

0057/99
Class
Out
Tomo

RUGOSIDADE E ESPALHAMENTO LUMINOSO EM SUPERFÍCIES DE ALUMÍNIO TORNEADAS COM FERRAMENTA DE DIAMANTE MONOCRISTALINO

ENRICO DI RAIMO



Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica



ORIENTADOR: Prof. Dr. Arthur J. V. Porto

SÃO CARLOS

1999

Class.	TESE - EESC
Cutt.	11904 ✓
Tombo	0057/99

311 0000 6829

sy 5 10 30390

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC/USP

D597r Di Raimo, Enrico
Rugosidade e espalhamento luminoso em superfícies
de alumínio torneadas com ferramenta de diamante
monocristalino / Enrico Di Raimo. -- São Carlos, 1999.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.

Área: Engenharia Mecânica.

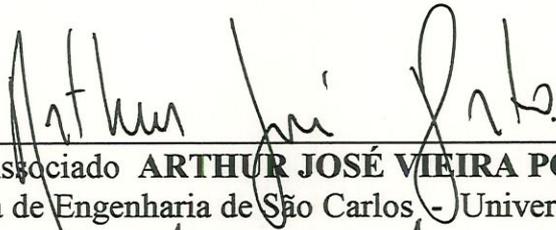
Orientador: Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto.

1. Torneamento de ultraprecisão. 2. Espalhamento
luminoso. 3. Rugosidade superficial. 4. Sensor CCD.
5. Laser. I. Título.

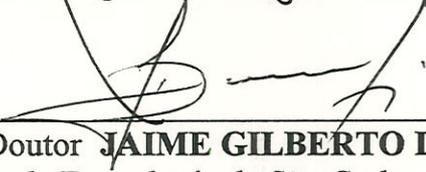
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **ENRICO DI RAIMO**

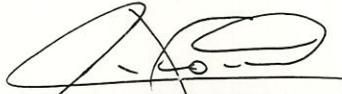
Dissertação defendida e aprovada em 04.02.1999
pela Comissão Julgadora:



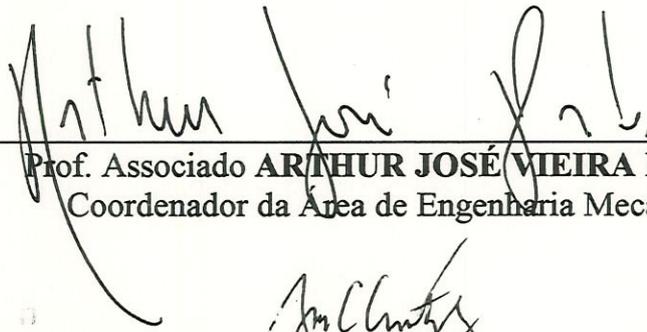
Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **JAIME GILBERTO DUDUCH**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **CARLOS ALBERTO FORTULAN**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

DEDICATÓRIAS

Aos meus pais , **FRANCESCO** e **MARIA**

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todas as pessoas que colaboraram direta ou indiretamente no desenvolvimento desta dissertação. Em particular: ao orientador Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto pelo apoio técnico e metodológico no desenvolvimento desse trabalho, assim como paciência na revisão desta dissertação; ao Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch pelo apoio técnico e auxílio junto ao laboratório de Engenharia de Precisão ; ao Eng. Dr. Renato Goulart Jasinevicius pelos conselhos e informações prestadas; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio na forma de bolsa de estudos durante a realização deste trabalho; aos colegas pesquisadores do Departamento de Engenharia Mecânica: Juan Carlos Rubio Campos, Julio Tanaka, Mário Luiz Tronco, Rogério Akihide Ikegami, Luciana Montanari, Helder, Jandira Guenka Palma; João Elídio C. Lobão, Oswaldo Asato, Daniela Lara Santos, Humberto Ledo e tantos outros com quais pude conviver; aos colegas do Departamento de Engenharia de Produção: Prof. Dr. Luiz César Ribeiro Carpinetti e Eng. Dr. Marcelo Seido Nagano; ao colega do Instituto de Física de São Carlos , Haroldo Arakaki pelo apoio prestado; aos amigos Fábio Cimonetti , Almir de Oliveira Neto, Priscilla Grifoni ; ao pesquisador João Cândido do Laboratório de Sistemas Integráveis – LSI pela ajuda recebida; e em especial à bióloga Viviane de Camargo Valadares, amiga e companheira que de alguma forma contribuiu para que este trabalho fosse realizado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
INTRODUÇÃO , OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	1
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
1.1 - Usinagem de ultra-precisão.....	4
1.1.1 - Característica dos materiais.....	4
1.1.2 - Ferramentas monocortantes de diamante.....	8
1.1.2.1 Desempenho das ferramentas de corte de precisão... 8	
1.1.2.2 Geometria da ferramenta e orientação do diamante... 10	
1.1.2.3 Afição da aresta de corte.....	12
1.1.2.4 Desgaste da aresta de corte de diamante.....	13
1.1.2.5 Adesão e formação de aresta postiça ("built-up-edge").....	15
1.1.3 - Aspectos físicos do Torneamento de Ultra Precisão	16
1.1.3.1 Considerações gerais.....	16
1.1.3.2 Mecanismos de remoção de material.....	16
1.1.3.3 Espessura mínima de corte.....	18
1.1.3.4 Força de corte.....	19
1.2 - Geração e análise de textura superficial.....	24
1.2.1 - Estrutura de superfície usinada.....	24
1.2.2 - Parâmetros estatísticos para cálculo de rugosidade.....	28
1.2.2.1 Rugosidade média R_a (Roughness Average).....	28
1.2.2.2 Rugosidade média quadrática R_q	31
1.2.2.3 Altura de picos e vales (R_{max} , R_z , R_p).....	31
1.2.2.4 Fator de enchimento ("bearing ratio").....	32

1.2.2.5 Média das distâncias entre saliências (S_m).....	33
1.2.2.6 Média das inclinações (Δ_a, Δ_q).....	34
1.2.2.7 Funções de distribuição das alturas:	
skewness e curtose.....	35
1.2.2.8 Função autocovariância, comprimento de correlação e comprimento de onda espacial.....	36
1.2.2.9 Função densidade de frequências espaciais.....	40
1.2.3 - Técnicas de caracterização superficial.....	41
1.2.3.1 Perfilômetros mecânicos ou métodos de contato.....	43
1.2.3.2 Perfilômetros óticos.....	45
1.2.3.3 Sondas de varredura microscópica.....	49
1.3 - Espalhamento de luz em superfícies óticas.....	52
1.3.1 - Introdução.....	52
1.3.2 - Espalhamento total integrado (TIS).....	53
1.3.2.1 Instrumentação para medida de TIS.....	55
1.3.3 - Dependência angular do espalhamento.....	58
1.3.3.1 Introdução.....	58
1.3.3.2 Espalhamento angular de uma rede senoidal.....	59
1.3.3.3 Espalhamento angular de superfícies não senoidais.....	62
1.3.3.4 Teoria de espalhamento angular para superfícies polidas.....	63
1.3.3.5 Medidas experimentais do espalhamento angularmente resolvido.....	69
2 DETECTORES OPTO-ELETRÔNICOS.....	72
2.1 - Fotodiodos.....	72
2.2 - Válvulas fotomultiplicadoras (PMTs).....	73

2.3 - Tratamento e captura do sinal.....	74
2.2.1 - Amplificador de transimpedância.....	74
2.2.2 - Digitalização e captura do sinal.....	75
2.4 - Controle do instrumento.....	75
2.5 - Exemplificação de dispositivos de transdução optoeletrônica.....	76
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	78
3.1 - Procedimento de usinagem dos materiais.....	79
3.1.1 - Ensaio de usinagem.....	81
3.2 - Análise de textura superficial.....	83
3.3 - Análise de espalhamento luminoso.....	84
4 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	89
5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APÊNDICES

Apêndice A

Apêndice B

Apêndice C

Apêndice D

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Geometria da Ferramenta.....	9
FIGURA 2 - Zonas de cisalhamento.....	21
FIGURA 3 - Exemplo de superfície ondulada e curva.....	25
FIGURA 4 - Dimensões de vários tipos de estruturas superficiais.....	26
FIGURA 5 - Combinação de rugosidade (A), ondulação (B) e forma (C)....	27
FIGURA 6 - Derivação gráfica de R_a	29
FIGURA 7 - Perfis de mesmo R_a , mas com diferenças na forma e valores de $R_{m\acute{a}x}$	30
FIGURA 8 - Derivação de S_m e R_z	34
FIGURA 9 - Derivação da curva de distribuição de amplitude.....	35
FIGURA 10 - Distinção de diferentes formas de perfis através de R_{sk}	36
FIGURA 11 - Três tipos básicos de perfis superficiais e suas correspondentes funções autocopvariâncias.....	37
FIGURA 12 - Varredura de perfilômetro mecânico de amostra de cobre torneada com ferramenta de diamante e respectiva função autocovariância computada.....	38
FIGURA 13 – Técnicas de caracterização superficial.....	42
FIGURA 14 - Constituintes principais de um instrumento de medida de textura superficial do tipo agulha.....	43
FIGURA 15 - Layout do interferômetro de textura superficial.....	47
FIGURA 16 - Diagrama mostrando a formação dos feixes múltiplos.....	47
FIGURA 17 - Medida experimental de refletância especular e TIS Através do hemisfério de Coblentz.....	56
FIGURA 18 - Ângulo de espalhamento de um “espalhador” coerente com incidência normal como função da separação lateral da ranhura de rede, usando luz de comprimento de onda de 5000 angstroms.....	60
FIGURA 19 - Nomograma que fornece a separação das características superficiais que produz espalhamento para um ângulo e comprimento de onda particular.....	60
FIGURA 20 - Diagrama esquemático mostrando a notação	

para fórmulas ARS.....	64
FIGURA 21 - Conceitos e parâmetros fundamentais do ARS.....	68
FIGURA 22 - Relação entre os diferentes parâmetros fundamentais do ARS.....	68
FIGURA 23 - Instrumento para a medida de ARS.....	70
FIGURA 24 - Torno de ultraprecisão ASG 2500.....	79
FIGURA 25 - Controle CNC.....	81
FIGURA 26 – Rugosímetro Talysurf.....	83
FIGURA 27 - Câmera CCD.....	85
FIGURA 28 - Laser He-Ne.....	86
FIGURA 29 - Representação esquemática da instrumentação para análise de espalhamento.....	87
FIGURA 30 – Rugosidade Rq em superfície de Al-2011 em função dos parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta de um torneamento de ultraprecisão.....	91
FIGURA 31 – Rugosidade Ra em superfície de Al-2011 em função dos parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta de um torneamento de ultraprecisão.....	92
FIGURA 32 – Rugosidade Rt em superfície de Al-2011 em função dos parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta de um torneamento de ultraprecisão.....	93
FIGURA 33 - Rugosidade Rq em superfície de Al-1050 em função dos parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta de um torneamento de ultraprecisão.....	94
FIGURA 34 - Rugosidade Ra em superfície de Al-1050 em função dos parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta de um torneamento de ultraprecisão.....	95
FIGURA 35 – Rugosidade Rt em superfície de Al-1050 em função dos parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta de um torneamento de ultraprecisão.....	96
FIGURA 36 - Espalhamento parcial em superfícies de alumínio	

torneadas em ultraprecisão com diferentes ferramentas....	98
FIGURA 37 – Espalhamento parcial em superfícies de Alumínio (Curvas de tendência).....	99
FIGURA 38 - Resultados de espalhamento total mostrando efeitos de difração.....	100
FIGURA 39 - Perfis e parâmetros de rugosidade em superfícies usinadas de Al-6061 e “cutoff” = 0.8 mm.....	101
FIGURA 40 - Perfis e parâmetros de rugosidade em superfícies usinadas de Al-Kobe e “cutoff” = 0.8 mm.....	102
FIGURA 41 - Perfis e parâmetros de rugosidade em superfícies usinadas de Al-6061 e “cutoff” = 0.25 mm.....	103
FIGURA 42- Perfis e parâmetros de rugosidade em superfícies usinadas de Al- Kobe e “cutoff” = 0.25 mm.....	104

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Rugosidade superficial em usinagem de Ultraprecisão (ensaio 1).....	90
TABELA 2 - Ensaio de usinagem nº. 2	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- A - angstrom.
- AFM - Atomic Force Microscope.
- Al - Alumínio.
- ARS - Espalhamento angularmente resolvido (“Angle-Resolved Scattering”).
- BRDF - Bidirectional Reflectance Distribution Function.
- CCD - Charge-Coupled Device.
- CNC - Computer Numerical Control.
- FFT - Fast Fourier Transform.
- h , A - Amplitude.
- m - ordem de interferência.
- P - potência.
- PMT - Photo Multiplier Tube.
- PSD - Power spectrum density (função densidade de frequência).
- r - raio da agulha.
- R_a - Média aritmética das alturas [μm].
- R_p - raio de ponta da ferramenta [μm].
- RMS - Root mean square.
- STM - Scanning Tunneling Microscope.
- TIS - Espalhamento total integrado (“Total Integrated Scattering”).
- TUP - Torneamento de Ultra Precisão.
- UP - Ultra Precisão.
- μm - micrometro (10^{-6} m).
- nm - nanometro (10^{-9} m).
- mm - milimetro (10^{-3} m)
- rev. - revolução
- f - avanço (μm / revolução)
- p - profundidade de corte.
- n - Velocidade do eixo árvore [rpm].
- δ_{RMS} - Desvio médio quadrático de rugosidade [μm].
- λ - Comprimento de onda.

-
- Ω - ângulo sólido.
- p - componente de polarização paralela.
- s - componente de polarização perpendicular.
- ε - constante dielétrica.
- ω - frequência angular.
- φ, ϕ - ângulo de espalhamento azimutal.
- ϕ' - ângulo do vetor campo elétrico incidente.
- ϕ_s - ângulo de espalhamento polar.
- γ - ângulo de saída da ferramenta.
- α - ângulo de folga da ferramenta.
- $G(\tau)$ - função autocovariância.
- θ, θ_0 - ângulo de incidência.
- θ_d - ângulo de difração.

Resumo

DI RAIMO, E. Rugosidade e espalhamento luminoso em superfícies de alumínio torneadas com ferramenta de diamante monocristalino. São Carlos, 1999, 110p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O processo de torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante vem sendo pesquisado para substituir os processos convencionais de polimento e lapidação no desenvolvimento de componentes ópticos. A qualidade destes componentes produzidos por torneamento de ultraprecisão é altamente dependente do raio de aresta da ferramenta de diamante monocristalino e integridade do raio de ponta. Visando monitorar o processo de torneamento em peças com qualidade ópticas, estudam-se as relações entre espalhamento luminoso e rugosidade superficial. O comportamento do espalhamento luminoso em superfícies de alumínio foi analisado através um sistema opto-eletrônico (utilizando sensor CCD e luz laser) e comparado com rugosidades superficiais obtidas por perfilometria mecânica.

Palavras-Chave: Torneamento de ultraprecisão, espalhamento luminoso, rugosidade superficial, sensor CCD, laser.

ABSTRACT

DI RAIMO, E. Rugosidade e espalhamento luminoso em superfícies de alumínio torneadas com ferramenta de diamante monocristalino. São Carlos, 1999, 110p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The ultraprecision single point diamond turning process have been research to replace conventional processes such as lapping and polishing in the development of optical components. The quality of this components is strongly dependent on the diamond tool tip radius and integrity of the cutting edge. With the objectify of monitoring for optical quality parts, relationship between light scattering and surface roughness have been studied. The behavior of light scattering in aluminum surfaces have been analyzed through optoeletronic system (using CCD sensor and laser) and compared with surface roughnesses obtained by mechanical perfilometer.

Keywords: Ultraprecision diamond turning, light scattering, surface roughness, CCD sensor, laser.

Introdução , Objetivos e Estrutura da Dissertação

A fim de se melhorarem as características e desempenho de certos produtos, a indústria tem sido constantemente forçada a desenvolver pesquisas em novos materiais. A necessidade da fabricação de produtos cada vez menores, mais leves, com maior acuracidade, confiabilidade e, se possível, com baixo custo, tem constantemente lançado desafios à engenharia de fabricação. Um típico exemplo é a manufatura de componentes ópticos, a qual correntemente apresenta tendências em direção ao uso de materiais tais como ligas de alumínio e cobre na fabricação de superfícies ópticas planas, esféricas e anesféricas para redução de tamanho e peso dos componentes.

Tolerâncias de contorno e acabamento superficiais a níveis ópticos são possíveis de serem obtidos por técnicas de torneamento com ferramenta de diamante em máquinas-ferramenta de ultra-precisão. Esta técnica está sendo seriamente considerada para substituir técnicas convencionais a fim de se reduzirem tempos e custos e se melhorarem a acuracidade e repetibilidade, na fabricação de componentes opto-eletrônicos.

O torneamento com diamante é o processo onde se utiliza uma ferramenta especial monocortante de diamante em uma máquina ferramenta de ultra-precisão, especialmente projetada para produzir acabamentos de superfícies, sob condições precisamente controladas de máquina, ferramenta e ambiente. Este processo difere de outros processos de usinagem de duas maneiras: a) o uso de ferramentas de diamante permite que vários materiais sejam torneados com precisão nanométrica; b) a ação do corte nesta escala de precisão juntamente com o desgaste extremamente baixo da ferramenta de diamante (com determinados materiais) resultam na geração de uma superfície espelhada.

Assim, o componente produzido pela máquina-ferramenta pode ser tomado como a identidade (impressão digital) da combinação da máquina e ferramenta, e durante a operação de usinagem, qualquer alteração na combinação de ambos será refletido no componente produzido, especialmente na superfície de componente e suas dimensões e formas.

Portanto, é fundamental garantir a integridade de ferramenta de ponta única de diamante, principalmente no que se refere à integridade do raio de ponta e raio de aresta.

Como, todo uso de ferramenta implica sempre em desgaste e por isso se danifica a geometria da ferramenta, torna-se necessário evitar usinagens desnecessárias.

O objetivo deste trabalho é estudar as relações entre a refletividade em termos de espalhamento luminoso e a rugosidade superficial, tendo como meta a aplicação deste estudo no monitoramento (on-line) de usinagem de ultra-precisão, para garantir que só estejam gerando superfícies com rugosidade superficial compatível com aplicação óptica. Isto se justifica pela necessidade de se estabelecerem padrões óticos relacionados ao tipo de textura superficial que foi deixada na superfície pelo processo de usinagem de ultra precisão.

Este trabalho está organizado em 6 capítulos e 4 apêndices, a saber:

Capítulo 1 - Este capítulo apresenta uma introdução do trabalho no contexto da usinagem de ultra-precisão, além de explicitar brevemente os objetivos e intenções futuras.

Capítulo 2 – Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica, dividindo-se em três partes: usinagem de ultraprecisão, geração e análise de textura superficial e espalhamento de luz em superfícies.

Na usinagem com ferramentas de diamante abrange-se: materiais para usinagem de ultra-precisão, ferramentas de diamante monocristalino e aspectos físicos da usinagem de ultra-precisão.

Na avaliação de textura aborda-se parâmetros para cálculo de rugosidade e técnicas para caracterização de superfícies rugosas.

Faz-se por último uma revisão das teorias de espalhamento luminoso em superfícies com a consequente correlação deste à rugosidade, além de se destacar técnicas experimentais para medida de espalhamento.

Capítulo 3 – Este capítulo apresenta as principais características de detectores opto-eletrônicos, tais como fotodiodos e fotomultiplicadoras.

Capítulo 4 – A descrição de materiais e métodos e procedimentos utilizados para os experimentos serão apresentados neste capítulo.

Os procedimentos para realização dos ensaios estão distribuídos em três grupos: a) usinagem dos materiais através de torno de precisão com ferramenta de diamante; b) avaliação de texturta superficial (rugosidade) com Form Talysurf; c) avaliação de espalhamento luminoso utilizando sensor CCD acoplado à câmara.

Capítulo 5 – Este capítulo apresenta os resultados experimentais na forma de gráficos e tabelas.

Capítulo 6 – As conclusões e propostas para trabalhos futuros serão apresentados neste capítulo.

Apêndices – Nos apêndices A, B, C e D apresenta-se a teoria escalar para o cálculo do espalhamento luminoso em superfícies.

Capítulo 1

Revisão Bibliográfica

1.1 - USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO

Na usinagem de ultra-precisão de materiais não ferrosos com ferramentas de diamante a qualidade nanométrica do acabamento superficial não é determinada pela máquina-ferramenta. A estabilidade dimensional e precisão e repetibilidade da máquina-ferramenta de ultra precisão fazem com que o fatores determinantes no acabamento de qualidade óptica sejam as características do material a ser usinado, desempenho da ferramenta (afiação da aresta de corte e geometria) e aspectos físicos da micro-usinagem.

1.1.1- CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

Para se obter superfícies com qualidade óptica através do torneamento com ferramentas de diamante é necessário que o processo introduza um baixo nível de energia à interface microscópica entre a aresta de diamante e a peça. Isto é necessário principalmente para retardar a interação química entre o diamante e o material da peça.

Em geral, os materiais mais facilmente usinados com diamante são os metais não ferrosos tais como o alumínio e o cobre pois apresentam baixa resistência ao escoamento e relativamente baixa reatividade química com carbono do diamante [TANAKA et al 1981]. A formação de cavaco no torneamento de um material metálico não ferroso ocorre a baixos níveis de energia em função de alta ductilidade que apresentam esses materiais. [SHAW apud PORTO, 1995]

Os metais que apresentam maior afinidade para usinagem com o diamante são o cobre, alumínio e o latão os quais podem ser facilmente usinados alcançando-se acabamentos superficiais de ordem submicrométrica

com um baixo desgaste da ferramenta. O ouro, prata, platina e Be-Cu também apresentam excelente desempenho em termos de usinabilidade com um desgaste reduzido da ferramenta de diamante [TANAKA et al apud PORTO, 1995].

BENJAMIN, [1978] mostrou através de inspeções que uma variedade de materiais frágeis (germânio e silício) são usináveis com torneamento com diamante como elementos ópticos de reflexão e transmissão no infravermelho, gerando acabamento espelhado.

No torneamento com diamante é possível se chegar a um acabamento superficial muito próximo do previsto teoricamente, já que em materiais normalmente classificados como torneáveis com diamante dificilmente ocorre a formação de aresta postiça ("built-up-edge) na ferramenta, entretanto uma aresta postiça aderente pode, ocasionalmente, formar-se quando da usinagem de alguns tipos de alumínio dentro de determinadas faixas de velocidade de corte, o que pode deteriorar o acabamento superficial [BAO & STEVENSON, apud PORTO, 1995].

Portanto a qualidade do material a ser usinado pode ter grande influência no acabamento superficial sobretudo na usinagem de ultraprecisão. Um fator de influência predominante no acabamento superficial é a diferença (não uniformidade) das propriedades elásticas e (principalmente) plásticas entre grãos distintos de um material policristalino. Essa diferença de comportamento resulta em superfícies usinadas com variações entre grãos vizinhos, os quais determinam a qualidade superficial em termos de refletividade.

Os contornos de grão podem ser considerados um outro fator de influência no acabamento de uma superfície usinada, por conterem impurezas decorrentes da fundição (difundidas durante a solidificação do material). Estas impurezas resultam em propriedades mecânicas diferentes entre o material de base e os contornos do grão.

As impurezas não apenas podem se instalar nos contornos de grão, mas também dentro dos grãos. Além disso, partículas de carbeto ligadas a alguns materiais (por exemplo, silício em ligas de Al), se instalam de uma forma

finamente distribuída. A forma encontrada para minimizar a influência dessas inclusões duras sobre o acabamento e a vida útil da ferramenta é através da geometria das ferramentas com a utilização de ângulos de saída mais negativos os quais removem facilmente estas inclusões da matriz ao invés de arrancá-las da superfície, o que, poderia causar o riscamento e conseqüentemente a degradação da superfície. **[OHMORI & TAKADA apud PORTO, 1995]**

Os materiais usados para peças de precisão são cuidadosamente inspecionados quanto a diversas propriedades tais como composição, resistência, etc. Porém, defeitos microscópicos do material, causados freqüentemente por impurezas ou precipitados, impõem limites ao acabamento superficial devido à formação de defeitos conhecidos como "vazios". Os vazios inicialmente no interior do material, passam a se integrar à superfície e trincas que são geradas pela aproximação da aresta de corte. Estas trincas se desenvolvem dividindo os vazios entre o lado do cavaco e o lado da superfície acabada **[OHMORI E TAKADA apud PORTO, 1995]**.

Outro fator importante é o efeito da anisotropia dos materiais. No torneamento de ultra-precisão pode vir a ocorrer que a espessura do cavaco venha a ser menor que o tamanho dos grãos do material. Por conseqüência os materiais para usinagem de ultraprecisão devem portanto, apresentar uma estrutura cristalina regular e microgranular ou então monocristalina.

Em materiais policristalinos, cada cristal está aleatoriamente orientado, e, conseqüentemente, a condição do acabamento superficial muda de acordo com a orientação dos cristais. Todavia, podem-se obter resultados satisfatórios através da minimização da diferença no grau de deformação e ruptura (fratura) entre os grãos do material.

Materiais policristalinos são anisotrópicos, mas ao reduzir-se a seção de corte, a ferramenta poderá estar cortando no domínio de um único grão. A espessura de corte se estabelece na posição de equilíbrio entre a força aplicada pela ferramenta e a reação do material do grão. Quando o corte passa para o grão seguinte, que estatisticamente apresenta uma outra orientação cristalográfica, a posição de equilíbrio será diferente por causa da mudança de

propriedades físicas do grão. Isso torna-se mais pronunciado com materiais com granulometria muito grande.

Em estruturas com granulometria fina, mesmo na usinagem de ultraprecisão, vários grãos serão cortados simultaneamente, de forma que a posição de equilíbrio para a espessura de corte se dá em uma posição média, e não oscila com grande intensidade [SUGANO et al 1987]. Para isso, são utilizadas ferramentas com raio de ponta grande no corte de materiais policristalinos.

Outro aspecto importante é que o cavaco formado no torneamento de ultraprecisão de materiais policristalinos são do tipo lamelar (VON TUROVICH, 1970; OHMORI & TAKADA, 1982). A importância de se utilizar a anisotropia de forma favorável durante a usinagem, ou seja, utilizar de ferramentas com raio de ponta grande e um material de estrutura granular refinada, deve-se ao fato de que essas diferenças em termos de resistência mecânica em cada grão pode ocasionar microvibrações na interface ferramenta/peça, o que influenciará na rugosidade superficial. Além disso, quando satisfeita esta condição, a ferramenta corta o material, que é policristalino, como se fosse um monocristal [PORTO, 1995].

Outra fonte de vibrações são devidas à grandes profundidades de corte uma vez que, poderia-se estar cortando mais de uma camada de grãos onde além de se ter que vencer a resistência mecânica de cada grão teria-se que vencer a resistência mecânica dos contornos de grãos das camadas envolvidas pelo corte [PORTO, 1995].

SATO et al 1991, procuram melhorar a acuracidade do corte a partir do ponto de vista da peça-obra procurando tornar claras as características do mecanismo de microusinagem e assim melhorar as propriedades do acabamento através da utilização da anisotropia do próprio material. Os autores perceberam que havia um gradiente na força principal próximo de uma profundidade de corte de $1\mu\text{m}$, sugerindo uma mudança no mecanismo de corte, possivelmente estaria ocorrendo o efeito TAMANHO ("SIZE EFFECT") que é o aumento na força de corte específica com a diminuição da profundidade de corte. Este efeito ocorre devido à diminuição do ângulo de

cisalhamento, que por sua vez aumenta o coeficiente de atrito na face da ferramenta [NAKAYAMA E TAMURA, 1968].

1.1.2- FERRAMENTAS MONOCORTANTES DE DIAMANTE

1.1.2.1 - Desempenho das ferramentas de corte de precisão

As ferramentas monocortantes de diamante devem atender os requisitos necessários à usinagem de ultraprecisão, onde acabamentos superficiais da ordem de 10 nm são freqüentes. A figura 1 apresenta a geometria típica de uma ferramenta monocortante de diamante monocristalino.

As geometrias com ponta circular são mais freqüentemente utilizadas para o corte de materiais dúcteis em função da policristalinidade e conseqüentemente da anisotropia desses materiais [PORTO, 1995].

A ferramenta com ponta seca é geralmente utilizada para o corte de materiais frágeis e monocristalinos em função de não haver influência de fatores tais como a anisotropia durante o corte desses materiais. No entanto, de acordo com TAKASU [1985], ferramentas com ponta reta absorvem mais micro vibrações inerentes ao processo, reduzindo a influência dessas variações no acabamento superficial.

Para se obter um total aproveitamento das máquinas ferramentas com uma precisão submicrométrica, uma atenção especial deve ser conferida às ferramentas de corte, isto porque podem ocorrer situações onde a qualidade e a precisão da usinagem sejam predominantemente determinada pelo desempenho da ferramenta e não da máquina ferramenta, dado que supõe-se que a máquina conseguirá garantir deslocamentos com precisão e repetibilidade.

Assumindo-se uma operação ideal de uma máquina ferramenta, a precisão geométrica da usinagem é determinada pela profundidade efetiva de corte a qual determina a espessura do material removido da superfície da peça.

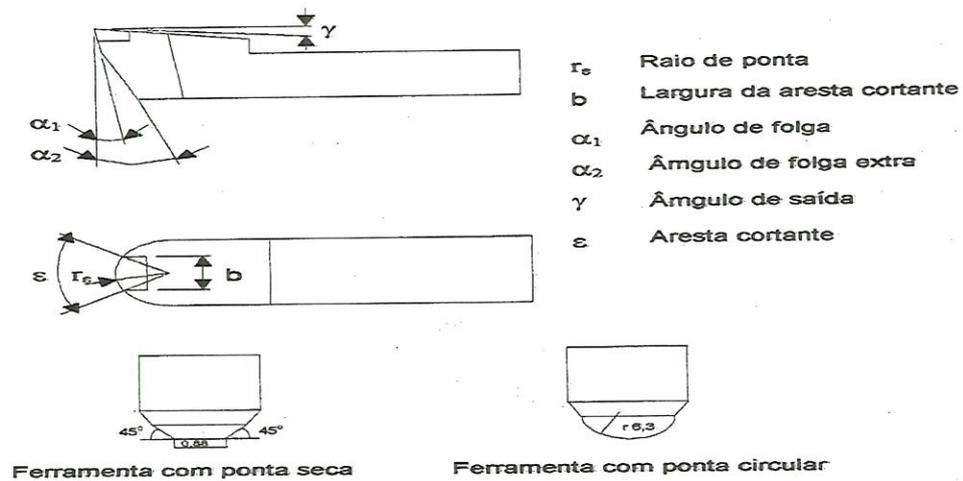


Fig.1. Geometria da Ferramenta [JASINEVICIUS, 1994]

A profundidade efetiva de corte não é sempre igual à profundidade nominal de corte (medida na aresta da ferramenta). Isto significa que a profundidade efetiva de corte deve ser afetada pelo comportamento do material ao redor da aresta de corte (medida na peça), devido ao recuo elástico, comportamento elasto-plástico, do movimento relativo entre ferramenta e peça, etc [IKAWA & SHIMADA, 1977].

A magnitude da resolução pode aumentar com um decréscimo da profundidade de corte por causa do atrito ou deslizamento (“rubbing ou Sliding”) da aresta da ferramenta sem que ocorra remoção do material.

A transição entre “rubbing” e o corte propriamente dito, é afetado por diversos fatores (desgaste, material, etc.) e em função disso a profundidade efetiva de corte pode variar instavelmente. Isto significa que, a profundidade de corte muito pequenas a ferramenta poderá estar em três situações distintas, ou seja:

- deslizando sobre a peça, pois o nível de tensão imposto pela ferramenta está dentro do nível de tensão do comportamento elástico do material;

- trabalhando dentro de um regime plástico tendo o nível de tensão superado o limite de escoamento, isto é conhecido como o “burnishing action”, nesse caso a ferramenta estaria deformando plasticamente o material sem haver remoção de material;

- atingindo um nível de tensão superior ao limite de fratura, havendo nesse caso remoção de material. Portanto, a menor espessura de material removida, dentro de uma profundidade considerada estável , talvez seja da mesma magnitude da resolução desta profundidade de corte, **[JASINEVÍCIUS, 1994]**.

Outro aspecto importante é quanto a durabilidade de ferramenta diamantada. Ferramentas de diamante se caracterizam pela alta resistência à abrasão e extrema fragilidade devido à alta dureza do diamante.

O lascamento da aresta de corte, independente do seu tamanho, resulta em danos à superfície. O dano à ferramenta de diamante ocorre abruptamente e é difícil de prever o momento do evento. Geralmente a ferramenta danificada por lascamento não pode ser mais aplicada para propósitos de usinagem de ultra precisão em termos de resolução em profundidade corte e desempenho em termos de acabamento superficial.

1.1.2.2 – Geometria da ferramenta e orientação do diamante

A geometria de ferramentas de diamante possui valores recomendados para usinagem de metais não ferrosos.

Ângulos de saída negativos seriam recomendáveis na usinagem de materiais constituídos por uma matriz mole na qual existem inclusões duras (por exemplo, inclusões de silício em alumínio) **[KÖNIG et al 1991]**.

Ferramentas com ângulo de saída positivo cortam de uma forma mais definida gerando uma superfície modulada por discontinuidades nos contornos de grão no metal. Ferramentas com ângulo de saída negativo tendem a empurrar o material por uma grande distância, sendo que a estrutura do grão aparentemente torna-se mais suave. Por outro lado, ferramentas com ângulo

negativo demonstraram-se mais passíveis de reproduzir qualquer imperfeição contida na aresta da ferramenta **[WILKS,1980]**.

Uma geometria ótima para ferramentas de diamante depende de outros parâmetros além do ângulo de saída. O ângulo de folga pode produzir um polimento benéfico na superfície, no entanto, deve-se ressaltar que ângulos de folga muito pequenos tem um efeito contrário a esse esperado, uma vez que, quanto menor for esse ângulo e maior a profundidade de corte, maior será a possibilidade de a face de folga encostar na peça durante a usinagem, isto deve-se ao efeito do recuo elástico do material.

Sendo o diamante um material extremamente duro, ele torna-se muito frágil, portanto é essencial no projeto garantir que tensões de tração sejam mantidas a um mínimo. Isso exige que ângulo entre a face de folga e de saída da ferramenta seja o maior possível, em geral de 80° a 85°.

Uma outra característica importante da ferramenta de diamante é a geometria da aresta de corte, em particular, sua afiação. O processo de torneamento de ultra-precisão deve o seu sucesso ao fato de que o diamante, quando apropriadamente orientado, pode ser afiado com raios de aresta de 20 a 50nm **[MIYAMOTO,1987,1990]**.

Além da afiação, a aresta de corte deve apresentar um perfil homogêneo, ou seja, a aresta de corte, quando visualizada com um aumento de 500 a 1000 vezes, não deve exibir nenhuma imperfeição, ondulação ou descontinuidade.

O acabamento superficial torna-se melhor quanto maior o raio de ponta da ferramenta. Aumentos no raio de ponta conduzem a uma mudança na microtopografia da superfície do componente usinado. Para usinagem de metais não ferrosos, são recomendados raios de ponta entre 2 e 10 mm na usinagem de superfícies planas e de 0.5 e 4 mm na usinagem de superfície côncavas e convexas **[KÖNIG et al 1991]**.

Porém, uma das desvantagens de ferramentas com raio de ponta grande seria que estas não são apropriadas para aplicação em usinagens de contorno em máquinas de torneamento. O motivo desta restrição deve-se ao fato de que, ferramentas com raio de ponta grande apresentam um raio de

curvatura maior que para o caso de usinagem de superfícies côncavas e convexas torna-se difícil de se conseguir compensar o raio ao longo da superfície de corte [PORTO, 1985].

1.1.2.3 - Afição da Aresta de Corte

Sob condições ideais de operação de uma máquina ferramenta, a acuracidade geométrica alcançável pela usinagem é determinada pela espessura efetiva de corte a qual é a espessura efetivamente removida da superfície de trabalho pela aresta de corte.

A espessura efetiva de corte nem sempre é igual ao seu valor nominal o qual é dado na aresta de corte pelo avanço. A uma profundidade de corte extremamente pequena a acuracidade da espessura efetiva de corte pode ser considerada como a mínima espessura de corte na qual ocorre uma transição na formação de cavaco passando de estável para instável. A mínima espessura de corte pode ser considerada como a que determina a possível limitação da acuracidade alcançável pelo corte [IKAWA et al 1987].

A afiação da aresta de corte é o principal fator na determinação da mínima espessura de corte. Quanto mais afiada a aresta de corte, menor poderá ser a espessura mínima de corte. Pode existir uma certa limitação no raio da aresta de corte, ou afiação da aresta. Baseado no balanço de energia entre a energia superficial e a energia na deformação elástica na aresta afiada, o raio crítico da aresta de diamante foi hipoteticamente calculado como sendo de 2nm (IKAWA & SHIMADA, 1977).

A partir desses resultados, considera-se que a aresta de corte de ferramentas de diamante pode ser polida até um raio menor que alguns nanômetros, e que a espessura mínima de corte possível possa ser da mesma ordem. Vale ressaltar que de acordo com estudos realizados por IKAWA & SHIMADA [1982,1985], a aresta do diamante com esse nível de afiação mantém as mesmas propriedades de resistência mecânica que a superfície. As ferramentas encontradas comercialmente no mercado internacional possuem um raio de aresta da ordem de 40 a 70 nm (KÖNIG et al,1991).

O perfil da superfície usinada é basicamente composto pela reprodução do perfil da ferramenta no plano normal à direção de corte (IKAWA & SHIMADA, 1977). O processo de transferência de perfil poderá ser afetado pelo desgaste da aresta decorrente da sua interação com o material, ou em outras palavras, na afinidade interfacial.

O diamante é um material conhecido por possuir pouca interação química com uma ampla variedade de materiais. A aresta de corte de diamante é considerada como a que possui melhor fidelidade de transparência, da ordem de 10 nm. Portanto qualquer irregularidade, por menor que seja, na aresta de corte devido ao microlascamento ou adesão de partículas, pode causar danos à superfície usinada.

1.1.2.4 Desgaste da aresta de corte de diamante

Durante a usinagem, a superfície é gerada através do deslizamento de uma aresta de corte perfeitamente afiada. O desgaste, portanto, pode ocorrer em dois locais de ferramenta: o desgaste da face de saída e o da face de folga. Nesse processo existem tensões de compressão muito altas que ocorrem na face de saída [TANIGUCHI, 1983] da ferramenta e que atingem um limite máximo ao longo do comprimento de contato da aresta de corte.

