

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNO LÚCIO EMERICH GRIPP
PATRICK LEAL DAVARIZ

**ESTUDO DO DESEMPENHO DAS FERRAMENTAS DE METAL
DURO NO CORTE INTERMITENTE DE AÇO INOXIDÁVEL
MARTENSÍTICO**

VITÓRIA

2007

BRUNO LÚCIO EMERICH GRIPP

PATRICK LEAL DAVARIZ

**ESTUDO DO DESEMPENHO DAS FERRAMENTAS DE METAL
DURO NO CORTE INTERMITENTE DE AÇO INOXIDÁVEL
MARTENSÍTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico, sob a orientação do Prof. Yordan Almeida Madureira.

VITÓRIA

2007

BRUNO LÚCIO EMERICH GRIPP
PATRICK LEAL DAVARIZ

**ESTUDO DO DESEMPENHO DAS FERRAMENTAS DE METAL
DURO NO CORTE INTERMITENTE DE AÇO INOXIDÁVEL
MARTENSÍTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 13 de Julho de 2007, por:

Prof. Yordan Almeida Madureira
(Orientador)

Prof. Flavio José da Silva, MsC. Eng.
(Examinador)

Dímisson Abreu Louzada, Eng.
(Examinador)

À todos que contribuíram para a realização
deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter nos possibilitado chegar até aqui.

Aos nossos pais pela compreensão, pelo esforço em nos manter estudando, pelo amor e atenção que sempre nos deram.

Ao Eng. Percy Emerich Gripp, gerente industrial da IMESA, por ter permitido a realização do trabalho.

À Empresa SANDVIK, por nos fornecer as ferramentas.

Ao meu orientador, Yordan Almeida, e ao Professor Flávio por terem aceitado a fazer parte e nos ajudado nessa etapa tão importante.

Ao Professor Aloir Fassarella pelo suporte.

Ao técnico José Costa Brandão, Encarregado da IMESA.

Ao técnico Carlos Alberto Zampiere do Laboratório de Metalografia.

À Adriely de Oliveira, pelo apoio e paciência.

Aos nossos colegas de curso, pela amizade e alegria.

Aos nossos professores, pela amizade e pelo que pudemos aprender com cada um.

“Se lutar, não tenha medo de falhar. Se falhar, não tenha medo de chorar. Se chorar repense sua vida, mas jamais desista de caminhar”.

Augusto Cury

RESUMO

A idéia deste estudo surgiu através interesse em entender as complexidades de se usinar o aço inoxidável. Apesar do grande aumento de pesquisas envolvendo a usinagem desse tipo de material, existem poucos resultados no torneamento com corte interrompido. Portanto, a questão a ser investigada nesse estudo: Quais as ferramentas mais eficientes de metal duro para a realização do corte intermitente do aço inoxidável martensítico? Assim, este trabalho teve como objetivo usinar um eixo estriado de aço inoxidável martensítico, de grande dimensão, escolhendo ferramentas de diferentes classes e geometrias efetuando o ranking teste de usinabilidade de curta duração no processo de usinagem, por torneamento cilíndrico externo intermitente, relacionando o desgaste da ferramenta com o acabamento superficial pela medição da rugosidade e do comprimento usinado. Foram realizados ensaios de desgaste das ferramentas de corte, variando-se o formato e a classe das pastilhas de metal duro, e os parâmetros de corte. Foram medidos a rugosidade da peça e o comprimento usinado. A análise dos resultados permitiu concluir que o torneamento intermitente do aço inoxidável martensítico apresentou grandes dificuldades para se medir o desgaste da ferramenta devido ao alto índice de falha das pastilhas antes da conclusão dos testes. Mas a principal contribuição do trabalho é mostrar o melhor desempenho das pastilhas de metal duro com geometrias e classes mais resistentes.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 AÇO INOXIDÁVEL.....	15
2.1.1 Aço inoxidável Martensítico.....	15
2.1.2 Aço inoxidável Ferrítico.....	16
2.1.3 Aço inoxidável Austenítico.....	17
2.2 FERRAMENTAS DE METAL DURO.....	18
2.2.1 Classes de metal duro.....	19
2.2.2 Metal duro revestido.....	21
2.3 USINAGEM.....	22
2.3.1 Torneamento.....	22
2.3.2 Torneamento com corte interrompido.....	25
2.4 FORÇAS DE USINAGEM NO TORNEAMENTO.....	26
2.5 USINAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL.....	27
2.6 PROBLEMAS NA USINAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL.....	27
2.6.1 Arestas postiças.....	27
2.6.2 Temperatura.....	28
2.6.3 Velocidade de corte e usinagem sem refrigerante.....	28
2.6.4 Endurecimento por tensão da superfície usinada.....	29
2.6.5 Formação de rebarbas.....	29
2.6.6 Geometrias para usinagem em aço inoxidável.....	29
2.7 MECANISMOS DE DESGASTE DA FERRAMENTA.....	30
2.8 CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA DE FERRAMENTA.....	32
2.9 ACABAMENTO SUPERFICIAL.....	33
2.10 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE.....	34
2.11 ENSAIO DE USINABILIDADE.....	36
3 METODOLOGIA.....	39
3.1 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS.....	39
3.1.1 Corpos de Prova (CPs).....	39
3.1.2 Torno Universal.....	41
3.1.3 Pastilhas e suportes.....	42

3.1.4 Microscópio Metalúrgico.....	43
3.1.5 Rugosidade superficial.....	44
3.2 MODELAMENTO ADOTADO.....	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
5 CONCLUSÕES.....	57
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
7 ANEXOS.....	59

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Aço inoxidável Martensítico ABNT 420.....	16
FIGURA 2 - Aço inoxidável Ferrítico ABNT 409.....	17
FIGURA 3 - Aço inoxidável Austenítico ABNT 304.....	17
FIGURA 4 - Principais propriedades dos metais duros.....	20
FIGURA 5 - Torneamento retilíneo externo.....	23
FIGURA 6 - Geometria da ferramenta de corte.....	25
FIGURA 7 - Torneamento Intermitente.....	25
FIGURA 8 - Força de usinagem no torneamento.....	26
FIGURA 9 - Desgaste abrasivo.....	30
FIGURA 10 - Desgaste por adesão.....	31
FIGURA 11 - Deformação plástica.....	31
FIGURA 12 - Fratura.....	31
FIGURA 13 - Rugosidade máxima X coeficiente de transmissão do calor.....	34
FIGURA 14 - Variação da rugosidade com o processo de fabricação.....	35
FIGURA 15 - Principais ensaios de usinabilidade.....	38
FIGURA 16 - Corpo de prova exposto ao meio ambiente.....	39
FIGURA 17 - Corpo de prova.....	40
FIGURA 18 - Abertura de rasgo com Bedame.....	41
FIGURA 19 - Torno NARDINI.....	41
FIGURA 20 - Conjunto Microscópio e computador.....	44
FIGURA 21 - Rugosímetro portátil.....	44
FIGURA 22 - Pontos de medição da rugosidade.....	45
FIGURA 23 - Luneta fixada ao eixo.....	45
FIGURA 24 - Relógio.....	46
FIGURA 25 - Avaria da pastilha W1105 na preparação da peça.....	48
FIGURA 26 - Aresta da pastilha W4235 após usinar 165mm.....	49
FIGURA 27 - Aresta da pastilha W2025 após usinar 225mm.....	49
FIGURA 28 - Aresta da pastilha W1005 após usinar 430 mm.....	49
FIGURA 29 - Comparativo do comprimento usinado das pastilhas de mesma geometria.....	50
FIGURA 30 - Comparativo do comprimento usinado das pastilhas de mesma classe.....	51

FIGURA 31 - Comparação da rugosidade das pastilhas.....	52
FIGURA 32 - Quebra da aresta da ferramenta T2015 na terceira fase.....	53
FIGURA 33 - Tendência das forças de corte.....	54
FIGURA 34 – Diagrama esquemáticos da cunha de corte.....	55
FIGURA 35 - Comparativo de todas as pastilhas ensaiadas.....	55
FIGURA 36 - Superfície após o 5º passe da pastilha T2015.....	61
FIGURA 37 - Superfície após o 4º passe da pastilha W1005.....	61
FIGURA 38 - Superfície após o 2º passe da pastilha W4235.....	61
FIGURA 39 - Superfície após o 4º passe da pastilha T4235.....	62
FIGURA 40 - Superfície após o 2º passe da pastilha W2025.....	62
FIGURA 41 - Superfície mostrando quebra logo no início da pastilha T2015 usinando com profundidade 100% maior	62
FIGURA 42 - Destruição da aresta da pastilha num erro operacional.....	63
FIGURA 43 - Aresta da pastilha T2015 após usinar 515mm.....	63
FIGURA 44 - Aresta da pastilha T4235 após usinar 480mm.....	63

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Composição Nominal do aço em porcentagem.....	40
TABELA 2 - Características das ferramentas.....	42
TABELA 3 - Parâmetros iniciais.....	46
TABELA 4 - Parâmetros utilizados.....	46
TABELA 5 - Medições da Rugosidade.....	60

SIMBOLOGIA

Co.....	Cobalto
WC.....	Carbeto de tungstênio
TiC.....	Carbeto de titânio
TaC.....	Carbeto de tântalo
NbC.....	Carbeto de nióbio
TiCN.....	Carbonitreto de titânio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio ou alumina
TiN.....	Nitreto de titânio
TiAlN.....	Nitreto de titânio-alumínio
AlTiN.....	Nitreto de alumínio - titânio
PVD.....	Deposição física à vapor
V_c	Velocidade de corte
V_f	Velocidade de avanço
f	Avanço
a_p	Profundidade de corte
b	Largura de corte
h	Espessura de corte
F	Força de usinagem
F_p	Força passiva ou de profundidade
ISO.....	International Standardization Organization
VB.....	Desgaste de flanco
VB _{máx}	Desgaste de flanco máximo
KT.....	Profundidade da cratera
KF.....	Distância frontal entre cratera e flanco
μm	Micrometro
m/min.....	Metro por minuto
IMESA.....	Indústria Metal Mecânica Ltda
CPs.....	Corpos de Prova
mm.....	Milímetro
CST.....	Companhia Siderúrgica de Tubarão
C.....	Carbono

Si.....	Silício
Mn.....	Manganês
Cu.....	Cobre
Ni.....	Níquel
Cr.....	Cromo
Mo.....	Molibidênio
V.....	Vanádio
UFES.....	Universidade Federal do Espírito Santo
HRc.....	Rokell C
m.....	Metro
rpm.....	Rotação por minuto
hp.....	Potência
HRSA.....	Liga de metal endurecido
WC.....	Carbeto de tungstênio
CVD.....	Deposição química a vapor
Ra.....	Rugosidade média
mm/rot.....	Milímetro por rotação
CBN.....	Nitreto cúbico de Boro

1 INTRODUÇÃO

A idéia deste estudo surgiu, através do nosso interesse em entender as complexidades na fabricação de peças de aço inoxidável por usinagem. Apesar do grande aumento de pesquisas envolvendo a usinagem desse tipo de material, existem poucos resultados no torneamento com corte interrompido do aço inox.

De acordo com Tebecherani⁽¹⁾ o aço inoxidável vem conquistando seu espaço no mercado de materiais a cada dia, devido sua elevada resistência à corrosão, sua empregabilidade na fabricação de peças críticas de modernas usinas e indústrias químicas, como também pela diversificação de sua utilização, que vai desde indústrias alimentícias devido a seu aspecto asséptico, até seu emprego como artigo decorativo por possuir excelente aspecto visual.

Entretanto, a composição química requerida para permitir tais propriedades aos aços inoxidáveis, resulta em uma baixa usinabilidade quando comparados aos aços-carbonos.

Levando em consideração esses aspectos, pretende-se através deste estudo, analisar o desempenho das ferramentas de metal duro no corte intermitente do aço inoxidável martensítico.

Chegaremos ao resultado através dos seguintes objetivos:

- 1- Usinar um eixo estriado de aço inox martensítico de grande dimensão, com diferentes ferramentas;
- 2- Efetuar o ranking teste de usinabilidade de curta duração no processo de usinagem, por torneamento cilíndrico externo intermitente, relacionando o desgaste da ferramenta com o acabamento superficial e o comprimento usinado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇO INOXIDÁVEL

Segundo Tebecherani⁽¹⁾, a expressão aço inoxidável, como é usualmente conhecida, nos dá uma idéia de um material que não se destrói mesmo quando submetido aos mais variados ataques químicos. Na verdade, este tipo de aço não é eterno e sim apresenta geralmente uma maior resistência à corrosão quando submetido a um determinado meio ou agente agressivo. Apresenta também uma maior resistência à oxidação a altas temperaturas em relação a outras classes de aços. A resistência à oxidação e corrosão do aço inoxidável se deve principalmente a presença do cromo, que a partir de um determinado valor e em contato com o oxigênio, permite a formação de uma camada passiva de óxido de cromo sobre a superfície do aço sendo, que é impermeável e insolúvel nos meios corrosivos usuais.

É definido como aço inoxidável o grupo de ligas ferrosas resistentes à oxidação e corrosão, que contenha no mínimo 12% de cromo.

Existem mais de 250 diferentes tipos de aços inoxidáveis. Esta grande variedade de aços inoxidáveis é dividida em 5 classes ou famílias principais, de acordo com AK Steel Corporation. Entretanto, iremos abordar os três grupos mais importantes de acordo com a microestrutura básica formada.

