ferramenta de corte para operações de desbaste e acabamento (MARCONDES, 2008).

Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2008), geralmente a primeira camada revestida, logo acima do substrato, é composta por TiC ou TiCN, que também pode ser a única camada de revestimento do inserto. As ferramentas com duas camadas

de revestimento, na maioria das vezes, são compostas pela primeira camada de TiC ou TiCN, seguido da segunda camada de Al_2O_3 ou de TiN. Já nas ferramentas que possuem três camadas de revestimento, geralmente tem uma última camada de TiN que recobre o revestimento intermediário de Al_2O_3 , o qual está recobrindo a camada primária de TiC ou TiCN.

As características de cada tipo de revestimento estão listadas abaixo:

- TiC: possui alta adesão sobre bases de metal duro. Possui excelente resistência ao desgaste, pelo fato de ser um revestimento bastante duro (MACHADO et al., 2015).
- TiN: proporciona baixos coeficientes de atrito entre a ferramenta e o cavaco. Por isso, geralmente é utilizado como a última camada de revestimento. Por não possuir tendência de adesão aos materiais ferrosos, ajuda a diminuir os comprimentos de contato da ferramenta com o cavaco (MACHADO et al., 2015). A camada de TiN usual é de 5 a 7 μm , dando uma cor dourada (STEMMER, 1993).
- Al_2O_3 : tem ótima resistência ao desgaste por cratera. Possui alta resistência à ataques químicos e à oxidação. Apresenta baixa resistência a choques térmicos e mecânicos, e tem limitada aderência sobre bases de metal duro (STEMMER, 1993).
- TiCN: apresenta boa resistência ao desgaste do flanco, e tem resistência ao desgaste de cratera, devido ao TiC e ao TiN, respectivamente. Bastante utilizado em aplicações de usinagem em ferros fundidos.
- TiAlN: possui elevada resistência térmica e resistência à oxidação. Quando esse revestimento oxida, ocorre uma camada superficial de Al_2O_3 , assim aumentando a resistência à oxidação e à difusão (apud CARVALHO, 2019).

Ferramentas revestidas com TiAlSiN pelo processo PVD possuem propriedades que contribuem para reduzir a taxa de desgaste da ferramenta em altas temperaturas (HE; LI; JI; LIU; ZHOU; JIANMINCHEN, 2016).

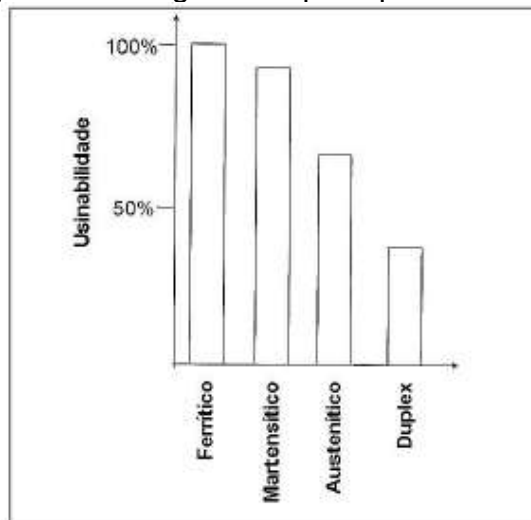
O revestimento TiB_2 possui uma boa condutividade térmica e elétrica, por isso é utilizado como revestimento em ferramentas de metal duro. Sua superfície lisa também contribui para ter bons resultados na usinagem com insertos de metal duro (HUANG; SUN; TU, 2019; SUMITOMO 2016). Também é uma característica desse tipo de revestimento ter propriedades auto lubrificantes na zona de corte, pelo fato de criar filmes através de sua interação. Por outro lado, os revestimentos de TiB_2 possuem alta dureza e tensões residuais, assim tornando o revestimento frágil por ter baixa adesão do substrato (CHOWDHURY; BOSE; FOX-RABINOVICH; VELDHUIS, 2021).

2.4 USINABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

A usinabilidade dos aços depende das propriedades mecânicas, composição química, tipo de microestrutura, da quantidade de partículas duras, e também das condições empregadas no processo de usinagem (BARBOSA, 2014). Por isso, Trent e Wright (2000) comentam que a usinabilidade não é uma propriedade do material, e sim a maneira em que o material se comporta durante o corte.

A usinagem dos aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos são um pouco mais fáceis quando comparada aos inoxidáveis austeníticos e duplex, conforme ilustrado na Figura 6. Isso ocorre, pois quanto mais elementos de liga o aço possui, mais as ferramentas se desgastam, assim reduzindo a qualidade superficial da peça usinada (BARBOSA, 2014).

Figura 6 – Comparação da usinagem das principais classes de aços inoxidáveis



Fonte: Adaptado de Machado et al.,(2015).

Para melhorar a usinabilidade dos aços inoxidáveis é utilizada a adição de elementos de liga na composição química do material, com o intuito de reduzir a ductilidade, assim provocando a quebra mais fácil do cavaco. O elemento mais utilizado para exercer essa função é o enxofre (MACHADO et al., 2015; (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem três principais características que influenciam diretamente na usinabilidade, tais quais são:

- Alto limite de resistência à tração;
- Alta taxa de encruabilidade; e
- Alta ductilidade.

Por ter essas características, esse material tem tendência de formar aresta postiça de corte na ferramenta quando submetido às operações comuns de usinagem. Sendo assim, durante o processo de corte, os cavacos removidos exercem altas pressões na aresta de corte. Pelo fato dos aços inoxidáveis possuírem baixa condutividade térmica, ele não dissipa o calor ao longo do processo de usinagem. Com isso, as altas pressões geradas pelos cavacos, juntamente com o aquecimento da região do corte, comprometem a vida útil da ferramenta (MACHADO et al., 2015; TRENT; WRIGHT, 2000).

Para obter boa qualidade superficial e produtividade na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos, combinado com uma satisfatória vida útil da ferramenta, Fernández-Abia et al. (2011) afirma que são realizados estudos fixando os valores de avanço e de profundidade de corte, enquanto a velocidade de corte é otimizada. Geralmente, para aplicações em aços austeníticos é utilizada velocidade de corte entre 150 e 350 m/min.

A usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos cria adesão e produz arestas postiças, assim criando cavacos duros e longos, levando a desgastes do tipo entalhe, flanco, cratera e deformação plástica. Por isso, utilizar arestas vivas com geometria positiva ajuda na usinabilidade dessa classe de material. (SANDVIK, 2021; NAVES, 2013). Segundo análise de Marques (2014), na usinagem do aço inoxidável austenítico AISI 304, utilizando o inserto da classe de metal duro ISO M, modelo TNMG160404R-FM do fabricante ZCCT-CT com os seguintes parâmetros de corte: $V_c = 200$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot e $a_p = 0,5$ mm, os mecanismos de desgaste que prevaleceram foram a adesão do material na superfície da ferramenta e o desgaste por entalhe.

Segundo Barbosa (2014), na usinagem de aços inoxidáveis, o aumento do avanço (f) influencia diretamente no aumento das forças de usinagem. Isso se dá, devido ao aumento da área de cisalhamento. Por outro lado, o aumento do avanço (f), em estruturas cristalinas CFC, que é o caso dos aços inoxidáveis austeníticos, reduz a deformação do material usinado durante o processo de usinagem. Para a usinagem dessa classe de aço, é recomendado que para velocidades de corte maiores o avanço deve ser menor, enquanto para baixas velocidades de corte, são necessários maiores avanços (GOMES, 1996).

No torneamento a seco do aço AISI 304 utilizando ferramentas de metal duro com coberturas multicamadas TiC, TiCN, Al_2O_3 e TiN, o desgaste de flanco diminui com o aumento da velocidade de corte (V_c) limitada até 180 m/min. O aumento da velocidade de corte diminui a espessura do cavaco e a área de contato entre cavaco e ferramenta (KORKUT et. Al, 2004).

É fundamental o conhecimento do material a ser usinado, bem como as condições de usinagem de determinada ferramenta relacionada ao material usinado, assim melhorando o desempenho econômico juntamente com a qualidade superficial do produto. Para ferramentas de metal duro na usinagem de aços inoxidáveis, é indicado o uso de fluido de corte para prolongar a vida da ferramenta (SOUZA, 2006).

Segundo Santos, Abrão e Santos (2020), insertos de metal duro com revestimento TiCN/ Al_2O_3 /TiN retardam a perda de material. A camada final de TiN possui um baixo coeficiente de atrito, assim reduzindo o contato entre a peça e o cavaco, resultando em um retardamento do desgaste de flanco. Já o inserto com revestimento de TiAl, com alto teor de Al, pode se transformar em um novo composto Al_2O_3 , o qual tem afinidade química com o Cr_2O_3 , assim promovendo adesão e ocasionando maior desgaste do inserto.

Santos, Abrão e Santos (2020) também afirmam, que o inserto com cobertura de TiCN/ Al_2O_3 /TiN por adesão CVD, obteve bons resultados de vida de ferramenta. Os parâmetros fixados foram avanço (f) de 0,15 mm/rev e profundidade de corte (a_p) de 0,7 mm, enquanto a velocidade de corte (V_c) foi variando em 200 m/min, 250 m/min e 300 m/min em um tempo de corte de 10 minutos. Outro fator que contribuiu para retardar o desgaste da ferramenta foi a lubri-refrigeração sob alta pressão. Para Habak e Lebrun (2011), a taxa de encruamento reduziu consideravelmente na

utilização de alta pressão do jato de fluido de corte. Isso ocorreu pelo fato do fluido reduzir a temperatura de usinagem.

