



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Faculdade de Engenharia  
Campus de Bauru



**ESTUDO DA USINABILIDADE DO  
POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO  
MOLECULAR PELA ANÁLISE DA FORÇA DE CORTE**

**LUIZ OTÁVIO CORRÊA**

Orientador: Prof. Dr. *Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves*

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Bauru, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

**BAURU - SP  
SETEMBRO - 2002**

Ficha catalográfica elaborada por  
**DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO**  
**UNESP – Bauru**

Corrêa, Luiz Otávio  
ESTUDO DA USINABILIDADE DO POLIETILENO DE ULTRA  
ALTO PESO MOLECULAR PELA ANÁLISE DA FORÇA DE  
CORTE/ Luiz Otávio Corrêa – Bauru: [s.n.] 2002.  
f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia.

Orientador: Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves

1. UHMWPE. 2. Usinabilidade. 3. Força de Corte. 4.  
Parâmetros de usinagem. I – Título. II – Univesidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia.

Maristela,12/08/02

Dedico este trabalho à Família, que suportou com muita paciência o período que estive ausente.

## **AGRADECIMENTOS**

Expressamos os nossos mais sinceros agradecimentos:

Ao Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, pela orientação, pelo incentivo, pelo apoio constante, pela amizade sincera, pelas valiosas sugestões e pela confiança depositada no sucesso deste projeto.

À empresa, Titana Tecnologia Comércio e Indústria de Polímeros Ltda, na pessoa do Sr. Sergio L. Pradez de Faria Jr, pelo apoio material e técnico à esta pesquisa.

Ao companheiro de trabalho e amigo Jefferson Luiz Cesar Salles, pelo apoio e pela colaboração na realização dos ensaios e ao CEFET, de Cornélio Procópio.

Ao Auxiliar Acadêmico MSc. Ulisses Frazão Tibúrcio Gonçalves pela valiosa ajuda à esta pesquisa.

Aos Professores Doutores Ivaldo De Domenico Valarelli, Luiz Eduardo de A. Sanchez, Célio Losnak, pela viabilização da usinagem dos corpos-de-prova, utilizando-se o Laboratório de Oficina Mecânica, o Laboratório de CAD/CAM e o Laboratório de Usinagem de Madeiras.

Ao Coordenador do Curso de Pós-graduação, Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, por seu apoio à defesa desta dissertação.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP de Bauru, aos Laboratórios de Apoio (CNC, Madeira, Oficina) e, de forma especial, à todos os Professores e Funcionários do Departamento, que colaboram de alguma forma na realização desta pesquisa.

A Deus pela saúde na realização desta pesquisa.

## SUMÁRIO

|                                                          |      |
|----------------------------------------------------------|------|
| <i>LISTA DE FIGURAS</i>                                  | III  |
| <i>LISTA DE TABELAS</i>                                  | VI   |
| RESUMO                                                   | VII  |
| ABSTRACT                                                 | VIII |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                      | 01   |
| 1.1. Histórico Sobre o Material .....                    | 01   |
| 1.2. Justificativa e Relevância do Trabalho .....        | 05   |
| 1.3. Objetivo .....                                      | 07   |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                           | 08   |
| 2.1. Usinabilidade .....                                 | 09   |
| 2.2. Condição da Superfície Gerada .....                 | 12   |
| 2.3. Comportamento dos Polímeros .....                   | 14   |
| 2.3.1. Propriedades térmicas .....                       | 15   |
| 2.3.2. Propriedades mecânicas .....                      | 17   |
| 2.3.3. Mecanismo de formação do cavaco .....             | 20   |
| 2.4. Trabalhos Realizados em Usinagem de Polímero .....  | 26   |
| 2.5. Aspectos Conclusivos da Revisão Bibliográfica ..... | 48   |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS .....                             | 49   |
| 3.1. Material .....                                      | 49   |
| 3.2. Ferramentas de Corte .....                          | 50   |
| 3.3. Equipamentos de Ensaio .....                        | 54   |
| 3.3.1. Máquina de ensaio .....                           | 54   |
| 3.3.2. Instrumento de medição .....                      | 54   |
| 3.3.3. Aquisição de dados .....                          | 55   |
| 3.4. Procedimentos de Ensaio .....                       | 57   |
| 3.4.1. Preparação das amostras .....                     | 57   |
| 3.4.2. Montagem do banco de ensaio .....                 | 58   |
| 3.4.3. Verificação de danos na ferramenta .....          | 61   |
| 3.4.4. Ensaio preliminares .....                         | 63   |
| 3.4.5. Metodologia adotada .....                         | 73   |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                          | 76   |

|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| 4.1. Influência do Avanço .....                | 77  |
| 4.2. Influência da Velocidade de Corte .....   | 88  |
| 4.3. Influência da Profundidade de Corte ..... | 99  |
| 4.4. Desgaste das Ferramentas de Corte .....   | 101 |
| 5. CONCLUSÕES .....                            | 103 |
| 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....      | 106 |
| 7. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....               | 107 |
| ANEXO 1 .....                                  | 110 |
| ANEXO 2 .....                                  | 111 |
| ANEXO 3 .....                                  | 122 |
| ANEXO 4 .....                                  | 148 |
| ANEXO 5.....                                   | 155 |

## LISTA DE FIGURAS

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1.1-  | Processo de polimerização, utilizando o catalisador Ziegler-Natta, do UHMWPE (MACROGALLERIA, 1977) .....                                                                                                                                                                                                                                | 3  |
| FIGURA 1.2-  | Produção em escala industrial do UHMWPE .....                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 5  |
| FIGURA 2.1-  | Descrição geral do processo de usinagem (TRIBOULOT, 1991) .....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 10 |
| FIGURA 2.2-  | Níveis de qualidade superficial (MALDONADO, 1998) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 13 |
| FIGURA 2.3-  | Comportamento dos materiais poliméricos com variação da temperatura (CARR e FEGER, 1993) .....                                                                                                                                                                                                                                          | 19 |
| FIGURA 2.4-  | Tipos de cavacos observados (KOBAYASHI, 1967) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 23 |
| FIGURA 2.5-  | Efeito da velocidade de corte sobre o tipo de cavaco formado na usinagem de placa fenólica (KOBAYASHI, 1967) .....                                                                                                                                                                                                                      | 24 |
| FIGURA 2.6-  | Mecanismo de formação de cavacos em materiais poliméricos (CARR e FEGER, 1963) .....                                                                                                                                                                                                                                                    | 25 |
| FIGURA 2.7-  | Efeito da velocidade de corte sobre a força de corte para várias profundidades de corte, com ângulos de saída de 0° e largura de corte de 5 mm (KOBAYASHI, 1967) .....                                                                                                                                                                  | 29 |
| FIGURA 2.8-  | Relação entre força de corte e a temperatura com ângulo de saída de 0° e profundidade de 0,1 mm (KOBAYASHI, 1967) .....                                                                                                                                                                                                                 | 30 |
| FIGURA 2.9-  | A variação do ângulo de cisalhamento com a temperatura de trabalho, para vários ângulos de saída e velocidade de corte de 0,8 mm (KOBAYASHI, 1967) .....                                                                                                                                                                                | 30 |
| FIGURA 2.10- | Relação entre a força de corte e ângulo de saída da ferramenta para diferentes profundidades de corte, usinando-se policarbonato, com velocidade de corte de 400 m/min (KOBAYASHI, 1967) .....                                                                                                                                          | 31 |
| FIGURA 2.11- | Relação entre a força de corte e o ângulo de saída da ferramenta para diferentes profundidades de corte, usinando-se polietileno, com velocidade de corte de 400 m/min (KOBAYASHI, 1967) .....                                                                                                                                          | 32 |
| FIGURA 2.12- | Comparação da superfície de corte usinada para vários tipos de plásticos (KOBAYASHI e HIRAKAWA, 1984) .....                                                                                                                                                                                                                             | 34 |
| FIGURA 2.13- | Sistema de medição da força de corte e de aquisição de dados. Onde: 1. ferramenta de corte; 2. cabeçote rotativo; 3. polimetacrilato de metila; 4. dispositivo micro-mecânico para ajuste de avanço de 0,01 mm; 5. fotoelétrico multiplicador; 6. dinamômetro piezoelétrico; 7. sistema de aquisição de dados. (GRABCHENKO, 1998) ..... | 37 |
| FIGURA 2.14- | Característica da intensidade mecânica luminescente (N) e a força de corte (Pz), no processo de corte com Vc = 1 m/s e profundidade de 0,2 mm (GRABCHENKO, 1998) .....                                                                                                                                                                  | 38 |
| FIGURA 2.15- | Efeito da velocidade de corte na taxa de desgaste do UHMWPE usinado (SONG, 1999) .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 43 |

|              |                                                                                                                                 |    |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2.16- | Variação do desgaste da superfície no UHMWPE em função das condições de usinagem (SONG, 1999) .....                             | 44 |
| FIGURA 2.17- | Efeito da profundidade de corte na taxa de desgaste e na taxa de desgaste e na rugosidade superficial do UHMWPE (SONG, 1999) .. | 45 |
| FIGURA 2.18- | Representação das ferramentas de corte no metal duro utilizados no ensaio (SALLES, 2000) .....                                  | 46 |
| FIGURA 3.1-  | Porta ferramenta de fixação utilizado na máquina afiadora universal de ferramenta .....                                         | 51 |
| FIGURA 3.2-  | Máquina de ensaio metalográfico usada para cortar as barras da ferramenta de aço rápido, no comprimento de 32 mm .....          | 51 |
| FIGURA 3.3-  | Máquina afiadora universal de ferramentas com sistema de fluido refrigerante .....                                              | 52 |
| FIGURA 3.4-  | Desenho esquemático genérico das ferramentas utilizadas sem escala e as ferramentas confeccionada .....                         | 53 |
| FIGURA 3.5-  | Máquina de ensaio .....                                                                                                         | 54 |
| FIGURA 3.6-  | Dispositivo empregado para medir a força de corte (GONÇALVES, 1993) .....                                                       | 55 |
| FIGURA 3.7-  | Gráfico da força principal de corte em função do tempo de usinagem .....                                                        | 57 |
| FIGURA 3.8-  | Ilustração do sistema de aquisição de dados .....                                                                               | 58 |
| FIGURA 3.9-  | Montagem da célula de carga na máquina e esquema de fixação da ferramenta de corte na célula de carga .....                     | 59 |
| FIGURA 3.10- | Detalhe da fixação do tarugo na máquina de ensaio .....                                                                         | 60 |
| FIGURA 3.11- | Sistema de desengate automático .....                                                                                           | 61 |
| FIGURA 3.12- | Montagem do sistema de verificação de danos na ferramenta de corte .....                                                        | 62 |
| FIGURA 3.13- | Detalhe do dispositivo d fixação da ferramenta de corte .....                                                                   | 63 |
| FIGURA 3.14- | Procedimento adotado para o início dos ensaios preliminares .....                                                               | 65 |
| FIGURA 3.15- | Exemplificação da amostra de cavacos .....                                                                                      | 75 |
| FIGURA 4.1-  | Condição da superfície gerada visualizada (a) “SL”; (b) “SR”; (c) “CP”; (d) “CT” .....                                          | 77 |
| FIGURA 4.2-  | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para $\chi_r = 60^\circ$ e diferentes avanços ....                                         | 81 |
| FIGURA 4.3-  | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para $\chi_r = 75^\circ$ e diferentes avanços ....                                         | 82 |
| FIGURA 4.4-  | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para $\chi_r = 90^\circ$ e diferentes avanços ....                                         | 83 |
| FIGURA 4.5-  | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para 0,048 mm/rot .....                                                                    | 84 |
| FIGURA 4.6-  | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para 0,103 mm/rot .....                                                                    | 84 |
| FIGURA 4.7-  | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para 0,158 mm/rot .....                                                                    | 85 |
| FIGURA 4.8-  | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para 0,218 mm/rot .....                                                                    | 85 |

|              |                                                                                                       |     |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4.9-  | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para 0,257 mm/rot .....                                          | 86  |
| FIGURA 4.10- | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para $\chi_r = 60^\circ$ e diferentes velocidades de corte ..... | 92  |
| FIGURA 4.11- | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para $\chi_r = 75^\circ$ e diferentes velocidades de corte ..... | 93  |
| FIGURA 4.12- | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para $\chi_r = 90^\circ$ e diferentes velocidades de corte ..... | 94  |
| FIGURA 4.13- | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para 7,3 m/min .....                                             | 95  |
| FIGURA 4.14- | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para 14,7 m/min .....                                            | 95  |
| FIGURA 4.15- | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para 29,4 m/min .....                                            | 96  |
| FIGURA 4.16- | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para 58,0 m/min .....                                            | 96  |
| FIGURA 4.17- | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para 116,0 m/min .....                                           | 97  |
| FIGURA 4.18- | Variação de Pce em função $\gamma_0$ para 228,7 m/min .....                                           | 97  |
| FIGURA 4.19- | Variação de Pce em função $\chi_r$ para $\gamma_0 = 30^\circ$ .....                                   | 101 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELA 2.1 - Fatores que afetam a ação do corte nos plásticos<br>(KOBAYASHI, 1967) .....                                                     | 15  |
| TABELA 2.2 - Classificação dos tipos de cavacos na usinagem de plásticos<br>(KOBAYASHI, 1967) .....                                          | 24  |
| TABELA 2.3 - Grandezas recomendadas na usinagem de plásticos<br>(WEARMOURTH, 1946) .....                                                     | 27  |
| TABELA 2.4 - Ângulo de saída crítico para PE, na condição da velocidade<br>de corte e da profundidade de corte (KOBAYASHI, 1967) .....       | 28  |
| TABELA 2.5 - Variação da velocidade de corte em função da rotação<br>(SONG, 1999) .....                                                      | 42  |
| TABELA 2.6 - Parâmetros utilizados nos quadros de ensaio<br>(SALLES, 2000) .....                                                             | 47  |
| TABELA 3.1 - Tarugos utilizados com suas especificações .....                                                                                | 49  |
| TABELA 3.2 - Geometrias adotadas e rugosidades das ferramentas<br>de corte .....                                                             | 53  |
| TABELA 3.3 - Parâmetros relacionados com o ensaio “A” .....                                                                                  | 67  |
| TABELA 3.4 - Parâmetros relacionados com o ensaio “B” .....                                                                                  | 68  |
| TABELA 3.5 - Parâmetros relacionados com o ensaio “C” .....                                                                                  | 69  |
| TABELA 3.6 - Parâmetros relacionados com o ensaio “D” .....                                                                                  | 70  |
| TABELA 3.7 - Parâmetro relacionados com o ensaio “E” para três grupos de<br>ensaio .....                                                     | 70  |
| TABELA 3.8 - Análise de regressão para o ensaio “E” com nível de<br>confiança de 98% .....                                                   | 71  |
| TABELA 4.1- Resultados da medição de Pce para $\chi_r = 60^\circ$ .....                                                                      | 78  |
| TABELA 4.2 - Resultados da medição de Pce para $\chi_r = 75^\circ$ .....                                                                     | 79  |
| TABELA 4.3 - Resultados da medição de Pce para $\chi_r = 90^\circ$ .....                                                                     | 80  |
| TABELA 4.4 - Resultados da medição de Pce para $\chi_r = 60^\circ$ .....                                                                     | 89  |
| TABELA 4.5 - Resultados da medição de Pce para $\chi_r = 75^\circ$ .....                                                                     | 90  |
| TABELA 4.6 - Resultados da medição de Pce para $\chi_r = 90^\circ$ .....                                                                     | 91  |
| TABELA 4.7 - Resultados da medição de Pce para $\gamma_o = 30^\circ$ , com $\chi_r = 60^\circ$ ,<br>75° e 90° .....                          | 100 |
| TABELA 4.8 - Tempo de usinagem que as ferramentas foram submetidas<br>pelas condições de avanço, velocidade de corte<br>e profundidade ..... | 102 |

## RESUMO

O presente trabalho teve o objetivo realizar um estudo do desempenho do corte do material Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE), em operação de torneamento, através da medição da força principal de corte, analisando-se a influência dos seguintes parâmetros: avanço, velocidade de corte, profundidade de corte e geometria da ferramenta. A medição da força de corte foi feita por um dinamômetro conectado ao sistema de aquisição de dados, durante a usinagem realizada em um torno mecânico horizontal. A partir dos resultados obtidos, foi possível indicar as condições de corte mais adequadas em relação aos valores da força de corte medidas, para as condições de qualidade superficial aceitáveis em operações de desbaste.

## **ABSTRACT**

The objective of this work is to carry out a study about the action cut of the Polyethylene of Ultra High Molecular Weight (UHMWPE) material, analyzing the influence of there parameters: feed, cutting speed, depth of cut and the geometry of the tool. The measurement of the cutting force was made a connected dinamometric to the acquisition data system, during the machining in a horizontal mechanical lathe. By the obtained results was possible to indicate the more appropriate cutting conditions related to the values of the measured cutting force, to the conditions of superficial quality accepted in roughness operation.

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Histórico Sobre o Material**

No início do século XX, surgiu um fato que marcou profundamente a história. Ficou provado que alguns materiais, produzidos em laboratório, que até então eram considerados alcalóides, consistiam na verdade de moléculas gigantescas, que podiam resultar do encadeamento de 10.000 ou mais átomos de carbono. Esse produto de síntese apresentava repetição de pequenas unidades estruturais em sua longa cadeia principal. Deu-se a este produto o nome de polímero (do grego, "muitas partes").

Esses materiais substituíram, no início, a madeira. Na década de 60, com a utilização em embalagens, vieram a substituir o vidro e o papelão. Mas na década de 70 ocorreram as substituições mais importantes, principalmente no campo até então dominado pelos metais, particularmente pelas ligas leves. Na década de 80, essas substituições foram crescentes, do ponto de vista técnico e comercial, com algumas aplicações imediatas, mas em outros casos era necessário saber que tipo de polímero deveria utilizar e, quais as características técnicas mais importantes, tanto do polímero como do material a ser substituído (ALBUQUERQUE,1990).

De acordo com sua densidade os polietilenos podem ser classificados em três categorias: baixa, média e alta densidade. Um quarto tipo de polietileno é o de elevado peso molecular (MANO, 1996).

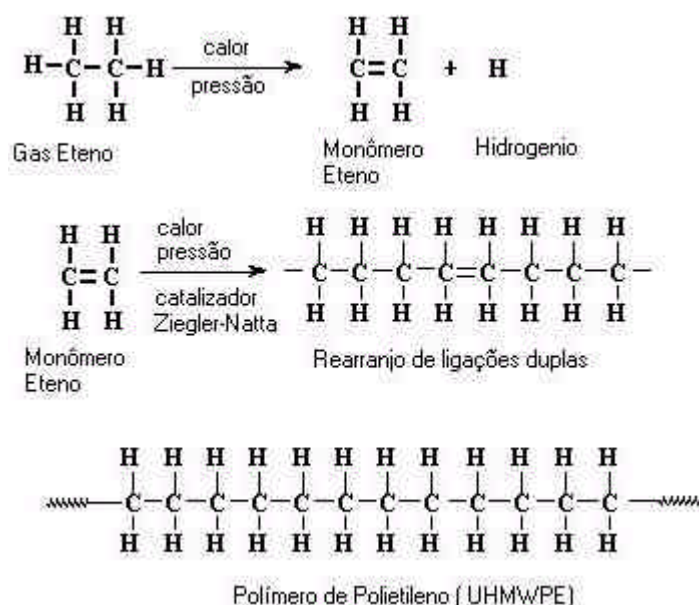
Este polietileno é comercialmente denominado por UHMWPE, cujas as letras estão relacionadas as iniciais do material “Ultra High Molecular Weight Polyethylene”.

As propriedades do UHMWPE são completamente diferentes dos polietilenos convencionais (ALBUQUERQUE,1990).

Originalmente esse tipo de polietileno era definido como sendo aquele cujo peso molecular médio, conforme medido pelo método de viscosidade de solução, fosse maior do que  $2 \times 10^6$  g/mol. Há anos os produtores e processadores dos UHMWPE tentam chegar a um acordo a respeito de quão elevado significa “ultra-elevado”. Os valores propostos no passado variavam desde  $10^6$  até  $35 \times 10^5$  g/mol. Também nesta discussão, estava em questão a relação entre o peso molecular e as propriedades das peças acabadas. Em 1981, foi aprovado o padrão de  $31 \times 10^5$  g/mol, ou mais elevado, para o peso molecular ultra-elevado (UHMWPE) e, no final, a totalidade da sociedade votou a aprovação da recomendação de 1981, definida atualmente pela norma ASTM D4020 (ALBUQUERQUE,1990).

O UHMWPE é obtido por um processo em suspensão com catalisador tipo ZIEGLER, ilustrado na Figura 1.1, que permite a obtenção de polímeros com peso molecular na faixa de 2 a 8 milhões g/mol, aproximadamente dez vezes maior do que os pesos moleculares de resinas consideradas de alto peso molecular. Tal fato proporciona uma viscosidade tão alta no estado fundido que seu índice de fluidez a

190° C/21,6 Kg se aproxima de zero. Assim não é possível processá-lo por métodos convencionais de injeção, sopro ou extrusão. O método empregado é o de compressão ou variações dele, como a prensagem e a extrusão por pistão. Através desse processo se obtém os produtos semi-acabados em forma de chapas ou tarugos, que geralmente são usinadas para atingirem suas dimensões finais (POLIALDEN. Boletim Técnico 3.01, 1998).



**Figura 1.1-** Processo de polimerização, utilizando o catalizador Ziegler-Natta, do UHMWPE (MACROGALLERIA, 1997).

RASTOGI (1998) confirma também que o UHMWPE possui propriedades e desempenho completamente diferentes dos encontrados nos outros tipos de polietileno. Sua excepcional resistência à abrasão e baixo coeficiente de atrito conferem-lhe grande potencialidade na substituição de outros materiais, inclusive de materiais metálicos.

Devido sua elevada massa molecular, o UHMWPE possui propriedades mecânicas superiores aos demais polietilenos. Por estas razões, são usados em próteses de joelho-junta e quadril (RASTOGI, 1998). Sendo considerado uma das únicas opções para a fabricação de superfícies de atrito para próteses articulares internas, pois o material é totalmente inerte, biocompatível e não provoca reações adversas no organismo (GUERREIRO, 2001).

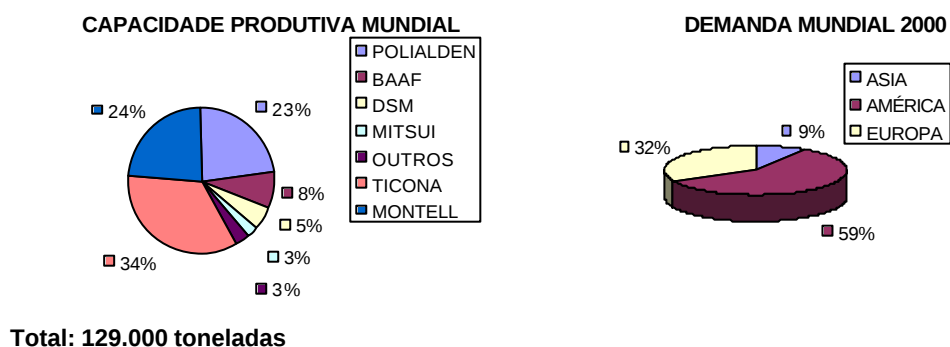
Uma característica interessante do UHMWPE é sua capacidade de trabalho em baixas temperaturas. Onde praticamente nenhum polímero de engenharia pode ser usado, o material mantém suas propriedades úteis, como resistência ao impacto, coeficiente de abrasão e a inércia química. A temperatura de transição vítrea (faixa de temperatura onde ocorre a fratura do material sem o alongamento) é menor que  $-269^{\circ}\text{C}$  (POLIALDEN. Boletim Técnico 4.06, 1998)

É extremamente resistente a uma ampla gama de produtos químicos. É totalmente inerte, o que faz com que seja indicado para uso em praticamente todos os tipos de ambientes agressivos ou corrosivos. Em temperaturas elevadas só é atacado por solventes aromáticos ou halogêneos e por oxidantes fortes como o ácido nítrico. (POLIALDEN. Boletim Técnico 4.04, 1998)

Atualmente as aplicações do material UHMWPE abrangem correias transportadoras, trilhos-guias, revestimento para caixas de sucção de máquinas de papel, forros de pára-quedas, mancais, peças para teares,

canalizações para materiais residuais e outros componentes que exijam um máximo de resistência à abrasão e a impactos, além de baixo coeficiente de atrito. O Anexo 1 apresenta as características e propriedades do UHMWPE.

A produção em escala industrial do UHMWPE (Figura 1.2), iniciou-se na década de noventa e o volume de produção mundial atingiu índices expressivos nesses últimos anos. O Brasil ocupa a posição de destaque na produção mundial, apesar do consumo interno ser pequeno comparado com alguns países.



**Figura 1.2-** Produção em escala industrial do UHMWPE (Fonte: POLIALDEN Petroquímica S/A).

## 1.2. Justificativas e Relevâncias do Trabalho

A usinagem de materiais poliméricos tem assumido importante posição no campo da engenharia de precisão com o surgimento de novos materiais poliméricos, principalmente os denominados “Plásticos de Engenharia”. Frequentemente, injeção, extrusão, ou moldagem por compressão de componentes de plástico não têm a precisão requerida

para algumas aplicações (CARR e FEGGER, 1993). Os componentes feitos de plásticos, normalmente, são produzidos por injeção ou por processos semelhantes em que podem ser feitos na forma final em um único processo. Porém, isto nem sempre é possível ou economicamente viável, e pode então ser apropriado fabricar os produtos por meio de processos de usinagem (ERIKSEN, 1997).

O comportamento dos plásticos durante a usinagem dependem especialmente de suas propriedades mecânicas, térmicas e reológicas. Por conseguinte, qualquer avaliação de características de usinagem deve levar em conta as propriedades particulares do material a ser usado. Cada categoria de plástico, como também muitas subcategorias específicas, demandam de diferentes geometrias de ferramenta para um ótimo desempenho e produtividade (ALAUDDIN, 1995).

O índice de fluidez do UHMWPE, quando fundido, aproxima-se de zero e limita o seu processamento pelos métodos habituais, como moldagem por injeção e extrusão (WANG e LI, 1999). Conseqüentemente, o emprego dos processos de usinagem para a obtenção de componentes de UHMWPE é muito frequente. Por isso, há um considerável interesse no estudo da usinabilidade, afim de se verificar o desempenho de corte na usinagem do material UHMWPE, para proporcionar o uso racional desse material, bem como definir melhor os fenômenos envolvidos na usinagem.

### **1.3. Objetivos**

O presente trabalho teve por objetivo realizar um estudo do desempenho de corte do material UHMWPE, em operação de torneamento, através da medição da força principal de corte, analisando-se a influência dos seguintes parâmetros: avanço, velocidade de corte, profundidade de corte e geometria da ferramenta. A partir dos resultados obtidos foi possível indicar as condições de corte mais adequadas em relação aos valores da força de corte medidas, para condições de qualidade superficial aceitáveis em operações de desbaste.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Usinagem é um termo genérico designado para descrever o processo de remoção de material de uma peça e pode se subdividido em três categorias: processos de corte, processos abrasivos e processos de usinagem não convencionais. O torneamento é um processo de corte em que a ferramenta de corte remove material da peça em forma de cavaco com uma ferramenta monocortante (BORELLI et al, 1999).

O torneamento está classificado dentro dos processos de fabricação de usinagem convencional, onde as peças são fabricadas através da remoção de material, com o contato físico entre a ferramenta e a peça, para o arranque de cavacos, valendo-se do mecanismo de cisalhamento.

Esse processo de fabricação utiliza a tensão como principal grandeza física para produzir as formas acabadas, a partir do material bruto, com a tensão aplicada maior que o limite de ruptura para que ocorra o corte (FERRARESI, 1977).

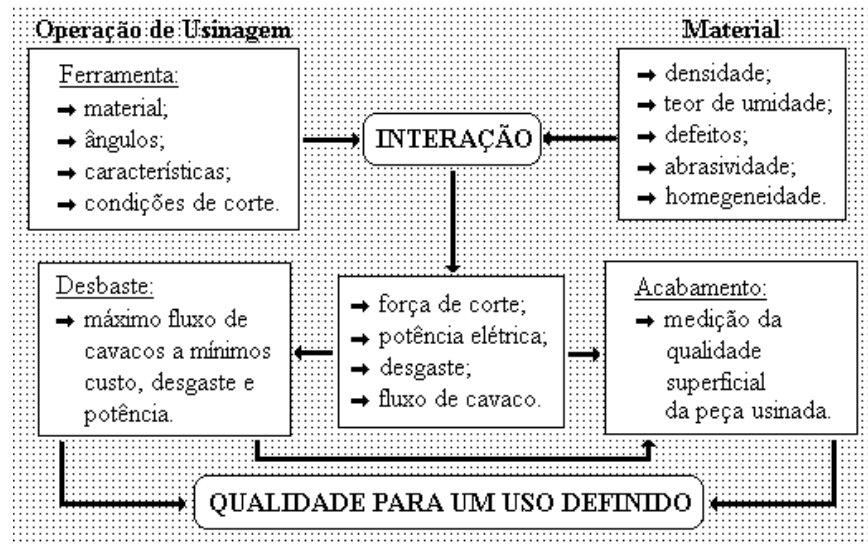
Considerando a usinagem como um processo de fabricação complexo, a presente revisão foi subdividida por tópicos relacionados com a usinagem convencional de materiais poliméricos.

## **2.1. Usinabilidade**

O termo usinabilidade pode ser usado para indicar a facilidade ou a dificuldade de se usinar um material afim de se obter tamanho, forma e acabamento superficial desejado.

Segundo JIN e SANDSTRÖM (1994) os efeitos da usinagem em um material não são dependentes somente das propriedades, mas também do tipo específico de operações de usinagem, das ferramentas de corte e dos parâmetros de corte. Por essa razão, a usinabilidade pode ser classificada como uma propriedade tecnológica que controla a capacidade de se usinar um material para atender as exigências comerciais na dimensão, forma e acabamento superficial. Do ponto de vista da engenharia, a usinabilidade pode ser interpretada como a medida da facilidade ou dificuldade com que cada material pode ser usinado.

MALDONADO (1998) afirma que a usinabilidade serve para descobrir as propriedades de mecanização de um determinado material, definindo-a ainda como a facilidade de se manipular um material em formas e dimensões definidas, com uma certa qualidade superficial, por operações de corte. A usinabilidade, ou facilidade de usinagem, é influenciada pelo tipo e forma da ferramenta de corte. Porém, usinagem é um termo livremente definido; é expressado como o tempo de vida de ferramenta, potência de corte, custo da operação de usinagem ou estado final da superfície. A Figura 2.1 apresenta a relação entre os fatores envolvidos em um processo de usinagem.



**Figura 2.1-** Descrição geral do processo de usinagem (TRIBOULOT, 1991)

STEMMER (1987) afirma que para a avaliação do grau de usinabilidade, os critérios fundamentais utilizados quer isoladamente ou em conjunto, são:

- Vida da ferramenta entre duas reafiações sucessivas;
- Grandezas de força que atuam sobre a ferramenta e da potência consumida;
- Qualidade do acabamento superficial obtido pela usinagem;
- Facilidade de formação do cavaco.

DEGARMO (1997) define a usinabilidade como um termo complexo, referido a uma superfície final aceitável do material usinado, relacionada as propriedades do material, a vida da ferramenta e a velocidade de corte.

DINIZ (1999) define usinabilidade de um metal como uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de valor numérico comparativo (índice ou porcentagem), um conjunto de propriedades de usinagem, em relação

a outro tomado como padrão. Entende-se como propriedades, aquelas que expressam o seu efeito sobre as grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem, o acabamento superficial da peça, a temperatura de corte, produtividade e as características do cavaco.

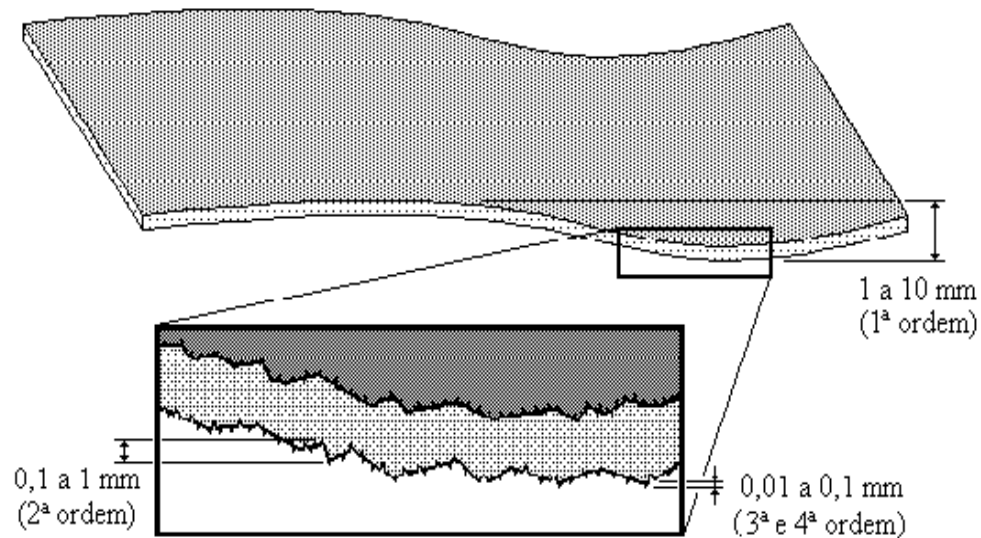
GONÇALVES (1993) relata a interação dos parâmetros como de suma importância para conferir a eficiência ao processo de usinagem, relacionado à madeira, de forma racional e otimizada. Para tanto, torna-se necessário conhecer e controlar os diversos parâmetros que afetam a eficiência de corte, tais como: grandezas de corte, condições de usinagem, geometria da ferramenta de corte, características e propriedades do material, direcionamento das fibras em relação à direção de corte e a penetração da ferramenta.

A qualidade do acabamento, na usinagem do UHMWPE, depende da velocidade de corte, do avanço, da geometria e afiação da ferramenta. Sendo empregados os mesmos equipamentos e ferramentas de corte usados para madeira e metal. São facilmente torneados, fresados, plainados, serrados e furados com uso de técnicas convencionais. As ferramentas de aço rápido tem apresentado bons resultados, sendo, no entanto, que as de metal duro proporcionam um corte mais limpo e de menor frequência de afiação, mostrando-se mais econômica a longo prazo. Para baixas velocidades de corte, não é necessária refrigeração, podendo ser usado em altas velocidades: o ar, água ou emulsão diluída em refrigerantes (POLIALDEN, 1998)

## **2.2. Condição da Superfície Gerada**

Todo material possui uma superfície, sempre caracterizada por uma determinada textura e rugosidade superficial, que são dependentes do processo de fabricação envolvido, da natureza do próprio material, ou uma combinação dos dois (LEMASTER e BEALL, 1996). De acordo com a aplicação do produto final, a qualidade superficial torna-se uma característica de controle extremamente importante. FERRARESI (1977) define que as irregularidades são originadas pelo próprio processo de formação de cavaco, vibrações da ferramenta, aresta postiça de corte, marcas de avanço da ferramenta nas operações de acabamento, atrito da superfície de incidência com a peça.

A qualidade superficial é utilizada como uma ferramenta para o estudo da usinabilidade dos materiais. Nos ensaios, os parâmetros de usinagem podem ser variados, e as melhores qualidades superficiais obtidas determinam quais são as características ideais para esse processamento. Dependendo do tipo de superfície e do material avaliado, a definição da qualidade superficial pode ter um significado diferente, conforme o comprimento de amostragem. MALDONADO (1998) define geometricamente 6 níveis de defeitos de forma e de estado de uma superfície usinada, esquematizados na Figura 2.2:



**Figura 2.2-** Níveis de qualidade superficial, MALDONADO (1998).

Segundo BOOTHROYD e KNIGHT (1989) a qualidade superficial é utilizada como uma ferramenta para o estudo da usinabilidade dos materiais. Nos ensaios, os parâmetros de usinagem podem ser variados, e as melhores qualidades superficiais obtidas determinam quais são as características ideais para esse processamento. A rugosidade da superfície final, obtida durante uma operação de usinagem, pode ser considerada como a soma de dois efeitos independentes:

- A rugosidade de superfície teórica que é o resultado da geometria da ferramenta e do avanço.
- A rugosidade de superfície real que é o resultado das irregularidades da operação de corte.

### **2.3. Comportamento dos Polímeros**

ALBUQUERQUE (1990) relata que a usinagem de plásticos industriais é uma operação econômica e até mais simples do que os metais. As diferenças, porém, existem e é necessário conhecê-las para um melhor resultado.

KOBAYASHI (1967) afirma que a operação de usinagem de plásticos deve ser usada como complemento das operações de moldagem. Assim, devido à vários tipos e classes de plásticos, suas propriedades são poucos conhecidas durante a usinagem, exemplificando que as superfícies usinadas tornam-se ásperas e com fissuras, devido às marcas da ferramenta de corte. E que o calor gerado pelo atrito causa a degradação nos termorrígidos e aderência nos termoplásticos na superfície final usinada. Com a utilização da ferramenta de corte na usinagem pode ser afetado o seu uso pelo desgaste e lascamento. Todos esses problemas ocorridos são devidos à falta de conhecimento das características reológicas e térmicas dos plásticos, tais como: calor específico, condutibilidade térmica e coeficiente de expansão térmica. Então é necessário, como primeiro passo, o entendimento do comportamento dos plásticos na usinagem, utilizando como análise uma ferramenta monocortante. A Tabela 2.1, relata os fatores que afetam as condições de corte, usando como referência uma ferramenta monocortante.

**Tabela 2.1-** Fatores que afetam a ação do corte nos plásticos (KOBAYASHI, 1967).

| FATORES                         | EFEITO SOBRE                                          |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Parâmetros da Ferramenta</b> |                                                       |
| Ângulo de saída                 | Formação de cavaco                                    |
| Ângulo de folga                 | Desgaste da ferramenta                                |
| Raio de Ponta                   | Rugosidade da superfície usinada                      |
| <b>Condições de Usinagem</b>    |                                                       |
| Profundidade de Corte           | Formação de cavaco e Rugosidade da superfície usinada |
| Velocidade de Corte             |                                                       |
| Velocidade de Avanço            |                                                       |
| Temperatura de Trabalho         | Calor gerado, degradação e derretimento               |
| Sistema de Refrigeração         |                                                       |

Conforme KOBAYASHI apud ALAUDDIN et al (1995) o comportamento dos plásticos durante a usinagem depende especialmente das propriedades mecânicas, térmicas e reológicas. Por conseguinte, qualquer avaliação de características de usinagem deve levar em conta as propriedades particulares do material a ser usado. Cada categoria de plástico, como também muitas subcategorias específicas, demandam diferentes geometrias de ferramenta para um ótimo desempenho e produtividade .

### 2.3.1 Propriedades térmicas

Durante a usinagem, o calor é gerado pelo trabalho de deformação e de atrito entre o cavaco e a ferramenta e entre a ferramenta e a peça. Na usinagem de metais a maior parte do calor é removida da área de corte pelos cavacos. Na usinagem de plásticos, graças à baixa condutividade térmica, a maior parte do calor tem que ser removida pela ferramenta. Isto resulta em um aumento de temperatura que pode influenciar no processo

de usinagem de dois modos: o aumento do desgaste da ferramenta e uma mudança na qualidade da superfície cortada (KOBAYASHI, 1967).

Segundo ERIKSEN (1997) dependendo da temperatura e das propriedades do polímero usinado o aumento da temperatura pode ser prejudicial. Em alguns casos, pode queimar, derreter ou descolorir a superfície usinada de um modo inaceitável. Mas em alguns casos, um pequeno derretimento na área de corte pode resultar em uma baixa rugosidade de superfície. Para os termoplásticos, um aumento na temperatura pode resultar em um comportamento mais flexível, que torna o material mais difícil de usar. Isto pode resultar em uma rugosidade de superfície maior se houver instabilidade do processo.

Os fluidos de corte que são usados para resfriar a área de corte durante a usinagem dos metais, podem degradar os plásticos. Sendo assim, sua utilização deve ser evitada. Se o resfriamento for necessário, as alternativas mais adequadas devem ser o ar ou a água.

Conforme KOBAYASHI (1967), o calor específico por unidade de peso dos plásticos é superior a 0,2 cal/g °C, sendo mais elevado do que os metais, mas o calor específico por unidade de volume para os plásticos é bem inferior a dos metais, devido à baixa densidade. Além disso a condutividade térmica do plástico é menor, se comparado com os aços. Assim, quase todo o calor produzido pelo atrito entre a ferramenta e o plástico deverá ser conduzido pela ferramenta. A taxa de transferência térmica para a ferramenta de corte é de 99,2% a 99,8% do calor gerado, e

o restante será conduzido pelo plástico, exibindo esse aumento de temperatura na superfície, não alcançando o interior do material. O tipo de cavaco formado pela usinagem pode variar com o aumento da temperatura, com a variação da tensão-deformação. A fratura torna-se dúctil com a elevação da temperatura e frágil com a diminuição e, essas temperaturas de amolecimento e degradação são relativamente baixas.

### **2.3.2 Propriedades mecânicas**

Conforme KOBAYASHI apud ERIKSEN (1999) as diferenças entre a usinagem de metais e a usinagem de plásticos estão relacionadas com as propriedades deste material, em particular a anisotropia e a viscoelasticidade. Nos metais, a deformação e fratura ocorrem freqüentemente ao longo de planos cristalográficos específicos. Nos plásticos, a fratura pode acontecer entre áreas amorfas e cristalinas. A baixa dureza dos plásticos resultará em uma deformação elástica ou plástica na peça, devido à fixação e às forças de corte. As forças de fixação também podem causar deformação em virtude da fluência do plástico. Isto tem que ser levado em conta para evitar imprecisão das partes usinadas. A deformação causada pela pressão da ferramenta pode resultar em uma área de maior contato entre a ferramenta e a peça. Isto conduz a um aumento do atrito e, então, a escolha dos ângulos da ferramenta é mais crítica que na usinagem dos metais.

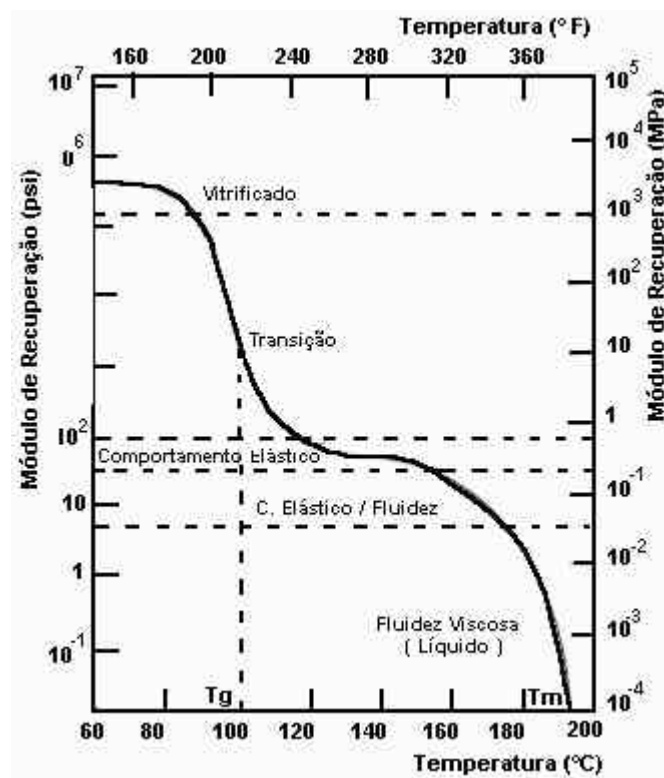
A natureza viscoelástica dos polímeros é reconhecida claramente, e são usados modelos de viscoelasticidade para explicar alguns fenômenos que ocorrem durante o processo de usinagem.

CARR e FEGGER (1993) descrevem a teoria da viscoelasticidade do polímero pela maneira que o material responde a um certo distúrbio. A descrição pode ser dada em função da variação do tempo ou da temperatura. A uma determinada temperatura todo polímero tem um tempo de resposta fixo que é relacionado à soma de seus movimentos vibracionais, rotacionais e translacionais. Estas características de tempo são definidas como um tempo de relaxação. Se o distúrbio acontece a uma taxa mais alta, a resposta será elástica e os polímeros se comportarão como um sólido. Se a velocidade do distúrbio for menor que o tempo de relaxação, a resposta será deformação plástica.

O material fluirá para acomodar a força aplicada de forma semelhante a um líquido. Em tempos intermediários o polímero exibe ambos os tipos de comportamento em graus variados. Esta resposta é chamada comportamento de viscoelasticidade. Desta descrição simples, segue aquela velocidade decrescente com que um distúrbio é aplicado, dando ao polímero mais tempo para relaxar. Neste caso, o polímero aparenta ser mais suave e mais dúctil quando usinados com baixas velocidades.

CALLISTER (1990) verifica com a variação da temperatura que os polímeros cristalinos e amorfos exibem três comportamentos distintos em

relação ao módulo de relaxação -  $E_r$ . Eles podem estar no estado vítreo, na fase elástica ou no regime de fluxo, conforme a Figura 2.3. A transição entre o estado vítreo e os outros estados é denominada temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ). O comportamento na redondeza da temperatura de transição vítrea também é distinto.



**Figura 2.3-** Comportamento dos materiais poliméricos com a variação da temperatura (CARR e FEGER, 1993).

Aumentando a temperatura e mantendo o tempo sobre o qual um distúrbio é aplicado, aumentarão os movimentos vibracionais, rotacionais e translacionais em um polímero. Deste modo, diminui o tempo de resposta do material a um distúrbio. Em outras palavras, o tempo de relaxação decresce com o aumento da temperatura. Novamente, isto

pode ser pensado como uma mudança de dureza, com o polímero que se torna mais brando e mais dúctil com o aumento da temperatura.

KOBAYASHI e HIRAKAWA (1984) relata que a deformação elástica e a plástica apresentam uma dependência do tempo. É observado o comportamento plástico em baixos avanços da ferramenta e o comportamento elástico com altos avanços.

### **2.3.3 Mecanismo de formação do cavaco**

KOBAYASHI (1967) relata que na usinagem de plásticos podem ser formados cavacos contínuos ou cavacos descontínuos. Os cavacos contínuos podem ser produzidos por uma grande deformação elástica ou por uma ação de cisalhamento ao longo de um plano de corte, ocorrendo quando se emprega pequenas velocidades de corte e em materiais com um grande alongamento. O plano de corte estará na direção em que o trabalho mínimo é exigido para formar um cavaco e os cavacos são contínuos porque os intervalos de cortes são pequenos.

O autor após um estudo de diversos materiais plásticos, classificou em cinco tipos de cavacos gerados na usinagem:

- Cavaco Contínuo – observado em baixas velocidades de corte e em materiais com alta elasticidade, possuindo grande alongamento, antes da fratura. A deformação que ocorre no cavaco é elástica e a espessura do cavaco é igual à profundidade de corte. Este tipo de cavaco é diferente do cavaco

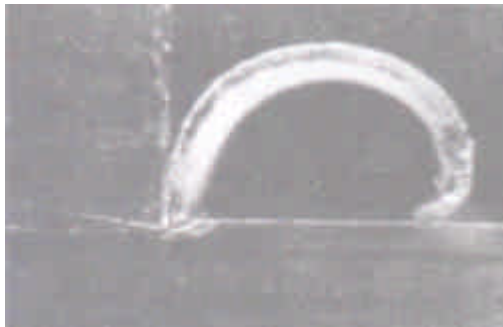
contínuo da usinagem de metais, pois é produzido por alta deformação elástica e não por fratura plástica. Quando este tipo de cavaco é produzido, a força de corte apresenta pequenas oscilações, apresentando bons resultados de rugosidade e dimensional.

