

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE INSERTOS DE AÇOS RÁPIDOS SINTERIZADOS AISI T15
PARA USINAGEM**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

DELMONTE NUNES FRIEDRICH

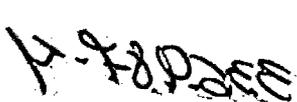
Florianópolis, novembro de 2000.

DESENVOLVIMENTO DE INSERTOS DE AÇOS RÁPIDOS SINTERIZADOS AISI T15
PARA USINAGEM

DELMONTE NUNES FRIEDRICH

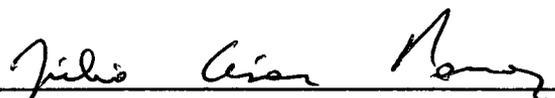
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
FABRICAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.



PROF. LOURIVAL BOEHS, DR. ENG.

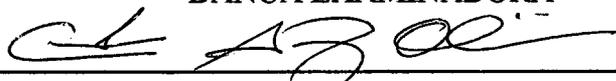
ORIENTADOR



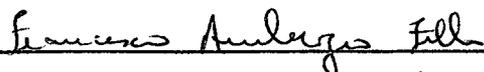
PROF. JÚLIO CÉSAR PASSOS, DR. ENG.

COORDENADOR

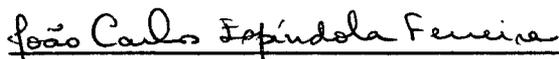
BANCA EXAMINADORA



PROF. CARLOS AUGUSTO SILVA DE OLIVEIRA, DSC.



PROF. FRANCISCO AMBRÓZIO FILHO, DR. ENG.



PROF. JOÃO CARLOS E. FERREIRA, PhD. ENG.



PROF. ROLF BERTRAND SCHROETER, DR. ENG.

*"A vida, na sua essência, é muito gratificante,
quando temos um objetivo definido ela se torna ainda melhor
e quando o alcançamos a sensação é indescritível,
motivo de energia sem igual,
energia esta que é liberada na forma de agradecimento a Jesus,
amigo que não abandona amigo no meio do caminho."*

Delmonte N. Friedrich

É com muita satisfação que dedico esta dissertação à pessoa mais importante da minha vida e que sempre foi a base do meu caminhar, motivo de exemplo de pessoa dedicada e de caráter sem igual, minha mãe Leone.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Leone e aos meus irmãos Delmar e Delnei, por tudo o que eles representam na minha vida.

Ao Prof. Lourival Boehs, não somente pela oportunidade concedida para a realização deste trabalho mas também pela amizade no decorrer desses anos.

Ao prof. Rolf B. Schroeter pela amizade, incentivo e presteza no decorrer desses anos.

À Odília C. de Souza Ribeiro por toda a sua dedicação e empenho prestados durante o desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Prof. Francisco Ambrózio Filho por toda a colaboração e incentivo na realização deste trabalho.

Ao Fernando, Sérgio, Joe, Mazinho e Valtair, equipe do USICON, pela dedicação e carinho que sempre demonstraram para comigo.

Aos estagiários Fabiano Mocellin, Gilson B. F. Palhares, Pedro Firmo Caldeira, Paulo Sérgio Steidel, Dámian S. Moretti, Margley Moura Júnior e Ramon de Souto Goulart, pela colaboração direta e indireta nos trabalhos em que participei nesta Universidade:

Ao Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, por me acolherem nesta instituição.

A todos os funcionários desta Universidade que de alguma forma tenham colaborado com a minha pessoa e que, por motivo de esquecimento, eu não tenha citado.

Ao IPEN, São Paulo-SP, e sua equipe, pelo suporte técnico e fornecimento do material necessário para a realização deste trabalho.

À empresa HURTH-Infer, Sorocaba-SP, pela disponibilidade técnica e de equipamentos indispensáveis para a execução deste trabalho.

ÍNDICE

SIMBOLOGIA.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XII
RESUMO.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	4
3 O AÇO RÁPIDO AISI T15 E ASPECTOS GERAIS DA METALURGIA DO PÓ.....	6
3.1 – CARACTERÍSTICAS DO AÇO RÁPIDO AISI T15.....	6
3.2 – A METALURGIA DO PÓ.....	7
3.2.1 - Métodos de fabricação de aços rápidos empregando M/P (Metalurgia do Pó).....	10
3.3 – TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS RÁPIDOS.....	13
4 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA, ÂNGULOS E QUEBRA-CAVACOS, NA VIDA DA FERRAMENTA.....	15
4.1 – PRINCIPAIS ÂNGULOS.....	16
4.2 – QUEBRA-CAVACOS.....	18
5 DESGASTE DE FERRAMENTAS.....	23
5.1 - DESGASTE DE FLANCO.....	23
5.2 - DESGASTE DE CRATERA.....	23

5.3 – MECANISMOS DE DESGASTE	23
6 METODOLOGIA APLICADA NO PRESENTE TRABALHO	27
6.1 – SOBRE OS INSERTOS.....	28
6.2 – MEDIÇÃO DA DUREZA DOS INSERTOS	30
6.3 – MATERIAL PARA OS ENSAIOS DE USINAGEM	31
6.4 – ENSAIOS DE USINAGEM	32
7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	34
7.1 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE DUREZA	35
7.2 - DESENVOLVIMENTO DA GEOMETRIA DOS INSERTOS, ÂNGULOS E QUEBRA-CAVACOS.....	37
7.2.1 - Aço rápido T15 comercial, TC74, temperado a 1210°C e revenido a 560°C	38
7.2.2 - Aço rápido T15 sinterizado a vácuo, TSV80, temperado a 1210° e revenido a 560°C	40
7.2.3 - Aço rápido T15 comercial, TC75, temperado a 1210°C e revenido a 560°C	41
7.2.4 – Aço rápido T15 sinterizado a vácuo, TSV82, temperado a 1210 °C e revenido a 560°C	43
7.2.5 - Aço rápido T15 sinterizado a vácuo, TSV54, temperado a 1210°C e revenido a 540°C..	44
7.3 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM INSERTOS JÁ NA GEOMETRIA FINAL, ÂNGULOS E QUEBRA-CAVACOS, AFIADOS NA UFSC	47
7.4 - COMPARAÇÃO ENTRE INSERTOS SINTERIZADOS COM FASE LÍQUIDA E BITS PRODUZIDOS A PARTIR DE BARRAS DE AÇO RÁPIDO Prensado isostaticamente a quente: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS TEMPERATURAS DE TÊMPERA E DE REVENIMENTO	55
7.4.1 - O aço rápido T15 prensado isostaticamente a quente	57
7.4.2 - O aço rápido T15 sinterizado com fase líquida (SV).....	57
7.5 – AVALIAÇÃO DO LOTE DE INSERTOS PRODUZIDOS PARA TESTE EM CAMPO.....	60
8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	73

8.1 - CONCLUSÕES	73
8.2 – SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	78
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
ANEXO 1 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS GRÁFICOS: “TESTE T” PARA DUAS AMOSTRAS PRESUMINDO VARIÂNCIAS EQUIVALENTES.....	86
ANEXO 2 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS.....	90
ANEXO 3 - PROGRAMA CNC	92

SIMBOLOGIA

α_o	[°]	Ângulo de incidência
α'	[°]	Ângulo de incidência do gume secundário
β	[°]	Ângulo de cunha
γ_o	[°]	Ângulo de saída
χ_r	[°]	Ângulo de direção do gume principal
χ_r'	[°]	Ângulo de direção do gume secundário
ε	[°]	Ângulo de quina
f	[mm]	Avanço
VB_N		Desgaste de flanco
$VB_{MÁX}$	[mm]	Desgaste de flanco máximo
VB_{MED}	[mm]	Desgaste de flanco médio
VB_L		Desgaste no gume secundário
KT		Desgaste de cratera
σ		Desvio-padrão
t		Fator de Student
b	[mm]	Largura de usinagem
a_p	[mm]	Profundidade de usinagem
r_s	[mm]	Raio de quina
T_t	[°C]	Temperatura de têmpera
T_r	[°C]	Temperatura de revenimento
T	[min]	Vida da ferramenta
v_c	[m/min]	Velocidade de corte

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Cristal de tungstênio (a) e uma partícula de tungstênio formada pela união desses cristais (b) (HUPPMANN; DALAL, 1986).....	7
Figura 3.2 - Etapas da sinterização (VAN VLACK, 1984).....	9
Figura 3.3 - Pó de aço rápido T15 atomizado a gás, SEM, 300x (HUPPMANN; DALAL, 1986).	12
Figura 3.4 - Esquema do processo de prensagem isostática a quente (KOIZUMI; NISHIHARA, 1991).....	12
Figura 3.5 - Pó de aço rápido T15 atomizado a água, SEM, 300x (HUPPMANN; DALAL, 1986)	13
Figura 4.1 – Vista de frente do rebaixo do quebra-cavacos (STEMMER, 1995).....	19
Figura 4.2 – Formas de escoamento do cavaco em função da concordância do quebra-cavacos (STEMMER, 1995).....	20
Figura 5.1 - Ferramenta com desgaste no flanco e na face (ISO 3685, 1977).....	23
Figura 5.2 - Mecanismos de desgaste que atuam em ferramentas de usinagem (KÖNIG, 1981; SANDVIK, 1994).....	25
Figura 5.3 - Avarias que ocorrem em ferramentas de corte (KÖNIG, 1981).....	26
Figura 6.1 – Geometria inicial dos insertos.....	30
Figura 7.1 - Durezas médias dos insertos.....	36
Figura 7.2 – Colapso do terceiro gume do inserto TSV80.....	41
Figura 7.3 - Rebaixo realizado na face do inserto TC75-1.....	41
Figura 7.4 - Curvas de desgaste dos bits TC06 e VK7' e do inserto TC75-1, v_c de 33m/min, a_p de 2,0 mm e f de 0,2 mm.....	42

Figura 7.5 – Desgaste de flanco, inserto TC75-1.....	43
Figura 7.6 – Rebaixo paralelo ao gume do inserto TSV82-3.....	44
Figura 7.7 - Curvas de desgaste: bits TC06, VK7' e insertos TC75-1 e TSV82-3, $v_c = 33$ m/min.	44
Figura 7.8 - Curvas de desgaste dos insertos TSV54-1 e TSV82-3, 33m/min, $a_p=2,0$ mm.....	46
Figura 7.9 - Geometria final e quebra-cavacos dos insertos.....	48
Figura 7.10 - Curvas de desgaste dos quatro gumes do inserto TC77.....	50
Figura 7.11 - Curvas de desgaste dos quatro gumes do inserto TSV54.....	52
Figura 7.12 - Destruição da quina do gume 02 do inserto TSV54, $v_c = 50$ m/min.....	52
Figura 7.13 - Curvas de desgaste do inserto TSV27, $v_c=40$ m/min.....	53
Figura 7.14 – Aspecto predominante do cavaco gerado nesta pesquisa, $v_c = 40$ m/min.....	55
Figura 7.15 - Curvas de desgaste dos bits de aço rápido T15 prensado isostaticamente a quente (HIP), velocidade de 33 m/min (SANTOS, 1999).....	58
Figura 7.16 - Curvas de desgastes das ferramentas de aço rápido T15 (SV), $v_c = 40$ m/min.....	59
Figura 7.17 - Curvas de desgaste dos gumes 1,3 e 4 do inserto TSV36, velocidade de 40 m/min.	61
Figura 7.18 - Desgaste atípico próximo à quina do inserto TSV36, gume 1, aumento de 30x....	61
Figura 7.19 - Flanco secundário do inserto TSV36 -1: desgaste atípico próximo à quina, 30x...	62
Figura 7.20 - Desgaste próximo à quina do inserto TSV36, gume 03, aumento de 30x.....	63
Figura 7.21 - Início do desgaste próximo à quina do inserto TSV36, gume 04, aumento de 30x.63	
Figura 7.22 - Aumento de 200x do detalhe da figura 7.21, Gume 04 do inserto TSV36.....	64
Figura 7.23 - Aumento de 1600x do detalhe da figura 7.21, marcas de desgaste por abrasão.....	64
Figura 7.24 - Carboneto presente na matriz do gume 04, detalhe da figura 7.21, 8000x.....	65
Figura 7.25 - Desgaste atípico próximo a quina do gume 01 do inserto TSV68, aumento de 30x.	66

Figura 7.26 - Aspecto devido ao lixamento do quarto gume do inserto TSV68, exibindo a zona de transição (detalhe), aumento de 30x.	67
Figura 7.27 - Curvas de desgaste dos gumes 1 e 4 do inserto TSV68, velocidade de 40 m/min.	67
Figura 7.28 - Gume 04, flanco principal (desgaste VB_N), aumento de 30x.	68
Figura 7.29 - Curvas de desgaste dos insertos TSV68-4 e TSV83, velocidade de 40 m/min.	69
Figura 7.30 - Melhoria do acabamento do terceiro gume do inserto TSV68, aumento de 50x.	70
Figura 7.31 - Flanco secundário do terceiro gume do inserto TSV68, aumento de 30x.	70
Figura 7.32 - Curvas de desgaste dos gumes 3 e 4 do inserto TSV68, velocidade de 40 m/min.	71
Figura 7.33 – Foto do inserto de aço rápido T15 sinterizado a vácuo, revestido com TiN, desenvolvido na presente pesquisa, montado no suporte SANDVIK CSBPR 2020K 12.	72

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 - GEOMETRIA DE CORTE E CONDIÇÕES DE USINAGEM.....	17
TABELA 4.2 – DIMENSÕES RECOMENDADAS PARA QUEBRA-CAVACOS PARALELOS E ANGULARES. VALORES EM MM (STEMMER, 1995).	20
TABELA 6.1 – COMPOSIÇÕES DAS LIGAS DE AÇO RÁPIDO T15 UTILIZADAS.....	28
TABELA 6.2 – DESIGNAÇÃO DOS INSERTOS.	30
TABELA 6.3 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS CORPOS-DE-PROVA.....	31
TABELA 7.1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DUREZA.	36
TABELA 7.2 - DESIGNAÇÃO E PECULIARIDADES DAS FERRAMENTAS.....	56

FRIEDRICH, Delmonte N., 2000 – “Desenvolvimento de Insetos de Aços Rápidos Sinterizados AISI T15” para Usinagem, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

RESUMO

Os aços rápidos sinterizados da classe T15 são largamente empregados na produção de ferramentas de usinagem. Duas técnicas de metalurgia do pó se destacam na obtenção desses materiais: a prensagem isostática a quente; e a sinterização com fase líquida. Esta segunda técnica, mais simples e de menor custo que a primeira, mas que proporciona um material com microestrutura mais grosseira, foi objeto de estudo deste trabalho. Deve-se ressaltar que as empresas brasileiras que consomem estes aços sinterizados importam os mesmos, uma vez que no Brasil estas técnicas de sinterização de aços rápidos ainda não são dominadas e utilizadas comercialmente. Para a realização desta pesquisa foram produzidos insetos a partir da sinterização com fase líquida do pó de aço rápido AISI T15. Os mesmos foram temperados e revenidos em três diferentes combinações de temperaturas, quais sejam 1160/540°C, 1210/540°C e 1210/560°C. A geometria desses insetos também foi foco de estudo. Os resultados obtidos mostram que a sinterização com fase líquida, realizada nas dependências do IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo, proporciona excelentes propriedades mecânicas às ferramentas de usinagem. Com a otimização dos ângulos e do quebra-cavacos dos insetos foi possível empregá-los na velocidade de 50 m/min, durante 10 minutos, no torneamento com corte contínuo do aço ABNT 1045 trefilado, sendo a usinagem realizada sem a utilização de fluido de corte e com avanço e profundidade de corte, respectivamente, de 0,2 mm e 2,0 mm. Outra constatação importante foi que a combinação de temperaturas de têmpera e revenimento de 1210/540°C proporciona maior dureza às ferramentas, mas piora consideravelmente a resistência ao desgaste das mesmas, isto para o processo de usinagem empregado nesta pesquisa.

Palavras-chave – Aço rápido; Sinterização; Têmpera e revenimento; Desgaste de flanco.

ABSTRACT

The sintered high speed steel that belongs to the T15 class are largely used in the production of machining tools. Two powder metallurgy techniques are predominantly employed to obtain these materials: Hot Isostatic Pressing and Sintering with Liquid Phase. The latter technique, which is simpler and cheaper than the former, results in a less refined microstructure. The Sintering with Liquid Phase process is the main subject of the present work. It is important to point out that the sintered steels used by Brazilian Companies are imported, because this sintering technique isn't yet commercially dominated in Brazil. To carry out this research, inserts were produced from AISI T15 high speed steel powder, using the Sintering with Liquid Phase process. These inserts were quenched and tempered under three temperature combinations: 1160/540°C; 1210/540°C; and 1210/560°C. Tools were sintered and heat treated at IPEN - "Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo". Results show excellent mechanical properties of the tools obtained by the Sintering with Liquid Phase process. With the optimization of the angles and the chip-breakers of the inserts, their tool life reached 10 minutes at speeds of 50 m/min when turning (i. e. continuous cutting) ABNT 1045 drawn steel. This tool life was reached without coolant and with feed rate and depth of cut of 0,2 mm and 2,0 mm, respectively. The geometry of the inserts is also an objective of this research. Another important conclusion was that the temperature combination of 1210/540°C provides higher tool hardness, however it decreases considerably the wear resistance in the machining process tested in this work.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de processos alternativos de metalurgia do pó, empregados na fabricação de componentes de aços rápidos, foi estimulado pela exigência de fabricantes de ferramentas e usuários das mesmas por melhorias microestruturais e, conseqüentemente, propriedades mecânicas superiores desse material (SANDEROW, 1990).

Como exemplo típico da atual importância dos aços rápidos na fabricação de ferramentas com as mais variadas formas, bem como aplicadas nos mais variados processos de produção, tem-se a empresa Erasteel. Em 1969, essa empresa iniciou a produção de uma liga de aço rápido visando a produção de um material de elevado desempenho para a produção de ferramentas de alto desempenho. Após 30 anos de existência, a Erasteel já desenvolveu diversas outras ligas e novos processos de produção do aço rápido, atingindo uma produção superior a 50.000 toneladas no decorrer desses anos. Além disso, já investigou mais de 10.000 ferramentas fornecidas por fabricantes e usuários de ferramentas de aços rápidos, garantindo a construção de uma importante biblioteca em termos de conhecimento técnico (ERASTEEL, 1999). Além desta, a CRUCIBLE é outra fabricante de aços rápidos que também tem projeção em várias partes do mundo. Portanto, o aço rápido continua sendo um material de grande importância para o setor metal mecânico mundial.

Dentre os processos de metalurgia do pó empregados na produção de aços rápidos, dois dos mais difundidos são: a prensagem isostática a quente e a sinterização com fase líquida (AMBRÓZIO et. al, 1996). A prensagem isostática a quente (HIP) é uma técnica de metalurgia do pó que utiliza pós de aços rápidos atomizados com gás inerte e prensados isostaticamente a

quente, em temperatura e pressão da ordem de 1100 °C e 100 MPa, respectivamente (id.). Na sinterização com fase líquida os pós são atomizados a água e compactados em prensas uniaxiais ou isostáticas e, posteriormente, sinterizados sob vácuo ou em atmosfera protetora, na temperatura da ordem de 1210 °C, onde ocorre a formação da fase líquida (AMBRÓZIO et. al, 1996).

A microestrutura do aço prensado isostaticamente é mais refinada, apresentando carbonetos pequenos ($\leq 3 \mu\text{m}$) e arredondados. Na sinterização em fase líquida os carbonetos são maiores ($\leq 10 \mu\text{m}$) e irregulares. Sendo assim, ocorrem diferenças entre suas propriedades (AMBRÓZIO et. al, 1996).

Após sinterizados, os aços rápidos são tratados termicamente, ou seja, temperados e revenidos. De acordo com as temperaturas de têmpera e revenimento obtêm-se propriedades mecânicas características. Por exemplo, o aço rápido T15 prensado isostaticamente a quente quando temperado a 1210 °C e revenido a 540 °C apresenta maior dureza, porém menor tenacidade, do que quando revenido a 560 °C. Essa diferença de 20 °C na temperatura de revenimento é suficiente para mudar consideravelmente o comportamento desse material quando empregado como ferramenta de usinagem (SANTOS, 1999).

Além do processo de metalurgia do pó e do tratamento térmico empregados na produção de ferramentas de aços rápidos, a geometria final da ferramenta é muito importante para o bom desempenho da mesma.

O estudo da influência da geometria da ferramenta sobre o seu desgaste durante a usinagem data de algumas décadas. Por exemplo, Kankaanpää e Korhonen, 1987, estudaram a influência de duas diferentes geometrias de corte no desempenho de ferramentas de aço rápido sinterizado e revestidas com TiN quando empregadas na usinagem do aço AISI 8620 com dureza de 170 HB. Eles concluíram que pequenas alterações na geometria da ferramenta geram grandes

ganhos na diminuição da taxa de evolução dos desgastes de flanco e de cratera, sendo que esses resultados serão apresentados na revisão bibliográfica.

Desta forma, é evidente a necessidade do conhecimento fundamentado das propriedades mecânicas que cada um dos processos de sinterização, acima citados, proporcionam ao aço rápido AISI T15. Igualmente, faz-se necessária a otimização da geometria dos insertos produzidos a partir desse material, e que serão empregados neste trabalho, o qual faz parte de um projeto de pesquisa no âmbito do programa PADCT II, sendo parceiros o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, a empresa HURTH-Infer - Indústria de Máquinas e Ferramentas Ltda, localizada em Sorocaba – São Paulo e o IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo.

Para facilitar o melhor entendimento por parte do leitor, este trabalho está dividido em 9 capítulos, como segue:

O capítulo 2, que é referente aos objetivos do presente trabalho;

O Estado da Arte, que está distribuído em 3 capítulos, apresenta informações sobre o aço rápido AISI T15 e aspectos gerais da metalurgia do pó (capítulo 3), influência da geometria, ângulos e quebra-cavacos, na vida da ferramenta (capítulo 4) e desgaste de ferramentas (capítulo 5).

O capítulo 6 apresenta a metodologia aplicada neste trabalho. Em seguida, o capítulo 7 traz a apresentação e análise dos resultados. As conclusões e sugestões para futuros trabalhos pertencem ao capítulo 8. O último capítulo lista as referências bibliográficas. Os anexos são: anexo I - análise estatística dos resultados; anexo II - máquinas e equipamentos utilizados neste trabalho, e o anexo III - programa CNC utilizado na realização dos ensaios de usinagem.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivos gerais avaliar o desgaste que ocorre em insertos de aço rápido AISI T15, produzidos por dois processos distintos de metalurgia do pó, quais sejam, a prensagem isostática a quente e a sinterização com fase líquida, quando empregados em processo de torneamento e desenvolver uma geometria adequada, ângulos e quebra-cavacos, para esses insertos, com a finalidade de utilizar os melhores parâmetros de usinagem.

A fim de alcançar os objetivos gerais, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

1 - Otimizar a geometria dos insertos, para maximizar o desempenho destes quando aplicados no processo de torneamento longitudinal externo e torná-los utilizáveis em suportes normalizados, empregados para insertos de metal duro. Desta forma, utilizam-se os suportes já existentes no mercado;

2- Analisar a influência de cada um dos processos de metalurgia do pó, acima citados, nas propriedades mecânicas de ferramentas de aço rápido na forma de insertos intercambiáveis aplicados em torneamento;

3- Analisar a influência de três combinações de temperaturas de têmpera e revenimento, quais sejam, 1160/540 °C, 1210/540 °C e 1210/560 °C, no desempenho desses insertos;

4 - Comparar os resultados obtidos no item 3 com as suposições realizadas por Santos (1999), o qual concluiu que o par de temperaturas de têmpera e revenimento de 1210/560 °C, apesar de não ter proporcionado maior dureza aos bits, aumentou a resistência ao desgaste dos mesmos quando aplicados no torneamento do aço ABNT 1045 trefilado, isto quando comparado com os pares de temperaturas de têmpera e revenimento de 1160/540 °C e 1210/540 °C;

5 - Realizar uma análise de macrodureza na superfície de saída dos insertos, e na superfície oposta a esta, para verificar se existe dispersão de dureza entre ambas. Comparar esses resultados com os verificados por Santos (1999), que constatou uma variação de dureza entre as superfícies que compõem a cunha de um bits;

6 – Coordenar a produção de um lote destes insertos para “teste em campo”, sendo esta realizada pela indústria HURTH-Infer;

7 - Testar alguns destes insertos do lote, escolhidos aleatoriamente, para confirmar o sucesso da sinterização, tratamento térmico e da afiação.

CAPÍTULO 3

O AÇO RÁPIDO AISI T15 E ASPECTOS GERAIS DA METALURGIA DO PÓ

3.1 – Características do Aço Rápido AISI T15

Em aços rápidos empregados na fabricação de ferramentas, o tungstênio é um elemento de liga muito importante. Os aços ao tungstênio são designados pela letra "T". Sua principal função é conferir dureza a quente, característica essa que faz do aço rápido um material muito empregado na fabricação de ferramentas de usinagem.

O tungstênio forma, juntamente com ferro e carbono, um carboneto complexo M_6C , responsável pela alta resistência ao desgaste do aço rápido. Para esse carboneto se dissolver na austenita é necessário que a temperatura de austenitização ultrapasse os 980 °C. Quando dissolvido, o tungstênio apresenta grande resistência a precipitar-se durante o revenimento. Sua precipitação acontece entre 510 °C e 590 °C e na forma de carboneto W_2C , que é, em grande parte, responsável pela chamada dureza secundária e pela dureza a quente dos aços rápidos. Somente após ultrapassar a temperatura de revenimento de 650 °C é que o tungstênio volta novamente a formar o carboneto estável M_6C (Fe_4W_2C ou Fe_3W_3C) (BAYER; BECHERER, 1989).

Nem todas as pessoas já tiveram a oportunidade de visualizar o arranjo de cristais quando estes formam uma partícula e, por isso, é que são apresentadas as figuras a seguir. A figura 3.1.a ilustra um cristal de tungstênio e, na sequência, figura 3.1.b, pode-se visualizar o arranjo desses cristais, formando uma partícula. Assim, pode-se perceber que os cristais se unem de tal forma que eles ficam entrelaçados, formando uma estrutura consistente, a partícula.

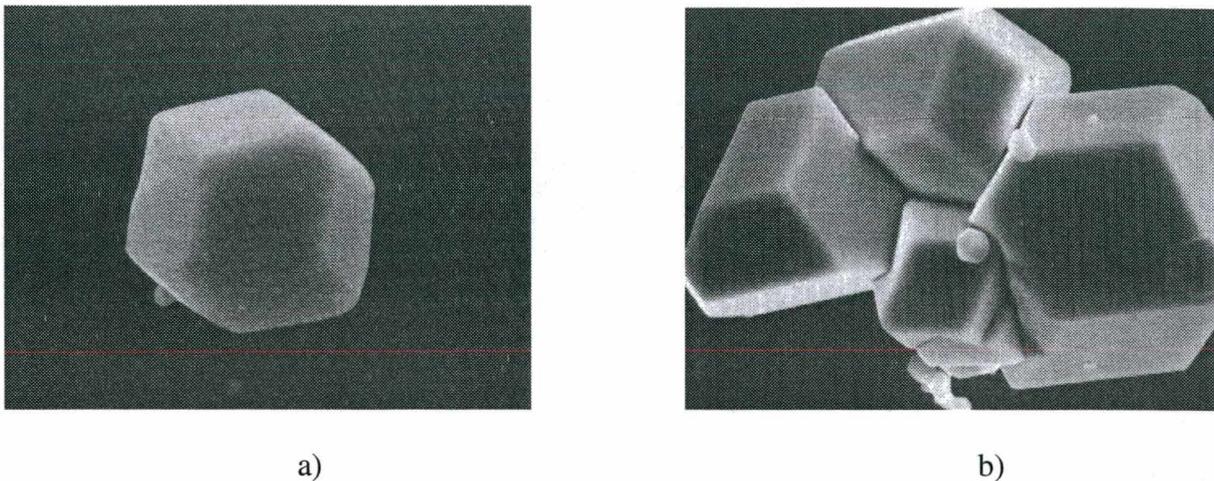


Figura 3.1 – Cristal de tungstênio (a) e uma partícula de tungstênio formada pela união desses cristais (b) (HUPPMANN; DALAL, 1986).

