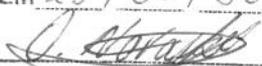


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

# FURAÇÃO EM LIGA DE TITÂNIO COM BROCAS HELICOIDAIS DE AÇO RÁPIDO

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR Carlos Cesar de  
Castro Deonizio E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 29/02/96.

  
\_\_\_\_\_  
ORIENTADOR

Autor : Carlos Cesar de Castro Deonizio

Orientador: Olívio Novaski

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

# **FURAÇÃO EM LIGA DE TITÂNIO COM BROCAS HELICOIDAIS DE AÇO RÁPIDO**

Autor : Carlos Cesar de Castro Deonísio

Orientador: Olívio Novaski

Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1996

S.P. - Brasil



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	7/UNICAMP
	D 44f
V.	E.
F.º DE	28219
PROC.	667/96
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
GABA	13/08/96
N.º CPD	00090910-4

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

D44f

Deonísio, Carlos Cesar de Castro

Furação em liga de titânio com brocas helicoidais de aço rápido / Carlos Cesar de Castro Deonísio.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Olívio Novaski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Usinagem. 2. Processos de fabricação.  
3. Ferramenta para cortar metais. 4. Metais - Corte.  
I. Novaski, Olívio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

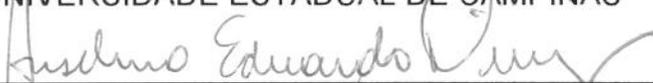
**Dissertação de Mestrado**

**FURAÇÃO EM LIGA DE TITÂNIO COM**  
**BROCAS HELICOIDAIS DE AÇO RÁPIDO**

Autor : Carlos Cesar de Castro Deonísio

Orientador: Olívio Novaski

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Olívio Novaski, Presidente  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Nehemias Lima Lacerda  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DA AERONÁUTICA

Campinas, 29 de fevereiro de 1996

## Dedicatória

Dedico este trabalho:

- aos meus pais, Luzia e Oscar, exemplos de trabalho e honestidade;
- à Alda, minha esposa, companheira de todas as horas;
- à Mariana, minha filha, esperança e renovação; e
- a todas as pessoas que utilizem as informações nele contidas.

## Agradecimentos

Este trabalho somente pôde ser concluído com a colaboração de diversas pessoas. Desejo expressar os meus agradecimentos:

- ao Prof. Dr. Olívio Novaski, pela orientação e ensinamentos durante todo o decorrer do trabalho;
- à Indústria e Comércio TWILL S.A., que forneceu as brocas e permitiu que fossem utilizadas as máquinas e equipamentos do seu Centro de Pesquisa, na pessoa do Eng. Guy Cliquet do Amaral Filho, pelas preciosas informações e diálogos, e do técnico Nilson, pela presteza e dedicação à realização dos ensaios;
- à EMBRAER, que usina peças de Ti-6Al-4V, e forneceu a matéria prima para a confecção dos corpos de prova, na pessoa do Eng. Júlio Cícero Cunha, pelo empenho e disposição em transmitir a sua experiência na usinagem desta liga;
- ao CTA, pela realização dos ensaios de verificação da matéria prima, e pela cessão dos equipamentos para coleta e análise de dados, na pessoa dos engenheiros Duque, Mário, Olivério, Samir e dos técnicos Agápito, Moacir e Saulo pela confecção dos corpos de prova e dispositivos;
- a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho, e
- a DEUS, responsável por tudo.

## Sumário

Lista de figuras -----	I
Lista de tabelas -----	VI
Nomenclatura -----	VII
Resumo -----	XI
Abstract -----	XII
Capítulo 1	
Introdução -----	1
Capítulo 2	
Revisão da Literatura	
2.1 - Propriedades da Liga Ti-6Al-4V -----	3
2.1.1 - Composição Química -----	4
2.1.2 - Propriedades Físicas -----	6
2.1.3 - Metalurgia Geral -----	7
2.2 - Características de Usinabilidade do Titânio e suas Ligas -----	8
2.2.1 - Formação do Cavaco e Efeito das Condições de Corte -----	11
2.2.2 - Mecanismos de Desgaste -----	13
2.2.3 - Problemas de Usinabilidade -----	16
2.2.4 - Análise dos Materiais para Ferramenta -----	18
2.3 - Tipos de Afiadoes -----	20
2.3.1 - Afiado Convencional -----	21
2.3.2 - Afiado Cruzada -----	22
2.3.3 - Afiado Helicoidal ("Helical") -----	22

2.3.4 - Afiação "Racon" ou de Ponta Radial-----	23
2.3.5 - Afiação "Bickford" -----	24
2.4 - Tipos de Perfil de Brocas Helicoidais-----	25
2.4.1 - Perfil do Cabo-----	25
2.4.2 - Perfil do Comprimento de Corte -----	25
2.4.3 - Perfil da Seção Transversal, [MASUHA, 1980] -----	26

### Capítulo 3

#### Metodologia Científica

#### 3.1 - Material Empregado

3.1-1 - Material ensaiado -----	29
3.1-2 - Material das brocas helicoidais -----	31
3.1-3 - Fluido de corte -----	32
3.2 - Equipamentos e Instrumentos -----	33
3.3 - Métodos Experimentais	
3.3-1 - Preparação dos corpos de prova-----	35
3.3-2 - Fase I -----	38
3.3-3 - Fase II - Parte 1 -----	46
3.3-4 - Fase II - Parte 2 -----	52

### Capítulo 4

#### Resultados e Discussões

4.1 - Fase I -----	53
4.1-1 - Comportamento dos esforços de corte durante a Fase I -----	53
4.1-2 - Erro dimensional dos furos obtidos durante a Fase I-----	58
4.1-3 - Evolução dos desgastes VB e VBQ durante a Fase I-----	61
4.1-4 - Observação da forma do cavaco durante a Fase I-----	63

4.2 - Fase II - Parte 1	
4.2-1 - Comportamento dos esforços de corte durante a Fase II - Parte1 -----	70
4.2-2 - Erro dimensional dos furos obtidos durante a Fase II - Parte1 -----	72
4.2-3 - Observação da forma do cavaco durante a Fase II - Parte1 -----	73
4.3 - Fase II - Parte 2	
4.3-1 - Comportamento dos esforços de corte durante a Fase II - Parte2 -----	82
4.3-2 - Comportamento dos desgastes VB e VBQ durante a Fase II - Parte2 -----	92
4.3-3 -Desvio dimensional do furo durante a Fase II - Parte2 -----	104

## Capítulo 5

### Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.1 - Fase I -----	111
5.2 - Fase II -----	112

Referências Bibliográficas-----	114
---------------------------------	-----

### Anexo

Afiação NAS P3 -----	118
Afiação NAS P9 -----	119

## Lista de Figuras

- 2.1 a, b e c - Processo de produção de cavaco com formato de dentes de serra, típico da liga Ti-6Al-4V: a) para baixas velocidades; b) para altas velocidades; c) representação esquemática da formação do cavaco. [SHAW, 1993].
- 2.2 - Geometria da afiação convencional
- 2.3 - Geometria da afiação cruzada
- 2.4 - Geometria da afiação helicoidal
- 2.5 - Geometria da afiação "Racon"
- 2.6 - Geometria da afiação "Bickford"
- 2.7 - Grupos de perfis [MASUHA, 1980].
- 3.1a e b - Resultado do ensaio metalográfico da liga Ti-6Al-4V, realizado de acordo com a norma ASTM E 113.
- 3.2a e b - Resultado do ensaio metalográfico do aço rápido ABNT M42, realizado de acordo com a norma ASTM E 113.
- 3.3 - Forma dos CDPs utilizados nos ensaios.
- 3.4 - Vista parcial da confecção dos corpos de prova no torno mecânico.
- 3.5a - Vista parcial dos equipamentos utilizados nos ensaios.
- 3.5b - Vista parcial do dinamômetro utilizado nos ensaios.
- 3.6 - Ferramenta com a afiação tipo "Helical".
- 3.7 - Ferramenta com a afiação tipo "Racon".
- 3.8 - Ferramenta com a afiação tipo "Bickford".
- 3.9 - Ferramenta com a afiação tipo cruzada NAS P3 [NAS 907, 1986].
- 3.10 - Ferramenta com a afiação tipo cruzada NAS P9 [NAS 907, 1986].
- 3.11 - Perfil da seção transversal número 3 e número 6, conforme a classificação de Masuha, [MASUHA, 1980].

- 3.12 - Perfil da seção transversal número 9 e número 13, conforme a classificação de Masuha, [MASUHA, 1980].
- 3.13 - Perfil N° 9, com a afiação tipo "Helical".
- 3.14 - Perfil N° 13, com a afiação tipo "Helical".
- 4.1 - Momento de torção ( $M_t$ ) em função da variação da velocidade de corte, com o avanço igual a 0,100 mm/rot, para vários tipos de afiação.
- 4.2 - Momento de torção ( $M_t$ ) em função da variação do avanço, com a velocidade de corte igual a 11,05 m/min, para vários tipos de afiação.
- 4.3 - Força de avanço ( $F_f$ ) em função da variação da velocidade de corte, com o avanço igual a 0,100 mm/rot, para vários tipos de afiação.
- 4.4 - Força de avanço ( $F_f$ ) em função da variação do avanço, com a velocidade de corte igual a 11,05 m/min, para vários tipos de afiação.
- 4.5 - Erro dimensional (alargamento) em função da variação da velocidade de corte, com o avanço igual a 0,100 mm/rot, para vários tipos de afiação.
- 4.6 - Erro dimensional (alargamento) em função da variação do avanço, com a velocidade de corte igual a 11,05 mm/rot, para vários tipos de afiação.
- 4.7 - Variação do desgaste na aresta principal do corte (VB).
- 4.8 - Variação do desgaste na aresta transversal (VBQ).
- 4.9 - Variação da forma do cavaco para afiação do tipo "Helical".
- 4.10 - Variação da forma do cavaco para afiação do tipo "Racon".
- 4.11 - Variação da forma do cavaco para afiação do tipo "Bickford".
- 4.12 - Variação da forma do cavaco para afiação do tipo NAS P3.
- 4.13 - Variação da forma do cavaco para afiação do tipo NAS P9.
- 4.14 - Adesão de material sobre a guia da broca, próximo a ponta de corte, observada para a afiação NAS P3.
- 4.15 - Momento de torção em função da variação do avanço para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.16 - Força de avanço em função da variação do avanço para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.17 - Erro dimensional (alargamento), em função da variação do avanço para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.18 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,100 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 9.

- 4.19 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,100 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 13.
- 4.20 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,122 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 9.
- 4.21 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,122 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 13.
- 4.22 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,150 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 9.
- 4.23 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,150 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 13.
- 4.24 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,200 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 9.
- 4.25 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,200 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 13.
- 4.26 - Variação do momento de torção em função do número de furos, usinando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número 9.
- 4.27 - Variação do momento de torção em função do número de furos, usinando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número 13.
- 4.28 - Variação do momento de torção em função do número de furos, com  $v_c=9,42$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.29 - Variação do momento de torção em função do número de furos, com  $v_c=11,30$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.30 - Variação do momento de torção em função do número de furos, com  $v_c=13,19$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.31 - Variação da força de avanço em função do número de furos, usinando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil núm. 9.
- 4.32 - Variação da força de avanço em função do número de furos, usinando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil núm. 13.

- 4.33 - Variação da força de avanço em função do número de furos, com  $v_c=9,42$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.34 - Variação da força de avanço em função do número de furos, com  $v_c=11,30$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.35 - Variação da força de avanço em função do número de furos, com  $v_c=13,19$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.36 - Variação do desgaste VB em função do número de furos, usando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número 9.
- 4.37 - Variação do desgaste VB em função do número de furos, usando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número 13.
- 4.38 - Variação do desgaste VB em função do número de furos, com  $v_c=9,42$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.39 - Variação do desgaste VB em função do número de furos, com  $v_c=11,30$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.40 - Variação do desgaste VB em função do número de furos, com  $v_c=13,19$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.41 - Variação do desgaste VBQ em função do número de furos, usando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número 9.
- 4.42 - Variação do desgaste VBQ em função do número de furos, usando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número 13.
- 4.43 - Variação do desgaste VBQ em função do número de furos, com  $v_c=9,42$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.44 - Variação do desgaste VBQ em função do número de furos, com  $v_c=11,30$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.45 - Variação do desgaste VBQ em função do número de furos, com  $v_c=13,19$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.46 - Desgaste VB em função do número de furos para o perfil número 9.

- 4.47 - Desgaste VB em função do número de furos para o perfil número 13.
- 4.48 - Variação do desvio dimensional em função do número de furos, usando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número 9.
- 4.49 - Variação do desvio dimensional em função do número de furos, usando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número 13.
- 4.50 - Variação do desvio dimensional em função do número de furos, com  $v_c=13,19$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.51 - Variação do desvio dimensional em função do número de furos, com  $v_c=11,30$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.52 - Variação do desvio dimensional em função do número de furos, com  $v_c=13,19$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.
- 4.53 - Cavaco formado pela aresta transversal para o perfil número 9.
- 4.54 - Cavaco formado pela aresta transversal para o perfil número 13.

## **Lista de Tabelas**

- 2.1 - Composição química típica da liga Ti-6Al-4V [ROSENBERG, 1979].
- 2.2 - Avaliação da usinabilidade do titânio e outros materiais [TIBRASIL, 1995].
- 3.1 - Composição química da liga Ti-6Al-4V, conforme resultado da análise química realizada pelo método de absorção atômica, segundo a norma ASTM E 30.
- 3.2 - Composição química da liga ABNT M42, conforme resultado da análise química realizada pelo método de absorção atômica, segundo a norma ASTM E 30.
- 3.3 - Características típicas do fluido de corte
- 3.4 - Equipamentos e Instrumentos utilizados nos ensaios
- 3.5a - Condições de usinagem utilizadas na Fase I
- 3.5b - Condições de usinagem utilizadas na Fase I
- 3.6 - Descrição da geometria das brocas utilizadas nos ensaios da Fase I
- 3.7 - Condições de usinagem utilizadas nos ensaios da FASE II - Parte 1
- 3.8 - Descrição da geometria das brocas utilizadas nos ensaios da Fase II - Parte 1 e Fase II - Parte 2
- 3.9 - Condições de usinagem utilizadas nos ensaios da FASE II - Parte 2

## Nomenclatura

### Lista de Símbolos

$Al_2O_3$  - óxido de alumínio

$TiB_2$  - boreto de titânio

$g / cm^3$  - grama/por centímetro cúbico

% - porcentagem

∅ - diâmetro

$\alpha$  - fase da liga Ti-6Al-4V

$\beta$  - fase da liga Ti-6Al-4V

° - graus

± - mais ou menos

< - menor

- - menos

°C - graus Célsius

$\mu m$  - micrometro

Al - Alumínio

C - Carbono

Co - Cobalto

Cr - Cromo

Cv - Cavalo Vapor

f - avanço (mm/rot ou mm/min)

fç - função

Fe - Ferro

Ff - força de avanço (N)

Fx - esforço lateral (N)

Fy - esforço lateral (N)

HB - dureza Brinell

HfN - nitreto de áfnio

HP - Horse Power

HRC - dureza Rockwell C

IT - qualidade de trabalho

kW - quiloWatt

m/min - unidade da velocidade de corte

mm - milímetro

mm/min - unidade do avanço

mm/rot - unidade do avanço

Mn - Manganês

Mo - Molibdênio

Mt - momento de torção (Ncm)

N - Nitrogênio

N - unidade da força de avanço

n furos - número de furos

Ncm - unidade do momento de torção

Ni - Níquel

P - Fósforo

S - Enxofre

Si - Silício

Sn - Estanho

Ti - Titânio

Ti(C,N) - carbo - nitreto de titânio

TiC - carbeto de titânio

TiN - nitreto de titânio

V - Vanádio

VB - desgaste da aresta principal de corte (mm)

VBQ - desgaste da aresta transversal (mm)

vc - velocidade de corte (m/min)

W - Tungstênio

Zn - Zircônio

#### Abreviaturas

Std - standard

mín. - mínimo

máx. - máximo

## Siglas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI - American Iron and Steel Institute

AR - Aço Rápido

AR-E - Aço Rápido - Especial

ASTM - American Society of Testing and Materials

CDP - corpo de prova

CDPs - corpos de prova

CNC - Computer Numerical Control

CTA - Centro Técnico Aeroespacial

DIN - Deutsche Industrie Normen (normas da indústria alemã)

ELI - Extra Low Interstitial

EP - Extrema pressão

ISO - International Organization for Standardization

MIL - Norma Militar

NAS - National Aerospace Standard

NBR - Norma Brasileira

RPM - rotações por minuto

## Resumo

DEONISIO, Carlos Cesar de Castro, *Furação em liga de titânio com brocas helicoidais de aço rápido*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996. 1 p. Tese (Mestrado)

Com o desenvolvimento e aplicação de novos materiais, faz-se necessária a otimização dos processos de fabricação, através da melhoria da geometria e do material das ferramentas, e através da adequação dos parâmetros de corte. O objetivo deste trabalho é estudar o processo de furação da liga Ti-6Al-4V, que representa 45% da produção total de titânio e suas ligas, e é aplicado em larga escala na indústria química, marítima, eletrônica, biomédica e principalmente na indústria aeroespacial. Neste sentido, o presente trabalho objetivou a escolha da geometria da ponta e do perfil da seção transversal mais adequados para a usinagem da liga Ti-6Al-4V com brocas helicoidais de aço rápido. Para que este objetivo fosse alcançado, foram conduzidos ensaios com várias geometrias da ponta, e vários perfis da seção transversal, observando-se o comportamento da ferramenta quanto aos esforços de corte, aos desgastes, ao tipo de cavaco gerado e ao desvio dimensional do furo. Apesar de não serem conclusivos, os resultados obtidos indicam que a afiação do tipo helicoidal ("Helical") e o perfil nº 9, para uma velocidade de corte de 11,30 m/min e um avanço de 0,100 mm/rot, tendem a ser a melhor escolha. Os resultados deste trabalho são importantes nos futuros estudos sobre furação em ligas de titânio.

### *Palavras Chave*

- Furação, Broca Helicoidal, Liga de Titânio

## Abstract

DEONISIO, Carlos Cesar de Castro, *Furação em Liga de Titânio com Brocas Helicoidais de aço rápido*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996. 1 p. Tese (Mestrado)

With the development and application of new materials, the manufacturing processes need to be optimized through the improvement of the geometry and material of the tools and the use of the adequate manufacturing parameters. The object of this work is to study the drilling process of the Ti-6Al-4V alloy, which represents 45% of the total production of titanium and its alloys, and is heavily used in the chemical, maritime, electronic and biomedical industries and primarily in the aerospace industry. For that end, the objective of this work concentrate on the selection of the adequate tool point geometry and adequate cross section profile for the manufacturing of Ti-6Al-4V alloy with high speed steel twist drills. Tests with various tool point geometries and various cross section profiles were done and the behaviour of the tools was observed regarding cutting forces, the tool wear, form of the chips and dimensional deviation of the hole. Despite the fact that the results were not conclusive, they show that the Helical grinding and the profile number 9, for a cutting speed of 11,30 m/min and a feed of 0,100 mm/rot, tend to be the best choice. The results of this work are important to future research on titanium alloys drilling.

### *Palavras Chave*

- Drilling, Twist Drill, Titanium Alloy

# Capítulo 1

## Introdução

Introduzida em 1954, a liga de titânio Ti-6Al-4V, de ampla aplicação em vários segmentos da indústria, principalmente na aeroespacial, é a mais usada de todas as ligas de titânio e representa cerca de 45% da produção total de titânio [KLEEFISCH,1979].

Apesar do desenvolvimento de novas geometrias e de novos materiais para ferramentas, a liga Ti-6Al-4V possui características típicas de usinabilidade, que fazem com que o uso de brocas helicoidais de aço rápido seja vantajoso.

O processo de furação com brocas helicoidais de aço rápido, geralmente dá origem a furos com qualidade de trabalho entre IT12 e IT13 e, dependendo da aplicação do furo gerado, faz-se necessário o uso de uma broca calibradora e de um alargador.

Supõe-se que, utilizando-se brocas helicoidais com afiação, geometria (ângulos de folga, de hélice, de ponta, etc.) e perfil da seção transversal especiais, obtenha-se furos com qualidade de trabalho entre IT7 e IT9, eliminando-se assim o uso de brocas calibradoras e em alguns casos o uso de alargador.

O objetivo deste trabalho é verificar, a partir das recomendações encontradas na literatura, entre os diferentes tipos de afiação, tipos de seção transversal e geometrias, qual a forma da broca que apresenta os melhores resultados na usinagem da liga Ti-6Al-4V, no que se refere:

- à qualidade de trabalho obtida e,
- ao rendimento da ferramenta (esforços de corte, vida e forma do cavaco).

Este trabalho está dividido em cinco capítulos.

No capítulo 1 procura-se dar uma visão geral do trabalho.

No capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica sobre:

- a liga Ti-6Al-4V (aplicações, principais propriedades e características de usinabilidade),
- os tipos de afiação das brocas helicoidais ("Helical", "Racon", "Bickford", Cruzada NAS P3 e Cruzada NAS P9) e
- os perfis da seção transversal (normalizados [DIN 1412, 1414 e 1836] e especiais [Masuha, 1980]).

No capítulo 3 descreve-se a metodologia adotada para a realização dos ensaios.

No capítulo 4 são mostrados os resultados obtidos e as discussões sobre estes resultados.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos de furação em ligas de titânio.

## Capítulo 2

### Revisão da Literatura

#### 2.1 - Propriedades da Liga Ti-6Al-4V [ROSENBERG, 1979]

Segundo Polmear, pode-se agrupar as ligas de titânio em quatro grupos: [POLMEAR, 1981].

1. Titânio puro, que apresenta uma excelente resistência à corrosão, mas baixas propriedades mecânicas;
2. Alfa e nova-alfa, que apresentam excelente resistência à deformação;
3. Alfa-beta, que apresenta excelentes propriedades mecânicas;
4. Beta, que apresenta alta temperabilidade, mas também alta densidade.

A liga de titânio Ti-6Al-4V, pertencente ao grupo alfa-beta, representa cerca de 45% da produção total de titânio, o titânio puro 30%, e as demais os 25% restantes. [WORD METAL STATISTICS YEARBOOK, 1986] e [DONACHIE, 1987].

Com uma densidade de  $4,43 \text{ g/cm}^3$ , a liga Ti-6Al-4V possui alta eficiência estrutural, principalmente para a aplicação em meios de transporte, em função da sua relação peso/resistência mecânica [POLMEAR, 1981].

A liga Ti-6Al-4V é recomendada para uso em temperaturas de  $-210^\circ\text{C}$  a  $400^\circ\text{C}$ . Aplicações fora desta faixa de temperatura são possíveis dentro de limites de tolerância, tendo em vista que esta liga apresenta a desvantagem de reagir com outros elementos acima de  $425^\circ\text{C}$ .

As propriedades de fadiga são excelentes, e o início de fratura não é afetado por água salgada abaixo de 230°C. A resistência à propagação de trincas também é excelente, para uma faixa dinâmica ou estática. A água salgada pode afetar a propagação de trincas acima de 230°C; a intensidade depende do conteúdo intersticial desta liga. Em atmosferas marítimas e água do mar, o titânio é superior ao aço inoxidável austenítico e ao metal monel [CLARK E VARNEY, 1965].

O início e a propagação de trincas são influenciados pelo tratamento térmico.

### 2.1.1 - Composição Química

A composição química influencia significativamente as propriedades da liga Ti-6Al-4V.

A Tabela 2.1 - apresenta a composição química típica da liga Ti-6Al-4V, de acordo com a norma AMS [ROSENBERG, 1979].

Dois níveis básicos de conteúdo intersticial são apresentados:

- Ti-6Al-4V padrão e
- Ti-6Al-4V ELI.

A sigla ELI é sinônimo de conteúdo intersticial extra baixo, o que na prática significa principalmente baixa porcentagem de oxigênio.

Tabela 2.1 - Composição química típica da liga Ti-6Al-4V [ROSENBERG, 1979].

Elemento	Padrão (AMS 4911D) (%)		ELI (AMS 4907C) (%)	
	min.	máx.	min.	máx.
Alumínio	5,50	6,75	5,50	6,50
Vanádio	3,50	4,50	3,50	4,50
Ferro	-	0,30	-	0,25
Oxigênio	-	0,20	-	0,13
Carbono	-	0,08	-	0,08
Nitrogênio	-	0,05	-	0,05
Hidrogênio	-	0,015	-	0,0125
Ytrium	-	0,005	-	-
Elementos residuais (cada)	-	0,10	-	0,10
Elementos residuais (total)	-	0,40	-	0,30
Titânio	remanescente		remanescente	

## 2.1.2 - Propriedades Físicas

Muitas das propriedades físicas do titânio e suas ligas dependem da direção em que elas são medidas. Isto ocorre por duas razões:

- 1 - Os cristais  $\alpha$  e  $\beta$  são anisotrópicos, isto é, suas principais propriedades terão valores que dependem da direção nas quais elas são medidas no cristal, e
- 2 - Na liga Ti-6Al-4V as fases  $\alpha$  e  $\beta$  tendem a ser fibradas, isto é, os eixos cristalinos tendem a se posicionar ao longo de direções preferidas com relação a direção do fluxo de metal adotada durante o processamento. Em geral, fora isto, toda propriedade física pode ser quantificada em uma escala simples, a qual demonstra muito pouco a anisotropia da liga Ti-6Al-4V.

### Densidade.

A densidade do Ti-6Al-4V é  $4,43 \text{ g/cm}^3$ , o que corresponde a apenas 56% da densidade do aço, e aproximadamente, ao dobro da densidade do alumínio.

### Expansão térmica

A expansão térmica da liga Ti-6Al-4V é uma propriedade que depende da direção em que é realizado o teste. O valor da expansão térmica da liga Ti-6Al-4V é a metade do valor obtido para o aço inoxidável austenítico e um terço do valor obtido para o alumínio, nas mesmas condições de ensaio.

### Condutividade térmica

A condutividade térmica também varia com a direção em que é realizada a medida. Os valores são similares aos do aço inoxidável austenítico.

### Difusibilidade térmica

Este valor também varia com a direção e os valores encontrados na literatura são muito dispersos.

### Faixa de fusão

O alumínio e o vanádio diminuem o ponto de fusão do titânio. O ponto de fusão da liga Ti-6Al-4V varia entre  $1.630^\circ\text{C}$  e  $1.650^\circ\text{C}$  e o ponto de fusão do titânio comercialmente puro é  $1.675^\circ\text{C}$ .

### 2.1.3 - Metalurgia Geral [CLARK E VARNEY, 1965]

O Titânio existe em duas formas alotrópicas, alfa ( $\alpha$ ) em temperaturas acima de 885°C e beta ( $\beta$ ) abaixo desta temperatura.

A mudança  $\alpha + \beta \Rightarrow \beta$  depende da composição química da liga. A liga Ti-6Al-4V - padrão transforma-se a  $996 \pm 14^\circ\text{C}$ , e a Ti-6Al-4V - ELI transforma-se a  $985 \pm 14^\circ\text{C}$ .

A liga Ti-6Al-4V é caracterizada como uma liga alfa, rica em composição alfa-beta.

A forma alfa apresenta estrutura hexagonal e a beta estrutura cúbica de corpo centrado. Muitos elementos de liga diminuem a temperatura de transformação da fase alfa para a fase beta.

Oxigênio, nitrogênio e alumínio aumentam a temperatura de transformação alotrópica do titânio.

Geralmente o oxigênio e o nitrogênio aumentam a dureza e a resistência, e diminuem a ductilidade e a conformabilidade. O efeito estabilizante do alumínio na fase alfa promove estabilidade a altas temperaturas, o que faz do alumínio um elemento importante em muitas ligas de titânio.

O nível de seis por cento de alumínio na liga Ti-6Al-4V é suficiente para causar o aumento da temperatura da fase alfa em solução sólida, em níveis mais baixos esta temperatura não é alta o bastante para evitar a fragilização do metal, pela introdução de gás ou de outros átomos estranhos [ROSENBERG, 1979].

Os elementos de liga, ferro, manganês, cromo, molibidênio, vanádio, colúmbio e tântalo estabilizam a fase beta, e todos fazem diminuir a temperatura de transformação alfa-beta.

A adição de colúmbio e tântalo produz o crescimento da resistência e auxilia na prevenção da fragilização produzida pela presença de compostos de titânio e alumínio.

Os elementos níquel, cobre e silício são ativadores das formas eutetóides, juntamente com o manganês, o cromo e o ferro.

Os elementos TiN e zircônio são solúveis nas estruturas alfa e beta.

O vanádio estabiliza a alta temperatura da fase beta, a qual é manifestada pela redução da temperatura de transformação alotrópica.

O nível de 4% de vanádio da liga Ti-6Al-4V excede o limite de solubilidade alfa em todas as temperaturas [ROSENBERG, 1979].

## **2.2 - Características de Usinabilidade do Titânio e suas Ligas**

O titânio e suas ligas podem ser usinados com sucesso em máquinas ferramenta convencionais, desde que certas exigências sejam atendidas.

Em toda operação de usinagem é necessário que haja boa rigidez da peça e da ferramenta de corte.

Melhores resultados são obtidos se a ferramenta de corte possui um bom acabamento superficial [IMI - TITANIUM, 1967].

O mais importante é que as diferentes grades de titânio, isto é, titânio puro e suas várias ligas, não possuem idênticas características de usinabilidade, ao passo que boa parte das grades de aço ou alumínio tem idênticas características. [IMI - TITANIUM, 1967].

Semelhante ao aço inoxidável, a baixa condutividade térmica do titânio inibe a dissipação de calor pela peça, tornando obrigatória a aplicação de fluidos de corte refrigerantes [TiBRASIL, 1995].

Geralmente, uma vida mais longa da ferramenta e uma boa qualidade de trabalho podem ser obtidas através de rígidas montagens na máquina ferramenta, pelo uso de fluido de corte, afiação e ferramenta adequados, baixas velocidades e avanços altos. O uso de ferramentas bem afiadas é vital, porque assim diminuí-se o

atrito e conseqüentemente o calor sobre a aresta de corte. O calor pode causar acentuado desprendimento de partículas da peça, levando à falha prematura da ferramenta.

A usinabilidade das grades de titânio comercialmente puro é comparada, por um operador de máquinas experiente, com usinabilidade do aço inoxidável 18-8, considerado de difícil usinabilidade.

A avaliação da usinabilidade do titânio e outros materiais pode ser vista na Tabela 2.2 [TiBRASIL, 1995].

Tabela 2.2 - Avaliação da usinabilidade do titânio e outros materiais [TiBRASIL, 1995].

Liga	Tipo	Condição * 1	Dureza	Avaliação * 2
2012	liga de alumínio	T4		300
B1112	aço resulforizado	HR		100
1020	aço carbono	CD		70
4340	aço liga	A		45
Titânio	comercial puro	A		40
302	aço inoxidável	A		36
Ti-6Al-2,5Sn	liga titânio	A	310	30
Ti-6Al-4V	liga titânio	A		22
Ti-6Al-6V-2Sn	liga titânio	A		20
Ti-8Al-4V	liga titânio	HT	365	16
Ti-6Al-6V-2Sn	liga titânio	HT	365	16
Ti-13V-11Cr-3Al	liga titânio	A		16
Ti-13V-11Cr-3Al	liga titânio	HT	365	12
HS 25	liga cobalto	A		10
Rene 41	liga níquel	HT		6

\* 1 - Condição usual de usinagem.

\* 2 - Baseado no aço AISI 1112, de usinabilidade igual a 100.

T4 - Solução tratada e envelhecida.

HR - Laminado a quente.

A - Recozido.

HT - Solução tratada e envelhecida.

CD - Trefilado/estirado a frio.

### 2.2.1 - Formação de Cavaco e Efeitos das Condições de Corte

Enquanto muitos materiais podem formar um cavaco contínuo e com espessura relativamente uniforme, o cavaco formado pela liga Ti-6Al-4V é serrilhado e foi classificado por Komanduri, citado por Machado, como “cavaco de cisalhamento catastrófico” [MACHADO, 1990].

A deformação no cavaco é confinada à faixas estreitas entre os segmentos, e há uma deformação muito pequena dentro dos segmentos.

Cook, 1953 e Shaw, 1954, citados por Machado, apresentam um modelo que explica qualitativamente as características da segmentação do cavaco [MACHADO, 1990].

Neste modelo, a relação da diminuição na resistência, resultante do aumento local de temperatura iguala ou ultrapassa a relação de aumento em resistência resultante do elevado aumento da dureza na zona primária de cisalhamento.

O cisalhamento para formar o cavaco ocorre em um plano de cisalhamento particular quando a sollicitação relativa ao deslocamento da ferramenta ultrapassa o limite de resistência à deformação do material.

A energia associada à esta deformação é convertida imediatamente em energia térmica e por causa da baixa condutividade térmica do titânio ocorre um grande aumento da temperatura. Shaw, observou que ocorre o efeito de temperatura localizada e em decorrência há um aumento contínuo do cisalhamento no mesmo plano ao invés do cisalhamento iniciar-se em um novo plano no material frio [SHAW, 1993].

Como a deformação continua na mesma direção, o plano de cisalhamento sofre uma rotação e em decorrência disto, o gradiente de força necessário para que ocorra esta rotação, mais a força necessária à deformação do material faz com que a força total seja maior do que a força necessária para deformar o material frio sobre um plano mais favorável.

Becht, 1964, chamou este processo de deformação termoplástica catastrófica e Vonterkovit, 1970 e Lemaire, 1972, citados por Machado, chamaram este processo de “cisalhamento adiabático” [MACHADO, 1990].

Becht, 1964, citado por Machado, observou que, para menores velocidades, os gradientes térmicos são baixos e a distância entre as bandas de cisalhamento é menor. A distância aproxima-se de zero quando a velocidade diminui para um “valor crítico”, para o qual a deformação se torna uniforme, [MACHADO, 1990].

Observa-se na figura 2.1 a, b e c o processo de produção de cavaco com o formato de dentes de serra, típico da liga Ti-6Al-4V, para diferentes velocidades de corte.