2.1.1 Aço Inoxidável Martensítico

Estes aços, mostrados na FIGURA 1 após resfriamento rápido de alta temperatura, mostram uma estrutura caracterizando alta dureza, denominada Martensítica.

Contém de 12 a 17% de cromo e 0,1 a 0,5% de carbono (em certos casos até 1% de carbono). O aumento do teor de carbono aumenta a resistência, mas diminui a ductilidade e tenacidade. Esses aços podem atingir diversos graus de dureza pela variação das condições de aquecimento e resfriamento (tratamento térmico). São dificilmente atacados pela corrosão atmosférica no estado temperado e se destacam pela dureza. São ferromagnéticos.

Apresentam trabalhabilidade inferior as demais classes e soldabilidade pior, especialmente com carbono mais elevado, devido à formação de martensita no resfriamento.

Alguns elementos como nióbio, silício, tungstênio e vanádio são, às vezes, adicionados para modificar o comportamento do aço durante o revenimento. Pequenas quantidades de níquel podem ser adicionadas para melhorar a resistência à corrosão.

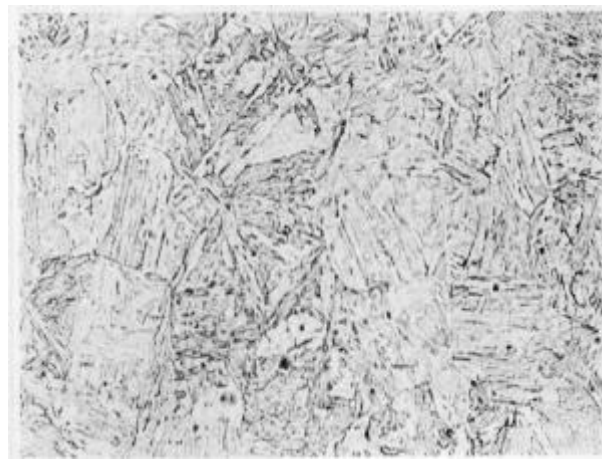


FIGURA 1 – Aço inoxidável Martensítico ABNT 420 (Tebecherani, 1999)

2.1.2 Aço Inoxidável Ferrítico

Contêm de 16 a 30% de cromo, eles mostram uma estrutura macia e tenaz; altamente homogênea conhecida como ferrítica. A microestrutura típica é mostrada na FIGURA 2.

Não podem ser endurecidos por tratamento térmico e são basicamente usados nas condições de recozido. Possuem uma maior trabalhabilidade, e maior resistência à corrosão que os aços martensíticos devido ao maior teor de cromo. Possuem boas propriedades físicas e mecânicas e são efetivamente resistentes à corrosão atmosférica e a soluções fortemente oxidantes. São ferromagnéticos. As principais aplicações são aquelas que exigem boa resistência à corrosão, ótima aparência superficial e requisitos mecânicos moderados. Apresentam tendência ao crescimento de grão após soldagem, particularmente para seções de grande espessura, experimentando certas formas de fragilidade.

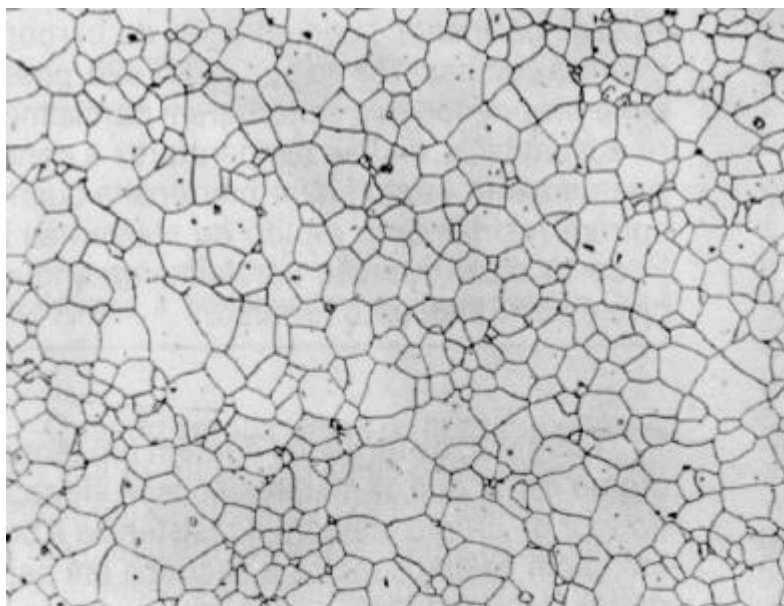


FIGURA 2 – Aço inoxidável ferrítico ABNT 409 (Tebecherani, 1999)

2.1.3 Aço Inoxidável Austenítico

Os aços inoxidáveis austeníticos, FIGURA 3, apresentam uma boa resistência à corrosão, porém, em alguns casos outras características além da resistência à corrosão são necessárias, para a utilização dos mesmos em determinadas aplicações. São acrescentados, então, outros elementos de liga para que o aço inoxidável adquira essas características.

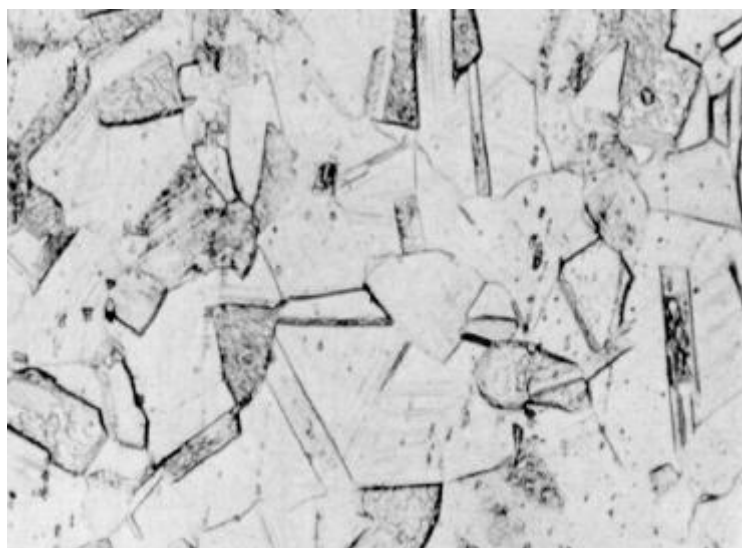


FIGURA 3 – Aço inoxidável austenítico ABNT 304 (Tebecherani, 1999)

Estes são os aços que apresentam maior resistência à corrosão. Eles combinam baixo limite de escoamento com alta resistência à tração e bom alongamento, oferecendo as melhores propriedades para trabalho a frio. Não podem ser endurecidos por tratamento térmico, mas sua resistência à tração e dureza pode ser aumentada por encruamento.

Não são ferromagnéticos. Possuem uma ampla faixa de propriedades mecânicas, oferecendo boa ductilidade e resistência a altas e/ou baixíssimas temperaturas, além de boa trabalhabilidade e soldabilidade.

Outros elementos como molibdênio, titânio e nióbio, se adicionados, podem melhorar a resistência à corrosão e minimizar a corrosão intergranular por estabilização dos carbonetos presentes.

Uma grande melhoria em muitas propriedades é conseguida com a introdução de Níquel como elemento de liga. Consegue-se uma mudança na estrutura, transformando ligas ferrítica em ligas austeníticas (estrutura de alta resistência e tenacidade).

2.2. FERRAMENTAS DE METAL DURO

De acordo com Machado e Silva⁽⁴⁾ o metal duro propiciou o segundo grande salto na área dos materiais para ferramentas de corte. Devido à sua elevada dureza e resistência ao desgaste, foi batizado de Widia (*Wie Diamont*, em alemão, como o diamante), uma referência à semelhança entre as propriedades dos dois materiais, o que, até certo ponto, é exagero. Composto basicamente de carbetos de tungstênio e cobalto, as ferramentas de metal duro são fabricadas pela metalurgia do pó, o que garante boa precisão dimensional das ferramentas. As ferramentas de metal duro produzidas inicialmente, contendo apenas WC e Co, obtiveram resultados excelentes na usinagem de ferro fundido cinzento e materiais não ferrosos.

Porém, na usinagem de aços, esta ferramenta apresentou baixa resistência à formação de cratera, devido ao forte atrito observado na superfície de saída, o que gerava altas temperaturas causando a difusão de materiais do cavaco para a ferramenta e vice-versa. Foram então adicionados novos elementos de liga às ferramentas de metal duro. Dessa maneira, os componentes usados em metal duro segundo STEMMER (2001) são:

Cobalto (Co) – geralmente usado como aglomerante para as partículas de carbonetos. Sua adição causa a queda da dureza a quente.

Carbeto de tungstênio (WC) – é solúvel no cobalto, o que gera ligações internas de alta resistência. Possui grande resistência ao desgaste, mas sua utilização na usinagem de aço é limitada devido à tendência de difusão de carbono, e de dissolução no cobalto e no ferro.

Carbeto de titânio (TiC) – aumenta a resistência à difusão dos metais duros. Em contrapartida, causa a queda da resistência das ligações internas, o que causa a queda da resistência da ferramenta e fragiliza o material. Metais duros com altos teores de TiC são usados na usinagem de aços com altas velocidades de corte.

Carbeto de tântalo (TaC) – em pequenas porcentagens, restringe o tamanho de grão, aumentando a tenacidade e a resistência do metal duro.

Carbeto de nióbio (NbC) – possui efeito semelhante ao TaC. Ambos os carbonetos ocorrem no metal duro como cristais mistos Ta – (Nb) – C.

2.2.1 Classes de metal duro

A norma ISO 513/1975 classifica os metais duros em 3 grupos, designados pelas letras P, M e K, e também designados por um código de cores (em ordem, azul, amarelo e vermelho). A classificação dentro de um grupo ou outro é feita de acordo com a aplicação do metal duro, uma vez que a variedade de composições químicas e processos de fabricação tornam difícil a padronização baseada em outras características. Dentro de cada grupo, ainda há uma classificação usando números.

O grupo P é formado por metais duros contendo teores elevados de TiC (até 35%) e TaC (até 7%), o que lhes confere uma elevada dureza a quente, resistência ao desgaste e resistência à difusão. Esta classe de metais duros é indicada para a usinagem de materiais dúcteis, de cavacos contínuos que, por apresentarem uma área de contato cavaco-ferramenta grande, desenvolvem altas temperaturas durante a usinagem. Materiais

normalmente usinados com ferramentas de metal duro classe P são aço fundido e ferro fundido maleável, nodular ou ligado.

O grupo M é um grupo de metais duros com propriedades intermediárias entre as do grupo P e do grupo K. Metais duros deste grupo se destinam as ferramentas de aplicações múltiplas. Ferramentas de metal duro tipo M são usadas na usinagem de aço, aço fundido, aço ao manganês, ferros fundidos ligados, aços inoxidáveis austeníticos, ferro fundido maleável e nodular e aços de corte fácil.

O grupo K foi o primeiro tipo de metal duro desenvolvido, de acordo com Diniz *et al*⁽²⁾, sendo composto basicamente por carbonetos de tungstênio aglomerados por cobalto. Devido à baixa resistência dos metais duros à difusão em altas temperaturas, as ferramentas deste grupo não são recomendadas para a usinagem de metais dúcteis, sendo sua área de aplicação restrita a usinagem de materiais frágeis, que formam cavacos curtos (ferros fundidos e latões), metais não ferrosos, como alumínio, cobre, titânio e níquel, não necessariamente de cavacos curtos e madeira.

A FIGURA 4 mostra as principais propriedades dos metais duros. Pode-se observar que os metais duros da classe P apresentam as maiores durezas (e menores tenacidades), ao contrário dos metais duros da classe K, com resultados opostos.





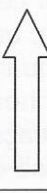
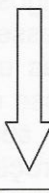
DESIGNAÇÃO ISO	DUREZA E RESIST. AO DESGASTE	TENACIDADE
P 01 P 10 P 20 P 25 P 30 P 40 P 50		
M 10 M 20 M 30 M 40		
K 01 K 05 K 10 K 20 K 30 K 40		

FIGURA 4 – Principais propriedades dos metais duros (Machado e Silva, 2004)

2.2.2 Metal duro revestido

Com o objetivo de aprimorar as propriedades do metal duro, foram desenvolvidas ferramentas de metal duro revestidas. Nestas ferramentas, aplica-se sobre um substrato de metal duro, com boa dureza e tenacidade, uma ou mais camadas de materiais que apresentem desempenho superior ao metal duro em relação a alguma propriedade. Dessa maneira, podem-se reunir, em uma mesma ferramenta de corte, características que de outra maneira seriam inconciliáveis, como alta tenacidade, dureza a quente e inércia química. Os materiais mais usados para revestimento de ferramentas são o carboneto de titânio, óxido de alumínio e nitreto de titânio. As principais propriedades destas camadas são:

- Carboneto de titânio (TiC) – aplicado em camadas que variam de 4 a 8 μm , é geralmente a primeira (ou única) camada de revestimento, por possuir alta afinidade com o metal duro, o que lhe garante uma boa adesão ao núcleo da ferramenta. Possui elevada dureza (3000 HV, a maior entre os materiais utilizados como cobertura), alta resistência ao desgaste por abrasão e baixa tendência de soldagem com o material da peça. Devido ao fato de conter carbono, necessita de uma barreira térmica para evitar a difusão na usinagem de aços. O carbonitreto de titânio (TiCN), também usado como revestimento em ferramentas de metal duro, possui propriedades semelhantes ao TiC, exceto pelo seu menor coeficiente de atrito.
- Óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3) – material de maior estabilidade química encontrado na natureza. Exatamente por isso, é usado como cobertura para garantir a estabilidade química do núcleo da ferramenta e evitar o desgaste causado pela difusão de átomos do material da peça para a ferramenta e vice-versa. Possui elevada dureza, porém apresenta baixa resistência a choques térmicos e mecânicos.
- Nitreto de titânio (TiN) – geralmente usado na camada externa de revestimento, conferindo à pastilha a coloração amarelada que, entre outras coisas, facilita a observação do desgaste. Reduz os esforços e temperaturas durante a usinagem, devido ao seu baixo

coeficiente de atrito, além de ser mais estável quimicamente do que o TiC. A espessura da camada de TiN varia entre 5 e 7 μm .