- Cavaco Contínuo de Cisalhamento - O plano de cisalhamento é gerado acima da ponta da ferramenta de corte e a formação do cavaco ocorre pela ação do cisalhamento ao longo deste plano. O cavaco é contínuo devido ao pequeno intervalo de cisalhamento. As marcas ao longo da superfície dos cavacos e a espessura maior que a profundidade são suas características. É o mais observado na usinagem dos plásticos. O plano de cisalhamento será produzido na direção do mínimo trabalho para formar o cavaco, quando a tensão de cisalhamento for menor que a tensão de ruptura. Este tipo de cavaco é semelhante ao produzido na usinagem dos metais. Pode ser considerado, quando for produzido na usinagem, de boa qualidade na superfície usinada.
- Cavaco Descontínuo de Cisalhamento – é produzido pela ação do cisalhamento no plano de cisalhamento, com um intervalo grande de cisalhamento. Neste caso a tensão de cisalhamento é

maior que a tensão de ruptura. A superfície gerada tem uma rugosidade alta e uma variação dimensional inadequada.

- Cavaco Descontínuo de Ruptura – pode ser observado na usinagem de materiais frágeis como os termorrígidos e alguns termoplásticos, com grande profundidade de corte e com grande ângulo de saída da ferramenta de corte. As fissuras também podem ser observadas na superfície usinada e o cavaco é produzido por momento fletor, que atua sobre o cavaco, após a fissura aumentar até um certo comprimento, caracterizando o mecanismo de formação do cavaco por fratura frágil.
- Cavaco Descontínuo Complexo – caracteriza pela adesão do cavaco no processo de usinagem, devido à utilização de grandes ângulos negativos de saída. Neste caso, ocorre durante a usinagem, a combinação das tensões de compressão e de cisalhamento. O resultado é percebido por uma rugosidade alta e uma variação dimensional alta.

A Figura 2.4 apresenta estes tipos de cavacos observados por KOBAYASHI.



**A - Cavaco Contínuo**

Material: Poliestireno

Ângulo de saída =  $0^\circ$

Profundidade de corte = 0,10 mm

Velocidade de corte = 0,2 m/min



**B- Cavaco Contínuo de Cisalhamento**

Material: Poliestireno

Ângulo de saída =  $20^\circ$

Profundidade de corte = 0,50 mm

Velocidade de corte = 0,8 m/min



**C - Cavaco Descontínuo de Cisalhamento**

Material: Poliestireno

Ângulo de saída =  $40^\circ$

Profundidade de corte = 0,50 mm

Velocidade de corte = 0,2 m/min



**D - Cavaco Descontínuo Complexo**

Material: Poliestireno

Ângulo de saída =  $-30^\circ$

Profundidade de corte = 0,25 mm

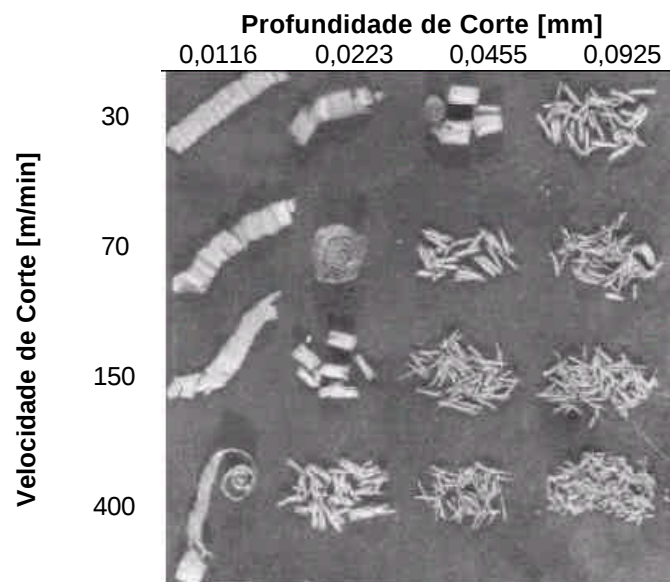
Velocidade de corte = 0,2 m/min

**Figura 2.4-** Os tipos de cavacos observados por KOBAYASHI (1967).

KOBAYASHI (1967) faz um resumo das principais causas que levam à formação dos tipos de cavaco, conforme é mostrado na Tabela 2.2. A Figura 2.5, mostra um caso de usinagem de uma chapa lâmina fenólica (baquelite - PR), com a produção do tipo de cavaco descontínuo de ruptura, quando a velocidade de corte torna-se alta.

**Tabela 2.2-** Classificação dos tipos de cavaco na usinagem de plásticos (KOBAYASHI, 1967).

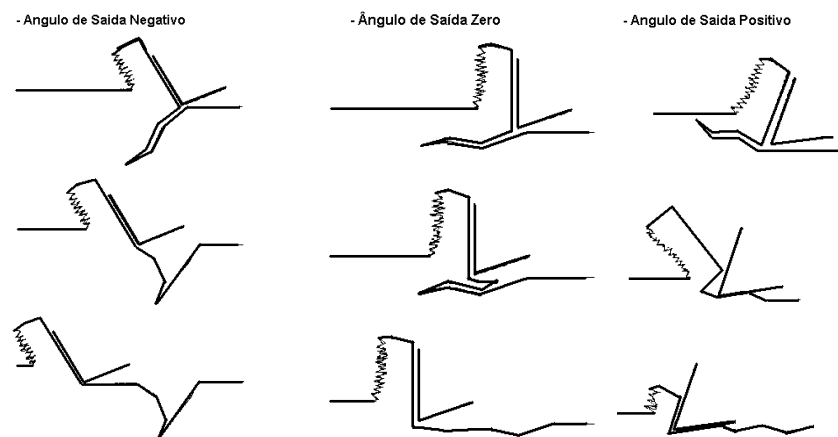
| Tipos de cavaco no Plástico | Causa                                                                   |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Fluxo Contínuo              | Alta deformação elástica                                                |
| Contínuo de Cisalhamento    | Tensão de cisalhamento por escorregamento contínuo                      |
| Descontínuo de Cisalhamento | Tensão de cisalhamento com fratura plástica                             |
| Descontínuo de Ruptura      | Fratura frágil, fratura elástica                                        |
| Descontínuo Complexo        | Fratura plástica por cisalhamento com tensão de compressão e/ ou tração |



**Figura 2.5-** Efeito da velocidade de corte sobre o tipo de cavaco formado na usinagem de placa fenólica (KOBAYASHI, 1967).

CARR e FEGER (1993) apresentaram um modelo para explicar o comportamento do material polimérico durante a usinagem em função do ângulo de saída de uma ferramenta monocortante, conforme a Figura 2.6. Em um material frágil, quando a tensão de compressão induzida pela aresta de corte excede a tensão de escoamento do polímero, uma fissura se propagará na direção do vetor força. É importante notar que este

modelo assume que as fissuras se originam e se propagam por intermédio do campo de compressão à frente da ferramenta. As fissuras que se formam no campo elástico, atrás da extremidade de corte, têm características de propagação diferentes, move-se ortogonalmente para o vetor força. Com ângulo de saída altamente negativo, a fissura estenderá em direção ao interior do material. A ferramenta move-se além da fissura e arrancará um pedaço grande de material em sua progressão. O cavaco produzido nesta situação é maciço e tende a ser descontínuo e a superfície final consiste, em grande parte, em erosões produzidas pelo arrancamento do material. Os cavacos produzidos por ângulos de saída próximos de zero são longos, com extremidades lisas e indicam uma remoção relativamente limpa de material. Um ângulo de saída positivo dirigirá o vetor de força para cima do plano de corte.



**Figura 2.6-** Mecanismos de formação de cavacos em materiais poliméricos (CARR e FEGGER, 1993).

SMITH (1989) explica que a transição vítrea ( $T_g$ ) de polímeros deve ser considerada. Este modelo sugere que a qualidade superficial depende

especialmente da temperatura da zona de corte, isto é, se o polímero está acima ou abaixo de seu Tg. Ele concluiu que uma superfície com alta rugosidade significa que a temperatura de transição vítrea não foi alcançada durante a usinagem e que ocorreu no material uma fratura frágil. Quando uma superfície com baixa rugosidade era produzida, era assumido que a temperatura de transição vítrea do polímero foi alcançada e que o material foi removido de maneira dúctil.

Os tipos de cavacos produzidos podem dar informações importantes sobre a usinagem. Para obter uma boa qualidade superficial, normalmente, é melhor selecionar os parâmetros de corte e a geometria da ferramenta, de tal modo que ocorra a formação de cavacos contínuos. Porém, deve ser levado em conta que eles também podem causar problemas ao se enrolarem ao redor da ferramenta ou da peça (SALLES, 2001).

## **2.4 Trabalhos Realizados de Usinagem de Polímeros**

### **WEARMOUTH, W. G. (1946)**

O autor compara a usinagem de materiais plásticos com a usinagem da madeira. Nesta época, a usinagem de plásticos em escala industrial não era uma prática comum, e ainda não existia os denominados plásticos de engenharia. Neste contexto, o autor fornece valores de referência para os parâmetros de usinagem de plásticos, baseado em seu conhecimento prático.

Foram estudados sete tipos de plásticos em forma de barras e um laminado, sendo eles: Nitrato de Celulose, Acetato de Celulose (CA), Polistireno (PS), Polimetil Metacrilato (PMMA), Polietileno (PE), Fenol Formaldeído (PR).

A Tabela 2.3 resume as grandezas de usinagem recomendadas para cada tipo de plástico.

**Tabela 2.3-** Grandezas recomendadas na usinagem de plástico (WEARMOUTH, 1946).

| Material                  | Ângulo de folga ( $\alpha$ ) | Ângulo de saída ( $\gamma$ ) | Velocidade de Corte ( m/min ) | Lubrificante  |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------|
| <b>Plásticos moldados</b> | 12                           | 0                            | 30,5                          | A seco        |
| <b>Plásticos fundidos</b> | 14                           | 0                            | 45 e 60                       | Óleo de corte |
| <b>Fibra</b>              | 15                           | 0                            | 24                            | A seco        |
| <b>Borracha</b>           | 20                           | 0                            | 45                            | Refrigerante  |

#### **KOBAYASHI , A. (1967)**

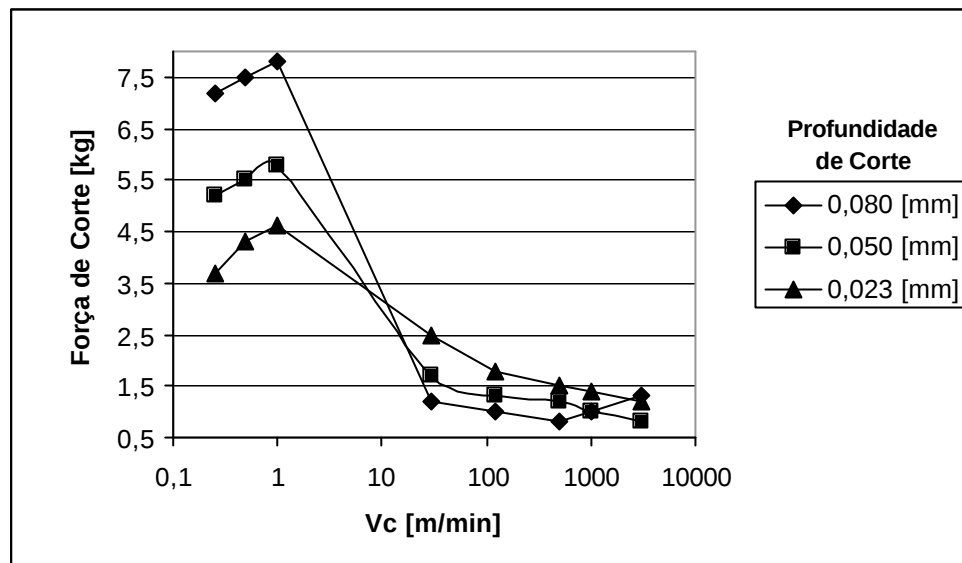
O autor descreve trabalhos de usinagem de materiais plásticos, que eram utilizados na época, e serviu como referência para todos os trabalhos posteriores. Em seus experimentos foram avaliados as condições de força de corte, os parâmetros da ferramenta e os cavacos gerados. Os materiais plásticos utilizados foram os termoplásticos e termorrígidos. Verificou-se o comportamento do material, quanto à viscoelasticidade. Observou-se que a condição da superfície gerada no material tinha uma dependência entre a deformação elástica e plástica, sob a influência da velocidade de corte. Verificou-se também, que os parâmetros das ferramentas tem uma grande importância na força de

corte e na qualidade superficial, destacando-se o ângulo de saída da ferramenta de corte como o parâmetro mais importante na usinagem dos plásticos. Estabeleceu-se um termo designado ângulo de saída crítico, onde a componente da força normal é zero. Este é o ângulo de saída ótimo para uma ferramenta monocortante na usinagem de plástico, em cuja situação, não surgem tensões de tração e nem compressão no plástico, na direção normal à superfície de corte. Seu valor é influenciado pelo material e profundidade de corte. O desgaste da ferramenta nessa condição é mínimo com boa precisão dimensional na usinagem do material. A Tabela 2.4, apresenta os ângulos de saída crítico para o torneamento do polietileno (PE).

**Tabela 2.4-** Ângulo de saída crítico para o PE, pela condição da velocidade de corte e da profundidade de corte (KOBAYASHI, 1967).

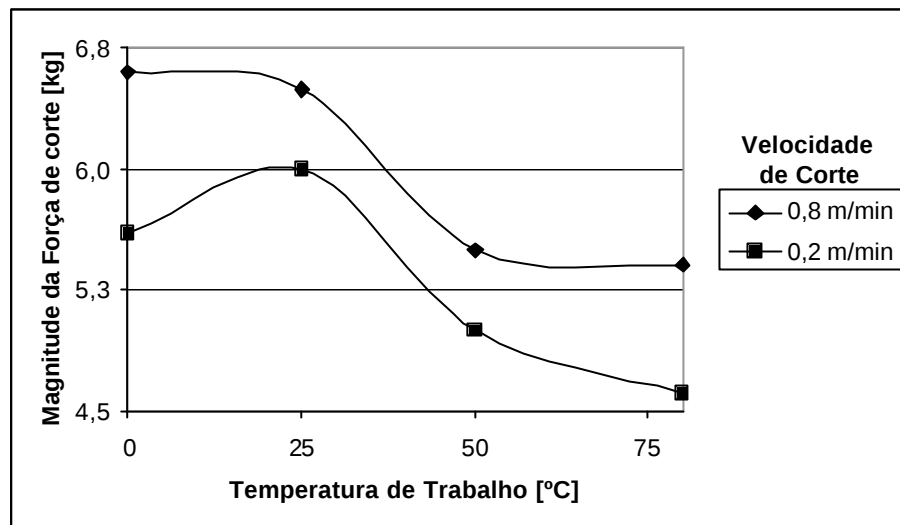
| Velocidade de Corte [m/min] | Profundidade de corte / Ângulo de saída crítico |         |         |
|-----------------------------|-------------------------------------------------|---------|---------|
|                             | 0,05 mm                                         | 0,10 mm | 0,15 mm |
| 0,8                         | 41°                                             | 30°     | 24°     |
| 50                          | 35°                                             | 25°     | 20°     |
| 100                         | 26°                                             | 16°     | 13°     |
| 200                         | 18°                                             | 9°      | 8°      |
| 400                         | 10°                                             | 4°      | 3°      |

A Figura 2.7 mostra como a força de corte varia com o aumento da velocidade de corte, tendo uma diminuição da força com o aumento da velocidade de corte. O cavaco formado quando a velocidade de corte torna-se alta é do tipo descontínuo de ruptura (Figura 2.5), resultando em uma repentina diminuição da força de corte.

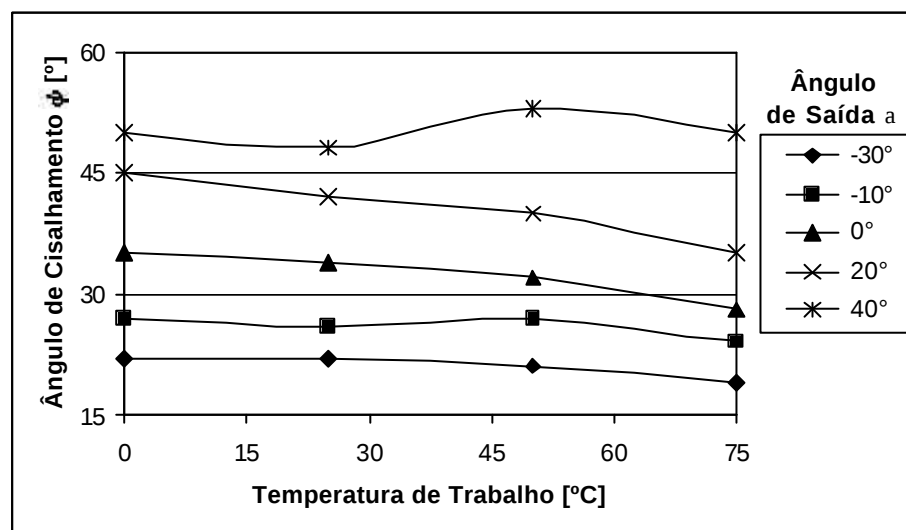


**Figura 2.7-** Efeito da velocidade de corte sobre a força de corte para várias profundidades de corte, com ângulo de saída de  $0^\circ$  e largura de corte de 5mm (KOBAYASHI, 1967).

É verificado o efeito da temperatura no processo de corte. O tipo de cavaco formado pela usinagem varia com a elevação da temperatura ocorrida durante o processo, desde a relação tensão-deformação e temperatura. A Figura 2.8 mostra a relação entre a temperatura de trabalho e a força de corte na usinagem do polimetil metacrilato (PMMA), verificando uma diminuição da força de corte com a elevação da temperatura. Na variação do ângulo de cisalhamento, com o mesmo material, com a elevação da temperatura, verificou-se uma pequena variação (Figura 2.9).



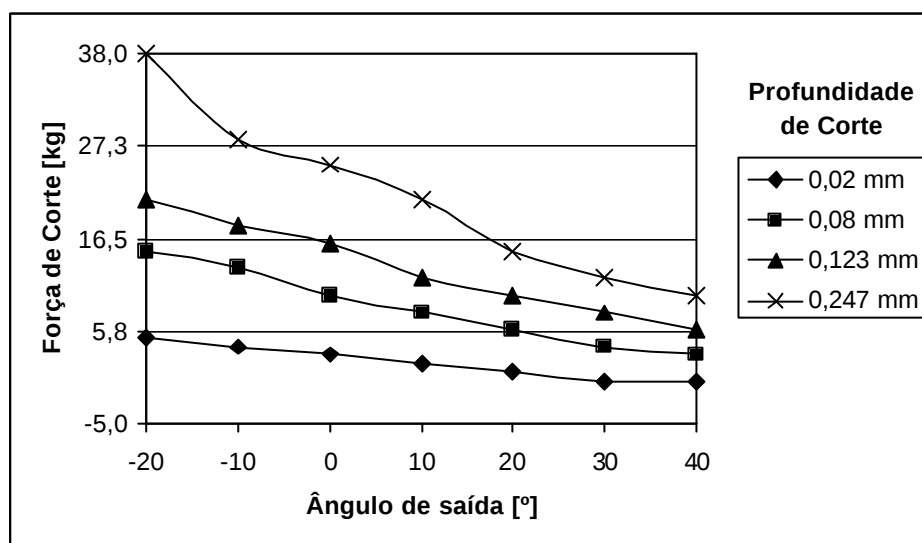
**Figura 2.8-** Relação entre a força de corte e a temperatura de trabalho com ângulo de saída de 0° e profundidade de 0,1 mm (KOBAYASHI, 1967).



**Figura 2.9 –** A variação do ângulo de cisalhamento com a temperatura de trabalho, para vários ângulos de saída e velocidade de corte de 0,8 m/min (KOBAYASHI, 1967).

A Figura 2.10 apresenta a amplitude e direção da força de corte na usinagem de policarbonato (PC), na direção da deformação desenvolvida durante o corte variando o ângulo de saída da ferramenta, observou que a

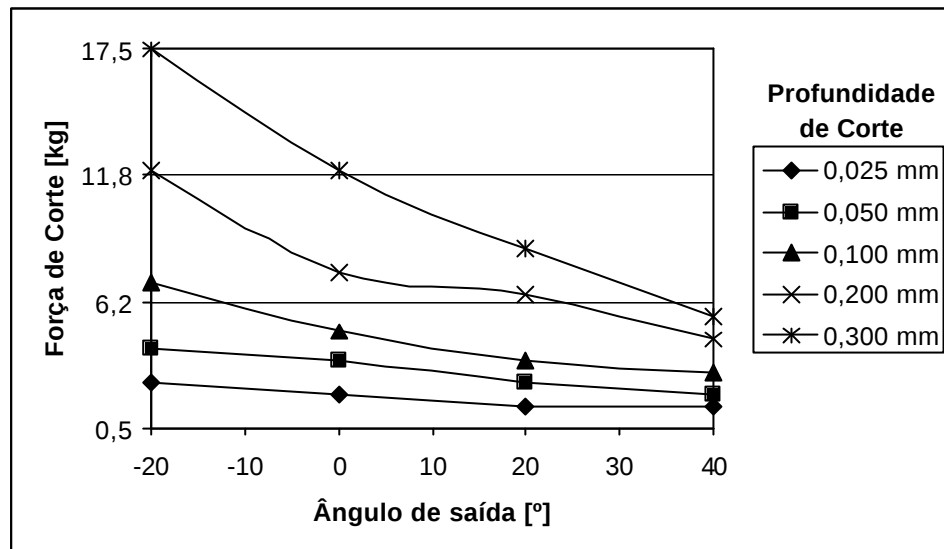
tensão é proporcional à deformação, e a correspondência da força de corte envolvida no processo de corte também varia com o ângulo de saída. A força de corte diminui com o aumento do ângulo de saída de negativo para positivo; que a ferramenta com ângulo de saída negativo, comprime o material durante o corte e o de ângulo de saída positivo, puxa o material para cima.



**Figura 2.10-** Relação entre a força de corte e ângulo de saída da ferramenta para diferentes profundidades de cortes, usando-se policarbonato, com velocidade de corte de 400 m/min (KOBAYASHI, 1967).

Na a usinagem do polietileno (PE) constatou-se que o material tem uma excelente usinabilidade. E que cavacos contínuos de cisalhamentos são formados com alta velocidade de corte e cavacos contínuos com baixa velocidade de corte. A magnitude da força de corte é pequena se comparada com outros plásticos. A Figura 2.11, mostra que a força de

corte aumenta proporcionalmente com o aumento da profundidade de corte e, diminui com o aumento do ângulo de saída.



**Figura 2.11-** Relação entre a força de corte e o ângulo de saída da ferramenta para diferentes profundidades de corte, usando-se polietileno, com velocidade de corte de 400 m/min (KOBAYASHI, 1967).

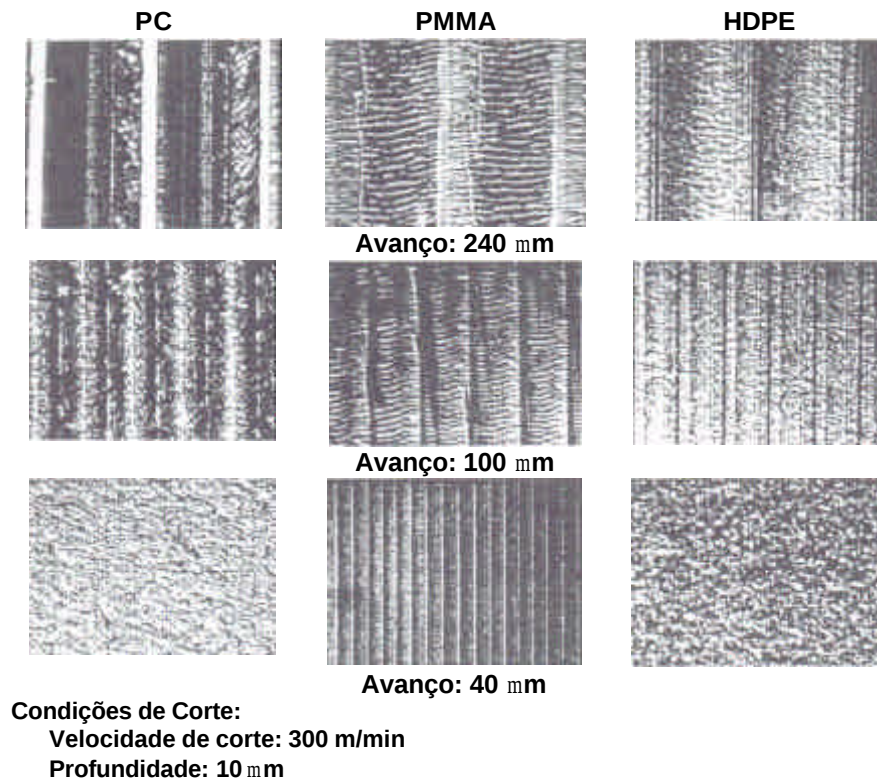
#### KOTTHAUS, H. (1972)

O autor descreve que na usinagem de materiais termoplásticos, recomenda-se trabalhar com alta velocidade de corte, com pequenos avanços e profundidades de corte, porém deve-se tomar o cuidado de não exceder a temperatura de aproximadamente de 60° C e, que as ferramentas de aço rápido (HSS) são adequadas para a usinagem. Para operação de torneamento de materiais termoplásticos, utilizando-se ferramentas de HSS, são indicados os seguintes parâmetros:

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| Velocidade de Corte [m/min]: | 300 a 1000 |
| Avanço [mm/rot]:             | 0,3 a 0,5  |
| Ângulo de Folga [°]:         | 10         |
| Ângulo de Saída [°]:         | 15 a 20    |

**KOBAYASHI, A. e HIRAKAWA, K. (1984)**

Os autores descrevem um estudo do torneamento de plásticos utilizando ferramentas de diamante policristalino. Um dos resultados obtidos, conforme Figura 2.12, foi a verificação da condição da superfície usinada de três materiais: Polimetil Metacrilato (PMMA), Policarbonato (PC) e Polietileno de Alta Densidade (HDPE), para diferentes condições de avanços. Os resultados obtidos confirmam que as diferenças obtidas se devem às características diferentes das propriedades dos materiais plásticos usinados. Quando o avanço torna-se menor que 100  $\mu\text{m}/\text{rot}$ , as marcas de avanço diminuem no PC e no HDPE. No PMMA, finos traços padrões, perpendiculares à direção de corte, são observados quando se utiliza grandes avanços, porém diminuem para avanços abaixo de 100  $\mu\text{m}$ .



**Figura 2.12-** Comparação da superfície de corte usinada para vários tipos de plásticos (KOBAYASHI e HIRAKAWA, 1984).

**CARR, J. W. e FEGER, C. (1993)**

Neste trabalho foi estudada a influência da geometria da ferramenta e dos parâmetros de usinagem na rugosidade de superfície e na estrutura dos materiais, estabelecendo uma fundamentação teórica para a usinagem de materiais poliméricos, relacionando os resultados do processo com as propriedades específicas de cada polímero, sendo elas: temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), temperatura de fusão ( $T_m$ ), peso molecular (MW), viscosidade e taxa de relaxação.

Na usinagem do material PMMA (Polimetil metacrilato), uma superfície de qualidade pode ser produzida com ferramenta de diamante,

dentro de uma determinada faixa de parâmetros de velocidade de corte e de avanço. Não foi verificado nenhuma evidência de fissuras ou crateras na superfície usinada. Como resultado, o PMMA pode ser considerado um polímero dúctil na usinagem com diamante. O bom desempenho do PMMA é obtido quando o material é usinado com uma ferramenta de ângulo de saída próximo de  $38^\circ$ .

O material ULTEM 1000 (Poli-imida - PI) foi usinado em três velocidades de corte diferentes: 11,5 m/s, 23 m/s e 34,5 m/s, respectivamente para 600 rpm, 1200 rpm e 1800 rpm. Com 11,5 m/s, a superfície ficou bastante áspera, com uma rugosidade média "Ra" de 75,0  $\mu\text{m}$  e aparece claramente a superfície fraturada, aparentando possuir uma fratura frágil típica do mecanismo de remoção do material. Quando a velocidade de corte foi de 34,5 m/s, a superfície final foi significativamente mais lisa. A superfície usinada em alta velocidade demonstrou ser menos fraturada. O mecanismo para remoção de material em ULTEM passa de um comportamento frágil a 34,5 m/s para um predominantemente dúctil a 45,9 m/s.

No material VESPEL (Poli-imida -PI), a remoção de material foi por intermédio de fratura frágil e a superfície aparece fraturada. Nesta região, se atribui a diminuição da rugosidade como sendo uma transição parcial para o regime dúctil. Com o aumento de calor gerado aumenta a ductilidade do polímero e, com um aumento adicional na velocidade de corte, a rugosidade de superfície não é afetada. Após aproximadamente

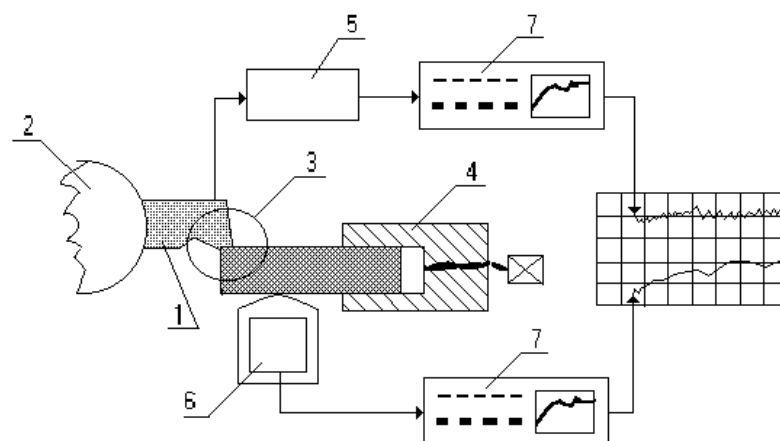
30 m/s, a rugosidade da superfície tende a aumentar. Fica claro que o número de fraturas e a rugosidade de superfície aumenta com o aumento da velocidade, acima de um valor limite. Para ângulos de saída de  $-38^{\circ}$  a  $2^{\circ}$ , com ferramentas de diamante, houve uma diminuição gradual na rugosidade. Para ângulos de saída acima de  $2^{\circ}$ , a superfície final torna-se mais áspera.

O estudo da usinagem dos materiais poliméricos com ferramenta monocortante de diamante, mostrou que as propriedades dos materiais e a viscoelasticidade do polímero, representam um papel importante na condição da superfície final, sendo que, as propriedades de viscoelasticidade dependem do tempo e da temperatura. Variando a geometria da ferramenta e a velocidade de corte, pode-se mudar o mecanismo de corte de fratura frágil com superfícies irregulares e ásperas para dúctil com superfícies lisas.

Com certeza, os parâmetros utilizados para a usinagem desses polímeros não poderão ser utilizados diretamente na usinagem de outros materiais, mas a importância deste trabalho se deve ao fato de ter demonstrado que a usinagem do polímero depende muito da temperatura na zona de corte e, conseqüentemente da velocidade de corte. Portanto, o comportamento durante a usinagem será diferente para cada polímero, o que faz com que seja necessário o estudo individual da usinabilidade de cada material.

**GRABCHENKO, A. I.; VEREZUB, N. V.; LAVRYNENKO, S. M.; HORVATH, M.; MAMALIS, A. G. ( 1998 )**

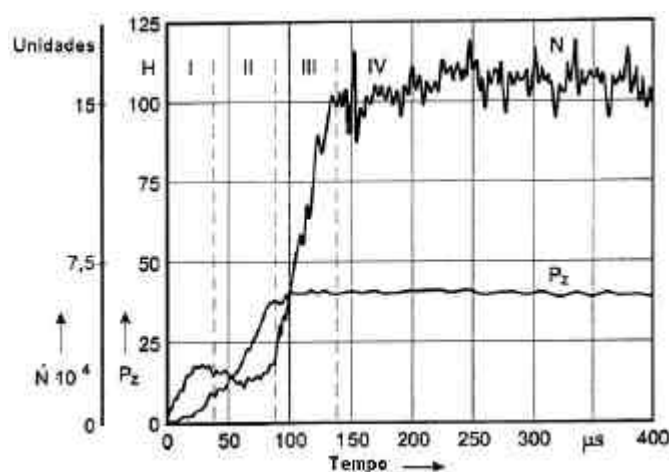
Os autores reproduziram um processo de corte, através de uma ferramenta monocortante, verificando o comportamento da força de corte em relação ao mecanismo de emissão luminescente (fotón-emissão) na superfície gerada (Figura 2.13), com material polimetacrilato de metila (PMMA), durante o corte de precisão de componentes poliméricos ópticos. A Figura 2.14 mostra esquematicamente o sistema empregado para medição da força de corte na usinagem do material PMMA.



**Figura 2.13-** Sistema de medição da força de corte e de aquisição de dados. Onde: 1. ferramenta de corte; 2. cabeçote rotativo; 3. polimetacrilato de metila; 4. dispositivo micro-mecânico para ajuste de avanço de 0,01 mm; 5. fotoelétrico multiplicador; 6. dinamômetro piezoelétrico; 7. sistema de aquisição de dados. (GRABCHENKO et al, 1998).

Os resultados obtidos, conforme verificado na Figura 2.14, podem ser descritos em quatro partes: No primeiro estágio, descreve-se a penetração da aresta de corte no polímero. Pode-se observar um

aumento linear da força de corte e um pequeno aumento do mecanismo de luminescente (ML). Com o aumento da carga começa ocorrer a destruição da camada, verificado na zona de deformação, iniciando os micro-poros, resultando no aumento de ML. No segundo estágio, ocorre um aumento da força de corte e uma diminuição de ML, como é verificado. Este efeito é caracterizado por concentrações de tensões secundárias como consequência de concentração de micro-poros. No final do segundo estágio, a força de corte aumenta até um nível que é suficiente para remoção de material. No terceiro estágio, a ação de micro-poros no material é observada, fácil escorregamento das macromoléculas ocorrem, ligações intermoleculares são quebradas e no final desse estágio a força de corte está estabilizada a um nível de 10 a 25 N e, o ML aumenta no limite de 14 a 16 x 10<sup>4</sup> unidades. Para o quarto e último estágio, o processo de corte está estabilizado, com a formação de cavacos contínuos e alta qualidade superficial.



**Figura 2.14-** Característica da intensidade mecânica luminescente (N) e a força de corte (Pz), no processo de corte com  $V_c = 1$  m/s e profundidade de 0,2 mm (GRABCHENKO et al, 1998).

### **POLIALDEN PETROQUÍMICA (1998)**

Para a usinagem do UHMWPE, recomenda-se o uso de ferramentas bem afiadas. A ferramenta de HSS tem apresentado bons resultados. Em baixas velocidades de corte não é necessário refrigeração. Para maiores velocidades, o calor gerado tende a prejudicar o acabamento ou provocar deformação na peça. Neste caso pode-se usar ar, água ou emulsão diluída com refrigerantes. O atrito do cavaco resultante contra a peça é também responsável pelo aquecimento. No torneamento do UHMWPE, conforme dados obtidos, tem-se os seguintes parâmetros da ferramenta:

- Ângulo de folga [°]: 0 a 25
- Ângulo de saída [°]: 5 a 30
- Velocidade de corte [m/min]: 200 a 400
- Avanço [mm/rot]: 0,1 a 0,5

No fresamento e na Tupia, conforme dados obtidos, tem-se os seguintes parâmetros da ferramenta:

- Ângulo de folga [°]: 10 a 15
- Ângulo de saída [°]: 10 a 20
- Velocidade de corte [m/min]: 200 a 800
- Avanço [mm/rot]: 0,25 a 0,5

Na plaina, conforme dados obtidos, tem-se os seguintes parâmetros da ferramenta:

- Ângulo de folga [°]: 20
- Ângulo de saída [°]: 15 a 20
- Velocidade de corte [m/min]: 250 a 450
- Avanço [mm/passe]: 0,1 a 0,3

Na serra normais, circulares e de fita, conforme dados obtidos, tem-se os seguintes parâmetros da ferramenta:

#### Serra de Fita:

- Ângulo de folga [°]: 5 a 8
- Ângulo de saída [°]: 15
- Passo [mm] 3 a 10
- Velocidade de corte [m/min]: 1000 a 2000
- Avanço [mm/dente]: 0,1 a 0,2

#### Serra Circular:

- Ângulo de folga [°]: 0 a 15
- Ângulo de saída [°]: 10 a 15
- Passo [mm] > 10
- Velocidade de corte [m/min]: 1000 a 4000
- Avanço [mm/dente]: 0,1 a 0,2

Na furação, conforme dados obtidos, tem-se os seguintes parâmetros da ferramenta:

- Ângulo de folga [°]: 5 a 15
- Ângulo de saída [°]: 10 a 20
- Ângulo de ponta [°] 60 a 90
- Velocidade de corte [m/min]: 40 a 70
- Avanço [mm/rot]: 0,1 a 0,3

**SONG, J. L.; CREMENTS P. M. e BONUTTI, P. (1999)**

Os autores publicaram um estudo do efeito da usinagem nas propriedades tribológicas do UHMW em termos de coeficiente de fricção e taxa de desgaste. Para tanto, foi verificada a influência da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte na estrutura polimérica e na textura da superfície usinada. Testes de desgaste foram realizados em um dispositivo do tipo pino-disco. Os discos eram de UHMWPE e os pinos metálicos.

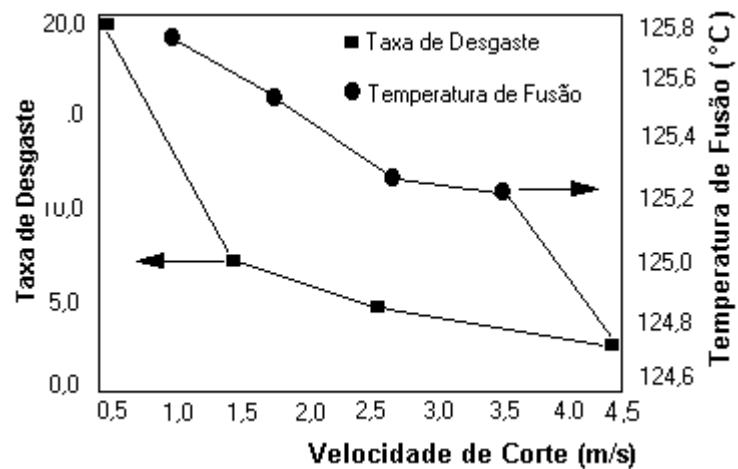
Foram realizados três tipos de ensaios distintos, com objetivos e parâmetros diferentes. Os ensaios realizados foram:

- a) Para estudar o efeito de velocidade de corte, a velocidade de avanço da ferramenta foi mantida em 8,47 mm/s e a profundidade de corte em 0,203 mm. A velocidade de corte variou conforme a Tabela 2.5.

**Tabela 2.5-** Variação da velocidade de corte em função da rotação (SONG et al, 1999).

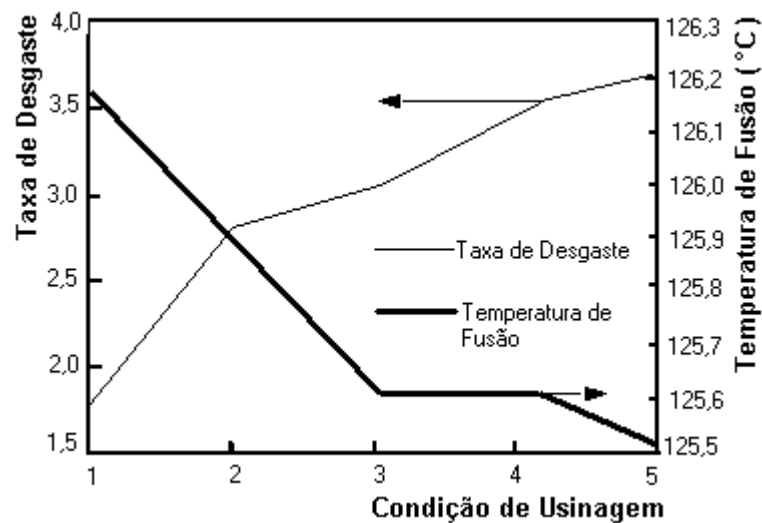
| VELOCIDADES DE CORTE<br>(m/s) | ROTAÇÃO [ rpm ] |
|-------------------------------|-----------------|
| 0,499                         | 500             |
| 1,50                          | 1500            |
| 2,49                          | 2500            |
| 3,49                          | 3500            |
| 4,49                          | 4500            |

- b) Para estudar o efeito da profundidade de corte, a velocidade de corte e a velocidade de avanço foram mantidos constantes, respectivamente: 4,49 m/s (4500 rpm) e 8,47 mm/s. As profundidades de corte em milímetros foram: 0,0508; 0,127; 0,203; 0,508 e 1,02 mm.
- c) Para avaliar a rugosidade de superfície em virtude da usinagem, foi realizado um ensaio com relação constante entre a velocidade de corte e a velocidade de avanço, ao passo que a profundidade de corte foi mantida em 0,203 mm. A relação foi 0,499 m/s (500 rpm) / 1,058 mm/s. A rugosidade superficial dos pinos de metal e dos pratos de UHMWPE foi medida antes e depois do ensaio de desgaste. Estas medidas foram realizadas utilizando um sistema Surfcom 120A, com capacidade para avaliar a topografia da superfície por meio de um software de monitoramento de perfil. O desgaste da superfície foi observado usando um microscópio óptico e um microscópio eletrônico de varredura (VP - SEM).



**Figura 2.15-** Efeito da velocidade de corte na taxa de desgaste do UHMWPE usinado (SONG et al, 1999).

A Figura 2.15 apresenta a variação da taxa de desgaste [ $\times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ ] do UHMWPE em função da velocidade de corte. Pode ser visto que a taxa de desgaste diminuiu quando a velocidade de corte aumentou, fixando o avanço da ferramenta e a profundidade de corte em 8,47 mm/s e 0,203 mm, respectivamente. Em outras palavras, quando a velocidade de corte aumentou, a resistência ao desgaste do UHMWPE melhorou. É apresentada na Figura 2.16, a variação da temperatura de fusão em função da velocidade de corte. Quando a velocidade de corte aumentou, a temperatura de fusão diminuiu significativamente. A diminuição da temperatura de fusão do polímero é relacionada aos danos na sub-superfície ou diminuição na cristalinidade.

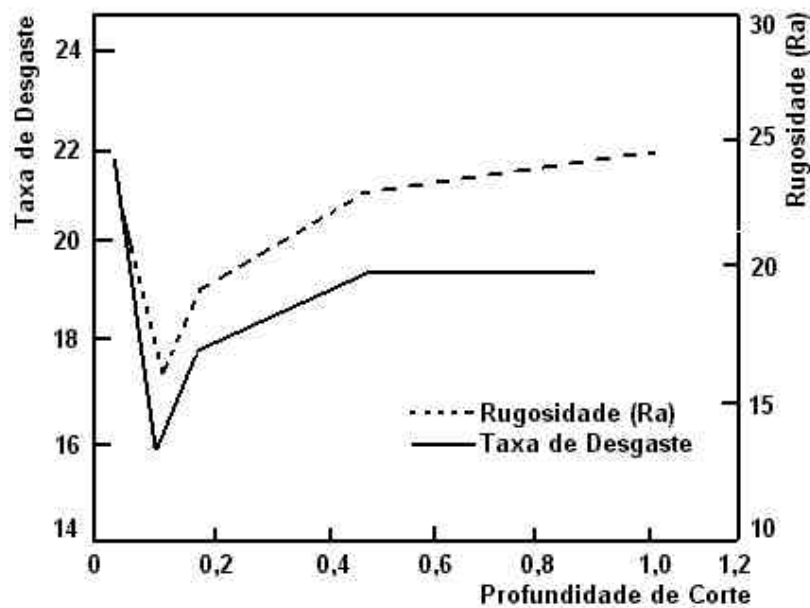


| Condição | Velocidade de corte | Velocidade de Avanço | Profundidade de corte |
|----------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 1        | 0,5 m/s             | 1,06 mm/s            | 0,203 mm              |
| 2        | 1,5 m/s             | 3,18 mm/s            | 0,203 mm              |
| 3        | 2,5 m/s             | 5,29 mm/s            | 0,203 mm              |
| 4        | 3,5 m/s             | 7,41 mm/s            | 0,203 mm              |
| 5        | 4,5 m/s             | 9,53 mm/s            | 0,203 mm              |

**Figura 2.16-** Variação do desgaste da superfície no UHMW em função das condições de usinagem (SONG et al, 1999).

A Figura 2.16 apresenta as variações da taxa de desgaste [ $\times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ ] e o início da temperatura de fusão do UHMWPE usinado quando a relação entre a velocidade de corte e a velocidade de avanço foi mantida constante. A taxa de desgaste aumentou com o aumento da velocidade de corte ao passo que a temperatura de fusão diminuiu quando a velocidade de corte diminuiu. Era esperado que a textura de superfície não se alterasse quando a relação da velocidade de corte e do avanço permanecesse constante. Porém, ocorreu maior degradação mecânica quando a velocidade de corte aumentou. Assim, a mudança na taxa de desgaste foi atribuída à mudança estrutural em virtude da

usinagem. Em resumo, a velocidade de corte alta causa maior degradação mecânica que conduz a uma redução na resistência ao desgaste do UHMWPE.



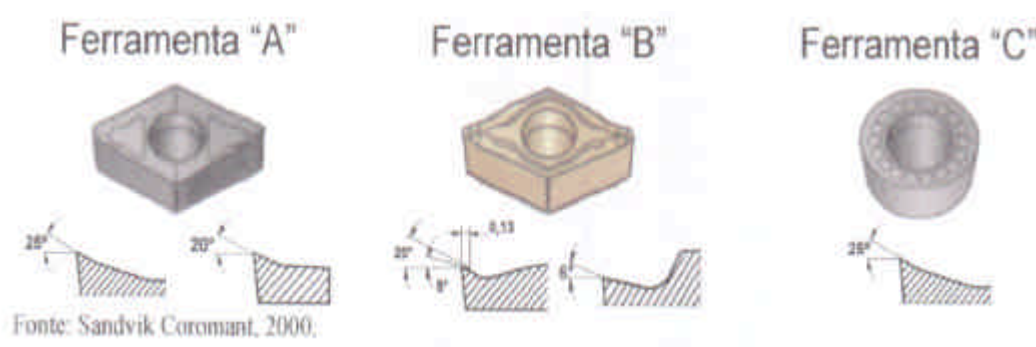
**Figura 2.17-** Efeito da profundidade de corte na taxa de desgaste e na rugosidade superficial do UHMW (SONG et al, 1999).