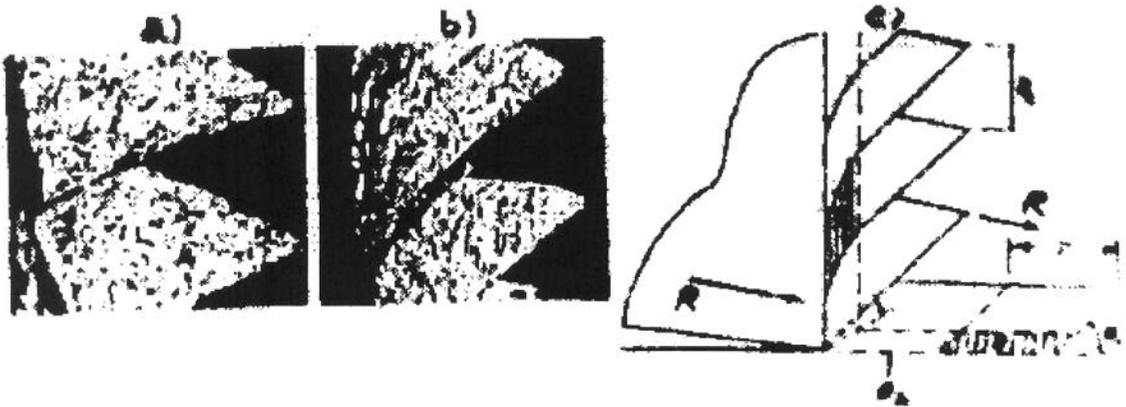


Figura 2.1 a, b e c - Processo de produção de cavaco com formato de dentes de serra, típico da liga Ti-6Al-4V: a) para baixas velocidades; b) para altas velocidades; c) representação esquemática da formação do cavaco [SHAW, 1993].

Turley, observou que com o aumento do avanço, ha um aumento da temperatura e em consequência há acentuação no processo “adiabático de formação do cavaco”.

Com a diminuição da profundidade de corte e do ângulo de saída a espessura dos segmentos diminui.

Segundo Turley, 1981, citado por Machado, o efeito das condições de corte sobre a formação do cavaco pode ser interpretado como o efeito destas sobre a

temperatura com o amolecimento ou endurecimento do material da peça [MACHADO, 1990].

Notonishi, 1987, citado por Machado, sugere que a formação de cavaco segmentado varia de acordo com a micro estrutura, e que este não é observado na liga alfa, é observado na liga alfa-beta e ocorre duas vezes mais na liga beta [MACHADO, 1990].

### 2.2.2 - Mecanismos de Desgaste

Estudos específicos sobre os mecanismos de desgaste não são abundantes.

O titânio tem a tendência de, quando em atrito com outras superfícies metálicas, durante o atrito deslizante, desprender partículas ou fundir-se sobre estas superfícies metálicas. [IMI - TITANIUM, 1967].

Atuam os desgastes por atrito, difusão, aderência do material da peça sobre a ferramenta e aresta postiça de corte.

A alta temperatura gerada, concentrada na região da aresta de corte, é a principal razão do rápido desgaste das ferramentas de aço rápido.

A temperatura desenvolvida na aresta de corte, segundo Zlatin, 1973, é geralmente 25 a 50% maior para a liga Ti-6Al-4V, quando esta é comparada com o aço AISI 4340 [MACHADO, 1990].

Smart e Trent, 1975, usaram métodos metalográficos para determinar a distribuição de temperatura em ferramentas de aço rápido empregadas na usinagem da liga Ti-6Al-4V [MACHADO, 1990].

König e Schröder, apresentaram um estudo sobre a distribuição do calor, na usinagem da liga Ti-6Al-4V para vários materiais para ferramentas. Os dados de distribuição do calor para o aço 4340 também foram incluídos, para comparação.

König e Schröder observaram que quando se usina a liga Ti-6Al-4V, 80% do calor gerado pode ser absorvido pela ferramenta, ao passo que no aço 4340 a porcentagem se situa entre 50 ou 60% [KÖNIG e SCHRÖDER, 1979].

Segundo Catt, 1967, citado por Machado, a alta temperatura e altos esforços desenvolvidos na aresta de corte da ferramenta podem causar deformação plástica e/ou acelerar o desgaste das ferramentas [MACHADO, 1990].

Segundo Haztung, 1982, citado por Machado, a deformação plástica pode ser a maior contribuinte para outros mecanismos de desgaste, quando se utiliza ferramentas de aço rápido na usinagem de ligas de titânio. A presença de altos esforços de compressão e também o desenvolvimento de altas temperaturas próximo à aresta de corte causa deformação plástica na aresta de corte e/ou da ponta da ferramenta, ocasionando a sua quebra [MACHADO, 1990].

Durante a furação da liga Ti-6Al-4V a deformação plástica é maior para maiores velocidades de corte.

Para minimizar este problema, deve ser aplicado fluido de corte. Um óleo solúvel, com aditivos de extrema pressão proporciona bons resultados, porém os que possuem a adição de fosfatos proporcionam os melhores resultados [OPERATOR HANDBOOK - MACHINING TITANIUM, 1968].

Karfakis, também sugere a aplicação de emulsões de óleo, contendo fosfatos, à altas pressões [KARFAKIS, 1989].

O fluido de corte age como lubrificante e principalmente como refrigerante.

Machado e Motta, também recomendam o uso de um fluido de corte refrigerante com características de extrema pressão, na usinagem de titânio e suas ligas, objetivando a ação de refrigeração e de lubrificação [MACHADO, 1990] [MOTTA, 1995].

Fluidos de corte são utilizados para incrementar a vida da ferramenta, melhorar o acabamento superficial, minimizar a ocorrência de pontos de solda entre a peça e a ferramenta e reduzir a tensão residual na peça [ZOREV, 1975].

Óleo solúvel - emulsionável, cera solúvel em água e refrigerantes químicos são normalmente utilizados para altas velocidades de corte, onde a refrigeração é importante. Óleos sulfurizados de baixa viscosidade são utilizados para baixas velocidades de corte, para reduzir o atrito cavaco-ferramenta e para minimizar a soldagem entre a ferramenta e o material usinado [DONACHIE, 1987].

Óleos de corte podem ser minerais ou mineral misturado com gordura animal.

Óleos clorinados são geralmente evitados, uma vez que os resíduos destes fluidos podem conduzir a trincas em decorrência de tensão oriunda de pontos de corrosão. Uma boa prática para remover todos os resíduos de fluidos da peça é o uso de um desengraxante não clorinado, tal como a acetona, metil-etil-cetona ou tolueno [DONACHIE, 1987].

König e Schröder, observaram em seus ensaios de furação na liga Ti-6Al-4V a formação de cavacos dobrados nos canais helicoidais, o que diminui a velocidade de saída do cavaco. A presença do cavaco entre a broca e o furo, por um tempo maior, faz com que uma quantidade insuficiente de fluido alcance a ponta da broca. O resultado é um aumento da temperatura, combinado com grande ocorrência de soldagem, deformação das arestas e finalmente a quebra.

König e Schröder, 1978, observaram também, a diminuição do momento de torção, a medida que aumentava o número de furos na liga Ti-6Al-4V. Segundo estes pesquisadores, após a ocorrência de desgastes elevados na broca, nos primeiros furos, diminui a abrasão, facilitando as condições de atrito, o que conduz à diminuição do torque [KÖNIG E SCHRÖDER, 1978].

### 2.2.3 - Problemas de Usinabilidade

Com relação à usinagem, observa-se as seguintes características:

a) O cavaco de titânio se forma através de um "processo adiabático ou de cisalhamento termoplástico catastrófico". O calor específico volumétrico baixo e uma pequena área de contato ferramenta-peça, com a presença de uma zona de fluxo muito fina entre o cavaco e a ferramenta, cerca de 8  $\mu\text{m}$ , comparado com 50  $\mu\text{m}$  quando se usina um aço com semelhantes condições de corte, causam altas temperaturas na aresta de corte da ferramenta, acima de 1.100°C [NOTONISHI, 1987, citado por MACHADO, 1990].

A alta temperatura é uma das principais razões do desgaste das ferramentas para furação. Karfakis e Heins, relatam em seus estudos, um sistema utilizado para medir a temperatura na aresta cortante de brocas, durante o processo de furação [KARFAKIS E HEINS, 1989]. Smart e Trent, citados por Machado, utilizaram métodos metalográficos para determinar a distribuição das temperaturas de corte, em ferramentas de AR, na usinagem de titânio [MACHADO, 1990].

b) Baixo módulo de elasticidade, o que pode causar problemas de vibração, deflexão e atrito. Alguns estudos específicos sobre os efeitos da geometria da ferramenta e os parâmetros do processo de usinagem sobre vibrações transversais em brocas helicoidais, utilizando métodos de cálculo numérico, foram desenvolvidos, por Tekinalp, e Lin, [TEKINALP, 1990] [LIN, 1991];

c) A alta resistência é mantida à elevadas temperaturas geradas na usinagem, e isto se opõe à deformação plástica necessária para a formação do cavaco;

d) O cavaco de titânio é muito fino e uma pequena área de contato é observada. Segundo Kirck, 1977, citado por Machado, a área de contato do cavaco com a ferramenta é 1/3 da área observada para o aço AISI 4340, para as mesmas condições de corte [MACHADO, 1990];

e) Há um alto "coeficiente de atrito" entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta;

f) O titânio apresenta alta reatividade química nas temperaturas de corte (acima de 500°C), com quase todos os materiais para ferramentas, o que acentua o mecanismo de desgaste por difusão;

g) Embora seja dito que a aresta postiça de corte não ocorra, alguns autores têm confirmado a sua presença para baixas velocidades de corte, o que causa um acabamento superficial ruim em furos [SCHULZ e MORIWAKI, 1992];

h) Também é preocupante a tendência do titânio à ignição durante a usinagem, devido às altas temperaturas envolvidas. [MACHADO, 1990].

i) Segundo Zlatin, 1953 e Child e Dalton, 1968, citados por Machado, e segundo Zlatin e Christopher, o titânio apresenta uma tendência maior ao encruamento do que o aço [ZLATIN e CHRISTOPHER, 1978] [MACHADO, 1990].

Todos estes fatores, operando separadamente ou combinados, proporcionam um rápido desgaste, quebra ou falha catastrófica das ferramentas utilizadas nos processos de furação em ligas de titânio.

#### 2.2.4 - Análise dos Materiais para Ferramenta

Devido aos problemas na usinagem citados, as ferramentas para furar titânio e suas ligas devem ter:

- a) Dureza e resistência mecânica suficiente à altas temperaturas, para manter a integridade física da ferramenta na macro escala e micro escala durante o corte;
- b) Resistência à abrasão, especialmente devido à formação do cavaco segmentado;
- c) Tenacidade e resistência à fadiga, também para suportar o processo de segmentação do cavaco;
- d) Baixa solubilidade química no titânio, para reduzir o fluxo de difusão dos constituintes da ferramenta para o cavaco;
- e) Alta resistência à compressão;
- f) Boa condutividade térmica, para diminuir o gradiente térmico e o choque térmico sobre a ferramenta.

Alguns autores, Colwell, 1953; Olofson, 1965; Catt, 1967 e König, 1969, citados por Machado, têm sugerido que para a furação de titânio as ferramentas de AR (com qualidade de M 1 a M 10), são as mais apropriadas e para a furação de suas ligas as de AR-E (AR ao Co, com qualidade M 35, M 42 ou similar). Hance, 1968, sugere que para diâmetros maiores que 1" deva-se utilizar ferramentas de AR e para diâmetros menores que 1" ferramentas de AR-E [OPERATOR HANDBOOK - MACHINING TITANIUM, 1968] [MACHADO, 1990].

O Convaïr , Programa de Desenvolvimento do Titânio, recomenda o aço rápido M33 e broca do tipo W (ângulo de hélice= $\pm 37^\circ$ ), na usinagem da liga Ti-6Al-4V [BASIC MANUFACTURING EVALUATION OF MATERIALS - CONVAIR, 1968].

König e Schröder, observaram também que para ferramentas multi cortantes a liga de aço rápido ao cobalto, com alta porcentagem de vanádio é recomendada [KÖNIG e SCHRÖDER, 1978].

A adição de cobalto, no aço rápido, aumenta a dureza a quente e a resistência ao desgaste. Os aços rápido ao cobalto são indicados para a usinagem de aços de elevada dureza, acima de 350 HB e metais de difícil usinabilidade, como a liga Ti-6Al-4V [CULP, 1980].

Donachie também observou que o aço rápido ao cobalto é o melhor, entre outros tipos de aço rápido avaliados na usinagem das ligas de titânio [DONACHIE, 1987].

Segundo Machado, os revestimentos de TiC, TiN-TiC,  $Al_2O_3$ -TiC-TiN, Ti(C,N)-TiC, HfN e  $TiB_2$ , apresentam altíssima razão de desgaste, quando comparados com ferramentas sem revestimentos [MACHADO, 1990].

O desenvolvimento de implementos em materiais para ferramentas utilizadas na usinagem do titânio é um dos mais difíceis. Segundo Kramer, a análise termoquímica de compostos dos "elementos de terra rara" e outros compostos selecionados tem identificado materiais quimicamente estáveis com relação ao titânio. Diversos deles, incluindo o carbeto de escândio, nitreto de escândio e um número de terras raras e boretos de metais de transição, tem dureza suficiente ou podem existir ligados para ter dureza suficiente para aplicações em usinagem. Infelizmente a análise termoquímica do desgaste de ferramentas apenas indica qual é a possibilidade, e não necessariamente a sua factibilidade [KRAMER, 1993].

### 2.3 - Tipos de Afições [LINDBERG, 1990]

A broca helicoidal é uma ferramenta de corte que apresenta uma geometria complexa.

O uso de computadores digitais auxiliando o projeto e a fabricação de brocas no final da década de sessenta, facilitou a análise e compreensão da complexa geometria destas ferramentas.

Fujii, De Vries e Wu, desenvolveram um programa de computador, baseado em um modelamento matemático, com a finalidade de facilitar a compreensão dos parâmetros de projeto e fabricação de brocas helicoidais [FUJII, DE VRIES e WU, 1970].

A performance da broca é afetada pela afiação utilizada.

Tsai e Wu, desenvolveram um modelo matemático que descreve as afiações cônica (padrão), hiperboloidal ("Helical") e a elipsoidal ("Racon"), de modo a facilitar o controle e o processo de afiação destes tipos de geometria de ponta. [ TSAI e WU, 1979].

Fugelso e Wu, trabalharam no desenvolvimento de afiadoras controladas por um microprocessador, para facilitar a realização precisa e controlada de afiações especiais como a "Helical" e a "Racon". [FUGELSO e WU, 1979].

Com o advento das afiadoras CNC, o modelamento matemático de muitos tipos de afiações, realizado desde 1953, e o desenvolvimento de programas de computador para facilitar o projeto de brocas tem recebido uma atenção especial por parte de diversos autores. [WU e SHEN, 1983] [RADAHAKRISHNAN, WU e LIN, 1983] [CHEN e WU, 1984]. [SHI HAN-MIN, 1994]

Não existe um tipo de afiação que seja adequado a usinagem de todos os materiais e em todas as condições de corte.

Na escolha do tipo de afiação deve-se procurar a melhor combinação de economia, vida da broca, qualidade do furo e adequação à máquina utilizada, se CNC ou convencional.

König e Schröder, observaram que algumas ligas de titânio só podem ser furadas com brocas especiais, como é o caso da liga IMI 685 [KÖNIG e SCHRÖDER, 1978].

### 2.3.1 - Afiação Convencional

A afiação convencional é utilizada na indústria em aplicações gerais, na usinagem da maior parte dos materiais comuns, aço, alumínio, ferro fundido, etc.

A figura 2.2 - Mostra a geometria da afiação convencional.



Figura 2.2 - Geometria da afiação convencional

A principal desvantagem da afiação convencional é que no início do furo a broca apresenta a tendência de se desviar do local do furo, em decorrência da forma da sua aresta transversal. É necessário realizar antes do furo uma marcação com um punção de centro ou um furo com uma broca de centro para obter uma maior precisão.

Na afiação convencional as pontas de corte da broca tendem a se desgastar mais rapidamente do que em outros tipos de afiação.

A afiação convencional geralmente não é recomendada para operações em máquinas CNC, uma vez que necessita de operações complementares como a pré furagem com broca de centro e o uso do alargador após a execução do furo.

Outra desvantagem é a tendência a produzir rebarba no final do furo.

A afiação convencional é uma boa escolha para aplicações onde alta precisão e alta produção não sejam necessárias e o baixo custo da ferramenta é importante [MASON, 1990].

### 2.3.2 - Afiação Cruzada

Também conhecida como afiação em cruz.

A figura 2.3 - Mostra a geometria da afiação cruzada.



Figura 2.3 - Geometria da afiação cruzada

A remoção de parte da superfície de folga, de cada aresta de corte, a partir do centro da aresta transversal, cria uma segunda superfície de folga, e estende a aresta de corte principal até o centro da broca (ver anexo 1 e 2).

Esta afiação é auto centrante, e é boa especialmente no início do furo sobre superfícies curvadas. Também é muito utilizada em furações profundas. A afiação cruzada, geralmente reduz a força de avanço decorrente da ação da aresta transversal a um valor mínimo [ZEISER, 1986].

A principal desvantagem deste tipo de afiação é que ela necessita de afiadoras especiais para a sua execução.

### 2.3.3 - Afiação Helicoidal ("Helical")

A afiação helicoidal apresenta a aresta transversal em forma de "S".

A figura 2.4 - Mostra a geometria da afiação helicoidal.



Figura 2.4 - Geometria da afiação helicoidal

A curva em forma de "S" proporciona um ponto mais alto no centro da aresta transversal, o que elimina o desvio no contato inicial da ponta da broca com o material a ser usinado. Esta afiação produz pequenos desvios dimensionais (alargamento), eliminando em muitos casos o uso posterior de alargadores [ZEISER, 1986].

A afiação helicoidal gera baixos esforços, sendo particularmente vantajosa para o uso em máquinas de eixos múltiplos. Ela também pode ser usada sobre superfícies curvas e dispensa o uso de buchas guias. A desvantagem da afiação "Helical", é que, semelhante à afiação convencional, apresenta a tendência de produzir rebarba no final do furo [DONARSKI, 1984].

#### 2.3.4 - Afiação "Racon" ou de Ponta Radial

A broca com a afiação "Racon" (GIDDING & LEWIS, USA), apresenta a ponta esférica.

A figura 2.5 - Mostra a geometria da afiação "Racon".



Figura 2.5 - Geometria da afiação "Racon"

A afiação "Racon" é usada comumente na indústria automotiva, por causa da longa vida entre as afiações. Na usinagem de ferro fundido a afiação "Racon" tem uma vida de 8 a 10 vezes maior do que a afiação convencional [ZEISER, 1986].

As arestas de corte em forma de raio tem a propriedade de dissipar melhor o calor gerado durante a usinagem. Pode-se usar avanços maiores do que os utilizados nas brocas convencionais e não há tendência a formação de rebarbas no final do furo.

A desvantagem da afiação "Racon" é que ela não é autocentrante, sendo necessário usar brocas de centro ou buchas guia.

### 2.3.5 - Afiação "Bickford"

A figura 2.6 - Mostra a geometria da afiação "Bickford".

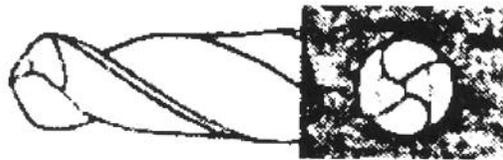


Figura 2.6 - Geometria da afiação "Bickford"

A afiação "Bickford" combina a construção auto centrante da afiação helicoidal com a longa vida, ausência de rebarbas no final do furo e o uso de maiores avanços próprios da afiação "Racon" [DONARSKI, 1984].

Um exemplo da aplicação da afiação "Bickford" é o uso na fabricação de estruturas de caminhão, onde uma broca com afiação convencional realiza vinte e cinco furos, e com a afiação "Bickford" realiza duzentos e cinquenta furos. Também o avanço pode ser aumentado de 114 para 254 mm/min [ZEISER, 1986].

## 2.4 - Tipos de Perfil de Brocas Helicoidais

A fim de se melhor entender o perfil total de uma broca, pode-se subdividir o perfil total em 4 subperfis [SKF MANUAL TÉCNICO, 1989]:

1. ---perfil da haste;
2. ---perfil do comprimento de corte (seção transversal);
3. ---perfil da ponta;
4. ---perfil da aresta transversal.

### 2.4.1 - Perfil da haste

A função do cabo é a de fixar e centrar a broca. Sobre a influência do perfil do cabo nas propriedades estáticas e dinâmicas, bem como na capacidade de corte das brocas, quase não se encontra nada na literatura.

Pode-se afirmar que o perfil da haste deve apresentar as seguintes características:

- uma fixação segura, rápida e precisa;
- boa centragem;
- boa rigidez estática e dinâmica;
- elevada elasticidade;
- grande capacidade de transmitir forças;
- pequena tendência ao desgaste, etc.

### 2.4.2 - Perfil do Comprimento de Corte

A forma dos canais bem como a forma e a geometria da aresta secundária de corte e da guia formam o perfil do comprimento de corte. A forma deste perfil é obtida na fabricação das brocas e não pode mais ser modificada pelo usuário.

O comprimento de corte exerce uma forte influência na rigidez estática e dinâmica da ferramenta, bem como no processo de furação e principalmente no

fluxo de cavaco e na vida da ferramenta [THORNLEY, 1987]. O comprimento do passo atua diretamente na rigidez à torção, à flexão e flambagem. A forma dos canais e o estado da superfície de saída influenciam o fluxo de cavaco, bem como a vida da ferramenta [LORENZ, 1979], [SKEVINGTON, 1986] e [FIESSELMANN, 1990].

#### Perfil da Seção Transversal [MASUHA, 1980]

Uma análise sistemática das seções transversais utilizadas conduz à três grupos de perfis. De acordo com esta análise, o primeiro grupo contém os perfis clássicos desenvolvidos ao longo de vários anos e que já são normalizados (DIN 1412, 1414, 1836) [DIN, 1977].

Embora os perfis números 5 e 6 (figura 2.7), não sejam normalizados, estes contém todos os elementos geométricos padrões, à exceção do núcleo.

#### Perfil do tipo I

Para os perfis “classificados” como do tipo I, observa-se as seguintes características:

- uma guia com largura entre 0,0025 e 0,15  $\varnothing$ ;
- um diâmetro do núcleo entre 0,08 e 0,2  $\varnothing$  e um aumento do diâmetro do núcleo no sentido da haste variando entre 1,4 e 1,8 mm em 100 mm;
- uma seção transversal que compreende entre 35 e 45% da seção total do círculo.

Para aumento da resistência da broca são aumentados tanto o diâmetro do núcleo, como também a largura da superfície secundária de folga (número 6). Para melhorar a refrigeração na ponta da broca, este tipo de perfil comporta canais de refrigeração (número 2). Para brocas utilizadas em máquinas do tipo automática prevê-se a utilização de brocas com o diâmetro do núcleo reduzido (número 5).

A figura 2.7 mostra os grupos de perfis.

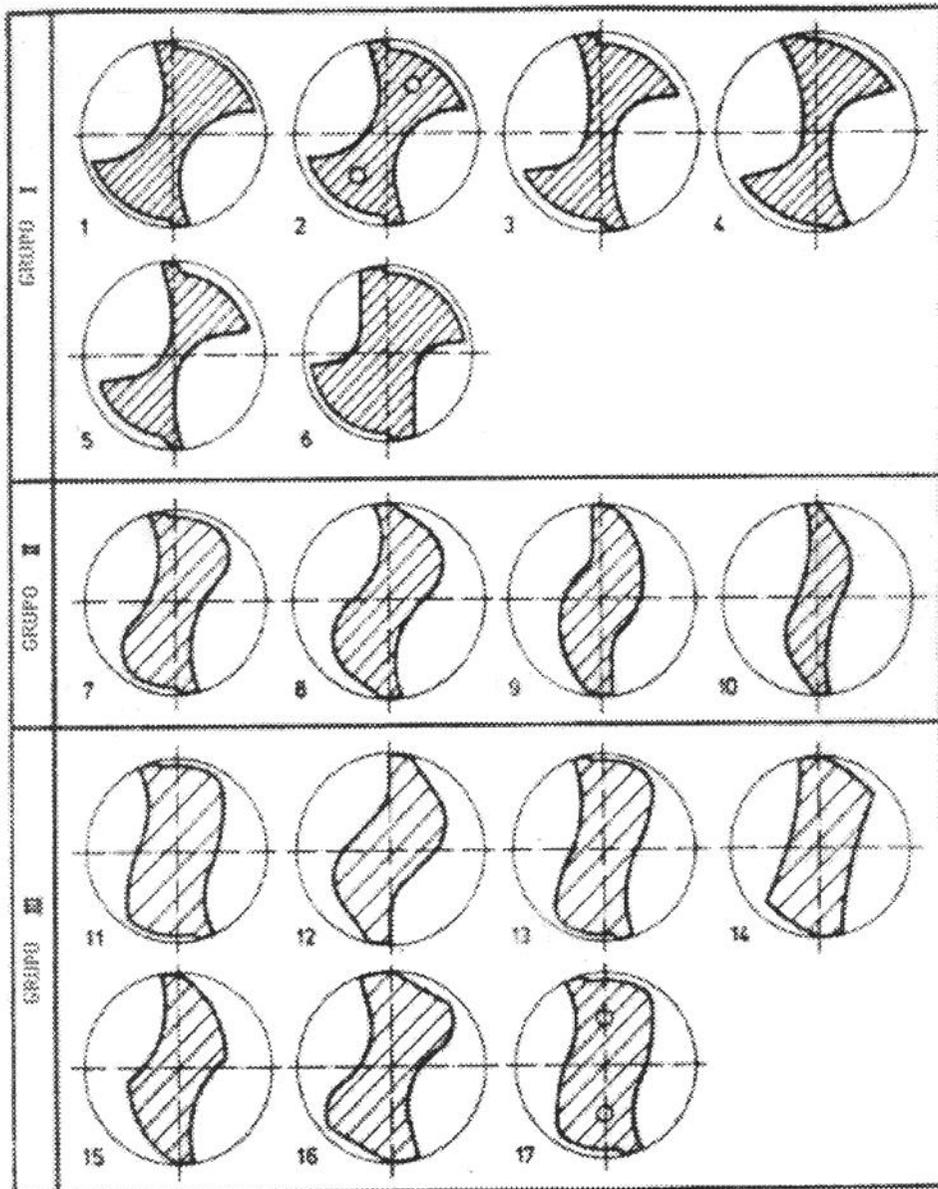


Figura 2.7 - Grupos de perfis [MASUHA, 1980].

### Perfil do tipo II

O perfil do tipo II, compreende novos desenvolvimentos feitos a partir dos perfis "classificados" como sendo do tipo I. Algumas características observadas nestes perfis são:

- uma guia arredondada, fazendo com que praticamente não seja mais possível se determinar o diâmetro da superfície secundária de folga;

- um núcleo mais reforçado, com diâmetro variando entre 0,2 e 0,28  $\varnothing$ , no entanto, não mais aumentando no sentido da haste (números 7 e 8);
- uma guia bastante delgada, fazendo com que o atrito entre a guia e a parede do furo sejam diminuídas.

O aumento do núcleo é dependente do tipo de utilização. Por exemplo, na furação de materiais com baixa resistência à tração, o núcleo não é aumentado, como se vê no número 10.

Brocas com estes perfis possuem ângulos de ponta variando entre 125 e 130°. Normalmente se emprega estes perfis com afiação do tipo cruzada.

### Perfis do tipo III

Este tipo de perfil foi desenvolvido para furações difíceis. Algumas características deste tipo de perfil:

- um perfil do tipo romboidal, limitados por curvas aproximadamente paralelas entre si;
- um núcleo extremamente reforçado, em torno de 0,3 e 0,4  $\varnothing$ . O núcleo não varia ao longo do comprimento da broca;
- uma guia extremamente delgada, diminuindo o atrito entre a guia e a parede do furo.

As características destes perfis são adequadas para furações com comprimentos acima de 5  $\varnothing$ , devido à elevada estabilidade da furação com estas brocas. O ângulo de saída é em geral mais elevado do que nas brocas normalizadas do tipo N, e o ângulo de ponta fica em torno de 125 à 130° e ângulo de hélice entre 30 e 45°. Empregam-se normalmente afiações cruzadas para este tipo de perfil.

## Capítulo 3

### Metodologia Científica

#### 3.1 - MATERIAL EMPREGADO

##### 3.1-1 - Material Ensaiado

Foi utilizada nos ensaios a liga de titânio Ti-6Al-4V. A tabela 3.1 mostra a composição química desta liga, conforme o resultado da análise química realizada pelo método de absorção atômica, segundo a norma ASTM E 30.

Tabela 3.1 - Composição química da liga Ti-6Al-4V, conforme resultado da análise química realizada pelo método de absorção atômica, segundo a norma ASTM E 30.

ELEMENTOS ANALISADOS (Porcentagem em peso)							
Al	V	Cr	Sn	Mo	Zn	Fe	Ni
6,44	3,73	0,02	0,04	0,005	< 0,001	0,16	0,02

Verificou-se que a composição química se enquadra naquela da liga Ti-6Al-4V, conforme a especificação ASTM B265 GR5 ou MIL-T-9046 Std.

O material ensaiado apresenta uma dureza média de 38,3 HRC, conforme ensaio de dureza realizado de acordo com a norma ASTM E 18.

A figura 3.1a e b apresenta o resultado do ensaio metalográfico realizado de acordo com a norma ASTM E 113.



a) Direção transversal



b) Direção Longitudinal

Figura 3.1a e b - Resultado do ensaio metalográfico da liga Ti-6Al-4V, realizado de acordo com a norma ASTM E 113.

### 3.1-2 - Material das brocas helicoidais

O material utilizado para a confecção das ferramentas foi o AR - E, ABNT M42. A tabela 3.2 mostra a composição química desta liga, conforme o resultado da análise química pelo método de absorção atômica, segundo a norma ASTM E 30.

Tabela 3.2 - Composição química da liga ABNT M42, conforme resultado da análise química realizada pelo método de absorção atômica, segundo a norma ASTM E 30.

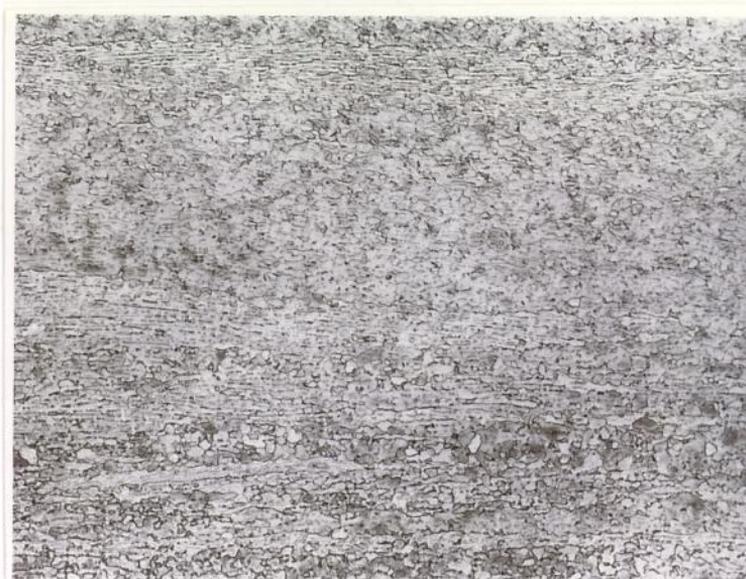
ELEMENTOS ANALISADOS (Porcentagem em peso)									
C	S	P	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co
1,100	-	0,017	0,290	0,410	3,650	1,140	1,440	9,690	8,120

Verificou-se que a composição química se enquadra naquela do aço rápido AISI M42, conforme a especificação ASTM A600-69, (ABNT M42, conforme NBR 6189).

A figura 3.2a e b apresenta o resultado do ensaio metalográfico



a) Direção Transversal



c) Direção Longitudinal

Figura 3.2a e b - Resultado do ensaio metalográfico do aço rápido ABNT M42, realizado de acordo com a norma ASTM E 113.

Todos os ensaios relatados nos itens 3.1 e 3.2 foram realizados no laboratório de materiais do CTA, e através destes foi possível observar a conformidade dos materiais amostrados com os certificados emitidos pelos fornecedores.

### 3.1-3 - Fluido de corte

Um fluido de corte do tipo solúvel, com características de extrema pressão (EP), o HOCUT 728, recomendado pelo fabricante, E. F. HOUGHTON do Brasil S.A., para furações severas em aço inoxidável, ligas de alumínio fundidas e ligas de titânio foi utilizado. A tabela 3.3 mostra as características típicas deste fluido de corte.

Tabela 3.3 - Características típicas do fluido de corte

Cor - máximo	3
Densidade a 4°C	1,080
Densidade a 20°C	1,060
Viscosidade a 45°C	70 - 80

### 3.2 - EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS

A tabela 3.4 descreve os equipamentos e os instrumentos utilizados nos ensaios.

Tabela 3.4 - Equipamentos e Instrumentos utilizados nos ensaios

Equipamentos/Instrumentos	Descrição
1 Centro de Usinagem CNC	marca BREVET, mod. CV 286 - Potência de 13,6 kW
2 Torno Mecânico	marca ROMI, mod. P 400 - Potência de 3,5/7,5 HP
3 Serra circular	
4 Dinamômetro Piezelétrico	marca KISTLER, mod. 9273 ,com quatro componentes (Fx, Fy, Ff e Mt)
5 Amplificador de carga	marca KISTLER, mod. 5007
6 Amplificador de carga	marca KISTLER, mod. 5001
7 Placa para interface A/D	marca LYNX, mod. CAD 12/36
8 Micro computador	marca MICROTEC, mod. AT 286
9 Programa para aquisição de dados	marca LYNX, AQDADOS
10 Cabo para interface A/D	montado com conectores BNC
11 Cabo para aquisição de dados	com isolamento especial
12 Micro durômetro	marca ZWICH, mod. 3211

13 Microscópio	marca DSV, mod. 10077
14 Projetor de perfil	marca MITUTOYO, mod. PH 350
15 Máquina fotográfica	marca PENTAX, mod. Sphotomatic SPII
16 Paquímetro	marca MITUTOYO, de 150 mm
17 Micrômetro externo de ponta fina	marca MITUTOYO, de 0 - 25 mm
18 Micrômetro externo	marca MITUTOYO, de 0 - 25 mm
19 Micrômetro interno	marca MITUTOYO, de 8 - 10 / 10 - 12 mm
20 Dispositivo para fixação do CDP no dinamômetro	ABNT 1040
21 Dispositivo de fixação da ferramenta para medição dos desgastes	ABNT 1040
22 Desempeno	fofo
23 Prisma magnético	marca MITUTOYO
24 Relógio apalpador	marca MITUTOYO, leitura de 0,001 mm
25 Lápis elétrico	
26 Pinça para fixação de ferramenta	

### 3.3 - MÉTODOS EXPERIMENTAIS.

Os ensaios de furação se dividem em fase I, onde o objetivo é estudar o comportamento de diferentes afiações na usinagem da liga Ti-6Al-4V e fase II, Parte 1 e Parte 2, onde o objetivo é estudar o comportamento de diferentes tipos de geometria de broca e perfis da seção transversal na usinagem desta mesma liga.