A espessura total da camada de revestimento costuma variar entre 2 e 12 μm . Apesar do aumento na resistência ao desgaste obtido com o aumento desta camada, este aumento causa a fragilização da aresta de corte, além de torna-la menos afiada. Isto, aliado a outras necessidades da indústria moderna, como a usinagem a seco, ou com baixa quantidade de fluido e corte, e a usinagem de materiais endurecidos, impulsiona continuamente a pesquisa de novos materiais e revestimentos para ferramentas de corte. Alguns resultados destas pesquisas aplicáveis na indústria são os revestimentos de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) e nitreto de alumínio-titânio (AlTiN). Conforme Diniz *et al*⁽²⁾, estas coberturas são aplicadas utilizando o processo PVD, que propicia camadas mais finas, o que é importante quando se necessita de arestas afiadas, como na usinagem de materiais dúcteis.

As propriedades das camadas de TiAlN e AlTiN são:

- Maior resistência à oxidação – a oxidação destes materiais forma uma camada de alumina, de elevada inércia química;
- Baixa condutividade térmica;
- Elevada dureza a frio e a quente;
- Estabilidade química.

2.3 USINAGEM

De acordo com Ferraresi⁽³⁾, usinagem são operações destinadas a conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzindo cavaco. O cavaco é definido como, a porção de material da peça retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma e geométrica irregular.

2.3.1 Torneamento

O processo de usinagem conhecido como torneamento é o processo mais estudado e usado, e é definido por Ferraresi⁽³⁾ como: o processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas mono cortantes.

Para tanto a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo, de acordo com a FIGURA 5.



FIGURA 5. – Torneamento retilíneo externo

De acordo com Machado e Silva⁽⁴⁾, o princípio usado em toda máquina ferramenta para se obter a superfície desejada é providenciar um movimento relativo apropriado entre a peça e a ferramenta, escolhida adequadamente. Assim, para o estudo da usinagem é necessária a definição das grandezas físicas no processo de corte.

Movimento de corte – movimento entre a peça e a ferramenta, o qual sem o movimento de avanço origina somente uma única remoção de cavaco durante uma volta ou um curso.

Movimento de avanço – movimento entre a peça e a ferramenta que juntamente com o movimento de corte origina um levantamento repetido ou contínuo de cavaco durante várias revoluções ou cursos.

Velocidade de corte (V_c) – velocidade instantânea do ponto de referência (normalmente a ponta da ferramenta que toca a peça) da aresta cortante segundo a direção e sentido de corte.

Velocidade de avanço (V_f) – velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço.

Avanço (f) – percurso de avanço em cada volta [mm/volta] ou em cada curso da ferramenta [mm/golpe].

Profundidade de corte (a_p) – quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho.

Largura de corte (b) – largura calculada do cavaco na seção transversal de corte a ser retirada, medida na superfície de usinagem principal, segundo a direção normal à direção de corte.

Espessura de corte (h) – espessura calculada do cavaco na seção transversal de corte a ser retirada, medida normalmente à superfície em usinagem principal e segundo a direção perpendicular à direção de corte.

Segundo Ferraresi⁽³⁾, algumas definições são necessárias, tais como:

Cunha de corte – parte da ferramenta na qual o cavaco se origina, através do movimento relativo entre ferramenta e peça.

Superfície de folga – superfícies da cunha cortante que defrontam com as superfícies de corte.

Superfície de saída – superfície da cunha cortante, sobre a qual o cavaco se forma.

Aresta principal de corte – aresta de corte cuja cunha de corte correspondente indica a direção de avanço no plano de trabalho.

Aresta Secundária de corte – aresta de corte cuja cunha de corte correspondente não indica a direção de avanço no plano de trabalho, como podemos observar na FIGURA 6.

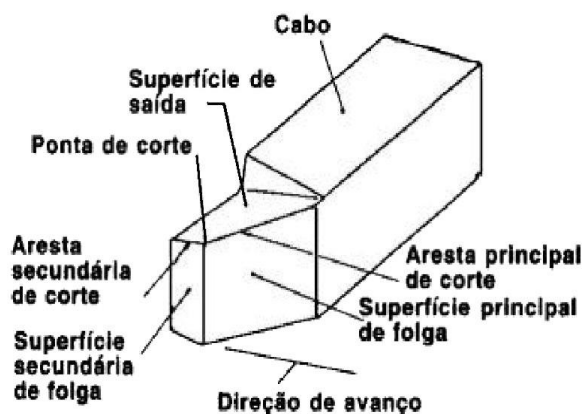


FIGURA 6 – Geometria da ferramenta de corte

2.3.2 Torneamento com corte interrompido

Apesar do grande número de pesquisas com torneamento, existem poucos resultados na literatura falando do torneamento com cortes interrompidos, também chamado de torneamento intermitente.

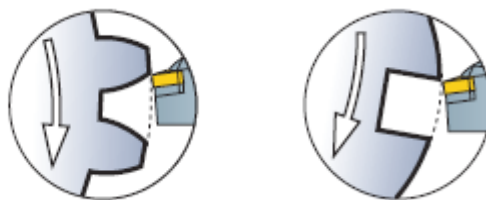


FIGURA 7 - Torneamento intermitente

Usinando um eixo estriado, a cada rotação do eixo, a ferramenta sofre um impacto violento na entrada na peça. Este impacto é causado porque a ferramenta não sofre qualquer tipo de carregamento mecânico no final do ciclo inativo, entrando rapidamente no corte, quando passa a sofrer grande carregamento compressivo. Devido a essa situação desfavorável, a ferramenta pode sofrer lascamento ou mesmo a quebra no primeiro ciclo ou giro. Caso a ferramenta seja corretamente especificada, ela terá a tenacidade suficiente para evitar sua quebra imediata, entretanto, mesmo possuindo tenacidade suficiente para evitar uma avaria imediata, a ferramenta de corte vai estar sujeita a um carregamento repetitivo a cada entrada da peça, o que pode levar a um aparecimento de trincas.

2.4 FORÇAS DE USINAGEM NO TORNEAMENTO

A força de usinagem (F) é a força que atua sobre o gume durante a operação de corte. As suas componentes são obtidas mediante uma decomposição ortogonal, de acordo com as considerações tecnológicas e físicas de formação do cavaco, segundo Ferraresi⁽³⁾.

A componente projetada sobre a direção de corte, é a força de corte (F_c). A componente normal à direção de corte projetada sobre a direção de avanço, é a força de avanço (F_f). A componente radial projetada perpendicularmente ao plano de trabalho é a força passiva ou de profundidade (F_p). As três componentes da força de usinagem geradas no processo de torneamento podem ser esquematizadas através da FIGURA 8.

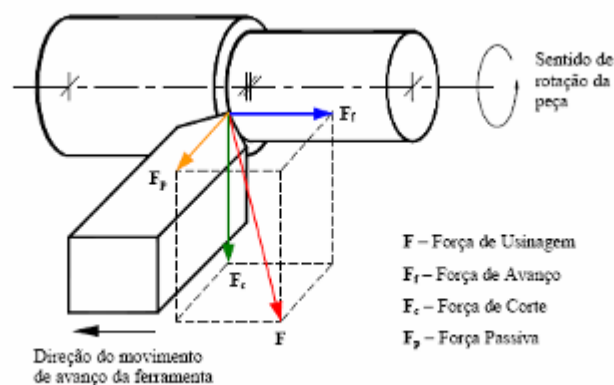


FIGURA 8 – Força de usinagem no torneamento

De acordo com Weingaertner *et al*⁽⁵⁾, a determinação das componentes de força usinagem há muito tempo tem sido uma área importante, tanto na prática quanto na pesquisa, relativa às operações de corte com ferramentas de geometria definida. Nesta determinação, diferentes fatores devem ser considerados: máquina-ferramenta, material da peça, área da seção de corte, espessura de corte geometria da ferramenta (ângulo de posição, κ_r), estado da ferramenta, material da ferramenta, lubrificação, parâmetros de usinagem, temperatura na região de corte, ambiente de trabalho etc.

De acordo com Machado e Silva, a pressão específica de corte, K_s , é definida como a relação entre a força de corte, F_c , e a área da seção de corte, A , onde $A = (\text{profundidade de corte}) \cdot (\text{avanço})$.

A pressão específica de corte pode, também, ser entendida como sendo a energia efetiva consumida para arrancar uma unidade de volume de material da peça.

A pressão específica de corte é considerada um bom índice de usinabilidade dos materiais. Todos os fatores que alteram o valor de F_c , sem alterar o valor de A , alteram proporcionalmente o valor de K_s .

2.5 USINAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL

A usinagem de aços inoxidáveis está associada à noção de que são materiais difíceis de usinar, porque a maioria desses materiais gera muito calor e, além disso, têm uma condução térmica ruim. Esse raciocínio está baseado na experiência em corte de metais com um processo contínuo, como no torneamento ou furação. Quando existe uma usinagem intermitente, como no caso de fresamento, as condições de usinagem para o aço inoxidável são melhores.

As propriedades mais importantes do aço inoxidável são: as resistências à corrosão e à tração. Os materiais de ligação que produzem essas propriedades frequentemente afetam a usinabilidade de forma negativa.

Tradicionalmente, as formas mais comuns para superar problemas de usinagem em aço inoxidável são: escolher uma classe mais tenaz que possa lidar melhor com a formação de arestas postiças; reduzir a temperatura; reduzir a velocidade de corte; e usar refrigerante.

2.6 PROBLEMAS NA USINAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL

Em recente artigo sobre usinagem, a empresa Sandvix Coromant fez um levantamento dos maiores problemas decorrente da usinagem do aço inox, os quais foram:

2.6.1 Arestas postiças

Um problema muito comum na usinagem do aço inoxidável é a tendência dos cavacos soldarem-se sobre a aresta de corte ou sobre a peça. Isso leva, inevitavelmente, à redução

da vida da ferramenta, pois os cavacos assim soldados desgastam camadas da cobertura e até partes do substrato quando se soltam da aresta de corte, ou, alternativamente, um acabamento superficial inaceitável da peça. Quando isso ocorre, ou seja, quando se forma arestas postiças, recomenda-se que a velocidade de corte seja aumentada, a fim de se obter uma temperatura acima da, assim chamada, área de aresta postiça, e que seja usada uma aresta de corte viva, juntamente com uma classe com cobertura de PVD. Isso reduzirá a tendência dos cavacos em se soldarem sobre a aresta.

2.6.2 Temperatura

A capacidade de condução térmica desempenha um papel importante no corte de metais, pois a maior parte do calor originário da zona de corte é eliminada junto com os cavacos. Entretanto, o aço inoxidável tem uma capacidade de condução térmica pior e deixa mais calor na zona de corte. Essas temperaturas mais elevadas aumentam a tendência a um maior desgaste da ferramenta e o risco de se obter deformação plástica das arestas de corte também é mais alto, particularmente com processos de corte contínuo. A limitação das forças de corte pode reduzir as altas temperaturas que freqüentemente surgem quando o aço inoxidável é usinado.

2.6.3 Velocidade de Corte e Usinagem sem Refrigerante

A maneira tradicional de evitar a aderência tem sido reduzir a velocidade de corte e aplicar refrigerante. O objetivo é reduzir a temperatura na "área de aresta postiça". A base desse conhecimento é a experiência na obtenção de aresta postiça no caso de torneamento ou furação com um processo de corte contínuo, onde o risco de deformação plástica nas arestas de corte freqüentemente impossibilita um aumento acima da "área de aresta postiça". Esse não é o caso no torneamento intermitente e a experiência adquirida com testes sugere que: a velocidade de corte deve ser aumentada acima da área de aresta postiça e deve-se realizar a usinagem sem refrigerante para obter uma vida útil confiável e econômica. Se, por outro lado, aumenta-se a velocidade de corte, mas também se aplica refrigerante, então se obtém uma considerável redução da vida útil da ferramenta, devido às trincas que se formam rapidamente como resultado das cargas térmicas muito grandes que surgem.

2.6.4 Endurecimento por tensão da superfície usinada

Os aços inoxidáveis com alta proporção austenítica freqüentemente apresentam tendência a endurecer por tensão. O efeito do endurecimento por tensão leva a mudanças na estrutura do material e aumenta notavelmente a dureza do material na superfície, o que aumenta o desgaste sobre a aresta de corte na profundidade de corte.

O efeito de endurecimento por tensão pode ser reduzido, tanto pelo reforço da aresta de corte principal, quanto pela variação da profundidade de corte, de modo que o desgaste seja distribuído sobre uma proporção maior da aresta principal. Normalmente, é mais vantajoso escolher uma profundidade de corte e um avanço que garantam que a aresta de corte em questão seja guiada para dentro do material, abaixo da zona endurecida. A velocidade de corte também pode ser reduzida, pois as zonas endurecidas por tensão geram temperaturas consideravelmente mais elevadas.

