

**Ana Lia Pires Camargo**

**Espalhamento de luz laser em superfícies  
metálicas: aplicação no estudo de rugosidade**

Volta Redonda

2018

**Ana Lia Pires Camargo**

**Espalhamento de luz laser em superfícies  
metálicas: aplicação no estudo de rugosidade**

Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Mestre em Física.

Orientador:

Prof. Dr. JOSÉ AUGUSTO OLIVEIRA HUGUENIN

Volta Redonda

2018

Ficha catalográfica automática - SDC/BIF

C172e Camargo, Ana Lia Pires  
Espalhamento de luz laser em superfícies metálicas:  
aplicação no estudo de rugosidade / Ana Lia Pires Camargo ;  
José Augusto Oliveira Huguenin, orientador. Niterói, 2018.  
78 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Niterói, 2018.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGF.2018.m.14665939705>

1. Speckle. 2. Rugosidade (Superfície). 3. Análise de  
superfície. 4. Produção intelectual. I. Título II.  
Huguenin, José Augusto Oliveira, orientador. III. Universidade  
Federal Fluminense. Instituto de Física.

CDD -

Biblioteca responsável: Danieli Brabo de Moraes - CRB7/5805

## Agradecimentos

Agradeço à toda minha família pelo incondicional apoio e ajuda em todas as circunstâncias, acadêmicas ou não.

Agradeço ao meu namorado, por toda ajuda desde a graduação, com as disciplinas, conselhos e por ouvir sempre com carinho meus desabafos.

Agradeço também todos meus professores, desde a graduação até o mestrado, pelos ensinamentos e inspirações. Em especial, agradeço ao meu orientador pela segunda vez, Prof. José Huguenin, pela imensa ajuda, direcionamento, compreensão e orientação durante todo o processo.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Fundamentos teóricos</b>	<b>4</b>
2.1	Equação de onda . . . . .	4
2.2	Polarização . . . . .	7
2.3	Rugosidade de superfícies . . . . .	15
2.4	Padrões de speckle . . . . .	17
2.4.1	Planos de observação do padrão de speckle . . . . .	19
2.5	Expoente de Hurst . . . . .	21
2.5.1	Cálculo do expoente do Hurst . . . . .	22
2.5.2	Generalização do expoente de Hurst para uma imagem digital . . . . .	25
2.6	Depolarização da luz . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Preparação e caracterização de amostras</b>	<b>29</b>
3.1	Preparação das amostras . . . . .	29
3.2	Caracterização das amostras . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Estudo comparativo entre perfis de superfícies metálicas e do padrão de <i>speckle</i> por meio do expoente de Hurst</b>	<b>35</b>
4.1	Esquema Experimental para obtenção de padrões de speckle . . . . .	36

4.2	Resultados . . . . .	37
4.2.1	Expoente de Hurst para o perfil da superfície . . . . .	38
4.2.2	Expoente de Hurst para os padrões de <i>speckle</i> . . . . .	39
4.2.3	Expoente de Hurst do padrão de speckle e do perfil de superfície . . . . .	39
4.2.4	Análise de resultados . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Medida de rugosidade a partir da depolarização</b>	<b>45</b>
5.1	Esquema Experimental . . . . .	45
5.2	Resultados e discussões . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>51</b>
<b>A</b>	<b>Lista de trabalhos produzidos</b>	<b>63</b>
A.1	. . . . .	63
A.2	. . . . .	64
<b>B</b>	<b>Código em C para o cálculo do expoente de Hurst</b>	<b>65</b>

# Lista de Figuras

2.1	Esquema ilustrativo da polarização linear. . . . .	8
2.2	Projeção dos campos $\mathbf{E}$ e $\mathbf{H}$ , polarizados linearmente, em um plano fixo . . . . .	9
2.3	Representação de diferentes campos elétricos $\mathbf{E}_1$ e $\mathbf{E}_2$ que são possíveis soluções da equação de onda. . . . .	10
2.4	Diferentes possíveis projeções de acordo com o ângulo $\delta$ . . . . .	11
2.5	Trajetória dos campos em uma polarização elíptica e sua projeção no plano. . . . .	11
2.6	Projeções da polarização circular . . . . .	12
2.7	Esféra de poincaré. . . . .	13
2.8	Representação da polarização de um feixe de luz feita por um PBS. . . . .	14
2.9	a) Projeção geométrica da amostra real, sem rugosidade. b) Amostra real com rugosidade. . . . .	15
2.10	Perfil efetivo de uma amostra sem qualquer tipo de filtragem. . . . .	16
2.11	Linha média e superfície efetiva de uma amostra rugosa de comprimento $l_e$ . A soma das áreas do gráfico A1 e A2 devem ser iguais a área 3 por definição. . . . .	17

2.12	Esquema da incidência da luz em uma superfície com picos de rugosidade do mesmo tamanho que o comprimento de luz $\lambda$ . A luz é então refletida em direções aleatórias. . . . .	18
2.13	Exemplo de um padrão de speckle. . . . .	18
2.14	Plano difração: não há a utilização de lentes. . . . .	19
2.15	Ao usarmos lente no processo, a obtenção de speckle se dá no plano imagem. . . . .	20
2.16	<sup>1</sup> Exemplo de uma série temporal. O número de passageiros de uma companhia aérea ao passar dos meses. . . . .	22
2.17	<sup>2</sup> Série persistente. É possível ver que os pontos seguem uma tendência de repetir o comportamento anterior no gráfico. . . . .	24
2.18	<sup>3</sup> Série antipersistente. Os pontos tendem a mudar o comportamento anterior, gerando um comportamento menos previsível. . . . .	24
2.19	Reflexão de um feixe em uma superfície lisa. . . . .	26
2.20	Depolarização de um feixe ao incidir em uma amostra rugosa. . . . .	27
3.1	Perfil 3D da amostra menos rugosa, de lixa 600 MESH . . . . .	30
3.2	Perfil 3D da amostra mais rugosa, de lixa 80 MESH . . . . .	31
3.3	Imagem obtida diretamente do microscópio confocal de cada uma das “fatias” em escala nanométrica da amostras sem a correção de inclinação. . . . .	32
3.4	Imagem corrigida de uma das “fatias” de cada amostras preparadas com as lixas de a) 600 b) 400 c) 150 e d)80 MESH. . . . .	33
3.5	Superfície das amostras obtidas pelo confocal: a)600; b)400; c)150 e d)80 MESH. . . . .	34
4.1	Esquema experimental da produção de <i>speckle</i> a partir de superfícies rugosas. . . . .	36



4.2	Foto obtida pela câmara CCD do speckle a partir das 4 amostras com diferentes rugosidades: a) 600; b)400; c)150; d)80 MESH . . . . .	37
4.3	Expoente de Hurst do perfil pela rugosidade $R_a$ . . . . .	38
4.4	Expoente de Hurst do speckle pela rugosidade $R_a$ . . . . .	39
4.5	Expoente de Hurst do speckle <i>vs</i> expoente de Hurst do perfil de superfície da amostra. . . . .	40
4.6	Simulação de 4 superfícies: a) sem rugosidade; b) com pouca e regular rugosidade; c)com alta e irregular rugosidade; d)com rugosidade totalmente aleatória. . . . .	41
4.7	Gráficos dos cálculos de $H_s$ (superior) e $H_p$ (inferior) com diferentes quantidades de pontos – todos os pontos: quadrado, 1 a cada 2 pontos: triângulo, 1 a cada 10 pontos: círculo. . . .	42
5.1	Esquema experimental da medição de depolarização de diferentes superfícies rugosas. . . . .	46
5.2	Intensidade do feixe de laser transmitido pelo PBS. . . . .	47
5.3	Intensidade do feixe de laser refletido pelo PBS. . . . .	48
5.4	Índice CPR de acordo com a rugosidade das amostras. . . . .	49

# Lista de Tabelas

3.1	Granulometria das amostras em função de suas rugosidades. . .	34
4.1	Expoente de Hurst dos perfis de superfície simulados na figura 4.9 com diferentes quantidades de pontos. Os números aleatórios <i>rand</i> são compreendidos entre $-1,5$ e $1,5$ . . . . .	41

## Resumo

Neste trabalho foi utilizado o espalhamento da luz em superfícies metálicas para o estudo de rugosidade. Primeiramente aplicamos a técnica de expoente de Hurst em um estudo experimental e analisamos o perfil de superfície ( $H_p$ ) e os padrões de *speckle* gerados ( $H_s$ ). Uma correlação clara entre eles é observada mostrando que, em princípio, a informação do expoente de Hurst do perfil pode ser obtida do expoente de Hurst dos padrões de *speckle* gerados. Por meio de uma simulação de perfil muito simples, mostramos que o expoente de Hurst é sensível a diferentes defeitos na amostra.

Uma outra abordagem foi o estudo da rugosidade a partir do efeito de depolarização usando o índice *CPR* (*cross polarization ration*) do feixe espalhado pela amostra. Apresentamos um estudo que combina diferentes aspectos para apresentar uma proposta simples de medição de rugosidade monitorando a intensidade da luz despolarizada. Ao usar um divisor de feixe polarizado, podemos avaliar a quantidade de luz despolarizada. Observamos uma dependência da rugosidade da superfície, que pode ser usada para construir uma curva de calibração para realizar uma medida indireta de rugosidade.

## Abstract

In this work, light scattering on metallic surfaces was used for the study of roughness. We first applied the Hurst exponent technique in an experimental study and analyzed the surface profile ( $H_p$ ) and the speckle patterns generated ( $H_s$ ). A clear correlation between them is observed showing that, in principle, Hurst exponent information from the profile can be obtained from the Hurst exponent of the patterns of speckle generated. By means of a very simple profile simulation, we show that the Hurst exponent is sensitive to different defects in the sample.

Another approach was to study the roughness from the depolarization effect using the cross-polarization ratio (CPR) index of the scattered beam by the sample. We present a study combining different aspects to present a simple proposal of roughness measurement by monitoring the intensity of the depolarized light. When using a polarized beam splitter, we can assess the amount of depolarized light. We observe a dependence of the roughness of the surface, which can be used to construct a calibration curve to perform an indirect roughness measurement.

# Capítulo 1

## Introdução

A rugosidade de superfície é um parâmetro importante para a área de estudo de materiais. Logo, ferramentas para seu estudo e medida se faz importante principalmente para a área industrial. Para a deposição de filmes, a rugosidade média final desempenha um papel crucial para muitas aplicações [1, 2, 3]. A rugosidade de substratos pode afetar a estrutura e a morfologia de filmes finos [4]. Para produções industriais, tais como superfícies de amônia [7] e latas para armazenamento de alimentos secas por pulverização [8], as propriedades das superfícies têm extrema relevância. Na produção industrial mais tradicional e mais antiga, como a fabricação de folhas de flandres em siderúrgicas, a rugosidade é um parâmetro de qualidade muito importante. Para a verificação da corrosão e o desgaste das superfícies metálicas, a rugosidade é um dos principais parâmetros a serem monitorados [31, 32].

O principal parâmetro para análises e estudos a respeito da qualidade das superfícies é a rugosidade média ( $R_a$ ). A Perfilometria é o método estabelecido ao longo dos anos e se baseia no levantamento topográfico através do contato de uma ponta de diamante, também conhecida como método da caneta (no Inglês *stylus*) . No entanto, o princípio de contato é responsável por

dano superficial e técnicas de não contato são constantemente desenvolvidas [33]. A abordagem principal para as medições da superfície sem contacto é através de métodos ópticos [34]. Por meio do perfilômetro óptico, é possível recuperar a técnica da caneta sem danos e também aumentar a resolução [35]. Novas abordagens, como a interferometria compósita, permitiram a criação de um método sensível imune à vibração [36]. Ao usar fibra óptica, um perfilômetro óptico foi desenvolvido para áreas difíceis de acesso [37].

Outra frente para medida sem contato da rugosidade é através do uso dos chamados padrões de speckles, que são produzidos através do espalhamento da luz em superfícies que apresentam rugosidade [38]. Ao usar as propriedades de speckle, foram propostos vários métodos. A correlação entre os padrões de speckle produzidos por ângulo de incidência diferente foi usada para propor medidas de rugosidade superficial [39, 40, 41]. Os padrões de speckle digital abriram a possibilidade de uso de uma estratégia muito poderosa: processamento de imagem. A relação  $B/D$  do número de pixels brilhantes ( $B$ - *bright*) e escuros ( $D$  - *dark*) tanto na direção especular [42] quanto na direção normal [43] foi relacionada à rugosidade de superfícies metálicas. As propriedades estatísticas dos padrões de speckle digitais também foram exploradas para avaliar superfícies metálicas, como dimensão fractal [44], limiar de imagem [45] e lacunaridade [46].