A Figura 2.17 ilustra o efeito da profundidade de corte na taxa de desgaste [ $\times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ ] e na rugosidade superficial do UHMWPE. A taxa de desgaste e a rugosidade da superfície ( $R_a$ ) mostraram a mesma tendência quando a profundidade de corte aumentou. Quando a profundidade de corte foi menor que 0,127 mm, a taxa de desgaste e a rugosidade de superfície  $R_a$  diminuíram com o aumento da profundidade de corte. Quando a profundidade de corte estava na faixa de 0,127 mm até 0,500 mm, a taxa de desgaste e a rugosidade de superfície ( $R_a$ ) aumentaram com o aumento da profundidade de corte. Quando a

profundidade de corte foi maior que 0,5 mm, a taxa de desgaste e a rugosidade ( $R_a$ ) permaneceram razoavelmente estável com o aumento da profundidade de corte. Houve uma ótima profundidade de corte, resultando na melhor resistência ao desgaste e ao acabamento superficial do UHMWPE. O valor ótimo para a profundidade de corte foi aproximadamente de 0,127 mm nas condições estudadas.

### **SALLES, J. L. C. (2001)**

Em seu trabalho foi analisado o acabamento superficial do UHMWPE, verificando a influência dos parâmetros de usinagem pela geometria de três ferramentas de metal duro (Figura 2.18). A Tabela 2.6 apresenta as condições dos ensaios que foram utilizados para a verificação do acabamento superficial do material analisado.



**Figura 2.18-** Representação das ferramentas de corte de metal duro utilizadas no ensaio (SALLES, 2001).

**Tabela 2.6-** Parâmetros utilizados nos quatro tipos de ensaio (SALLES, 2001).

| <b>Ensaio</b>                                                           | <b>Velocidade de Corte<br/>[m/min]</b> | <b>Avanço<br/>[mm/rot]</b>                         |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Condição de Melhor Acabamento Superficial</b>                        | 160 / 220 / 280 / 340<br>/ 400         | 0,025 / 0,05 / 0,10 / 0,15<br>/ 0,20 / 0,25 / 0,30 |
| <b>Influência da Velocidade de Corte</b>                                | 160 / 220 / 280 / 340<br>/ 400         | 0,025 / 0,05 / 0,10 / 0,15<br>/ 0,20 / 0,25 / 0,30 |
| <b>Influência do Avanço</b>                                             | 160 / 220 / 280 / 340<br>/ 400         | 0,025 / 0,05 / 0,10 / 0,15<br>/ 0,20 / 0,25 / 0,30 |
| <b>Comparação das ferramentas em função do avanço</b>                   | 220 / 280                              | 0,025 / 0,05 / 0,10 / 0,15<br>/ 0,20 / 0,25 / 0,30 |
| <b>Comparação entre as ferramentas em função da velocidade de corte</b> | 160 / 220 / 280 / 340<br>/ 400         | 0,05 / 0,10 / 0,20                                 |

Através dos ensaios, o autor verificou que as ferramentas A e C, foram as mais indicadas para o torneamento do material UHMWPE, quando o objetivo é o acabamento superficial. Dentro dos parâmetros de corte, tem-se os avanços de 0,025 a 0,100 mm/rot e na velocidade de corte de 220 e 280 m/min. As formas de cavacos verificadas, foram do tipo contínuo sem diferenças significativas. Quanto ao desgaste da ferramenta, pode-se verificar que nas condições de usinagem, não ocorreram adesão de material na superfície da ferramenta, avarias nas arestas de corte e na superfície de saída.

## **2.5 Aspectos Conclusivos da Revisão Bibliográfica**

Da pesquisa bibliográfica realizada pode-se constatar que o estudo sobre a usinagem de polímeros é relativamente novo. Dos estudos apresentados, observa-se que a usinabilidade de cada polímero está relacionada diretamente com as propriedades do material, o que indica a necessidade de estudos específicos para determinação das melhores condições de usinagem e grandezas de corte. Especificações disponíveis sobre a geometria das ferramentas e os parâmetros para usinagem de polímeros são genéricas e em alguns casos utiliza-se os mesmos valores empregados para os metais.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresentam-se os equipamentos e materiais necessários para a realização dos ensaios de medição da força de corte, bem como a metodologia empregada.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Processos de Usinagem da Faculdade de Engenharia - UNESP, Campus de Bauru.

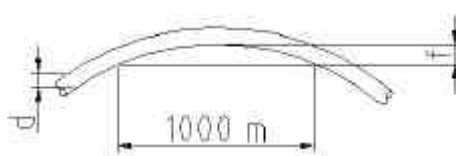
#### 3.1. Material

O material utilizado neste trabalho foi o Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular denominado: PE-UAPM UTEC 6540, recebido em barras conforme especificações da Tabela 3.1. Este material foi doado pela empresa “Titana Tecnologia Comércio e Indústria de Polímeros Ltda.”

**Tabela 3.1-** Tarugos utilizados com suas especificações. **Fonte:** Titana Tecnologia Comércio e Indústria de Polímeros Ltda. Out., 2000.

| Diâmetro ( mm ) |      | Massa/m<br>( kg/m ) | Ovalização<br>( mm ) | Flexa<br>( mm ) | Comprimento<br>( m ) | Cor    |
|-----------------|------|---------------------|----------------------|-----------------|----------------------|--------|
| Nominal         | Real |                     |                      |                 |                      |        |
| 35              | 38   | 1,0                 | < 0,1                | 4               | 1                    | Branca |
| 40              | 42   | 1,3                 | < 0,1                | 4               | 1                    | Branca |
| 50              | 53   | 2,2                 | < 0,1                | 3               | 1                    | Branca |
| 60              | 61   | 2,9                 | < 0,1                | 3               | 1                    | Branca |

- Diâmetro Nominal: Medida aproximada em milímetros, usada como referência do produto.
- Diâmetro Real ( d ): Diâmetro mínimo em milímetros de uma seção do tarugo.
- Massa por metro: peso teórico de um metro, consideradas a ovalização e tolerância de comprimento.
- Ovalização: Diferença entre os diâmetros máximo e mínimo de uma seção do tarugo.
- Flexa ( f ): Valores típicos, podem sofrer variações por condições de transporte e armazenagem.



- Comprimento: Tamanhos de estoque com tolerância – 0% a +3%. Quaisquer outras medidas sob pedido.
- Cores: Branco natural – pode apresentar leves variações de tonalidade de lote para lote.

### 3.2. Ferramentas de Corte

Dado as características do corte e do material a ser usinado, optou-se por adotar ferramentas monocortantes, bits 9,52 mm (3/8”), de aço rápido com as seguinte especificação: 18 W 4 Cr 1 Va com 12 % Co.

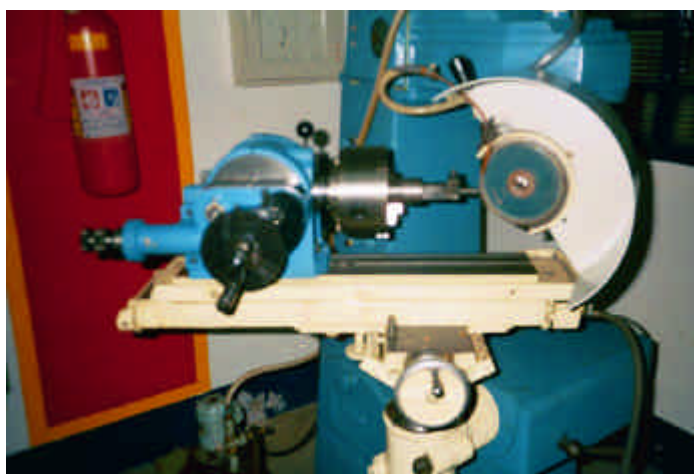
Para a preparação das ferramentas utilizou-se:

- Uma máquina de corte metalográfico, marca “STRUERS”, para cortar as barras de aço rápido, no comprimento de 38 mm;
- Um esmeril, marca “JOWA”, com rebolo cilíndrico de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) de 304,80 mm (12”) convencional tipo tangencial, para a usinagem de desbaste das superfícies das ferramentas de corte;
- Uma máquina Afiadora Universal de Ferramentas, marca “MAAC”, com divisor, modelo “DUR-2”, marca “ZOCCA” (Figura 3.2), adaptado à mesa da afiadora, a fim de possibilitar um posicionamento angular necessário para o acabamento das superfícies da ferramenta; um porta ferramenta confeccionado para fixação, conforme Figura 3.1; rebolo diamantado, tipo “HDS”, marca “Tecno Tools”, de granulação fina de 150 mm de diâmetro, do tipo prato com corte frontal e emulsão preparada em 5 %, como fluido refrigerante, conforme Figura 3.3. Para controlar os ângulos e o posicionamento foram necessários: um transferidor de graus com régua móvel, um esquadro de régua fixa de 200 mm e um paquímetro com resolução de 0,01 mm.

- Um rugosímetro, marca “Taylor Hobson”, modelo “Surtronic 3+”, com ponta apalpadora de diamante, de forma cone-esférica, com raio de ponta de 2  $\mu\text{m}$ , para medir a rugosidade das ferramentas, em  $R_a$ , especificamente, na superfície principal de folga (**A<sub>a</sub>**) e superfície de saída (**A<sub>g</sub>**).



**Figura 3.1-** Porta ferramenta de fixação utilizado na máquina afiadora universal de ferramentas.



**Figura 3.2-** Divisor universal, porta ferramenta de fixação e rebolo diamantado.

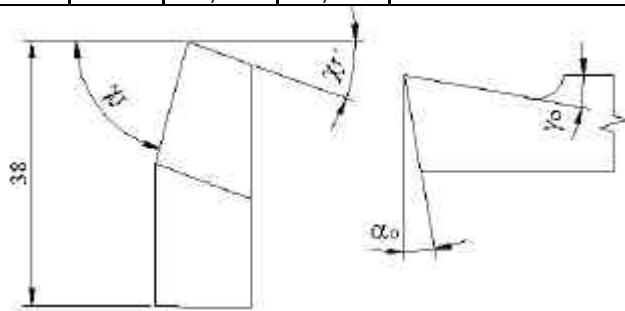


**Figura 3.3-** Máquina afiadora universal de ferramentas com sistema de fluido refrigerante.

A Tabela 3.2 apresenta a geometria adotada das ferramentas. A Figura 3.4 mostra respectivamente a representação esquemática dos ângulos e as ferramentas confeccionadas.

**Tabela 3.2-** Geometrias adotadas e rugosidade das ferramentas de corte.

| Ferramenta<br>N.º | Geometria |       | Rugosidade<br>Ra [ $\mu\text{m}$ ] |       | Onde:<br>$c_r$ : Ângulo de posição;<br>$g_o$ : Ângulo de saída;<br>$A_a$ : Superfície principal de folga;<br>$A_g$ : Superfície de saída.                                                     |
|-------------------|-----------|-------|------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | $c_r$     | $g_o$ | $A_a$                              | $A_g$ |                                                                                                                                                                                               |
| 1                 | 60º       | 10º   | 0,40                               | 0,40  | <b>Observação:</b><br>Os seguintes ângulos foram fixados:<br>$a_o = 10^\circ$ : Ângulo de folga;<br>$c_r' = 10^\circ$ : Ângulo de posição lateral;<br>$l_s = 0^\circ$ : Ângulo de inclinação. |
| 2                 |           | 20º   | 0,44                               | 0,20  |                                                                                                                                                                                               |
| 3                 |           | 30º   | 0,44                               | 0,44  |                                                                                                                                                                                               |
| 4                 |           | 40º   | 0,56                               | 0,56  |                                                                                                                                                                                               |
| 5                 | 75º       | 10º   | 0,22                               | 0,22  |                                                                                                                                                                                               |
| 6                 |           | 20º   | 0,22                               | 0,22  |                                                                                                                                                                                               |
| 7                 |           | 30º   | 0,30                               | 0,30  |                                                                                                                                                                                               |
| 8                 |           | 40º   | 0,28                               | 0,28  |                                                                                                                                                                                               |
| 9                 | 90º       | 10º   | 0,22                               | 0,22  |                                                                                                                                                                                               |
| 10                |           | 20º   | 0,38                               | 0,34  |                                                                                                                                                                                               |
| 11                |           | 30º   | 0,20                               | 0,18  |                                                                                                                                                                                               |
| 12                |           | 40º   | 0,68                               | 0,76  |                                                                                                                                                                                               |

**Figura 3.4-** Desenho esquemático genérico das ferramentas utilizadas, sem escala e as ferramentas confeccionadas.

### **3.3. Equipamento de Ensaio**

#### **3.3.1. Máquina de ensaio**

Para a realização dos ensaios, adotou-se o processo de torneamento em operação de desbaste. A máquina utilizada, (Figura 3.5) foi um torno horizontal, marca “ROMI”, modelo “Tormax 30”, com as faixas de rotações e avanços.



**Figura 3.5-** Máquina de ensaio.

#### **3.3.2. Instrumento de medição**

O dispositivo empregado foi projetado inicialmente para medir esforços durante a usinagem de madeira (GONÇALVES, 1993). Consiste de um suporte porta-ferramenta confeccionado em aço ABNT 4340, (Figura 3.6). O suporte apresenta um sistema de fixação da ferramenta de corte e uma haste com secção reduzida (célula de carga), a qual foi dimensionada para receber dois circuitos em ponte completa com emprego de extensômetros elétricos. Estes extensômetros são

responsáveis pela medição da força normal à direção de corte '**P<sub>n</sub>**', de capacidade de carga de 10 daN e da força principal de corte '**P<sub>c</sub>**', de capacidade de carga de 60 daN. Os extensômetros são ligados em circuito de ponte completa de "Wheatstone" e solicitados a esforços normais e de flexão. A ligação é feita com 4 ramos ativos de forma adequada para eliminar os efeitos de temperatura e das deformações normais e transversais.

Para o presente estudo realizou-se, somente, a medida da força principal de corte "**P<sub>c</sub>**".



**Figura 3.6-** Dispositivo empregado para medir a força de corte.  
(GONÇALVES, 1993)

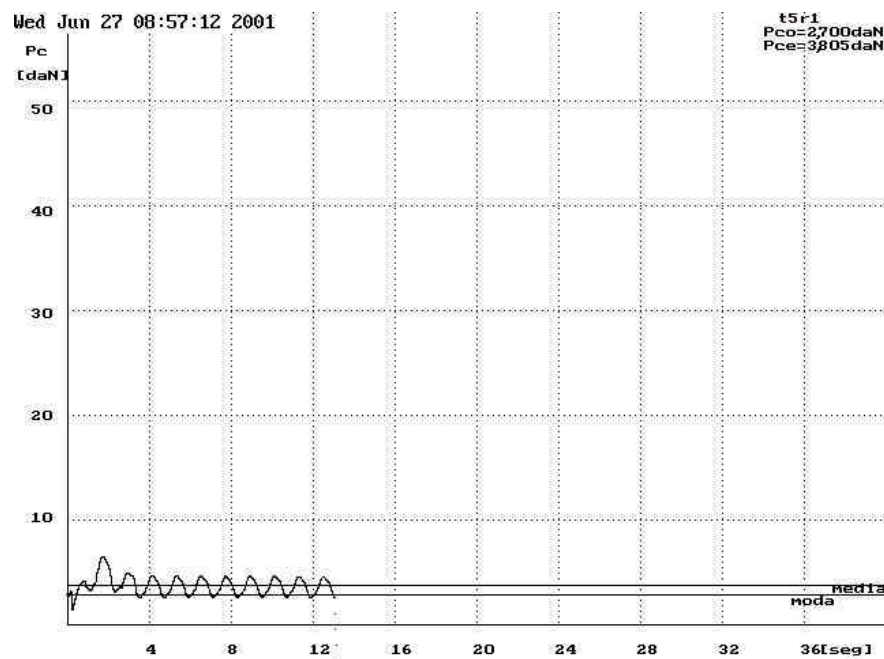
### 3.3.3. Aquisição de dados

Empregou-se um microcomputador PC 486, marca IBM, modelo DX/D, 33 MHz e 4 MB de memória RAM, no qual instalou-se uma placa de inter-face que foi projetada e confeccionada pelo Grupo de Instrumentação e Controle de Processos da Laboratório de Dinâmica da Escola de Engenharia de São Carlos, USP. A placa foi projetada para adquirir aproximadamente 945.000 pontos para um tempo de aquisição

de 40 segundos, além de filtrar os sinais de ruído. Quanto ao programa utilizado, em Linguagem Turbo C, desenvolvido pelo mesmo Grupo, consiste de um software de aquisição de dados, desenvolvido para processar e arquivar os resultados de ensaio, recuperar os resultados adquiridos em bits e transformá-los em unidade de força, sendo assim, visualizados no monitor e registrados em impressora, (Figura 3.7).

O gráfico da Figura 3.7, apresenta:

- As curvas da variação da força principal de corte, na unidade de daN, em função do tempo, para a usinagem do UHMWPE;
- A curva registrada na ordenada do gráfico, através de pontos que indicam a incidência de valores da força principal de corte “Pc”;
- As retas que indicam o valor da força principal de corte média “Pce” e o valor da força principal de corte de maior incidência durante o ensaio “Pco”- representada pela moda;
- Na parte superior, os valores de “Pce” e “Pco” e o nome do sub-programa de registro do ensaio;



**Figura 3.7-** Gráfico da força principal de corte em função do tempo de usinagem.

### 3.4. Procedimentos de Ensaio

#### 3.4.1. Preparação das amostras

As barras de UHMWPE, no comprimento de 1000 mm, inicialmente foram verificadas a deformação pela flexão e corrigidas e cortadas no comprimento, aproximado, de 250 mm, em uma serra alternativa. Durante o processo de corte, os tarugos cortados, da mesma barra, eram marcados com traços em sua superfície, com um bits 9,52 mm (3/8"), para identificar que pertenciam à mesma barra. Como o processo de corte não resultou em faces devidamente retilíneas e com rebarbas, realizou-se um processo de faceamento e furação de centro. Foi observado e tomado o máximo de cuidado com a pressão usada na fixação do tarugo na placa

do torno, antes de fazer o furo de centro, para não ocorrer deformações que poderiam afetar a concentricidade.

### 3.4.2. Montagem do banco de ensaio

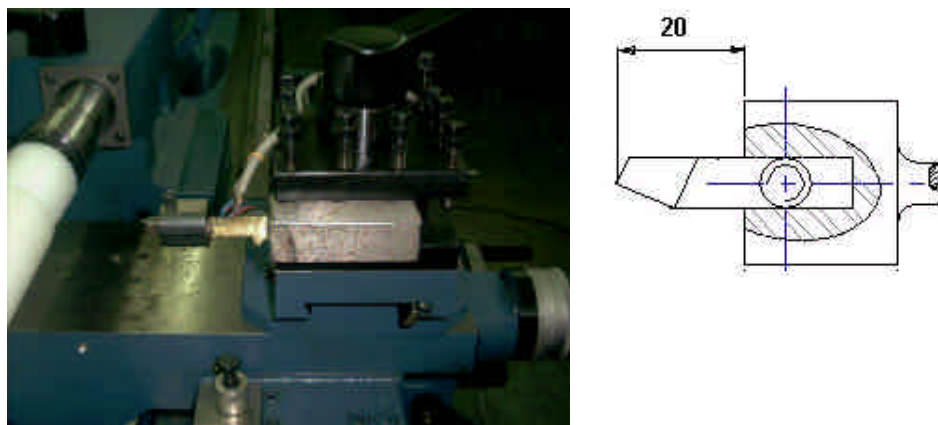
Para a montagem do banco de ensaio os seguintes procedimentos foram tomados antes de iniciar os ensaios preliminares:

- Montagem do sistema de aquisição de dados, conforme descrito no item 3.3.3., sobre uma mesa a uma distância, de no máximo, 800 mm da máquina de ensaio, com a posição da tela do monitor e do teclado voltado para a máquina, conforme Figura 3.8, para que o operador da máquina de ensaio, pudesse operar o sistema de aquisição, dado ao comprimento do cabo do dispositivo da célula de carga.



**Figura 3.8-** Ilustração do sistema de aquisição de dados.

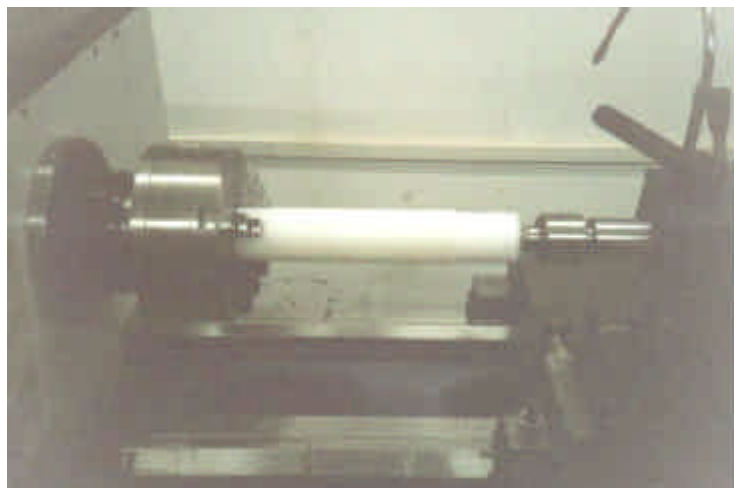
- Montagem e fixação do dispositivo da célula de carga e o da ferramenta de corte; os procedimentos foram: a fixação da ferramenta de corte no suporte do dispositivo da célula de carga, a uma distância de 20 mm da ponta da ferramenta de corte até a face do suporte. Outra condição verificada na montagem da ferramenta de corte foi o acerto dos ângulos de posição e de saída. Nesta etapa foi necessário a utilização de um paquímetro de resolução de 0,02 mm e de um transferidor de graus com régua fixa e móvel. Após a etapa da fixação da ferramenta de corte, fixou-se o dispositivo da célula de carga no suporte de ferramentas da máquina de ensaio, conforme Figura 3.9,. Estas condições foram observadas e verificadas para todas as ferramentas de corte.



**Figura 3.9-** Montagem da célula de carga na máquina e esquema de fixação da ferramenta de corte na célula de carga.

Montagem do corpo de prova na máquina: fixação na placa universal de 3 castanhas, com contra-ponta, do cabeçote móvel, onde o comprimento livre de usinagem não deveria ultrapassar o comprimento de

3 vezes o diâmetro do tarugo utilizado (recomendações adotadas em práticas industriais). A fixação do tarugo na placa universal foi determinada com uma pressão de fixação adequada, de forma a não deformar o material, pois alteraria o alinhamento com o contra-ponta, produzindo a conicidade junto com a flexão, alterando a profundidade no comprimento usinado. O procedimento foi repetido na pressão do cone, do contra ponta com o furo de centro. A Figura 3.10 mostra o detalhe da fixação do tarugo na máquina de ensaio.

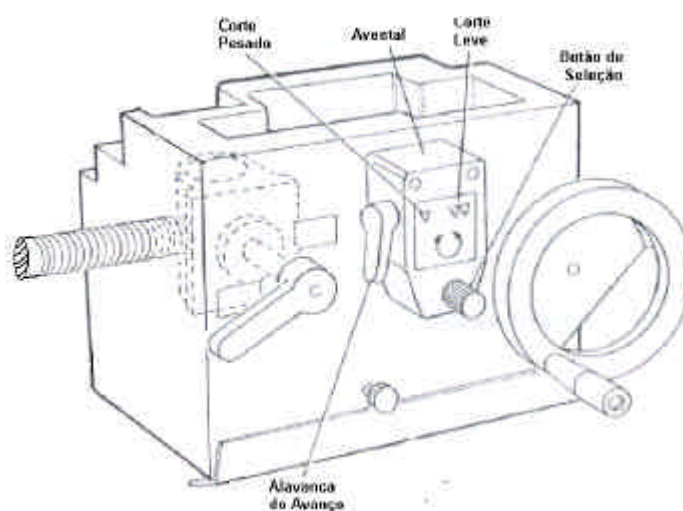


**Figura 3.10-** Detalhe da fixação do tarugo na máquina de ensaio.

- Acerto das engrenagens do recâmbio e seleção do sistema de desengate automático de precisão do avental no avanço. O posicionamento das engrenagens do recâmbio foi obtido através da inversão das engrenagens, obtendo uma das faixas de avanço longitudinal, que foram utilizados em todos os ensaios. Estas combinações foram determinadas pelos pares de engrenagens e pelo número de dentes já estabelecido pelo fabricante.

Com estas combinações de pares de engrenamento, foram obtidas as faixas de avanço.

Quanto ao sistema de desengate automático, do avental, conforme mostrado pela Figura 3.11, foi selecionado através do posicionamento de um botão para todos os ensaios, a condição de corte leve, o motivo desta escolha ocorreu devido as condições de resistência mecânica do material usinado (UHMWPE) ter uma dureza muito inferior a dureza dos metais, resultando em um esforço suave no acionamento.



**Figura 3.11-** Sistema de desengate automático.

### 3.4.3. Verificação de danos na ferramenta

Os danos na ferramenta de corte, foram verificados por visualização de avarias e desgastes das arestas principal e lateral de corte e das superfícies principal de folga e de saída. Esta visualização, seguida de fotografia, consistiu em utilizar um microscópio estereoscópio, da marca

“Carl Zeiss”, do Laboratório de Materiais, do Departamento de Engenharia Mecânica da FEB-UNESP, acoplado com uma máquina fotográfica com filme preto e branco de 35 mm ASA 200 com ampliação de 10 vezes (Figura 3.12). Para o posicionamento e o acerto do foco, houve a necessidade de confeccionar um dispositivo de fixação, com dois graus de liberdade, para as combinações da variação do ângulo de saída com a variação do ângulo de posição das diferentes ferramentas de corte (Figura 3.13).



**Figura 3.12-** Montagem do sistema de verificação de danos na ferramenta de corte.



**Figura 3.13-** Detalhe do dispositivo de fixação da ferramenta de corte.

#### **3.4.4. Ensaios preliminares**

Os dados extraídos da Revisão Bibliográfica, relacionados com a usinagem de polímeros, mostraram que:

- A usinagem não era específica do UHMWPE 6540, e as ferramentas eram de metal duro ou diamante;
- As máquinas de ensaio eram de baixas frequências de vibração e trabalhavam com sensores piezoelétricos;
- Parâmetros de corte utilizados: baixos valores de profundidade de corte e avanço, combinados a velocidades de corte alta e baixa;
- Na pesquisa de usinagem deste material, realizada por SALLES (2001), empregou-se ferramentas de metal duro e um torno CNC, verificando-se a condição de acabamento superficial.

Para a proposta de se estudar a interação dos parâmetros de usinagem: avanço, velocidade de corte, profundidade de corte, ângulos

de saída e ângulos de posição, com a força principal de corte ( $P_c$ ), houve a necessidade de realizar ensaios preliminares, tendo como objetivos:

- Fixada a velocidade de corte, verificar a influência da geometria das ferramentas sobre a forma do cavaco, variando-se o avanço a cada 0,05 mm/rot;
- Fixado o avanço, verificar a influência da geometria das ferramentas sobre a forma do cavaco, variando-se a velocidade de corte;
- Verificar a influência do ângulo de posição sobre a forma do cavaco em relação à profundidade de corte com variação de 0,25 mm, para as ferramentas de ângulo de saída de 30° ( indicação de catálogo );
- Verificar as condições de avarias e desgaste da ferramenta de corte.

Os seguintes ensaios preliminares foram realizados:

**Ensaio A:** Velocidade de corte com parâmetros da máquina de ensaio aproximados do estudo de SALLES (2001);

**Ensaio B:** Velocidade de corte com variação seguindo uma progressão geométrica de razão 2;

**Ensaio C:** Avanço com parâmetros da máquina de ensaio aproximados do estudo de SALLES (2001);

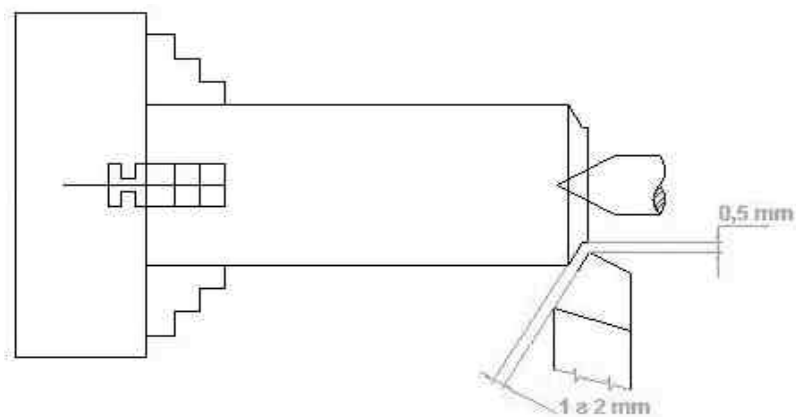
**Ensaio D:** Profundidade de corte;

**Ensaio E:** Repetibilidade.

Os resultados obtidos nos ensaios preliminares são apresentados na forma de gráficos no Anexo 2.

Anteriormente à realização dos ensaios, os procedimentos tomados na preparação foram:

- Trabalhar com uma profundidade de corte mínima de 2 mm, motivo que foi verificado quando utilizou-se uma profundidade, menor e igual a 1 mm e o sistema de aquisição de dados não registrou algumas leituras.
- Preparar um chanfro de 1 a 2 mm, de 60° ou 75°, no tarugo somente para as ferramentas de ângulo de posição diferentes de 90°. O motivo adotado foi que as ferramentas iniciassem o corte de forma total, como mostrado na Figura 3.14. Ganhava-se tempo na preparação e padronização dos ensaios.



**Figura 3.14-** Procedimento adotado para o início dos ensaios preliminares.

- Afastar e posicionar a ferramenta, antes e depois de cada ensaio, à distância de 1 mm do tarugo, na profundidade programada. Este procedimento garante o acionamento conjunto da alavanca do avanço e do sistema de aquisição.

- Trabalhar com um tempo de usinagem de 9 a 12 segundos para uma média de 4000 pontos adquiridos. Após, acionava-se a tecla “enter” parando o registro de dados antes do acionamento da alavanca do avanço;
- Visualizar a ferramenta antes e depois de cada ensaio e após a utilização, no microscópio estereoscópico;
- Verificar por tato, após cada ensaio, possíveis aquecimentos do material e ferramenta;
- Nomear os arquivos de aquisição gerados conforme aqui exemplificado: ensaio preliminar n.º. 5 e 20, seguem, respectivamente: **t4v1** e **t11v4**, onde:

O primeiro campo, letra “t”, corresponde ao ensaio preliminar (teste).

Observação: para o ensaio definitivo este item não aparece;

O segundo campo corresponde ao número da ferramenta de corte utilizada. Da ferramenta 1 até 9, um dígito, da 10 até 12 com dois dígitos;

O campo “v” do exemplo acima, corresponde ao ensaio preliminar de velocidade de corte;

O último campo corresponde ao número da sequência do ensaio da ferramenta, assim: 1 corresponde ao primeiro ensaio preliminar da ferramenta n.º. 4 e 4 corresponde ao quarto ensaio preliminar da ferramenta n.º. 11.

### **Ensaio A:**

Aqui, foram escolhidas as ferramentas de ângulo de saída de 30° e 40°, devido aos seguintes motivos: a condição de melhor acabamento, analisado no trabalho foram as de ângulo de saída de 25°. O fabricante deste material, “Polialden”, especifica como condição de usinagem de qualidade, com ângulo de saída de 5° até 30° e a teoria de usinagem verifica que quanto maior o ângulo de saída, menor a força de corte. Dado a configuração das engrenagens do recâmbio, adotou-se o avanço de 0,158 mm/rot. A Tabela 3.3 relaciona as condições de ensaios.

**Tabela 3.3-** Parâmetros relacionados com o ensaio “A”.

| Ensaio Nº | Ferramenta | Figura Anexo 2 | D [ mm ] | rpm  | Vc [ m/min ] | f [ mm/rot ] | a <sub>p</sub> [ mm ] | P <sub>co</sub> [ daN ] | P <sub>ce</sub> [ daN ] |
|-----------|------------|----------------|----------|------|--------------|--------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1         | 3          | 1              | 52       | 2240 | 366          | 0,158        | 2,0                   | 1,324                   | 1,678                   |
| 2         | 3          | 2              | 48       | 1800 | 271,4        |              |                       | 1,415                   | 1,682                   |
| 3         | 3          | 3              | 44       | 1120 | 154,8        |              |                       | 2,051                   | 1,867                   |
| 4         | 3          | 4              | 40       | 900  | 113,1        |              |                       | 2,258                   | 2,037                   |
| 5         | 4          | 5              | 52       | 2240 | 366          |              |                       | 1,661                   | 1,612                   |
| 6         | 4          | 6              | 48       | 1800 | 271,4        |              |                       | 1,830                   | 1,645                   |
| 7         | 4          | 7              | 44       | 1120 | 154,8        |              |                       | 1,960                   | 1,998                   |
| 8         | 4          | 8              | 40       | 900  | 113,1        |              |                       | 1,882                   | 1,645                   |
| 9         | 7          | 9              | 52       | 2240 | 366          |              |                       | 1,830                   | 1,903                   |
| 10        | 7          | 10             | 48       | 1800 | 271,4        |              |                       | 2,116                   | 2,004                   |
| 11        | 7          | 11             | 44       | 1120 | 154,8        |              |                       | 1,843                   | 2,254                   |
| 12        | 7          | 12             | 40       | 900  | 113,1        |              |                       | 2,323                   | 2,350                   |
| 13        | 8          | 13             | 52       | 2240 | 366          |              |                       | 2,440                   | 2,408                   |
| 14        | 8          | 14             | 48       | 1800 | 271,4        |              |                       | 2,219                   | 2,311                   |
| 15        | 8          | 15             | 44       | 1120 | 154,8        |              |                       | 2,038                   | 2,105                   |
| 16        | 8          | 16             | 40       | 900  | 113,1        |              |                       | 2,310                   | 2,584                   |
| 17        | 11         | 17             | 52       | 2240 | 366          |              |                       | 1,622                   | 2,054                   |
| 18        | 11         | 18             | 48       | 1800 | 271,4        |              |                       | 1,350                   | 1,800                   |
| 19        | 11         | 19             | 44       | 1120 | 154,8        |              |                       | 1,350                   | 2,016                   |
| 20        | 11         | 20             | 40       | 900  | 113,1        |              |                       | 1,895                   | 2,360                   |
| 21        | 12         | 21             | 52       | 2240 | 366          |              |                       | 1,687                   | 2,106                   |
| 22        | 12         | 22             | 48       | 1800 | 271,4        |              |                       | 2,025                   | 2,070                   |
| 23        | 12         | 23             | 44       | 1120 | 154,8        |              |                       | 2,090                   | 1,799                   |
| 24        | 12         | 24             | 40       | 900  | 113,1        |              |                       | 1,661                   | 1,729                   |

**Ensaio B:**

Parâmetros adotados:

Ferramenta de corte nº.: 8;

Rotação [ rot/min ]: 45, 90, 180, 355, 710, 1400 e 2240;

Avanço [mm/rot ]: 0,048;

Diâmetro [ mm ]: 37

Profundidade [ mm ]: 2,0.

Condições selecionadas da menor até a maior rotação disponível, para verificação com o mais baixo valor do avanço, com o menor diâmetro de tarugo recebido. A Tabela 3.4 relaciona as condições de ensaio.

**Tabela 3.4-** Parâmetros relacionados com o ensaio “B”.

| Ensaio Nº | Ferramenta Nº. | Figura Axexo 2 | D [ mm ] | rpm  | Vc [ m/min ] | f [ mm/rot ] | a <sub>p</sub> [ mm ] | Pco [ daN ] | Pce [ daN ] |
|-----------|----------------|----------------|----------|------|--------------|--------------|-----------------------|-------------|-------------|
| 25        | 8              | 25             | 37       | 45   | 5,2          | 0,048        | 2                     | 2,674       | 2,703       |
| 26        |                | 26             |          | 90   | 10,5         |              |                       | 2,466       | 2,889       |
| 27        |                | 27             |          | 180  | 21,0         |              |                       | 1,389       | 3,108       |
| 28        |                | 28             |          | 355  | 41,2         |              |                       | 2,674       | 2,737       |
| 29        |                | 29             |          | 710  | 82,5         |              |                       | 2,531       | 2,578       |
| 30        |                | 30             |          | 1400 | 162,7        |              |                       | 2,206       | 2,249       |
| 31        |                | 31             |          | 2240 | 260,3        |              |                       | 2,103       | 2,099       |

**Ensaio C:**

Parâmetros adotados:

Ferramenta de corte nº.: 7;

Rotação [ rot/min ]: 2240;

Velocidade de corte [ m/min ]:366;

Avanço [mm/rot ]: 0,048, 0,158 e 0,340;

Diâmetro [ mm ]: 52

Profundidade [ mm ]: 2,0.

Condições selecionadas para verificar as condições do corte dentro destas faixas de avanço com uma alta velocidade de corte. A Tabela 3.5 relaciona as condições de ensaios.

**Tabela 3.5-** Parâmetros relacionados com o ensaio “C”.

| Ensaio Nº | Ferramenta Nº. | Figura Anexo 2 | D [ mm ] | rpm  | Vc [ m/min ] | f [ mm/rot ] | a <sub>p</sub> [ mm ] | P <sub>co</sub> [ daN ] | P <sub>ce</sub> [ daN ] |
|-----------|----------------|----------------|----------|------|--------------|--------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 32        | 7              | 32             | 52       | 2240 | 366,0        | 0,048        | 2                     | 2,674                   | 2,703                   |
| 33        |                | 33             |          |      |              | 0,158        |                       | 2,466                   | 2,889                   |
| 34        |                | 34             |          |      |              | 0,340        |                       | 1,389                   | 3,108                   |

### **Ensaio D:**

Parâmetros adotados:

Ferramenta de corte nº.: 3 e 4;

Rotação [ rot/min ]: 1800;

Velocidade de corte [ m/min ]: 232

Avanço [mm/rot ]: 0,048;

Diâmetro [ mm ]: 41

Profundidade [ mm ]: 3,0, 3,5 e 4,0.

Condições selecionadas para verificar condições do corte dentro de faixas de profundidades acima de 2,0 mm, com uma velocidade de corte considerada alta e com o menor avanço . A Tabela 3.6 relaciona as condições de ensaios.

**Tabela 3.6-** Parâmetros relacionados com o ensaio “D”.

| Ensaio Nº | Ferramenta Nº. | Figura Anexo 2 | D [ mm ] | rpm  | Vc [ m/min ] | f [ mm/rot ] | a <sub>p</sub> [ mm ] | Pco [ daN ] | Pce [ daN ] |
|-----------|----------------|----------------|----------|------|--------------|--------------|-----------------------|-------------|-------------|
| 35        | 3              | 35             | 41       | 1800 | 232,0        | 0,048        | 3,0                   | 1,311       | 1,720       |
| 36        | 3              | 36             |          |      |              |              | 3,5                   | 1,402       | 1,858       |
| 37        | 3              | 37             |          |      |              |              | 4,0                   | 1,506       | 1,958       |
| 38        | 4              | 38             |          |      |              |              | 3,0                   | 1,324       | 1,806       |
| 39        | 4              | 39             |          |      |              |              | 3,5                   | 1,402       | 1,962       |
| 40        | 4              | 40             |          |      |              |              | 4,0                   | 1,428       | 2,085       |

**Ensaio E:**

Condições selecionadas para definir confiabilidade dos resultados obtidos em função do material homogêneo e da célula de carga. O procedimento ocorreu da seguinte forma: foi dividido em três grupos e, nesses grupos tinham em comum um ensaio com os mesmos parâmetros e, com tarugos de barras diferentes para cada grupo, conforme descrito no item 3.4.1. Terminando o ensaio do primeiro grupo na sequência, iniciava-se o do segundo e após, o terceiro. Encerrado os ensaios eram comparados os resultados de força de corte, estatisticamente entre os grupos. A Tabela 3.7 relaciona as condições de ensaios e a Tabela 3.8 a análise de regressão.

**Tabela 3.7-** Parâmetros relacionados com o ensaio “E” para os três grupos de ensaios.

| Grupo 1   |                |                |          |      |              |                           |                       |             |             |
|-----------|----------------|----------------|----------|------|--------------|---------------------------|-----------------------|-------------|-------------|
| Ensaio Nº | Ferramenta Nº. | Figura Anexo 2 | D [ mm ] | rpm  | Vc [ m/min ] | f <sub>n</sub> [ mm/rot ] | a <sub>p</sub> [ mm ] | Pco [ daN ] | Pce [ daN ] |
| 41        | 1              | 41             | 52       | 45   | 7,4          | 0,218                     |                       | 4,582       | 4,609       |
| 42        | 2              | 42             | 52       | 45   | 7,4          | 0,218                     |                       | 3,608       | 3,594       |
| 43        | 5              | 43             | 52       | 45   | 7,4          | 0,218                     |                       | 3,673       | 3,641       |
| 44        | 6              | 44             | 41       | 1800 | 232,0        | 0,103                     | 2                     | 1,376       | 1,706       |
| 45        | 9              | 45             | 41       | 1800 | 232,0        | 0,158                     |                       | 2,038       | 2,215       |
| 46        | 10             | 46             | 41       | 1800 | 232,0        | 0,158                     |                       | 1,350       | 1,897       |
| 47        | 12             | 47             | 41       | 1800 | 232,0        | 0,218                     |                       | 2,661       | 2,612       |

| Grupo 2   |                |                |          |      |              |                           |                       |             |             |
|-----------|----------------|----------------|----------|------|--------------|---------------------------|-----------------------|-------------|-------------|
| Ensaio Nº | Ferramenta Nº. | Figura Anexo 2 | D [ mm ] | rpm  | Vc [ m/min ] | f <sub>n</sub> [ mm/rot ] | a <sub>p</sub> [ mm ] | Pco [ daN ] | Pce [ daN ] |
| 48        | 1              | 48             | 52       | 45   | 7,4          | 0,218                     |                       | 4,776       | 4,786       |
| 49        | 2              | 49             | 52       | 45   | 7,4          | 0,218                     |                       | 3,400       | 3,420       |
| 50        | 5              | 50             | 52       | 45   | 7,4          | 0,218                     |                       | 3,647       | 3,650       |
| 51        | 6              | 51             | 41       | 1800 | 232,0        | 0,103                     | 2                     | 1,467       | 1,718       |
| 52        | 9              | 52             | 41       | 1800 | 232,0        | 0,158                     |                       | 2,816       | 2,233       |
| 53        | 10             | 53             | 41       | 1800 | 232,0        | 0,158                     |                       | 1,648       | 1,872       |
| 54        | 12             | 54             | 41       | 1800 | 232,0        | 0,218                     |                       | 2,180       | 2,423       |

| Grupo 3   |                |                |          |      |              |                           |                       |             |             |
|-----------|----------------|----------------|----------|------|--------------|---------------------------|-----------------------|-------------|-------------|
| Ensaio Nº | Ferramenta Nº. | Figura Anexo 2 | D [ mm ] | rpm  | Vc [ m/min ] | f <sub>n</sub> [ mm/rot ] | a <sub>p</sub> [ mm ] | Pco [ daN ] | Pce [ daN ] |
| 55        | 1              | 55             | 52       | 45   | 7,4          | 0,218                     |                       | 6,593       | 5,059       |
| 56        | 2              | 56             | 52       | 45   | 7,4          | 0,218                     |                       | 2,518       | 3,689       |
| 57        | 5              | 57             | 52       | 45   | 7,4          | 0,218                     |                       | 2,700       | 3,805       |
| 58        | 6              | 58             | 41       | 1800 | 232,0        | 0,103                     | 2                     | 1,856       | 1,768       |
| 59        | 9              | 59             | 41       | 1800 | 232,0        | 0,158                     |                       | 2,803       | 2,305       |
| 60        | 10             | 60             | 41       | 1800 | 232,0        | 0,158                     |                       | 1,480       | 1,892       |
| 61        | 12             | 61             | 41       | 1800 | 232,0        | 0,218                     |                       | 2,829       | 2,599       |

**Tabela 3.8-** Análise de Regressão para o ensaio ‘E’ com um nível de confiança de 98%.

| Parâmetros          | Dados de força | Relação entre os Grupos |          |          |
|---------------------|----------------|-------------------------|----------|----------|
|                     |                | 1 com 2                 | 1 com 3  | 2 com 3  |
| R múltiplo          | Pco            | 0,947284                | 0,777025 | 0,831752 |
|                     | Pce            | 0,994263                | 0,997193 | 0,999042 |
| R quadrado          | Pco            | 0,897347                | 0,603767 | 0,691812 |
|                     | Pce            | 0,988559                | 0,994394 | 0,998085 |
| R quadrado ajustado | Pco            | 0,876817                | 0,524521 | 0,630174 |
|                     | Pce            | 0,986271                | 0,993273 | 0,997702 |
| Erro padrão         | Pco            | 0,437121                | 1,157684 | 1,020993 |
|                     | Pce            | 0,125969                | 0,099047 | 0,057885 |

Nos arquivos de aquisição gerados para este ensaio empregou-se a letra “r”, indicando ser o ensaio de repetibilidade.

Como a seguir, as conclusões extraídas dos ensaios preliminares foram:

- As ferramentas não tiveram problemas de desgastes e nem variações quanto à fixação, desde as maiores e menores velocidades, avanços e profundidade de corte;
- Aquecimento anormal verificado no sistema eixo árvore na rotação de 2240 rpm;
- A profundidade mínima de 2,0 mm foi ideal para trabalhos em todas as faixas de avanço;
- Ocorrências de curvas irregulares (ensaio “B”) nos valores registrados de força de corte, com amplitudes maiores para os ensaios 25 a 29, mesmo aumentando o tempo de usinagem para 16 segundos;
- Constatou-se pelo tipo de cavaco (de pequena largura e contínuo), que ao ser acionado a alavanca de avanço, existia um percurso mínimo do movimento do carro, da máquina de ensaio, onde o avanço era inferior ao acertado;
- Diâmetros a partir de 42 mm não ocorreram variações de amplitude acima do que era normal na força de corte ( $P_c$ );
- Os procedimentos adotados antes de iniciar o processo de corte foram eficientes, a menos da variação que ocorre com o carro do avanço ao ser acionado;
- Os resultados da repetibilidade confirmaram a confiabilidade dos resultados da média da força de corte ( $P_{ce}$ ) que foram superiores e expressivos em relação aos resultados da moda ( $P_{co}$ ). Portanto

para análise da influência dos parâmetros aqui estudados, adotou-se somente os valores de “Pce”.

#### **3.4.5. Metodologia adotada**

Com os dados da revisão bibliográfica e dos ensaios preliminares, pode-se definir, uma metodologia para verificação do comportamento da força de corte ( $P_c$ ), do material UHMWPE 6540, em relação aos parâmetros de usinagem: avanço, velocidade de corte e profundidade, como a seguir:

##### **Ensaio de Avanço:**

Ferramenta de corte nº.: todas;

Rotação [ rot/min ]: 1800;

Diâmetro [ mm ]: 42 ( 41 mm acertado );

Velocidade de corte [ m/min ]: 232;

Avanço [mm/rot ]: 0,048, 0,103, 0,158, 0,218 e 0,257;

Profundidade [ mm ]: 2,0.