2.4.1 Vida útil da ferramenta

O termo vida da ferramenta é utilizado para definir o tempo em que a ferramenta pode trabalhar até sua capacidade de corte ficar impossibilitada, de acordo com um critério de final de vida pré determinado. Geralmente a vida da ferramenta é expressa em minutos, e também pode ser definida pelo percurso de corte (L_c), em quilômetros, ou pelo percurso de avanço (L_f), em milímetros, conforme equações 3 e 4 abaixo.

$$L_c = \frac{V_c T}{1000} \quad (3)$$

$$L_f = f n T \quad (4)$$

Onde:

f: avanço por rotação [mm/rot]

n: rotação da peça [rot/min]

T: vida da ferramenta [min]

V_c : velocidade de corte [m/min]

2.4.2 Tipos de desgastes em ferramentas

Cerca de 20% da vida de uma ferramenta de corte de usinagem é representada por desgastes ou por quebras. Esses desgastes influenciam diretamente na qualidade superficial da peça, no custo final do produto e na precisão dimensional (ALMEIDA, 2009). O desgaste de uma ferramenta de metal duro é a relação entre vários fenômenos distintos, dependendo da natureza do material usinado e das condições de usinagem (FERRARESI, 1970).

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

- a) Desgaste Frontal (ou de flanco): é o tipo de desgaste mais comum, ocorrendo em todas as operações de usinagem, pois é causado através do contato entre a ferramenta e a peça. Causa deterioração do acabamento

superficial e alterações no dimensional da peça. É impulsionado pelo aumento da velocidade de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008). O desgaste de flanco está ilustrado na Figura 7.

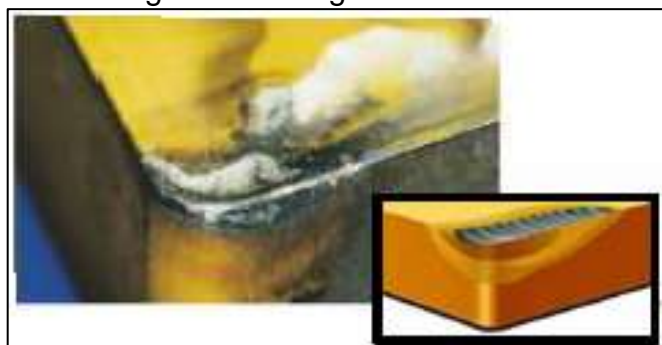
Figura 7 – Desgaste de flanco



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2021)

b) Desgaste de cratera: é causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco, por isso acontece na superfície de saída da ferramenta. Geralmente não ocorre quando o material da peça é frágil. O revestimento de Al_2O_3 nas ferramentas de metal duro é bastante eficiente para evitar esse tipo de desgaste. Com o crescimento do desgaste de cratera, a ferramenta pode quebrar quando esse desgaste se encontra com o desgaste frontal, conforme Figura 8 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Figura 8 – Desgaste de cratera

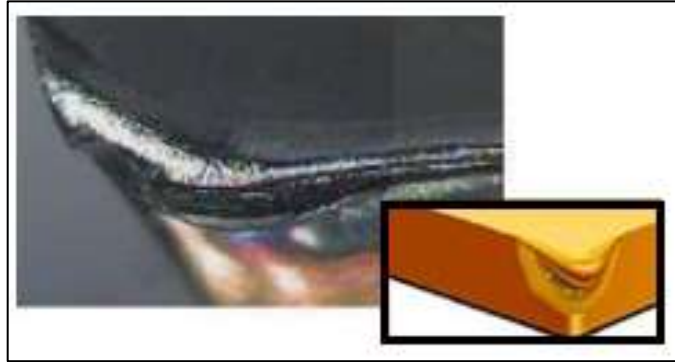


Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2021)

c) Deformação plástica da aresta de corte: a associação da alta temperatura com a pressão aplicada na ponta da ferramenta gera a deformação plástica, conforme Figura 9. Essas deformações provocam

dificuldade do controle de cavaco e redução da qualidade superficial da peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

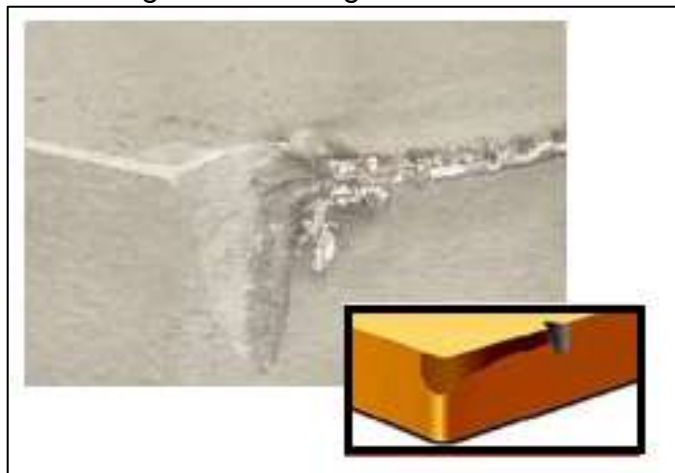
Figura 9 – Deformação plástica da aresta de corte



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2021)

d) Desgaste de entalhe: ocorre nos dois extremos de contato entre a peça e a superfície de folga da ferramenta. A ação oxidante da atmosfera e as rebarbas produzidas nos externos dos cavacos influenciam na ocorrência desse desgaste. É bastante prejudicial ao acabamento superficial da peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008). A Figura 10 representa o desgaste de entalhe.

Figura 10 – Desgaste de entalhe

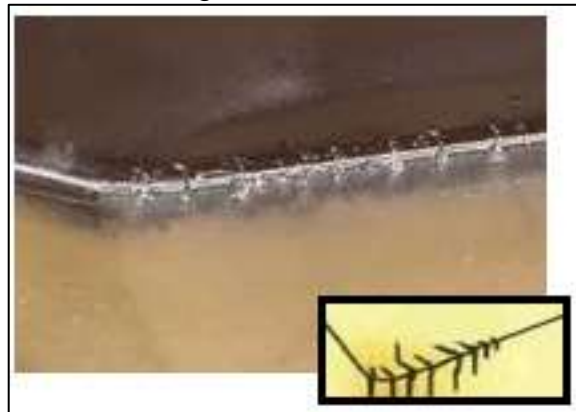


Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2021)

e) Trincas: ocorrem devido à variação de temperatura e pela variação dos esforços mecânicos. As trincas são geradas perpendicularmente à aresta de corte quando ocorrem por variação térmica. Quando a origem é mecânica, a trilha ocorre paralela à aresta de corte. Operações com corte interrompido,

porta ferramenta pouco tenaz e deficiência de fluido de corte, são fatores que contribuem diretamente na formação de trincas. O crescimento das trincas pode levar à quebra da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008). A Figura 11 mostra uma trinca perpendicular.

Figura 11 - Trinca



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2021)

f) Quebra: ocorre com o crescimento dos desgastes e das avarias citadas anteriormente. Outros fatores podem levar à quebra, tais como, ferramenta com dureza muito elevada, cargas excessivas sobre a ferramenta, operações com corte interrompido, raio de ponta pequeno e paradas rápidas da ferramenta de corte. A quebra, além de danificar a aresta de corte, pode danificar o inserto como um todo, o porta ferramenta e a peça que está sendo usinada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008). A Figura 12 ilustra uma quebra.

Figura 12 - Quebra



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2021)

g) Lascamento: é uma avaria ocasionada por excesso de esforços mecânicos e elevadas temperaturas. As maiores causas são: alta dureza da ferramenta para a aplicação; operações com corte interrompido e vibrações máquina-ferramenta. A identificação dos lascamentos se dá pelo fato de partículas relativamente grandes se soltarem da ferramenta, conforme a Figura 13 (STEMMER, 1993 e DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Figura 13 - Lascamento



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2021)

Diversas são as causas dos desgastes e avarias nas ferramentas de corte. Algumas delas são:

- a) Abrasão mecânica: é uma das principais causas de desgaste das ferramentas de corte. Os desgastes de flanco e de cratera podem ser gerados pela abrasão mecânica. A presença de partículas duras no material da peça e a temperatura de corte incentivam a ocorrência da abrasão. Por isso, ferramentas com maior dureza a quente tendem a ser mais resistentes ao desgaste por abrasão (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).
- b) Aderência: no contato de duas superfícies metálicas sofrendo carga mecânica, baixa temperatura e baixa velocidade de corte, forma-se um extrato metálico que no momento final do contato ocorre rompimento de um dos materiais. Sendo assim, as partículas do metal rompido migram para a superfície do outro material formando o desgaste chamado aresta postiça. A aderência também influencia da formação do desgaste de entalhe (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).
- c) Difusão: é a transferência de átomos de um metal para o outro gerado pela alta temperatura na região de corte. A relação físico-química da

ferramenta de corte e do material usinado está diretamente ligada na ocorrência da difusão. Por isso, combinações de tipos de insertos e revestimentos são importantes. A difusão geralmente ocasiona o desgaste por cratera, pelo fato que na superfície de saída da ferramenta a temperatura é alta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

d) Oxidação: a presença de ar e água no processo, juntamente com altas temperaturas, gera um óxido poroso na superfície da ferramenta, assim ocasionando a oxidação. Geralmente ocorre nas extremidades do contato cavaco-ferramenta, portanto, é uma possível causa do desgaste de entalhe (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

2.4.3 Critérios de final de vida da ferramenta

É importante definir até quando uma ferramenta de corte pode ser útil, para evitar possíveis falhas e gastos excessivos nos processos de usinagem. Por isso, é preciso analisar quando a ferramenta perde suas características operacionais para efetuar a troca ou a afiação (AMORIM, 2002). Ao longo da usinagem a ferramenta vai se desgastando e gerando variações no processo, tais como, alterações dimensionais da peça, pior acabamento superficial e aumento do esforço de corte. Por isso, é importante escolher um critério de final de vida da ferramenta (STEMMER, 1993).