Além desse efeito, na face de saída da ferramenta ocorre uma elevação da temperatura devido ao atrito causado pelo deslizamento do cavaco. A reafiação da ferramenta será necessária quando o desgaste alcançar a fase rápida de deterioração final, pois nesse ponto, o acabamento superficial sofrerá danos devido à imperfeição da aresta. O desgaste inicial é um fenômeno característico e muito comum com ferramentas de diamante utilizadas na manufatura de discos rígidos para computadores, Este fenômeno parece estar relacionado com um “burnishing” desejável (nesta aplicação) da superfície usinada pela área desgastada da ferramenta.

Para a fabricação de superfícies ópticas de alta qualidade, o desgaste na face de folga implicaria em aumentos na rugosidade superficial que não

seriam desejáveis em função da necessidade reflexiva que esses componentes exigem.

O efeito de um raio de ponta e de uma face de folga desgastada na superfície usinada é um aumento na deformação da superfície. Esta deformação aumenta a pressão de contato e eleva a temperatura na interface ferramenta/peça, podendo acelerar um mecanismo de desgaste. Por sua vez, esse desgaste implicaria em aumento das forças da ferramenta, e conseqüentemente, um aumento na rugosidade superficial devido a trepidação e outras instabilidades decorrentes desse efeito. Pode-se dizer que, com o aumento da deformação causado pelo desgaste da ferramenta implica no aumento do erro de forma e ondulação da superfície.

A durabilidade ou estabilidade da aresta de corte é uma exigência comum para qualquer tipo de material utilizado como ferramenta. O desgaste da aresta de diamante pode ser classificada em dois tipos, um seria o microlascamento (por fratura ou fadiga) e o outro seria o desgaste gradual (atrimento, abrasão, etc.).

O acúmulo de microfraturas é observado tanto na aresta lateral assim como na aresta frontal de folga, e a superfície fraturada torna-se evidente devido à fratura por clivagem. Geralmente, a orientação cristalina das duas superfícies fraturadas são paralela ao plano de clivagem (111) do diamante. A fratura pode ocorrer ainda num estágio prematuro do corte. Este tipo de desgaste aparece na aresta frontal afetando a rugosidade superficial significativamente.

Quando o desgaste progride somente pela acumulação de pequenos lascamentos, os principais fatores para o desgaste da ferramenta são a orientação cristalina e a microresistência do diamante. Porém, sabe-se que o diamante apresenta grande perda de peso por oxidação ou grafitização quando é exposto a altas temperaturas, a ferramenta de diamante pode apresentar um severo desgaste após o corte de alguns tipos de materiais especialmente metais ferrosos [THORNTON & WILKS, 1979], [DAVIES & EVANS, 1972], [KOMANDURI & SHAW 1976], [IKAWA & TANAKA 1971],

A importância dos estudos sobre desgaste de ferramenta de diamante deve-se ao fato de que, por menor que seja o dano que qualquer tipo de desgaste possa ocasionar à aresta de corte, este pode afetar o desempenho do corte e conseqüentemente, o acabamento superficial, ou seja, dado que os resultados de acabamento e desempenho dependem da afiação da aresta de corte (de ordem nanométrica), o desgaste torna-se um fator de grande relevância.

1.1.2.5 - Adesão e a Formação de Aresta Postiça (“build-up-edge”)

O desgaste de ferramentas de diamante monocristalino pode ocorrer através de inúmeros mecanismos os quais podem acontecer simultaneamente e interativamente.

Um dos axiomas estabelecidos pela moderna comunidade do torneamento com diamante é que pode-se chegar a um acabamento superficial muito próximo do teórico em materiais torneáveis com diamante pois “difícilmente ocorre formação de aresta postiça na ferramenta [EVANS, 1991].

Uma aresta postiça aderente é ocasionalmente formada durante a usinagem de alguns tipos de alumínio, o que produz um acabamento artificial muito pobre. A formação de aresta postiça na usinagem de ligas de alumínio é altamente dependente da velocidade de corte, podendo ser evitada através do emprego de fluidos refrigerantes [KÖNIG et al, 1991].

1.1.3 - ASPECTOS FÍSICOS DO TORNEAMENTO DE ULTRA-PRECISÃO

1.1.3.1 – Considerações gerais

No torneamento convencional com formação de cavaco contínuo, já é bem conhecido que a maior parte do calor (em torno de 80%) é retirado pelo cavaco [SHAW , apud PORTO 1995]. Porém com o decréscimo na massa térmica do cavaco através da profundidade de corte reduzida, no torneamento de ultra-precisão (TUP) há a possibilidade de uma deformação plástica subsuperficial na peça , devido ao atrito (“rubbing”) da face lateral (“flank face rubbing”), e assim a divisão de energias térmicas na usinagem de TUP pode diferir da usinagem convencional. Outro aspecto importante para o melhor entendimento do TUP são as forças de corte que ora podem oscilar em função de um possível desgaste de ferramenta, ora em função da policristalinidade de metais ferrosos e do efeito causado pela redução da profundidade de corte (“size effect”).

Os mecanismos de remoção é um assunto que tem recebido grande atenção nos últimos anos e a compreensão sobre a formação de cavaco pode ajudar na melhoria do desempenho do TUP visando a melhoria do acabamento superficial.

1.1.3.2 - Mecanismos de remoção de material

No corte dúctil dos metais, existe um plano de cisalhamento que passa por um ponto de concentração de tensão no material. Quando o metal (ao ser retirado da superfície) se aproxima deste plano de cisalhamento ele sofre cisalhamento puro através de um plano muito delgado de cisalhamento [SHAW apud PORTO, 1995]. O cavaco então passa pela face da ferramenta e uma superfície ondulada forma-se na parte posterior do cavaco resultante de uma deformação não homogênea presente no processo.

DUDUCH et al [1996] propôs modelo para torneamento com ponta única de materiais frágeis, em que a maior parte do material pode ser removida

através de microfratura frágil e com altas taxas de remoção ainda que uma superfície e subsuperfície pode ser obtida com níveis baixos de danos.

A deformação do material na usinagem dúctil é geralmente representada por um modelo ortogonal bidimensional da geometria do processo de corte. O material na região delimitada pela espessura de cavaco indeformado (t_m) à frente da ferramenta será separado da peça pela face de saída da ferramenta.

O cavaco pode ser diversas vezes mais espesso do que a profundidade de corte, pois a espessura do cavaco depende somente do ângulo do plano de cisalhamento [SHAW apud PORTO, 1995]. O ângulo assume um valor tal a minimizar o trabalho realizado durante o corte.

Uma zona secundária de deformação ocorre onde o cavaco é forçado a mover-se sobre a face de saída da ferramenta; nesse ponto considera-se que o material seja friccionado sobre a superfície, com forças de atrito significativas ou adere à ferramenta e cisalha também com uma força significativa [SHAW apud JASINEVICIUS, 1994].

O processo de formação de cavaco é caracterizado por diversos fatores:

- 1) Deformações extremamente grandes (200-300%)
- 2) Taxas de deformação extremamente altas ($10^4 - 10^6 \text{ s}^{-1}$)
- 3) Atrito ou adesão de uma superfície recém formada, sobre a face de saída a qual é quimicamente limpa e ativa.
- 4) O contato por atrito existe também entre a superfície recém criada e uma pequena porção da face de folga da ferramenta, provocando desgaste nessa região da ferramenta.

Para uma determinada profundidade de corte e um ângulo de saída α , quanto maior o ângulo de cisalhamento mais longo será o cavaco produzido por unidade de comprimento de corte. Como neste mecanismo de corte o comprimento do cavaco não pode exceder o comprimento de corte, o ângulo de cisalhamento máximo é conseguido dividindo-se ao meio o ângulo entre a face de saída da ferramenta e a superfície a ser usinada (dessa forma, o comprimento do cavaco é igual ao comprimento do corte).

1.1.3.3 - Espessura mínima de corte

Segundo **IKAWA et al [1991b]** o fenômeno de corte com remoção de cavaco nanométrico é considerado, morfologicamente, como sendo o mesmo que o da usinagem convencional com diamante, à profundidade de corte de 1 μm ou maior.

A mecânica da fratura prevê que nos sólidos frágeis, o material também pode ser removido por ação de escoamento plástico, como no caso de um metal. As superfícies ficam livres de fissura quando este processo de remoção é realizado em profundidade menor do que uma profundidade crítica de corte **[IKAWA, 1991]**.

Porém, a remoção de cavaco na usinagem de ultraprecisão a nível nanométrico ocorre numa pequena região contendo somente poucas camadas atômicas. Nestes casos a simulação computacional poderia ser uma técnica útil para compreender a remoção de micro-cavaco e processos de acabamento superficial de um ponto de vista atomístico ou molecular. Vários trabalhos dessa natureza foram realizados baseados no método dos elementos finitos não-lineares **[INAMURA et al 1991a]**, **[INAMURA et al 1991b]**, **[STOWERS et al 1991]** e **[BELAK & STOWERS 1990]**.

Embora a incerteza na profundidade efetiva de corte possa ser assumida como sendo muito pequena, nas profundidades de corte extremamente pequenas, existe uma mínima profundidade de corte abaixo da qual a formação de cavaco é instável.

Considera-se que a afiação da aresta de corte seja um dos fatores mais importante na determinação da mínima espessura de corte. Quanto mais afiada a aresta de corte, menor será a espessura mínima de corte **[IKAWA & SHIMADA, 1977]**. Os outros fatores que afetam a espessura mínima de corte são a uniformidade do material e a interação entre a superfície da ferramenta e do material da peça em termos do seu comportamento elasto-plástico.

1.1.3.4 - Força de Corte

Na torneamento de ultra-precisão de materiais policristalinos, o corte é realizado dentro de um grão individual e, conseqüentemente, a distribuição estatística de defeitos do cristal e suas interações com o campo de tensão da ponta da ferramenta de corte desempenha um papel importante no mecanismo de corte.

Como a máquina ferramenta utilizada na usinagem de UP é dimensionalmente estável e mecanicamente rígida, espera-se que a flutuação nas forças de corte não podem ser decorrentes de uma trepidação natural da máquina ferramenta. A variação dinâmica da força ocorre no contorno de grãos de materiais policristalinos e tem sua origem centrada nas diferentes orientações e conseqüentemente nas propriedades de cada grão.

Portanto, o mecanismo de corte depende muito da direção e orientação cristalográfica dos sistemas de escorregamento do grão, os quais são altamente anisotrópico com respeito às suas propriedades elásticas e plásticas.

Tanto em monocristais como em policristais, descobriu-se que os ângulos de cisalhamento e as forças de corte variam com a orientação cristalográfica [SATO et al 1978]. Embora a direção do cisalhamento tem sido mostrada como sendo muito sensível à orientação cristalográfica do cristal que está sendo cortado, uma relação simplificada entre a direção do cisalhamento e a orientação cristalográfica ainda não foi estabelecida.

Segundo LEE [1990] a variação periódica das forças de micro-corte em ligas de alumínio teria sua origem física na variação da orientação cristalográfica dos cristais que a ferramenta atravessa durante as revoluções do corte. No torneamento de materiais policristalinos, uma textura cristalográfica aleatória com um tamanho de grão ultra-fino seria desejável objetivando minimizar as flutuações nas micro forças de corte.

Portanto, o padrão de variação na força de micro-corte pode ser previsto caso a textura cristalográfica do material seja conhecida. O efeito da orientação cristalográfica de materiais policristalinos também tem grande influência sobre o mecanismo de formação de cavaco em TUP.

Um ângulo de cisalhamento grande está associado com a formação de cavacos contínuos e bom acabamento superficial [ASAI & KOBAYASHI, 1990].

As forças de corte refletem-se claramente no processo de remoção de cavaco como sendo um parâmetro físico muito importante para o entendimento do fenômeno de corte. FURUKAWA e MORONUKI [1988] observaram que o aumento na força específica de corte (ou “size effect”) predomina no sistema de força no torneamento com ferramenta monocortante de diamante a profundidades de corte sub-micrométrica.

Vários elementos do processo de micro-usinagem são supostos contribuir para o aumento desta força específica. Primeiramente, quando a superfície de corte é reduzida, a contribuição relativa do deslizamento elasto-plástico na face lateral da ferramenta para a energia total gasta aumenta.

Segundo LO-A-FOE et al [1988] outras fontes de influências sobre as forças de corte seriam profundidades de corte e/ou o desgaste da ferramenta que por sua vez podem afetar fortemente a acuracidade de forma da peça usinada (magnitude da ordem de $0.1 \mu\text{m}$), especialmente quando o desgaste da ferramenta ou a profundidade de corte for grande.

Alguns estudos procuraram desenvolver um modelo que permita correlacionar as forças de corte com as condições da ferramenta (geometria e desgaste) e parâmetros de corte (profundidade de corte, taxa de avanço e velocidade de corte). Os estudos conduzidos por DRESHER & DOW [1990, 1991] mostram que variações na velocidade de corte numa faixa de 4,2 a 21,0 m/s não afetam as forças de corte. Nesse mesmo estudo, esses autores concluem que a força de corte não é linear com a taxa de avanço para valores muito pequenos. Outro aspecto interessante é que pequenas variações na geometria da ferramenta pode influenciar muito nas forças de corte.

Finalmente, as forças são significativamente maiores do que seria esperado baseado na dureza nominal do material. Essas aparentes anomalias podem, talvez, serem explicadas pelo aumento exponencial da dureza do material próximo à superfície devido ao processo de deformação causado pela

ferramenta além de poder explicar por conseqüência as respostas das forças com relação a variações na taxa de avanço e profundidade de corte.

As pequenas profundidades de corte (sub-micrométrica), as vezes empregadas, o raio das arestas de corte, a pequena proporção entre a profundidade de corte e o raio da aresta, a qualidade da aresta de corte e até mesmo quantidades mínimas de desgaste na face de folga da ferramenta aumentam a complexidade do processo de usinagem de UP. Conseqüentemente, em adição às zonas primárias e secundárias de cisalhamento, uma terceira entre a superfície usinada e a face de folga pode ter uma função importante na usinagem de UP. Esta zona poderia ocorrer devido ao recuo elástico da superfície usinada e/ou devido à fricção (“rubbing”) da face de folga com a superfície usinada como conseqüência de um possível desgaste [LUCCA & SEO, 1989]. A Figura 2 esquematiza as forças de corte e seus efeitos na interface ferramenta/peça/cavaco durante a usinagem.

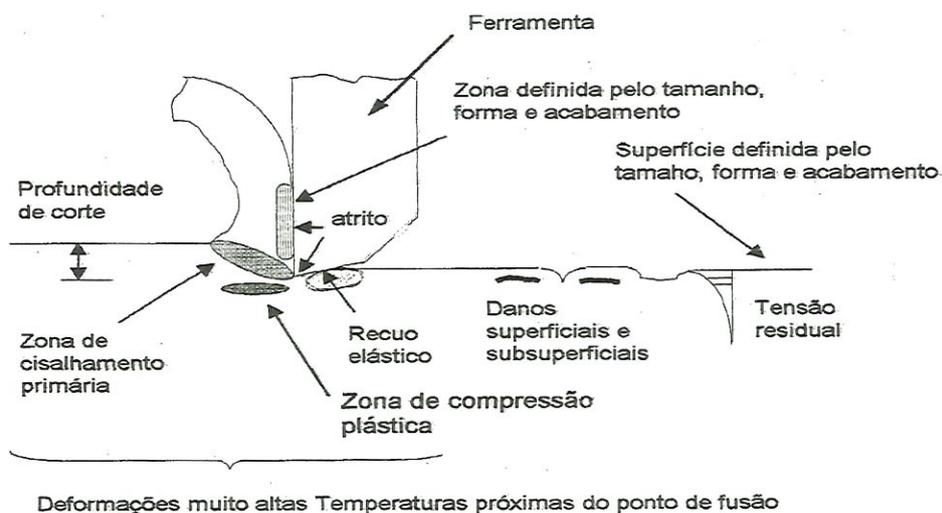


Fig. 2. Zonas de cisalhamento [KONIG et al. , 1991]

STOWERS et al [1991] investigaram o torneamento com ferramentas de diamante a profundidades de corte micrométrica e submicrométrica (15 nm a 5 nm) e demonstraram que para o cobre, existe um aumento significativo na força específica de corte, observando também uma diminuição da componente secundária em relação à profundidade de corte.

Os autores sugerem que nem toda energia gasta no processo esteja diretamente relacionada à remoção de material sendo parte dessa energia consumida com a deformação plástica causada pelo “plowing” e pelo deslizamento (“sliding”) da face lateral da ferramenta que é empurrada elasticamente pela superfície. Por outro lado a força de corte secundária pode variar com o aumento da distância de corte, ou seja, acredita-se que isso acontece em função da ocorrência de desgaste da ferramenta.

Segundo **SUGANO et al [1987]** a força de corte secundária aumenta quando a distância de corte atinge faixas de corte instável, a primeira faixa ocorre devido ao desgaste inicial, em seguida, em torno de 300-400 Km, após isso, ela torna-se estável novamente; como mostra o esquema abaixo:

0 Km

a ⇒ região de corte instável devido ao desgaste inicial

100 Km

100 Km

a ⇒ região de corte estável

300 Km

300 Km

a ⇒ região da segunda fase de corte instável

400 Km

400 Km

ou ⇒ região de corte estável

mais

Acredita-se que esta tendência é causada pelo desgaste da ferramenta, em particular o desgaste lateral **[idem]**.

1.2 - GERAÇÃO E ANÁLISE DE TEXTURA SUPERFICIAL

1.2.1 Estrutura de superfície usinada

Superfícies óticas além do polimento podem ser obtidas também por processos de usinagem – torneamento com diamante de ponta única em máquina que se desloca precisamente [CHURCH & TAKACS, 1985]. O acabamento superficial consiste depressões ou ranhuras em forma de sulcos espiralados com profundidades iguais formadas pela ferramenta de diamante, marcas de vibração (trepidação) sobre as ranhuras, grandes ranhuras espaçadas irregularmente causadas pelas interações máquina-ferramenta-cavaco, e estruturas no material tais como partículas de segunda fase e inclusões.

Irregularidades geométricas que são introduzidas na superfície, modificam a estrutura cristalográfica. Quanto mais dúctil for o material da peça maiores serão as modificações de superfície. Com isso o acabamento superficial é alterado resultando em mudanças nas condições de refletividade.

Embora as ranhuras sejam visíveis em muitas superfícies torneadas com diamante, especialmente em materiais duros como o silício, germânio, e o níquel eletrolítico, alguns materiais moles podem “queimar” enquanto estão sendo torneados com diamante, de forma que as ranhuras são muito menos distintas. Isto é particularmente verdade no caso de ligas de alumínio. Materiais com ligas de alumínio segregam inclusões duras que produzem inchaços (“bumps”) característicos em superfícies torneadas com diamante. Este defeitos podem ser responsáveis pela maior parte do espalhamento destas superfícies. Assim é importante escolher uma liga de alumínio que tenha uma densidade mínima de impurezas e ao mesmo tempo tenha outras propriedades necessárias de dureza e estabilidade, por exemplo [BENNETT,1992].

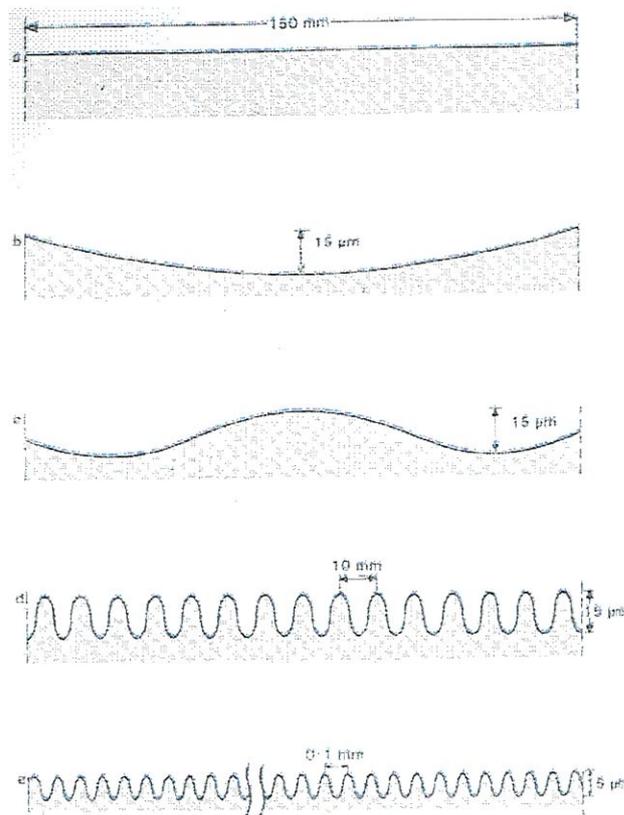


Figura 3. – Exemplo de superfície ondulada e curva [DAGNALL, 1986]

A figura 3 ilustra como irregularidades com a mesma altura podem fazer com que a superfície seja classificada como rugosa, ondulada ou curva, dependendo do espaçamento, ou seja, onde termina a rugosidade e começa a ondulação da superfície. A estrutura da superfície pode ser dividida em três grupos gerais de acordo com as dimensões laterais:

- **Microrugosidade superficial ou textura primária:** freqüentemente chamada de rugosidade, são as microirregularidades inerentes ao processo deixadas pela ferramenta de corte, tendo comprimentos de até aproximadamente um milímetro.
- **Ondulação superficial ou textura secundária:** também chamada de rugosidade de média freqüência, é a componente da textura sobre a qual a

rugosidade está sobreposta. Apresenta-se como séries de desvios regularmente repetidos de forma aproximadamente senoidal e com comprimento de onda aproximadamente constante. Tem comprimentos que vão de alguns milímetros até talvez um centímetro.

- **Forma:** forma global de uma superfície, freqüentemente chamada de aparência ótica ou forma na usinagem, tem comprimentos da escala do centímetro indo até o tamanho da peça.

A diferença entre rugosidade e ondulação é meramente uma questão de escala (comprimento de onda), embora suas causas e efeitos funcionais não sejam iguais .

A figura 4 ilustra três tipos de estruturas de superfícies com irregularidades e respectivas dimensões laterais.

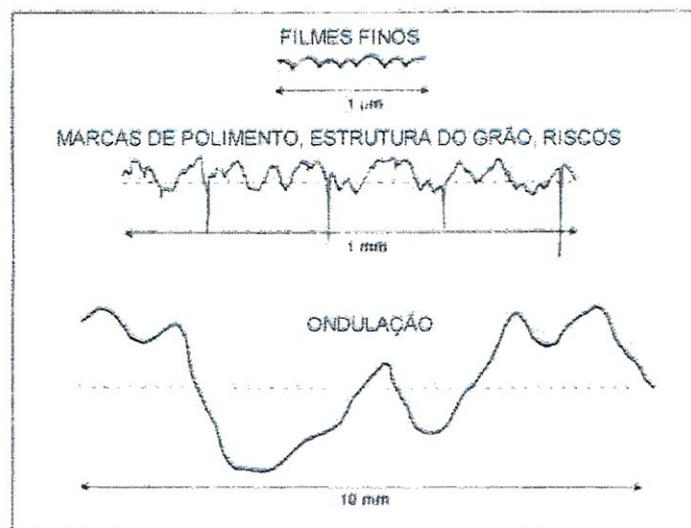


FIG. 4 Dimensões de vários tipos de estruturas superficiais
[BENNETT,1992]

A rugosidade superficial tem duas características principais: alturas das irregularidades (ou profundidades) e dimensões laterais. Outras características importantes da superfície são: orientação das irregularidades e passo ou “freqüência das irregularidades”. No TUP há forte característica direcional na

textura superficial, sendo a direção de maior importância para medida de rugosidade a direção transversal, isto é, a direção do avanço.

No torneamento com ponta única a ferramenta avança numa distância axial constante por revolução da peça. A superfície resultante, vista perpendicularmente à direção do avanço da ferramenta, replica a forma da ferramenta no corte. Esta rosca tem passo igual ao avanço (a) e altura de rugosidade $R_{\max} = (R_{\max})_{\text{teórica}}$, dada pela fórmula :

$$(R_{\max})_{\text{teor}} \cong a^2 / 8 \cdot R_p$$

onde R_p é o raio de curvatura da ponta da ferramenta.

As superfícies geradas são resultado do efeito combinado de rugosidade, ondulação e forma. No entanto, por causa dos efeitos funcionais de rugosidade, ondulação e forma serem diferentes torna-se útil medi-los separadamente, como mostra a figura 5.

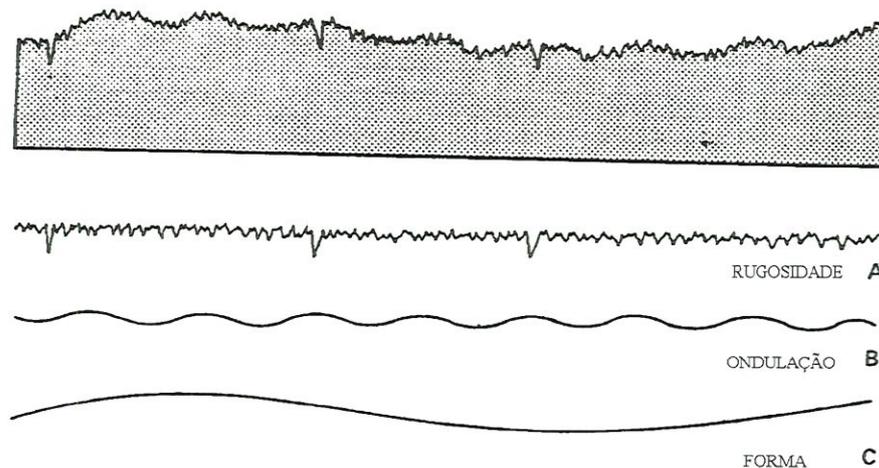


FIG. 5 Combinação de rugosidade (A), ondulação (B) e forma (C). [PORTO, 1995]

1.2.2 Parâmetros estatísticos para cálculo de rugosidade

Os parâmetros estatísticos usados para quantificar a rugosidade podem ser genericamente classificados em: parâmetros de amplitude, parâmetros de espaçamento, parâmetros híbridos

As alturas de rugosidade em superfícies polidas ou usinadas são freqüentemente medidas e registradas como rugosidade média quadrática δ ou, em usinagem de precisão, como rugosidade média r_z . As unidades são Angstroms ou nanômetros para superfícies lisas e micrômetros para superfícies rugosas.

A amostragem dos parâmetros de é feita em relação a uma linha de referência, traçada ao longo do perfil medido. Sendo que a linha média (LM) é traçada de forma que a soma de áreas acima desta linha é igual a somatória de área abaixo desta. Outra linha de referência, a linha dos mínimos quadrados é traçada de forma que a soma dos desvios acima e abaixo desta sejam mínimos.

1.2.2.1 Rugosidade Média R_a (Roughness Average)

Este parâmetro é definido como a amplitude média do perfil em relação à linha de referência, sobre um comprimento do perfil correspondente à cada comprimento amostral considerado (Figura 6). Matematicamente, a rugosidade média é expressa por:

$$R_a = (y_1 + y_2 + \dots + y_n) / n \quad (1)$$

onde y_i , $i = 1, \dots, n$, são pontos discretos ao longo do perfil. Sendo R_a correspondente à média dos valores conforme a equação (1), o efeito de uma única irregularidade, atípica de pico ou vale será balanceado minimizando sua influência sobre o valor medido.

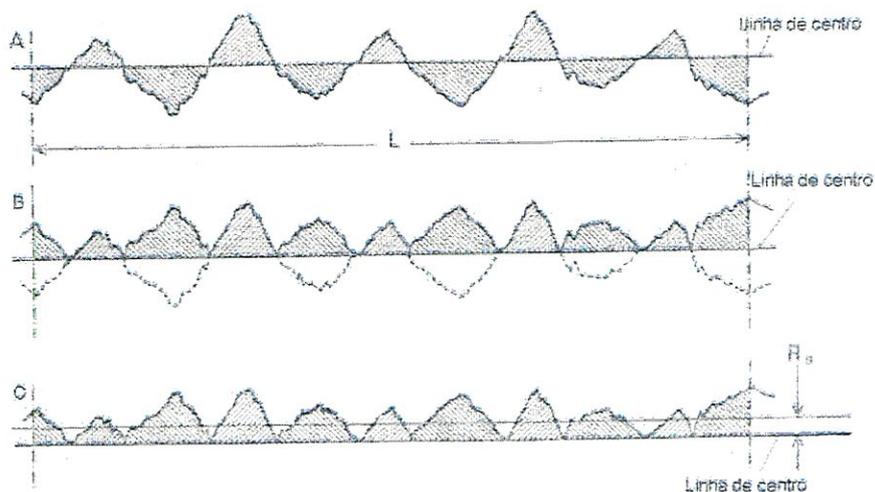


Figura 6: Derivação gráfica de R_a [DAGNALL, 1986].

- A – Perfil com linha de centro; B - Partes inferiores do perfil invertidas;
C – R_a é a altura média do perfil

Uma limitação da utilização de R_a é o fato de ele ser um valor médio das amplitudes do perfil, independente da forma geral das ondulações. A figura 7, ilustra quatro perfis de mesmo R_a e de ondulações com formatos bastante distintos. Além disso, esse parâmetro não faz distinção entre pico e vales, informação essa bastante importante em aplicações tais como superfícies de deslizamento.

Um outro ponto importante de ser observado é que dependendo das ondulações contidas na superfície, o valor R_a variará dependendo do comprimento amostral utilizado. Esses comprimentos consecutivos são definidos pelo "cut-off (B_{max})" estipulado e o R_a somente terá repetibilidade caso seja utilizado o mesmo "cut-off".

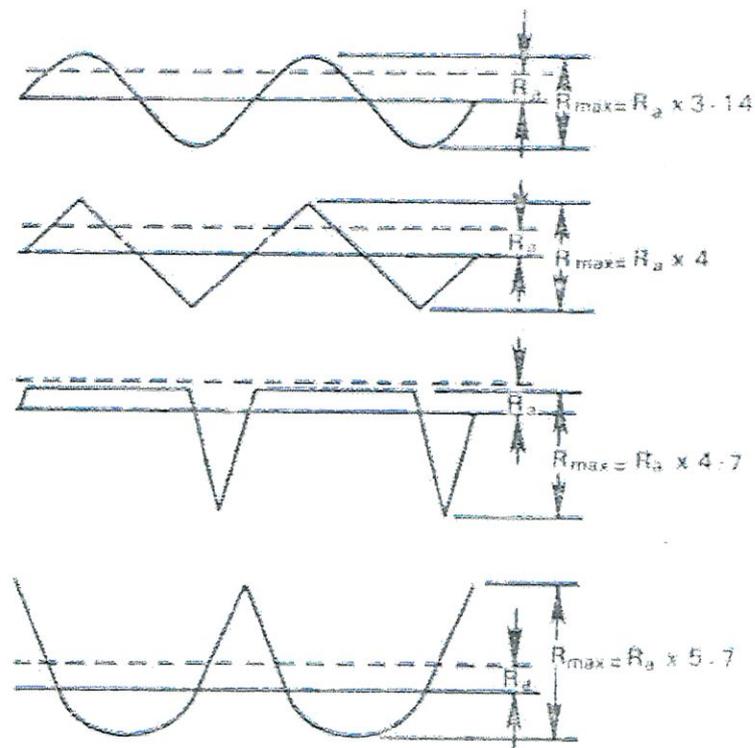


FIG. 7 Perfis de mesmo R_a , mas com diferenças na forma e valores de $R_{m\acute{a}x}$. [DAGNALL, 1986]

1.2.2.2 Rugosidade Média Quadrática (Rq)

Um outro método de se calcular uma amplitude média, muito usado em medidas científicas é o “Root Mean Square” (RMS). Este é obtido através da elevação ao quadrado de cada valor e então é calculada a raiz quadrada da média, expresso matematicamente:

$$R_q = \left[\frac{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2}{n} \right]^{1/2} \quad (2)$$

onde y_i , $i = 1, \dots, n$, são pontos discretos ao longo do perfil. O valor de R_q quando comparado com R_a é mais sensível a picos e vales, ou seja as amplitudes maiores, quando elevadas ao quadrado, terão um peso maior no cálculo da média das amplitudes. Portanto, para um mesmo segmento de uma superfície, a comparação entre os valores de R_a e R_q pode acrescentar alguma informação sobre o formato das irregularidades. Também nesse caso, o valor R_q variará dependendo do comprimento amostral utilizado.

Superfícies metálicas torneadas com diamante de ponta única, por exemplo, o alumínio, cobre, ou níquel eletrolítico, podem ter rugosidades de ~ 3 a 15 nm dependendo do material, máquina e parâmetros de corte [BENNETT, 1992].

1.2.2.3 Alturas de Picos e Vales (R_{max} , R_z , R_p)

Algumas vezes torna-se necessário especificar a máxima altura de rugosidade (i.e., pico-a-vale) ao invés de se ter apenas a altura média que é fornecida por R_a ou R_q . Para esse caso, vários são os parâmetros usados. O

mais comum, R_{max} , corresponde à distância vertical entre os pontos mais baixos e mais altos do perfil dentro do comprimento de medição, medido perpendicularmente à linha de ordenada do perfil. Este parâmetro, o qual se relaciona bem com a avaliação tátil de uma superfície é chamado de R_t (= Rauhtiefe, profundidade de rugosidade em alemão). É importante observar que o valor de R_t é diretamente afetado por riscos ou sujeiras sobre a superfície. R_z corresponde à média dos cinco maiores picos e cinco maiores vales, ao longo do comprimento de medição (Figura 8), expresso por:

$$R_z = [(P_1 + P_2 + \dots + P_5) - (V_1 + V_2 + \dots + V_5)] / 10 \quad (3)$$

Outros dois parâmetros de altura, embora menos utilizados são o R_p , definido como a máxima altura do perfil acima da linha de referência dentro de um comprimento amostral. Um coeficiente relacionado ao parâmetro R_p é o Coeficiente de Esvaziamento, K_e , que é definido como a relação entre R_p e R_{max} .

1.2.2.4 Fator de Enchimento (“Bearing Ratio”)

Uma função bastante importante de superfícies em engenharia é a de proporcionar uma superfície de deslizamento para uma outra superfície que se mova em relação à primeira. Para superfícies com valores de R_a semelhantes, o desgaste será mais acentuado e precoce para aquela superfície que tiver predominantemente picos. O fator de enchimento, t_p , é um parâmetro variável em função da posição vertical de uma linha (alinhada com a linha de referência do perfil) cortando o perfil, e expressa a razão (em porcentagem) entre o comprimento de medição e o comprimento de superfície interceptado por essa linha. Matematicamente, é expresso por:

$$t_p = (a+b+c+d+e) / E \times 100\% \quad (4)$$

Este parâmetro, embora simule o efeito do desgaste, não substitui testes de desgaste da superfície pelos seguintes motivos:

- O fator de enchimento é uma fração de um comprimento, e não de uma área da superfície.
- Ele é determinado a partir de uma amostra comparativamente pequena da superfície e ignora lacunas que podem resultar de ondulação e forma.
- t_p está relacionado a uma superfície sem carga e deformações, e portanto não nas mesmas condições de uso.
- Na prática, estariam envolvidas duas superfícies em contato, e as características de cada uma tem sua parte no mecanismo de desgaste.
- O desgaste é geralmente acompanhado por um escoamento físico do material, e o conceito geométrico das arestas sendo niveladas com uma linha que a atravessa o perfil pode ser irreal.

Ainda considerando essas limitações, t_p é um parâmetro o qual encontra inúmeras aplicações e pode ser correlacionado com o fator desempenho.

1.2.2.5 Média das Distâncias entre Saliências (S_m)

Este parâmetro é definido como a média dos passos (ou largura) das saliências, medidas sobre a linha média, no comprimento de amostragem (Figura 8). Matematicamente é expresso por:

$$S_m = S_1 + S_2 + \dots + S_n / n \quad (5)$$

Este parâmetro é normalmente utilizado juntamente com parâmetros de amplitude

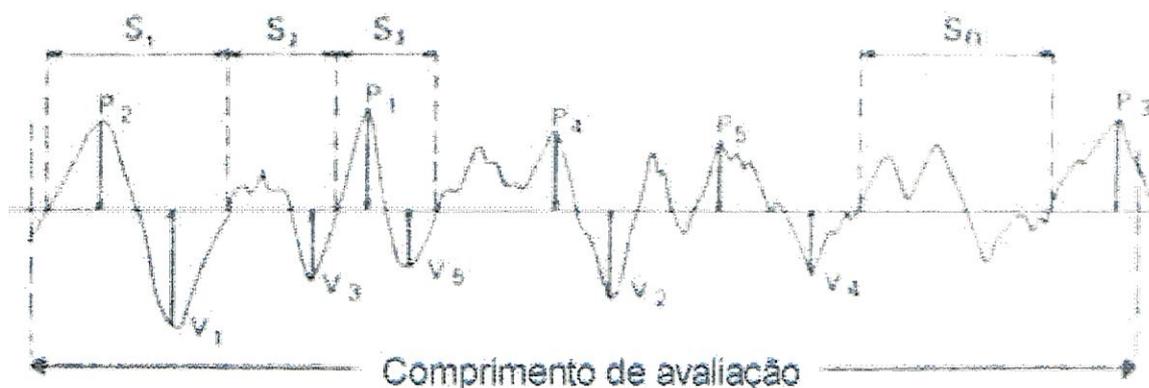


Figura 8: Derivação de S_m e R_z [DAGNALL, 1986].

1.2.2.6 Média das Inclinações (Δ_a , Δ_q)

A média das inclinações (em termos de gradiente), Δ_a , é dado pela média dos ângulos (expressos em radianos) formados pela tangente ao perfil em relação à linha de referência, para vários pontos medidos.

Similarmente a R_q , Δ_q representa a média quadrática das inclinações. Estes parâmetros carregam informações tanto da amplitude como de espaçamento das irregularidades, e por isso são chamados de parâmetros híbridos.

Estes parâmetros são úteis para a avaliação do desempenho das superfícies de engenharia em relação a três fatores:

- Contato: Δ_a e Δ_q podem ser relacionados à dureza e elasticidade, revelando o grau de possibilidade de “rolar” a superfície para esmagamento dos picos.
- Óptico: Δ_a ou Δ_q pequenos revelam superfícies apropriadas para reflexão da luz.
- Fricção: as propriedades de adesão e fricção variam com Δ_a ou Δ_q ;

1.2.2.7 Funções de distribuição das alturas: Skewness e Curtose

Pode-se obter informações adicionais sobre a distribuição estatística da rugosidade superficial analisando as funções distribuição e forma do perfil. Uma função distribuição das alturas é um histograma feito de frações de alturas da superfície que está entre uma dada altura e um incremento.

