

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

**GILMAR BARRETELLA JUNIOR
PLINIO AUGUSTO HATSUMURA**

**Avaliação da Influência da Microgeometria da Aresta
(Preparação da Aresta de Corte) no Desempenho de
Ferramentas de Usinagem**

**SÃO PAULO
2007**

FICHA CATALOGRÁFICA

Barretella Junior, Gilmar

Avaliação da influência da microgeometria da aresta (preparação da aresta de corte) no desempenho de ferramentas de usinagem / G. Barretella Junior, P.A. Hatsumura. -- São Paulo, 2007.

56 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Usinagem 2.Aço temperado 3.Ferramentas I.Hatsumura, Plínio Augusto II.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III.t.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

GILMAR BARRETELLA JUNIOR
PLINIO AUGUSTO HATSUMURA

**Avaliação da Influência da Microgeometria da Aresta
(Preparação da Aresta de Corte) no Desempenho de
Ferramentas de Usinagem**

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Graduação em Engenharia.

**Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica**

Orientador: Professor Dr. Amauri Hassui

SÃO PAULO
2007

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Amauri Hassui, pela orientação e motivação transmitidas ao longo do projeto.

Ao Engenheiro Marcelo Acacio Rodrigues, M.Sc. pelo constante apoio e aconselhamento na execução do trabalho.

Aos senhores Erivelto A. Miranda e Wellington R. Queiroz da empresa Wolf Brasil, pelo fornecimento das ferramentas para usinagem.

Aos senhores Daniel Ávila e Ricardo Caetano da empresa Thermix, por fornecer o serviço de tratamento térmico dos corpos de prova.

Ao senhor Jovinilo Oliveira, pelo auxílio técnico.

Aos nossos familiares pelo incentivo e compreensão.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão desse trabalho.

RESUMO

Neste trabalho foi avaliado o desempenho de diferentes microgeometrias (preparações de arestas) de ferramentas de corte cerâmicas no torneamento. Foi também estudado o comportamento do desgaste de ferramentas de metal duro. Para tanto, foram usinados corpos de provas com diferentes condições de corte (velocidades de corte e avanço) e preparações de arestas das ferramentas (retas ou com chanfros).

Cabe ressaltar que as ferramentas utilizadas foram as comercialmente existentes e os ensaios preliminares definidos com base num planejamento experimental fatorial. As variáveis de entrada foram as microgeometrias das ferramentas e as condições de corte.

Foi realizado análise do desgaste das ferramentas, com o auxílio de microscopia óptica quantitativamente que, neste caso, avaliou a extensão e progressão dos mesmos.

Os resultados dos experimentos indicaram o comportamento das microgeometrias das ferramentas nas diferentes condições de usinagem, verificando a possibilidade de obtenção de um nível de qualidade especificado.

Foi verificada também a relação entre as diferentes formas de preparação da aresta de corte e os mecanismos e fenômenos de desgaste durante a usinagem. Além disto, foi possível conhecer a melhor combinação entre a microgeometria e o material que possibilite um corte mais estável, tornando maior a vida da ferramenta.

ABSTRACT

In this work it was evaluated the performance of different microgeometries (tool edge preparations) during the turning process. To do so, samples were turned under different cutting conditions (cutting speed, feed rate and cutting depth) and tool edge preparations.

It should be outlined that the tools used were the commercially available ones and the preliminary tests were defined based on a factorial experimental planning. The input variables were the cutting tool microgeometries and the cutting conditions.

The tool wear was also analyzed, with the aid of an optical microscopy, to quantitatively evaluate its extension and growing rate.

The experiments' results indicated the behavior of the cutting tools' microgeometries under different cutting conditions, verifying the possibility of obtaining a specified quality level.

Checking the relationship between different forms of cutting edge preparation with the wear mechanisms and phenomena during turning was also done. Besides that, an attempt to understand the best combination between material and microgeometry that allows a more stable cut, with consequently longer tool life, was made.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos de torneamento.....	02
Figura 2 – Plano de trabalho.....	04
Figura 3 - Sistema efetivo de referência de uma ferramenta e sistema de referência da ferramenta de um torno.....	05
Figura 4 – Geometria de uma ferramenta de barra.....	06
Figura 5 – Usinagem com aresta de corte arredondada	07
Figura 6 – Ângulos da cunha cortante.....	08
Figura 7 – Geometrias de ferramentas	10
Figura 8 – Desgaste frontal.....	11
Figura 9 – Desgaste de cratera	12
Figura 10 – Aspecto micrográfico de um aço temperado.....	15
Figura 11 – Sistema de resfriamento no Ensaio Jominy.....	16
Figura 12 – Curvas de dureza Jominy, comparando diversos tipos de aços .	17
Figura 13 – Codificação das ferramentas.....	19
Figura 14 – Geometria da ferramenta.....	20
Figura 15 – Codificação do porta-ferramentas.....	21
Figura 16 – Geometria do porta-ferramentas.....	21
Figura 17 – Torno Traub TX-08.....	22
Figura 18 – Comandos do torno Traub TX-08.....	23
Figura 19 – Detalhamento de alguns comandos.....	23
Figura 20 – Preparação das castanhas	24
Figura 21 – Fixação da peça.....	24
Figura 22 – Preparação dos aços 4340.....	25
Figura 23 – Grades de proteção	26
Figura 24 – Microscópio óptico.....	32
Figura 25 – Ensaio 1.....	33
Figura 26 – Ensaio 2.....	34
Figura 27 – Ensaio 3.....	34
Figura 28 – Ensaio 9.....	35
Figura 29 – Comparação entre os aços e preparação da aresta de corte	36
Figura 30 – Avanço 0,35 mm/rot, sem revestimento.....	37

Figura 31 – Avanço 0,35 mm/rot, com revestimento.....	38
Figura 32 – Avanço 0,50 mm/rot, sem revestimento	38
Figura 33 – Avanço 0,50 mm/rot, com revestimento.....	39
Figura 34 – Avanço 0,35 mm/rot, sem revestimento.....	40
Figura 35 – Avanço 0,35 mm/rot, com revestimento.....	40
Figura 36 – Avanço 0,50 mm/rot, sem revestimento.....	41
Figura 37 – Avanço 0,50 mm/rot, com revestimento.....	41
Figura 38 – Pastilha convencional nova	42
Figura 39 – Pastilha nanorrevestida nova.....	42
Figura 40 – Pastilha do ensaio 1.....	43
Figura 41 – Pastilha do ensaio 11.....	43
Figura 42 – Pastilha do ensaio 9.....	43
Figura 43 – Efeito do aumento da velocidade de corte.....	45
Figura 44 – Efeito do aumento do avanço	46
Figura 45 – Efeito do aumento da profundidade de corte.....	46
Figura 46 – Comparação entre os aços e preparação da aresta de corte.....	47
Figura 47 – Pastilha do ensaio 36.....	48
Figura 48 – Pastilha do ensaio 52.....	49
Figura 49 – Pastilha do ensaio 43.....	49
Figura 50 – Ensaio em aço não endurecido	50
Figura 51 – Ensaio em aço temperado.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões das pastilhas, em mm.....	20
Tabela 2 – Dimensões do porta-ferramentas, em mm	21
Tabela 3 – Ensaios dos materiais não endurecidos.....	28
Tabela 4 – Ensaios dos materiais temperados	30
Tabela 5 – Análise da variação do Tempo de Corte	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Estrutura do Trabalho.....	1
1.2	Objetivos.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1	Torneamento mecânico.....	2
2.2	Movimento entre a peça e a aresta cortante.....	3
2.3	Direções dos movimentos.....	3
2.4	Velocidades.....	3
2.5	Plano de Trabalho.....	4
2.6	Sistemas de referência.....	4
2.7	Geometria da ferramenta.....	5
2.8	Ângulos medidos na cunha cortante.....	7
2.9	Preparação da aresta de corte.....	9
2.10	Formato e raio da ponta da pastilha.....	9
2.11	Avarias e desgastes da ferramenta.....	11
3.	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS.....	14
3.1	Materiais disponíveis.....	14
3.2	Análise da temperabilidade dos aços.....	15
4	ESCOLHA DAS PASTILHAS E PORTA-FERRAMENTAS.....	18
4.1	Material das pastilhas e porta-ferramentas.....	18
4.2	Forma das pastilhas.....	19
4.3	Porta-Ferramentas.....	20
5	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	22
5.1	Torno CNC.....	22
5.2	Set up experimental.....	24
5.3	Programa em linguagem G.....	26
5.4	Planejamentos dos experimentos.....	27
6	EXPERIMENTOS.....	31
6.1	Metodologia.....	31
6.2	Dados obtidos.....	33

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	37
7.1 Materiais não endurecidos.....	37
7.2 Materiais Temperados.....	44
8 CONCLUSÃO.....	52
9 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	54

1 INTRODUÇÃO

O estudo do processo de formação de cavaco e sua relação com a geometria da aresta de corte são de fundamental importância em pesquisas sobre usinagem, uma vez que a energia gasta para cisalhar o material pode ser minimizada alterando-se fatores como o ângulo de posição e o raio de ponta da ferramenta.

Através do torneamento de uma peça escolhida, variando-se principalmente a geometria da aresta de corte, foi analisado o desempenho da ferramenta utilizada. Após a escolha do material da ferramenta e da peça a ser usinada, foi feita uma série de ensaios que permitiram esse estudo.

1.1 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho apresenta os objetivos a serem realizados e aborda conceitos relevantes no torneamento e no uso de ferramentas mecânicas. São apresentados também alguns conceitos básicos sobre usinagem e microgeometria da aresta de corte. Posteriormente é feita a descrição dos experimentos, apresentação dos resultados experimentais, discussão e conclusão a respeito dos mesmos. Por fim, é apresentada uma lista de referências bibliográficas consultadas para embasamento teórico e mesmo prático do trabalho.

1.2 Objetivos

Este trabalho objetiva analisar a influência da microgeometria da aresta no desempenho da ferramenta de corte.

Para tanto, foram realizados ensaios em diferentes condições de trabalho e geometrias de ferramentas comercialmente disponíveis.

Como resultado, as análises demonstraram o comportamento das microgeometrias das ferramentas, indicando seu nível de qualidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o desenvolvimento deste trabalho, conceitos relevantes sobre torneamento e ferramentas de corte foram abordados, a fim de permitir a análise dos ensaios com diferentes microgeometrias de ferramentas. Também se fez necessária a abordagem de aspectos básicos sobre usinagem em geral.

2.1 Torneamento mecânico

O torneamento é o processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes (ferramentas com uma única aresta de corte ativa). 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.

O torneamento pode ser retilíneo ou curvilíneo, baseado na trajetória da ferramenta, sendo que o torneamento retilíneo pode ser cilíndrico, côncico ou radial, de acordo com a finalidade do movimento (figura 1).

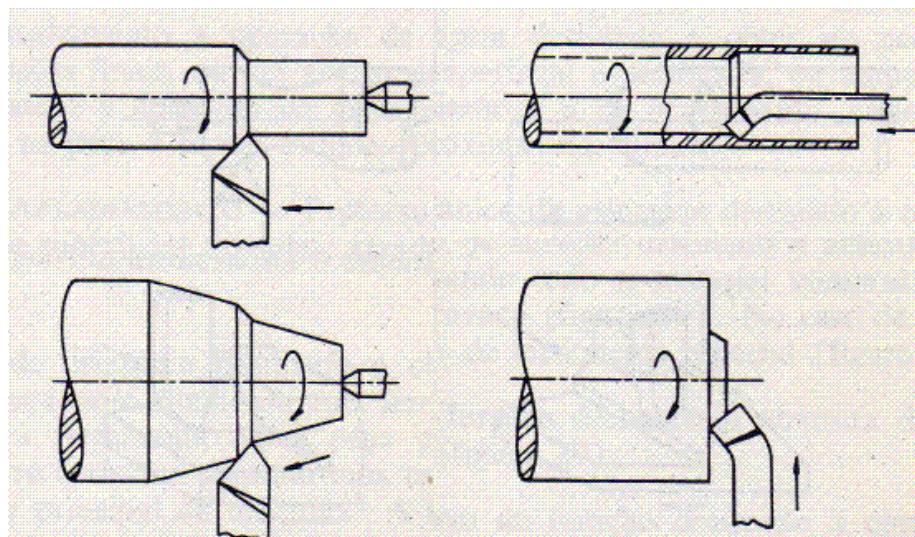


Figura 1: Processos de torneamento (FERRARESI, 1970).

As operações de torneamento podem ser classificadas em torneamento de desbaste ou de acabamento. O torneamento de desbaste é a operação de usinagem anterior à de acabamento, visando obter na peça forma e dimensões

próximas das finais. O acabamento é a operação que atinge as dimensões finais, um acabamento superficial especificado, ou ambos.

2.2 Movimento entre a peça e a aresta cortante

No processo de torneamento, a análise do movimento relativo entre a peça e a aresta de corte assume como referência a peça, ou seja, considera-se essa estática.

Há dois tipos de movimentos: o que causa diretamente a saída do cavaco e aquele que não toma parte diretamente na formação do cavaco. Com relação ao primeiro caso, trata-se do movimento efetivo de corte, normalmente resultante dos movimentos de corte e de avanço.

O movimento de corte somente, origina uma única remoção de cavaco durante uma volta ou um curso. Já o de avanço, juntamente com o de corte, origina uma remoção contínua de cavaco durante várias revoluções ou cursos.

2.3 Direções dos movimentos

Existem três direções de movimentos: direção de corte, direção de avanço e direção efetiva de corte, conforme os respectivos movimentos de corte.

Desse modo, a direção de corte é a direção instantânea do movimento de corte, a direção de avanço é a direção instantânea do movimento de avanço e a resultante das duas é a direção efetiva de corte.

2.4 Velocidades

Seguindo os mesmos conceitos citados anteriormente, a velocidade de corte é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante na direção de corte, a velocidade de avanço é a velocidade instantânea da ferramenta na direção de avanço e a velocidade efetiva de corte se refere à velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte, segundo a direção efetiva de corte.

2.5 Plano de trabalho

O plano de trabalho contém as direções de corte e de avanço (passando pelo ponto de referência da aresta cortante). Neste plano realizam-se todos os movimentos que tomam parte na formação do cavaco.

A figura a seguir ilustra o plano de trabalho, sendo φ o ângulo da direção de avanço e η o ângulo da direção efetiva de corte (figura 2).

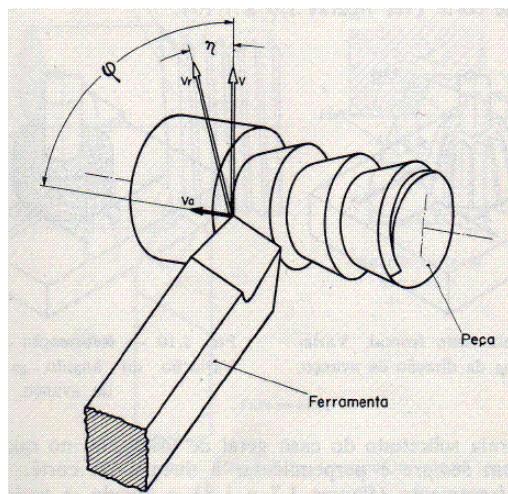


Figura 2: Plano de Trabalho (FERRARESI, 1970)

Como geralmente a velocidade de avanço é pequena com relação à velocidade de corte, o ângulo η pode ser desprezado na maioria dos casos. Assim, nas operações comuns de torneamento, considera-se $\eta=0$.

2.6 Sistemas de referência

Para um estudo racional dos ângulos da ferramenta e dos ângulos efetivos ou de trabalho, devem-se distinguir dois sistemas de referência: o sistema de referência da ferramenta e o sistema efetivo de referência.

O sistema de referência da ferramenta tem aplicação na execução e reparo das ferramentas. O sistema efetivo de referência tem significado na determinação das condições de usinagem (figura 3).