##### **Ensaio de velocidade de corte:**

Ferramenta de corte nº.: todas;

Rotação [ rot/min ]: 45, 90, 180, 355, 710 e 1400;

Diâmetro [ mm ]: 53 ( 52 mm acertado );

Velocidade de corte [ m/min ]: 7,4, 14,7, 29,4, 58,0, 116,0 e 228,7;

Avanço [mm/rot ]: 0,218;

Profundidade [ mm ]: 2,0.

**Ensaio de profundidade:**

Ferramenta de corte nº.: 3, 7 e 11;

Rotação [ rot/min ]: 560;

Diâmetro [ mm ]: 61 ( 60 mm acertado );

Velocidade de corte [ m/min ]: 106,0;

Avanço [mm/rot ]: 0,158;

Profundidade [ mm ]: 3,50, 3,25, 3,00, 2,75, 2,50, 2,25 e 2,00;

**Verificação do desgaste das ferramenta de corte:**

Mostrar a condição da ferramenta de corte com seus respectivos tempos totais de usinagem, somados o preliminar e o definitivo, após o final de todos os ensaios. Com uma ampliação de 10 vezes, das arestas de corte e superfícies de saída e de folga.

**Procedimentos após os ensaios:**

Para cada ensaio, foram preparadas folhas de registro de dados e registradas as observações úteis para posterior análise e, cada folha de registro numeradas com a ordem dos ensaios, bem como recolhidos os cavacos com respectivo registro do arquivo gerado, conforme mostrado na Figura 3.15, que servirão para análise de trabalhos posteriores na relação destes com a condição da superfície gerada, apresentam-se no Anexo 4.



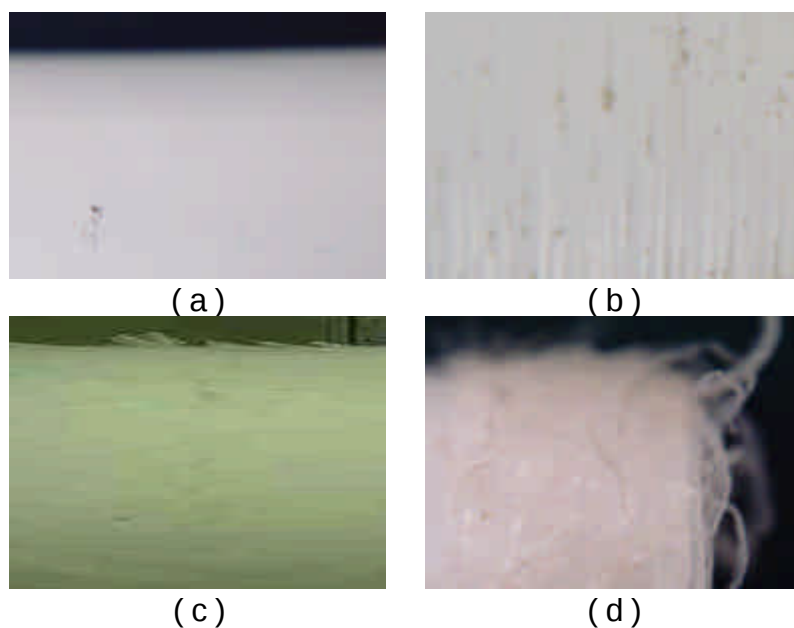
**Figura 3.15-** Exemplificação da amostra de cavacos.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de simplificar a apresentação dos resultados nas formas de figuras, tabelas e gráficos, empregou-se as seguintes simbologias e respectivas unidades:

| <b>Força Principal de Corte</b>                      |          |
|------------------------------------------------------|----------|
| <b>P<sub>ce</sub></b> = Força principal de corte     | [daN]    |
| <b>Parâmetros de corte</b>                           |          |
| <b>V<sub>c</sub></b> = Velocidade de corte           | [m/min]  |
| <b>f</b> = Avanço                                    | [mm/min] |
| <b>a<sub>p</sub></b> = Profundidade de corte         | [mm]     |
| <b>D</b> = Diâmetro da amostra                       | [mm]     |
| <b>Geometria da Ferramenta</b>                       |          |
| <b>c<sub>r</sub></b> = Ângulo de posição             | [Graus]  |
| <b>g<sub>o</sub></b> = Ângulo de saída               | [Graus]  |
| <b>A<sub>g</sub></b> = Superfície de saída           |          |
| <b>A<sub>a</sub></b> = Superfície principal de folga |          |
| <b>Condição da superfície Gerada</b>                 |          |
| <b>SL</b> = Superfície lisa sem marcas de avanço     |          |
| <b>SR</b> = Superfície com riscos de avanço          |          |
| <b>CP</b> = Cavaco adere parcialmente à superfície   |          |
| <b>CT</b> = Cavaco adere totalmente à superfície     |          |

A Figura 4.1 apresenta as condições da superfície gerada, verificada visualmente.



**Figura 4.1-** Condição de superfície gerada visualizada: ( a ) ‘SL’; ( b ) ‘SR’; ( c ) ‘CP’; ( d ) ‘CT’.

#### 4.1. Influência do Avanço

Os resultados dos ensaios da influência do avanço sobre a força principal de corte média, apresentam-se nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 e no Anexo 3, para as séries de grupos de ferramenta com ângulo de posição ( $\gamma_r$ )  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  e  $90^\circ$  e seguintes parâmetros de corte:  $D = 41,0$  mm;  $V_c = 232,0$  m/min;  $a_p = 2,0$  mm.

As Figuras de 4.5 a 4.9, apresentam as curvas de Pce em relação à  $\gamma_o$  para cada avanço ensaiado e diferentes ângulos de posição ( $\chi_r$ ).

**Tabela 4.1-** Resultados da medição de Pce para  $c_r = 60^\circ$ .

| Ensaio N°. | Ferramenta N°.                 | Figura N°.<br>ANEXO 3 | Avanço f<br>[mm/rot] | N°. de Pontos Lidos | Condição da Superfície | Pce [daN] |
|------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|------------------------|-----------|
| 1          | 1<br>( $\gamma_o = 10^\circ$ ) | 1                     | 0,048                | 5416                | SR                     | 2,274     |
| 2          |                                | 2                     | 0,103                | 4039                | SR                     | 2,776     |
| 3          |                                | 3                     | 0,158                | 4032                | SR                     | 3,077     |
| 4          |                                | 4                     | 0,218                | 4120                | SR                     | 2,896     |
| 5          |                                | 5                     | 0,257                | 3590                | SR                     | 4,036     |
| 6          | 2<br>( $\gamma_o = 20^\circ$ ) | 6                     | 0,048                | 3675                | SL                     | 1,431     |
| 7          |                                | 7                     | 0,103                | 3574                | SL                     | 1,717     |
| 8          |                                | 8                     | 0,158                | 3618                | SL                     | 1,961     |
| 9          |                                | 9                     | 0,218                | 3628                | SL                     | 2,449     |
| 10         |                                | 10                    | 0,257                | 3692                | SL                     | 2,889     |
| 11         | 3<br>( $\gamma_o = 30^\circ$ ) | 11                    | 0,048                | 3608                | CT                     | 1,453     |
| 12         |                                | 12                    | 0,103                | 3654                | SR                     | 1,519     |
| 13         |                                | 13                    | 0,158                | 3625                | SR                     | 1,652     |
| 14         |                                | 14                    | 0,218                | 3637                | SR                     | 2,059     |
| 15         |                                | 15                    | 0,257                | 3621                | CP                     | 2,527     |
| 16         | 4<br>( $\gamma_o = 40^\circ$ ) | 16                    | 0,048                | 3603                | CP                     | 1,615     |
| 17         |                                | 17                    | 0,103                | 3638                | SR                     | 1,535     |
| 18         |                                | 18                    | 0,158                | 3638                | SR                     | 1,804     |
| 19         |                                | 19                    | 0,218                | 3600                | SR                     | 2,229     |
| 20         |                                | 20                    | 0,257                | 3600                | SR                     | 2,367     |

Na Tabela 4.1, verifica-se que as melhores condições de superfícies geradas SL, foram para a ferramenta de  $\gamma_o = 20^\circ$ , para todas as faixas de avanço. A pior condição CT, foi  $\gamma_o = 30^\circ$  e  $f = 0,048$  mm/rot e como CP, para os ensaios 15 e 16. Pode-se observar, que para os  $\gamma_o = 10^\circ$  e  $20^\circ$ , as condições de superfície foram sem aderência de cavaco na superfície, para todas as faixas de avanço. Quanto a variação de Pce, não se observou e constatou uma relação com a condição da superfície gerada, como também, se a condição de superfície foi influenciada com a variação do avanço ou com o aumento de  $\gamma_o$ .

**Tabela 4.2-** Resultados da medição de Pce para  $c_r = 75^\circ$ .

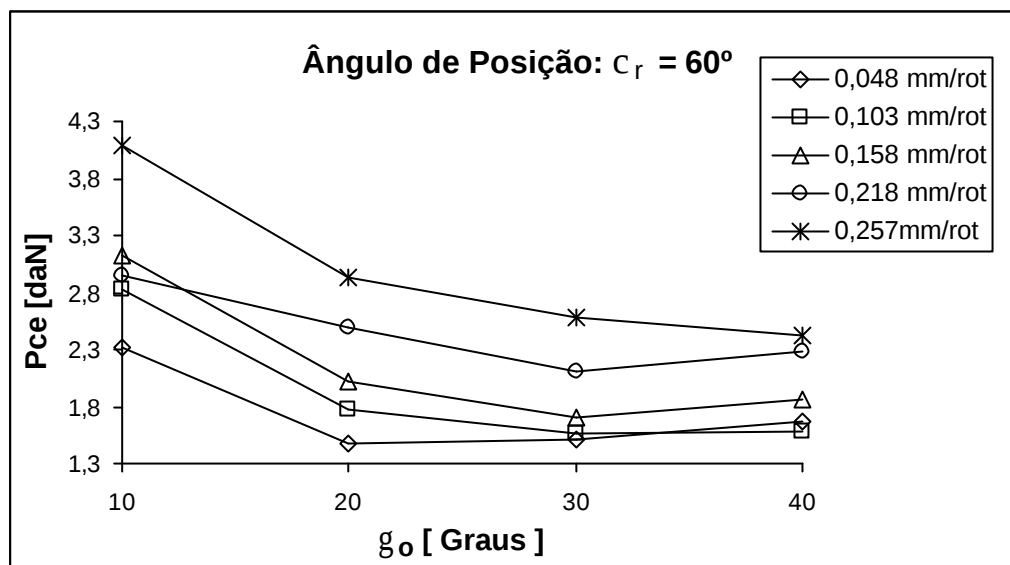
| Ensaio N°. | Ferramenta N°.                 | Figura N°.<br>ANEXO 3 | Avanço f<br>[mm/rot] | N°. de Pontos Lidos | Condição da Superfície | Pce [daN] |
|------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|------------------------|-----------|
| 21         | 5<br>( $\gamma_o = 10^\circ$ ) | 21                    | 0,048                | 3633                | CP                     | 1,417     |
| 22         |                                | 22                    | 0,103                | 3621                | SR                     | 1,652     |
| 23         |                                | 23                    | 0,158                | 2468                | SL                     | 1,984     |
| 24         |                                | 24                    | 0,218                | 3610                | SL                     | 2,874     |
| 25         |                                | 25                    | 0,257                | 3515                | SL                     | 3,227     |
| 26         | 6<br>( $\gamma_o = 20^\circ$ ) | 26                    | 0,048                | 3357                | SL                     | 1,525     |
| 27         |                                | 27                    | 0,103                | 3561                | SR                     | 1,768     |
| 28         |                                | 28                    | 0,158                | 3593                | SR                     | 1,929     |
| 29         |                                | 29                    | 0,218                | 3581                | SR                     | 1,699     |
| 30         |                                | 30                    | 0,257                | 3593                | SR                     | 1,745     |
| 31         | 7<br>( $\gamma_o = 30^\circ$ ) | 31                    | 0,048                | 3520                | SL                     | 1,486     |
| 32         |                                | 32                    | 0,103                | 3634                | CP                     | 1,662     |
| 33         |                                | 33                    | 0,158                | 3578                | CP                     | 1,664     |
| 34         |                                | 34                    | 0,218                | 3585                | CP                     | 1,922     |
| 35         |                                | 35                    | 0,257                | 3735                | CP                     | 1,952     |
| 36         | 8<br>( $\gamma_o = 40^\circ$ ) | 36                    | 0,048                | 3675                | CP                     | 1,586     |
| 37         |                                | 37                    | 0,103                | 3670                | CP                     | 1,800     |
| 38         |                                | 38                    | 0,158                | 3604                | CP                     | 2,406     |
| 39         |                                | 39                    | 0,218                | 3625                | CP                     | 2,781     |
| 40         |                                | 40                    | 0,257                | 3570                | CT                     | 2,765     |

Na Tabela 4.2, verifica-se que as melhores condições de superfície sem aderência de cavaco, para as variações de avanço, foram para  $\gamma_o = 10^\circ$  e  $20^\circ$ , com exceção para o ensaio 21, destacando as condições de SL, para os ensaios 23 a 26 e 31. As piores condições foram para os  $\gamma_o = 30^\circ$  e  $40^\circ$  e com um caso de CT no ensaio 40. Não foi observado e constatado se a variação de f interferiu na condição de superfície, como a condição de superfície influenciou na variação de Pce. Mas teve uma tendência que o aumento  $\gamma_o$ , após  $20^\circ$ , modificou a condição de superfície gerada, com aderência de cavaco com o aumento.

**Tabela 4.3-** Resultados da medição de Pce para  $c_r = 90^\circ$ .

| Ensaio N°. | Ferramenta N°.                  | Figura N°.<br>ANEXO 3 | Avanço f<br>[mm/rot] | N°. de Pontos Lidos | Condição da Superfície | Pce [daN] |
|------------|---------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|------------------------|-----------|
| 41         | 9<br>( $\gamma_o = 10^\circ$ )  | 41                    | 0,048                | 3675                | SL                     | 1,593     |
| 42         |                                 | 42                    | 0,103                | 3610                | SL                     | 1,840     |
| 43         |                                 | 43                    | 0,158                | 3615                | SL                     | 1,958     |
| 44         |                                 | 44                    | 0,218                | 3614                | SR                     | 2,037     |
| 45         |                                 | 45                    | 0,257                | 3671                | SR                     | 2,649     |
| 46         | 10<br>( $\gamma_o = 20^\circ$ ) | 46                    | 0,048                | 3578                | CP                     | 1,674     |
| 47         |                                 | 47                    | 0,103                | 3643                | CP                     | 2,071     |
| 48         |                                 | 48                    | 0,158                | 3606                | CP                     | 1,930     |
| 49         |                                 | 49                    | 0,218                | 3578                | SR                     | 1,730     |
| 50         |                                 | 50                    | 0,257                | 3667                | SR                     | 2,027     |
| 51         | 11<br>( $\gamma_o = 30^\circ$ ) | 51                    | 0,048                | 3396                | CP                     | 1,686     |
| 52         |                                 | 52                    | 0,103                | 3609                | CP                     | 1,836     |
| 53         |                                 | 53                    | 0,158                | 3940                | CP                     | 2,067     |
| 54         |                                 | 54                    | 0,218                | 3612                | CT                     | 2,129     |
| 55         |                                 | 55                    | 0,257                | 3653                | CT                     | 2,188     |
| 56         | 12<br>( $\gamma_o = 40^\circ$ ) | 56                    | 0,048                | 4595                | CP                     | 2,098     |
| 57         |                                 | 57                    | 0,103                | 3666                | CP                     | 1,856     |
| 58         |                                 | 58                    | 0,158                | 3701                | CP                     | 2,133     |
| 59         |                                 | 59                    | 0,218                | 3671                | CP                     | 2,260     |
| 60         |                                 | 60                    | 0,257                | 2768                | SR                     | 2,303     |

Na Tabela 4.3, verifica-se as melhores condições de superfície, sem aderência de cavaco foi no  $\gamma_o = 10^\circ$ , para todas as faixas de avanços, destacando os ensaios de 41 a 43, com condição SL. Para o  $\gamma_o = 20^\circ$  e  $40^\circ$ , temos os ensaios 49, 50 e 60 como condição de superfície SR. As piores condições CT, observou somente nos ensaios 54 e 55, nos maiores avanços, diferenciando dos outros ensaios. Constatou-se uma tendência que o aumento do  $\gamma_o$ , após  $10^\circ$ , influenciou na condição de superfície gerada, aumentando a aderência com o aumento de  $\gamma_o$ .



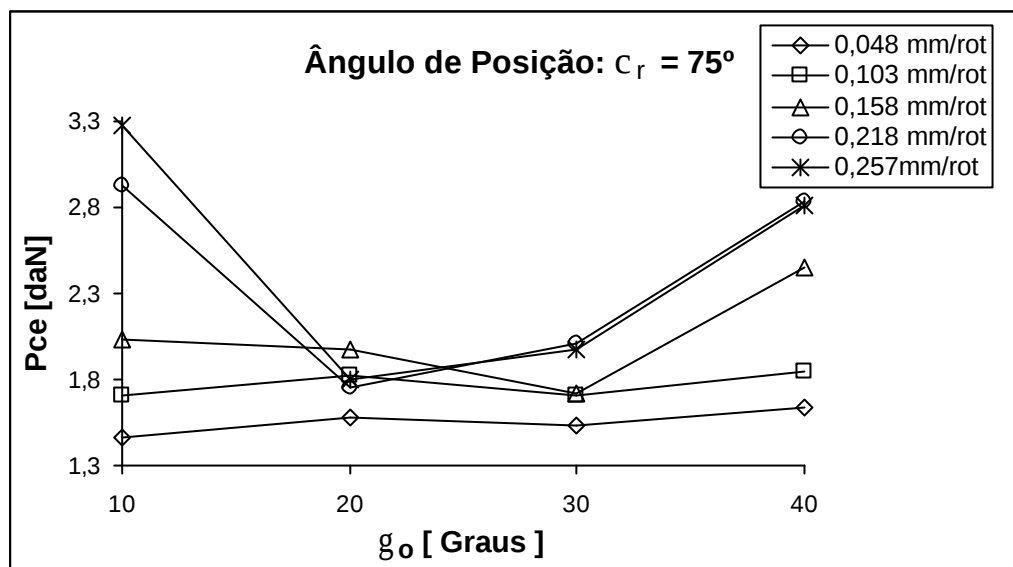
**Figura 4.2-** Variação de Pce em função  $\gamma_o$  para  $c_r = 60^\circ$  e diferentes avanços.

Pelo gráfico da Figura 4.2, pode-se observar uma tendência geral de diminuição significativa da força de corte com o aumento do ângulo saída para todas as faixas de avanço de  $10^\circ$  para  $20^\circ$ .

Com o aumento  $\gamma_o$  de  $20^\circ$  para  $40^\circ$ , para o avanço de 0,048 mm/rot, o valor de Pce não teve variação significativa.

Com o aumento de  $\gamma_o$  de  $30^\circ$  para  $40^\circ$ , não observa-se uma variação significativa de Pce, para os três menores avanços.

Para o  $\gamma_o = 20^\circ$ , pode-se observar uma tendência de crescimento progressivo de Pce com o aumento de f, mostrando um comportamento mais estável.



**Figura 4.3-** Variação de Pce em função “ $\gamma_0$ ” para  $c_r = 75^\circ$  e diferentes avanços.

No gráfico da Figura 4.3, observa-se para o  $\gamma_0 = 10^\circ$ , um aumento significativo de Pce com o aumento de  $f$ .

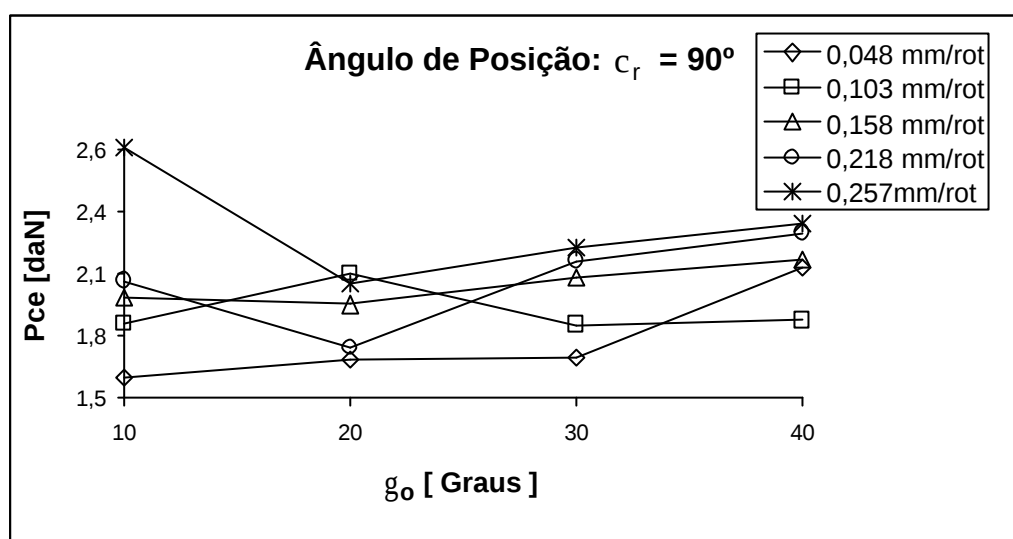
Pode-se notar, que as curvas dos avanços 0,048 e 0,103 mm/rot tiveram comportamento semelhante, sem variação significativa da força com o aumento  $\gamma_0$ .

Com o aumento de  $\gamma_0$  de  $10^\circ$  para  $20^\circ$ , Pce decresceu para os dois maiores  $f$ , se manteve constante para  $f = 0,158$  mm/rot e aumentou para os avanços inferiores a este.

Com o aumento de  $\gamma_0$  de  $20^\circ$  para  $30^\circ$ , Pce aumentou para os dois maiores  $f$ , decresceu para  $f = 0,158$  mm/rot e se manteve para os avanços inferiores a este.

Com o aumento de  $\gamma_o$  de  $30^\circ$  para  $40^\circ$ , Pce aumentou para todos os f, sendo mais significativo, para os três maiores.

Nas curvas de avanços 0,218 e 0,257 mm/rot, verifica-se uma grande proximidade dos valores de Pce nos ângulos de  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $40^\circ$ .

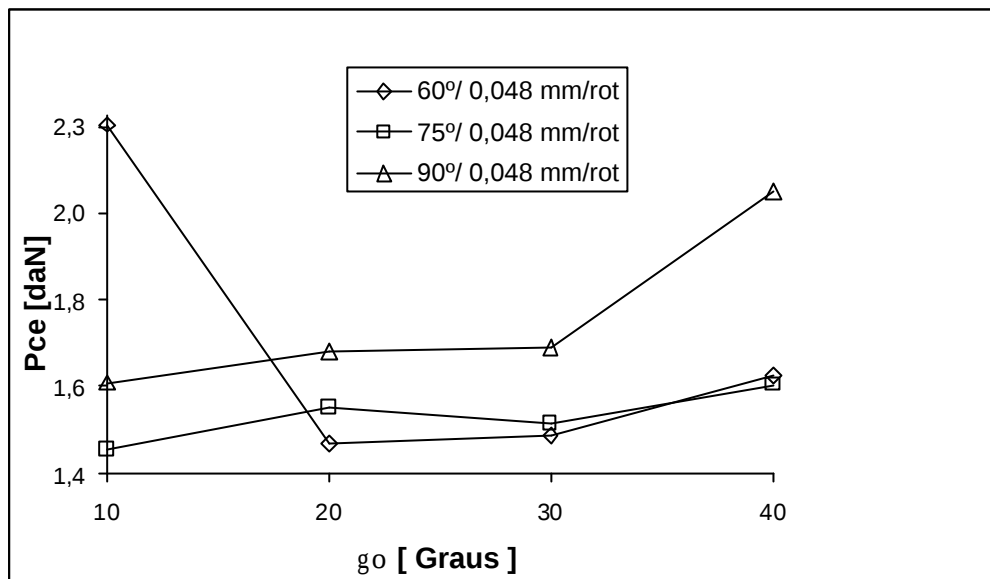


**Figura 4.4-** Variação de Pce em função de saída " $g_o$ " para  $c_r = 90^\circ$  e diferentes avanços.

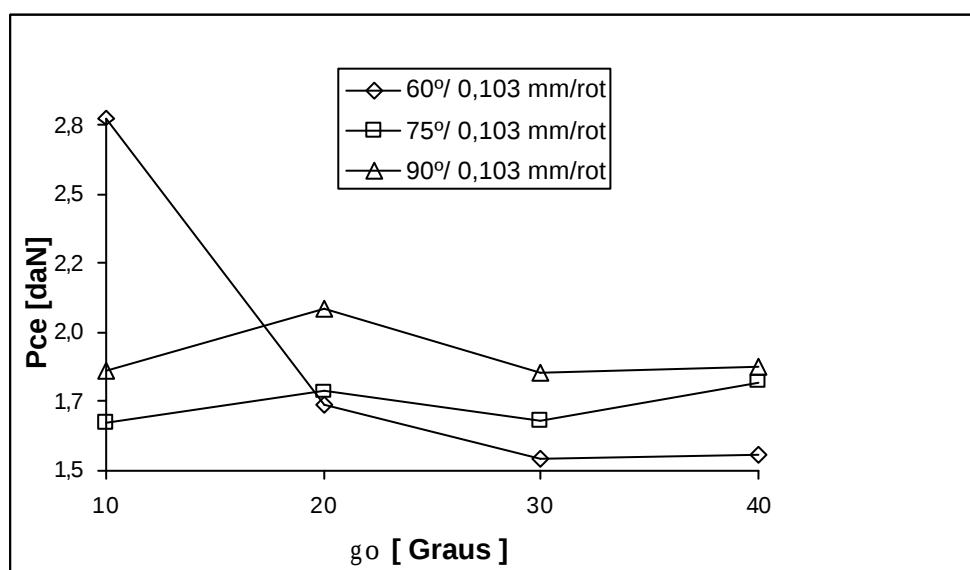
No gráfico da Figura 4.4, observa-se para  $f = 0,218$  mm/rot e  $0,257$  mm/rot, tem-se para  $\gamma_o$  de  $20^\circ$ , a melhor condição com a diminuição significativa de Pce.

Para  $f = 0,103$  mm/rot e  $0,158$  mm/rot, a variação do valor de Pce foi pequena, com o aumento de  $\gamma_o$ , exceto para  $f = 0,103$  mm/rot em  $\gamma_o = 20^\circ$ .

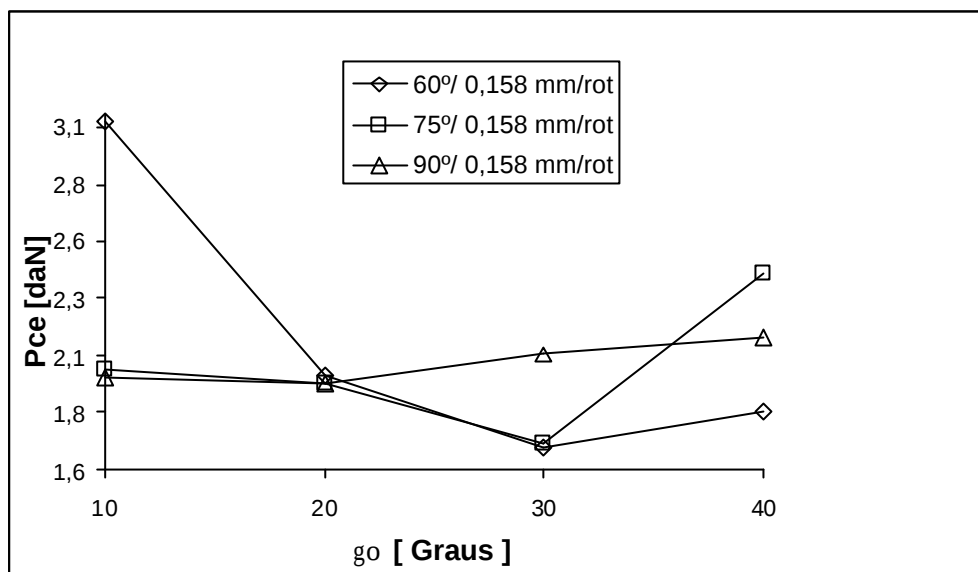
Para o  $f = 0,048$  mm/rot, verificou-se que para os ângulos de  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $30^\circ$ , não ocorre um aumento significativo de Pce, porém Pce aumentou consideravelmente para  $\gamma_o = 40^\circ$ .



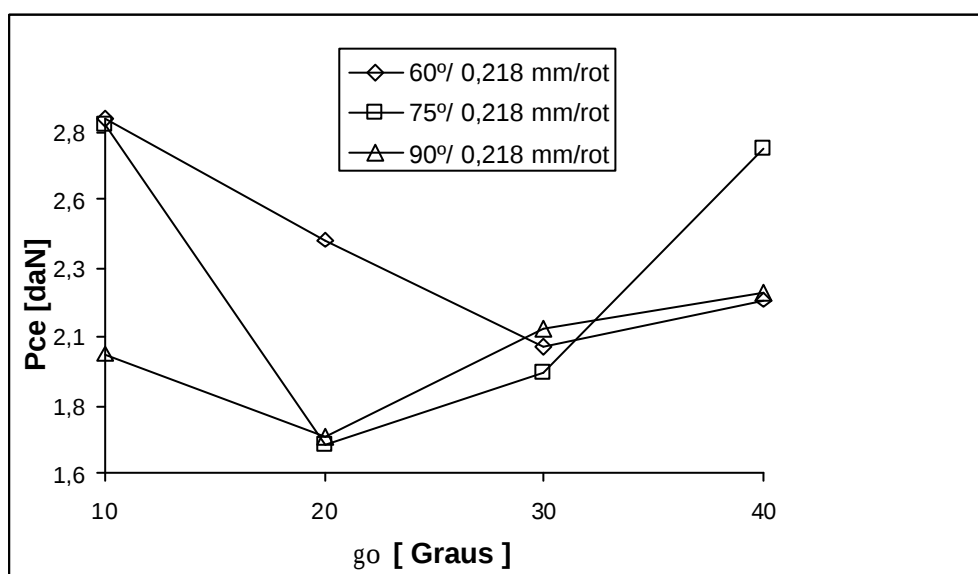
**Figura 4.5-** Variação de  $P_{ce}$  em função de  $g_o$  para  $f = 0,048$  mm/rot e diferentes  $c_r$ .



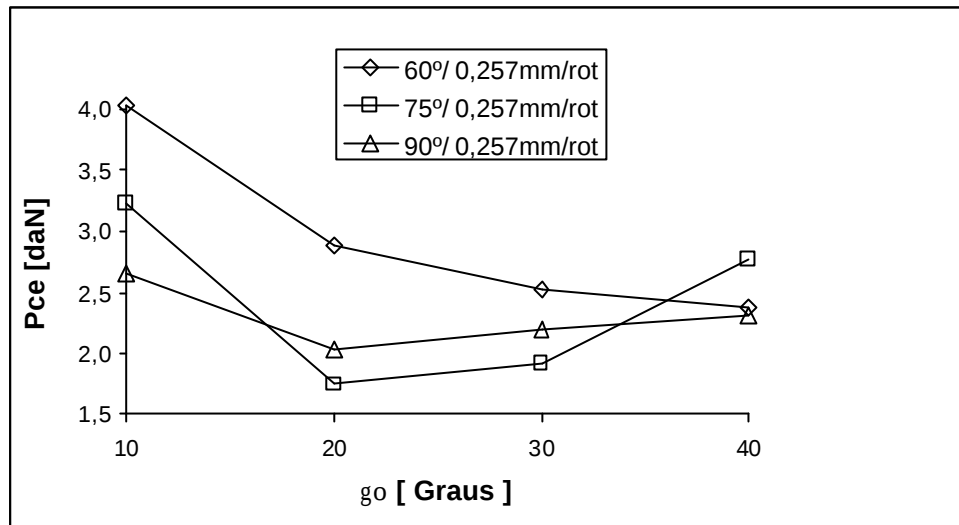
**Figura 4.6-** Variação de  $P_{ce}$  em função de  $g_o$  para  $f = 0,103$  mm/rot e diferentes  $c_r$ .



**Figura 4.7-** Variação de  $P_{ce}$  em função de  $g_o$  para  $f = 0,158$  mm/rot e diferentes  $c_r$ .



**Figura 4.8-** Variação de  $P_{ce}$  em função de  $g_o$  para  $f = 0,218$  mm/rot e diferentes  $c_r$ .



**Figura 4.9-** Variação de Pce em função de  $g_o$  para  $f = 0,257$  mm/rot e diferentes  $c_r$ .

Das Figuras de 4.5 à 4.9, pode-se observar que:

Para  $f = 0,048$  mm/rot, em  $\chi_r = 60^\circ$ , tem-se uma diminuição significativa de Pce de  $\gamma_o = 10^\circ$  para  $20^\circ$ . No  $\gamma_o = 10^\circ$ , o ângulo de posição mostrou favorável para  $\chi_r = 75^\circ$  e  $90^\circ$ . Com exceção de  $\gamma_o = 10^\circ$  e  $\chi_r = 60^\circ$ , de modo geral Pce aumentou com o aumento de  $\gamma_o$  e com o aumento de  $\chi_r$ .

Para  $f = 0,103$  mm/rot, em  $\chi_r = 60^\circ$ , tem-se uma diminuição significativa de Pce de  $\gamma_o = 10^\circ$  para  $20^\circ$ . De forma geral, exceto  $\chi_r = 60^\circ$  e  $\gamma_o = 10^\circ$ , tem-se que aumentando  $\chi_r$ , aumenta Pce para todos os  $\gamma_o$ . No  $\gamma_o = 10^\circ$ ,  $\chi_r$  mostrou-se favorável para  $\chi_r = 75^\circ$  e  $90^\circ$ .

Para  $f = 0,158$  mm/rot, em  $\chi_r = 60^\circ$ , tem-se uma diminuição significativa de Pce de  $\gamma_o = 10^\circ$  para  $30^\circ$ . No  $\gamma_o = 30^\circ$ , tem-se uma queda

acentuada de Pce, exceto para  $\chi_r = 90^\circ$ . No  $\gamma_o = 40^\circ$ , tem  $\chi_r$  desfavorável para  $\chi_r = 75^\circ$ .

Para  $f = 0,218$  mm/rot, em  $\chi_r = 60^\circ$ , tem-se uma diminuição significativa de Pce de  $\gamma_o = 10^\circ$  para  $30^\circ$ , onde para  $\chi_r = 75^\circ$ , tem-se do  $\gamma_o = 10^\circ$  para  $20^\circ$ . No  $\gamma_o = 10^\circ$ ,  $\chi_r$  mostrou-se favorável para  $\chi_r = 90^\circ$ . No  $\gamma_o = 40^\circ$ ,  $\chi_r$  mostrou-se desfavorável para  $\chi_r = 75^\circ$ . No  $\gamma_o = 20^\circ$ ,  $\chi_r$  mostrou-se favorável para  $\chi_r = 75^\circ$  e  $90^\circ$ .

Para  $f = 0,257$  mm/rot, para  $\chi_r = 60^\circ$ , tem-se uma diminuição de Pce de  $\gamma_o = 10^\circ$  para  $40^\circ$ . No  $\gamma_o = 20^\circ$  e  $30^\circ$ ,  $\chi_r$  mostrou-se favorável para  $\chi_r = 75^\circ$  e desfavorável para  $\gamma_o = 40^\circ$ .

De modo geral, os resultados apresentados nas Figuras 4.5 à 4.9, podemos concluir:

Que os valores de Pce para  $\chi_r = 60^\circ$  em  $\gamma_o = 10^\circ$ , está, provavelmente, ao aumento de do atrito em  $A\gamma$ ,  $A\alpha$  e da tensão de cisalhamento.

Para o  $f = 0,048$  mm/rot, para  $\gamma_o = 20^\circ$  e  $f = 0,103$  mm/rot e  $\gamma_o = 30^\circ$ , observou-se, como condição mais estável, somente, um crescimento progressivo de Pce com o aumento de  $\chi_r$ .

Para o  $\gamma_o = 10^\circ$ , quanto maior o  $f$ , com a diminuição de  $\chi_r$  resulta em maiores valores de Pce.

Para  $\gamma_o = 40^\circ$ , para o aumento de  $f$ , observou-se um aumento de  $P_{ce}$  para  $\chi_r = 75^\circ$  e diminuição de  $P_{ce}$  para  $\chi_r = 90^\circ$ .

Para  $\gamma_o = 20^\circ$  e  $30^\circ$  e, todos os  $\chi_r$ , de modo geral, para todos os  $f$  testados, observou-se as condições mais favoráveis de menores valores de  $P_{ce}$ .

Para  $\gamma_o = 20^\circ$  e  $\chi_r = 60^\circ$ , observou-se um aumento mais significativo de  $P_{ce}$ , com o aumento de  $f$ , diferenciando dos demais no  $\chi_r$ .

#### **4.2. Influência da Velocidade de Corte**

Os resultados dos ensaios da influência da velocidade de corte sobre a força principal de corte média, apresentam-se nas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6, Figuras 4.10, 4.11 e 4.12, no Anexo 3, para as séries de grupos de ferramenta com ângulo de posição ( $c_r$ )  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  e  $90^\circ$  e seguintes parâmetros de corte:  $D = 51,0$  mm;  $f = 0,218$  mm/rot;  $a_p = 2,0$  mm.

As Figuras de 4.13 a 4.18, apresentam as curvas de  $P_{ce}$  em relação ao  $g_o$  para cada velocidade de corte e diferentes ângulos de posição ( $c_r$ ).

**Tabela 4.4-** Resultados da medição de **Pce** para  $c_r = 60^\circ$ .

| Ensaio N°. | Ferramenta N°.                 | Figura N°.<br>ANEXO 3 | Velocidade de Corte Vc [m/min] | N°. de Pontos Lidos | Condição da Superfície | Pce [daN] |
|------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------|-----------|
| 61         | 1<br>( $\gamma_o = 10^\circ$ ) | 61                    | 7,4                            | 5552                | SL                     | 4,609     |
| 62         |                                | 62                    | 14,7                           | 5597                | SL                     | 4,801     |
| 63         |                                | 63                    | 29,4                           | 5449                | SL                     | 4,647     |
| 64         |                                | 64                    | 58,0                           | 5390                | SL                     | 4,430     |
| 65         |                                | 65                    | 116,0                          | 5535                | SR                     | 3,113     |
| 66         |                                | 66                    | 228,7                          | 5629                | SR                     | 2,138     |
| 67         | 2<br>( $\gamma_o = 20^\circ$ ) | 67                    | 7,4                            | 6646                | SL                     | 3,594     |
| 68         |                                | 68                    | 14,7                           | 5418                | SL                     | 3,522     |
| 69         |                                | 69                    | 29,4                           | 5448                | SR                     | 3,563     |
| 70         |                                | 70                    | 58,0                           | 5433                | SR                     | 3,381     |
| 71         |                                | 71                    | 116,0                          | 5440                | SR                     | 2,463     |
| 72         |                                | 72                    | 228,7                          | 5192                | SR                     | 1,681     |
| 73         | 3<br>( $\gamma_o = 30^\circ$ ) | 73                    | 7,4                            | 5479                | SL                     | 3,167     |
| 74         |                                | 74                    | 14,7                           | 5478                | SL                     | 2,971     |
| 75         |                                | 75                    | 29,4                           | 5511                | SL                     | 3,310     |
| 76         |                                | 76                    | 58,0                           | 5460                | SR                     | 2,870     |
| 77         |                                | 77                    | 116,0                          | 5449                | SR                     | 2,295     |
| 78         |                                | 78                    | 228,7                          | 5278                | SR                     | 2,312     |
| 79         | 4<br>( $\gamma_o = 40^\circ$ ) | 79                    | 7,4                            | 5529                | SL                     | 2,635     |
| 80         |                                | 80                    | 14,7                           | 5387                | SL                     | 2,550     |
| 81         |                                | 81                    | 29,4                           | 5514                | SL                     | 2,678     |
| 82         |                                | 82                    | 58,0                           | 5411                | SL*                    | 2,460     |
| 83         |                                | 83                    | 116,0                          | 5535                | SR                     | 2,456     |
| 84         |                                | 84                    | 228,7                          | 5768                | SR                     | 2,160     |

**Observação:** No item “Condição da Superfície”, no ensaio 82, assinalado com “\*”, representa a melhor condição de superfície, verificada visualmente, diferenciando das condições “SL”.

Na Tabela 4.4, observa-se que não ocorreram casos de aderência de cavaco na superfície, para todos os  $\gamma_o$  e Vc.

Tem-se no ensaio 82, uma condição, que representa a melhor condição visualizada de SL.

Observa-se, de modo geral, para todos os  $\gamma_o$ , que para pequenas Vc, no caso Vc = 7,4 e 14,7 m/min, tem-se as condições de SL e, para os duas maiores Vc, para todos os  $\gamma_o$ , tem-se a condição SR.

Pode-se afirmar, que há uma tendência de termos uma superfície gerada com aderência de cavaco para as maiores  $V_c$ .

**Tabela 4.5-** Resultados da medição de **Pce** para  $c_r = 75^\circ$ .

| Ensaio N°. | Ferramenta N°.                 | Figura N°.<br>ANEXO 3 | Velocidade de Corte $V_c$ [m/min] | N°. de Pontos Lidos | Condição da Superfície | Pce [daN] |
|------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------------|-----------|
| 85         | 5<br>( $\gamma_o = 10^\circ$ ) | 85                    | 7,4                               | 5492                | SL                     | 3,641     |
| 86         |                                | 86                    | 14,7                              | 5323                | SL                     | 3,329     |
| 87         |                                | 87                    | 29,4                              | 5524                | SL                     | 3,211     |
| 88         |                                | 88                    | 58,0                              | 5665                | SL                     | 3,383     |
| 89         |                                | 89                    | 116,0                             | 5463                | SR                     | 3,282     |
| 90         |                                | 90                    | 228,7                             | 5392                | SR                     | 2,435     |
| 91         | 6<br>( $\gamma_o = 20^\circ$ ) | 91                    | 7,4                               | 5529                | SL                     | 3,993     |
| 92         |                                | 92                    | 14,7                              | 5524                | SL                     | 4,002     |
| 93         |                                | 93                    | 29,4                              | 5545                | SL                     | 3,714     |
| 94         |                                | 94                    | 58,0                              | 5290                | SL                     | 4,201     |
| 95         |                                | 95                    | 116,0                             | 5484                | SR                     | 2,464     |
| 96         |                                | 96                    | 228,7                             | 5445                | SR                     | 1,865     |
| 97         | 7<br>( $\gamma_o = 30^\circ$ ) | 97                    | 7,4                               | 5615                | SL                     | 4,207     |
| 98         |                                | 98                    | 14,7                              | 5495                | SL                     | 3,470     |
| 99         |                                | 99                    | 29,4                              | 5450                | SL                     | 3,504     |
| 100        |                                | 100                   | 58,0                              | 5459                | SL                     | 3,332     |
| 101        |                                | 101                   | 116,0                             | 5453                | SR                     | 2,866     |
| 102        |                                | 102                   | 228,7                             | 5466                | SR                     | 2,287     |
| 103        | 8<br>( $\gamma_o = 40^\circ$ ) | 103                   | 7,4                               | 5348                | SL                     | 2,608     |
| 104        |                                | 104                   | 14,7                              | 5420                | SL                     | 2,677     |
| 105        |                                | 105                   | 29,4                              | 5471                | SL                     | 2,710     |
| 106        |                                | 106                   | 58,0                              | 5513                | SL                     | 2,833     |
| 107        |                                | 107                   | 116,0                             | 5428                | SR                     | 2,585     |
| 108        |                                | 108                   | 228,7                             | 4943                | CP                     | 2,494     |

Na Tabela 4.5, observa-se um caso de aderência de cavaco, no ensaio 108.

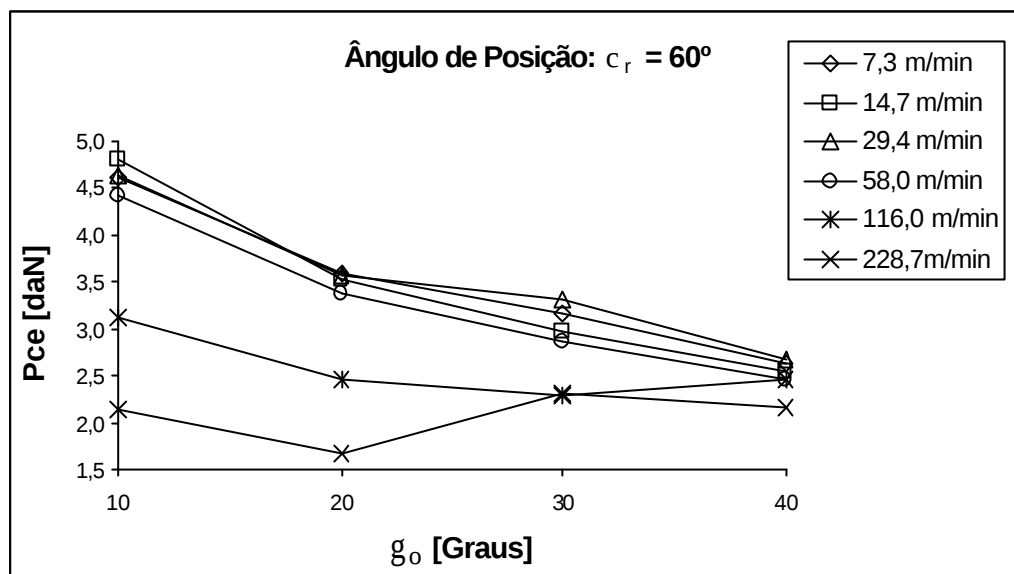
Como condição para todos  $\gamma_o$ , que para  $V_c = 7,4$  a  $58$  m/min, tem-se as melhores condições com SL.

Pode-se afirmar, que há uma tendência de termos uma condição de pior superfície gerada para as duas maiores  $V_c$ , para todos  $\gamma_o$ .