A assimetria de distribuição (R_{sk}) é o critério de avaliação do formato (ou deformação) da curva de distribuição das amplitudes das irregularidades em relação à linha de referência, no comprimento de medição (Figura 9).

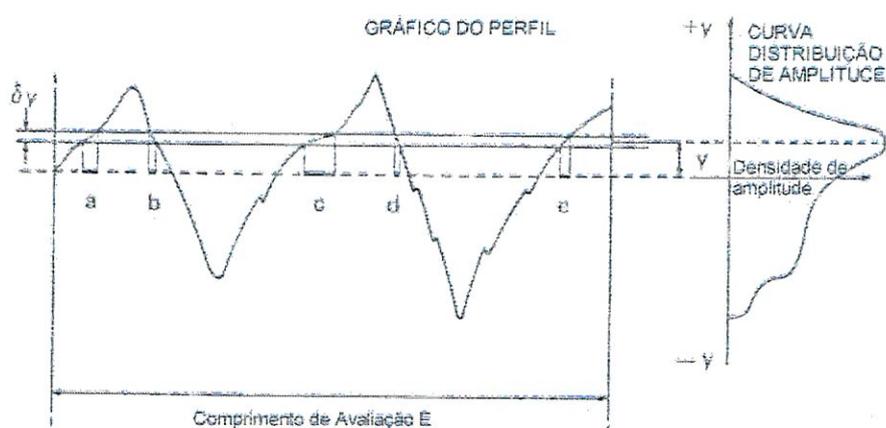


Figura 9: Derivação da curva de distribuição de amplitude [DAGNALL, 1986]

Em termos práticos, se R_{sk} for negativo, as irregularidades da superfície tem a forma da distribuição distorcida para cima, ou seja caracterizada por sulcos estreitos. Caso contrário, quando R_{sk} for positivo, a superfície é caracterizada por picos estreitos (Figura 10)

Superfícies com R_{sk} negativo são menos suscetíveis à desgaste prematuro. Além disso, em aplicações como mancais lubrificados, os sulcos servem como depósito de lubrificante. Portanto, R_{sk} é um parâmetro importante para a medição de superfícies de mancais (para superfícies de mancais, recomenda-se R_{sk} entre -16 e -2,0).

Curtose, que também indica o formato das irregularidades superficiais, mede a forma da curva de distribuição das amplitudes, ou seja, o afilamento ou

achamento dessa curva. Em termos práticos, valores altos de Curtose (superiores a $K = 3$), indicam a que as irregularidades superficiais são “pontagudas”, ou seja mais suscetíveis ao desgaste prematuro do que superfícies não pontagudas, como valores de Curtose mais baixos (geralmente menores que $K = 3$). Assim, este parâmetro, juntamente com o fator de enchimento (t_p) e assimetria (S_k) são complementares e igualmente importantes para a caracterização de superfícies de deslizamento e de mancais.

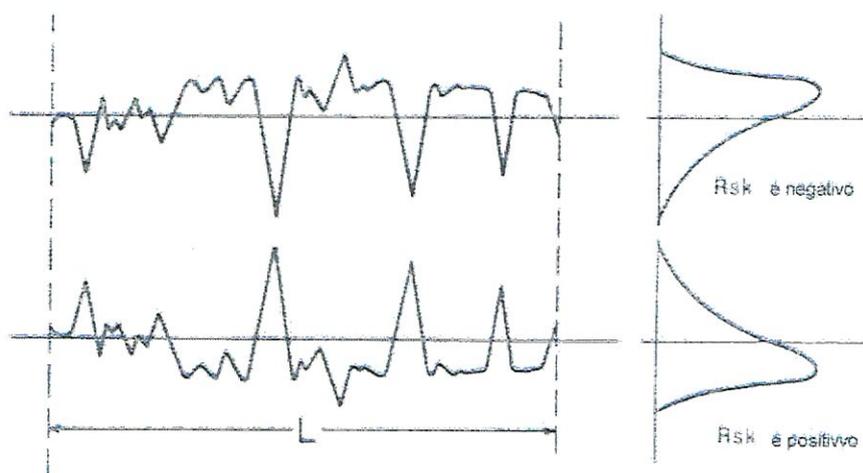


FIG. 10 – Distinção de diferentes formas de perfis através de R_{sk} [DAGNALL, 1986]

1.2.2.8 Função Autocovariância, Comprimento de Correlação e Comprimento de Onda Espacial

A função autocovariância é a medida das propriedades de correlação da superfície rugosa, ou seja, é o produto de duas “cópias” do mesmo perfil, sendo uma atrasada em relação a outra. A soma da separação lateral entre os dois perfis representa o “atraso no comprimento”. Um valor positivo da função autocovariância indica que o aspecto da superfície se repetirá para um particular atraso de comprimento. A função autocovariância tem unidade de comprimento ao

quadrado e a sua periodicidade é a própria periodicidade apresentada pela superfície. O valor da função para um atraso igual a zero é de fundamental importância, porque neste caso é igual ao quadrado da rugosidade rms do perfil superficial. Uma definição analítica da função autocovariância para um perfil superficial de comprimento finito é mostrado na equação (7) .

Pelo exame das funções autocovariância pode-se verificar os componentes comuns da estrutura superficial [ELSON et al., 1979]. Na figura 11 podemos ver estas estruturas, que consistem de (a) ondulações de grande escala, (b) rugosidades aleatórias de curto alcance (c) periodicidade.

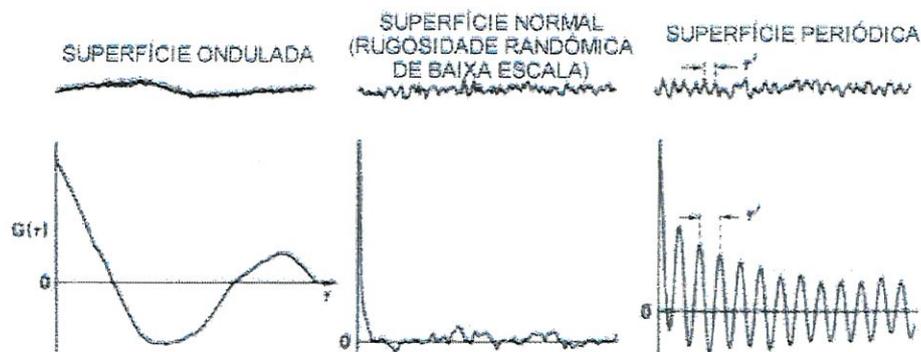


FIG. 11 Três tipos básicos de perfis superficiais e suas correspondentes funções autocovariâncias [BENNETT & MATTSSON, 1989]

Superfícies com componentes periódicos, tais como superfícies torneadas com diamante ou redes (“gratings”) tem funções autocovariância oscilatórias. A figura 12 mostra a porção inicial de uma curva para uma superfície deste tipo, uma amostra de cobre torneada com diamante. A periodicidade de cerca 14 μm que aparece nesta superfície não é a separação básica de ranhura, mas é um efeito de grande alcance provavelmente produzido pela vibração entre ferramenta e peça. [ELSON et al, 1979]

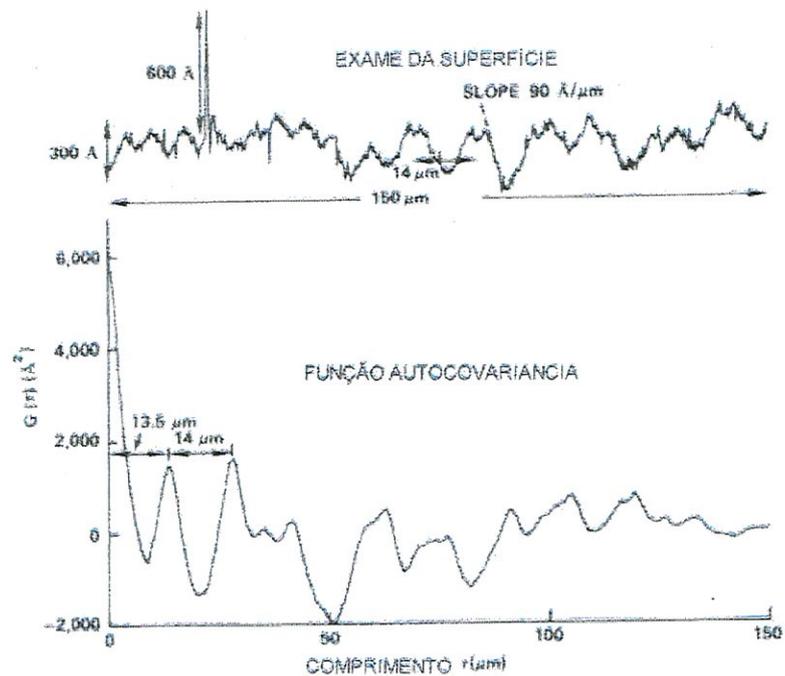


Figura 12 Varredura de perfilometro mecânico de amostra de cobre torneada com ferramenta de diamante e respectiva função autocovariância computada

[DECKER et al,1978]

A transformada de Fourier da função autocovariância, chamada Função Densidade de Freqüências Espaciais, é importante para calcular o espalhamento angularmente resolvido.

O comprimento de onda espacial superficial é um parâmetro usualmente utilizado para descrever rugosidades superficiais. Se a corrugação é da forma de uma senóide ou outra função periódica, o comprimento de onda espacial superficial é o período espacial da função, cujo recíproco é a freqüência espacial. A topografia de uma superfície pode ser isotrópica ou aleatória. Será isotrópica, se a rugosidade for a mesma quando tomado o perfil em qualquer direção. Será aleatória, se o perfil for

equivalente à superposição de um conjunto de estruturas periódicas, cada uma tendo diferentes amplitudes, períodos e orientações. Cada período é um comprimento de onda espacial superficial. Diferentes perfilômetros medem diferentes intervalos de comprimento de onda espacial. Por esta razão, os valores obtidos em diferentes instrumentos, para a rugosidade rms, são usualmente diferentes; pois existem componentes de rugosidade para muitos comprimentos de onda espacial presentes na superfície.

Se for usada uma medida de TIS para se obter o valor de δ_{rms} , o período depende do λ da luz incidente, do ângulo de incidência e do intervalo angular da medida. O período pode ser calculado da equação de redes de difração, onde somente a difração de primeira ordem precisa ser considerada, se a amplitude da rugosidade for muito menor que o comprimento de onda da luz incidente:

$$\lambda = d(\sin\theta \pm \sin\theta_d) \quad (6)$$

onde d é o período, θ é o ângulo de incidência e θ_d é o ângulo de difração.

Para o caso de incidência normal, pode-se calcular $\sin\theta=0$, e o intervalo de λ espacial (valor de d) que produz o espalhamento das microirregularidades correlatas. O menor valor de λ espacial ocorre quando $\sin\theta_d = 1$ ou $\theta = 90^\circ$. Neste caso é igual ao λ incidente (a luz é espalhada em um ângulo rasante ao longo da superfície). O maior λ espacial ocorre quando $\sin\theta_d = 0$ ou $\theta = 0^\circ$. Em princípio é igual ao infinito, mas na prática depende do intervalo angular coletado pelo instrumento. Para o caso ideal, perfil contínuo de comprimento infinito, a função autocovariância $G(\tau)$ é definida como

$$G(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-L} z_i z_{i+L}, \quad L=0,1,2,\dots, N-1, \quad (7)$$

onde L é um inteiro correspondente ao atraso de comprimento, a distância entre pares de ponto onde a correlação é calculada. O valor numérico do atraso de comprimento é $\tau = L\tau_0$, onde τ_0 é a distância lateral entre pontos

adjacentes z_i , ao longo da superfície e portanto, pode-se escrever $G(\tau)$. N é o número total de pontos na varredura total.

1.2.2.9 Função Densidade de Freqüências Espaciais

A Função Densidade de Freqüências Espaciais é um espectro de freqüências da rugosidade superficial, medido em unidades do inverso do comprimento. Através dessa função pode-se obter informações sobre as freqüências espaciais da superfície e o fator de superfície (associado a uma função das alturas em relação a uma nível médio). Estas informações possibilitam calcular a expressão para o espalhamento angularmente resolvido (ARS) por unidade de ângulo sólido, para uma superfície rugosa. Se, ao contrário, ARS for medido, a mesma teoria de espalhamento vetorial pode ser usada para encontrar a Função Densidade de Freqüências Espaciais $g(k)$. A Transformada de Fourier de $g(k)$ gera a função autocovariância $G(\tau)$. Portanto, a partir de uma medida óptica (ARS), o perfil da superfície não pode ser obtido, pois falta informação sobre as fases das freqüências que compõem a superfície.

A Função Densidade de Freqüências Espaciais pode ser entendida da seguinte forma: considere uma superfície que seja lisa na média, mas que tenha muitas irregularidades locais. O perfil unidimensional pode ser representado por uma função contínua composta por uma série infinita de ondas senoidais com diferentes amplitudes, períodos e fases.

Dados obtidos de um perfil são tipicamente gerados como uma série de pontos discretos, igualmente espaçados. Sendo o comprimento do perfil finito, e não infinito, pode-se usar uma série de Fourier de comprimento finito para representar o perfil da superfície. Especificamente, a Função Densidade

de Frequências Espaciais é o quadrado da transformada de Fourier do perfil original, ou a transformada de Fourier da função autocovariância.

PORTO [1995] aplicou a técnica de análise espectral das frequências espaciais em perfis de rugosidade superficial gerados em usinagem de ultra-precisão de peças de cobre e ligas de alumínio.

A diferença entre rugosidade e ondulação é meramente uma questão de escala, embora suas causas e efeitos funcionais não sejam iguais.

1.2.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO SUPERFICIAL

Uma extensa variedade de métodos são disponíveis para medir rugosidade superficial. Estes métodos podem ser agrupados entre aqueles que dão “fotografia” de superfícies (e as vezes informação quantitativa), e aqueles que dão informação estatística quantitativa sobre as superfícies.

Para superfícies lisas, dois modos de caracterização superficial dão informação quantitativa sobre a rugosidade superficial: perfilômetros mecânicos e óticos que tomam perfis ao longo de uma linha ou fazem mapas topográficos de uma área, e métodos de espalhamento de luz que podem dar informação sobre propriedades estatísticas da superfície tais como a rugosidade RMS ou espectro de potência, mas não a topografia da superfície.

BENNETT & MATTSSON [1989] elaboraram um diagrama esquemático das características de perfilômetros superficiais e instrumentos de medir espalhamento de luz . Isto pode ser observado na Figura 13, onde as barras horizontais dão os alcances do comprimento de onda espacial da superfície, e os números entre parênteses são as escalas de alturas RMS que podem ser medidas em cada instrumento. Para medidas de espalhamento total integrado, as barras superior e inferior são para os comprimentos de onda de 0.6328 e 10.6 μm respectivamente.

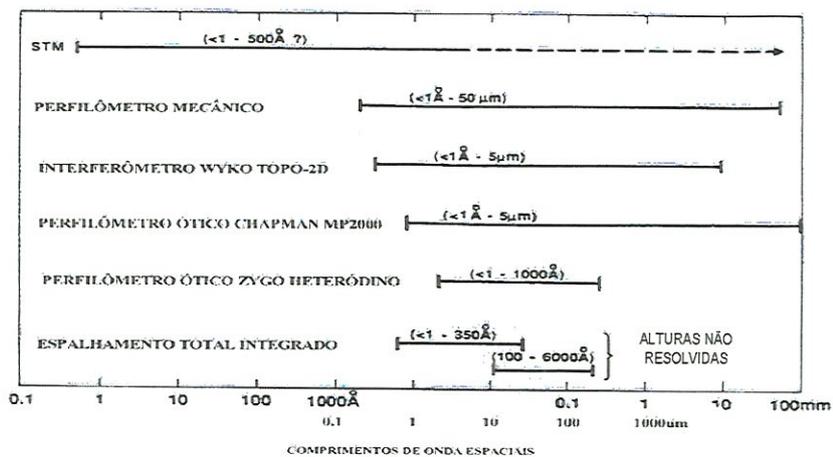


FIG. 13 Técnicas de caracterização superficial [BENNETT & MATTSSON, 1989]

1.2.3.1 Perfilômetros mecânicos ou métodos de contato

Convencionalmente, a medição de rugosidade é feita utilizando-se perfilômetros de contato mecânico. Em instrumentos desse tipo, as irregularidades de uma superfície são detectadas através do deslizamento de uma agulha (de diamante) de ponta diminuta sobre um determinado segmento da superfície, assumido como representativo do resto da superfície sendo analisada. Esse tipo de medida mecânica está relacionada tanto com o raio da agulha (da ordem de 0.1 a 12 μm) como pela carga aplicada a esta.

Os componentes básicos de um instrumento do tipo agulha estão ilustradas na figura 14.

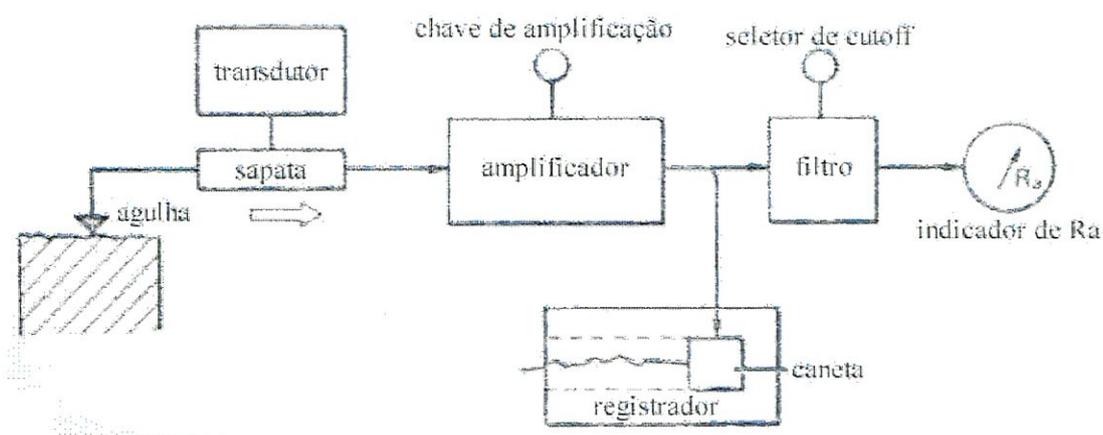


FIG. 14 Constituintes principais de um instrumento de medida de textura superficial do tipo agulha [DAGNALL, 1986]

A sensibilidade do instrumento, ou seja, a habilidade em medir alturas superficiais muito pequenas, da ordem de alguns ângstrons, depende da sensibilidade na montagem eletromecânica, que transforma o movimento vertical do apalpador em um sinal elétrico de amplitude proporcional à altura das irregularidades. A frequência do sinal elétrico gerado pelo transdutor será função do espaçamento das irregularidades e da velocidade com que o apalpador percorre a superfície. Ou seja, quanto menor for o espaçamento das irregularidades, e para uma mesma velocidade de deslocamento da

agulha, maior será a frequência do sinal elétrico. Ou, aumentando-se a velocidade de deslocamento do apalpador, a frequência do sinal gerado será maior.

O sinal elétrico é filtrado para separar o sinal de baixa frequência (ou seja ondulações de comprimento de onda relativamente maior e correspondentes a ondulações da superfície) do sinal de alta frequência. Os filtros de rugosidade atenuam os componentes do sinal com comprimentos de ondas acima do comprimento de corte ("cut-off" e "wave-length"). Os valores intencionalmente normalizados de "cut-off" são de 0,08, 0,25, 0,8 e 2,5mm.

O segmento de superfície percorrido pela agulha é chamado de comprimento total. Entretanto, a medição da rugosidade é feita sobre um trecho menor, depois de eliminado os segmentos do perfil no começo e final do comprimento de medição, distorcidos devido à aceleração e desaceleração do carro transversal que movimenta a agulha. Finalmente, o comprimento de amostragem corresponde à segmentos dentro do comprimento de medição sobre os quais calculam-se os parâmetros estatísticos quantitativos dos erros de rugosidade. Assim, a rugosidade da superfície é avaliada pela média aritmética de uma série de segmentos consecutivos (comprimento de amostragem), que definem o comprimento de medição.

O comprimento do "cut-off" com o qual a ondulação é avaliada refere-se ao comprimento abaixo do qual as irregularidades são suprimidas, o comprimento amostral deve, no entanto, ser maior do que o "cut-off". Isto é o oposto do propósito de "cut-off" para aplicação em medições de rugosidade, quando o comprimento passa acima de onde as irregularidades são normalmente excluídas ou seja, o filtro de ondulação é do tipo passa-baixo e o de rugosidade é passa-alto.

O limite superior para o comprimento amostral (que para ondulação também é o comprimento de avaliação) é geralmente ajustado pelo máximo comprimento transversal disponível ao invés de se excluir os desvios de forma.

A resolução lateral, ou seja, o melhor contorno possível pela agulha, depende das características das superfícies relativas às limitações do equipamento. Uma simples expressão que relaciona esses parâmetros para uma superfície periódica de perfil senoidal foi proposta por **ELSON apud BENNETT & MATTSSON [1989]**

$$d > 2\pi\sqrt{hr} \quad (8)$$

onde d é o período superficial, h é a amplitude e r é o raio da agulha. Esta expressão também se aplica a perfis em V ou do tipo onda quadrada.

Em estudo mais recente sobre a resolução da agulha **AL-JUMAILY et al [1987]** calcularam a função transferência de modulação aproximada de um perfilômetro mecânico como uma função da frequência espacial superficial para senóides de frequência única. Também foi calculada a distorção harmônica total como uma função da frequência espacial.

Um instrumento de perfilometria mecânica de superfície em comparação com outros métodos tem as seguintes vantagens: alta sensibilidade dos instrumentos mais sensíveis (na escala subnanométrica); boa resolução lateral (melhor do que a dos perfilômetros óticos); um alcance maior para medida de altura, freqüentemente até alguns micrometros; não são afetados pelo material (constantes óticas ou transparência) da superfície, desde que não seja muito mole.

A principal desvantagem dos instrumentos tipo agulha é que estes não podem pre-selecionar uma área típica sobre a amostra exceto por observação visual usando um microscópio de baixa potência. Pelo fato da agulha de diamante entrar em contato com a superfície, estes instrumentos podem deixar um risco, a menos que o carregamento seja muito cuidadosamente controlado como em alguns perfilômetros mecânicos amigáveis ao usuário **[ELSON et al , 1979]**. O tamanho finito da ponta do apalpador e a sapata estando solidária ao transdutor funcionam como filtros, afetando a acuracidade com a qual o perfil pode ser traçado. Os instrumentos correntes não podem perfilar acuradamente superfícies muito lisas da ordem de 10 angstroms rms.

1.2.3.2 Perfilômetros ópticos

Os perfilômetros ópticos se classificam em duas categorias, dependendo do princípio de funcionamento: interferometria e detecção de erro focal.

Diferentes tipos de instrumentos usando o princípio de detecção de erro focal são discutidos na literatura [SHERRINGTON & SMITH, 1988]. A resolução horizontal desses instrumentos, definida pela dimensão do ponto focal, é geralmente, limitada a valores em torno de 1 ou 2 μm , enquanto a resolução vertical é de 10 nm, podendo atingir até 1nm.

Os métodos de interferometria utilizam o princípio da interferência da luz. Este princípio é brevemente descrito: quando os raios de luz são refletidos entre duas superfícies (uma das quais é de referência) que não são paralelas, os diferentes comprimentos de percurso em várias partes da superfície causam mudanças de fase na luz refletida de volta ao observador. Como resultado disto, alguns raios cancelam e outros somam-se, resultando num padrão de franjas alternadas de luz e escuro, sendo seus espaçamentos e forma dependentes da regularidade da superfície e do refletor. As irregularidades de textura são reproduzidas como irregularidades no padrão de interferência e, sob condições especificadas, o deslocamento das franjas é uma medida da altura de rugosidade.

O instrumento é basicamente um microscópio com um sistema de iluminação embutido (Figura 15). Entre a objetiva e a superfície está um semi-refletor (G da Figura 15 e mostrado com mais detalhes na Figura 16), ligeiramente inclinado em relação a superfície tal que este forma uma fenda de ar de cunha acentuada. Reflexões múltiplas entre a superfície e o plano refletor produzem franjas afiadas que são vistas na objetiva.

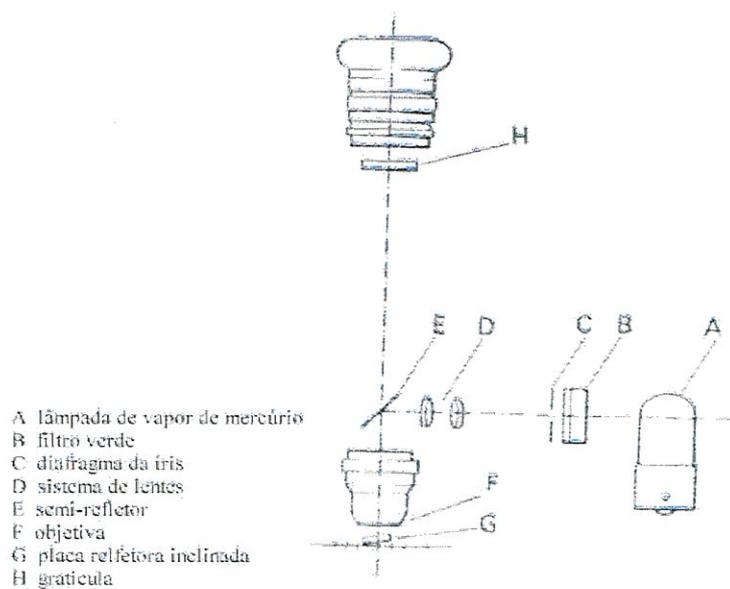


FIG. 15 Layout do interferômetro de textura superficial[DAGNALL, 1986]

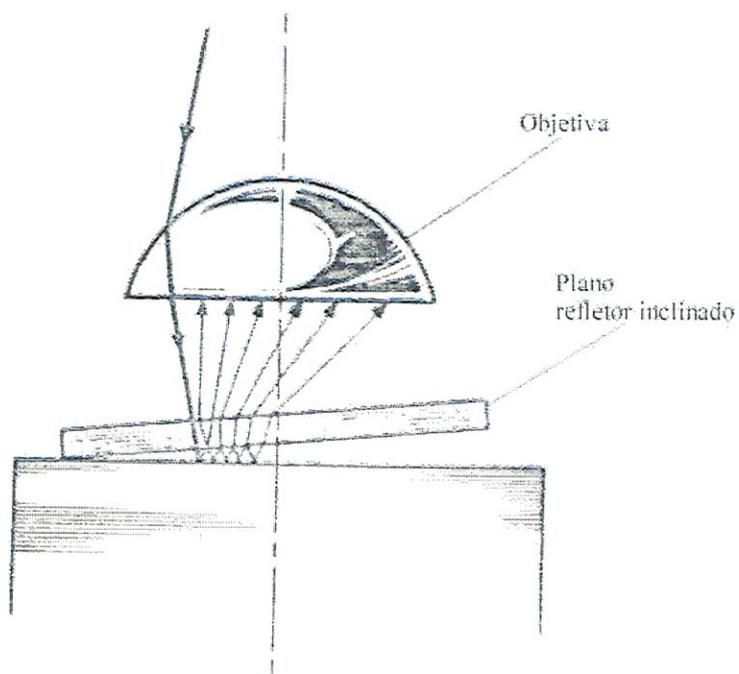


FIG. 16 Diagrama mostrando a forma o dos feixes múltiplos[DAGNALL,1986]

O interferômetro clássico do tipo Mirau é descrito por [WHITEHOUSE, 1987]. O padrão de franjas (variação da intensidade luminosa devido à interferência construtiva e destrutiva) ao longo de um perfil da superfície é detectado por uma série de fotodiodos (ou sensores de estado sólido tipo “CCD array”) posicionados em linha. Variações verticais da superfície da ordem de 1 nanometro são possíveis de ser percebidas pela medição da diferença de fase entre os feixes de referência e de medição, através da detecção da variação de intensidade do padrão de franjas detectada por cada fotosensor quando a lente objetiva e o plano de referência são deslocados verticalmente por um transdutor piezoelétrico em relação à superfície de medição que permanece fixa. Alternativamente, fotosensores de área podem ser usados em substituição aos sensores lineares e nesse caso um mapa topográfico de uma região da superfície pode ser determinado.

Os instrumentos baseados na interferometria tem altas sensibilidades à alturas, estando estas na escala subnanométrica. A resolução horizontal é dependente da dimensão abrangida pelos fotosensores, reduzida através da magnificação da superfície pela lente objetiva, podendo atingir valores em torno de 1 μm . A resolução vertical é basicamente dependente da resolução com que se pode medir a variação da diferença de fase entre os dois feixes de luz. Valores típicos são da ordem de centésimos de micrometro. Instrumentos que usam a técnica de medir a fase entre dois feixes de luz estão comercialmente disponíveis, como o **Wyko TOPO 2D[®]** (perfil) e **TOPO 3D[®]** (área).

A vantagem óbvia de um perfilômetro ótico é que sendo este sem contato, não pode danificar a superfície. Outra vantagem é que todos os perfilômetros disponíveis comercialmente são amigáveis ao usuário, medidas podem ser tomadas facilmente e rapidamente, e a redução dos dados é rápida.

As principais desvantagens dos perfilômetros óticos são: (a) suas resoluções laterais são limitadas pelas propriedades dos sistemas óticos e

pelos feixes de luz que iluminam as superfícies, (b) desde que são sensíveis à fase da luz refletida da superfície, eles não podem distinguir entre mudanças na topografia e mudanças nas constantes óticas sobre a superfície e (c) a altura máxima de degrau que pode ser medida é menor do que a metade do comprimento de onda incidente. A resolução lateral de 1-2 μm não é suficiente para apurar riscos finos e detalhes de superfície finos. Como conseqüência, valores de rugosidade obtidos pelo uso de perfilômetros óticos tendem a ser muito menores do que aqueles medidos com instrumentos do tipo sonda de contato, sobre as mesmas superfícies.

1.2.3.3 Sondas de varredura microscópica

Técnicas de rastreamento para a caracterização de superfícies em escala nanométrica evoluíram rapidamente nos últimos dez anos. Sensores de rastreamento microscópico ("Scanning Probe microscopes", SPMs) constituem uma família de instrumentos de alta resolução vertical e horizontal que constroem uma imagem tridimensional (topográfica) da superfície através do rastreamento dela. O microscópio de força atômica, "AFM" (Atomic Force Microscope) e o microscópio de tunelamento, "STM" (Scanning Tunneling Microscope) são os tipos de instrumentos desta família mais investigados [BENNETT, 1992].

YOUNG, WARD e SCIRE apud CARPINETTI et al [1996], através do desenvolvimento do "topographiner", foram os primeiros a conseguir o levantamento topográfico de superfícies em escala nanométrica, através da utilização da relação de dependência entre corrente de tunelamento (entre a ponta de uma sonda e uma superfície condutora) e a distância de separação entre elas. A sonda é fixa em três transdutores de deslocamento piezoelétricos, que conferem à sonda possibilidade de deslocamento em

direções ortogonais x , y e z . A sonda é aproximada da superfície até que uma corrente de tunelamento entre a sonda e a superfície seja detectada (valores típicos são de 1nA de corrente e 100 mV de potencial). Conforme a sonda é movimentada sobre a superfície, nas direções x e y , pelos dois transdutores piezoelétricos, a variação da corrente de tunelamento (ou variação de potencial) é alimentada ao transdutor piezoelétrico que confere movimento à sonda na direção z de forma a anular a variação da corrente de tunelamento (e portanto manter constante a distância entre a sonda e superfície). As variações verticais da superfície são medidas pela curva de calibração (voltagem x deslocamento) do transdutor piezoelétrico.

Embora STMs possibilitem alta resolução vertical e horizontal (em torno de 0,1 nm horizontal e 0,02 nm vertical), impossíveis de serem conseguidas com perfilômetros mecânicos, a histerese e não-linearidade dos transdutores piezoelétricos são fatores limitantes do uso de STMs em aplicações metrológicas, onde a precisão de posicionamento é importante. Uma alternativa ao transdutor piezoelétrico investigada é o uso de um atuador linear de força eletromagnética .

PORTO et al. [1997] utilizaram análise microscópica para avaliar a morfologia e topografia de cavaco resultantes de liga Al-Mg torneadas com ferramenta de diamante para obtenção de espelhos.

STMs funcionam com superfícies condutoras e, portanto, para a medição de superfícies ópticas ou não condutoras, microscópios de força atômica, AFM, "Atomic Force Microscope", são empregados [**BINNING et al. ; CHETWYND & SMITH apud CARPINETTI et al, 1996**]. Similarmente ao STM, no AFM a sonda é aproximada a uma distância nanométrica da superfície e deslocada sobre ela ao longo de direções ortogonais, x e y . A sonda é fixa a uma viga engastada de espessura micrométrica. Devido às forças interatômicas (forças de Van der Waals e Lennard-Jones), a viga é fletida quando a sonda se aproxima da superfície. A deflexão da viga é monitorada, em geral, usando interferometria laser (ainda que outros métodos sejam possíveis de ser empregados). Conforme a sonda rastreia a superfície, as variações verticais da superfície provocam um aumento ou



diminuição das forças interatômicas, variações essas que são percebidas através da variação da deflexão da viga. A variação de deflexão da sonda faz com que um transdutor de movimento atue em sentido contrário ao movimento da sonda de forma a restabelecer a distância original entre a sonda e a superfície. As variações verticais da superfície são quantificadas pelos deslocamentos da sonda necessários para restabelecerem-se as condições iniciais de deflexão da viga e intensidade das forças intermoleculares.

Investigações nessa área têm resultado no desenvolvimento de instrumentos similares, como por exemplo o SCM, "Scanning Capacitance Microscope".

1.3 - ESPALHAMENTO DE LUZ EM SUPERFÍCIES ÓTICAS

1.3.1 Introdução

A presença de luz espalhada é um problema contínuo no projeto e performance de sistemas óticos. Este espalhamento está relacionado com a qualidade superficial dos componentes óticos fabricados. Muitos destes componentes são fabricados utilizando-se usinagem de ultraprecisão, onde obtém-se superfícies com ótimas características de textura, forma e refletividade. No torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante podem-se obter rugosidades superficiais da ordem de 3 a 10 nm.

O espalhamento de uma superfície pode resultar dos seguintes fatores (1) irregularidades tais como riscos, crateras, ou partículas que são grandes comparadas ao comprimento de onda da luz incidente, (2) irregularidades isoladas, cujo tamanho é comparável ou menor do que o comprimento de onda da luz incidente, (3) irregularidades que são pequenas em uma ou mais dimensões, mas que tem espaçamentos tão próximos, que não podem ser tratadas como centros espalhadores independentes. O efeito de cada centro está relacionado com aquele de suas vizinhanças; espalhamento de tal forma é chamado freqüentemente de "espalhamento por microirregularidades".

Métodos utilizados para cálculo de espalhamento ótico citados na literatura são: ótica geométrica, teoria escalar, teoria vetorial, teoria de Mie e métodos numéricos [ELSON, BENNETT & BENNETT, 1979].

Quando a rugosidade superficial é muito maior do que o comprimento de onda, a ótica geométrica pode ser aplicada se as dimensões exatas das características superficiais podem ser especificadas.

Espalhamento por partículas únicas, manipulado pela teoria Mie, é especialmente útil para calcular espalhamento de uma superfície coberta por partículas.

As aproximações numéricas dão forma exata, mas a convergência da solução pode ser fraca e não são aplicáveis a superfícies com rugosidades aleatórias.

1.3.2 Espalhamento Total Integrado

A teoria escalar de espalhamento (descrita nos Apêndices A-D) é utilizada para encontrar uma expressão para o espalhamento total integrado, que permite calcular a altura média das irregularidades superficiais a partir de medidas de TIS (“Total Integrated Scattering”).

A base da teoria escalar está no espalhamento de ondas eletromagnéticas, onde utiliza-se a integral de difração de Helmholtz-Kirchhoff para calcular espalhamento de superfícies correlacionadas às microirregularidades. Esta teoria não dá informação sobre a polarização da luz, mas pode ser aplicada em situações onde a rugosidade é muito menor ou muito maior do que o comprimento de onda da luz. Assume-se que o feixe incidente seja normal à superfície (que deve ser opaca ao comprimento de onda incidente). Ela é usada para prever o (TIS), isto é, o espalhamento em todas direções. Uma aplicação usada vastamente da teoria escalar foi a determinação da relação entre a rugosidade superficial e diminuição da refletancia especular de superfície rugosa [ELSON & BENNETT, 1979]

Esta teoria relaciona a refletancia especular R_e com a refletancia total R_0 (que inclui a refletancia difusa R_d) de uma superfície à rugosidade superficial rms δ e o comprimento de onda incidente λ :

$$\frac{R_e}{R_0} = e^{-(4\pi\delta \cos\theta_0/\lambda)^2} \quad (9)$$

onde θ_0 é o ângulo de incidência da luz sobre a superfície.

Para superfícies rugosas ($R_d > 1\%$), a taxa de refletancia especular em relação à refletancia total de uma superfície é calculada diretamente da Eq(9).

No entanto para superfícies muito lisas , onde $Re/Rd \approx 1$ (sendo melhor coletar e medir a luz espalhada do que a perda na refletancia especular) podemos usar :

$$TIS = \frac{R_d}{R_0} = \frac{(R_0 - R_s)}{R_0} = 1 - e^{-(4\pi\delta/\lambda)^2} \approx \left(\frac{4\pi\delta}{\lambda}\right)^2 \approx \frac{R_d}{R_s} \quad (10)$$

A dependência do TIS em relação ao comprimento de onda previsto na equação (10) foi verificado com experimento no alcance do comprimento de onda de 0.25 μ m no UV a 1.15 μ m próximo do infravermelho [BENNETT, 1978].

Da equação (10) resolvendo em δ obtemos:

$$\delta = (\lambda/4\pi)\sqrt{TIS} \quad (11)$$

Para um feixe laser de He-Ne ($\lambda = 0.6328$ mm), e rugosidade rms de até 100 angstroms o erro no valor desta rugosidade é de até 1%. Os comprimentos de onda espaciais (d) amostrados no TIS dependem do comprimento de onda da luz λ , do ângulo de incidência θ_0 e ângulo de coleta do instrumento, variando de acordo com a equação $\lambda = d (\sin\theta_0 \pm \sin\theta_d)$, sendo que o alcance do comprimento de onda espacial (d) amostrado no TIS é muito menor do que o medido por instrumento de perfilometria.

DAVIES [1964] trabalhando no espalhamento de ondas radar fez a suposição de que a distribuição das alturas de rugosidade (δ_{RMS}) da superfície deveria ter uma função Gaussiana, para ser válida. Posteriormente mostrou-se que esta suposição não é necessária, outras formas de distribuição são também válidas.