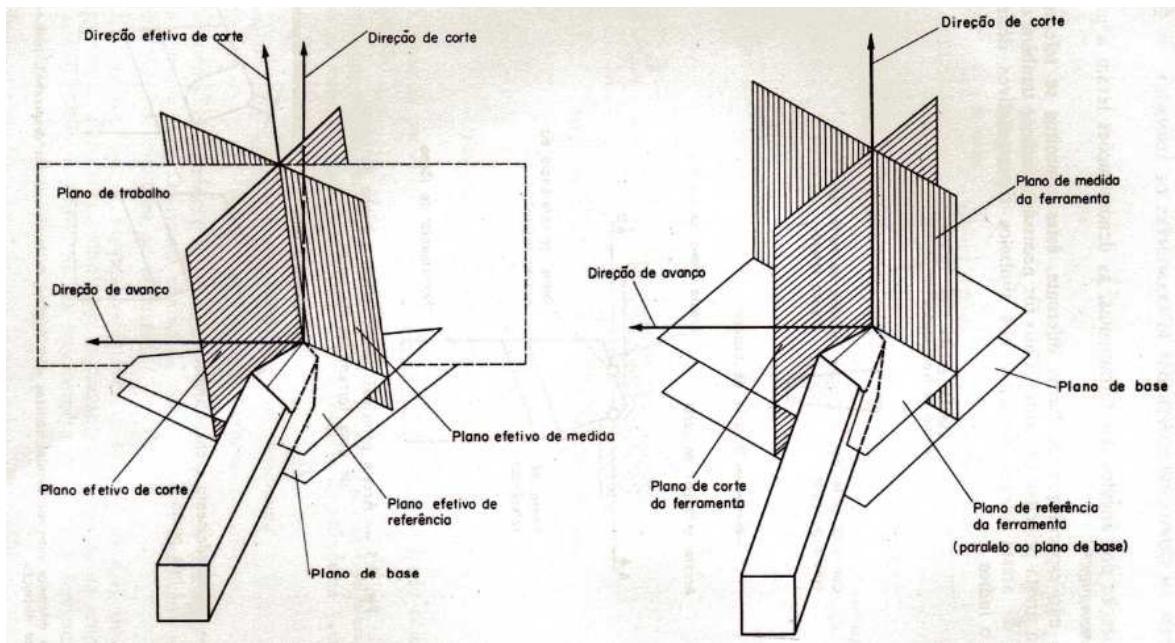


Figura 3: Sistema efetivo de referência de uma ferramenta e sistema de referência da ferramenta de um torno (FERRARESI, 1970)

2.7 Geometria da ferramenta

Denomina-se cunha cortante a parte da ferramenta na qual o cavaco se origina, através do movimento relativo entre ferramenta e peça. As arestas que limitam as superfícies da cunha são arestas de corte, podendo ser retilíneas, angulares ou curvilíneas.

A geometria da aresta de corte possui efeito significativo em quase todos os parâmetros de corte como forças de corte, vida da ferramenta, integridade da superfície (acabamento e tensão residual) e temperaturas. Por isso, compreender os efeitos de diferentes preparações de arestas e predizê-los, se possível, é de crucial importância.

2.7.1 Superfícies

Superfície de folga: superfície da cunha cortante que defronta com a superfície de corte. Também é chamada de superfície de incidência.

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

2.7.2 Arestas e Pontas

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

Aresta lateral de corte: aresta de corte cuja cunha correspondente não indica a direção de avanço no plano de trabalho.

Ponta de corte: é a ponta na qual se encontram a aresta principal e a lateral de corte de uma mesma superfície de saída.

As superfícies, arestas e pontas são ilustradas na figura seguinte (fig. 4).

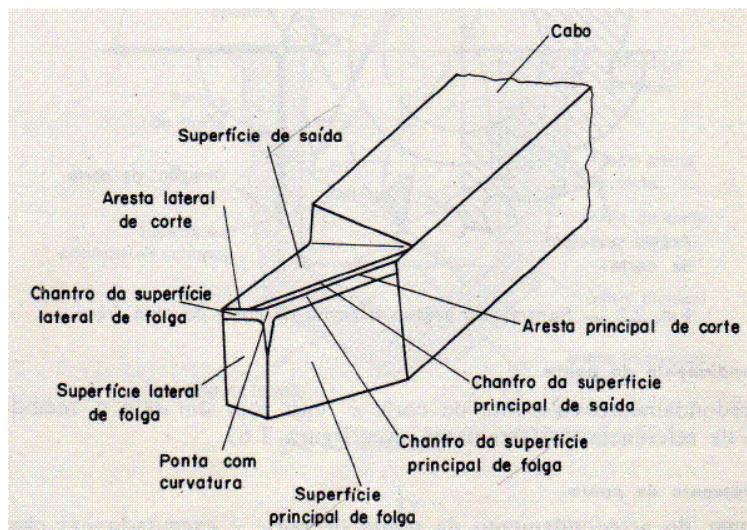


Figura 4: Geometria de uma ferramenta de barra (FERRARESI, 1970)

2.7.3 Formato da Aresta

É comum assumir que a ferramenta empregada no corte possui ponta perfeitamente afiada. Mas existe um limite físico e, mesmo se o corte iniciar com uma ferramenta afiada, sua ponta eventualmente irá gastar ou quebrar-se e o corte continuará com uma ponta não-afiada (figura 5).

Uma aresta de corte arredondada a torna mais resistente ao lascamento. Também facilita a aplicação de revestimentos que podem significativamente melhorar o desempenho e a produtividade da operação, promovendo amortecimento que elimina parte da vibração, modificando a geração de calor e

desgaste da ferramenta, bem como alterando o comportamento da tensão residual.

A dimensão da aresta de corte também pode alterar forças e temperaturas durante o corte, tendo efeito sobre a qualidade e a acurácia da peça usinada.

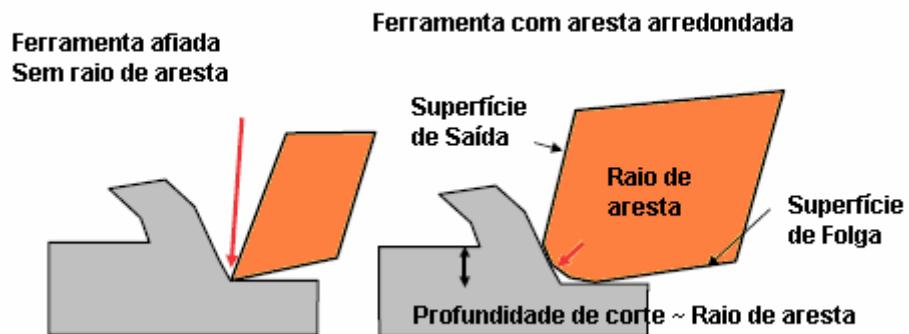


Figura 5: Usinagem com aresta de corte arredondada (S. RANGANATH, 2006)

2.8 Ângulos medidos na cunha cortante

Os ângulos na cunha cortante servem para a determinação da sua posição e forma.

Ângulo de folga α : também chamado de ângulo de incidência, é o ângulo entre a superfície de folga e o plano de corte, medido no plano de medida da cunha cortante. Quando pequeno, aumenta o atrito entre a peça e a superfície de incidência da ferramenta. A situação oposta, ou seja, ângulos de folga grandes fragilizam a ferramenta, pois as dimensões da cunha de corte diminuem.

Ângulo de cunha β : é o ângulo entre a superfície de folga e a superfície de saída, medido no plano de medida da cunha cortante. Quanto maior, mais robusta é a ferramenta.

Ângulo de saída γ : é o ângulo entre a superfície de saída e o plano de referência, medido no plano da cunha cortante. O ângulo de saída é positivo quando a intersecção do plano de referência com o plano de medida fica fora da cunha cortante. Um aumento neste ângulo diminui a resistência da ferramenta e aumenta sua sensibilidade aos choques.

Para esses ângulos, vale a relação: $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$.

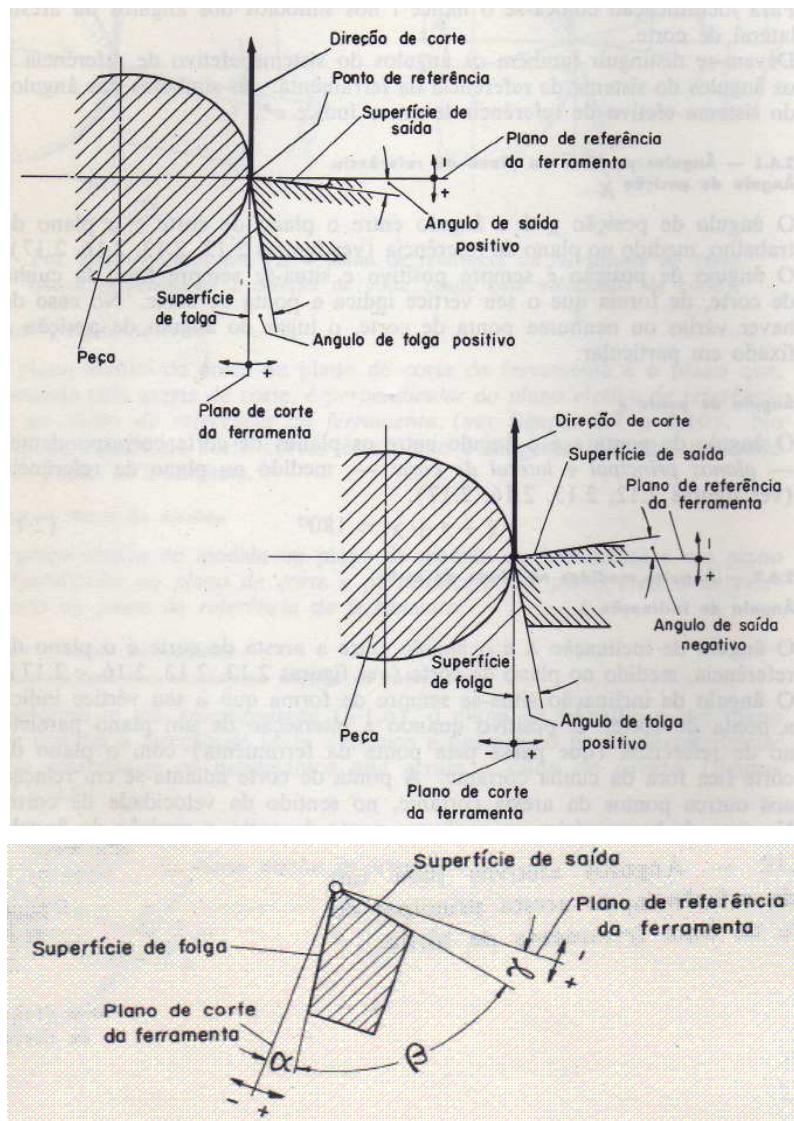


Figura 6: Ângulos da cunha cortante (FERRARESI, 1970)

Há uma distinção entre geometria positiva e negativa de pastilha: uma pastilha negativa possui um ângulo de cunha de 90 graus, visto em uma seção transversal do formato básico da aresta de corte, e uma pastilha positiva possui ângulo menor do que 90 graus. A pastilha negativa precisa ser inclinada negativamente no porta-ferramentas, de forma a prover um ângulo de folga tangencial à peça, enquanto a positiva possui sua própria folga incorporada (figura 6).

Quando a pastilha é montada no porta-ferramentas, sua geometria e inclinação no suporte determinarão o ângulo de corte com o qual a aresta irá usinar.

2.9 Preparação da aresta de corte

A preparação da aresta de corte, entre as superfícies de saída e de folga da ferramenta pode se dar na forma de um raio, chanfro ou uma combinação de chanfro e raio e afeta a resistência da ferramenta, consumo de energia, capacidade de acabamento da ferramenta, tendência a vibração e formação de cavaco.

A preparação da aresta utilizada nas pastilhas também depende da aplicação e pode variar de uma aresta retificada aguda para acabamento em materiais dúcteis a uma ampla fase negativa para operações mais pesadas em materiais mais resistentes. O arredondamento da aresta é a preparação usada com mais freqüência, em combinação com a aplicação de fase plana. Os raios são medidos em micrões e aplicados com precisão por meio de um processo especial, em geral abrasivo. O grau do arredondamento da aresta também é combinado com o material da ferramenta e com o processo de cobertura das pastilhas intercambiáveis.

2.10 Formato e raio da ponta da pastilha

Através da vista superior da ferramenta, é possível perceber que a pastilha possui um formato básico e um raio nos cantos. O formato da pastilha varia consideravelmente podendo também ser redondo e o ângulo da ponta pode variar entre 35 a 100 graus. Entre esses extremos estão formatos quadrados, triangulares e romboidais, com ângulos de ponta de 55, 60 e 80 graus. A faixa de ângulos de ponta apresenta propriedades que vão da mais alta robustez, passando por operações de desbaste, até ângulos de ponta pontiagudos que tenham maior acessibilidade para perfilamentos, cópias, etc.

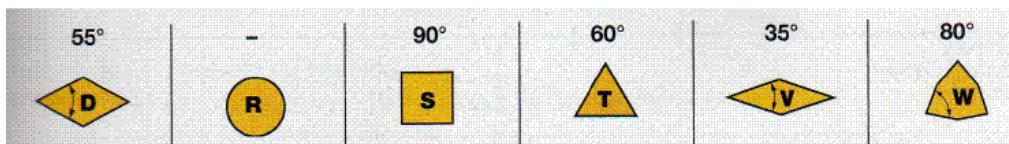


Figura 7: Geometrias de ferramentas (SANDVIK, 2005)

Com a alta resistência da ferramenta proporcionado por um ângulo de ponta grande e uma área de contato maior vem a tendência para vibrações no processo de usinagem e altas exigências de potência. Com um ângulo de ponta menor, obtém-se maior acessibilidade, porém a ferramenta fica mais frágil. Sempre que possível, é necessário fazer uma escolha balanceada para a operação em questão.

O raio de ponta é um fator importante em muitas operações de torneamento e precisa ser levado em consideração, já que a escolha certa afeta a robustez da aresta de corte e o acabamento superficial da peça. Estão disponíveis no mercado pastilhas com diversos raios de ponta, o menor raio de ponta é teoricamente zero, mas na realidade 0,2 mm é o menor tamanho encontrado e o maior é normalmente 2,4 mm.

No torneamento de desbaste, pode ser escolhido o maior raio de ponta possível, para permitir maior robustez, já que nesse caso o acabamento superficial deteriorado por possíveis vibrações, não é importante. O valor do avanço da ferramenta pode ser afetado pelo raio da ponta ou vice-versa. Um maior raio de ponta permite uma ferramenta mais robusta, capaz de suportar altos avanços para uma área de contato apropriada. Um menor raio de ponta significa uma ferramenta menos resistente, porém capaz de cortes com maiores exigências em termos de acessibilidade. Em operações de torneamento, o acabamento superficial gerado será diretamente influenciado pela combinação de raio de ponta e avanço.

A superfície gerada por uma ferramenta de corte com uma única aresta é originada à medida que o raio de ponta move-se ao longo da superfície da peça. A altura máxima teórica de perfil é calculada por meio de uma fórmula simples, dando uma indicação dos valores a serem esperados e que podem ser comparados com os limites estabelecidos para a peça que está sendo feita. Alternativamente, tendo-se um certo raio de ponta especificado e uma altura de perfil exigida, pode ser calculado um valor inicial para avanço escolhido.

2.11 Avarias e desgastes da ferramenta

Os tipos de desgastes e avarias da ferramenta variam conforme a superfície da mesma, velocidade de corte, esforços solicitantes, condições de temperatura, material e classe da ferramenta.

Nesse contexto, destacam-se entre os principais tipos os desgastes frontal (ou de flanco) e de cratera, deformação plástica da aresta de corte, lascamento, trincas e, finalmente, a quebra.

2.11.1 Desgaste frontal ou de flanco

Trata-se do tipo de desgaste mais comum e ocorre na superfície de folga da ferramenta. A principal causa é a abrasão mecânica gerada pelo material da peça, cuja causa principal por sua vez é o aumento da velocidade de corte. Esse tipo de desgaste pode ocasionar a deterioração do acabamento superficial da peça, já que modifica totalmente a forma da aresta de corte original e pode não satisfazer mais a faixa de tolerância exigida.

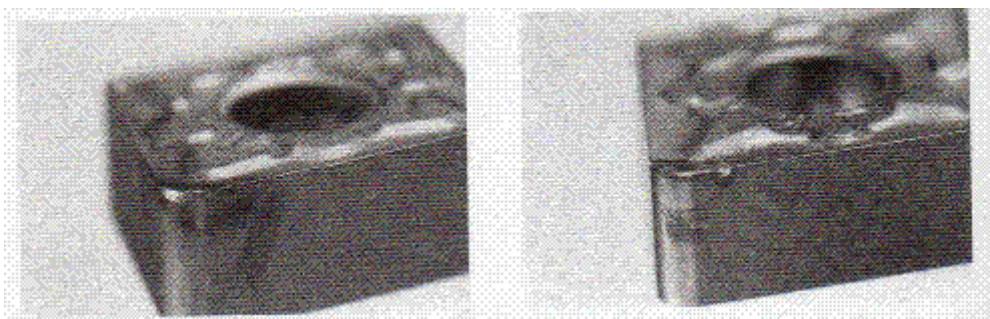


Figura 8: Desgaste frontal (DINIZ, 2003)

2.11.2 Desgaste de cratera

É o desgaste ocorrido na superfície de saída devido ao atrito entre ferramenta e cavaco. Em alguns tipos de materiais, como ferramentas de metal duro ou cerâmica, esse tipo de desgaste pode não ocorrer. No entanto, o crescimento do desgaste de cratera e o encontro com o desgaste frontal, podem resultar na quebra da ferramenta.