Segundo Stemmer (1993), pode-se citar como critérios do fim de vida da ferramenta:

- a) Falha completa da ferramenta;
- b) Falha preliminar da ferramenta;
- c) Largura da marca de desgaste;
- d) Vibrações intensas da peça ou da ferramenta;
- e) Profundidade de cratera KT;
- f) Deficiência no acabamento superficial;
- g) Formação de rebarbas;
- h) Variação na forma dos cavacos;
- i) Alteração das dimensões da peça;
- j) Força de corte, torque ou potência;
- k) Aumento da força de avanço; e

- l) Aumento da temperatura do gume.

A análise dos desgastes pode ser pelo método direto ou indireto. O método direto é aplicado através da medição da geometria da ferramenta com equipamentos óticos, tais como, microscópio e lupa. Já o método indireto baseia-se nos valores obtidos por meio das variáveis do processo, como por exemplo, vibração, temperatura, emissão acústica e também avalia a relação entre o desgaste e os parâmetros do processo (ALMEIDA, 2009).

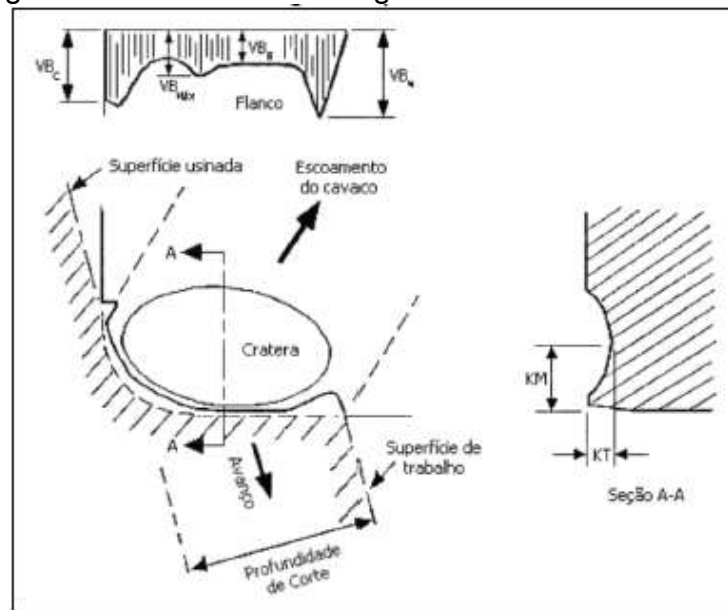
A norma ISO 3685 (1993) estabelece ensaios de usinabilidade para determinar o tempo de vida da ferramenta de corte. O tempo é expresso pela letra T, e é o período no qual a ferramenta trabalha até gerar um defeito crítico.

Segundo a norma ISO 3685 (1993), os critérios de fim da vida adotados nas ferramentas de metal duro são:

- a) Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3 \text{ mm}$;
- b) 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;
- c) Profundidade da cratera (KT), $KT = 0,06+0,3f$, (onde f é o avanço);
- d) Distância frontal entre cratera e flanco, $KF=0,02 \text{ mm}$; e
- e) Falha catastrófica.

A Figura 14 mostra como é realizada as medições dos desgastes conforme a norma ISO 3685 (1993).

Figura 14 – Critérios de desgaste de ferramenta de corte



Fonte: adaptado de ISO 3685 (1993)

Onde:

VB : largura da marca do desgaste [mm]

VB_B : desgaste médio do flanco [mm]

$VB_{máx}$: desgaste máximo do flanco [mm]

VB_N : desgaste de entalhe na aresta principal de corte [mm]

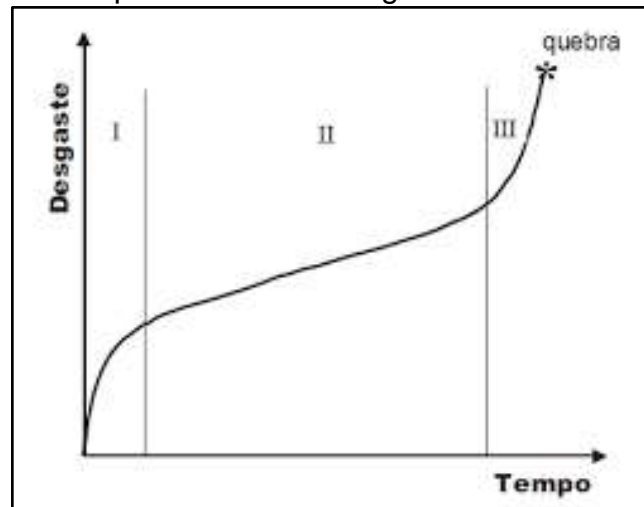
VB_C : desgaste de entalhe na aresta secundária de corte [mm]

KT : profundidade da cratera [mm]

KM : distância do centro da cratera à aresta cortante [mm]

A evolução dos desgastes das ferramentas de usinagem até chegar ao final da vida geralmente segue um padrão de comportamento, o qual está demonstrado na Figura 15 (MACHADO et al., 2015).

Figura 15 – Comportamento do desgaste da ferramenta de corte



Fonte: adaptado de Machado et al (2015)

A análise é realizada identificando três estágios.

O estágio I ocorre no início do corte, quando a ferramenta sofre um desgaste precipitado em função do processo. Nesse estágio, a cunha cortante está se adequando à condição de corte, por isso o desgaste. Já no final desse primeiro estágio, a curva sofre uma inflexão (MACHADO et al., 2015).

No estágio II o desgaste é estabilizado, ocorrendo uma taxa de desgaste praticamente constante ao longo do tempo (MACHADO et al., 2015).

No início do estágio III, a curva sofre outra inflexão, acusando um aumento no desgaste da ferramenta. Nesse estágio ocorre a quebra da ferramenta, por consequência das elevadas temperaturas e tensões do processo (MACHADO et al., 2015).

2.4.4 Curva de vida de ferramenta

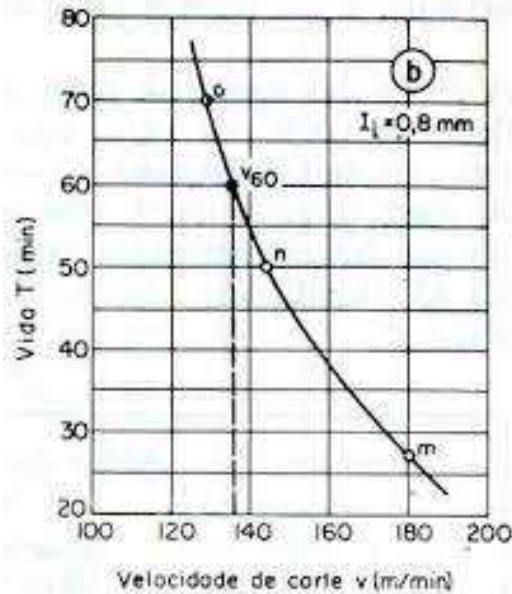
A curva de vida de uma ferramenta tem o objetivo de fornecer a vida da ferramenta em função da velocidade de corte. Para analisar essa curva, é necessário construir gráficos auxiliares, monitorando o desgaste das ferramentas para diferentes velocidades e tempos de trabalho, com determinadas condições de usinagem (avanço, profundidade de corte) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

O parâmetro de usinagem que mais influencia sobre a vida da ferramenta é a velocidade de corte (STEMMER, 1993). A velocidade é responsável pelo aumento

da temperatura na região da formação dos cavacos, assim acelerando os desgastes na ferramenta (MACHADO et al., 2015).

A Figura 16 mostra a curva de vida (T) da ferramenta em função da velocidade de corte (V_C).

Figura 16 – Curva de vida da ferramenta



Fonte: adaptado de Stemmer (1993).

O cálculo da curva de vida da ferramenta é realizado utilizando a equação 5, conhecida como Equação de Taylor.

$$T = KV_C^{-x} \quad (5)$$

Onde:

T: vida da ferramenta [min]

V_C : velocidade de corte [m/min]

K: constante dependente da condição de usinagem

x: constante dependente da condição de usinagem

As constantes K e x variam conforme o material da peça e da ferramenta, a geometria da peça, o fluido de corte e o critério de fim de vida da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo tem a finalidade de mostrar a metodologia e os materiais que serão utilizados no desenvolvimento deste trabalho para alcançar os objetivos já propostos, levando em consideração o referencial teórico e os recursos disponíveis.

Foram levantados todos os dados necessários do atual processo de torneamento das esferas, bem como os dados necessários para os ensaios experimentais de usinagem, visando testar novas ferramentas para essa aplicação. Também se realizou a análise das ferramentas de corte de metal duro utilizadas, dos parâmetros de usinagem que foram aplicados e das características da máquina CNC.