ELSON et al [1979] apresentou uma boa discussão sobre o uso da teoria escalar de espalhamento para prever e interpretar medidas de rugosidade superficial.

O método para obter a rugosidade superficial rms através da eq. (11) foi validado pela medida intercomparativa entre oito laboratórios em grupos

idênticos de 4 espécies tendo rugosidade na escala entre 20 e 117 angstroms rms [DETRIO & MINER, 1985].

1.3.2.1 Instrumentação para medida de TIS

A instrumentação para medir espalhamento TIS consiste de:

- uma fonte de luz, geralmente um laser He-Ne ($\lambda = 0.6328 \text{ mm}$);
- filtros para reduzir a intensidade da luz de maneira controlada;
- filtro para controlar o tamanho do feixe;
- dispositivo para coletar a luz espalhada;
- detetor, geralmente fotodiodo de silício, para medir a luz espalhada e luz refletida especularmente.
- eletrônica apropriada e equipamento de processamento de dados para medir o sinal detetor, calcular a intensidade de luz espalhada, e em alguns casos também calcular a rugosidade superficial

Duas montagens experimentais podem ser utilizadas para medidas de TIS. Na primeira montagem utiliza-se um hemisfério de Coblentz e incidência de luz normal à amostra [BENNETT, 1978]. A Figura 17 mostra a montagem experimental utilizando um feixe laser de He-Ne focalizado na amostra, sobre uma mesa acionada por um motor. Em frente à amostra está um espelho esférico com furo central (coletor da luz espalhada no hemisfério). O detetor 1 recebe a luz refletida especularmente, enquanto o detetor 2 recebe a luz espalhada no hemisfério que foi focalizada num ponto do espelho, durante a varredura na amostra feita pelo motor. Se o sistema não está automatizado (como neste caso), os dois detectores são ligados em um registrador XT ou XY, obtendo-se os dois espectros simultaneamente da mesma região da amostra, um de refletancia difusa e outro de refletancia especular. Os espectros podem

ser lidos numa mesa digitalizadora e com um programa simples de computador pode-se calcular diretamente δ_{rms} qualquer região da amostra onde for feita a medida [FERREIRA, 1994]. O valor da altura média das irregularidades só pode ser calculado dentro da validade da teoria escalar, pois esta teoria não considera os efeitos de polarização da luz incidente ou espalhada.

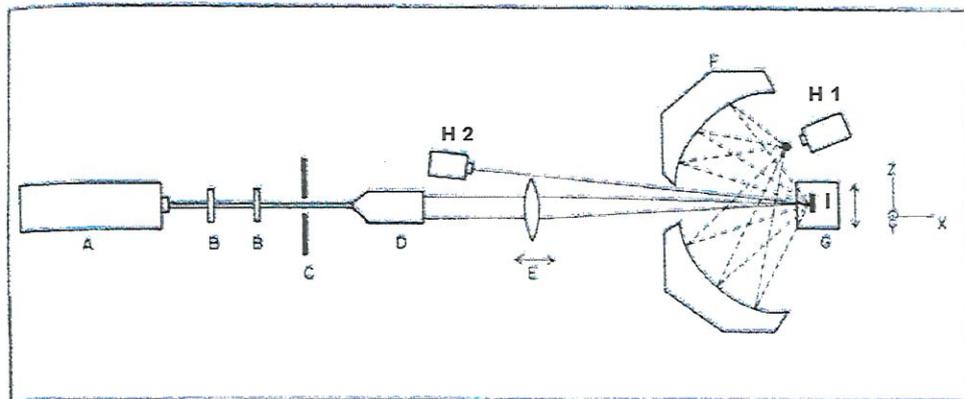


FIG. 17 – Medida experimental de refletancia especular e TIS através do hemisfério de Coblenz.

A. . laser He-Ne, B. filtros neutros, C. anteparo com furo central, D. expensor do feixe, E. lente focalizadora, F. espelho côncavo, G. mesa xy, H1 e H2 detectores, I. Peça (amostra)
[FERREIRA, 1994]

Uma outra forma de medida experimental de TIS pode ser feita utilizando-se de espectrofotômetro com esfera integradora. Com estes equipamentos pode-se fazer a varredura em comprimento de onda no intervalo de 280 nm a 3800 nm, estando o sistema conectado com um microcomputador de modo a gerar os espectros já em forma de arquivo de dados. Existem duas possibilidades para levantamentos dos espectros, sendo que em cada possibilidade o sistema deve ser calibrado com um padrão, fornecido pelo fabricante (refletor padrão – 100%). No primeiro tipo de medida (somente para refletancia difusa), a esfera deve ser calibrada substituindo a janela que reflete a luz especular por uma cavidade negra. Para o segundo tipo de medida (refletancia total + difusa), a esfera é calibrada com todo o seu interior branco (material utilizado como padrão 100%, fornecido pelo fabricante). Para certas

superfícies não condutoras, tanto para medidas de ARS como para TIS, as superfícies podem ser cobertas por fina camada de ouro (por evaporação) melhorando a condutividade e satisfazendo as condições da teoria escalar de espalhamento [FERREIRA, 1994].

O método TIS depende da medida de uma taxa de voltagem V dos detetores ($V_{\text{amostra, espalhada}} / V_{\text{amostra, especular+espalhada}}$) que elimine alguns erros sistemáticos não associados com a hipótese de uma resposta linear do detetor. **DETRO & MINER [1985]** atenuaram a intensidade do laser incidente de tal forma que o sinal produzido por uma amostra espalhadora de referência estivesse dentro da resposta linear. O sinal muito atenuado (fraco) da luz espalhada, produzido pela amostra desconhecida sob teste, é medido ajustando-se o ganho do amplificador, sendo que a linearidade do amplificador deve ser verificada independentemente.

Em alguns instrumentos a amostra deve ser removida manualmente para medir-se o TIS a diferentes lugares sobre a superfície, enquanto em outros [BENNETT, 1978] a amostra é movida por motores de passo. No último caso grande número de pontos de dados podem ser tomados para obter boa informação estatística sobre a rugosidade superficial ou para mapear a variação de rugosidade em função da posição sobre a superfície.

Rugosidades medidas por TIS e técnicas de perfilometria tem boa correlação em superfícies selecionadas com rugosidades "rms" da ordem de 1 - 100 angstroms. Entretanto, em apalpadores cujos raios são menores do que 1 μm , os valores de rugosidade "rms" medidos no perfilometro tendem a ser muito altos porque estes medem microestruturas não analisadas pela luz visível [BENNETT & MATTSON, 1989].

1.3.3 Dependência angular do espalhamento

1.3.3.1 Introdução

A teoria vetorial de espalhamento é utilizada para calcular a distribuição angular da luz espalhada de superfícies óticas como função do comprimento de onda, das constantes óticas do material e da Função Densidade de Freqüências Espaciais.

Embora as medidas de TIS (“Total Integrated Scattering”) sejam relativamente simples e uma das técnicas mais comumente usadas para caracterizar rugosidade superficial; às vezes, torna-se necessário conhecer o espalhamento em um determinado ângulo ou intervalo angular.

Nesta seção analisaremos o espalhamento angular por microirregularidades, quando as corrugações superficiais tem alturas, em relação a um nível médio, muito menores que o comprimento de onda da luz incidente. Neste caso, entretanto, não existe uma simples relação como mostrado na seção anterior, para TIS, dentro da teoria escalar. A razão é que a distribuição angular do espalhamento não depende somente de δ_{rms} da superfície, mas também de sua separação lateral, medida convenientemente através da função autocorrelação dos pontos do perfil.

A teoria escalar pode dar informações para o espalhamento angular somente para ângulos próximos à direção especular. A teoria vetorial, no entanto, tem maior flexibilidade em predizer o espalhamento angular por considerar as propriedades de polarização da luz incidente e espalhada, como também em considerar as propriedades estatísticas das superfícies rugosas.

1.3.3.2 Espalhamento angular de uma rede senoidal

As superfícies com rugosidades aleatórias podem ser representadas da superposição bidimensional de componentes de fourier de redes senoidais com diferentes amplitudes, períodos e fases. O comportamento do espalhamento de uma rede individual tendo amplitude A , medida do nível médio da superfície, e espaçamento de rede d será relacionado à distribuição angular da luz espalhada por uma superfície microrugosa. Para luz incidindo na direção normal em relação a superfície o ângulo de difração α (espalhamento) é dado pela equação de rede:

$$\text{sen}\alpha = m (\lambda/d) \quad (12)$$

onde m é a ordem de interferência e λ o comprimento de onda. A intensidade I da luz difratada de ordem m é proporcional a: **[CHURCH E ZAVADA,1975]**

$$I \sim (A/\lambda)^{2|m|} \quad (13)$$

Para superfícies microrugosas temos $A/\lambda \ll 1$, de forma que apenas a primeira ordem de difração deve ser considerada. Da equação (12) observa-se que o *ângulo* dentro do qual a luz é difratada ou espalhada depende *apenas* do espaçamento lateral entre ranhuras. A *intensidade* de espalhamento, por sua vez, depende principalmente da profundidade da ranhura, o qual pode ser relacionada a rugosidade superficial rms δ .

Um gráfico da geometria para as equações (12) e (13) e relação entre d e α está ilustrado na figura 18 **[ELSON, BENNETT E BENNETT, 1979]**.

Uma outra relação entre comprimento de onda, ângulo de espalhamento e separação das irregularidades superficiais para feixe incidente normal à superfície é ilustrada na figura 19 **[BENNETT, 1978]**.

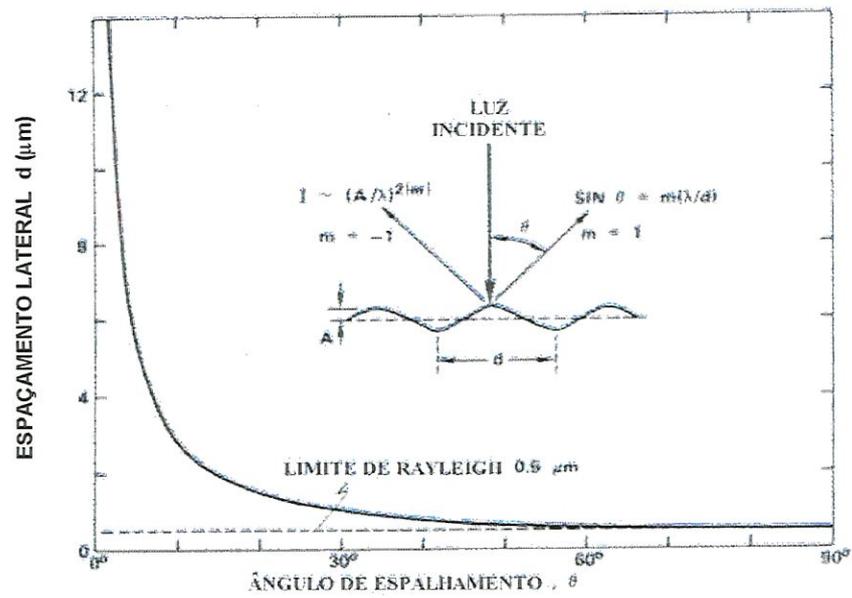


FIG. 18 Ângulo de espalhamento de um “espalhador” coerente com incidência normal como função da separação lateral da ranhura de rede usando luz de comprimento de onda de 5000 Å [BENNETT, 1978]

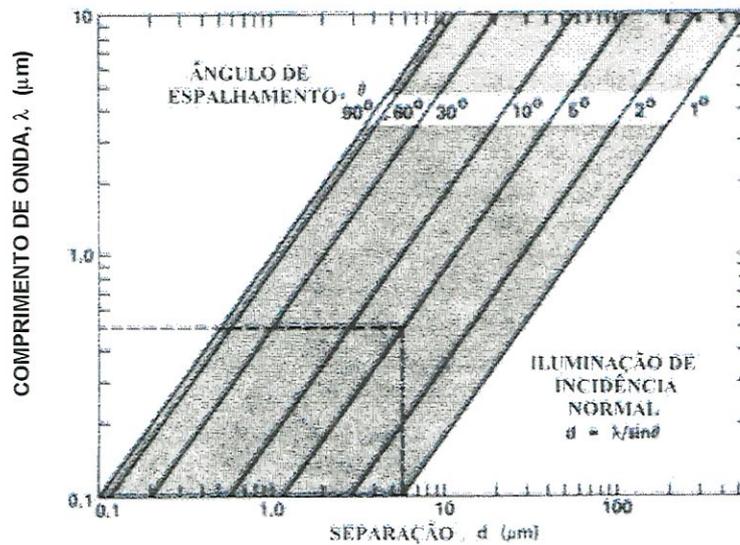


FIG.19 Nomograma que fornece a separação das características superficiais que produz espalhamento para um ângulo e comprimento de onda particular [ELSON et al, 1979]

Conclui-se que irregularidades com separações menores do que λ estão abaixo do “limite de Rayleigh” e farão com que luz seja difratada da superfície. Se elas estão acima do limite de Rayleigh, a quantidade de luz que será difratada destas é proporcional ao quadrado da taxa de suas alturas em relação ao comprimento de onda (eq. 13).

Se as superfícies são anisotrópicas, tais como aquelas torneadas com diamante, o espalhamento da luz depende da polarização do feixe incidente e da orientação das características superficiais. No caso unidimensional do espalhamento angular de uma rede senoidal com feixe incidente normal à superfície as expressões completas para intensidade difratada (ou espalhada) a um ângulo α são [CHURCH & ZAVADA, 1975]:

$$I_p / R_o = (2\pi A/\lambda)^2 \sec\alpha \quad (14)$$

$$I_s / R_o = (2\pi A/\lambda)^2 \cos\alpha \quad (15)$$

onde p refere-se ao feixe que é polarizado paralela ao plano de difração (perpendicular às ranhuras da rede) e s refere-se feixe polarizado perpendicularmente ao plano de difração (paralelo às ranhuras da rede).

As equações (14) e (15) dão a *intensidade* da luz difratada de primeira ordem em *ângulos* especificados pela equação de rede (13), tal que estes ângulos α apresentam-se apenas em “ângulos específicos”. Quando o espaçamento da ranhura d aproxima-se do comprimento de onda λ (α aproxima-se de 90°), as intensidades dos componentes p e s difratados são muito diferentes devido aos termos $\sec\alpha$ e $\cos\alpha$, e dependem fortemente do valor de d bem como do valor de A . Entretanto, se a luz incidente não está polarizada, este efeito é desprezível exceto para espaçamentos de redes que são quase idênticos ao comprimento de onda. Os efeitos de difração são particularmente importantes para superfícies torneadas com diamante, o qual

exibem ranhuras paralelas rasas cortadas pela ponta do diamante [ELSON et al, 1979].

1.3.3.3 Espalhamento angular de superfícies não senoidais

Uma superfície com rugosidades aleatórias pode ser composta pela superposição de componentes de Fourier senoidais tendo diferentes amplitudes, períodos e fases. O espalhamento devido à superposição de componentes de Fourier é uma distribuição de picos positivos e negativos de difração de primeira ordem produzidos por cada componente senoidal da corrugação superficial. Cada componente pode produzir mudanças no vetor de onda paralelo à superfície.

Superfícies com perfis não senoidais podem ser divididas em dois grupos: as que tem irregularidades periódicas e as aleatórias (Apêndices A e B). Qualquer perfil superficial $z(\mathbf{r})$ pode ser considerado como a superposição de Fourier de perfis senoidais na forma:

$$z(\mathbf{r}) = \int d^2k Z(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \quad (16)$$

A quantidade $\mathbf{r} = (x,y)$ é o vetor posição de um ponto no plano (x,y) para o qual a altura é medida. Como a superfície é analisada em duas dimensões, $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$ é o vetor de onda da componente de Fourier cuja amplitude é $Z(\mathbf{k})$. A equação (12) pode representar uma rugosidade aleatória ou periódica. Se $z(\mathbf{r})$ se refere a uma rugosidade aleatória (periódica), então $Z(\mathbf{k})$ é geralmente uma função contínua (discreta) de \mathbf{k} . A luz incidente em uma superfície tendo um perfil não senoidal será espalhada como uma soma de espalhamento de componentes senoidais deste perfil. Assim, espalhamentos em superfícies com corrugações periódicas serão dados em direções discretas, enquanto espalhamentos devidos a corrugações aleatórias serão distribuídos continuamente em ângulo, porque a distribuição de componentes superficiais senoidais é contínua. Para se incluir a distribuição senoidal nas fórmulas de

espalhamento, deverão ser consideradas as equações obtidas a partir da teoria de perturbação de primeira ordem.

1.3.3.4 Teoria de espalhamento angular para superfícies polidas

O espalhamento angular é convenientemente expresso como uma fração diferencial dP da intensidade incidente espalhada por unidade de ângulo sólido $d\Omega$, em uma dada direção que é função do ângulo polar θ e do ângulo azimutal ϕ . Outra forma frequentemente usada para expressar o espalhamento é a função de distribuição de refletancia bidirecional (“bidirectional reflectance distribution function” BRDF), a qual é igual a $dP/d\Omega$ dividido por $\cos\theta$. Para incidência normal e luz espalhada próxima à direção especular, os valores de BRDF são próximos aos valores de espalhamento angular $dP/d\Omega$.

Superfícies polidas cujas rugosidades rms δ são muito menores do que o comprimento de onda λ e redes cujas amplitudes são pequenas comparadas ao λ são idealmente apropriadas para cálculos de espalhamento usando a teoria de perturbação de primeira ordem. A literatura tem tratado o problema de espalhamento por superfícies rugosas no caso $\delta \ll \lambda$ incluindo as propriedades vetoriais da luz espalhada. A fração diferencial dP da energia incidente espalhada por unidade de ângulo sólido $d\Omega$ pode ser escrita como [ELSON et al , 1979]

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{(\omega/c)^4}{\pi^2} \cos\theta_0 \cos^2\theta_s |1-\varepsilon|^2 \frac{|Z(\bar{k}-\bar{k}_0)|^2}{L^2} \left[\frac{|\chi_\theta|^2}{|\nu-iq\varepsilon|^2} + \frac{|\chi_\phi|^2}{|\nu-iq|^2} \right] \quad (17)$$

onde

$$\chi_\theta = \frac{(\nu\nu_0 \cos\phi + kk_0\varepsilon)\cos\phi'}{\nu_0 - iq_0\varepsilon} - \frac{i(\omega/c)\nu \sin\phi \sin\phi'}{\nu_0 - iq_0} \quad (18a)$$

e

$$\chi_{\phi} = \frac{\omega}{c} \left[\frac{(\omega/c) \cos \phi \sin \phi'}{v_0 - iq_0} - \frac{iv_0 \sin \phi \cos \phi'}{v_0 - iq_0 \varepsilon} \right] \quad (18b)$$

A luz é espalhada em uma direção especificada por (θ_s, ϕ) . Aqui ϕ é o ângulo de espalhamento “azimutal” e ϕ' é o ângulo do vetor campo elétrico incidente (Figura 20).

A expressão (17) pode ser aplicada ao espalhamento de superfícies com rugosidades aleatórias ou à difração de redes de baixa eficiência.

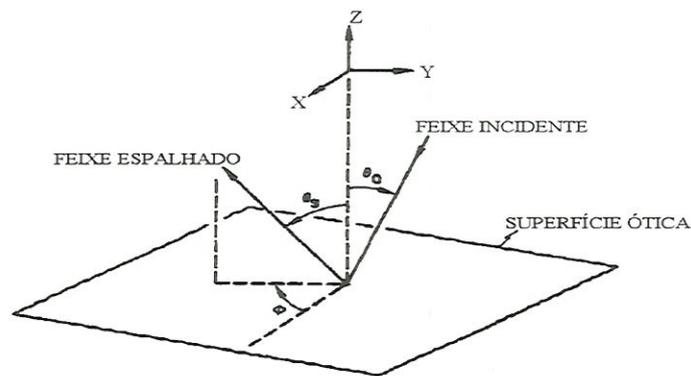


FIG. 20 - Diagrama esquemático mostrando a notação para fórmulas ARS. A luz é incidente a um ângulo θ_0 ; os ângulos de espalhamento polar e azimutal são θ_s e ϕ , respectivamente

As componentes do vetor de onda paralelas ou perpendiculares à superfície média são :

Luz	Vetor de onda	Componente paralela	Componente perpendicular	Equação
Incidente	\mathbf{k}_0	$k_0 = (\omega/c) \sin \theta_0$	$[q_0 = (\omega/c) \cos \theta_0]$	(19)
espalhada	\mathbf{k}	$k = (\omega/c) \sin \theta_s$	$[q = (\omega/c) \cos \theta_s]$	(20)

Assim também,

$$v_0 = \left[k_0^2 - \varepsilon \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{e} \quad v = \left[k^2 - \varepsilon \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (21)$$

onde ε é a constante dielétrica complexa do meio de espalhamento (material) para a frequência angular ω . A quantidade $Z(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0)$ é a transformada de Fourier do perfil superficial.

Usando a condição de incidência normal ($\theta_0=0$, $\text{sen}\theta_0=0$ e $\text{cos}\theta_0=1$) e espalhamento só no plano de incidência ($\phi=0$, $\text{sen}\phi=0$ e $\text{cos}\phi=1$), substituindo nas equações (17),(18a),(18b),(19),(20),(21) acima

$$\chi_\theta = \frac{v v_0 \cos \phi'}{v_0 - i q_0 \varepsilon} \quad (22a)$$

$$\chi_\phi = \frac{i(2\pi / \lambda)^2 \text{sen} \phi'}{v_0 - i q_0} \quad (22b)$$

O primeiro termo ($|\chi_\theta|^2 / |v - i q_0 \varepsilon|^2$) e o segundo termo ($|\chi_\phi|^2 / |v - i q_0|^2$) entre colchetes na equação (17) se referem à luz polarizada paralela e perpendicular ao plano de incidência, respectivamente. Analogamente, os primeiros e o segundos das equações (18a) e (18b) se referem à componente da luz incidente com polarização paralela ou perpendicular ao plano de incidência, respectivamente. Para essas duas polarizações tem-se as componentes \mathbf{p} e \mathbf{s} respectivamente. Assim, para a polarização \mathbf{p} $\phi'=0$ e para polarização \mathbf{s} $\phi'=\pi/2$, o que resulta nas seguintes equações, considerando incidência normal e espalhamento somente no plano de incidência.

Para a polarização \mathbf{p} , pode-se calcular

$$ARS = \frac{dP^{(P)}}{d\omega} = \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \cos^2 \theta_s |1 - \varepsilon|^2 \left[\frac{|\chi_\theta|}{|v - iq\varepsilon|^2} \right] g(\vec{k} - \vec{k}_0) \quad (23a)$$

onde $g(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0)$ é a função densidade de frequências espaciais (PSD "Power spectrum density"), que representa o quadrado da transformada de Fourier ou a transformada de Fourier da função autocovariância. O valor de χ_θ é

$$\chi_\theta = \frac{-(2\pi/\lambda)[\text{sen}^2 \theta_s - \varepsilon]^{1/2}}{(1 - i\varepsilon^{1/2})}$$

e para polarização \mathbf{s} ,

$$ARS = \frac{dP^{(s)}}{d\omega} = \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \cos^2 \theta_s |1 - \varepsilon|^2 \left[\frac{|\chi_\phi|}{|v - iq|^2} \right] g(\vec{k} - \vec{k}_0) \quad (23a)$$

com

$$\chi_\phi = \frac{-i(2\pi/\lambda)}{\varepsilon^{1/2} + i}$$

Sendo que para a luz não polarizada é válida a relação

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{1}{2} \left(\frac{dP^{(P)}}{d\Omega} + \frac{dP^{(s)}}{d\Omega} \right) \quad (24)$$

Portanto, pode-se concluir que utilizando as equações acima, a partir de uma medida de ARS obtem-se a função $g(\mathbf{k})$ ou $g(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0)$ que é a função da

superfície, chamada densidade de frequências espaciais (PSD – “Power spectrum density”).

A distribuição angular da luz espalhada pode ser expressa então como produto de um fator ótico e um fator de superfície. Como o nome infere, o fator ótico consiste de quantidades que podem ser calculadas do comprimento de onda, ângulos de incidência e espalhamento, propriedades do material, e polarização dos feixes incidente e espalhado (Fig.21). O fator de superfície, de outro modo, é uma função apenas da rugosidade de superfície. Ele é realmente o quadrado da magnitude da transformada de Fourier do perfil superficial (Fig.22). Na figura 21 é mostrado que tanto a rugosidade superficial (alturas) como os comprimentos de onda espaciais (separação das características de superfície) contribuem para o espalhamento. A rugosidade superficial determina a magnitude, e os comprimentos de onda espaciais determinam os ângulos de espalhamento e a forma da função autocovariância. A função densidade-espectral-de-potência (o fator de superfície na figura 21) pode ser derivada igualmente diretamente do perfil de superfície via quadrado da transformada de Fourier ou por meio da função autocovariância (Figura 22). Se a distribuição angular da luz espalhada é medida, a função densidade-espectral-de-potência pode ser facilmente determinada, bem como a função autocovariância. Entretanto, o perfil de superfície não pode ser obtido porque a informação de fase das características superficiais é perdida. A rugosidade “rms” é a raiz quadrada do termo zero da função autocovariância. Alternativamente, esta rugosidade pode ser obtida da integração dos valores de ARS medidos em todos os ângulos, produzindo o TIS e então usar $\delta = \lambda / 4\pi \sqrt{\text{TIS}}$ para calcular δ [BENNETT & MATTSSON, 1989]

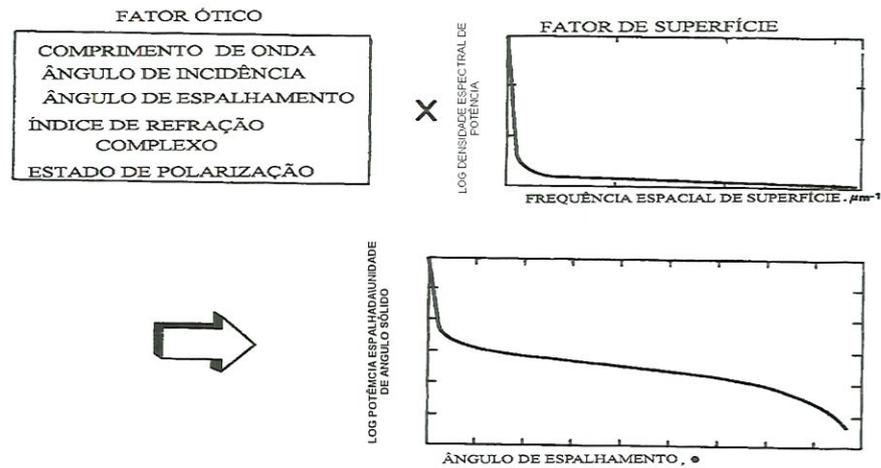


Fig. 21- Conceitos e parâmetros fundamentais do ARS [BENNETT & MATTSSON, 1989]

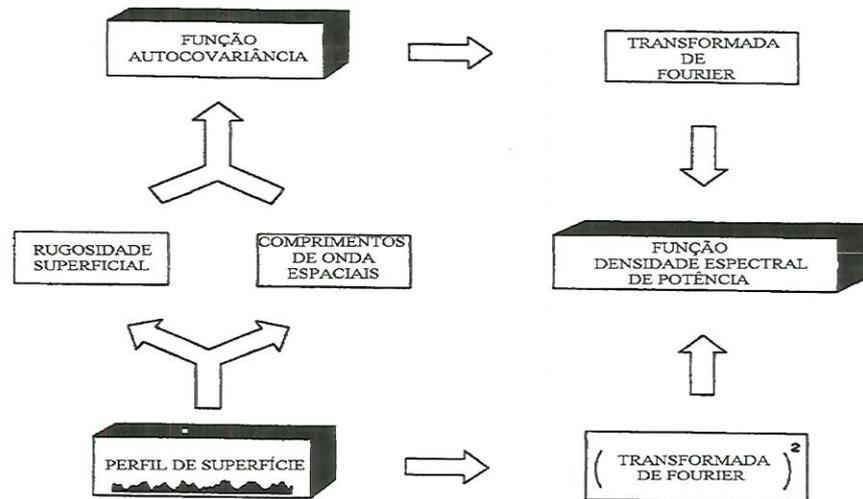


Fig.22- Relação entre os diferentes parâmetros fundamentais do ARS [BENNETT & MATTSSON, 1989]

A teoria ARS de CHURCH , equivalente a aquela dada na equação (17) por ELSON, foi testada extensivamente para o comprimento de onda laser He-Ne de 0.6328 nm. O autor trabalhou a diferentes ângulos de incidência sobre o mesmo "spot" na superfície de uma amostra torneada com diamante e de uma amostra isotrópica. As funções PSD foram calculadas em todos os casos e estavam dentro do erro de medida. A excelente repetibilidade indica que a

dependência angular do espalhamento na teoria é correta e que o instrumento de medida de espalhamento é estável [**CHURCH & ZAVADA, 1975**].

STOVER et al , [1984] revê algumas técnicas analíticas e apresenta evidências experimentais que suportam descrições publicadas anteriormente por **CHURCH & ZAVADA, [1975]** da relação entre rugosidade superficial e espalhamento de luz.

1.3.3.5 Medidas experimentais do espalhamento angularmente resolvido

O espalhamento angularmente resolvido (ARS-“Angle Resolved Scattering”) pode ser medido usando um instrumento similar ao mostrado na Figura 23. O feixe laser de laser He-Ne ($\lambda = 632.8$ nm, $P = 5$ mW, por exemplo) passa por um “chopper” (EGG-PAR) e pode ser focalizado na amostra por uma lente convergente. Filtro espacial e filtros para reduzir a intensidade da luz também podem ser usados. Tanto a amostra como o feixe incidente são fixos, enquanto que o detetor está localizado sobre um braço que pode girar livremente. A amostra tem um fixador com diversos graus de liberdade. O braço telescópico é acionado por um motor de passo controlado por microcomputador, que monitora também um amplificador “lock-in”, que recebe o sinal da luz espalhada através de um detetor de fotodiodo, linear de alta sensibilidade. A cada passo, o sinal é registrado na tela de forma gráfica e armazenado em um arquivo de dados. Antes da entrada no “lock-in”, encontra-se acoplado ao sistema de detecção um amplificador operacional que cria um terra virtual, mantendo a ddp (diferença de potencial) do diodo muito pequena, o que mantém a linearidade do detector e, para o aumento da sensibilidade basta simplesmente aumentar a resistência, mesmo para amostras de baixa refletividade.

Quando se opera em luz ambiente, um chopper deve ser usado para manter a luz errática (“stray”) de outras fontes desviada da amostra sob medida.

Deve-se assegurar que a luz espalhada produzida pelas bordas das lâminas do chopper não interfiram com as medidas.

Um polarizador deve ser usado, já que a expressão teórica relacionando espalhamento angularmente resolvido à rugosidade "rms" inclui o estado de polarização do feixe de luz incidente. É preferível que a luz seja polarizada e plana, de forma paralela (p) ou perpendicular (s) ao plano de incidência se ângulos de incidência maior do que aproximadamente 10° são usados.

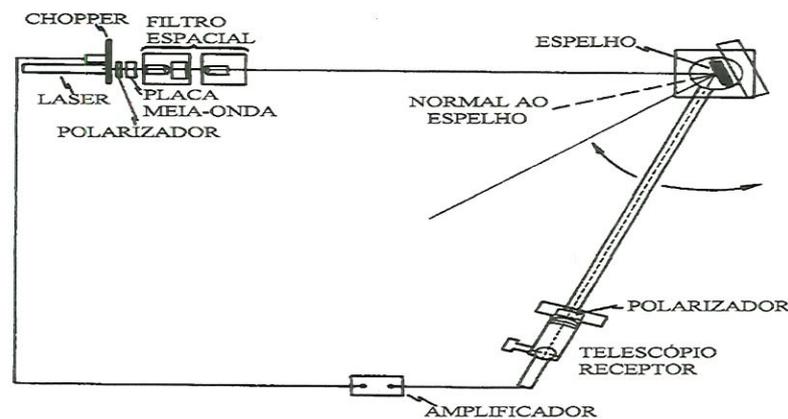


Fig. 23 - Instrumento para a medida de ARS

CHANDLEY [1976] publicou dados onde a rugosidade superficial rms calculada através do ARS compara-se com rugosidade medidas através de perfilometria e corrigidas para incluir os mesmos comprimentos de onda espaciais.

Muitas das pessoas que tem medido ARS estão interessadas na obtenção de estatísticas de superfície tais como rugosidade rms, função autocovariância, ou função densidade espectral de potência [**CHANDLEY, 1976**], [**CHURCH et al, 1977**] ou comparando teoria com experimento.

STOVER et al [1984] trabalhando com uma amostra torneada com diamante, mostrou como a rugosidade calculada através dados de ARS dependia dos comprimentos de onda espaciais da superfície incluídos na medida.

STOUT et al [1985] , **BRODMANN et al [1985]** construíram instrumentos para caracterizar superfícies de engenharia em termos de seus espalhamentos. Estes não medem estritamente TIS ou ARS e sim uma combinação de refletância especular e espalhamento “aproximadamente angular”. Um dos instrumentos compara a distribuição de espalhamento “aproximadamente angular” com aquela produzida por certos tipos de superfícies padrão cujas distribuições de luz e perfis foram medidos **[BRODMANN et al, 1985]**. Estes instrumentos são projetados na maior parte para medir superfícies usinadas. Eles trabalham na faixa de rugosidade de 50 angstroms a 2 μm (R_a) **[BRODMANN et al, 1985]** enquanto outros medem na região de 600 angstroms a 10 μm (R_a).

BENNETT [1985] fez medidas de espalhamento angularmente resolvido (ARS) (para o qual foi montado um sistema óptico automatizado). Todas as medidas foram comparadas com microscopia eletrônica de varredura. Para o estudo das irregularidades superficiais foi também utilizado um perfilômetro.

VALLIANT & BENNETT, [1997] desenvolveram um instrumento, voltado para o ambiente de produção, que usa espalhamento de luz laser com incidência não normal para medir rugosidade de superfícies usinadas. Este instrumento é do tipo sem contato , com tempo de resposta rápido (10 amostras/segundo) e tem correção automática da amostra, sendo organizado para medir rugosidades R_a na escala de 0.005 μm – 0.5 μm .

Capítulo 2

Detectores Opto-eletrônicos

Para medir sinais ópticos é necessário transduzí-los para sinais elétricos através de sensores opto-eletrônicos. As principais características a se considerar são a sensibilidade espectral, o ganho interno e o tempo de resposta. Os dispositivos mais comumente utilizados em sistemas de fotometria são os de estado sólido (fotodiodos) e as válvulas fotomultiplicadoras (PMT - photo multiplier tube), discutidos a seguir.

2.1 Fotodiodos

São dispositivos semicondutores que realizam a transdução fotoeletrônica e apresentam menor sensibilidade que as válvulas fotomultiplicadoras. São baseados na formação de pares elétrons-lacunas proporcionais à incidência de fótons na região sensível à energia radiante. Cada um desses portadores de carga elétrica deslocam-se para o terminal de carga oposta resultando num fluxo de corrente se existir um caminho elétrico para isto. Podem ser utilizados em casos de detecção para maiores intensidades de radiação.

Para a escolha do fotodiodo, considera-se principalmente: a) A capacitância de junção formada nas junção P-N, principal fator na determinação da velocidade de resposta do diodo. Deve ser a menor possível para que se tenha tempos de transição menores possibilitando sua utilização em análise de sinais na faixa de microsegundos; b) A área ativa que se relaciona com a sensibilidade. Uma área maior significa um ganho maior, e em contrapartida, aumenta a capacitância, portanto, diminui a velocidade de resposta do dispositivo; c) A resistência de junção.

O fotodiodo pode ser utilizado no modo fotovoltaico apresentando corrente de saturação reversa igual a zero (menor nível de ruído) e, em contrapartida, maiores tempos de transição. Outra maneira de utilizá-lo é no modo fotocondutivo que apresenta respostas mais rápidas. A polarização reversa diminui a capacitância de transição mas, em contrapartida, diminui a relação sinal/ruído devido a existência da corrente de saturação reversa além da decorrente dos fótons incidentes no dispositivo.

2.2 Válvulas fotomultiplicadoras (PMTs)

Uma válvula fotomultiplicadora é composta, basicamente, de um catodo fotoemissivo, uma seqüência de dinodos internos para multiplicação eletrônica e um ânodo coletor de elétrons.

Os dinodos são mantidos a uma diferença de potencial que proporciona a aceleração de um elétron de um dinodo para o seu dinodo posterior. O primeiro dinodo (coberto por BeO, GaP ou CsSb) ao ser atingido por fotoelétrons, provenientes do catodo, emite elétrons que serão acelerados em direção ao segundo dinodo. A energia cinética é tal que ao se chocar com o próximo dinodo um elétron proporciona a liberação de vários outros elétrons. Isto permite uma grande multiplicação da corrente ao longo da válvula.

Os tempos de resposta para válvulas fotomultiplicadoras (0,5 ns para GaP e entre 1 e 2 ns para outros materiais) aliados ao ganho interno elevado (o que as tornam sensíveis a uma energia radiante incidente de um ou poucos fótons) caracterizam-nas como um detector de grande utilidade para sinais de baixa intensidade de radiação e curtos tempos de duração. Este é o caso da emissão de fosforescência (de intensidade pequena e duração da ordem de microsegundos a segundos)

Para se polarizar uma válvula fotomultiplicadora utiliza-se um divisor resistivo para fornecer as diferenças de potenciais desejadas entre os dinodos. A tensão entre o primeiro dinodo e o catodo é uma característica

fundamental e aconselha-se, neste ponto, o uso de um diodo zener com a tensão sugerida pelo fabricante da válvula. Outro cuidado a se tomar é que os dinodos se determinam quando sobreaquecidos, devendo-se limitar a corrente no ânodo para um valor abaixo do máximo recomendado pelo fabricante (e. g., para a válvula fotomultiplicadora **R-928 (HAMAMATSU)** a corrente máxima permitida para o ânodo é de 1 mA) Os resistores utilizados no divisor resistivo, em geral, devem possuir valores idênticos para proporcionar ganhos iguais entre os diversos dinodos evitando-se distorção do sinal.

2.3 Tratamentos e Captura do Sinal

Até este ponto, discutiram-se alguns dispositivos que podem ser utilizados para se obter um sinal elétrico (corrente) proporcional a energia radiante emitida. Faz-se necessário ainda o tratamento e processamento deste sinal.

2.3.1 Amplificador de transimpedância

Inicialmente deve-se transformar a corrente proveniente do sensor optoeletrônico em um nível de tensão, que pode ser feito com o amplificador de transimpedância.