O expoente de Hurst  $H$ , comumente usado em área de finanças, também foi usado para estudar a rugosidade das superfícies metálicas [47] e monitorando a qualidade das superfícies metálicas em movimento [27]. Recentemente, estudo mostrou-se que os padrões de speckle produzidos pela incidência de feixes de laser que contêm o momento angular orbital melhoram a sensibilidade da técnica do expoente Hurst [48].

Além da análise dos padrões de speckle, o espalhamento da luz é usado na

investigação de propriedades de superfície com diferentes abordagens [50, 51]. A estimativa de informações sobre propriedades estatísticas de superfícies rugosas foi obtida a partir de medições da dispersão de luz [49]. Outra análise muito poderosa do espalhamento da luz é por meio do estudo da depolarização [52, 53, 54]. O espalhamento do campo eletromagnético em superfície rugosas randômicas foi cuidadosamente estudada na Ref. [55], levando Liu, Li e Nonaka [56] a introduzir a razão de polarização cruzada (CPR, do inglês *Cross-polarization ratio*) para avaliar superfícies rugosas randômicas.

Neste trabalho, analisamos a superfície de amostras metálicas produzidas no Laboratório de Óptica do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal Fluminense (UFF). O estudo foi realizado usando duas ferramentas: por meio do expoente de Hurst e a partir da depolarização. No capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica com os principais conceitos e definições básicas utilizados nesta dissertação. No capítulo 3 é detalhado todo o processo de fabricação e caracterização das amostras utilizadas. A primeira abordagem do trabalho é apresentada no capítulo 4, onde é comparado o expoente de Hurst do perfil das amostras e dos padrões de speckle gerados por estas amostras. No capítulo 5, apresentamos o estudo onde rugosidade foi associada à intensidade de luz depolarizada pela incidência de um feixe de laser na amostra. O capítulo 6 sumariza as principais conclusões obtidas neste trabalho. Por fim, no Apêndice A listamos os trabalhos produzidos ao longo da dissertação.

# Capítulo 2

## Fundamentos teóricos

### 2.1 Equação de onda

Os fenômenos elétricos e magnéticos observáveis podem ser unificados em apenas quatro equações, conhecidas como equações de Maxwell, dadas por:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (2.4)$$

O operador Laplaciano  $\nabla^2$  representa a derivada segunda no espaço. Em coordenadas cartesianas:

$$\nabla^2 \mathbf{u} = \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial z^2}. \quad (2.5)$$



A equação 2.1 é a lei de Gauss para a eletricidade. Esta equação relaciona os campos elétricos com as densidades de cargas elétricas e também é válida para casos que variem no tempo.

A equação 2.2 é o análogo a lei de Gauss para o magnetismo. A partir desta, pode-se concluir que as linhas de campos magnéticos são linhas de dipolos, diferentemente das do campo elétrico que se originam nas cargas positivas e finalizam nas negativas. O fato de  $\nabla \cdot \mathbf{B}$  ser nulo está associado ao fato de não existirem monopólos magnéticos.

A terceira equação 2.3 é uma correção de Maxwell à lei de Ampère. Além do campo magnético poder ser calculado a partir de uma densidade de corrente elétrica, também pode ser gerado por campos elétricos que variam no tempo.

A última equação 2.4, conhecida como lei de Faraday, descreve os campos elétricos do tipo rotacionais originados através de um fluxo magnético variável.

Consideramos agora a configuração de carga e corrente nulas, ou seja,

$$\mathbf{J} = \rho = 0. \quad (2.6)$$

Dessa maneira, as equações de Maxwell se reduzem a:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2.8)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2.9)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (2.10)$$

Com a identidade vetorial

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{V} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{V}) - \nabla^2 \mathbf{V}, \quad (2.11)$$

onde  $\mathbf{V}$  é um vetor qualquer não nulo, podemos usa-la para os campos elétricos e magnéticos:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} = -\nabla^2 \mathbf{H}, \quad (2.12)$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E}, \quad (2.13)$$

onde utilizamos as Equações 2.7 e 2.8. Com o auxílio das equações 2.9 e 2.10, podemos reescrever as relações obtidas usando que  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$  e  $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$ :

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}, \quad (2.14)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}. \quad (2.15)$$

Essas equações são chamadas de **Equações de onda vetoriais**.

As equações de onda possuem a forma genérica

$$\nabla^2 \Psi = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}, \quad (2.16)$$

com uma possível solução da forma

$$\Psi(x, y, z) = A \exp[i(K_x x + K_y y + K_z z)], \quad (2.17)$$

onde  $A$  representa a amplitude máxima da onda e  $K_x, K_y$  e  $K_z$  são os números de onda em  $x, y$  e  $z$ , respectivamente  $\|\mathbf{K}\| = \sqrt{\mathbf{K}^2_x + \mathbf{K}^2_y + \mathbf{K}^2_z}$ . A equação 2.17 é chamada de solução de onda plana.

Para o caso particular em que a onda plana se propaga ao longo de um dos eixos, por exemplo o eixo  $x$ , a equação 2.16 se reduz à uma equação unidimensional:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}, \quad (2.18)$$

com as soluções

$$\Psi(x, t) = \Psi_0 \cos(kx - \omega t), \quad (2.19)$$

onde  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  e  $\omega = 2\pi f$ .

$\Psi(x, t)$  pode assumir a forma de campo elétrico  $\mathbf{E}(x, t)$  ou campo magnético  $\mathbf{B}(x, t)$ , e podemos escrever  $\mathbf{E}(x, t) = A \exp^{i(kx - \omega t)} \hat{\mathbf{e}}$ , onde  $\hat{\mathbf{e}}$  é perpendicular à  $\hat{\mathbf{x}}$ , uma onda transversal.

## 2.2 Polarização

Quando o campo elétrico oscila em uma determinada direção, dizemos que a luz é polarizada. Se uma onda transversal, que está vibrando em várias direções, tem uma de suas direções selecionadas e passa a vibrar somente nesta, significa que a onda passou pelo processo de polarização. O dispositivo encarregado de bloquear as outras direções de vibração é chamado de polarizador.

A luz natural, não-polarizada, tem suas ondas eletromagnéticas vibrando em diversas direções. Podemos polarizá-la através de polarizadores, por absorção, espalhamento, reflexão ou refração. Uma luz polarizada se propaga em apenas um plano. Um exemplo do cotidiano são as lentes polarizadas de óculos de sol. Essas lentes são feitas com a propriedade de polarização vertical, enquanto que os raios solares são provenientes de diversas direções. O resultado é um bloqueio da luz solar intensa.

Outro exemplo do dia-a-dia é o espalhamento que a luz sofre ao penetrar a atmosfera, polarizando-a. De acordo com a Fig 2.1, é possível ilustrar como é dado o processo de polarização. A luz incidente, que está oscilando em diversas direções, ao passar pelo polarizador vertical, por exemplo, tem

suas componentes horizontais absorvidas e refletidas, de modo que apenas as componentes verticais são transmitidas. Dessa maneira, temos o campo elétrico polarizado verticalmente.

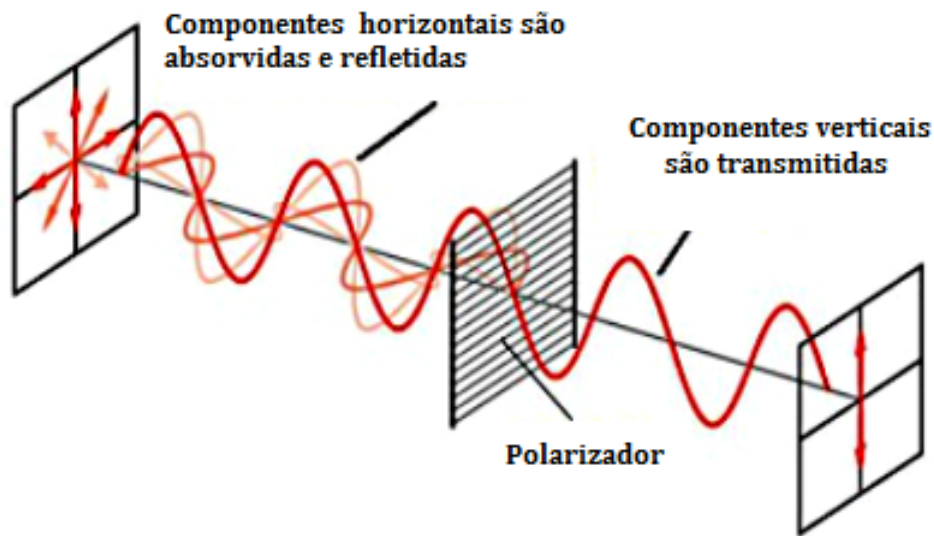


Figura 2.1: <sup>2</sup>Esquema ilustrativo da polarização linear. A luz natural inicial vibra em todos os planos, e ao passar por um polarizador vertical, tem suas componentes horizontais absorvidas e refletidas. Dessa maneira, apenas restam vibrações no plano vertical da luz incidente.

- Polarização linear:

Consideramos agora as seguintes equações:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp^{\pm i(kz - \omega t)}, \quad (2.20)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 \exp^{\pm i(kz - \omega t)}. \quad (2.21)$$

<sup>2</sup>Disponível em: <http://slideplayer.com.br/slide/1268587/>

Se as amplitudes  $\mathbf{E}_0$  e  $\mathbf{H}_0$  são vetores reais e constantes, a polarização é chamada polarização linear. A polarização da onda é a direção do campo elétrico e plano de polarização aquele que o contém (Fig. 2.1). A projeção da polarização linear está representada na Fig 2.2, que ilustra um campo variando sobre um plano fixo se propagando na direção de um observador.

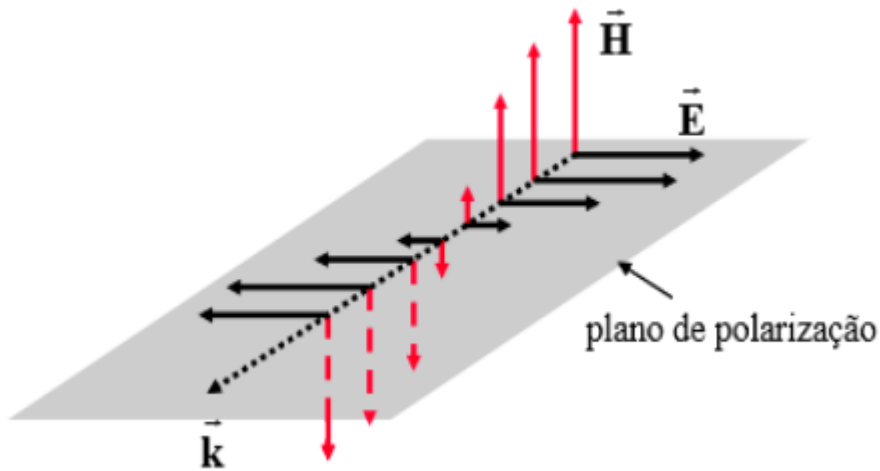


Figura 2.2: <sup>4</sup>Projeção dos campos  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{H}$ , polarizados linearmente, em um plano fixo.

- Polarização elíptica:

Diferentemente da projeção da polarização linear, que é um segmento de reta, a projeção da polarização elíptica é uma elipse. Para entendermos a polarização elíptica, basta imaginar a soma de dois campos,  $\mathbf{E}_1$  e  $\mathbf{E}_2$ , os quais possuem a mesma frequência, vetor de onda e são possíveis soluções da equação de onda, mas são rodados por  $\pi/2$ , conforme a Fig. 2.3. Neste caso,

<sup>4</sup>Disponível em: <http://www.fotonica.ifsc.usp.br/ebook/book1/Capitulo5.pdf>

também pode haver uma diferença de fase relativa  $\delta = \pi/2$ . Alguns casos particulares de acordo com  $\delta$  podem ser analisados pela Fig. 2.4: quando  $\delta = 0$ , temos como projeção a reta  $y = x$  e se  $\delta = \pi$ , a reta  $y = -x$  correspondendo às polarizações lineares; para valores de  $\delta = \pi/2$ , a projeção é elíptica no sentido horário e  $\delta = -\pi/2$  nos dá a projeção elíptica no sentido anti-horário, correspondendo às polarizações elípticas.