#### 3.3-1 - Preparação dos corpos de prova

Os CDPs foram confeccionados a partir de placas de Ti-6Al-4V com 25,4 mm de espessura.

A figura 3.3 mostra a forma dos CDPs utilizados nos ensaios.

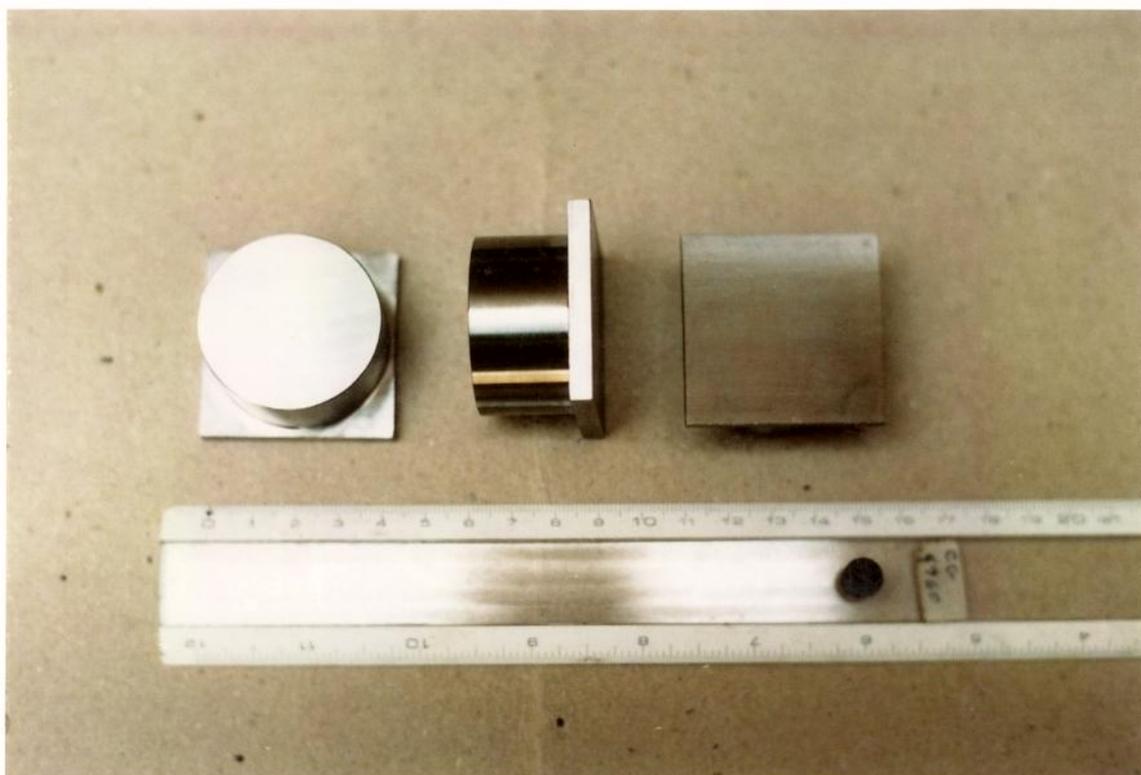


Figura 3.3 - Forma dos CDPs utilizados nos ensaios.

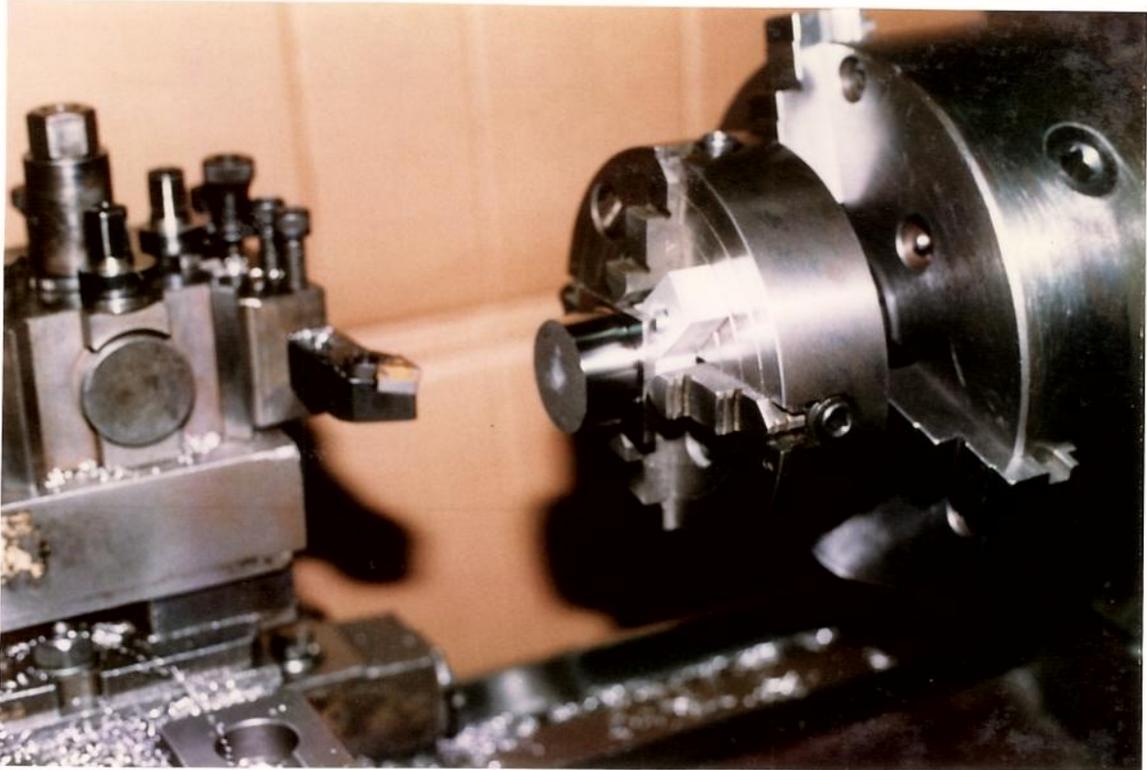


Figura 3.4 - Vista parcial da confecção dos corpos de prova no torno mecânico.

As placas de Ti-6Al-4V foram cortadas em pedaços quadrados de aproximadamente 45 x 45, em uma serra circular, e posteriormente usinados até atingirem a sua forma final em torno mecânico.

A figura 3.4 mostra a vista parcial da confecção dos corpos de prova no torno.

Na fase I e na fase II - Parte 2 - foram realizados furos nos corpos de prova e em uma placa da liga Ti-6Al-4V, presa ao lado do dinamômetro, porém na fase II - Parte 1, utilizou-se apenas os corpos de prova para a realização dos ensaios.

As figuras 3.5a e 3.5b ilustram o arranjo físico dos equipamentos utilizados nos ensaios.

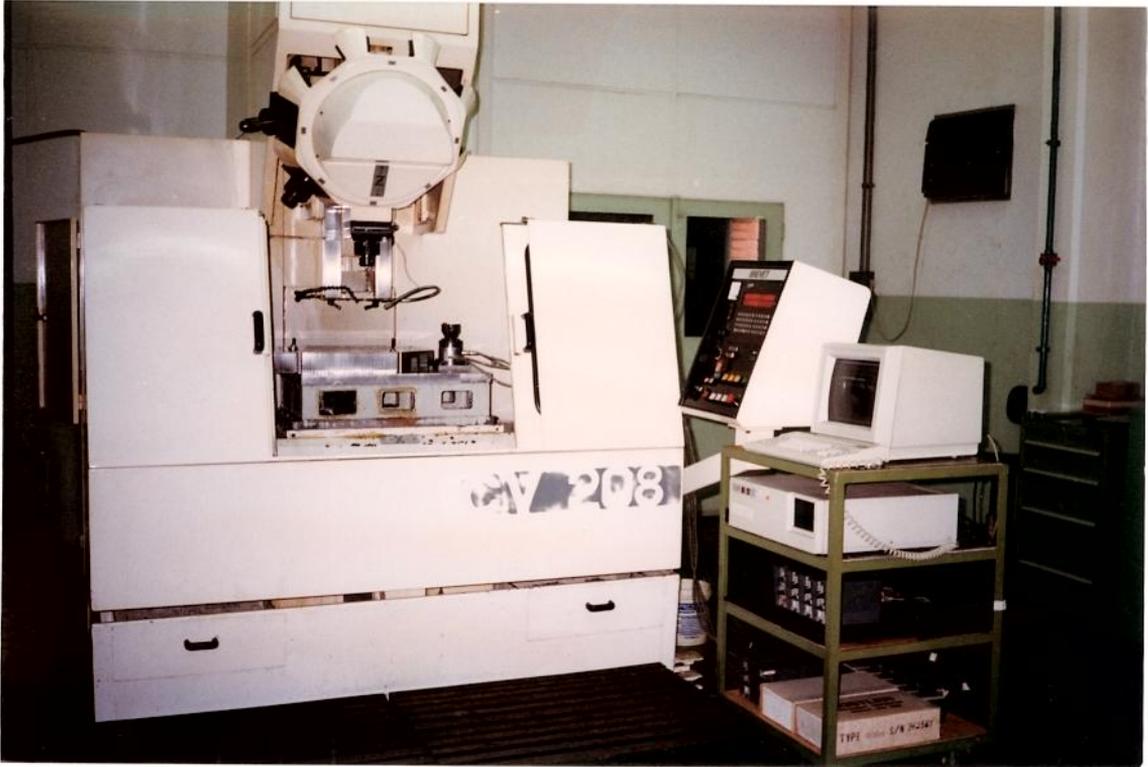


Figura 3.5a - Vista parcial dos equipamentos utilizados nos ensaios.



Figura 3.5b - Vista parcial do dinamômetro utilizado nos ensaios.

## FASE I :

Os objetivos da primeira Fase são:

1. Verificar o comportamento das diferentes afiações no que se refere:
  - aos esforços de corte (momento de torção  $M_t$  e força de avanço  $F_f$ );
  - à evolução dos desgastes da aresta principal de corte VB e da aresta transversal VBQ (até atingir 2000 mm na somatória do comprimento dos furos usinados);
  - ao erro dimensional do furo (alargamento);
  - ao tipo de cavaco gerado.
2. Selecionar entre os tipos de afiação propostos, com base na observação do item anterior, qual é o mais indicado para a usinagem da liga Ti-6Al-4V.

Foram utilizados os seguintes tipos de afiação:

1. Tipo "Helical";
2. Tipo "Racon";
3. Tipo "Bickford";
4. Tipo cruzada P3 de acordo com a norma NAS 907;
5. Tipo cruzada P9 de acordo com a norma NAS 907.

A figura 3.6 mostra a ferramenta com a afiação tipo "Helical".



Figura 3.6 - Ferramenta com a afiação tipo "Helical".

A figura 3.7 mostra a ferramenta com a afiação tipo "Racon".



Figura 3.7 - Ferramenta com a afiação tipo "Racon".

A figura 3.8 mostra a ferramenta com afiação tipo “Bickford”.



Figura 3.8 - Ferramenta com a afiação tipo “Bickford”.

A figura 3.9 mostra a ferramenta com afiação tipo cruzada NAS P3 [NAS 907,1986].



Figura 3.9 - Ferramenta com a afiação tipo cruzada NAS P3 [NAS 907,1986].

A figura 3.10 mostra a ferramenta com a afiação tipo cruzada NAS P9 [NAS 907,1986].



Figura 3.10 - Ferramenta com a afiação tipo cruzada P9 [NAS 907,1986].

Os corpos de prova foram fixados no dispositivo, sobre o dinamômetro, e a cada cinco furos foram monitorados o momento  $M_t$ , a força de avanço  $F_f$ , o desgaste VB, o desgaste VBQ e o alargamento do furo, para as condições de usinagem ilustradas nas tabelas 3.5a e 3.5b.

Tabela 3.5a - Condições de usinagem utilizadas na Fase I

CONDIÇÃO DE USINAGEM	TEMPO DE USINAGEM por furo (segundos)	AVANÇO (mm/volta)	AVANÇO (mm/min)	VELOCIDADE DE CORTE (mm/min)	ROTAÇÃO (rpm)
1	49	0,100	27	7,40	268
2	30	0,100	40	11,05	400
3	28	0,100	47	13,00	470
4	22	0,100	60	16,58	600
5	27	0,122	49	11,05	400
6	22	0,150	60	11,05	400
7	17	0,200	80	11,05	400

Tabela 3.5b - Condições de usinagem utilizadas na Fase I

ITEM	DESCRIÇÃO
DIÂMETRO DA BROCA (mm)	8,8
PROFUNDIDADE DO FURO (mm)	22
FLUIDO DE CORTE	Tipo : HOCUT 728 (Solúvel) Fabricante: HOUGHTON Vazão: 8,0 l/min Concentração: 10%

Os valores do avanço e da velocidade de corte foram selecionados, com base nas recomendações contidas no Operators Handbook - Machining Titanium e no Machining Data Handbook [OPERATORS HANDBOOK - MACHINING TITANIUM, 1968] [MACHINING DATA HANDBOOK, 1985]

Para todas as afiações citadas, foram utilizadas brocas com o perfil número 6, segundo a classificação de Masuha, [MASUHA, 1980], (figura 2.7).

O perfil número 6 é o perfil mais reforçado, dentre os perfis que utilizam ângulos normalizados (ângulo de ponta, ângulo de hélice, ângulo de folga, etc.).

A tentativa de se utilizar um perfil padrão, número 3, para todas as afiações, conduziu, em alguns casos, à quebra da ferramenta (afiações: cônica normal, "Helical" e cruzada NAS P9). As características das ferramentas utilizadas nos ensaios da Fase I, se encontram na tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Descrição da geometria das brocas utilizadas nos ensaios da Fase I

GEOMETRIAS	NÚMERO 3	NÚMERO 6
ângulo de hélice (graus)	29	29
passo de hélice (mm)	49,80	49,80
diâmetro externo (mm)	8,8	8,8
diâmetro do núcleo (mm)	1,59 - 1,71	3,00 - 3,41
diâmetro detalonado	8,52 - 8,59	8,52 - 8,59
diâmetro do núcleo / diâmetro externo	0,16	0,36
conicidade do núcleo/100 mm	1,5	nula
ângulo de ponta (graus)	130	130
ângulo de folga	8 - 12	8 - 12
ângulo de saída (graus)	29	29
ângulo da aresta transversal (graus)	115 - 130	115 - 130
perfil da seção transversal	PADRÃO	ESPECIAL
diferença de altura de corte (mm)	0,07 (máx.)	0,07 (máx.)
batimento (mm)	0,07 (máx.)	0,07 (máx.)
conicidade da broca	0,026 - 0,044	0,026 - 0,044
espessura da guia (mm)	0,56 - 0,78	0,56 - 0,78
comprimento total	132,2 - 133,9	132,2 - 133,9
comprimento de corte útil (mm)	78	78
dureza da área útil (HRC)	64 - 66	64 - 66

A figura 3.11 mostra os perfis da seção transversal número 3 e número 6, conforme a classificação de Masuha. [MASUHA, 1980].

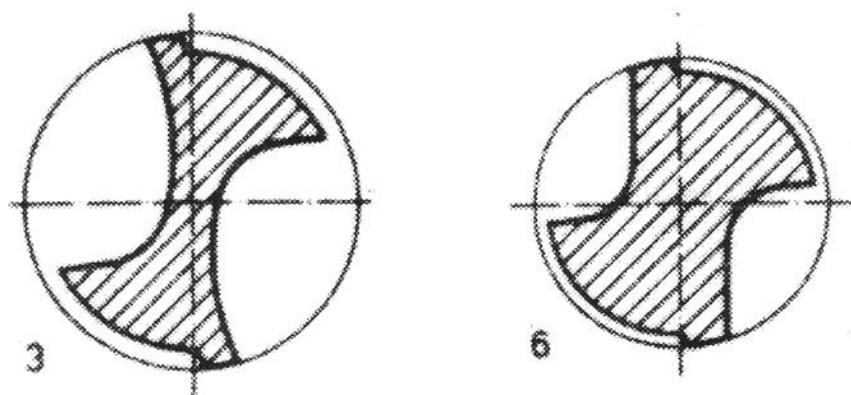


Figura 3.11 - Perfil da seção transversal número 3 e número 6, conforme a classificação de Masuha. [MASUHA, 1980].

### 3.3-3 - FASE II/Parte 1

Na primeira parte da segunda Fase dos ensaios, Fase II - Parte 1, foram realizados ensaios com o tipo de afiação que apresentou um melhor desempenho na Fase I, adotando-se a velocidade de corte recomendada no Operators Handbook - Machining Titanium e no Machining Data Handbook e alterando-se os valores do avanço [OPERATORS HANDBOOK - MACHINING TITANIUM, 1968] [MACHINING DATA HANDBOOK, 1985].

Os ensaios foram realizados de acordo com as condições de usinagem descritas na tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Condições de usinagem utilizadas nos ensaios da FASE II - Parte 1

CONDIÇÃO DE USINAGEM	TEMPO DE USINAGEM (segundos)	AVANÇO (mm/volta)	AVANÇO (mm/min)	VELOCIDADE DE CORTE (m/min)	ROTAÇÃO (rpm)
1	37	0,100	36	11,30	360
2	30	0,122	44		
3	25	0,150	54		
4	19	0,200	72		

O objetivo da Fase II - Parte 1, foi verificar, para a afiação que apresentou o melhor desempenho na usinagem da liga Ti-6Al-4V, entre as afiações utilizadas na Fase I, qual a influência da variação do avanço no comportamento dos esforços de corte ( $M_t$  e  $F_f$ ) e no desvio dimensional (alargamento) do furo obtido.

Foram utilizados apenas os corpos de prova para a realização dos ensaios e realizadas três repetições para cada condição de usinagem.

Nesta Fase foram testadas ferramentas com o perfil da seção transversal e a geometria especiais.

Os perfis números 9 e 13 são os recomendados para a usinagem de ligas duras e materiais de difícil usinabilidade e por isso foram utilizados.

A figura 3.12 mostra os perfis da seção transversal número 9 e número 13, conforme a classificação de Masuha, [MASUHA, 1980].

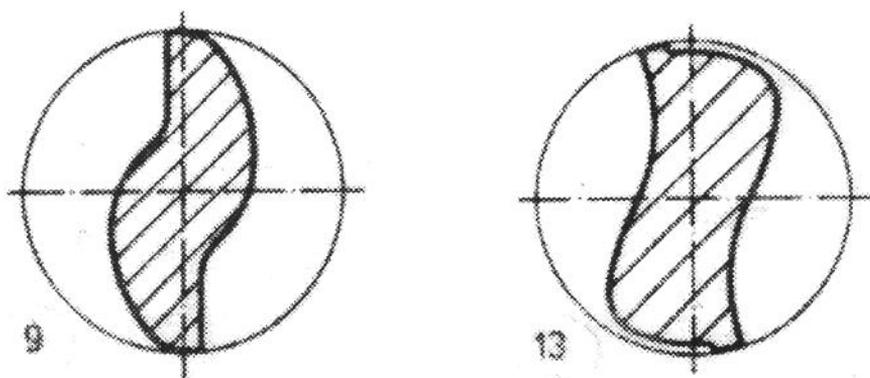


Figura 3.12 - Perfil da seção transversal número 9 e número 13, conforme a classificação de Masuha, [MASUHA, 1980].

A tabela 3.8 descreve a geometria das brocas utilizadas nos ensaios da Fasell.

Tabela 3.8 - Descrição da geometria das brocas utilizadas nos ensaios da Fasell.

GEOMETRIAS	PERFIL	
	Nº 9	Nº 13
ângulo de hélice (graus)	38	38
passo de hélice (mm)	40	40
diâmetro externo (mm)	9,990 - 10,000	9,990 - 10,000
diâmetro do núcleo (mm)	3,40 - 3,47	3,18 - 3,25
diâmetro detalonado	9,42 - 9,49	9,42 - 9,49
diâmetro do núcleo / diâmetro externo	0,34	0,32
conicidade do núcleo/100 mm	nula	nula
ângulo de ponta (graus)	130	130
ângulo de folga	8 - 12	8 - 12
ângulo de saída (graus)	38	38
ângulo da aresta transversal (graus)	115 - 130	115 - 130
perfil da seção transversal	número 9	número 13
diferença de altura de corte (mm)	0,07 (máx.)	0,07 (máx.)
batimento (mm)	0,07 (máx.)	0,07 (máx.)
conicidade da broca	0,026 - 0,044	0,026 - 0,044
espessura da guia (mm)	0,60 - 0,75	0,60 - 0,75
comprimento total	132,2 - 133,9	132,2 - 133,9
comprimento de corte útil (mm)	71	71
dureza da área útil (HRC)	64 - 66	64 - 66
tipo de afiação	"Helical"	"Helical"

Todas as brocas utilizadas nos ensaios possuíam em comum as seguintes características:

- Material: AR - E, AISI-M 42
- Haste: cilíndrica, série curta - NBR 7442
- Diâmetro: 10 mm
- Fabricante: Twill Ind. e Comércio de Ferramentas S.A.

Admitiu-se um desvio máximo de 0,07 mm para o erro de batimento e diferença de altura de corte (diferença de divisão), como foi mostrado na tabela 3.8.

A figura 3.13 mostra o perfil N° 9, com a afiação tipo “Helical”.

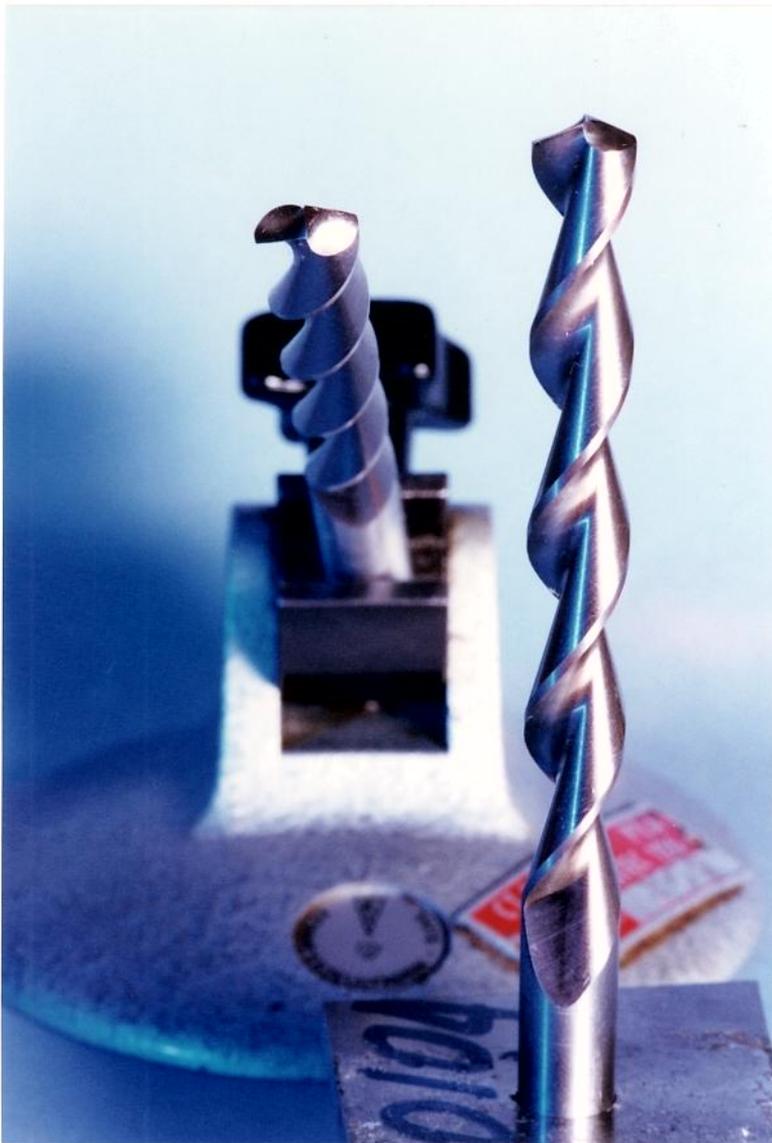


Figura 3.13 Perfil N° 9, com a afiação tipo “Helical”.

A figura 3.14 mostra o perfil N° 13, com a afiação tipo "Helical".



Figura 3.14 - Perfil N° 13, com a afiação tipo "Helical".

## FASE II - Parte 2

Nesta fase foram realizados ensaios com o objetivo de verificar qual o comportamento dos tipos de perfis utilizados na Fase II - Parte 1, para diferentes velocidades de corte, adotando-se o avanço de 0,100 mm/rot, conforme é recomendado no Operators Handbook - Machining Titanium e no Machining Data Handbook [OPERATORS HANDBOOK - MACHINING TITANIUM, 1968] [MACHINING DATA HANDBOOK, 1985]. Para atingir este objetivo foram monitorados:

- os esforços de corte (momento de torção  $M_t$  e força de avanço  $F_f$ );
- a evolução dos desgastes da aresta principal de corte VB e da aresta transversal VBQ;
- o erro dimensional do furo (alargamento);
- o tipo de cavaco gerado durante a usinagem.

Os ensaios foram realizados de acordo com as condições de usinagem descritas na tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Condições de usinagem utilizadas nos teste da FASE II - Parte 2

CONDIÇÃO DE USINAGEM	TEMPO DE USINAGEM (segundos)	AVANÇO (mm/volta)	AVANÇO (mm/min)	VELOCIDADE DE CORTE (m/min)	ROTAÇÃO (rpm)
1	44	0,100	30	9,42	300
2	37	0,100	36	11,30	360
3	30	0,100	42	13.19	420

Na Fase II - Parte 2 - foram realizados furos nos corpos de prova e em uma placa da liga Ti-6Al-4V, presa ao lado do dinamômetro. A cada nove furos realizados na placa, foi realizado um furo no corpo de prova fixado no dinamômetro. Este procedimento foi adotado até que se completassem 2000 mm de furo usinado, para cada uma das três velocidades de corte adotadas.

## Capítulo 4

### Resultados e Discussões

#### 4.1 - FASE I

Os resultados dos ensaios da Fase I podem ser observados nas figuras 4.1 a 4.14.

##### 4.1-1 - Comportamento dos Esforços de Corte Durante a Fase I.

Os resultados referentes ao comportamento do momento de torção durante a Fase I podem ser observados nas figuras 4.1 e 4.2 .

A figura 4.1 mostra o comportamento do momento de torção ( $M_t$ ), quando se manteve o avanço constante, igual à 0,100 mm/rot, e se variou a velocidade de corte.

A figura 4.2 mostra o comportamento do momento de torção ( $M_t$ ), quando se manteve a velocidade de corte constante, igual à 11,05 m/min, e se variou o avanço.

Em relação ao momento de torção, a afiação “Helical” apresentou um comportamento mais uniforme para a variação do avanço, e praticamente não se alterou com a variação da velocidade de corte.

Das figuras 4.1 e 4.2 observa-se que a influência do avanço sobre o momento de torção é maior que a influência da velocidade de corte, conforme observado também por Shall e Oxford, citados por Fonseca, na furação de outros materiais [FONSECA, 1992].

$M_t = f(v_c)$ , para  $f = 0,100$  mm/rot

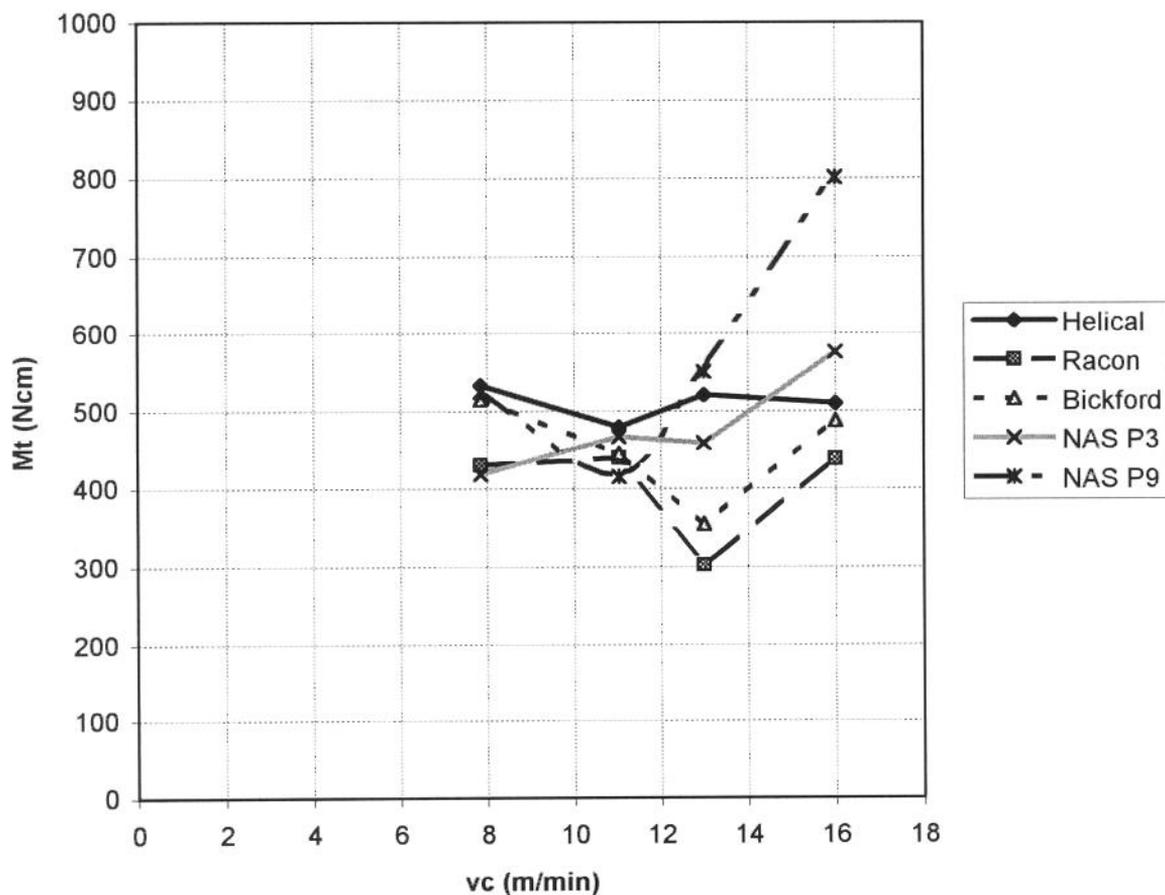


Figura 4.1 - Momento de torção ( $M_t$ ) em função da variação da velocidade de corte, com o avanço igual a  $0,100$  mm/rot, para vários tipos de afiação.

Na figura 4.1 observa-se que não há mudança significativa nos valores do momento de torção para o aumento da velocidade de corte para a afiação helical.

$M_t = f_{\zeta}(f)$ , para  $v_c = 11,05$  m/min

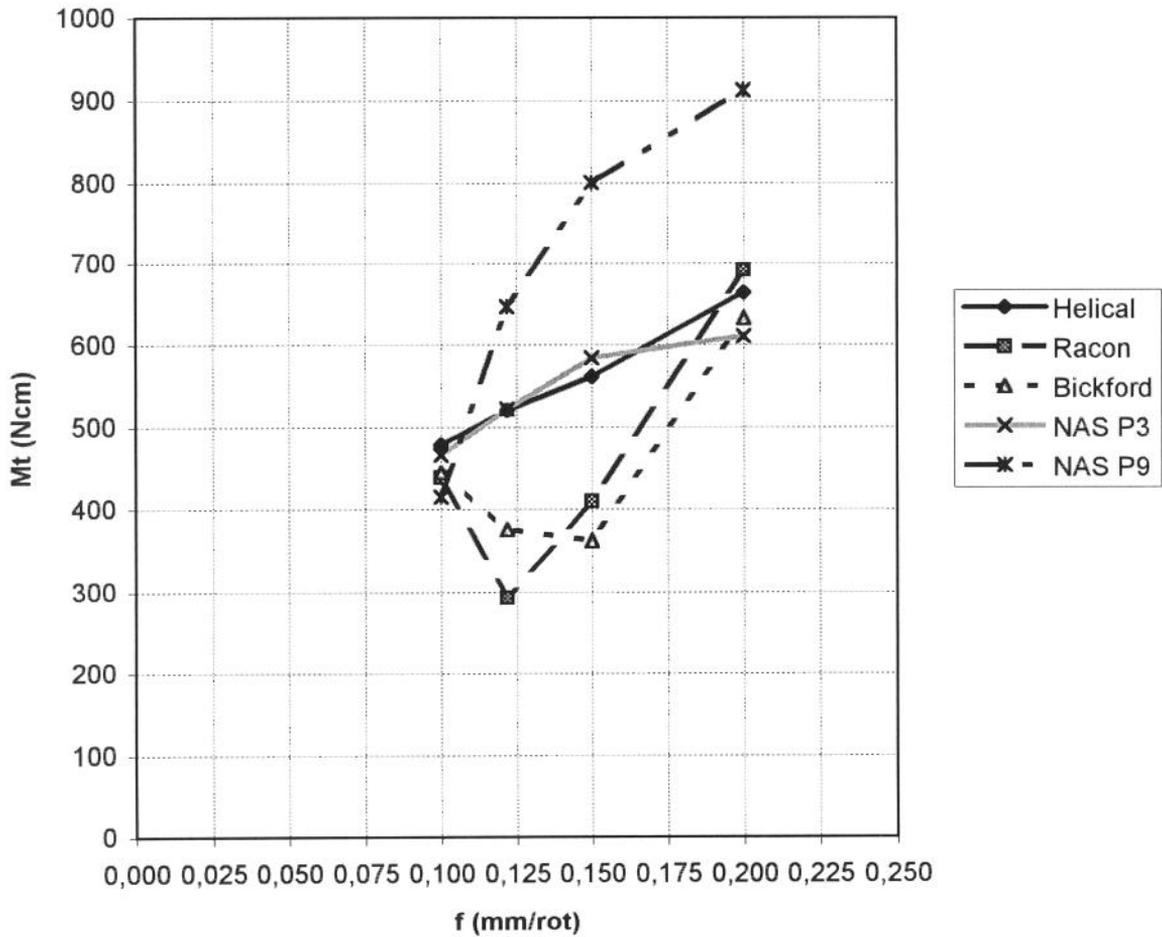


Figura 4.2 - Momento de torção ( $M_t$ ) em função da variação do avanço, com a velocidade de corte igual a 11,05 m/min, para vários tipos de afiação.

Observa-se, das figuras 4.1 e 4.2, que os menores valores do momento de torção ocorreram para as afiações “Racon” e “Bickford”, respectivamente.

Os resultados referentes ao comportamento da força de avanço durante a Fase I podem ser observados nas figuras 4.3 e 4.4.

A figura 4.3 mostra o comportamento da força de avanço ( $F_f$ ), quando se manteve o avanço constante, igual à 0,100 mm/rot, e se variou a velocidade de corte.