O amplificador de transimpedância (conversor corrente - tensão) comporta-se de forma que a tensão de saída (V_s) é proporcional à corrente de entrada (I_e) tendo como constante de proporcionalidade o resistor de realimentação (R)

O capacitor (C) em paralelo com o resistor de realimentação é utilizado para proporcionar estabilidade do sinal, limitando assim a resposta em alta frequência mas eliminando os ruídos correspondentes.

2.3.2 Digitalização e captura do sinal

A digitalização deve ser feita através de um conversor analógico digital (conversor A/D). Este pode ser parte de um circuito dedicado, como seria o caso de uma placa conversora microprocessada para realizar também a manipulação dos dados obtidos e apresentar os resultados desejados, ou então pode-se utilizar um conversor em um instrumento de uso mais genérico.

Os osciloscópio digital é um desses instrumentos e pode ser utilizado em conjunto com um microcomputador padrão IBM PC conectados via interface padrão IEEE-488 (GPIB) para manipular os dados obtidos.

Uma outra alternativa é o uso placa conservadoras A/D que podem ser acopladas diretamente em um conector da placa mãe de um microcomputador realizando a comunicação de dados via barramento da placa. Esta última opção é mais veloz que diz respeito à comunicação de dados. Possui, em contrapartida, um custo bastante elevado quando se deseja trabalhar com taxas de amostragens.

2.4 Controle do instrumento

Faz-se necessário ainda o uso de algum dispositivo que seja capaz de controlar o funcionamento do instrumento como um todo. Esse controle dependerá dos dispositivos utilizados no desenvolvimento do instrumento. Para o caso de se utilizar um osciloscópio como digitalizador do sinal pode-se optar por um controle via interface padrão GPIB gerenciado por um programa dedicado a este fim. Pode-se ainda desenvolver uma placa conectada ao microcomputador que forneça os sinais de sincronismo para o chopper e disparo do laser. Para o caso de se utilizar uma placa de conversão analógico digital pode-se obter, se a mesma possuir tal característica, um sinal de saída digital para gerar o sinal de sincronismo para disparo e digitalização do sinal.

2.5 Exemplificação de dispositivos de transdução optoeletrônica.

a) Válvula fotomultiplicadora (PMT)

Descrevemos como exemplo, uma válvula fotomultiplicadora do tipo janela lateral (side-on) R928 (HAMAMATSU Co., U.S.) com sensibilidade do cátodo de $352 \mu\text{A/lúmen}$, corrente de ânodo na ausência de energia radiante iniciante (dark current) de $4,5 \text{ nA}$, ambas para tensão cátodo-ânodo igual a 1000 V e distribuição de tensão conforme sugerido em catálogo do fabricante [HAMAMATSU, 1994] esta válvula apresenta um tempo de subida de $2,2 \text{ ns}$ e resposta espectral de 190 a 900 nm .

Como fonte de alta tensão para a polarização da válvula pode-se utilizar conversor DC-DC tipo C1309-04 (HAMAMATSU Co., U.S.A) com tensão de entrada 13 a 24 V (recomendado de 14 a 16 V) e corrente de 160 mA . A tensão de saída é regulada ($+0,05\%$ de regulação de carga e ripple de 100 mV p-p máximos) entre 190 e 1100 V . Para o instrumento descrito utilizam-se todos os dinodos e uma tensão máxima de polarização de -1000 V . Como a diferença de potencial entre o catodo e o primeiro dinodo é recomendada ser de aproximadamente 100 V , utiliza-se um dinodo zener entre este dois terminais da válvula fotomultiplicadora, conforme recomendação do fabricante. Restam, portanto, 900 V para serem divididas entre os 9 resistores necessário à polarização de todos os outros dinodos. Procura-se fazer todas a resistência série total desses 9 resistores ser próxima de $1,35 \text{ M}$, o que fornece um valor aproximado de 150 k .

b) Fotodiodo

Utiliza-se um fotodinodo para a verificação inicial do funcionamento da fonte óptica, enquanto não se dispõe de estrutura mecânica em alumínio para a válvula fotomultiplicadora. Os pulsos foram gerados utilizando-se o circuito apropriado e detectados utilizando-se primeiramente o circuito de modo fotocondutivo. Neste, a corrente no diodo (MRD-500 com tempo de

resposta de 1 ns para tensão reversa de 20V) decorrente da radiação iniciante é monitorada da forma de uma tensão sobre um resistor em série. Como esperado, a duração do pulso medido através de circuito é variável com a mudança do valor do resistor empregado, uma vez que altera o tempo de resposta do fotodetector, pois este é função da constante R.C, onde R é a resistência do circuito e C é a capacitância intrínseca do fotodiodo (4 pF). Para valores recomendados de $R \sim 50$ o pulso possui duração aproximada de 1 us.

Posteriormente utiliza-se o fotodiodo junto a um amplificador de transimpedância para converter a corrente que flui pelo fotodiodo em uma tensão. Ambas medições do sinal de tensão são realizadas com o osciloscópio digital.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

O objetivo deste trabalho é observar a relação entre rugosidade superficial e refletividade de uma liga de alumínio torneada com ferramenta de diamante de ponta única. Esta refletividade é analisada em função da distribuição do espalhamento luminoso.

Os procedimentos para a realização dos ensaios foram:

- Usinagem dos materiais através de torno de precisão com ferramenta de diamante.
- Avaliação de textura superficial (rugosidade) com Form Talysurf.
- Avaliação de espalhamento luminoso utilizando sensor CCD acoplado à camera.

3.1 PROCEDIMENTO DE USINAGEM DOS MATERIAIS

As peças com 20,0 mm de diâmetro, ligas de alumínio, foram usinadas em operação de faceamento de modo a obter uma superfície espelhada. A máquina CNC geradora de superfícies anesféricas utilizada nos ensaios é torno de ultraprecisão RANK PNEUMO TAYLOR ASG 2500 (fig 24).

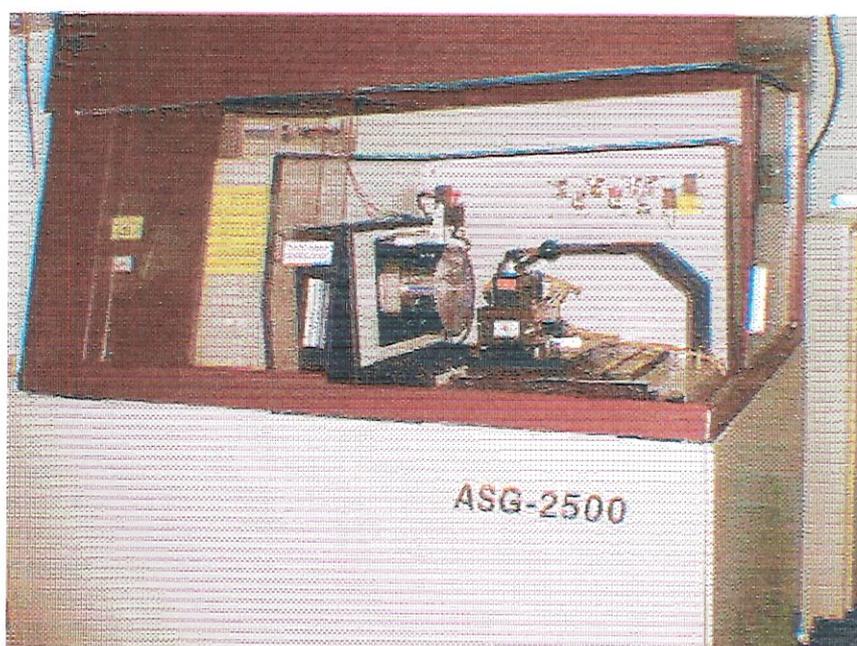


FIG. 24 - Torno de ultraprecisão ASG 2500 (RANK PNEUMO)

As características do eixo-árvore, guias e controle desta máquina estão listadas a seguir:

Eixo-árvore

- mancais aerostáticos radiais e axiais
- faixa de rotação: 100-2400 rpm
- Batida axial: 0,1 micrometro T.I.R ou menor

- Batida radial: 0,1 micrometro T.I.R ou menor
- Rigidez axial: $14,1 \cdot 10^7$ N/m
- Rigidez radial: $8,7 \cdot 10^7$ N/m
- Acionamento: motor DC diretamente acoplado ao eixo-árvore
- Acionador: Servo motor DC com 0,9 HP de pico.

Guias lineares X e Z

- Tipo: guias hidrostáticas
- faixa de avanço: 0,25-762 mm/min.
- Retilneidade horizontal: x - 0,5 micrometro ou menor (curso completo)
z - 0,3 micrometro ou menor (curso completo)
- Comp. Transversal: x - 254 mm
z - 152 mm
- Rigidez horizontal: $17,5 \cdot 10^7$ N/m
- Rigidez Longitudinal: $3,00 \cdot 10^7$ N/m
- Acionador: Servo motor DC diretamente acoplado a um fuso de esfera pré-carregado, que por sua vez está acoplado ao "slide-carriage"

Controle e "feedback"

Tipo: CNC 8200 Allen-Bradley (Fig. 25) interfaceado com um transdutor interferométrico a laser HP 5518

Resolução: 10 nanometros

Características de compensação de temperatura, umidade e pressão barométrica através do laser



FIG. 25 – Controle CNC

3.1.1 ENSAIOS DE USINAGEM

No primeiro ensaio 16 peças foram usinadas num experimento 2^k fatorial, com as seguintes condições:

- a) 2 ferramentas de diamante com as seguintes características geométricas:
ferramenta 1 $\Rightarrow R_{p1} = 0,2995''$ ou 0,76 mm, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$.
ferramenta 2 $\Rightarrow R_{p2} = 0,5985''$ ou 1,52 mm, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$.
- b) 2 materiais com diferentes características mecânicas, principalmente quanto à resiliência : Al-2011 e Al-1050
- c) rotação do eixo-árvore de 1000 rpm
- d) 2 valores extremos para o avanço ($f_{\min.} = 5 \mu\text{m/rev.}$; $f_{\max.} = 30 \mu\text{m/rev.}$)
- e) 2 valores extremos para a profundidade de corte ($p_{\min.} = 3 \mu\text{m}$; $p_{\max.} = 30 \mu\text{m}$).

Para cada peça resultante de uma condição específica de usinagem, material e ferramenta foram analisados a seguir os parâmetros de rugosidade.

No ensaio n°. 2 as peças de ligas de alumínio Al-6061T6 e Al-Kobe foram usinadas com quatro ferramentas diferentes, com o intuito de obterem-se peças em graus diversos de acabamento superficial. Com isto, mantidas as condições de usinagem constantes, e utilizando-se ferramentas de geometria aproximadamente iguais, verificamos as diferenças no acabamento superficial devido a integridade da ferramenta.

As condições de usinagem neste ensaio são:

$n = 1000 \text{ rpm}$

$f = 5 \text{ } \mu\text{m/rev.}$

$p = 10 \text{ } \mu\text{m}$

temperatura ambiente $21^\circ \pm 0.1^\circ\text{C}$.

As peças foram usinadas com as seguintes ferramentas no torneamento de ultraprecisão: ferramenta de metal duro, ferramenta de diamante nacional, ferramenta de diamante importada. Estas ferramentas tinham aproximadamente o raio de ponta equivalente ao da ferramenta de diamante importada, que era $R_p = 1,527 \text{ mm}$. A peça de referência foi usinada em torno convencional para servir como ponto de referência.

Foram analisados rugosidade e distribuição de espalhamento para 4 diferentes peças para comparar o acabamento gerado pela ferramenta e a obtenção de superfície espelhada.

4.1 ANÁLISE DE TEXTURA SUPERFICIAL

A análise de topografia de superfície foi realizada por perfilômetro mecânico (tipo stylus) FORM TALYSURF, de resolução de 4nm, obtendo-se o perfil da superfície usinada e os parâmetros característicos de rugosidade (R_a , R_q , R_t , $Delq$, slope, R_v).

O FORM TALYSURF (Fig. 26) é operado através de um microcomputador, de maneira que todo o procedimento de medição pode ser controlado automaticamente, ou seja: posicionamento, pressão de contato, velocidade de medição, comprimento de medição, filtros, "cut-off".

O sensoriamento da posição vertical da agulha ao longo da superfície se faz através de um sistema interferométrico (tipo Michelson), o que garante a alta resolução e repetibilidade do instrumento.



FIG. 26 – Rugosímetro Talysurf (RANK TAYLOR ROBSON)

3.2 ANÁLISE DE ESPALHAMENTO LUMINOSO

O espalhamento luminoso ("light scattering") foi observado através de uma câmera CCD que contém uma série de fotodiodos de silício dispostos em matriz. Algumas características desta camera CCD (Fig. 27) são especificadas a seguir:

- 1) Número total de pixels: EIA (410.000 pixels) : 818 (H) x 513 (V)
CCIR(490.000 pixels) : 816 (H) x 606 (V)
Passo do pixel: EIA: 11.0 (H) x 13.0 (V) μm
CCIR: 11.0 (H) x 11.0 (V) μm
Número efetivo de pixels: EIA: 768 (H) x 493 (V)
CCIR: 756 (H) x 518 (V)

- 2) Área de imagem: 8.8 x 6.6 mm
- 3) Resolução horizontal: EIA 570 linhas de TV
CCIR: 560 linhas de TV
Resolução vertical: EIA: 485 linhas de TV
CCIR: 575 linhas de TV
- 4) Sensibilidade: 400 lux, f4, sob 3200 K de iluminação

- 5) Frequência de varredura
horizontal: EIA: 15.734 KHz
CCIR: 15.625 KHz
- 6) Frequência de varredura
vertical: EIA: 59.94 Hz
CCIR: 50 Hz

7) Sistema de varredura

de sincronismo interno: 2:1 interlace

Número de linhas horizontais EIA: 525 linhas de TV

CCIR: 625 linhas de TV

Equação para relação entre $f(v)$ e $f(H)$:

$$f(v) = 2f(H)/525 \quad (625 \text{ para CCIR})$$

8) Entrada de sincronismo externa

HD +/VD: 2 a 6 V_{p-p}

ou SYNC (VS e VBS

também aceitáveis): 0.3 (min 0.25) V_{p-p} , negativo

Impedância de entrada: 1k ohms

desvio de frequência: $\pm 1\%$

9) Iluminação mínima de objeto: 0.5 lux, f1.4 AGC e GAMMA on, sem filtro de corte IR

10) AGC

Ganho fixo ou AGC

Ajuste para ganho fixo(ads) à fabrica.

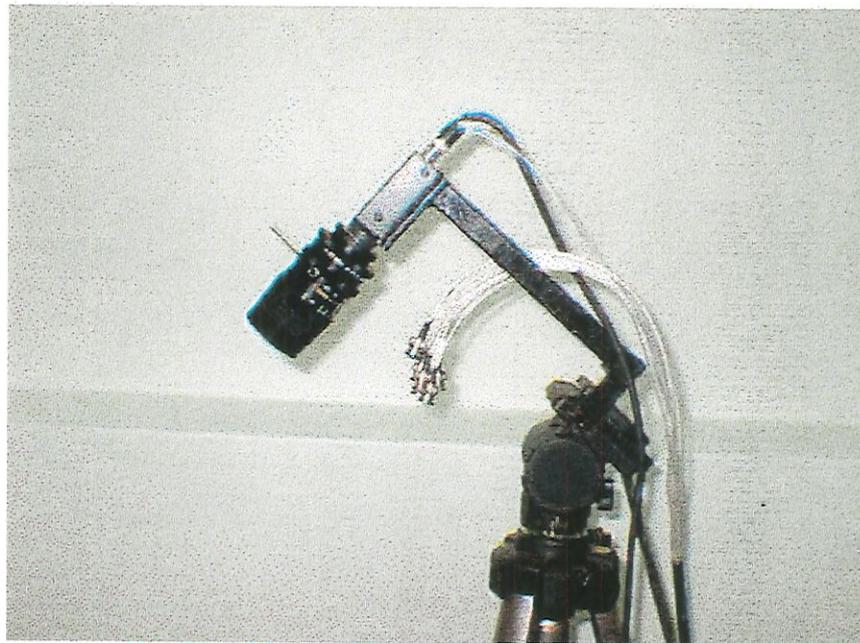


FIG. 27 – Câmera CCD (HITACHI DENSHI – KP-M1)

Uma fonte laser (Fig. 28) OPTO He-Ne ($\lambda=630$ nm) foi utilizada como luz incidente, fixando-se o ângulo de incidência em aproximadamente 45° . O feixe laser incidente sobre a peça é expandido por uma lente cilíndrica de forma que a projeção seja uma linha luminosa.

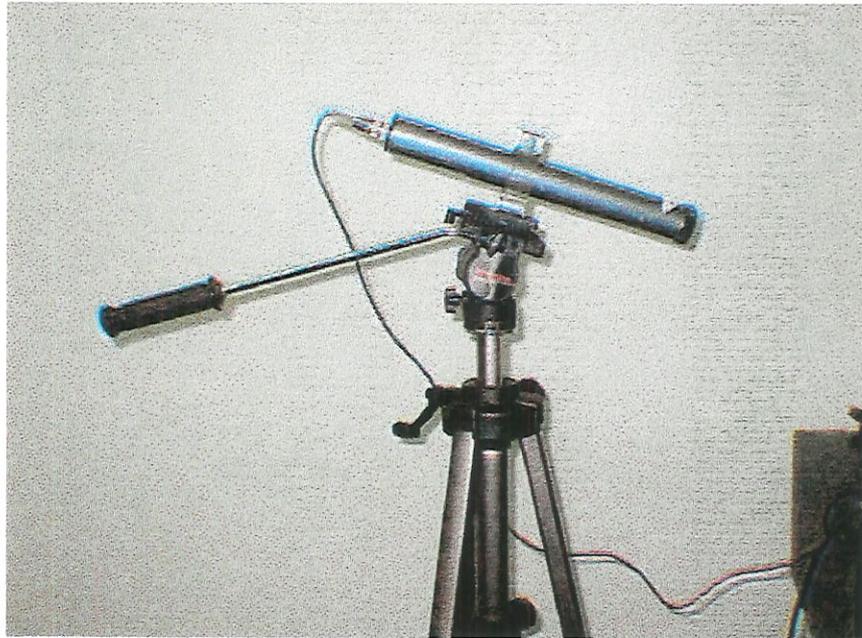


FIG. 28 Laser He-Ne (OPTO)

Para aquisição e análise de imagem, um microcomputador PC (Pentium 120 MHz) recebe sinal através da câmera CCD e faz o tratamento necessário através do software GLOBAL LAB image. Este software implementa uma série de ferramentas, tais como perfil, histograma, FFT. A imagem em preto e branco é digitalizada através de uma FRAME GRABBER (DT-3155). Cada ponto é armazenado pelo fotodiodo em termos de energia luminosa (E_v). Para registrar intensidade a placa digitalizadora utiliza níveis de tons de cinza ("grayscale"), variando de 0 para a cor negra e 255 para a cor branca. Conseqüentemente o gráfico de perfil será uma função de tons de cinza contra nós de pontos coletados (pixels).

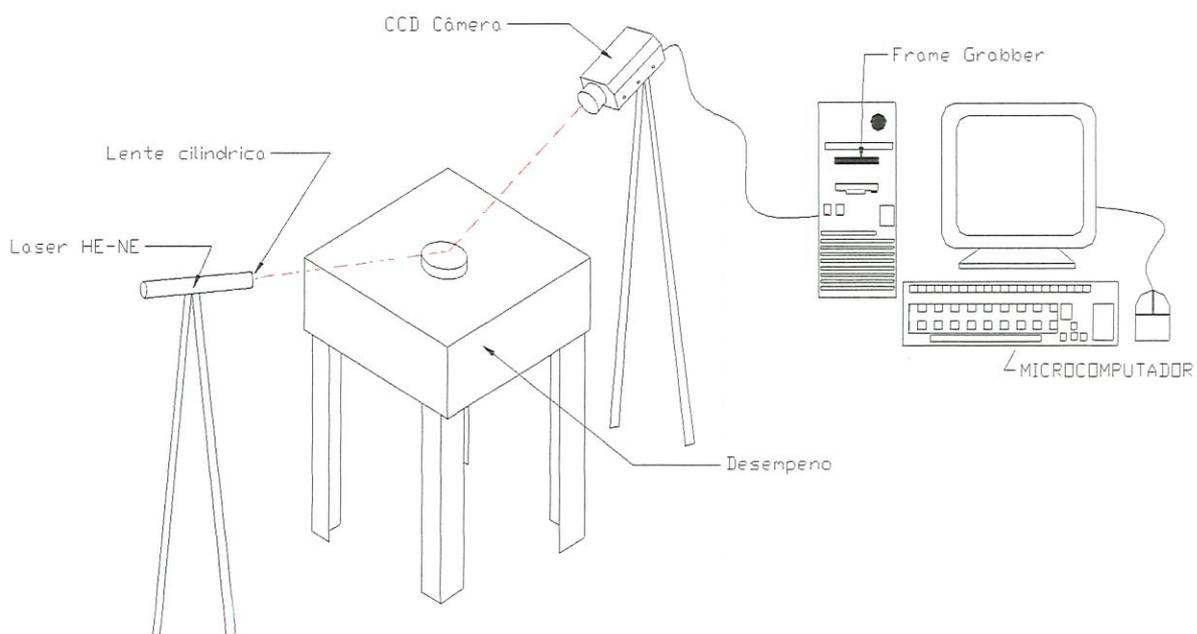


FIG. 29 - Representação esquemática da instrumentação para análise de espalhamento

Na figura 29 temos a representação esquemática da análise de espalhamento luminoso feita em nosso experimento, com instrumentação montada no Laboratório de Engenharia de Precisão (EESC/USP).

Existem diversas técnicas para análise de espalhamento ou reflexão difusa, tais como TIS, ARS, BRDF. Neste trabalho esta análise é feita para espalhamento total (englobando feixe refletido especularmente e feixe espalhado) e espalhamento parcial (despreza-se o feixe especular) através de uma direção. A distribuição de intensidade refletida em um único ponto é devida à irregularidades (rugosidades) presentes na superfície sob inspeção.

As condições gerais desta análise foram:

- Aquisição de imagem do feixe refletido diretamente da peça ou da projeção desta imagem num anteparo;
- Utilização ou não de filtros redutores de intensidade de luz (20% e 50%).
- Utilização ou não de filtro polarizador.
- Utilização ou não de lente cilíndrica.
- Utilização ou não de luz ambiente.

Capítulo 4

Análise de resultados

No primeiro experimento foram geradas 16 peças em torneamento de ultraprecisão, ilustrado na tabela 1, resultando na avaliação dos parâmetros de rugosidade: R_a , R_t , R_q , R_v , slope, Delq. A variação de três parâmetros (R_q , R_a e R_t) em função das condições de usinagem e raio de ponta da ferramenta são ilustrados graficamente através das figuras 30-35.

Diferenças no acabamento superficial neste experimento são resultantes de condições de usinagem, geometria da ferramenta e material da peça. Segundo a teoria os fatores de usinagem que mais influenciam no acabamento superficial de uma peça são o avanço da ferramenta e o raio de ponta desta ferramenta. Este acabamento medido na forma de rugosidade máxima teórica seria :

$R_{m\acute{a}x. (teor.)} \cong a^2 / 8R_p$, onde a é o avanço e R_p sendo o raio de ponta

Neste ensaio trabalhou-se também com 2 materiais de diferentes propriedades mecânicas (tenacidade e resiliência) para verificar as influências destas no acabamento superficial e conseqüentemente na refletividade.

No segundo ensaio (ilustrado através da tabela 2) foram usinadas 8 peças, sendo 4 feitas em liga de alumínio Al-6061T6 e 4 trabalhadas em liga de alumínio Kobe. As condições de usinagem permaneceram constantes, com rotação de 1000 rpm, avanço de $5\mu\text{m/rev.}$ e profundidade de $10\mu\text{m.}$ Utilizaram-se três ferramentas diferentes para usinagem de ultraprecisão: metal duro, diamante de fabricante nacional e diamante de fabricante estrangeiro.

TABELA – 1 Rugosidade superficial em usinagem de ultraprecisão (ensaio 1)

N (rpm)	Rp (mm)	Material	Pc (μm)	f ($\mu\text{m}/\text{rev}$)	Peça n.	Slope ($^{\circ}$)	Rq (μm)	Ra (μm)	Delq ($^{\circ}$)	Rv (μm)	Rt (μm)
1000	0,76	Al 2011	3	5	27	0.0529	0.0280	0.0168	2.0414	0.2898	0.4298
				30	11	0.0559	0.0591	0.0489	1.2794	0.1226	0.2905
			30	5	25	0.0312	0.0184	0.0129	1.3772	0.2165	0.3229
				30	28	0.0266	0.0506	0.0413	1.5529	0.2378	0.4100
		Al 1050	3	5	18	0.1187	0.0269	0.0184	1.4856	0.1722	0.3367
				30	17	-0.0523	0.0560	0.0450	1.8634	0.3917	0.5678
			30	5	05	-0.0658	0.0251	0.0164	1.8205	0.1287	0.3144
				30	07	0.1347	0.0575	0.0465	1.8233	0.4055	0.5733
	1,52	Al 2011	3	5	30	0.0562	0.0176	0.0128	1.0062	-	0.2751
				30	16	0.0547	0.0258	0.0195	1.3450	0.1071	0.2315
			30	5	31	-0.0846	0.0223	0.0161	1.2024	0.3067	0.3792
				30	26	0.1669	0.0293	0.0220	1.3234	0.0855	0.2116
		Al 1050	3	5	03	0.1407	0.0246	0.0165	1.9221	0.3951	0.4827
				30	04	0.0643	0.0327	0.0221	1.6063	0.4378	0.6040
			30	5	01	0.1362	0.0227	0.0170	1.7312	0.1111	0.2144
				30	06	0.1250	0.0366	0.0242	1.8753	0.5401	0.6602

Ângulos das ferramenta: $\gamma = 0^{\circ}$; $\alpha = 10^{\circ}$

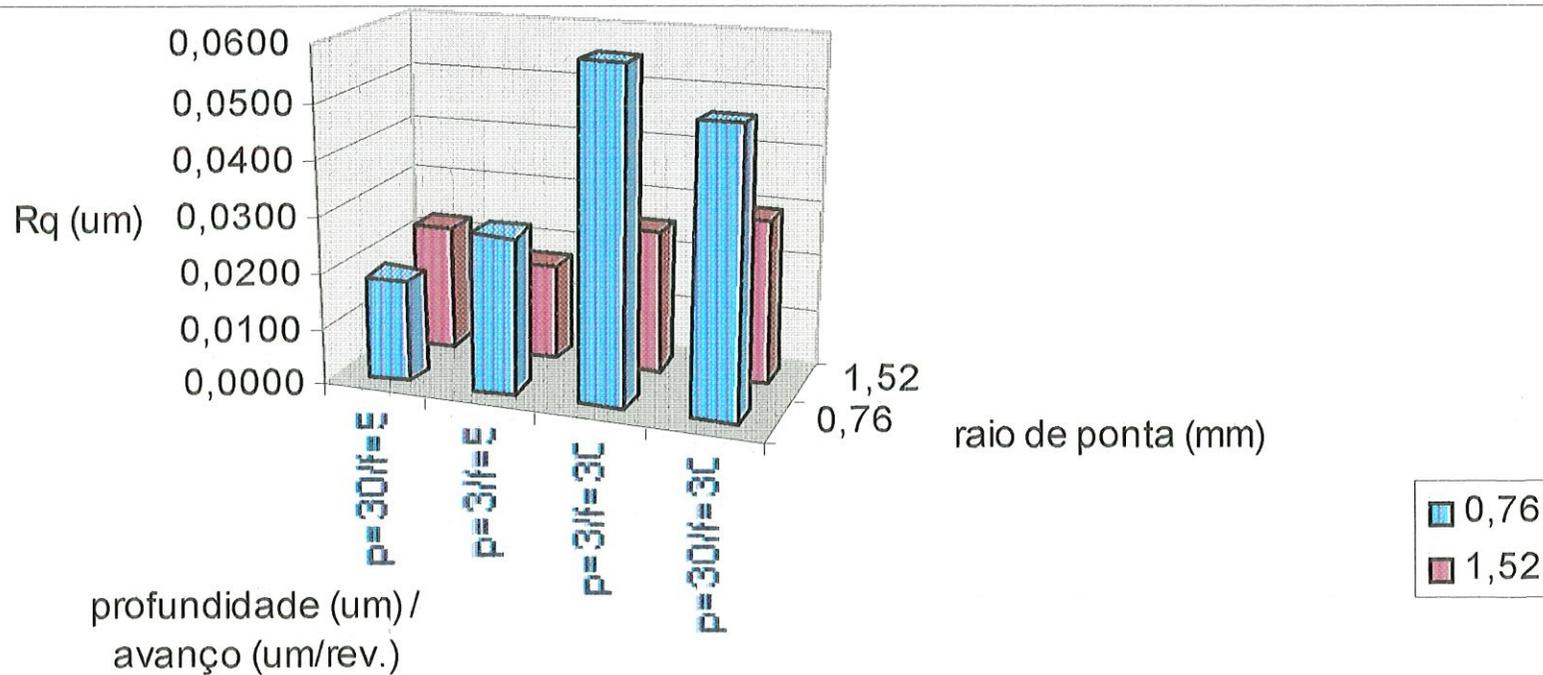


FIG 30 - Rugosidade R_q em superfície de Al-2011 em função dos parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta de um torneamento de ultraprecisão[tabela 1]

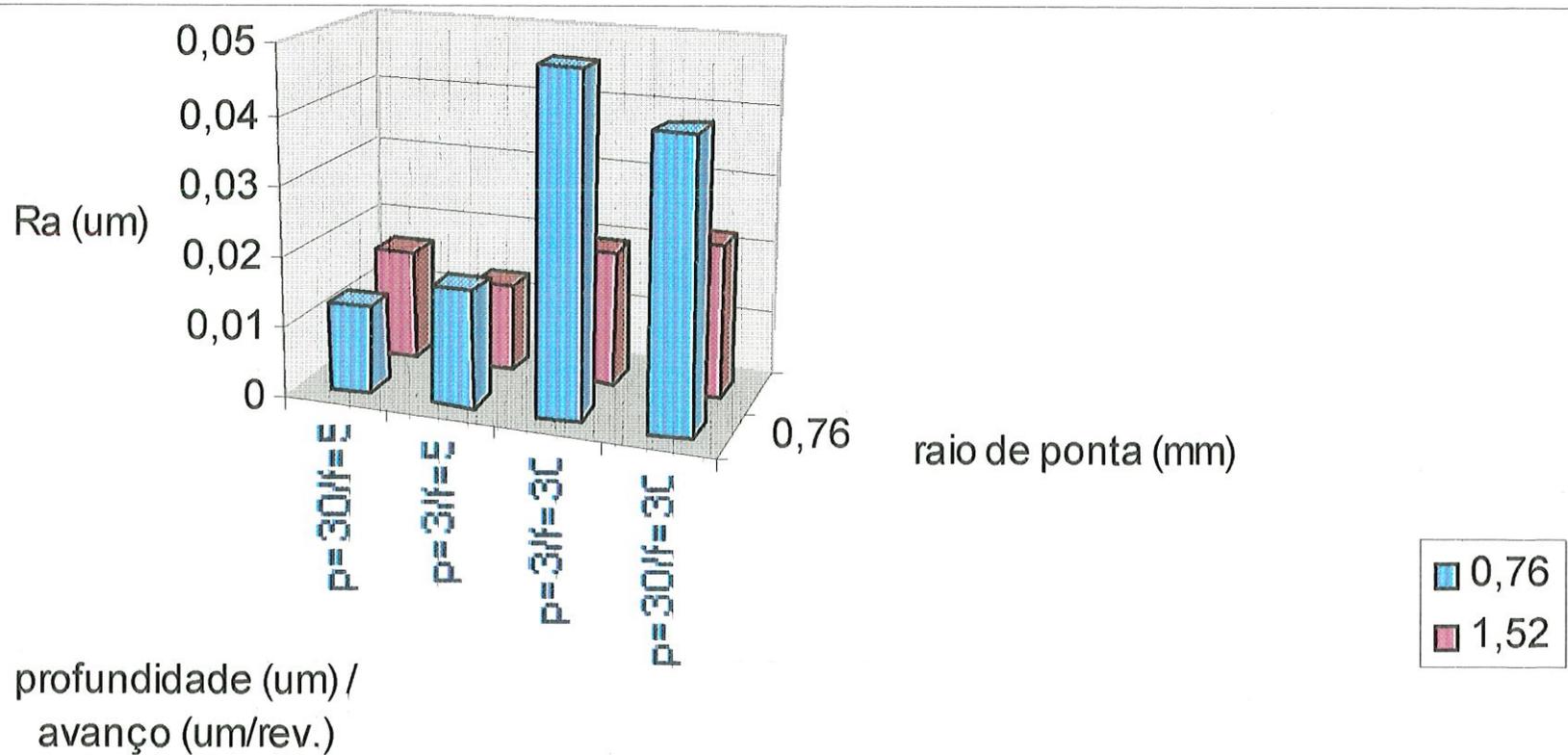


FIG 31 - Rugosidade R_a em superfície de Al-2011 em função dos parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta de um torneamento de ultraprecisão[tabela 1]

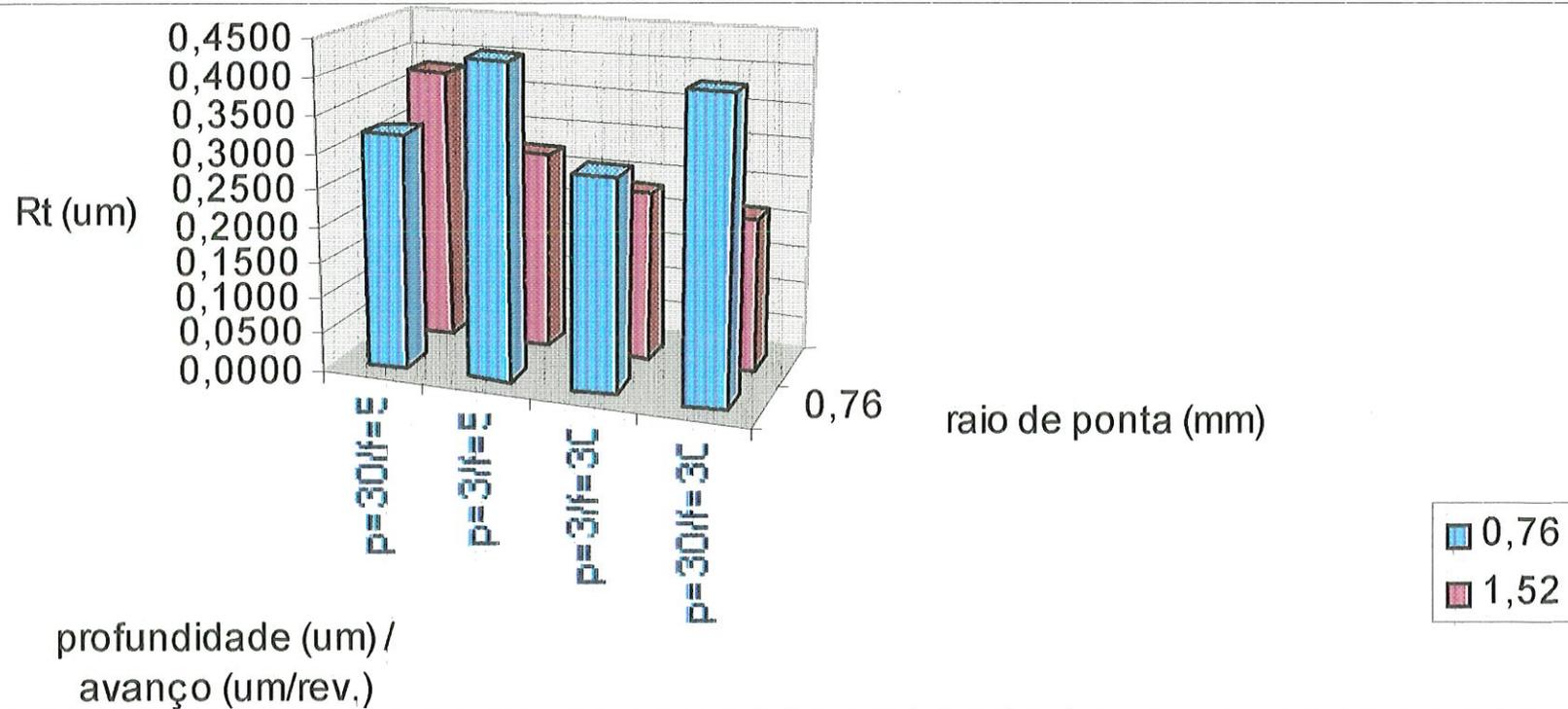


FIG 32 - Rugosidade Rt em superfície de Al-2011 em função dos parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta de um torneamento de ultraprecisão[tabela 1]