Os ensaios foram realizados no setor de usinagem da empresa MGA, localizada em Veranópolis – RS, a qual fornece soluções de válvulas para diversos setores.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os materiais e equipamentos utilizados para realização dos experimentos deste trabalho estão especificados a seguir.

3.1.1 Material ensaiado

O material ensaiado é uma peça de linha de produção, denominada uma esfera, produzida através do método de cera perdida (microfusão). Possui dureza na faixa de 180 e 230 HB. As peças são produzidas seguindo um rigoroso controle de qualidade, a fim de garantir um produto de excelente qualidade e segurança.

A peça ensaiada faz parte da estrutura de uma válvula industrial, sendo um componente de grande importância para garantir o correto funcionamento da válvula. Por isso, na etapa de usinagem é fundamental ter alto controle dimensional e de acabamento superficial.

A Tabela 3 e Tabela 4 mostram, respectivamente, a composição química e as propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico CF8M segundo a Norma ASTM (2018).

Tabela 3 – Composição química do aço CF8M (%)
Elemento, % (máximo, exceto onde o intervalo é fornecido)

Material	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo
CF8M J92900	0,08	1,5	1,5	0,04	0,04	18,0-21,0	9,0-12,0	2,0-3,0

Fonte: adaptado de ASTM (2018)

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do aço CF8M

Material	Resistência à tração mínima. Ksi [Mpa]	força de rendimento mínima,(A) ksi [Mpa]	Alongamento em 2 pol. ou 50 mm,(B) min, %
CF8M J92900	80 [485]	30 [205]	30

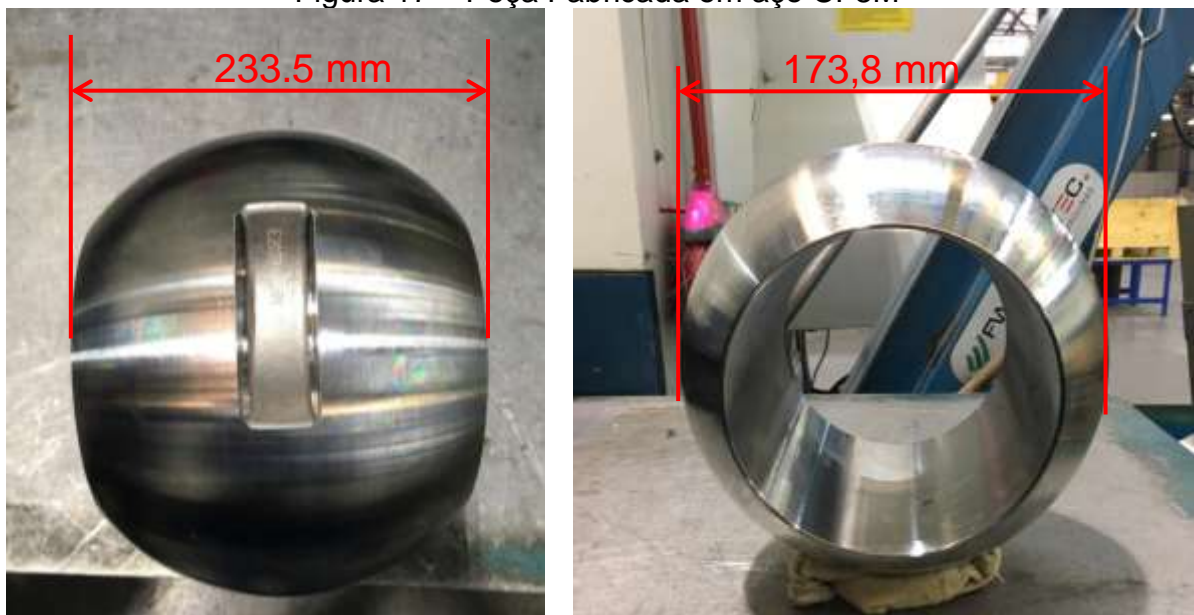
A: Determinado pelo método de deslocamento de 0,2%.

B: Quando as barras de teste ICI são usadas em testes de tração, conforme previsto na especificação A985 / A985M, o comprimento do calibre para a proporção do diâmetro da seção reduzida deve ser de 4 para 1.

Fonte: adaptado de ASTM (2018)

A Figura 17 ilustra o modelo da peça, na qual foi realizado o processo experimental de usinagem de torneamento externo.

Figura 17 – Peça Fabricada em aço CF8M



Fonte: Autor (2021)

3.1.2 Máquina Ferramenta

A realização dos ensaios experimentais foi em um torno CNC horizontal, fabricado pela Romi, modelo GL350B, o qual possui duas placas (esquerda e direita), com motor de potência de 25 kW e 22 kW, respectivamente. A rotação máxima do eixo esquerdo é de 5000 rpm e do direito é de 6000 rpm. O torno CNC possui comando de programação FANUC e está ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Torno CNC Romi GL 350B



Fonte: Romi (2021)

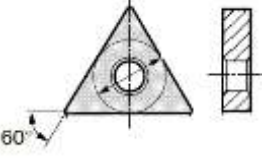
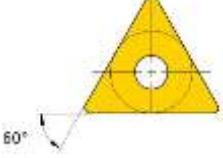
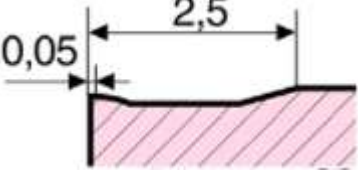

3.1.3 Ferramentas de corte atual

As ferramentas de metal duro utilizadas no atual processo de torneamento das esferas estão descritas na Tabela 5. O anexo A contém informações sobre o revestimento do inserto TNMG 160412N EM-AC5025S (amostra I e amostra II) utilizado na operação de desbaste.

Tabela 5 – Ferramentas atuais utilizadas no processo de torneamento externo

	Desbaste Externo	Acabamento Externo
Código	TNMG 160412N EM-AC5025S	TNMG 160408 MJ VP10RT
Imagem		

(Continuação)

	Desbaste Externo	Acabamento Externo
Classe	AC5025S	VP10RT
Deposição	PVD	PVD
Formato		
Quebra cavaco	EM 	MJ 
Raio de ponta	1,2	0,8

Fonte: autor (2021)

Para a fixação da ferramenta de desbaste é utilizado um suporte código MTJNR 2525M 16N, o qual está ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Suporte MTJNR 2525M 16N



Fonte: World Tools (2021)

3.1.4 Ferramentas de corte propostas para testes

As informações das ferramentas de metal duro testadas no procedimento experimental estão descritas na Tabela 6.



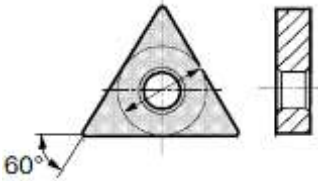
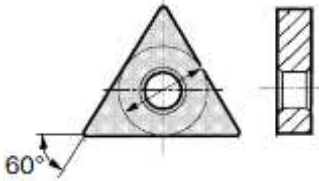
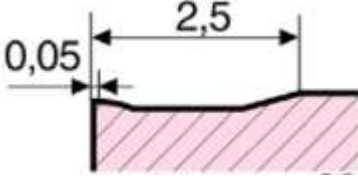
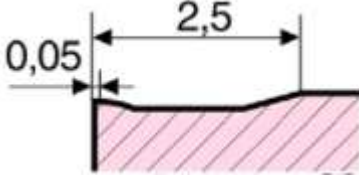
Ambas as ferramentas foram utilizadas na operação de desbaste externo das esferas e são da classe M, sendo indicadas para a usinagem de aços inoxidáveis austeníticos.

A diferença entre as duas ferramentas é o tipo do revestimento. O revestimento composto por TiB_2 da classe AC6030M fornece melhor desempenho para evitar lascamentos e melhora a resistência a adesão. É produzido através da técnica CVD. Já a classe AC6040M é composta pelo revestimento multicamadas $TiAlSiN$, melhorando a resistência ao desgaste de flanco e a oxidação. É bastante resistente ao calor gerado na usinagem e é produzido pelo processo PVD.

O tipo do quebra cavaco das duas ferramentas é o mesmo, sendo o tipo EM. Um modelo desenvolvido especialmente para operações de desbaste.

O anexo B mostra as informações sobre os inserts TNMG 160412N EM AC6030M (amostra III e amostra IV) e o TNMG160412N EM AC6040M (amostra V e amostra VI).

Tabela 6 – Ferramentas testadas no processo de torneamento externo

	Desbaste Externo	Desbaste Externo
Código	TNMG 160412N EM AC6030M	TNMG 160412N EM AC6040M
Imagem		
Classe	AC6030M	AC6040M
Revestimento	TiB_2	$TiAlSiN$
Deposição	CVD	PVD
Formato		
Quebra cavaco	EM 	EM 
Raio de ponta	1,2	1,2

3.1.5 Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte utilizados foram os mesmos para as três ferramentas analisadas, a atual e as duas testadas. As definições desses parâmetros foram de acordo com os valores recomendados pelos fabricantes e por pré-testes já realizados na produção dessa linha de peças. A Tabela 7 representa os parâmetros de corte utilizados.