$F_f=f\zeta(vc)$  para  $f=0,100$  mm/rot

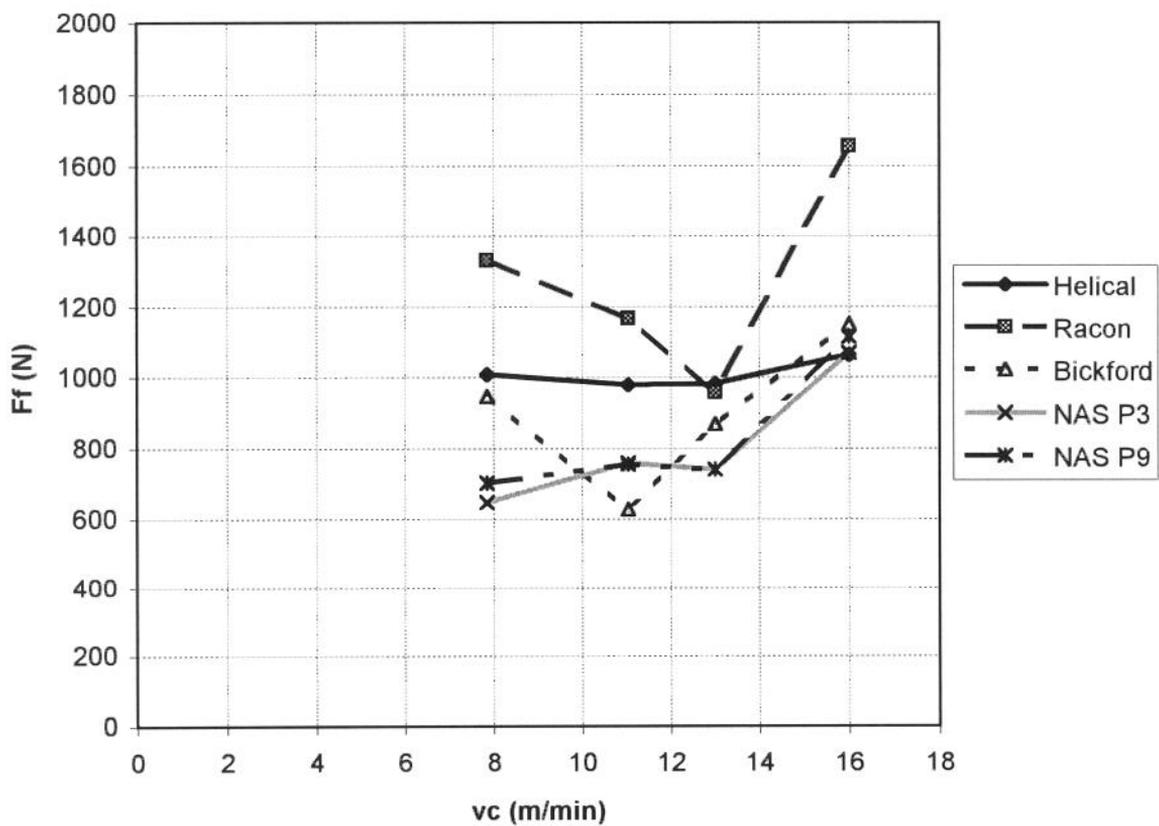


Figura 4.3 - Força de avanço ( $F_f$ ) em função da variação da velocidade de corte, com o avanço igual a 0,100 mm/rot, para vários tipos de afiação.

Na figura 4.3 observa-se que há uma variação da força de avanço ( $F_f$ ) para todos os tipos de afiação, quando se aumenta a velocidade de corte ( $vc$ ), exceto na afiação do tipo “Helical”, para a qual praticamente não há variação da força de avanço ( $F_f$ ).

A figura 4.4 mostra o comportamento da força de avanço ( $F_f$ ), quando se manteve a velocidade de corte constante, igual à 11,05m/min, e se variou o avanço.

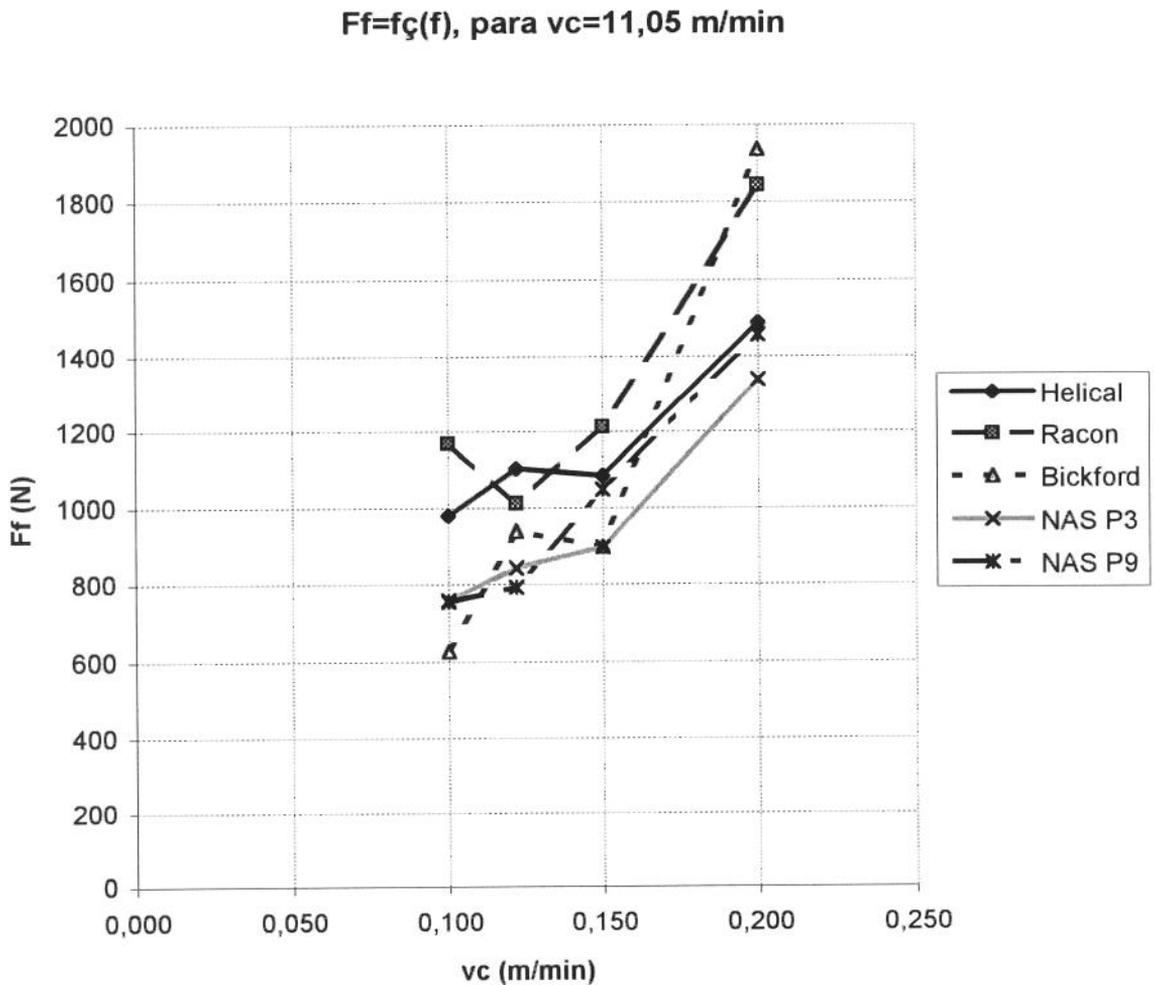


Figura 4.4 - Força de avanço ( $F_f$ ) em função da variação do avanço, com a velocidade de corte igual a 11,05 m/min, para vários tipos de afiação.

Observa-se das figuras 4.3 e 4.4 que os menores valores da força de avanço ( $F_f$ ) foram para as afiações tipo NAS P3 e P9 respectivamente.

Na figura 4.4 observa-se que quando o avanço ( $f$ ) aumenta, aumenta também a força de avanço ( $F_f$ ) para todos os tipos de afiação e que a influência do avanço é maior do que a influência da velocidade de corte sobre os valores da força de avanço.

#### 4.1-2 - Erro Dimensional dos Furos Obtidos Durante a Fase I.

Os resultados referentes ao erro dimensional dos furos durante a Fase I podem ser observados nas figuras 4.5 e 4.6.

A figura 4.5 mostra o erro dimensional do furo (alargamento), quando se manteve o avanço constante, igual a 0,100 mm/rot, e se variou a velocidade de corte.

**Alargamento=fç(vc), para f=0,100 m/min**

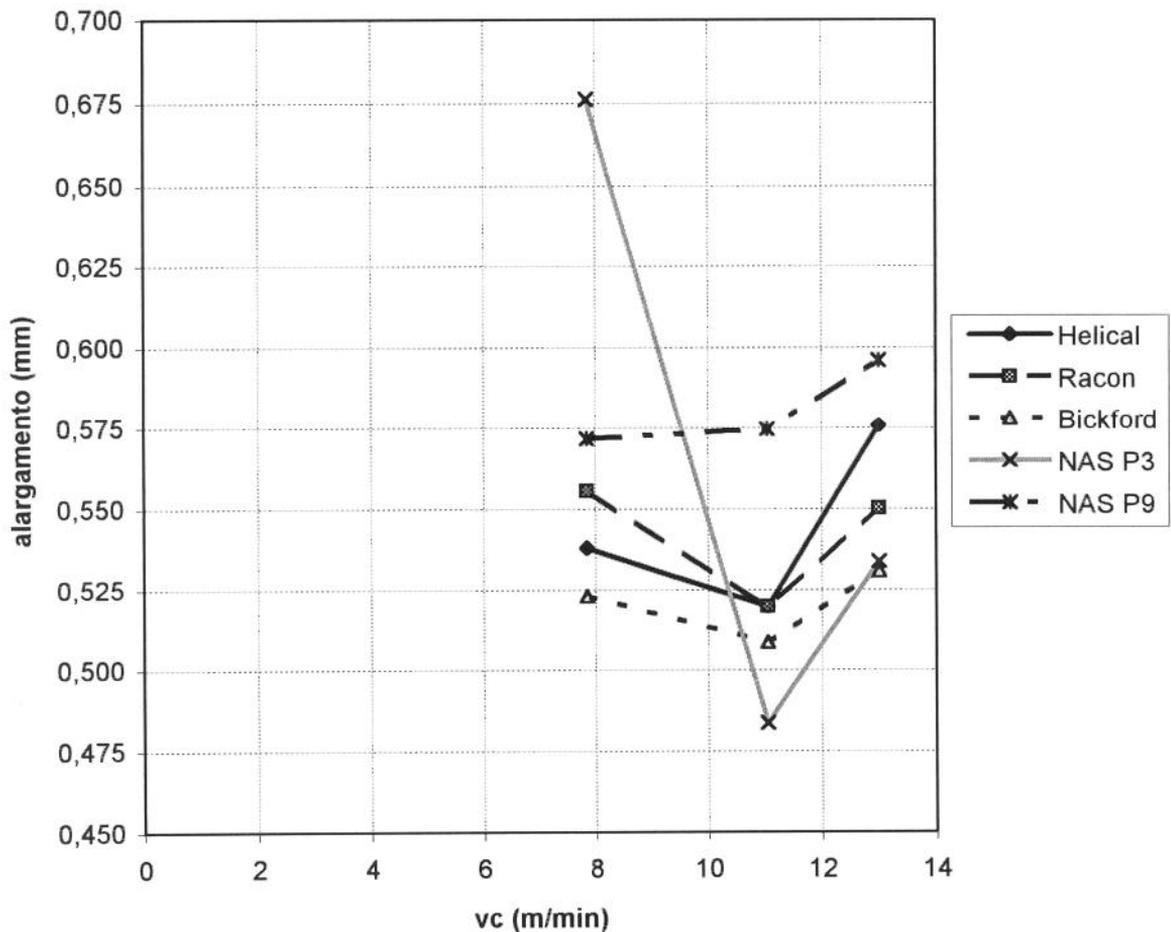


Figura 4.5 - Erro dimensional (alargamento) em função da variação da velocidade de corte, com o avanço igual a 0,100 mm/rot, para vários tipos de afiação.

A figura 4.6 mostra o erro dimensional do furo (alargamento), quando se manteve a velocidade de corte constante, igual a 11,05 m/min, e se variou o avanço.

**alargamento=fç(f), para vc=11,05 m/min**

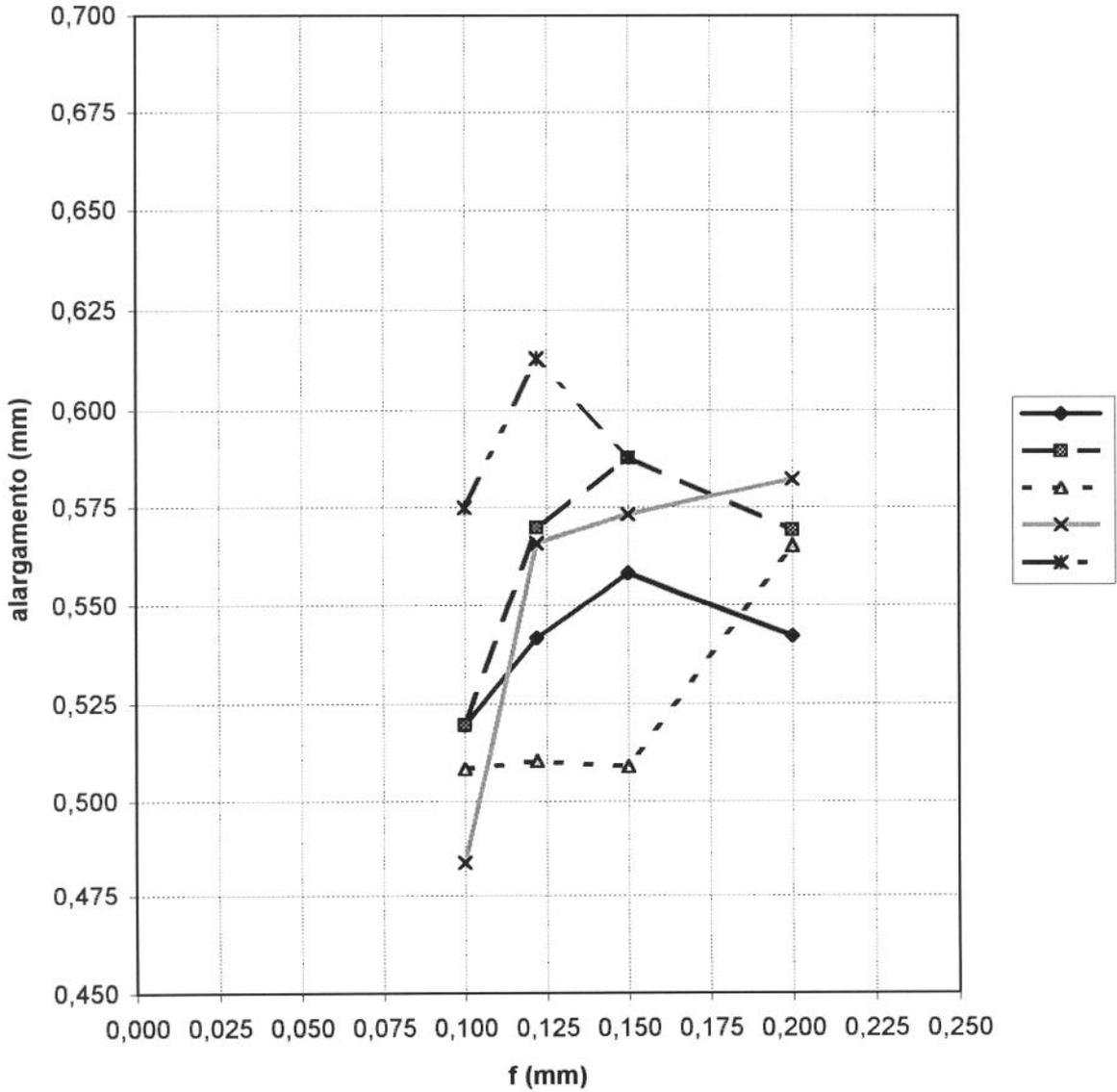


Figura 4.6 - Erro dimensional (alargamento) em função da variação do avanço, com a velocidade de corte igual a 11,05 mm/rot, para vários tipos de afiação.

Nas figuras 4.5 e 4.6 observa-se que os menores valores de alargamento ocorreram para as afiações do tipo “Bickford” e “Helical”.

Foram obtidos furos dentro de uma faixa de qualidade de trabalho que variou de IT14 a IT16.

Estes valores, de certa forma já eram esperados, tendo em vista que o perfil número 6 não é recomendado para ligas duras e materiais de difícil usinabilidade [MASUHA, 1980], e foi utilizado para que se pudesse comparar o resultado do uso de uma ferramenta com a geometria padrão com o resultado do uso de geometrias especiais, aplicadas na fase II.

4.1-3 - Evolução dos Desgastes VB e VBQ Durante a Fase I.

A figura 4.7 mostra a variação do desgaste da aresta principal de corte (VB) para os cinco tipos de afiação.

**VB=fç(n furos), para vc=11,05 m/min e f=0,100 mm/rot**

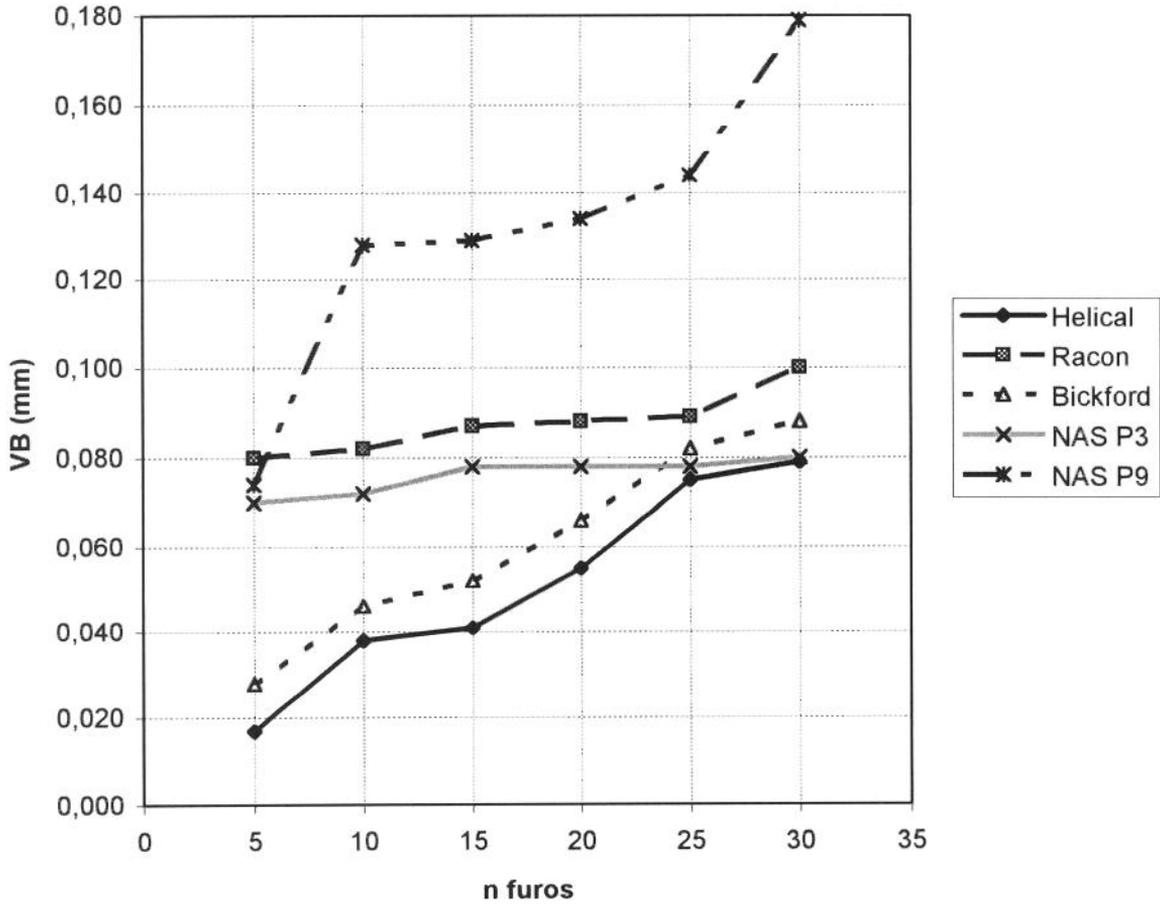


Figura 4.7 - Variação do desgaste na aresta principal do corte (VB).

A figura 4.8 mostra a variação do desgaste na aresta transversal (VBQ) para os cinco tipos de afiação.

**VBQ=fç(n furos), para  $vc=11,05$  m/min e  $f=0,100$ mm/rot**

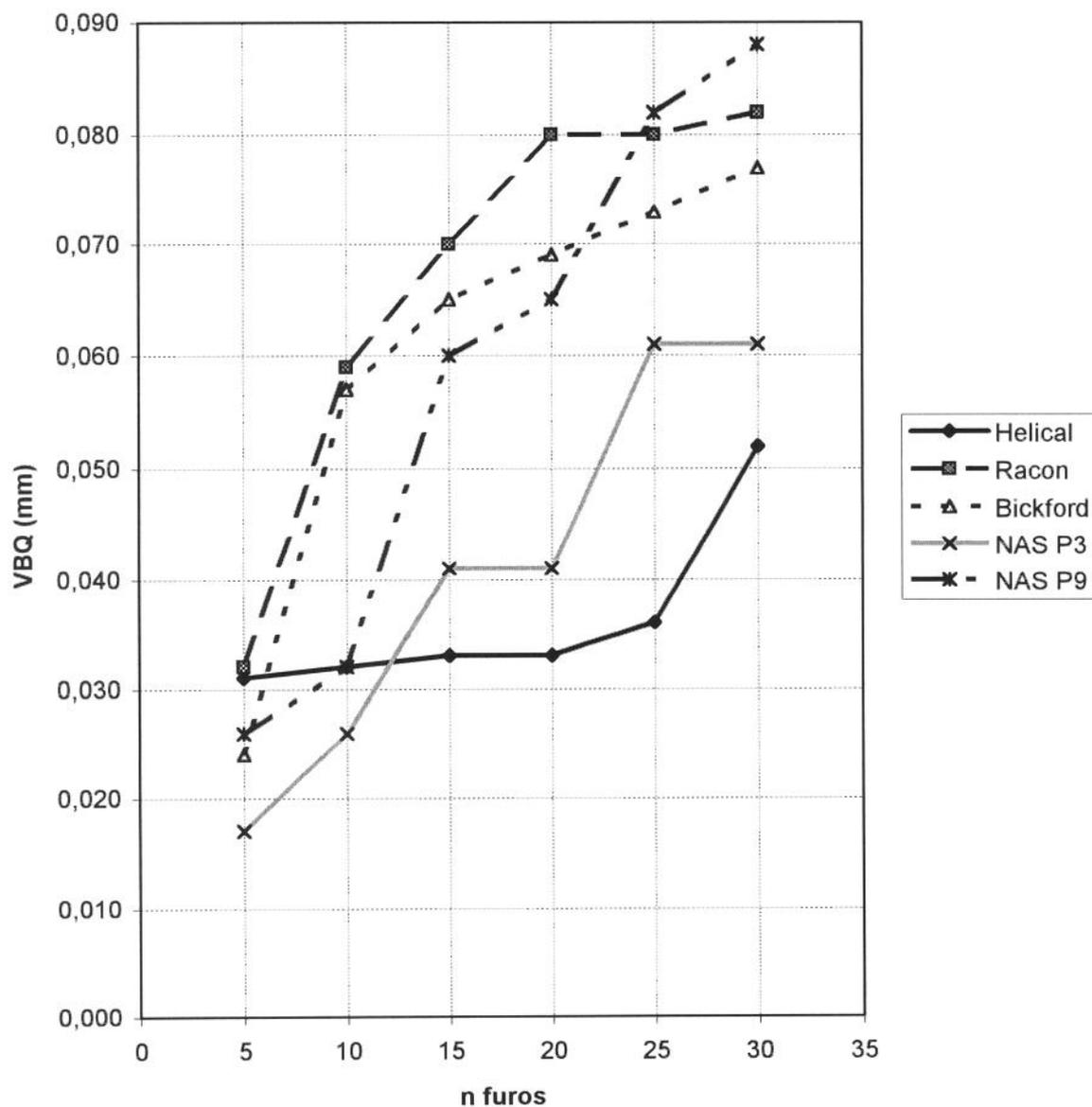


Figura 4.8 - Variação do desgaste na aresta transversal (VBQ).

Observou-se nas figuras 4.7 e 4.8 que os valores de VB e VBQ, respectivamente, foram menores para a afiação do tipo "Helical".

#### 4.1-4 - Observação da Forma do Cavaco Durante a Fase I.

Os resultados referentes a forma do cavaco durante a Fase I, para os diferentes tipos de afiação, utilizadas nesta fase dos ensaios, podem ser observados nas figuras 4.9 à 4.13.

As figuras 4.9 à 4.13 mostram as formas do cavaco no início, meio e fim do furo (22 mm de profundidade) para as afiações do tipo "Helical", "Racon", "Bickford", NAS P3 e NAS P9, respectivamente.

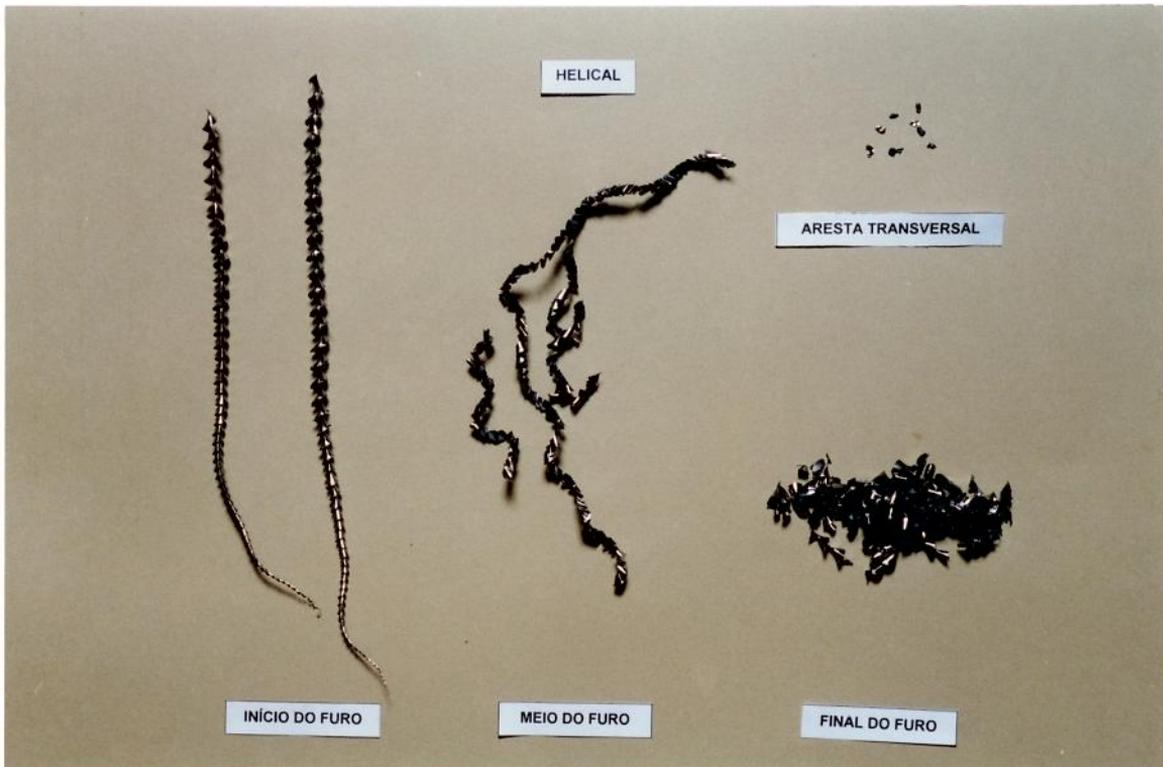


Figura 4.9 - Variação da forma do cavaco para afiação do tipo "Helical".

Observa-se da figura 4.9 que a afiação helicoidal gera (de acordo com o anexo G da norma ISO 3685) [ISO/DIS 3685,1988]:

- cavaco cônico helicoidal longo no início do furo (forma ISO número 5.1),
- cavaco amassado, longo e médio no meio do furo (não enquadrado na norma ISO),

- cavaco cônico helicoidal curto no final do furo (forma ISO número 5.2) e
- curto em pequenos pedaços (forma ISO número 7), formados pela aresta transversal em forma de “S”.

Observou-se no final do furo a aderência do cavaco formado pela aresta transversal, na superfície de saída, próximo à esta aresta.

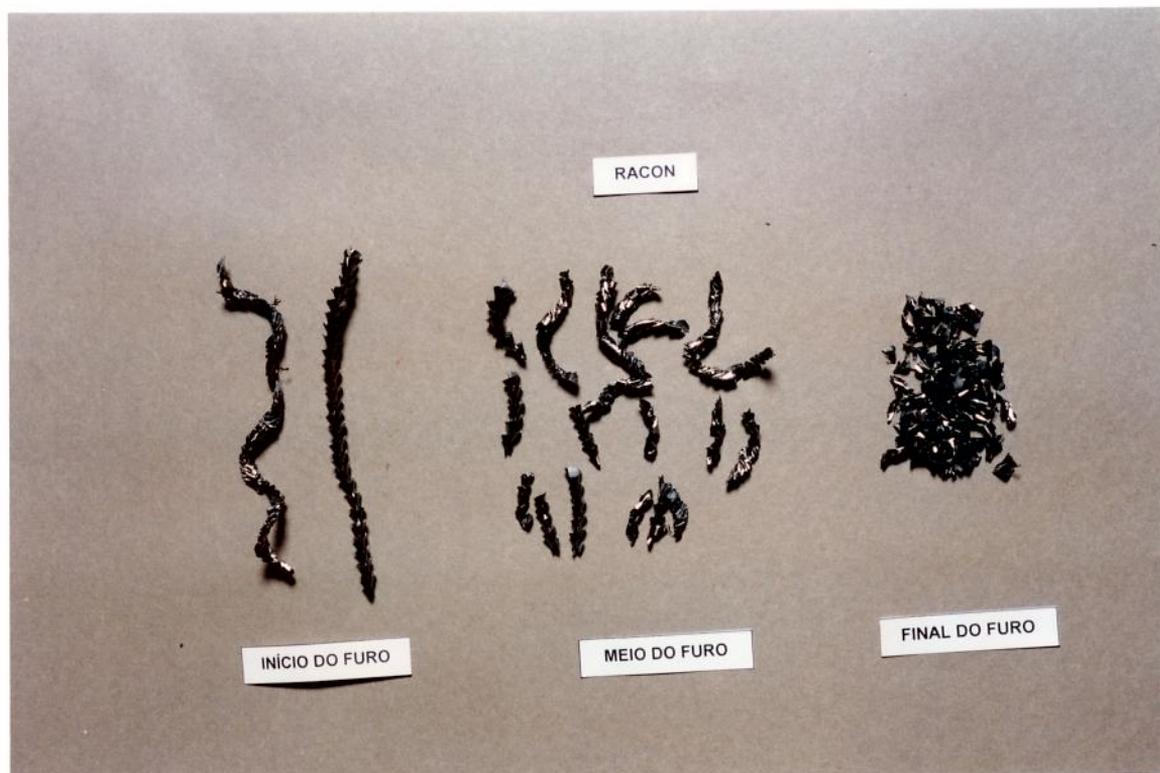


Figura 4.10 - Variação da forma do cavaco para afiação do tipo “Racon”.

Observa-se da figura 4.10 que a afiação “Racon” gera (de acordo com o anexo G da norma ISO 3685) [ISO/DIS 3685,1988]:

- cavaco amassado longo no início do furo (não enquadrado na norma ISO),
- cavaco amassado, curto no meio do furo (não enquadrado na norma ISO), e
- cavaco em pedaços no final do furo (forma ISO número 7).

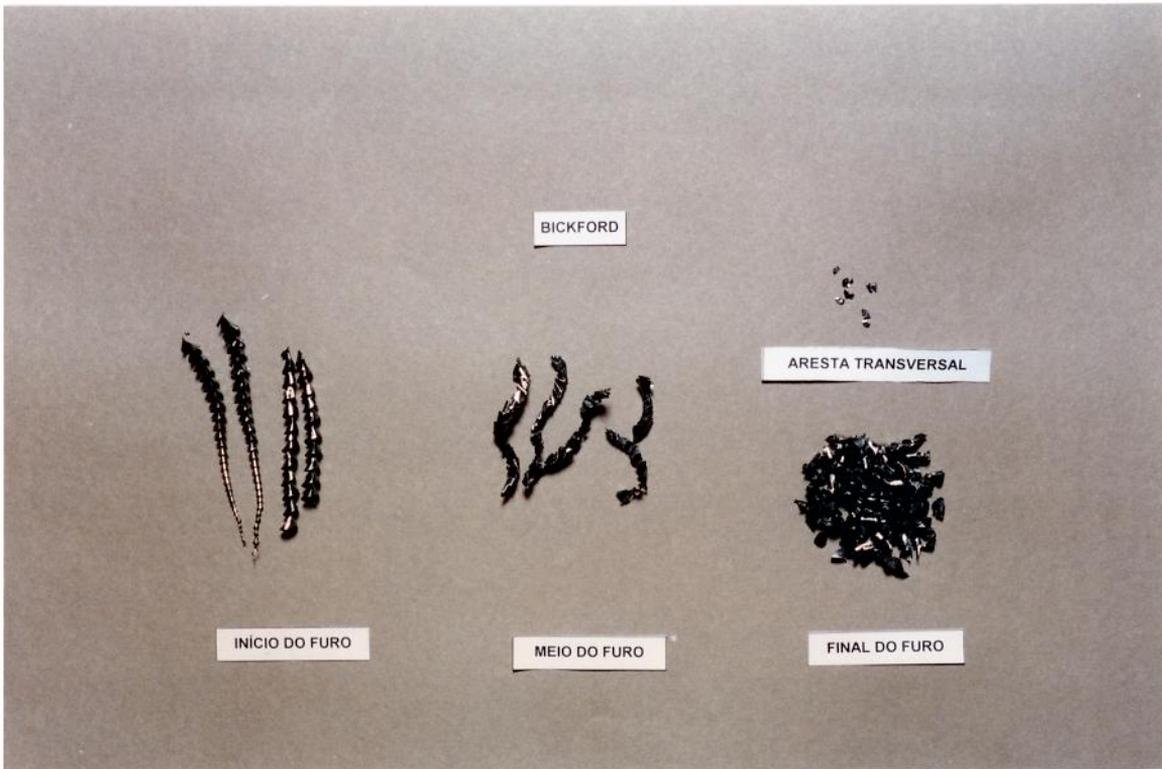


Figura 4.11 - Variação da forma do cavaco para afiação do tipo “Bickford”.