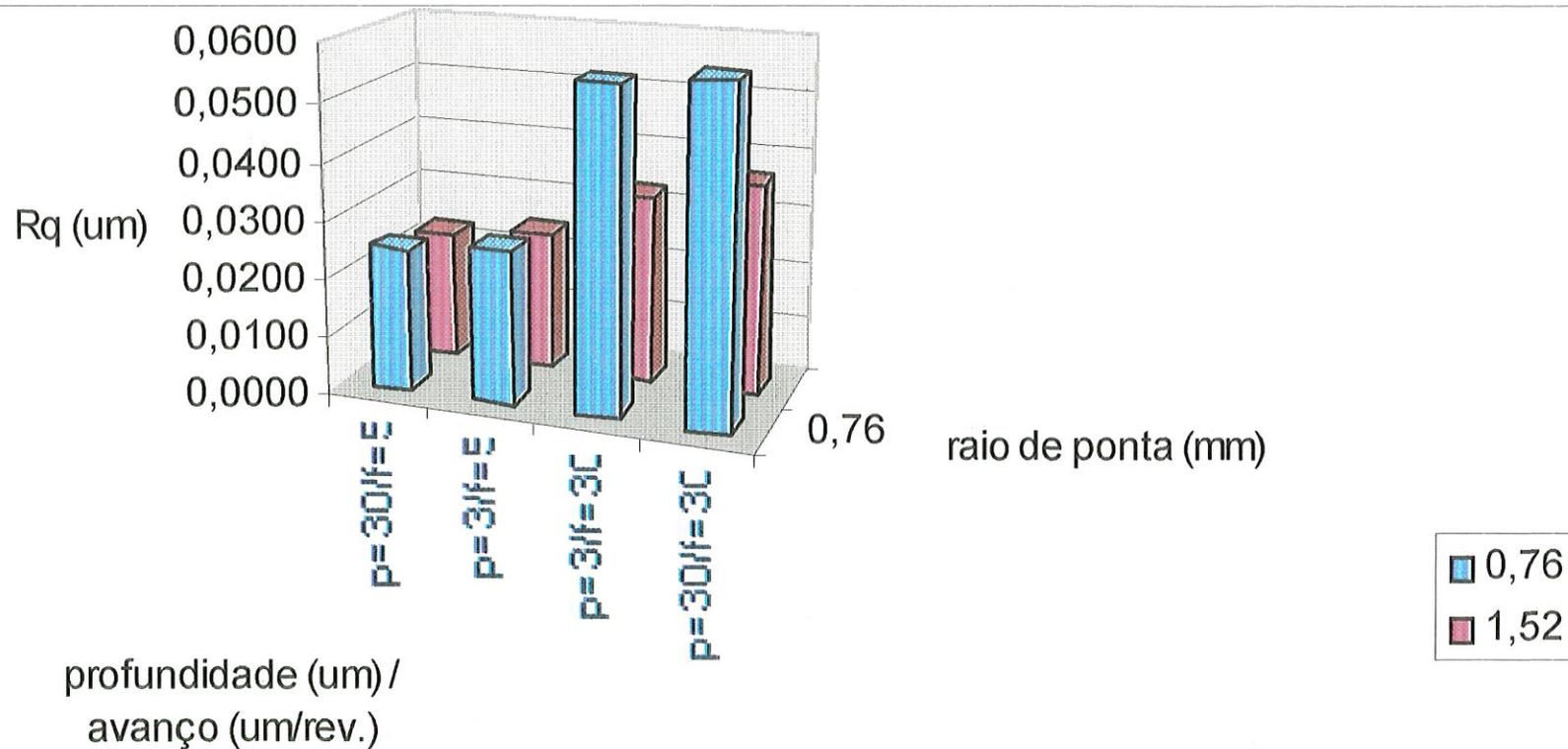


FIG 33 - Rugosidade Rq em superfície de Al-1050 em função dos parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta de um torneamento de ultraprecisão[tabela1]

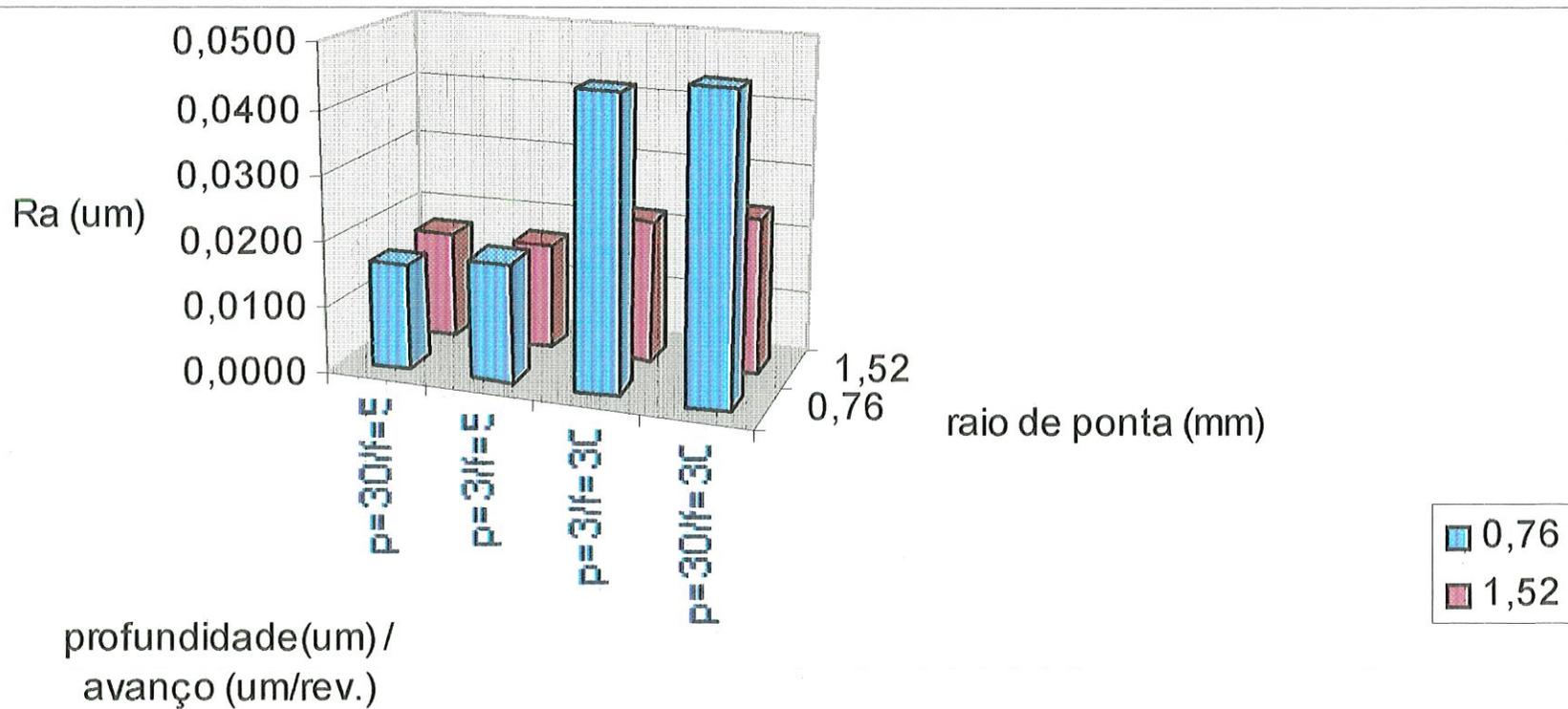


FIG 34 - Rugosidade Ra em superfície de Al-1050 em função dos parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta de um torneamento de ultraprecisão[tabela1]

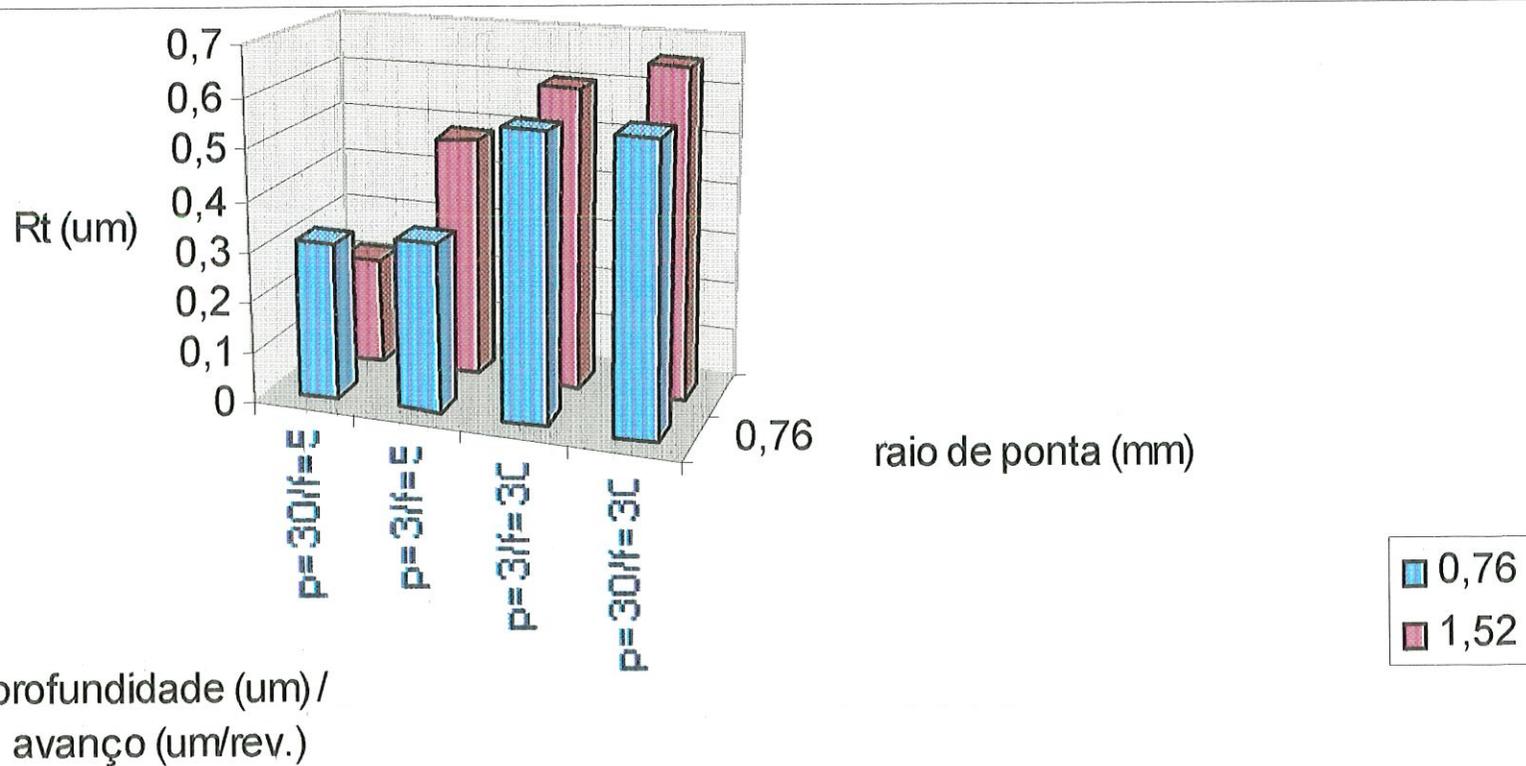


FIG 35 - Rugosidade Rt em superfície de Al-1050 função dos parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta de um torneamento de ultraprecisão[tabela1]

Condições de Usinagem	Material	Ferramenta e Processo	Peça n°.
n = 1000 rpm a = 5 µm / rev. p = 10 µm	Al -6061	MD / TC	ER7
		MD / TUP	EN11
		DN / TUP	EN14
		DI / TUP	EN23
	Al-Kobe	MD / TC	ER29K
		MD / TUP	EN13K
		DN / TUP	EN10K
		DI / TUP	EN23K

Tabela 2 – Ensaio de usinagem n° 2

Processo: TUP – torneamento de ultraprecisão

TC – torneamento convencional

Ferramentas: DI = diamante importado

DN = diamante nacional

MD = metal duro

Os resultados de refletividade em termos de espalhamento luminoso estão ilustrados nas figuras 36, 37 e 38.

A primeira figura (36) ilustra os resultados de espalhamento parcial em 4 peças de mesma liga de alumínio nas condições de usinagem: a = 5 µm / rev. , p= 5 µm , n = 1000 rpm. Cada peça sendo usinada com um tipo diferente de ferramenta. As curvas resultantes desta condição são ajustadas com curvas de tendência exponencial, mostradas na figura 37.

Na figura 38 temos os resultados de espalhamento total (com efeitos de difração) para as mesmas superfícies analisadas na figura 36. Neste caso a intensidade foi coletada através de camera CCD sobre o feixe refletido num anteparo e sem a presença de luz ambiente.

Os perfis de superfície e parâmetros de rugosidade para as condições apresentadas na tabela 2 são mostrados nas figuras 39, 40, 41, 42. Utilizaram-se dois filtros (“cutoff”) recomendados pela literatura em torneamento de UP : cutoff de 0.8 mm e cutoff de 0.25 mm[DAGNALL, 1986].

ESPALHAMENTO PARCIAL

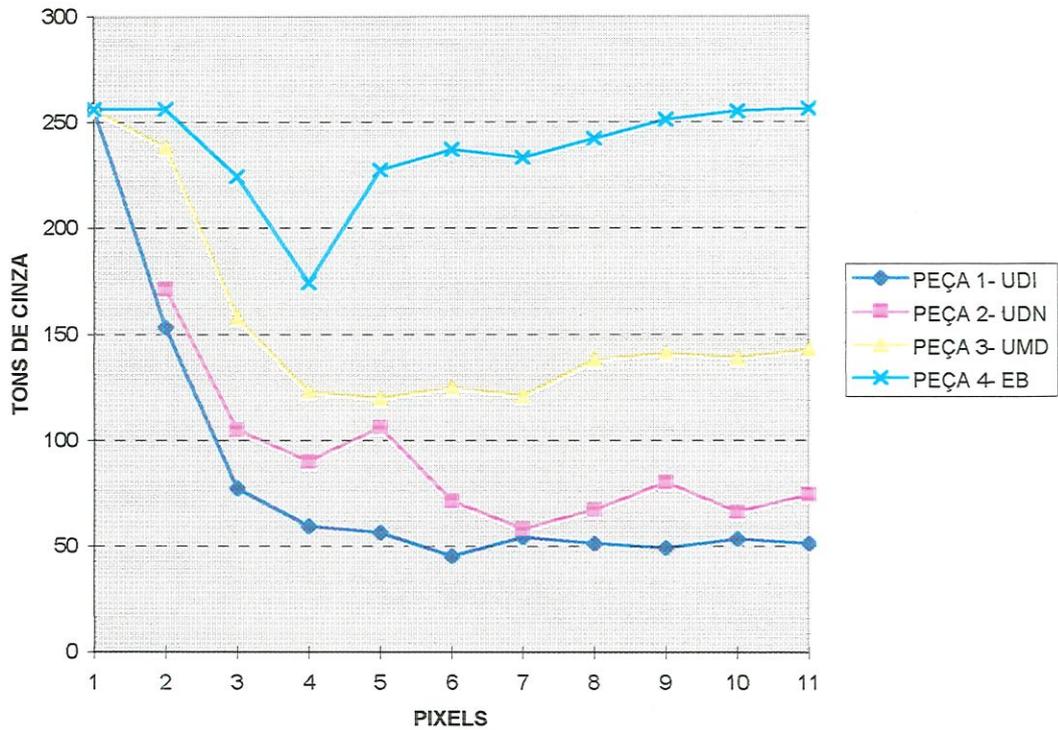


FIG. 36 - Espalhamento parcial em superfícies de alumínio de mesma liga torneadas em ultra precisão (3 peças) e convencionalmente utilizando diferentes ferramentas de corte. Intensidade coletada com camera CCD diretamente do feixe refletido da peça. Condições de usinagem $a = 5 \mu\text{m}/\text{rev.}$, $p = 5 \mu\text{m}$, $n = 1000 \text{ rpm}$. UDI = usinagem com diamante importado ; UDN = usinagem com diamante nacional ; UMD = usinagem com metal duro e EB = estado bruto (peça torneada convencionalmente).

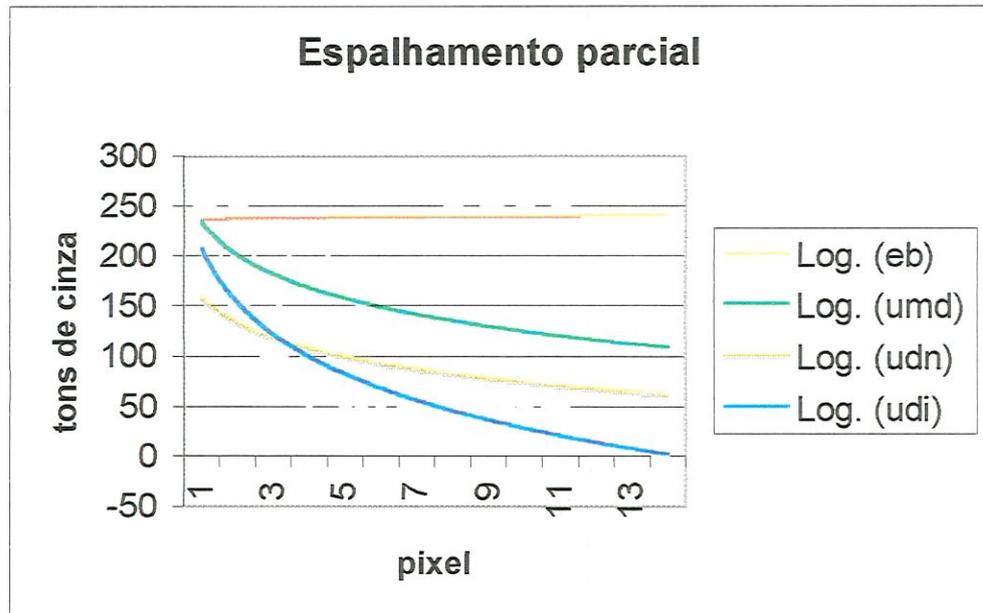


FIG. 37 - Espalhamento parcial em superfícies de alumínio (Curvas de tendência). Intensidade coletada com câmera CCD diretamente do feixe refletido da superfície (Peças da fig. 36)

RESULTADOS DE REFLETIVIDADE - DIFRAÇ.
 coleta com câmera CCD da imagem
 de luz laser refletida da peça num anteparo

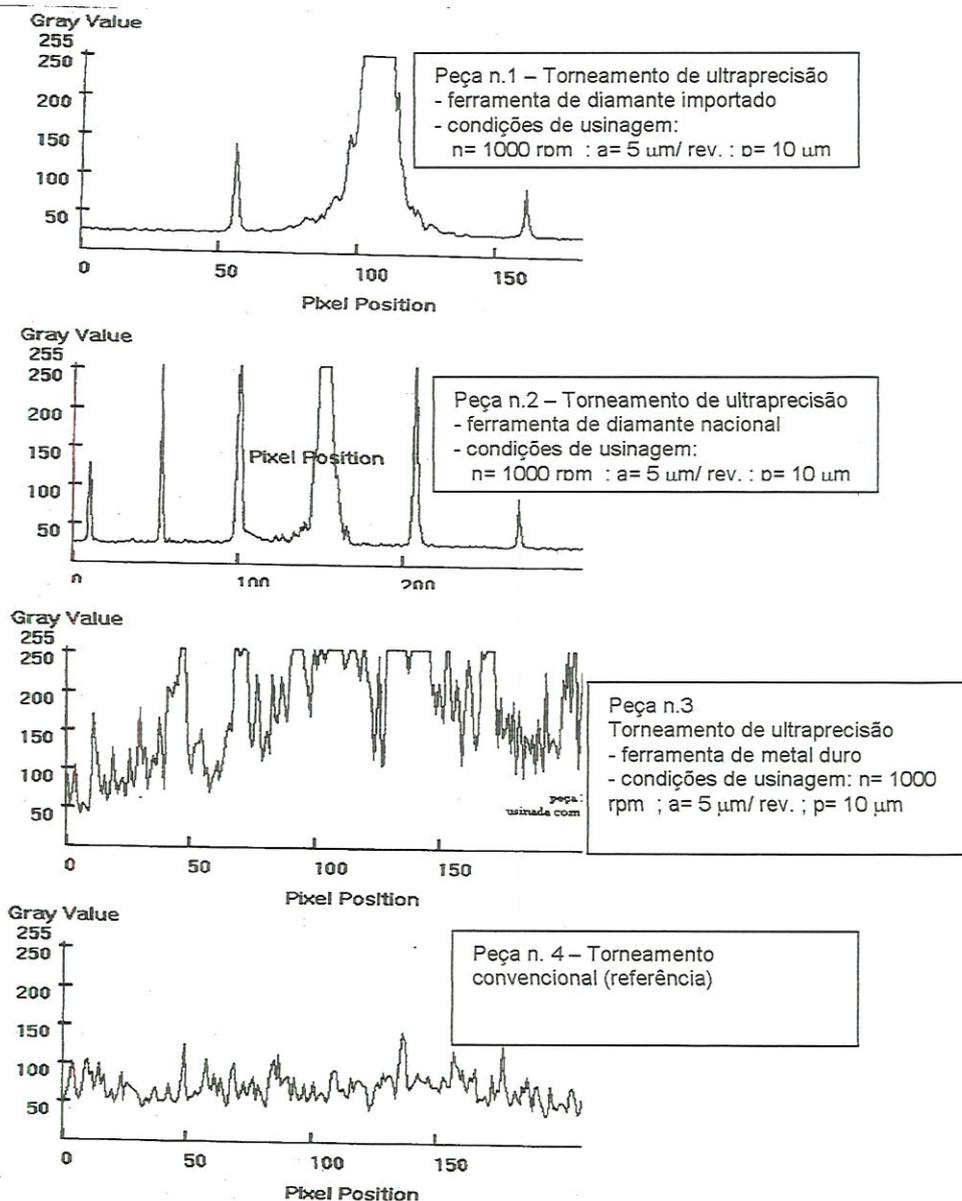


FIG. 38 Resultados de espalhamento total mostrando os efeitos de difração. As peças são as mesmas da figura 36. Intensidade coletada através de câmera CCD sobre a imagem do feixe laser refletido num anteparo

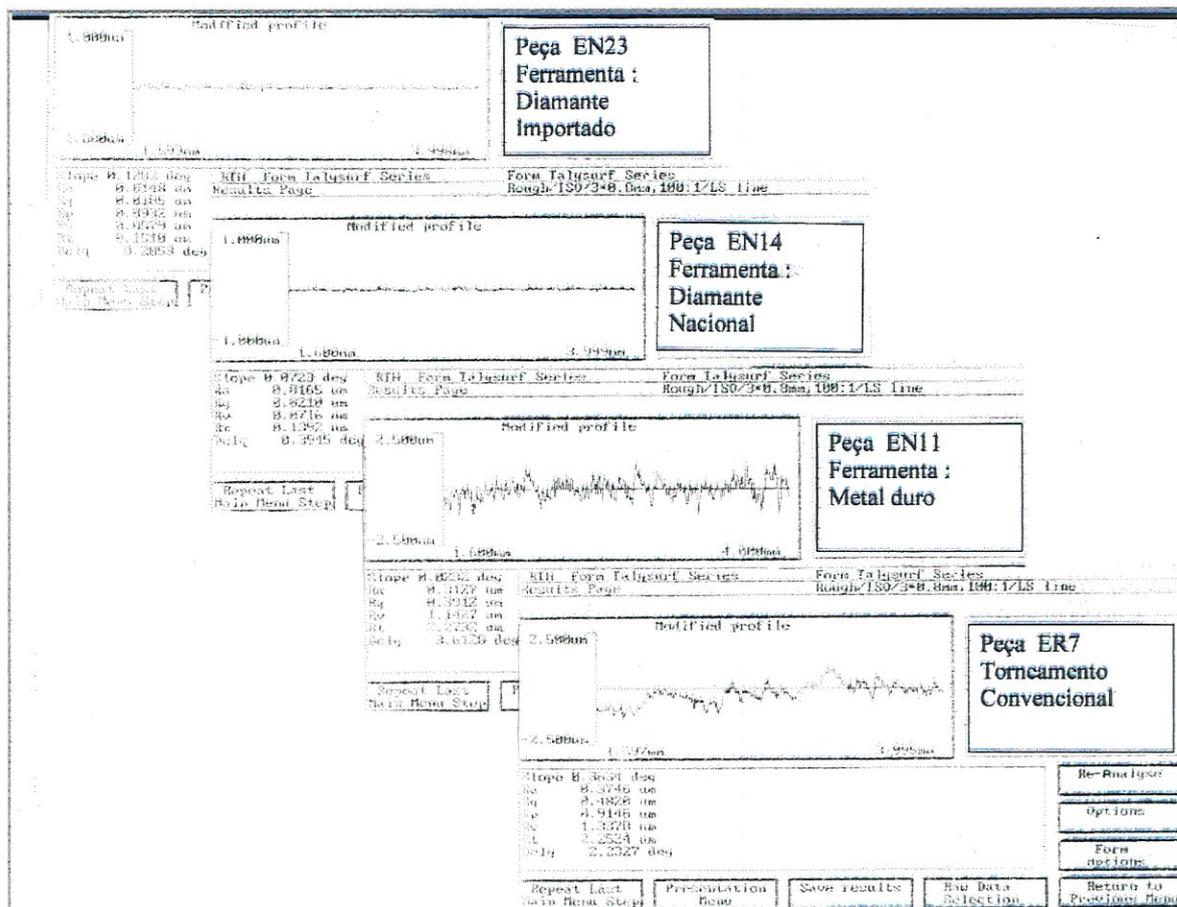


FIG. 39 Perfis e parâmetros de rugosidade em superfícies usinadas de Al-6061 e "cutoff" = 0.8 mm.

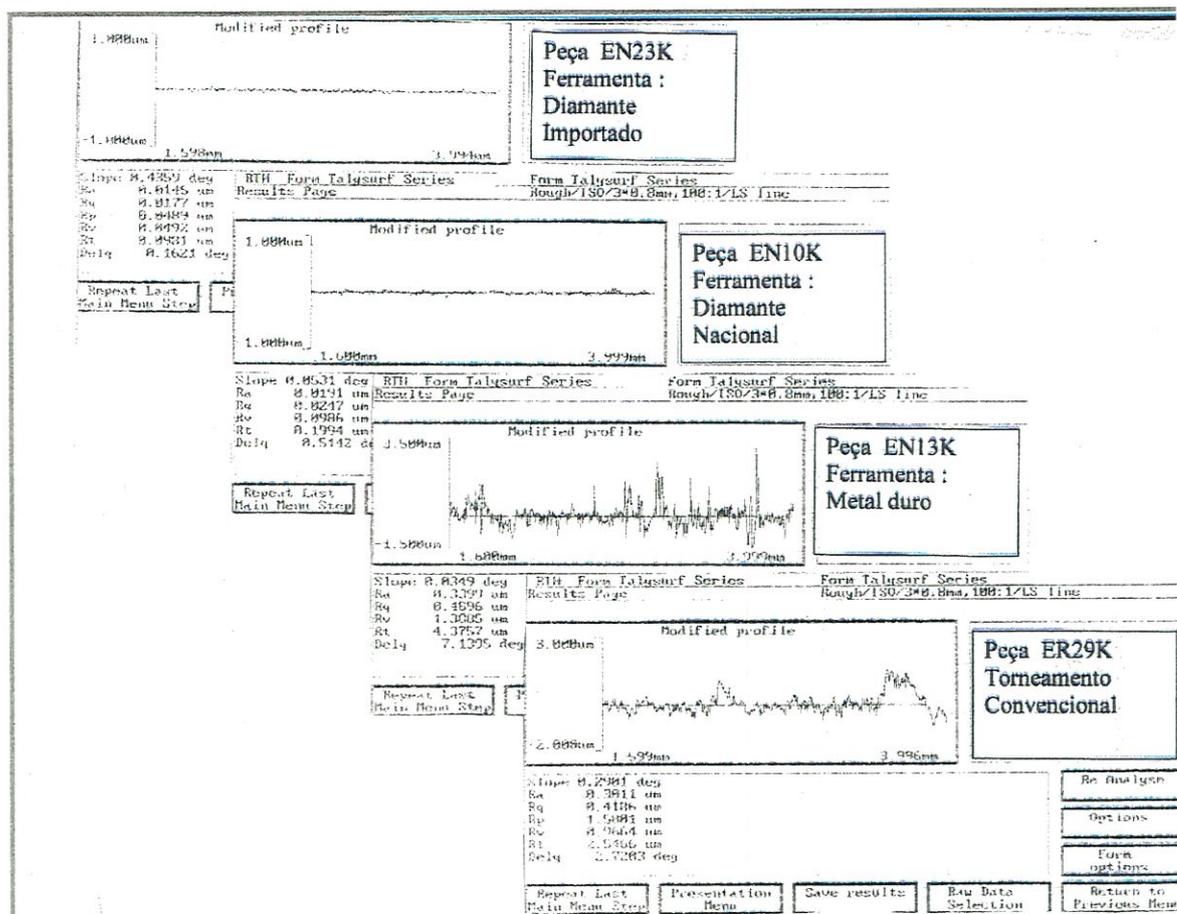


FIG. 40 – Perfis e parâmetros de rugosidade em superfícies usinadas de Al-Kobe e “cutoff” = 0.8 mm

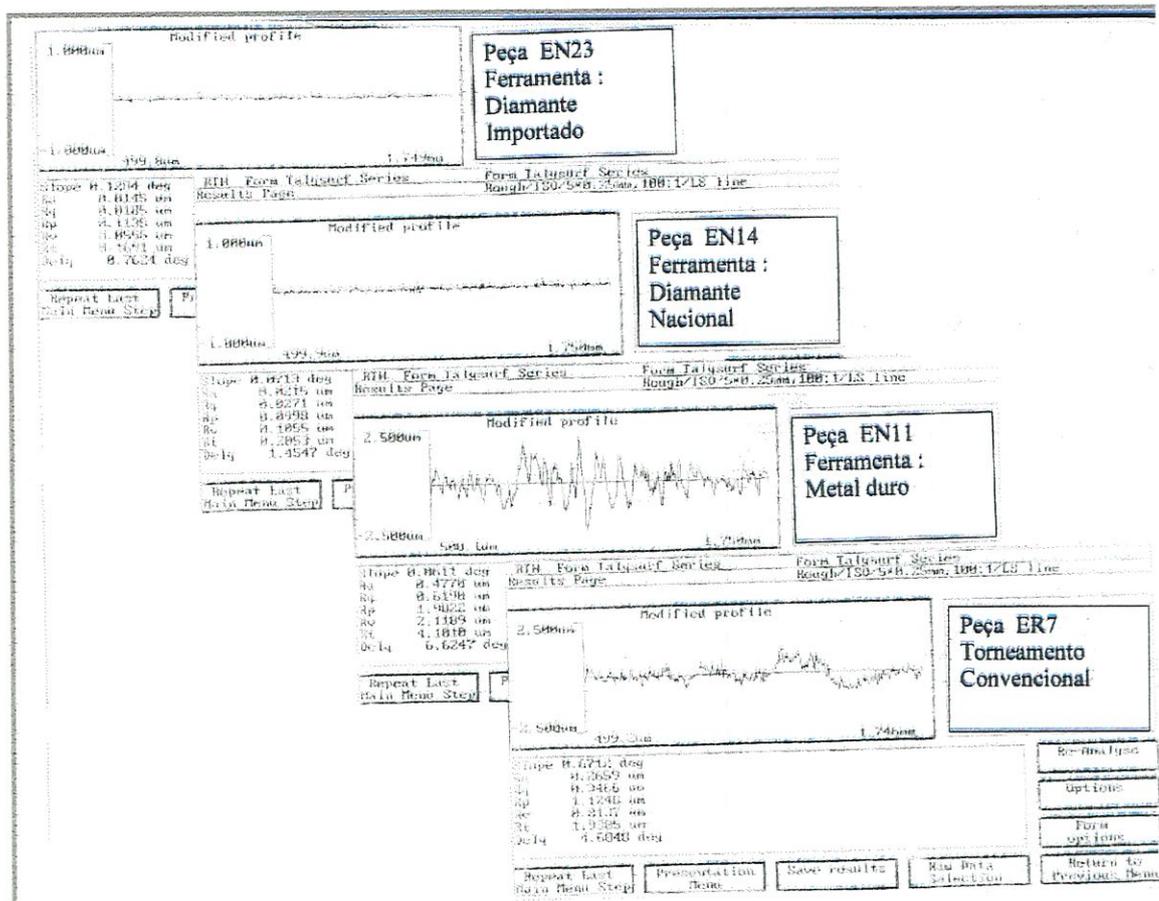


FIG. 41 – Perfis e parâmetros de rugosidade em superfícies usinadas de Al-6061 e “cutoff” = 0.25mm.

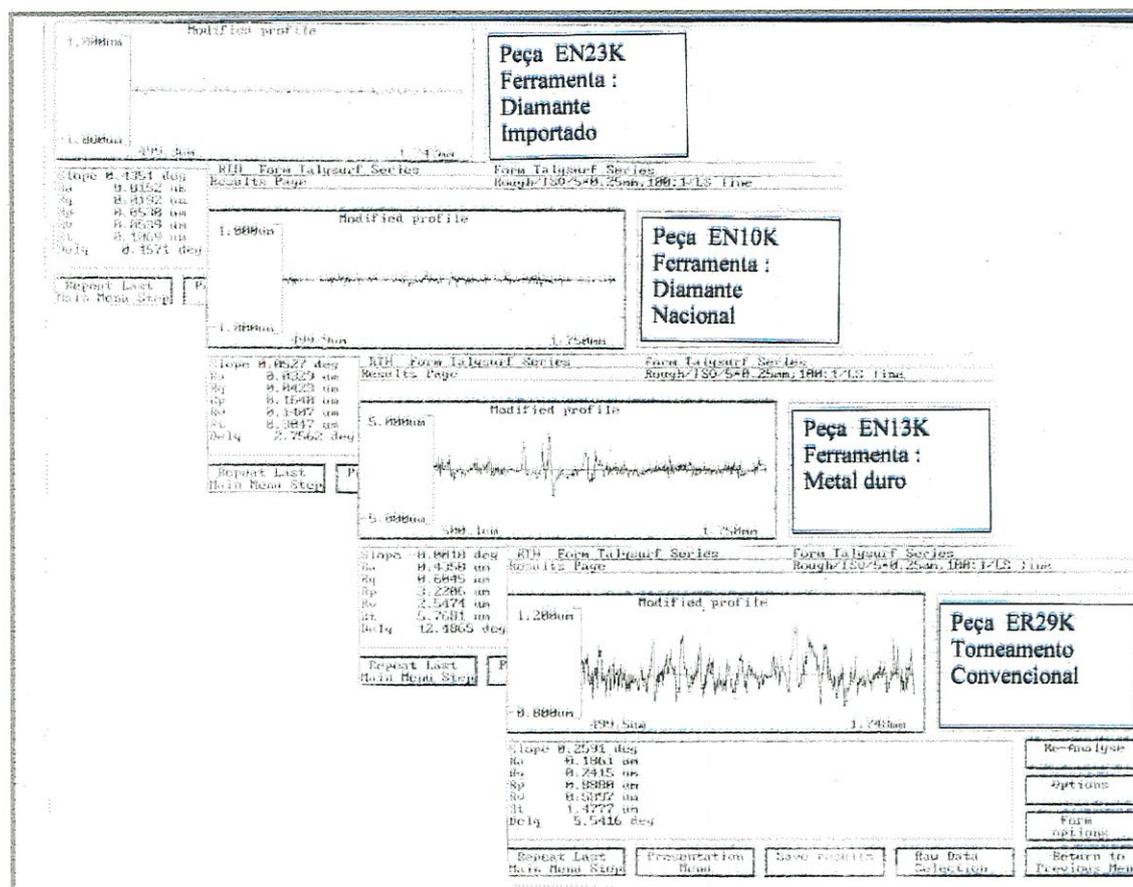


FIG. 42 – Perfis e parâmetros de rugosidade em superfícies usinadas de Al-Kobe e “cutoff”= 0.25 mm.

Capítulo 5

Conclusões e propostas para trabalhos futuros

No capítulo 1 apresentou-se uma revisão sobre espalhamento luminoso em superfícies usinadas.

No torneamento de ultra-precisão obtém-se superfícies com qualidade ótica da ordem de 10nm (R_a). Pelos resultados obtidos observa-se que a qualidade da superfície em termos de textura é bastante afetada pela integridade do gume cortante da ferramenta. No ensaio n.º.2, onde utilizaram-se 3 tipos de ferramentas para o TUP e 1 ferramenta para usinagem convencional, realizou-se o faceamento de 8 peças de alumínio (1 peça Al 6061 e 1 peça Al-Kobe). A qualidade em termos de textura variou significativamente com o tipo de ferramenta usada. Isto pode ser observado nos gráficos de perfis retirados do talysurf juntamente com a ordem crescente dos parâmetros de rugosidade ($R_a, R_q, R_t, \Delta q, \text{slope}$). Houve uma discrepância nos resultados com a superfície usinada com ferramenta de metal duro em UP apresentando valores maiores do que peça torneada convencionalmente. Isto explica-se pelo fato da ferramenta ter sido danificada e por causa disto ter gerado risco na peça.

Um dos parâmetros que menos variou e é o mais indicado para qualidade ótica da superfície é o Δq ou o slope, pois sendo parâmetros híbridos (altura e espaçamento) retratam melhor o grau de acabamento de uma superfície.

Os resultados de espalhamento indicam que superfícies de melhor acabamento espalham menos ou tem menos luz difusa. Isto é difícil de ser observado em superfícies de ultra-precisão, pois todas tem reflexão superior a 97%. Se se fosse plotar intensidade de feixe refletido em função de suas coordenadas angulares teria-se uma função gaussiana. Em superfícies óticas de UP esta gaussiana tem função de base estreita e altura elevada em torno do valor médio, dificultando a medição de intensidade, pois nesta

região há saturação da resposta do sensor, obrigando a utilização de filtros para reduzir a intensidade. A compensação seria feita com o aumento do ganho do sinal detetor.

As superfícies analisadas foram medidas a partir de coordenadas (pixels) que mostram como a curva de intensidade diminui da região de reflexão especular para a região de reflexão difusa, isto é, mediu-se de uma certa forma o espalhamento angularmente resolvido em uma direção.

Os resultados dos gráficos 36 e 37 comprovam que a integridade da ferramenta afeta a qualidade superficial e conseqüentemente o espalhamento luminoso. No gráfico 36 tem-se peças usinadas TUP (3 ferramentas) e uma referência nas condições de $a=5\mu\text{m}/\text{rev.}$ e $p=5\mu\text{m}/\text{rev.}$ $n=100\text{rpm.}$ A superfície de referência apresentou altas intensidades de energia espalhada (em torno de 255 grayscale). Esta intensidade diminui a medida que as superfícies melhoram sua qualidade.

No TUP temos resultados muito próximos de espalhamento devido à qualidade superior de suas peças. O objetivo deste ensaio foi delimitar faixas de espalhamento para enquadrar as superfícies. Isto pode ser observado no gráfico 37 de tendências onde observa-se o comportamento de quatro superfícies com relação a espalhamento.

Os resultados das figuras 30-35 mostram que as rugosidades R_q e R_a dependem tanto do avanço, quanto do raio de ponta da ferramenta. Para avanços maiores, tanto os materiais Al-2011 como o Al-1050 apresentaram aumento da rugosidade variando diretamente de acordo com o avanço. Raios de ponta maiores e aumento do avanço produzem menores rugosidades superficiais.

A utilização de filtros redutores, polarizadores, cálculos estatísticos, calibração de resposta do sensor poderia ser estudada para permitir a padronização das curvas de distribuição.

Trabalhos posteriores podem ser realizados como o monitoramento on-line do processo de TUP ou mesmo retificação. A análise de espalhamento mostrou ter correlação com rugosidade superficial. As publicações consultadas e referenciadas relacionam o TIS e ARS à

rugosidade RMS, e publicação recente [VALLIANT & BENNETT, 1997] também relaciona TIS e ARS ao perfil (gráfico) e Ra.