3.2 – A Metalurgia do Pó

Desde o início da década de 70, a metalurgia do pó é utilizada na produção de ferramentas de usinagem de aços rápidos. Os aços rápidos sinterizados encontram lugar de destaque, principalmente pelas vantagens econômicas (ARROYO, 1986), uma vez que as ferramentas obtidas a partir desses materiais têm maior vida útil do que as obtidas a partir de aços rápidos convencionais, o que resulta na redução dos tempos improdutivos em uma indústria, decorrentes de trocas de ferramenta.

O melhor entendimento dos fenômenos que ocorrem durante este processo tem possibilitado o desenvolvimento de novos materiais a partir do pó, a melhoria da qualidade dos materiais normalmente processados por esta técnica, bem como o desenvolvimento da própria tecnologia de processamento (KLEIN, 1987).

Em relação aos processos convencionais de produção de aços, tais como lingotamento e conformação, o processo de metalurgia do pó apresenta as seguintes vantagens (KAR; SAHA; UPADHYAYA, 1993):

- Aumento da tenacidade em serviço;
- Resposta mais rápida ao endurecimento;
- Maior uniformidade microestrutural durante o tratamento a quente;
- Excelente uniformidade de dureza ao longo da seção transversal do material;
- Processamento próximo da forma final do componente;
- Maior facilidade de retificar o material na condição endurecida;
- Ausência de segregações;
- Coalescimento mínimo tanto dos carbonetos quanto da matriz.

Em linhas gerais, na produção dos aços sinterizados devem ser consideradas as seguintes etapas básicas: mistura do pó; compactação e sinterização (SANTOS, 1999). Serão apresentados os dois processos de metalurgia do pó utilizados para produzir os materiais empregados nesta pesquisa, sendo possível compreender melhor cada uma dessas etapas. Antes disso, compete conceituar o fenômeno de sinterização propriamente dito.

Sinterização é o transporte de matéria, ativada termicamente, em uma massa de pós ou um compactado poroso, resultando na diminuição da superfície específica livre pelo crescimento de contatos entre as partículas, redução do volume e alteração da geometria dos poros (KLEIN, 1999).

Considerando-se aspectos mais práticos, a sinterização é um tratamento térmico de uma massa de pós (compactada ou não), visando alterar suas propriedades e eliminar os poros. Neste tratamento controlam-se os seguintes parâmetros (KLEIN, 1999):

- Velocidade de aquecimento e resfriamento;
- Tempo de permanência e temperatura;
- Atmosfera do forno.

A sinterização pode ser dividida em três etapas:

1- Formação de contatos: consiste na formação de pescoços (“necks”) entre as partículas, figura 3.2.a e figura 3.2.b, onde há continuidade da matéria. Neste estágio ainda não há uma contração significativa da amostra.

2- Estágio intermediário, onde há um maior contato entre as partículas, acompanhado de um crescimento de grão, alterando a forma, e da conseqüente diminuição dos poros, figura 3.2.c. Com a continuação da sinterização o material se contrai e se torna cada vez mais denso.

3- No estágio final há um arredondamento dos poros, figura 3.2.d. A densificação pode atingir valores próximos à densidade teórica do material e é perceptível o crescimento do grão.

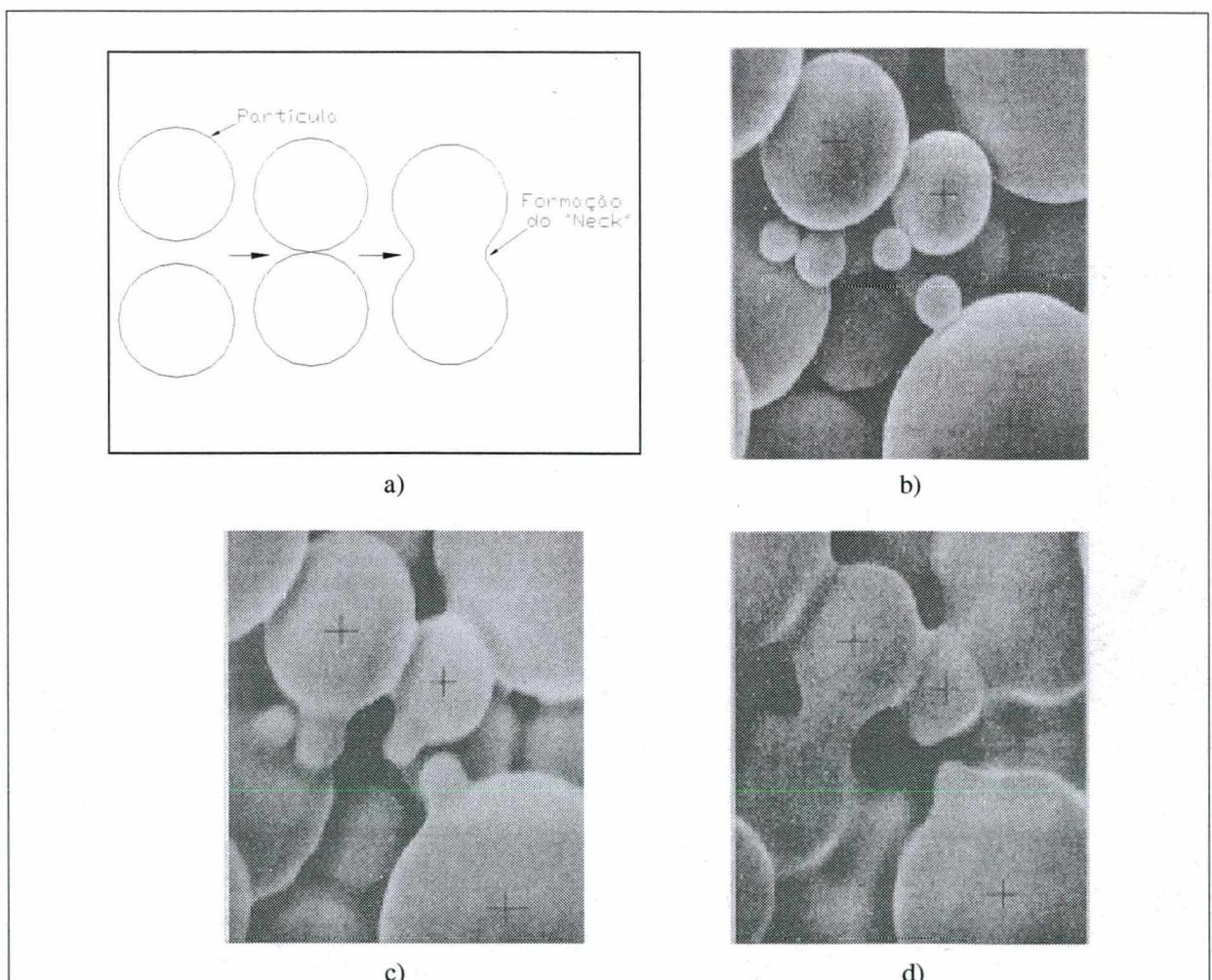


Figura 3.2 - Etapas da sinterização (VAN VLACK, 1984).

3.2.1 - Métodos de fabricação de aços rápidos empregando M/P (Metalurgia do Pó)

A seguir, são apresentados dois métodos de fabricação de aços rápidos que empregam técnicas de metalurgia do pó, quais sejam, a Prensagem Isostática a Quente (HIP) e a Sinterização em Fase Líquida, esta última também conhecida como sinterização a vácuo (SV). As características microestruturais provenientes de cada um desses métodos podem ser observadas no trabalho realizado por Ambrózio (AMBRÓZIO et. al, 1996), no qual foram estudados corpos-de-prova de aço rápido AISI T15 obtidos por essas duas técnicas, sendo constatado que:

- Ambos contêm carbonetos do tipo MC e M_6C , envolvidos por uma matriz martensítica revenida;
- Existe uma diferença significativa no que diz respeito ao tamanho dos carbonetos, sendo maiores os provenientes do processo de SV;
- Porosidade residual foi observada somente nas amostras SV;
- Os carbonetos maiores do tipo MC, devido à sua baixa solubilidade na austenitização, apresentam porcentagens superiores aos carbonetos do tipo M_6C ;
- As amostras do aço rápido T15 HIP, após temperadas e revenidas nas mesmas temperaturas empregadas para o aço rápido T15 SV, apresentaram maior tenacidade;

a) Prensagem Isostática a Quente (HIP)

Nesta técnica de metalurgia do pó são empregados pós de aço rápido atomizados com gás inerte e prensados isostaticamente a quente, em temperatura e pressão da ordem de 1100 °C e

100 MPa. A microestrutura do aço proveniente dessa técnica é mais refinada, apresentando carbonetos pequenos ($\leq 3 \mu\text{m}$) e arredondados (AMBRÓZIO et. al, 1996). A figura 3.3 mostra o aspecto do pó de aço rápido atomizado a gás, onde as partículas são regulares e em forma de esfera.

A figura 3.4 mostra um esquema de como é realizado o processo de prensagem isostática a quente (HIP) de aços rápidos. Primeiramente, o aço rápido é fundido em um forno de alta frequência para em seguida ser despejado em um reservatório onde é pressurizado por um gás inerte (N_2). A alta pressão em que o gás se encontra provoca a atomização do material, o qual é transformado em pó de formato esférico com baixo teor de oxigênio. Este pó então é colocado dentro de um reservatório, o qual deve ter as seguintes características: compatibilidade com o pó e com a cerâmica da cápsula-suporte que se encontra dentro do vaso HIP; capacidade de deformação na temperatura utilizada no processo HIP; soldabilidade e resistência à oxidação quando inserido no vaso HIP em alta temperatura (KOIZUMI; NISHIHARA, 1991).

Depois que o pó está bem empacotado no reservatório, este é tampado e evacuado (o ar é retirado por um tubo acoplado à tampa) ao mesmo tempo que o pó é aquecido até uma temperatura em torno de 300-500 °C para a remoção de gases que foram absorvidos em etapas anteriores. Após o reservatório estar completamente fechado e seguro de que não haverá nenhum vazamento, ele é colocado dentro do equipamento de prensagem isostática a quente, que é o local onde ocorre a sinterização propriamente dita (KOIZUMI; NISHIHARA, 1991).

O motivo de se assegurar que o reservatório não tenha riscos de vazamento se deve ao fato do processo de sinterização ser realizado sob o efeito de um gás a alta pressão, o qual pode entrar na cápsula e, mesmo que o material seja completamente sinterizado e densificado posteriormente, podem ser formados poros, os quais podem alterar as propriedades mecânicas do material, principalmente após um tratamento térmico subsequente.

Após sinterizado, o lingote produzido então pode ser usado se já se encontrar na forma desejada, ou pode sofrer um posterior processo de transformação que levará à forma final desejada (KOIZUMI; NISHIHARA, 1991).

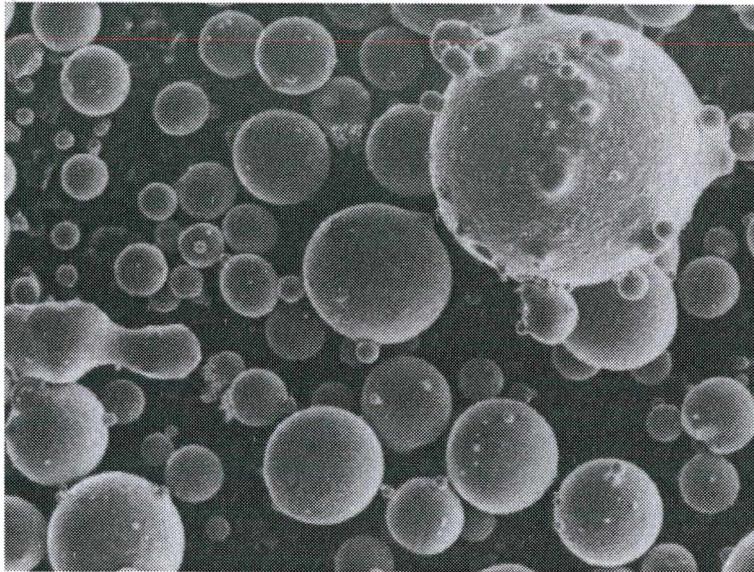


Figura 3.3 - Pó de aço rápido T15 atomizado a gás, SEM, 300x (HUPPMANN; DALAL, 1986).

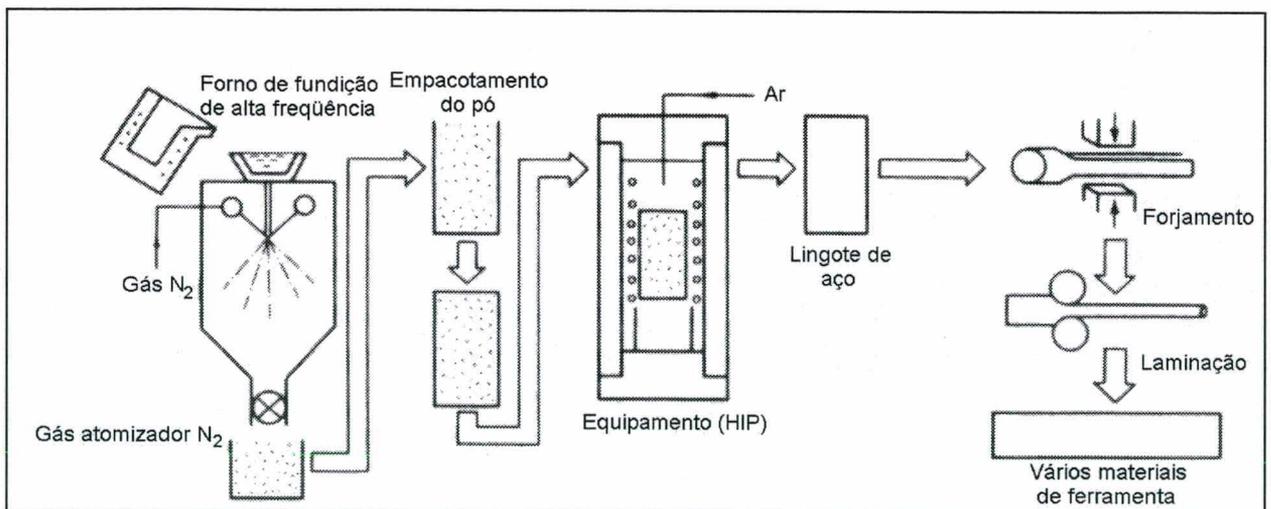


Figura 3.4 - Esquema do processo de prensagem isostática a quente (KOIZUMI; NISHIHARA, 1991).

b) Sinterização em Fase Líquida (SV)

Na sinterização em fase líquida os pós são atomizados a água e compactados em prensas uniaxiais ou isostáticas e, posteriormente, sinterizados sob vácuo ou atmosfera protetora, nas temperaturas da ordem de $(1260 \pm 15) \text{ }^\circ\text{C}$, onde ocorre a formação da fase líquida. Já a microestrutura do aço proveniente dessa técnica é mais grosseira em relação à prensagem isostática a quente, apresentando carbonetos maiores ($\leq 10 \text{ }\mu\text{m}$) e irregulares (AMBRÓZIO et. al, 1996). A figura 3.5 mostra o aspecto do pó de aço rápido atomizado a água, onde as partículas são irregulares em relação ao pó atomizado a gás (figura 3.3).

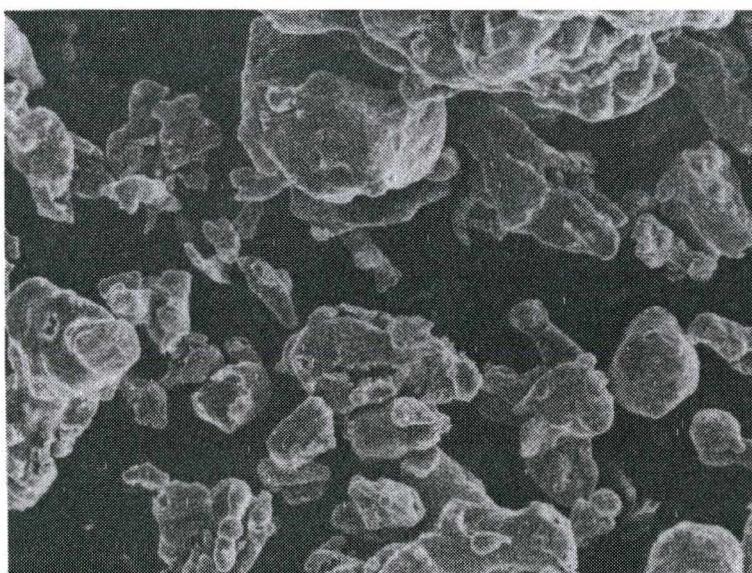


Figura 3.5 - Pó de aço rápido T15 atomizado a água, SEM, 300x (HUPPMANN; DALAL, 1986)

3.3 – Tratamentos Térmicos dos Aços Rápidos

Para as ferramentas de aços rápidos sinterizados empregam-se os mesmos tratamentos térmicos básicos que são realizados em ferramentas de aços rápidos convencionais, porém, os resultados obtidos, no que tange as propriedades mecânicas, são melhores. Isto ocorre porque

respondem mais rapidamente ao tratamento térmico devido a uma microestrutura mais uniforme e com carbonetos menores, decorrentes do próprio processo de sinterização (KAWAI E TAKIGAWA, 1981).

Para efetuar as mudanças microestruturais necessárias para que os aços rápidos tenham propriedades mecânicas adequadas para serem empregados como ferramentas de usinagem, quatro tratamentos térmicos são realizados na seguinte ordem: pré-aquecimento, têmpera, resfriamento, revenimento ou triplo revenimento.

Neste trabalho não se faz necessária a revisão dos conceitos de cada um desses tratamentos térmicos porque os mesmos já foram foco de diversos outros trabalhos, sendo fácil encontrar referências sobre o assunto. Em especial o trabalho realizado por Santos (1999), que enfoca esses tratamentos quando aplicados nos aços rápidos.

CAPÍTULO 4

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA, ÂNGULOS E QUEBRA-CAVACOS, NA VIDA DA FERRAMENTA

Em todos os processos de usinagem, as características dos mesmos, tal como formação e saída do cavaco, força de corte, desgaste da ferramenta e o resultado da usinagem, são influenciados consideravelmente pela geometria da ferramenta. Assim, essa geometria deve ser adaptada às condições em que se realiza a usinagem, por exemplo, se o material da peça a ser usinado é dúctil ou frágil, se o material da ferramenta é tenaz ou frágil porém resistente ao desgaste, se a máquina-ferramenta é rígida ou se possui folgas pelo uso, entre outros.

Além da geometria, o sucesso do emprego de uma determinada ferramenta na usinagem depende do processo de obtenção do material utilizado para fabricá-la. Outros fatores também são determinantes, tais como: refrigeração (se for o caso), emprego adequado; e o acabamento nas superfícies de incidência e na face da ferramenta.

No capítulo 3 tratou-se dos processos de obtenção do material. Nesse abordar-se-à a influência da geometria da ferramenta sobre sua vida, e no quinto capítulo serão abordados os desgastes que comumente ocorrem em ferramentas de usinagem, abrangendo, assim, os principais conceitos necessários para o entendimento da parte experimental do presente trabalho.

No item 4.1 do presente capítulo são apresentados os conceitos dos principais ângulos de uma ferramenta de corte, bem como os resultados que outros pesquisadores obtiveram com o estudo da influência desses ângulos na vida de ferramentas de aço rápido. Finalizando, o item 4.2 é referente às dimensões de um quebra-cavacos, além de mostrar de que forma este atua sobre a vida de uma ferramenta de corte.

4.1 – Principais Ângulos

Os conceitos dos ângulos mais importantes para o presente trabalho são:

O ângulo de direção do gume χ_r - uma diminuição desse ângulo diminui a espessura de corte "h" e ao mesmo tempo proporciona um aumento da largura de corte "b", considerando a mesma profundidade de corte. Com isso, a vida da ferramenta aumenta, pois resulta numa melhor distribuição da temperatura de corte num trecho da ferramenta "b" maior (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999).

O ângulo de direção do gume secundário χ_r' - o valor desse ângulo deve ser no mínimo igual a 2° , para diminuir o atrito entre o gume secundário e a superfície da peça.

O ângulo de saída γ_o - quanto maior esse ângulo menores serão a deformação do cavaco, a temperatura e a pressão específica de corte. Ferramentas chamadas de geometria positiva têm ângulos efetivos bem positivos, pois além dos ângulos positivos gerados pelo porta-ferramenta, tem-se os ângulos formados pelo quebra-cavacos (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999). Este ângulo também influi no desgaste da ferramenta, existindo um valor adequado para cada tipo de material a usar.

O ângulo de incidência α_o - o crescimento desse ângulo diminui o desgaste frontal, ou seja, desgaste no flanco da ferramenta, porque reduz a área de atrito entre a ferramenta e a peça, principalmente para valores de " α_o " menores que 5° . Por outro lado, seu crescimento também enfraquece a cunha de corte. Por isso, é recomendada a utilização dos menores valores possíveis para esse ângulo, em torno dos 5° , dependendo do tipo de material a usar.

KANKAANPÄÄ e KORHONEN (1986) estudaram a influência do ângulo de saída γ_0 e do ângulo de incidência α_0 , no desgaste de insertos de aço rápido sem revestimento e no desgaste de insertos de aço rápido com revestimento de nitreto de titânio (TiN). Através de ensaios de torneamento, baseados na norma ISO 3685, e na usinagem do material OVAKO MoCN 206M (AISI 8620) com dureza de 170 HB, estes pesquisadores concluíram que pequenas alterações nesses ângulos têm grande influência no desgaste dessas ferramentas. Um aumento no ângulo de saída de 5° para 6° proporcionou um aumento de 40% na vida da ferramenta sem revestimento e de 200% na vida da ferramenta revestida com TiN.

A tabela 4.1 traz um resumo dos ângulos e dos parâmetros de usinagem empregados por estes pesquisadores.

Tabela 4.1 - Geometria de corte e condições de usinagem.

	Geometria I	Geometria II
Ângulo de direção do gume	75°	75°
Ângulo de saída	5°	6°
Ângulo de incidência	6°	5°
Raio de quina	0,8 mm	0,8 mm
Velocidade de corte	1,12 m/s	1,12 m/s
Avanço	0,25 mm	0,25 mm
Profundidade de corte	2,5 mm	2,5 mm

Essas conclusões reforçam os resultados obtidos na presente pesquisa, e que serão apresentados no capítulo 7, onde constatou-se que pequenas alterações no ângulo de incidência melhoraram consideravelmente o desempenho dos insertos, os quais foram utilizados com o mesmo ângulo de direção do gume, de 75° , que os referidos pesquisadores empregaram.

4.2 – Quebra-Cavacos

Com ferramentas de aço rápido, o emprego de ângulos convenientes pode determinar formas de cavacos e sentidos de saída adequados, de modo que, normalmente, o controle dos cavacos não apresenta maior problema (STEMMER, 1995).

A situação se torna efetivamente séria na usinagem de materiais dúcteis com ferramentas de metal duro ou cerâmica, em que se usam velocidades de corte superiores a 90 m/min. Nestas condições, o operador não tem mais tempo de controlar os cavacos com segurança. É necessário um método auxiliar para quebrar cavacos em pedaços pequenos, que caíam facilmente em uma bacia coletora. Este método consiste em forçar um dobramento além do limite de resistência do material, provocando a ruptura dos cavacos (STEMMER, 1995).

Os três fatores a considerar em um quebra-cavacos de obstrução integrado na própria ferramenta são (STEMMER, 1995), figura 4.1:

- Distância do quebra-cavacos l_{Bn} – Se for muito pequena, o cavaco vai sair dobrado excessivamente: o cavaco quebra muito miúdo, mas a força e a potência de corte aumentam. A pressão excessiva contra o cavaco solicita fortemente o gume, que pode lascas e quebrar. Se essa distância for muito grande o dobramento do cavaco resulta insuficiente para quebrá-lo. A distância correta do quebra-cavacos depende do avanço, profundidade de corte e do tipo de material a usar. A tabela 4.2 dá uma orientação dessa distância em função do avanço e profundidade de corte;
- Altura h_B – Deve ser suficiente para que o cavaco seja dobrado até a ruptura, pela obstrução. Altura excessiva provoca um enrolamento muito apertado do cavaco. Como regra, pode-se fixar a altura nos seguintes valores: 10% da distância do quebra-cavacos quando se usinam materiais com elasticidade média, tais como todos os aços carbono até uma resistência à tração de 600 N/mm²; 20% da distância do quebra-

cavacos para materiais de alta elasticidade, tais como aços carbono com teor superior a 0,5% de carbono e resistência à tração superior a 600 N/mm^2 . No caso de avanços inferiores a 0,25 mm, usam-se maiores alturas para a obstrução do quebra-cavacos, 30 a 40% da distância, em virtude da maior dificuldade de quebrar cavacos finos.

- Raio de concordância r_B – A face ativa do quebra-cavacos deve ter um raio de concordância adequado com a face da ferramenta. Um canto vivo impede o escoamento do cavaco, que tranca na face ativa e provoca grandes esforços com quebra de partes da ferramenta. Um raio muito amplo faz com que o cavaco seja dobrado de modo insuficiente, não assegurando a sua ruptura.

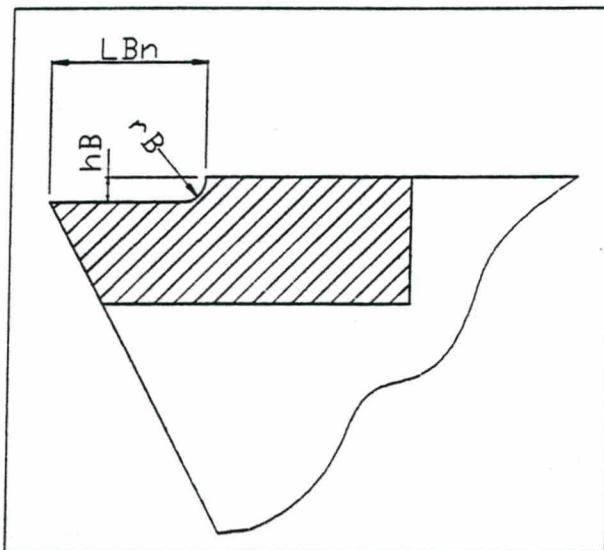


Figura 4.1 – Vista de frente do rebaixo do quebra-cavacos (STEMMER, 1995).

A figura 4.2 ilustra o dobramento do cavaco em função da concordância do quebra-cavacos com a face: as figuras 4.2(1) e 4.2(2) mostram os raios de concordância corretos. No primeiro, o cavaco enrola facilmente e no segundo o cavaco enrola com diâmetro apropriado. Nas figuras 4.2(3) e 4.2(4) pode-se observar que onde tem canto vivo o cavaco bate contra o ressalto, podendo flambar e fraturar a ferramenta. A figura 4.2(5) mostra que um ressalto com

raio muito grande gera cavacos com diâmetro excessivo, o que não é desejado durante a usinagem.

Tabela 4.2 – Dimensões recomendadas para quebra-cavacos paralelos e angulares. Valores em mm (STEMMER, 1995).