2.6.5 Formação de rebarbas

A formação de rebarbas é outro problema que surge na usinagem do aço inoxidável e normalmente é o resultado de ângulos de pastilhas negativos, geralmente no chanfro de reforço, o que resulta num processo de corte difícil. Esse problema pode ser reduzido ou eliminado usando-se uma aresta de corte positiva e mais viva, que seja mais adequada para essa gama de materiais.

2.6.6 Geometrias para usinagem em aço inoxidável

Alguns requisitos gerais são aplicáveis a usinagem de materiais inoxidáveis. As pastilhas têm que ser mais positivas que as geometrias "para aço", o que significa: mínima formação de rebarbas; reduzida tendência à formação de arestas postiças; menor geração de calor; menor risco de endurecimento por tensão da peça. Os quebra-cavacos devem ser abertos, produzindo menos calor e facilitando o escoamento dos cavacos.

A importância de se levar em conta a interação entre o conceito da ferramenta, classe, geometria da pastilha e dados de corte, visando-se alcançar um bom resultado, não pode ser enfatizada demais na usinagem do aço inoxidável. Por esse motivo, é importante

"ousar", fazer uso das recomendações dadas e ir até o fim. Caso contrário, existe o risco de se parar no meio da "área de aresta postiça", como foi descrito anteriormente, ou de se ter uma vida útil curta como resultado da combinação de usinagem sem refrigerante e aumento da velocidade de corte, e ter, como resultado trincas térmicas.

2.7 MECANISMOS DE DESGASTE DA FERRAMENTA

Para Diniz *et al*⁽²⁾, diversos são os tipos de desgastes e avarias que acontecem em uma ferramenta de usinagem. Dentre os mecanismos de desgaste existentes, temos: deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas; deformação plástica devido a tensões de compressão; desgaste por difusão; atrito; desgaste abrasivo; e desgaste de entalhe.

Segundo Hogmark⁽⁶⁾, o desgaste por aderência e arrastamento predomina na usinagem dos aços inoxidáveis, caracterizando o desgaste da ferramenta, promovendo assim uma mudança na forma original da geometria da mesma. Nas figuras 9, 10, 11 e 12 podemos visualizar fotos de testes de micrografias realizadas por um microscópio de varredura eletrônica e outro óptico (SEM e OM, respectivamente) mostrando os principais tipos de desgaste na usinagem de aços inoxidáveis.

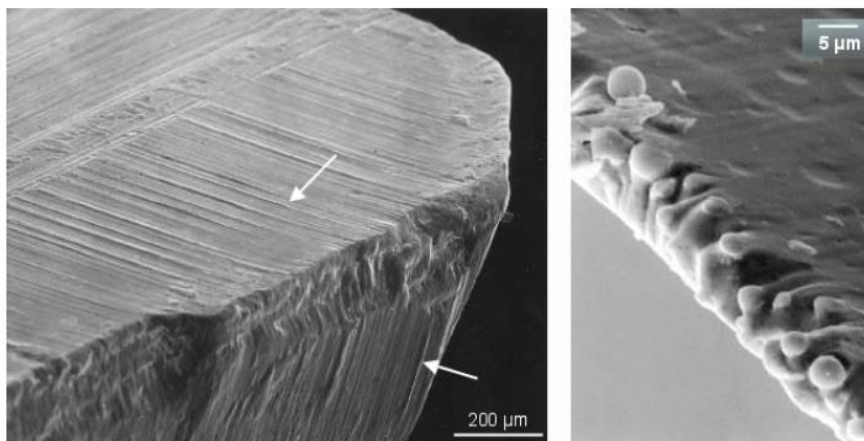


FIGURA 9 – Desgaste abrasivo (HOGMARK, 2005)

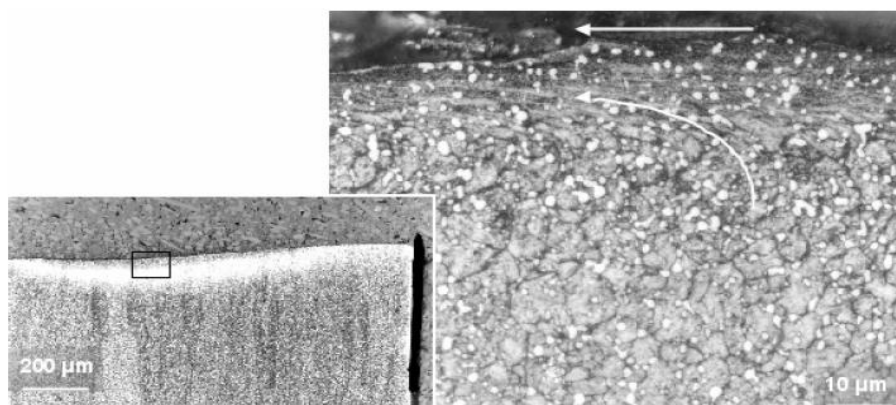


FIGURA 10 – Desgaste por adesão (HOGMARK, 2005)

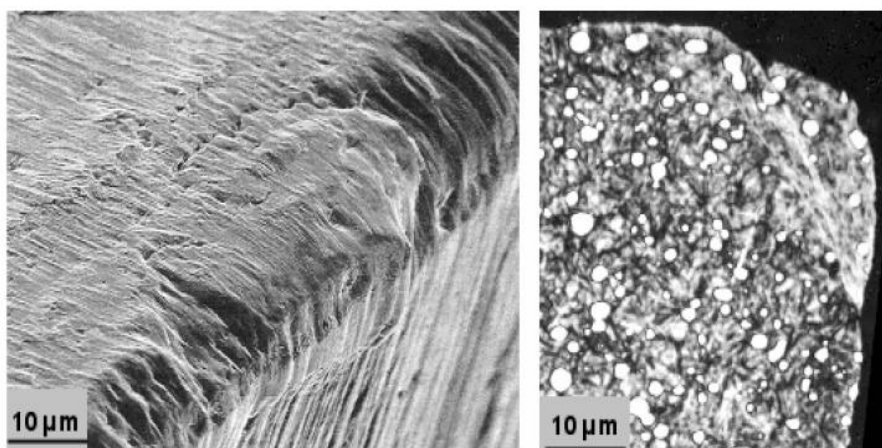


FIGURA 11 – Deformação plástica (HOGMARK, 2005)

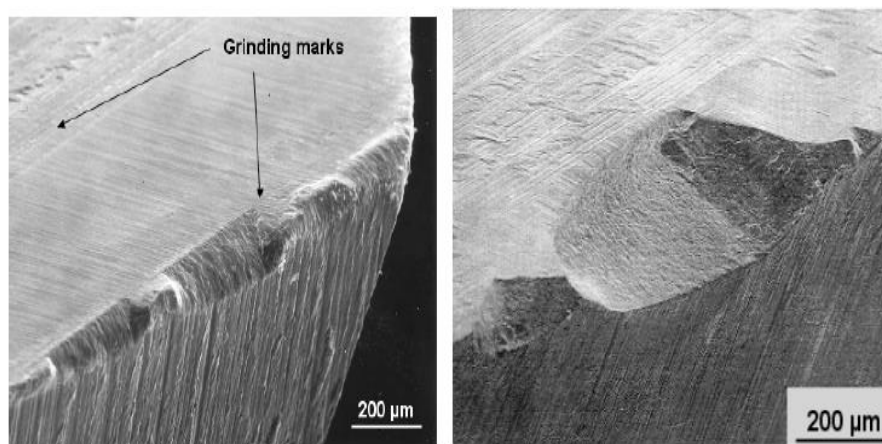


FIGURA 12 – Fadiga e fratura (HOGMARK, 2005)

As grandezas destes desgastes, ou a fixação de um nível de desgaste permitido irá depender de inúmeros fatores, tais como:

- Acabamento superficial requerido;
- Tolerâncias dimensionais não são mais possíveis de serem obtidas;
- Aumento excessivo da força de corte;
- Temperatura excessiva atingida pela ferramenta;
- Receio de uma falha catastrófica da ferramenta de corte devido ao nível de desgaste;
- E outros.

Através do controle destes fatores numa operação de usinagem, sabe-se quando a ferramenta deve ser substituída ou reafiada e também, estabelecer os limites econômicos de uma ferramenta, utilizando-a ao máximo.

2.8 CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA DE FERRAMENTA

Devido ao caráter progressivo do desgaste de ferramentas de corte, é necessário, para evitar danos causados por falhas catastróficas e gastos excessivos por operação inadequada da máquina operatriz, que se defina até onde uma ferramenta de corte pode ser útil, e quando esta começa a perder suas características operacionais, ou seja, quando a ferramenta deverá ser reafiada ou substituída.

A forma mais usual de determinar este ponto é dada pela norma ISO 3685. Esta norma estabelece ensaios de usinabilidade para determinar o período de tempo no qual uma ferramenta de corte pode trabalhar, até que seja necessária a sua substituição. Este período, denominado de “*tempo de vida da ferramenta de corte*”, é determinado através do tempo de trabalho necessário para que se desenvolva um defeito crítico.

Segundo a norma, os critérios que devem ser adotados para ferramentas de metal duro são:

- Desgaste de flanco médio, $VB = 0,3 \text{ mm}$

- Desgaste de flanco máximo, $VB_{max} = 0,6$ 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, $KF = 0,02$ mm
- Falha catastrófica.

A norma recomenda a reafiação ou substituição da ferramenta ao atingir qualquer um destes limites.

A norma ISO 3685, cita a rugosidade superficial (de acordo com a norma ISO 468), e o crescimento repentino das forças de usinagem como critério de fim de vida de ferramenta em operações de acabamento. No caso específico da rugosidade média, os valores indicados são definidos de acordo com a necessidade do fabricante.

2.9 ACABAMENTO SUPERFICIAL

Geralmente especificado em projetos mecânicos, o acabamento superficial representado principalmente pela rugosidade, consiste em um conjunto de irregularidades, com espaçamento regular ou irregular, que tendem a formar um padrão ou textura característica em uma superfície. Estas irregularidades estão presentes em todas as superfícies reais, por mais perfeitas que estas sejam, e muitas vezes constituem uma herança do método empregado na obtenção da superfície (torneamento, fresamento, furação).

A importância da rugosidade justifica-se pela sua relação, entre outros, com fatores como:

Precisão e tolerância – muito importante, em especial em peças com acoplamentos onde furo e eixo estejam em movimento relativo. Neste caso, superfícies com rugosidades mais pronunciadas estarão expostas a desgastes mais intensos do que os que sofreriam caso tivessem um melhor acabamento.

Resistência à corrosão – superfícies com acabamentos superficiais mais pobres tendem a reter maior quantidade de líquidos e vapores do que superfícies melhor acabadas. Desse modo, tornam-se mais vulneráveis a corrosão.

Resistência à fadiga – peças que trabalham sob cargas dinâmicas necessitam de melhor acabamento superficial, pois superfícies com alta rugosidade apresentam maior área efetiva, e geometrias mais propensas à concentração de tensões, oferecendo melhores condições para a nucleação de trincas de fadiga.

Escoamento de fluidos – superfícies com melhores acabamentos permitem escoamentos laminares a faixas mais amplas de velocidade, reduzindo a turbulência. No caso de pistões ou elementos que atuem como retentor, superfícies com melhor acabamento garantem uma vedação mais eficiente evitando a fuga do elemento sob pressão.

Lubrificação – Caso a profundidade da rugosidade de um entre dois componentes entre os quais haja lubrificação seja maior do que a espessura do filme de óleo usado ocorrerá contato entre partes metálicas, anulando a lubrificação.

Transmissão de calor – à medida que a rugosidade de um componente diminui, aumenta a área de contato entre este componente e outra superfície, aumentando o coeficiente de transmissão de calor, conforme a FIGURA 13.

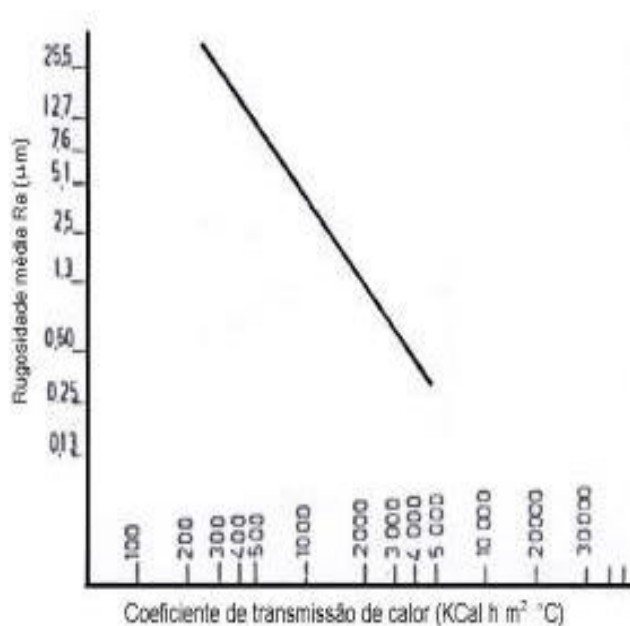


FIGURA 13 - Rugosidade média x coeficiente de transmissão de calor (Ferraresi, 1970)

2.10 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

Parâmetros de rugosidade são procedimentos usados para avaliar o acabamento superficial de um componente. Dentre todos, o mais amplamente usado é a rugosidade média R_a , geralmente expresso em micrometro (μm) no sistema métrico.

Devido à facilidade de sua medição, a rugosidade média é bastante empregada em controles continuados em linhas de produção para avaliação da rugosidade em superfícies de pouca responsabilidade e que apresentem sulcos bem definidos, sendo peças torneadas exemplos clássicos.