Observa-se da figura 4.11 que a afiação “Bickford” apresenta (de acordo com o anexo G, da norma ISO 3685) [ISO/DIS 3685,1988]:

- no início do furo cavaco do tipo helicoidal cônico curto (forma ISO número 5.2),
- no meio do furo cavaco do tipo amassado de tamanho curto (não enquadrado na norma ISO), e
- no final do furo apresenta cavaco em pedaços (forma ISO número 7).

Observou-se que, também neste tipo de afiação, há formação de um tipo de cavaco curto, em pequenos pedaços (forma ISO número 7), pela ação da aresta transversal, semelhante ao que ocorria com a afiação do tipo “Helical”.

Ocorreram também pontos de solda fria (ao longo da guia) e pequenas quebras.



Figura 4.12 - Variação da forma do cavaco para afiação do tipo NAS P3.

Da figura 4.12 observa-se que a ferramenta com a afiação do tipo Cruzada NAS P3 apresenta cavaco cônico helicoidal curto (forma ISO número 5.2) no início do furo, cavaco amassado no meio do furo (não enquadrado na norma ISO) e em pequenos pedaços no final do furo (forma ISO número 7).

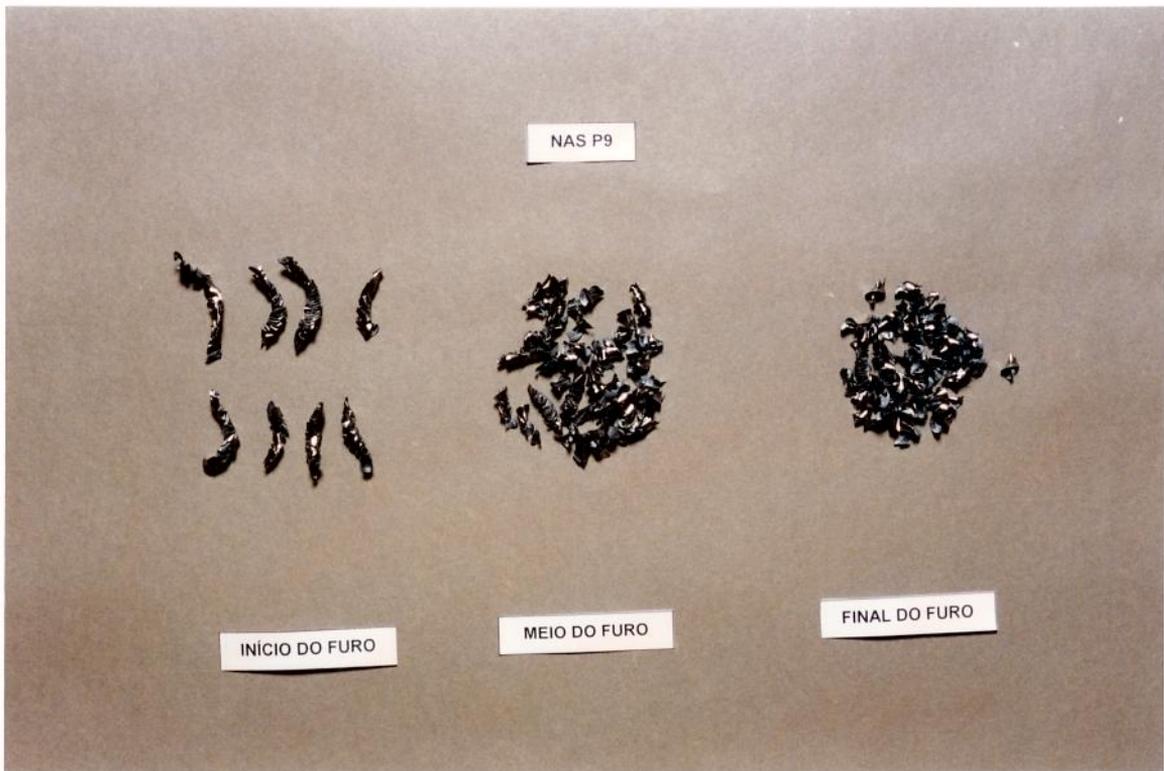


Figura 4.13 - Variação da forma do cavaco para afiação do tipo NAS P9.

Da figura 4.13 observa-se que a ferramenta com a afiação do tipo Cruzada NAS P9 apresenta cavaco curto, amassado no início e meio do furo (não enquadrado na norma ISO) e em pequenos pedaços no final do furo (forma ISO número 7).

A afiação helicoidal e a afiação “Bickford” possuem aresta transversal em forma de “S”. Após a conclusão do furo ocorreu a adesão de cavaco na superfície de saída, próximo à aresta transversal, nestes dois tipos de afiação.

Observa-se das figuras 4.9 a 4.13 que:

- as afiações “Racon” e Cruzada NAS P9 apresentaram cavaco amassado do início ao final do furo, o que significa que a forma do cavaco gerado por estas afiações dificulta a ação do fluido de corte.

- as afiações Cruzada NAS P3 e “Bickford”, apresentaram cavaco helicoidal curto (forma ISO 5.2), no início e meio do furo, o que facilita a remoção de cavaco. Já a afiação “Helical” apresentou cavacos longos, o que é menos favorável sob o ponto de vista de remoção de cavaco.

Na figura 4.14 observa-se, para a afiação P3, a adesão de material sobre a guia da broca, próximo a ponta de corte, em função da tendência que a liga Ti-6Al-4V possui, de desprender um grande número de partículas sobre a ferramenta, com a elevação da temperatura.

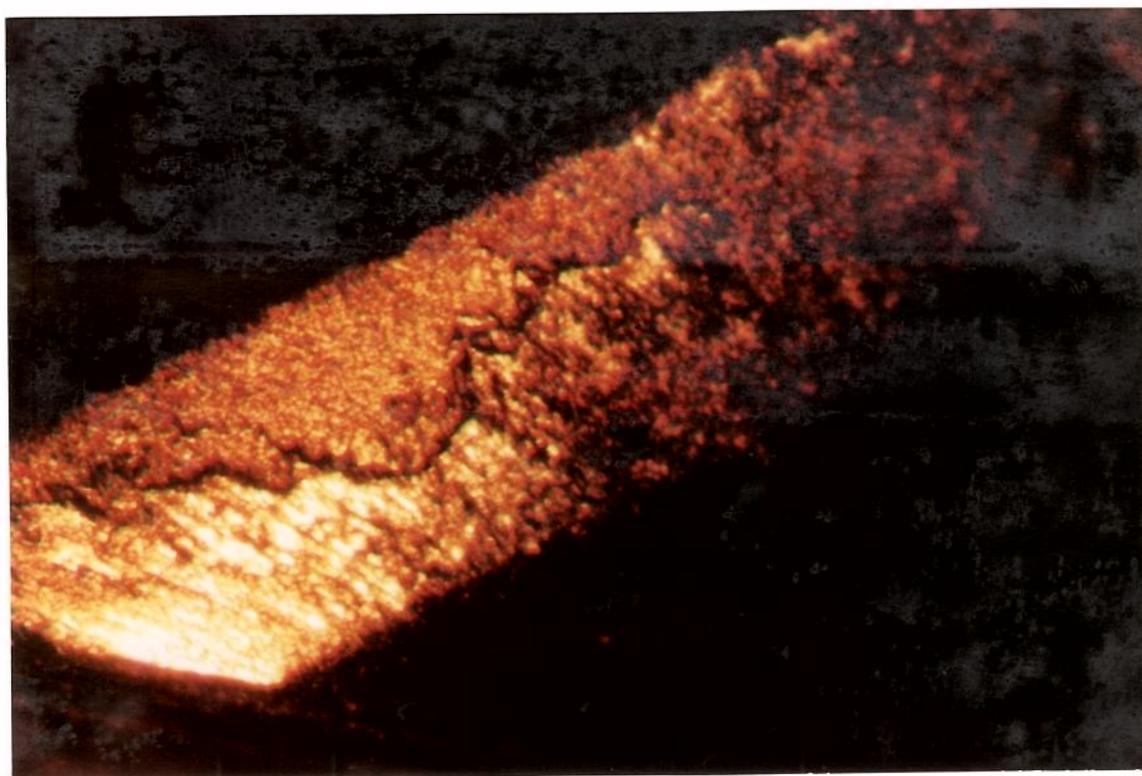


Figura 4.14 - Adesão de material sobre a guia da broca, próximo a ponta de corte, observada para a afiação P3.

A afiação tipo "Helical" foi escolhida para a realização dos ensaios da fase II, porque apresentou os menores valores de alargamento do furo e de desgaste da ferramenta. Embora esta afiação não tenha apresentado os menores valores do momento de torção, observados para as afiações "Racon" e "Bickford" respectivamente e da força de avanço, observados para as afiações Cruzada NAS P3 e Cruzada NAS 9 respectivamente, esta apresentou as menores variações nos valores dos esforços de corte para as diferentes condições de usinagem, ou seja, apresentou um comportamento mais uniforme durante os ensaios.

## 4.2 FASE II - Parte 1

Na fase II - parte 1 foram conduzidos ensaios com os perfis número 9 e número 13, que possuem geometria especial e são recomendados para a usinagem de ligas duras e ligas de difícil usinabilidade.

### 4.2-1 - Comportamento dos Esforços de Corte Durante a Fase II - Parte 1.

Os resultados referentes ao comportamento dos esforços de corte durante a Fase II - Parte 1 podem ser observados nas figuras 4.15 e 4.16.

A figura 4.15 mostra o comportamento do momento de torção ( $M_t$ ), quando se manteve a velocidade de corte constante, igual à 11,30 m/min, e se variou o avanço, para o perfil número 9 e o perfil número 13. A velocidade de corte de 11,30 m/min é recomendada para a usinagem da liga Ti-6Al-4V [OPERATORS' HANDBOOK Machining Titanium, 1968], [ROSENBERG, 1979] e [MACHINING DATA HANDBOOK, 1985], etc.

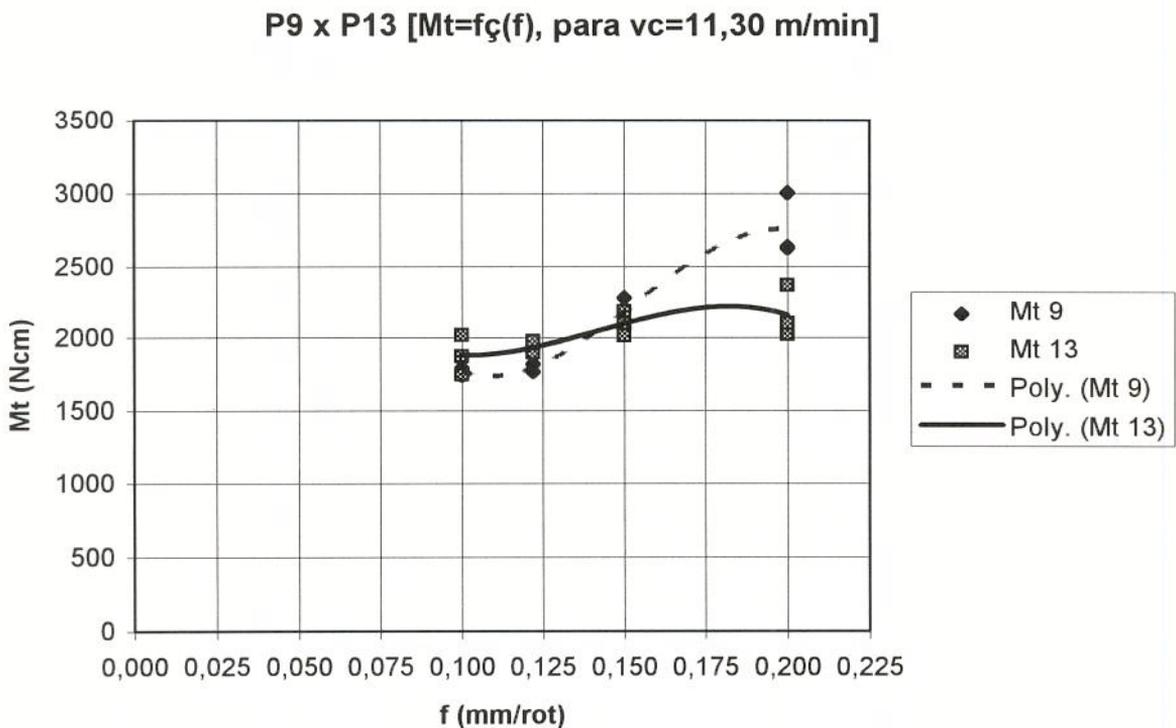


Figura 4.15 - Momento de torção em função da variação do avanço para perfil número 9 e para o perfil número 13.

A figura 4.16 mostra o comportamento da força de avanço ( $F_f$ ), quando se manteve a velocidade de corte constante, igual a 11,30 m/min, e se variou o avanço, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

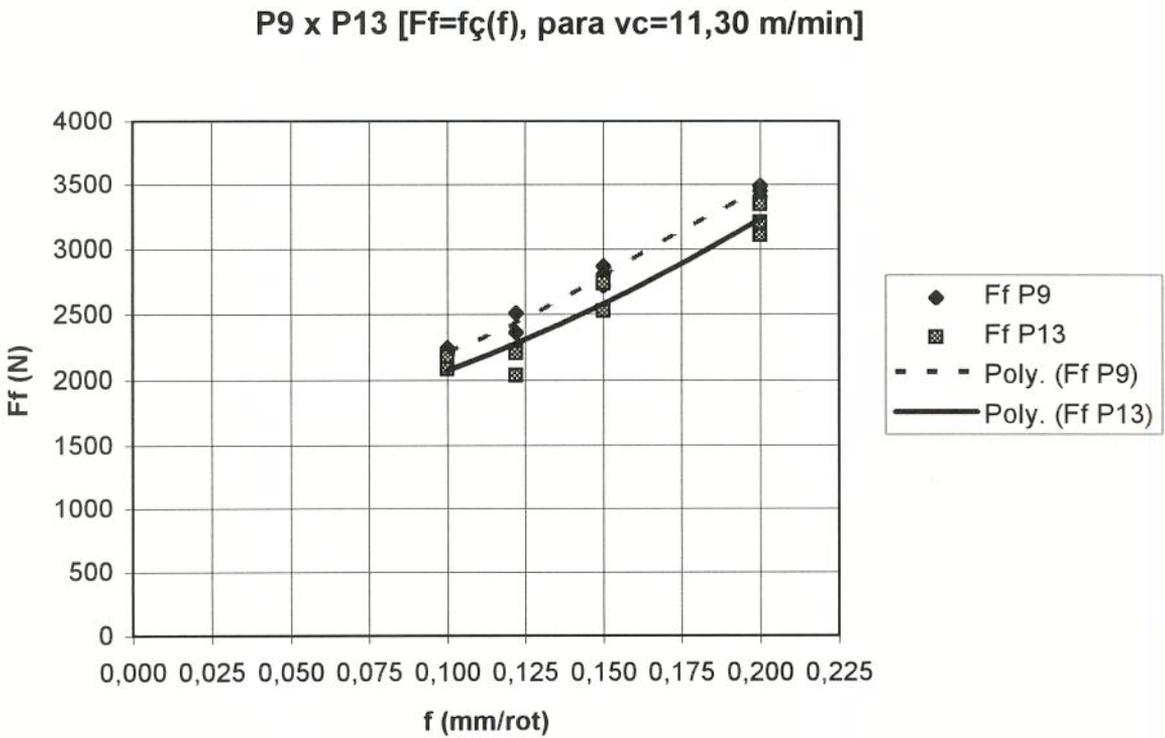


Figura 4.16 - Força de avanço em função da variação do avanço para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

Observa-se das figuras 4.15 e 4.16 que os valores do momento de torção e da força de avanço do perfil P13 são menores do que os valores observados para o perfil do tipo P9, quando se utiliza a velocidade de corte 11,30 m/min, recomendada pelo Machining Data Handbook , 1985 e pelo Operators'Handbook - Machining Titanium, 1968, entre outros.

Observa-se na figura 4.15 que para o perfil do tipo P13 há um pequeno aumento do momento de torção com a variação do avanço, e que para o perfil tipo P9 ha uma variação maior.

Na figura 4.16 observa-se que a variação da força de avanço, em função do avanço, é praticamente a mesma tanto para o perfil número 9, como para o perfil número 13, e que os valores da força de de avanço são maiores para o perfil número 9.

#### 4.2-2 - Erro Dimensional dos Furos Obtidos Durante a Fase II - Parte 1.

Os resultados referentes ao erro dimensional dos furos durante a Fase II - Parte 1 podem ser observados nas figuras 4.17.

A figura 4.17 mostra o erro dimensional do furo (alargamento), quando se manteve a velocidade de corte constante, igual a 11,30 m/min, e se variou o avanço, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

**alargamento=fç(f), para vc=11,30 m/min**

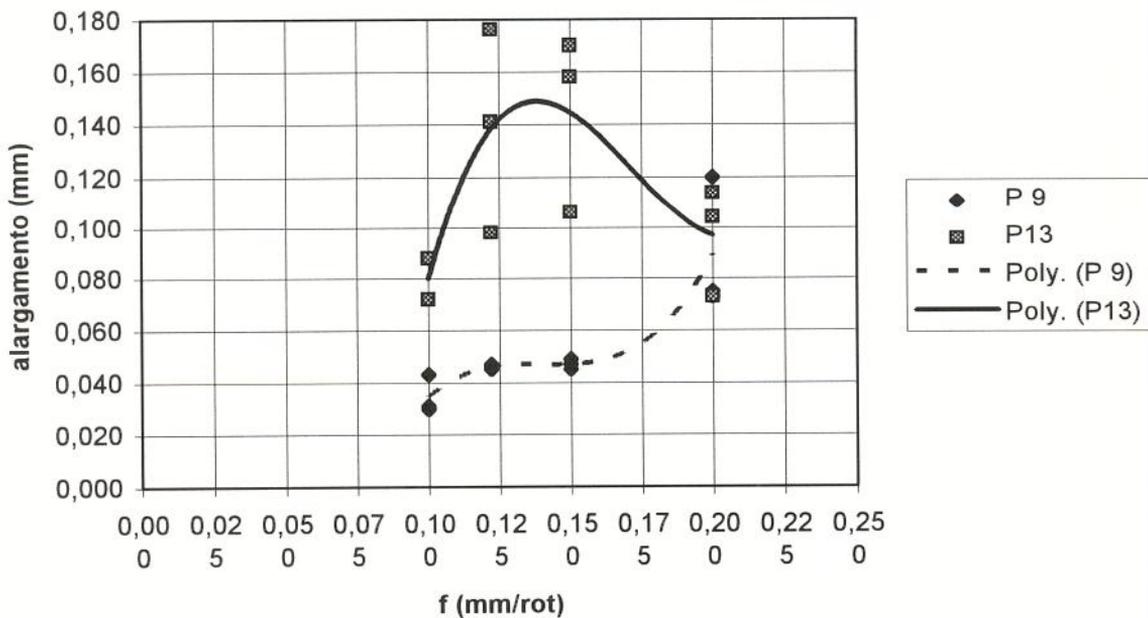


Figura 4.17 - Erro dimensional (alargamento), em função da variação do avanço para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

#### 4.2-3 - Observação da Forma do Cavaco Durante a Fase II - Parte 1.

As figuras 4.18 a 4.25 mostram os resultados referentes a forma do cavaco durante a Fase II - Parte 1, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

Observa-se destas figuras, que não há uma diferença significativa entre a forma de cavaco gerada pelo perfil número 9 e a gerada pelo perfil número 13.

Para todas as condições ensaiadas observou-se, no final do furo, a aderência do cavaco formado pela aresta transversal à superfície de saída, próximo à esta aresta.

A variação da forma do cavaco, usinando-se com o avanço de 0,100 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 9, é mostrada na figura 4.18.

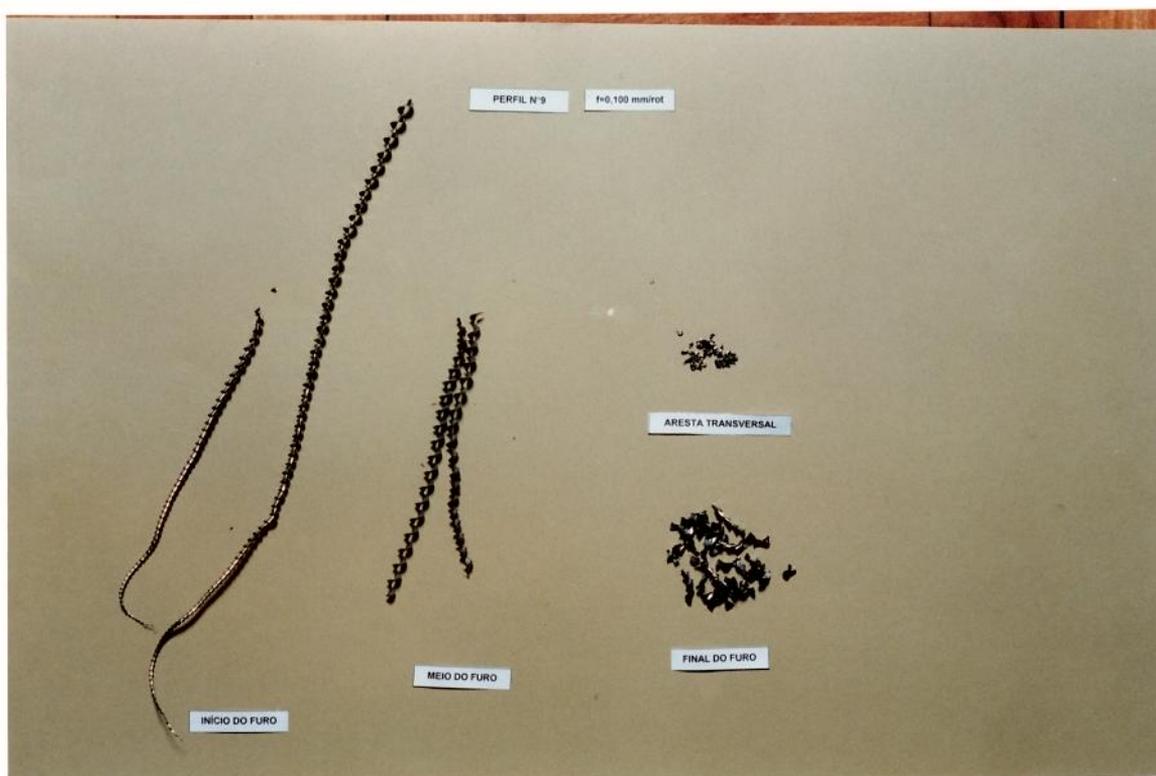


Figura 4.18 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,100 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 9.

Observa-se da figura 4.18, que para o avanço de 0,100 mm/rot e a velocidade de 11,30 m/min, o perfil número 9 gera (de acordo com o anexo G da norma ISO 3685) [ISO/DIS 3685,1988]:

- cavaco cônico helicoidal longo no início do furo (forma ISO número 5.1),
- cavaco cônico helicoidal curto no meio do furo (forma ISO número 5.2),
- cavaco pedaços no final do furo (forma ISO número 7) e
- curto em pequenos pedaços (forma ISO número 7), formados pela aresta transversal em forma de “S”.

Observou-se no final do furo a aderência do cavaco formado pela aresta transversal, na superfície de saída, próximo à esta aresta.

A variação da forma do cavaco, usinando-se com o avanço de 0,100 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 13, é mostrada na figura 4.19.

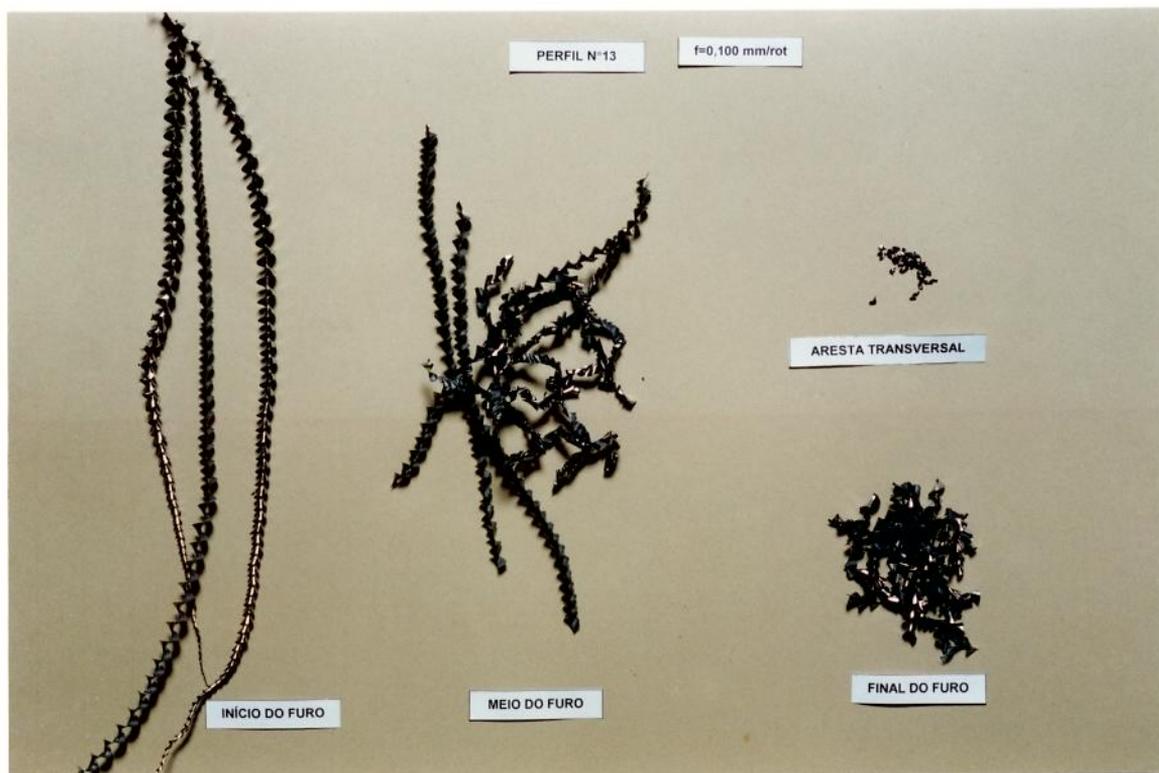


Figura 4.19 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,100 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 13.

Observa-se da figura 4.19, que para o avanço de 0,100 mm/rot e a velocidade de 11,30 m/min, o perfil número 9 gera (de acordo com o anexo G da norma ISO 3685) [ISO/DIS 3685,1988]:

- cavaco cônico helicoidal longo no início e no meio do furo (forma ISO número 5.1),
- cavaco pedaços no final do furo (forma ISO número 7) e
- curto em pequenos pedaços (forma ISO número 7), formados pela aresta transversal em forma de "S".

Observou-se no final do furo a aderência do cavaco formado pela aresta transversal, na superfície de saída, próximo à esta aresta.

A variação da forma do cavaco, usinando-se com o avanço de 0,122 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 9, é mostrada na figura 4.20.

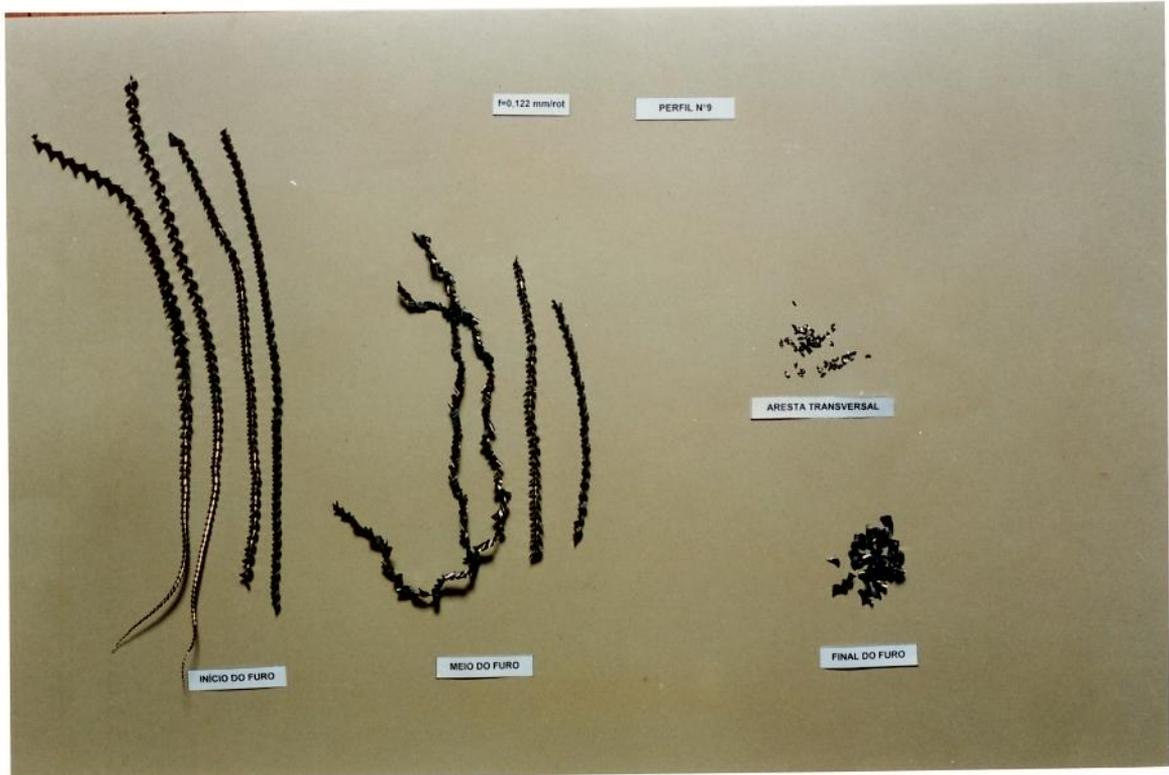


Figura 4.20 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,122 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 9.

Observa-se da figura 4.20, que para o avanço de 0,122 mm/rot e a velocidade de 11,30 m/min, o perfil número 9 gera (de acordo com o anexo G da norma ISO 3685) [ISO/DIS 3685,1988]:

- cavaco cônico helicoidal longo no início do furo (forma ISO número 5.1),
- cavaco cônico helicoidal curto (forma ISO número 5.2) e amassado (não enquadrado na norma ISO) no meio do furo,
- cavaco pedaços no final do furo (forma ISO número 7) e
- curto em pequenos pedaços (forma ISO número 7), formados pela aresta transversal em forma de "S".

A variação da forma do cavaco, usinando-se com o avanço de 0,122 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 13, é mostrada na figura 4.21.

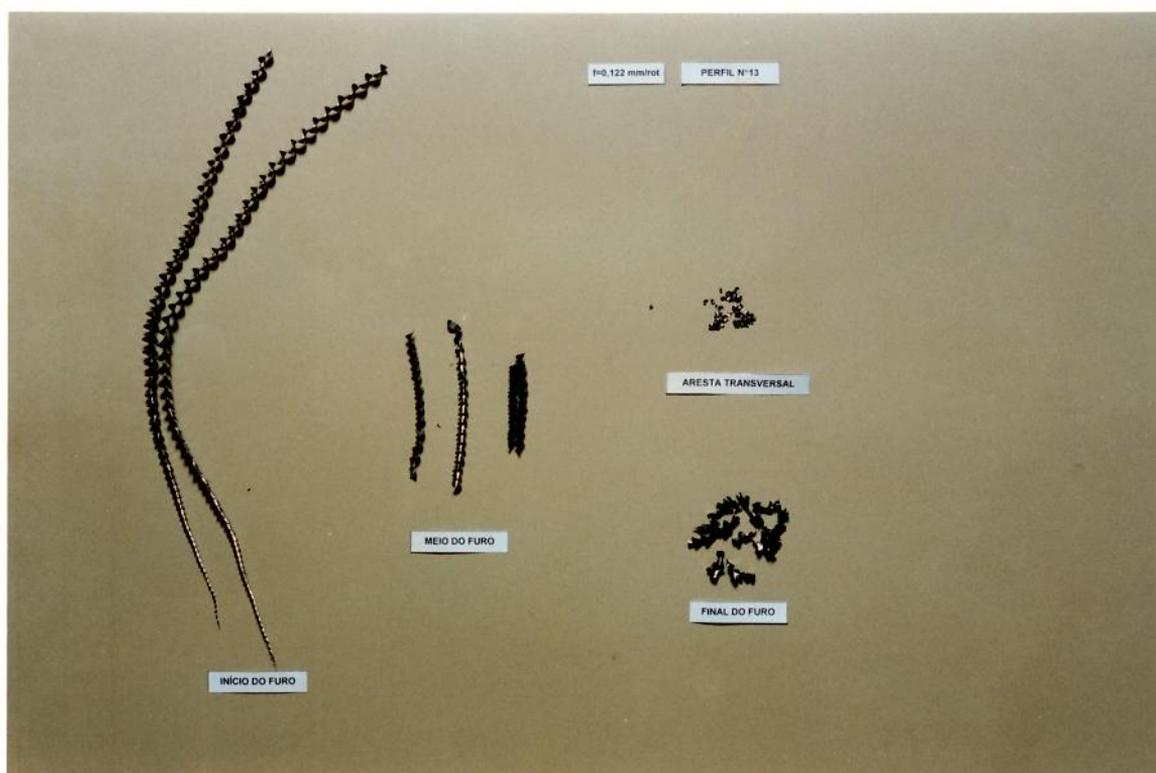


Figura 4.21 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,122 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 13.

Observa-se da figura 4.21, que para o avanço de 0,122 mm/rot e a velocidade de 11,30 m/min, o perfil número 9 gera (de acordo com o anexo G da norma ISO 3685) [ISO/DIS 3685,1988]:

- cavaco cônico helicoidal longo no início do furo (forma ISO número 5.1),
- cavaco cônico helicoidal curto (forma ISO número 5.2) no meio do furo,
- cavaco pedaços no final do furo (forma ISO número 7) e
- curto em pequenos pedaços (forma ISO número 7), formados pela aresta transversal em forma de "S".

A variação da forma do cavaco, usinando-se com o avanço de 0,150 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 9, é mostrada na figura 4.22.