Tabela 7 – Parâmetros de corte utilizados

Parâmetros	Velocidade de corte (V_c) [m/min]	Avanço (f) [mm/rot]	Profundidade de corte (a_p) [mm]
Insertos			
TNMG 160412N EM AC5025S	140	0,18	3,00
TNMG 160412N EM AC6030M			
TNMG 160412N EM AC6040M			

Fonte: Autor (2021)

3.1.6 Microscópio Óptico

Para analisar os desgastes dos insertos utilizados no procedimento experimental através do método direto, foi utilizado um microscópio óptico. Essa análise ocorreu no laboratório de usinagem da Universidade de Caxias do Sul. As seis ferramentas testadas passaram por uma análise no microscópio, com imagens aumentadas trinta vezes para visualização dos mecanismos de desgastes. Também foi realizada a medição do desgaste de flanco $V_{BMáx}$.

3.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS







O procedimento experimental foi realizado no atual processo de torneamento de esferas, sendo executado no ambiente da linha de produção das peças. O foco foi na operação de desbaste externo da peça representada na Figura 17, pois é a operação que necessita de mais trocas de insertos.

A variável de entrada foi somente o tipo de cobertura que o inserto de metal duro possui. Os parâmetros de corte, fluido refrigerante, máquina-ferramenta, material da peça, geometria da ferramenta e fixação foram os mesmos para todas as ferramentas.

A análise dos desgastes foi realizada no atual inserto utilizado na operação de desbaste, bem como nas duas ferramentas testadas para essa aplicação. Foi considerada a fundamentação teórica apresentada, para obter melhores escolhas, assim buscando possíveis melhorias no processo do torneamento das esferas, visando melhor desempenho das ferramentas, melhorar a produtividade e reduzir o custo com insertos.

Os testes das ferramentas de metal duro deram-se através da usinagem de um lote de sete peças para cada gume de corte das três classes de insertos testadas, tendo como critério de fim de vida da ferramenta a qualidade superficial e precisão dimensional da peça usinada. O procedimento experimental foi realizado com duas amostras de cada classe, conforme Tabela 8. Foi utilizada uma aresta de corte de cada inserto (circulado em vermelho), totalizando seis arestas analisadas. A base para o determinado lote de peças analisado, bem como os critérios de fim de vida, parte do atual padrão adotado no processo de torneamento das esferas.

Tabela 8 – Amostras do ensaio experimental

AC5025S		AC6030M		AC6040M	
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
					

Fonte: Autor (2021)

Após a fixação da peça no torno, utilizaram-se os parâmetros de usinagem conforme Tabela 7 para efetuar a usinagem da peça ilustrada na Figura 17. A programação do torno para a operação de desbaste consta com um passe no diâmetro externo, retirando três milímetros de material, no sentido longitudinal ao longo de 89 mm, conforme ilustrado na Figura 20. O tempo de contato da ferramenta com cada peça é de dois minutos e quarenta e dois segundos. Cada aresta de corte

totalizou dezoito minutos e cinquenta e quatro segundos de movimento de corte ao longo das sete peças usinadas.

Figura 20 – Ensaaios experimentais



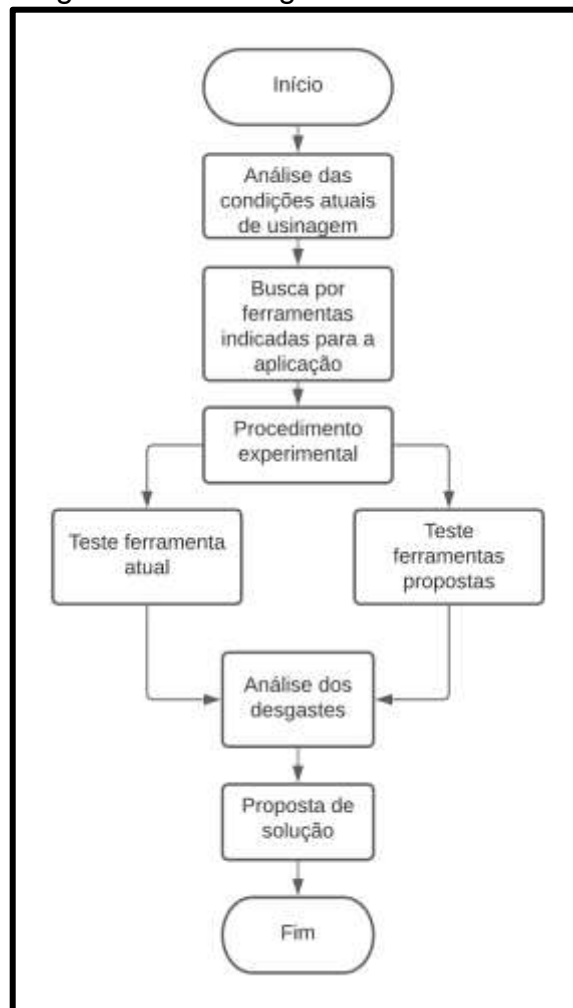
Fonte: Autor (2021).

Os insertos utilizados no procedimento experimental foram analisados posteriormente em um microscópio óptico no laboratório de usinagem da Universidade de Caxias do Sul, para mensurar os desgastes.

A análise de cada amostra no microscópio óptico constou com imagens ampliadas trinta vezes para identificação dos mecanismos de desgastes presentes. Também foi realizado a medição dos valores de desgaste de flanco máximo ($V_{BMáx}$).

A Figura 21 mostra o fluxograma das atividades realizadas.

Figura 21 – Fluxograma de atividades



Fonte: Autor (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

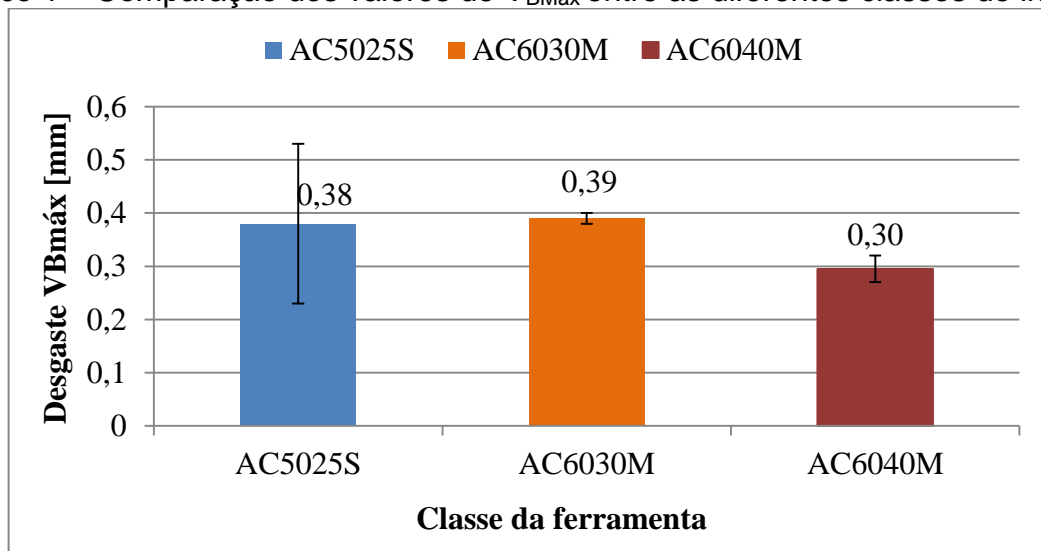
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através do procedimento experimental de torneamento cilíndrico externo realizado no setor de usinagem da empresa MGA.

4.1 ANÁLISES DAS DIFERENTES CLASSES DE INSERTOS

4.1.1 Avaliação dos desgastes

Os resultados da comparação dos valores de $V_{B\text{Máx}}$ entre as diferentes classes dos insertos de metal duro, estão representados no Gráfico 1. Esses valores representam uma média entre as duas amostras de cada tipo de classe de revestimento. O tempo de contato da ferramenta com a peça foi igual para todas as ferramentas testadas, sendo de 2,7 minutos para cada peça usinada, totalizando 18,9 minutos de contato para as sete peças produzidas.

Gráfico 1 – Comparação dos valores de $V_{B\text{Máx}}$ entre as diferentes classes de insertos



Fonte: Autor (2021).

Baseado na análise do Gráfico 1, foi possível avaliar que a classe AC6040M obteve um melhor desempenho perante as classes AC5025S e AC6030M, quando feito a comparação dos valores de $V_{B\text{Máx}}$. A classe AC5025S obteve o maior desvio padrão entre os três tipos de ferramentas testados, afirmando diferentes

comportamentos entre as duas amostras analisadas. O desvio padrão da classe AC6030M foi o mais baixo encontrado. Já a classe AC6040M obteve desvio padrão relativamente baixo, mostrando a constância dos desgastes entre as duas amostras analisadas.

A classe AC6040M contém um revestimento de TiAlSiN, o qual, conforme Li et al (2019), possui boa resistência ao calor durante a usinagem. Essa característica do revestimento atende as características da usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos. Segundo Trent e Wright (2000), os aços inoxidáveis possuem baixa condutividade térmica, assim não dissipando o calor ao longo do processo de usinagem, comprometendo a vida da ferramenta.

Conforme apresentado na metodologia, foram realizados ensaios com duas ferramentas de cada tipo de revestimento. A análise microscópica dos mecanismos de desgastes das seis amostras testadas está detalhada a seguir.