Como sugestão aponta-se:

- a) montagem de equipamento com sensor CCD e software adequado para captura e análise de dados (visual basic, C++) acoplado a motor de passo (controlado por PC) que faria a varredura angular. Um amplificador e osciloscópio para calibrar o sinal de resposta de forma a linearizar a resposta de frequência.
- b) utilizar-se de diodos laser de vários comprimentos de onda (IR, UV, visível).
- c) montar dispositivos de fixação da peça com vários graus de liberdade e testar em movimento de rotação simulando uma usinagem, para verificar a influência do erro de batida (rigidez axial) do eixo árvore.
- d) Criar banco de dados de modo a obter curvas de padrões de comportamento da rugosidade das peças em relação à espalhamento. Isto seria realizado com o uso da estatística para delimitar campos (faixas).
- e) outra análise possível seria a realização de experimentos de usinagem 2^k fatorial com intuito de fazer análise de variância e verificar a influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade superficial, principalmente com parâmetros Δq , slope.
- f) estudar a influência do fluido lubrificante na distribuição de intensidade de luz refletida, para geração de novos padrões.

Referências Bibliográficas

- AL-JUMAILY, G. A. , WILSON, S. R., JUNGLING, K. C. , McNEIL, J. R. e BENNET, J. M. ,** "Frequency response characteristics of mechanical surface profilometers", *Optical Engineering*, vol 26(9) , 953-958, 1987.
- ASSAI, S. & KOBAYASHI, A . ,** "Observations of chip producing behaviour in ultra-precision diamond machining and study on mirror-like surface generating mechanism", *Precision Engineering*, vol 12(3), 1990.
- BELAK, J. F., STOWERS, I. F.,** "A molecular dynamics modal of the orthogonal cutting process", *Proc. Of the 1990 Annual Meeting of the ASPE*, Rochester, NY, USA, pp. 76-79, 1990.
- BENJAMIN, R. J.,** "Diamond Turning at a large optical manufacturer", *Optical Engineering* , 574, vol 17(6), 1979.
- BENNETT, J. M. ,** "Recent developments in surface roughness characterization", *Meas. Scie. Technol.*, vol. 3, pp. 1119-1127, 1992.
- BENNETT, J. M. & MATTSON, L. ,**"Introduction to Surface Roughness and Scattering", *Optical Society America*, 1989.
- BENNETT, H. E. ,** "Scattering characteristics of optical materials" , *Optical Engineering*, vol 17(5), 480-488, 1978.
- BENNETT, J. M. ,**"Comparison of techniques for measurements the roughness of optical surfaces" *Optical Engineering*, vol 24(3), 1985, 380-387.

BRODMANN, R. , GERSTORFER, O. , THURN, G. , ,“Optical roughness measuring instrument for fine-machined surfaces” , Optical Engineering, vol24(3):380-387, 1985.

CARPINETTI, L. C. R. , GONÇALVES FILHO, E. V. , PORTO, A. J. V. e JASINEVICIUS, R. G. , “Rugosidade superficial - conceitos e princípios de medição”, Seção de publicações da EESC-USP, 1996.

CHANDLEY, P.J. , “Surface roughness measurements from coherent light scattering,” Op. Quantum Electron., 8, p 323-327 , 1976.

CHURCH, E. L. , VORBURGER, T. V. , WYANT, J. C. , “Direct comparison of mechanical and optical measurements of the finish of precision machined optical surfaces” , Optical Engineering , Vol.24(3), 388-395,1985.

CHURCH, E. L. & TAKACS, P. Z. “Survey of the finish characteristics of machined optical surfaces” Optical Engineering, Vol 24 (3): 396-403,1985.

CHURCH, E. L. , ZAVADA, J. M. , “Residual surface roughness of diamond-turned optics”, Applied Optics, Vol. 14(8):1788-1795, 1975.

DAGNALL, H. “Exploring Surface Texture”, Rank Taylor Hobson Limited, 1986.

DAVIES, H. “The reflection of electromagnetic waves from a rough surface” , Proc. Inst. Elect. Engs , vol. 101, pp 209-214, 1984.

DAVIES, G., EVANS, T., “Graphitization of diamond at zero pressure and at a high pressure”. Proc. R. Soc. (London). A.328, pp.413-427, 1972.

DECKER, D. L. , BENNETT, J. M. , SOILEAU, M. J. , PORTEUS, J. O . e BENNETT, H. E. "Surface and optical studies of diamond-turned and other metal mirrors" , Optical Engineering, Vol. 17(2), 1978, 160-166

DETRIO, J. A . ; MINER, S. M. "Standardized total integrated scatter measurements of optical surfaces", Optical Engineering , Vol 24(3), 419-422, 1985.

DRESCHER, J. D. , DOW, T. A . "Tool force model development for diamond turning", Precision Engineering , vol. 12(1) , 1990.

DRESCHER, J. D., DOW, T., "Machining Forces in Diamond Turning of Cooper". Proc. of the 6th ASPE, 1991 Annual Conference, Santa Fe, NM, USA, pp.104-107, 1991.

DUDUCH, J. G. , PORTO, A. J. , JASINEVICIUS, R. G. , "Model of Brittle Materials Single Point Machining with High Removal Rates", Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, Vol. 18(1), pp. 33-39, 1996.

ELSON, J. M. , BENNETT, H. E. & BENNETT, J. M. "Scattering from optical surfaces" in Applied Optics and Optical Engineering, Vol VII, 191-244, 1979.

EVANS, C. "Cryogenic diamond turning of stainless steel" Annals of the CIRP, Vol. 40(2):571-575, 1991.

FERREIRA, N. G. (1994). *Rugosidade e espalhamento em superfícies de n-InP atacada fotoeletroliticamente*. Campinas. 120 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Física "Gleb Wataghin" , Universidade Estadual de Campinas.

FURUKAWA, Y., MORONUKI, N., "Effect of materials properties on ultra precise cutting processes", Annals of the CIRP, vol. 37 (1):113-116, 1988.

HAMAMATSU, (1992). "Hamamatsu C1309 Family Regulated High Voltage Power Supplies (Instruction Manual). Iwata-gun: Hamamatsu Photonics K.K.

HAMAMATSU, (1994). "Test Data Sheet (Photomultiplier Tube Type R-928). Middlesex (NJ): Hamamatsu Corporation.

IKAWA, N. , DONALDSON R. R. , KOMANDURI, R. , KONIG W. , AACHEN, T. H., MCKEOWN, P. A ., MORIWAKI, STOWERS, I. F. "Ultraprecision metal cutting, the past, the present end the future" , Annals of the CIRP, vol. 40(2):587-594, 1991.

IKAWA, N., SHIMADA, S., MOROOKA, H. "Techonology of diamond tool for ultraprecision metal cutting", Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., vol.21 (4) : 233-238, Dec. 1987.

IKAWA, N., SHIMADA, S. "Non-destructive strength evaluation of diamond for ultraprecision cutting tool". Annals of the CIRP, Vol. 34(1):117-120,1985.

IKAWA, N., SHIMADA, S., "Microfature of diamond as fine tool material", Annals of the CIRP, Vol.31(1): 71-74, 1982.

IKAWA, N., SHIMADA, S., "Cutting tool for ultraprecision machining". Proc. e rd ICPE, Kyoto, pp. 357-365, 1977.

IKAWA, N., SHIMADA, S., TANAKA, H., OHMORI, G. "An atomistic analysis pf nanometric chip removal as affected by tool-work interaction in diamond turning", Annals of the CIRP, Vol. 40 (1):551-554, 1991.

IKAWA, N., TANAKA, T., "Thermal aspects of wear of diamond grain grinding". Annals of the CIRP, Vo. 19, pp. 153-157, 1971.

INAMURA, T. SUZUKI, H., TAKEZAWA, N. "Cutting experiments in a computer using atomic models of a copper crystal and a diamond tool", Int. Japan Soc. Prec. Eng., Vol 25 (4):259-266, Dec.1991.

INAMURA,T., TAKEZAWA, N., "Cutting experiments in a computer using atomic models of a cooper crystal and a diamond tool", Proc. of the 6 th Int. Prec. Eng. Seminar, Braunschweig, Germany, pp.231-242, 1991.

JASINEVICIUS, R. G. (1994). *Caracterização da usinabilidade de ultra precisão em ligas de alumínio fabricadas no Brasil.* 141p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

KOMANDURI, R., SHAW, M.C., "On the diffusion wear of diamond in grinding pure iron". Philosophical Magazine, Vol. 34 (2): 195-204, 1976 1976.

KONIG, W., WECK, M., SPENRATH, N., LUDERICH, J., "Diamond machining technology". (tutorial), 6 th I.P.E.S Sem., Braunschweig, 96p., 1991.

LEE, W. B. "Prediction of microcutting force variation in ultra-precision machining", Precision Engineering, Vol. 12(1),25-28, Jan. 1990.

LO-A-FOE, T.C.G., DAUTZENBERG, J. H., Van der WOLF, A.C.H., "Cutting forces and their influences upon the surface integrity in SPDT", in Weck, M., Hartel, R., Ultraprecision In Manufacturing Eng., Proc. of the Int. Congress for UPT, Aachen/FRG, ed. Springer-Verlag, pp. 110-125, May 1988.

LUCCA, D.A., SEO, Y. W., "Prediction of the partitions of energied and temperatures in orthogonal ultraprecision machining" Proc. of the 5 th Int.

Prec. Eng. Seminar and Annual Meeting of the ASPE, Monterey, Ca, USA, pp.116-120, 1989.

MIYAMOTO, I., "Ultra fine finishing of diamonds tools by ion beams". Prec. Eng., vol. 9 (2):71-78, April 1987.

MIYAMOTO, I., EZAWA, T., NISHIMURA, K. "Ion beam machining of single point diamond tools for nano-precision turning". Nanotechnology, Vol. 1(1):44-49, 1990.

NAKAYAMA, K., TAMURA, K., "Size effect in metal cutting force", Trans. ASME, J. of Eng. For Industry, pp. 119-126, Feb. 1968.

PORTO, A . J. V. (1995). *Diagnóstico do processo de fabricação da operação de torneamento de face de ultraprecisão em cobre e ligas de alumínio.* 237 p. Tese (Livre-docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PORTO , A.J.V., JASINEVICIUS, R.G. DUDUCH J.G. , "Chip Topography and Morphology of Diamond Turned Al-Mg Alloy for Mirrors" Acta Microscopica Vol 6, Supplement A, Sept 1997 pp94-95.

SATO, M., KATO, Y., TUCHIYA, K. "Effects of material anisotropy upon cutting mechanism". Trans. Of. Jap. Inst. of Metals, Vol. 19, pp. 530-536, 1978.

SATO, M. , YAMAZAKI T. , SHIMIZU Y., TAKABAYASHI, T. "A study on the microcutting of aluminum single crystals" , JSME International Journal series III, Vol. 34(4), 1991.

SHERRINGTON, I. e SMITH, E. H. "Modern measurement techniques in surface metrology: part II ; optical instruments", Wear, vol. 125, pp. 289-308, 1988.

STOVER, J. C. ; SERATI, S. A . ; GILLESPIE, C.H. "Calculation of surface statistics from light scatter" *Optical engineering* , Vol. 23(4):406-412, 1984.

STOWERS, I.F., BELAK, J.F., LUCCA, D.A., KOMANDURI, R., RHORER, R.L., MORIWAKI, T., OKUDA, K, IKAWA, N, SHIMADA, S., TANAKA, H., DOW, T.A., DRESCHER, J.D., "Molecular dynamics simulation of the chip forming process in single crystal copper and comparison with experimental data" in *Proc. of the 6 th ASPE Annual Conference, Santa Fe, NM, USA*, pp. 100-103, 1991.

SUGANO, T., TAKEUCHI, K., GOTO, T., YOSHIDA, Y., "Diamond turning of na Aluminum alloy for mirror", *Annals of the CIRP*, Vol. 36(1):17-20, 1987.

TAKASU, S., MASSUDA, M., NISHIGUCHI, T., "Influence of steady vibration with small amplitude upon surface roughness in diamond machining", *Annals of the CIRP*, vol (34 (1): 463-467,1985.

TANAKA, T., IKAWA, N., TSUWA, H. , "Afinity of diamond for metals". *Annals of the CIRP*, vol. 30 (1);241-245 ,1981.

TANIGUCHI, N., "Current status in and future trends od ultra-precision machining and ultrafine materials processing", *Annals of the CIRP*, Vol. 32(2):-582, 1983.

THORNTON, A. G., WILKS, J., "Tool wear and solid state reactions during machining", *WEAR*, Vol. 53, pp. 165-187, 1979.

VALLIANT, J. G. e BENNETT, J. M. , "Instrument for on-line monitoring of surface roughness of machined surfaces" in *Proc. ASPE, Advances in Surface Metrology* , Jun. 1997.

VON TURKOVICH, B. F., BLACK, J. T.,"Micro-machining of cooper and aluminum crystals", Trans. Of the ASME, J.of Eng. For Industry, vol. 92 (1): 130-134, Feb. 1970.

WHITEHOUSE, D. J. ,"Surface metrology instrumentation" , J. Phys. E: Sci. Instrum., vol. 20 , pp 1145-1155, 1987.

WILKS, J., "Performance of diamond as cutting tools for precision machining". Prec. Eng., Vol. 2, pp. 57-71, 1980.

APÊNDICES

Nestes apêndices (A-E) apresentamos a teoria escalar para cálculo de espalhamento luminoso utilizando a técnica de TIS. O desenvolvimento teórico é baseado no trabalho de FERREIRA [1994].

APÊNDICE A. ESPALHAMENTO POR SUPERFÍCIES RUGOSAS

No estudo de espalhamento de ondas eletromagnéticas pode-se a partir de um objeto espalhante, determinar o espectro de espalhamento, ou a partir de um espectro de espalhamento encontrar as características de um objeto espalhador..

Mesmo estudando somente o espalhamento do tipo elástico, onde a frequência das ondas espalhadas é a mesma da onda incidente, e há apenas variações das direções dos vetores de onda nas ondas espalhadas exige-se um tratamento específico para cada tipo de sistema ou centro espalhador em particular.

O objetivo dos apêndices é apresentar um estudo do espalhamento elástico, em particular sobre as teorias aplicáveis ao tratamento do espalhamento de ondas eletromagnéticas por superfícies rugosas, utilizando-se basicamente o tratamento escalar.

A maior diferença entre o espalhamento por partículas e por superfícies é que nas superfícies os centros espalhadores não podem ser considerados independentes.

Uma superfície pode ser considerada lisa quando uma onda ou um feixe incidente é refletido especularmente numa só direção, enquanto numa superfície rugosa a luz é espalhada em várias direções. Este comportamento serve para definir superfícies lisas ou rugosas. Assim uma mesma superfície pode ser rugosa para um comprimento de onda e lisa para outro, ou para o mesmo comprimento de onda, rugosa ou lisa para diferentes ângulos de incidência.

O problema do espalhamento por uma superfície rugosa qualquer não tem uma solução geral. Em determinados casos, quando algumas aproximações podem ser feitas, é possível se obter uma solução analítica.

A maior parte das teorias para o espalhamento em superfícies rugosas usa uma ou mais das seguintes aproximações:

1. As dimensões dos elementos espalhadores na superfície são considerados muito maiores ou muito menores que o comprimento de onda da radiação incidente;
2. O raio de curvatura dos elementos espalhadores são considerados muito maiores que λ ;
3. Efeitos de borda são desprezados;
4. Somente o campo distante é calculado;
5. Espalhamento múltiplo é desprezado;
6. A densidade das irregularidades (número de elementos espalhadores por unidade comprimento ou por área da superfície) não é considerada;
7. Os tratamentos são restritos a modelos particulares de superfícies, no caso de superfícies periódicas considera-se uma forma particular de corrugação: senoidal, retangular ou triangular; no caso de aleatórias considera-se uma distribuição estatística particular.

As teorias mais usadas para estudar o espalhamento por superfícies rugosas são baseadas na integral de Helmholtz e nas condições de contorno de Kirchhoff (teoria escalar).

Existem várias formas de aproximação para essas condições de contorno como por exemplo: estimar a distribuição superficial de corrente de campo elétrico incidente ou expressar o campo total pela média dos coeficientes de reflexão locais. A solução se reduz a uma simples fórmula quando a superfície é perfeitamente condutora ou se a rugosidade da superfície é periódica.

Antes de nos dedicarmos a solução geral de Kirchhoff para o problema de espalhamento, duas questões gerais muito importantes precisam ser analisadas: os critérios para definição de rugosidade (Critério de Rayleigh) e a localização e tamanho das zonas espalhadoras (Zonas de Fresnel).

A.1. Critério de Rayleigh

Antes de determinar quantitativamente o campo espalhado por uma superfície rugosa, é preciso considerar duas questões elementares. Para que valores de comprimento de onda e ângulo de incidência, uma reflexão regular muda para uma reflexão difusa, ou quando uma superfície “lisa” pode ser considerada rugosa e vice-versa ?

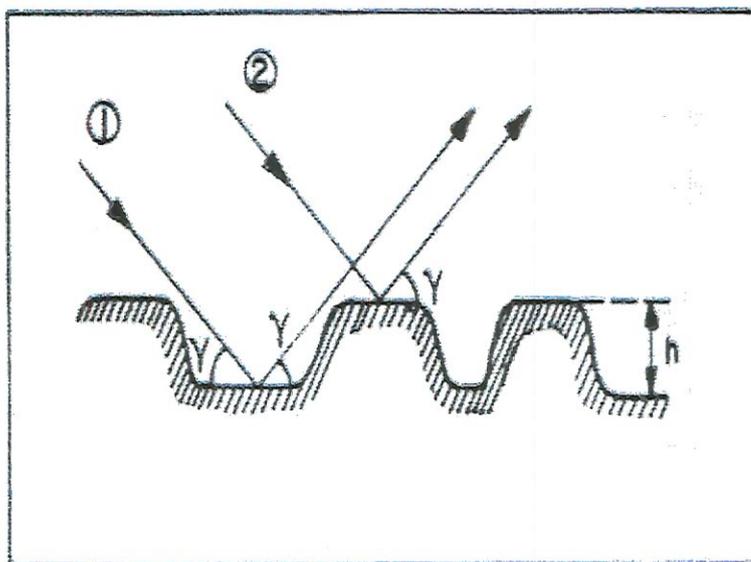


Figura A.1. Critério de Rayleigh

Rayleigh sugeriu uma forma de relacionar esses parâmetros: considere os raios 1 e 2 incidentes numa superfície com irregularidades de altura h e ângulo γ (Figura A.1). A diferença de caminho entre os dois raios é

$$\Delta r = 2h \operatorname{sen} \gamma \quad (1)$$

e, portanto, a diferença de fase é

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r = \frac{4\pi}{\lambda} h \operatorname{sen} \gamma \quad (2)$$

Se a diferença de fase é pequena, os dois raios estão em fase e teremos o caso de uma superfície perfeitamente “lisa”. Se a diferença de fase aumenta, os dois raios se interferem; para $\Delta \varphi = \pi$ estarão em oposição de fase e se cancelam. Se não há energia nesta direção, então esta deve ter sido distribuída em outra direção, pois não pode ser perdida. Assim, para $\Delta \varphi = \pi$ a superfície espalha e é rugosa, enquanto para $\Delta \varphi = 0$ a superfície reflete specularmente e é lisa. Pode-se agora estabelecer um valor para a diferença de fase entre os dois extremos e dividir “rugoso” e “liso”. Por uma simples escolha arbitrária, toma-se o valor médio $\Delta \varphi = \pi/2$, o qual substituído em (2) obtém-se a relação usualmente conhecida como “Critério de Rayleigh”, no qual uma superfície é considerada lisa para

$$h < \lambda / 8 \operatorname{sen} \gamma \quad (3)$$

Uma forma de expressar a idéia básica do critério de Rayleigh é usar o lado direito da expressão (2),

$$4\pi h / \lambda \operatorname{sen} \gamma \quad (4)$$

como medida da rugosidade superficial efetiva, pode-se dizer, então, que uma superfície tende a ser efetivamente “lisa” somente sob duas condições:

$$h/\lambda \Rightarrow 0 \quad \text{ou} \quad \gamma \Rightarrow 0 \quad (5)$$

Este critério é bastante utilizado pela sua simplicidade, envolvendo simples teoria e por descrever a irregularidade de uma superfície rugosa por parâmetros que são fáceis de medir (h , γ , λ). No estudo de superfícies rugosas aleatórias, pode-se obter uma expressão quantitativa para o espalhamento médio na direção da reflexão specular em termos praticamente dos mesmos

três parâmetros; esta expressão inclui o critério de Rayleigh como um simples limite e nos dá informações adicionais.

A.2. Localização e Tamanho de uma Região Espalhadora

A segunda questão elementar é : Que região da superfície espalhadora tem a mais importante contribuição no campo total em um dado ponto quando a superfície é iluminada por uma fonte em um outro dado ponto ?

Considere um plano liso xy (Figura A.2), iluminado por uma fonte no ponto $A(0, 0, h_1)$. Fisicamente, essa fonte induz correntes superficiais no plano, as quais irradiam campos secundários ou refletidos. Seja esse campo refletido recebido no ponto $B(r, 0, h_2)$. O local de todos os pontos do plano xy , para o qual a radiação secundária vinda de B , com diferença de fase constante d com respeito a radiação direta ao longo de R é dada pela relação

$$R_1 + R_2 - R = \delta \quad (6)$$

ou, se R é constante

$$R_1 + R_2 = \text{const} = R + \delta \quad (7)$$

esta é a equação de elipsóides de revolução, com focos em A e B .

Portanto, o local desejado no plano xy são elipses determinadas pela interseção do plano com os elipsóides (7).

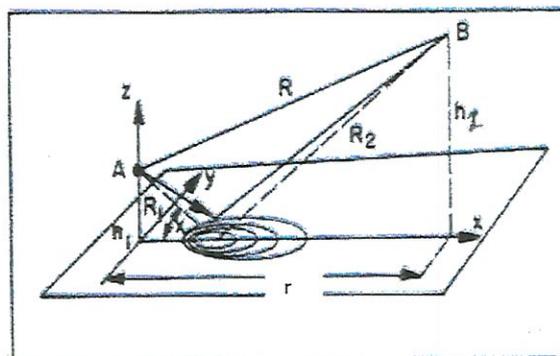


Figura A.2. Zonas de Fresnel em um plano refletor.

Se δ é aumentado em intervalos de $\lambda/2$, resultará em uma família de elipses no plano xy ; a fase média da radiação de cada zona limitada por duas elipses vizinhas difere da zona adjacente por π , tal que as ondas elementares secundárias irradiadas por sucessivas zonas estarão em oposição de fase. Estas zonas são chamadas de zonas de Fresnel.

A contribuição de cada zona para o campo total recebido em B, é encontrada pela integração da amplitude do campo incidente sobre cada zona. Uma vez que, zonas sucessivas estão em oposição de fase, as contribuições de zonas adjacentes tendem a se cancelar, mas não totalmente, pois as amplitudes do campo incidente decrescem a medida que as zonas se afastam do centro. Assim, pode-se mostrar que a maior contribuição para o campo espalhado corresponde à primeira zona de Fresnel. A Figura A.3 ilustra o peso das contribuições correspondentes às sucessivas zonas (área hachurada) para o campo total espalhado. Note que áreas adjacentes dão contribuições opostas devido à oposição de fase correspondentes a estas zonas.

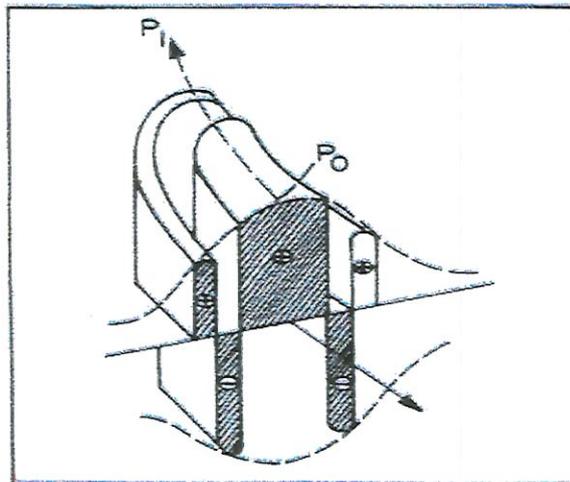


Figura A.3. Peso das contribuições correspondentes às sucessivas Zonas de Fresnel.

APÊNDICE B. SOLUÇÃO GERAL DE KIRCHHOFF

A solução geral de Kirchhoff é baseada no teorema integral de Helmholtz, que relaciona a integral de superfície de uma função escalar e de sua derivada com o valor desta mesma função num ponto qualquer no interior desta superfície. Kirchhoff aplicou este teorema a uma superfície particular de tal forma que a integral de superfície se reduz apenas à área da região espalhadora. Um tratamento mais detalhado é feito por Beckmann & Spizzichino.

B.1. Solução Geral de Kirchhoff para uma Superfície Rugosa em Uma Dimensão

Serão usadas as coordenadas cartesianas x, y, z com origem em 0 e vetores unitários $\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0$. A superfície rugosa será dada pela função

$$\zeta \equiv \zeta(x, y) \quad (1)$$

O nível médio da superfície é o plano

$$z = 0 \quad (2)$$

As quantidades associadas com o campo incidente serão denotadas pelo subscrito 1 e as associadas ao campo espalhado terão subscrito 2. Assim E_1 é o campo incidente e E_2 é o campo espalhado. O meio no espaço $z > \zeta$ é assumido livre e E_1 será linearmente polarizado. Será considerado polarização vertical e horizontal, de forma que teremos somente o campo escalar E_1 do vetor \mathbf{E}_1 , sendo uma onda plana harmônica de amplitude unitária

$$E_1 = e^{ik_1 \cdot \mathbf{r} - i\omega t} \quad (3)$$

onde

$$k_1 = 2\pi / \lambda \quad (4)$$

é o vetor de onda, sempre no plano xy e \mathbf{r} é o vetor raio

$$\mathbf{r} = x\mathbf{x}_0 + y\mathbf{y}_0 + z\mathbf{z}_0 \quad (5)$$

Em particular, para pontos na superfície S , temos

$$\mathbf{r} = x\mathbf{x}_0 + y\mathbf{y}_0 + \zeta(x, y)\mathbf{z}_0 \quad (6)$$

O ângulo de incidência, na direção de propagação, entre \mathbf{E} e o eixo z , será chamado de θ_1 , o ângulo de espalhamento, entre z e \mathbf{k} , será denotado por θ_2 , onde, conforme Figura B.1.

$$k_2 = |\mathbf{k}_2| = |\mathbf{k}_1| = k = 2\pi / \lambda \quad (7)$$

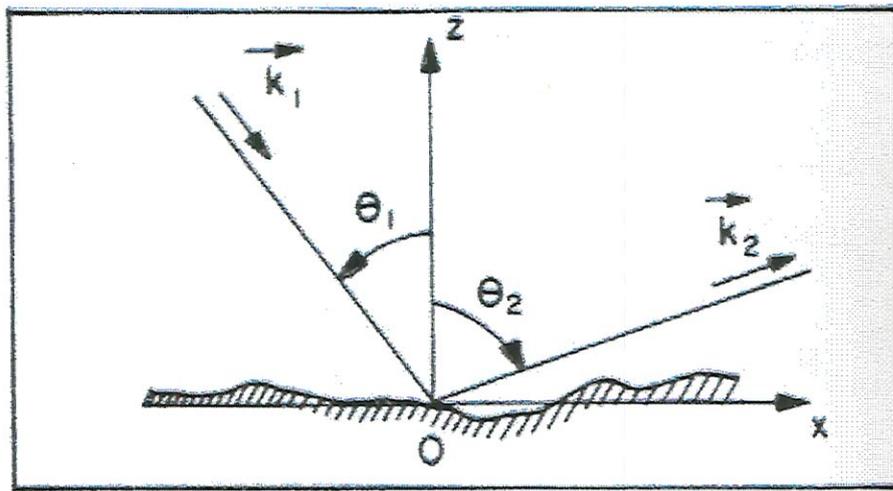


Figura B.1. Notação básica. O ângulo de incidência θ_1 e de espalhamento θ_2 são medidos em relação a z .

Para o espalhamento lateral, fora do plano de incidência $(\mathbf{k}_1, \mathbf{z}_0)$, deve ser introduzido o ângulo θ_3 , conforme Figura B.2. Definindo a polarização de \mathbf{E}_1 e \mathbf{E}_2 , temos: \mathbf{E}_1 terá polarização vertical se está no plano de incidência $\mathbf{k}_1, \mathbf{z}_0$ e similarmente \mathbf{E}_2 será chamado verticalmente polarizado se está no plano de espalhamento $\mathbf{k}_2, \mathbf{z}_0$. Analogamente, na polarização horizontal, \mathbf{E}_1 e \mathbf{E}_2 são normais aos planos de incidência e espalhamento, respectivamente. As quantidades associadas a polarização vertical terão subscrito "+" e as associadas a polarização horizontal terão subscrito "-". Como foi dito E é um escalar, tal que

$$\mathbf{E} = \mathbf{e}.E$$

onde \mathbf{e} é um vetor unitário na direção de E . Em particular

$$E_1^- = E_1^- y_0$$

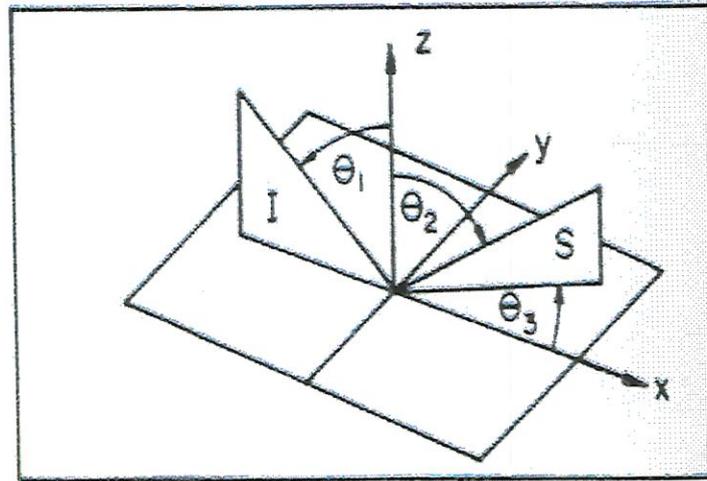


Figura B.2. Geometria do Espalhamento. I é o plano de incidência e S o plano de Espalhamento.

Seja P um ponto de observação e R' a distância de P ao ponto x, y, ζ (x, y) na superfície S, será mostrado que, o campo espalhado E_2 em P é dado pela integral de Helmholtz.

$$E_2(P) = \frac{1}{4\pi} \iint_s \left(E \frac{\partial \psi}{\partial n} - \psi \frac{\partial E}{\partial n} \right) dS \quad (8)$$

onde

$$\psi = e^{ik_2 R'} / R'$$

Como parte das ondas planas espalhadas estão na direção de θ_2 , fazendo $R' \rightarrow \infty$, P é removido da zona de difração de Fraunhofer, então, como visto na Figura B.3

$$k_2 R' = k_2 R_0 - k_2 \cdot r \quad (9)$$

onde R_0 é a distância de P da origem, tal que

$$\psi = \frac{e^{ik_2 R_0 - ik_2 r}}{R_0 - r} \quad (10)$$

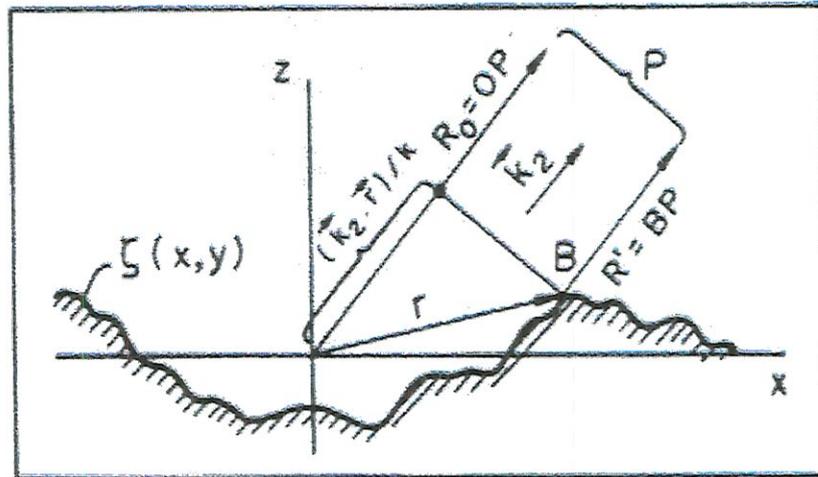


Figura B.3. Geometria utilizada na equação (9)

E e $\partial E/\partial n$ são o campo e sua derivada normal em S . Os valores exatos dessas duas quantidades geralmente não são conhecidos e o método de Kirchhoff ou método da óptica física consiste essencialmente de aproximar os valores de E e $\partial E/\partial n$ em S e calcular a integral (8).

No presente caso, o campo em qualquer ponto da superfície será aproximado por um campo que pode estar presente em um plano tangente àquele ponto (Figura B.4a). A validade desta aproximação será discutida no final do capítulo, a qual obviamente é muito boa quando o raio de curvatura da irregularidade é grande comparada com λ , mas perde a validade para irregularidade do tipo da Figura B.4b

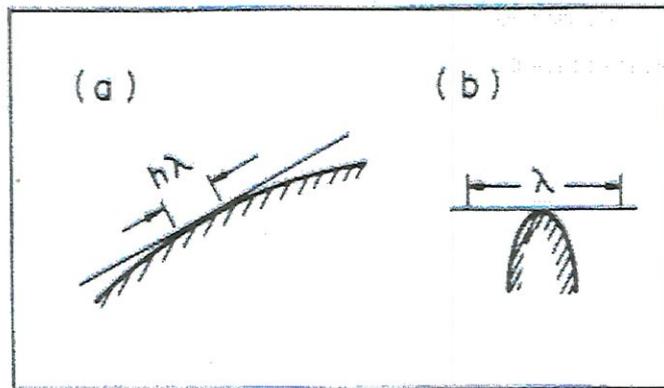


Figura B.4. Plano tangente a um ponto numa superfície rugosa.
 a. raio de curvatura $> \lambda$
 b. raio de curvatura $< \lambda$

Dentro dessa aproximação o campo em S será

$$(E)_s = (1+R)E_1 \quad (11)$$

e

$$(\partial E/\partial n) = (1 - R)E_1 k_1 \cdot n \quad (12)$$

onde \mathbf{n} é a normal a superfície no ponto considerado e R é o coeficiente de reflexão para o plano liso. A segunda relação segue da primeira por diferenciação das ondas incidentes e refletidas ou tomando o campo magnético como

$$(H_s) = (1-R)H_1$$

e usando a equação de Maxwell

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\varepsilon \partial \mathbf{H} / \partial t$$

O coeficiente de reflexão R depende não só do ângulo de incidência e das propriedades elétricas do material, mas também da polarização da onda incidente. Os coeficientes de Fresnel para uma superfície plana lisa são

$$R^+ = \frac{Y^2 \cos \vartheta - \sqrt{(Y^2 - \sin^2 \vartheta)}}{Y^2 \cos \vartheta + \sqrt{(Y^2 - \sin^2 \vartheta)}} \quad (13)$$

$$R^- = \frac{\cos \vartheta - \sqrt{(Y^2 - \sin^2 \vartheta)}}{\cos \vartheta + \sqrt{(Y^2 - \sin^2 \vartheta)}} \quad (14)$$

onde ϑ é o ângulo de incidência "local" (Figura B.5), isto é, o ângulo compreendido entre \mathbf{k}_1 e \mathbf{n} naquele ponto considerado da superfície.

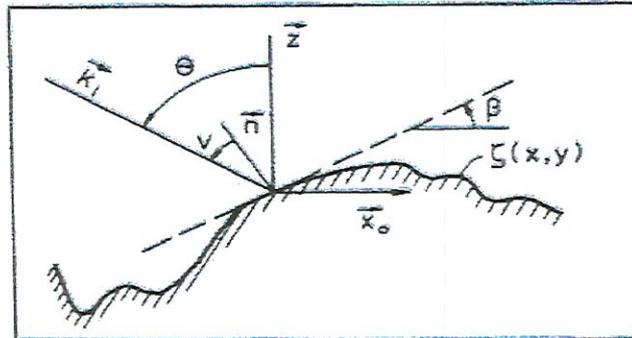


Figura B.5. Geometria de espalhamento "local".