Profundidade de corte	Avanço f	0,15 – 0,30	0,31 – 0,44	0,45 – 0,64	0,65 – 1,0	>1
	Raio r _B	0,25 – 0,65	0,8 – 1,6	0,8 – 1,6	0,6 – 1,6	0,8 – 1,6
	Altura h _B	0,25	0,4	0,5	0,75	0,75
0,4 - 1,4	Distância l _{Bn}	1,6	2,0	2,8	3,2	-
1,5 - 6,5		2,4	3,2	4,0	4,8	4,8
6,6 - 13		3,2	4,0	4,8	4,8	4,8
13,1 - 20		4,0	4,8	4,8	5,6	5,6
>20		4,8	4,8	5,6	6,0	6,3

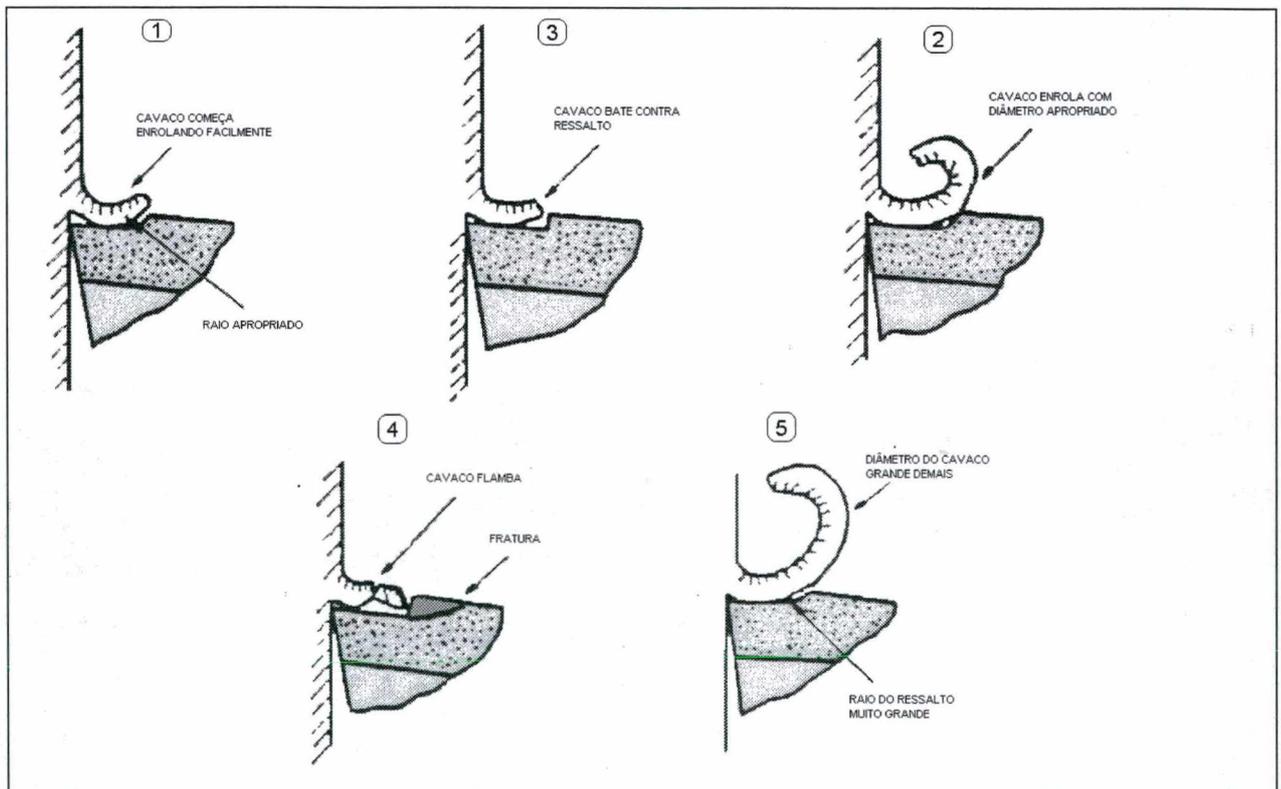


Figura 4.2 – Formas de escoamento do cavaco em função da concordância do quebra-cavacos (STEMMER, 1995).

As informações contidas neste capítulo vêm a facilitar a compreensão das alterações que foram realizadas tanto nos ângulos quanto no quebra-cavacos dos insertos desenvolvidos na presente pesquisa (capítulo 7).

Através do presente capítulo foi possível tomar como referência, para o desenvolvimento dos insertos de aço rápido sinterizado proposto nesta pesquisa, alguns valores para os ângulos da ferramenta e para as principais dimensões de seu quebra-cavacos. A seleção desses valores foi em função dos parâmetros de corte empregados na presente pesquisa e serviram como valores de referência, um ponto de partida de forma embasada na literatura, o que resultou em um menor número de ensaios, reduzindo o tempo despendido para a execução da parte experimental da presente pesquisa bem como na redução dos custos. Para a obtenção dos valores obtidos na tabela 4.2 considerou-se uma profundidade de corte de 2,0 mm e avanço entre 0,31 mm e 0,44 mm:

- Ângulo de incidência do inserto montado no suporte, de 7 a 8°;
- Profundidade do quebra-cavacos de 0,4 mm (tabela 4.2);
- Largura do quebra-cavacos superior a 3 mm (tabela 4.2);

CAPÍTULO 5

DESGASTE DE FERRAMENTAS

A seguir, são apresentados os dois principais tipos de desgastes que comumente ocorrem em ferramentas de usinagem, desgaste de flanco e desgaste de cratera, além dos mecanismos de desgaste que atuam nessas ferramentas. No capítulo anterior mostrou-se que pequenas alterações em alguns dos ângulos da cunha de uma ferramenta aumentam consideravelmente a vida da mesma, ou seja, atenuam esses desgastes. Portanto, o entendimento da influência desses ângulos sobre o comportamento das ferramentas é importante para o entendimento do capítulo 7 deste trabalho, no qual trabalhou-se com os principais ângulos, tais como ângulo de direção do gume χ_r , ângulo de direção do gume secundário χ_r' , ângulo de saída γ_o e ângulo de incidência α_o .

5.1 - Desgaste de Flanco

É indicado pela faixa desgastada no flanco da ferramenta, como mostra o esquema da figura 5.1. A largura ou a altura da marca de desgaste é que exprime o grau de comprometimento da ferramenta para prosseguir na tarefa de usinagem. Esse desgaste não pode ser evitado, porém, com uma correta escolha das condições de corte e do material da ferramenta pode-se minimizá-lo.

5.2 - Desgaste de Cratera

É a depressão que se forma na face da ferramenta e é causada, em alguns tipos de materiais como por exemplo o aço rápido, pelo atrito do cavaco com esta face, figura 5.1. A

cratera é caracterizada pela sua profundidade KT e pela distância KM medida da posição original do gume até o centro da cratera, figura 5.1. O colapso da ferramenta pode ocorrer tanto devido ao desgaste de cratera quanto pelo desgaste de flanco, ou ainda, pelo efeito combinado de ambos. O desgaste provoca um deslocamento do gume, conforme ilustra a figura 5.1, fato que pode ser reduzido pela especificação correta da ferramenta e das condições de corte. Um valor elevado de KT facilita o lascamento e a quebra da ferramenta (MARCONDES, 1990).

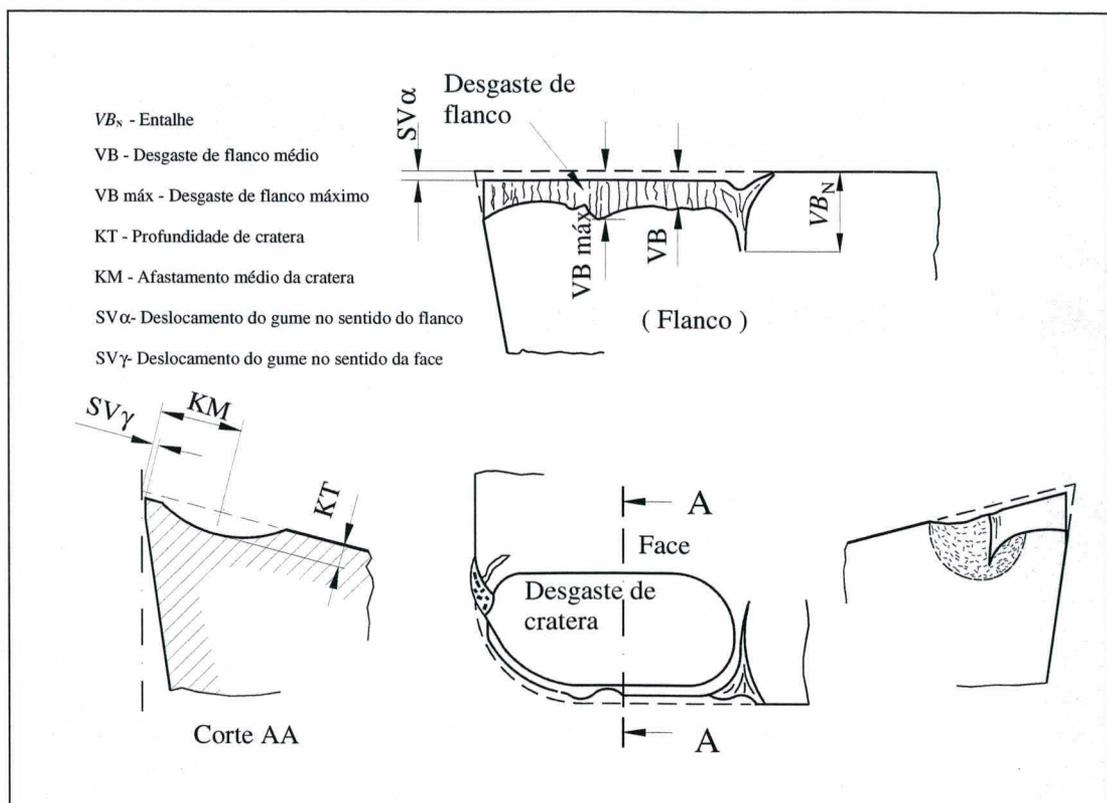


Figura 5.1 - Ferramenta com desgaste no flanco e na face (ISO 3685, 1977).

5.3 – Mecanismos de Desgaste

Os diversos mecanismos de desgaste (figura 5.2) geralmente agem simultaneamente e, por isso, é muito difícil isolá-los durante a usinagem para entender suas causas e seus efeitos.

Esses mecanismos são (KÖNIG, 1981):

- Danificação do gume em decorrência de solicitações mecânicas e térmicas excessivas;

- Adesão (cisalhamento de microsoldagem ou microcaldeamento);
- Difusão;
- Abrasão mecânica;
- Oxidação.

Solicitações mecânicas e térmicas excessivas causam danificações no gume como lascamentos, microquebras, fissuras transversais e fissuras longitudinais, bem como deformação plástica, conforme ilustra a figura 5.3. Lascamentos podem ocorrer em função de forças de corte excessivas, principalmente quando o ângulo de cunha ou o ângulo de quina da ferramenta são muito pequenos ou, ainda, quando o material da ferramenta é muito frágil. O corte interrompido também pode provocar lascamentos, principalmente na usinagem de materiais tenazes que proporcionam a geração de cavacos que facilmente se soldam (caldeiam) na face da ferramenta. Microlascamentos ou microquebras ocorrem quando o material a ser usinado é duro e contém inclusões não metálicas, gerando solicitações localizadas. As fissuras transversais também são decorrentes da solicitação alternante compressiva oriunda do corte interrompido, no caso o fresamento, por exemplo. As fissuras longitudinais (em forma de pente) são decorrentes de solicitações térmicas alternantes. Deformações plásticas ocorrem quando a ferramenta dispõe de uma resistência à deformação muito pequena, mas tem uma tenacidade suficiente, ou se a temperatura na cunha é tão alta que o material da ferramenta amolece (KÖNIG, 1981).

A abrasão é a remoção de partículas da própria ferramenta que escoam pelo seu flanco em decorrência de forças externas. O material da peça a ser usinada também pode provocar o desgaste abrasivo, desde que o mesmo seja composto por partículas duras que se tornam abrasivas quando em contato com o material da ferramenta.

A ruptura de microcaldeamentos também podem gerar um desgaste abrasivo tanto no flanco como na face da ferramenta. Esses caldeamentos se formam em função da ação de forças

elevadas ou devido a interação das superfícies inferiores do cavaco e face da ferramenta, que estão livres de óxidos e se formam com soldagem por adesão.

A difusão é a solubilidade mútua de materiais, ou seja, da peça que está sendo usinada para o material da ferramenta e vice-versa. Pode ocorrer a difusão do ferro para o ligante cobalto do metal duro, difusão do cobalto para o aço, onde o ferro e cobalto podem mutuamente se dissolver integralmente formando cristais mistos, e a dissolução de carbonetos de tungstênio, formando cristais mistos e duplos na forma de $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, $(\text{FeW})_6$ e $(\text{FeW})_{23}\text{C}_6$.

Outro mecanismo de desgaste é a oxidação. Após a usinagem, muitas ferramentas apresentam cores de revenimento próximas a região de contato que são provocadas pela oxidação. A oxidação depende do material da ferramenta e da temperatura gerada durante a usinagem. Para os aços rápidos a oxidação praticamente não tem importância, pois a sua resistência a quente é ultrapassada antes que ocorra uma oxidação expressiva. A ação destrutiva da oxidação sobre o metal duro a base de carboneto de tungstênio é em decorrência da temperatura elevada e da ação do oxigênio do ar, formando um filme de óxido.

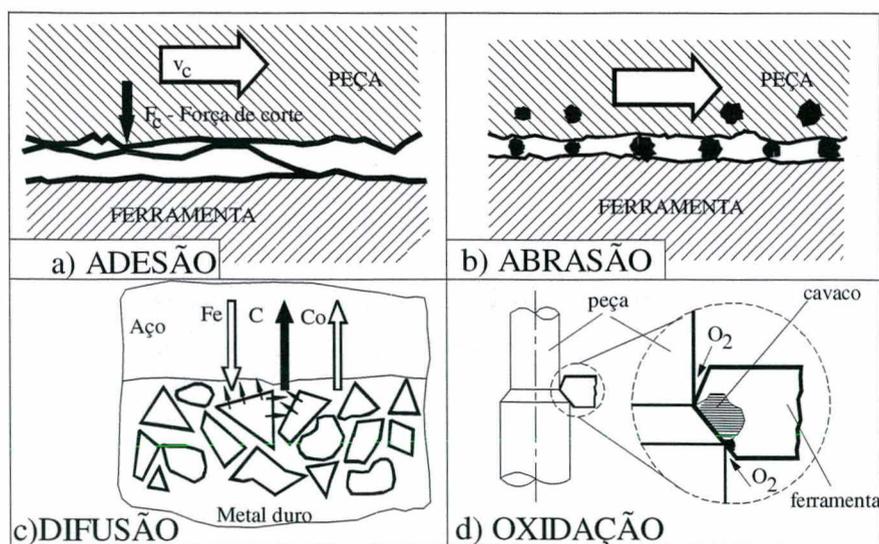


Figura 5.2 - Mecanismos de desgaste que atuam em ferramentas de usinagem (KÖNIG, 1981; SANDVIK, 1994).

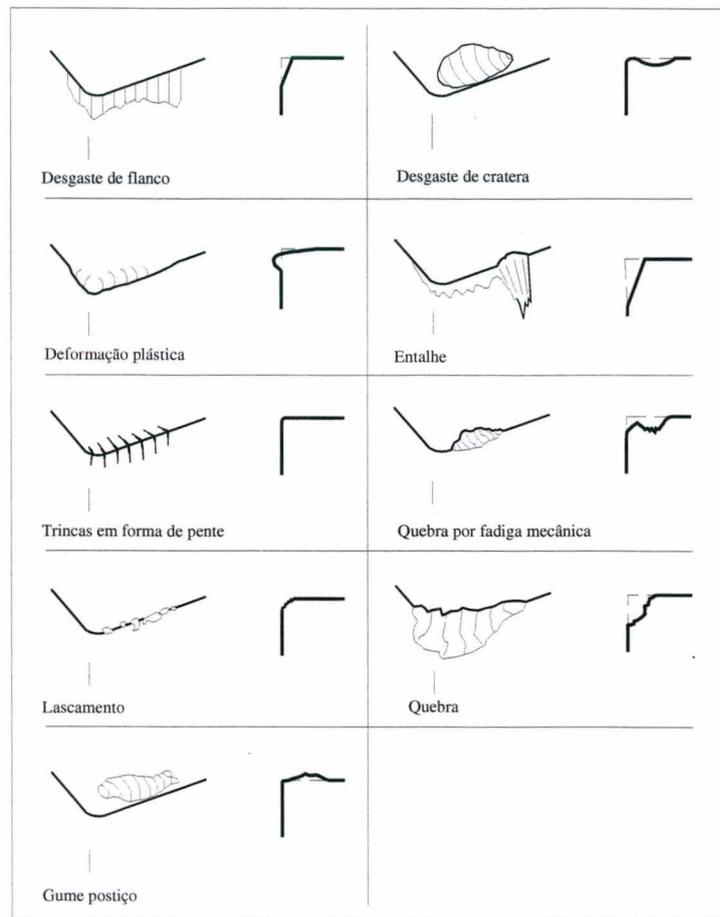


Figura 5.3 - Avarias que ocorrem em ferramentas de corte (KÖNIG, 1981).

CAPÍTULO 6

METODOLOGIA APLICADA NO PRESENTE TRABALHO

A presente pesquisa tem grande importância para o domínio da técnica de sinterização a vácuo empregada na fabricação de ferramentas de usinagem no Brasil, pois até o presente momento não se tem conhecimento da existência de algum outro trabalho dessa natureza desenvolvido nesse país. Portanto, os resultados de usinagem aqui obtidos servem como referência para futuros trabalhos sobre a fabricação de ferramentas de aço rápido utilizando metalurgia do pó.

A seguir, serão descritos os procedimentos utilizados na execução da presente pesquisa. Deve-se salientar que cada equipe participante do projeto, citada no capítulo 1, foi responsável por uma determinada etapa, o que facilitou a disponibilidade de equipamentos. O anexo 2 traz informações sobre os equipamentos disponibilizados nos laboratórios de Engenharia Mecânica da UFSC. As ferramentas empregadas na presente pesquisa são as seguintes:

- Insertos fabricados a partir de barras comerciais (importadas) do aço rápido T15 sinterizado (HIP);
- Insertos de aço rápido T15 sinterizados a vácuo nas dependências do IPEN.

Além dos resultados obtidos com os ensaios dessas ferramentas, utilizou-se os resultados obtidos por Santos (1999) no emprego das seguintes ferramentas:

- Bits de aço rápido T15 sinterizado (HIP) comercial;
- Bits de aço rápido VK10E, 10% de cobalto, comercial;

As informações obtidas por Santos (1999) serviram como referência para o desenvolvimento dos insertos de aço rápido sinterizados a vácuo (SV).

6.1 – Sobre os Insertos

O IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo) foi responsável pela sinterização a vácuo dos insertos de aço rápido T15, corte das barras comerciais de aço rápido T15 prensado isostaticamente a quente (HIP) e caracterização das microestruturas desses materiais. O tratamento térmico e parte das afiações foram realizados pela empresa HURTH-Infer, localizada em Sorocaba, São Paulo. As afiações iniciais, medições de dureza Vickers, documentação no MEV (microscópio eletrônico de varredura) e os ensaios de usinagem foram realizados no Usicon e no laboratório de materiais LabMAT, ambos da UFSC.

Os insertos de aço rápido T15 prensado isostaticamente a quente (HIP) foram produzidos a partir de barras comerciais desse material. Essas barras foram cortadas com uma espessura próxima àquela com que esses insertos ficaram após a afiação. Para identificá-los nesta pesquisa, adotou-se as iniciais “TC” de T15 Comercial.

Os sinterizados a vácuo foram produzidos a partir do pó de aço rápido T15 e foram designados pelas iniciais “TSV” de T15 Sinterizado a Vácuo.

Após as etapas anteriormente citadas, os insertos eram encaminhados para o tratamento térmico e pré-usinagem, realizados na HURTH-Infer.

Todos os insertos e bits utilizados nesta pesquisa foram temperados e revenidos no mesmo ambiente, ou seja, forno e banho.

As composições nominais das ligas utilizadas são mostradas na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Composições das ligas de aço rápido T15 utilizadas.

Materiais dos Insertos	Designação	Composição Química (%)							
		C	Cr	V	W	Mn	Mo	Co	Si
T15 comercial	TC	1,55	4,0	5,0	12,25	0,3	-	5,0	0,3
T15 sinterizado a vácuo (IPEN)	TSV	1,55	4,0	5,0	12,25	0,3	-	5,0	0,3

Estes insertos foram produzidos com uma geometria semelhante à dos insertos de metal duro para torneamento geral SANDVIK SPGN 09 03 08 (SANDVIK, 1995), conforme ilustra a figura 6.1. Sabe-se, todavia, que a geometria de uma ferramenta de metal duro não condiz com a geometria que deve ser empregada em ferramentas de aço rápido.

Estes insertos foram produzidos nesta forma porque a empresa SANDVIK Coromant cedeu a matriz para produzi-los. Esta parceria foi necessária para a realização do estudo inicial sobre esse aço rápido sinterizado a vácuo na forma de ferramenta de usinagem, uma vez que o custo de desenvolvimento e fabricação de uma matriz é elevado.

Além disto, não se tem conhecimento de quem esteja produzindo insertos de aço rápido sinterizado, ou seja, não existe matriz com a geometria ideal para tal, sendo o desenvolvimento desta uma das pretensões futuras desse grupo de pesquisa.

A figura 6.1 ilustra as dimensões e ângulos dos insertos após sinterizados, e que serviram de marco inicial para a realização da presente pesquisa.

Com base em pesquisas que o IPEN vêm realizando há anos, foi realizado o tratamento térmico em três diferentes combinações de temperaturas de têmpera e revenimento, quais sejam:

- a) Têmpera a 1210°C e revenimento a 540°C;
- b) Têmpera a 1210°C e revenimento a 560°C;
- c) Têmpera a 1160°C e revenimento a 540°C.

Os pesquisadores pertencentes ao IPEN, no decorrer dos últimos anos, têm investigado qual a combinação de temperaturas de têmpera e revenimento que gera melhores resultados (maiores tempos de vida) à ferramenta e também quais as características microestruturais (tamanho de grão, distribuição e tamanho de carbonetos, etc.) obtidas com cada uma dessas combinações. Portanto, foram produzidos insertos sob cada condição, conforme mostra a tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Designação dos insertos.

Material	Temperatura de têmpera [°C]	Temperatura de revenimento [°C]	Designação
T15 comercial HIP (TC)	1210	540	TC45
			TC47
	1210	560	TC74
			TC75
	1160	540	TC19
			TC21
T15 sinterizado a vácuo – IPEN (TSV)	1210	540	TSV52
			TSV54
	1210	560	TSV80
			TSV81
			TSV82
	1160	540	TSV26
			TSV27

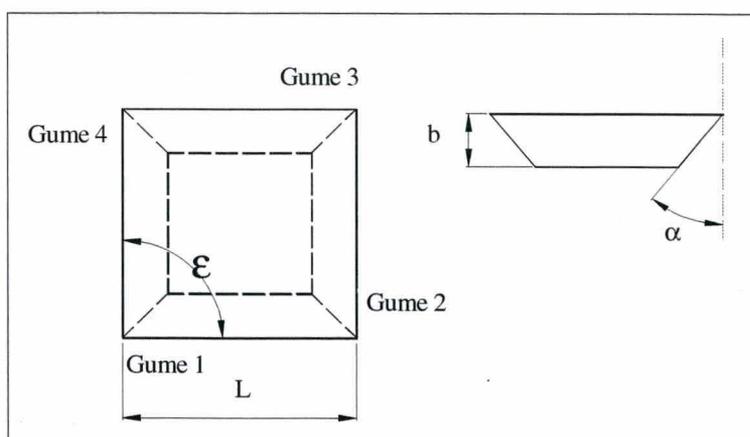


Figura 6.1 – Geometria inicial dos insertos.

Onde, $L = 12,7 \text{ mm}$, $b = 4,8 \text{ mm}$, $\alpha = 11^\circ$ e $\varepsilon = 90^\circ$

6.2 – Medição da Dureza dos Insertos

Foram realizadas 12 medições de dureza em cada inserto, sendo 6 na face (superfície de saída) e 6 na superfície oposta a esta (base). Optou-se por realizar as medições em duas regiões distintas de cada ferramenta com o intuito de avaliar a influência, sobre a dureza, do

aquecimento gerado na afiação, em que o rebolo em alta velocidade de corte entra em contato com a superfície do inserto.

Este número de medições foi escolhido tendo em vista uma recomendação da norma ASTM E 92 (1977), a qual sugere um número de 5 a 10 medições para caracterizar blocos padrão de dureza.

Como parâmetros de medição adotou-se a dureza Vickers, com carga de 30 kgf e tempo de aplicação da carga de 15 s.

Para comparar os valores de dureza entre as regiões de um mesmo inserto, ou mesmo entre duas ferramentas, foi utilizado um método estatístico denominado teste “t” para duas amostras supondo que as variâncias de suas médias sejam iguais, com uma confiabilidade de 95% (MONTGOMERY, 1996).

Os dados técnicos do equipamento utilizado para a medição de dureza encontram-se no anexo 2.

6.3 – Material para os Ensaios de Usinagem

Os materiais usinados foram o aço ABNT 1045 laminado com dureza de 213 HV30 e o aço ABNT 1045 trefilado com dureza de 268 HV30, ambos de mesma composição química. Foram preparados corpos-de-prova com comprimento de 261 mm e diâmetro de 49 mm. A composição química desses materiais foi fornecida pelo fabricante dos mesmos e está indicada na tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Composição química dos corpos-de-prova.

AÇO ABNT 1045	Composição %					
	C	Cr	P	S	Mn	Si
Amostra 1 (trefilado)	0,486	0,016	0,025	0,016	0,792	0,270
Amostra 2 (laminado)	0,436	0,034	0,019	0,022	0,748	0,215

6.4 – Ensaio de Usinagem

A análise do comportamento ao desgaste das ferramentas de usinagem foi realizada através de ensaios de torneamento longitudinal, externo e de longa duração, executados em um torno comandado numericamente, da marca ROMI MAZAK, modelo COSMUS 10U, com potência instalada de 10 kVA. A escolha deste processo se justifica pela sua grande aplicação em escala industrial e, também, por representar uma situação muito próxima do que ocorre dentro das indústrias no que se refere à utilização de insertos intercambiáveis.

Sendo um dos objetivos deste trabalho comparar a resistência ao desgaste dos insertos com a resistência de ferramentas de mesmo material confeccionadas na forma de bits, as condições iniciais de corte dos insertos foram as mesmas empregadas por Santos (1999), o qual ensaiou os bits de aços rápidos, de mesmo material dos insertos, nas seguintes condições: $v_c = 33$ m/min, $a_p = 2,0$ mm e $f = 0,2$ mm.

A cada 5 min de usinagem efetuou-se a medição, em um microscópio de ferramentaria, do desgaste da ferramenta. Os parâmetros de desgaste medidos foram o VB , VB_{max} e VB_N , descritos no capítulo 5. Com essas informações estruturou-se gráficos "tempo de usinagem X desgaste de flanco", os quais possibilitaram a interpretação dos resultados obtidos com os ensaios de usinagem.

Utilizou-se um programa CNC (anexo 3) para a execução desses ensaios, o qual proporcionou os seguintes benefícios:

- Execução da usinagem com velocidade constante, independentemente do diâmetro do corpo-de-prova usinado;
- Facilidade de interromper a usinagem a cada 5 min sem danificar a ferramenta;
- Acompanhamento "on-line" da potência consumida pela máquina;

- Facilidade de alterar os parâmetros de usinagem, quando necessário, durante os ensaios. Por exemplo, se a velocidade de corte de 40 m/min não estava adequada para aquela situação, no mesmo instante interrompia-se o ensaio e alterava-se a velocidade para 33 m/min, ou para uma outra mais adequada. O mesmo era feito com relação à profundidade de corte, reduzindo-se de 2,0 mm para 1,0 mm, ou para um outro valor adequado, isto de forma rápida, sem perda de tempo.

CAPÍTULO 7

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados provenientes da parte experimental do presente trabalho. Esta apresentação está dividida em cinco itens: 7.1; 7.2; 7.3; 7.4 e 7.5. O primeiro refere-se à análise de dureza das ferramentas.

O item 7.2 refere-se ao desenvolvimento da geometria dos insertos, ângulos e quebra-cavacos, com a finalidade de utilizá-los no mínimo com os mesmos parâmetros de corte que Santos (1999) utilizou com os bits de aços rápidos.

O terceiro item refere-se aos resultados obtidos com os insertos já na geometria final, afiados na UFSC. No item 7.2 ainda não havia sido reproduzido os ângulos e quebra-cavacos nos quatro gumes de um mesmo inserto.

O item 7.4 traz uma comparação entre os insertos sinterizados com fase líquida e os bits produzidos a partir de barras de aço rápido prensado isostaticamente a quente, sendo também enfocada a questão da existência de uma combinação adequada entre as temperaturas de têmpera e revenimento que proporciona maior tempo de vida aos insertos. Deve-se lembrar que Santos (1999), verificou que a melhor combinação entre as temperaturas de têmpera e revenimento foi a de 1210/560 °C quando comparada com as combinações de 1160/540 °C e 1210/540 °C, isto para o aço rápido T15 prensado isostaticamente a quente, o qual é um material importado.