**Tabela 4.6-** Resultados da medição de **Pce** para  $c_r = 90^\circ$ .

| Ensaio N°. | Ferramenta N°.                  | Figura N°.<br>ANEXO 3 | Velocidade de Corte $V_c$<br>[m/min] | N°. de Pontos Lidos | Condição da Superfície | Pce [daN] |
|------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|---------------------|------------------------|-----------|
| 109        | 9<br>( $\gamma_o = 10^\circ$ )  | 109                   | 7,4                                  | 5466                | SL                     | 5,124     |
| 110        |                                 | 110                   | 14,7                                 | 5484                | SL                     | 4,322     |
| 111        |                                 | 111                   | 29,4                                 | 5523                | SL                     | 4,086     |
| 112        |                                 | 112                   | 58,0                                 | 5554                | SL                     | 3,954     |
| 113        |                                 | 113                   | 116,0                                | 5496                | SR                     | 3,762     |
| 114        |                                 | 114                   | 228,7                                | 6135                | SR                     | 2,629     |
| 115        | 10<br>( $\gamma_o = 20^\circ$ ) | 115                   | 7,4                                  | 5508                | CP                     | 3,942     |
| 116        |                                 | 116                   | 14,7                                 | 5471                | CP                     | 4,123     |
| 117        |                                 | 117                   | 29,4                                 | 5537                | CP                     | 3,851     |
| 118        |                                 | 118                   | 58,0                                 | 5558                | SL                     | 3,422     |
| 119        |                                 | 119                   | 116,0                                | 5447                | SR                     | 2,853     |
| 120        |                                 | 120                   | 228,7                                | 5489                | SR                     | 2,089     |
| 121        | 11<br>( $\gamma_o = 30^\circ$ ) | 121                   | 7,4                                  | 5422                | CP                     | 4,404     |
| 122        |                                 | 122                   | 14,7                                 | 5538                | CP                     | 3,940     |
| 123        |                                 | 123                   | 29,4                                 | 5439                | CP                     | 3,693     |
| 124        |                                 | 124                   | 58,0                                 | 5467                | SL                     | 3,517     |
| 125        |                                 | 125                   | 116,0                                | 5719                | SR                     | 2,283     |
| 126        |                                 | 126                   | 228,7                                | 2205                | SR                     | 2,070     |
| 127        | 12<br>( $\gamma_o = 40^\circ$ ) | 127                   | 7,4                                  | 5380                | SL                     | 2,617     |
| 128        |                                 | 128                   | 14,7                                 | 5535                | SR                     | 2,413     |
| 129        |                                 | 129                   | 29,4                                 | 5474                | SR                     | 2,074     |
| 130        |                                 | 130                   | 58,0                                 | 5416                | SL                     | 2,000     |
| 131        |                                 | 131                   | 116,0                                | 5307                | CP                     | 2,315     |
| 132        |                                 | 132                   | 228,7                                | 6789                | CP                     | 1,861     |

Na Tabela 4.6, observa-se para  $\gamma_o = 10^\circ$ , as melhores condições de superfície gerada, para todas  $V_c$ . Para  $V_c = 58$  m/min, tem-se como SL, para todos  $\gamma_o$ . Observa-se uma tendência da influência da superfície gerada com o aumento da  $\gamma_o$ , após  $10^\circ$  e, não do aumento da  $V_c$ .



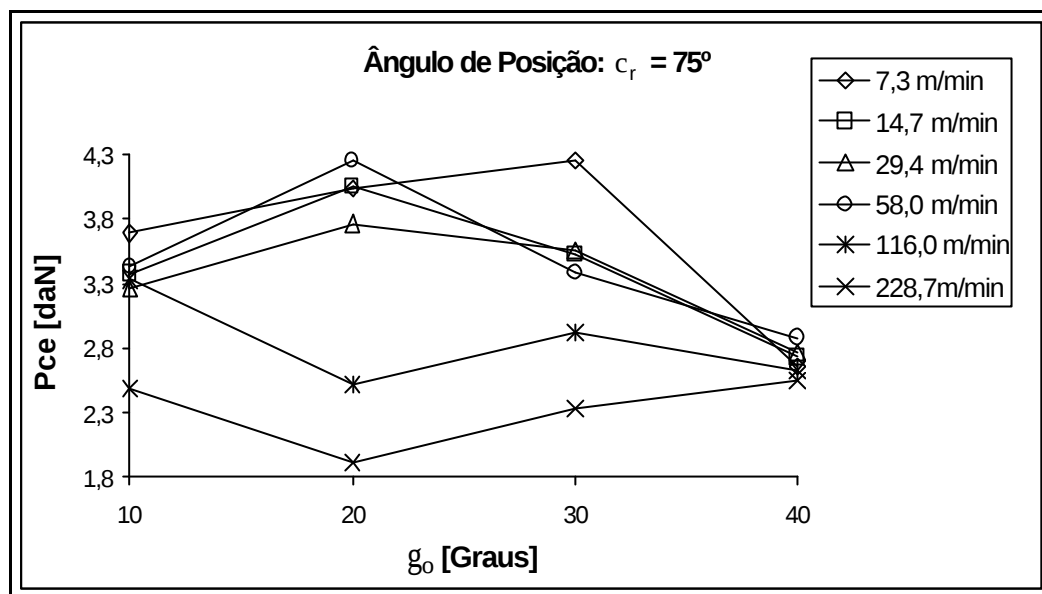
**Figura 4.10-** Variação de **Pce** em função de  $g_o$  para  $c_r = 60^\circ$  para diferentes velocidades de corte.

Da Figura 4.10, observa-se, de modo geral, que Pce diminui com o aumento de  $V_c$ , para todos  $\gamma_o$  ensaiados.

Nas velocidades de corte de 7,3 até 58,0 m/min, as curvas de Pce apresentam comportamento semelhante, onde a força de corte tem uma diminuição com o aumento do ângulo de saída, tal como registrado em trabalhos de outros pesquisadores.

Na curva para a  $V_c = 116,0$  m/min, tem-se um comportamento com uma diminuição da força com o aumento do ângulo de saída até  $30^\circ$  e um aumento da força para  $\gamma_o = 40^\circ$ .

Para a curva da  $V_c = 228,7$  m/min, observa-se o valor mínimo de Pce na condição de  $\gamma_o = 20^\circ$ , um aumento mais acentuado para o  $\gamma_o = 30^\circ$ , superando o valor registrado em  $\gamma_o = 10^\circ$  e uma pequena diminuição da força para  $\gamma_o = 40^\circ$ .



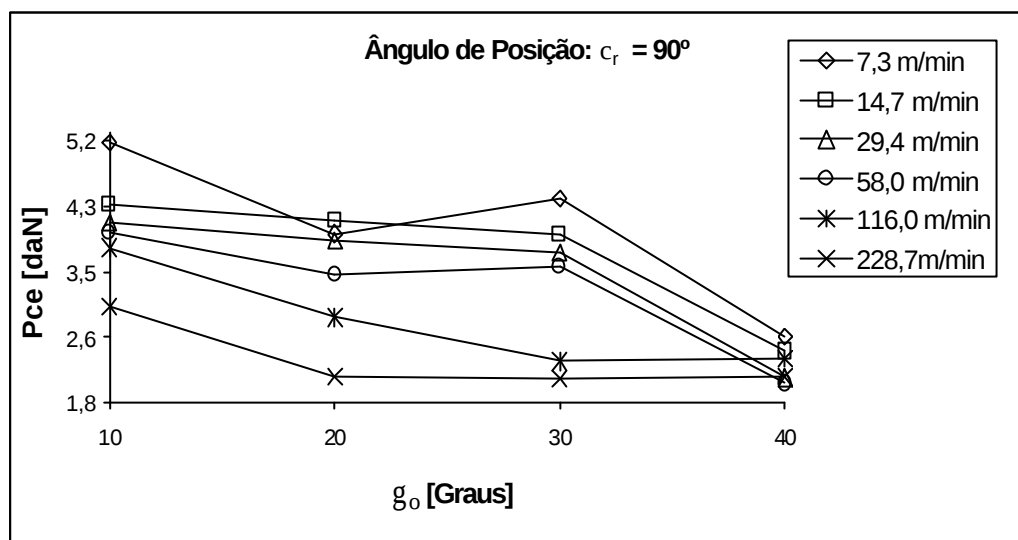
**Figura 4.11-** Variação de **Pce** em função de  $\gamma_0$  para  $c_r = 75^\circ$  para diferentes velocidades de corte.

Da Figura 4.11, pode-se visualizar claramente para  $\gamma_0 = 20^\circ$ , comparado aos outros ângulos, uma redução acentuada de Pce para as duas maiores velocidades e um acréscimo para as demais, exceto a condição  $V_c = 7,3$  m/min e  $\gamma_0 = 30^\circ$ .

Na curva da  $V_c = 7,3$  m/min, tem-se um aumento linear da força de corte com o aumento do ângulo de  $10^\circ$  até  $30^\circ$  e, diminuindo significativamente para  $\gamma_0 = 40^\circ$ .

Para as velocidades de corte de 14,7 até 58,0 m/min, apresentam-se semelhanças, com um aumento acentuado da força de corte para  $\gamma_0 = 20^\circ$ , diminuindo de forma linear, o valor de Pce com o aumento da força para os ângulos de  $30^\circ$  e  $40^\circ$ .

No caso das  $V_c = 116,0$  e  $228,7$  m/min, verifica-se uma diminuição acentuada dos valores de  $P_{ce}$  de  $\gamma_o = 10^\circ$  para  $\gamma_o = 20^\circ$ , aumentando para os maiores  $\gamma_o$ , exceto para  $V_c = 116,0$  m/min e  $\gamma_o = 40^\circ$ .



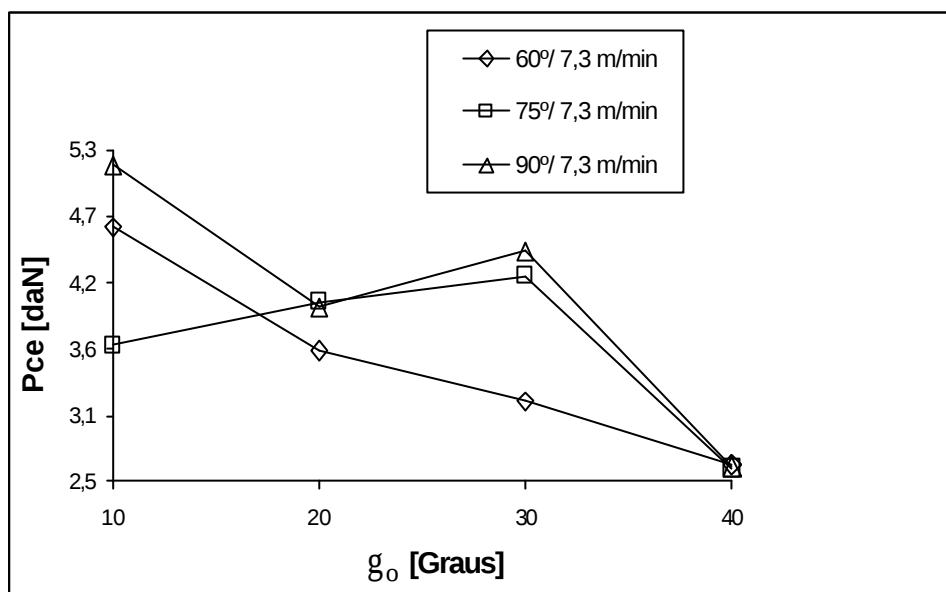
**Figura 4.12-** Variação de  $P_{ce}$  em função de  $\gamma_o$  para  $c_r = 90^\circ$  para diferentes velocidades de corte.

Da Figura 4.12, pode-se visualizar claramente para  $\gamma_o = 30^\circ$ , uma redução acentuada de  $P_{ce}$  para as duas maiores velocidades.

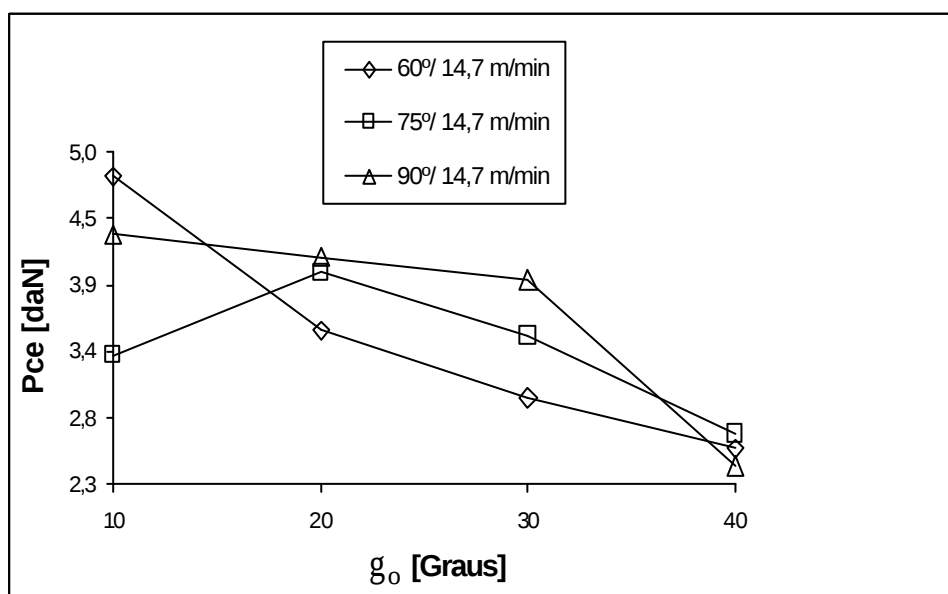
Nas velocidades de corte de 7,3 até 58,0 m/min, tem-se curvas distintas, com comportamento semelhantes, destacando-se a diminuição da força, de forma linear, com o aumento do ângulo de saída de  $10^\circ$  até  $30^\circ$  e uma queda significativa para o  $\gamma_o = 40^\circ$ , exceto na condição  $V_c = 7,3$  m/min e  $\gamma_o = 30^\circ$ .

Para  $V_c = 116,0$  m/min, verifica-se uma diminuição linear, significativa, da força de corte com o aumento do ângulo de saída de  $10^\circ$  à  $30^\circ$  e, estabilizando-se, para  $\gamma_o = 40^\circ$ .

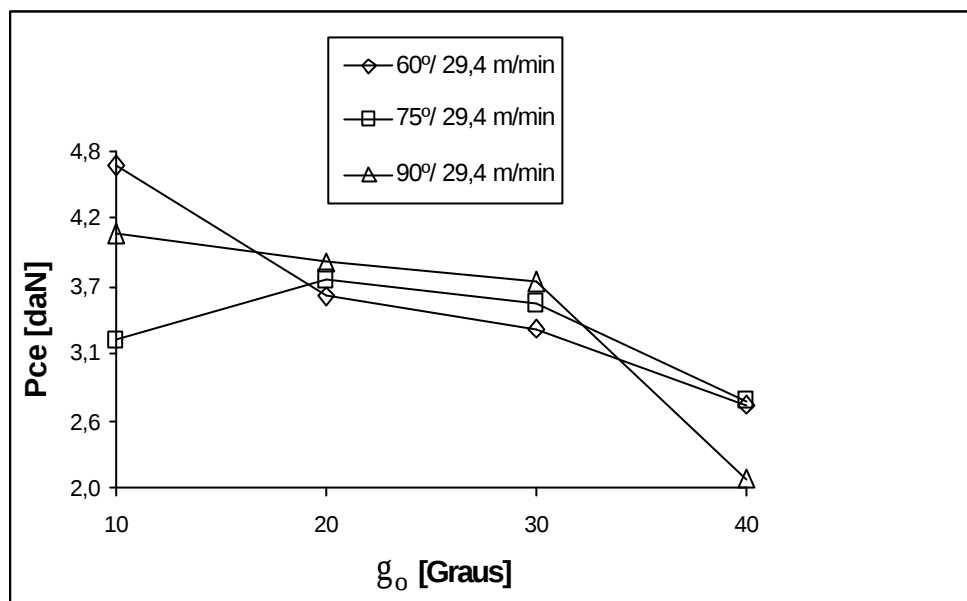
Na curva da  $V_c = 228,7$  m/min, tem-se uma redução de  $P_{ce}$  para o aumento de  $\gamma_o$  de  $10^\circ$  para  $20^\circ$  e mantendo-se sem variação significativa de  $20^\circ$  até  $40^\circ$ .



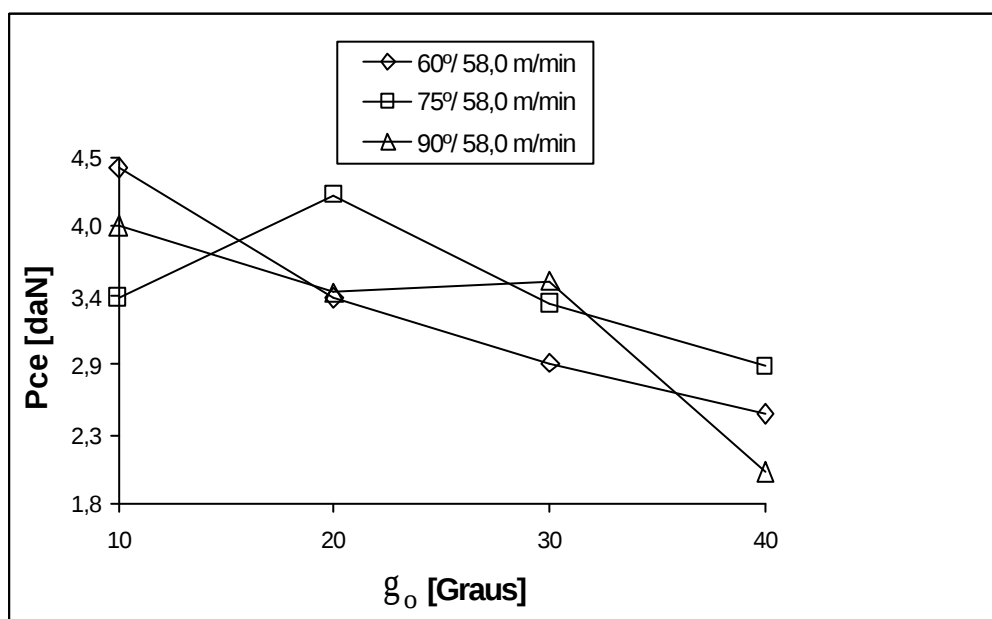
**Figura 4.13-** Variação de  $P_{ce}$  em função de  $g_o$  para 7,3 m/min.



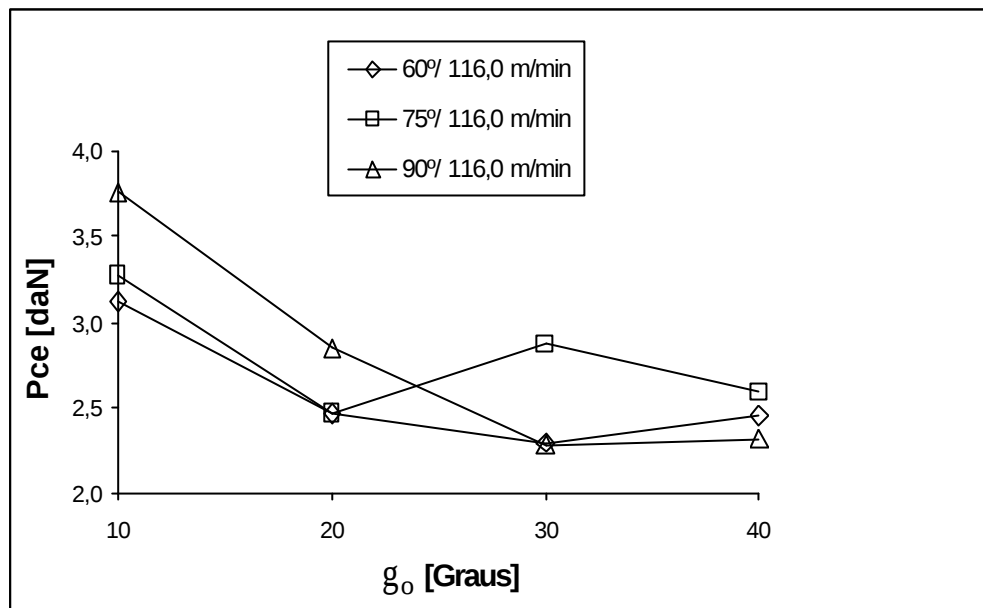
**Figura 4.14-** Variação de  $P_{ce}$  em função de  $g_o$  para 14,7 m/min.



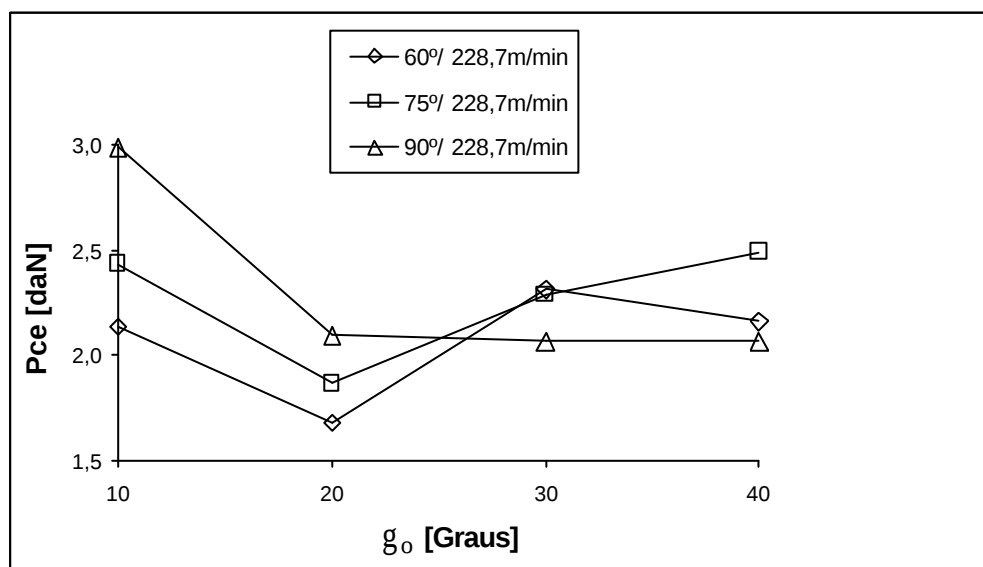
**Figura 4.15-** Variação de **Pce** em função de  $g_o$  para 29,4 m/min.



**Figura 4.16-** Variação de **Pce** em função de  $g_o$  para 58,0 m/min.



**Figura 4.17-** Variação de  $P_{ce}$  em função de  $g_o$  para 116,0 m/min.



**Figura 4.18-** Variação de  $P_{ce}$  em função de  $g_o$  para 228,7 m/min.

Das Figuras 4.13 a 4.18, pode-se observar que:

Para  $V_c = 7,3$  m/min, a curva de  $\chi_r = 60^\circ$ , mostra uma diminuição de Pce com o aumento do  $\gamma_o$ , destacando para  $\gamma_o = 20^\circ$  e  $30^\circ$ , uma condição mais favorável dos demais  $\chi_r$ . Para  $\gamma_o = 10^\circ$ , tem-se como condição favorável  $\chi_r = 75^\circ$ . Observa-se para  $\chi_r = 75^\circ$  e  $90^\circ$ , valores de Pce próximas com o aumento do  $\gamma_o$ , no intervalo de  $20^\circ$  a  $40^\circ$  com uma queda acentuada de  $30^\circ$  a  $40^\circ$ . Para  $\gamma_o = 40^\circ$ , os valores de Pce foram bem próximos para todos  $\chi_r$ .

Para  $V_c = 14,7$  m/min e  $29,4$  m/min, de forma geral, observa-se uma diminuição de Pce com o aumento  $\gamma_o$ , exceto para  $\chi_r = 75^\circ$  entre  $10^\circ$  e  $20^\circ$ .

Como condição mais estável, observa-se que para  $\gamma_o = 20^\circ$  e  $30^\circ$ , quanto menor  $\chi_r$ , menor os valores de Pce, com menor variação para a maior velocidade de corte.

Para  $V_c = 58,0$  m/min, observa-se uma grande semelhança em relação as velocidades de  $14,7$  e  $29,4$  m/min, exceto para  $\gamma_o = 20^\circ$ , onde Pce aumentou para  $\chi_r = 75^\circ$  e diminui para  $\chi_r = 90^\circ$ .

Para  $V_c = 116,0$  m/min, de forma geral, tem-se a diminuição de Pce, com o aumento de  $\gamma_o$  de  $10^\circ$  até  $30^\circ$ , exceto para  $\chi_r = 75^\circ$  com  $\gamma_o = 30^\circ$ . Para  $\gamma_o = 10^\circ$ , observa-se a condição mais estável, que com o aumento de  $\chi_r$ , tem-se o aumento de Pce.

Para  $V_c = 228,7$  m/min, de forma geral, observa-se um queda acentuada de Pce para todos os ângulos de posição, de  $\gamma_o = 10^\circ$  para  $20^\circ$ .

Para  $\gamma_0 = 10^\circ$  e  $20^\circ$ , verifica-se como condição mais estável, que com o aumento de  $\chi_r$ , tem-se o aumento de Pce. A partir de  $\gamma_0 = 20^\circ$ , os valores de Pce apresentam: pouca variação para  $\chi_r = 90^\circ$  e uma variação aleatória para  $\chi_r = 60^\circ$  e  $75^\circ$ .

De modo geral, os resultados apresentados nas Figuras 4.13 até 4.18, podemos concluir:

Tem-se para  $\gamma_0 = 40^\circ$ , menor Pce para  $\chi_r = 90^\circ$  e maior Pce para  $\chi_r = 75^\circ$ .

Para  $\chi_r = 60^\circ$ , verifica-se que com o aumento de  $\gamma_0$ , tem-se a diminuição de Pce, exceto para  $V_c = 228,7$  m/min.

Para  $\chi_r = 75^\circ$ , tem-se uma variação de valores de Pce, de forma aleatória, com o aumento de  $\gamma_0$ .

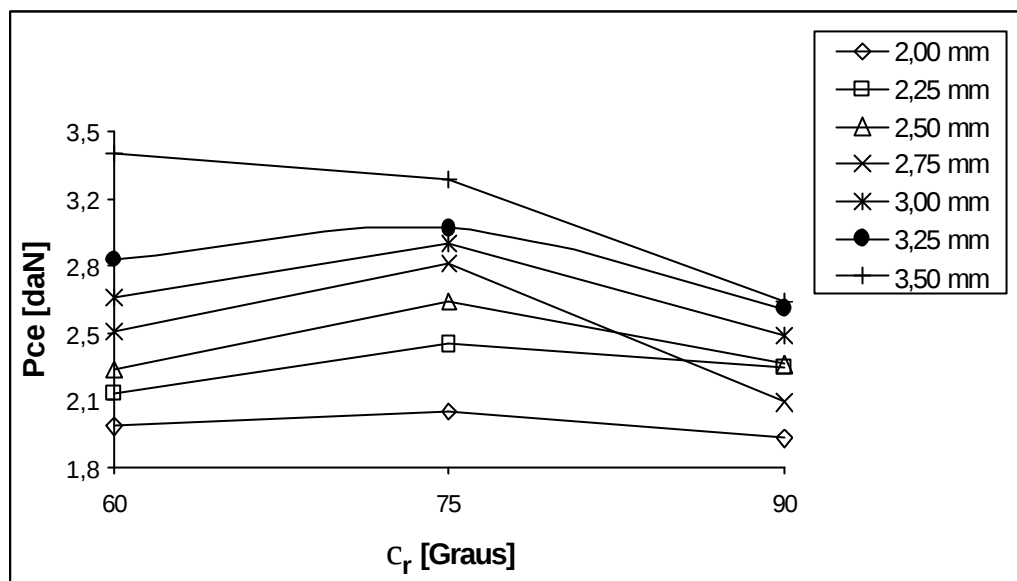
### 4.3. Influência da Profundidade de Corte

Os resultados dos ensaios da influência da profundidade de corte sobre força principal de corte, apresentam-se na Tabela 4.7, Figura 4.19 e Anexo 3. Dado a indicações de catálogo, tem-se o interesse em verificar e analisar a influência do ângulo de posição em relação à profundidade de corte com variação de 0,25 mm, com ferramentas com ângulos de saída de  $30^\circ$  e os seguintes parâmetros de corte:  $D = 60,0$  mm;  $f = 0,158$  mm/rot;  $V_c = 106,0$  m/min.

**Tabela 4.7-** Resultados da medição de **Pce** para  $g_o = 30^\circ$  com  $c_r = 60^\circ$ ,  $75^\circ$  e  $90^\circ$ .

| Ensaio N°. | Ferramenta N°.             | Figura N°.<br>ANEXO 3 | Profundidade de Corte $a_p$ [mm] | N°. de Pontos Lidos | Condição da Superfície | Pce [daN] |
|------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------|------------------------|-----------|
| 133        | 3<br>( $c_r = 60^\circ$ )  | 133                   | 2,00                             | 4239                | SR                     | 1,965     |
| 134        |                            | 134                   | 2,25                             | 3742                | SR                     | 2,136     |
| 135        |                            | 135                   | 2,50                             | 3746                | SR                     | 2,260     |
| 136        |                            | 136                   | 2,75                             | 3709                | SR                     | 2,460     |
| 137        |                            | 137                   | 3,00                             | 3766                | SR                     | 2,638     |
| 138        |                            | 138                   | 3,25                             | 3655                | SL                     | 2,835     |
| 139        |                            | 139                   | 3,50                             | 3750                | SR                     | 3,391     |
| 140        | 7<br>( $c_r = 75^\circ$ )  | 140                   | 2,00                             | 3938                | CT                     | 2,043     |
| 141        |                            | 141                   | 2,25                             | 3828                | CP                     | 2,392     |
| 142        |                            | 142                   | 2,50                             | 3805                | SR                     | 2,616     |
| 143        |                            | 143                   | 2,75                             | 3733                | SR                     | 2,816     |
| 144        |                            | 144                   | 3,00                             | 3766                | SR                     | 2,918     |
| 145        |                            | 145                   | 3,25                             | 3734                | SR                     | 2,999     |
| 146        |                            | 146                   | 3,50                             | 3777                | SR                     | 3,253     |
| 147        | 11<br>( $c_r = 90^\circ$ ) | 147                   | 2,00                             | 4098                | CP                     | 1,903     |
| 148        |                            | 148                   | 2,25                             | 3850                | CP                     | 2,272     |
| 149        |                            | 149                   | 2,50                             | 3802                | CP                     | 2,287     |
| 150        |                            | 150                   | 2,75                             | 3742                | CP                     | 2,090     |
| 151        |                            | 151                   | 3,00                             | 3836                | CP                     | 2,436     |
| 152        |                            | 152                   | 3,25                             | 3747                | CP                     | 2,577     |
| 153        |                            | 153                   | 3,50                             | 5582                | CT                     | 2,610     |

Na Tabela 4.7, observa-se para  $\chi_r = 60^\circ$ , as melhores superfícies geradas, sem aderência de cavaco SL (ensaio 138) e SR, para todas  $a_p$  e, as piores condições (CP e CT) para  $\chi_r = 90^\circ$  e, para  $\chi_r = 75^\circ$ , nos dois menores  $a_p$  (ensaios 140 e 141).



**Figura 4.19-** Variação de **Pce** em função de  $c_r$  para  $g_o = 30^\circ$ .

Pelo gráfico da Figura 4.19, observa-se para  $\chi_r = 60^\circ$  e  $75^\circ$ , que Pce aumenta com o aumento de  $a_p$ .

De modo geral, os valores de Pce foram maiores para  $\chi_r = 75^\circ$ , em relação aos demais para todas as profundidades de corte ensaiadas.

Os valores de Pce apresentaram-se bem próximos para  $\chi_r = 60^\circ$  e  $\chi_r = 90^\circ$ , com a mesma profundidade.

#### 4.4. Desgaste das Ferramentas de Corte

Com o objetivo de verificar possíveis ocorrência de desgaste das ferramentas de corte, após o término dos ensaios, registrou-se o estado das arestas principal e lateral de corte e das superfícies de saída e de folga (Anexo 5). Os tempos efetivos de corte em que as ferramentas foram submetidas, apresentam-se na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8-** Tempo de usinagem que as ferramentas foram submetidas pelas condições de avanço, velocidade de corte e profundidade.

| Ferramenta N°. | Geometria da Ferramenta          | Tempo de Usinagem [min] |
|----------------|----------------------------------|-------------------------|
| 1              | $c_r = 60^\circ, g_o = 10^\circ$ | 2,5                     |
| 2              | $c_r = 60^\circ, g_o = 20^\circ$ | 2,7                     |
| 3              | $c_r = 60^\circ, g_o = 30^\circ$ | 4,7                     |
| 4              | $c_r = 60^\circ, g_o = 40^\circ$ | 3,5                     |
| 5              | $c_r = 75^\circ, g_o = 10^\circ$ | 2,5                     |
| 6              | $c_r = 75^\circ, g_o = 20^\circ$ | 2,3                     |
| 7              | $c_r = 75^\circ, g_o = 30^\circ$ | 4,0                     |
| 8              | $c_r = 75^\circ, g_o = 40^\circ$ | 4,2                     |
| 9              | $c_r = 90^\circ, g_o = 10^\circ$ | 2,9                     |
| 10             | $c_r = 90^\circ, g_o = 20^\circ$ | 2,5                     |
| 11             | $c_r = 90^\circ, g_o = 30^\circ$ | 3,6                     |
| 12             | $c_r = 90^\circ, g_o = 40^\circ$ | 3,2                     |

Verifica-se pela análise visual, nas Figuras A5.1 a A5.12, que não se têm ocorrência de desgastes ou qualquer tipo de avarias nas arestas e superfícies das ferramentas de corte, não sendo observados qualquer evidência de adesão de material na superfície de saída da ferramenta.

## 5. CONCLUSÕES

A partir da análise comparativa entre os resultados da força de corte com a variação dos parâmetros estudados, pôde-se concluir:

### **Influência do Avanço:**

As ferramentas com ângulo de posição  $\chi_r = 60^\circ$  apresentaram valores de Pce e curvas semelhantes comparados aos resultados obtidos por outros pesquisadores citado na revisão bibliográfica, qual seja: diminuição da força principal de corte média Pce, com o aumento do ângulo de saída  $\gamma_o$ . Destacaram-se por apresentar a menor tendência de adesão do cavaco na superfície do material. A melhor condição de superfície (SL) foi verificada para o ângulo de saída de  $20^\circ$ , para todos os avanços.

As ferramentas com ângulo de posição de  $75^\circ$  e  $90^\circ$ , apresentaram muita adesão de cavaco na superfície da peça, destacando-se as com ângulos de saída de  $30^\circ$  e  $40^\circ$ , na condição CP e CT, nestas condições verificou-se o aumento de Pce com o aumento do  $\gamma_o$ .

De forma geral , não houve uma correspondência entre os valores de Pce e a condição da superfície gerada, que pudessem relacionar uma tendência geral.

Quanto à relação entre as ferramentas de diferentes ângulos de posição com mesmo ângulo de saída e para cada avanço, não ocorreu variação significativa do valor de Pce.

Quanto a influência do avanço sobre  $P_{ce}$ , constatou-se que a situação mais estável para diferentes ângulos de posição, se deu para ângulos de saída de  $20^\circ$  e  $30^\circ$ . E, para as ferramentas de ângulo de saída de  $10^\circ$ , quanto maior o avanço, com a diminuição do ângulo de saída, resulta em maiores valores de  $P_{ce}$ .

Portanto, com as condições de corte:  $V_c = 232,0$  m/min e  $a_p = 2,0$  mm, as ferramentas mais adequadas foram:

- para  $\chi_r = 60^\circ$  com  $\gamma_o = 20^\circ$ , para todos  $f$ ;
- para  $\chi_r = 75^\circ$  com  $\gamma_o = 10^\circ$ , para  $f = 0,158$  ;  $0,218$  e  $0,257$  mm/rot;
- para  $\chi_r = 90^\circ$  com  $\gamma_o = 10^\circ$ , para  $f = 0,048$ ;  $0,103$  e  $0,158$  mm/rot.

### **Influência da Velocidade de Corte:**

Para as ferramentas de ângulo de posição de  $60^\circ$ , verificou-se, como tendência geral, uma diminuição da força com o aumento do ângulo de saída. A melhor condição de superfície gerada (SL) ocorreu para as menores velocidades de corte e SR para as maiores.

Para o ângulo de posição de  $75^\circ$ , tem-se uma variação de valores de  $P_{ce}$ , de forma aleatório, com o aumento do ângulo de saída. A melhor condição de superfície (SL) gerada ocorreu para as velocidades de corte de  $7,4$  m/min até  $58,0$  m/min.

Para o valor de ângulo de posição de  $90^\circ$ , não houve uma correspondência da variação da força com o aumento do ângulo de saída.

E, quanto a condição de superfície (SL e SR) gerada, ocorreu para ângulo de saída de  $60^\circ$ , para todas as velocidades de corte ensaiadas.

De modo geral, as ferramentas com ângulos de saída de  $40^\circ$ , apresentaram os menores valores da força  $P_{ce}$  e, sem variações significativas em relação aos outros parâmetros.

Portanto, com as condições de corte:  $f = 0,218$  mm/rot e  $a_p = 2,0$  mm, as ferramentas mais adequadas foram:

- para  $\chi_r = 60^\circ$  com  $\gamma_o = 40^\circ$ , para  $V_c = 7,4$  até  $58,0$  m/min;
- para  $\chi_r = 75^\circ$  com  $\gamma_o = 40^\circ$ , para  $V_c = 7,4$  até  $58,0$  m/min;
- para  $\chi_r = 90^\circ$  com  $\gamma_o = 40^\circ$ , para  $V_c = 7,4$  até  $58,0$  m/min..

#### **Influência da Profundidade de Corte:**

Na condição analisada de profundidade de corte, verificou-se um aumento da força  $P_{ce}$  com o aumento da profundidade de corte e, de modo geral, que as ferramentas de ângulo de posição de  $75^\circ$ , proporcionaram maiores valores de  $P_{ce}$  em relação aos demais.

A ferramenta de ângulo de posição de  $60^\circ$ , apresentaram, como condição de superfície SL e SR e, a pior condição (CP e CT) para a ferramenta de  $90^\circ$ , para todas profundidades de corte ensaiadas.

Portanto, com as condições de corte:  $f = 0,158$  mm/rot e  $V_c = 106,0$  m/min, a ferramenta mais adequada foi:

- para  $\chi_r = 60^\circ$  com  $\gamma_o = 30^\circ$ , para  $a_p = 2,0$  até  $3,25$  mm.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Avaliação da força de corte, na operação de torneamento, na usinagem de UHMWPE, com ferramentas de metal duro e avaliar os resultados, comparando-os com as de ferramentas de aço rápido.
- Avaliação da força de corte, na operação de fresamento, utilizando ferramentas de aço rápido e metal duro.
- Determinação das Velocidades de Corte Críticas, na operação de torneamento, para vários tipos de polímeros comerciais.
- Avaliação da influência do tipo e forma do cavaco na condição de superfície usinada gerada e quanto a variação da força de corte.

## 7. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Comissão de Estudos de Ferramentas da Usinagem, do CB – 4 – Comitê Brasileiro de Mecânica. 1º Projeto de Revisão da NBR 6162 – Conceitos da Técnica de Usinagem, Movimentos e Relações Geométricas – Terminologia. fev. 1988, 39 p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Comissão de Estudos de Ferramentas da Usinagem, do CB – 4 – Comitê Brasileiro de Mecânica. 1º Projeto de Revisão da NBR 6163 – Conceitos da Técnica de Usinagem, Geometria da Cunha de Corte – Terminologia. maio 1989, 63 p.

ALAUDDIN, M. et al. Plastics and their machining. Journal of Material Processing Technology. 1995, v.54, p.40 – 46.

ALBUQUERQUE, J. A. C. O plástico na prática. 1. ed. São Paulo: Editora SAGRA, 1990. 295 p., 23 cm. ISBN 85-241-0260-8.

BOOTHROYD, G., KNIGHT, W. A. Fundamentals of machining and machine tools. 2 ed. New York: McGraw-Hill, Inc. 1989. ISBN 0-8247-7852-9.

BORELLI, J. E. et al. Diagnóstico de estados de ferramentas nos processos de usinagem de alto desempenho com uso de lógica fuzzy e imagem infravermelho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 15, 1999, Águas de Lindóia. Anais...Águas de Lindóia, 1999.

CALLISTER, W. D. Materials Science and Engineering, An Introduction. 2 ed.. Ed. Salt Lake City. 1990. 790p.

CARR, J. W., FEGER, C. Ultraprecision machining of polymers. Precision Engineering, out. 1993. n. 4, p. 221-235.

DEGARMO, E. P., BLACK, J.T., KOHSER, R.A. Material and Processes in manufacturing. 8 ed. Prentice-Hall, Inc. 1997. ISBN 0-02-328621-0

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 1 ed. São Paulo: MM Editora, 1999. 242 p.

ERIKSEN, E. Machining of short fibre reinforced thermoplastics. Aalborg, August 1997. 169p. Ph.D thesis: Aalborg University, Denmark.

FERNANDES, J. C. Metodologia científica. 1 ed. Bauru: UNESP, 1997. 50p.

FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. 7 ed. São Paulo: Edgard Blücher. 1977. 751p.

GONÇALVES, M. T. T. Proposta de Metodologia para Medição dos Esforços de Corte da Madeira. São Carlos, 1993, 148 p. Tese ( Doutorado em Engenharia Mecânica ), Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

GRABCHENKO, A. I. et al. Precision cutting of optical polymer componentes for bioengineering applications. Journal of Materials Processing Technology, Grécia, 21 jun. 1998. n. 97, p. 126-131.

GUERREIRO, A. R. Desenvolvimento da Área Médica Caminha Lado a Lado com os Plásticos. Plástico Industrial, Fevereiro 2001. p. 30 – 41.

JIN, L. Z., SANDSTRÖM, R. Evaluation of Machinability Data. Journal of Testing and Evaluation, Suécia, Estocolmo, Maio 1994. v. 22, n. 3, p. 204-211.

KOTTHAUS, H. Técnica da Produção Industrial: Materiais Metálicos – Materiais Auxiliares. Ed. Polígono, v. 3, 1972.

KOBAYASHI, A. Ultraprecision Machining of Plastics. New York: McGraw-Hill, 1967, v. 508, p. 31- 36.

KOBAYASHI, A., HIRAKAWA, K. Ultraprecision Machining of Plastics, part 1, polymethyl methacrylate. Polym. Plast. Technol. Eng., Japão, 1984. n. 1, p. 15-25.

LEMASTER, R. L., BEALL, F. C.. The use on optical profilometer to measure surface roughness in medium density fiberboard. Forest Products Journal. 1996, v.46, n 11-12.

MACROGALLERIA. Departament of Polymer Science. University of Souther Mississippi, 1997. Disponível em: <<http://www.psrc.usm.edu/macrog/ziegler.htm>>. Acesso em : 20 maio 2000.

MALDONALDO, M. R. Trabajabilidad de tableros. Maderas Cs & Tec. Chile, 1998 v.1, n.1.

MANO, E. B. Polímeros como materiais de engenharia. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1996.

POLIALDEN. Boletim Técnico 3.01. São Paulo, 1988.

POLIALDEN. Boletim técnico 4.04. São Paulo, 1998.

POLIALDEN. Boletim técnico 4.06. São Paulo, 1998.

RASTOGI, S.; KURELEC, L.; LEMSTRA, P. J. A Novel route to process UHMWPE via mobile hexagonal phase, The Dutch Polymer Institute – Eindhoven Polymer Laboratories, Eindhoven, The Netherlands, 1998.

SALLES, J. L. C. Estudo do Acabamento Superficial na Usinagem do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Industrial ). UNESP - Bauru, 2001.

SMITH, G. T. Advanced Machining – The Handbook of Cutting Technology. IFS Publications, 1989, ISBN 1-85423-022-6.

SONG, J. et al. Effects of Machining on tribological behavior of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) under dry reciprocating sliding. *Wear*, Charlton, EUA, 1999. p. 716-723.

STEMMER, C. E. Ferramenta de corte I. 4 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1987.

TRIBOULOT, P.; KREMER, P.; MARTIN, P. Planning of Norway Spruce With Very Ring Width. *Holz als Roh und Werkstoff*, 1991, v. 49, p. 181 – 184.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Coordenadoria Geral de Bibliotecas, Ed. UNESP. Normas para publicações da UNESP. UNESP. São Paulo: UNESP, 1994. v. 4: Dissertações e teses.

WANG, Y. Q.; LI, J. Sliding wear behavior and mechanism of ultra-high molecular weight polyethylene. *Materials Science and Engineering, China*, 1999. p. 155-160.

WEARMOUTH, W. G. Notes on the Machining of Plastics. *Journal of Scientific Instruments*, London, Junho 1946. V. 23, n 6, p.109-113.