A rugosidade de uma peça manufaturada é afetada por diversos fatores, desde o processo de fabricação até a geometria da ferramenta, passando pelos parâmetros de corte. Dentre as variáveis que influem sobre a rugosidade, as mais importantes são:

Processo de fabricação – a FIGURA 14 mostra a variação da rugosidade em função do processo de fabricação utilizado, segundo Ferraresi⁽³⁾.

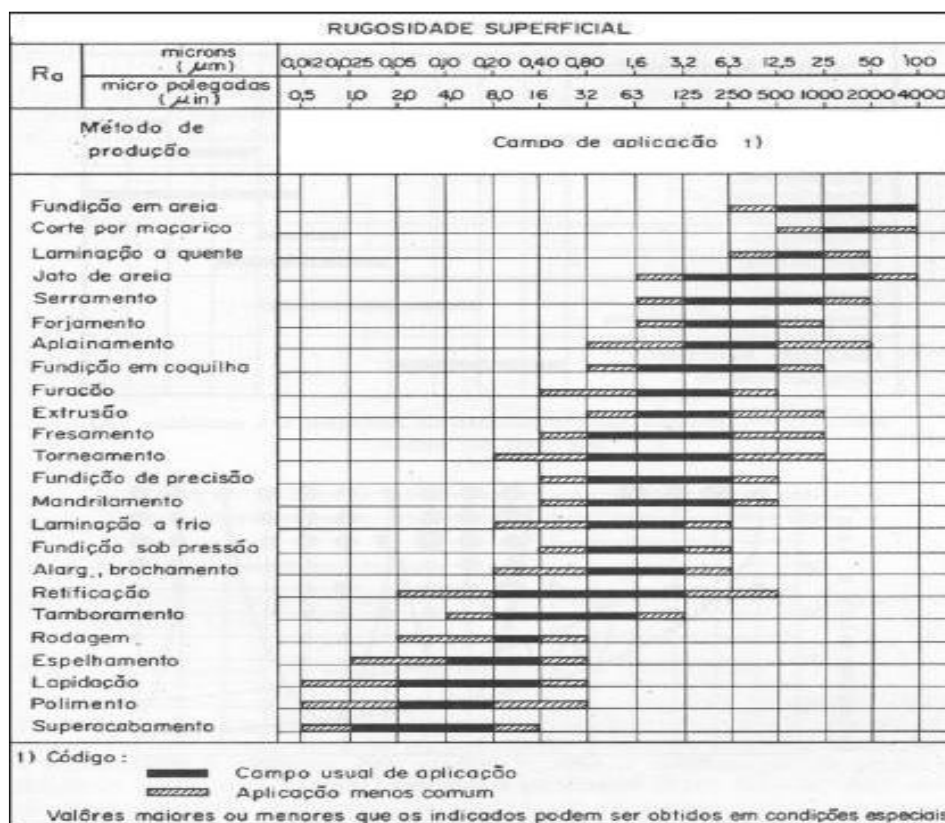


FIGURA 14 – Variação da rugosidade com o processo de fabricação (Ferraresi, 1970)

Parâmetros de corte – em relação aos parâmetros de corte, Diniz *et al*⁽²⁾ cita o mais importante como sendo o avanço, sendo este usado para a determinação teórica da rugosidade média. Em relação à profundidade de corte, esta não apresenta grande influência na rugosidade, exceto que, para profundidades de corte superiores a 1 mm ocorre um pequeno decréscimo na rugosidade.

A velocidade de corte mostra, para valores baixos, forte relação com a rugosidade média, devido à formação da aresta postiça de corte. Para velocidades de corte superiores a 100 m/min, a rugosidade torna-se praticamente estável em relação à velocidade de corte, segundo Ferraresi⁽³⁾.

2.11 ENSAIO DE USINABILIDADE

De acordo com Ferraresi⁽³⁾, a usinabilidade de um metal pode ser definida como uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de um valor numérico comparativo um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação a outro tomado como padrão. Entendem-se como propriedades de usinagem àquelas que expressam o seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem tais como a vida útil da ferramenta, a força de usinagem, o acabamento superficial, etc.

A usinabilidade interessa não somente aos fabricantes dos metais, como também aos consumidores e aos fabricantes de ferramentas, todos envolvidos na produção de peças por meio da formação de cavaco. Tem uma grande influência na produtividade de uma empresa, razão pela qual existe um enorme interesse em estabelecer métodos de ensaios não muito longos e com relativa precisão, que permitem determinar a usinabilidade de um material.

Infelizmente a usinabilidade não possui uma unidade bem definida devido às dificuldades apresentadas:

- A usinabilidade não é uma grandeza física do material, mas sim a propriedade resultante da combinação de dois materiais, isto é, da interação ferramenta-peça usinada.

- Os resultados das medidas de uma operação de usinagem não são precisos devido às dificuldades de serem analisados e interpretados dados a multiplicidade de fatores: velocidade de corte, avanço, geometria da ferramenta, materiais, aresta postiça, etc. O número de combinações possíveis de todos esses fatores é simplesmente astronômico.
- A dificuldade e demora dos ensaios não acompanham a rápida evolução dos materiais.

Em face do grande gasto de material e tempo, este controle não pode ser feito em ensaios de grande duração, mas sim, devem ser adotados aqueles ensaios que fornecem, num intervalo de tempo pequeno e com pouco gasto de material, resultados tais que sejam determinadas às condições ótimas de usinagem.

Ensaio prático de usinabilidade de curta duração, mostrado na FIGURA 15 informam sobre o comportamento dos materiais durante o processo de fabricação, normalmente sob condições forçadas de usinagem a fim de acelerar o desgaste da ferramenta. Os ensaios de curta duração possuem a vantagem de não serem tão dispendiosos devido ao pequeno gasto de tempo e insumos.

Os testes podem ser divididos em absolutos ou ranking testes. Os ranking testes, geralmente de curta duração, indica a condição comparativa de usinabilidade de dois ou mais pares ferramenta-peça para as mesmas condições de corte; enquanto os absolutos, todos de longa duração, fornecem o comparativo para uma dada faixa de condições de usinagem.

Crêterios	Tipos de ensaio	Ensaio de Usinabilidade	Variáveis medidas	Parâmetros de comparação
Vida da ferramenta	Longa duração	Levantamento de curvas de vida	Desgaste ou vida	V_{50} , V_{90} , etc.
	Curta duração (aceleração)	Método do comprimento usinado	Vida	Comprimento do cavaco usinado
		Faceamento Brandsma	Vida	Velocidade equivalente V_r
		Faceamento de Mathon	$D_{0.2}$	Diâmetro $D_{0.2}$ para uma rotação de 350 rpm
		Aumento discreto da velocidade de corte no torneamento	Comprimento usinado do último degrau, V_c , no instante da queima	Velocidade de corte comparativa V_{comp}
		Aumento progressivo da velocidade de corte no torneamento	Velocidade de corte no instante da queima	Velocidade de corte comparativa V_{comp}
		Ensaio com ferramenta tipo bedame	Desgaste	Desgaste para um certo tempo de operação
		Ensaio com medida do desgaste pelo método radioativo	Desgaste	Desgaste para um certo tempo de operação
	Ensaio com duração relativamente pequena	�ndice B	Desgaste Volume de material removido	�ndice B
		Método Macreadys	Desgaste	Gráfico comparativo onde são plotados os desgastes de flanco e cratera
Força de usinagem	Ensaio com duração relativamente pequena	Método da pressão específica de corte	Força principal de corte	Volume de cavaco usinado em relação � potência consumida e tempo de operação
		Método de tensão de cisalhamento	Força principal de corte	Tensão média de cisalhamento
		Método de força de avanço constante na furação	Avanço	Percorso de avanço para um determinado número de voltas da broca
		Método de força de avanço constante no torneamento	Força de avanço	Avanço que produz uma determinada força de avanço
		Método de força de avanço constante de Kovach	Vida	Tempo para executar determinado número de furos
Acabamento superficial	Ensaio com duração relativamente pequena	Ensaio baseado no acabamento superficial	Rugosidade	Relação entre a rugosidade teórica e a rugosidade obtida no ensaio
Produtividade	Longa duração	Ensaio baseado na produtividade	Produção, vida ou rugosidade	Produção horária
Temperatura de usinagem	Curta duração	Ensaio baseado na temperatura de usinagem	Temperatura de usinagem	Temperatura de usinagem para uma dada velocidade de corte
Características do cavaco	Curta duração	Grau de recalque	Espessura de corte	Grau de recalque
		Forma e coeficiente volumétrico	Volume ocupado pelo cavaco e forma do cavaco	Coeficiente volumétrico do cavaco
		Freqüência e amplitude de vibração da força de usinagem	Freqüência e amplitude de vibração da força de usinagem	
Energia	Curta duração	Ensaio baseado na energia fornecida pelo pêndulo	Deslocamento do mancal do pêndulo	

FIGURA 15 – Principais ensaios de usinabilidade (Evangelista, Soares e Kunrath, 2003)

3 METODOLOGIA

O experimento foi realizado na IMESA – Indústria Metal Mecânica Ltda., localizada em Carapina - Serra. Foi realizado a usinagem do eixo estriado, medindo a rugosidade e o comprimento usinado.

3.1 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

3.1.1 Corpos de prova (CPs):

O material utilizado foi um eixo estriado de aço inoxidável martensítico doado pela empresa para realização dos testes. O eixo tem 500 mm de comprimento e diâmetro de 321,5 mm, existindo dois tipos de estrias intercaladas: uma retangular com 50 mm de largura e 40 mm de profundidade e outra semicircular com raio de 100 mm, dando origem a “10 dentes” não uniformes com largura aproximada de 50 mm e profundidade de 40 mm. O eixo encontrava-se exposto ao meio ambiente por 10 anos (FIGURA 16), começando a apresentar os primeiros sinais de oxidação na superfície.



FIGURA 16 – Corpo de prova exposto ao meio ambiente

Foi removida amostra do eixo, para análise da composição do material, por meio de uma máquina tipo serra fita fornecida pela própria empresa. Uma parte quadricular com 40 mm de lado e 5 mm de espessura removido da parte continua do eixo foi analisado no

laboratório da CST – Companhia Siderúrgica de Tubarão. A composição nominal do aço é apresentada abaixo, na TABELA 1.

TABELA 1 – Composição nominal do aço em porcentagem

C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	V
0,0413	0,4984	1,0541	0,1546	4,7617	15,7	2,66	0,0782

Como resultado da análise tem-se o aço martensítico com adição alguns elementos como nióbio, silício, vanádio e níquel.

O mesmo pedaço de material analisado foi utilizado para medir a dureza no Laboratório de Metalografia no Centro Tecnológico da UFES. No centro da amostra foram realizados três ensaios e como média obtivemos 32 HRc.

O eixo foi dividido em três corpos de prova com comprimento de 120 mm (FIGURA 17) separados por um canal de 10 mm de largura e 8 mm de profundidade abertos com bedame (CM 4125 – RF 123G20-2525-B), como nos mostra a FIGURA 18, facilitando a entrada e saída de ferramenta. Foram utilizados 60 mm para fixação no torno e os 50 mm restantes foram deixados no início, devido a partes danificadas que levariam tempo para serem preparadas para o teste.



FIGURA 17 – Corpo de prova



FIGURA 18 – Abertura de rasgo com Bedame

3.1.2 Torno Universal

A máquina ferramenta utilizada no experimento foi um torno da marca NARDINI modelo LHM (FIGURA 19) com as seguintes características:

Diâmetro admissível: 500 mm;

Distância entre pontas: 3m;

Gama de velocidades: 10 – 475rpm;

Motor principal: 10hp;



FIGURA 19 – Torno NARDINI

3.1.3 Pastilhas e suportes:

Foram utilizadas seis pastilhas de metal duro de diferentes tamanhos, geometrias e classes juntamente com dois porta-ferramentas todos do mesmo fornecedor Sandvik Coromant. Abaixo foram tabeladas as características das ferramentas (TABELA 2).

TABELA 2 – Características das ferramentas

PORTA FERRAMENTA	PASTILHA	FORMATO	TIPO	TAMANHO	RAIO DE PONTA	APLICAÇÃO
MWLNR 2525M 08	WNMG 080408-23 GC 1005	Trigonal 80°	Negativa Dupla face	8 mm	0.8 mm	Acabamento em super ligas
	WNMG 080408-23 GC 1105	Trigonal 80°	Negativa Dupla face	8 mm	0.8 mm	Acabamento em super ligas
	WNMG 080408-MF GC 2025	Trigonal 80°	Negativa Dupla face	8 mm	0.8 mm	Acabamento em Inox
	WNMG 080408-PM GC 4235	Trigonal 80°	Negativa Dupla face	8 mm	0.8 mm	Usinagem média em aços
MTJNR 2525M 22M1	TNMG 080408-MM GC 2015	Triangular 60°	Negativa Dupla face	22 mm	1.2 mm	Usinagem média em Inox
	TNMM 080408-PR GC 4235	Triangular 60°	Negativa Face Única	22 mm	1.2 mm	Desbaste em aços

As características de cada classe segundo Catálogo principal, Sandvik Coromant⁽⁷⁾ são:

Classe GC1005 – Tem um revestimento PVD com camada de 4µm de TiAlN-TiN. Esse revestimento duro e resistente ao desgaste, aliado a um substrato duro e de grãos finos,

garantem as propriedades necessárias para se ter arestas de corte afiadas e uma grande segurança contra o martelamento de cavacos. Uma classe para tolerâncias estreitas e excelente acabamento superficial em HRSA e aços inoxidáveis.