O último item refere-se aos resultados obtidos com a avaliação de um lote de insertos em que a empresa HURTH-Infer, além de tratá-los termicamente, realizou a afiação (ângulos e quebra-cavacos) conforme as dimensões apresentadas na figura 7.9.

7.1 - Análise dos Resultados das Medições de Dureza

As durezas médias em cada região das ferramentas, bem como a média entre as duas regiões de cada ferramenta e seu respectivo desvio-padrão são apresentadas na tabela 7.1.

Com os resultados obtidos através das medições de dureza realizadas de acordo com a metodologia descrita no item 6.2, constatou-se que a maioria dos insertos não apresentou uma diferença significativa entre as durezas das duas regiões analisadas, com exceção da ferramenta TSV81. Isto se deve à homogeneidade do material inicial, às pequenas dimensões dos insertos, que dificultam a formação de gradientes térmicos acentuados durante o tratamento térmico, e também porque os mesmos foram cortados ou sinterizados com as dimensões próximas às dimensões finais, restando apenas uma pequena quantidade de material a ser removido por retificação, processo no qual a maior parte do calor gerado é absorvido pela peça.

No gráfico da figura 7.1, pode-se observar que, de um modo geral, o tratamento térmico que permitiu maiores durezas para cada material foi o de têmpera a 1210 °C e revenimento a 540°C, seguido do tratamento de 1210°C e 560°C. Os insertos que apresentaram menores durezas foram os temperados a 1160°C e revenidos a 540°C.

Esse resultado já era esperado, uma vez que a têmpera a 1210°C proporciona uma maior dissolução dos carbonetos e elementos de liga na matriz, tornando-a mais dura. O revenimento a 560°C permite um maior alívio de tensões do que o revenimento a 540°C, reduzindo a dureza do material. Já a têmpera a 1160°C propiciou uma menor dissolução dos carbonetos e elementos de liga na matriz, resultando em um material menos duro, mesmo para um revenimento a 540°C.

Observa-se, ainda, que o material comercial (TC) apresentou dureza maior do que o sinterizado a vácuo pelo IPEN (TSV), para cada condição de tratamento térmico.

Tabela 7.1 - Resultados dos ensaios de dureza.

Material	Têmpera [°C]	Reveni- mento [°C]	Designa- ção	Durezas médias			Desvio padrão (σ)
				Superf. saída	Superf. inferior	Média (μ)	
T15 comercial (TC)	1210	540	TC45	849,2	852,3	850,8	9,85
			TC47	851,2	859,2	855,2	11,90
	1210	560	TC74	841,3	842,5	841,9	12,21
			TC75	841,3	848,0	844,7	16,95
	1160	540	TC19	822,3	811,5	816,9	18,30
			TC21	813,7	814,7	814,2	7,41
T15 sinterizado a vácuo IPEN (TSV)	1210	540	TSV52	834,7	827,2	830,9	10,71
			TSV54	829,5	843,5	836,5	17,52
	1210	560	TSV80	816,7	821,8	819,3	9,25
			TSV81	818,0	793,0	805,5	18,34
			TSV82	808,0	829,83	819,0	10,3
	1160	540	TSV26	799,3	793,0	796,2	12,61
TSV27			810,3	796,0	803,2	13,27	

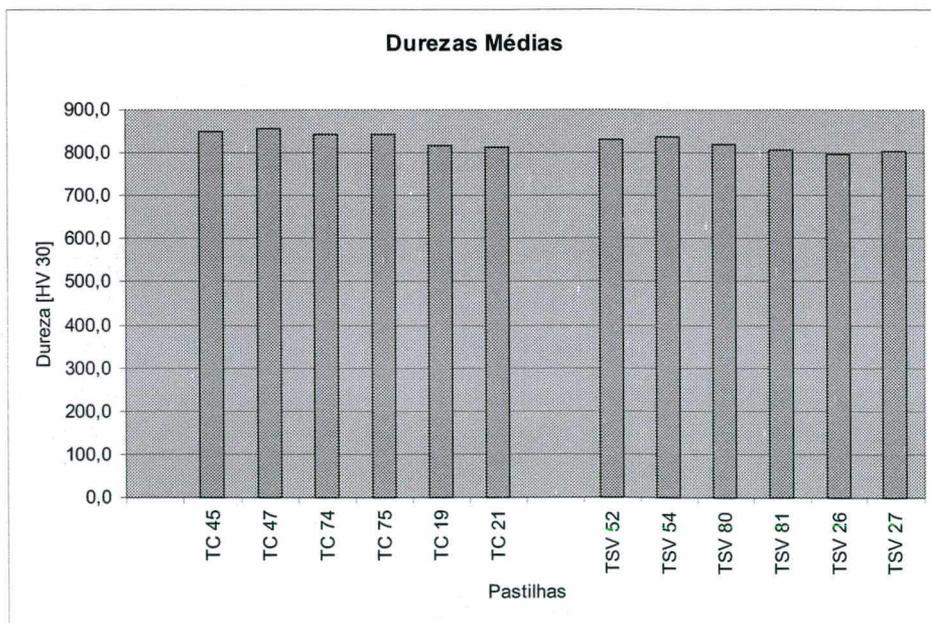


Figura 7.1 - Durezas médias dos insertos.

As considerações referentes a este item são:

- A maioria dos insertos não apresentou diferenças significativas de dureza entre a superfície de saída e a superfície oposta a esta;
- De um modo geral, o tratamento térmico que permitiu maiores durezas para ambos os materiais foi o de têmpera a 1210°C e revenimento a 540°C, seguido do tratamento de 1210°C e 560°C. Os insertos que apresentaram menores durezas foram os temperados a 1160°C e revenidos a 540°C;
- Comparando-se as durezas dos dois materiais T15 observou-se que o material comercial (TC) apresentou dureza maior do que o sinterizado a vácuo pelo IPEN (TSV), para cada condição de tratamento térmico;
- Quanto aos valores de dureza, Santos (1999) constatou a existência de uma dispersão entre as superfícies (face, flanco, base) que compõem a cunha de um bits. Com os insertos, essa dispersão não foi verificada com a mesma intensidade. Os insertos foram sinterizados próximos da dimensão final, o que reduziu a quantidade de material removido por retificação.

7.2 - Desenvolvimento da Geometria dos Insertos, Ângulos e Quebra-Cavacos

Como o comentado no capítulo 6, os insertos foram produzidos com uma geometria semelhante à dos insertos de metal duro para torneamento geral SANDVIK SPGN 09 03 08 (SANDVIK, 1995), conforme ilustra a figura 6.1. A partir desta geometria, iniciaram-se os primeiros ensaios. Após a interpretação dos resultados obtidos com estes primeiros ensaios é que foram realizadas as alterações dos ângulos e quebra-cavacos a fim de otimizar a geometria dos insertos.

O objetivo inicial era conseguir empregar os insertos de aço rápido sinterizados a vácuo e os insertos de aço rápido comercial na usinagem a seco do aço ABNT 1045 trefilado, com velocidade de corte v_c de 33 m/min, profundidade de corte a_p de 2,0 mm e avanço f de 0,2 mm. Utilizando esses mesmos parâmetros de usinagem, Santos (1999), ensaiou todas as suas ferramentas de aço rápido comercial, na forma de bits, sem que nenhuma delas entrasse em colapso rapidamente, o que permitiu a obtenção de um número mínimo de medições de desgaste de flanco com cada uma das ferramentas, suficiente para compará-las.

Porém, conforme é relatado a seguir, o inserto produzido a partir do mesmo aço rápido T15 comercial utilizado na fabricação do bits que apresentou melhor resultado no trabalho de Santos (1999), e com o mesmo tratamento térmico, teve um tempo de vida desprezível com esses parâmetros. Então, iniciou-se uma série de alterações tanto nos parâmetros de usinagem quanto na própria geometria dos insertos até obter uma geometria adequada que suportasse no mínimo os mesmos parâmetros empregados com os bits.

A seguir é descrito o que ocorreu com cada inserto. Esse tratamento individual facilita o entendimento das alterações realizadas a cada passo, até o momento em que foi definida a geometria final desses insertos.

7.2.1 - Aço rápido T15 comercial, TC74, temperado a 1210°C e revenido a 560°C

O inserto, que será analisado a seguir, foi produzido a partir do mesmo material T15 empregado para a produção do bits que proporcionou o melhor resultado no trabalho de Santos, 1999, e também foi tratado termicamente nas mesmas temperaturas, ou seja, temperado e revenido, respectivamente, a 1210 °C e 560 °C. Como Santos (1999) havia obtido bons resultados com esse material, um tempo de vida de 125 minutos na velocidade de corte de 33

m/min, profundidade a_p de 2,0 mm e avanço f de 0,2 mm, esperava-se o mesmo com esse inserto. Porém, isso não aconteceu. Seu primeiro gume não resistiu sob esses parâmetros de usinagem, sendo destruído logo nos primeiros segundos de usinagem.

Com o segundo gume, denominado neste trabalho de TC74-2, baixou-se a profundidade de corte para 1,25 mm, o que possibilitou a usinagem. Mas o resultado não foi satisfatório, uma vez que esta ferramenta deveria ter apresentado o mesmo tempo de vida que o bits, ou seja, os 125 minutos.

Aumentou-se a profundidade de corte para 1,5 mm, mantendo-se constante os demais parâmetros e utilizou-se o terceiro gume dessa ferramenta, denominado de TC74-3. Nessas condições novamente a ferramenta não apresentou o resultado desejado, pois teve um tempo de vida de apenas 3 minutos.

Para o quarto gume desse inserto, denominado TC74-4, na tentativa de melhorar o tempo de usinagem, realizou-se um raio de quina de 1,0 mm, utilizou-se quebra-cavacos posição e aumentou-se o ângulo de incidência de 10° para 20° , a fim de deixá-lo com ângulo de cunha próximo ao dos bits empregados por SANTOS, 1999, que foi de 69° . Finalmente foi possível usinar à profundidade de corte de 2,0 mm e na velocidade de 33 m/min. Esse gume teve uma vida de aproximadamente 15 min, sem interrupção da usinagem para medir o desgaste no flanco, até o momento em que não mais ofereceu condições de usinagem devido à destruição de sua quina. Procedeu-se dessa maneira porque, naquele momento, o interesse maior era verificar a possibilidade de usinar com os mesmos parâmetros de corte empregados com os bits e não acompanhar a evolução do desgaste no flanco da ferramenta. Com isso, verificou-se que alterações na geometria dos insertos, ângulos e quebra-cavacos, melhorariam consideravelmente seus desempenhos, equiparando-os ou até mesmo tornando-os superiores aos bits.

Após a utilização dos quatro gumes desse inserto e com essas constatações, considerando-se também a limitação em termos de insertos disponíveis, optou-se por ensaiar

aquele obtido por sinterização a vácuo, o TSV80. Este foi o primeiro inserto sinterizado nas dependências do IPEN que foi experimentado no presente trabalho. Não se sabia quais os parâmetros de corte que ele iria suportar. Os resultados são apresentados a seguir.

7.2.2 - Aço rápido T15 sinterizado a vácuo, TSV80, temperado a 1210° e revenido a 560°C

Para o primeiro gume desse inserto, denominado de TSV80-1, realizou-se as mesmas alterações anteriormente feitas no inserto TC74-4, além de que os parâmetros também foram os mesmos, porém com uma profundidade de corte a_p de 1,25 mm. Com isso, verificou-se que esse inserto possibilitou a usinagem durante 116 min para um desgaste de flanco VB_N final de 0,77 mm. Portanto, esse inserto, obtido por sinterização a vácuo, processo este ainda em desenvolvimento aqui no Brasil, apresentou um resultado promissor, fato que permitiu trabalhar sua geometria para aumentar ainda mais a profundidade de corte.

Entretanto, antes de alterar sua geometria, ângulos e quebra-cavacos, utilizou-se o segundo gume, denominado de TSV80-2, na profundidade de corte a_p de 2,0 mm. Logo nos primeiros 3 minutos de usinagem essa ferramenta já não apresentava condições de corte e entrou em colapso.

Para o terceiro, denominado de TSV80-3, realizou-se um rebaixo paralelamente ao gume secundário, na superfície de saída, e conseguiu-se usinar na profundidade de corte a_p de 1,5 mm. Logo em seguida aumentou-se a profundidade de corte para 2,0 mm e a ferramenta entrou em colapso nos primeiros minutos de usinagem, quando sua quina foi destruída, figura 7.2.

No quarto gume, denominado de TSV80-4, realizou-se um novo rebaixo com geometria diferente da realizada no terceiro gume e paralelo ao gume principal. Assim, foi possível usinar na profundidade de corte a_p de 1,5 mm durante 30 minutos, momento em que o desgaste de flanco VB_N atingiu o valor de 0,97 mm.

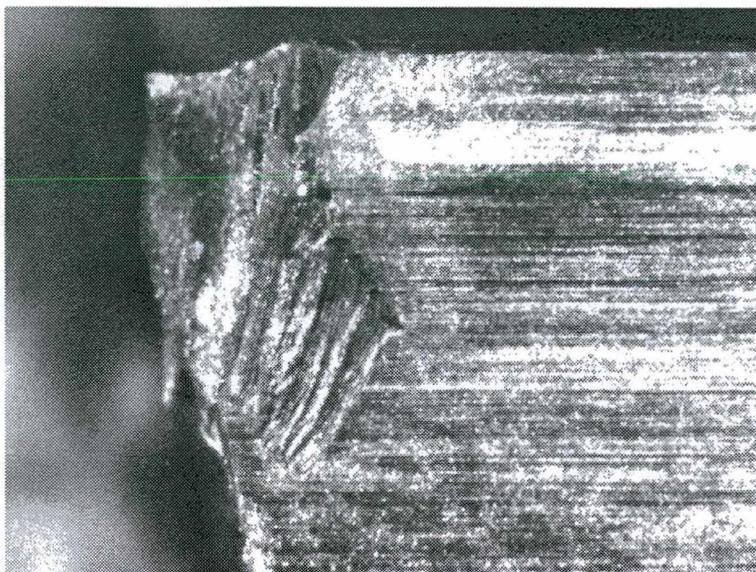


Figura 7.2 – Colapso do terceiro gume do inserto TSV80.

7.2.3 - Aço rápido T15 comercial, TC75, temperado a 1210°C e revenido a 560°C

Para o primeiro gume deste inserto, denominado de TC75-1, aumentou-se os ângulos de incidência tanto do gume principal quanto do gume secundário de 10,5° para 12,5°. Além disso, foi feito um rebaixo paralelamente a toda extensão desse gume principal, conforme figura 7.3. Em decorrência desse rebaixo o gume 2 foi inutilizado. Quanto aos gumes 3 e 4, estes foram reservados para uma posterior réplica do rebaixo, caso fosse necessário.

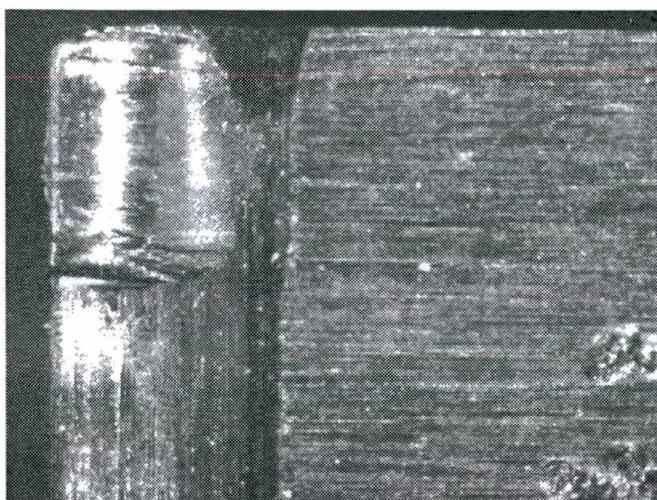


Figura 7.3 - Rebaixo realizado na face do inserto TC75-1.

Com essas alterações finalmente foi possível usinar na profundidade de corte a_p de 2,0 mm, mantendo-se os demais parâmetros de corte constantes, v_c de 33 m/min e f de 0,2 mm. Conforme ilustra a figura 7.4, esse inserto proporcionou 120 min de usinagem e teve um desgaste de flanco VB_N , de 0,95 mm, figura 7.5, ou seja, apresentou um comportamento mais próximo ao dos bits. As ferramentas em forma de bits TC06, aço rápido T15 comercial com 5% de cobalto, e a VK7', aço rápido convencional com 10% de cobalto, foram as que apresentaram melhores resultados nos ensaios de usinagem realizados por Santos (1999) e, por isso, foram utilizadas como referência para otimizar a geometria dos insertos, ângulos e quebra-cavacos. A análise estatística das curvas dessas ferramentas encontra-se no anexo 1.

Com base nos resultados ilustrados na figura 7.4, verificou-se a possibilidade de aproximar ainda mais a curva de desgaste dos insertos com as curvas de desgaste dos bits. Para tal, utilizou-se um outro inserto sinterizado a vácuo, o TSV82. Os resultados são apresentados no próximo item.

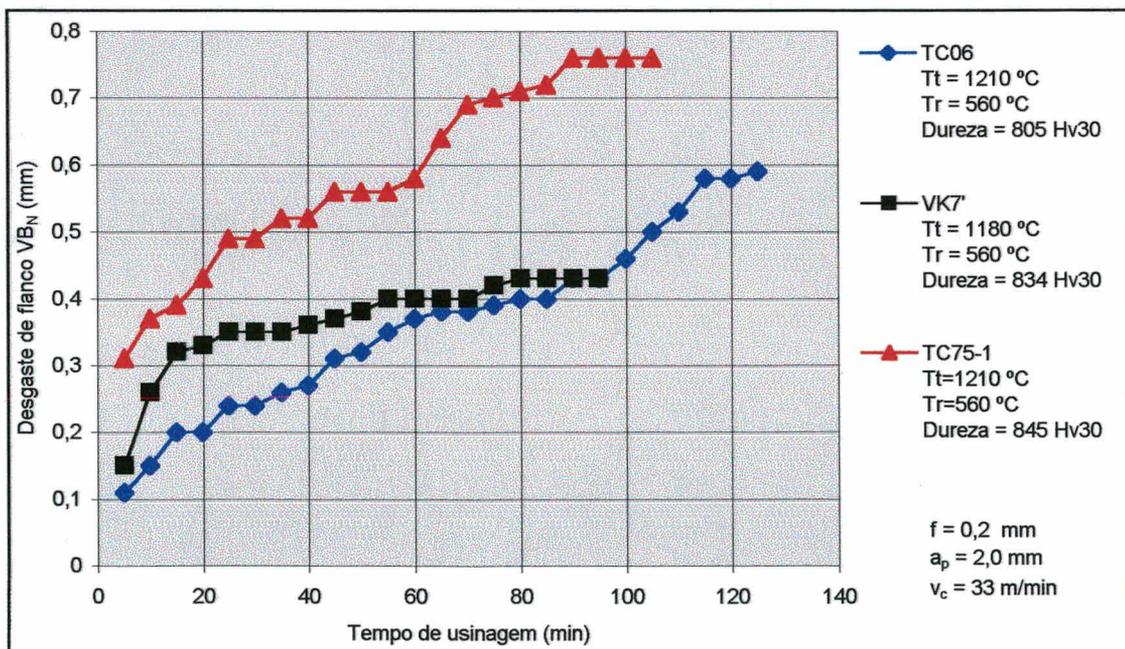


Figura 7.4 - Curvas de desgaste dos bits TC06 e VK7' e do inserto TC75-1, v_c de 33m/min, a_p de 2,0 mm e f de 0,2 mm.

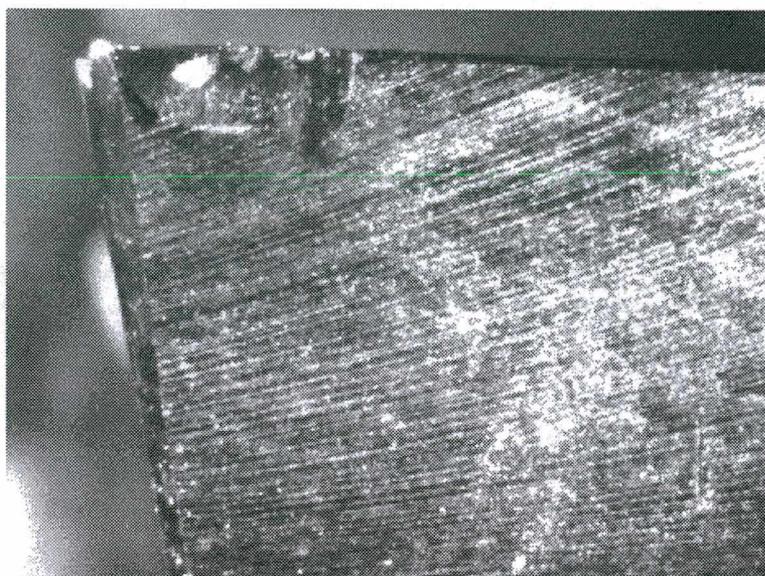


Figura 7.5 – Desgaste de flanco, inserto TC75-1.

7.2.4 – Aço rápido T15 sinterizado a vácuo, TSV82, temperado a 1210 °C e revenido a 560 °C

Para obter um resultado ainda melhor do que o obtido com o inserto TC75, alterou-se os ângulo de incidência, tanto do gume principal quanto do secundário do inserto TSV82-3, temperado a 1210°C e revenido a 560°C, de 10,5° para 15° e repetiu-se o rebaixo feito no inserto TC75-1, paralelo à toda extensão do gume principal, conforme ilustra a figura 7.6.

Nesta mesma figura pode-se visualizar o desgaste ocorrido nesse rebaixo, ou quebra-cavacos, em decorrência do escoamento dos cavacos. A aproximação entre as curvas de desgaste dos insertos e dos bits ensaiados por Santos (1999) finalmente foi alcançada, conforme ilustra a figura 7.7. Esse inserto foi utilizado durante 180 min para um desgaste de flanco VB_N final de 0,69 mm, indicando um excelente desempenho, inclusive superior ao desempenho apresentado pelos bits.

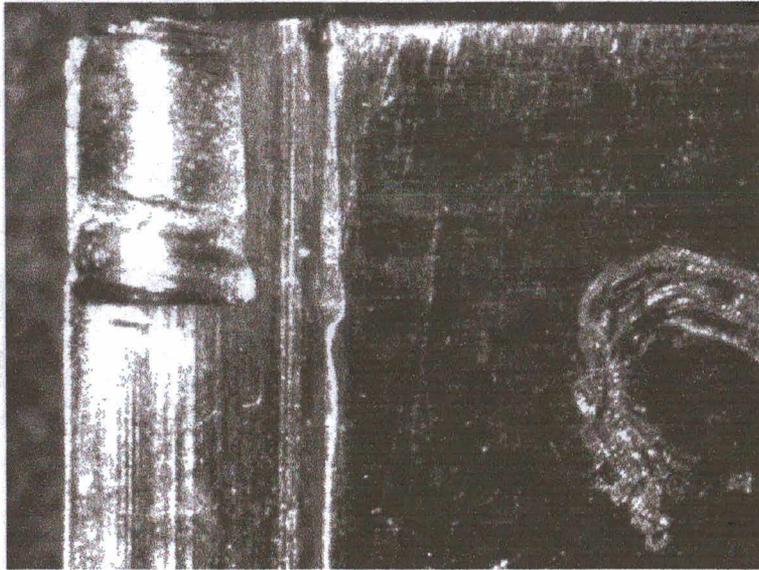


Figura 7.6 – Rebaixo paralelo ao gume do inserto TSV82-3.

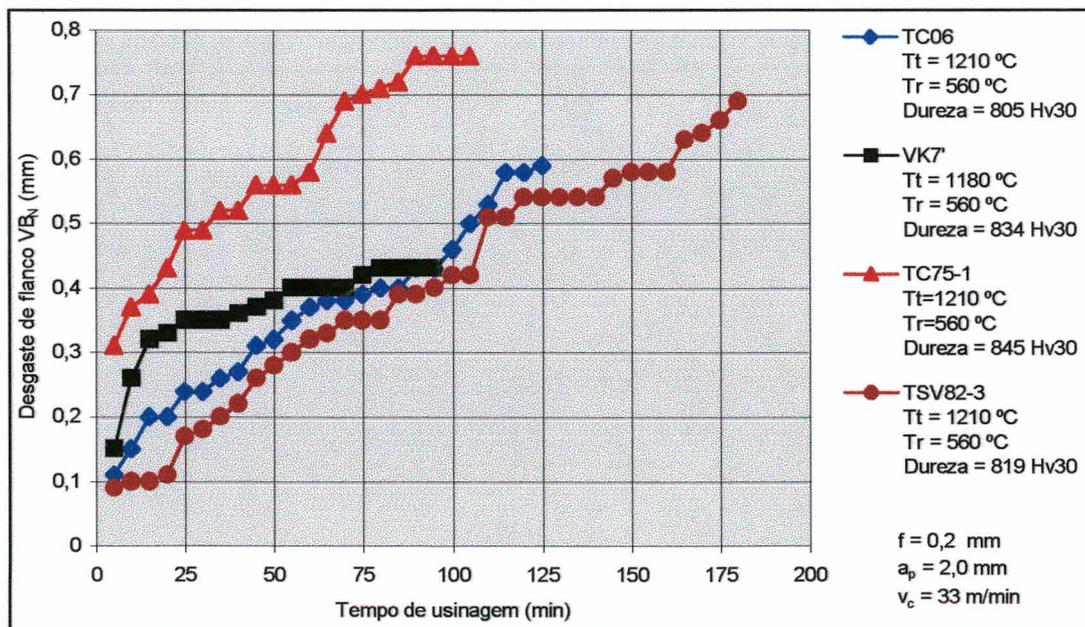


Figura 7.7 - Curvas de desgaste: bits TC06, VK7' e insertos TC75-1 e TSV82-3, v_c = 33 m/min.

7.2.5 - Aço rápido T15 sinterizado a vácuo, TSV54, temperado a 1210°C e revenido a 540°C

No primeiro gume desse inserto, TSV54-1, realizou-se as mesmas alterações feitas no inserto TSV82-3. Conforme constatado por Santos (1999), a temperatura de têmpera de 1210 °C,

associada ao revenimento de 540 °C, ofereceu às ferramentas de aço rápido T15 sinterizado comercial (HIP) menor resistência ao desgaste no processo de torneamento do que quando esta temperatura de têmpera foi seguida por um revenimento de 560 °C. O mesmo foi constatado com os insertos de aço rápido T15 sinterizados a vácuo, conforme ilustra a figura 7.8.

O inserto TSV82-3, temperado a 1210 °C e revenido a 560 °C, cujos resultados estão apresentados no item anterior, foi utilizado durante 180 minutos até um desgaste de flanco VB_N de 0,69 mm. Já esse inserto TSV54-1, temperado a 1210 °C e revenido a 540 °C, foi utilizado durante 155 min até um desgaste de flanco VB_N de 0,83 mm. Até os 80 minutos de usinagem eles tiveram comportamentos estatisticamente semelhantes (anexo 1), porém, após este tempo, esse gume do inserto sofreu um desgaste mais acentuado, como ilustrado na figura 7.8. Surge, então, a seguinte pergunta: Porque uma ferramenta de maior dureza tem menor resistência ao desgaste (menor vida) do que uma ferramenta com menor dureza?

Na busca de uma resposta para esta indagação surgiu uma hipótese no decorrer desta pesquisa, mas salienta-se que o assunto é complexo e exige ainda muito estudo. Portanto, a seguinte hipótese serve como um marco inicial para a futuros trabalhos: “Existe um valor de dureza ideal para cada classe de aço rápido, ou seja, aquela ferramenta de maior dureza não necessariamente será superior a uma outra de menor dureza e o inverso também é verdadeiro. Por exemplo, uma ferramenta com dureza de 840 Hv30 (1210/540 °C) pode apresentar pior desempenho do que aquela com 810 Hv30 (1210/560 °C), que, por sua vez, pode apresentar melhor desempenho do que aquela com 780 Hv30 (1160/540 °C). Em relação à temperatura de têmpera de 1160 °C, na temperatura de têmpera de 1210 °C ocorre maior dissolução dos carbonetos na matriz tornando-a mais dura, menos tenaz e por consequência mais frágil. Quando é feito um revenimento a 540 °C no aço rápido que foi temperado a 1160 °C, em comparação com aquele temperado a 1210 °C, ocorre a precipitação de novos carbonetos em uma matriz não tão frágil, sendo esta precipitação suficiente para aliviar as tensões internas da matriz. Para a

temperatura de têmpera de 1210 °C, a temperatura de revenimento de 540 °C não promove uma precipitação de carbonetos suficiente para o alívio de tensões da matriz. Quando essa têmpera à 1210 °C e seguida por um revenimento à 560 °C ocorre uma maior precipitação dos carbonetos, os quais vão se coalescendo, diminuindo as tensões internas da matriz que estava saturada. Na prática, ocorre que durante a usinagem tem-se forças exercidas sobre os carbonetos e, se esse for muito pequeno é arrancado com maior facilidade e se for muito grande, quando arrancado, o desgaste por abrasão da matriz também é acentuado. Portanto, existe um tamanho adequado de carboneto decorrente do coalescimento que ocorre durante o revenimento. Juntamente com isso, se a matriz estiver com tensões internas ela tende a expulsar com maior facilidade os carbonetos, isto diante de qualquer esforço que vier a sofrer”.