## ANEXO 1

## Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular PE-UAPM UTEC® 6540

| PROPRIEDADES FÍSICAS                                                            | MÉTODOS ASTM | UNIDADES                            | VALORES TÍPICOS      |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------|----------------------|
| Peso Molecular Viscosimétrico                                                   |              | g/mol                               | $>6,0 \times 10^5$   |
| Densidade (no moldado)                                                          | D-1505       | g/cm <sup>3</sup>                   | $>0,93$              |
| Densidade Aparente                                                              | D-1895       | g/cm <sup>3</sup>                   | $>0,4$               |
| Tamanho médio de partícula $\mu$                                                |              | $\mu$ m                             | 120 - 220            |
| <b>PROPRIEDADES MECÂNICAS</b>                                                   |              |                                     |                      |
| Resistência à tração no escoamento                                              | D-1708       | MPa                                 | 25                   |
| Resistência à tração na ruptura                                                 | D-1708       | MPa                                 | 35                   |
| Alongamento final                                                               | D-1708       | %                                   | $>300$               |
| Resistência ao impacto (ZOD)                                                    | D-256        | J/m                                 | não quebra           |
| Resistência ao impacto Charpy*                                                  |              | KJ/m <sup>2</sup>                   | $>80$                |
| Dureza Shore                                                                    | D-2240       | Shore D                             | 63                   |
| Resistência à abrasão                                                           |              | mg/1000 ciclos                      | 27                   |
| Perda por abrasão em lama de areia                                              |              | Índice de abrasão (após 1025 = 100) | 25                   |
| Coefficiente de fricção Estático $\mu$ Dinâmico $\mu$                           | D-1894       | -                                   | 0,32<br>0,28         |
| <b>PROPRIEDADES TÉRMICAS</b>                                                    |              |                                     |                      |
| Temperatura de fusão                                                            | D-3418       | °C                                  | 133                  |
| Temperatura de amolecimento VICAT                                               | D-1525       | °C                                  | 126                  |
| Temperatura de deformação térmica 0,45 MN/m <sup>2</sup> 1,61 MN/m <sup>2</sup> | D-648        | °C                                  | 79<br>48             |
| Condutividade térmica a 23°C                                                    | D-177        | W/m.K                               | 0,4                  |
| Coefficiente de dilatação linear                                                | D-696        | 10 <sup>-6</sup> /°C                | 1,5                  |
| Calor específico (23°C)                                                         | D-150        | cal/g°C                             | 0,48                 |
| Entalpia específica de fusão                                                    |              | cal/g                               | 34                   |
| <b>PROPRIEDADES ELÉTRICAS</b>                                                   |              |                                     |                      |
| Resistência volumétrica                                                         | D-257        | $\Omega$ cm-cm                      | $>10^{11}$           |
| Resistência superficial                                                         | D-257        | $\Omega$ cm                         | $>10^{12}$           |
| Resistência dielétrica                                                          | D-149        | kV/cm                               | 900                  |
| Constante dielétrica (10 <sup>3</sup> cps)                                      | D-150        | -                                   | 2,3                  |
| Tangente dielétrica                                                             | D-150        | -                                   | $2,3 \times 10^{-3}$ |
| <b>OUTRAS PROPRIEDADES</b>                                                      |              |                                     |                      |
| Absorção de água                                                                | D-570        | %                                   | 0,01                 |

\* Determinado com energia de golpe de 1,0 J, após 10 segundos de choque de 10 J, conforme norma ISO 15422



**POLIALDEN PETROQUÍMICA S.A.**

Rua Gesildo Flautino Gomes, 61 - 2º andar - Brás de Pina - São Paulo - SP - CEP 04575-060  
 Telefone: (+5511) 5505-3166 - Fax: (+5511) 5505-2595