A quantidade Y é a admitância normalizada do meio no espaço $z < \zeta$ é dado por

$$Y = \sqrt{\frac{\epsilon_{rc}}{\mu_{rc}}} \quad (15)$$

onde ϵ_{rc} é a permissividade complexa relativa

$$\epsilon_{rc} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} + i60\lambda\sigma \quad (16)$$

com ϵ sendo a constante dielétrica, σ a condutividade e $\mu_{rc} = \mu / \mu_0$ é a permeabilidade relativa (a qual pode ter uma parte imaginária se o meio tem perdas magnéticas). Limitando-se a uma superfície rugosa em uma dimensão

$$\zeta(x, y) = \zeta(x) \quad (17)$$

constante ao longo do eixo y e \mathbf{n} sempre no plano de incidência xy . Então

$$\upsilon = \theta_1 - \beta = \theta_1 - \arctan \zeta'(x) \quad (18)$$

Substituindo (10), (11) e (12) em (8), se obtém

$$E_2 = \frac{ie^{ikR_0}}{4\pi R_0} \int_s (R\upsilon - p) \cdot ne^{i\upsilon \cdot r} dS \quad (18a)$$

onde foi introduzido os valores

$$\mathbf{v} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2 \quad (19)$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 \quad (20)$$

Resolvendo os vetores em suas componentes cartesianas,

$$\mathbf{v} = k(\text{sen}\theta_1 - \text{sen}\theta_2)\mathbf{x}_0 - k(\text{cos}\theta_2 + \text{cos}\theta_1)\mathbf{z}_0 \quad (21)$$

(Note que $v_x = 0$ para $\theta_1 = \theta_2$, isto é, para espalhamento na direção da reflexão especular, entretanto v_z é zero para $\theta_1 = \theta_2 = \pi/2$)

$$\mathbf{p} = k[(\text{sen}\theta_1 + \text{sen}\theta_2)\mathbf{x}_0 + (\text{cos}\theta_2 - \text{cos}\theta_1)\mathbf{z}_0] \quad (22)$$

$$\mathbf{n} = -\mathbf{x}_0 \text{sen}\beta + \mathbf{z}_0 \text{cos}\beta \quad (23)$$

$$\mathbf{r} = x\mathbf{x}_0 + \zeta(x)\mathbf{z}_0 \quad (24)$$

$$dS = \sec\beta dx, \quad \tan\beta = \zeta'(x) \quad (25)$$

Para uma superfície de $x=-L$ a $x=L$ pode-se escrever (18a) na forma escalar

$$E_2 = \frac{ike^{ikR_0}}{4\pi R_0} \int_{-L}^L (a\zeta' - b)e^{iv_x x + iv_z \zeta} dx \quad (26)$$

onde

$$a = (1 - R)\text{sen}\theta_1 + (1+R)\text{sen}\theta_2 \quad (27)$$

$$b = (1 + R)\text{cos}\theta_2 - (1 - R)\text{cos}\theta_1 \quad (28)$$

A expressão (26) pode ser normalizada introduzindo o coeficiente de espalhamento

$$\rho = E_2 / E_{20} \quad (29)$$

onde E_{20} é o campo refletido na direção especular ($\theta_1 = \theta_2$) por um plano perfeitamente condutor, liso nas mesmas dimensões, sob o mesmo ângulo de incidência na mesma distância, quando a onda incidente é horizontalmente polarizada. Para $L \gg \lambda$, o que deve ser assumido para (11) e (12) serem válidas, uma superfície lisa, perfeitamente condutora, concentrará praticamente toda a energia refletida na direção $\theta_2 = \theta_1$, tal que a lei de conservação de energia requer que

$$|\rho| \leq 1 \quad (30)$$

de (21)

$$v_x = k(\text{sen}\theta_1 - \text{sen}\theta_2) \quad (31)$$

para a direção da reflexão especular $v = 0$; para uma superfície lisa $z=z'=0$ e de (26) e (28)

$$E_{20} = \frac{ike^{ikR_0} L \cos\theta_1}{\pi R_0} \quad (32)$$

Portanto, de (26) e (29)

$$\rho = \frac{1}{4L \cos\theta_1} \int_{1-L}^L (a\zeta' - b) e^{iv_x iv - \zeta} dx \quad (33)$$

De uma forma puramente formal, esta é a solução geral para uma superfície rugosa de condutividade finita em uma dimensão, mas como a e b são através de (27), (28), (13), (14) e (18) funções complicadas de x , a integral (33) não é usada em sua presente forma, exceto para o caso de superfície lisa ($\zeta = 0$), quando se encontra

$$\rho = -\frac{(1+R) \cos\theta_2 - (1-R) \cos\theta_1}{2 \cos\theta_1} \text{sen } cv_x L \quad (34)$$

Para polarização horizontal $R^- = -1$, (34) se reduz a

$$\rho_0 = \text{sen } cv_x L \quad (35)$$

onde foi usado nas duas últimas fórmulas que

$$\text{sen } cx = \frac{\text{sen } x}{x} \quad (36)$$

A fórmula (34) dá o diagrama de espalhamento para um plano condutor finito: substituindo (31) nesta fórmula mostra-se que como $\lambda/L \rightarrow 0$, o lado "lobes" se concentrará na direção $\theta_2 = \theta_1$, fazendo $\rho_0 = 1$ para $\theta_2 \approx \theta_1$ e $\rho_0 = 0$ em todas as outras direções.

A integral (33) é também facilmente integrável quando a e b são constantes. Uma forma de fazer é para um R médio sobre a superfície, fazendo a e b independente de x (será discutido em superfícies não periódicas). Um outro caso importante é para $Y \rightarrow \infty$ ou uma superfície perfeitamente condutora.

De (13) e (14)

$$R^+ = 1, \quad R^- = -1 \quad (37)$$

tal que a e b em (27) e (28) são independentes de x . Removendo os parêntese do integrando em (33) e integrando por partes

$$\rho = \frac{1}{4L \cos \theta_1} \left[\left(b + \frac{av_x}{v_z} \right) \int_{-L}^L e^{iv \cdot r} dx - \frac{ia}{v_z} e^{iv \cdot r(x)} \right]_{-L}^L \quad (38)$$

Substituindo (37) em (27) e (28) se obtém

$$\begin{aligned} a^+ &= 2 \operatorname{sen} \theta_2, \quad b^+ = 2 \operatorname{cos} \theta_2 \\ a^- &= 2 \operatorname{sen} \theta_1, \quad b^- = -2 \operatorname{cos} \theta_1 \end{aligned} \quad (39)$$

Substituindo essas equações em (34) e usando (21), finalmente se obtém, após algumas transformações

$$\rho_{\pm}(\theta_1 + \theta_2) = \pm \sec \theta_1 \frac{1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \frac{1}{2L} \int e^{iv \cdot r} dx + \frac{e^{\pm(L)}}{2L} \quad (40)$$

onde

$$e^{\pm}(L) = \frac{i \sec \theta_1 \sin \theta^{\pm}}{k(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)} e^{iv.r(x)} \Big|_{-L}^L \quad (41)$$

com

$$\theta^+ = \theta_2, \theta^- = \theta_1$$

A quantidade de v.r é dada explicitamente como

$$v.r = \frac{2\pi}{\lambda} [(\sin \theta_1 - \sin \theta_2)x - (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \zeta(x)] \quad (42)$$

A fórmula (40) é a solução geral para uma superfície rugosa, perfeitamente condutora, em uma dimensão. Para $L \gg \lambda$, o segundo termo de (40) é desprezível comparado com o primeiro, reduzindo (40) a simples fórmula

$$\rho = \frac{F_2}{2L} \int_{-L}^L e^{iv.r} dx \quad (43)$$

$$F_2(\theta_1, \theta_2) = \sec \theta_1 \frac{1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \quad (44)$$

B.2. Solução Geral para uma Superfície Rugosa em Duas Dimensões

Os resultados anteriores podem ser estendidos para uma superfície $\zeta(x,y)$ rugosa em ambas dimensões. A principal dificuldade é que R^+ e R^- , dados em (13) e (14) da seção B.2 se aplicam somente para polarização “local”, a qual não é necessariamente idêntica a polarização no plano xy . Se for considerado o efeito da polarização, deve-se resolver o campo E_1 tendo uma componente “horizontalmente localizada” e outra “verticalmente localizada”. As duas componentes serão refletidas com coeficientes R^+ e R^- , e como esses dois coeficientes complexos não são iguais, uma onda linearmente polarizada será despolarizada em uma onda elipticamente polarizada.

Como na Figura A.5 as ondas espalhadas nas direções θ_2 e θ_3 são devido a ondas elementares refletidas de planos tangentes que são mutuamente paralelos. Esses planos irão despolarizar a onda incidente da mesma forma. Para condutividade finita, os coeficientes de reflexão R , nas condições de contorno (11) e (12) anteriores, terão agora uma complicada dependência das propriedades elétricas, da inclinação, do ângulo de incidência e da polarização da onda incidente. Será apresentado agora, somente o valor escalar de E_2 .

Repetindo o procedimento anterior

$$\rho = \frac{1}{4XY \cos\theta} \int_{1-x-y}^x \int_0^y (a\zeta_x'' + c\zeta_y' - b) e^{iv \cdot r} dx dy \quad (45)$$

onde

$$v = k [(\sin\theta_1 - \sin\theta_2 \cos\theta_3) x_0 - \sin\theta_2 \sin\theta_3 y_0 - (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) z_0] \quad (46)$$



$$a = (1 - R)\text{sen}\theta_1 + (1 + R)\text{sen}\theta_2 \cos\theta_3 \quad (47)$$

$$b = (1 + R) \cos\theta_2 - (1 - R) \cos\theta_1 \quad (48)$$

$$c = (1 + R) \text{sen}\theta_2 \text{sen}\theta_3 \quad (49)$$

onde R não é o coeficiente de Fresnel. Para uma superfície perfeitamente condutora, fazendo R=1, obtém-se

$$a = 2 \text{sen}\theta_2 \cos\theta_3 \quad (50)$$

$$b = 2\cos\theta_2 \quad (51)$$

$$c = 2 \text{sen}\theta_2 \text{sen}\theta_3 \quad (52)$$

Se a, b, c são constantes devido a condutividade infinita ou outras razões, (45) pode ser integrado por partes, como na seção anterior obtendo-se

$$\rho = \frac{1}{4XY \cos\theta_1} \left[\left(b + \frac{av_x + cv_y}{v_z} \right) \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y e^{iv.r} dx dy - \frac{ic}{v_z} \int_{-X}^X e^{iv.r} \Big|_{-Y}^Y dx - \frac{ia}{v_z} \int_{-X}^X e^{iv.r} \Big|_{-Y}^Y dy \right] \quad (53)$$

Substituindo (50) e (52) em (53),

$$\rho(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \frac{1 + \cos\theta_1 \cos\theta_2 - \text{sen}\theta_1 \text{sen}\theta_2 \cos\theta_3}{\cos\theta_1 (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)} \frac{1}{A} \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y e^{iv.r} dx dy + \frac{e(X,Y)}{A} \quad (54)$$

onde $A=4XY$ é a área de S projetada no plano xy e $e(X,Y)$ é dada pelos dois últimos termos de (53). O segundo termo de (54) é um "efeito de borda",

desprezível quando comparado com o primeiro termo para $A \gg \lambda^2$; neste caso (54) se reduz a simples fórmula

$$\rho = \frac{F_3}{A} \iint_A e^{iv \cdot r} dx dy \quad (55)$$

com

$$F_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \frac{1 + \cos\theta_1 \cos\theta_2 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3}{\cos\theta_1 (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)} \quad (56)$$

Para espalhamento longitudinal ($\theta_3 = 0$), $F_3 = F_2$, tal que (55) se reduz a (45) da seção anterior. As ondas espalhadas no plano de incidência xy (longitudinalmente espalhadas) não são despolarizadas se a onda incidente é polarizada verticalmente ou horizontalmente. Isto significa substituir $\theta_3 = 0$ em (49) resultando $c=0$ em (44); para ondas longitudinalmente espalhadas de ζ'_y é irrelevante e não há despolarização e R será, como no caso unidimensional, idêntico aos coeficientes de Fresnel R^+ e R^- , dependendo da polarização de E_1 . Fisicamente, isto é claro porque ondas espalhadas longitudinalmente originam somente em planos tangentes com n no plano xy .

B.3. Propriedades da Solução Geral

A fórmula (54) do item anterior pode ser aplicada na solução para superfícies rugosas periódicas ou aleatórias. O número de efeitos comuns para espalhamento de ondas de qualquer superfície, os quais podem ser encontrados a partir da solução geral.

Antes de investigar esses efeitos, deve-se observar uma questão mais importante: as condições de validade das soluções (40) em B.1 e (54) em B.2 para uma e ambas dimensões respectivamente.

- A. A superfície é perfeitamente condutora, ou geralmente, as quantidades a , b , c em (47)-(49) da seção anterior são constantes.
- B. Interações mútuas das irregularidades (espalhamento múltiplo) podem ser desprezados.
- C. A onda incidente é plana e linearmente polarizada com o vetor E paralelo ou no plano de incidência xy .
- D. O plano de observação é suficientemente longe da superfície para enxergar as ondas espalhadas como planas.

A validade desta solução é essencialmente limitada pela validade da relação

$$(E)_s = (1 + R)E_1 \quad (57)$$

isto é, o campo em qualquer ponto da superfície é expresso como a soma do campo incidente e refletido, com coeficiente de reflexão R do plano, o qual é tangente no ponto considerado. A condição de contorno (57), embora no caso do plano infinito, pode ser uma boa aproximação para uma superfície composta de irregularidades com pequenas curvaturas. De considerações geométricas Brekhovskikh encontrou o critério

$$4 \pi r_c \cos \nu \gg \lambda \quad (58)$$

onde r_c é o raio de curvatura e $\nu = (-\mathbf{k}_1, \mathbf{n})$ o ângulo local de incidência. Este é o principal limite de validade de (57) nos modelos de superfícies para as quais a solução será aplicada. Em geral, a superfície deve ter irregularidades com pequeno raio de curvatura.

Outra restrição para o uso dos coeficientes de Fresnel é que $(kr_c / 2)^{1/3} \gg 1$. Pode ser violado para baixas frequências e incidência próxima de $\pi/2$.

Investigando, agora, o fator que aparece na equação (56) da seção anterior

$$F_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \frac{1 + \cos\theta_1 \cos\theta_2 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3}{\cos\theta_1(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)} \quad (59)$$

Nota-se que para o plano de incidência, para $\theta_3 = 0$,

$$F_3(\theta_1, \theta_2, 0) = \sec\theta_1 \frac{1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos\theta_1 + \cos\theta_2} \quad (60)$$

Em primeiro lugar, duas coisas parecem erradas: para $\theta_1 = \pi/2$, esta expressão fica infinita e F não é simétrica em θ_1 e θ_2 , de forma que o teorema da reciprocidade aparece violado. Mas nenhuma das duas são verdadeiras, $\theta_1 = \pi/2$ corresponde a incidência razante, quando se tem só reflexão especular. Para direção da reflexão especular ($\theta_2 = \theta_1$, $\theta_3 = 0$), para qualquer θ_1 ,

$$F_3(\theta_1, \theta_2, 0) = F_{esp} = \frac{1 + \cos 2\theta_1}{2 \cos^2 \theta_1} \equiv 1 \quad (61)$$

de forma que (60) só poderá ser infinita para ondas não especularmente em incidência razante, essas ondas não existem.

O teorema da reciprocidade, mostra que o campo em um ponto A devido a uma origem em B é igual ao campo em B quando a origem é em A sob condições equivalentes, em um meio de propagação linear. Da Figura B.6, pode-se observar que se uma onda incidente ao longo do raio A(θ_1) gera uma onda espalhada, dentre outras, ao longo do raio B(θ_2), então uma onda incidente ao longo de B(θ_2) deve gerar uma onda espalhada, dentre outras, ao longo de A(θ_1). Portanto, qualquer fórmula que apresenta um campo em função de θ_1 e θ_2 deve produzir o mesmo valor quando estes são trocados. Pode-se confirmar, assim, que as fórmulas anteriores para uma ou ambas dimensões são consistentes com o teorema da reciprocidade.

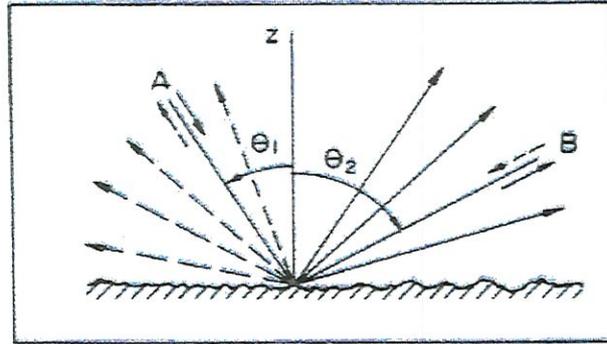


Figura B.6. Reciprocidade no espalhamento

APÊNDICE C. RUGOSIDADE EM SUPERFÍCIES PERIÓDICAS

Todos os modelos para superfícies rugosas podem ser divididos em duas classes: superfícies com perfis periódicos ou aleatórios. O tratamento matemático para cada tipo de superfície é completamente diferente.

Neste capítulo serão tratadas superfícies com irregularidades periódicas, como ondulações senoidais, perfis dente-de-serra, corrugações regulares, etc. A teoria será tratada de forma geral, e pode posteriormente ser usada para estudo de perfis periódicos específicos, tanto em relação a forma das irregularidades como ao tamanho em relação ao comprimento de onda da luz incidente.

C.1. Solução Geral de Kirchhoff para o Campo Espalhado por uma Superfície Periódica Perfeitamente Condutora.

Assumindo primeiro rugosidade na dimensão x , com $\zeta(x)$ periódico:

$$\zeta(x) = \zeta(x + \Lambda) \quad (1)$$

onde Λ é o período ou comprimento de onda da superfície.

Neste caso, integrando $\exp(iv \cdot r)$ na equação (40) da seção B.1, será periódico com período Λ se

$$v_x \Lambda = 2\pi m \quad (2)$$

onde m é qualquer inteiro. De (21) da seção B.1,

$$v_x = \frac{2\pi}{\lambda} (\text{sen}\theta_1 - \text{sen}\theta_2) \quad (3)$$

e (2) pode ser escrito como

$$\text{sen}\theta_{2m} = \text{sen}\theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (4)$$

Esta equação é conhecida em teoria de rede e merece alguma atenção, agora seja

$$\frac{L}{\Lambda} = n + n_1 \quad (5)$$

onde n é um inteiro e n_1 é uma fração ($0 \leq n_1 \leq 1$).

Como $\exp(iv \cdot r)$ é periódica, com período Λ , pode-se escrever

$$\int_{-L}^L e^{iv \cdot r} dx = 2n \int_0^{\Lambda} + \int_0^{n_1 \Lambda} + \int_{-n_1 \Lambda}^0 = \frac{2L}{\Lambda} \int_0^{\Lambda} + \int_{-n_1 \Lambda}^{n_1 \Lambda} - 2n_1 \int_0^{\Lambda} \quad (6)$$

onde foi omitido o integrando $\exp(iv \cdot r)$.

Substituindo (2) em (41) da seção B.1,

$$e(1) = e(2\pi m n_1 / v_x) \quad (7)$$

Substituindo (5) e (7) na solução geral (40) da mesma seção, obtém-se a fórmula básica para uma superfície periódica perfeitamente condutora em uma dimensão:

$$\rho \pm (\theta_1, \theta_2) = \pm \sec \theta_1 \frac{1 + \cos(\theta_1 + \theta_{2m})}{\cos \theta_1 + \cos \theta_{2m}} \frac{1}{2\Lambda} \int_0^{\Lambda} e^{iv \cdot r} dx + \frac{C(n_1)}{2L} \quad (8)$$

onde

$$C(n_1) = F_2(\theta_1, \theta_2) \left[\int_{-n_1 \Lambda}^{n_1 \Lambda} e^{iv \cdot r} dx - 2n_1 \int_0^{\Lambda} e^{iv \cdot r} dx \right] + e(2\pi m n_1 / v_x) \quad (9)$$

é o termo de correção ou “efeito de borda”, o qual vai para zero para $n_1 = 0$, isto é, quando L/Λ é inteiro; em qualquer caso, o segundo termo de (8) é desprezível quando $L \gg \Lambda$.

O ângulo de espalhamento θ_{2m} é determinado pela equação da rede (4). Cada m inteiro corresponde a um modo propagado de espalhamento na direção θ_{2m} . O número total de modos possíveis é limitado pela condição

$$|\sin\theta_{2m}| \leq 1 \quad (10)$$

Pode-se observar, da equação (4) que o modo para $m=1$ é o modo especular, $m=\pm 1$ está um em cada lado da direção especular. Os modos continuam assim um de cada lado do modo especular até o último que satisfaça (10); eles são propagados em ângulos próximos de $\theta_{2m} \pm \pi/2$ (Vide Figura C.1).

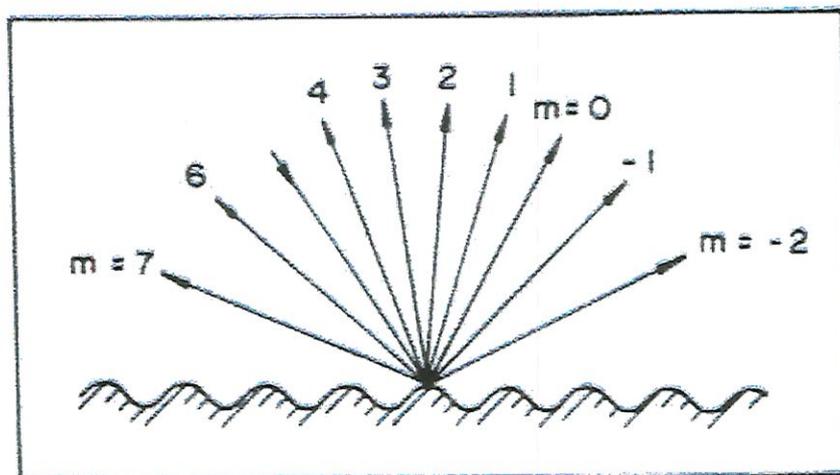


Figura C.1 Direções nas quais os vários modos m são espalhados em uma superfície periódica

Se λ/Λ é pequeno, segue de (4) que m terá muitos valores inteiros antes de (10) ser violado, tal que se o comprimento de onda da radiação incidente é pequeno comparado com o período ou “comprimento de onda” da superfície, a radiação incidente será dividida em muitas ondas

espalhadas. Por outro lado, pode-se concluir de (4) que para $\lambda/\Lambda \gg 1$ existirá somente um modo $m=0$, tal que para $\lambda \gg \Lambda$ qualquer superfície periódica refletirá especularmente com rugosidade desprezível.

Na equação (4), fazendo m constante e aumentando λ , observa-se que os modos se propagam mais próximos da horizontal, sendo esta uma condição limite para a equação (10). Isto é conhecido com “modo de corte”, para uma dada frequência.

A equação da rede (4), é obtida da teoria de redes, considerando uma rede de sulcos paralelos, espaçados por uma distância Λ , (Figura C.2) excitada por uma onda incidente em um ângulo θ_1 . Se a diferença de fase entre as ondas A e B for calculada a partir da geometria da figura, pode-se determinar todos os ângulos θ_2 , para os quais a diferença de fase é $2m\pi$ (isto é, os ângulos para as ondas espalhadas estão em fase), portanto, a equação (4) é obtida. Neste caso, o princípio físico é similar: θ_{2m} é a direção para qual as ondas espalhadas de períodos individuais da superfície estão em fase e se reforçarão uma com as outras dando os modos ou os “lóbulos laterais” no diagrama de espalhamento.

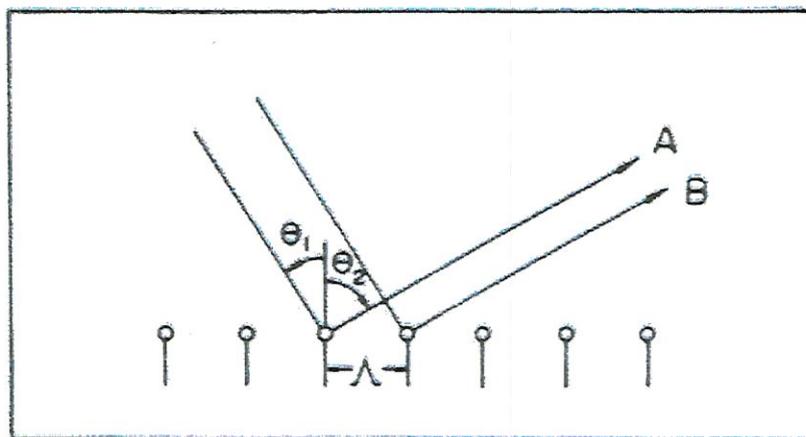


Figura C.2 Derivação de uma equação de rede

Para calcular o campo espalhado em direções diferentes de θ_{2m} , correspondentes a um máximo em “lóbulos laterais”, utiliza-se a solução (40), da seção B.1 . Desconsiderando os “efeitos de borda”, $n_1 = 1$ tal que $L/\Lambda = n$ é inteiro. Dividindo o comprimento $2L$ em $2n$ segmentos, cada um se

estendendo de $x = \mu\Lambda$ a $x = (\mu + 1)\Lambda$, onde μ é um inteiro ($-n \leq \mu \leq -1$), obtém-se

$$\frac{1}{2L} \int_{-L}^L e^{iv.r} dx = \frac{1}{2n\Lambda} \sum_{\mu=-n}^{n-1} \int_{\mu\Lambda}^{(\mu+1)\Lambda} e^{iv_x x + v_z \zeta(x)} dx = \frac{1}{2n\Lambda} \sum_{\mu=-n}^{n-1} e^{iv_x \Lambda \mu} \int_0^\Lambda e^{iv_x x' + v_z \zeta(x')} dx' \quad (11)$$

onde a segunda igualdade vem da substituição de $x = x' + \mu\Lambda$. Substituindo agora

$$v_x \Lambda = 2\pi p \quad (12)$$

ou expressando v_x explicitamente,

$$p = \frac{\lambda}{\Lambda} (\text{sen}\theta_1 - \text{sen}\theta_2) \quad (13)$$

Esta é uma equação de rede generalizada, formalmente idêntica a equação (4), exceto que p não é necessariamente um inteiro. De (12) e (11), pode-se encontrar

$$\frac{1}{2L} \int_{-L}^L e^{iv.r} dx = \frac{1}{2n} \sum_{\mu=-n}^{n-1} e^{i2p\pi\mu} \frac{1}{\lambda} \int_0^\Lambda e^{iv.r} dx \quad (14)$$

o qual difere do resultado anterior pelo fator

$$W = \frac{1}{2n} \sum_{\mu=-n}^{n-1} e^{i2p\pi\mu}, \quad |W| \leq 1 \quad (15)$$

com $W=1$ quando p é inteiro. Tratando (15) como uma série finita geométrica, encontra-se

$$W = \frac{\text{sen } 2np\pi}{2n \text{ sen } p\pi} e^{i2p\pi} \quad (16)$$

tal que a solução, em qualquer θ_2 (não necessariamente igual a θ_{2m}), para uma superfície periódica perfeitamente condutora, pode ser obtida da equação (40) da seção B,

$$\rho \pm (\theta_1, \theta_2) = \pm W \sec \theta_1 \frac{1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \frac{1}{\Lambda} \int e^{iv.r} dx + O\left(\frac{n_1}{n}\right) \quad (17)$$

onde $O(n_1/n)$ representa o termo de correção que se anula quando L/Λ é inteiro: W é dado por (16) e p por (13). A solução (17) se reduz a (8) quando p é inteiro.

Na prática não é necessário calcular o diagrama de espalhamento ponto a ponto a partir de (17); as direções dos máximos dos “lóbulos” são dadas por (4) e seus valores por (8), outra quantidade de interesse, a largura média desses “lóbulos”, pode ser encontrada por (15). $|W|$ é máximo para $p=m$ (inteiro, correspondente ao ângulo de espalhamento θ_{2m} ; os zeros próximos são em $p = m \pm 1/2n$, correspondente aos ângulos $\theta_{2m} \pm \Delta\theta_{2m}$, onde θ_{2m} é a metade da largura do “lóculo” (Figura C.3). Substituindo esses valores de p em (13)

$$\text{sen}\theta_{2m} - \text{sen}(\theta_{2m} \pm \Delta\theta_{2m}) = \frac{\lambda}{2n\Lambda} \quad (18)$$

para qual o valor exato de $\Delta\theta_{2m}$ pode ser encontrado; para $\lambda \ll 2n\Lambda = 2L$ e θ_{2m} não tão próximo de $\pi/2$, encontra-se

$$\Delta\theta_{2m} \cong \frac{\lambda}{2L} \sec\theta_{2m} \quad (19)$$

enquanto, para $\theta_{2m} \rightarrow \pi/2$, encontra-se de (18) $\Delta\theta_{2m} \rightarrow 0$.

A solução (8) pode ser estendida para uma superfície com corrugações periódicas em duas dimensões.

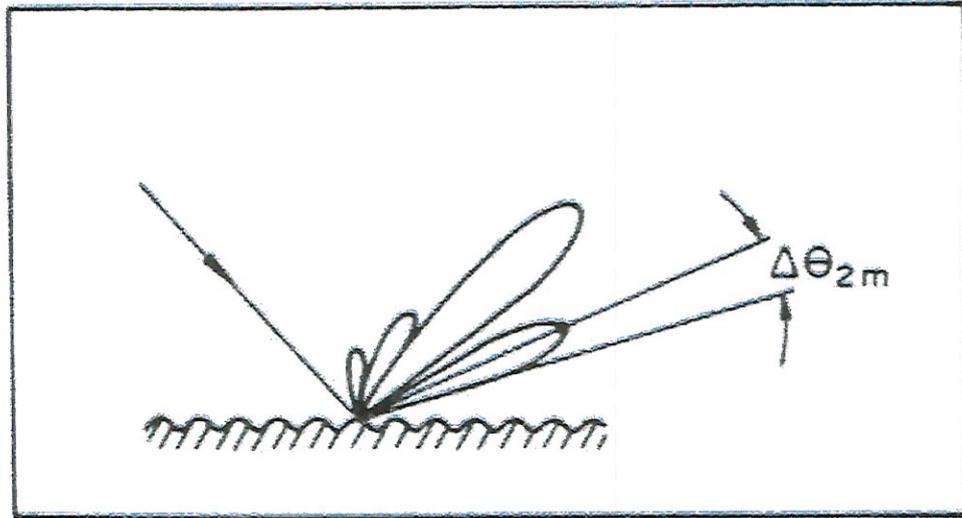


Figura C.3 Meia largura de um lóbulo lateral.

Seja $\zeta(x,y)$ periódica com períodos Λ_x e Λ_y :

$$\zeta(x,y) = \zeta(x + \Lambda_x, y + \Lambda_y) \quad (20)$$

Neste caso, a expressão $\exp(iv.r)$ no integrando de (44), na seção B.2 será periódica, com períodos Λ_x e Λ_y , se

$$v_x \Lambda_x = 2m\pi, \quad v_y \Lambda_y = 2n\pi \quad (21)$$

onde m e n são inteiros arbitrários, tal que agora, as equações da rede expressam v_x e v_y explicitamente de (45) da seção B.2,

$$\text{sen}\theta_{2mn} \cos\theta_{3mn} = \text{sen}\theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda_x}, \quad \text{sen}\theta_{2mn} \text{sen}\theta_{3mn} = n \frac{\lambda}{\Lambda_y} \quad (22)$$

Então, (44) da seção B.2 pode ser escrita como

$$\rho = F_3(\theta_1, \theta_{2mn}, \theta_{3mn}) \frac{1}{\Lambda_x \Lambda_y} \int_0^{\Lambda_x} \int_0^{\Lambda_y} e^{iv \cdot r} dx dy + e\left(\frac{\Lambda_x \Lambda_y}{A}\right) \quad (23)$$

onde F_3 é dada por (45) da seção B.2, com ângulos de espalhamento θ_{2mn} e θ_{3mn} satisfazendo (22). Cada grupo de inteiros m, n corresponde a um modo de espalhamento; $m=n=0$ é o modo fundamental ou especular.

Todas essas considerações tem sido feitas baseadas na condição de que o ponto de observação P está longe da superfície, de forma que somente ondas planas sejam recebidas neste ponto, isto é, na direção θ_2 ou (θ_2, θ_3) . Isto está simbolicamente mostrado na Figura C.4. Para uma superfície periódica, o campo total espalhado numa certa direção é dado pela adição das contribuições de cada período naquela direção. Pode-se assumir, portanto, que se P está a uma distância finita de S , o campo em P pode ser determinado como a soma das contribuições, isto é, modos de onda, espalhados para P por diferentes períodos, situados em diferentes direções.

$$E_2(P) = \sum_m \sum_n E_2(v_{2mn}, \theta_{3mn}) \quad (24)$$

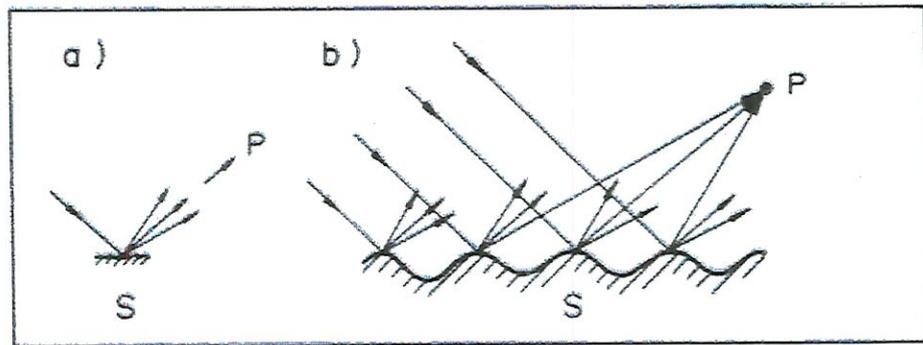


Figura C.4. Campo em um ponto de observação

a . um modo na zona de Fraunhofer

b . soma de muitos modos espalhados na zona Fresnel.

APÊNDICE D. SUPERFÍCIES COM CORRUGAÇÕES ALEATÓRIAS

De uma forma geral as superfícies não são periódicas. Uma superfície com corrugações aleatórias pode ser tratada como uma superposição de várias redes (corrugações periódicas), de períodos diferentes, ou pela distribuição estatística de suas alturas em relação ao nível médio.

Esta seção trata o campo espalhado por uma superfície rugosa, gerado por um processo aleatório estacionário contínuo, com o objetivo de encontrar o valor médio do campo e da potência média espalhada em uma direção arbitrária para qualquer ângulo de incidência. Esses valores médios representam ainda informações incompletas, pois a solução final deve apresentar a distribuição de probabilidade em torno desses valores médios. Pode-se obter uma expressão para coeficiente de espalhamento integrado angularmente. Esta expressão relaciona a altura média das irregularidades superficiais com o espalhamento total integrado.

D.1 Superfície Rugosa Como Um Processo Aleatório

Uma quantidade aleatória pode ser encontrada não somente quando se calcula seu valor médio, mas quando a distribuição de probabilidade em torno desse valor médio é conhecida. No caso especial de um único valor ao invés de uma distribuição, é chamado “solução exata”, que é muito mais fácil de encontrar que uma “solução estatística”, a qual inclui a “exata” como caso especial.

Como demonstrado nas seções anteriores, pode-se encontrar a solução de Kirchhoff para o espalhamento em uma superfície rugosa e determinar o coeficiente de espalhamento ρ se $\zeta(x,y)$ é dado. Foi encontrada a solução para os casos idealizados $\zeta(x,y)$ periódico ou constante (superfície lisa). O caso mais realístico e também mais difícil é determinar a distribuição de probabilidade de ρ quando ζ é uma função aleatória de x e y ; tendo os dois casos ideais incluídos na solução geral. Uma superfície lisa é o caso

limite quando a variância vai para zero, e uma superfície periódica é o caso quando a função correlação do processo é periódica.

As superfícies rugosas na natureza (terra, mar, camadas atmosféricas) podem ser descritas por distribuições estatísticas de seus desvios em torno de um certo valor médio. Mas, uma melhor descrição pode ser feita usando a função correlação ou autocorrelação de coeficientes que apresenta o aspecto da superfície. Pode-se utilizar uma função aleatória para a superfície, ζ de coordenada x ou x e y , isto é, $\zeta(x)$ ou $\zeta(x,y)$, para uma ou duas dimensões, como descrito nos Apêndices.

Aplicando a solução geral da seção B.1 (equação 40) e tomando o caso unidimensional, quando a superfície é dada por um processo aleatório estacionário $\zeta(x)$, constante na direção y . Assumindo valores de alturas z , representados como um vetor \mathbf{k} com uma densidade de probabilidade $Z(\mathbf{k})$ e o valor médio dado por

$$\langle \zeta \rangle = 0 \quad (1)$$

e considerando o valor médio da integral

$$\left\langle \int_{-L}^L e^{iv_x r} dx \right\rangle = \int_{-L}^L e^{iv_x x} \langle e^{iv_z \zeta} \rangle dx = \langle e^{iv_z \zeta} \rangle \int_{-L}^L e^{iv_x x} dx \quad (2)$$

desde que

$$\langle e^{iv_z \zeta} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} Z(k) e^{iv_z z} dz = \chi(v_z) \quad (3)$$

Da teoria de probabilidade, pode-se usar a definição de função característica $\chi(v_z)$, (que é exceto pelo fator $1/\sqrt{2\pi}$ a transformada de Fourier de $Z(\mathbf{k})$, também chamada densidade espectral associada com a função $Z(\mathbf{k})$)

$$\left\langle \int_{-L}^L e^{iv_z r} dx \right\rangle = \chi(v_z) \int_{-L}^L e^{iv_z x} dx \quad (4)$$

Substituindo (3) e (4) em (40) da seção B.1, encontra-se a importante relação

$$\langle \rho \rangle = \chi(v_z) \rho_0 \quad (5)$$

$$\rho_0 = \text{sencv}_x L \quad (6)$$

é como em (34) e (35) do apêndice B.1, o coeficiente de espalhamento de uma superfície lisa.

Uma superfície rugosa $\zeta(x,y)$ é sempre gerada pela superposição de muitas variáveis aleatórias com diferentes distribuições:

$$\zeta = \zeta_1 + \zeta_2 + \dots \quad (7)$$

e se $\chi(v_z)$ é uma função característica de ζ , e se χ_1, χ_2, \dots são funções características de ζ_1, ζ_2, \dots respectivamente, usando a propriedade básica das funções características, onde $\chi = \chi_1 \chi_2 \dots$, fica na forma

$$\langle \rho \rangle = \chi_1 \chi_2 \dots \rho_0 \quad (8)$$

Esta é uma das grandes vantagens de expressar o campo médio (ou coeficiente de espalhamento) por meio das funções características

associadas com a superfície. Como ρ é uma quantidade complexa, seu valor médio

$$|\rho| = \sqrt{\rho\rho^*} \quad (9)$$

onde o asterístico significa o complexo conjugado. A média quadrática de (9),

$$\langle \rho\rho^* \rangle = \langle |\rho|^2 \rangle = \left\langle \left| \frac{E_2}{E_{20}} \right|^2 \right\rangle \quad (10)$$

é proporcional à potência média espalhada, o que pode ser chamado também como a variância de ρ , $D\{\rho\}$, e para a variância do campo espalhado $D\{E_2\}$, onde se pode escrever

$$\langle \rho\rho^* \rangle = \langle \rho \rangle \langle \rho \rangle^* + D\{\rho\} = \langle \rho \rangle \langle \rho \rangle^* + \frac{1}{|E_{20}|^2} D\{E_2\} \quad (11)$$

usando as relações (a) e (b) abaixo, da teoria de probabilidade

$$D\{A\zeta\} = A^2 D\{\zeta\} \quad (a)$$

$$D\{\rho\} = \langle \rho\rho^* \rangle - \langle \rho \rangle \langle \rho \rangle^* \quad (b)$$

O valor da raiz média quadrática de ρ é dado por

$$\rho_{RMS} = \sqrt{\langle \rho\rho^* \rangle} \quad (12)$$

Desta forma, pode-se encontrar todas as quantidades de interesse determinando o valor de $\langle \rho\rho^* \rangle$, que está diretamente relacionado com a

rugosidade média quadrática δ_{rms} pela expressão de Beckmann & Spizzichino:

$$\langle \rho_{RMS} \rangle = \exp \left[- \left(\frac{4\pi\delta \cos\theta_1}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (13)$$

sendo o espalhamento total integrado (TIS) dado pela expressão, conforme referência [BENNETT & MATTSON, 1989],

$$TIS = \frac{R_d}{R_d + R_e} \quad (14)$$

onde R_d = refletância difusa e R_e = refletância especular, ou pela equação,

$$TIS = 1 - \exp \left[- \left(\frac{4\pi\delta \cos\theta_1}{\lambda} \right)^2 \right] \cong \left(\frac{4\pi\delta \cos\theta_1}{\lambda} \right)^2 \quad (15)$$

pode-se obter, para incidência normal, a altura média das irregularidades,

$$\delta_{rms}^2 = \frac{R_d}{R_d + R_e} \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2} \quad (16)$$