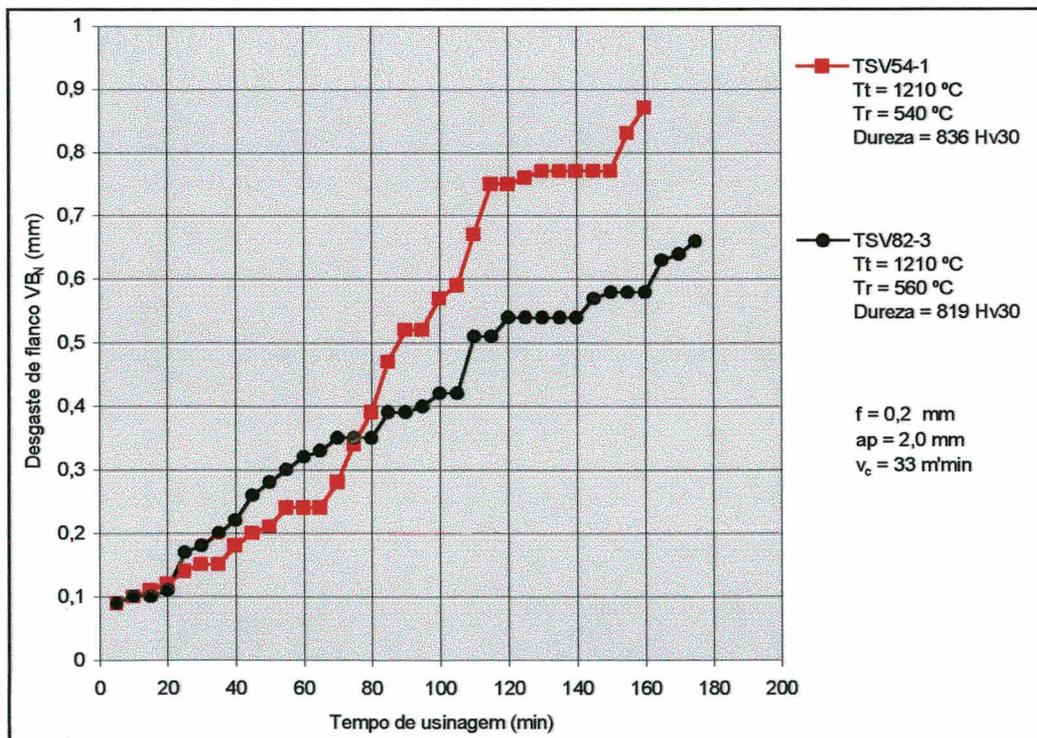


Figura 7.8 - Curvas de desgaste dos insertos TSV54-1 e TSV82-3, 33m/min, $a_p=2,0$ mm.

As principais observações referentes a estes resultados são as seguintes:

- A sinterização a vácuo realizada nas dependências do IPEN foi bem sucedida, bem como os tratamentos térmicos realizados na empresa HURTH-Infer. Os insertos de aço rápido sinterizados por este processo, após sofrerem alterações em seus ângulos e ter sido introduzido um quebra-cavacos, apresentaram melhores resultados que os bits empregados por Santos (1999), e também que os insertos produzidos a partir de barras de aço rápido T15 comercial;
- O quebra-cavacos foi introduzido de tal forma que inutilizou o gume subsequente dos insertos. O próximo passo, conforme será relatado a seguir, foi reproduzir esse quebra-cavacos com um comprimento menor, o que permitiu fazê-lo nos quatro gumes de cada inserto;
- Os insertos, assim como os bits, não tinham raio de quina de 0,8 mm. Portanto, não ocorreu variação na direção de afiação de seus flancos (item 7.5);
- Para um mesmo avanço e velocidade de corte, pequenas variações de 0,25 mm na profundidade de corte alteraram completamente o desempenho dos insertos.

7.3 - Apresentação dos Resultados Obtidos com Insertos já na Geometria Final, Ângulos e Quebra-Cavacos, Afiados na UFSC

Com os resultados obtidos até então, definiu-se a geometria final dos insertos, figura 7.9. Quanto ao quebra-cavacos, em relação ao que foi definido no final do item 7.2, alterou-se apenas seu comprimento para que o mesmo pudesse ser reproduzido para os quatro gumes principais do inserto.

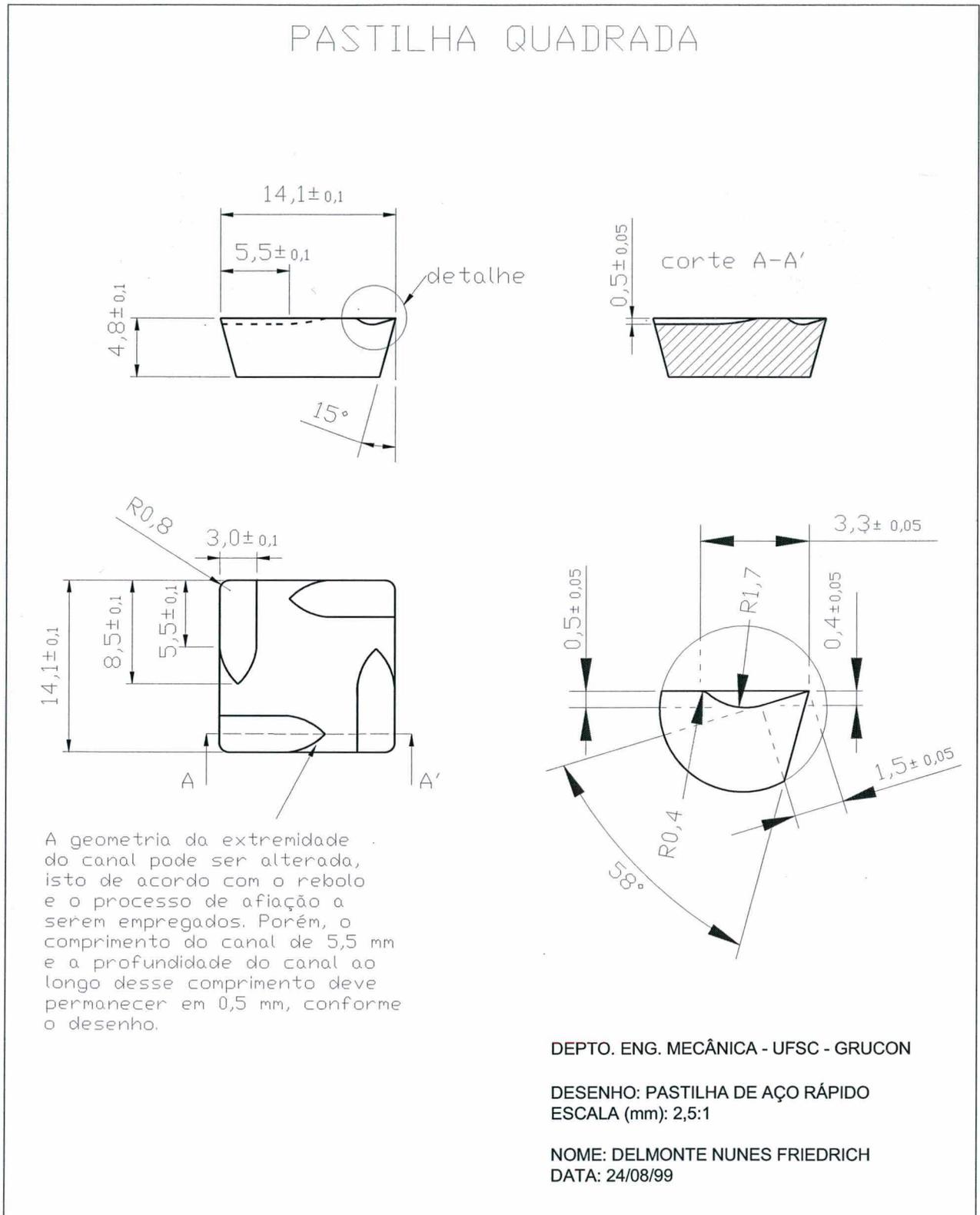


Figura 7.9 - Geometria final e quebra-cavacos dos inserts.

Como um dos resultados mais significativos cita-se o fato de que com esta concepção geométrica foi possível usinar a 50 m/min durante 10 minutos, isto na profundidade de corte de 2,0 mm, avanço de 0,2 mm, a seco e usinando o aço 1045 trefilado, conforme será apresentado a seguir. Nesta etapa, foram ensaiados o inserto TC77 (1210/560 °C), obtido a partir de uma barra do aço rápido T15 comercial, e os inserts TSV54 (1210/540 °C) e TSV27 (1160/540 °C), ambos sinterizados a vácuo nas dependências do IPEN.

Os ângulos e quebra-cavacos apresentados na figura 7.9 foram reproduzidos primeiramente no inserto TC77, temperado a 1210 °C e revenido a 560 °C, com dureza de 823 Hv30, obtido a partir de uma barra de aço rápido T15 comercial. Inicialmente, tentou-se usinar a 50 m/min. Nessa velocidade de corte o gume 1 dessa ferramenta teve uma vida de 5 min, o que foi um resultado satisfatório, tendo em vista que Santos (1999), utilizando bits de aço rápido com 10% de cobalto e bits de aço rápido sinterizado T15 comercial, conseguiu empregar no máximo uma velocidade de corte de 35 m/min de usinagem para um tempo de vida das ferramentas ainda menor que 5 min.

Para os demais gumes dessa ferramenta utilizou-se a velocidade de corte de 40 m/min, sendo os resultados ilustrados na figura 7.10. Pode-se observar que ocorreu uma dispersão na vida dos gumes 2, 3 e 4. O gume 3, denominado de TC77-3, apresentou um desgaste mais intenso em relação aos demais. Os gumes 2 e 4 apresentaram curvas com a mesma tendência (paralelas e com vidas relativamente próximas, respectivamente, de 50 min e 60 min), porém, como um todo, significativamente diferentes, conforme mostra a tabela de análise estatística apresentada no anexo 1 deste trabalho.

Esta dispersão nas vidas dos gumes do inserto TC77 pode ser atribuída ao aquecimento gerado durante o corte realizado na barra de aço rápido comercial para a sua obtenção em bruto, o qual posteriormente foi afiado. Em decorrência disso, com uma microestrutura já alterada, durante a afiação (ângulos e quebra-cavacos) ocorreu a queima do terceiro gume e, por isso, o

mesmo teve uma vida significativamente inferior em relação aos gumes 2 e 4., figura 7.10. Os outros dois insertos, TSV54 e TSV27, não passaram por este processo de corte do material em bruto, uma vez que os mesmos foram sinterizados em uma forma próxima à final a partir do pó de aço rápido.

Um dos grandes problemas na obtenção de ferramentas de aço rápido é o cuidado que se deve ter com o corte do material e posteriormente com a afiação, principalmente quando esta é realizada em retificadoras manuais, pois dificilmente consegue-se reproduzir os mesmos resultados de uma ferramenta para outra, ou melhor, de um gume para outro. Talvez, devido a isto, também tenham ocorrido diferenças entre o gume 2 e 4, porém em menores proporções. O ferramenteiro perde tempo, gasta rebolo e fluido de corte para afiar as ferramentas e, ainda, dificilmente consegue repetibilidade entre uma afiação e outra. Daí que surgem as vantagens das ferramentas sinterizadas na geometria próxima a final, pois as mesmas pouco serão retificadas.

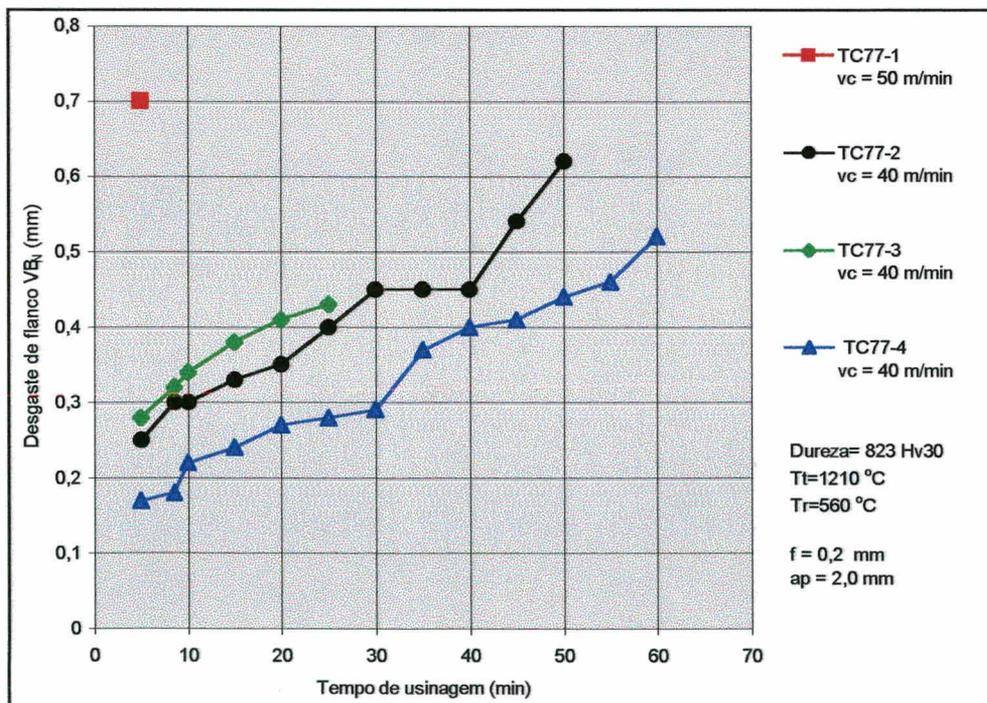


Figura 7.10 - Curvas de desgaste dos quatro gumes do inserto TC77.

Ao ensaiar o gume 2 do inserto TSV54, temperado a 1210 °C, revenido a 540 °C e com dureza de 836 Hv30, sinterizado a vácuo nas dependências do IPEN, verificou-se que na velocidade de corte de 50 m/min o tempo de usinagem foi maior do que o obtido com o inserto TC77, ou seja, aproximadamente 10 min, conforme ilustra a figura 7.11. Seu fim de vida ocorreu pela destruição da quina, conforme ilustra a figura 7.12.

No ensaio de um outro gume dessa ferramenta, TSV54-1, na velocidade de 33 m/min, constatou-se que o mesmo ofereceu excelentes condições de corte, inclusive superando os resultados obtidos com os bits ensaiados com os mesmos parâmetros, respectivamente, 143 minutos para um desgaste VB de 0,77 mm contra 125 minutos para um desgaste VB de 0,6 mm, considerando-se que o valor de desgaste de flanco deve permanecer preferencialmente no intervalo de 0,6 a 0,8 mm (SANTOS, 1999) e a ferramenta ainda oferecer condições de corte. No caso do citado bits, com 0,6 mm de desgaste já não havia mais condições de corte em função da destruição de sua quina. Como já foi mencionado, os bits não suportaram velocidades de corte acima de 35 m/min, pois entravam em colapso imediatamente.

Partiu-se, então, para a velocidade de corte de 40 m/min. Nesta velocidade, o quarto gume, TSV54-4, foi utilizado durante 60 min para um desgaste de flanco VB_N de 0,72 mm, também considerado um excelente resultado, figura 7.11.

Para o terceiro gume, TSV54-3, aplicou-se a mesma velocidade de corte, porém, o material usinado foi um aço 1045 laminado (213 HV30), de dureza inferior ao trefilado (268 HV30). O material é trefilado a partir de uma barra, de maior diâmetro, do material laminado, o que gera o encruamento maior dos grãos, aumento na dureza e alteração das propriedades mecânicas, sem alterar a composição química. Realizou-se este ensaio porque na prática as ferramentas de aços rápidos são bastante empregadas na usinagem do aço 1045 laminado, sendo os resultados bem diferentes daqueles obtidos na usinagem do 1045 trefilado, ou seja, as ferramentas têm um tempo de vida maior, conforme o ilustrado na figura 7.11.

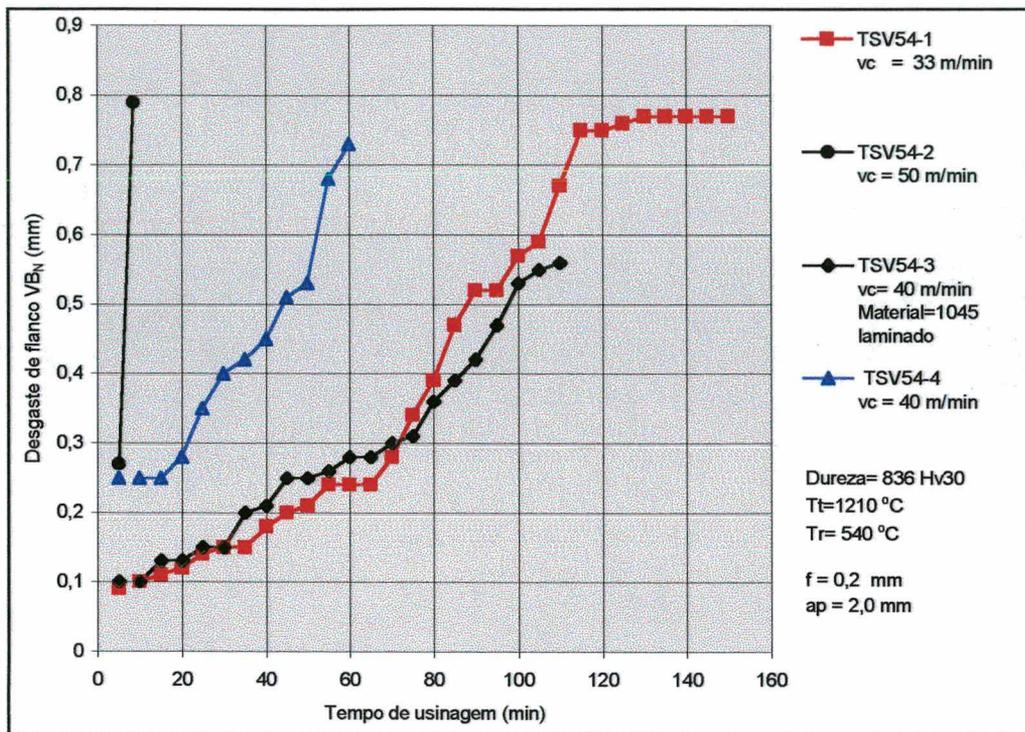


Figura 7.11 - Curvas de desgaste dos quatro gumes do inserto TSV54.

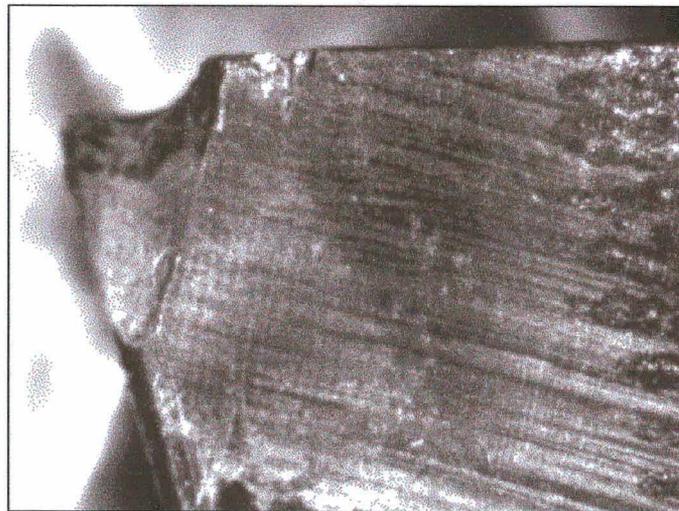


Figura 7.12 - Destruição da quina do gume 02 do inserto TSV54, $v_c = 50 \text{ m/min}$.

Para completar esta etapa do trabalho ensaiou-se o último inserto, TSV27, temperado a $1160 \text{ }^\circ\text{C}$, revenido a $540 \text{ }^\circ\text{C}$, com dureza de 803 Hv30 . O gume 1 dessa ferramenta, TSV27-4, teve uma vida de 55 minutos para um desgaste de flanco VB_N de $0,4 \text{ mm}$. O outro gume,

TSV27-2, durou 60 minutos para um desgaste de flanco VB_N de 0,33 mm, conforme ilustra a figura 7.13. Os fins-de-vida destes gumes foram determinados pela destruição de suas quinas, isto porque no final de suas vidas já não apresentavam mais boas condições de corte e o calor gerado foi suficiente para causar deformação plástica.

Estatisticamente, as curvas de desgaste de ambos os gumes desse inserto, figura 7.13, não diferem significativamente, conforme tabela apresentada no anexo 1. Este fato indica que as afiações foram bem sucedidas.

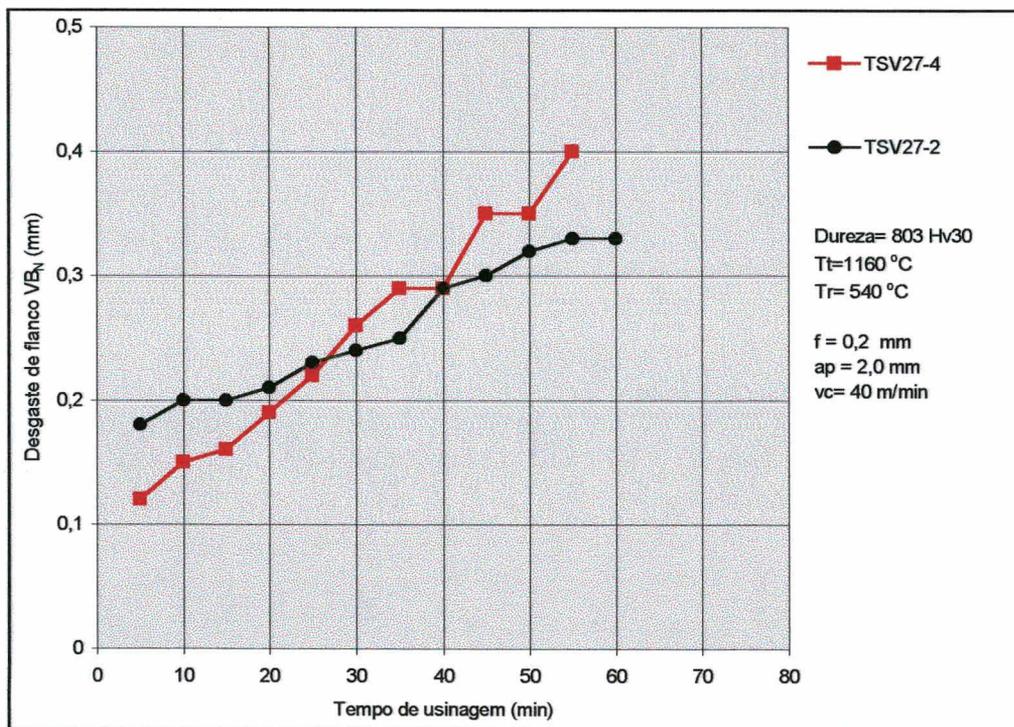


Figura 7.13 - Curvas de desgaste do inserto TSV27, $v_c=40$ m/min.

As principais observações referentes a este item são:

- Os insertos, afiados com a geometria definida nesta pesquisa, tiveram desempenhos acima do esperado. Foi possível utilizar a velocidade de corte de 50 m/min, durante 10 minutos de usinagem;

- Ultrapassou-se em cerca de 20% a velocidade de 33 m/min, definida por Santos (1999) como adequada para a realização dos ensaios sem comprometer rapidamente as ferramentas de aços rápidos, ou seja, com essa mesma finalidade a velocidade de 40 m/min possibilitou ensaiar os insertos produzidos com os ângulos e quebra-cavacos sugeridos no desenho da figura 7.9.
- A sinterização dos insertos na geometria próxima à final elimina a necessidade do corte da barra de aço rápido, eliminando, portanto, a influência do calor gerado durante o corte na microestrutura do material, o que, por sua vez, pode ser agravado ainda mais durante a afiação. Com a sinterização, este inconveniente é eliminado;
- Na velocidade de 33 m/min a vida da ferramenta atinge cerca de 130 minutos. Na velocidade de 40 m/min, obtida somente com os insertos, este tempo é substancialmente menor, cerca de 70 minutos. Os insertos desenvolvidos nesta pesquisa suportaram essa velocidade de corte sem serem destruídos rapidamente, o que não aconteceu com os bits empregados por Santos (1999), como já citado anteriormente;
- Ocorreu repetibilidade nos resultados obtidos com os gumes 2 e 4 do inserto TSV27, indicando que tanto a afiação quanto os ensaios foram bem conduzidos.
- Com essa concepção de quebra-cavacos foram gerados cavacos favoráveis, ou seja, cavacos em forma de hélices cônicas curtas e não revenidos, indicando que a temperatura gerada durante a usinagem não foi excessiva, usinagem não forçada. Lucas (1998), indica que este cavaco é tido como bom para a usinagem. Foi a partir do trabalho que ela desenvolveu que buscou-se o embasamento para denominar esse cavaco como em forma de hélices cônicas curtas, o qual está ilustrado na figura 7.14. Essa forma cônica ocorre porque a profundidade e a largura do quebra-cavacos vai diminuindo à medida que aproxima-se do seu comprimento final.

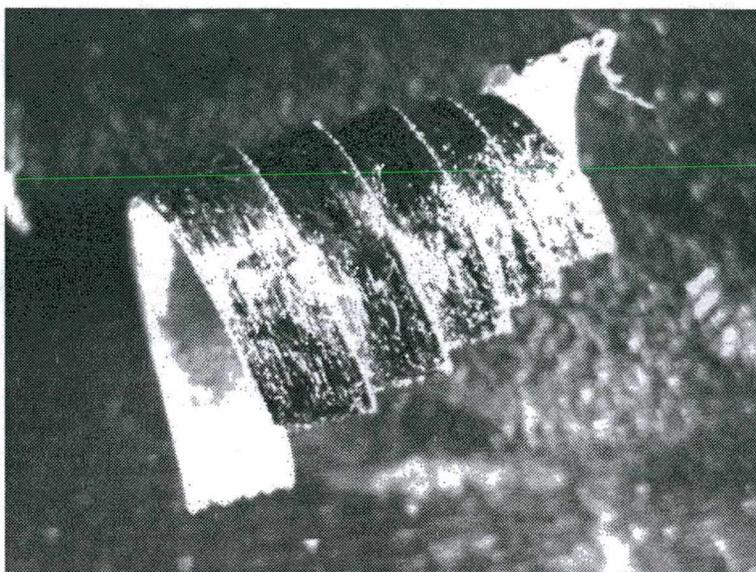


Figura 7.14 – Aspecto predominante do cavaco gerado nesta pesquisa, $v_c = 40$ m/min

7.4 - Comparação entre Insertos Sinterizados com Fase Líquida e Bits Produzidos a Partir de Barras de Aço Rápido Prensado Isostaticamente a Quente: Análise da influência das Temperaturas de Têmpera e de Revenimento

No Brasil, as empresas importam o aço rápido T15 prensado isostaticamente a quente. Em uma primeira etapa, aproveitando o perfil das barras desse material importado, foram produzidas ferramentas na forma de bits. Em uma segunda etapa, nas dependências do IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo), o pó desse mesmo aço rápido foi sinterizado com fase líquida (SV), justamente porque o objetivo é desenvolver um processo de sinterização com tecnologia nacional e que ao mesmo tempo seja viável economicamente.