J. 01/00

**UTEC® 6540**



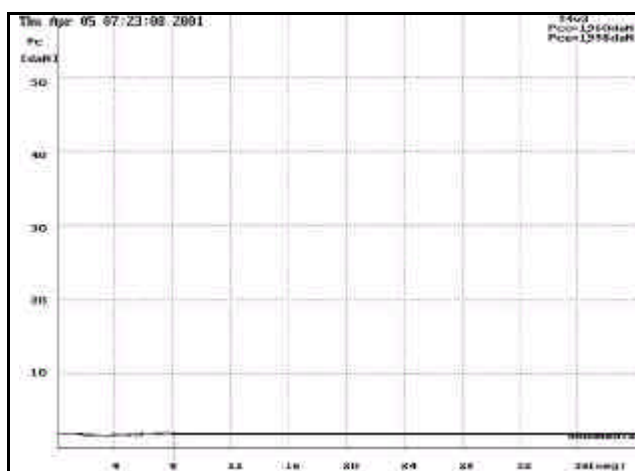


Figura 7



Figura 8

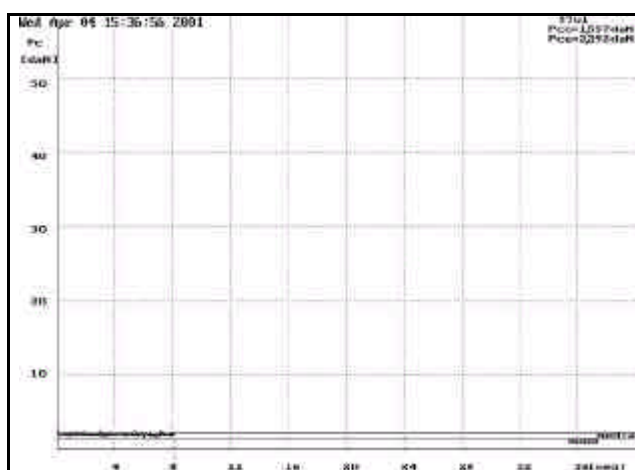


Figura 9



Figura 10

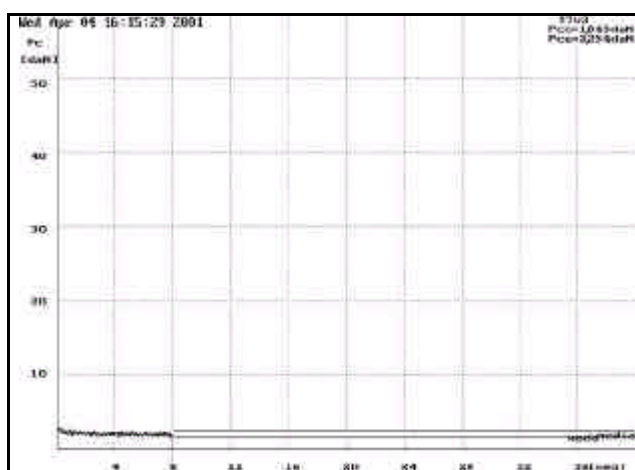


Figura 11

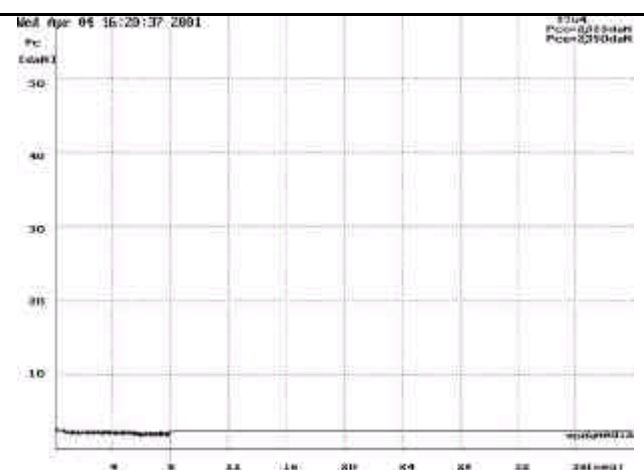


Figura 12

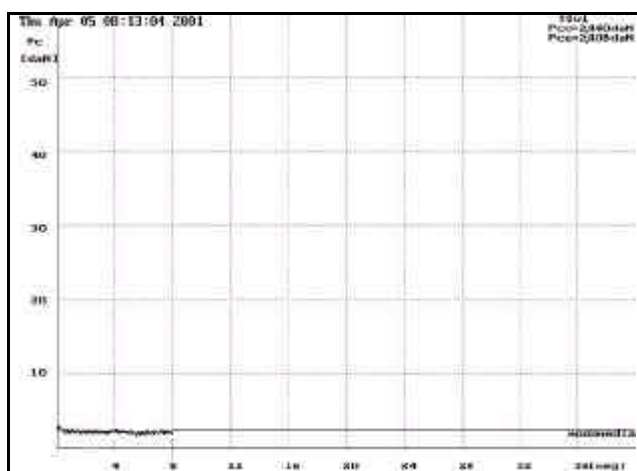


Figura 13



Figura 14



Figura 15



Figura 16



Figura 17



Figura 18

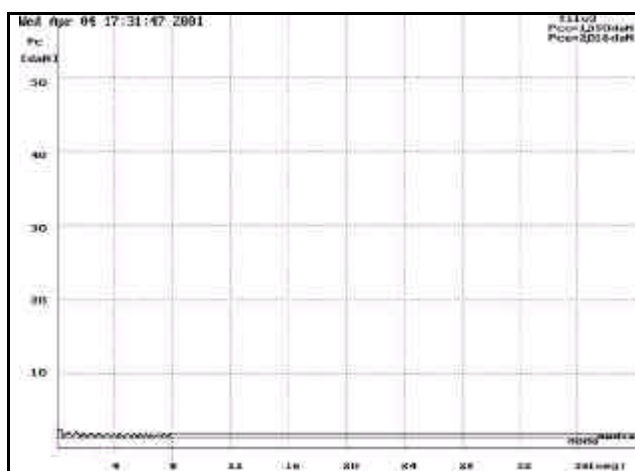


Figura 19



Figura 20

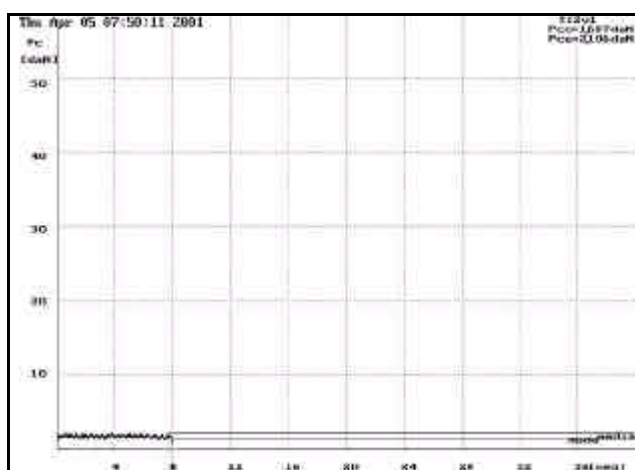


Figura 21

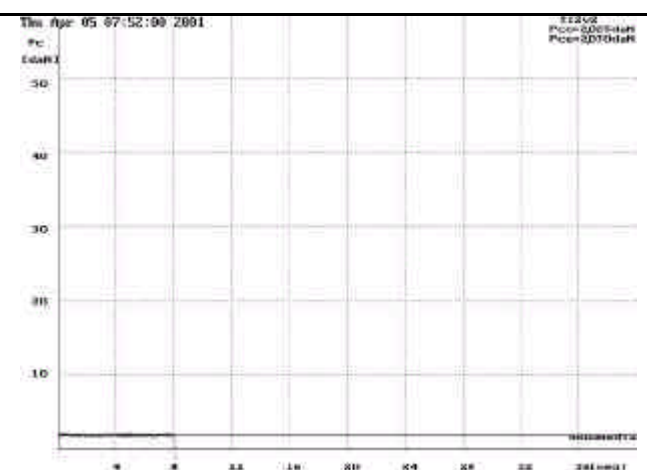


Figura 22



Figura 23

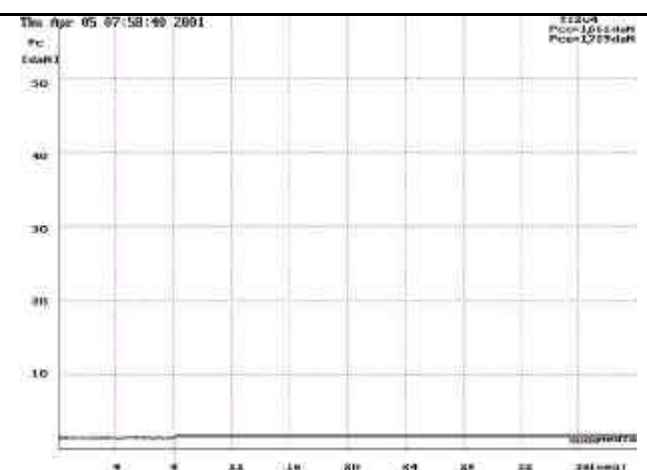


Figura 24

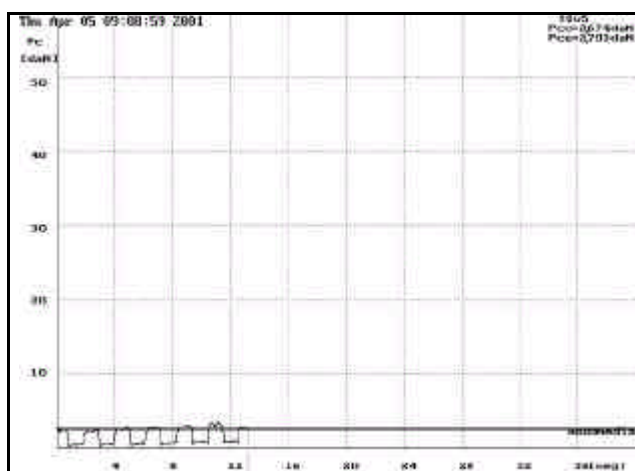


Figura 25

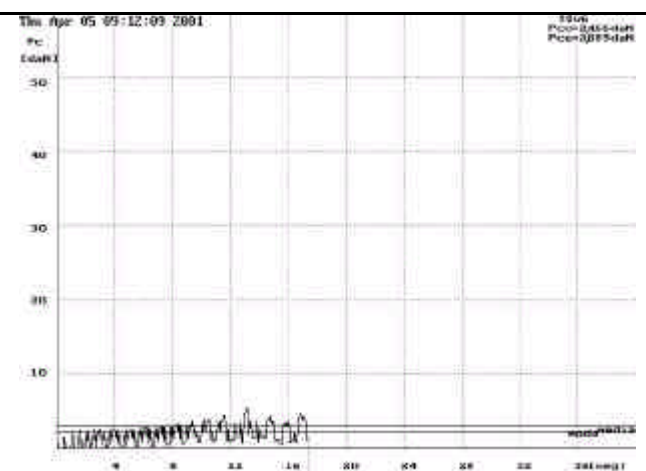


Figura 26



Figura 27



Figura 28

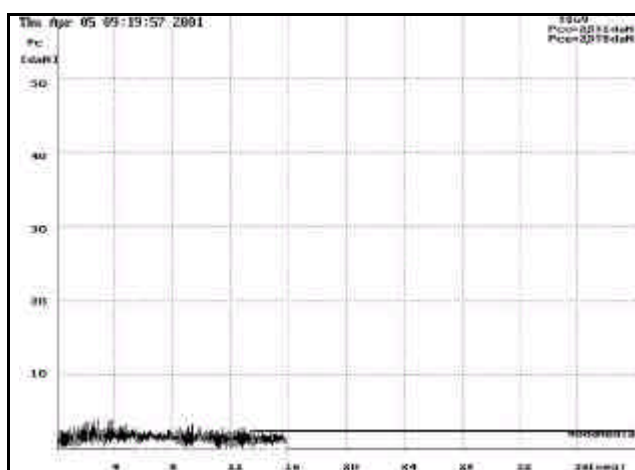


Figura 29



Figura 30

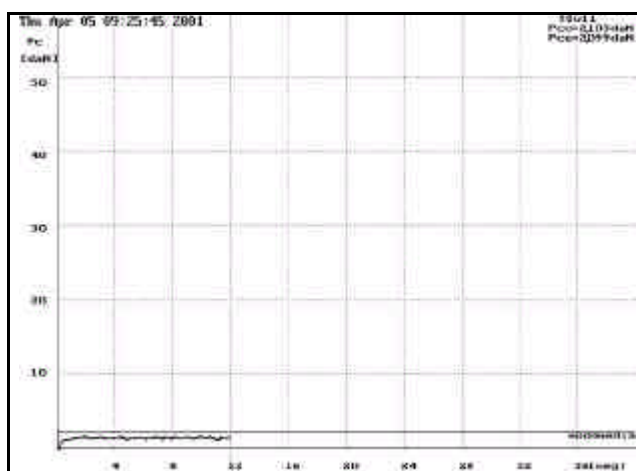


Figura 31

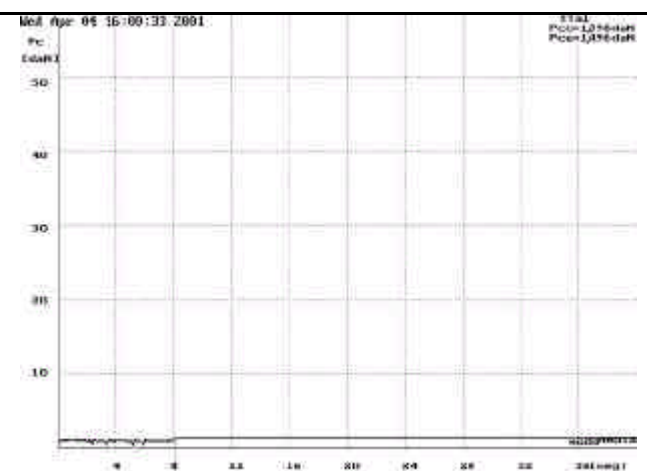


Figura 32

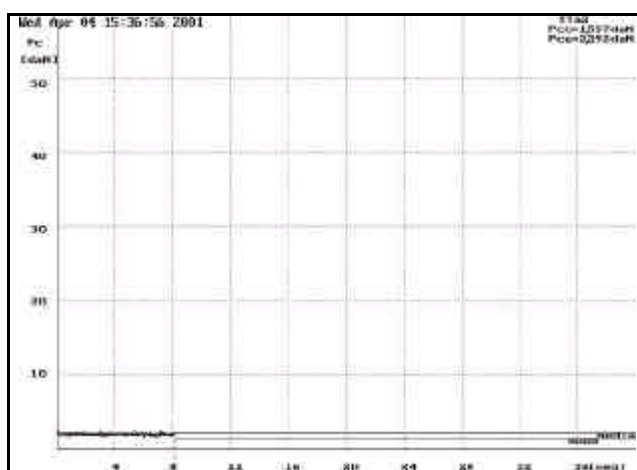


Figura 33



Figura 34



Figura 35



Figura 36



Figura 37



Figura 38



Figura 39

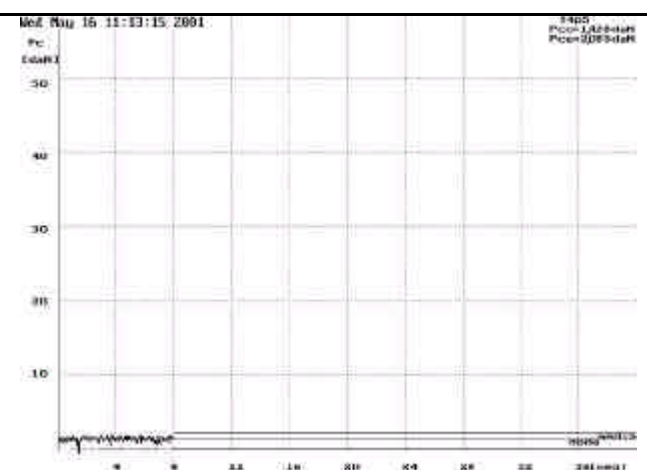


Figura 40



Figura 41



Figura 42



Figura 43



Figura 44

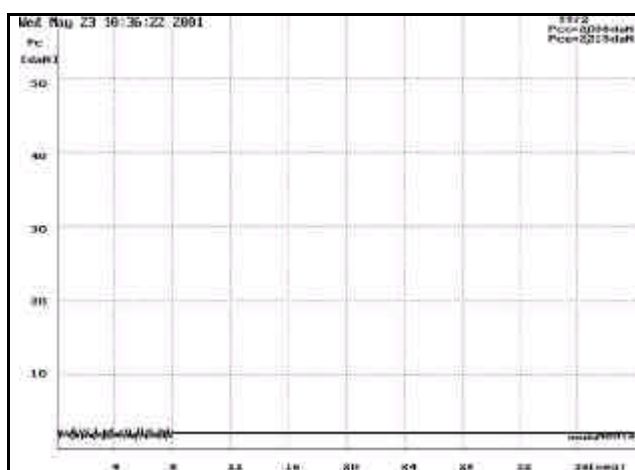


Figura 45

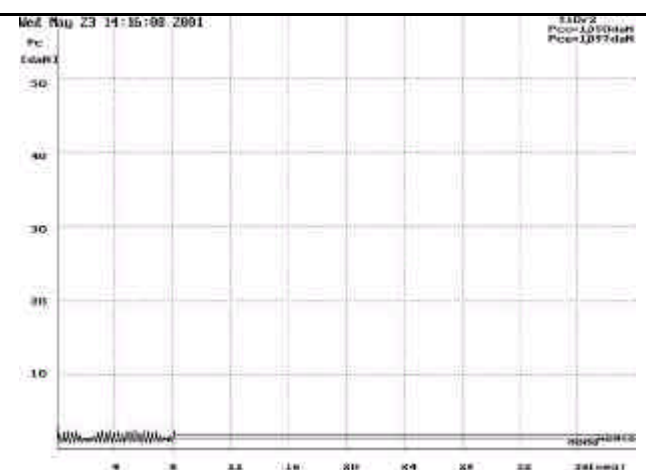


Figura 46



Figura 47

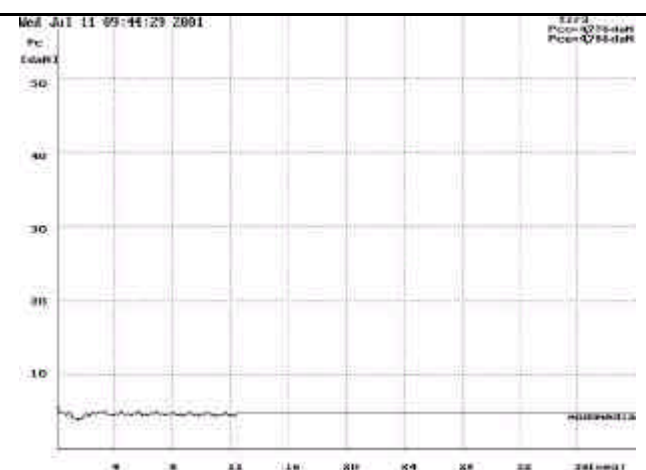


Figura 48

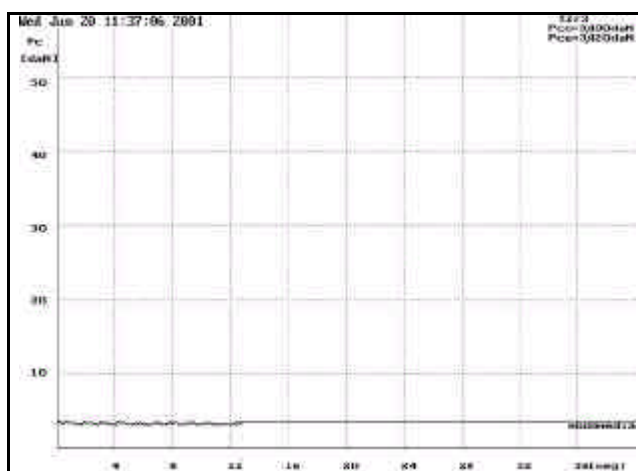


Figura 49

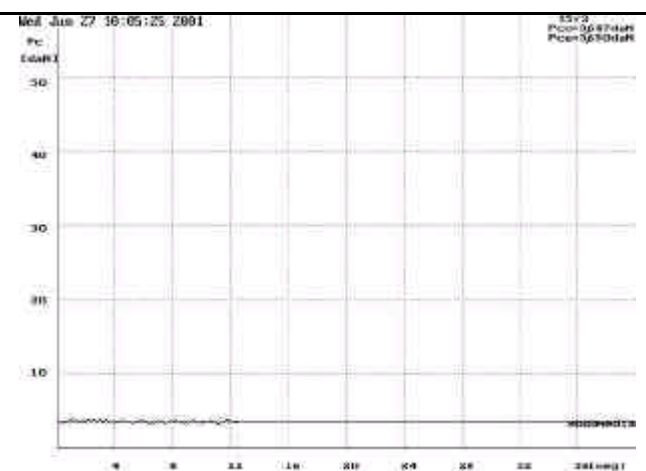


Figura 50



Figura 51



Figura 52



Figura 53



Figura 54

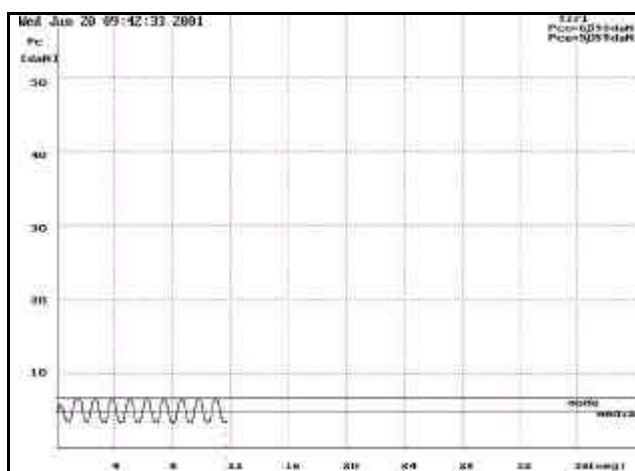


Figura 55

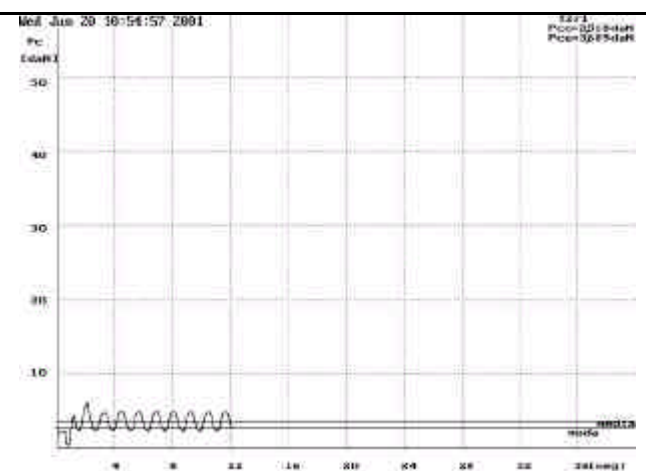


Figura 56

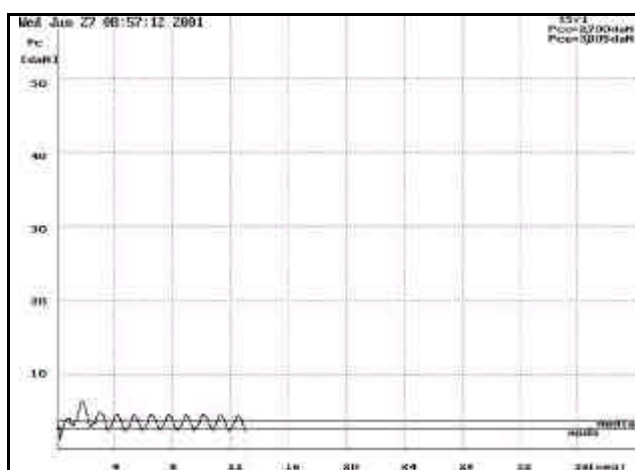


Figura 57



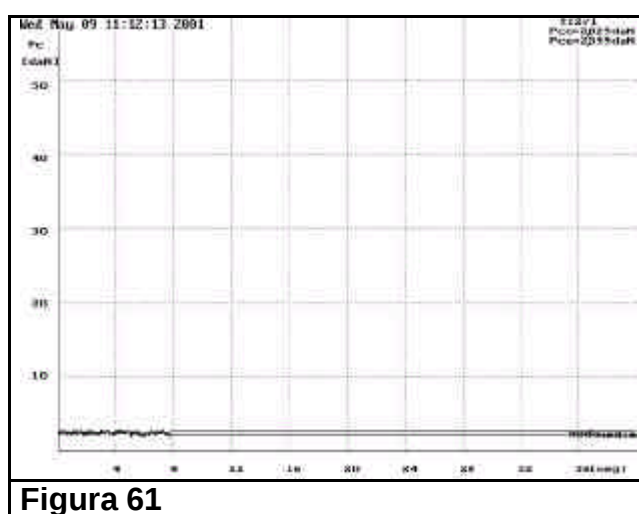
Figura 58



Figura 59



Figura 60



### ANEXO 3 ENSAIOS DEFINITIVOS



Figura 1

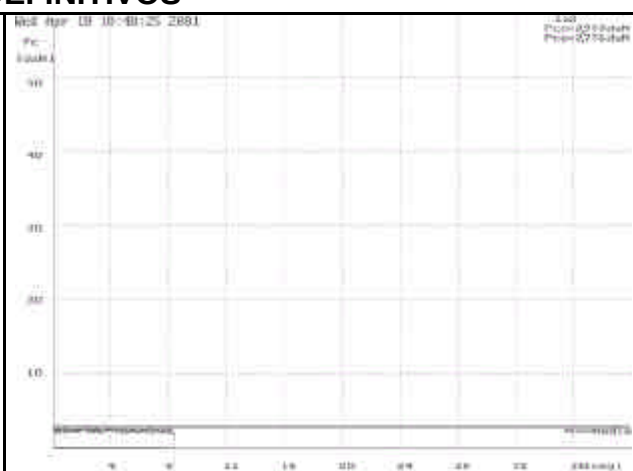


Figura 2



Figura 3



Figura 4

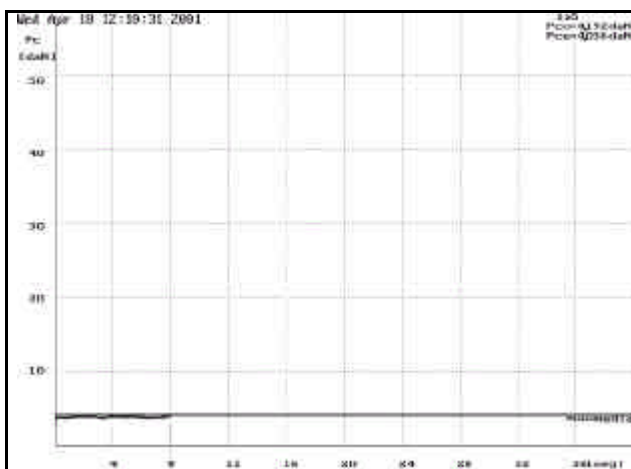


Figura 5

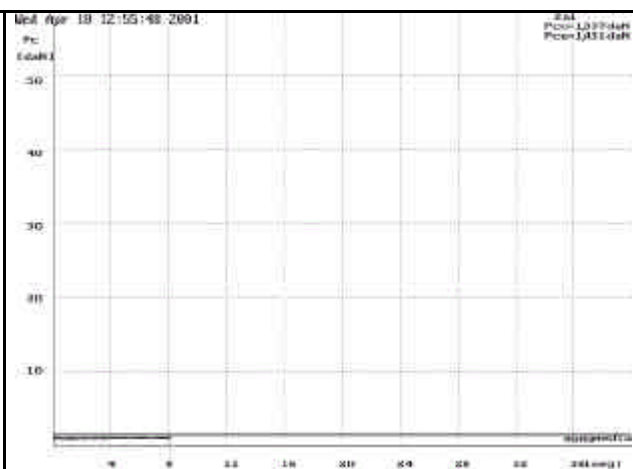


Figura 6

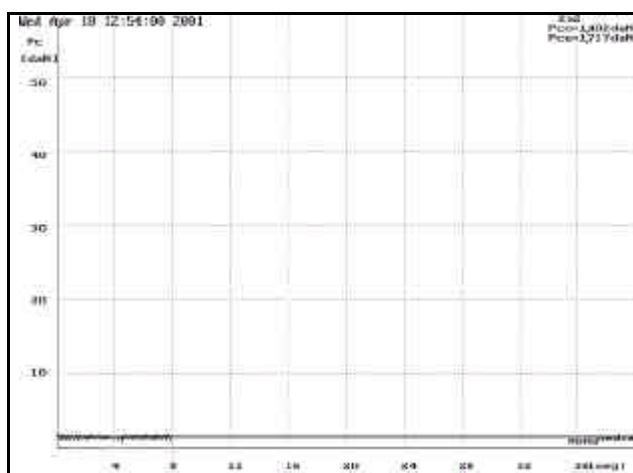


Figura 7

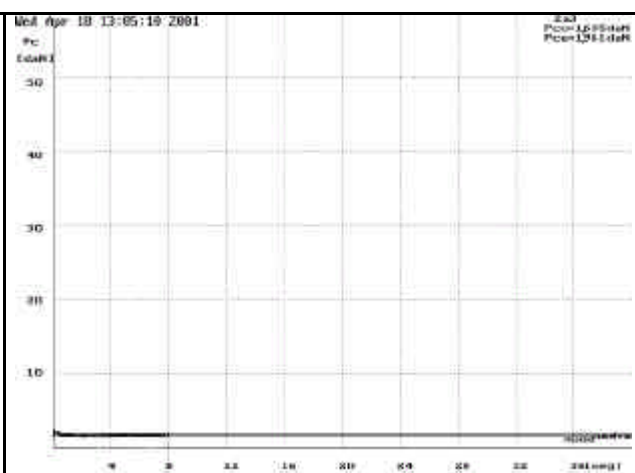


Figura 8

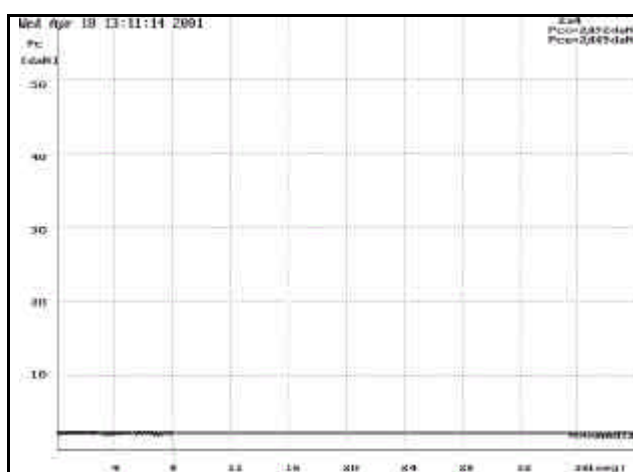


Figura 9



Figura 10



Figura 11

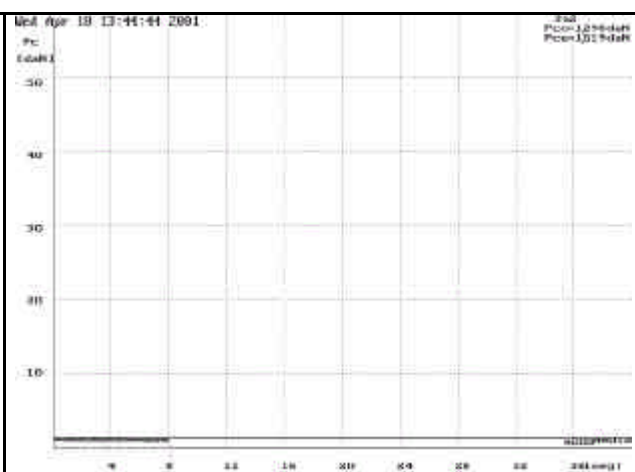


Figura 12



Figura 13



Figura 14

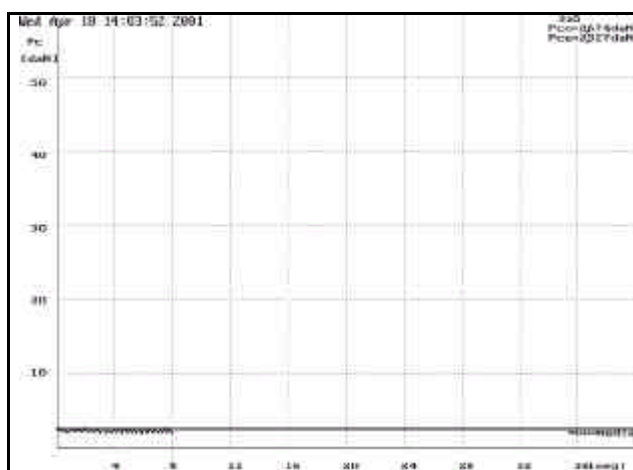


Figura 15



Figura 16

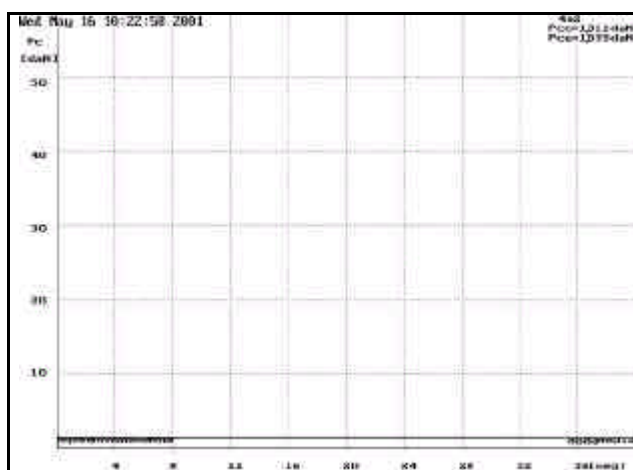


Figura 17



Figura 18

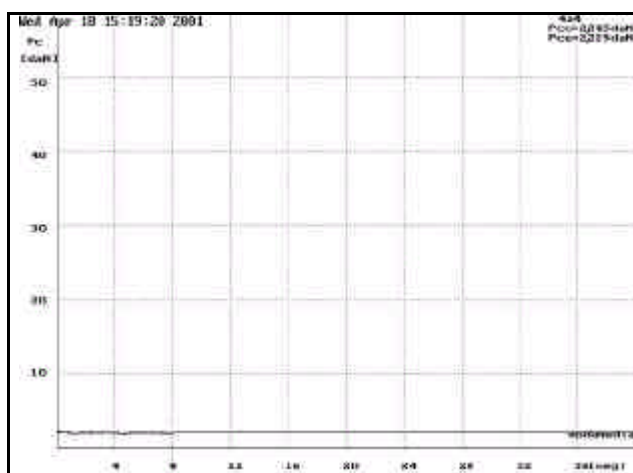


Figura 19



Figura 20

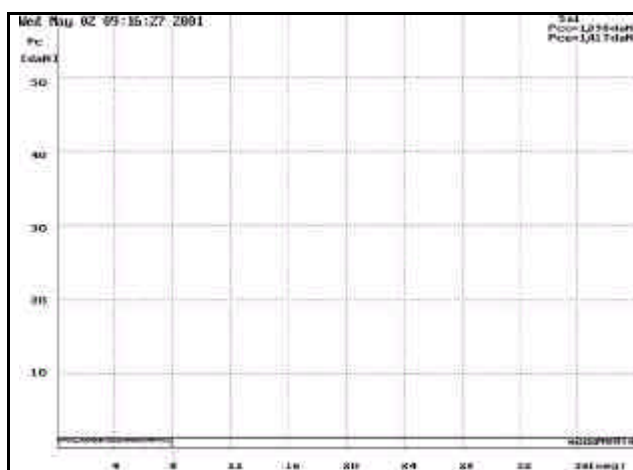


Figura 21



Figura 22

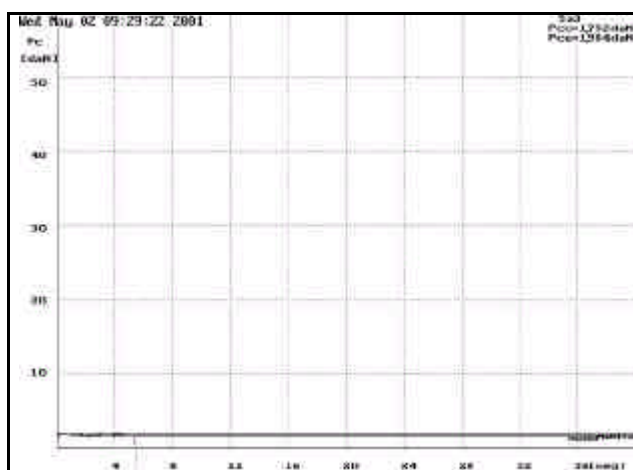


Figura 23



Figura 24

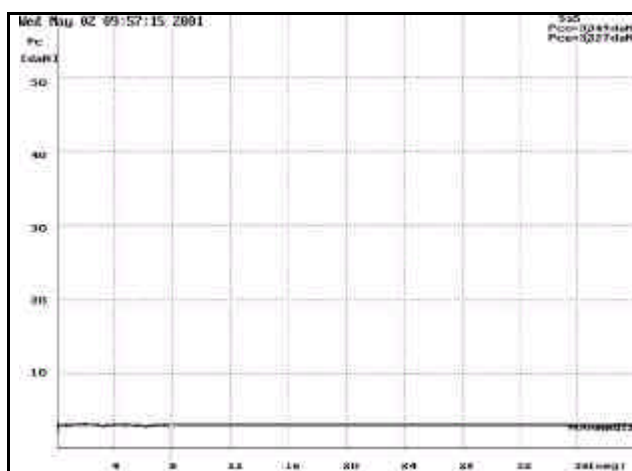


Figura 25



Figura 26

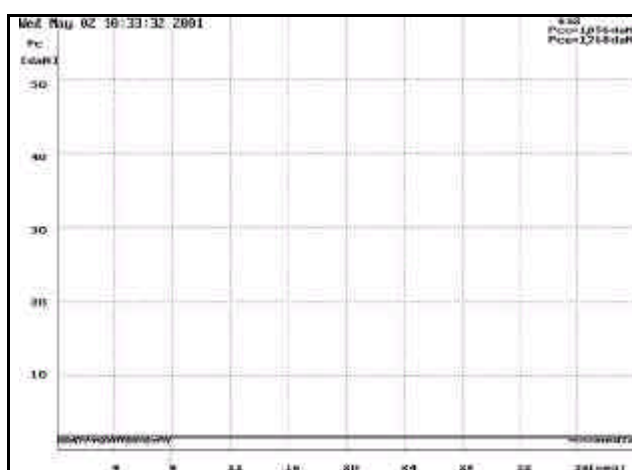


Figura 27

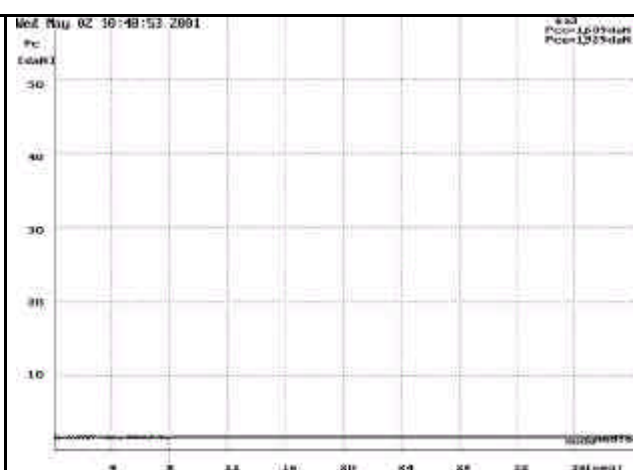


Figura 28

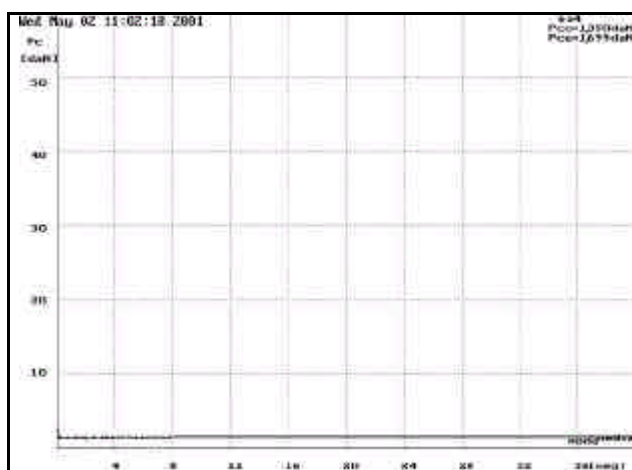


Figura 29

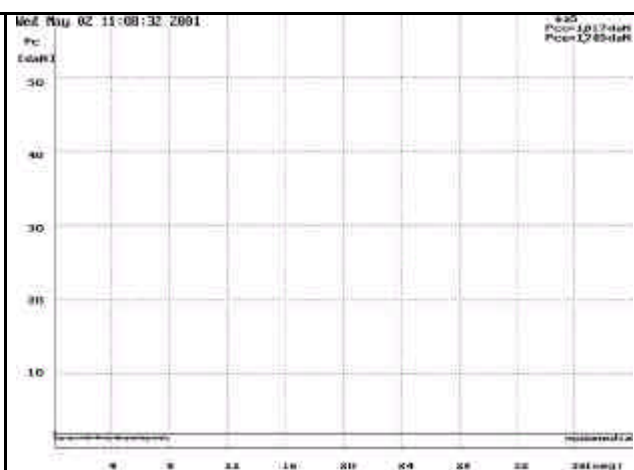


Figura 30

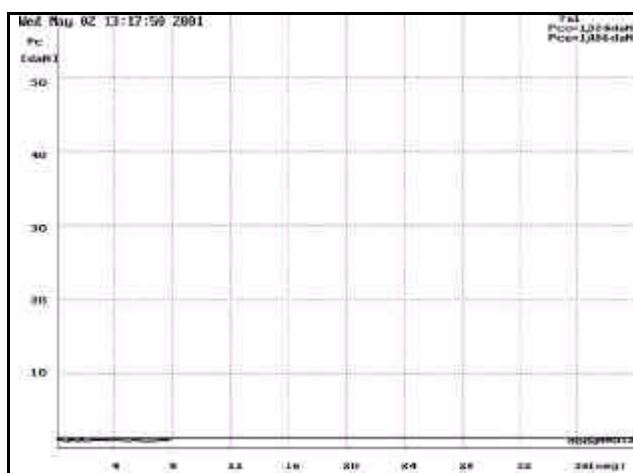


Figura 31



Figura 32

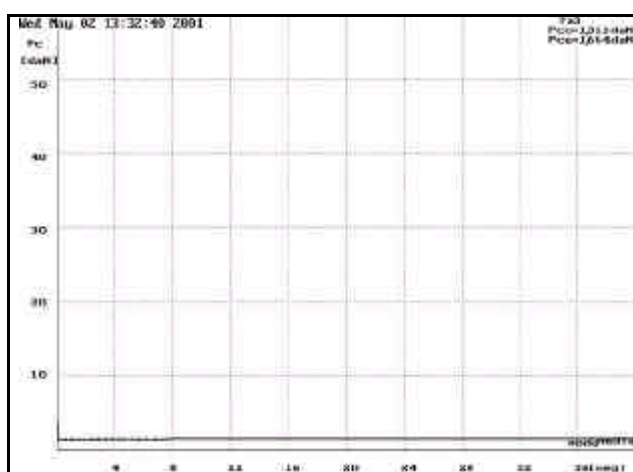


Figura 33



Figura 34



Figura 35

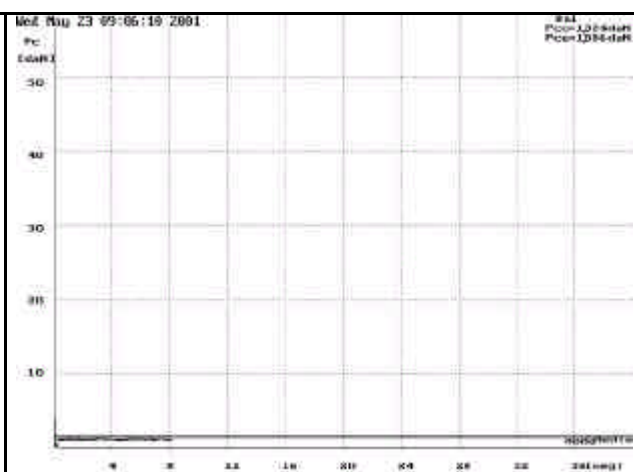


Figura 36



Figura 37



Figura 38

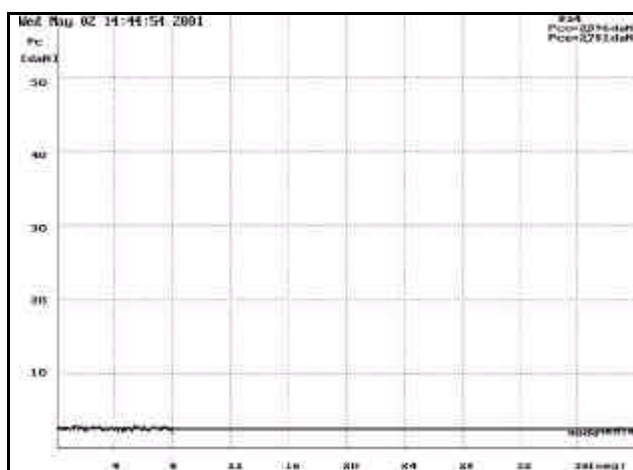


Figura 39

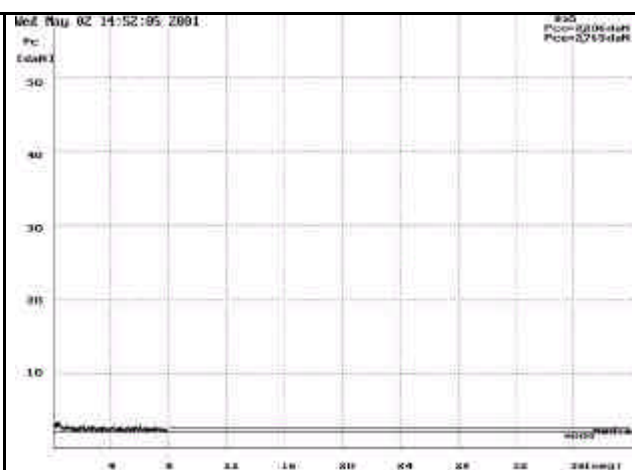


Figura 40



Figura 41



Figura 42

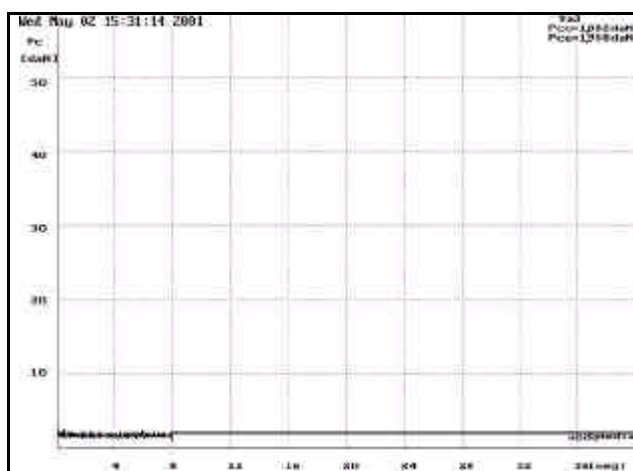


Figura 43

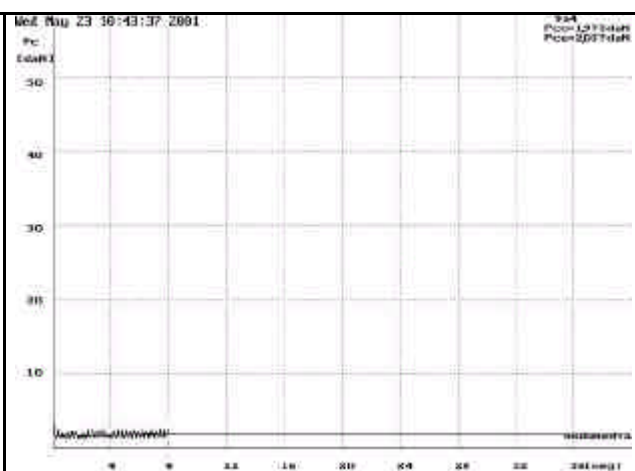


Figura 44

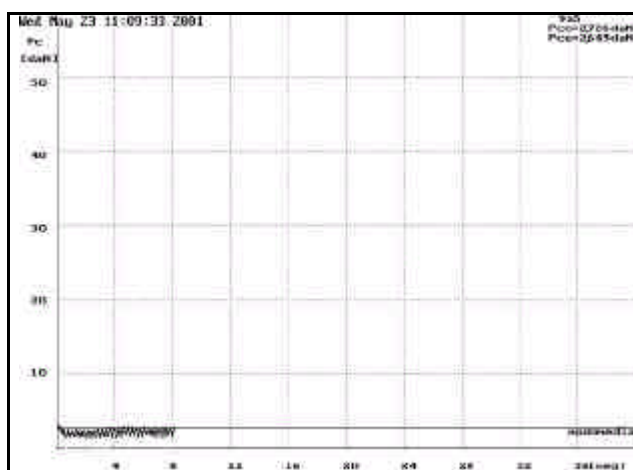


Figura 45



Figura 46



Figura 47



Figura 48



Figura 49



Figura 50

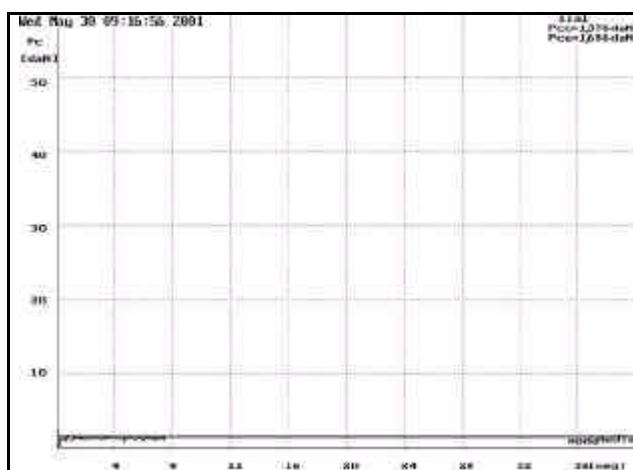


Figura 51

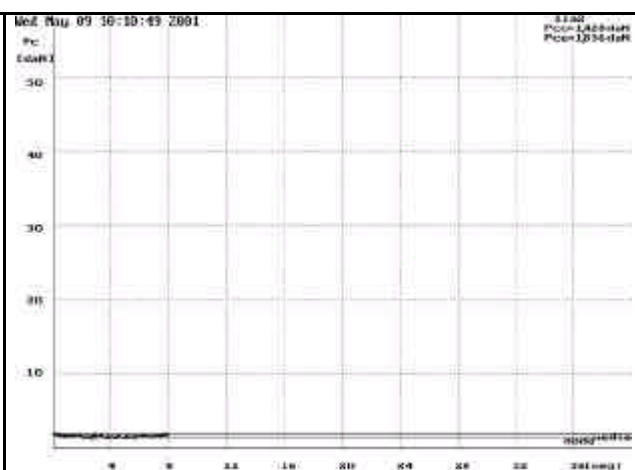


Figura 52



Figura 53



Figura 54



Figura 55



Figura 56



Figura 57



Figura 58



Figura 59



Figura 60



Figura 61

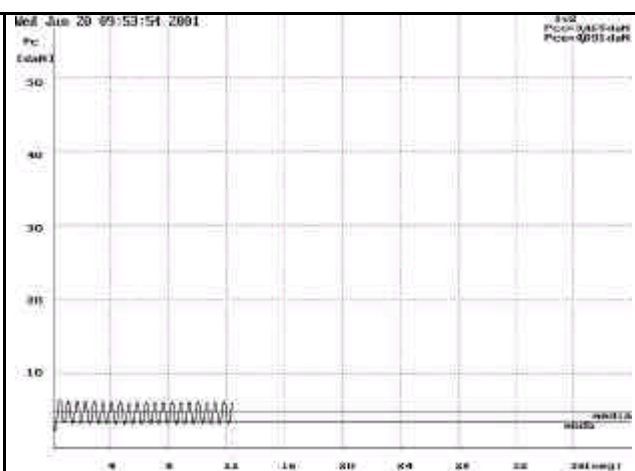


Figura 62

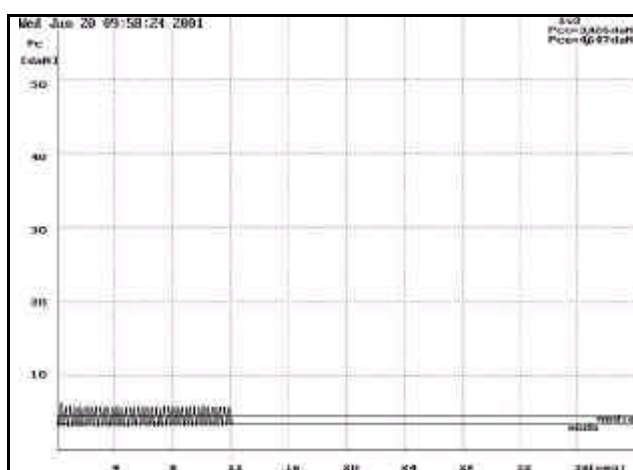


Figura 63

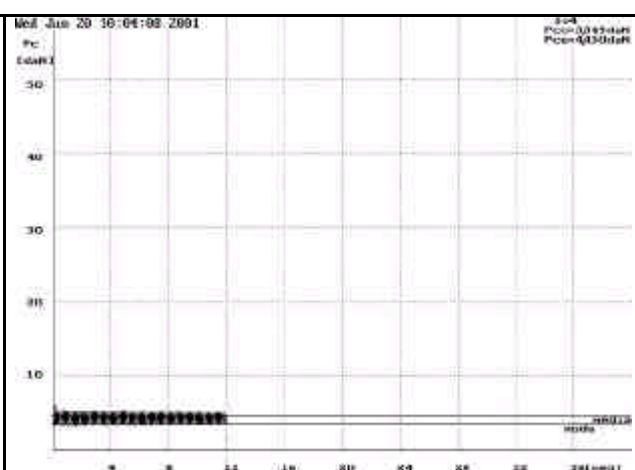


Figura 64

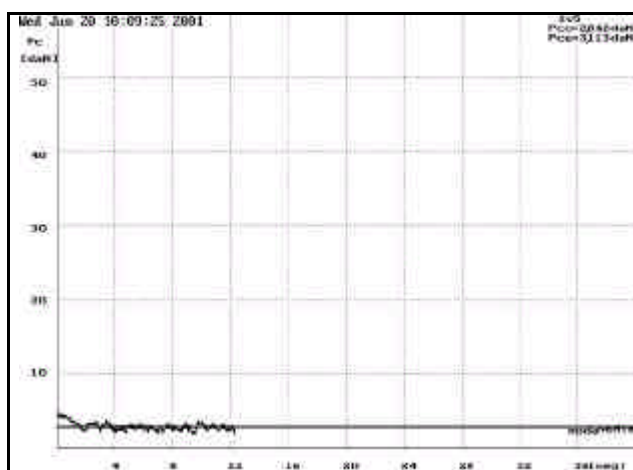


Figura 65



Figura 66

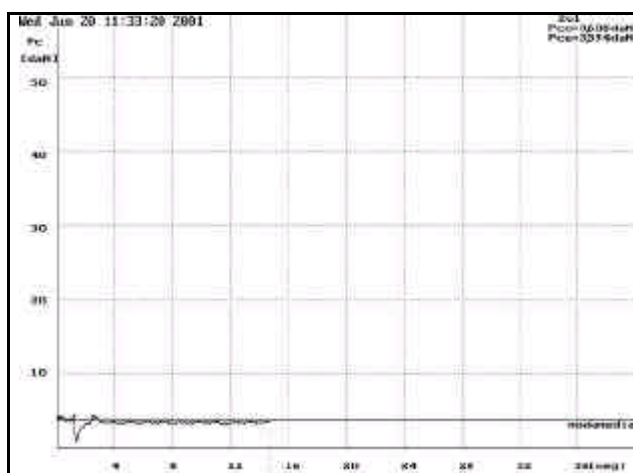


Figura 67



Figura 68

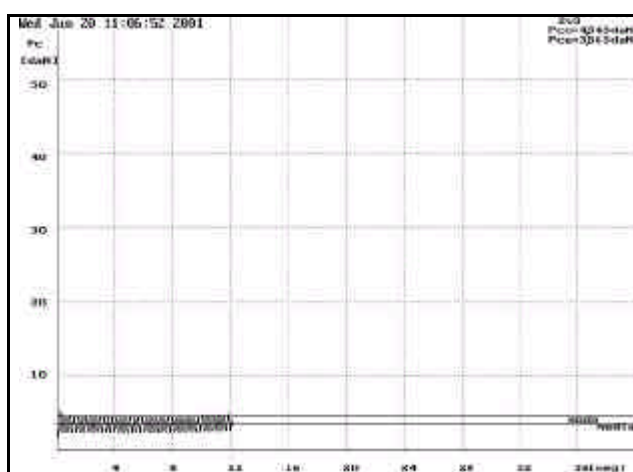


Figura 69

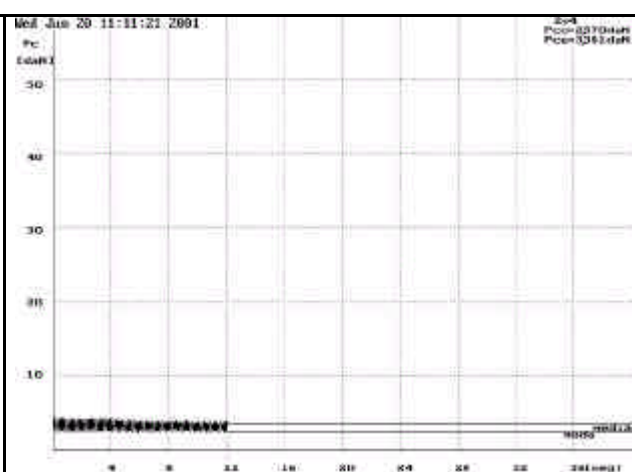


Figura 70

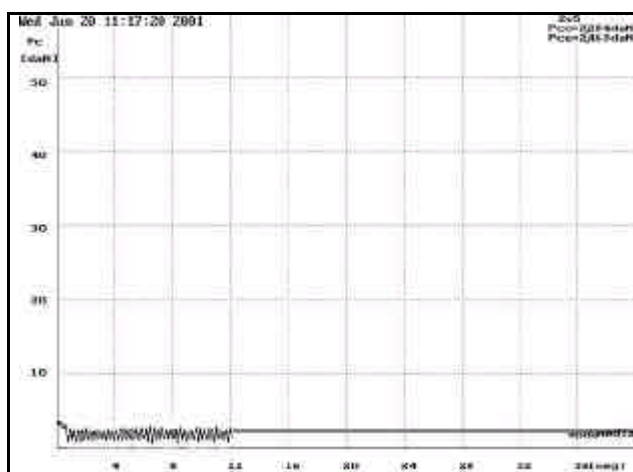


Figura 71



Figura 72

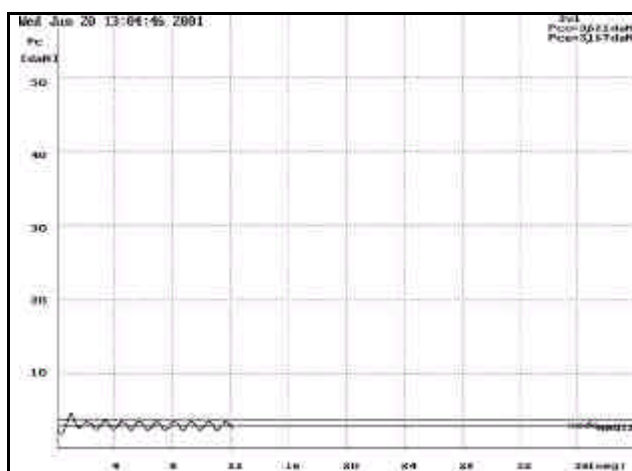


Figura 73

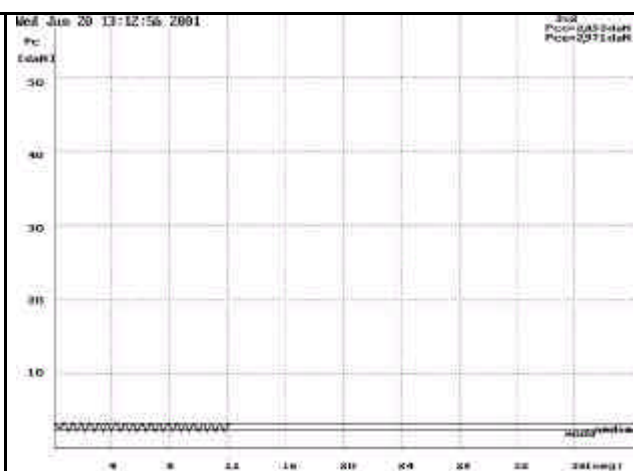


Figura 74

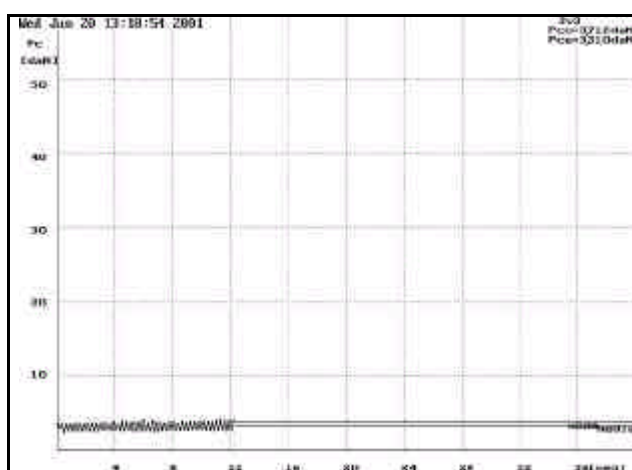


Figura 75



Figura 76

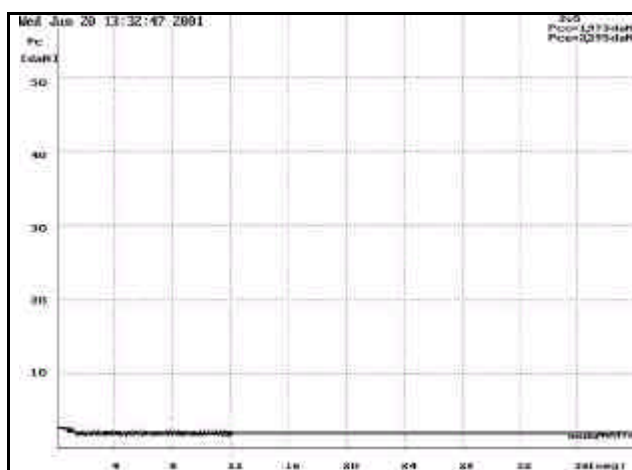


Figura 77



Figura 78

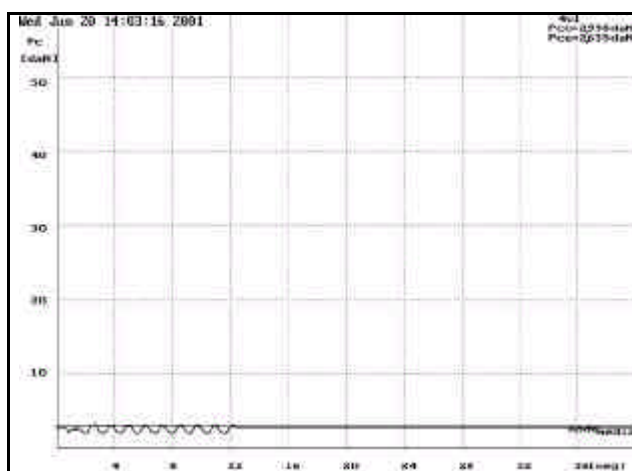


Figura 79



Figura 80

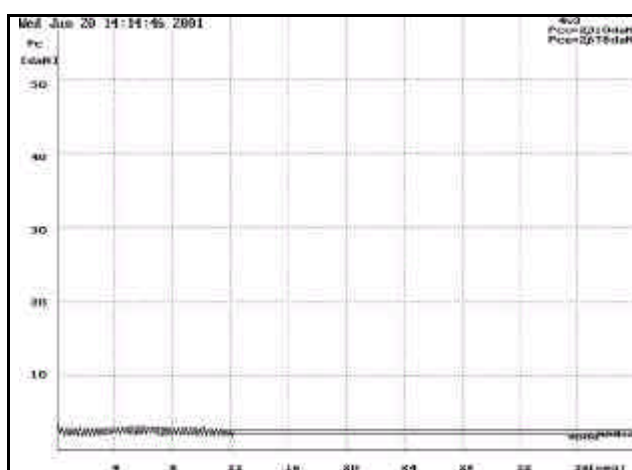


Figura 81



Figura 82



Figura 83



Figura 84



Figura 85

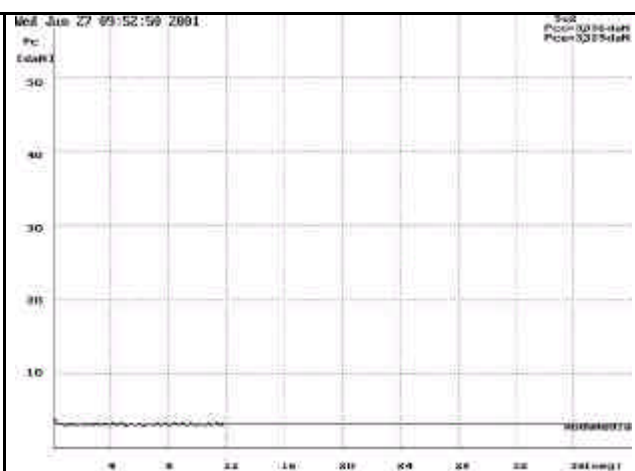


Figura 86

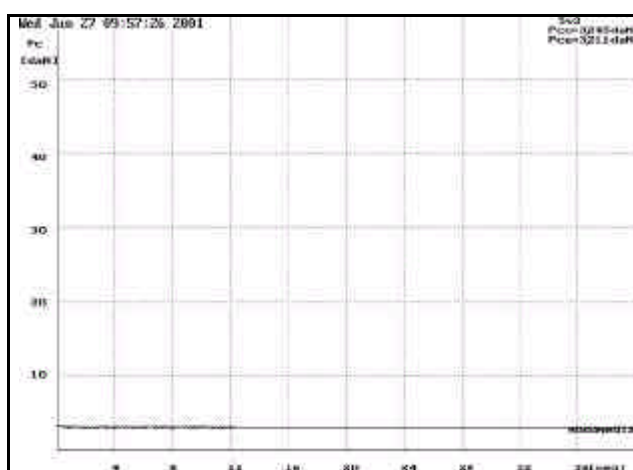


Figura 87

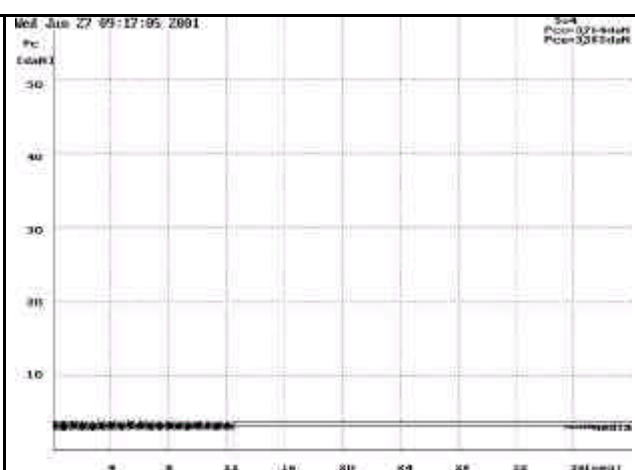


Figura 88

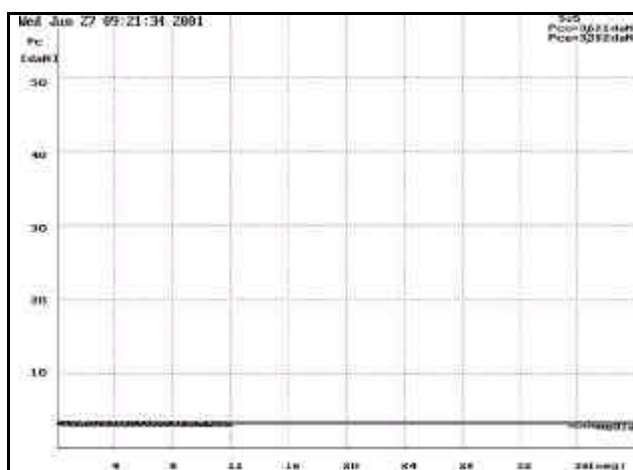


Figura 89

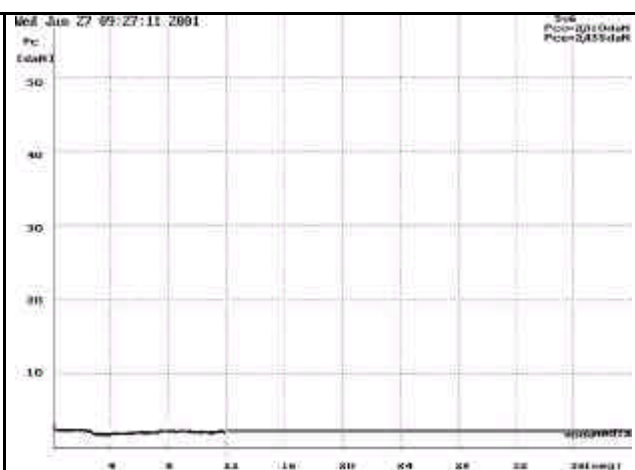


Figura 90



Figura 91



Figura 92

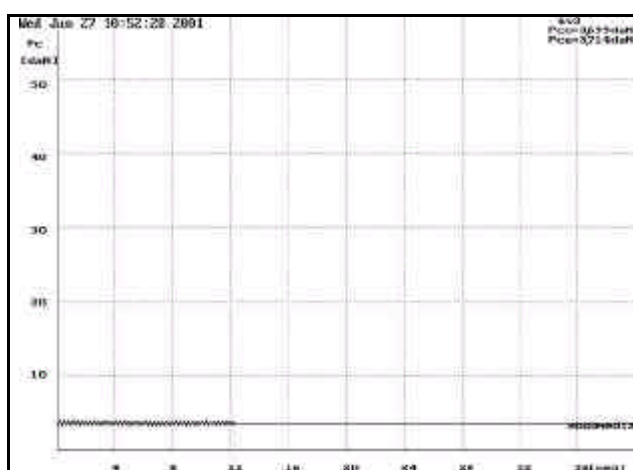


Figura 93



Figura 94

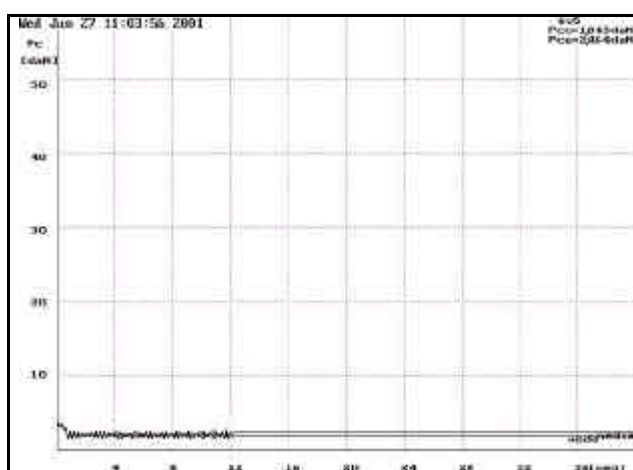


Figura 95



Figura 96

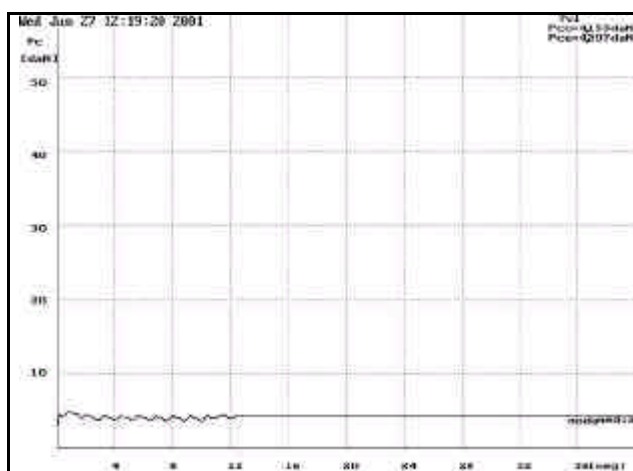


Figura 97



Figura 98



Figura 99

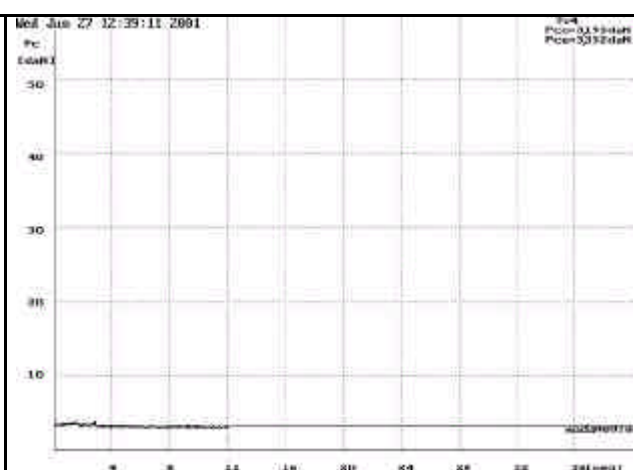


Figura 100

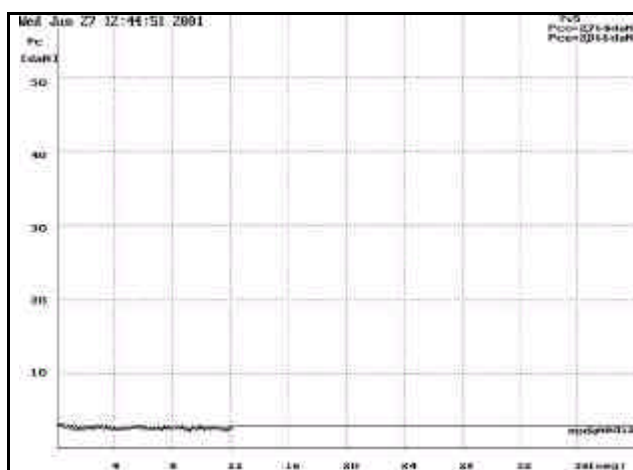


Figura 101



Figura 102

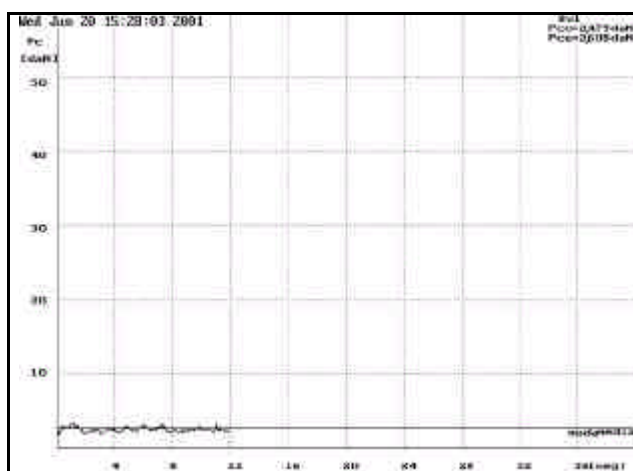


Figura 103



Figura 104

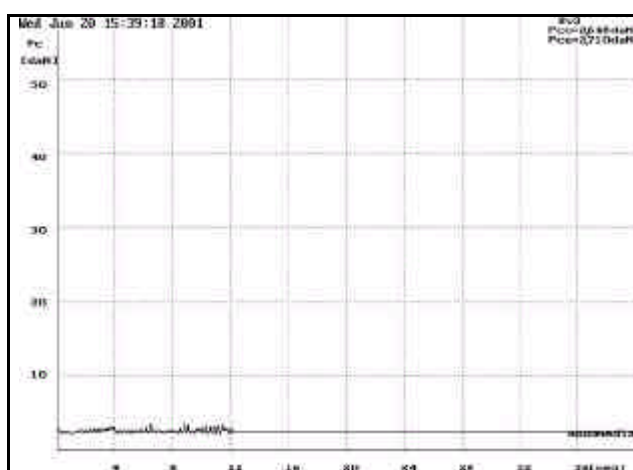


Figura 105

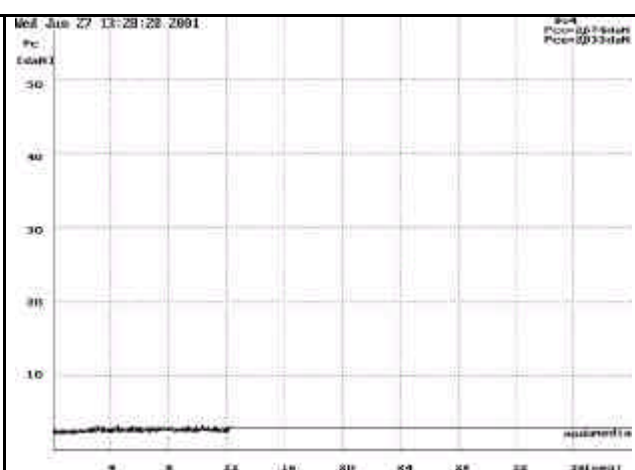


Figura 106



Figura 107

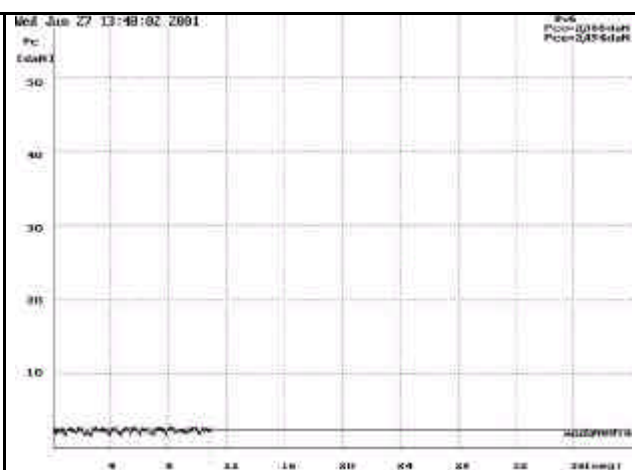


Figura 108

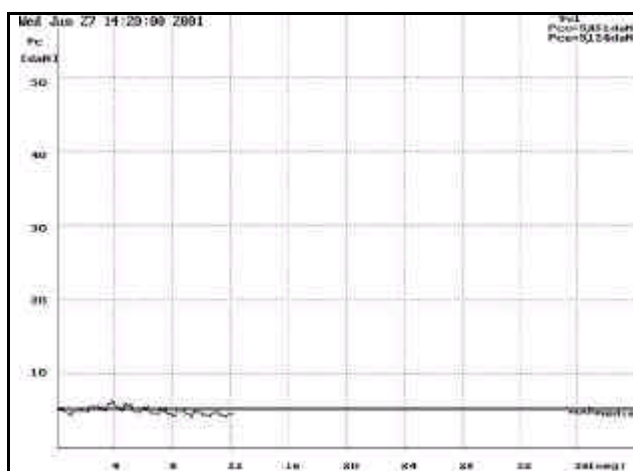


Figura 109



Figura 110



Figura 111



Figura 112

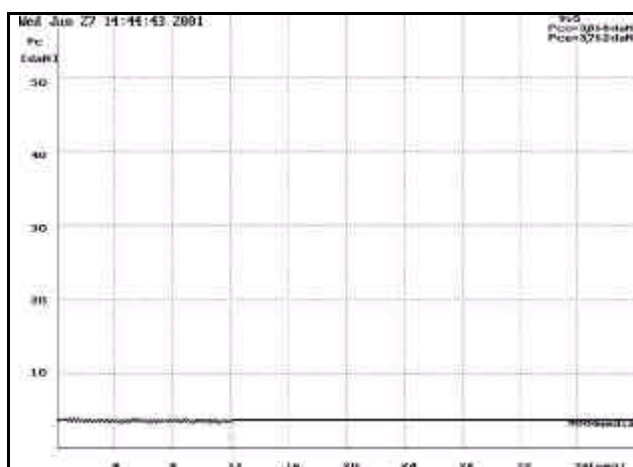


Figura 113

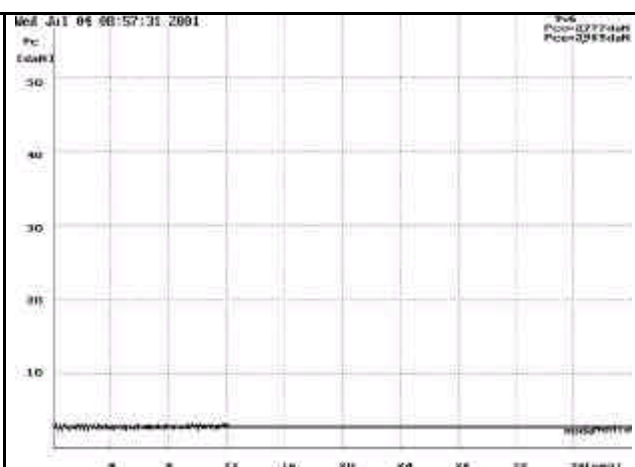


Figura 114

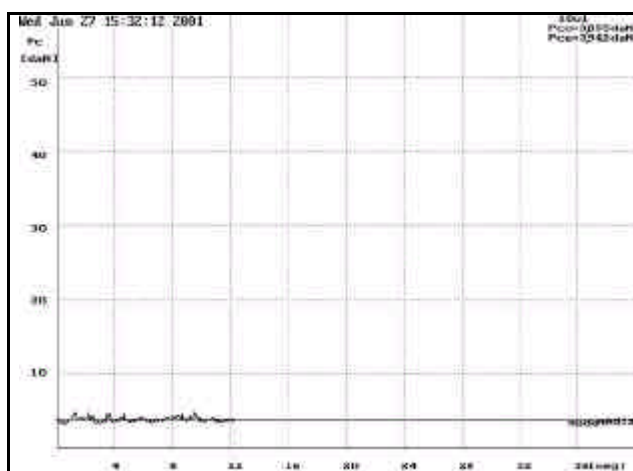


Figura 115



Figura 116

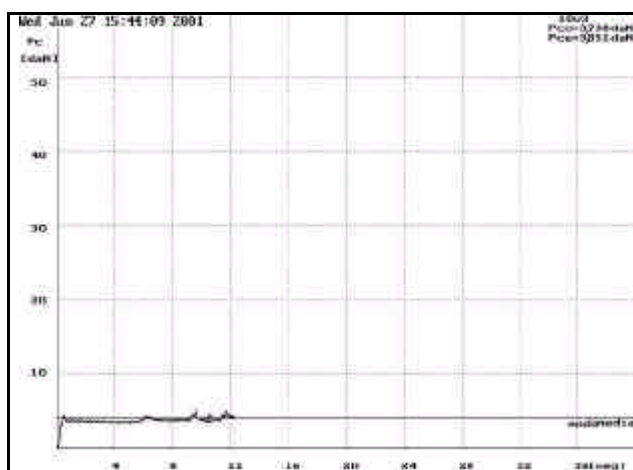


Figura 117



Figura 118

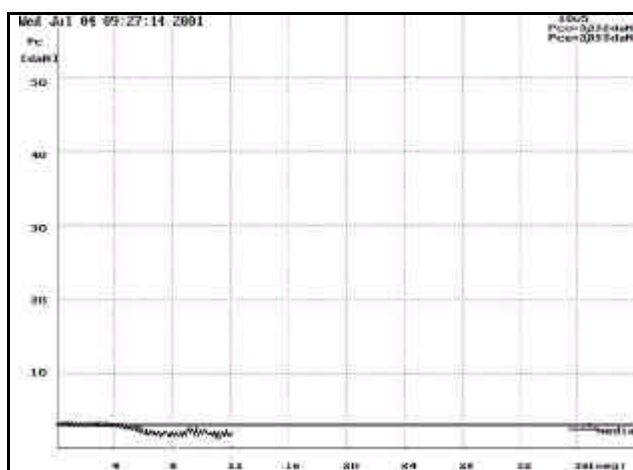


Figura 119



Figura 120



Figura 121

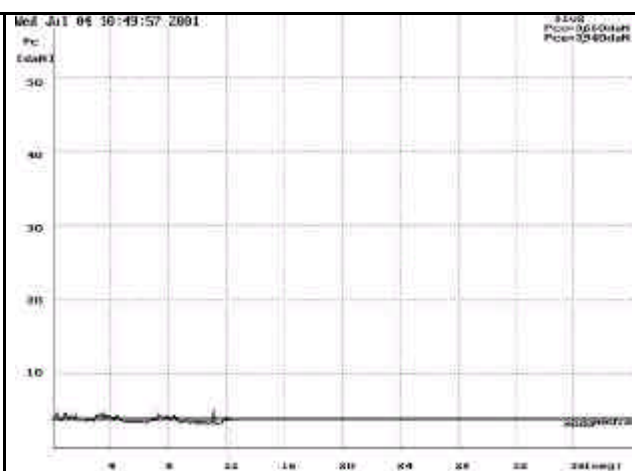


Figura 122

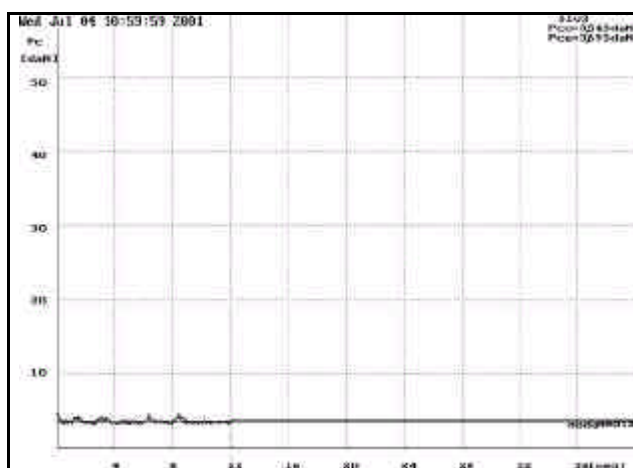


Figura 123



Figura 124



Figura 125



Figura 126

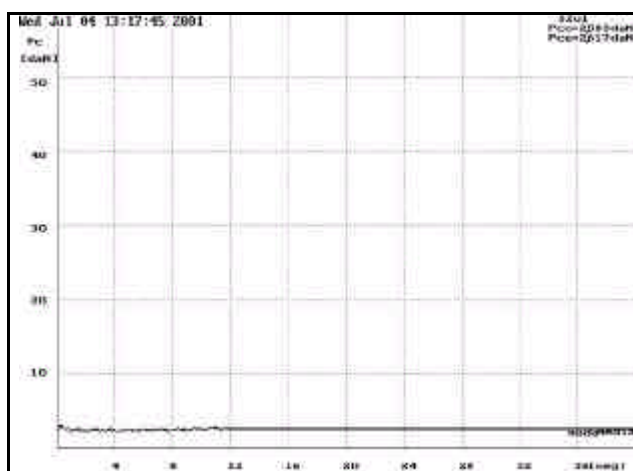


Figura 127

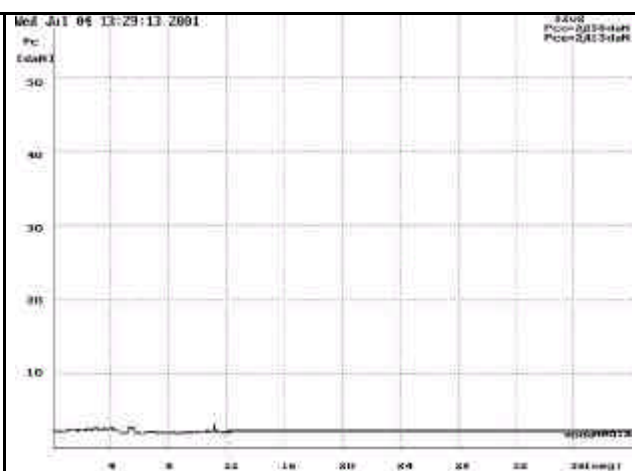


Figura 128

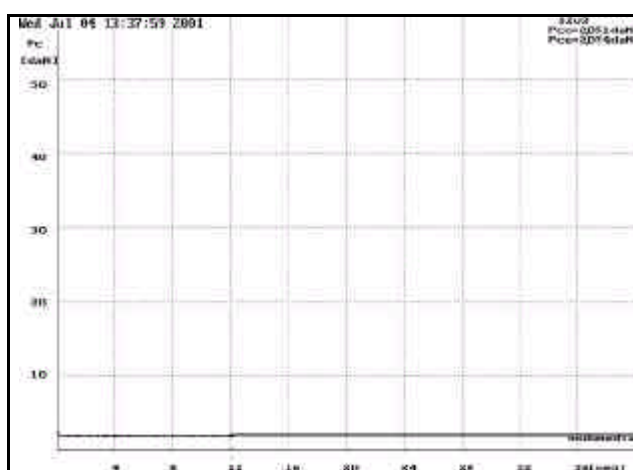


Figura 129

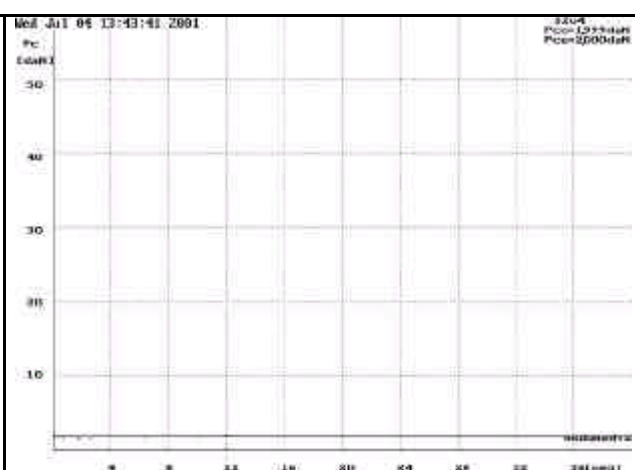


Figura 130

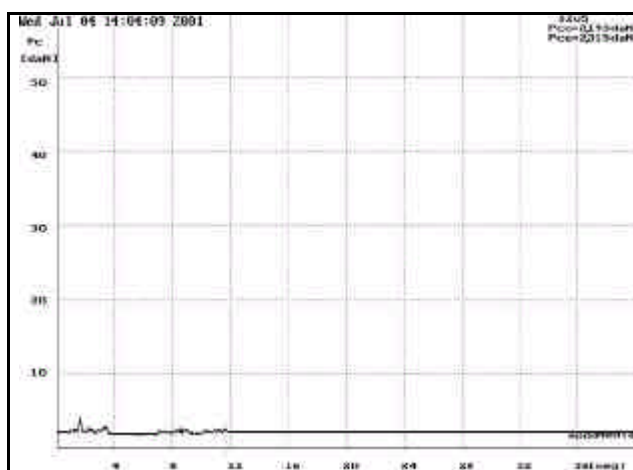


Figura 131



Figura 132



Figura 133



Figura 134



Figura 135



Figura 136

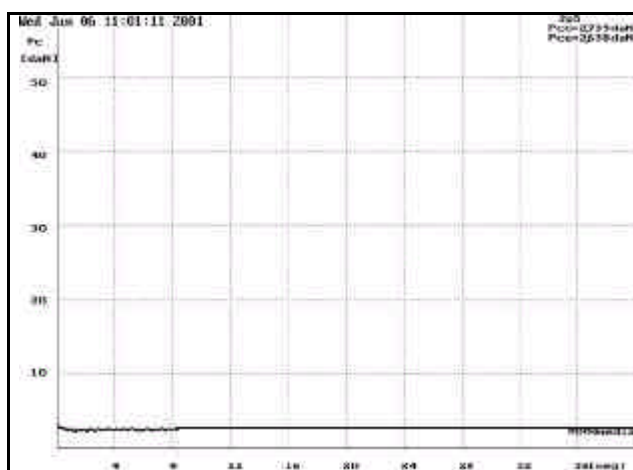


Figura 137

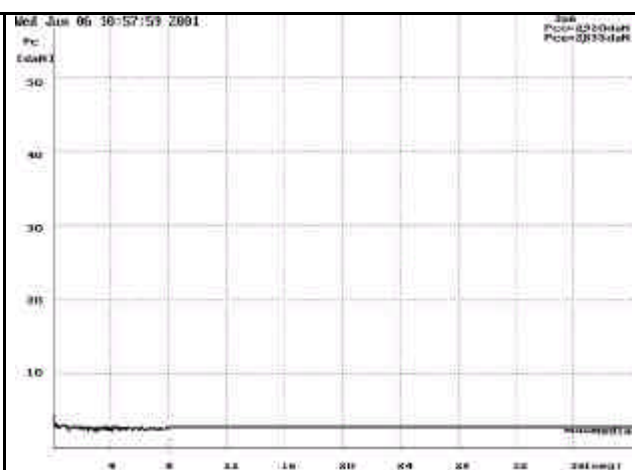
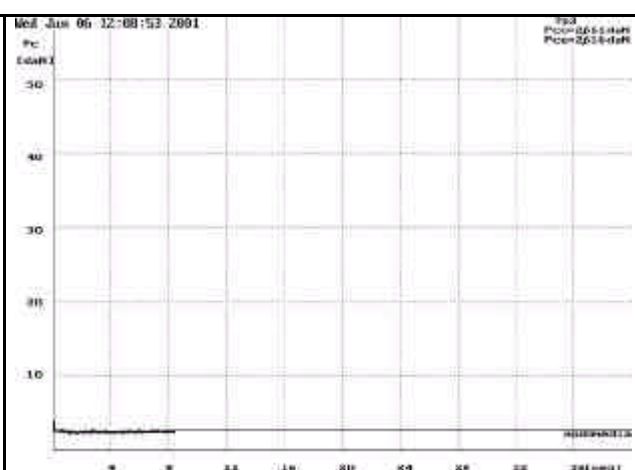
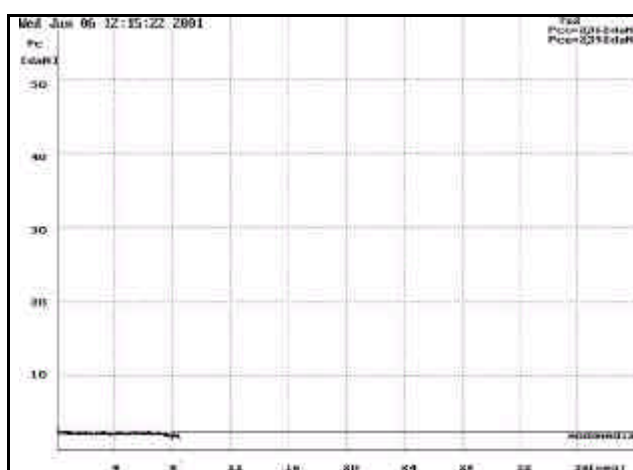
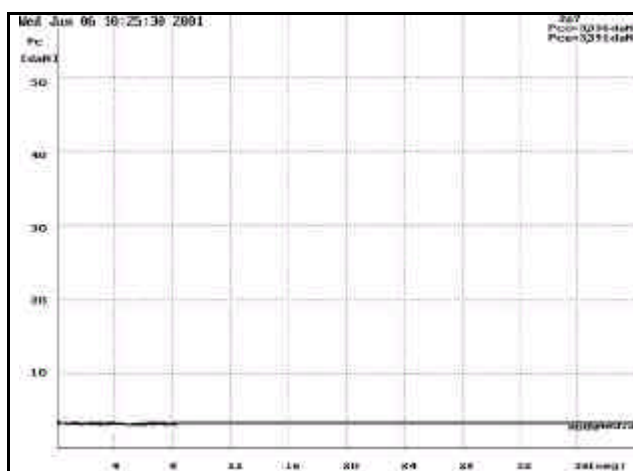