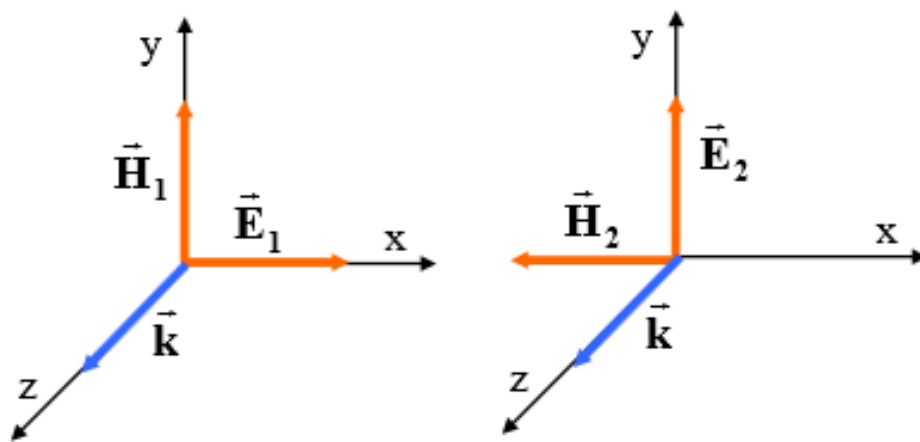


Figura 2.3: <sup>6</sup>Representação de diferentes campos elétricos  $\mathbf{E}_1$  e  $\mathbf{E}_2$  que são possíveis soluções da equação de onda e possuem características tais como: mesma frequência, mesmo vetor de onda e são rotacionados em um ângulo de  $\pi/2$ .

<sup>6</sup>Disponível em: <http://www.fotonica.ifsc.usp.br/ebook/book1/Capitulo5.pdf>

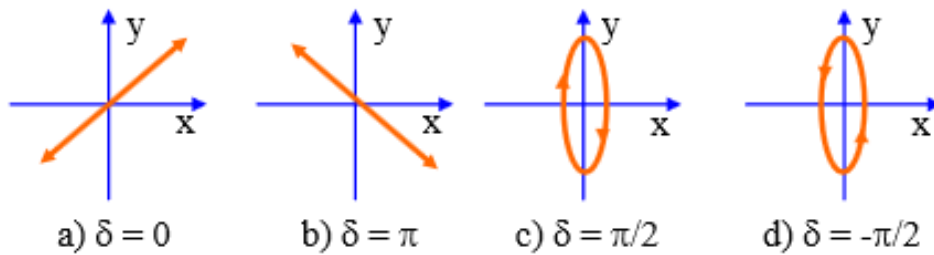


Figura 2.4: <sup>8</sup>Diferentes possíveis projeções de acordo com o ângulo  $\delta$ . Para  $\delta = 0$  ou  $\delta = \pi$ , temos projeções lineares; para  $\delta = \pm\pi/2$ , temos projeções elípticas.

Os campos da figura 2.3 quando somados ao longo do eixo resultam na primeira imagem da figura 2.5. A segunda imagem da figura, ao lado direito, representa a projeção elíptica do campo elétrico no plano xy.

A equação que representa a polarização elíptica é escrita como:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = (\mathbf{E}_1 \exp^{i\delta} \mathbf{i} + \mathbf{E}_2 \mathbf{j}) \exp^{i(kz - \omega t)} \quad (2.22)$$

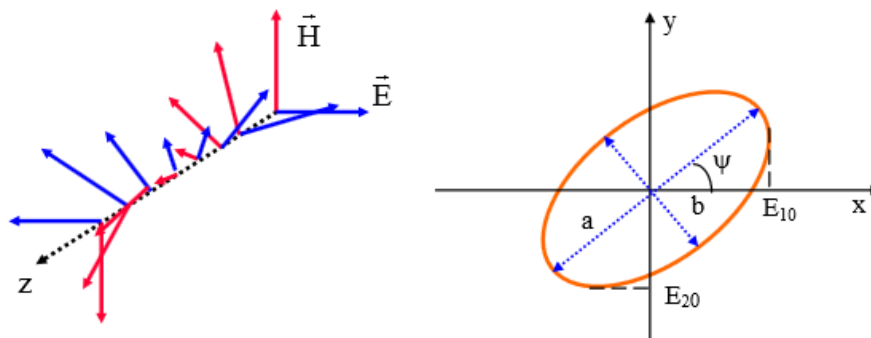


Figura 2.5: <sup>10</sup>Do lado esquerdo, trajetória dos campos em uma polarização elíptica. Do lado direito, sua projeção no plano, que forma uma elipse.

<sup>10</sup>Disponível em: <http://www.fotonica.ifsc.usp.br/ebook/book1/Capitulo5.pdf>

- Polarização circular

A polarização circular é um caso especial da polarização elíptica. Agora, consideraremos que além da rotação em um ângulo de  $\pm\pi/2$ , os campos  $\mathbf{E}_1$  e  $\mathbf{E}_2$  têm o mesmo módulo, fazendo com que as projeções sejam circunferências no plano  $xy$ , como na Figura 2.6. Dessa maneira, a equação se torna:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = (\mathbf{E} \exp^{i\delta} \mathbf{i} + \mathbf{E} \mathbf{j}) \exp^{i(kr - \omega t)}. \quad (2.23)$$

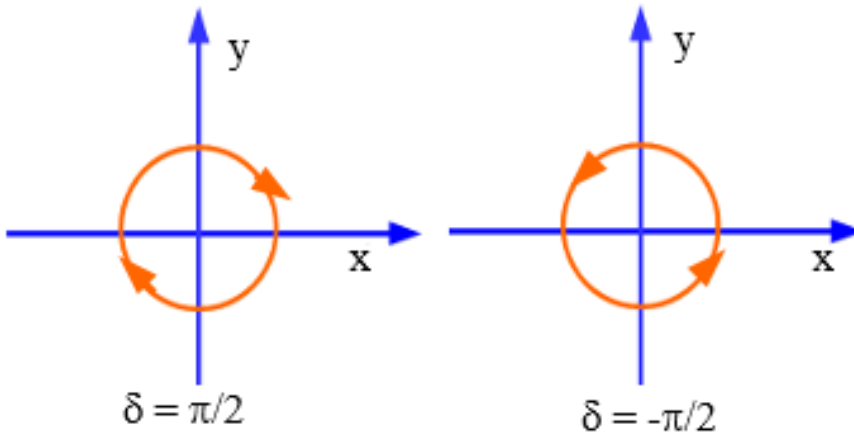


Figura 2.6: Projeções da polarização circular, uma particularidade da projeção elíptica, uma vez que os campos  $\mathbf{E}_1$  e  $\mathbf{E}_2$  têm o mesmo módulo.

- Esfera de Poincaré

A esfera de Poincaré na polarização é usada para representar um estado polarizado. É um espaço geométrico com variação dos ângulos  $\chi$  e  $\Psi$  em uma superfície esférica de raio unitário. Nesta esfera, pode ser representado qualquer estado de polarização. Além disso, cada ponto é um estado único de polarização.



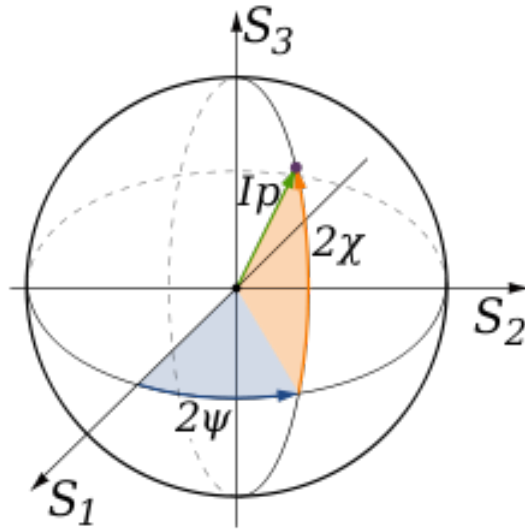


Figura 2.7: <sup>12</sup>Esfera de Poincaré. Qualquer estado de polarização pode ser representado nesta esfera com o auxílio de dois ângulos,  $\chi$  e  $\psi$ , que podem ou não serem nulos.

Para o estado de polarização linear, temos a seguinte combinação:  $S_1 = \cos 2\chi$ ,  $S_2 = \pm \sin 2\chi$ ,  $S_3 = 0$  e  $\chi$  varia de 0 a  $2\pi$ . Este conjunto de pontos representa o equador da esfera de Poincaré, ou seja, nenhum ângulo de elevação. O estado de polarização circular é mais simples de visualizar (figura 2.7) com os seguintes pontos:  $S_1 = S_2 = 0$  e  $S_3 = \pm 1$ . Os dois pontos que interceptam o eixo  $S_3$  (polos), representam  $\delta = \pi/2$  (diferença de fase relativa, apresentado na equação 2.21) no polo norte, ou polarização circular a esquerda, e  $\delta = 3\pi/2$  no polo sul, ou polarização circular a direita. Todos os demais pontos da esfera representam a polarização elíptica.

- Divisores de Feixe Polarizado (Polarized Beam Splitter - PBS)

Agora será apresentado o instrumento de polarização utilizado durante a segunda parte deste trabalho.

<sup>12</sup>[http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3955/3955\\_3.PDF](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3955/3955_3.PDF)

Os Divisores de Feixes (Beam Splitters - BS's) comuns são usados apenas para dividir um feixe de luz em duas partes. Bem semelhantes, os PBS's fazem o mesmo, porém dividem o feixe inicial em dois feixes ortogonalmente polarizados. A luz incidente tem seu feixe de polarização  $p$  transmitido enquanto que o feixe de polarização  $s$  é refletido, conforme a Fig 2.8. São geralmente usados para  $0$  ou  $45^\circ$  de incidência com  $90$  graus de separação entre os feixes. Idealmente, a soma da intensidade de seus feixes “resultantes” deveriam fornecer a intensidade do feixe original, o que não ocorre uma vez que geralmente o feixe refletido sofre uma absorção mais considerável que o feixe transmitido.

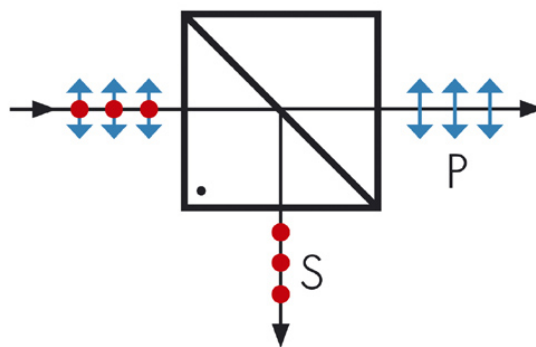


Figura 2.8: <sup>14</sup>Representação da polarização de um feixe de luz feita por um PBS. De acordo com a orientação do cubo na figura, as componentes verticais, de polarização  $p$ , são transmitidas e as componentes horizontais, de polarização  $s$ , são refletidas.

<sup>14</sup><http://www.lasercomponents.com/us/product/polarizing-beam-splitter-cubes/>

## 2.3 Rugosidade de superfícies

O estudo de rugosidades em superfícies se faz importante principalmente na área industrial. As superfícies de um componente mecânico devem ser apropriadas de acordo com sua função. Por exemplo, uma peça pode precisar ser mais ou menos rugosa para causar mais ou menos atrito. Além disso, a grandeza, a orientação e o grau de irregularidade da rugosidade podem apontar problemas durante o processo de fabricação de peças; tais como: imperfeições nas máquinas, desgaste de ferramentas ou até mesmo o próprio método de conformação da peça. Uma vez entendida a importância de seu estudo, é necessária a compreensão do que é a rugosidade e como medi-la.

A rugosidade de uma superfície é definida como as saliências e reentrâncias encontradas em peças de qualquer material. Também podemos definir mais claramente como os desvios encontrados na peça real (Fig. 2.9 b)) em relação a sua superfície geométrica original (Fig.2.9 a)), ou seja, a superfície que seria a peça sem nenhuma rugosidade. Vale ressaltar que a superfície geométrica é virtual, uma projeção parâmetro para analisar as rugosidades da superfície real.

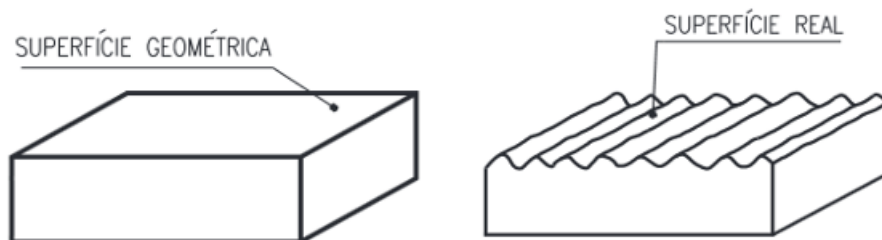


Figura 2.9: a) Projeção geométrica da amostra real, sem rugosidade. b) Amostra real com rugosidade.

A rugosidade pode ser medida de diversas maneiras. Uma das mais usadas utiliza uma linha média junto com o perfil efetivo e calcula a rugosidade média  $Ra$  (roughness average). Primeiramente, o perfil efetivo é obtido por uma impressora de rugosímetro gerando um registro gráfico sem filtragem da superfície da amostra, como mostra a figura 2.10.