No caso, a sinterização com fase líquida, ou sinterização a vácuo, tem se mostrado uma boa alternativa, porém, há necessidade de se verificar o sucesso desse material quando empregado como ferramenta de corte. Para esse material optou-se por produzir ferramentas na forma de insertos devido às seguintes vantagens: menores dimensões; facilidade de sinterizar;

geometria próxima à final; menor volume de material removido por retificação; e também porque a produção de ferramentas intercambiáveis é uma tendência mundial.

Os dados de usinagem pertinentes às ferramentas de aço rápido T15 HIP (Hot Isostatic Pressing) foram obtidos do trabalho realizado por Santos (1999). Em sua pesquisa, Santos verificou que a combinação de temperaturas de têmpera de 1210 °C e revenimento de 560 °C proporcionou maior resistência ao desgaste aquelas ferramentas.

Sintetizando, três objetivos básicos foram de interesse do presente trabalho. Primeiro, conseguir usinar com os insertos obtidos por sinterização a vácuo. Segundo, comparar o desempenho desses insertos com o desempenho dos bits testados por Santos. Terceiro, verificar o efeito de cada uma das três combinações de temperaturas de têmpera e revenimento a que os insertos foram submetidos sobre suas vidas. O primeiro objetivo foi alcançado, conforme relatado no item 7.2 deste capítulo. Os dados obtidos por Santos (1999), e que foram comparados com os resultados obtidos neste trabalho, a fim de alcançar o segundo objetivo, estão dispostos resumidamente na tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Designação e peculiaridades das ferramentas.

Insero (designação)	Temp. Têmpera (°C)	Temp. Revenimento (°C)	v_c (m/min)	VB_N (mm)	Tempo de vida (min)	Dureza (HV 30)	
						média	σ
Bits de aço rápido AISI T15 prensado isostaticamente a quente							
TC02	1160	540	33	0,49	85	780	49,4
TC04	1210	540	33	0,8	85	830	22,7
TC06	1210	560	33	0,59	125	802	28,2
Insertos, sinterizados com fase líquida, de aço rápido AISI T15							
TSV27	1160	540	40	0,33	60	803	13,3
TSV54	1210	540	40	0,73	60	836	17,5
TSV83	1210	560	40	0,54	60	833	16,4

7.4.1 - O aço rápido T15 prensado isostaticamente a quente

Para esse material, quando empregado na forma de bits, fato este que é o de praxe dentro das indústrias, a velocidade de corte mais adequada foi de 33 m/min, isto para uma profundidade de corte de 2,0 mm e um avanço de 0,2 mm, usinagem a seco do aço ABNT 1045 trefilado. Dentre as três combinações de temperaturas de tratamento ficou evidenciada a superioridade da ferramenta temperada a 1210 °C e revenida a 560 °C, de dureza intermediária em relação às outras duas (SANTOS, 1999).

A ferramenta TC04, de dureza significativamente superior, apresentou um desgaste mais acentuado em relação às ferramentas TC02 e TC06, conforme ilustra a figura 7.15. As ferramentas TC02 e TC06 tiveram um desempenho estatisticamente semelhante até o tempo de usinagem de 85 min. A partir desse momento a TC02 não apresentou mais condições de usinagem e a TC06 prosseguiu sendo utilizada até 125 min, momento em que atingiu um desgaste de flanco VB_N de 0,59 mm, comprovando sua superioridade em relação às outras duas. As durezas dessas duas últimas ferramentas são significativamente diferentes.

7.4.2 - O aço rápido T15 sinterizado com fase líquida (SV)

As combinações de temperaturas de tratamento foram as mesmas empregadas nos bits. Quanto à velocidade de corte, conforme resultados apresentados nos itens anteriores deste capítulo, constatou-se que a velocidade de corte mais adequada foi de 40 m/min, para um avanço de 0,2 mm e uma profundidade de corte de 2,0 mm.

Para este aço rápido verificou-se que a combinação de temperaturas de têmpera de 1210 °C e revenimento de 540 °C, apesar de proporcionar maior dureza à ferramenta, não é adequada para que a mesma tenha o melhor desempenho.

As demais combinações de tratamento térmico proporcionaram desempenhos estatisticamente semelhantes às ferramentas, conforme será descrito a seguir.

De acordo com a figura 7.16, as três ferramentas foram utilizadas durante o mesmo tempo de usinagem. Porém, a ferramenta TSV54 apresentou um desgaste maior, principalmente em relação à ferramenta TSV27, a qual possui dureza inferior à primeira. Com relação à TSV83 verificou-se que ela apresentou um comportamento intermediário, sendo sua dureza semelhante à TSV54.

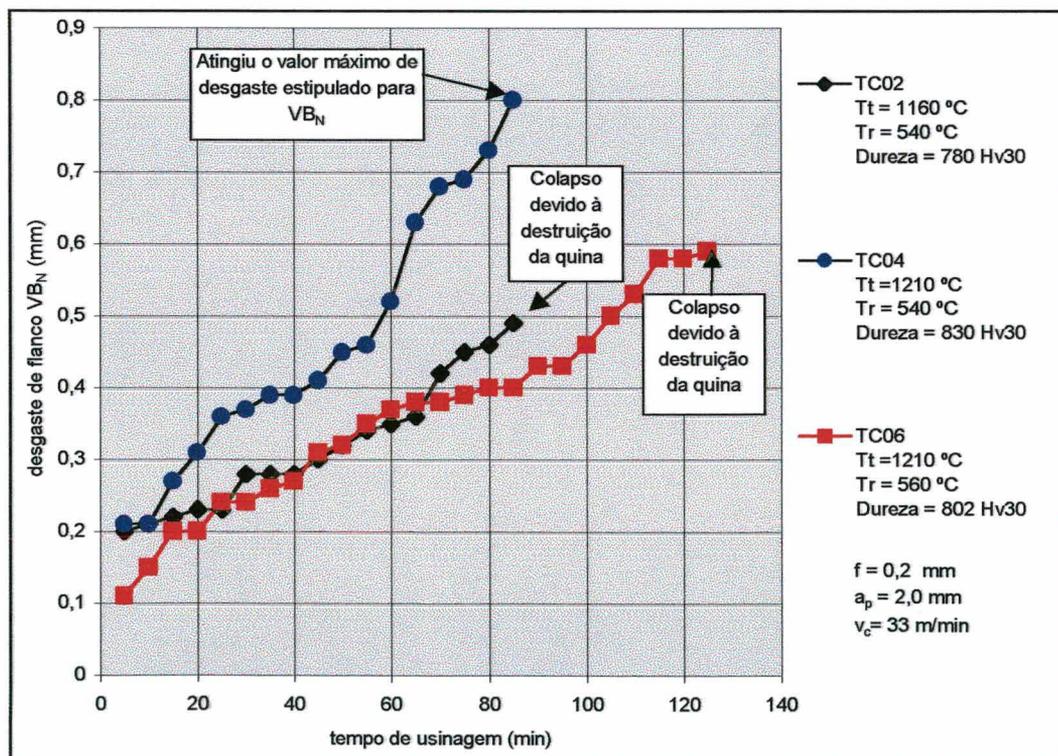


Figura 7.15 - Curvas de desgaste dos bits de aço rápido T15 prensado isostaticamente a quente (HIP), velocidade de 33 m/min (SANTOS, 1999).

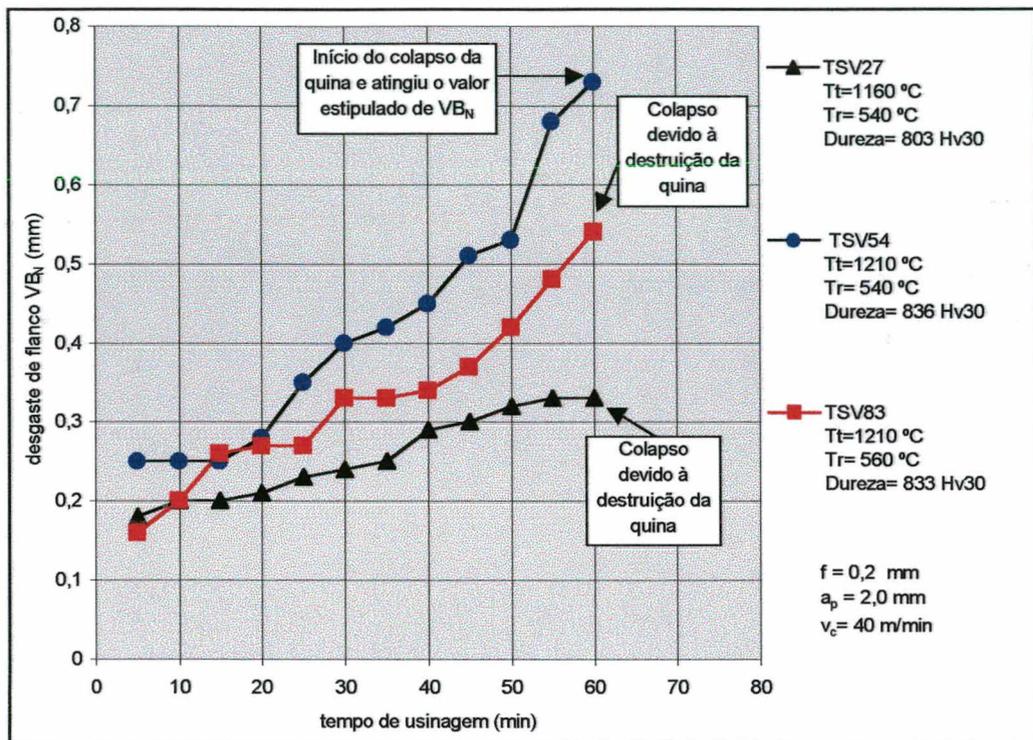


Figura 7.16 - Curvas de desgastes das ferramentas de aço rápido T15 (SV), $v_c = 40\text{ m/min}$.

As principais observações referentes a este item são:

O processo de sinterização com fase líquida (SV) proporcionou resultados importantes na produção de ferramentas de usinagem., no caso os inserts. Em relação aos bits produzidos a partir do aço rápido prensado isostaticamente a quente, considerando o mesmo avanço e a mesma profundidade de corte (respectivamente, 0,2 mm e 2,0 mm), os inserts sinterizados com fase líquida proporcionaram um aumento de aproximadamente 20% na velocidade de corte, ou seja, de 33 m/min para 40 m/min. Além deste fato, deve-se salientar que a sinterização com fase líquida é um processo bem mais simples e barato do que o outro anteriormente citado, sendo, por isso, economicamente mais vantajoso.

Assim como o verificado com os bits, para os inserts sinterizados a vácuo a combinação de temperaturas de têmpera e revenimento de 1210 °C e 540 °C não proporcionou boa resistência ao desgaste quando comparada com as combinações de 1210/560 °C e 1160/540 °C. Ou seja,

maior dureza não significou maior resistência ao desgaste. Existe uma combinação adequada entre as temperaturas de têmpera e revenimento que proporciona melhores propriedades mecânicas e resistência ao desgaste ao material quando empregado como ferramenta de corte.

Deve-se estudar melhor a relação entre processo de sinterização, tratamento térmico, microestrutura e resistência ao desgaste de aços rápidos empregados na fabricação de ferramentas de usinagem. Este trabalho serviu para demonstrar que processos alternativos, mais simples e baratos, são eficientes e que é possível desenvolver tecnologia nacional para a fabricação de matérias-prima até então importadas.

7.5 – Avaliação do Lote de Insertos Produzidos para Teste em Campo

Após o desenvolvimento da geometria final dos insertos, ângulos e quebra-cavacos, figura 7.9, e dos testes preliminares, os quais foram apresentados dos itens 7.1 a 7.4, foi produzido um lote para a realização de ensaios em indústrias de interesse. Essa produção, tratamento térmico e afiação, foi feita pela empresa HURTH-Infer, a qual entregou os insertos na forma acabada e prontos para serem utilizados. Porém, para certificar que a sinterização, tratamento térmico e a afiação haviam sido bem sucedidas, foram realizados novos ensaios, na UFSC, com alguns destes insertos escolhidos aleatoriamente. Ensaiou-se os insertos denominados de TSV36 e TSV68, ambos temperados a 1210 °C e revenidos a 560 °C.

Na figura 7.17 são apresentadas as curvas de desgaste dos gumes 1, 3 e 4 da ferramenta TSV36, sendo que nenhum deles ofereceu condições de usinagem. O gume 1 durou apenas 10 minutos, sendo que seu fim de vida foi determinado por um desgaste brusco na quina, da ordem de 0,40 mm. Ainda pior desempenho tiveram os gumes 3 e 4, que duraram apenas 5 minutos e apresentaram o mesmo desgaste atípico verificado no gume 1, também na ordem de 0,40 mm,

figura 7.17. Pela análise da figura 7.18, que ilustra o gume 1 da ferramenta TSV36, percebe-se nitidamente uma região de transição decorrente da mudança na direção de afiação entre o flanco e a quina dessa ferramenta, justamente onde o desgaste se propagou. No flanco, as marcas decorrentes da afiação estão dispostas horizontalmente, enquanto que na quina estas marcas estão dispostas na vertical.

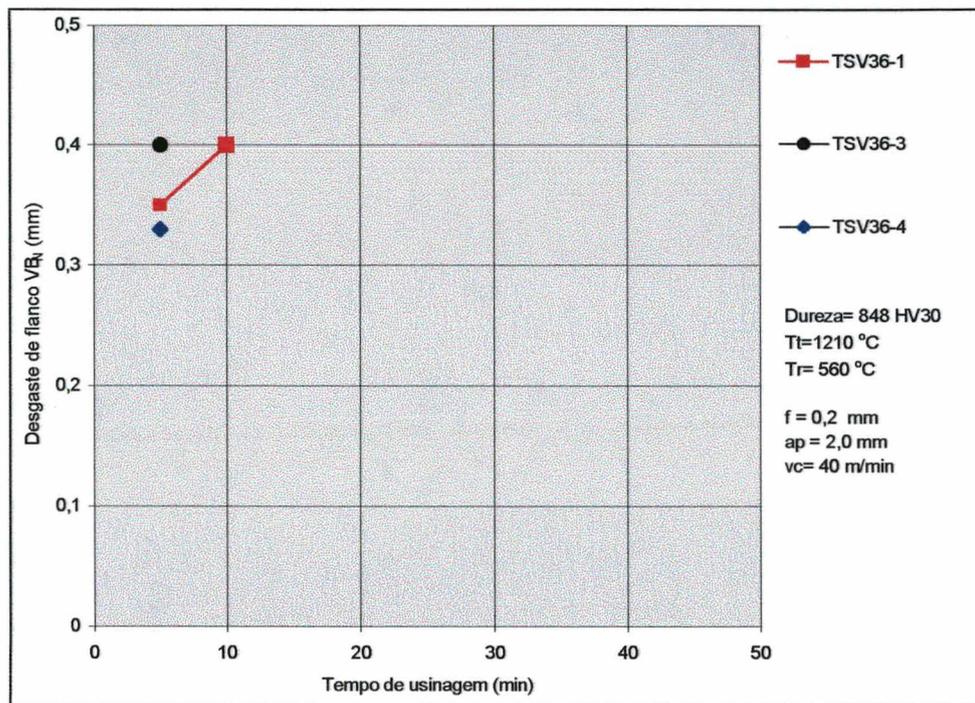


Figura 7.17 - Curvas de desgaste dos gumes 1,3 e 4 do inserto TSV36, velocidade de 40 m/min.

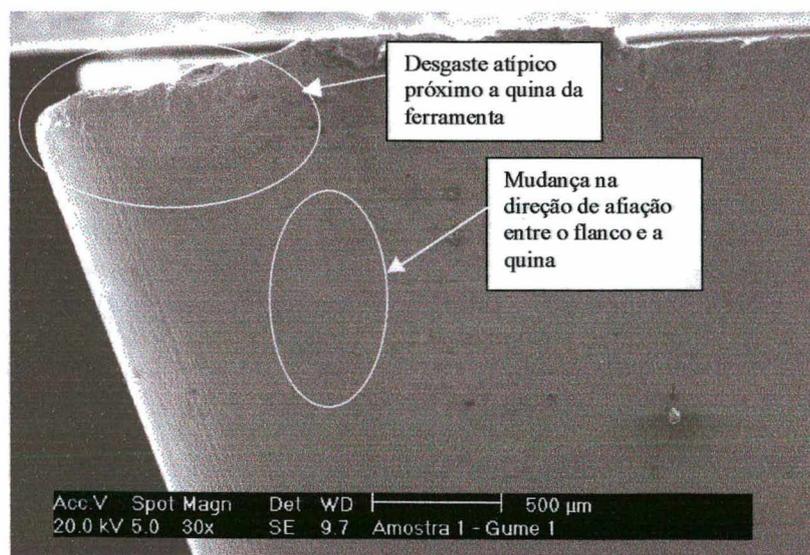


Figura 7.18 - Desgaste atípico próximo à quina do inserto TSV36, gume 1, aumento de 30x.

A diferença na direção de afiação também pode ser vista no flanco secundário do gume 1 da ferramenta TSV36, figura 7.19, evidenciando que o raio de quina foi afiado em uma segunda etapa e na vertical, diferentemente da afiação do flanco que foi na horizontal, gerando uma discordância de planos.

No terceiro gume desta ferramenta, conforme ilustra a figura 7.20, também verificou-se o mesmo desgaste atípico que ocorreu com o gume 1, ou seja, um desgaste acentuado na região de transição da direção de afiação, onde estão evidenciadas as marcas de afiação horizontais no flanco e as marcas de afiação verticais na quina. Tais marcas, ranhuras, são decorrentes dos grãos abrasivos do rebolo utilizado para afiar os insertos.

O mesmo ocorreu com o quarto gume desta ferramenta. Porém, antes de levá-lo até o colapso, logo nos primeiros segundos de usinagem interrompeu-se o ensaio a fim de se observar o que havia ocorrido na fase inicial do desgaste. Conforme ilustra a figura 7.21, pode-se ver o início do desgaste da ferramenta, justamente naquela região transitória decorrente das diferenças nas direções de afiação entre o flanco e a quina. Além disso, percebe-se um fenômeno muito interessante: linhas de escoamento a partir da quina da ferramenta em direção a esta zona de transição.

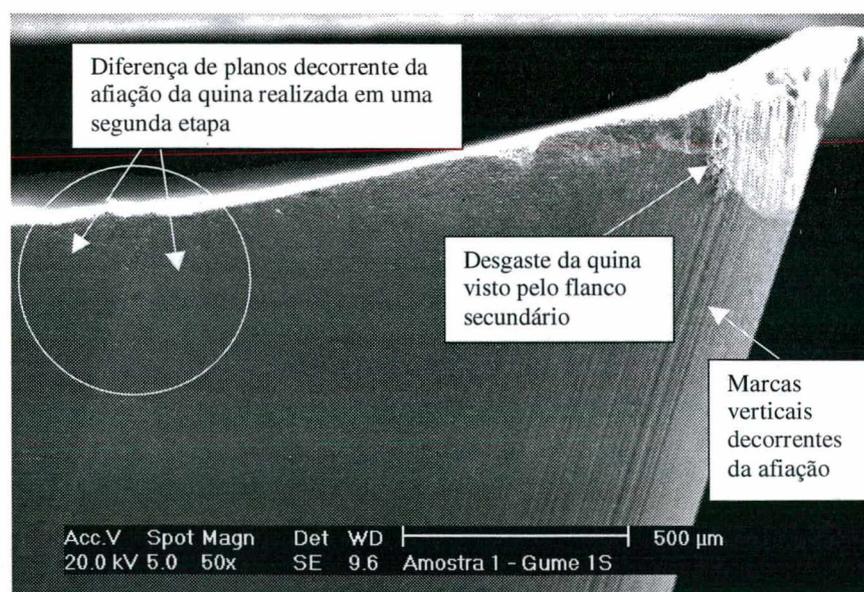


Figura 7.19 - Flanco secundário do inserto TSV36 -1: desgaste atípico próximo à quina, 50x.

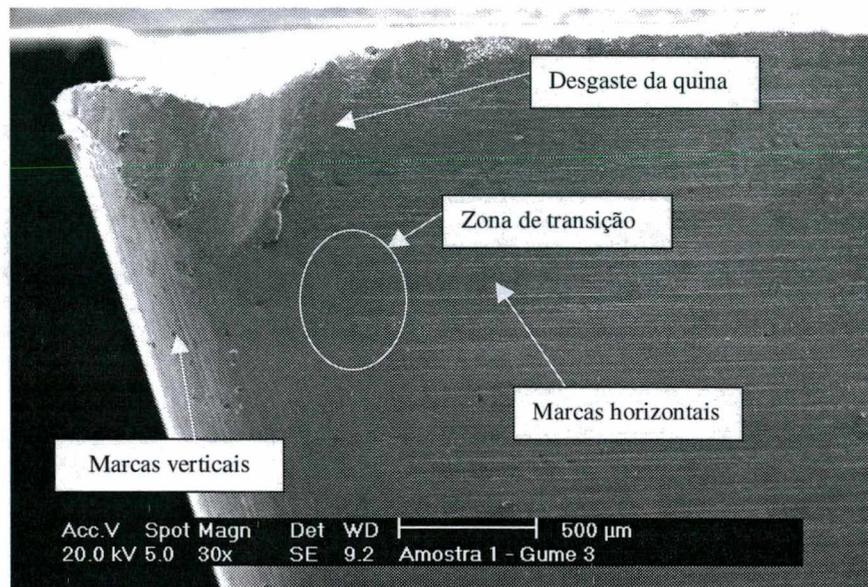


Figura 7.20 - Desgaste próximo à quina do inserto TSV36, gume 03, aumento de 30x.

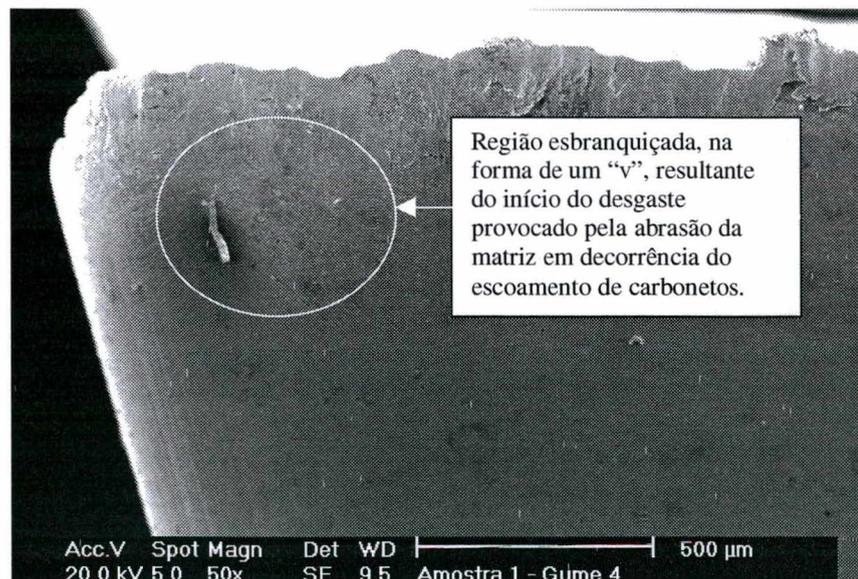


Figura 7.21 - Início do desgaste próximo à quina do inserto TSV36, gume 04, aumento de 50x.

As figuras 7.22, 7.23 e 7.24 referem-se à sucessivas ampliações do detalhe indicado na figura 7.21. Na figura 7.22 já é possível visualizar melhor as marcas (abrasão) causadas pelo escoamento dos carbonetos sobre a matriz, bem como a trajetória que eles percorreram: de fora para dentro, ou seja, da quina e do lado direito da região transitória até se juntarem e formarem

um “canal de escoamento”. Ampliando ainda mais o detalhe da figura 7.21, figura 7.23, pode-se visualizar diversos carbonetos e a severidade da abrasão causada pelos mesmos: formam-se sulcos profundos, de largura semelhante ao diâmetro dos carbonetos, desgastando a ferramenta.

Para finalizar a seqüência de figuras que ilustram o início do desgaste da ferramenta tem-se a figura 7.24, onde o detalhe da figura 7.21 é aumentado em 8000x: ao lado dos sulcos encontra-se um carboneto e também um vazio deixado pelo arrancamento de um outro carboneto.

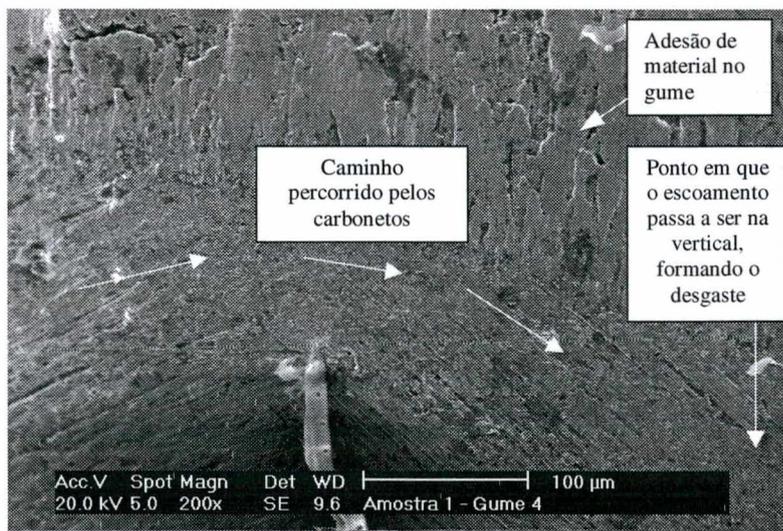


Figura 7.22 - Aumento de 200x do detalhe da figura 7.21, Gume 04 do inserto TSV36.

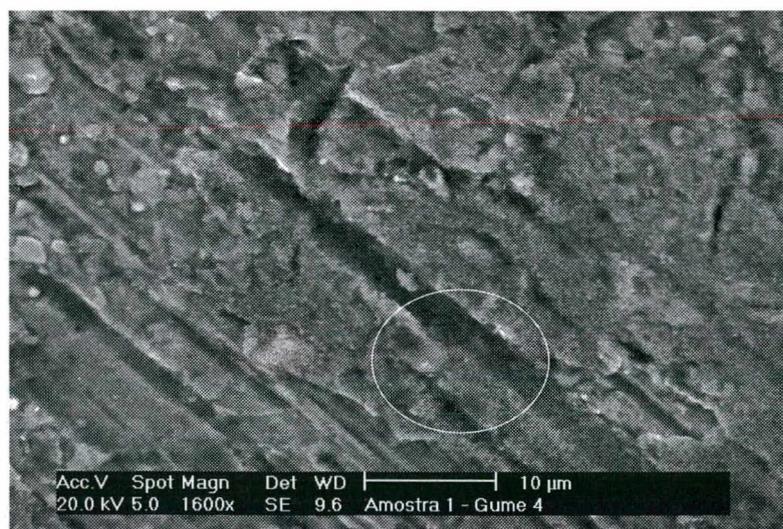


Figura 7.23 - Aumento de 1600x do detalhe da figura 7.21, marcas de desgaste por abrasão.

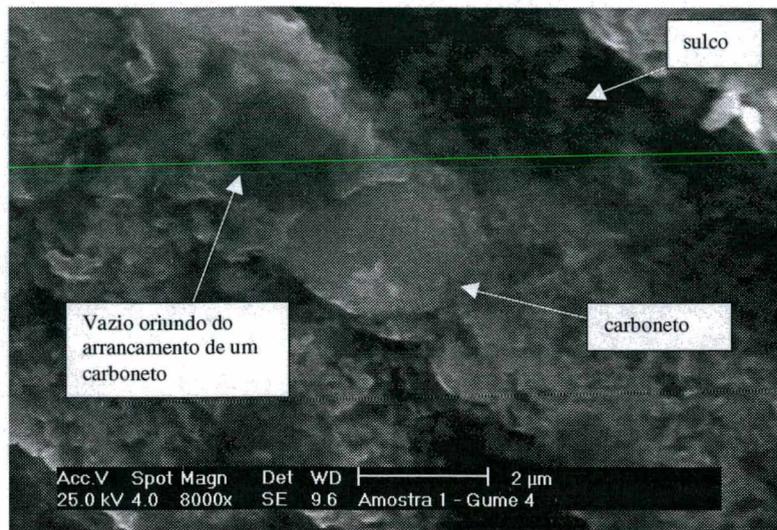


Figura 7.24 - Carboneto presente na matriz do gume 04, detalhe da figura 7.21, 8000x.