Figura 138



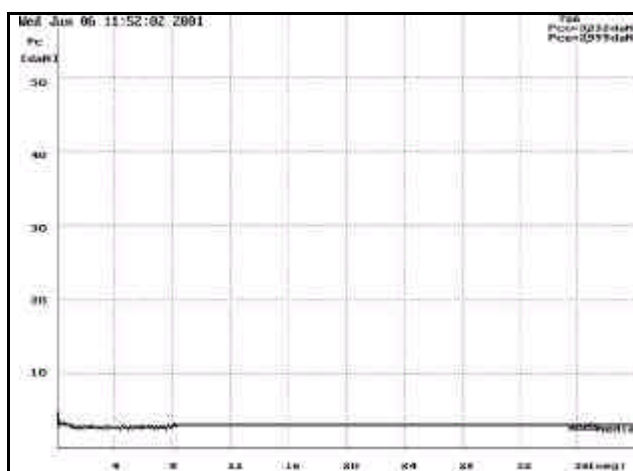


Figura 145

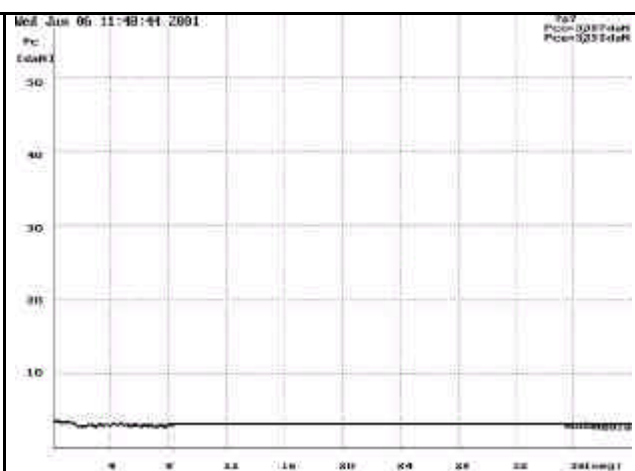


Figura 146

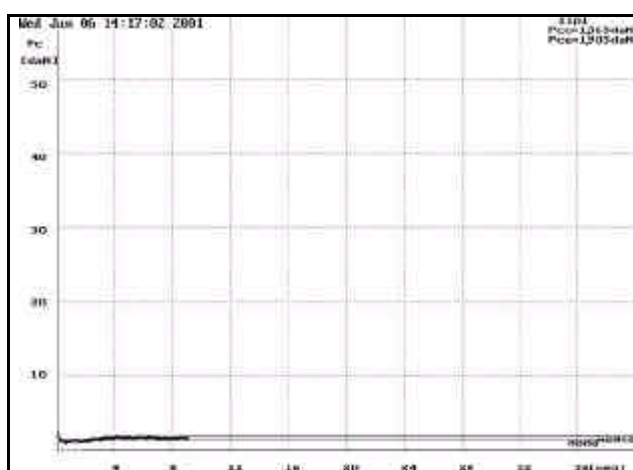


Figura 147



Figura 148

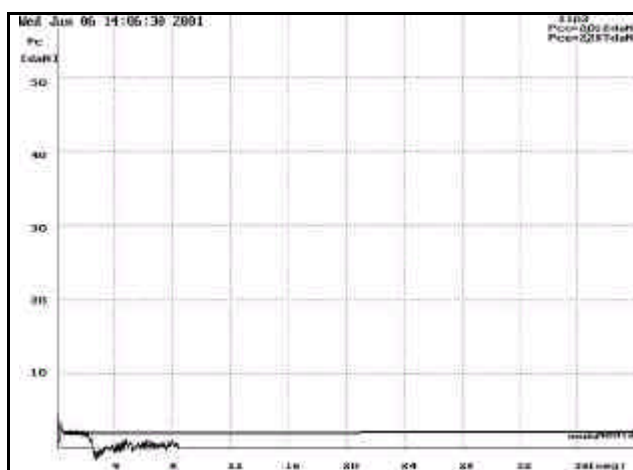


Figura 149



Figura 150

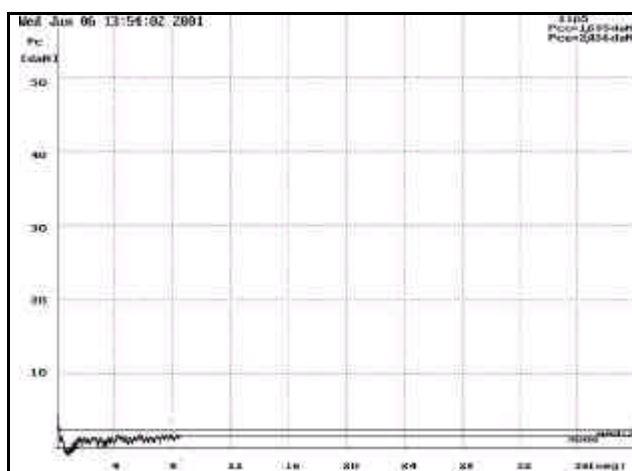


Figura 151



Figura 152



Figura 153

## ANEXO 4

## Cavaco Gerado na Usinagem

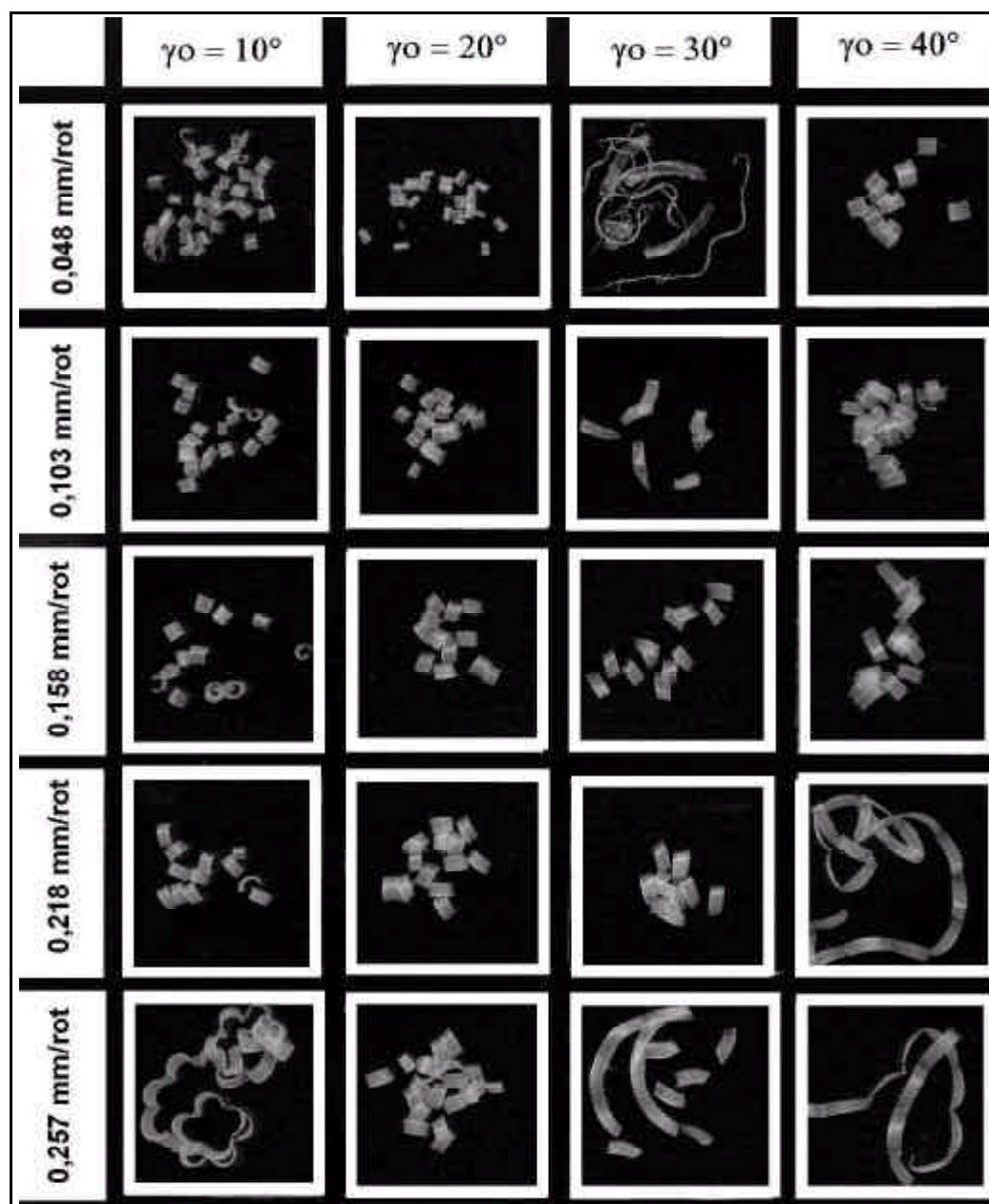


Figura A4.1- Cavacos obtidos com  $c_r = 60^\circ$  para  $\gamma_0$  e  $f$  adotados.

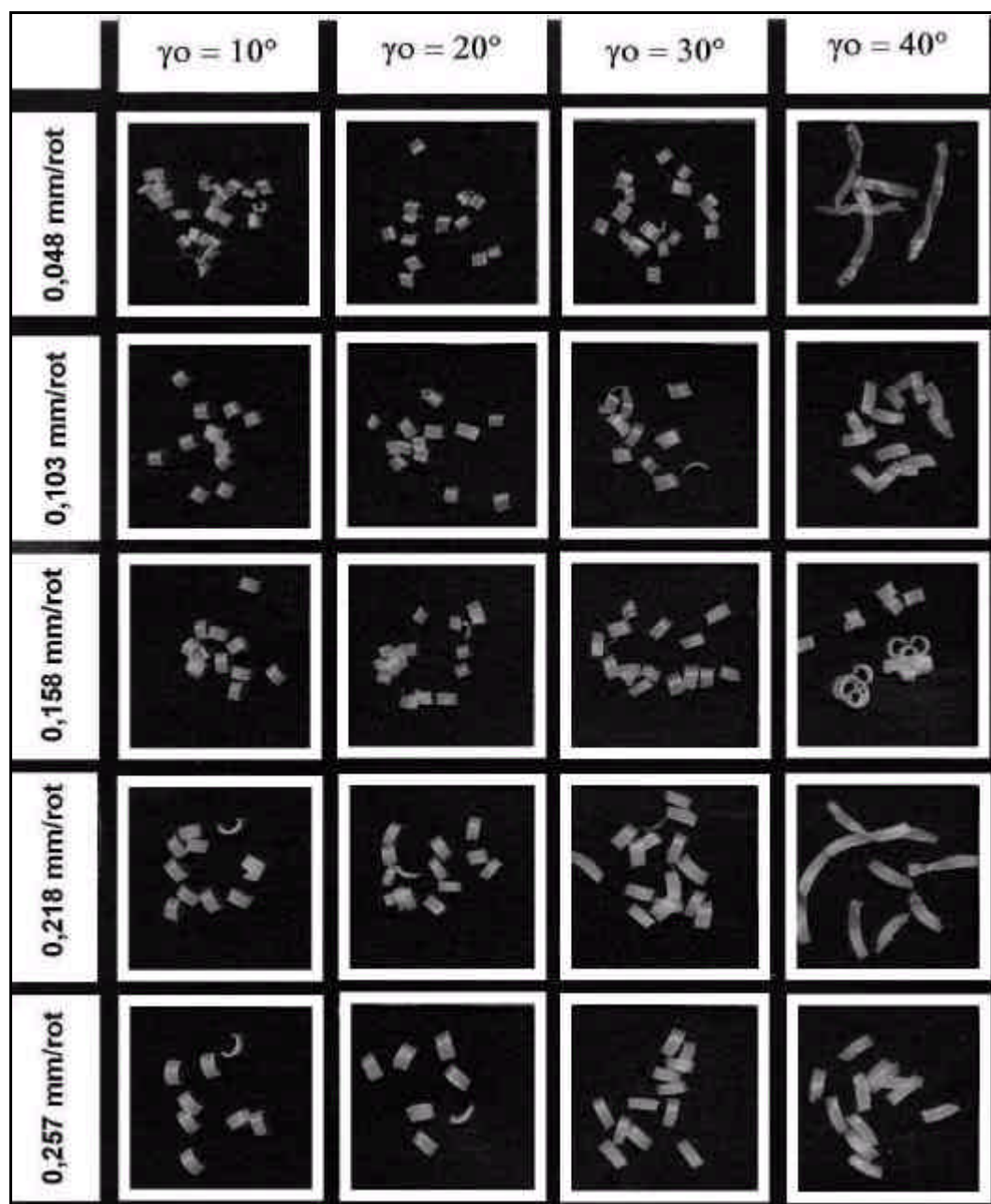


Figura A4.2- Cavaco obtidos com  $c_r = 75^\circ$  para  $\gamma_0$  e  $f$  adotados.

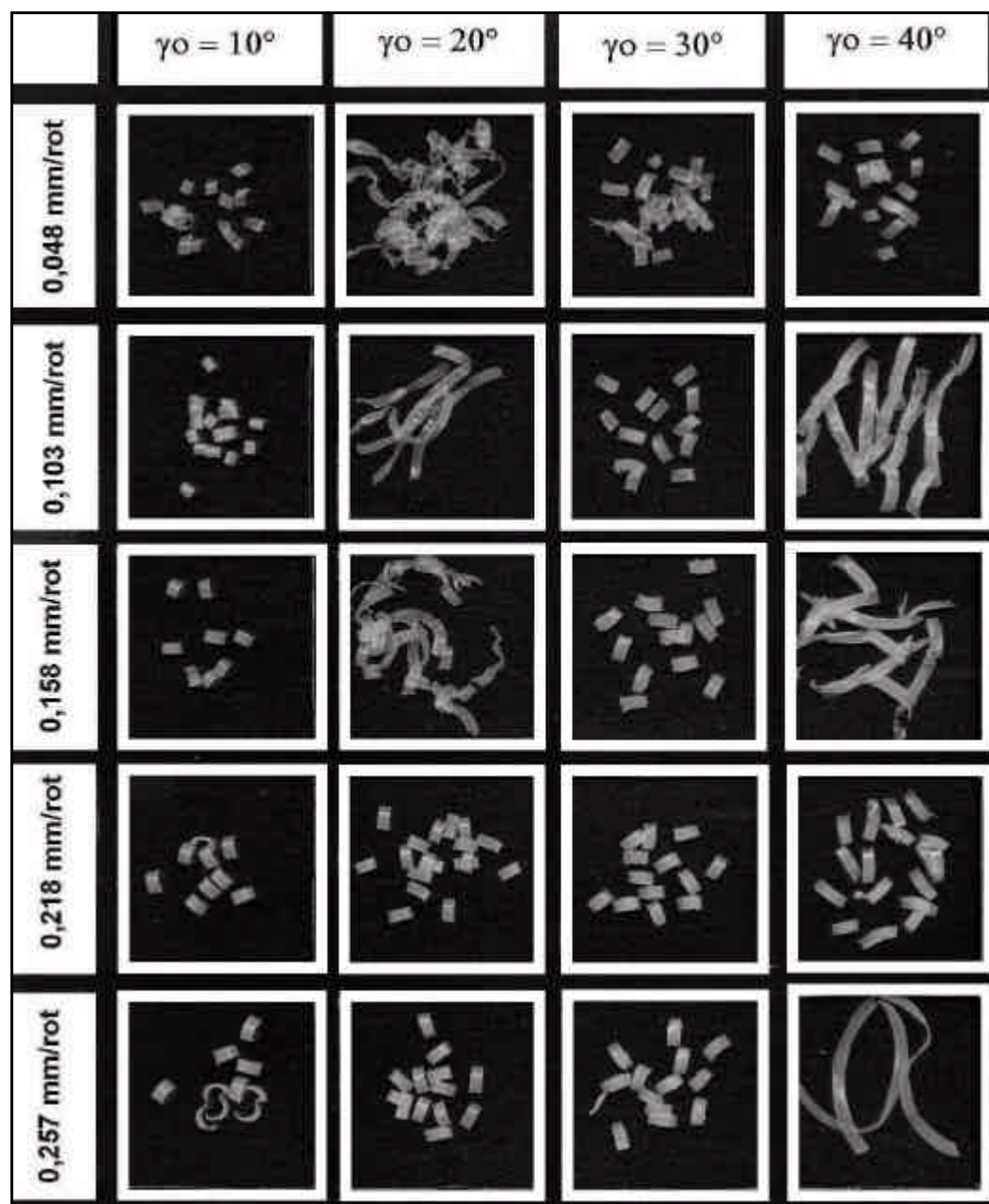


Figura A4.3- Cavaco obtidos com  $c_r = 90^\circ$  para  $\gamma_0$  e  $f$  adotados.

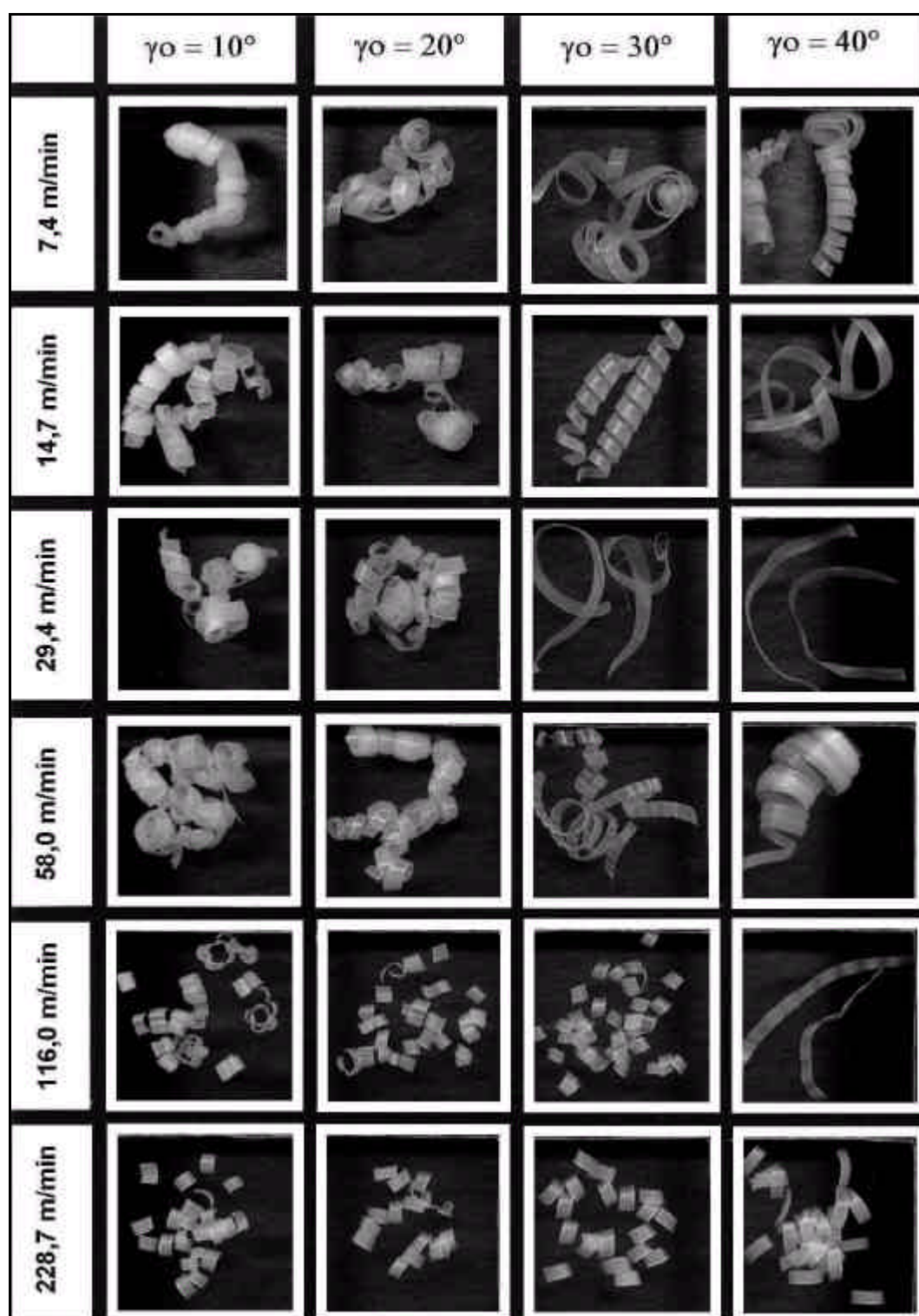


Figura A4.4- Cavaco obtidos com  $c_r = 60^\circ$  para  $\gamma_0$  e  $V_c$  adotados.

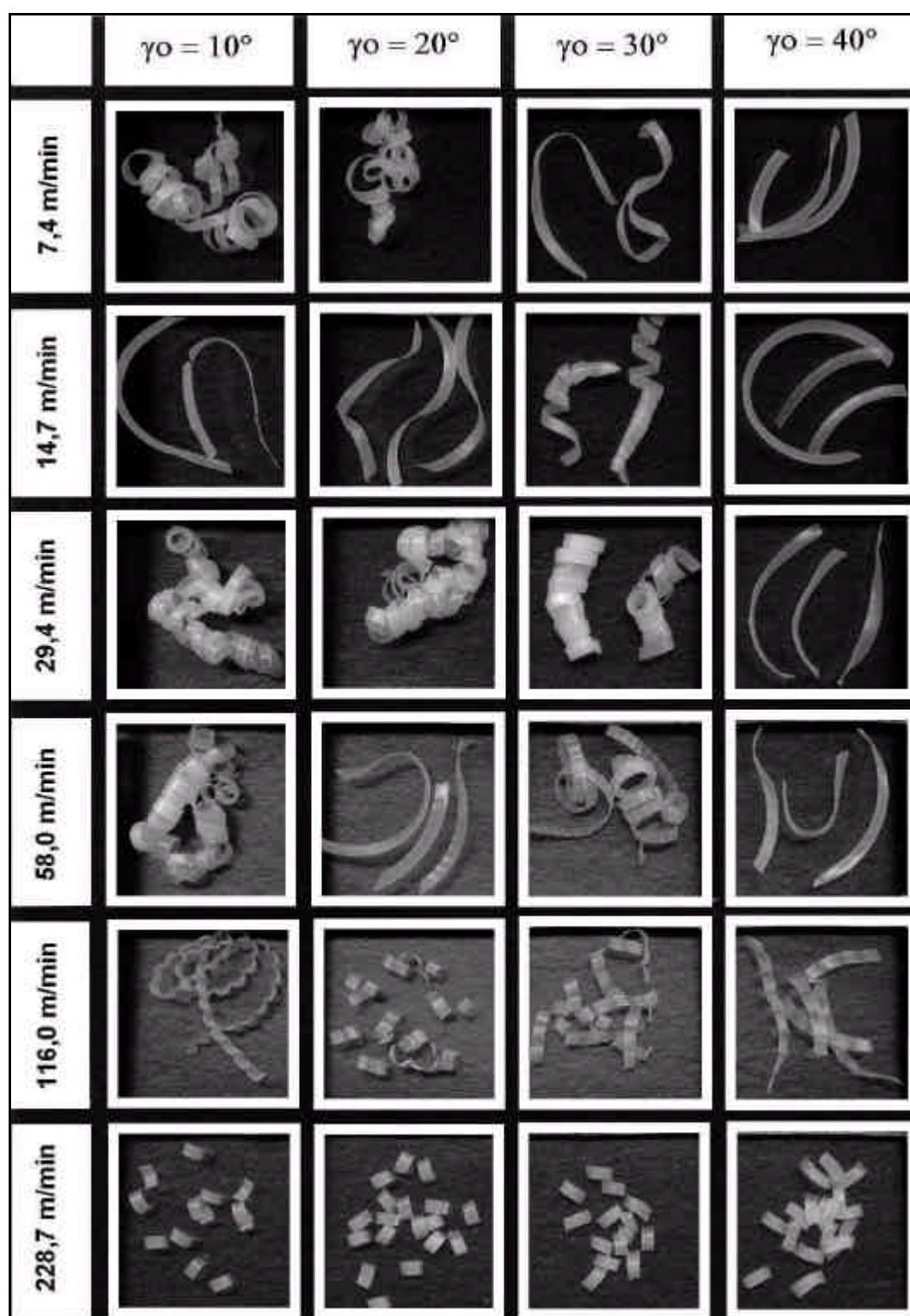


Figura A4.5- Cavaco obtidos com  $c_r = 75^\circ$  para  $\gamma_0$  e  $V_c$  adotados.

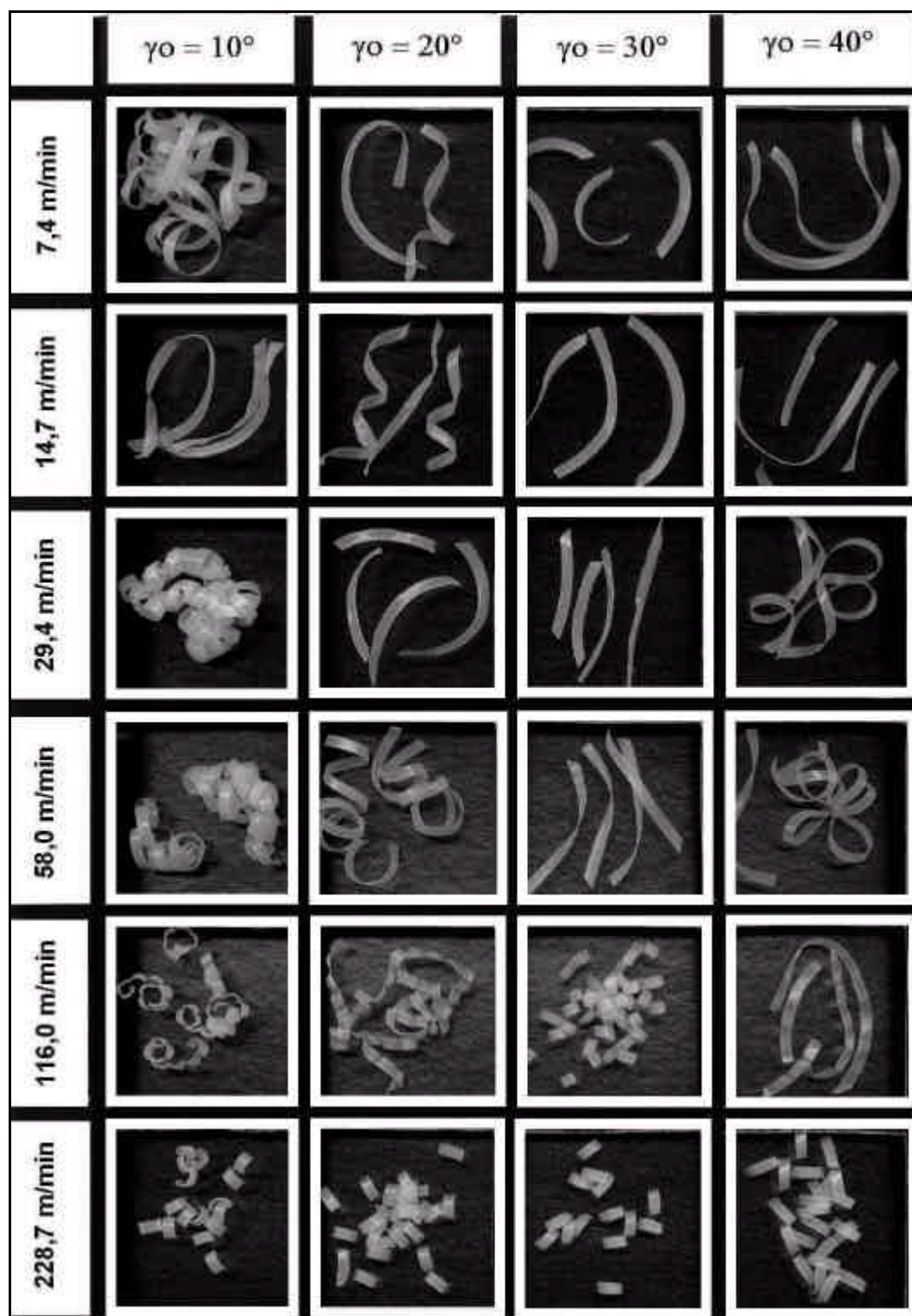


Figura A4.6- Cavaco obtidos com  $c_r = 90^\circ$  para  $\gamma_0$  e  $V_c$  adotados.

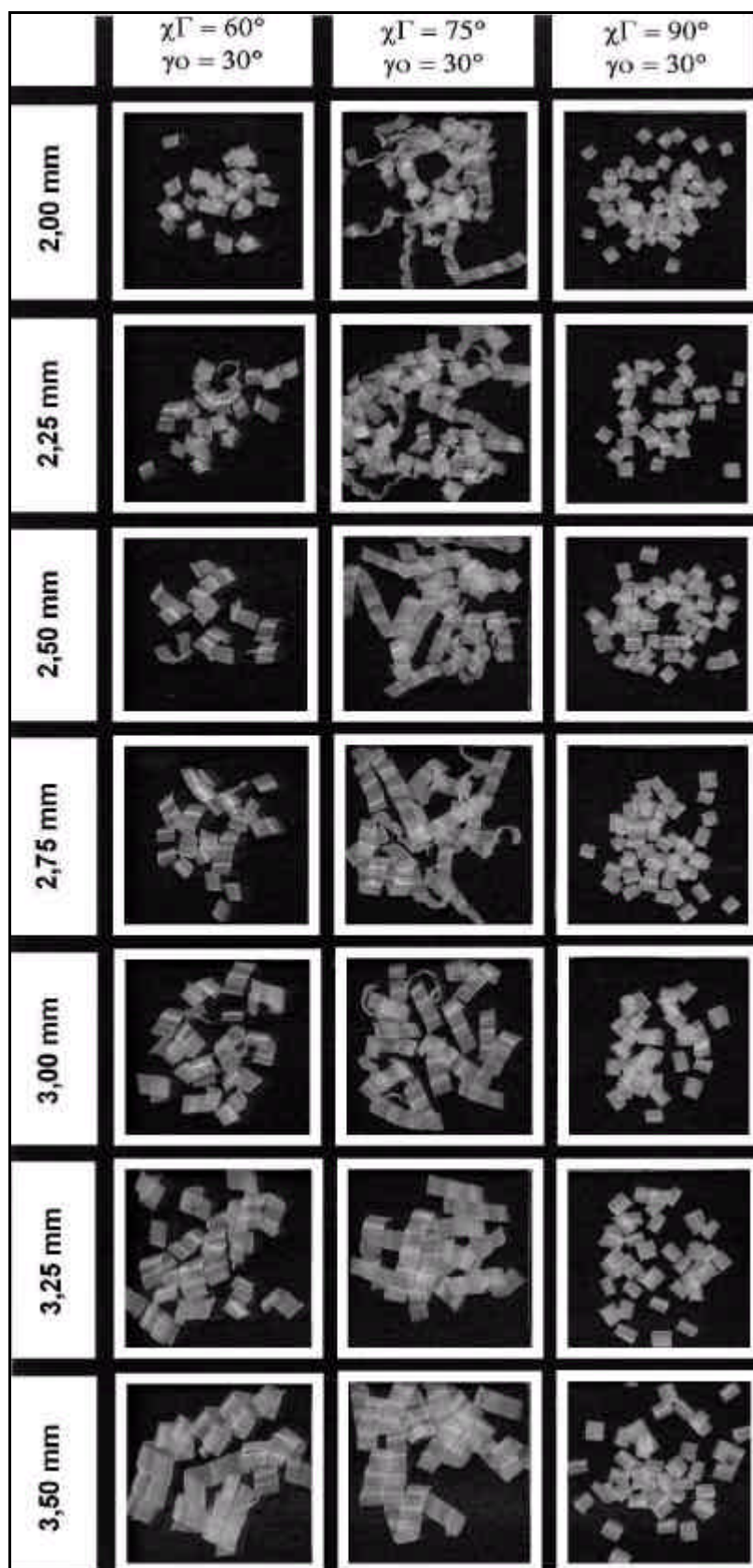
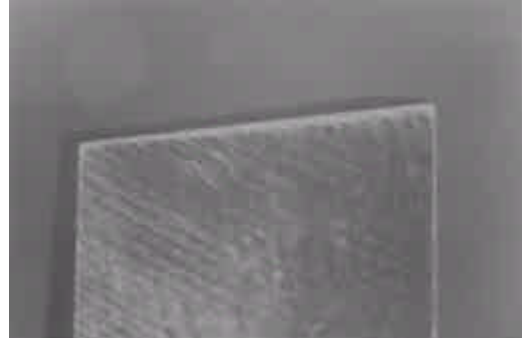
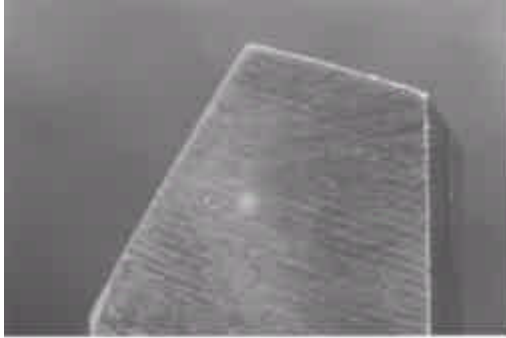


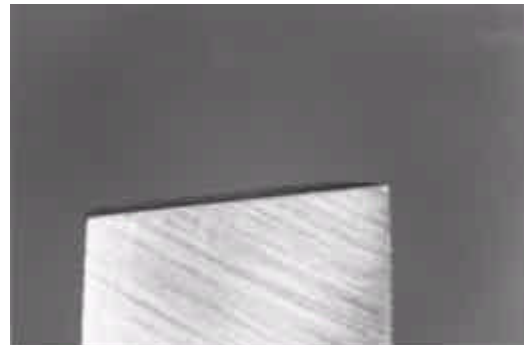
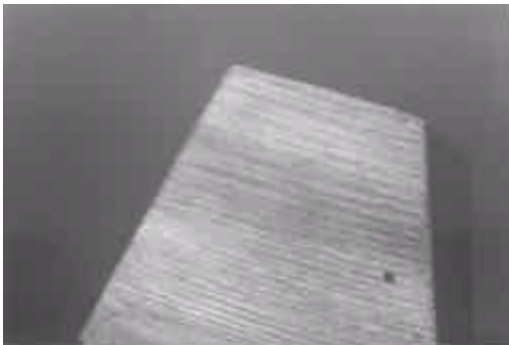
Figura A4.7- Cavacos obtidos com  $g_O = 30^\circ$  para ângulo de posição e profundidade de corte adotadas.

## **ANEXO 5**

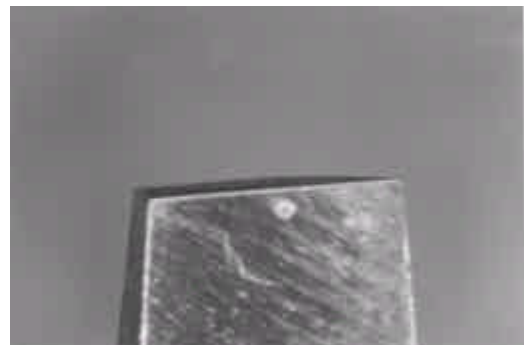
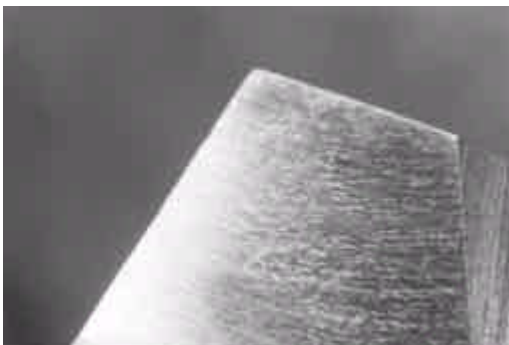
### **Estado das Ferramentas de Corte**



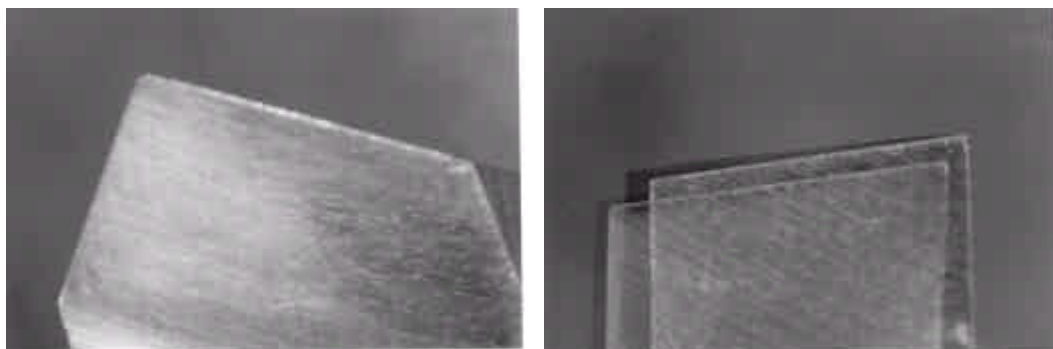
**Figura A5.1-** Ferramenta 1.



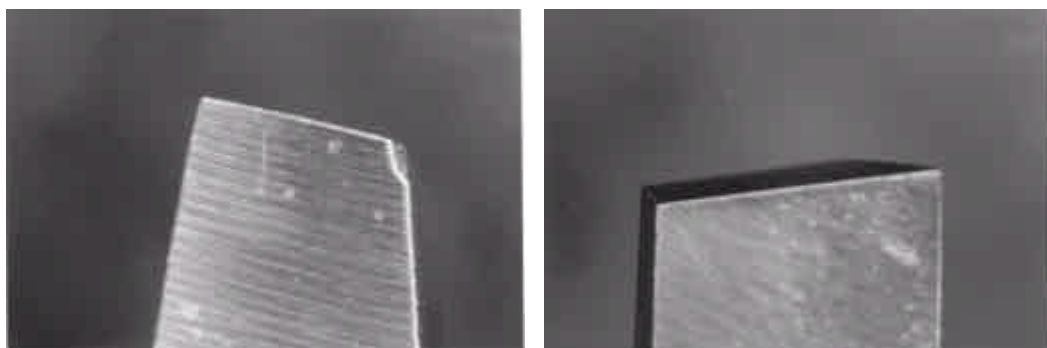
**Figura A5.2-** Ferramenta 2.



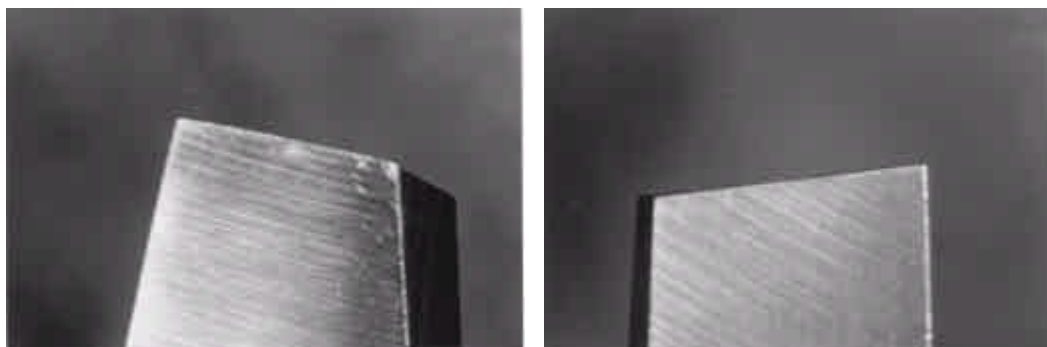
**Figura A5.3-** Ferramenta 3.



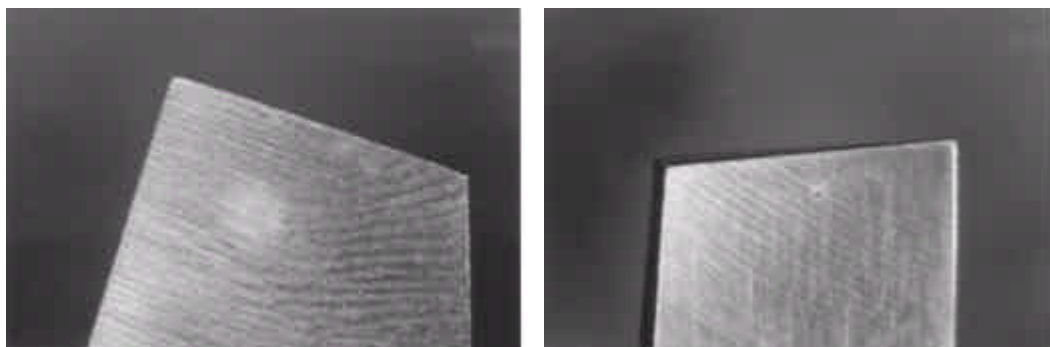
**Figura A5.4-** Ferramenta 4.



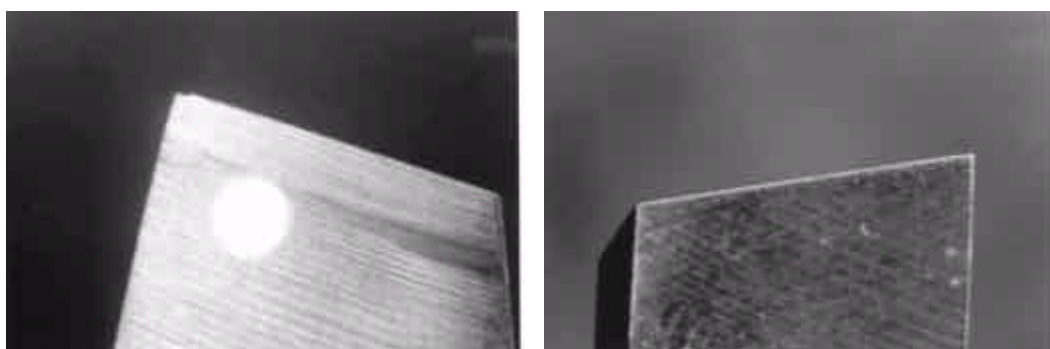
**Figura A5.5-** Ferramenta 5.



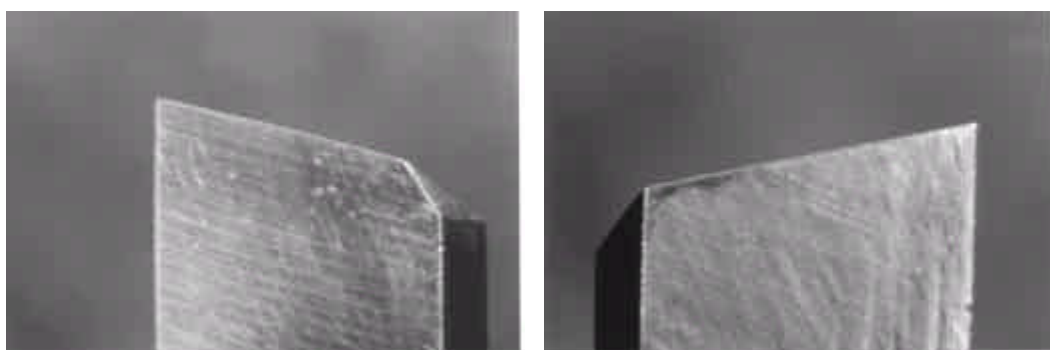
**Figura A5.6-** Ferramenta 6.



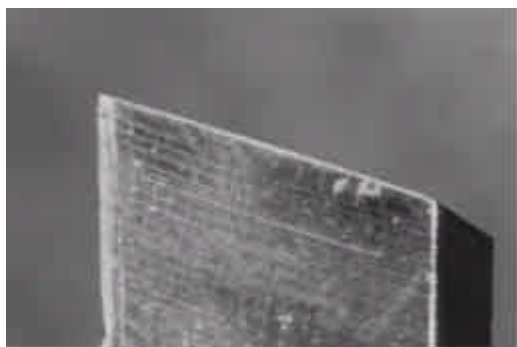
**Figura A5.7-** Ferramenta 7.



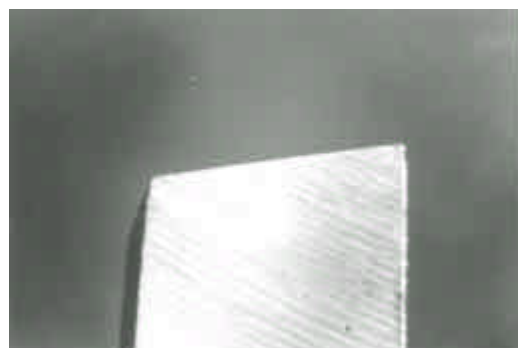
**Figura A5.8-** Ferramenta 8.



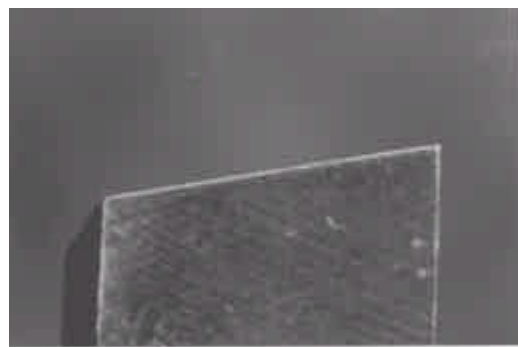
**Figura A5.9-** Ferramenta 9.



**Figura A5.10-** Ferramenta 10.



**Figura A5.11-** Ferramenta 11.



**Figura A5.12-** Ferramenta 12.