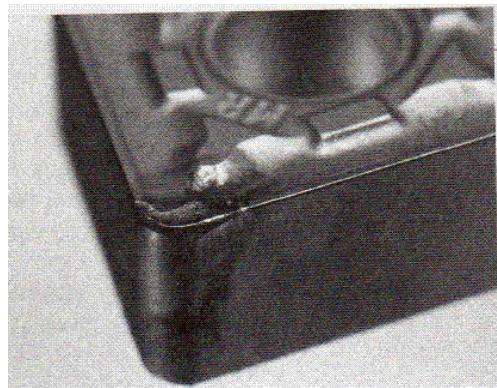


Figura 9: Desgaste de cratera (DINIZ, 2003)

2.11.3 Deformação plástica da aresta de corte

A deformação plástica da aresta de corte é ocasionada devido a altas temperaturas combinadas com altas pressões na região de corte. Como consequência, pode ocorrer deterioração do acabamento superficial da peça e deficiências do controle de cavacos.

2.11.4 Lascamento

Ocorre principalmente em ferramentas de material frágil ou quando a aresta de corte é pouco reforçada. Diferentemente dos desgastes frontal e de cratera (desgastes que retiram continuamente micropartículas da ferramenta), o lascamento é uma avaria na qual partículas maiores são retiradas instantaneamente, podendo ocorrer a quebra da ferramenta.

2.11.5 Trincas

Caracterizado como uma avaria, as trincas têm origem na variação excessiva de esforços ou de temperatura na aresta de corte. Como as trincas são concentradores de tensão, a sua propagação é rápida e leva à quebra da ferramenta.

2.11.6 Quebra

Como citado anteriormente, todos os tipos de desgaste e avarias têm como conseqüência final a quebra da ferramenta. No entanto, existem inúmeros fatores em que a quebra é imediata e inesperada. Podem ser citados entre os mais comuns a alta dureza e pouca tenacidade da ferramenta aliadas à carga excessiva sobre a mesma, raio de ponta ou ângulo de cunha pequenos, entre outros.

Além do próprio dano à ferramenta, a quebra pode danificar toda a pastilha ou o porta ferramenta e danificar a peça.

3. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE ENSAIO

Para a realização dos ensaios, dois materiais foram selecionados por haver maior disponibilidade (sua aquisição seria imediata) e por serem comumente utilizados na construção mecânica. Cabe ressaltar que uma ampla utilização em componentes mecânicos implica na necessidade de usinagem. A fim de tornar o estudo mais próximo à realidade esses aços foram tratados termicamente.

3.1 Materiais disponíveis

Os dois aços estudados são: Aço ABNT 1045 e Aço ABNT 4340.

3.3.1 Aço ABNT 4340

Aço com a mais alta temperabilidade entre os de construção mecânica. Possui usinabilidade e soldabilidade ruins, mas boa forjabilidade.

3.1.2 Aço ABNT 1045

Aço de boa resistência mecânica, boa usinabilidade e baixa soldabilidade. Em aços comerciais como este, não são garantidas as faixas de temperabilidade conforme as normas NBR ou SAE.

3.1.3 Critério de escolha

Como o foco deste trabalho é a verificação e análise do desempenho das ferramentas de corte em função da preparação de suas preparações de arestas e condições de usinagem, a escolha de um corpo de prova de maior dureza teoricamente facilitaria a análise e permitiria um estudo mais rápido. Sendo assim, optou-se pelo uso de um material temperado.

Entretanto, planejou-se também ensaios com o material antes do tratamento térmico, com ferramentas de metal duro (sem preparação de aresta), para uma melhor compreensão dos fenômenos de usinagem.

3.2 Análise da temperabilidade dos aços

A têmpera objetiva a formação de uma fase chamada martensita, dura e frágil. Os fatores que contribuem para o aumento da temperabilidade de um aço são o seu teor de carbono e a adição de elementos de liga.

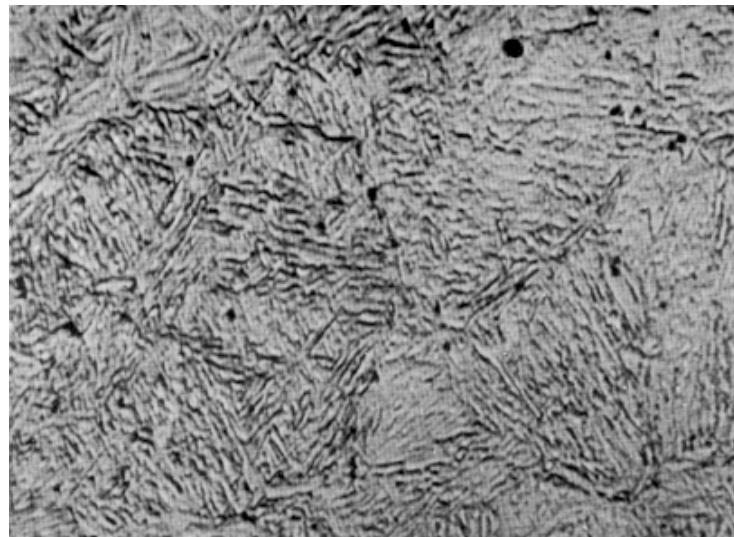


Figura 10: Aspecto micrográfico de um aço temperado (martensita).

Ampliação: 1000 vezes (INTERNET)

3.2.1 Ensaio Jominy

A tendência para a formação de martensita em um aço pode ser medida ao longo de uma dada distância no ensaio Jominy. Neste, o corpo de prova é aquecido a 900°C, retirado rapidamente do forno e colocado em um dispositivo de resfriamento que propicia diferentes taxas de resfriamento a diferentes regiões do material (a base do corpo de prova é resfriada rapidamente pela água corrente, o que não ocorre com o topo). Em seguida, são feitas medidas de dureza ao longo de seu comprimento.

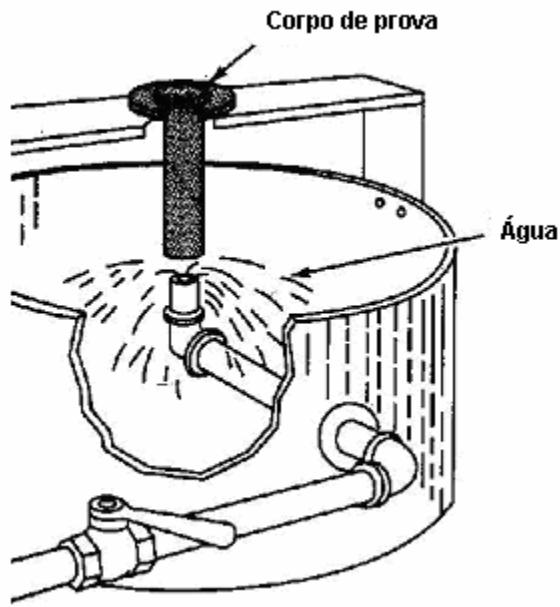


Figura 11: Sistema de resfriamento no Ensaio Jominy (INTERNET)

A medida de dureza feita é Rockwell C (HR_C). A dureza é sempre maior junto à base do corpo de prova, onde as taxas de resfriamento são mais elevadas. Se o aço apresentar dureza elevada, mesmo em taxas de resfriamento mais baixas, então ele apresenta elevada temperabilidade. Os resultados do ensaio permitem comparar a temperabilidade de diferentes aços e também servem como uma maneira de avaliar o aço recebido (controle de qualidade).

3.2.1 Aço ABNT 1045 x Aço ABNT 4340

Uma análise superficial, considerando a quantidade de elementos de liga e o teor de carbono, leva a crer que, como ambos possuem quantidades próximas de carbono (Aço ABNT 1045 \rightarrow 0,45%; Aço ABNT 4340 \rightarrow 0,40%) e o aço ABNT 1045 não possui elementos de liga, ao passo que o aço ABNT 4340 comporta Mo, Si e Cr, então o último provavelmente terá maior temperabilidade.

Uma análise detalhada confirma a suspeita, conforme se pode observar pelas curvas de dureza Jominy: a curva de dureza do aço ABNT 1045 está próxima da do aço ABNT 1040, demonstrando que sua dureza – e também

temperabilidade – é muito inferior à do aço ABNT 4340 (que está entre os aços ABNT 8640 e ABNT 4042).

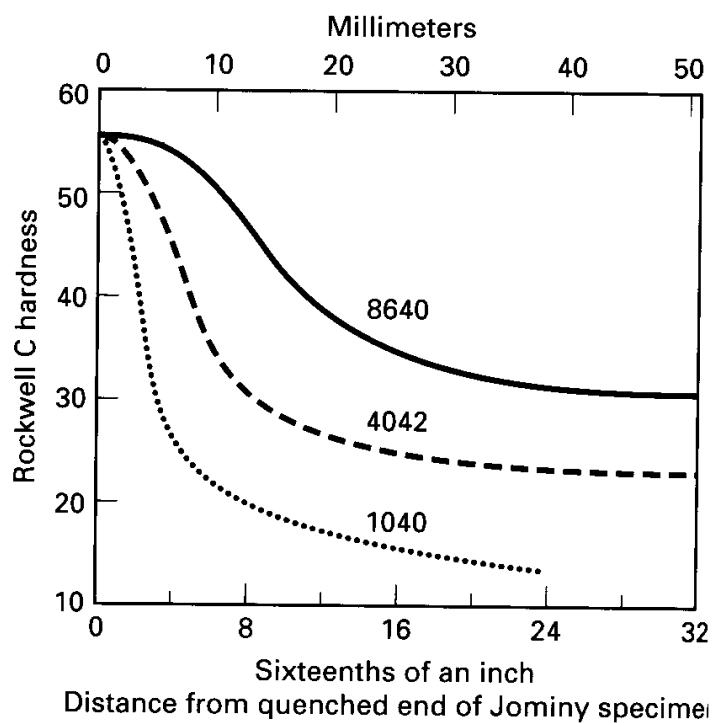


Figura 12: Curvas de dureza Jominy, comparando os diversos tipos de aço (INTERNET)

4 ESCOLHA DAS PASTILHAS E PORTA-FERRAMENTAS

Optou-se por comprar um novo porta-ferramentas (e pastilhas adaptáveis a ele), pois o material novo garantiria tranquilidade em relação à validade dos dados.

Os critérios adotados para a escolha da compra foram: material e formato da ferramenta e adaptabilidade do porta-ferramentas. Ambos foram adquiridos junto à empresa ZCC.

4.1 Material das pastilhas e porta-ferramentas

Seguindo o contexto deste trabalho, promovendo usinabilidade com foco científico, ressalta-se que a escolha da ferramenta baseou-se no fato dos corpos de prova serem de aço-liga com alto teor de carbono, tratado termicamente, logo de alta dureza. Naturalmente, as pastilhas devem ter dureza maior – o suficiente para usinar, mas permitindo desgaste em curto tempo (para fins do estudo).

A escolha dos materiais de ferramentas está baseada em seis grupos:

- 1) Aço (P)
- 2) Aço Inoxidável (M)
- 3) Ferro Fundido (K)
- 4) Não Ferrosos (N)
- 5) Ligas resistentes a altas temperaturas (S)
- 6) Materiais Endurecidos (H)

As peças ensaiadas pertencem ao grupo 6, o que nos leva a escolher um material do grupo 6 para a ferramenta.

Dessa forma, o material escolhido para a pastilha é uma cerâmica de nitreto de silício (Si_3N_4). Cabe ressaltar que esse material, dentre as cerâmicas, é mais tenaz, indicado para cortes interrompidos, que não é o caso desse trabalho. Por outro lado, serão testadas ferramentas sem preparação de aresta, portanto mais frágeis, daí essa escolha, pois temeu-se somar fragilidade do

material com a da aresta e ter-se uma ferramenta muito suscetível ao lascamento. No entanto, como citado anteriormente, também serão realizados ensaios com peças não temperadas. Nesse sentido, também foram selecionadas pastilhas de metal duro para tais ensaios, sendo metade dessas pastilhas nanorrevestidas com Nitreto de Titânio Alumínio (TiAlN).

4.2 Formato das pastilhas

Para efetuar a escolha das pastilhas, é necessário contemplar alguns aspectos básicos: formato, tipo, ângulo de folga, tolerância, tamanho, espessura e raio de ponta. De posse desses dados, é possível codificá-la no formato ISO.

Nesse trabalho, foi escolhida a pastilha “W”, com ângulo de ponta de 80° . Duas ferramentas de cerâmica são adequadas, uma com chanfro T (20° a cada 0,20 mm) e outra com aresta de corte com canto vivo (sem preparação de aresta). Suas codificações no formato ISO são: WNGA080408T02020 e WNMG080408F.

A figura 13 explica o significado de cada parâmetro, enquanto a figura 14 e a tabela 1 detalham a ferramenta.

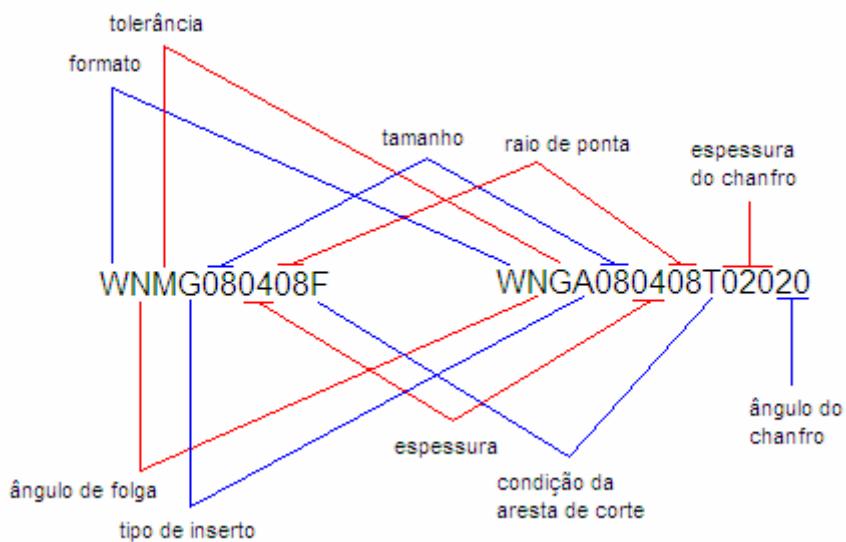


Figura 13: Codificação das Ferramentas

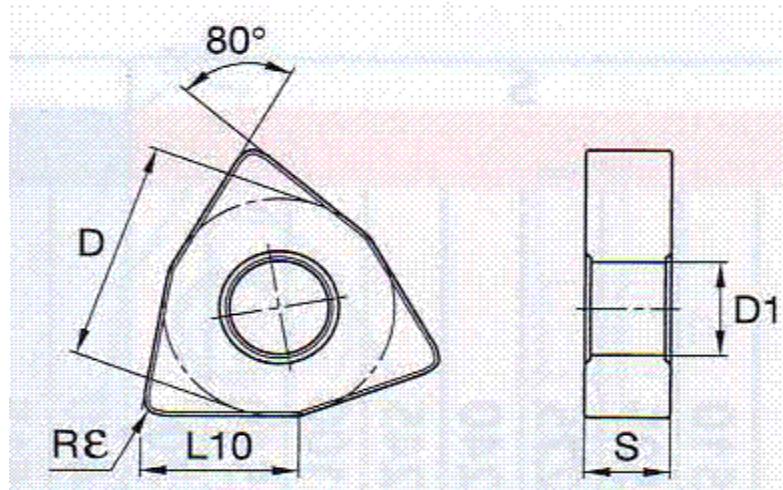


Figura 14: Geometria da ferramenta (KENNAMETAL).

Tabela 1: Dimensões das pastilhas, em mm

D	L10	S	R ϵ	D1
12,7	8,69	4,76	0,8	5,16

A pastilha de metal duro selecionada foi a WNMG080408, semelhante à de cerâmica citada anteriormente.

4.3 Porta-Ferramentas

Da escolha da ferramenta deriva a do porta-ferramentas. Levando em consideração aspectos da pastilha, como: método de fixação, formato, comprimento da aresta de corte, ângulos de posição e folga, etc., obtém-se os parâmetros escolhidos para o porta-ferramentas.