4.1.1.1 Classe AC5025S

4.1.1.1.1 Amostra I

Na amostra I da classe AC5025S, os mecanismos de desgastes observados foram a abrasão (a) e a adesão (c). Também ocorreu desgaste de flanco (b), ocasionado pelo mecanismo de abrasão, conforme sinalizados na Figura 23 pelos círculos vermelhos.

A abrasão (a) foi o mecanismo de desgaste mais evidente nessa amostra. Esse mecanismo gera o desgaste de flanco (b) nas ferramentas. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), a ocorrência da abrasão se intensifica com aumento da temperatura na região de corte e na usinagem de materiais que possuem partículas duras, como é o caso do aço inoxidável CF8M. O desgaste de flanco se intensificou acarretando em um rebaixo desgastado, visto que os cantos estão arredondados. Esse comportamento pode estar associado a porosidades presentes no material da peça, as quais foram observadas no procedimento experimental. Pelo fato da peça usinada ser fabricada pelo processo de microfusão, o defeito de porosidade é comum de ocorrer (SILVA, 2011). Para melhorar a usinabilidade da peça, o tratamento de solubilização pode ajudar. Segundo Nunes e Martins (2017), o tratamento térmico de solubilização em aços inoxidáveis austeníticos tem como

principais objetivos diminuir a dureza da peça e ajustar o tamanho do grão, deixando a peça homogênea.

A Figura 22 mostra um exemplo de porosidade que pode estar presente nas esferas usinadas no procedimento experimental.

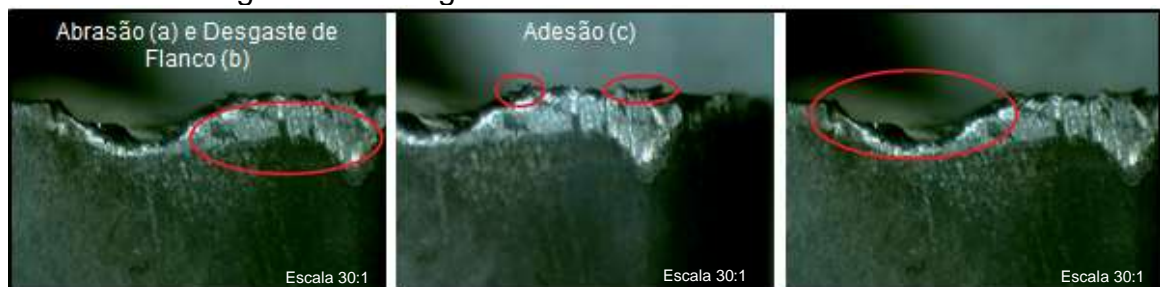
Figura 22 – Porosidade nas peças usinadas



Fonte: Autor (2021).

O mecanismo de adesão (c) ocorreu com baixa intensidade nessa amostra. As partículas de material do cavaco aderem na ferramenta, e quando se desprendem, acabam removendo parte do revestimento do inserto. Com isso, a integridade do gume de corte fica comprometida (NAVES, 2013).

Figura 23 – Desgastes da amostra I classe AC5025S



Fonte: Autor (2021).

A severidade do desgaste de flanco após a usinagem do lote de sete peças deve-se muito as características do material. Além do aço CF8M possuir poros, os aços inoxidáveis austeníticos têm a usinabilidade dificultada devido a elementos como o Níquel em sua composição, ocasionando em maior atrito dos cavacos na ferramenta (MARQUES, 2014).

O valor de $V_{BMáx}$ medido nessa amostra foi de 0,53 mm.

4.1.1.1.2 Amostra II

Na amostra II da classe AC5025S, foram observados o desgaste de flanco (a) ocasionado pelo mecanismo de abrasão (b) e o mecanismo de adesão (c). Na Figura 24, é possível analisar os desgastes na ferramenta.



Fonte: Autor (2021).

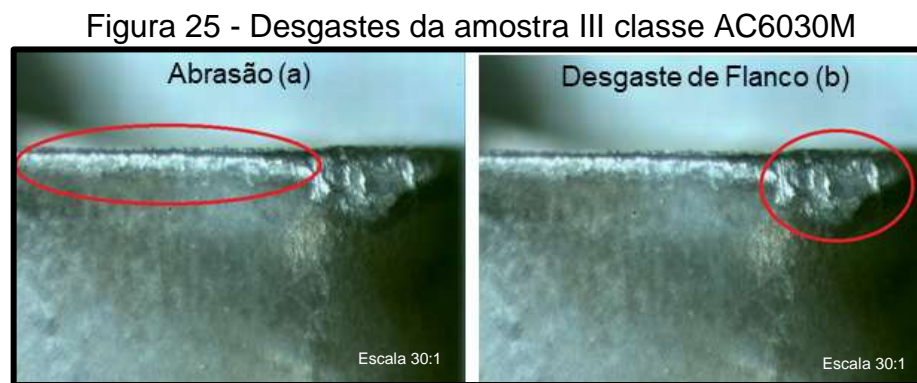
O desgaste de flanco (b), ocasionado pela abrasão (a) ocorreu de maneira menos intensa quando comparado com a amostra I dessa mesma classe de ferramenta. O menor desgaste do gume da ferramenta da amostra II pode ser explicado pelo fato de não ter usinado nenhuma porosidade da peça. Visto que os poros não estão presentes em todas as peças. O valor de $V_{BMáx}$ da amostra II foi igual a 0,23 mm, sendo o menor valor dentre todas amostras analisadas.

Também foi possível ver a adesão (c) do material da peça na amostra II, mas de maneira mais sutil. Segundo Marques (2012), a utilização de ferramentas com cobertura de baixo coeficiente de atrito, como por exemplo o Nitreto de titânio, ajudam na redução da adesão ao longo do processo de usinagem, assim diminuindo o desgaste da ferramenta.

4.1.1.2 Classe AC6030M

4.1.1.2.1 Amostra III

Na amostra III, da classe AC6030M, foi possível observar o desgaste de flanco (b), ocasionado pelo mecanismo de abrasão. Na Figura 25 é possível identificar tal desgaste.



Fonte: Autor (2021).

O aumento do desgaste de flanco foi mais acentuado na ponta da ferramenta, resultando em um valor de $V_{BMáx}$ de 0,38 mm. Silva (2007) afirma que na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos, o aumento da temperatura dos cavacos, devido a baixa condutividade térmica do aço, ocorre conforme o desgaste de flanco aumenta ao longo do processo de usinagem.

4.1.1.2.2 Amostra IV

Os mecanismos de desgastes observados na amostra IV foram abrasão (a) e adesão (c). O efeito da abrasão ocasionou o desgaste do tipo desgaste de flanco (b), conforme indicado na Figura 26.

Figura 26 - Desgastes da amostra IV classe AC6030M



Fonte: Autor (2021).

Os revestimentos compostos por TiB_2 formam um tipo de camada lubrificante entre a ferramenta e a peça ao longo da usinagem. A lubrificação criada reduz o atrito, assim auxiliando na menor propagação dos desgastes (CHOWDHURY, BOSE, FOX-RABINOVICH E VELDHUIS, 2021). No procedimento experimental da amostra IV, não foram observadas porosidades presentes nas peças. Sendo assim, o inserto não demonstrou rebaixos desgastados.

O mecanismo de abrasão foi mais acentuado nesta amostra, quando comparada a amostra III. Com isso, o valor de $V_{BM\acute{a}x}$ foi igual a 0,40 mm. Tal comportamento é devido às características do aço CF8M, que contém Níquel, Cromo e Molibdênio em sua composição. Segundo Pathade e Wakcaure (2013), o Níquel se dissolve na matriz ferrítica, aumentando a tendência de endurecimento do material da peça por deformação. Já o Cromo e o Molibdênio combinam-se com o Carbono através de carbonetos duros, assim melhorando a dureza do aço em altas temperaturas. Esses fenômenos influenciam diretamente no maior desgaste do flanco.

4.1.1.3 Classe AC6040M

4.1.1.3.1 Amostra V

Na amostra V da classe AC6040M, foi observado o desgaste de flanco (b), ocasionado pelo mecanismo de abrasão (a), houve também o mecanismo de adesão (c) do material da peça na ferramenta. A Figura 27 mostra os desgastes gerados na amostra V.

Figura 27 - Desgastes da amostra V classe AC6040M



Fonte: Autor (2021).

O mecanismo de desgaste que prevaleceu nessa ferramenta foi a abrasão (a), assim gerando o desgaste de flanco (b), o qual ocorreu de maneira acentuada nessa classe de ferramenta. O crescimento do desgaste de flanco ao longo da usinagem acarretou em um rebaixo do desgaste. Nesta região foi medido o $V_{BM\acute{a}x}$ igual a 0,32 mm.

A adesão (c) do material da peça na ferramenta ocorreu de maneira pontual na região do rebaixo desgastado. Isso se deve as características do material usinado, pois materiais com teor de níquel considerável possuem a tendência de promover adesão. O níquel aumenta o encruamento do grão e diminui a condutividade térmica na região do corte (MARQUES, 2007). O aço CF8M possui Níquel em sua composição, assim possuindo as características citadas.

4.1.1.3.2 Amostra VI

A amostra VI se comportou de maneira parecida com a amostra V, ambas da classe AC6040M. Esse comportamento afirma a constância deste tipo de revestimento aplicado em aços inoxidáveis austeníticos. Os desgastes observados foram o desgaste de flanco (b), devido ao mecanismo de abrasão (a) e o mecanismo de adesão (c), conforme Figura 28.