Ao ensaiar o primeiro gume de um outro inserto igual ao TSV36, no caso o TSV68, verificou-se a ocorrência daquele mesmo desgaste atípico próximo à quina, conforme ilustra a figura 7.25. Na figura 7.27 são apresentadas as curvas de desgaste dos gumes 1 e 4 deste inserto TSV68, dureza de 839 Hv30, o qual também foi temperado a 1210°C e revenido a 560°C. O gume 1 teve uma vida de 40 minutos, sendo que nos primeiros cinco minutos observou-se a formação acentuada de adesão sobre o mesmo e também que o desgaste estava ocorrendo próximo à quina da ferramenta. O colapso ocorreu devido à destruição total da mesma.

A partir das constatações que surgiram após os ensaios realizados com o inserto TSV36 e pela repetibilidade das mesmas com o ensaio do primeiro gume do inserto TSV68, suspeitou-se de que o baixo tempo de vida estivesse relacionado com o acabamento superficial, onde: no flanco as marcas de acabamento estavam na horizontal enquanto que na quina estas estavam na vertical.

Em decorrência dessa suspeita, decidiu-se melhorar o acabamento naquela região para amenizar a transição decorrente da mudança de direção de afiação. Então, por meio de um lixamento manual, primeiramente com lixa 400 e posteriormente com lixa 600, realizou-se o

pretendido (ver figura 7.26) isto com o quarto gume do inserto TSV68. Este gume, devidamente melhorado, teve uma vida de 70 minutos, conforme apresentado na figura 7.27. Além do aumento no tempo de vida, o desgaste ocorreu de forma típica, figura 7.28, onde o entalhe de flanco VB_N voltou a surgir e a quina da ferramenta não foi destruída. Nos primeiros 30 minutos de usinagem observou-se que o desgaste foi mais uniforme em relação ao gume 1. A primeira alteração significativa notada deu-se aos 45 minutos quando foi verificada uma piora no acabamento superficial do material usinado, o que se repetiu aos 65 minutos. Nos 5 minutos seguintes de ensaio surgiram indícios de fim de vida do gume, tais como ruído, desgaste excessivo no gume secundário e um péssimo acabamento da superfície usinada. Deve-se salientar que todas estas observações são típicas de quando o desgaste ocorre de forma correta, diferentemente de quando a ferramenta pouco dura devido à repentina destruição de sua quina.

Através dos resultados acima citados, verificou-se que alterações na direção de afiação reduzem consideravelmente o tempo de vida da ferramenta.

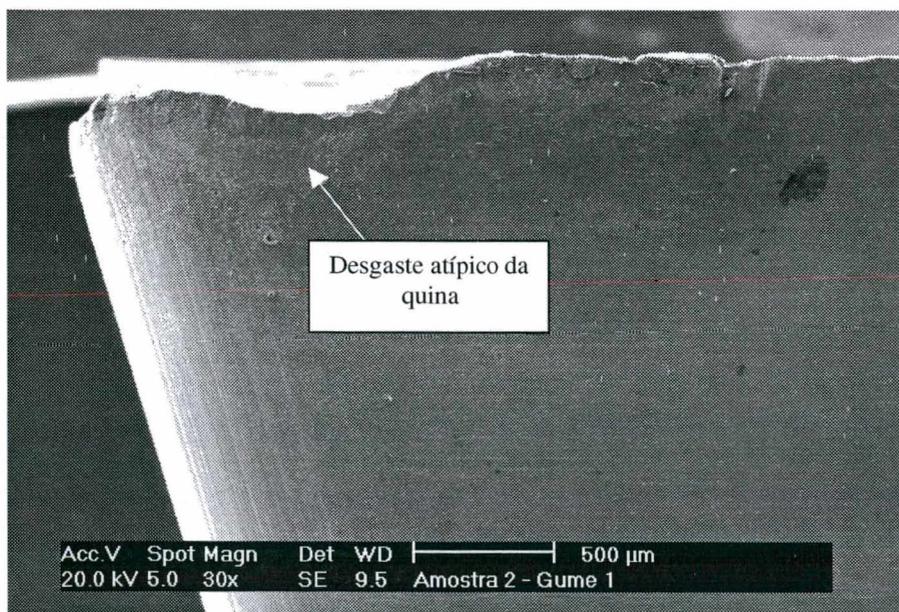


Figura 7.25 - Desgaste atípico próximo a quina do gume 01 do inserto TSV68, aumento de 30x.

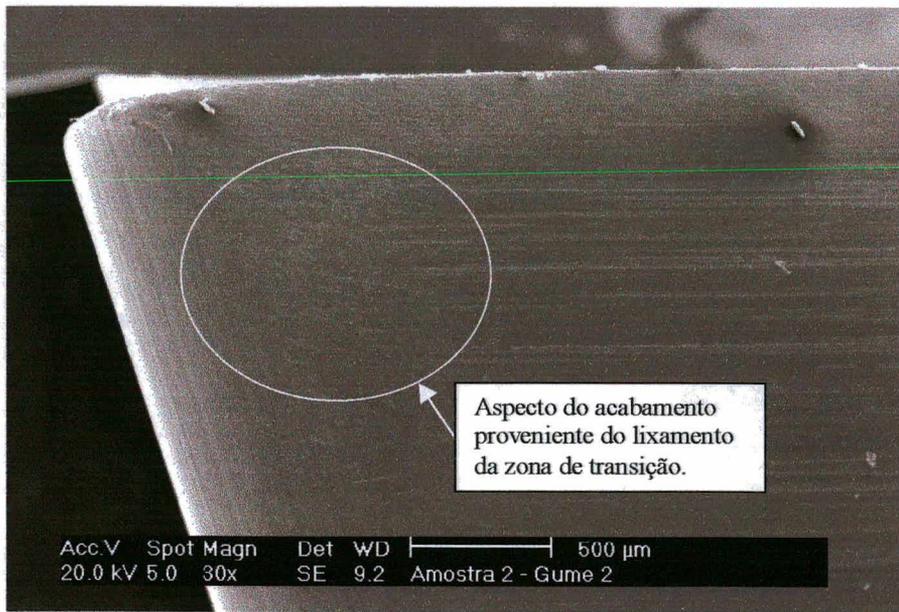


Figura 7.26 - Aspecto devido ao lixamento do quarto gume do inserto TSV68, exibindo a zona de transição (detalhe), aumento de 30x.

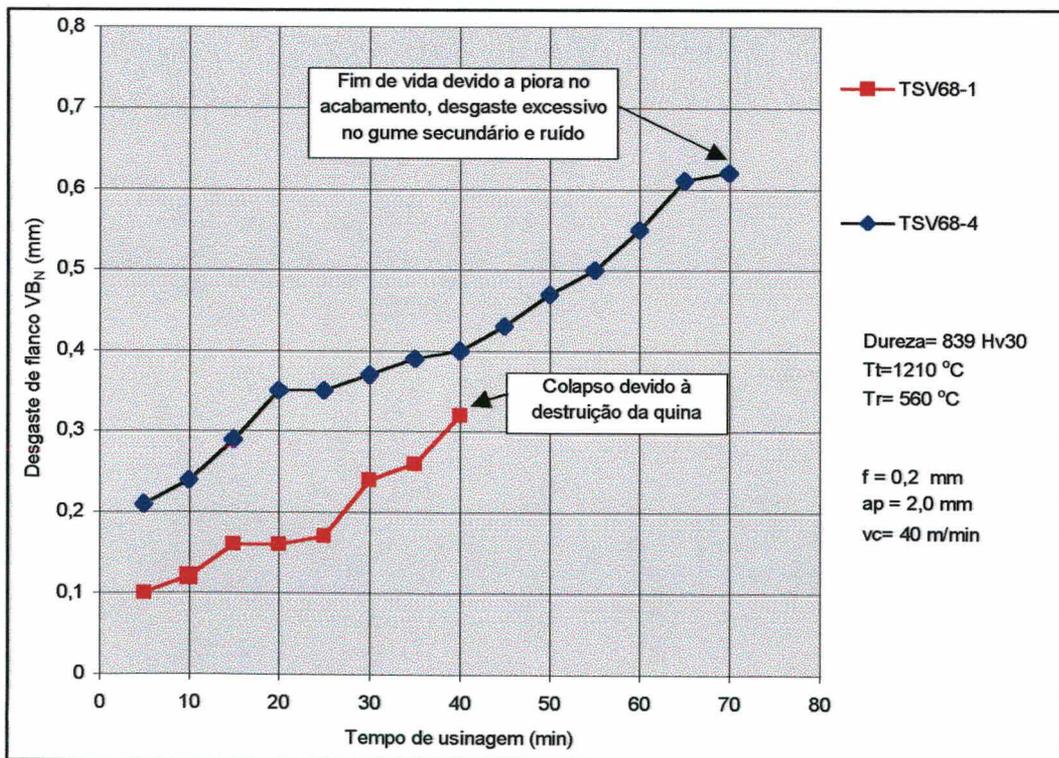


Figura 7.27 - Curvas de desgaste dos gumes 1 e 4 do inserto TSV68, velocidade de 40 m/min.

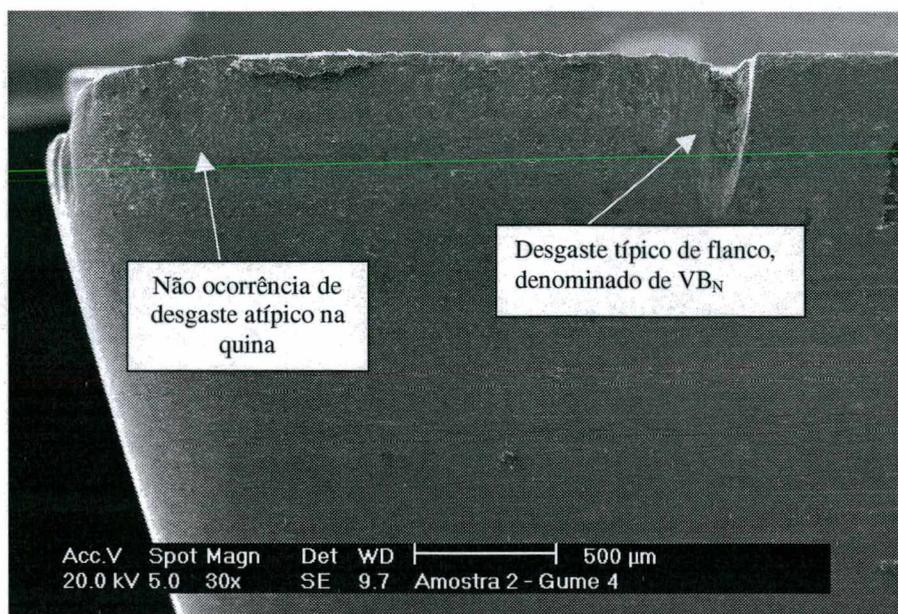


Figura 7.28 - Gume 04, flanco principal (desgaste VB_N), aumento de 30x.

Antes da produção deste lote de insertos para teste em campo e dos problemas oriundos da afiação constatados neste item 7.5, foi atingido o tempo de vida de 60 minutos com o inserto TSV83, afiado nas dependências do USICON – UFSC, sem raio de quina e de mesmo tratamento térmico que os insertos TSV36 e TSV68.

Esperava-se que os insertos escolhidos aleatoriamente do lote produzido pela HURTH-Infer durassem no mínimo esse mesmo tempo. Somente após as melhorias no acabamento do quarto gume do inserto TSV68 é que isto foi possível.

A figura 7.29 mostra que este gume durou 70 minutos contra os 60 minutos da ferramenta TSV83 e que as curvas de desgaste de ambas apresentam evoluções semelhantes. Com isso, verificou-se que o método de afiação empregado pela indústria HURTH-Infer, especificamente para os insertos desenvolvidos nesta pesquisa, estava implicando na diminuição da vida dos mesmos. Talvez, mudanças na direção de afiação em outros tipos de ferramentas, como por exemplo brocas, brochas e fresas, também reduzam consideravelmente a vida das mesmas, fato este que carece de investigação.

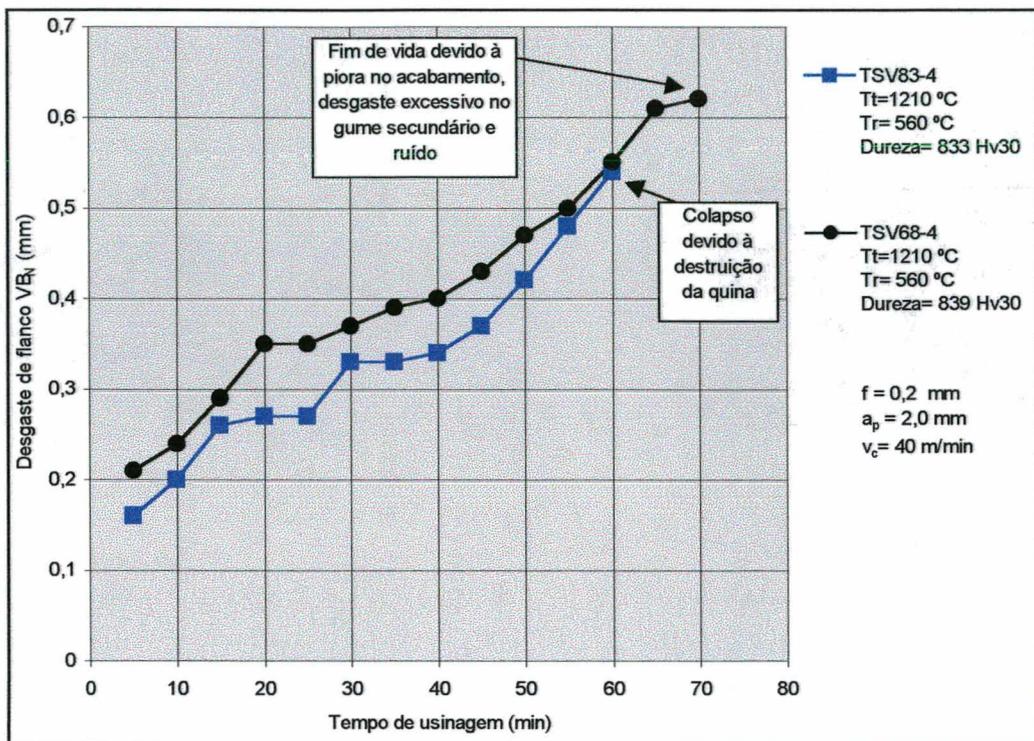


Figura 7.29 - Curvas de desgaste dos insertos TSV68-4 e TSV83, velocidade de 40 m/min.

O bom resultado obtido com a melhoria no acabamento do quarto gume do inserto TSV68 precisava ser comprovado. Para tal, repetiu-se os mesmos procedimentos de lixamento anteriormente citados para o seu terceiro gume. No flanco principal e secundário conseguiu-se minimizar bastante as diferenças nas linhas de afiação, conforme ilustram as figuras 7.30 e 7.31. Nestas figuras também pode-se visualizar que a melhoria no acabamento ocorreu apenas em um pequeno trecho do flanco, justamente na região de transição da direção de afiação. Com isso, o restante do flanco que participa da usinagem não foi alterado, sendo perceptíveis as marcas decorrentes da afiação que é comumente realizada pelas indústrias fabricantes de ferramentas. Com este procedimento, apenas evitou-se a influência de diferentes direções de afiação no mecanismo de desgaste dos insertos. Este gume teve uma vida de 70 minutos e atingiu um desgaste de flanco VB_N , típico, de 0,67 mm, figura 7.32. Seu fim-de-vida ocorreu pela

combinação desse desgaste que atingiu o valor entre 0,6 e 0,8 mm e pelo aumento da potência exigida pelo corte, verificada no indicador de potência da máquina. Estatisticamente este gume teve o mesmo comportamento do terceiro gume, ou seja, ocorreu repetibilidade dos resultados com a melhoria do acabamento na região de transição de afiação entre o flanco e a quina.

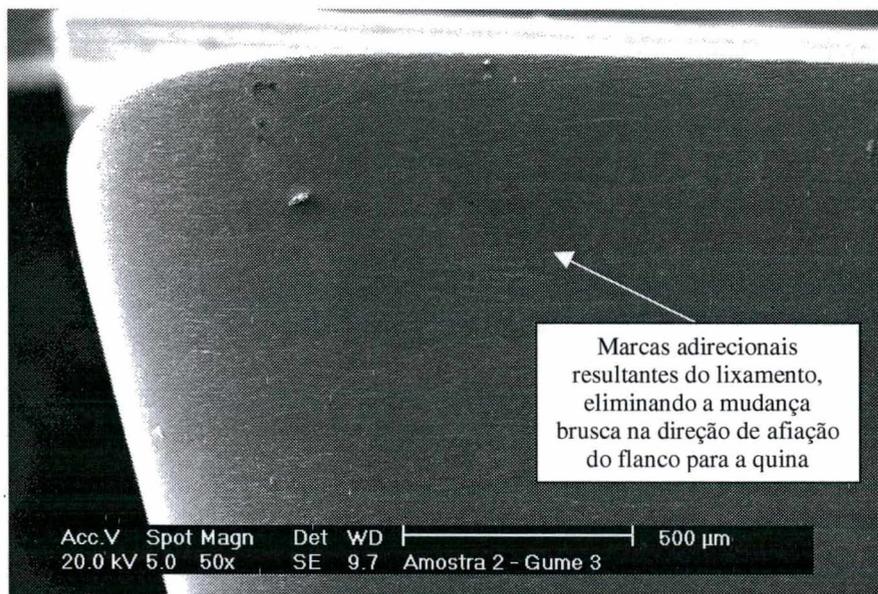


Figura 7.30 - Melhoria do acabamento do terceiro gume do inserto TSV68, aumento de 50x.

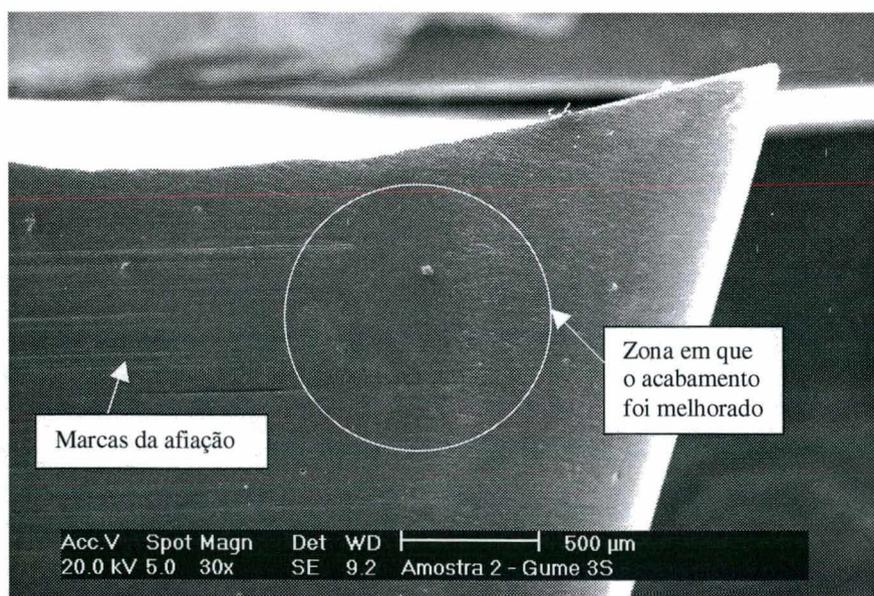


Figura 7.31 - Flanco secundário do terceiro gume do inserto TSV68, aumento de 30x.

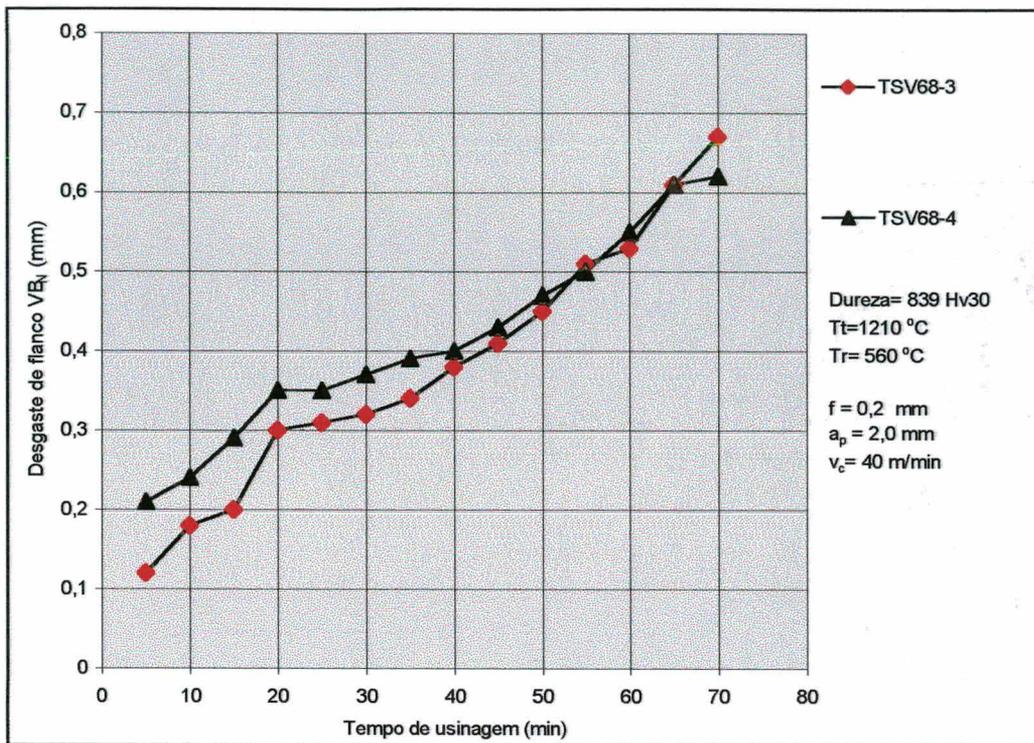


Figura 7.32 - Curvas de desgaste dos gumes 3 e 4 do inserto TSV68, velocidade de 40 m/min.

Com isso, deu-se por concluído este estudo sobre os insertos de aço rápido sinterizado a vácuo. Espera-se que este trabalho venha a contribuir com os pesquisadores que tenham interesse sobre o assunto abordado, uma vez que os objetivos propostos foram alcançados e exaustivamente estudados. Os principais resultados obtidos, bem como as sugestões para futuros trabalhos, são apresentadas no próximo capítulo.

A figura 7.33 ilustra o inserto desenvolvido nesta pesquisa, recoberto com TiN e montado no suporta da Sandvik. Pode-se observar nitidamente a geometria do quebra-cavacos. Em relação ao desenho apresentado na figura 7.9, através do qual este inserto foi produzido, a única diferença está no final do quebra-cavacos, onde no desenho este é finalizado em “v”. Havia a possibilidade dessa alteração em função da maneira como seriam afiados os quebra-cavacos, o que está escrito no próprio desenho da figura 7.9.

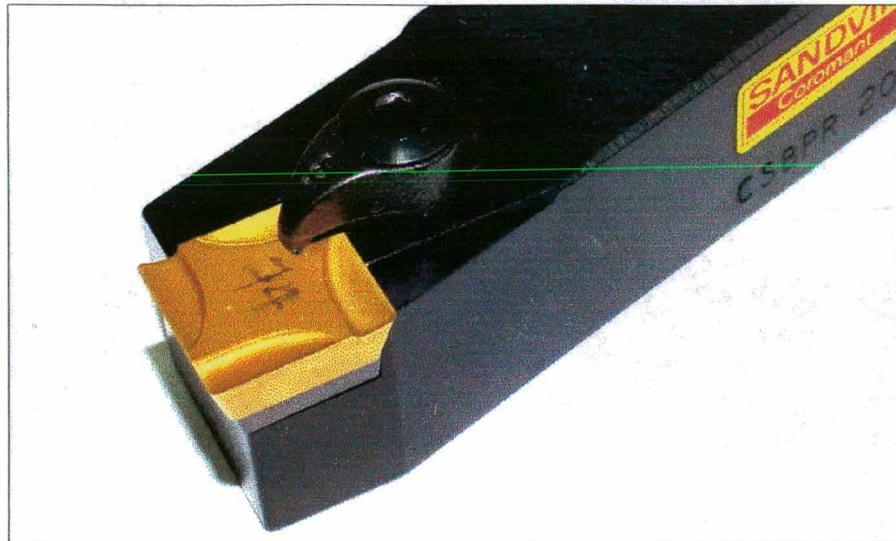


Figura 7.33 – Foto do inserto de aço rápido T15 sinterizado a vácuo, revestido com TiN, desenvolvido na presente pesquisa, montado no suporte SANDVIK CSBPR 2020K 12.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

8.1 - Conclusões

As indústrias, para se manterem competitivas no mercado globalizado, precisam estar sempre inovando seus produtos e aperfeiçoando os seus meios de produção. Os processos de usinagem merecem atenção especial nesse contexto, pois direta ou indiretamente encontram-se presentes na fabricação de uma infinidade de produtos consumidos no mundo todo. Para tal, existe uma busca constante no aperfeiçoamento das ferramentas de usinagem, as quais precisam ter alto desempenho, maior durabilidade e confiabilidade. Este aperfeiçoamento envolve o desenvolvimento de novos materiais, melhoria da geometria e dos processos de fabricação que venham a proporcionar ferramentas com elevado acabamento nos flancos e na face.

Este trabalho, que teve como enfoque o estudo do aço rápido AISI T15, permitiu comprovar que o processo de sinterização com fase líquida (SV) desse aço mostra-se como uma boa alternativa para a fabricação de ferramentas de aço rápido. Este resultado foi possível com o estudo da influência dos ângulos e do quebra-cavacos no desempenho dos insertos produzidos por este processo e empregados, nesta pesquisa, como ferramentas de corte.

Destaca-se que o possível insucesso no desempenho de uma ferramenta de aço rápido não deve ser atribuído exclusivamente ao material e ao tratamento térmico sem que seja verificada a influência de outras variáveis, tais como a maneira como esta foi afiada.

Complementando, foram obtidos os seguintes resultados referentes aos objetivos estabelecidos no capítulo 2:

1º) Com relação à influência do processo de sinterização e do tratamento térmico sobre a vida das ferramentas de aço rápido concluiu-se que:

- A resistência mecânica dos insertos de aço rápido depende diretamente da combinação adequada das temperaturas de tratamento térmico, têmpera e revenimento, a qual varia de um processo de sinterização para outro. Dentro de um mesmo processo pode haver variação desta combinação em função da liga a ser sinterizada, da compactação do pó (resistência a verde) e da temperatura de sinterização. Se o material não for bem compactado ele não terá uma suficiente resistência a verde e, conseqüentemente, o tratamento térmico não proporcionará resistência mecânica adequada à ferramenta;
- A combinação de temperaturas de têmpera e revenimento, respectivamente, de 1210 °C e 540 °C, quando comparada com as combinações de 1210/560 °C e 1160/540 °C, proporciona maior dureza às ferramentas de aço rápido T15 obtidas pela técnica de sinterização a vácuo (SV), porém, diminui consideravelmente a resistência ao desgaste das mesmas quando empregadas no torneamento em corte contínuo. Este mesmo resultado foi obtido na pesquisa realizada por Santos (1999), que empregou bits de aço rápido T15 produzidos pela técnica de prensagem isostática a quente (HIP);
- Não se constatou uma diferença significativa entre a vida dos insertos tratados a 1210/560 °C e aqueles tratados a 1160/540 °C, bem como entre suas durezas. Ao contrário, Santos (1999) havia concluído que dentre as três combinações de temperaturas de tratamento térmico (1160/540 °C, 1210/540 °C e 1210/560 °C) nas quais as ferramentas foram tratadas, a de 1210/560 °C foi a mais adequada. Nesta combinação a ferramenta ficou com uma dureza de 802 HV30, valor este intermediário aos obtidos a 1160/540 °C e 1210/540 °C, respectivamente, de 780 HV30 e 830 HV30, mas teve maior tempo de vida e um menor desgaste. Em termos percentuais, isto significa que de uma combinação de tratamento térmico para outra a diferença de dureza foi superior a 2,5%. O verificado na presente pesquisa deve-se ao fato de que o inserto

tratado a 1210/560 °C ficou com uma dureza próxima daquela apresentada pelo inserto tratado a 1210/540 °C, respectivamente, de 833Hv30 e 836 Hv30, e superior em 30 pontos à obtida com a combinação de 1160/540°, que foi de 803 Hv30. Em termos percentuais significa que a diferença de dureza entre as combinações de 1210/540 °C e 1210/560 °C foi inferior a 0,5% e entre as combinações de 1210/560 °C e 1160/540 °C foi de 3,6%. Com isso, constata-se que uma variação acima de 15 pontos na dureza Vickers, aproximadamente 1,25%, é expressiva para as ferramentas de aços rápidos. Este fato também foi constatado na pesquisa realizada por Bolton (1996), que acrescentou 8% de TiN, partícula muito dura, na composição de uma liga de aço rápido e obteve um aumento de apenas 20 pontos na dureza Hv30 desse material, porém este aumento reduziu pela metade a tenacidade da mesma.