Devido ao tipo de máquina CN a ser utilizada, enfatiza-se que o sentido de corte é à direita. A haste possui altura e largura de 25 mm, e comprimento de 150 mm (este será adaptado para condições práticas no ensaio, podendo ter seu comprimento diminuído).

Em vista desses critérios, chega-se à seguinte codificação para o porta-ferramentas, que é feito de aço: MWLNR2525M08.

A figura 15 explica o significado de cada parâmetro, enquanto a figura 16 e a tabela 2 detalham o porta-ferramentas.



Figura 15: Codificação do Porta-ferramentas

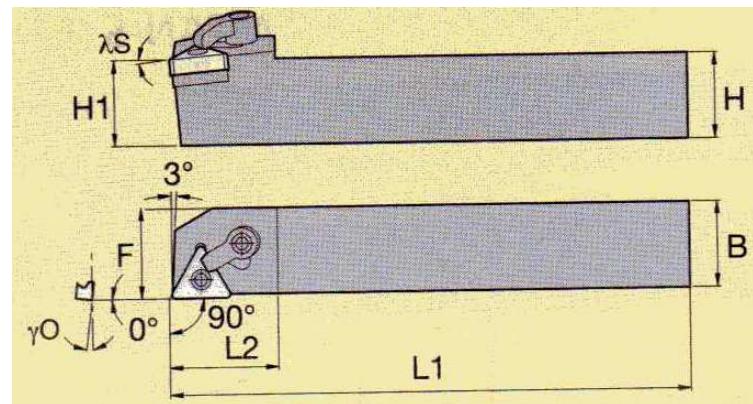


Figura 16: Geometria do porta-ferramentas (KENNAMETAL).

Tabela 2: Dimensões do porta-ferramentas, em mm

H_1	B	F	L_1	L_2
25	25	32,0	150	30

5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

5.1 Torno CNC

O planejamento experimental se dá início com a escolha do tipo de máquina a ser utilizada para a realização dos ensaios.

Desse modo, optou-se por utilizar uma máquina de comando numérico computadorizado (CNC). Assim, será utilizado o torno CNC Traub TX-8 situado nas dependências do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica.

O Traub se trata de uma máquina CNC muito robusta, com claros comandos de execução e manipulação de programas em linguagem G (inserção, edição, carregamento), assim como uma boa interface com o usuário.

Dadas as menções acima, o seu manuseio é perfeitamente adequado às propostas desse projeto, permitindo uma boa análise das ferramentas e corpos de prova.

As figuras abaixo ilustram mais detalhadamente o torno e alguns comandos.



Figura 17: Traub TX-08



Figura 18: Comandos do Traub TX-08

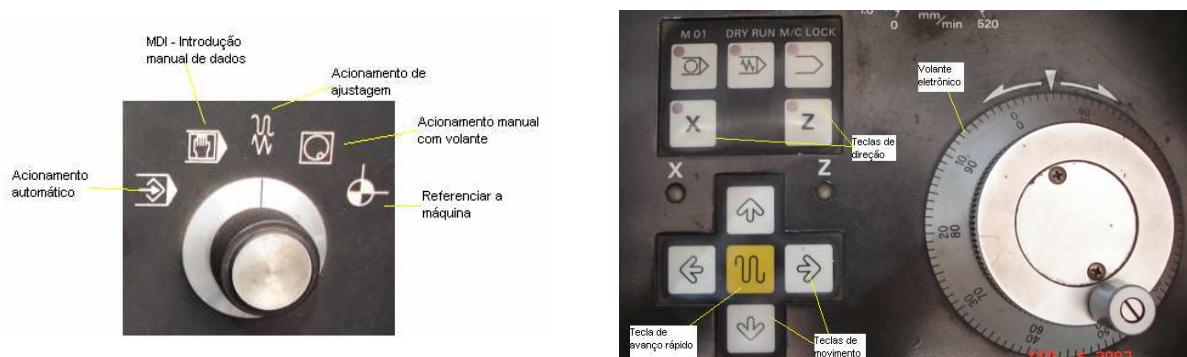


Figura 19: Detalhamento de alguns comandos

5.2 Set up experimental

A realização do set up experimental se deu início com a preparação das castanhas, ou seja, fez-se necessário ajustá-las às condições dos diâmetros das peças a serem usinadas. Assim, obteve-se um raio interno maior nas castanhas, no qual as peças se encaixassem sem maiores dificuldades.

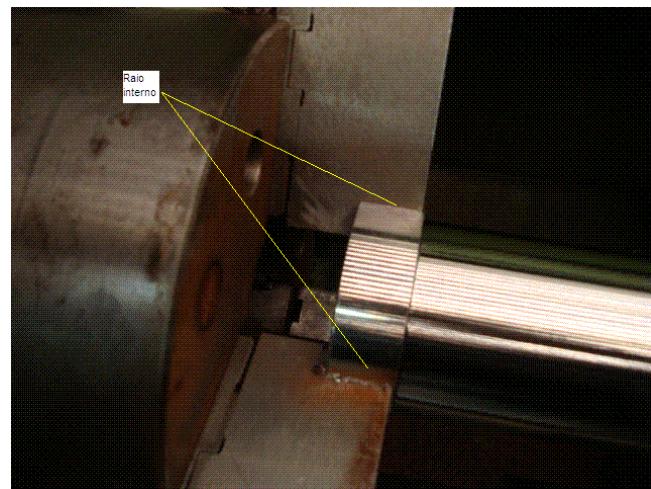


Figura 20: Preparação das Castanhas

Outro aspecto importante a se contemplar foi a utilização de uma contra-ponta à ponta livre das peças, devido à grande inércia e elevadas rotações em que os corpos de prova foram submetidos. Desse modo, a fixação das peças se deu por completo, como ilustra a próxima figura.



Figura 21: Fixação da Peça

Esses cuidados com o sistema de fixação foram feitos para evitar a vibração decorrente do elevado comprimento em balanço. Caso essa ocorresse a ferramenta lascaria ou mesmo quebraria, gerando uma avaria que prejudicaria o estudo, cujo objetivo está relacionado à visualização de um desgaste gradual.

Após a preparação do sistema de fixação, a próxima etapa foi estabelecer um padrão para o diâmetro das peças a serem fixadas pelas castanhas, ou seja, preparar a base de cada peça.

Como referência foi tomada a base dos corpos de prova de aço ABNT 1045, devido ao seu diâmetro ser menor e já ajustado para se fixar nas castanhas. Assim, as “pegas” das peças de aço ABNT 4340 foram ajustadas para um diâmetro igual às dos aços ABNT 1045, sendo realizadas em tornos convencionais.



Figura 22: Preparação dos Aços ABNT 4340

Como mencionado anteriormente, as elevadas rotações e inércias das peças durante os ensaios transmitem uma grande quantidade de energia para todo o sistema e, consequentemente, o conjunto sofre vibrações que requerem atenção, em especial com relação às peças.

Com isso, a segurança durante a realização dos ensaios também foi discutida e, desse modo, foram inseridas duas grades de proteção no torno para evitar eventuais acidentes no caso de escape dos corpos de prova.



Figura 23: Grades de Proteção

5.3 Programa em linguagem G

O seguinte ciclo foi programado para que o torno realize o desbaste automaticamente, fazendo dois passes com profundidade de corte de 1mm (no caso de ferramenta de metal duro), seguidos de um passe de acabamento:

```

G59 X0 Z375 // referencia a ferramenta
T101 M3 S100 // seleciona a ferramenta, liga o spindle sentido anti-horário
G96 V300 // define a velocidade de corte
G92 P3000 Q50 // limites máximo e mínimo de rotação
G71 P50 Q60 D1 F0.5 // realiza o ciclo de desbaste automático
// com avanço 0,5 mm/rotação e passes de 1mm de profundidade
N50 // início do ciclo
G0 X68 Z0 // diâmetro final da peça
G1 Z-195 // comprimento percorrido por passe
G1 X72 // diâmetro inicial da peça
N60 // fim do ciclo
G0 X130 Z0 // retorno da ferramenta
M5 // desliga o spindle

```

5.4 Planejamentos dos experimentos

O planejamento dos experimentos foi dividido em duas etapas, sendo a primeira com relação aos aços sem tratamento térmico (não endurecidos) e a segunda, com os mesmos endurecidos.

Para tal, foram consideradas a velocidade de corte, o avanço e a profundidade como parâmetros. No entanto, apenas a velocidade de corte e o avanço são variados e a profundidade de corte é fixada em 1 mm por passada (no caso de ferramentas de metal duro). Para as ferramentas de cerâmica serão variadas as velocidades e a profundidade de corte e o avanço.

Vale ressaltar que as definições dos parâmetros foram obtidas em testes preliminares até que se pudesse obter um intervalo para os parâmetros em questão. Nesse contexto, os valores foram obtidos na tentativa e erro tendo como valor inicial o mencionado na bibliografia, a fim de permitirem análises consistentes no intervalo de tempo necessário.

5.4.1 Materiais não endurecidos

Nessa etapa foram contempladas apenas as ferramentas de metal duro (convencional e com nanorrevestimento), assim como os dois tipos de aços disponíveis (ABNT 1045 e ABNT 4340).

Com relação aos parâmetros de usinagem, foram utilizados quatro velocidades de corte diferentes e dois avanços para cada velocidade. Nesse contexto, as velocidades utilizadas foram 250, 300, 350 e 400 m/min e os avanços, 0,35 e 0,50 mm/volta.

A tabela seguinte detalha os ensaios realizados nessa etapa, sendo a ferramenta WNMG 080408-WG YBC 251 convencional e a WNMG 080408-WG YBG 202 com nanorrevestimento.

Tabela 3: Ensaios dos materiais não endurecidos

Ensaios	Tipo de material	Tipo de ferramenta	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rot)
1	ABNT 1045	WNMG 080408-WG YBC 251	250	0,35
2		WNMG 080408-WG YBC 251	250	0,50
3		WNMG 080408-WG YBC 251	300	0,35
4		WNMG 080408-WG YBC 251	300	0,50
5		WNMG 080408-WG YBC 251	350	0,35
6		WNMG 080408-WG YBC 251	350	0,50
7		WNMG 080408-WG YBC 251	400	0,35
8		WNMG 080408-WG YBC 251	400	0,50
9		WNMG 080408-WG YBG 202	250	0,35
10		WNMG 080408-WG YBG 202	250	0,50
11		WNMG 080408-WG YBG 202	300	0,35
12		WNMG 080408-WG YBG 202	300	0,50
13		WNMG 080408-WG YBG 202	350	0,35
14		WNMG 080408-WG YBG 202	350	0,50
15		WNMG 080408-WG YBG 203	400	0,35
16		WNMG 080408-WG YBG 204	400	0,50
17	ABNT 4340	WNMG 080408-WG YBC 251	250	0,35
18		WNMG 080408-WG YBC 251	250	0,50
19		WNMG 080408-WG YBC 251	300	0,35
20		WNMG 080408-WG YBC 251	300	0,50
21		WNMG 080408-WG YBC 251	350	0,35
22		WNMG 080408-WG YBC 251	350	0,50
23		WNMG 080408-WG YBC 251	400	0,35
24		WNMG 080408-WG YBC 251	400	0,50
25		WNMG 080408-WG YBG 202	250	0,35
26		WNMG 080408-WG YBG 202	250	0,50
27		WNMG 080408-WG YBG 202	300	0,35
28		WNMG 080408-WG YBG 202	300	0,50
29		WNMG 080408-WG YBG 202	350	0,35
30		WNMG 080408-WG YBG 202	350	0,50
31		WNMG 080408-WG YBG 203	400	0,35
32		WNMG 080408-WG YBG 204	400	0,50

5.4.2 Materiais temperados

Com o tratamento térmico dos dois aços, ABNT 1045 e ABNT 4340, a dureza obtida ficou entre 42 e 46 HR_C. Com isso, foram realizados os ensaios com as ferramentas de cerâmica (nitreto de silício – Si₃N₄). Para esse caso, as análises foram baseadas na preparação da aresta de corte (microgeometria), sendo utilizadas ferramentas com chanfro e sem chanfro.

Com relação aos parâmetros de usinagem, foram utilizadas velocidades de corte de 75 e 100 m/min, além de avanços de 0,125 e 0,160 mm/rot. A profundidade de corte (a_p) também foi variada, com valores de 0,4 e 0,8 mm. Dadas as combinações dos parâmetros de usinagem, tem-se mais 32 ensaios, conforme mostra a tabela a seguir.

Na tabela dos ensaios, tem-se que a ferramenta WNGA080408T02020 possui aresta de corte com chanfro e a WNMG080408F, sem chanfro.

Tabela 4: Ensaios dos materiais temperados

Ensaio	Tipo de material	Tipo de ferramenta	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	a_p (mm)
33	ABNT 1045	WNGA080408T02020	75	0,125	0,4
34		WNGA080408T02021	75	0,125	0,2
35		WNGA080408T02022	75	0,160	0,4
36		WNGA080408T02023	75	0,160	0,2
37		WNGA080408T02024	100	0,125	0,4
38		WNGA080408T02025	100	0,125	0,2
39		WNGA080408T02026	100	0,160	0,4
40		WNGA080408T02027	100	0,160	0,2
41		WNMG080408F	75	0,125	0,4
42		WNMG080408F	75	0,125	0,2
43		WNMG080408F	75	0,160	0,4
44		WNMG080408F	75	0,160	0,2
45		WNMG080408F	100	0,125	0,4
46		WNMG080408F	100	0,125	0,2
47		WNMG080408F	100	0,160	0,4
48		WNMG080408F	100	0,160	0,2
49	ABNT 4340	WNGA080408T02020	75	0,125	0,4
50		WNGA080408T02021	75	0,125	0,2
51		WNGA080408T02022	75	0,160	0,4
52		WNGA080408T02023	75	0,160	0,2
53		WNGA080408T02024	100	0,125	0,4
54		WNGA080408T02025	100	0,125	0,2
55		WNGA080408T02026	100	0,160	0,4
56		WNGA080408T02027	100	0,160	0,2
57		WNMG080408F	75	0,125	0,4
58		WNMG080408F	75	0,125	0,2
59		WNMG080408F	75	0,160	0,4
60		WNMG080408F	75	0,160	0,2
61		WNMG080408F	100	0,125	0,4
62		WNMG080408F	100	0,125	0,2
63		WNMG080408F	100	0,160	0,4
64		WNMG080408F	100	0,160	0,2

6 EXPERIMENTOS

6.1 Metodologia

Existem diferentes critérios para estabelecer o fim de vida de uma ferramenta, cada um com suas considerações. Basicamente, estes critérios podem ser divididos em falhas na ferramenta, tolerâncias da peça, degradação do acabamento da superfície usinada e fatores econômicos. Em laboratórios, as falhas na ferramenta são freqüentemente usadas como critério de fim de vida por serem facilmente quantificadas. Sob condições normais de usinagem, o desgaste de flanco é usualmente escolhido como base para a avaliação do estado da ferramenta de corte nos diversos sistemas de monitoramento desenvolvidos, pois influencia diretamente nos erros dimensionais e na rugosidade da peça.

Nas ferramentas de metal-duro (MD) e de cerâmica, o desgaste no flanco é geralmente maior que na superfície de saída. Os desgastes aumentam progressivamente até a quebra do gume, que deve ser evitada devido às suas consequências. Na usinagem de muitos materiais, esta quebra se dá para valores de v_b (medida do desgaste de flanco) entre 0,8 e 1,5 mm. Em operações de acabamento, a ferramenta deve ser retirada bem antes do desgaste atingir valores que ponham em risco o gume, para não comprometer a precisão da peça e seu acabamento.

Desse modo, para a realização dos experimentos foram analisados os desgastes de flanco (ou frontal) das pastilhas, pois se trata de um método bastante utilizado. Para isso, os valores de v_b foram medidos por microscopia óptica a cada dois passes, sendo retirados 2 mm no diâmetro a cada passe (no caso de ferramentas de metal duro), a fim de padronizar o volume de cavado retirado antes de cada análise. Nos ensaios realizados com ferramentas de cerâmica foram retirados, a cada passe, valores de 0,4 ou 0,8 mm no diâmetro. Os outros parâmetros de usinagem já foram mencionados no item anterior.



Figura 24: Microscópio Óptico

Analizando a relação $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d}$, sendo:

- n = rotação [rpm]
- v_c = velocidade de corte [m/min]
- d = diâmetro do cilindro [mm]

pode-se concluir que, como o diâmetro do cilindro sofre uma redução a cada passada e havendo fixado a rotação máxima do torno em 3000 rpm (devido às limitações da máquina), pode-se determinar o diâmetro mínimo da peça a ser usinada em função da velocidade de corte desejada.