Classe GC1105 – O substrato consiste de grãos finos e duros de WC com 6% de Co para alta dureza a quente e boa resistência contra deformação plástica. A nova cobertura fina de PVD-TiAlN com excelente adesão, inclusive em arestas, garantem tenacidade, desgaste de flanco homogêneo e desempenho excepcional em super ligas resistentes ao calor.

Classe GC2015 – Tem um substrato próprio para altas velocidades de corte. Uma zona gradiente tenaz próxima da superfície garante à aresta uma excelente segurança. O revestimento de 5.5 microns, com várias camadas, garante uma proteção muito boa contra desgaste e diminui o atrito e, conseqüentemente, a formação de arestas postiças.

Classe GC2025 – Consiste de um revestimento CVD com uma camada de 5.5 μ m de TiCN-Al₂O₃-TiN sobre o substrato com excelente resistência a choques térmicos e mecânicos. Isso garante uma excelente aderência com grande resistência ao desgaste por craterização e a deformação plástica em altas temperaturas. Também reduz o atrito e, conseqüentemente, a formação de arestas postiças.

Classe GC4235 – Tem uma espessa camada de Al₂O₃ sobre uma camada de média espessura de TiCN. A espessura total dessa cobertura CVD é de aproximadamente 12 μ m. A cobertura deixa a classe resistente ao desgaste. A GC4235 é uma boa opção para aplicações que exigem tenacidade e resistência a deformação plástica. Ela funciona muito bem em cortes interrompidos. Uma classe segura para aplicações bastante produtivas na área P35 de aços com alta dureza e para usinagem de aço inoxidável na área M25 quando houver necessidade de uma resistência maior ao desgaste.

3.1.4 Microscópio Metalúrgico

Para a medição e leitura dos valores de desgaste das ferramentas de corte, utilizou-se um microscópio metalúrgico Olympus BX60M, conforme apresentado na FIGURA 20, disponível no Laboratório de Metalografia no Centro Tecnológico da UFES.

Para a obtenção das fotografias dos desgastes das ferramentas de corte foi utilizado um acessório, de maneira que as imagens da objetiva fossem para um computador. Neste, utilizou-se o software ScrotoPhoto versão 2.0.4 para capturar e gerar os arquivos digitais contendo as referidas fotos.



FIGURA 20 – Conjunto Microscópio e computador

3.1.5 Rugosidade superficial

As medições da rugosidade superficial dos corpos de prova foram feitas no local da usinagem, com a peça ainda fixada no torno, utilizando um rugosímetro portátil da marca Taylor - Hobson, modelo Surtronic 3+ (FIGURA 21). O parâmetro superficial medido em todos os ensaios foi sempre a rugosidade média **Ra** em micrometro com comprimento de amostragem de 0,8 mm.



FIGURA 21 – Rugosímetro portátil

Para realização da medição da rugosidade superficial, foram realizadas três medições em diferentes dentes de cada corpo de prova. Cada um dos dentes foi medido três vezes com espaços de 30 mm, um no início, outro no meio e a última medição no final do corpo de prova. A FIGURA 22 ilustra os pontos utilizados na medição.

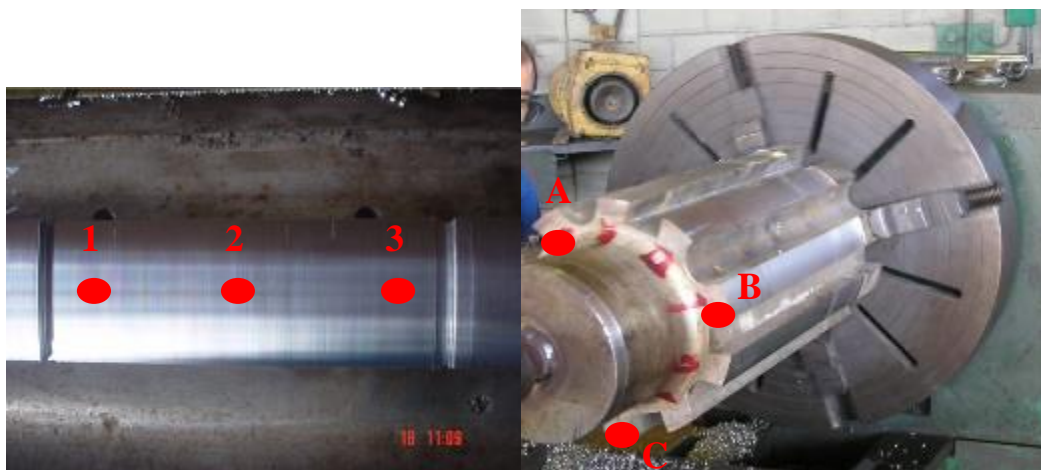


FIGURA 22 – Pontos de medição da rugosidade

3.2 MODELAMENTO ADOTADO

O eixo estriado foi fixado em uma placa de quatro castanhas independentes, utilizando uma luneta (FIGURA 23) para centralização e furação do contraponto feito no próprio torno.



FIGURA 23 – Luneta fixada ao eixo

O eixo foi calibrado medido através de um relógio comparador 2046S Mitutoyo 10 mm (FIGURA 24) sua circunferência na parte contínua no lugar mais crítico, longe da placa de

fixação do torno. Os resultados obtidos foram satisfatórios com menos de 0,03 mm de desbalanceamento. Este mesmo relógio foi usado para fazer o avanço de profundidade no torno evitando folgas adquiridas com o tempo.



FIGURA 24 - Relógio

Levando em consideração os parâmetros fornecidos pelo catálogo do fabricante das pastilhas, delimitamos nossos parâmetros, baseado na usinagem de aço inoxidável martensítico em condições difíceis de usinagem. Os valores aproximados para as opções fornecidas pelo torno foram:

TABELA 3 – Parâmetros iniciais

f [mm/rot]	Rotação [rpm]	a_p [mm]
0,17	125	1,0

Antes de iniciar o experimento, a pastilha W1105 foi utilizada para remoção inicial da superfície em oxidação. Nesta etapa manteve-se a velocidade de corte e avanço, e reduzimos a profundidade para 0,2 mm. Durante o passe inicial, a pastilha apresentou avaria no final dos 400 mm usinados, indicando assim, uma escolha incorreta dos parâmetros, o que nos fez redefini-los.

TABELA 4 – Parâmetros utilizados

f [mm/rot]	Rotação [rpm]	a_p [mm]
0,17	65	0,5

O ranking teste de curta duração foi realizado para processo de torneamento intermitente retilíneo externo sem lubrificação ou refrigeração (fluidos de corte). A cada dois passes capitalizando 240 mm foi feita uma medição da rugosidade, no total foram realizados três medições de rugosidade depois de concluído o total de 720 mm de comprimento usinado. Se a ferramenta sofresse qualquer tipo de avaria antes de concluirmos os dois passes no corpo de prova, era dado o fim de vida da ferramenta e iniciávamos o ensaio com a pastilha seguinte.

Cada pastilha foi denominada pela primeira letra referente ao formato da pastilha seguido do número referente à classe da pastilha, exemplo:

W1105

Formato triangular 80° / classe GC 1105

O experimento foi dividido em três fases. Na primeira fase comparamos três pastilhas de mesmo formato e geometria, mas com classes diferentes. Medimos a rugosidade e o comprimento usinado de cada uma mostrando qual classe obteve melhor resultado no torneamento intermitente de aço inoxidável martensítico.

Na segunda fase do ensaio, mantivemos os parâmetros anteriores e mudamos a geometria da pastilha, mantendo a mesma classe para definir qual geometria das pastilhas testadas obteria melhor resultado. Como o eixo só possuía três corpos de prova foi utilizada outra aresta de corte da pastilha W1105 para preparar o corpo de prova para o teste. A velocidade de corte neste caso é menor que na fase anterior, porém essa diferença não é significativa devido o grande diâmetro e a pequena diferença após os dois primeiros passes de 0,5 mm.

Na terceira e última fase mudamos alguns parâmetros das pastilhas que possuíram melhores resultados nos dois últimos testes, para estudar a influência dos principais parâmetros no torneamento intermitente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na preparação da peça para o teste foi detectada uma avaria (FIGURA 25) com 500 mm usinados, mesmo utilizando condições mais favoráveis do que as que seriam utilizadas no experimento. Concluímos, antes mesmo de iniciar o teste, que não existiriam parâmetros concretos para condições difíceis como no torneamento intermitente existente nesse caso.

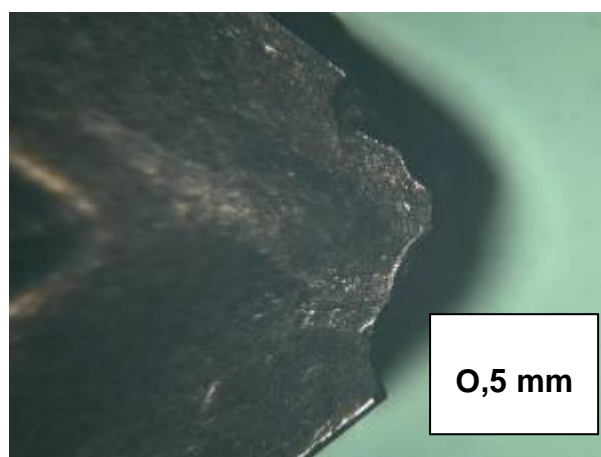


FIGURA 25 – Avaria da aresta da ferramenta W1105 na preparação da peça

De acordo com Machado e Silva⁽⁴⁾, as ferramentas de corte usadas no corte interrompido são frequentemente rejeitadas por trincamento, lascamento ou quebras. Neste tipo de operação o desenvolvimento do desgaste uniforme, na superfície de folga ou saída, será dominante apenas se a ferramenta de corte possuir tenacidade suficiente para resistir aos choques mecânicos e térmicos inerentes a tais processos.

Na primeira fase dos testes utilizamos as pastilhas W1005, W2025, W4235. As duas últimas sofreram desgaste por lascamento durante o segundo passe, não se fazendo necessário à medição da rugosidade. A pastilha W1005 completou os dois passes iniciais e durante o quarto passe sofreu avaria. No final do corpo de prova foram tiradas duas medidas de rugosidade, no 2º e 4º passe, antes da quebra. Nas FIGURAS a seguir (26, 27 e 28), podemos ver as avarias dessas pastilhas. Em seguida veremos na FIGURA 29 as comparações do comprimento usinado.

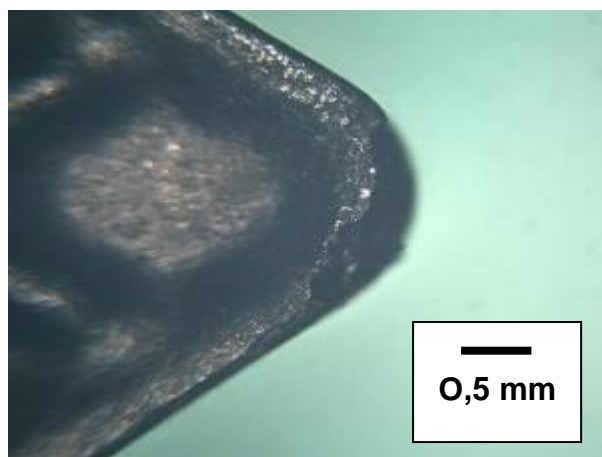


FIGURA 26 – Aresta da ferramenta W4235 após usinar 165 mm.

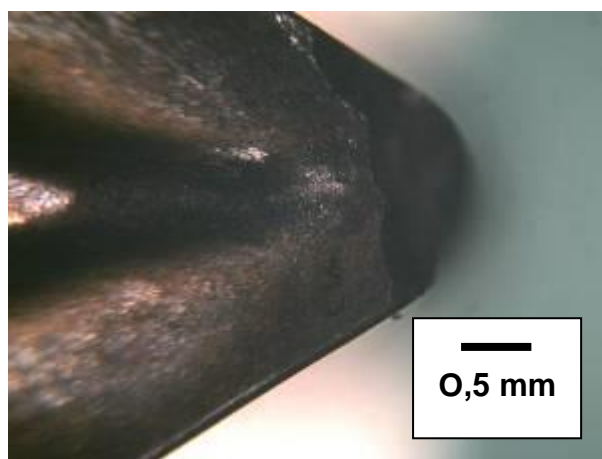


FIGURA 27 – Aresta da ferramenta W2025 após usinar 225 mm.

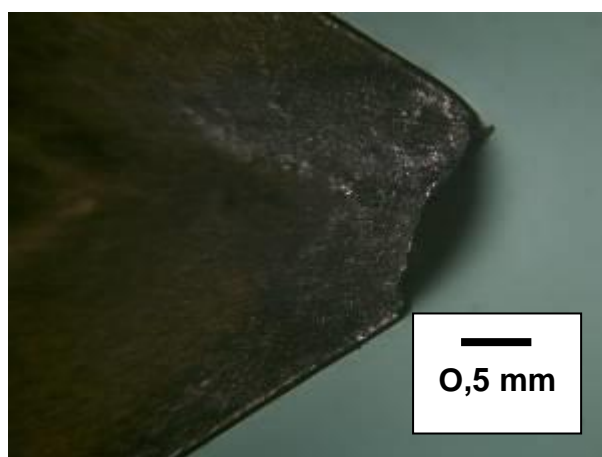


FIGURA 28 – Aresta da ferramenta W1005 após usinar 430 mm.