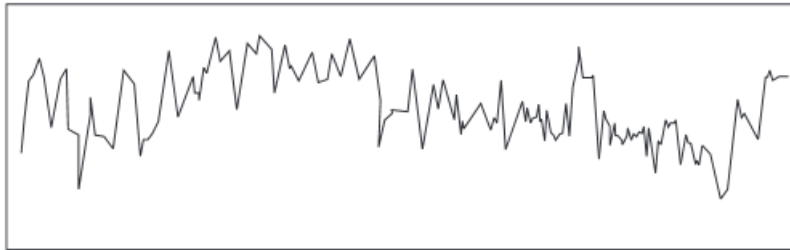


Figura 2.10: Perfil efetivo de uma amostra sem qualquer tipo de filtragem.

Continuando, a definição de linha média: *“linha média é a linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento da amostragem ( $l_e$ )”*. Na figura 2.11 podemos observar a linha média, a superfície efetiva e três áreas definidas entre elas: A1, A2 e A3. Lembrando que A1 somado a A2 deve ter o mesmo valor de A3, segundo a definição dada acima.

<sup>14</sup>Disponível em:<https://www.dumonttreinamentos.com.br/rugosidade>

<sup>14</sup>Disponível em:<https://www.dumonttreinamentos.com.br/rugosidade>

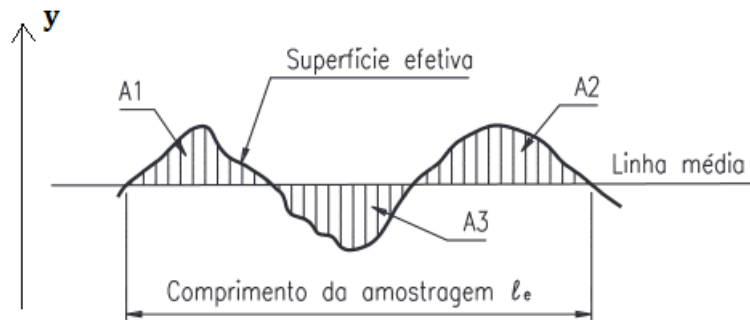


Figura 2.11: Linha média e superfície efetiva de uma amostra rugosa de comprimento  $l_e$ . A soma das áreas do gráfico A1 e A2 devem ser iguais a área 3 por definição.

A rugosidade  $R_a$  é calculada como a média aritmética dos pontos de perfil de rugosidade em relação à linha média dentro do percurso de medição ( $l_e$ ). Ou seja, para o nosso exemplo da figura 2.9:  $R_a = \frac{y_1+y_2+y_3}{3}$ . Ou, de forma genérica:

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} \quad (2.24)$$

## 2.4 Padrões de speckle

Quando uma superfície óptica rugosa, com picos de rugosidade em alturas da mesma grandeza ou maior que o comprimento de onda da luz, é iluminada por um feixe com alto grau de coerência (fig. 2.12), como por exemplo um laser, a luz espalhada apresenta uma distribuição de intensidades particular chamada *speckle*. Essa distribuição acontece porque a luz é espalhada em várias direções e por isso possui uma aparência granulada, composta de

<sup>14</sup>Disponível em: <https://www.dumonttreinamentos.com.br/rugosidade>

alternados pontos claros e escuros que podem ser de diversos tamanhos e intensidades em uma forma aleatória como na figura 2.13.

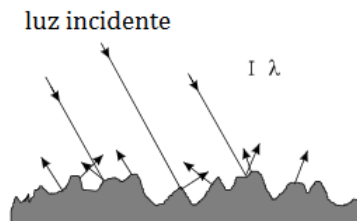


Figura 2.12: Esquema da incidência da luz em uma superfície com picos de rugosidade do mesmo tamanho que o comprimento de luz  $\lambda$ . A luz é então refletida em direções aleatórias.



Figura 2.13: Exemplo de um padrão de speckle.

Os padrões de speckle, por serem particulares a cada tipo de superfície, possuem inúmeras aplicações. Dentre elas, usado em interferômetros na área

de óptica, na astronomia com *speckle* estelar, na biologia com análise em amostras biológicas e etc.

### 2.4.1 Planos de observação do padrão de speckle

Os dois tipos básicos de campos de speckle são especificados como plano difração e plano imagem. O plano imagem é dado quando não há o uso de lentes. A distribuição do speckle pode ser observada de maneira simples e direta, como por exemplo usando um anteparo na região onde está sendo refletido o speckle. O tamanho médio desses padrões de speckles é determinado principalmente pelo comprimento de onda da luz coerente  $\lambda$ , a largura do feixe iluminador original ou, de forma equivalente, o tamanho da área de superfície iluminada e a geometria envolvida. Se a distância do objeto para a superfície de detecção for  $L$  e a área iluminada tiver o diâmetro  $D$  (figura 2.14), então o diâmetro  $S_{dif}$  médio estatístico dos pontos é:

$$S_{dif} = 1.22 \frac{L}{D} \lambda \quad (2.25)$$

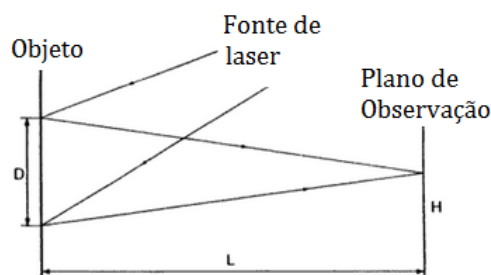


Figura 2.14: Plano difração: não há a utilização de lentes.

<sup>14</sup>Disponível em: G. Cloud “Optical Methods of Engineering Analysis” - Cambridge University Press, 1998.

Por outro lado, se passarmos a usar lente no processo, o padrão de speckle que temos é dado no chamado plano imagem. A relação do tamanho médio do speckle muda e agora está relacionado às características da lente na imagem (figura 2.15). Se temos que  $M$  é a imagem/ ampliação do objeto,  $f$  é a distância focal e  $a$  o diâmetro da lente, então o diâmetro médio do speckle na imagem  $S_{im}$  e na superfície de espalhamento  $S_{esp}$  são respectivamente:

$$S_{im} = 1.22 (1 + M) \lambda f \quad (2.26)$$

$$S_{esp} = 1.22 (1 + M) \lambda \frac{f}{M} \quad (2.27)$$

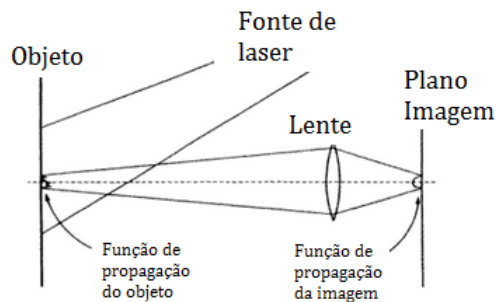


Figura 2.15: Ao usarmos lente no processo, a obtenção de speckle se dá no plano imagem.

Um outro método, que utiliza a transformada de Fourier, é representado no plano focal. Este método utiliza lente delgada e fornece informações sobre toda a imagem, mas é muito mais complicado de obter do que usando o método de franja de Young devido à dificuldade de localizar corretamente a abertura do filtro em ambas as distâncias radiais do centro e na orientação

<sup>14</sup>Disponível em: G. Cloud “Optical Methods of Engineering Analysis” - Cambridge University Press, p399, 1998.



adequada em torno do eixo central. Além disso, se a abertura de filtragem for pequena para produzir uma franja de frequência estreita, a quantidade de luz transmitida através dela será pequena e serão necessárias longas exposições para obter uma imagem final razoável.

## 2.5 Expoente de Hurst

O expoente de Hurst, atualmente muito utilizado pelo mercado financeiro, é utilizado para analisar séries temporais. Para compreender melhor sua definição, primeiramente uma breve definição de séries temporais. Uma série temporal é uma coleção de observações feitas sequencialmente ao longo de um tempo. Uma característica muito importante deste tipo de dados é que as observações vizinhas são dependentes e o interesse é analisar e modelar essa dependência. Na figura 2.16 é possível observar uma série temporal com um comportamento peculiar.

Foi durante o projeto de barragem do rio Nilo, no Egito, que o hidrólogo britânico Harold Edwin Hurst percebeu que o nível da água do rio não era estocástica como se acreditava. Hurst estudou os registros dos níveis do rio de nove séculos e encontrou um padrão, que veio a se tornar um algoritmo chamado de “método de escala normalizada” ou “análise R/S”.

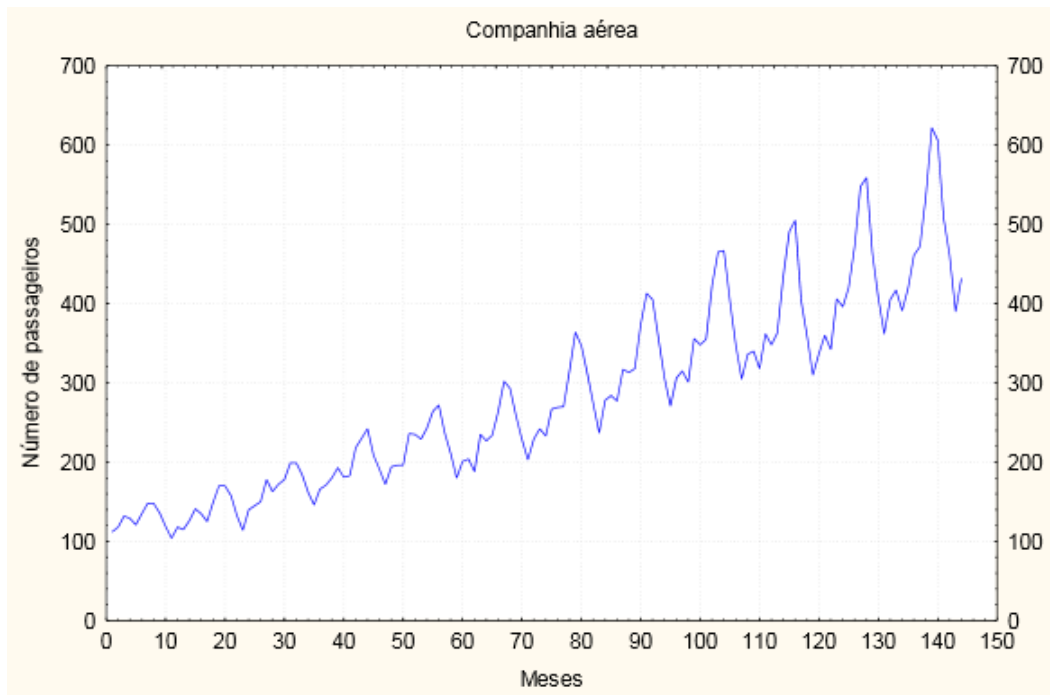


Figura 2.16: <sup>16</sup>Exemplo de uma série temporal. O número de passageiros de uma companhia aérea ao passar dos meses.

### 2.5.1 Cálculo do expoente do Hurst

Vamos considerar uma série de  $n$  termos  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . Para calcular o expoente de Hurst, começamos calculando a média

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \quad (2.28)$$

e o desvio padrão

$$S = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^i (x_k - \bar{x})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (2.29)$$

<sup>16</sup>Disponível em: <http://www.inf.ufsc.br/marcelo.menezes.reis/Cap4.pdf>

O próximo passo é acumular uma série construindo um vetor  $\vec{X}$  do qual sua  $i^{\text{ésima}}$  posição é dada por

$$X_i = \sum_{k=1}^i (x_k - \bar{x}). \quad (2.30)$$

A partir disso, encontramos o *range*, a distância entre o ponto máximo e o ponto mínimo

$$R = \max(\vec{X}) - \min(\vec{X}), \quad (2.31)$$

Finalmente obtemos a expressão

$$\frac{R}{S} = n^H, \quad (2.32)$$

onde  $H$  é o chamado expoente de Hurst.

Os valores do expoente de Hurst variam de 0 a 1, e de acordo com isso podemos avaliar a série em 3 categorias: série randômica, persistente ou antipersistente. Para  $0 \leq H < 0,5$  temos que a série é denominada antipersistente, ou seja, há uma tendência nos pontos da série a não repetirem o comportamento do ponto anterior, há uma tendência a reversão. Caso tenhamos  $0,5 < H \leq 1$ , então a série é considerada persistente, e ao contrário do caso anterior, há uma tendência dos pontos manterem o mesmo comportamento. E, por último, caso o valor de  $H$  seja exatamente 0,5, então a série é dita independente, ou seja, totalmente aleatória, não há tendência alguma. As figuras 2.17 e 2.18 são ações de grandes companhias ao passar do tempo e são classificadas como persistentes e antipersistentes respectivamente.



Figura 2.17: <sup>18</sup>Série persistente. É possível ver que os pontos seguem uma tendência de repetir o comportamento anterior no gráfico.