Figura 28 - Desgastes da amostra VI classe AC6040M



Fonte: Autor (2021).

Esta amostra VI sofreu os desgastes de maneira menos acentuada, quando comparada a amostra V da mesma classe. O desgaste de flanco (b) foi inferior ao analisado na amostra V, tendo como $V_{BMáx}$ o valor de 0,27 mm. Porém, também ocorreu um rebaixo desgastado, devido ao aumento do desgaste de flanco ao longo da usinagem do lote de peças. Segundo Gomes (1996), o desgaste gerado pelo mecanismo de abrasão pode se dar por inclusões e/ou pontos duros ou moles presentes no material usinado, como é o caso de poros.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu a compreensão dos conceitos do comportamento dos desgastes das ferramentas de metal duro revestidas, oriundos do processo de torneamento longitudinal externo em desbaste do aço inoxidável austenítico CF8M.

Através dos ensaios experimentais de usinagem, seguido da análise microscópica dos desgastes das ferramentas, foi possível entender quais os principais mecanismos de desgastes presentes na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos. Sendo eles: mecanismo de abrasão e adesão.

Para a ferramenta atual, bem como as duas classes de ferramentas testadas, os mecanismos e tipos de desgastes predominantes foram os mesmos. O mecanismo de abrasão prevaleceu, levando ao desgaste do tipo flanco, o qual é inevitável em operações de usinagem. As diferentes classes somente alteraram a intensidade em que o desgaste ocorreu. A adesão também se apresentou de maneira persistente nas amostras.

De maneira geral, a classe AC5025S se saiu de maneira satisfatória nos testes experimentais. Porém, quando obteve porosidade no material usinado, a ferramenta apresentou um grande aumento no desgaste de flanco, gerando um rebaixo do gume de corte. Já a classe AC6030M, apresentou o maior desgaste de flanco máximo dentre todas as ferramentas testadas. No entanto, não mostrou nenhum comportamento de rebaiços desgastados em suas amostras. A classe AC6040M se comportou de maneira regular em suas amostras, resultando no menor desgaste de flanco máximo, com baixo desvio padrão. Obteve leves desgastes rebaixados do gume de corte.

Através da análise dos desgastes das ferramentas de metal duro, aplicadas na operação de desbaste das esferas, constatou-se que a classe AC6040M obteve regularidade na usinagem do aço CF8M. A classe AC6040M apresentou os menores valores de $V_{BMáx}$ dentre as três classes analisadas. No entanto, importante ressaltar que existe o efeito das porosidades identificadas no microfundido, que pode ser significativo sobre os resultados de desgastes.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Pelo fato dos ensaios experimentais serem realizados no ambiente de produção, visto que a disponibilidade da máquina que realiza a usinagem do tipo de peça analisado é limitada, não foi possível realizar um estudo mais detalhado. Com isso, sugere-se uma análise dos desgastes de mais amostras de cada classe de inserto, bem como uma análise mais profunda dos parâmetros de corte utilizados no processo, entre elas, executar variações de velocidade de corte, de avanço e profundidade de corte.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Cristiano Mateus de. **Avaliação do Desgaste da Ferramenta de Metal Duro Revestida com TiN no Fresamento do Aço ABNT4140 Laminado a Quente e Temperado/Revenido**. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontífca Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

AMORIM, Heraldo José. **Estudo da Relação entre Velocidade de Corte, Desgaste de Ferramenta, Rugosidade e Forças de Usinagem em Torneamento com Ferramenta de Metal Duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6158: Sistema de tolerâncias e ajustes**. Procedimento. Rio de Janeiro, 1995.

ASTM A351 / A351M-18e1, Standard Specification for Castings, Austenitic, for Pressure-Containing Parts, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org.

BARBOSA, Patrícia Alves. **Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis**. 2014. 234 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

CARVALHO, Matheus Pereira. **AVALIAÇÃO DE TIPOS E MECANISMOS DE DESGASTES DE BROCA DE METAL DURO REVESTIDAS POR TiN E TiAIN NA FURAÇÃO DO AÇO ABNT 1045**. 2019. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

Chowdhury, M.S.I.; Bose, B.; Fox-Rabinovich, G.; Veldhuis, S.C. **Investigation of the Wear Performance of TiB₂ Coated Cutting Tools during the Machining of Ti6Al4V Alloy**. Materials 2021, 14, 2799. <https://doi.org/10.3390/ma14112799>

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L., **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 6º ed., São Paulo: M.M Editora, 2008.

ESPANHOL, Victor. **Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra-cavaco**. 2008. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FAVARETTO, A. S.; VALLE, P. D.; J. CANGIOLIERI, 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, o 45-60, out. 2009.

FERNÁNDEZ-ABIA, A. I., BARREIRO, J., LÓPEZ DE LACALLE, L. N., MARTÍNEZ, S. **Effect of very high cutting speeds on shearing, cutting forces and**

roughness in dry turning of austenitic stainless steels. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 57, ed. 1-4, Nov. 2011.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** São Carlos: Blucher, 1970. 751 p.

FRACARO, Janaína. **Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle.** Curitiba: Intersaberes, 2017. 342 p.

FREITAS, Bruno Mello de. **Desgaste de ferramenta e otimização da velocidade de corte na usinagem do aço inoxidável austenítico 304L com fluido vegetal.** 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

GOMES, Jefferson de Oliveira. **Características da usinabilidade de aços inoxidáveis austeníticos SAE 304 e SAE 316 com a variação dos parâmetros metalúrgicos.** 1996. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

HABAK, M.; LEBRUN, J. L.; Na experimental study of the effect of high-pressure water jet assisted turning (HPWJAT) on the surface integrity, **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** 2011.

HE, Nairu; LI, Hongxuan; JI, Li; LIU, Xiaohong; ZHOU, Huidi; JIANMINCHEN. High temperature tribological properties of TiAlSiN coatings produced by hybrid PVD technology. **Tribology International**, v. 98, n. , p. 133-143, ago. 2016.

HUANG, Xiaoxiao; SUN, Shuchen; TU, Ganfeng. Investigation of mechanical properties and oxidation resistance of CVD TiB₂ ceramic coating on molybdenum. **Journal Of Materials Research And Technology.** China, p. 282-290. 08 nov. 2019.

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

KORKUT, Ihsan *et al.* Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel. **Materials & Design.** p. 303-305. 2004.

Li, G.; Li, L.; Han, M.; Luo, S.; Jin, J.; Wang, L.; Gu, J.; Miao, H. The Performance of TiAlSiN Coated Cemented Carbide Tools Enhanced by Inserting Ti Interlayers. **Metals** **2019**, 9, 918. <https://doi.org/10.3390/met9090918>

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem do Materiais**, 3^o ed., São Paulo: Blucher, 2015.

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

MARQUES, Daniel Cirillo. Estudo da influencia do teor de níquel na usinabilidade de ligas Fe-Cr-Ni. 2007. 95 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

MARQUES, Fernando. Análise da usinabilidade dos aços inoxidáveis aisi 304 e aisi 420 durante o processo de torneamento externo cilíndrico. In: 21º Congresso Brasileiro De Engenharia E Ciência Dos Materiais, 2014, Cuiabá. **Anais [...]**. Criciúma: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014. p. 4481-4489.

NAVES, V. T. G. **Usinagem do Aço Inoxidável Ausenítico ABNT 316UF com Aplicação de Fluido de Corte a Alta Pressão**. 2013. 181p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

NUNES, Caio José Antunes; MARTINS, Cíntia Dias. **Efeitos do Tratamento de Solubilização e Envelhecimento Térmico na Microestrutura e Resistência a Corrosão de uma Junta Soldada com Aço AISI 304L**. 2017. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2017.

PATHADE, P. H.; WAKCHAURE, V. D.. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLANK WEAR IN COATED CARBIDE TIPPED TOOL FOR MACHINING AISI 304. **International Journal Of Mechanical And Production Engineering Research And Development**. Sangamner, p. 63-86. jun. 2013.

REBEYKA, Claudimir José. **Princípios dos Processos de Fabricação por Usinagem**. Curitiba: Intersaberes, 2016. 292 p.

SANDVIK COROMANT. **Materiais da peça**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>. Acesso em: 22 maio 2021.

SANDVIK COROMANT. **Materiais de Ferramentas de Corte**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>. Acesso em: 25 abr. 2021.

SANTOS, Deibe Valgas dos; ABRÃO, Alexandre Mendes; SANTOS, Anderson Júnior dos. Avaliação da usinabilidade do aço inoxidável supermartensítico na operação de torneamento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, jun. 2020.

SHACKELFORD, James F.. **Ciência dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008. 574 p.

SILVA, Ana Catarina Ferreira da. **Produção de Microcomponentes na Liga CoCrMo**. 2011. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2011.

SILVA, Flávia Cristina Sousa e. **Diagnóstico do processo de torneamento do aço inoxidável ABNT 304 a partir do estudo da formação do cavaco**. 2007. 109 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

SILVA, Pedro Emanuel Cunha e. **Efeito do processamento da liga CF8M (316) na microestrutura e nas propriedades mecânicas.** 2013. 51 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2013.

SOUZA, Luciano de. **Avaliação dos efeitos dos parâmetros de usinagem e dos tratamentos térmicos no torneamento de três aços inoxidáveis austeníticos.** 2006. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

STEMMER, C. E., **Ferramentas de Corte**, 3^o ed., Florianópolis: Editora da UFSC, 1993.