Cada ensaio termina quando o valor do desgaste v_b atinge o limite entre 0,80 e 1,5 mm, como especificado anteriormente. A partir desse valor, a chance de quebra da ferramenta aumenta sensivelmente e a qualidade da peça é comprometida. Fato constatado na prática.

Ao término de um ensaio, se a peça usinada ainda estiver com um diâmetro considerável (que não comprometa o limite de rotação), o próximo ensaio começará com a peça em questão, após normalização do diâmetro.

O tempo de corte – período efetivo de trabalho da ferramenta – é dado por

$$t_c = \frac{L_c}{n \cdot f}, \text{ sendo:}$$

- t_c = tempo de corte [min]
- f = avanço [mm/rotação]
- n = rotação [rpm]
- L_c = comprimento de corte [mm]

O tempo de corte determina a vida da ferramenta sob determinadas condições de usinagem e, juntamente com o desgaste v_b , foi usado para comparar as diferentes ferramentas.

6.2 Dados obtidos

Com os parâmetros v_b e t_c , foram construídos gráficos que permitem analisar e comparar a qualidade das ferramentas, exceto quando a pastilha não suportou as condições do ensaio. Alguns gráficos são mostrados a seguir.

Por exemplo, para as ferramentas de metal duro, a partir dos gráficos referentes aos ensaios 1, 2 e 3 (figuras 25, 26 e 27) pode-se perceber a diferença de comportamento, considerando um mesmo material e ferramenta e variando os parâmetros de corte. Já o ensaio 9 mostra o mesmo material quando ensaiado com uma pastilha nanorrevestida.

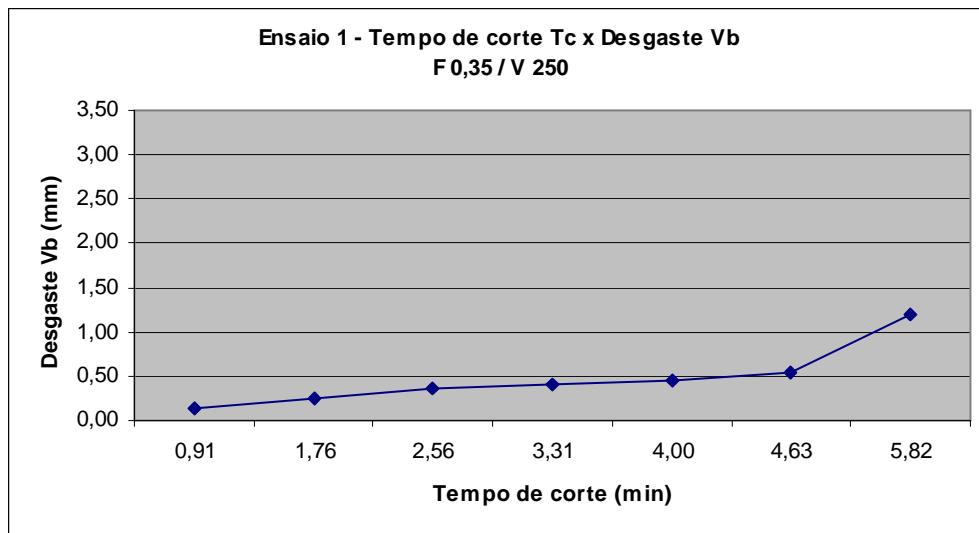


Figura 25: Ensaio 1

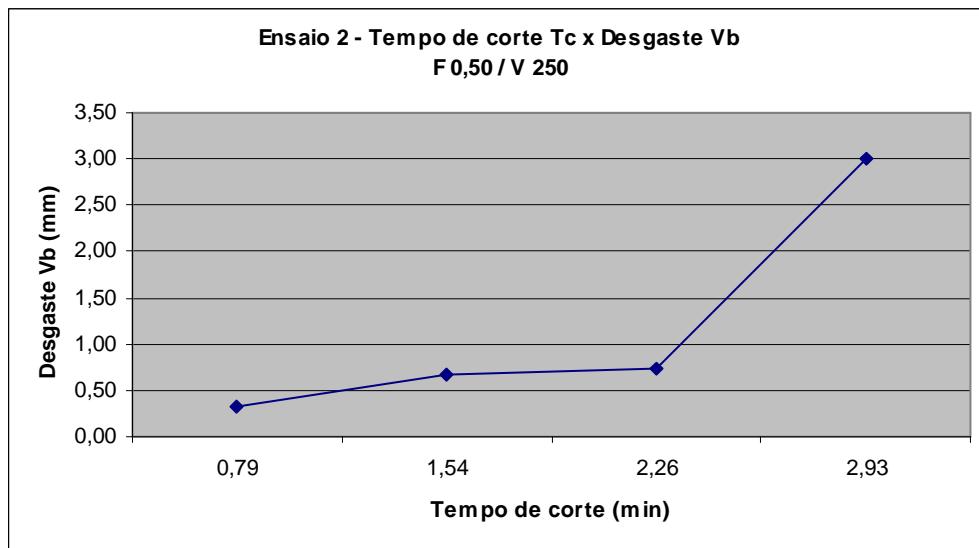


Figura 26: Ensaio 2

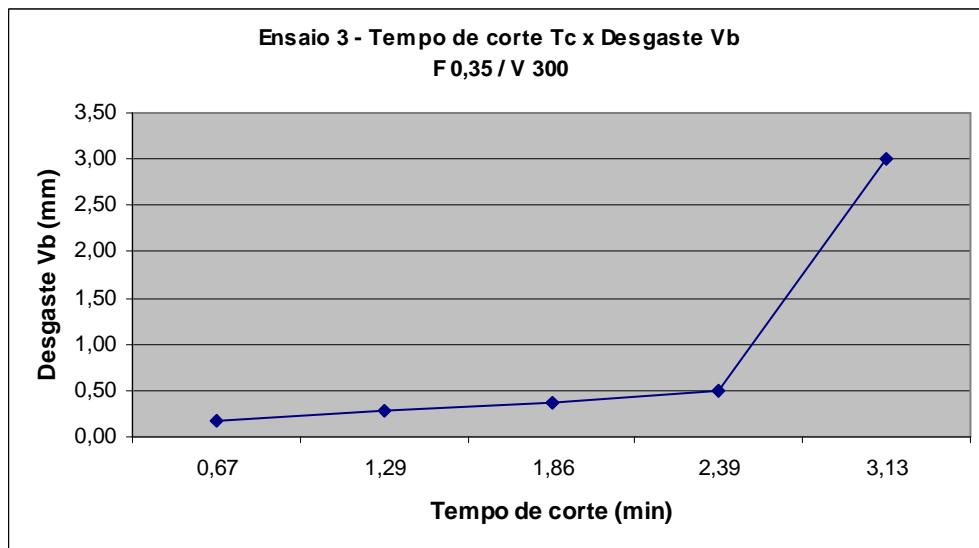


Figura 27: Ensaio 3

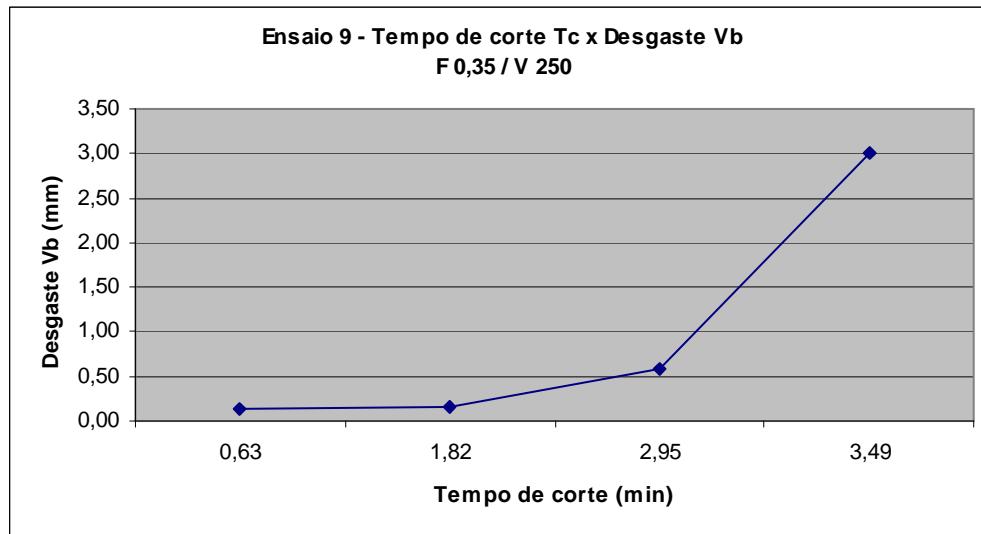


Figura 28: Ensaio 9

No caso dos ensaios realizados com ferramentas de cerâmica em aços temperados, foram traçados gráficos comparativos, permitindo analisar as consequências da variação dos parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte), tipo de aço temperado, bem como a preparação da aresta de corte.

A figura a seguir ilustra a comparação entre os dois aços para as mesmas condições de usinagem. Neste caso, $f=0,125$ mm/rot, $v_c=75$ m/min e $a_p=0,20$ mm. O gráfico superior retrata o comportamento dos aços usinados com ferramentas chanfradas, enquanto no inferior não há chanfro na microgeometria das ferramentas.

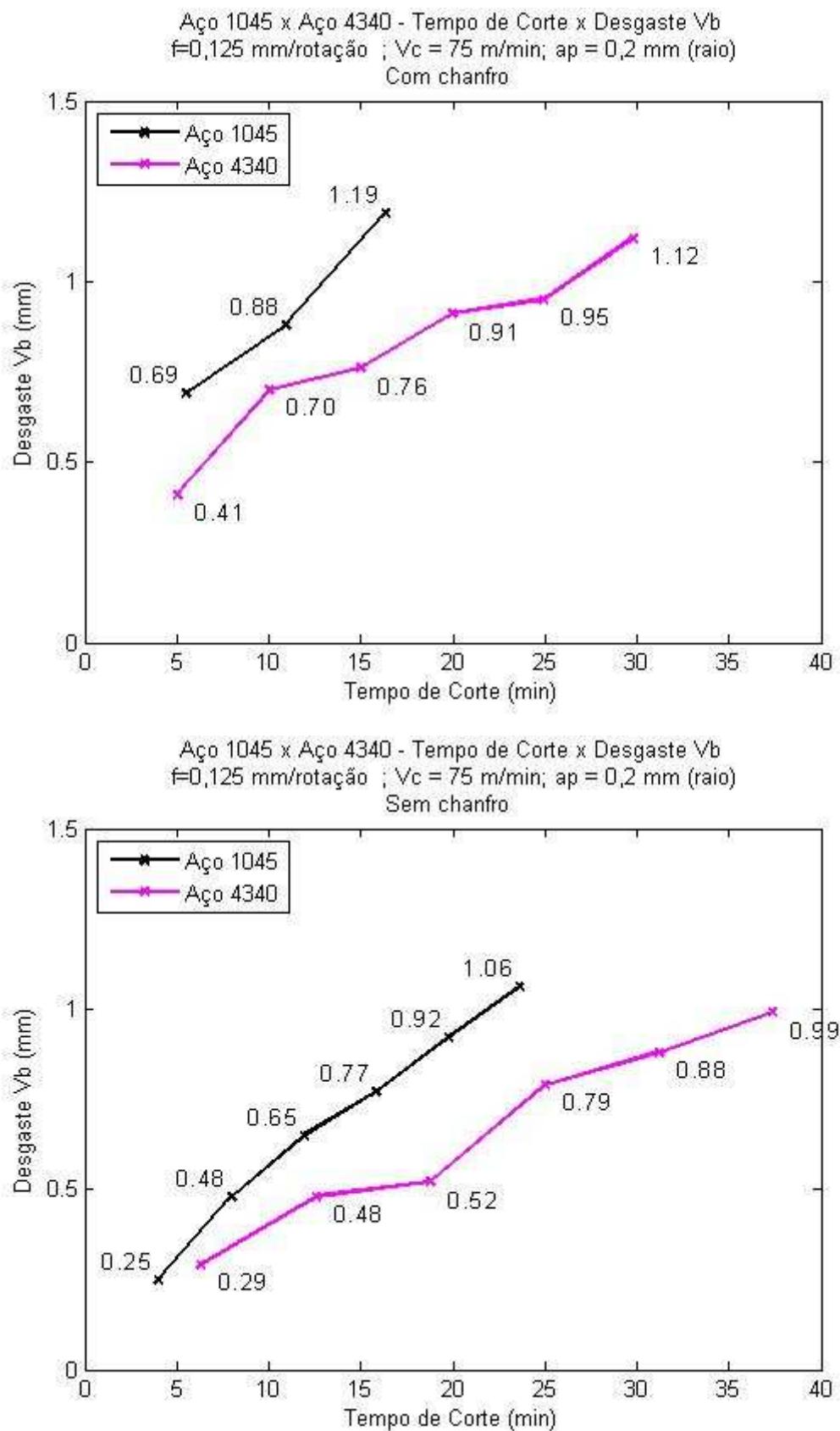


Figura 29: Comparação entre os aços e preparação da aresta de corte

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.1 Materiais não endurecidos

De posse dos dados dos ensaios realizados com a ferramenta de metal duro, foi possível traçar curvas de velocidade de corte em função do tempo de corte da ferramenta, variando o avanço, o material do corpo de prova e a presença de nanorrevestimento.

7.1.1 Aço ABNT 1045

Para o aço ABNT 1045, obtiveram-se os seguintes gráficos:

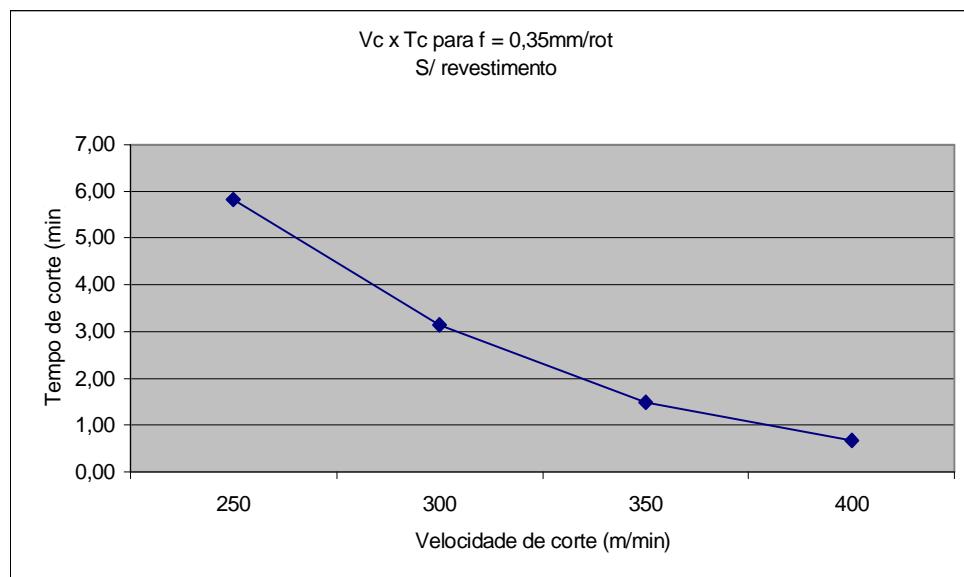


Figura 30: Avanço 0,35 mm/rot, sem revestimento

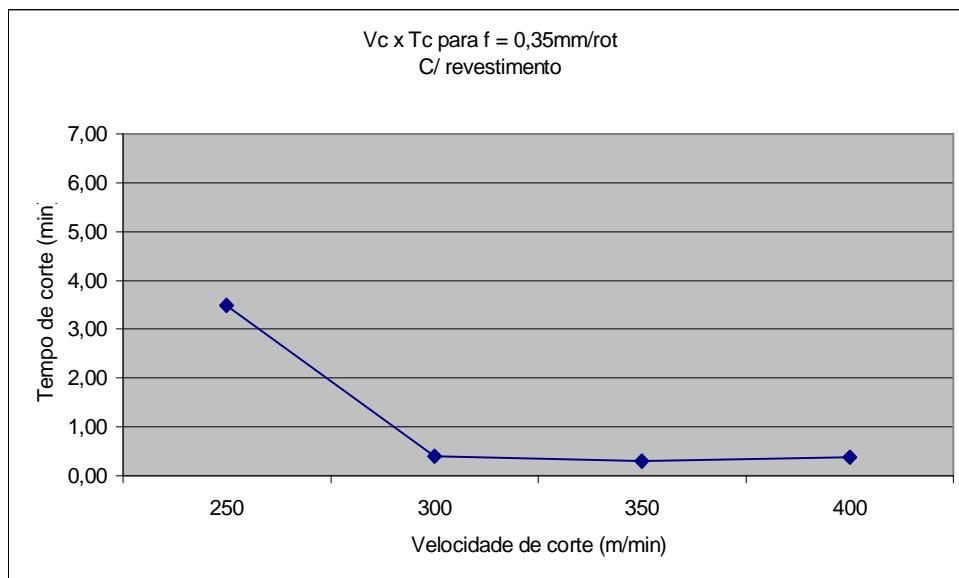


Figura 31: Avanço 0,35 mm/rot, com revestimento

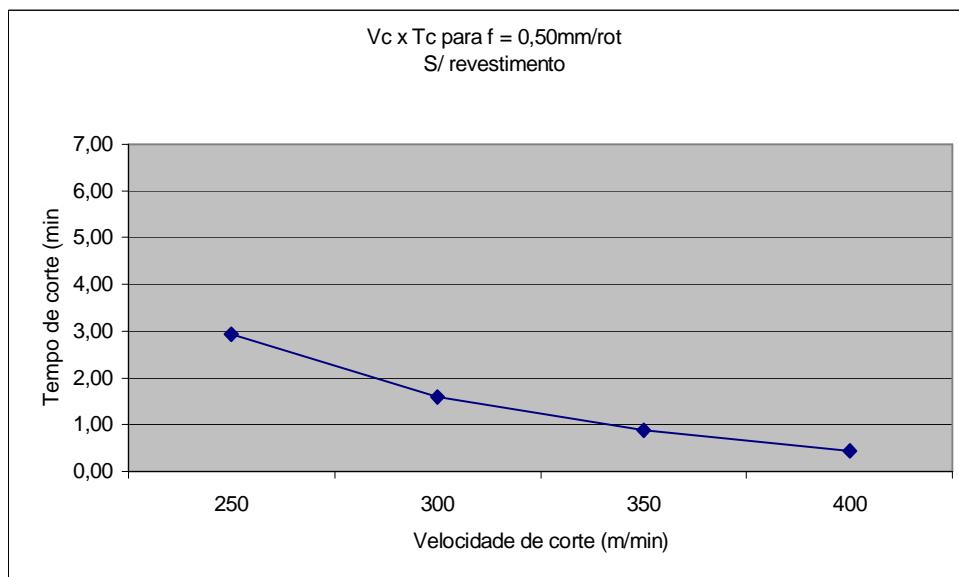


Figura 32: Avanço 0,50 mm/rot, sem revestimento

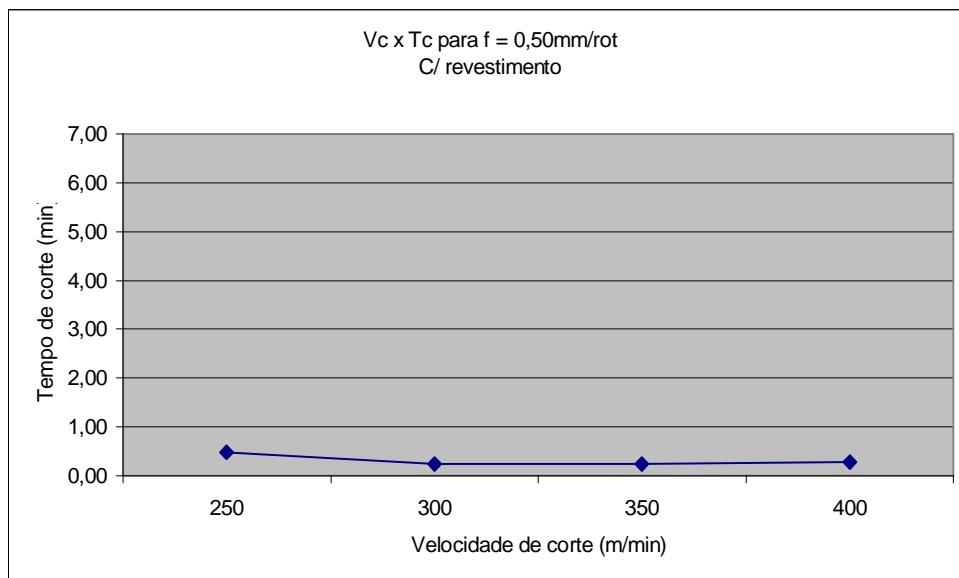


Figura 33: Avanço 0,50 mm/rot, com revestimento

Percebe-se que, para um mesmo avanço, a ferramenta com revestimento apresenta pior performance que aquela sem revestimento, com a ferramenta quebrando rapidamente na maioria dos casos. O revestimento tende a arredondar a aresta de corte, tornando-a menos afiada, daí os esforços sobre a mesma são maiores. Por outro lado, ferramentas não revestidas tendem a ser mais afiadas. Como no caso a peça era bastante regular e sem elementos duros na sua microestrutura, um menor esforço sobre a ferramenta gerou melhor desempenho do que o aumento de resistência ao desgaste do revestimento.

Além disso, o aumento do avanço implica em um menor tempo de corte, como era esperado. Um fato curioso é que nas condições ensaiadas, o avanço exerce maior influência na vida da ferramenta do que a velocidade de corte. Um maior avanço implica em um cavaco com espessura maior bem como maior taxa de deformação do material do corpo de prova. Consequentemente ocorre uma maior carga sobre a ferramenta, gerando sua vida menor. Por outro lado, maiores velocidades de corte implicam em maiores temperaturas que pode, em certos casos, favorecer o corte.

7.1.2 Aço ABNT 4340

Para o aço 4340, obtiveram-se os seguintes gráficos:

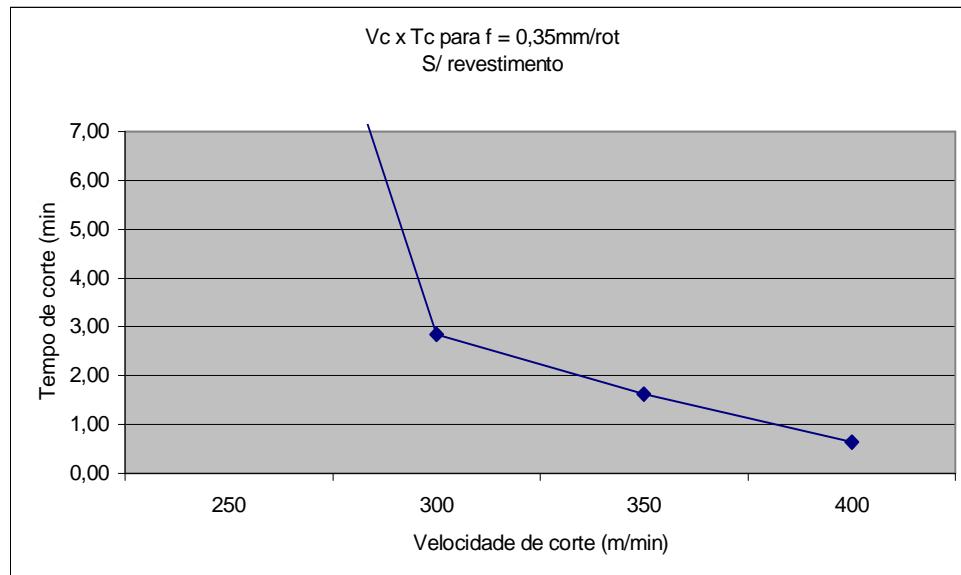


Figura 34: Avanço 0,35 mm/rot, sem revestimento

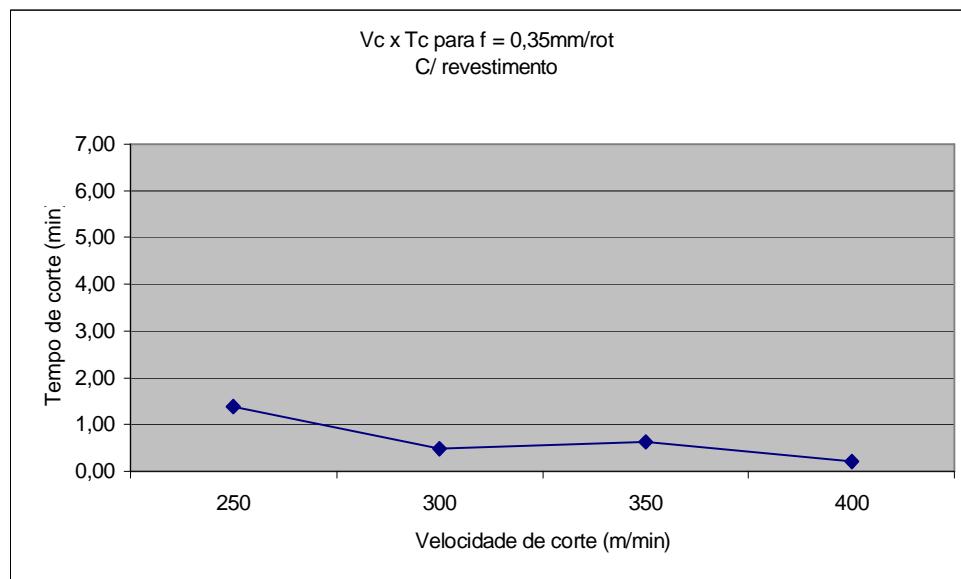


Figura 35: Avanço 0,35 mm/rot, com revestimento

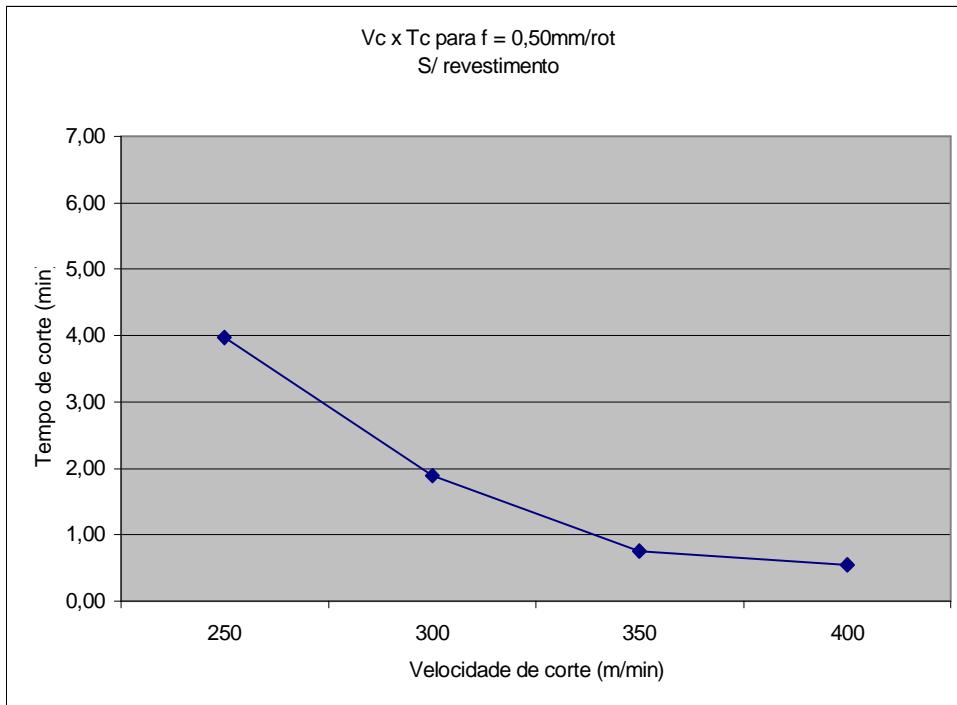


Figura 36: Avanço 0,50 mm/rot, sem revestimento

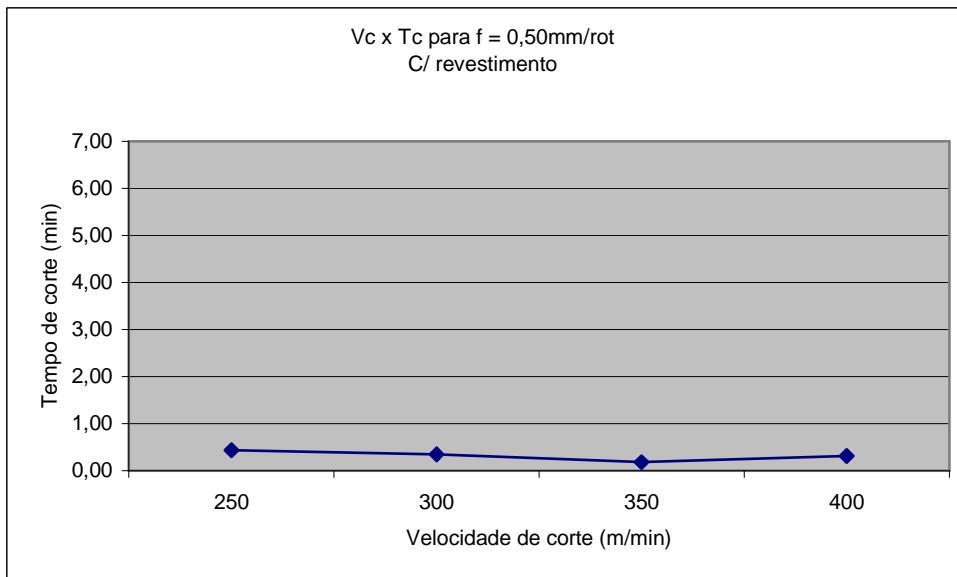


Figura 37: Avanço 0,50 mm/rot, com revestimento

Novamente, para um mesmo avanço, a ferramenta convencional (sem o nanorrevestimento) apresenta melhor performance que a nanorrevestida, e esta quebra rapidamente na maioria dos casos.

O aumento do avanço também resultou em um menor tempo de corte.

7.1.3 Desgaste da ferramenta de metal duro

Através de microscopia óptica, pode-se observar as consequências sofridas pelas ferramentas, entre elas o desgaste de flanco, que foi utilizado como parâmetro para o cálculo do tempo de corte, como mencionado anteriormente.

Foram tiradas fotos das ferramentas sob dois ângulos, o que permite também a observação do desgaste de cratera em alguns casos.

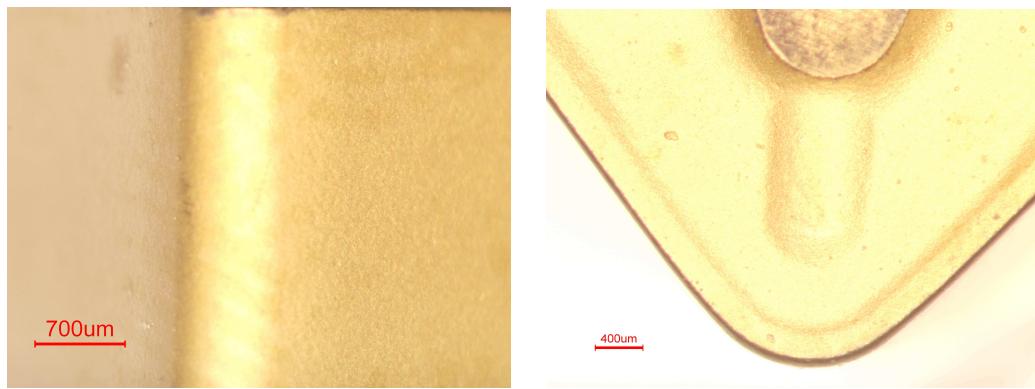


Figura 38: Pastilha convencional nova

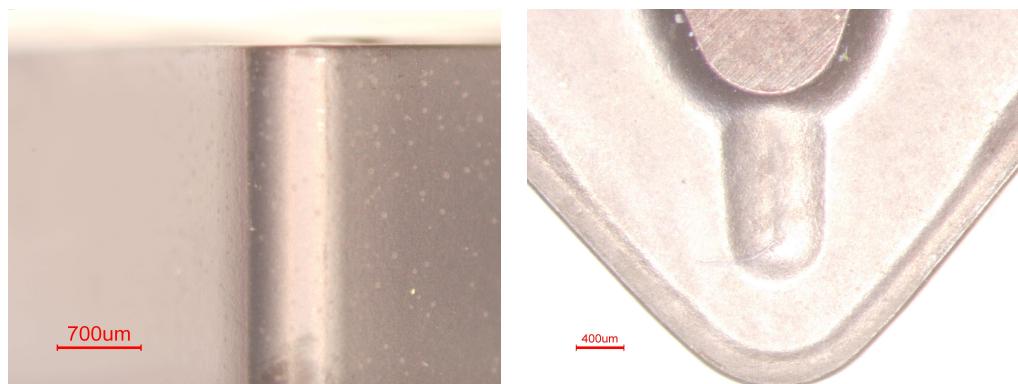


Figura 39: Pastilha nanorrevestida nova



Figura 40: Pastilha do ensaio 1

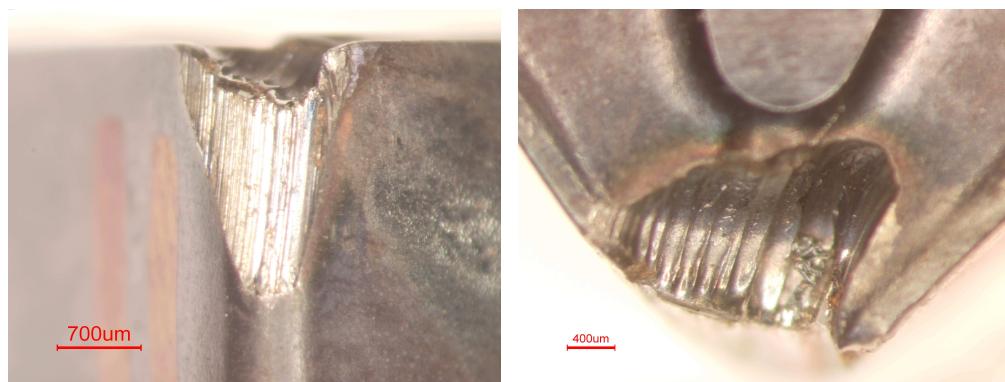


Figura 41: Pastilha do ensaio 11

Em alguns casos, houve adesão do material do corpo da prova sobre a ferramenta, como na figura 42.