Figura 2.18: <sup>20</sup>Série antipersistente. Os pontos tendem a mudar o comportamento anterior, gerando um comportamento menos previsível.

---

<sup>20</sup>Disponível em: <https://www.mql5.com/pt/articles/2930>

### 2.5.2 Generalização do expoente de Hurst para uma imagem digital

Extendendo a definição para uma imagem digital, consideramos os  $(m, n)$  pixels como pontos de uma matriz com  $m$  colunas e  $n$  linhas. Cada coluna  $j$  da matriz será considerada como uma série de  $n$  termos cada uma. Dessa maneira, é calculado o expoente de Hurst de cada coluna como definido anteriormente. Com isso, temos um expoente de Hurst  $H_j$  para cada coluna.

O expoente de Hurst geral da figura é dado por

$$H = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n H_j \quad (2.33)$$

## 2.6 Depolarização da luz

Quando um feixe inicialmente polarizado incide em uma superfície e tem sua polarização modificada, dizemos que ocorreu o fenômeno da depolarização, que ocorre devido ao espalhamento da luz em superfícies rugosas [56]. Uma superfície depolarizadora ideal espalharia toda a luz aleatoriamente polarizada, independente de sua polarização inicial.

Vamos considerar, então, um feixe de luz polarizado na direção  $s$  incidindo em uma superfície metálica plana. Consideremos, primeiramente, um superfície lisa, sem rugosidade. A Figura 2.19 ilustra esta situação. O feixe incidente, representado pela seta à esquerda, com intensidade  $I_{is}$ , faz um ângulo de  $\theta_i$  em relação á normal. Temos, então, o plano incidente  $xz$ . Neste caso ocorre a a chamada reflexão especular, com um ângulo  $\theta_s = \theta_i$  com intensidade  $I_{ss}$ . A reflexão especular em superfície lisa não muda o estado de polarização da luz. Logo, a polarização  $s$  (o campo eletromagnético oscilando no plano  $xy$ , continua no mesmo plano ao ser refletido. Ou seja, dizemos que

a luz não sofreu depolarização [56].

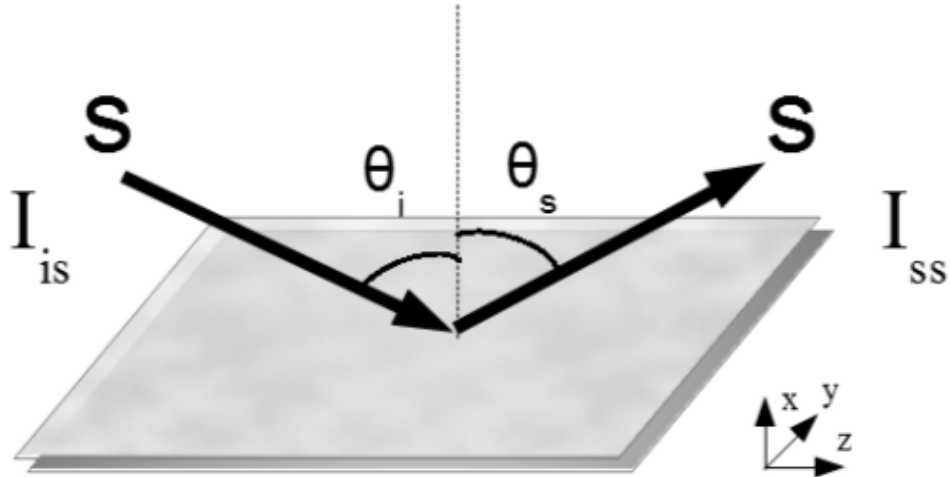


Figura 2.19: Reflexão de um feixe em uma superfície lisa.

Vejamos agora a ilustração do caso de incidência de um feixe luminoso polarizado em uma superfície contendo alguma rugosidade. A Figura 2.20 ilustra esta situação. Neste caso, além da reflexão especular, representada pela seta à direita, a luz sofre espalhamento em várias direções [56], algumas delas representadas pelas setas menores. Neste processo ocorre a depolarização, fazendo aparecer componentes de polarização cruzada, ou seja, ortogonal à polarização do feixe incidente. Na ilustração que discutimos, o feixe incidente tem polarização  $s$  e intensidade  $I_{is}$ . Em qualquer direção que observemos a luz espalhada poderemos observar a intensidade da luz que não sofreu depolarização ( $I_{ss}$ ) e a intensidade da luz com polarização cruzada, ou seja, ortogonal à polarização do feixe incidente ( $I_{sp}$ ). Na Figura 2.20 podemos observar a ilustração da mudança de direção de propagação devido ao espalhamento, além da polarização. Dessa maneira, o feixe incidente polarizado no plano  $xy$  passa a ser espalhado também em outros planos e é possível

detectar polarização ortogonal  $p$  (plano  $xz$ ). Temos, então, intensidade de luz espalhada em ambas polarizações:  $p$  e  $s$ .

É interessante notar que, se o feixe incidente polarizado linearmente muda a direção de polarização considerando o plano de incidência, a luz refletida pode apresentar mudanças nas componentes das intensidades e fases, transportando informações das propriedades ópticas de superfície. Medir esta mudança de polarização é o núcleo da técnica de elipsometria.

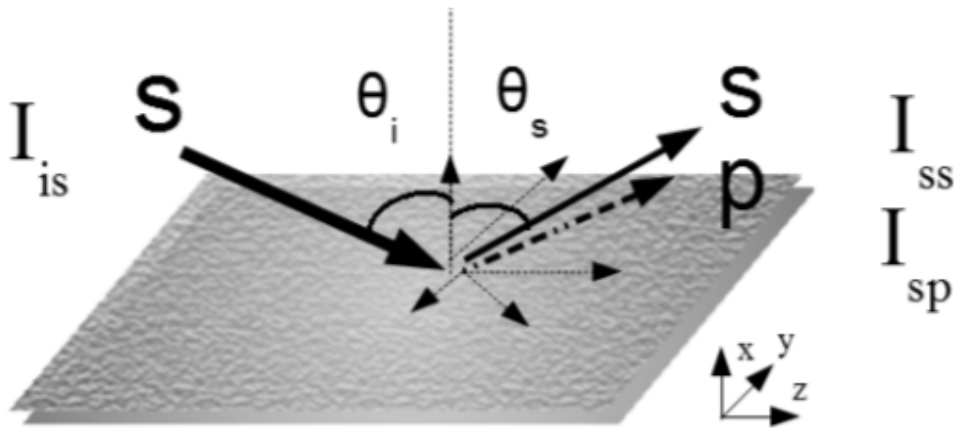


Figura 2.20: Depolarização de um feixe ao incidir em uma amostra rugosa.

A Ref. [56] introduziu uma maneira elegante e precisa de estudar o grau de depolarização da luz incidente com polarização  $s$  em uma superfície rugosa em uma dada direção de observação. Trata-se da Razão de Polarização Cruzada, no Inglês *Cross-Polarization Ratio* ( $CPR$ ). Esta razão é definida como a porcentagem da intensidade da polarização  $p$  na luz espalhada em relação à intensidade inicial total. Em outras palavras, o  $CPR$  é a razão da intensidade depolarizada com a intensidade total, podendo ser escrita como

$$CPR(\%) = \frac{I_{sp}}{I_{sp} + I_{ss}} \times 100, \quad (2.34)$$

sendo as intensidade definidas acima, com  $I_{sp}$  e  $I_{ss}$  representando as intensidades espalhadas com polarização  $p$  e  $s$ , respectivamente, para incidência de um feixe com polarização  $s$ . A razão  $CPR$  pode ser medida para qualquer direção de observação. Para os objetivos deste trabalho, analisamos apenas a intensidade espalhada na direção normal à superfície da amostra.



## Capítulo 3

# Preparação e caracterização de amostras

### 3.1 Preparação das amostras

Nas duas configurações experimentais deste trabalho foram usadas as quatro amostras metálicas produzidas no laboratório. As amostras, que são pequenos paralelepípidos com base de aproximadamente 2.0 x 3.0 cm, foram lixadas com diversas lixas com diferentes granularidades para que pudessem adquirir diferentes rugosidades.

O primeiro passo do processo foi lixar todas as amostras com a lixa d'água mais rugosa, de granulometria 80 MESH. Então, foi separada uma delas, que se tornou a primeira amostra pronta (a mais rugosa). As três restantes foram submetidas a um novo lixamento com a lixa de 150 MESH, e da mesma maneira a segunda amostra ficou pronta (a segunda mais rugosa). De maneira análoga as quatro amostras foram feitas sucessivamente com as lixas 80, 150, 400 e 600 MESH, fazendo assim as 4 amostras da mais rugosa para a menos rugosa.

## 3.2 Caracterização das amostras

Através do microscópio confocal Leica DCM3D, foram obtidos os perfis 3D da superfície de cada amostra. O microscópio possui um eixo, que convencionaremos chamar de  $y$ , sobre o qual corre um segundo eixo,  $x$ , que por sua vez possui a cabeça de leitura. A partir desse princípio de funcionamento, ele efetua a varredura completa da superfície da amostra. Porém, os intervalos de leitura são diferentes em cada um dos eixos.

Em vista dessa diferença, são obtidos 35 perfis associados ao longo de  $y$ , cada um representando o equivalente a uma “fatia” da amostra, com sua altura  $z$  em função da posição  $x$ . Para uma melhor compreensão, as figuras 3.1 e 3.2 representam dois perfis 3D das amostras menos e mais rugosa, respectivamente. O intervalo de medida em  $y$  é  $26,56 \mu m$  e em  $x$  de  $1,66 \mu m$ .