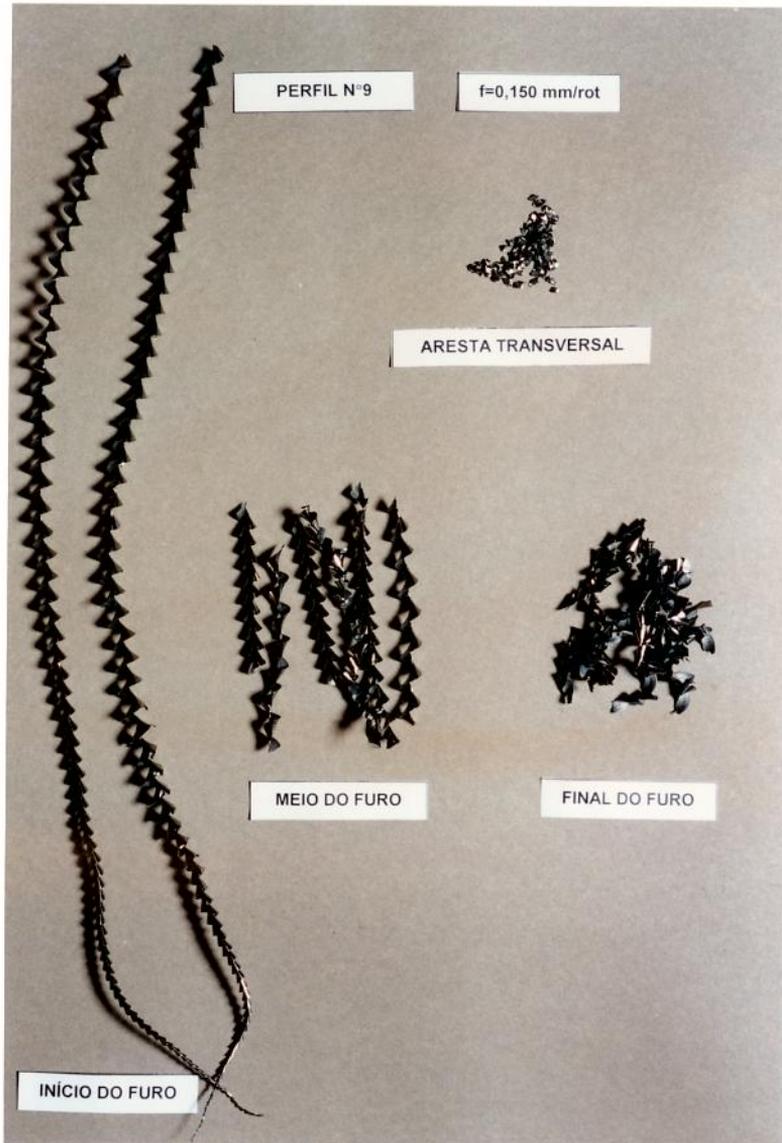


Figura 4.22 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,150 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 9.

Observa-se da figura 4.22, que para o avanço de 0,150 mm/rot e a velocidade de 11,30 m/min, o perfil número 9 gera (de acordo com o anexo G da norma ISO 3685) [ISO/DIS 3685, 1988]:

- cavaco cônico helicoidal longo no início do furo (forma ISO número 5.1),
- cavaco cônico helicoidal curto (forma ISO número 5.2) no meio do furo,
- cavaco pedaços no final do furo (forma ISO número 7) e

- curto em pequenos pedaços (forma ISO número 7), formados pela aresta transversal em forma de “S”.

A variação da forma do cavaco, usinando-se com o avanço de 0,150 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 13, é mostrada na figura 4.23.

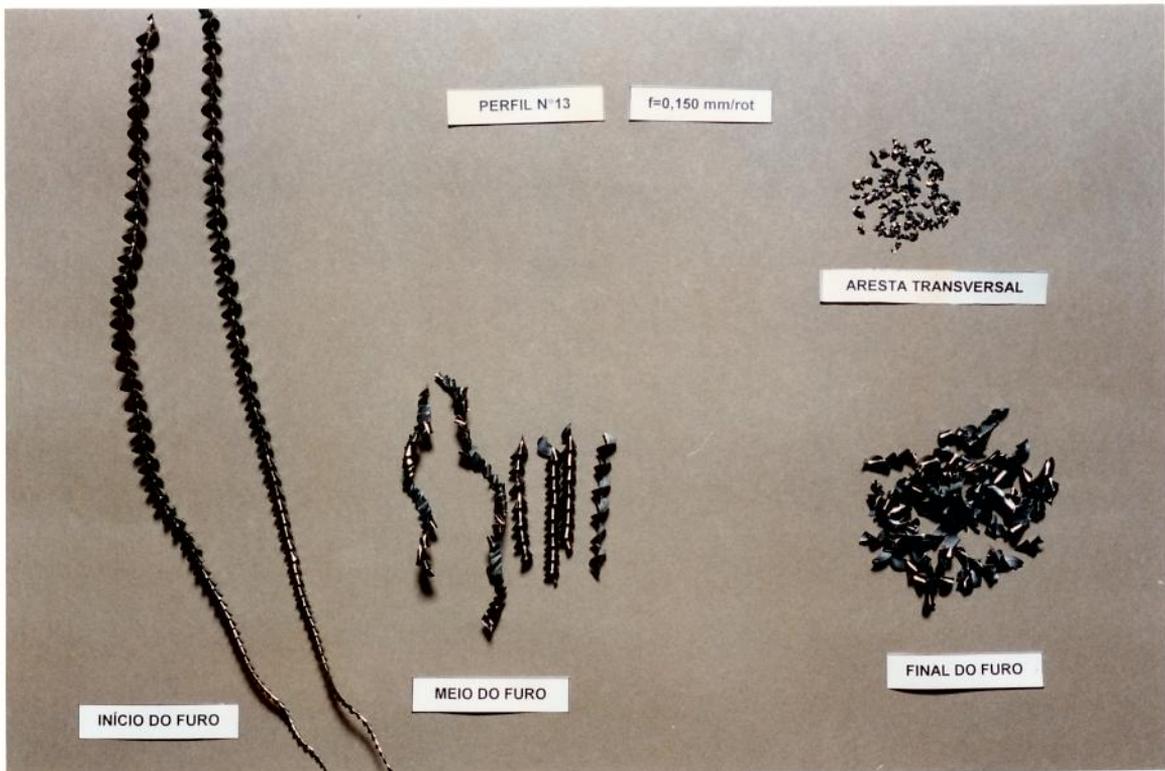


Figura 4.23 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,150 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 13.

Observa-se da figura 4.23, que para o avanço de 0,150 mm/rot e a velocidade de 11,30 m/min, o perfil número 13 gera (de acordo com o anexo G da norma ISO 3685) [ISO/DIS 3685,1988]:

- cavaco cônico helicoidal longo no início do furo (forma ISO número 5.1),
- cavaco cônico helicoidal curto (forma ISO número 5.2) e cavaco amassado curto (não enquadrado na norma ISO) no meio do furo,
- cavaco pedaços no final do furo (forma ISO número 7) e curto em pequenos pedaços (forma ISO número 7), formados pela aresta transversal em forma de “S”.

A variação da forma do cavaco, usinando-se com o avanço de 0,200 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 9, é mostrada na figura 4.24.

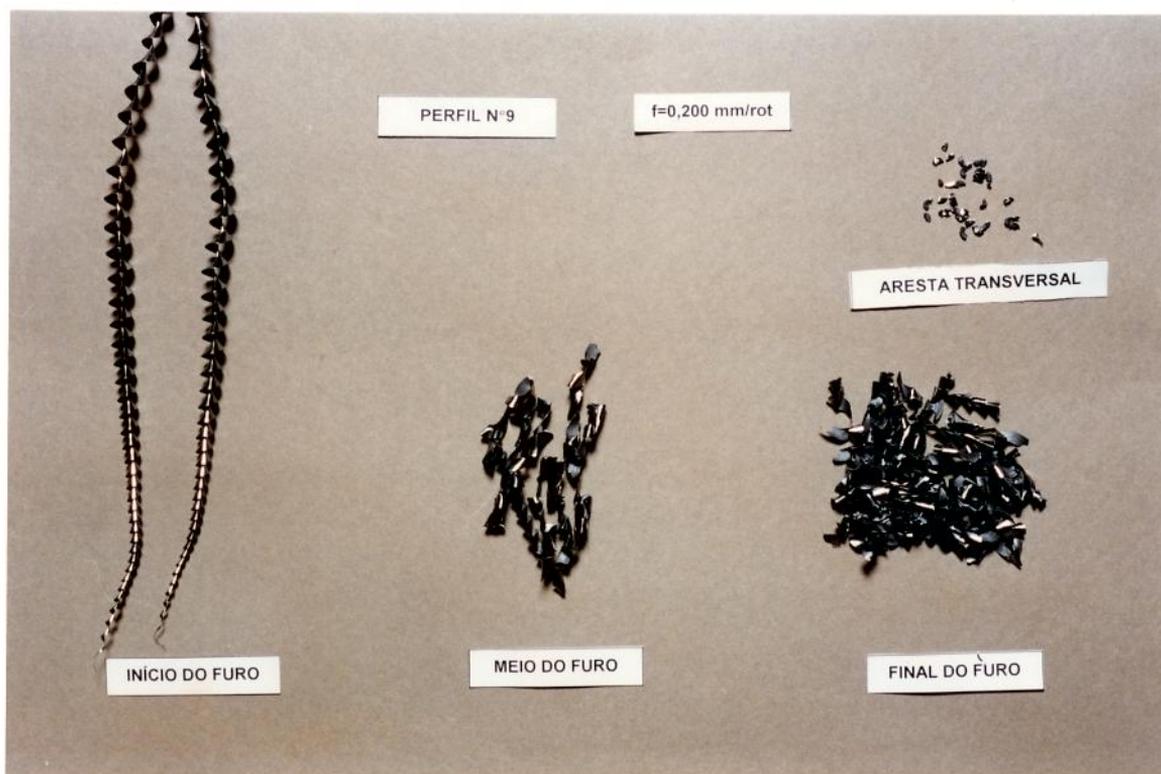


Figura 4.24 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,200 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 9.

Observa-se da figura 4.24, que para o avanço de 0,200 mm/rot e a velocidade de 11,30 m/min, o perfil número 9 gera (de acordo com o anexo G da norma ISO 3685) [ISO/DIS 3685, 1988]:

- cavaco cônico helicoidal longo no início do furo (forma ISO número 5.1),
- cavaco cônico helicoidal curto (forma ISO número 5.2) e cavaco amassado curto (não enquadrado na norma ISO) no meio do furo,
- cavaco pedaços no final do furo (forma ISO número 7) e
- curto em pequenos pedaços (forma ISO número 7), formados pela aresta transversal em forma de “S”.

A variação da forma do cavaco, usinando-se com o avanço de 0,200 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 13, é mostrada na figura 4.25.

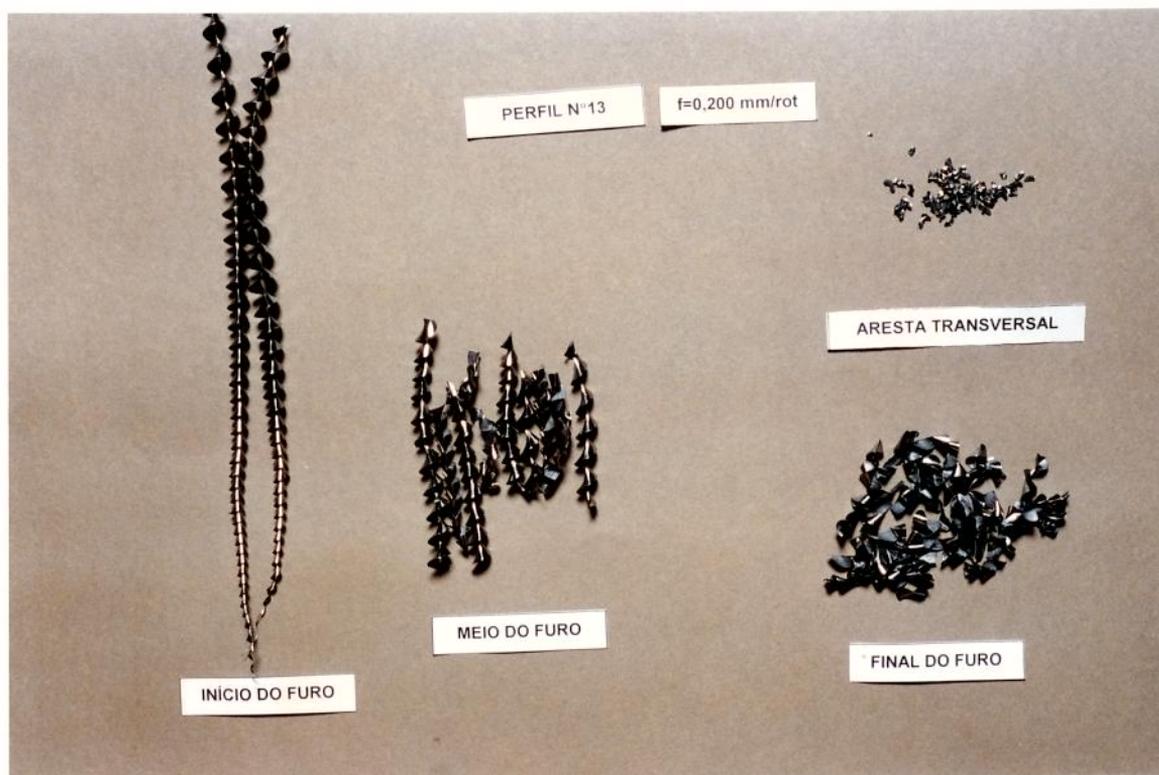


Figura 4.25 - Variação da forma do cavaco usinando-se com o avanço de 0,200 mm/rot, para a velocidade de 11,30 m/min, para o perfil número 13.

Observa-se da figura 4.25, que para o avanço de 0,200 mm/rot e a velocidade de 11,30 m/min, o perfil número 13 gera (de acordo com o anexo G da norma ISO 3685) [ISO/DIS 3685, 1988]:

- cavaco cônico helicoidal longo no início do furo (forma ISO número 5.1),
- cavaco cônico helicoidal curto (forma ISO número 5.2) e cavaco amassado curto (não enquadrado na norma ISO) no meio do furo,
- cavaco pedaços no final do furo (forma ISO número 7) e
- curto em pequenos pedaços (forma ISO número 7), formados pela aresta transversal em forma de "S".

### 4.3 FASE II - Parte 2

#### 4.3-1 - Comportamento dos Esforços de Corte Durante a Fase II - Parte 2.

Os resultados referentes ao comportamento dos esforços de corte durante a Fase II - Parte 2, para o perfil número 9 e para o perfil número 13, podem ser observados nas figuras 4.26 à 4.35 .

A variação do momento de torção em função do número de furos, usando-se com três velocidades de corte, para o perfil número 9, é mostrada na figura 4.26.

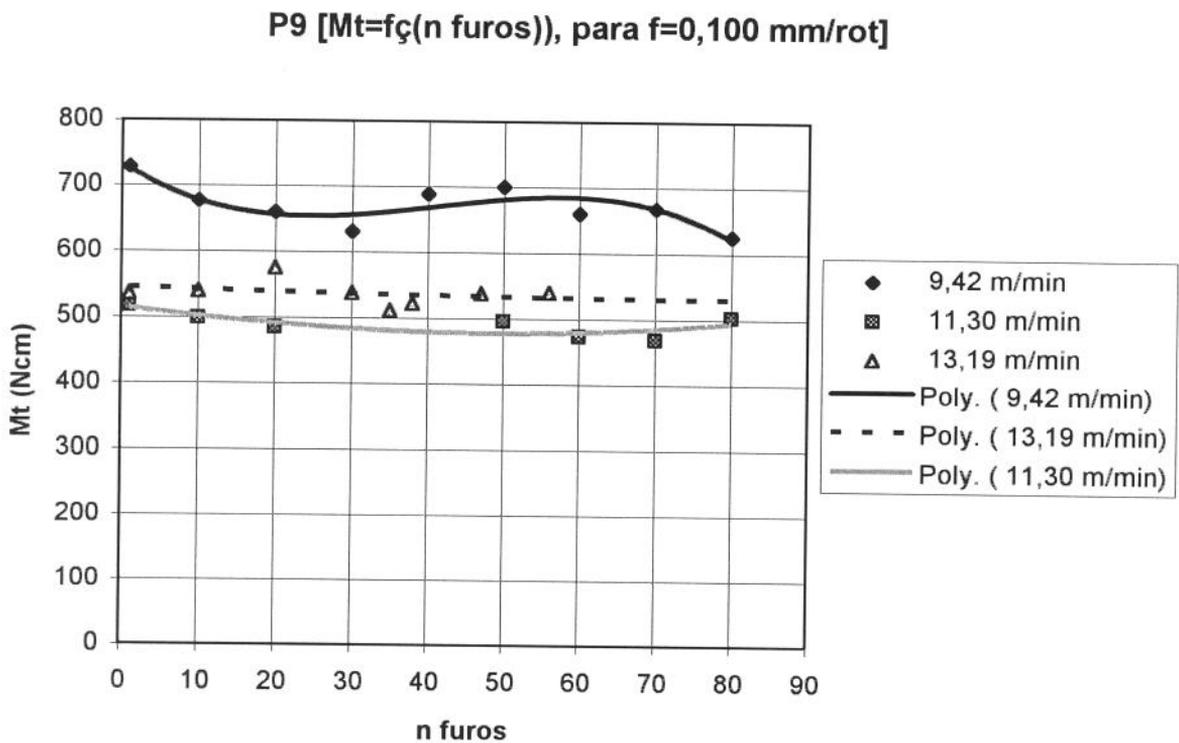


Figura 4.26 - Variação do momento de torção em função do número de furos, usando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número 9.

A variação do momento de torção em função do número de furos, usando-se com três velocidades de corte, para o perfil número 13, é mostrada na figura 4.27.

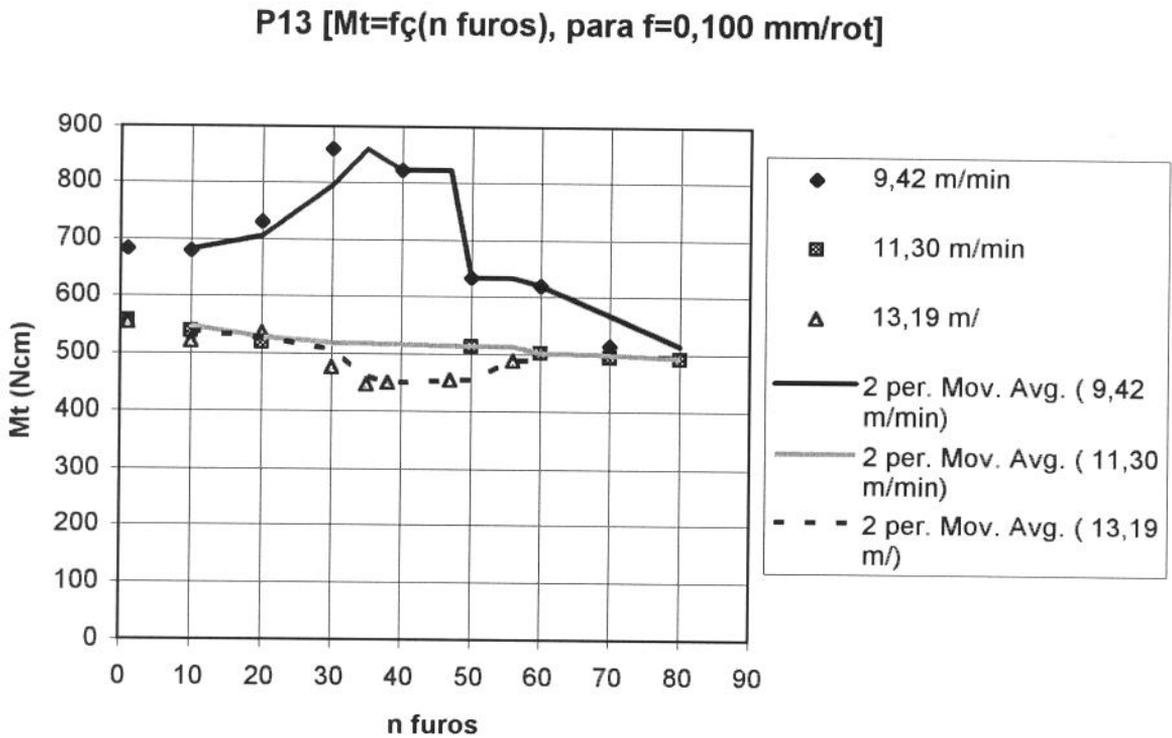


Figura 4.27 - Variação do momento de torção em função do número de furos, usando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número 13.

Observa-se das figuras 4.26 e 4.27 que os maiores valores do momento de torção ocorreram para a velocidade de corte de 9,42 m/min e que os valores do momento de torção tendem a diminuir com o aumento do número de furos, para o perfil 9 e para o perfil 13.

Esta diminuição do momento de torção com o aumento do número de furos também foi observada por König e Schoröder. Segundo estes pesquisadores, após a ocorrência de desgastes elevados na broca, nos primeiros furos, diminui a abrasão, facilitando as condições de atrito, o que conduz à diminuição do torque [König e Schröder, 1978].

As figuras 4.28, 4.29 e 4.30 mostram para as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, respectivamente, a variação do momento de torção em função do número de furos para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

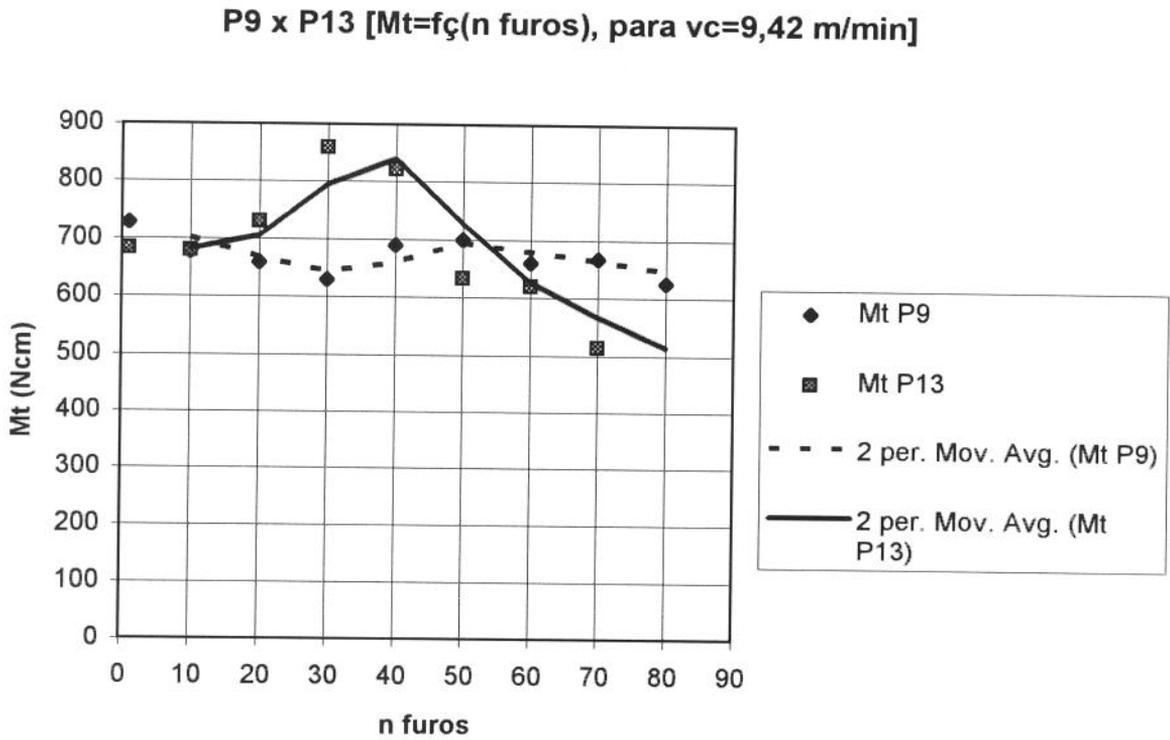


Figura 4.28 - Variação do momento de torção em função do número de furos, com  $vc=9,42$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

Observa-se da figura 4.28 que para a velocidade de corte de 9,42 m/min não ha uma diferença significativa entre os valores de Mt para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

**P9 x P13 [Mt=fç(n furos), para vc=11,30 m/min]**

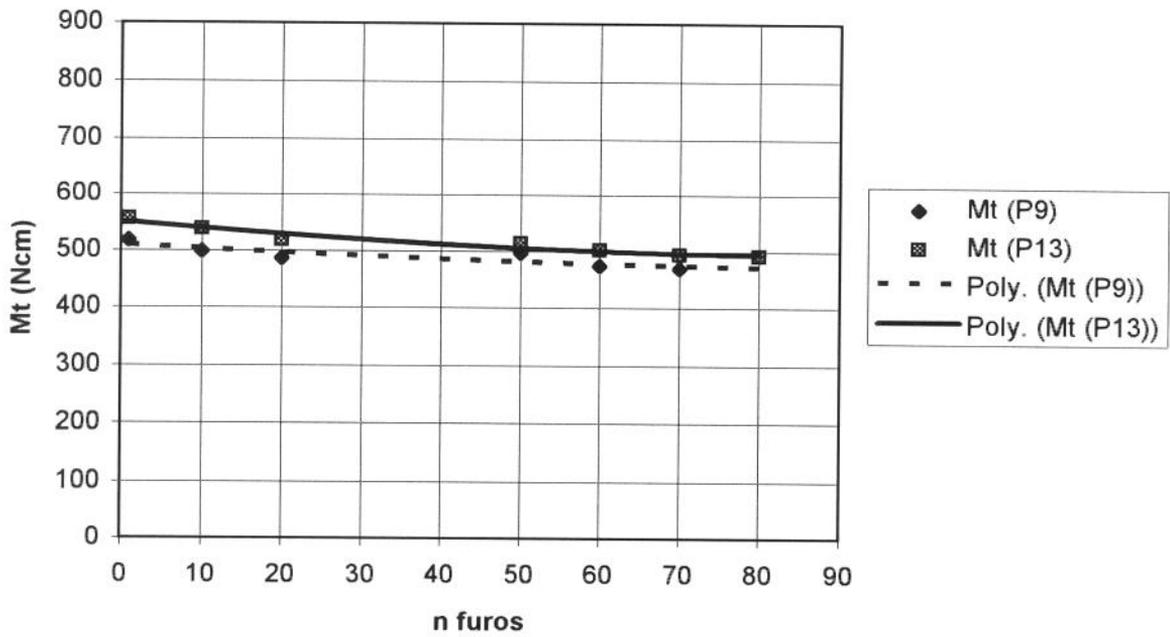


Figura 4.29 - Variação do momento de torção em função do número de furos, com  $vc=11,30$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

Observa-se da figura 4.29 que para a velocidade de corte de 11,30 m/min o perfil número 9 apresenta os menores valores de Mt.

P9 x P13 [Mt=fç(n furos), para vc=13,19 m/min]

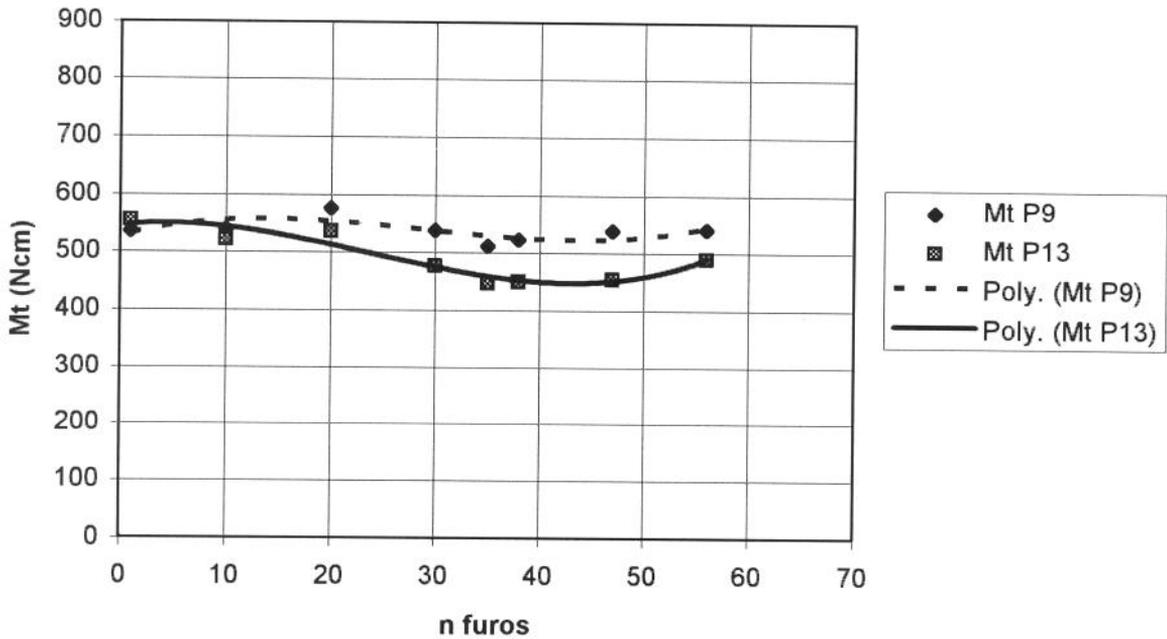


Figura 4.30 - Variação do momento de torção em função do número de furos, com  $vc=13,19$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

Observa-se da figura 4.30 que para a velocidade de corte de 13,19 m/min o perfil número 13 apresenta os menores valores de Mt.

A variação da força de avanço em função do número de furos, usando-se com três velocidades de corte, para o perfil número 9, é mostrada na figura 4.31.

P9 [ $F_f=f\zeta(n \text{ furos})$ , para  $f=0,100 \text{ mm/rot}$ ]

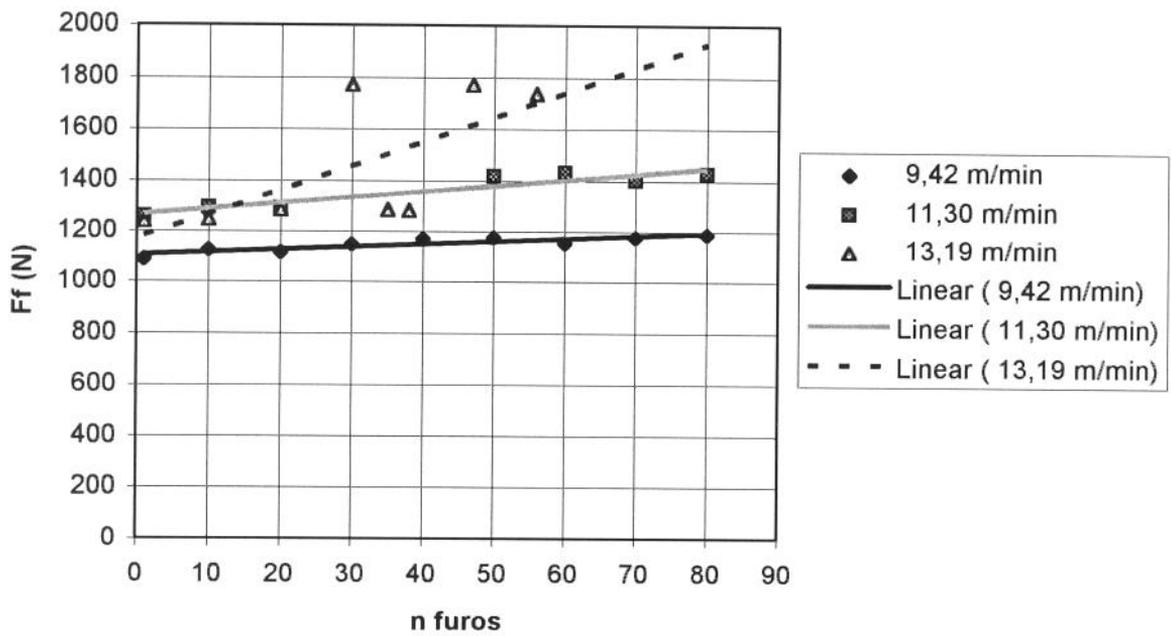


Figura 4.31 - Variação da força de avanço em função do número de furos, usando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil núm. 9.

A variação da força de avanço em função do número de furos, usinando-se com três velocidades de corte, para o perfil número 13, é mostrada na figura 4.32.

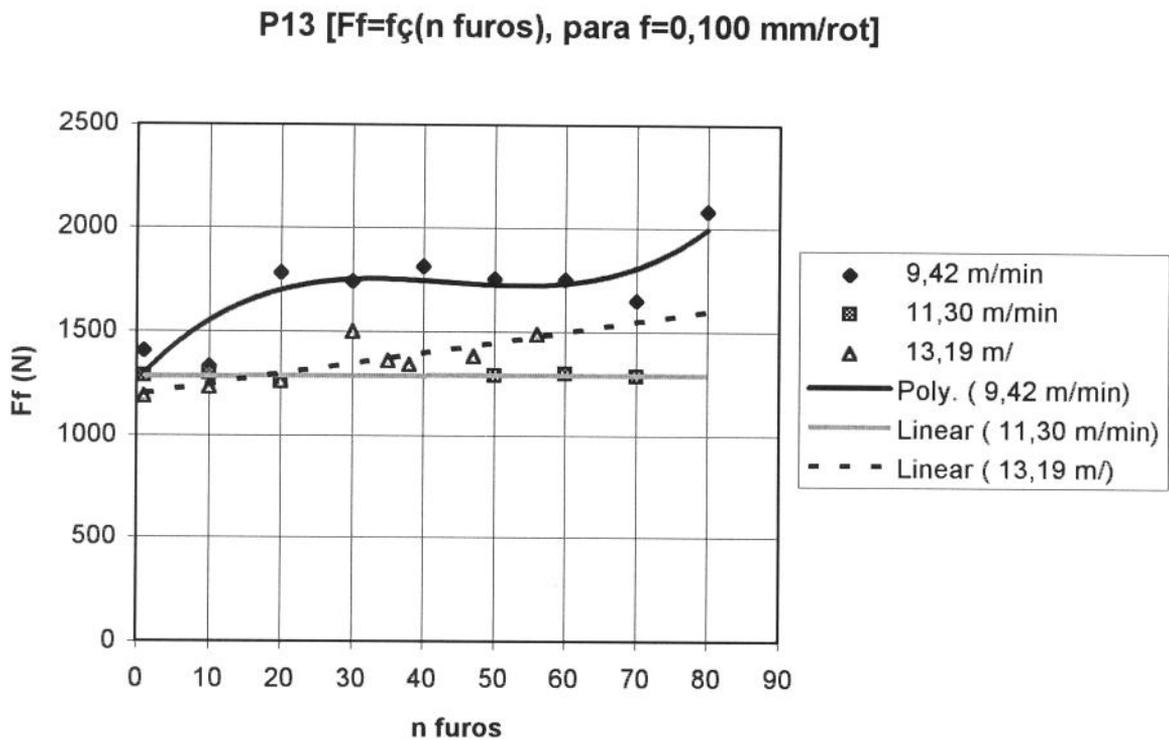


Figura 4.32 - Variação da força de avanço em função do número de furos, usinando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil núm. 13.