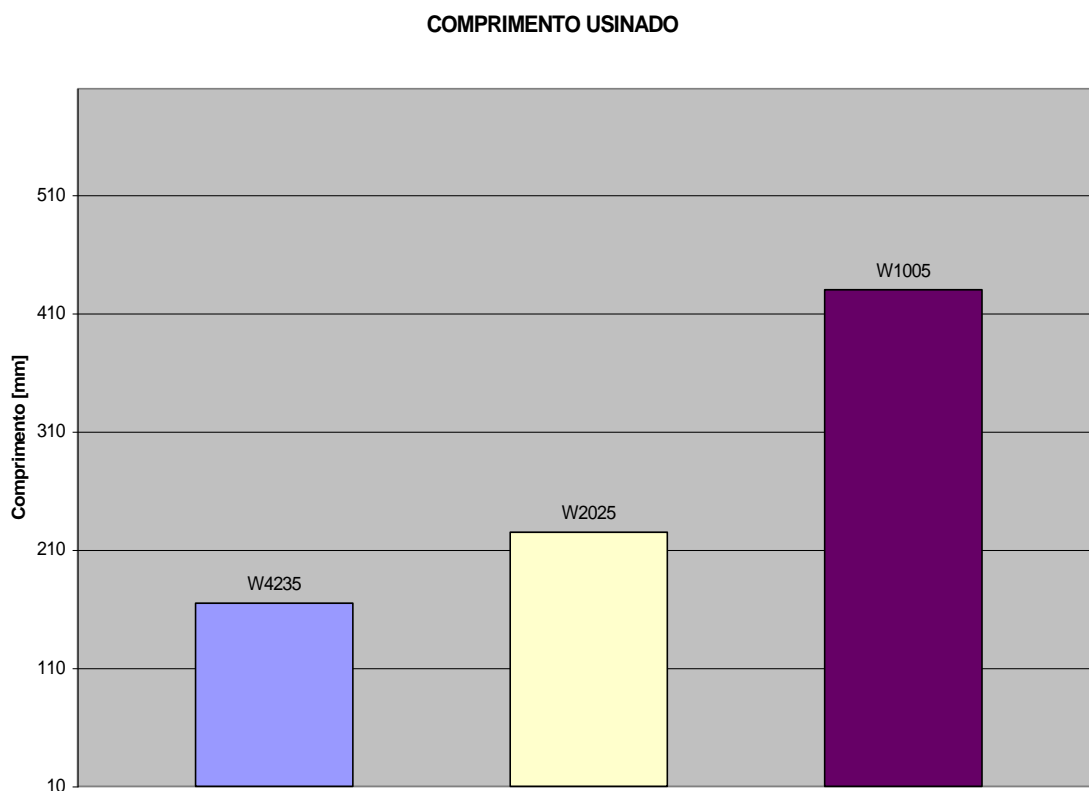


FIGURA 29 – Comparativo do comprimento usinado das pastilhas de mesma geometria

O resultado da primeira fase nos mostra que a classe GC 1005, devido ao substrato duro e de grãos finos, apresentou diferença significativa quando comparada às demais classes utilizadas no ensaio, quanto à resistência da aresta de corte durante o torneamento com corte interrompido de aço inoxidável martensítico.

Na segunda fase do experimento a pastilha T4235 foi testada mantendo os parâmetros da primeira fase. Foram feitas duas medidas de rugosidade, após o 2º e 4º passes. Antes de terminar o quinto passe, a pastilha sofreu uma falha, demonstrando o mesmo tipo de desgaste que as pastilhas anteriores, por lascamento. A seguir temos um comparativo do comprimento usinado das pastilhas de mesma classe (FIGURA 30).

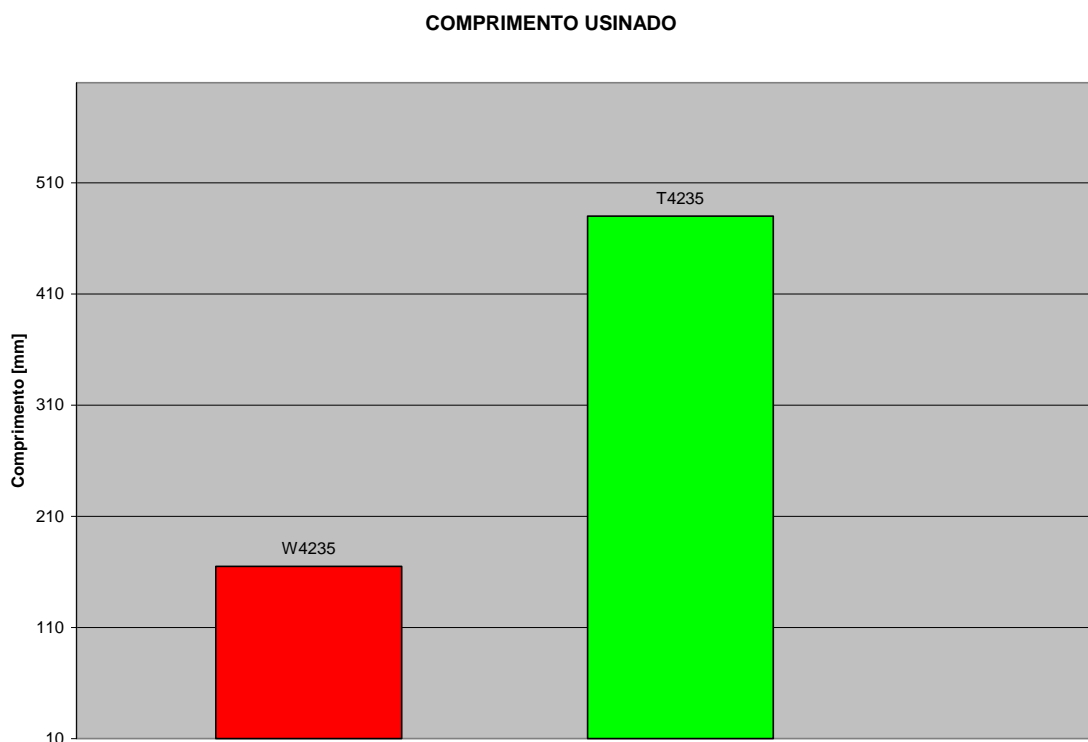


FIGURA 30 – Comparativo do comprimento usinado das pastilhas de mesma classe

O resultado foi o previsto, apesar do formato W possuir a aresta de corte mais resistente que o formato T. A pastilha triangular 60° utilizada é cerca de 1,4 vezes o tamanho da pastilha W, e apresenta também um raio de ponta 1,5 vezes maior, dando maior resistência a aresta de corte.

Nessa fase usinamos com a pastilha T2015 comparando com a W2025, a qual possui classes semelhantes. O resultado encontrado foi igual ao anterior, uma significativa melhora no torneamento intermitente com as pastilhas mais robustas, com raio de pontas maiores. Nesta etapa percebemos que o raio de ponta maior nos fornece maior segurança, mas por outro lado, possui uma qualidade superficial inferior, como podemos observar no (FIGURA 31) onde comparamos as medidas das rugosidades com as pastilhas anteriores.

Quando comparadas as pastilhas de formato T, a pastilha da classe GC 2015 foi a que obteve o melhor resultado, mostrando um maior comprimento usinado e uma melhor qualidade superficial.

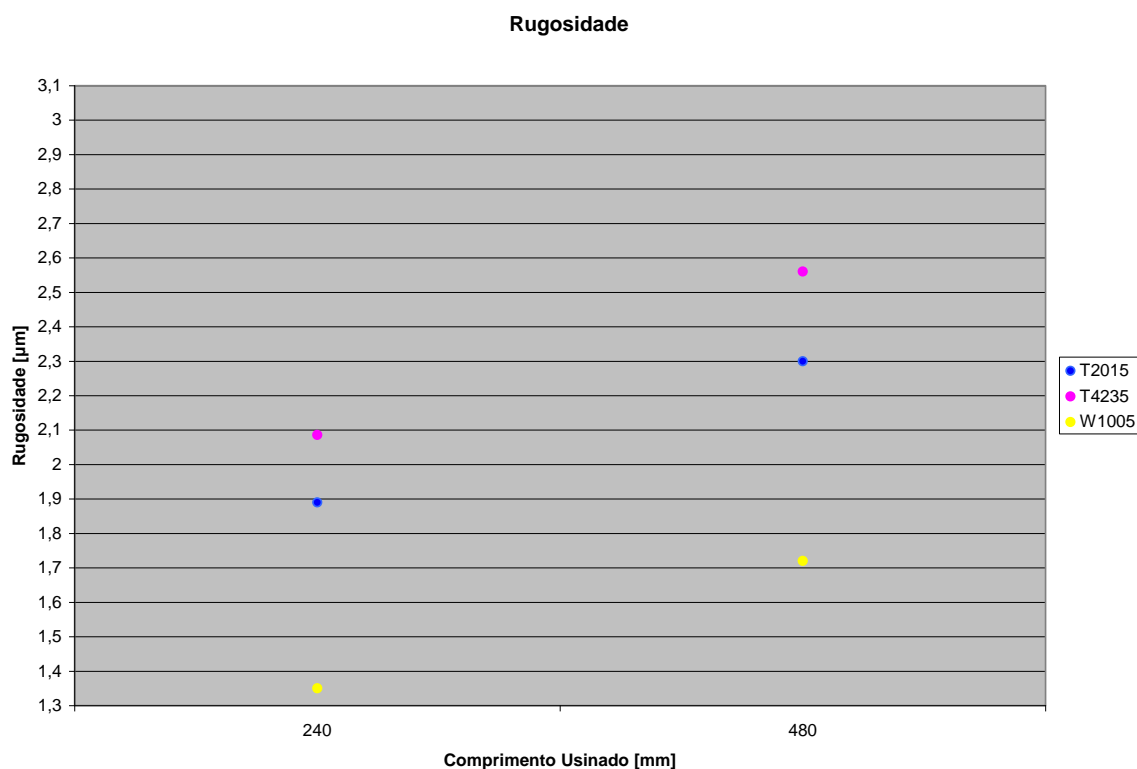


FIGURA 31 – Comparação da rugosidade das pastilhas de melhor desempenho

Quando ocorria o desgaste por lascamento, o acabamento mudava de brilhoso para ruim, o que dificultava a medição da rugosidade média, em virtude desse parâmetro estar fora da escala do equipamento. Construímos o gráfico em função apenas do comprimento usinado, não incluindo os picos de rugosidade após o lascamento.

Na terceira e última fase fizemos um teste com outra aresta de corte das pastilhas com melhores resultados. A pastilha T2015 foi usinada com a profundidade de corte 100% maior que a profundidade inicial. No primeiro passe, antes da metade do corpo de prova, a pastilha sofreu uma quebra (FIGURA 32). Em seguida a pastilha W1005 foi testada com velocidade de avanço aproximadamente 100% maior que a velocidade inicial. A qualidade da superfície piorou visualmente, o rugosímetro não foi utilizado nesta fase, usinando até o fim do segundo passe. A terceira e última pastilha foi testada com velocidade de corte aproximadamente 100% maior que a velocidade inicial, apresentando queda da qualidade superficial, apenas no segundo passe.

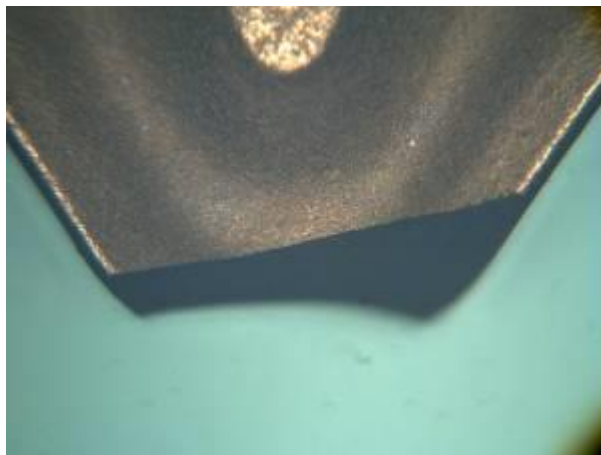


FIGURA 32 – Quebra da aresta da ferramenta T2015 na terceira fase

Esses resultados mostraram que no torneamento intermitente a profundidade de corte é o parâmetro mais influente na vida da ferramenta, visto que as forças de corte aumentaram em relação ao parâmetro profundidade quando relacionados aos outros parâmetros.

De acordo com os Ko e Kim⁽⁸⁾, a FIGURA 33, mostra a tendência das forças de corte em relação as diferentes condições de corte no torneamento intermitente de aços endurecidos. A componente radial é dominante, assim como no torneamento contínuo. Isto mostra que a força de impacto não influencia a força de corte de maneira geral no torneamento intermitente. A força de corte decresce suavemente com o aumento da velocidade de corte ao contrário do avanço e profundidade de corte que influenciam significativamente a força de corte. Em particular o efeito da profundidade é o mais significativo.