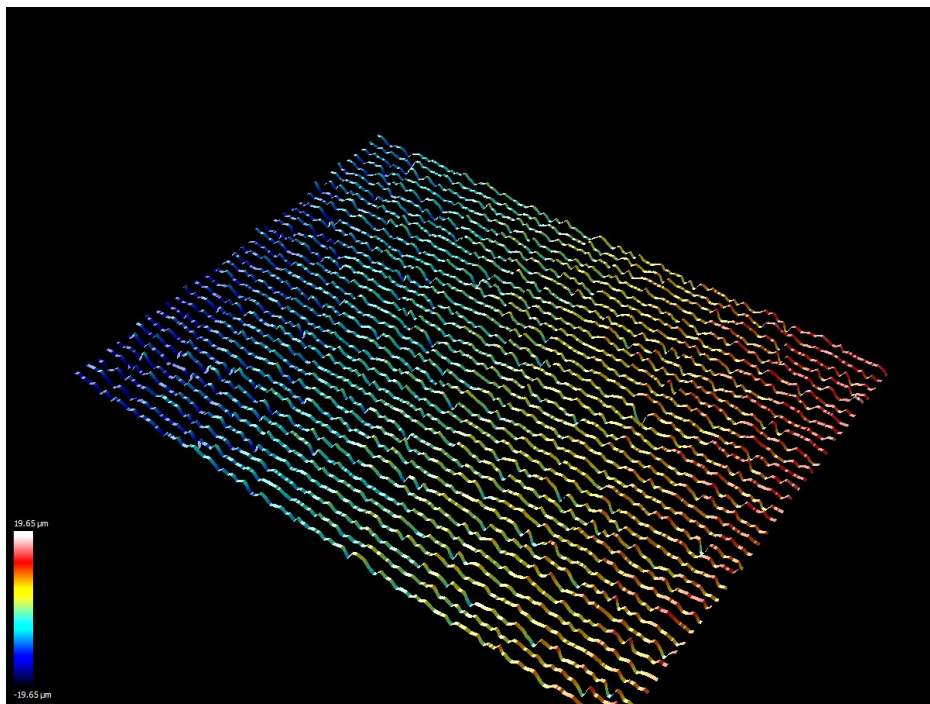


Figura 3.1: Perfil 3D da amostra menos rugosa, de lixa 600 MESH

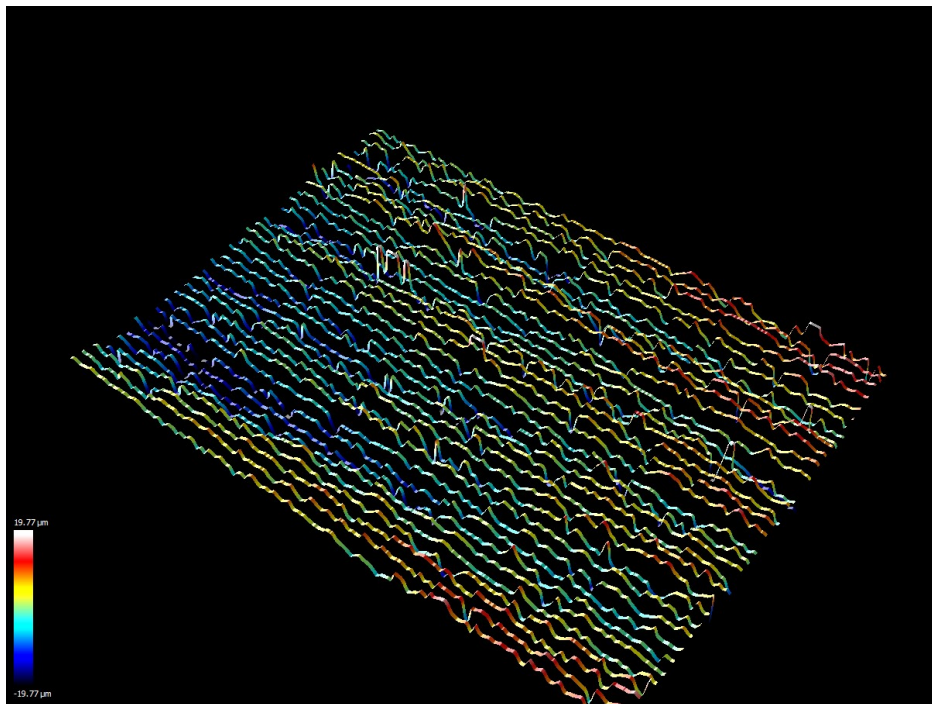


Figura 3.2: Perfil 3D da amostra mais rugosa, de lixa 80 MESH

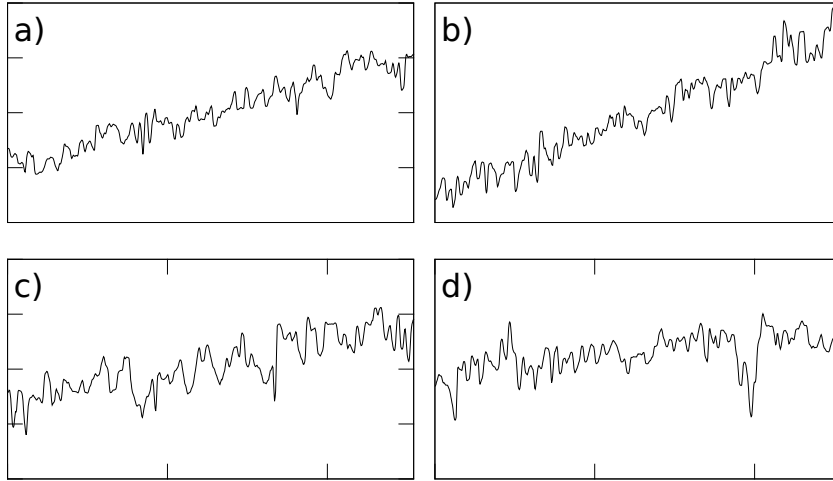


Figura 3.3: Imagem obtida diretamente do microscópio confocal de cada uma das “fatias” em escala nanométrica da amostras sem a correção de inclinação.

Uma consequência dessa maneira de se obter as medidas é que uma leve inclinação da amostra no aparelho pode gerar um resultado distorcido, conforme a cabeça de medição se aproxima ou se afasta da amostra enquanto corre pelo eixo  $x$ . Essa situação é ilustrada em cortes selecionados de cada uma das amostras na figura 3.3. Vale ressaltar que as escalas dos eixos das ordenadas em ambas as figuras são diferentes, devido ao fato de terem sido geradas automaticamente.

Tal distorção é especialmente problemática para a análise feita neste trabalho, uma vez que introduz uma correlação artificial entre os pontos medidos. Em outras palavras, os pontos medidos acompanham uma inclinação. Isso foi corrigido computacionalmente através de um algoritmo que empregava o método dos mínimos quadrados para encontrar a reta que melhor aproxima os pontos  $(x, z)$  para cada  $y$ , e então subtraía essa reta dos pontos medidos. A figura 3.4 apresenta os mesmos cortes da figura 3.3 após passar pelo processo de correção.

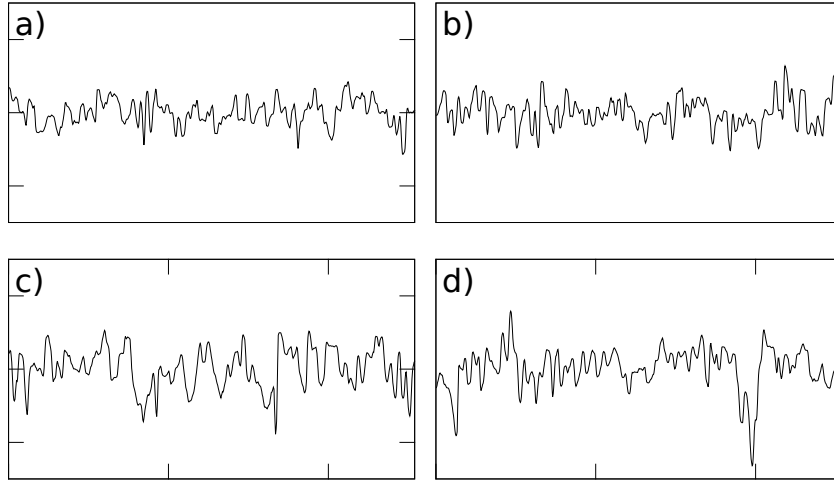


Figura 3.4: Imagem corrigida de uma das “fatias” de cada amostras preparadas com as lixas de a) 600 b) 400 c) 150 e d)80 MESH.

A medida de rugosidade  $R_a$ , como definida no capítulo anterior, é calculada a partir dos 35 perfis pelo *software* DCM3D, e então a rugosidade geral da amostra é calculada como a média das rugosidades de cada perfil. Na tabela 3.1 é possível comparar o  $R_a$  calculado com a rugosidade da amostra. A granulometria das amostras também pode ser vista a partir das “fatias” das amostras obtidas também pelo confocal, como mostra a figura 3.4, e a figura 3.5 apresenta a superfície das amostras em fotografia. Ao comparar estas duas últimas figuras, conclui-se que estão em concordância: A figura 3.4a) representa a amostra menos rugosa, e apresenta pouca variação no seu perfil típico, assim como a sua superfície, figura 3.5a) aparenta ser uma superfície mais lisa e menos salpicada. De maneira análoga, as outras amostras também coincidem conforme ficam mais rugosas.

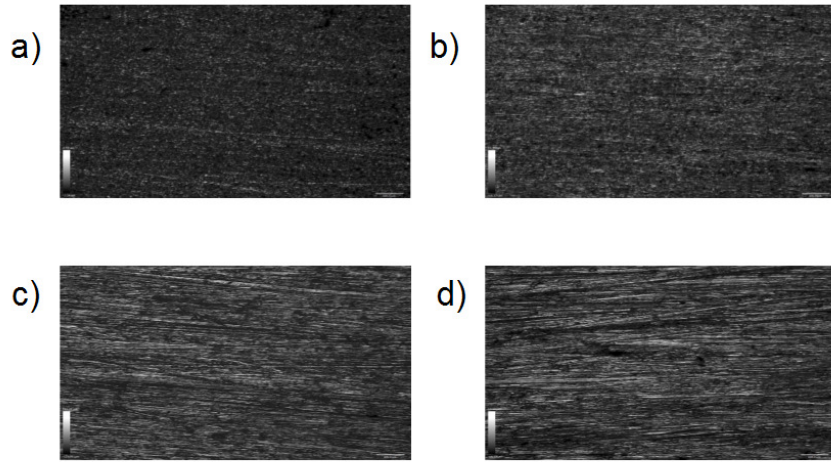


Figura 3.5: Superfície das amostras obtidas pelo confocal: a)600; b)400; c)150 e d)80 MESH.

GRA (Mesh)	$R_a(\mu m)$
80	$2.60 \pm 0.02$
150	$2.27 \pm 0.02$
400	$1.68 \pm 0.02$
600	$1.48 \pm 0.02$

Tabela 3.1: Granulometria das amostras em função de suas rugosidades.

## Capítulo 4

# Estudo comparativo entre perfis de superfícies metálicas e do padrão de *speckle* por meio do expoente de Hurst

Neste capítulo vamos apresentar um estudo onde aplicamos o cálculo do expoente de Hurst para relacionar o perfil de uma superfície metálica e o padrão de speckle gerado por esta superfície. Iniciamos mostrando a configuração para obtenção do padrão de speckle a partir das amostras descritas no capítulo anterior. Em seguida são apresentados os resultados para o cálculo do expoente de Hurst para o perfil da superfície obtido através do microscópio confocal, o expoente de Hurst do respectivo padrão de speckle e, por fim, a comparação entre estes resultados. O código em *C* usado para os cálculos dos expoentes de Hurst estão no Anexo B.

## 4.1 Esquema Experimental para obtenção de padrões de speckle

A figura 4.1 representa a configuração experimental da produção de *speckle* utilizando superfícies rugosas. Um laser verde (DPSS laser,  $532nm$ , potência  $1mW$ , polarizado verticalmente) passa por um filtro de densidade natural (NF) para controlar a intensidade do laser nas amostras e evitar saturação. Também para evitar a saturação, calibra-se a intensidade do laser utilizando a amostra mais rugosa, já que ela trará maior intensidade de luz no detector.

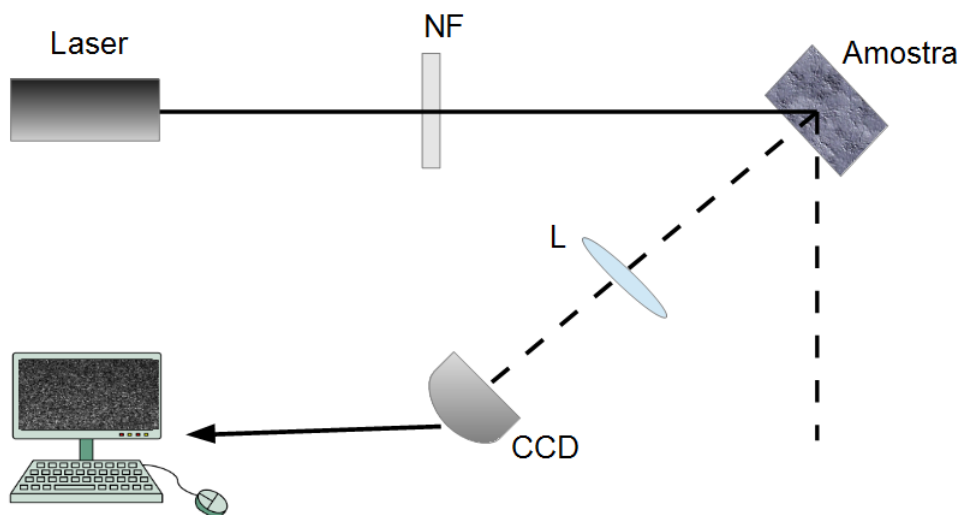


Figura 4.1: Esquema experimental da produção de *speckle* a partir de superfícies rugosas.

Após definir a intensidade suficientemente boa calibrada, mantemos esta até o fim do experimento. A luz incide na amostra com um ângulo de  $45^\circ$  em direção à normal. A câmera (CCD - Charge Coupled Device) é posicionada a  $20cm$  da superfície da amostra, e além disso, lentes são usadas para projetar



a imagem da superfície da amostra na câmera. As imagens obtidas (figura 4.2) são salvas e utilizadas para o cálculo do expoente de Hurst para uma imagem digital.