As figuras 4.33, 4.34 e 4.35 mostram para as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, respectivamente, a variação da força de avanço em função do número de furos para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

P9 x P13 [ $F_f=f\zeta(n \text{ furos})$ , para  $v_c=9,42 \text{ m/min}$ ]

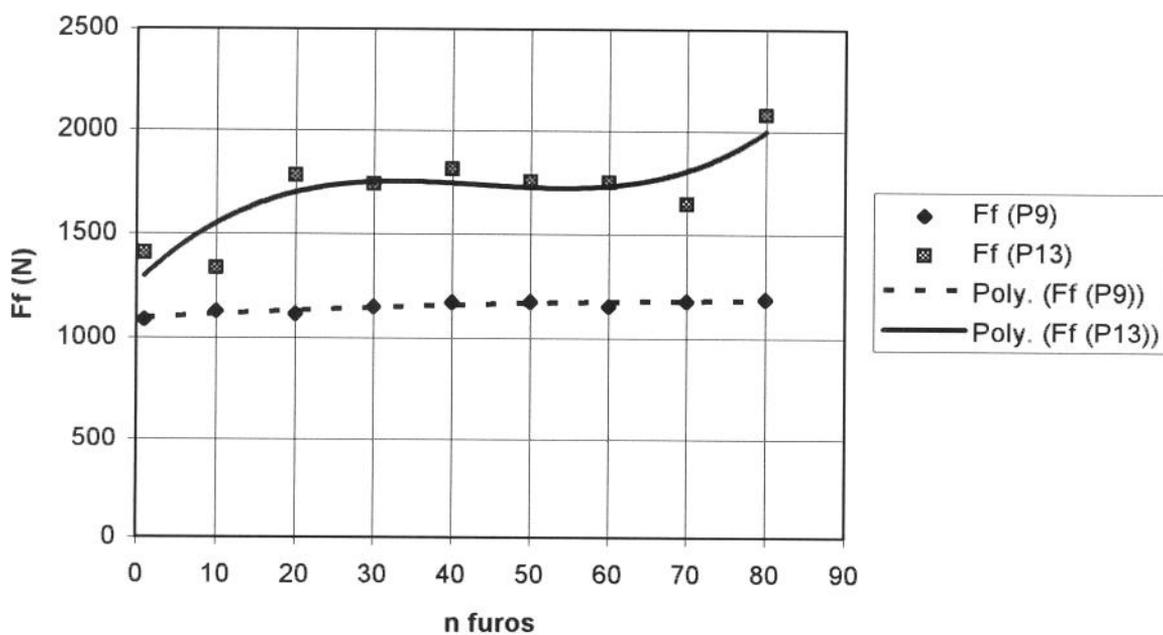


Figura 4.33 - Variação da força de avanço em função do número de furos, com  $v_c=9,42 \text{ m/min}$  e  $f=0,100 \text{ mm/rot}$ , para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

P9 x P13 [ $F_f=f\zeta(n \text{ furos})$ , para  $v_c=11,30 \text{ m/min}$ ]

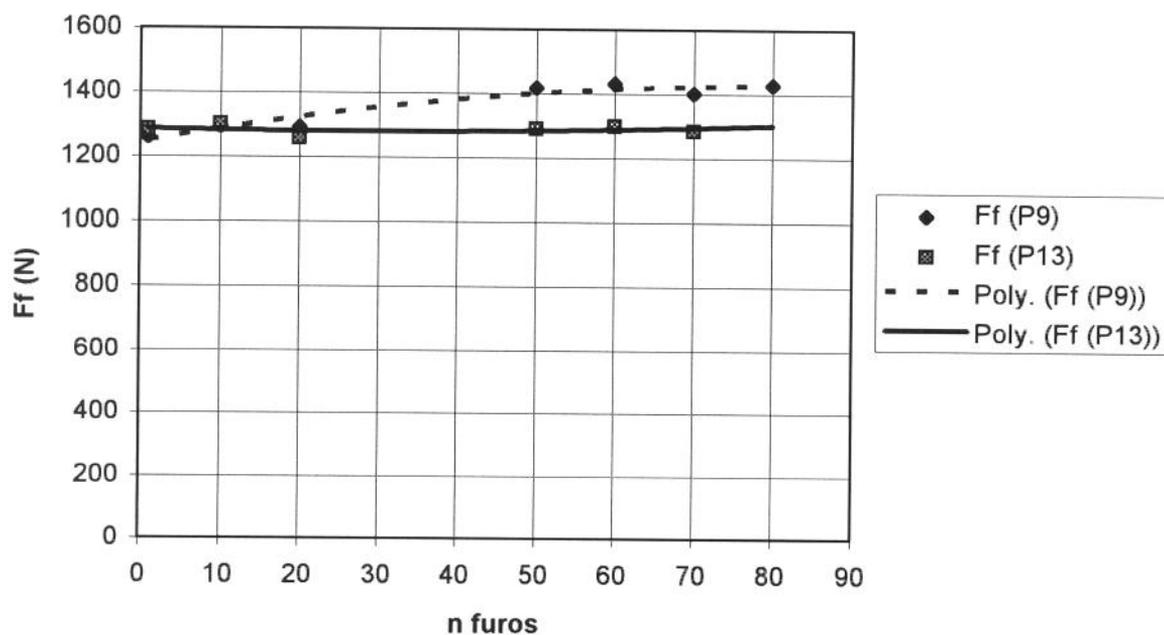


Figura 4.34 - Variação da força de avanço em função do número de furos, com  $v_c=11,30 \text{ m/min}$  e  $f=0,100 \text{ mm/rot}$ , para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

P9 x P13 [ $F_f=f\zeta(n \text{ furos})$ , para  $vc=13,19 \text{ m/min}$ ]

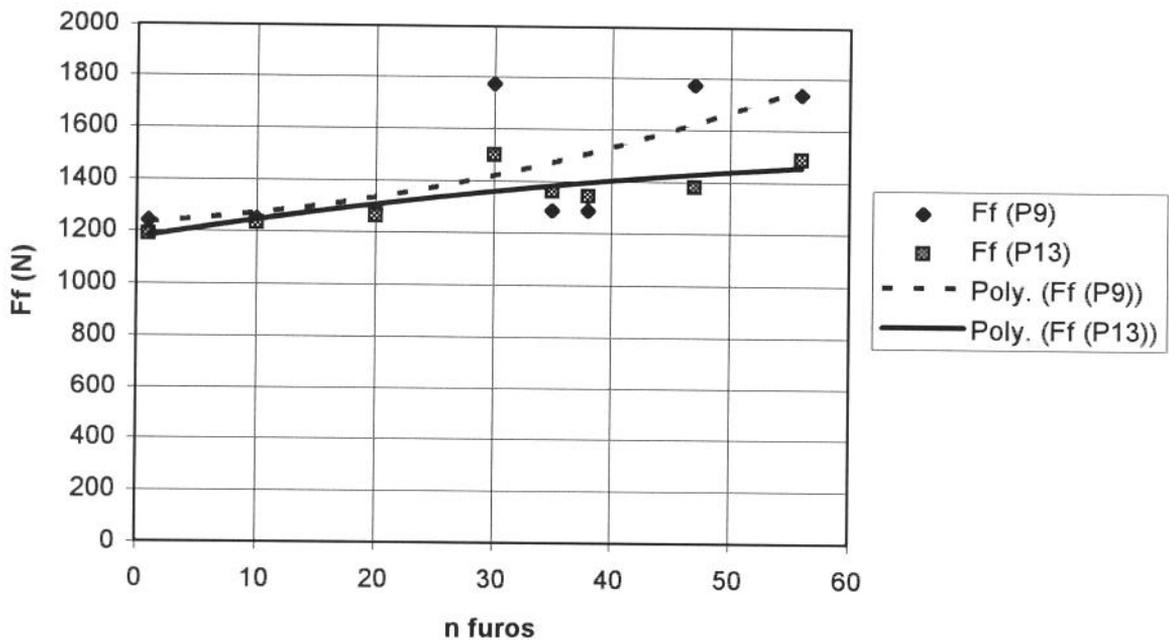


Figura 4.35 - Variação da força de avanço em função do número de furos, com  $vc=13,19 \text{ m/min}$  e  $f=0,100 \text{ mm/rot}$ , para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

Das figuras 4.26, 4.27, 4.31 e 4.32 observa-se que a velocidade de corte de  $9,42 \text{ m/min}$ , não apresenta bons resultados em relação aos perfis P9 e P13.

O perfil tipo P13 apresenta, para velocidade de corte de  $9,42 \text{ m/min}$ , os maiores valores de  $M_t$  e  $F_f$ , e, embora o perfil tipo P9 apresente os menores valores de  $F_f$ , em contra partida apresenta os maiores valores de  $M_t$  para esta velocidade.

A velocidade de corte de  $11,30$  proporcionou o melhor compromisso entre  $M_t$  e  $F_f$ , no entanto para a escolha do melhor perfil, os dados não são conclusivos, uma vez que para esta velocidade de corte, o perfil P9 apresenta os menores valores do momento de torção e perfil P13 os menores valores da força de avanço, como pode ser observado nas figuras 4.29 e 4.34.

#### 4.3-2 - Comportamento dos Desgastes VB e VBQ Durante a Fase II - Parte 2.

Os resultados referentes ao comportamento dos desgastes VB e VBQ durante a Fase II - Parte 2, para o perfil número 9 e para o perfil número 13, podem ser observados nas figuras 4.36 a 4.45.

A variação do desgaste VB em função do número de furos, usando-se com três velocidades de corte, para o perfil número 9, é mostrada na figura 4.36.

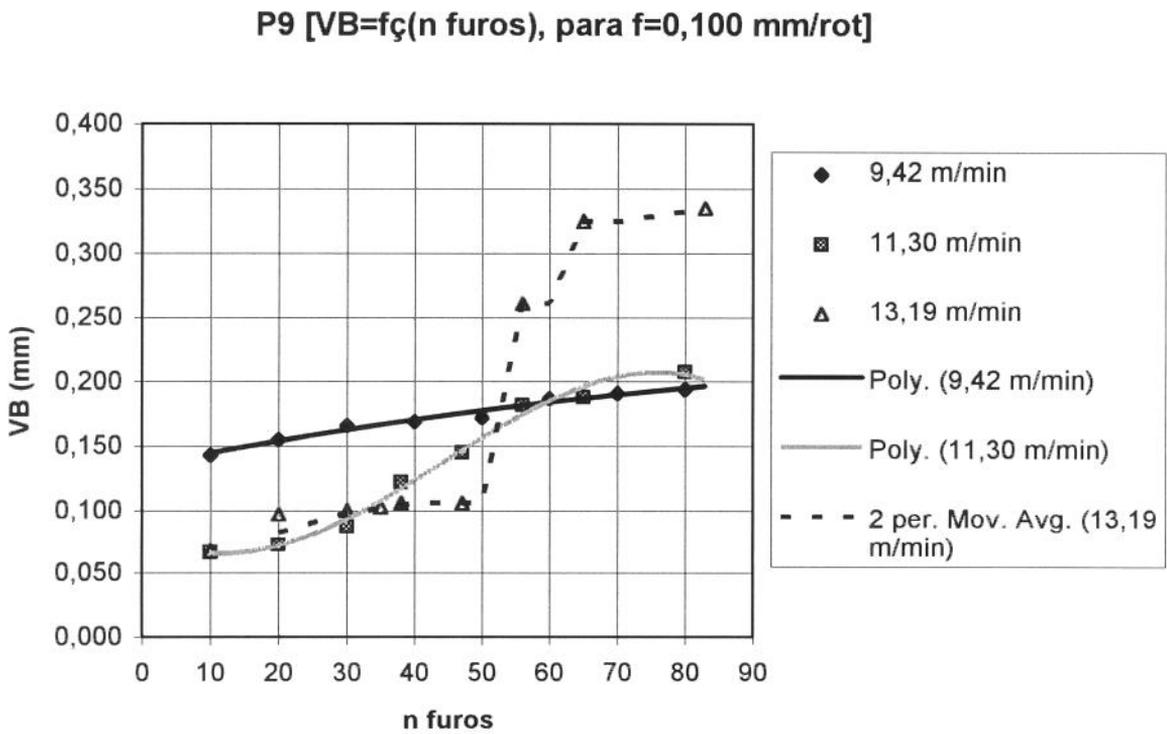


Figura 4.36 - Variação do desgaste VB em função do número de furos, usando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número 9.

A variação do desgaste VB em função do número de furos, usando-se com três velocidades de corte, para o perfil número 13, é mostrada na figura 4.37.

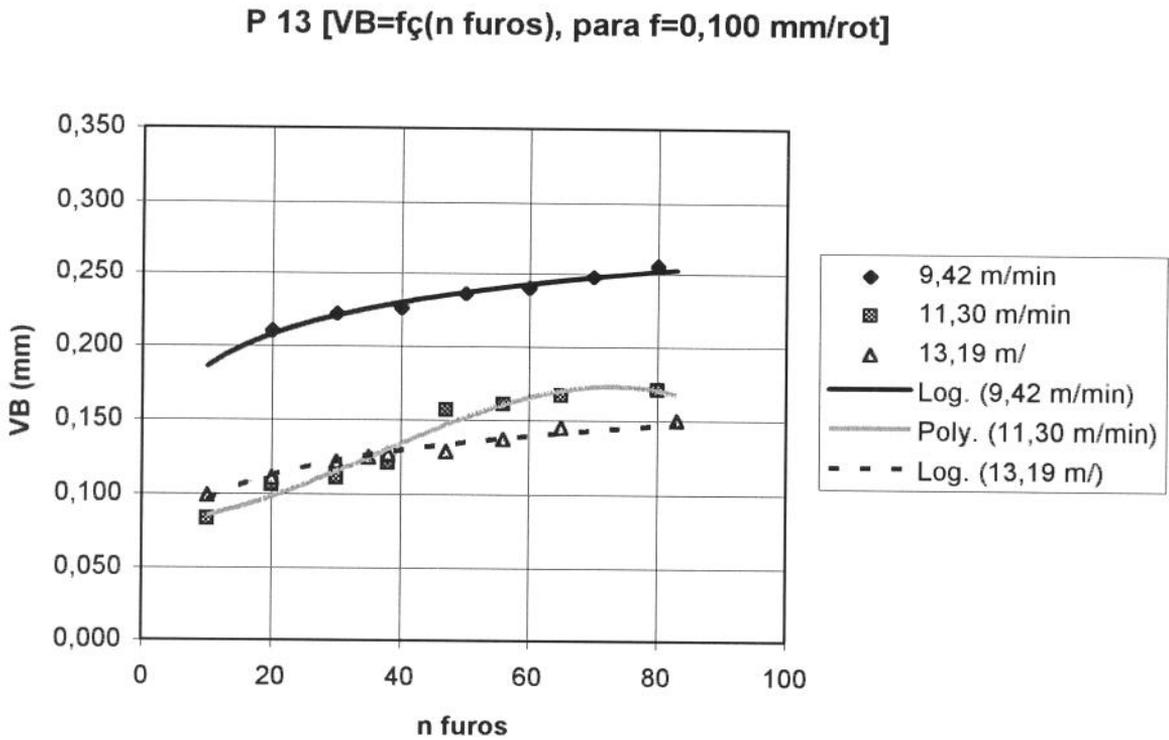


Figura 4.37 - Variação do desgaste VB em função do número de furos, usando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número 13.

Das figuras 4.36 e 4.37 observa-se que os maiores valores de VB para os perfis 9 e 13 respectivamente, ocorrem para a velocidade de corte de 13,19 m/min.

As figuras 4.38, 4.39 e 4.40 mostram para as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, respectivamente, a variação do desgaste VB em função do número de furos para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

P9 x P13 [VB=fç(n furos), para vc=9,42 m/min]

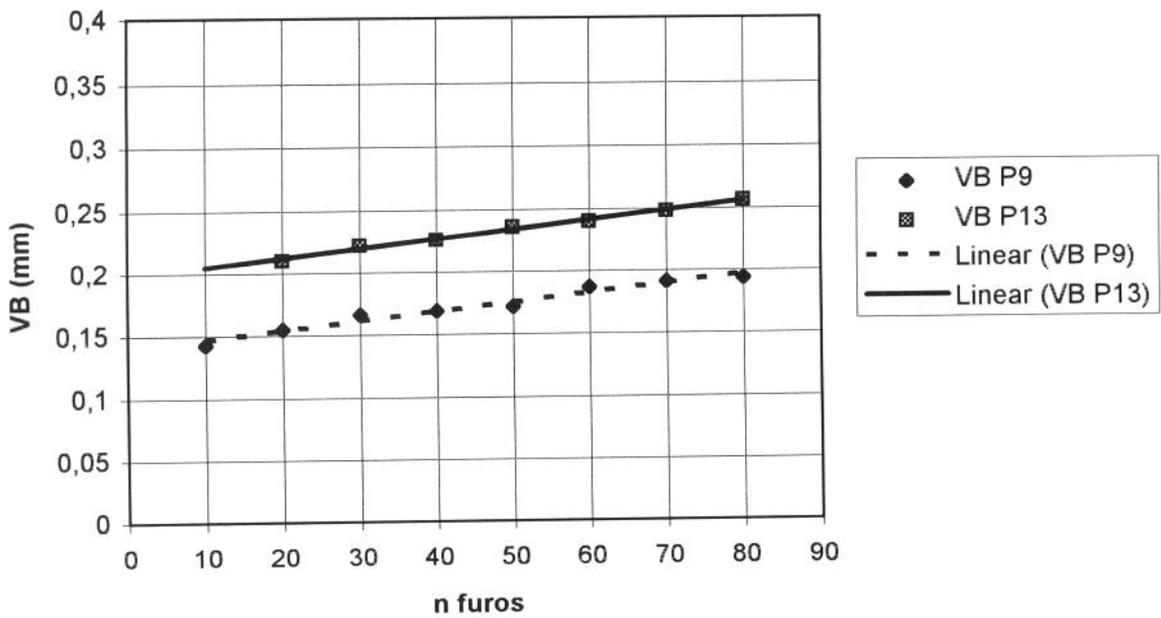


Figura 4.38 - Variação do desgaste VB em função do número de furos, com  $v_c=9,42$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

P9 x P13 [VBfç=(n furos), para vc=13,19 m/min]

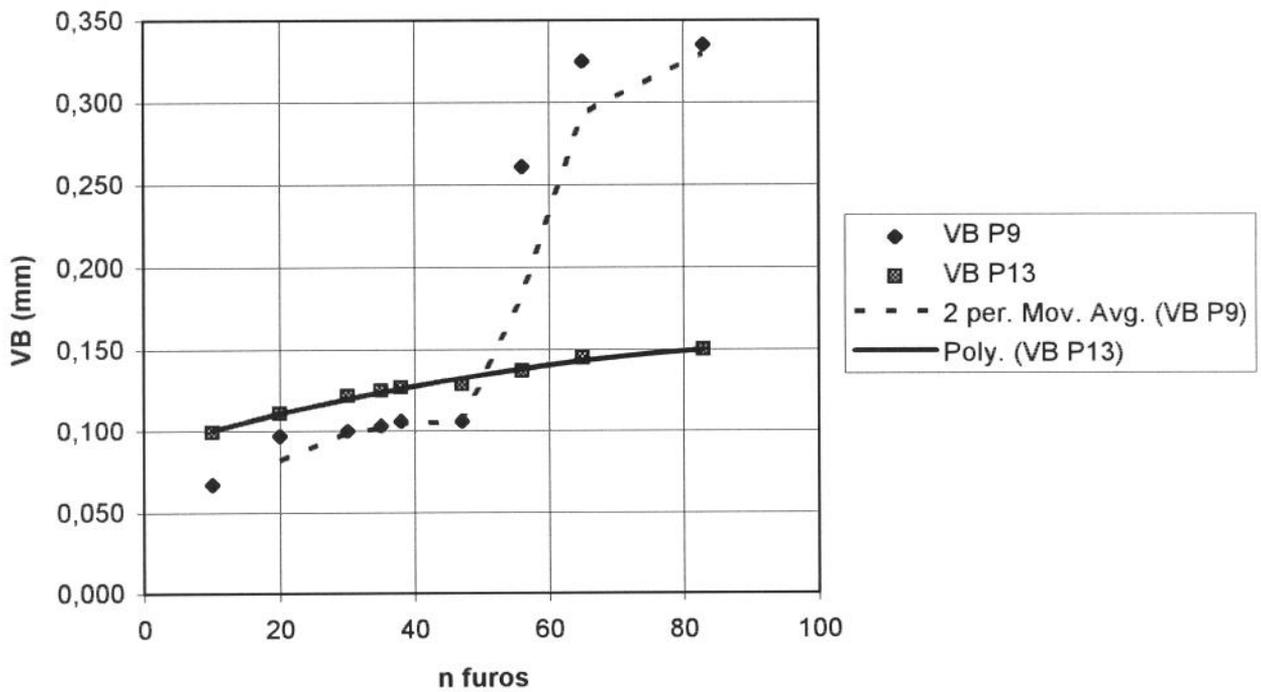


Figura 4.40 - Variação do desgaste VB em função do número de furos, com  $vc=13,19$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

A variação do desgaste VBQ em função do número de furos, usando-se com três velocidades de corte, para o perfil número 9, é mostrada na figura 4.41.

P9 [VBQ=fç(n furos),para f=0,100 mm/rot]

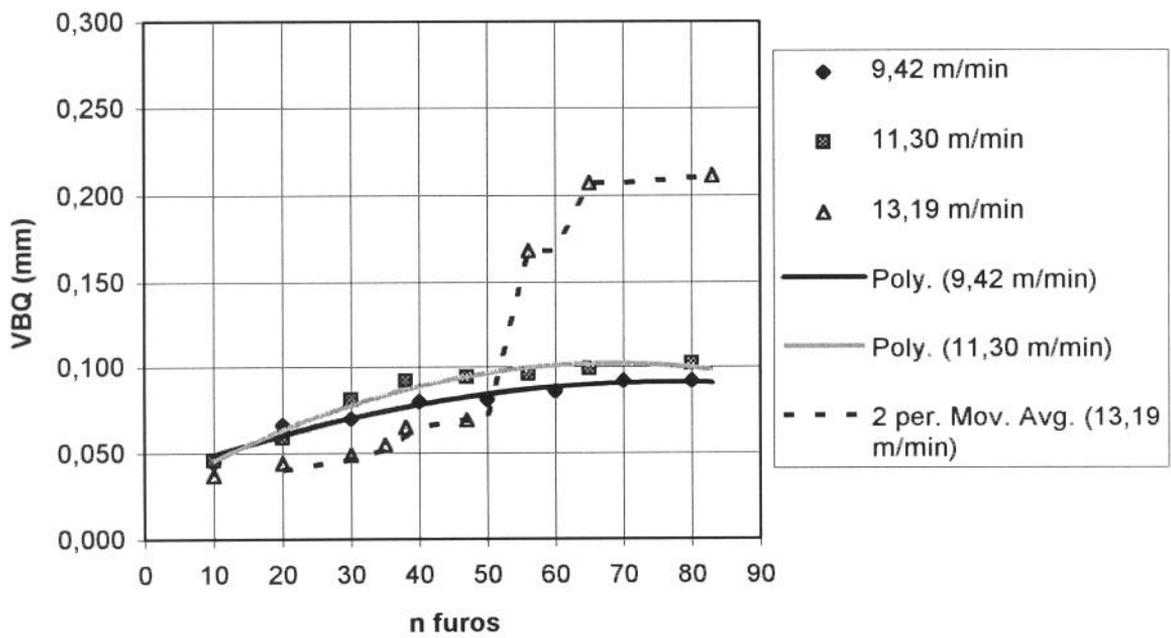


Figura 4.41 - Variação do desgaste VBQ em função do número de furos, usando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número

9.

A variação do desgaste VBQ em função do número de furos, usando-se com três velocidades de corte, para o perfil número 13, é mostrada na figura 4.42

**P 13 [VBQ=fç(n furos), para f=0,100 mm/rot]**

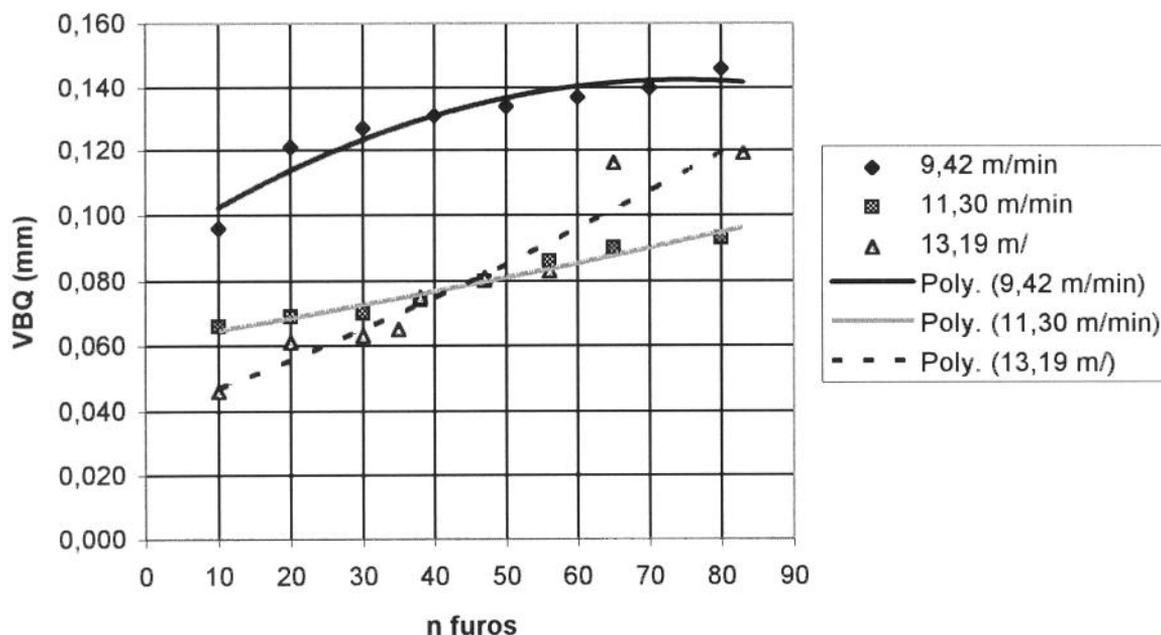


Figura 4.42 - Variação do desgaste VBQ em função do número de furos, usando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número 13.

Das figuras 4.41 e 4.42, observa-se que os maiores valores de VBQ, para os perfis 9 e 13 respectivamente também ocorrem para a velocidade de corte de 13,19 m/min.

As figuras 4.43, 4.44 e 4.46 mostram para as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, respectivamente, a variação do desgaste VB em função do número de furos para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

P9 x P13 [VBQ=fç (n furos), para vc=9,42 m/miin]

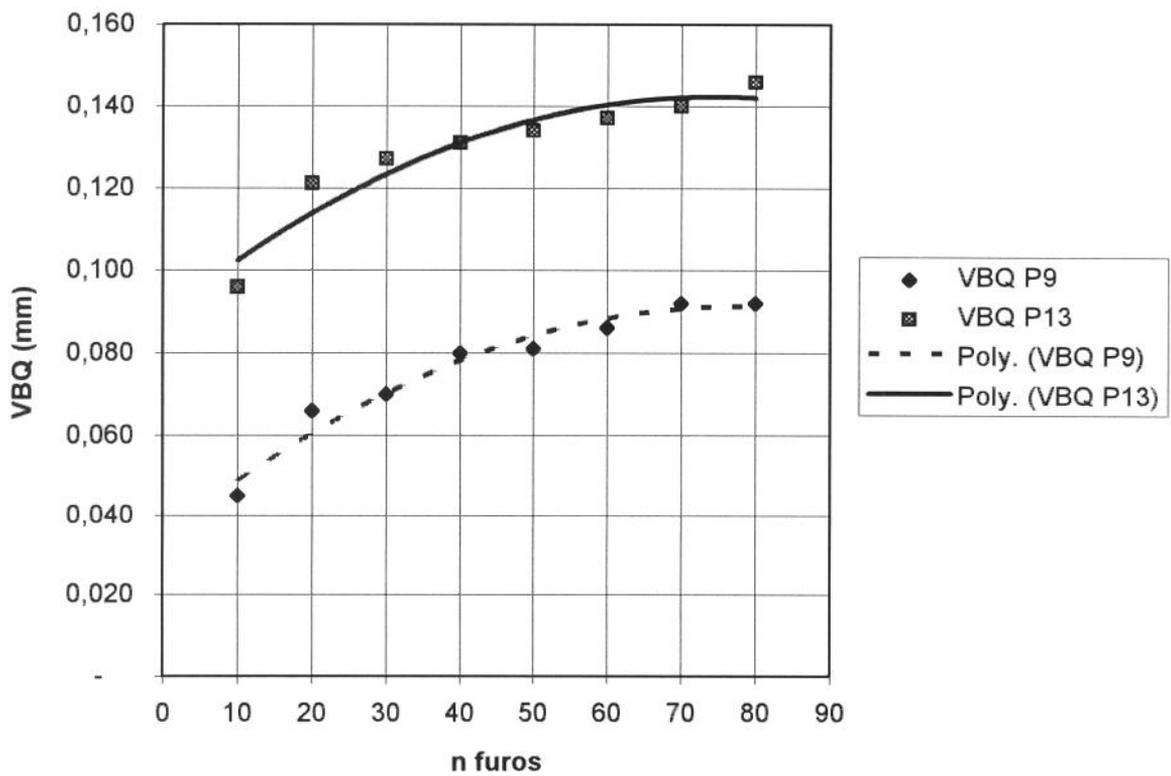


Figura 4.43 - Variação do desgaste VBQ em função do número de furos, com vc=9,42 m/min e f=0,100 mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

P9 x P13 [VBQ=fç(n furos), para vc=11,30 m/min]

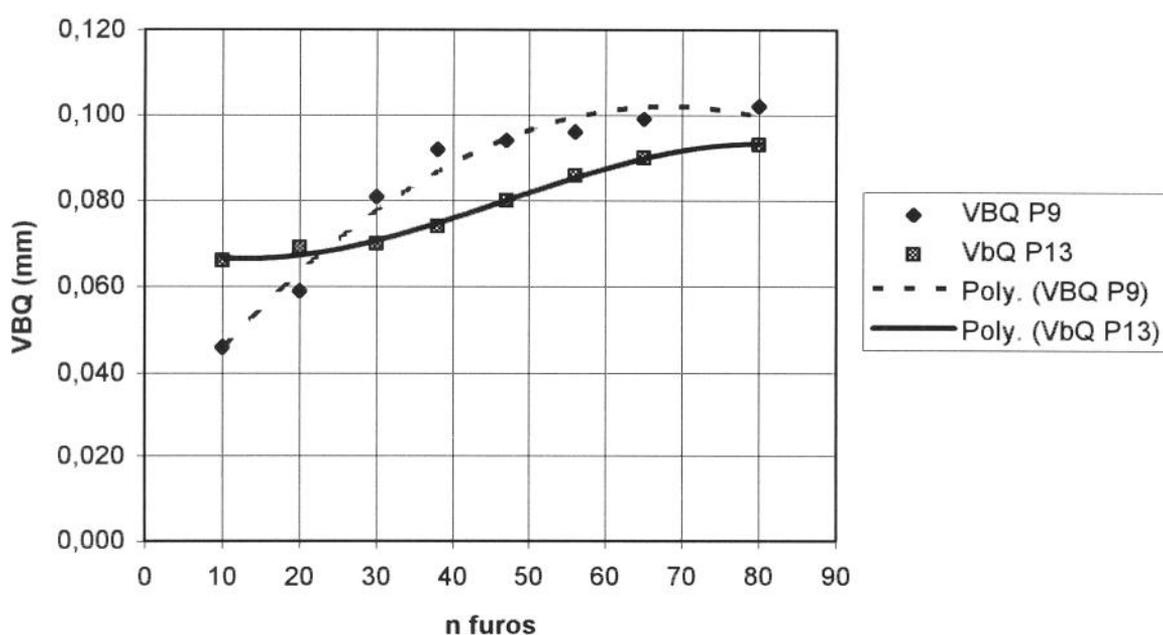


Figura 4.44 - Variação do desgaste VBQ em função do número de furos, com  $vc=11,30$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

P9 x P13 [VBQ=fç(n furos), para vc=13,19 m/min]

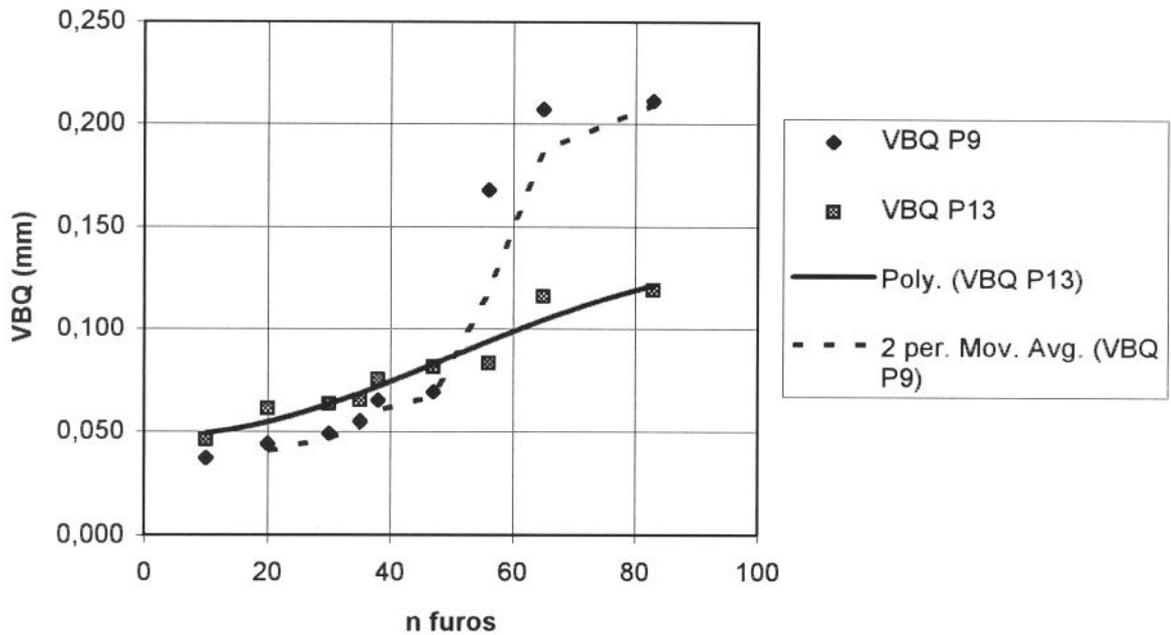


Figura 4.45 - Variação do desgaste VBQ em função do número de furos, com  $vc=13,19$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

Das figuras 4.39 e 4.44, observa-se que a velocidade de corte de 11,30 m/min, representa o melhor compromisso entre o desgaste VB e VBQ para os perfis do tipo P9 e do tipo P13.