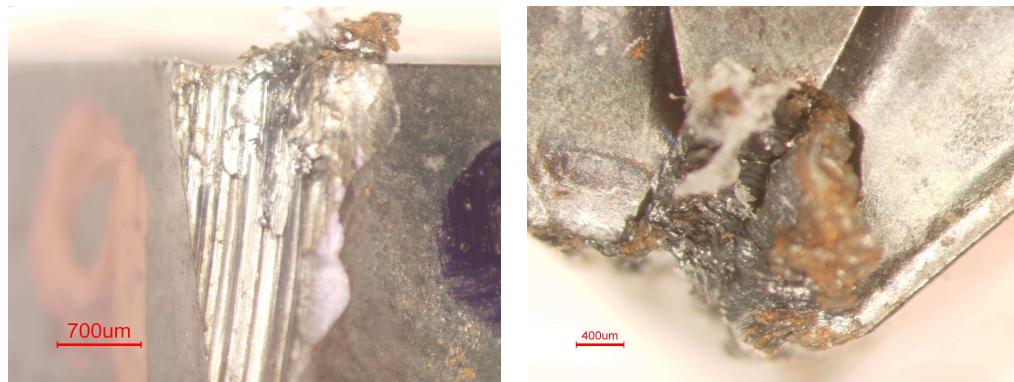


Figura 42: Pastilha do ensaio 9

7.2 Materiais Endurecidos

Nessa etapa, as análises foram discutidas em função da influência de cada parâmetro de usinagem. Assim, o comportamento do tempo de corte foi estudado para cada parâmetro isolado, sendo que os demais foram fixados para não interferirem.

Tomando a velocidade de corte como fator variável para valores de 75 e 100 m/min percebe-se, com o aumento da velocidade, uma média na redução no tempo de corte de 32,92% para ferramentas com chanfro no aço ABNT 1045 e de 30,27% para ferramentas sem chanfro no mesmo aço. Para a mesma análise feita com o aço ABNT 4340, obteve-se uma maior variação na redução do tempo de corte, sendo de 37,82% quando utilizadas ferramentas com preparação de aresta e 42,42% nas ferramentas sem chanfro.

Tabela 5: Análise da variação do Tempo de Corte

Parâmetros		Variação do Tempo de Corte			
Parâmetros Fixos	Parâmetro Variável	Aço 1045		Aço 4340	
		com chanfro	sem chanfro	com chanfro	sem chanfro
f=0,125; ap=0,2 f=0,160; ap=0,2 f=0,125; ap=0,4 f=0,160; ap=0,4	vc=75~100	-18,24%	-35,86%	-28,79%	-44,93%
		-31,90%	-30,90%	-42,50%	-41,39%
		-33,33%	-21,03%	-29,66%	-44,83%
		-48,22%	-33,27%	-50,34%	-38,52%
Média		-32,92%	-30,27%	-37,82%	-42,42%
vc=75; ap=0,2 vc=75; ap=0,4 vc=100; ap=0,2 vc=100; ap=0,4	f=0,125~0,160	14,14%	-10,12%	0,00%	-1,15%
		-10,92%	-2,79%	-14,59%	-15,17%
		-4,94%	-3,17%	-21,21%	5,20%
		-30,81%	-17,85%	-39,49%	-5,48%
Média		-8,13%	-8,48%	-18,82%	-4,15%
vc=75; f=0,125 vc=75; f=0,160 vc=100; f=0,125 vc=100; f=0,160	ap=0,2~0,4	27,23%	-12,02%	-19,90%	-3,53%
		-0,69%	-4,85%	-29,64%	-17,22%
		3,74%	8,32%	-20,88%	-3,35%
		-24,49%	-8,11%	-39,23%	-13,16%
Média		-7,15%	-4,17%	-27,41%	-9,32%

Com o aumento do avanço para valores de 0,125 e 0,160 mm/rot, tem-se, em média, uma redução de 8,13% no tempo de corte da ferramenta com chanfro usinada no aço ABNT 1045 e, na ferramenta sem chanfro, uma redução de 8,48%. No aço ABNT 4340 tem-se, para pastilhas com chanfro, uma diminuição no tempo de 18,82% e, para ferramentas sem chanfro, 4,15%.

Para a variação da profundidade de corte de 0,2 e 0,4 mm, o aumento do mesmo provoca, no aço ABNT 1045, reduções no tempo de corte de 7,15% e 4,17% nas ferramentas com chanfro e sem chanfro, respectivamente. No aço ABNT 4340 as tendências de redução são de 27,41% para ferramentas com chanfro e 9,32% nas sem chanfro.

Para alguns ensaios, ocorreu aumento e não redução do tempo de corte com o aumento dos parâmetros variados. Por exemplo, aumentando-se a profundidade de corte de 0,2 para 0,4 mm, mantendo a velocidade de corte igual a 75 m/min e o avanço de 0,125 mm/rot, obteve-se um aumento de cerca de 27% no tempo de corte. Porém, poucos foram os casos e, em se tratando de dados experimentais, a análise estatística de toda a amostra é confiável para uma grande quantidade de pontos e revela um padrão de redução do tempo de corte.

Todos esses resultados são melhor visualizados através dos gráficos das figuras 43, 44 e 45, a seguir, que ilustram a variação no tempo médio de corte com a mudança dos parâmetros de usinagem.

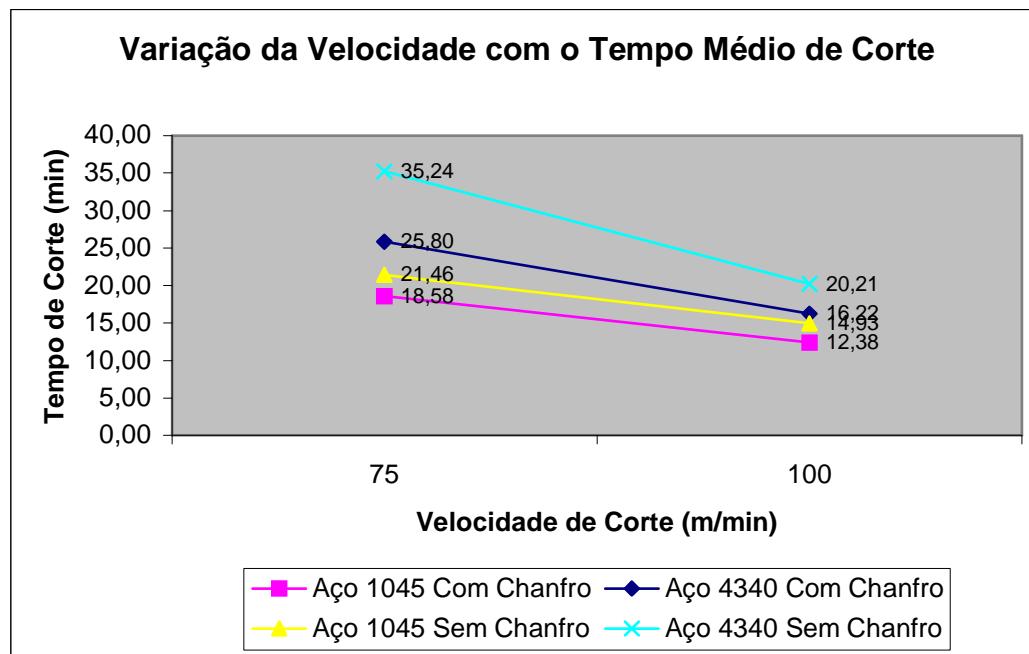


Figura 43: Efeito do aumento da Velocidade de Corte

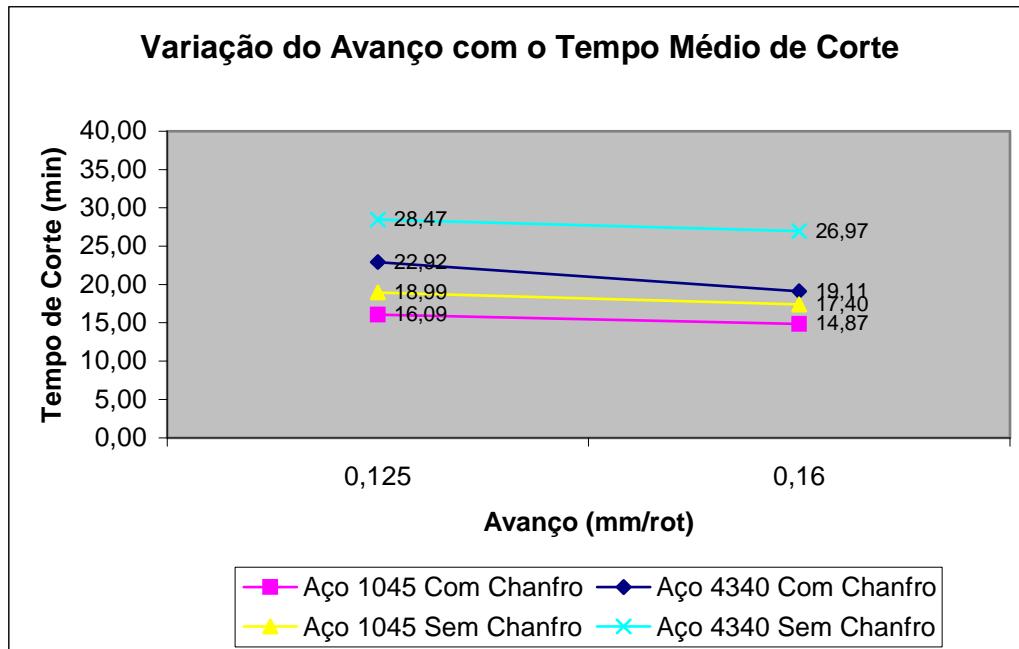


Figura 44: Efeito do aumento do Avanço

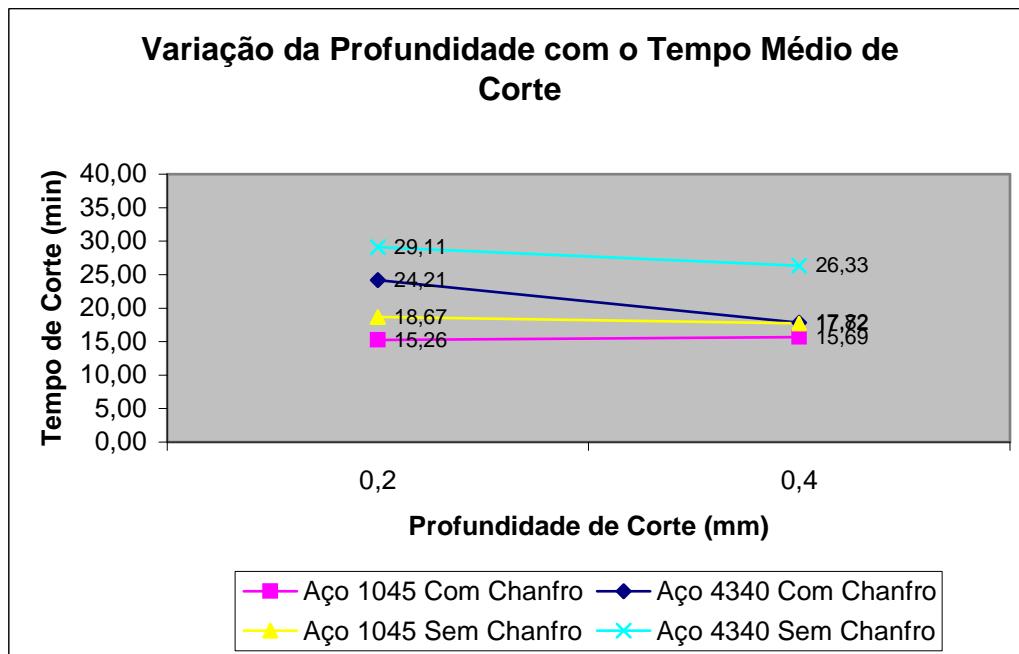


Figura 45: Efeito do aumento da Profundidade de Corte

Assim como na figura 29, os próximos gráficos (figura 46) ilustram a maior capacidade de torneamento quando são utilizadas ferramentas sem chanfro. Nesse caso, com $f=0,125$ mm/rot, $v_c=100$ m/min e $a_p=0,2$ mm, tem-se para o mesmo desgaste V_b , um maior tempo de corte para ferramenta sem chanfro, em ambos os tipos de aços. A análise das figuras revela que para o caso de

materiais endurecidos ocorreu uma concordância como o mencionado pela literatura, ou seja, a velocidade de corte exerce influência maior do que o avanço que por sua vez exerce influência maior do que a profundidade de corte no desgaste da ferramenta. Outro dado importante é para os materiais endurecidos o aço ABNT 4340 apresentou melhor usinabilidade, novamente isso se deve provavelmente aos seus elementos de liga.