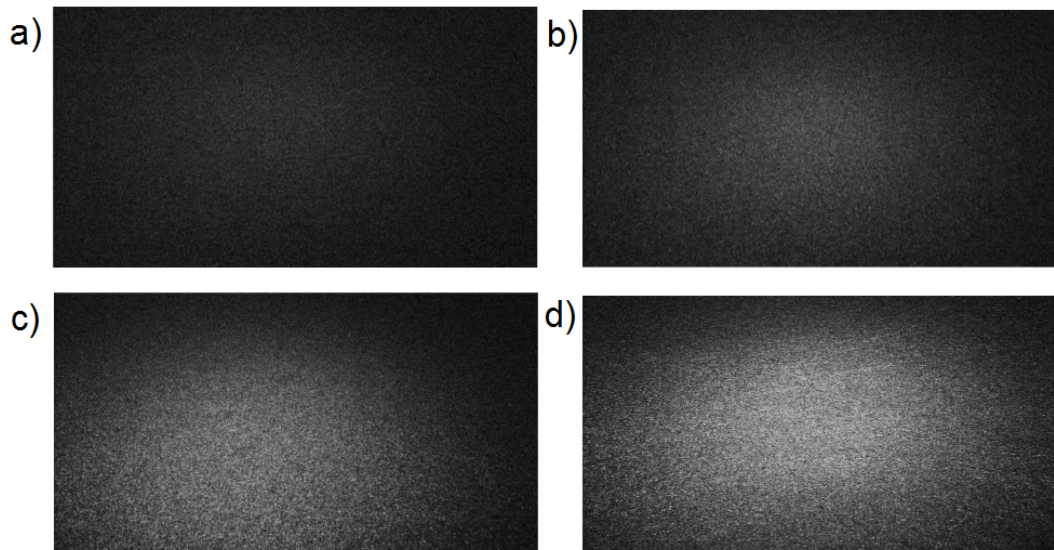


Figura 4.2: Foto obtida pela câmera CCD do speckle a partir das 4 amostras com diferentes rugosidades: a) 600; b)400; c)150; d)80 MESH

## 4.2 Resultados

No capítulo 3 foram apresentadas imagens das amostras (um perfil típico e a superfície) obtidas após todo o procedimento de lixamento e com clareza é notável a coerência entre estas duas figuras, como também já discutido no capítulo 3. No início deste capítulo foram apresentadas também as fotos dos padrões de *speckle* obtidos a partir das amostras (figura 4.2). Mais uma vez podemos ver a concordância dos resultados. A amostra menos rugosa, que possui menos variação no seu perfil também possui menos granulação em seu perfil de *speckle*. Ou seja, a amostra possui menos “chapiscos” brancos, uma

vez que ela espalha menos a luz incidida, conforme discutido no capítulo 2. Após a análise de consistência de resultados, partimos para os cálculos do expoente de Hurst. Após os cálculos do expoente de Hurst dos perfis  $H_p$  e dos *speckles*  $H_s$ , os resultados foram analisados associando  $H$ 's à rugosidade de cada amostra.

#### 4.2.1 Expoente de Hurst para o perfil da superfície

Os resultados para  $H_p$  vs  $R_a$  podem ser visto na figura 4.3. É possível observar sua dependência: conforme o  $R_a$  aumenta,  $H_p$  também aumenta. A função de melhor ajuste à curva é  $H_p(R_a) = 0,05 \tanh(1,7R_a - 3,1) + 0,71$ , e as barras de erro vêm da média dos  $H$ 's dos 35 perfis da amostra.

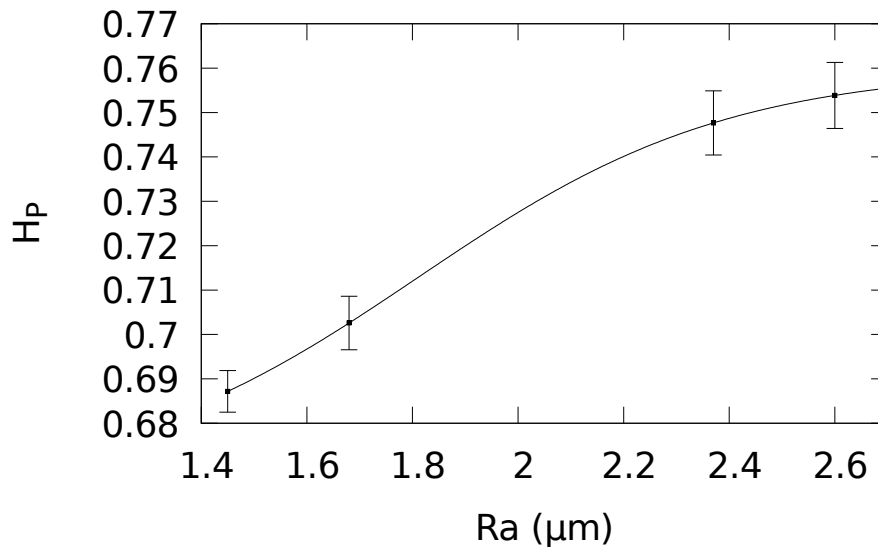


Figura 4.3: Expoente de Hurst do perfil pela rugosidade  $R_a$

### 4.2.2 Expoente de Hurst para os padrões de *speckle*

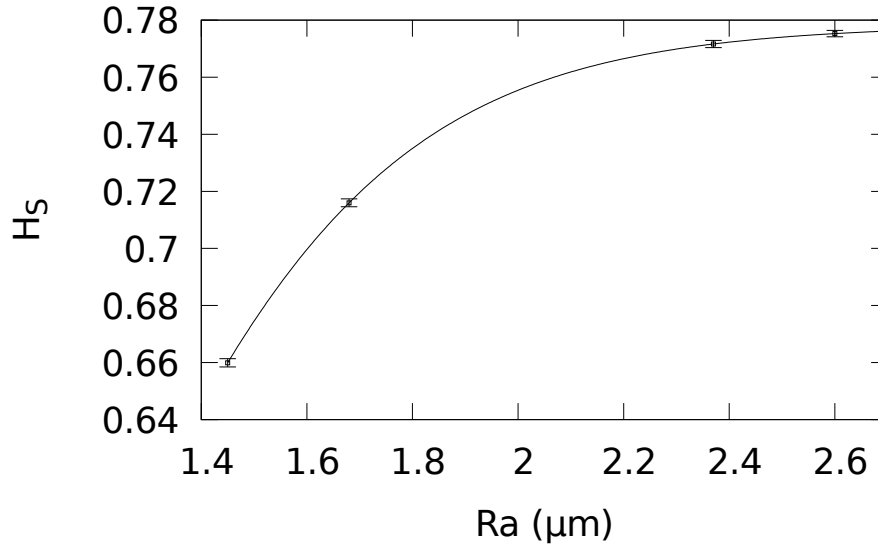


Figura 4.4: Expoente de Hurst do speckle pela rugosidade  $R_a$

A figura 4.4 mostra os resultados obtidos para o expoente de Hurst dos padrões de speckle em função da rugosidade. O comportamento, de crescer em razão do  $R_a$  foi semelhante ao  $H_p$ , porém com parâmetros diferentes. A função de melhor ajuste foi  $H_s(R_a) = 0,24\tanh(1,7R_a - 1,91) + 0,53$  e as barras de erro vêm da média feita sobre as colunas  $j$  da matriz com os *pixels*  $(m, n)$ .

### 4.2.3 Expoente de Hurst do padrão de speckle e do perfil de superfície

A figura 4.5 mostra o resultado do expoente de hurst dos padrões de speckle pelo expoente de hurst do perfil de superfície da amostra. É possível ver uma correlação entre  $H_s$  e  $H_p$ . Uma vez que existe tal correlação, isso

poderia indicar uma alternativa para se obter informações a respeito do expoente de Hurst sem ter que calcular especificamente  $H_p$ . Ou seja, apenas com  $H_s$  teríamos a informação do comportamento de  $H$ , já que ambos são correlacionados.

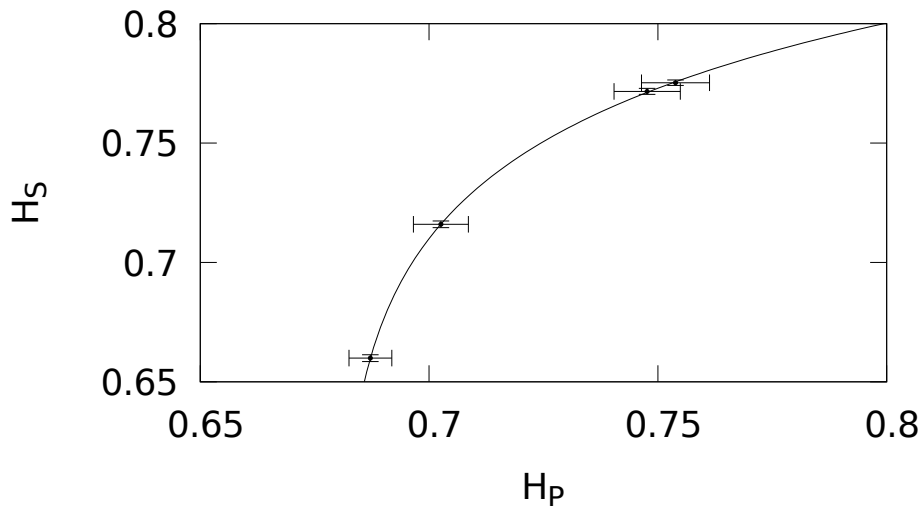


Figura 4.5: Expoente de Hurst do speckle *vs* expoente de Hurst do perfil de superfície da amostra.

Para melhor entender como  $H$  estaria relacionado a rugosidade, serão mostradas na figura 4.6 quatro simulações de perfis de superfície. Além disso, na tabela 4.1 foram calculados os  $H$ 's referentes a estas funções, pegando diferentes quantidades (100, 500 e 1000) de pontos. Figura 4.6 a) representa uma superfície sinoidal, sem nenhuma rugosidade (tabela 4.1a)). Na figura 4.6 b) foi acrescentada uma segunda função sinoidal (tabela 4.1b), que simulou uma superfície com rugosidade regular e baixa. Para simular uma superfície com rugosidade alta e irregular, foi acrescentado à função sinoidal um número aleatório ( $-1.5 \leq rand \leq 1.5$ ), representado pela figura 4.6 c) e tabela 4.1c). A figura 4.6 d) representa uma superfície de rugosidade

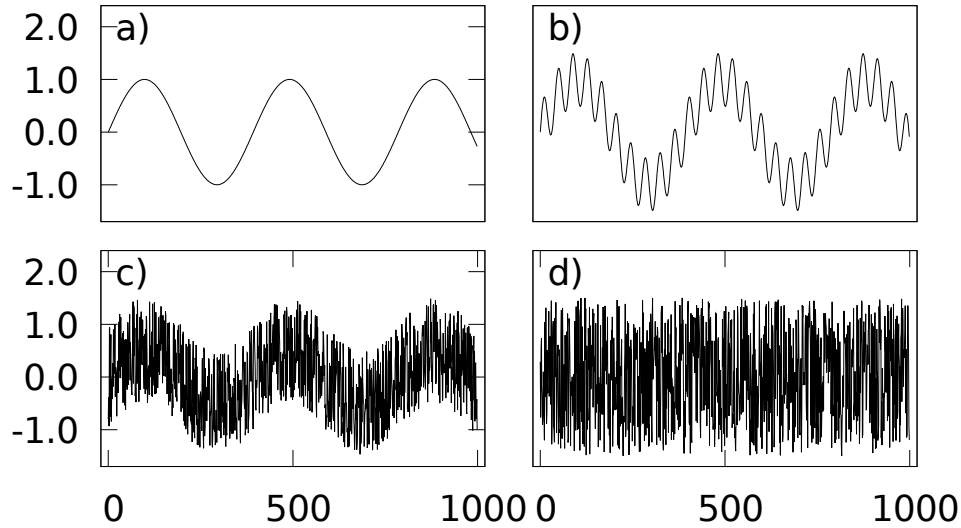


Figura 4.6: Simulação de 4 superfícies: a) sem rugosidade; b) com pouca e regular rugosidade; c) com alta e irregular rugosidade; d) com rugosidade totalmente aleatória.

totalmente aleatória (tabela 4.1d)).

$f(x)$	Image	Hurst exponent		
		100 pts.	500 pts.	1000 pts.
$\sin(x)$	a)	0.72977	0.79923	0.81930
$\sin(x) + 0.5\sin(10x)$	b)	0.71299	0.78774	0.80901
$0.5\sin(x) + rand$	c)	0.59062	0.71283	0.73387
$1.5rand$	d)	0.53352	0.58921	0.50146

Tabela 4.1: Expoente de Hurst dos perfis de superfície simulados na figura 4.9 com diferentes quantidades de pontos. Os números aleatórios *rand* são compreendidos entre  $-1,5$  e  $1,5$ .

Ao obter diferentes valores de  $H$  ao selecionar diferentes quantidades de pontos para o cálculos do expoente de Hurst, foi aberta uma discussão:

no que implicaria pegar menores quantidades de pontos para calcular  $H_p$  e menores quantidades de *pixels* para calcular  $H_s$ . Para fazer a análise foram recalculados os  $H$ 's como mostra a figura 4.7. O gráfico superior apresenta as 3 curvas do  $H_s$  utilizando todos os pontos do perfil de superfície (quadrado vazio), 1 a cada 2 pontos (triângulo vazio) e 1 a cada 10 pontos (círculo vazio). O gráfico inferior apresenta as 3 curvas do  $H_p$  utilizando todos os *pixels* da figura (quadrado cheio), 1 a cada 2 *pixels* (triângulo cheio) e 1 a cada 10 *pixels* (círculo cheio).