Para esta velocidade de corte não há uma diferença significativa entre os valores de VB para os dois tipos de perfis. O mesmo foi observado em relação a VBQ.

Nota-se uma incidência maior de quebras na aresta principal de corte do perfil número 9, para a  $vc=13,19$  m/min, como pode ser observado nas figuras 4,41 e 4.45.

As figuras 4.46 e 4.47 mostram, respectivamente, o desgaste VB para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

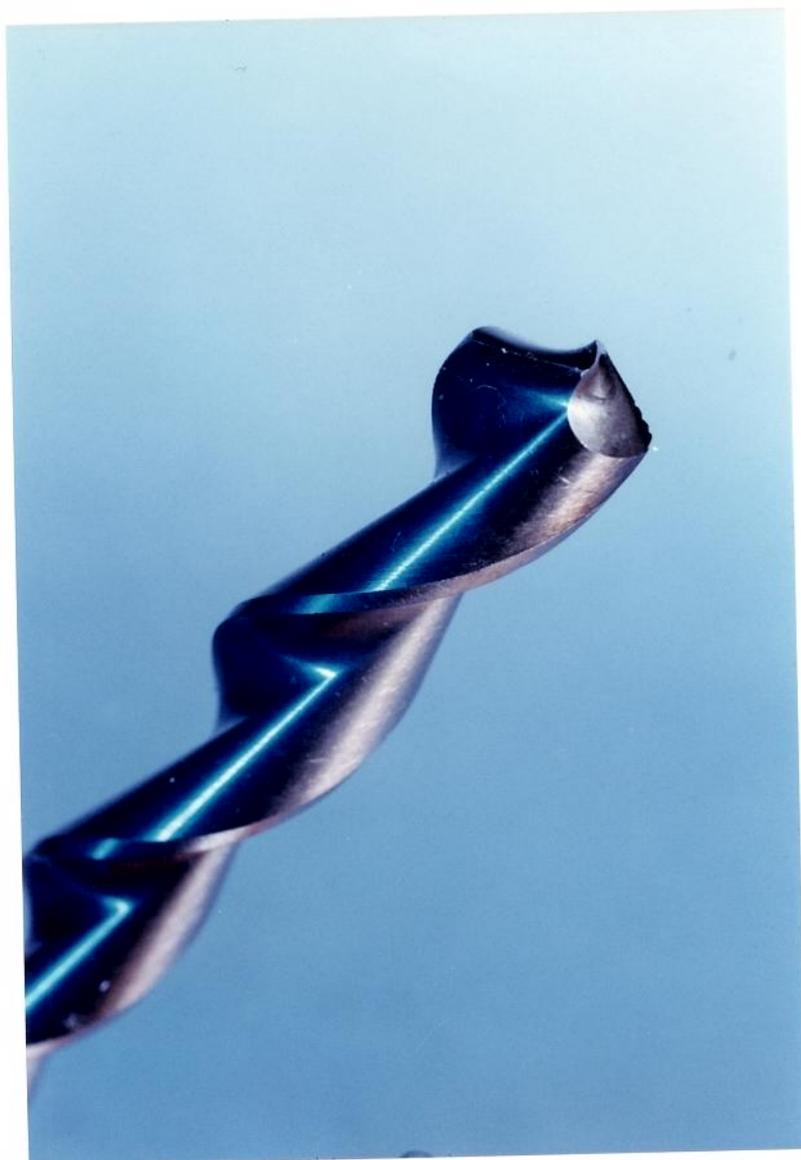


Figura 4.46 - Desgaste VB em função do número de furos para o perfil número 9



Figura 4.47 - Desgaste VB em função do número de furos para o perfil número 13

### 4.3-3 - Desvio Dimensional do Furo Durante a Fase II - Parte 2.

Os resultados referentes ao desvio dimensional dos furos durante a Fase II - Parte 2, para o perfil número 9 e para o perfil número 13, podem ser observados nas figuras 4.48 a 4.52 .

A variação do desvio dimensional em função do número de furos, usando-se com três velocidades de corte, para o perfil número 9, é mostrada na figura 4.48.

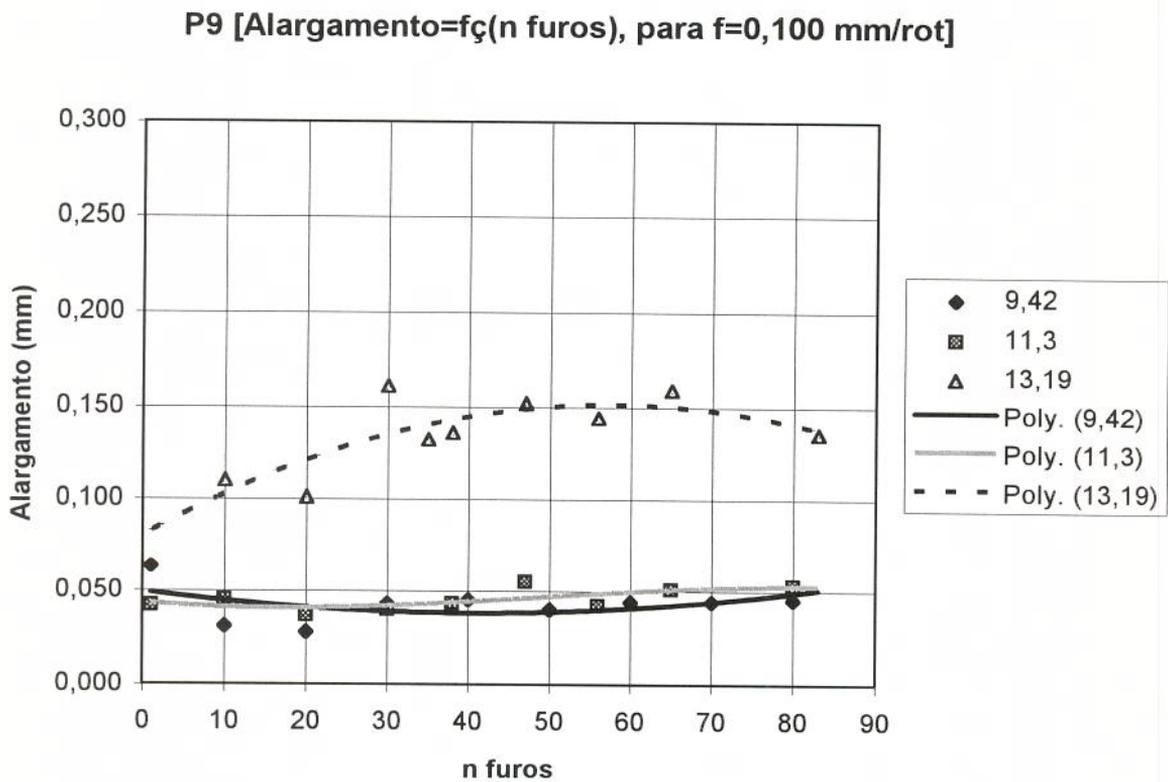


Figura 4.48 - Variação do desvio dimensional em função do número de furos, usando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número 9.

A variação do desvio dimensional em função do número de furos, usando-se com três velocidades de corte, para o perfil número 13, é mostrada na figura 4.49.

P13 [Alargamento= $f\zeta(n \text{ furos})$ , para  $f=0,100 \text{ mm/rot}$ ]

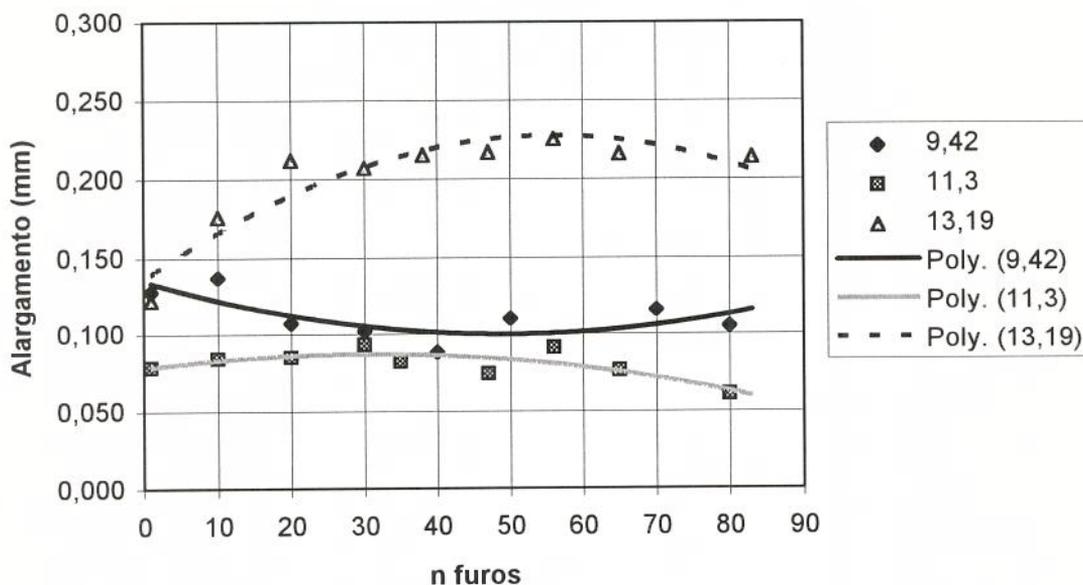


Figura 4.49 - Variação do desvio dimensional em função do número de furos, usando-se com as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, para o perfil número 13.

Das figuras 4.48 e 4.49 observa-se que os maiores valores de alargamento são para a velocidade de corte de 13,19 m/min.

As figuras 4.50, 4.51 e 4.52 mostram para as velocidades de corte de 9,42; 11,30 e 13,19 m/min, respectivamente, a variação do desgaste VB em função do número de furos para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

P9 x P13 [Alargamento=fç(n furos), para  $v_c=9,42$  m/min]

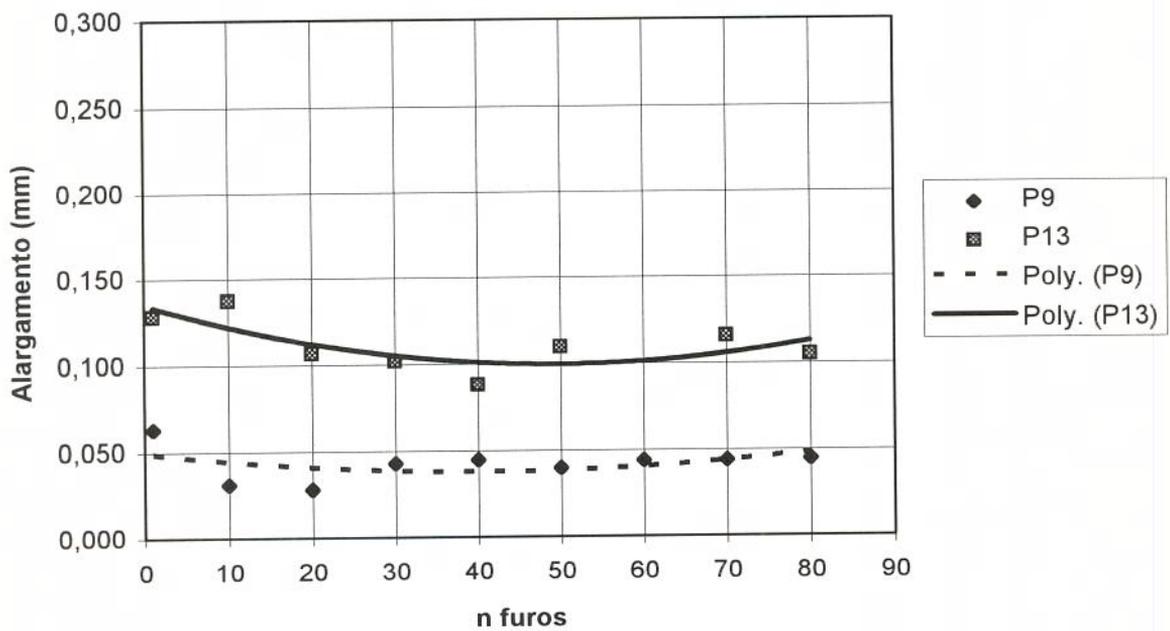


Figura 4.50 - Variação do desvio dimensional em função do número de furos, com  $v_c=9,42$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

P9 x P13 [Alargamento=fç(n furos, para vc=11,30 m/min]

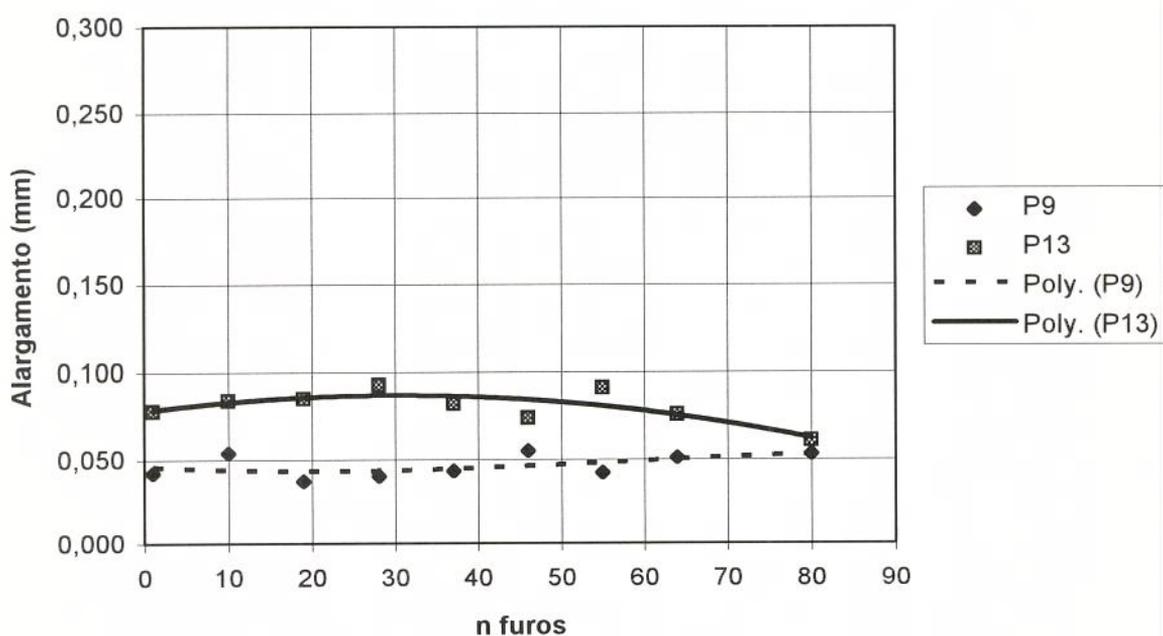


Figura 4.51 - Variação do desvio dimensional em função do número de furos, com  $vc=11,30$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

**P9 x P13 [Alargamento= $f\zeta(n \text{ furos})$ , para  $vc=13,19 \text{ m/min}$ ]**

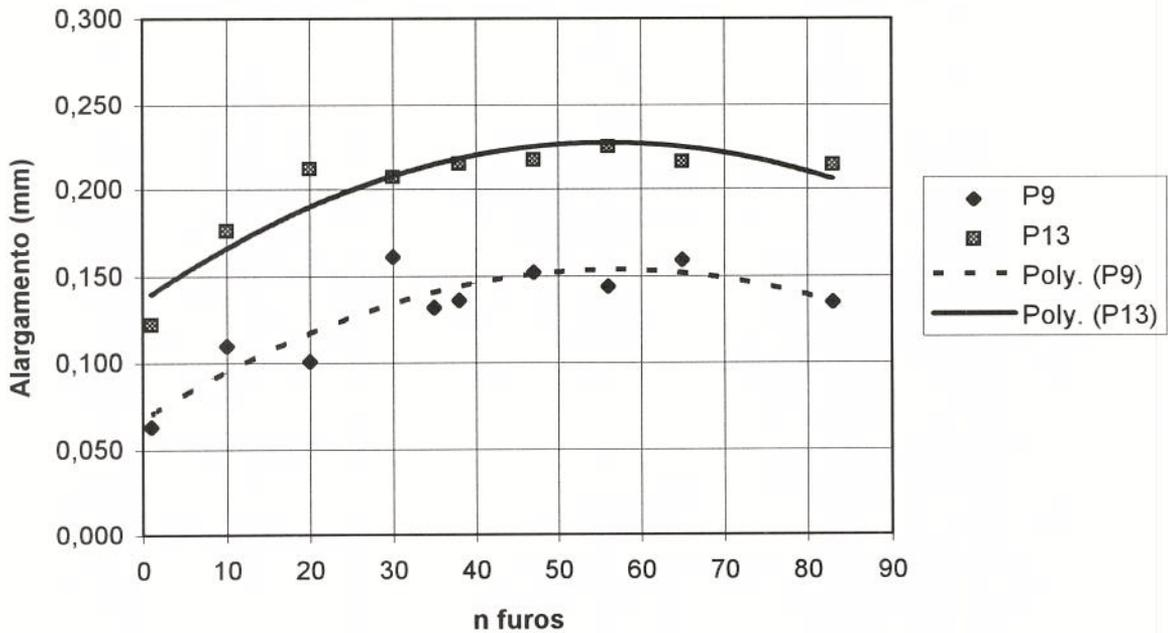


Figura 4.52 - Variação do desvio dimensional em função do número de furos, com  $vc=13,19 \text{ m/min}$  e  $f=0,100 \text{ mm/rot}$ , para o perfil número 9 e para o perfil número 13.

O perfil número P9 apresentou furos com qualidade de trabalho entre IT8 e IT10.

O perfil número P13 apresentou furos com qualidade de trabalho entre IT10 e IT13.

Das figuras 4.50 a 4.52, observa-se que o perfil do tipo P9 apresentou os menores valores de alargamento, para todas as velocidades utilizadas nos ensaios.

As figuras 4.53 e 4.54 mostram, respectivamente, o cavaco formado pela aresta transversal para o perfil número 9 e para o perfil número 13.



Figura 4.54 - Cavaco formado pela aresta transversal para o perfil número 13.



Figura 4.53 - Cavaco formado pela aresta transversal para o perfil número 9.

## Capítulo 5

### Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros

#### 5.1 - FASE I

Dos ensaios da Fase I conclui-se que:

- o perfil número 3 (padrão), não é adequado para a furação da liga de titânio Ti-6Al-4V, pois nas tentativas realizadas ou a broca quebrou, ou ocorreu a fusão da ponta da broca antes que se completasse dois ou três furos.
- o perfil número 6 (especial), que apresenta uma geometria padrão, afiação especial e o núcleo reforçado, pode ser usado na usinagem da liga Ti-6Al-4V, porém a qualidade de trabalho obtida, entre IT 14 e IT 16, está abaixo da qualidade de trabalho obtida normalmente no processo de furação (entre IT 11 e IT 13). Estas qualidades de trabalho foram obtidas porque as ferramentas com perfil número 6, embora tivessem o núcleo reforçado, de dimensões próximas às dimensões do núcleo das brocas especiais utilizadas na fase II, não apresentavam a seção transversal adequada para a usinagem da liga Ti-6Al-4V. A forma dos canais helicoidais e a geometria (padrão) dificultavam a saída do cavaco, havendo uma grande adesão do material usinado sobre a aresta de corte secundária e sobre a guia, o que contribuiu para o alargamento do furo.
- entre as afiações testadas, a afiação helical foi escolhida para os ensaios da Fase II, porque apresentou a melhor forma de cavaco, baixos valores de alargamento do furo e os menores valores de desgaste da ferramenta. Embora esta afiação não tenha apresentado os menores valores do momento de torção (obtido com a afiação Racon) e da força de avanço (obtida com a afiação cruzada NAS P3 e P9), ela apresentou as menores variações destes esforços, para as diferentes condições de usinagem, ou seja, apresentou um comportamento mais uniforme durante os ensaios.

## 5.2 - FASE II

Dos ensaios da Fase II conclui-se que:

- visto que :
  - os menores valores de alargamento foram observados para o avanço de 0,100 mm/rot, com qualidade de trabalho entre IT 8 e IT 10, e
  - o melhor compromisso entre os valores dos desgastes VB e VBQ e os esforços de corte foram observados para a velocidade de corte de 11,30 m/min.

Conclui-se, então, que os parâmetros de corte mais indicados para a usinagem da liga Ti-6Al-4V, utilizando-se os perfis número 9 e número 13, são  $vc=11,30$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot.

Conclui-se também que a hipótese inicial de que com o uso de perfis, geometrias e afiações especiais, poderia-se obter furos com qualidade de trabalho entre IT 7 e IT9 é verdadeira, visto que, o perfil número 9 (com geometria e afiação especiais), proporcionou uma qualidade de trabalho entre IT 8 e IT 10, para as condições de corte mais favoráveis ( $vc=11,30$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot).

- Apesar de não serem conclusivos, os resultados obtidos indicam que a afiação do tipo helicoidal ("Helical") e o perfil número 9, para uma  $vc=11,30$  m/min e  $f=0,100$  mm/rot, tendem a ser a melhor escolha.

### Sugestões para trabalhos futuros

Observou-se, em todos os ensaios, que o momento de torção diminuiu à medida que os desgastes aumentaram. Este fato está de acordo com as observações feitas por König e Schröder [König e Schröder, 1978]. Como o objetivo do trabalho era o de fazer uma análise comparativa entre os perfis e as afiações, não se aprofundou nesta questão, ficando como sugestão, para trabalhos futuros, o estudo das causas deste tipo de comportamento.

Em trabalhos futuros poder-se-á dar uma atenção maior às duas outras afiações testadas na Fase I, a "Bickford" e a Cruzada NAS P3, que apresentaram

bons resultados, em relação aos esforços de corte e à forma do cavaco, na usinagem da liga Ti-6Al-4V.

Sugere-se também o uso de outros materiais de ferramenta nos ensaios, como por exemplo o aço rápido sinterizado. Em brocas helicoidais de aço rápido sinterizado, pode-se utilizar canais internos de lubrificação, que permitem uma ação mais eficiente do fluido de corte sobre a ponta da ferramenta.

É importante também a pesquisa sobre o revestimento de brocas helicoidais de aço rápido com materiais que possuem pouca afinidade com o titânio e boa resistência a abrasão, como o diamante, boretos de alguns metais de transição e as terras raras, visto que os revestimentos normais (TiN, TiC, TiN-TiC,  $Al_2O_3$ -TiC-TiN, Ti(C,N)-TiC, HfN e  $TiB_2$ ) apresentam afinidades com o titânio e alta razão de desgaste, quando comparamos ferramentas revestidas com ferramentas sem revestimento.

Uma possibilidade para a realização destes revestimentos é o uso da tecnologia de aplicação de revestimentos através do uso de plasma.

## Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Aços ferramenta - especificação, NBR 6189. -- Rio de Janeiro: ABNT, 1982, p.13.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais, NBR 6162 out/1989. -- Rio de Janeiro: ABNT, 1989.
- BARROS NETO, B. et all Planejamento e otimização de experimentos. -- São Paulo: UNICAMP, 1995.
- BASIC Manufacturing Evaluation of Materials, Methods and Processes. -- CONVAIR-SD: Titanium Development Program, v. III, p. 104-172.
- CHEN, L. H., WU, S. M. Further investigation of multifacet drills (MFD's) Mathematical models, methods of grinding, and computer plotting. -- *Trans. of the ASME*, v.106, nov. 1984, p.313-324.
- CLARCK, D. S., VARNEY, W. R. *Physical Metallurgy for Engineers*. -- New Jersey: D. Van Nostrand, 1965, p. 447-594.
- CULP, N. J.; HUFFMAN, D. D. et all Toll materials. -- *Metals Handbook*. 9 ed., cap. 18, 1980, p. 18.1-18.17.
- DIN Werk zeng normen Bohres, Senker, Recbahlen, Gewindeschneidwerkzeuge 8. -- Berlin: Beuth Verlag, 1977.
- DONACHIE, M. J. (ed.) Titanium. -- *Metals Handbook*. 11 ed., cap. 9, 1987, p. 9.1-9.11.
- DONARSKI, R. R. Get the right point for drilling. -- Ohio: Modern Machine Shop.
- DONARSKI, R. R. New geometries for wide-web drills. -- *American Machinist*, nov. 1984, p.140-141.

- ERNST, H. and HAGGARTY, W. A. The spiral point drill - a new concept in drill point geometry. -- *Trans. ASME*, v.80, 1958, p.1059-1072.
- FIESSELMANN, F. *MR90-326 Doubling drilling productivity to 6 SIGMA SPC*, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1990, 17 p.
- FONSECA, E. M.- *Uma contribuição ao conhecimento dos esforços de corte no processo de furação em cheio com brocas helicoidais de aço rápido*, U.F.U., Uberlândia, M.G., 1992.
- FUGELSO, M. A., WU, S. M. A microprocessor controlled twist drill grinder for automated drill production. -- *Trans. of the ASME*, v.101, may 1979, p.205-210.
- FUJII, S. et al An analysis of drill geometry for optimum drill design by computer. -- *Trans. of the ASME*, aug. 1970, part I and II.
- IMI Titanium Fabrication -- *Imperial Metal Industries*. Grã Bretanha: Kynoch Press, 1967.
- ISO/DIS 3685, 1988 Tool life testing with single point turning tools. -- Anexo G - Chip forms, ISO, 1988.
- KARFAKIS, M. G. ; HEINS, R. W. Laboratory measurement of bit bearing temperatures in rotary drilling with the garter spring pick-up system. *Journal of Eng. for Industry*, v.111, 1989, p.187-192.
- KLEEFISCH, E. W. (ed.) *Industrial Applications of Titanium and Zirconium*. U.S.A.: *American Society for Testing and Materials - STP 728*; 1979, 208 p.
- KÖNIG, W., SCHRÖDER, K. H. Face milling and drilling of titanium alloys. -- In: *Proc. Int. Symp. Spored Machinability Activity*. -- American Society for Metals, 1978, p. 308-323.
- KÖNIG, W. *Proceedings of Forty-seventh Meeting of AGARD Structural and Materials Panel*, Florence, 26-28 september 1978, AGARD, CP 256, London, 1979, pp. 77-78.

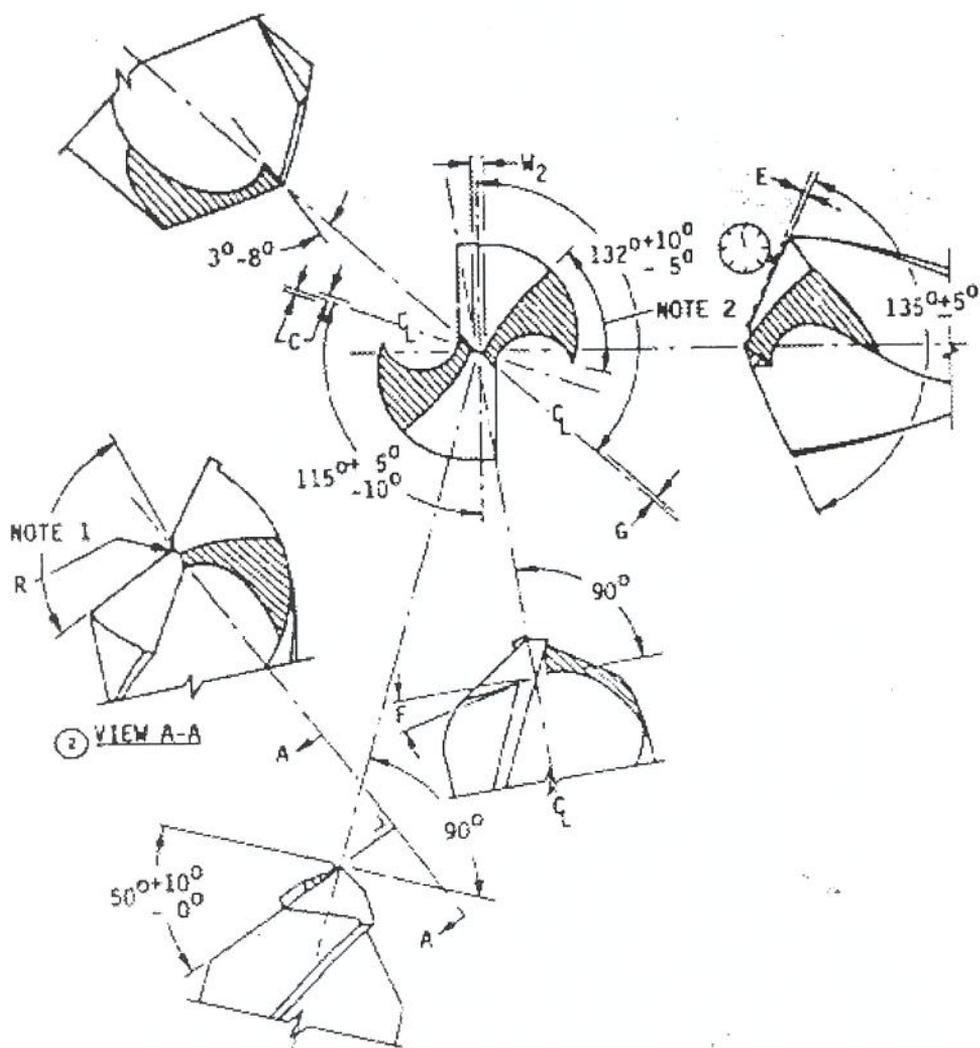
- KRAMER, B. M. ; VIENS, D.; CHIN, S. Theoretical consideration of rare earth metal compounds as tool materials for titanium machining. *Annals of the CIRP*, Arizona State University, v. 42, 1993, p. 111-114.
- LIN, Y. Q., WANG, Y.-H. Stick-slip vibration of drill strings. -- *Transactions of the ASME*, v.113, 1991, p.38-43.
- LINDBERG, R. A. *Processes and materials of manufacture*. -- Boston: Allyn and Bacon, 1990.
- LORENZ, G. Helix angle and drill performance. -- *Annals of the CIRP*, Arizona State University, v.28, n.1, 1979, p.83-86.
- MACHADO, A. R. Machining of Ti6A14V and Inconel 901 with a high pressure coolant system, PhD Thesis, Engineering Department, University of Warwick, Aug. 1990, 288 p.
- MACHADO, A. R., WALLBANK, J. Machining of titanium and its alloys - a review. -- *Proc Instn Mech Engrs*, v. 204, n. B1, 1990,p. 53-60.
- MACHINING DATE HANDBOOK, 5 ed, 1985.
- MASON, F. A evolução nas arestas de corte das brocas. -- *Máquinas e Metais* -- São Paulo: Aranda, fev. 1990, p. 28-58.
- MASUHA, J. R. Torsionssteifigkeit und Bohrverhalten von Spiralbohrern mit Sonderprofilen. -- Berlin: Verlag München, 1980.
- MOTTA, M. F.; MACHADO, A. R. Fluidos de corte: tipos, funções, seleção, métodos de aplicação e manutenção. --*Máquinas e Metais*, São Paulo: Aranda, n. 355, set. 1995, p. 44-56.
- NAS 907 National Aerospace Standard. -- Aerospace Industries Association of America, 1986.
- NOVASKI, O. *Introdução à engenharia de fabricação mecânica* -- São Paulo: Edgard Blücher, 1994, 119 p.

- OPERATORS' HANDBOOK Machining titanium. -- Boeing Commercial Airplane Division, may 1968, 94 p.
- POLMEAR, I. J. Light alloys: Metallurgy of the Light Metals. -- *Metallurgy and Materials Science Series*. Grã-Bretanha: Edward Arnold, 1981.
- RADHAKRISHNAN, T. et al A mathematical model for point drill flanks. -- *Trans of the ASME*, v.105, aug. 1983, p.137-142.
- ROSENBERG, H. W. *Properties and processing Ti-6Al-4V*. -- Pittsburgh: TIMET, 1979.
- SCHULZ, H. ; MORIWAKI, High-speed machining. *Annals of the CIRP*, Arizona State University, v. 41, 1992, p.637-643.
- SHAW, M. C. ; VYAS, A. Chip formation in the machining of hardened steel. *Annals of the CIRP*, Arizona State University, v.42, n.1, 1993, p.29-33.
- SHI HAN-MIN et al A study on curved edge drills. -- *Trans. of the ASME*, v.116, may 1994, p.267-273.
- SKEVINGTON, E., FREEMAN, R., SKEVINGTON, C. The truth about twist drills. -- *Tooling and Production*, apr. 1986, p.54-61.
- SKF FERRAMENTAS *Manual técnico*. -- São Paulo: SKF Ferramentas, 1989, 261 p.
- SPUR, G., MASUHA, J. R. Drilling with twist drills of different cross section profiles. -- *Annals of the CIRP*, Arizona State University, v.30, n.1, 1981, p.31-35.
- TEKINALP, O., ULSOY, A. G. Effects of geometric and process parameters on drill tranverse vibrations. -- *Journal of Engineering for Industry*, v.112, 1990, p.189-194.
- THORNLEY, R. H. et al Some aspects of twist drill design. -- *Int. J. Mach. Tool Manufact.* -- Grã Bretanha: Pergamon Journal, v.27, n.3, 1987, p.383-397.

- TiBRASIL TITÂNIO LTDA. *Fabrication*. -- São Paulo: Titânium Industries, 07 dez. 1995, 4 p. (Fax 2077)
- TiBRASIL TITÂNIO LTDA. -- São Paulo: Titânium Industries, 1995. (Folheto)
- TSAI, W. D., WU, S. M. A mathematical model for drill point design and grinding. -- *Trans. of the ASME*, v.101, aug. 1979, p.333-340.
- WORLD METAL STATISTICS YEARBOOK 1986, -- Massachusetts: World Bureau of Metal Statistics, 1986, p.58-59.
- WU, S. M., SHEN, J. M. Mathematical model for multifacet drills. -- *Trans. of the ASME*, v.105, aug. 1983, p.173-186.
- ZEISER, W. Drill-point geometries: choices to match the job. -- *Tooling and Production*, apr. 1986, p.64-66.
- ZLATIN, N., CHRISTOPHER, J. Machining characteristics of difficult to machine materials. -- In: *Proc. Int. Symp. Spored Machinability Activity*. -- American Society for Metals, 1978, p.296-307.
- ZOREV, N. N., OVSEENKO, A. N. Influence of the cutting process on strength properties and deformation of parts made of titanium alloys. -- In: *Proc. Int. Symp. Spored Machinability Activity*. -- American Society for Metals, 1978, p. 257-271.

Anexo 1

Afição Cruzada NAS P3 (Norma NAS 907)



Anexo 2

Afição Cruzada NAS P9 (Norma NAS 907)