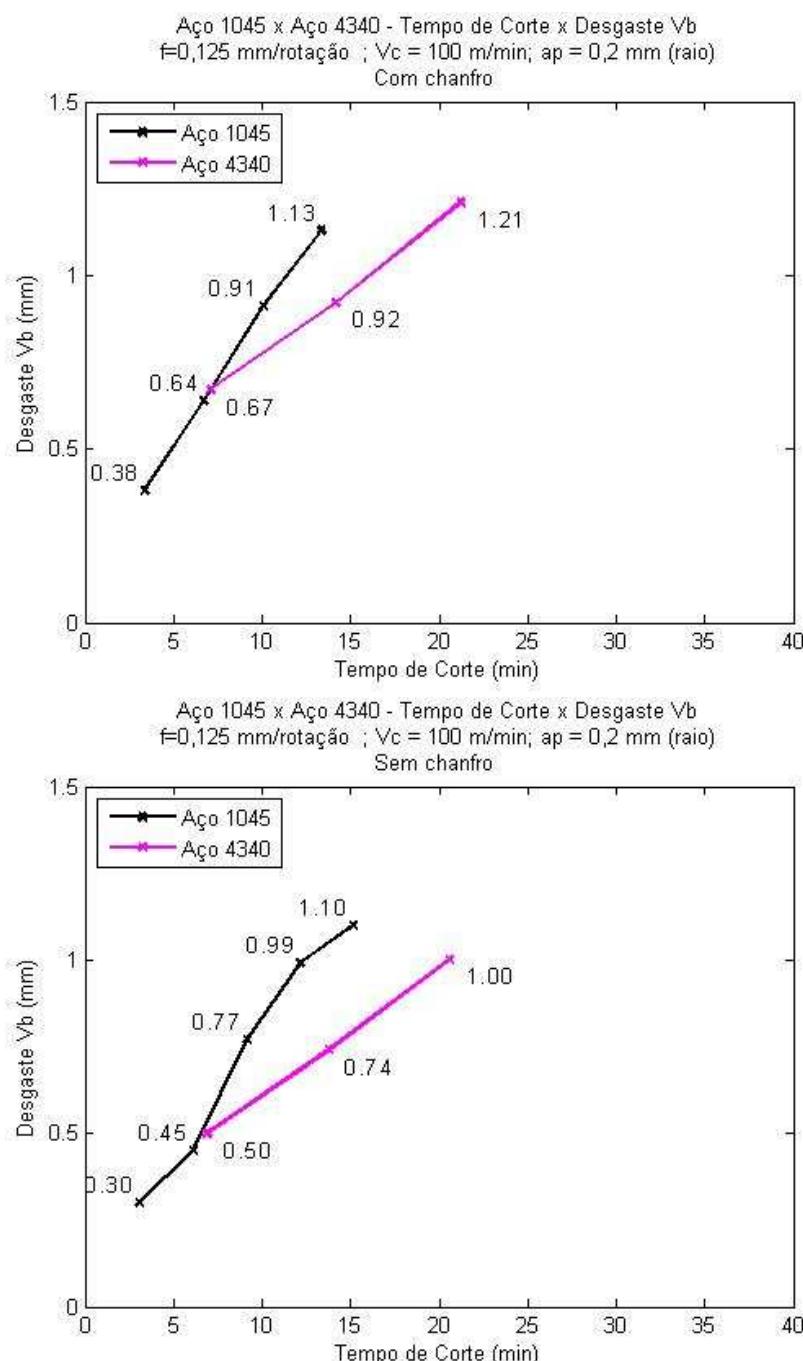


Figura 46: Comparação entre os aços e preparação da aresta de corte

Nota-se pelas figuras que a ferramenta sem chanfro apresentou melhor desempenho em relação à chanfrada. Novamente, há que se ressaltar que o corte é contínuo e aparentemente o material mostrou-se homogêneo (sem partículas de elevada dureza). Com base nisso, a ferramenta sem chanfro sofre menores esforços por parte da peça durante a formação de cavaco. Além disso a cerâmica utilizada apresenta boa tenacidade, o que provavelmente, possibilitou a utilização da mesma sem chanfro. Com isso, pode-se concluir que o maior esforço sobre a ferramenta com chanfro superou sua maior resistência mecânica. Caso o material da ferramenta fosse mais duro, provavelmente o resultado seria diferente pois nesse somaria-se a fragilidade do material à da aresta mais afiada.

7.2.1 Desgaste da ferramenta de cerâmica

As imagens obtidas por microscopia óptica revelaram que o desgaste ocorrido nas ferramentas de cerâmica ocorre principalmente na aresta secundária de folga, diferentemente dos ensaios em material não endurecido com ferramentas de metal duro, no qual pode-se observar o desgaste como sendo, fundamentalmente, na aresta principal. As figuras a seguir (figuras 47, 48 e 49) ilustram o fato.

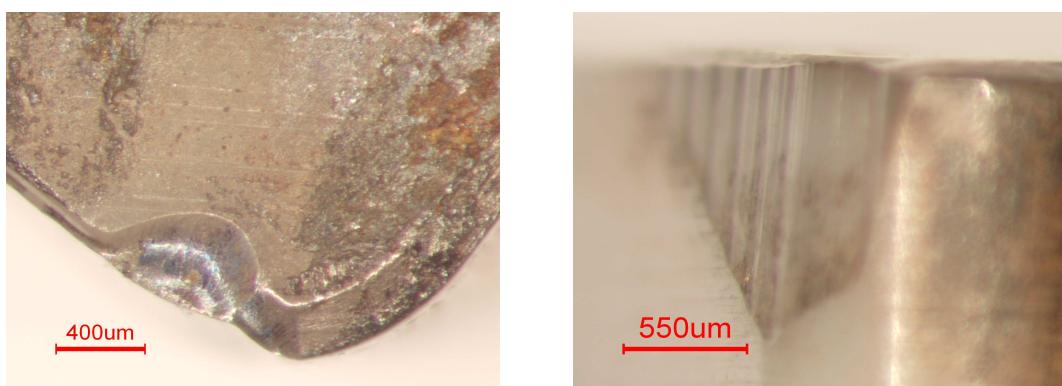


Figura 47: Pastilha do ensaio 36

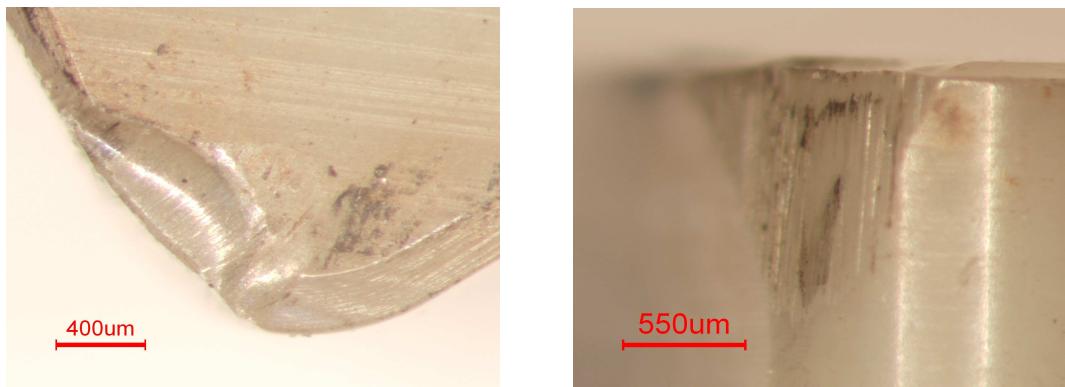


Figura 48: Pastilha do ensaio 52

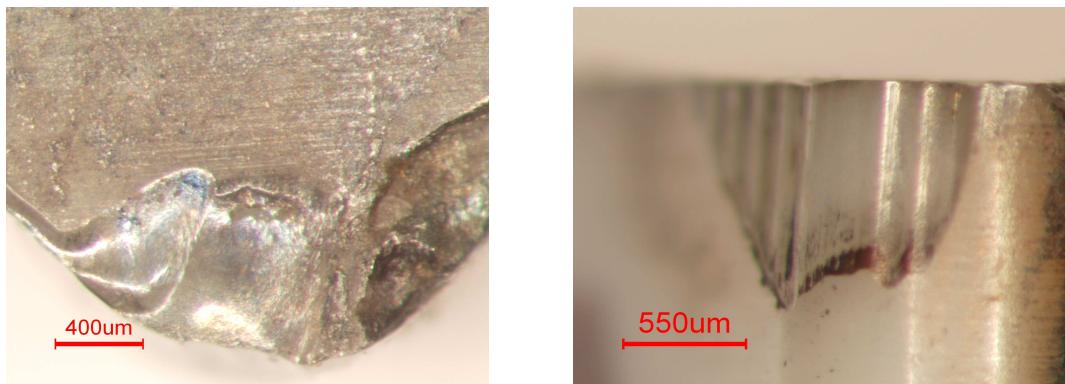


Figura 49: Pastilha do ensaio 43

A explicação para esse fato reside na diferença entre a profundidade de corte utilizada nos ensaios e o raio de ponta da ferramenta. Nos ensaios com pastilha de metal duro, em aços não endurecidos, a profundidade de corte foi de 1mm no raio, maior que o raio de ponta da ferramenta (0,8 mm). Uma análise geométrica revela que isso implica em um desgaste na aresta principal. Isso é ilustrado na figura a seguir (figura 50), onde o cavaco está representado em azul e aresta que realiza o corte, em vermelho.

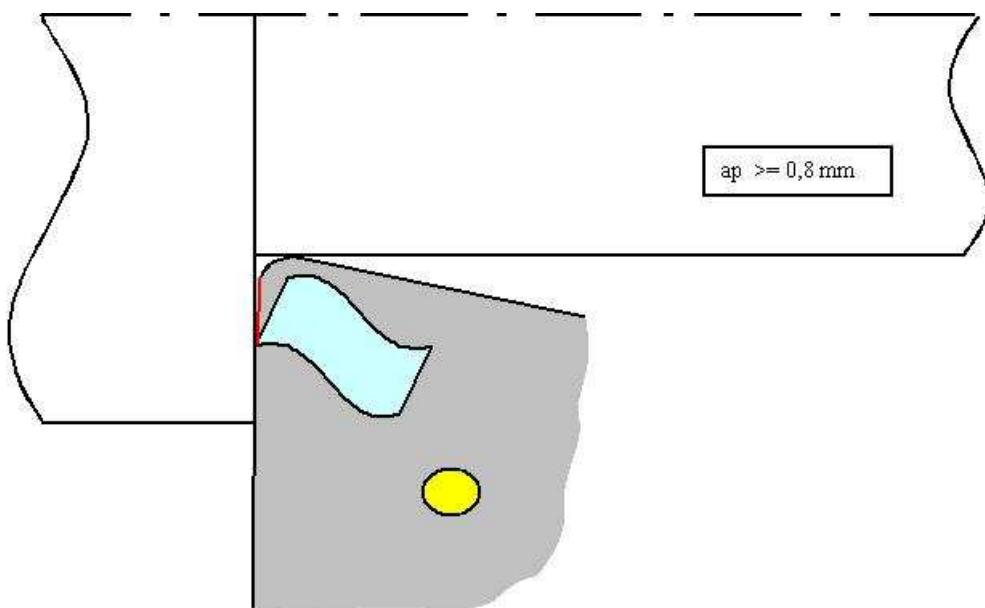


Figura 50: Ensaio em aço não endurecido

Já nos ensaios com pastilhas de cerâmica, foi necessário reduzir a profundidade de corte devido à agressividade dos ensaios, variando entre 0,2 e 0,4 mm no raio, sempre menor que o raio de ponta da ferramenta. Dessa forma, o desgaste ocorre em grande parte na aresta lateral, como visto na figura 51, onde as representações são as mesmas da figura anterior.

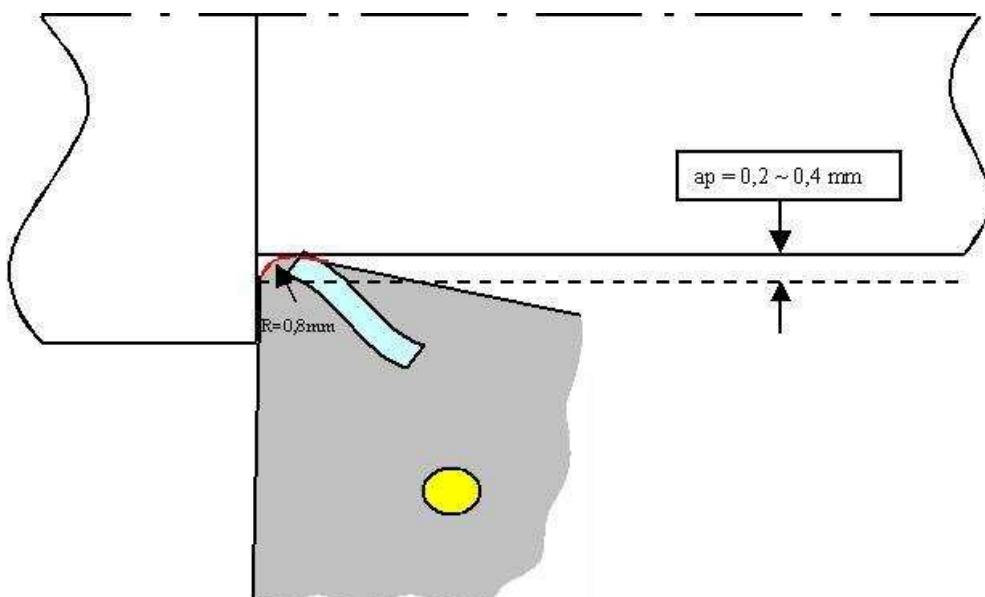


Figura 51: Ensaio em aço temperado

Além da explicação geométrica há que se ressaltar que o material endurecido apresenta-se mais abrasivo em função de sua maior dureza. Por outro lado a cerâmica também é mais resistente à abrasão. Nessa relação de compromisso, aparentemente, a maior abrasividade da peça teve um peso maior. Outro ponto que merece nota é que os tipos de desgaste apresentados na ferramenta cerâmica são similares aos das de metal duro, desgaste flanco, de cratera e de entalhe.

8 CONCLUSÃO

Os ensaios com material não endurecido e pastilhas de metal duro serviram para melhor compreensão do fenômeno de usinagem e familiarização com o comando numérico computadorizado (CNC) em tornos de alta precisão.

Desses ensaios, pode-se concluir que um maior avanço realmente diminui o tempo de corte, e que a ferramenta nanorrevestida de nitreto de titânio alumínio (TiAlN) apresenta um desempenho aquém do esperado, superado pela ferramenta convencional. Além disso, comparando os dados sobre o aço ABNT 1045 com os do aço ABNT 4340, nota-se que, em geral, o aço ABNT 4340 permite um tempo de corte ligeiramente superior ao aço ABNT 1045.

Nos ensaios com material temperado e pastilhas de cerâmica (nitreto de silício – Si_3N_4), que são bem mais agressivos, os parâmetros de usinagem (velocidade e profundidade de corte e avanço) foram reduzidos. Novamente, verificou-se um tempo de corte superior ao trabalhar-se com o aço ABNT 4340.

Com relação à preparação da aresta de corte, as duas microgeometrias estudadas apresentaram resultados coerentes com o esperado: a pastilha sem chanfro forneceu maiores tempos de corte. Um dos fatores que influenciaram esse resultado foi o menor esforço necessário para a ferramenta penetrar na peça.

Nos ensaios com material não endurecido e pastilhas de metal duro, o desgaste ocorreu principalmente na aresta principal de corte, enquanto nos ensaios com material temperado o fenômeno foi mais visível na aresta secundária. Esse fato é explicado pela diferença entre a profundidade de corte de cada ensaio e o raio de ponta da ferramenta. Com as pastilhas de cerâmica, a profundidade de corte é reduzida e acaba sendo menor que o raio de ponta da ferramenta, modificando a região de corte.

Ainda em relação aos ensaios com ferramentas cerâmicas, a variação de cada parâmetro influí de maneira diferente no tempo de corte. Aumentando-se um desses parâmetros de corte e mantendo-se constantes os demais, sempre ocorre a redução do tempo de corte, porém com intensidades diferentes. Concluiu-se que a velocidade de corte é o fator que mais influencia o tempo de corte. Isso pode ser visto graficamente, já que a inclinação da curva velocidade x tempo é a maior, seguida do avanço e da profundidade de corte.

Os ensaios com o aço ABNT 4340 apresentam, em geral, dados mais dispersos, o que implica em um maior desvio padrão. No entanto, a tendência de diminuição do tempo de corte relacionada ao aumento dos parâmetros se confirma.

Os desgastes de flanco e cratera foram bem visíveis ao microscópio óptico e uma aderência do material da peça à ferramenta ocorreu em vários casos nas ferramentas de metal duro, especialmente naquelas com nanorrevestimento.

A ferramenta cerâmica com maior desempenho foi a que possui microgeometria sem chanfro, em todas as condições ensaiadas. Para uma velocidade de corte de 75 m/min, avanço de 0,125 mm/rot e profundidade de corte de 0,2 mm no raio, o tempo de corte foi maximizado.

9 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

FERRARESI, D. **Usinagem dos Metais: Fundamentos da Usinagem dos Metais.** Editora Edgard Blücher, 1960. 753 p. v. 1.

DINIZ, E. A.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** São Paulo: Artliber, 2003. 248 p.

MOHAMED, N.A. **Modelling the effects of tool edge radius on residual stresses when orthogonal cutting AISI 316 L.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, n.47, p.401-411, 2007. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 12 abr. 2007.

SANTOSH RANGANATH, A. B.; CAMPBELL, D. W. G. **A model to calibrate and predict forces in machining with honed cutting tools or inserts.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, n.47, p.820-840, 2007. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 12 abr. 2007.

DEBIASI, I. L. **Dossiê técnico: Pastilhas alisadoras.** Senai RS – Centro Tecnológico de Mecatrônica, 25 p., 2006. Disponível em: <sbrt.ibict.br/upload/dossies/sbrt-dossie48.pdf?PHPSESSID=93ed4f33dcfb220ed39a4dbb054f4510>. Acesso em: 14 abr. 2007.

SOUZA, A. J. **Variáveis envolvidas no processo de usinagem.** Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, 2007. Disponível em: <<http://www.urisan.tche.br/~ajsouza/usinagem.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2007.

RODRIGUES, M. A. **Uma forma de troca de ferramentas em operação de usinagem interna de acabamento.** Revista Máquinas e Metais, p.320-351, 2005.