- Segundo Ambrózio et. al (1996), a sinterização a vácuo (SV) com fase líquida gera um material com microestrutura mais grosseira e grãos irregulares quando comparada com a técnica de sinterização que envolve a prensagem isostática a quente (HIP). Nesta última, em decorrência da atomização do pó ser a gás, as partículas são finas e arredondadas, o que, teoricamente, deveria proporcionar maior resistência ao desgaste às ferramentas. Na presente pesquisa, onde a usinagem ocorreu com corte contínuo, a irregularidade e os carbonetos maiores decorrentes da sinterização a vácuo proporcionaram uma maior vida às ferramentas do que aquela microestrutura regular e com carbonetos menores obtidos pela prensagem isostática a quente.

2º) Com relação à influência da geometria da ferramenta de aço rápido, ângulos e quebra-cavacos, sobre sua vida, concluiu-se que:

- A otimização da geometria de uma ferramenta de corte depende de vários fatores, tais como: das condições em que a ferramenta será empregada (corte a seco ou não); do material que será usinado; da potência e rigidez da máquina-ferramenta; do tipo de fixação da ferramenta. Associar todos estes fatores não é tarefa fácil, além do que não existe um modelo para tal e nem

mesmo um roteiro que possa ser aplicado indistintamente. Sugere-se que, a partir de uma ferramenta já existente e aplicável em uma operação semelhante à pretendida, sejam realizadas as devidas alterações e, após, executados os experimentos para verificar os efeitos dessas alterações. Este procedimento foi adotado nesta pesquisa. O resultado final foi a obtenção, com sucesso, de insertos de aço rápido T15 sinterizados a vácuo, utilizáveis no suporte comercial CSBPR 2020K 12 para insertos de metal duro, que permitiram o emprego de velocidades de corte na faixa de 33 m/min a 50 m/min, corte a seco do aço ABNT 1045 trefilado, com profundidade de corte de 2,0 mm e avanço de 0,2 mm. A vida das ferramentas, neste caso, encontram-se na faixa de, respectivamente, 180 a 10 minutos.

- O aço rápido é muito utilizado na produção de ferramentas de geometrias específicas e mais complexas, em que outros materiais como o metal duro e a cerâmica não são apropriados. Em função disso, muitas pesquisas estão sendo realizadas para aprimorar as ligas de aços rápidos. Porém, no decorrer do presente trabalho, através da leitura de diversos artigos e revistas Nacionais e Internacionais sobre o assunto, verificou-se que não existe uma padronização tanto do tipo de ferramenta a ser produzida para a realização dos experimentos quanto do próprio procedimento experimental. O problema já inicia na afiação, onde é difícil conseguir a devida repetibilidade, o que prejudica a obtenção de resultados consistentes em uma pesquisa. Com esta concepção de inserto de aço rápido sinterizado, pode-se alterar as composições químicas das ligas e depois sinterizá-las já na geometria e com acabamento próximos ao final. Deste modo, reduz-se uma série de variáveis decorrentes da afiação, tais como o aquecimento excessivo em determinadas regiões da ferramenta e a diferença na geometria e nas dimensões entre ferramentas de um mesmo lote experimental. Isto também facilitará a aplicação e análise do efeito de revestimentos com camadas mais duras (TiN, TiC e TiAl) em ferramentas de aço rápido sinterizado, abrindo oportunidades para o estudo do efeito desses revestimentos sobre a vida de ferramentas de aço rápido sinterizado;

- O inserto de aço rápido deve ter sua geometria muito bem otimizada, pois pequenas alterações tanto em seus ângulos como na forma de seus quebra-cavacos alteram as condições de corte. Um quebra-cavacos com profundidade acentuada associado a um ângulo de incidência α , também acentuado, fragiliza a cunha da ferramenta, ou seja, diminui o ângulo de cunha β . Em contrapartida, o ângulo de incidência α muito pequeno gera atrito entre o flanco e a superfície transitória da peça. Este fato, associado a um quebra-cavacos com pequena profundidade, ângulo de saída pequeno, faz com que aumente a temperatura durante a usinagem, podendo ultrapassar a temperatura de amolecimento da ferramenta.

- O raio de curvatura do cavaco gerado depende também da largura e da profundidade do quebra-cavacos. Um quebra-cavacos com pouca largura tende a proporcionar cavacos de pequeno raio de curvatura, revenidos, resultando no rápido aquecimento da ferramenta e levando-a ao colapso em poucos minutos (ou até mesmo segundos). Uma largura excessiva gera cavacos com diâmetros maiores, o que significa maior tempo de contato entre o cavaco e a ferramenta, ocasionando, também, seu aquecimento;

- Através das observações que ocorreram durante o desenvolvimento da geometria dos insertos de aço rápido T15 sinterizado a vácuo, conclui-se que o quebra-cavacos deve ter profundidade de 0,4 mm e largura de 3,3 mm e os ângulos devem ser de 15° para o ângulo de incidência e 58° para o ângulo de cunha. Quando montado no suporte, o ângulo de incidência passa a ser de 7° . Estes valores referem-se à ferramenta quando utilizada na usinagem do aço ABNT 1045 trefilado e nas condições de corte empregadas nesta pesquisa.

3º) Com relação à influência da afiação da ferramenta de aço rápido sobre sua vida, concluiu-se que:

- A alteração da direção de afiação do flanco para a quina dos insertos provoca um desgaste prematuro e atípico justamente naquela região de mudança de direção. A vida dos

insertos diminuiu de 70 minutos para no máximo 40 minutos. Como o raio de quina foi feito em uma etapa posterior à afiação do flanco, além da direção ter sido alterada, a pressão de contato entre o rebolo e a superfície provavelmente também não foi a mesma, o que gerou um “canal de escoamento” dos carbonetos presentes na microestrutura do material, ocasionando o desgaste por abrasão. O desgaste que até então estava ocorrendo nos insertos se dava no ponto de transição entre o gume ativo da ferramenta e sua parte passiva, ou seja, onde a velocidade é maior;

- Através do lixamento, com lixa 400 e 600, daquela região de mudança de direção, o desgaste voltou a ocorrer de forma típica. A vida da ferramenta praticamente dobrou, retornando aos 70 minutos. Com isso, conclui-se que pequenos detalhes na afiação podem ser responsáveis pelo desempenho inadequado de uma ferramenta, o qual muitas vezes é atribuído ao seu material, processo de fabricação e tratamento térmico.

8.2 – Sugestões para Futuros Trabalhos

- O aço rápido é um material sensível ao efeito do tratamento térmico e também ao calor gerado pelo processo de retificação. Por isto, a padronização das ferramentas empregadas no estudo desse tipo de material é importante. Os insertos de aço rápido desenvolvidos nesta pesquisa servem como opção para tal, uma vez que os mesmos podem ser sinterizados próximo da geometria final, a qual é simples, e também porque possuem pequenas dimensões, diminuindo uma série de transtornos causados pelo tratamento térmico e pela retificação. Por exemplo, após a definição de uma liga de aço rápido produz-se, por sinterização, uma série de insertos, já próximo da geometria final, faz-se o tratamento térmico, a afiação e, a seguir, realizam-se os ensaios de torneamento utilizando um suporte comercial como o CSBPR 2020K12. Após os devidos estudos preliminares é que serão utilizadas ferramentas com geometria mais complexa,

como as brocas, alargadores, brochas, enfim, aquela ferramenta cujo custo de desenvolvimento e de fabricação é maior e mais complexo.

- Realizar ensaios de torneamento com insertos de aço rápido AISI T15 sinterizado a vácuo e com pastilhas de metal duro na usinagem tanto do aço ABNT 1045 trefilado como do aço ABNT 1045 laminado. Com isso, estudar o quanto os processos de obtenção do material, no caso a trefilação e a laminação, influenciam na vida das ferramentas empregadas para usiná-los.
- Afiar os insertos alterando a direção de afiação do flanco em relação à quina, com o intuito de estudar o quanto mudanças na direção de afiação influenciam na vida de uma ferramenta.
- Avaliar a influência do ângulo de incidência α_0 dos insertos nas forças de corte decorrentes do processo de torneamento. Para tal, produzir um lote de insertos com o quebra-cavacos de acordo com sugerido na presente pesquisa, e medir as forças de corte para cada valor do ângulo de incidência, variando-o de 11° até 15° , considerando estes valores para o inserto fora do suporte, o qual diminui este ângulo em 8 graus quando montada a ferramenta.
- Revestir estes insertos com TiN ou TiAl e executar ensaios de torneamento, na profundidade de corte de 2,0 mm e avanço de 0,2 mm, a seco, com aço ABNT 1045 trefilado, para verificar a velocidade de corte máxima, considerando uma vida representativa. Iniciar os ensaios na velocidade de 50 m/min.
- Estudar a influência da temperatura de revenimento sobre a vida de insertos de aço rápido sinterizado. Para tal, sugere-se que a temperatura de têmpera seja fixada em 1210°C e que a temperatura de revenimento inicie em 540°C , aumentando-a a cada 5° , até atingir 580°C . Para cada combinação de temperaturas de têmpera e revenimento realizar ensaios de torneamento, seguindo a metodologia apresentada neste trabalho, na velocidade de corte de 40 m/min, profundidade de corte de 2,0 mm e avanço de 0,2 mm. Com isso, serão obtidas curvas de

desgaste em função do tempo para cada condição de tratamento térmico. Repetir os ensaios com três diferentes insertos tratados na mesma combinação de temperaturas para obter um valor médio dos resultados. Realizar medições de dureza, HV30, para verificar a relação entre temperatura de revenimento, dureza e vida da ferramenta. Também, fazer análise metalográfica para acompanhar a evolução microestrutural decorrente de cada 5° de aumento na temperatura de revenimento. Nesta pesquisa, constatou-se que da temperatura de revenimento de 540 °C para a temperatura de 560 °C ocorre uma pequena variação de 2,5 % na dureza Hv30 das ferramentas de aço rápido mas que se traduz em uma acentuada variação nos seus desempenhos. O objetivo é investigar melhor a razão dessa diferença.

CAPÍTULO 9

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBROZIO, F.; OLIVEIRA, M. M.; RIBEIRO, O. C. S. – **Microestrutura e Propriedades de um Aço Rápido Sinterizado**. ABM – Associação Brasileira Metalurgia e Material, I semana de conformação, p.753 – 771, 1993.
- AMBROZIO, F.; LIMA, L. F. C. P.; NEVES, M. D. M.; NOGEIRA, R. A.; RIBEIRO, O. C. S. **Influência dos Tratamentos Térmicos nas Propriedades de Aços Rápidos Sinterizados AISI T15**. CONAMET IX - IV IBEROMET, p.379-390, 1996.
- AMBROZIO, F.; BOEHS, L.; FUNARO, R.; LIMA, L. F. C. P.; NEVES, M. D. M.; NOGEIRA, R. A.; RIBEIRO, O. C. S. **Avaliação da Resistência ao Desgaste dos Aços Rápidos AISI M2 e T15**. 13º CBECIMAT, 1998.
- ANSI/ASTM E 92 – 72. **Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials**, 1977.
- ARROYO, I. K.; KLEIN A. N.; PALMA, E. S. **Recentes avanços na Técnica de Liga na Metalurgia do Pó Ferrosa**. Anais do 7º Congresso Brasileiro de Eng. e Ciências dos Materiais (CBECIMAT), Florianópolis, S.C., p.357-361, Dez.1986.
- ARROYO, I. K.; KLEIN A. N. **Aços Sinterizados: Correlação entre as Propriedades Mecânicas**. Anais do 8º CBECIMAT, UNICAMP, Campinas , p. 22a 224, Dez.1988.
- ARROYO, I. K.; KLEIN A. N.; BLASS, A. **Homogeneização de Aços Sinterizados parte I - Homogeneização e Microestrutura**. IX Congresso de Engenharia Mecânica, Florianópolis, S.C., p. 1113-1115, Dez. 1987.

- ASM INTERNATIONAL. **Machining of Tool Steels**. ASM Specialty Handbook, p. 352-376, 1995.
- BAYER, A. M.; BECHERER, B. A. **High-Speed Tool Steels**. Metals Handbook ninth edition volume 16, p. 784-793, 1989.
- BOEHS, L.; CONSALTER, L.A.; FERREIRA, J.C. **Programa para Curso Básico de Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida, Banco de Dados de Usinagem e Organização de Ferramentas**. Florianópolis publicação interna, 240p, 1997.
- BOEHS, L. BORGES, R. **Metodologia do ensaio de usinagem para torneamento**. Florianópolis: Publicação interna GRUCON, 1980. 25 p.
- BOEHS, L. **Programa interno de treinamento de recursos humanos**. Campo Limpo, SP. KRUPP Metalúrgica, 1995.
- BOLTON, J. **Modern developments in sintered high speed steels**. MPR, 1996. P. 33-36.
- BRINKSMEIER, E.; BARTSCH, S. **Material characteristics and load types determine wear mechanisms**. West Germany, 1988. Anais do CIRP.
- CARVILHOS, H.; MARTINS, I. M.; OLIVEIRA M. M.; SANTOS M. – **Combined effects of sintering, hiping and heat treating parameter on the cutting properties of T15 HSS**. Modern Development in Powder Metall., V.19, In. Powder. Conference, Orlando-Florida, MPIF-APMF, 1988.
- CHIAVERINI, V. - **Aços e Ferros Fundidos** - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 6ª Edição, São Paulo, 1977.
- CRUCIBLE – **Data Sheet** – Catalogue of the Crucible Service Centers, Division of Crucible Materials Coporation, 1993.
- DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. - **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: mm editora, 1997.
- ERASTEEL. - **Product - information ASP 2023 and ASP 2030**. FEMAFE-SP, 1999.

- FERRARESI, D. - **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Blucher, 1977.
- GOMES, J. D. **Características da Usinabilidade de Aços Inoxidáveis Austeníticos SAE 304 e SAE 316 com a Variação dos Parâmetros Metalúrgicos**. Florianópolis, 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) UFSC, 105p.
- HITACHI, O.; MATSUDA, K.; SHIBATA, N. **Powdered High Speed Tool Steel**. European Patent Application, journal Auszuge Aus Den Europaischen Patentanmeldungen, volume nº 6, 1990.
- HUPPMANN, W.J; DALAL, K. **Metallographic Atlas of Powder Metallurgy**. Freiburg, West Germany: VERLAG SCHMID GMBH, P. O.B. 1722, 1986.
- ISO 3685 - INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Tool-Life Testing with Single Point Turning Tools**. Switzerland, 1977.
- KAR, P.K.; SAHA, B.P.; UPADHYAYA, G. S. **Properties of Sintered T15 and T42 High Speed Steels**. The International Journal of Powder Metallurgy, volume 29, nº 2, 1993.
- KANKAANPÄÄ, H.; KORHONEN, A. S. **Effects of cutting geometry in turning with TiN – coated tools**. Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 27. Nº 3. Pp. 305-310. Great Britain, 1987.
- KLEIN, A. N.; OBERACKER R.; THUMMLER F. **High Strength Sin-Mn - Alloyed Sintered steels - microstructure and mechanical properties**. Powder Metallurgy Internacional, vol.17 p. 13 - 16, 1987.
- KLEIN, A. N. Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 1999.
- KOIZUMI, M.; NISHIHARA, M. **ISOSTATIC PRESSING Technology and Applications**. ISBN 1-85166-596-X, p. 389. Barking: ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS LTD, 1991.
- KÖNIG, W. **Tecnologia da fabricação**. AACHEN, 1981. Tradução realizada pelo Prof. Dr. Walter I. Weingaertner.

- KÖNIG, W.; FRITSCH, R.; KAMMERMEIER, D. **New approaches to characterizing the performance of coated cutting tools.** Annals of the CIRP, 1992. Vol. 41.
- LENEL, V. FRITZ. **Metallurgy principles and applications.** Metal powder industries Federation, Princeton, New Jersey, Copyright, 1980.
- LUCAS, E. O. **Análise da Influência da Modificação da Microestrutura do Aço Carbono AISI 1040 pela Técnica de Adição de Inclusões Metálicas de Bismuto.** Florianópolis, 1998. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- MALISKA, A. M. **Influência de elementos de liga e do oxigênio no processo nitretação por plasma em aços sinterizados.** Tese de Doutorado do Depto. de Engenharia Mecânica, Florianópolis, UFSC - Brasil. 1995.
- MARCONDES, C. F. **A História do Metal Duro. SANDVICK do Brasil,** 1ª edição, Unida Artes Gráficas e Editora Ltda. 234p., 1990.
- MARGERIE, J. C. **Facteurs metalurgiques de l'usinabilité des pièces en fonte.** Fonderie, nº 303, 1971.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments.** 4th edition ISBN 0-471-15746-5, QA279.M66, p. 703, 1996.
- OLIVEIRA, M. M.; RIBEIRO, O. C. S.; WRONSKI, A. S. **Processing of a high-Alloy High-Speed Steel Via Water Atomisation and Direct Sintering.** Journal Powder Metallurgy, vol. 25, nº 5, p. 215-218, 1993.
- OPTIZ, H.; KÖNIG, W. **On the Wear of Cutting Tools.** 7º L.M.T.D.R., 1996.
- PINNOW, K.E.; STASKO, W. **P/M Tool Steels -** Crucible Materials Corporation. The Metallurgical Society of AIME, 1990.
- RIGNEY, D.A. **Wear Resistance.** Metals Handbook ninth edition volume nº1, Properties and Selection: Iron and Steels, p. 597-638, 1978.

- ROSSO JUNIOR, R. S. U. **Determinação de Condições Otimizadas de Usinagem com Aplicação em Torneamento**. Florianópolis, 1995. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SANDEROW, Howard. **High temperature sintering**. New perspectives in powder metallurgy. vol. 9. Metal Powder Industries Federation Princeton. New Jersey, 1990.
- SANDVIK COROMANT. **Modern Metal Cutting**. A practical Handbook. 1 ed Dept. Technical Sandvik Coromant, 1994, 500 p.
- SANDVIK COROMANT. **Catálogo de ferramentas para torneamento**. SANDVIK COROMANT, 1995.
- SANTOS, R. S. **Ferramentas de Torneamento de Aço Rápido Sinterizado e Aços Rápidos Convencionais: Análise de Propriedades**. Florianópolis, 1999. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SIEGWARTH, O. **Higher Productivity with ASP Tooling Material** - Society of Manufacturing Engineers Technical Paper MF 81-137, p 1-22, 1981.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995. 249p.
- TAKIGAWA, H.; KAWAI, N. **Properties of High-Speed Steels Produced by Powder Metallurgy**. Powder Metallurgy fourth edition, volume 4, pgs 196-201, 1981.
- Tool and manufacturing engineers handbook. Dearborn: Society of manufacturing engineers, 1978. 4th edition. Vol.1.
- VAN VLACK, L.H. **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. Tradutor Edson Monteiro. Rio de Janeiro: Campus, 1984.

ANEXO 1

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS GRÁFICOS: "TESTE T" PARA DUAS AMOSTRAS
PRESUMINDO VARIÂNCIAS EQUIVALENTES.**

1 - Referente à figura 7.4: Curvas de desgaste dos bits TC06 e VK7' e do inserto TC75-1, v_c de 33 m/min, a_p de 2,0 mm e f de 0,2 mm.

	TC06	VK7'
Média	0,3	0,36631579
Variância	0,00905882	0,00479123
Observações	18	19
Variância agrupada	0,00686406	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	35	
Stat t	-2,4335406	
P(T<=t) uni-caudal	0,01009891	
t crítico uni-caudal	1,68957285	
P(T<=t) bi-caudal	0,02019781	
t crítico bi-caudal	2,03011041	

	TC06	TC75-1
Média	0,3628	0,59272727
Variância	0,01798767	0,02024935
Observações	25	22
Variância agrupada	0,01904312	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	45	
Stat t	-5,6997245	
P(T<=t) uni-caudal	4,3481E-07	
t crítico uni-caudal	1,67942744	
P(T<=t) bi-caudal	8,6962E-07	
t crítico bi-caudal	2,0141033	

2 - Referente à figura 7.8: Curvas de desgaste dos insertos TSV54-1 e TSV82-3, 33 m/min.

	TSV54-1	TSV82-3
Média	0,447813	0,399444
Variância	0,074966	0,031663
Observações	32	36
Variância agrupada	0,052002	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	66	
Stat t	0,873012	
P(T<=t) uni-caudal	0,192911	
t crítico uni-caudal	1,66827	
P(T<=t) bi-caudal	0,385822	
t crítico bi-caudal	1,996564	

3 - Referente à figura 7.10: Curvas de desgaste dos quatro gumes do inserto TC77

	TC77 2	TC77 4
Média	0,40363636	0,34357143
Variância	0,01252545	0,01571703
Observações	11	14
Variância agrupada	0,01432939	
Hipótese da diferença de média	0	
gi	23	
Stat t	1,24536746	
P(T<=t) uni-caudal	0,11276773	
t crítico uni-caudal	1,71387001	
P(T<=t) bi-caudal	0,22553547	
t crítico bi-caudal	2,06865479	

4 - Referente à figura 7.11: Curvas de desgaste dos quatro gumes do inserto TSV54.

Comparação até o tempo de 110 minutos de usinagem

	TSV54 1	TSV54 3
Média	0,29636364	0,29
Variância	0,03313853	0,02115238
Observações	22	22
Variância agrupada	0,02714545	
Hipótese da diferença de média	0	
gi	42	
Stat t	0,12810118	
P(T<=t) uni-caudal	0,44934016	
t crítico uni-caudal	1,68195129	
P(T<=t) bi-caudal	0,89868032	
t crítico bi-caudal	2,01808234	

5 - Referente à Figura 7.13: Curvas de desgaste do inserto TSV27, $v_c = 40$ m/min.

	TSV27 4	TSV27 2
Média	0,25272727	0,25666667
Variância	0,00852182	0,00302424
Observações	11	12
Variância agrupada	0,00564214	
Hipótese da diferença de média	0	
gi	21	
Stat t	-0,1256408	
P(T<=t) uni-caudal	0,45060567	
t crítico uni-caudal	1,72074351	
P(T<=t) bi-caudal	0,90121134	
t crítico bi-caudal	2,07961421	

6 – Referente à figura 7.15: Curvas de desgaste dos bits de aço rápido T15 prensado isostaticamente a quente (HIP), velocidade de 33 m/min.

	TC02	TC04
Média	0,318824	0,463529
Variância	0,008511	0,033512
Observações	17	17
Variância agrupada	0,021011	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	32	
Stat t	-2,9105	
P(T<=t) uni-caudal	0,003259	
t crítico uni-caudal	1,693888	
P(T<=t) bi-caudal	0,006519	
t crítico bi-caudal	2,036932	

TC02xTC06, até o tempo de 85 minutos.

	TC02	TC04
Média	0,318824	0,292353
Variância	0,008511	0,008507
Observações	17	17
Variância agrupada	0,008509	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	32	
Stat t	0,836639	
P(T<=t) uni-caudal	0,2045	
t crítico uni-caudal	1,693888	
P(T<=t) bi-caudal	0,409	
t crítico bi-caudal	2,036932	

7 – Referente à figura 7.16: Curvas de desgastes das ferramentas de aço rápido T15 (SV), $v_c = 40$ m/min.

	TSV54	TSV83
Média	0,425	32,5
Variância	0,02691818	325
Observações	12	12
Variância agrupada	162,513459	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	22	
Stat t	-6,1630774	
P(T<=t) uni-caudal	1,6685E-06	
t crítico uni-caudal	1,71714419	
P(T<=t) bi-caudal	3,337E-06	
t crítico bi-caudal	2,07387529	

8 – Referente à figura 7.27: Curvas de desgaste dos gumes 1 e 4 do inserto TSV68, velocidade de 40 m/min.

	TSV68_1	TSV68_4
Média	0,19125	0,325
Variância	0,00564107	0,00497143
Observações	8	8
Variância agrupada	0,00530625	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	14	
Stat t	-3,6722305	
P(T<=t) uni-caudal	0,00125587	
t crítico uni-caudal	1,76130925	
P(T<=t) bi-caudal	0,00251173	
t crítico bi-caudal	2,1447886	

9 – Referente à figura 7.29: Curvas de desgaste dos insertos TSV68-4 e TSV83, velocidade de 40 m/min.

	TSV83-4	TSV68-4
Média	0,330833	0,412857
Variância	0,012208	0,016022
Observações	12	14
Variância agrupada	0,014274	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	24	
Stat t	-1,74516	
P(T<=t) uni-caudal	0,046875	
t crítico uni-caudal	1,710882	
P(T<=t) bi-caudal	0,093751	
t crítico bi-caudal	2,063898	

10 – Referente à figura 7.32: Curvas de desgaste dos gumes 3 e 4 do inserto TSV68, velocidade de 40 m/min.

	TSV68_3	TSV68_4
Média	0,38357143	0,41285714
Variância	0,0279478	0,01602198
Observações	14	14
Variância agrupada	0,02198489	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	26	
Stat t	-0,5225679	
P(T<=t) uni-caudal	0,30284984	
t crítico uni-caudal	1,70561634	
P(T<=t) bi-caudal	0,60569968	
t crítico bi-caudal	2,05553079	

ANEXO 2**EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS****1 - Torno ROMI-MAZAK COSMUS 10U**

Fabricante: Indústrias ROMI S.A.

Rotação máxima da árvore: 4500 rpm

Potência: 10 kVA

Outras características: variação contínua tanto de velocidade quanto de avanço; dotado de um leitor de posição de ferramenta. A máquina possui um mostrador da potência consumida durante a usinagem, o qual auxilia na determinação do instante do colapso da ferramenta e serve como um indicativo da eficiência de corte da mesma.

2 – Porta-ferramenta

Fabricante: Sandvik Coromant

Modelo: CSBPR 2020K 12

Ângulo de direção do gume: $\chi_r = 75^\circ$

3 - Microscópio para medição de ferramentas

Fabricante: Leitz Wetzlar – Alemanha

Ampliação: 20x e 30x

Resolução dos tambores micrométricos: 0,01 mm

Resolução do giro da placa: 1'

4 - Durômetro

- Fabricante: Wesktoffprüfmaschinen

- Modelo: HPO 250

- Forças de pressão ajustáveis por botão de pressão para ensaios de dureza segundo a unidade Vickers de:

120 100 60 50 40 30 20 15 10 e 5 kp.

- Dispositivo para a projeção das impressões com objetivas permutáveis para ampliações de 35, 70 e 140 vezes.

- Possibilidade de projeção para impressões:

Até 3,2 mm \varnothing com ampliação de 35 vezes;

Até 1,6 mm \varnothing com ampliação de 70 vezes;

Até 0,8 mm \varnothing com ampliação de 140 vezes.

- Dispositivo para a medição de impressões com régua graduada e parafuso micrométrico.

5 - Paquímetro

Fabricante: Mitutoyo-Japão

Faixa de indicação: 0 a 300 mm

Resolução: 0,05 mm

6 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Marca: Philips

Modelo: XL30

ANEXO 3**PROGRAMA CNC**

N10 G21 G40 G90 G95
N20 G0 X200 Z265 T00 M5
N30 T0606
N40 G96 S40 M3
N50 G92 S2000
N60 G0 X50 Z265
N70 G71 U2 R2
N80 G71 P90 Q120 U0 W0 F0.2
N90 G0 X25
N100 G1 Z265 F0.2
N110 X25 Z35
N120 X50 Z25
N130 G0 X200 Z265 T00 M5
N140 M30