SUMITOMO. **Classes AC6020M, AC6030M e AC6040M para aço inoxidável.** 2016. Disponível em: <https://sumicarbide.com/product/ac6000m/>. Acesso em: 07 nov. 2021.

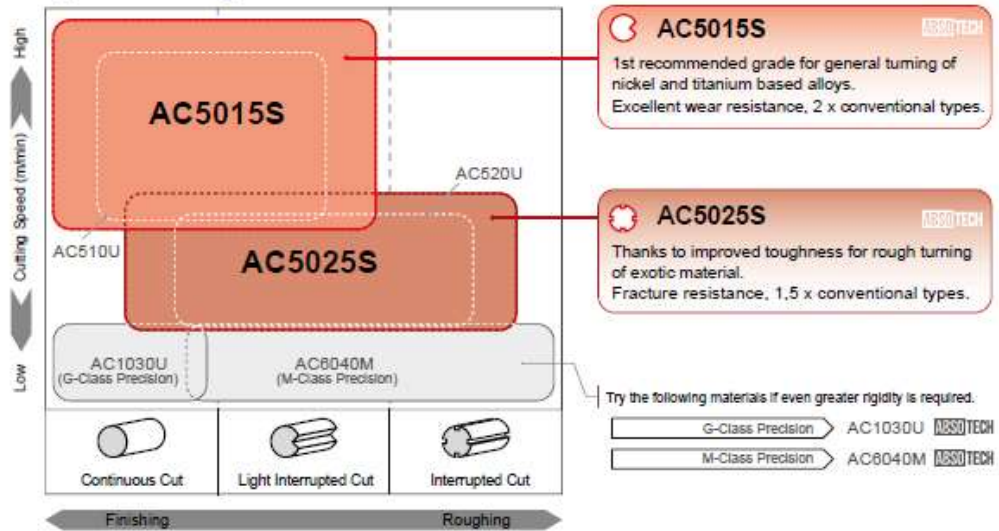
TRENT, E. M.; RIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4^a ed. London: Butherworths-Heinemann, 2000. 464 pages.

TSCHÄTSCH, H. **Applied Machining Technology**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 8^a ed., 2008.

ANEXO A – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DOS INSERTOS DE METAL DURO TNMG 160412 EM-AC5025S

For Exotic Alloy Turning AC5015S / AC5025S

Application Range



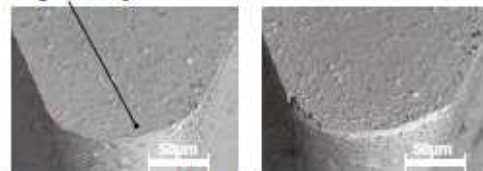
Features

AC5015S / AC5025S



The new PVD coated grades named AC5015S and AC5025S achieve excellent crater and notch wear resistance thanks to tough substrate combined with new adhesion technology.

Excellent Cutting Edge Quality



AC5015S / AC5025S

Conventional

Coating

ABSOTECH

New PVD-Coating Technology
Absotech®Bronze

Newly Developed Highly Adhesive Technology

Newly Developed Rich Carbide Parent Material

Highly heat-resistant ultra-multi-layer thin-film AlTiSiN structure realizes excellent crater wear resistance and flank wear resistance.

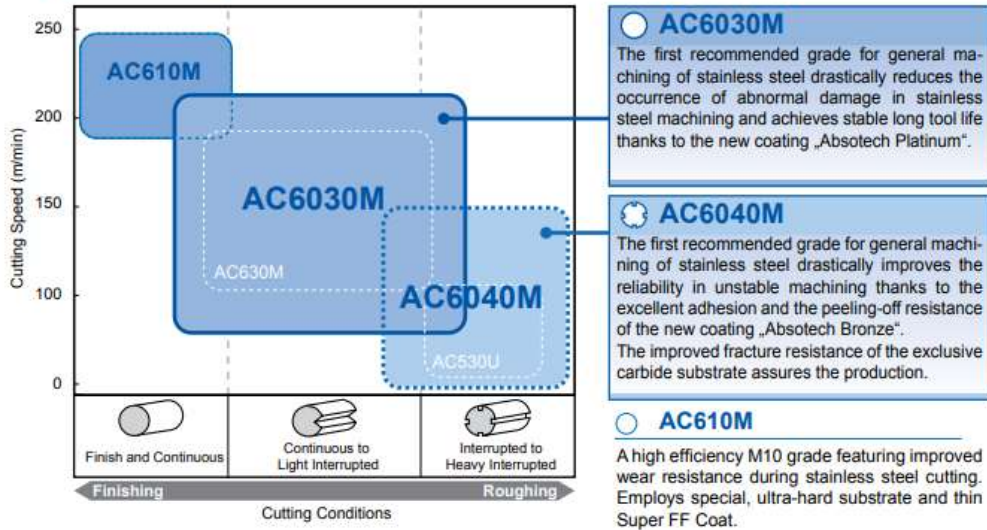
Greatly improved film coating adhesion realizes excellent boundary defect resistance.

Introduction of a revolutionary new sintering process enables hardness to be maintained while greatly improving rigidity, whilst attaining a reduction in boundary defects and chipping resistant issues.

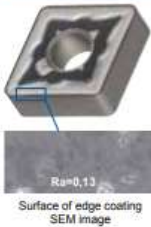
ANEXO B – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DOS INSERTOS DE METAL DURO TNMG 160412N EM AC6030M/AC6040M

For Stainless Steel Turning AC6030M / AC6040M

Application Range



AC6030M



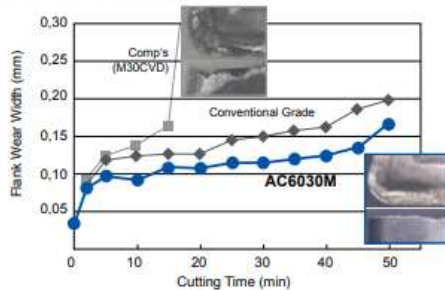
Grade for General Machining

Achieves more than double the chipping resistance of conventional coatings thanks to the improved coating strength.
Drastically improves the adhesion resistance and reduces the occurrence of abnormal damage thanks to excellent surface smoothness.
Improves the corner visibility with a unique light color.

New CVD Coating „Absotech Platinum“

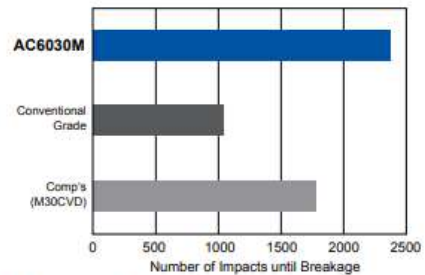
Achieves a good balance between drastically improved coating strength and excellent surface smoothness thanks to a newly developed, boride-based titanium compound coating.

Continuous Cutting



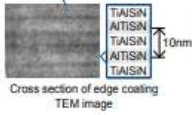
Work Material: X6CrMo17 12 2
Insert: CNMG120408
Cutting Conditions: $v_c=200\text{m/min}$, $f=0,2\text{mm/rev}$, $a_p=2,0\text{mm}$, Wet

Interrupted Cutting



Work Material: X6CrMo17 12 2
Insert: CNMG120408
Cutting Conditions: $v_c=100\text{m/min}$, $f=0,10\text{mm/rev}$, $a_p=1,0\text{mm}$, Wet

AC6040M



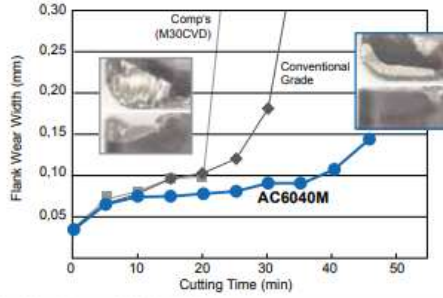
Grade for Heavy Interrupted Cutting

Achieves excellent wear and oxidation resistance thanks to the new composition's TiAlSiN-based ultra-multi-layered coating structure. Drastically improves the peeling-off resistance of coating by improving the boundary control technology between carbide substrate and coating. Compared to conventional grades, achieves more than double the fracture resistance in stainless steel machining.

New PVD Coating „Absotech Bronze“

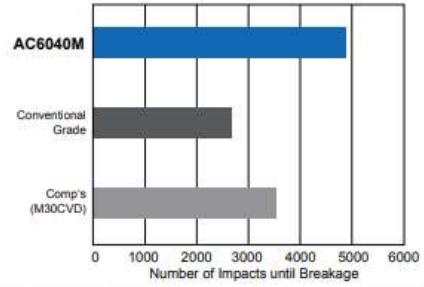
Improves the stability of the cutting edge by succeeding our unique ultra-multi-layered coating structure, which is applied to Super ZX Coating and by employing highly heat-resistant coating of new composition, as well as improving the adhesion strength between carbide substrate and coating.

Continuous Cutting



Work Material: X6CrMo17 12 2
 Insert: CNMG120408
 Cutting Conditions: $v_c=150\text{m/min}$, $f=0.2\text{mm/rev}$, $a_p=2.0\text{mm}$, Wet

Interrupted Cutting



Work Material: X6CrMo17 12 2
 Insert: CNMG120408
 Cutting Conditions: $v_c=230\text{m/min}$, $f=0.23\text{mm/rev}$, $a_p=0.8\text{mm}$, Dry