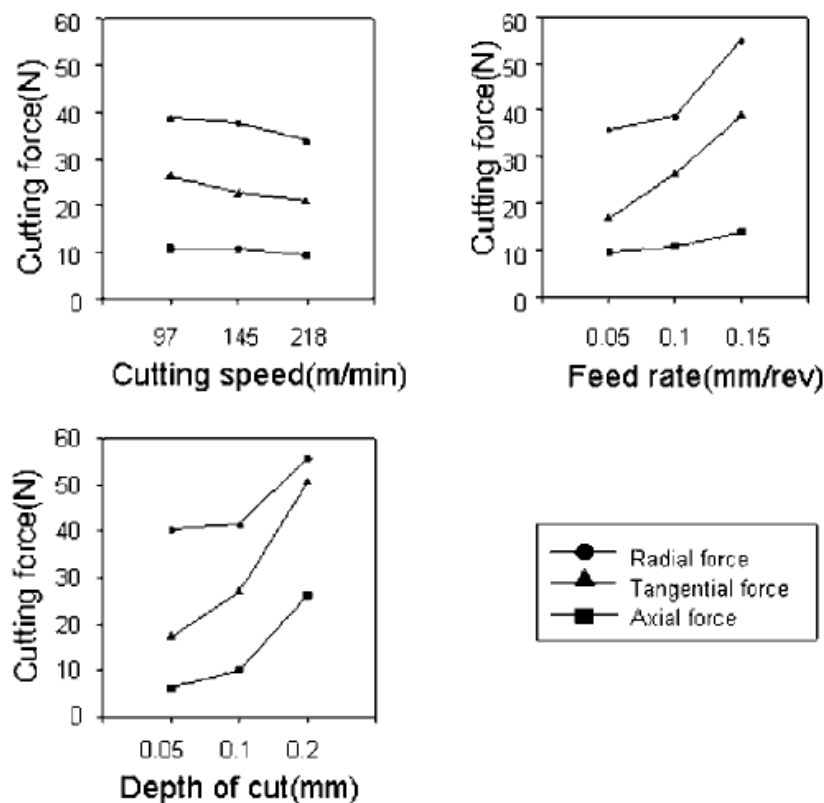


FIGURA 33 – Tendência das forças de corte

Devido às avarias sofridas antes do esperado, não conseguimos realizar o teste de curta duração como tínhamos planejado, ou seja, não foi possível avaliar o VB e o VBmáx. Conseguimos medir apenas, o comprimento e a Ra de alguns corpos de prova.

As falhas nas pastilhas podem ter sido originadas na saída da ferramenta, no processo de formação do cavaco. De acordo com a figura 34, após o volume *klmn* passar pela zona de cisalhamento primária, já deformado plasticamente, passa-se para um novo formato *pqrs*, e se movimenta sobre a superfície de saída da ferramenta, definindo-se a região da zona de cisalhamento secundária, representada pelo plano OB.

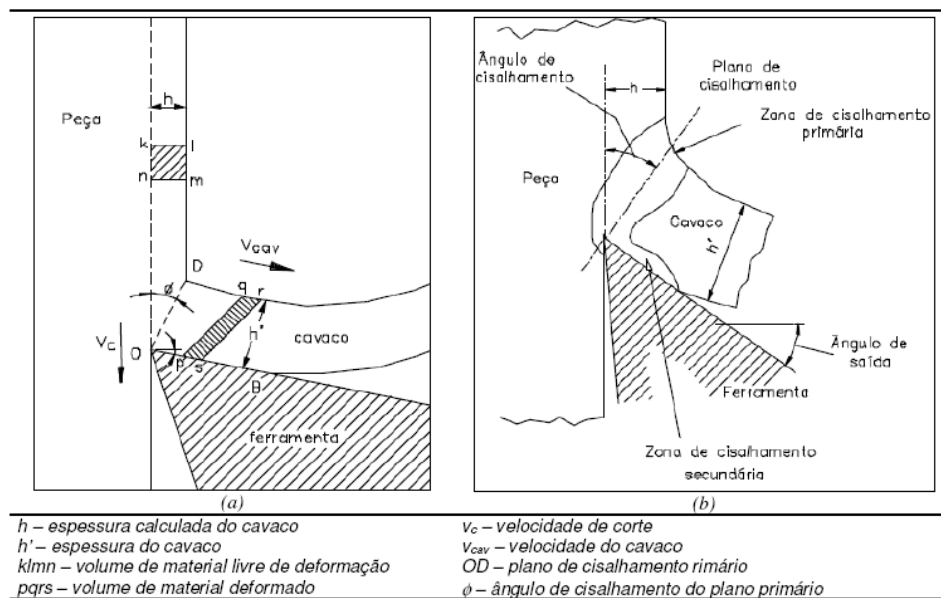


FIGURA 34 – Diagrama esquemáticos da cunha de corte (Trent, 1991)

A seguir um gráfico (FIGURA 35) comparando todas as pastilhas utilizadas no teste, usinadas com o mesmo parâmetro, mostrando que de maneira geral a pastilha T2015 obteve o melhor desempenho.

COMPIMENTO USINADO

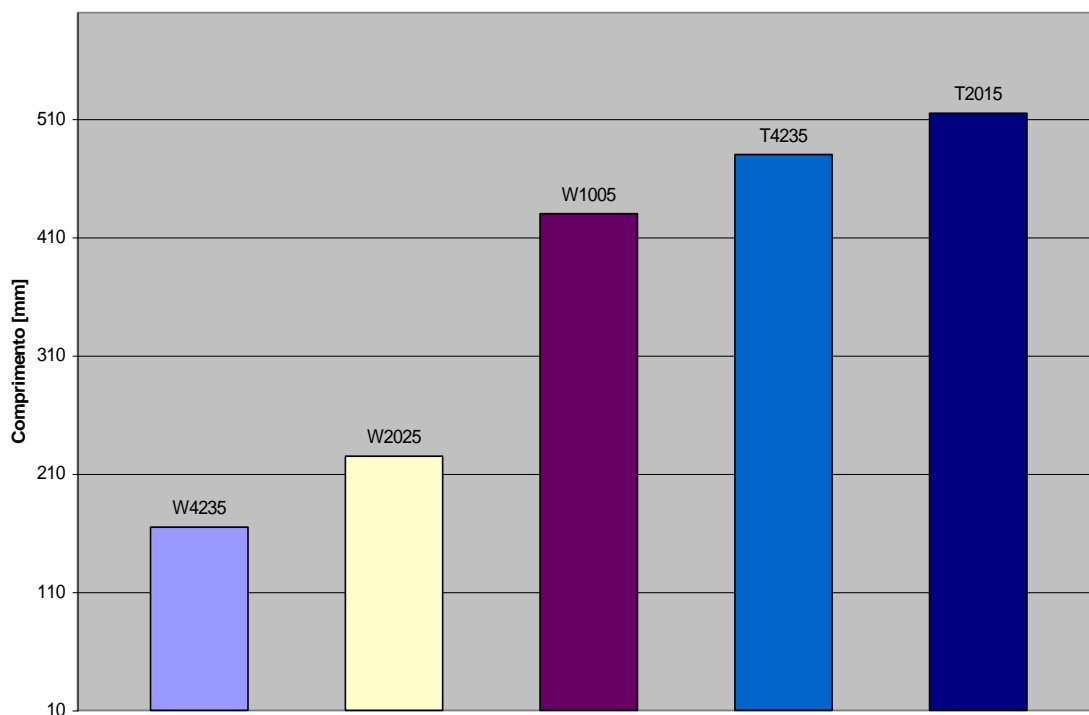


FIGURA 35 – Comparativo de todas as pastilhas ensaiadas

Todas as ferramentas analisadas sofreram lascamento. Esse tipo de desgaste, ao contrário do desgaste de flanco que retira continuamente partículas muito pequenas das ferramentas, retira partículas maiores de uma só vez. Segundo Diniz *et al*⁽²⁾, essa forma de avaria ocorre principalmente em ferramentas com material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada, prejudicando o acabamento superficial da peça e, se continuam crescendo, provocam a quebra da ferramenta.

Afirmam ainda, que o lascamento também pode ser causado por geometria da ferramenta muito fraca e choques da ferramenta com a peça, e as possíveis ações para minimização dessa avaria seriam de selecionar classes de ferramentas mais tenazes, aumento do raio da ponta, utilizar máquinas mais estáveis e evitar choques mecânicos.

Por outro lado recentes trabalhos com usinagem mostram que as ferramentas de CBN são conhecidas por serem boas no corte interrompido devido sua ductilidade à fratura ser melhor^(9,10) apresentando um alto desempenho. Entretanto, a baixa tenacidade do material da ferramenta somado ao aumento da dureza da peça, implica emprego de avanços por dente menores⁽¹¹⁾.

Em recente trabalho publicado no Encarte Científico⁽¹²⁾ “O Mundo Da Usinagem” foi feito um estudo do desgaste de pastilhas de metal duro no torneamento da casca de fundição de um aço inoxidável super duplex e o corte da casca de fundição assemelha-se a um corte interrompido em que as irregularidades da periferia do fundido são da ordem de milímetros e faz com que o contato entre o material e a peça não seja constante em alguns pontos da aresta cortante. E devido aos choques mecânicos as pastilhas quebravam prematuramente como no nosso trabalho. Também a vida das ferramentas utilizada nesse ensaio também foi pequena com a melhor pastilha usinando apenas 420 mm do corpo de prova.

5 CONCLUSÕES

O melhor desempenho entre as ferramentas de metal duro no torneamento intermitente de aço inoxidável martensítico foi à pastilha com classe mais resistente ao desgaste e com raio de ponta maior.

Caso seja necessário aumentar a produtividade das pastilhas alterando os parâmetros para uma usinagem mais rápida, alterar a velocidade de corte e o avanço seriam os mais recomendados no caso do torneamento intermitente de aço inoxidável martensítico.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. TEBECHERANI, C. T. P. **Aços inoxidáveis**. São Paulo: 1999. Disponível em: www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/Artigo_para_pipesystem_sobre_inox1.pdf Acessado em: 15 de Maio de 2007.
2. DINIZ *et al* **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 5º Ed. Artliber, 2006.
3. FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 6º Ed. Blucher, 1970.
4. MACHADO E SILVA **Usinagem dos metais**. 8º versão, 2004.
5. WEINGAERTNER, W. **Determinação do fim de vida da ferramenta através do monitoramento da força de usinagem em torneamento**. Anais do 2º COBEF, 2003.
6. HOGMARK, S. **Wear mechanisms of HSS cutting tools**. Uppsala University, 2005..
7. Catálogo Principal Sandvik Coromant, 2007.
8. KO T. J ; KIM H. S. **Surface integrity and machineability in intermittent hard turning**. Spring-Verlag London Limited, 2001.
9. NARUTAKI, N.; YAMANE, Y. **Tool wear and cutting temperature of CBN tools in machining of hardened steels**. Annals CIRP, 28(1), pp. 23–28, 1979.
10. NAKAI, t. *et al*. **Hard turning by PCBN**. Superabrasive, 11–13 June, Chicago, pp. 11/61–11/75, 1991.
11. WEINGAERTNER, L.; GOMMES, J. O. **Influência dos parâmetros de corte sobre a estabilidade dinâmica do fresamento de topo reto a altas velocidades**. São Paulo, 2004.
12. O Mundo da Usinagem, **Estudo Do Desgaste De Pastilhas de Metal Duro no Torneamento da Casca de Fundição de um Aço Inoxidável Super Duplex**. Edição nº: 36, Volume III, Junho de 2007.

ANEXOS

TABELA 5 - Medições da Rugosidade

[illegible]

ILUSTRAÇÕES



FIGURA 36 – Superfície após o 5º passe da pastilha T2015



FIGURA 37 - Superfície após o 4º passe da pastilha W1005



FIGURA 38 - Superfície após o 2º passe da pastilha W4235



FIGURA 39 - Superfície após o 4º passe da pastilha T4235



FIGURA 40 - Superfície após o 2º passe da pastilha W2025



FIGURA 41 - Superfície mostrando quebra logo no início da pastilha T2015 usinando com profundidade 100% maior

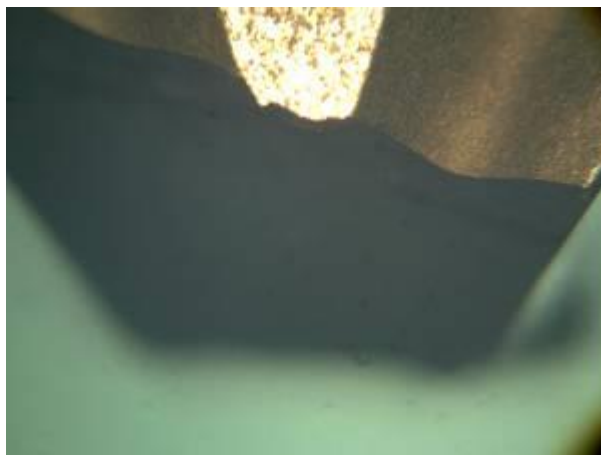


FIGURA 42 - Destruição da aresta da pastilha T2015 num erro operacional.



FIGURA 43 - Aresta da pastilha T2015 após usinar 515 mm.

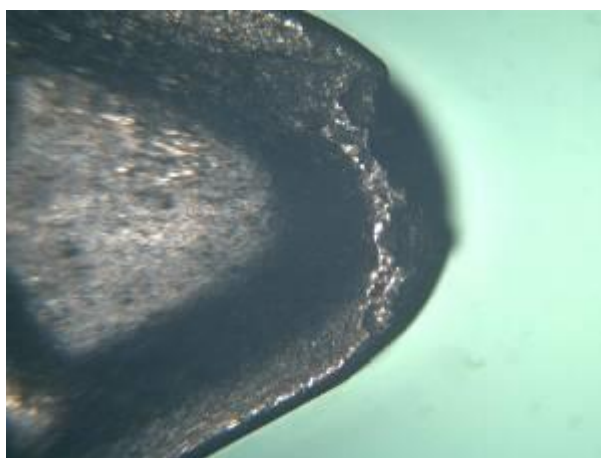


FIGURA 44 - Aresta da pastilha T4235 após usinar 480 mm.