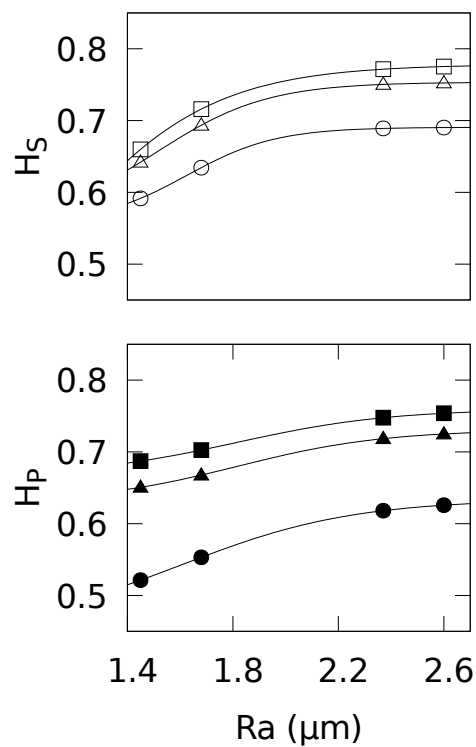


Figura 4.7: Gráficos dos cálculos de  $H_s$  (superior) e  $H_p$  (inferior) com diferentes quantidades de pontos – todos os pontos: quadrado, 1 a cada 2 pontos: triângulo, 1 a cada 10 pontos: círculo.

#### 4.2.4 Análise de resultados

Os resultados referentes ao hurst do perfil da rugosidade mostram uma relação clara entre  $H_p$  e a rugosidade da superfície da amostra. A figura 4.6 e a tabela 4.1 também mostram que a regularidade de rugosidade também influencia nos valores de  $H$ . A associação é boa uma vez que a aleatoriedade dessas simulações equivalem a distribuição de grãos nas lixas, que é dada de forma aleatória. Ou seja, quanto mais rugosa a superfície, mais aleatória suas variações.

Os resultados referentes ao hurst dos padrões de speckle possuem as mesmas características e implicações que as dos hurst do perfil. A figura 4.4 sugere uma saturação nos pontos finais, o que é justificado pela saturação da camera CCD. Por isso, diferentes variações de  $R_a$  exigem diferentes curvas de calibração. O mesmo se aplica para o processo de fabricação das amostras, já que variações de formato da amostra podem mudar bastante os padrões de speckle obtidos.

A figura 4.5 mostra que associar os 2 resultados  $H_s$  e  $H_p$  pode ser muito bom para monitorar a qualidade da superfície. Basta construir curvas de calibração  $H_p$  vs  $R_a$  e  $H_s$  vs  $R_a$  e correlacionar  $H_p$  e  $H_s$ . Monitorar  $H_s$  pode ser simples e barato e bem informativo a respeito da superfície. Vale ressaltar que este não é um método único, mas comparativo. Além disso, para o método de calibração, quanto mais pontos mais preciso o resultado obtido.

A simulação das superfícies comprova que características ou defeitos nas amostras podem ser apontados pelo expoente de Hurst  $H$ . Sugere também, que  $H$  tem grande potencial de caracterizar superfície de amostras e seu estudo deve ser incentivado. Através da simulação também pode-se concluir que para um resultado mais preciso, o ideal é utilizar o máximo de pontos

(ou pixels) possível para o cálculo de  $H$ . Em contrapartida, mesmo reduzindo fortemente a quantidade de elementos, a função não variou, permaneceu  $f(R_a) = \tanh(R_a)$ , mostrando consistência de resultados.



# Capítulo 5

## Medida de rugosidade a partir da depolarização

### 5.1 Esquema Experimental

A configuração experimental, mostrada na figura 5.1., representa o processo onde foi estudada a depolarização para diferentes rugosidades. Um laser verde (DPSS laser, 532nm, potência 1mW, polarizado verticalmente) passa por um filtro de densidade natural (FN) para controlar a intensidade do laser nas amostras e evitar saturação. O laser incide na amostra com um ângulo de  $45^\circ$  em direção à normal. Logo a frente da amostra, é posicionada uma lente convergente de foco 100mm, usada para capturar a luz que foi espalhada e concentrar na área sensível do detector. O PBS (*polarized beam splitter*) divide o feixe em dois feixes ortogonalmente polarizados. Esta configuração foi projetada com o objetivo de transmitir a polarização *s* no PBS e refletir a polarização *p*. Após cada uma das saídas do PBS – transmitido (T) e refletido (R) – foi colocado um detector. A intensidade de luz medida T e R foram observadas simultaneamente por um osciloscópio digital.

A calibração foi feita de maneira análoga a seção 4.1: usamos como parâmetro a amostra menos rugosa (que gerou mais intensidade nos detectores) e a intensidade foi ajustada de modo que não saturasse. Para as outras amostras foi usada a mesma intensidade fixada anteriormente.

Esta configuração tem como objetivo analisar o quanto da polarização original foi mudada. Para não haver mudança alguma, o feixe que é horizontalmente polarizado, igual ao feixe incidente, deveria ser totalmente transmitido ao passar pelo PBS e com intensidade  $I_{ss}$  intensa. Caso a superfície da amostra depolarize parte do feixe, podemos medir intensidade  $I_{sp}$  na saída R do PBS. Usando a  $ddp$  associada a  $I_{ss}$  e  $I_{sp}$  dada pelo osciloscópio, calculamos o  $CPR$ , dado pela equação 2.34.

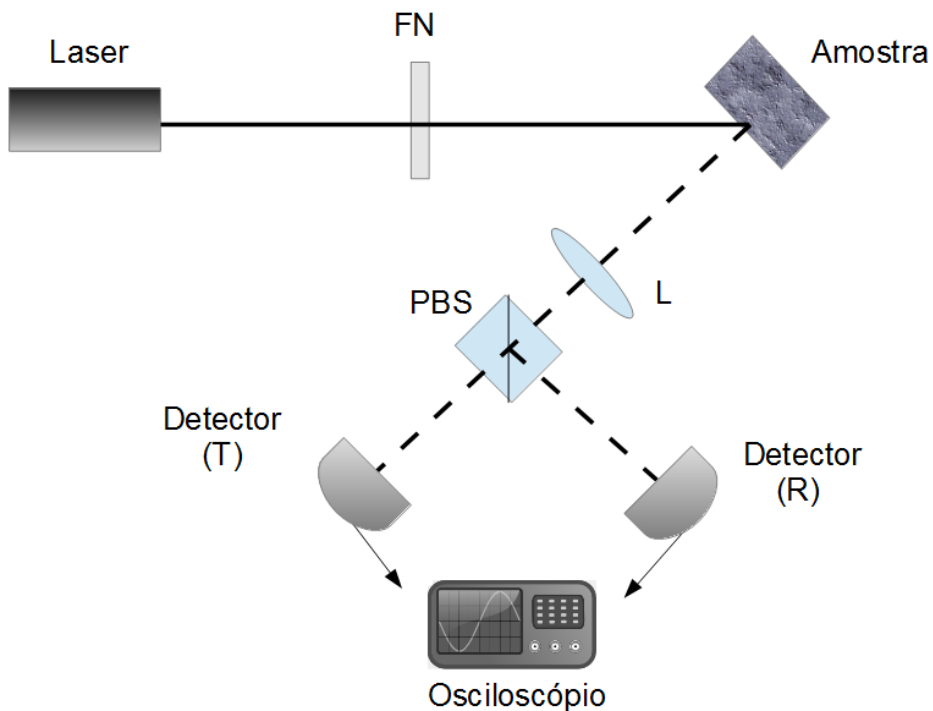


Figura 5.1: Esquema experimental da medição de depolarização de diferentes superfícies rugosas.

## 5.2 Resultados e discussões

Vamos apresentar agora os resultados obtidos para medida da depolarização da luz por superfícies rugosas. A Figura 5.2 mostra a intensidade transmitida pelo PBS em função da rugosidade  $R_a$  da superfície espalhadora.

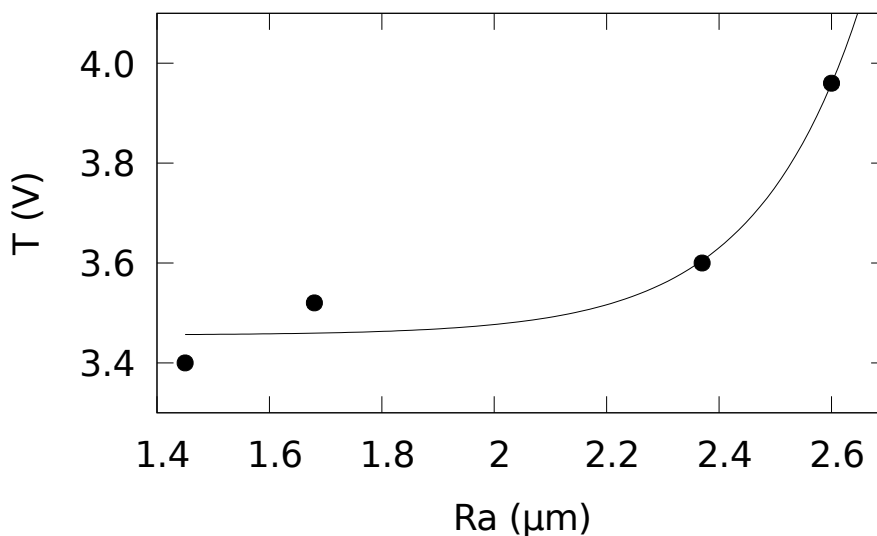


Figura 5.2: Intensidade do feixe de laser transmitido pelo PBS.

Como esperava-se, por estarmos captando a intensidade espalhada pela amostra na direção normal para um feixe laser incidindo à um ângulo de  $45^\circ$ , quanto maior a rugosidade, maior a intensidade espalhada na direção normal, o que pode ser verificado na Figura 5.2. É possível observar que a intensidade da luz transmita pelo PBS na direção normal aumenta conforme a rugosidade da amostra é aumentada. A função que melhor ajusta os pontos é dada por  $T(R_a) = 5,41e^{-7}exp(5,29R_a) + 3,46$ , com  $R^2 = 0,85$ . Vemos que há dois pontos que prejudicam o ajuste. Acreditamos que seja devido ao limite do detector na hora da medição. O feixe transmitido é bem mais intenso que o feixe refletido pelo PBS, porém, a área que capta a intensidade de luz

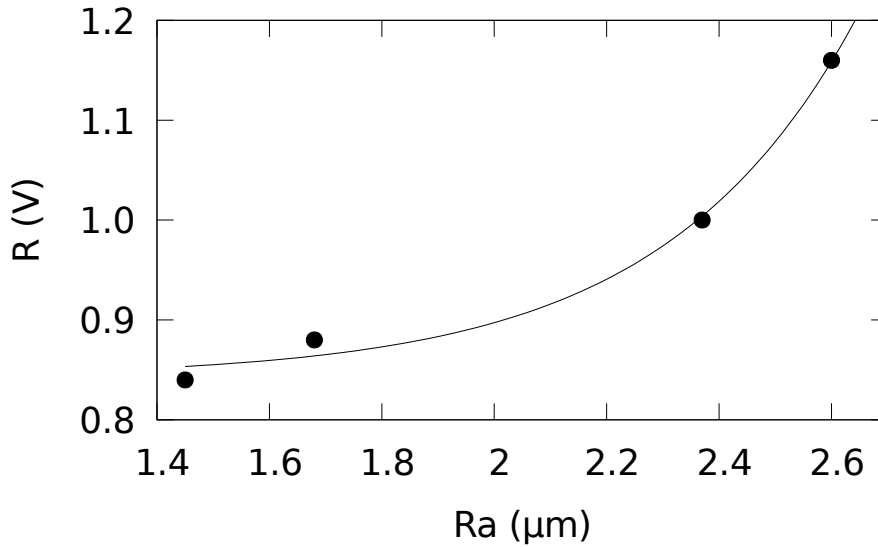


Figura 5.3: Intensidade do feixe de laser refletido pelo PBS.

no detector é limitada, e durante a coleta de dados parte desta intensidade pode não ter sido computada, causando assim uma variação na relação da intensidade com as amostras.

Analisando agora a intensidade da luz refletida pelo PBS, vemos na Figura 5.3 que a intensidade da luz refletida aumenta com a rugosidade.

Como visto anteriormente, quanto maior a rugosidade da superfície, maior é a depolarização da luz espalhada. A parcela do feixe refletido, ou seja, a depolarizada, aumenta à medida que a rugosidade das amostras aumenta. A curva que melhor se ajustou aos pontos foi  $R(R_a) = 2,0e^{-4}exp(2,92R_a) + 0,84$ , com  $R^2 = 0.95$ . Como podemos ver, há um excelente acordo com a discussão da referência [56]. O bom ajuste de uma curva exponencial indica que, em princípio, é possível fazermos uma curva de calibração para a intensidade da luz depolarizada em função de  $R_a$  e, a partir dela, obter o  $R_a$  da amostra por inversão, a partir da medida da intensidade de luz depolarizada. Vale destacar que apresentamos aqui uma prova de princípio, uma vez que para

mediação indireta é necessário o estabelecimento de um processo que envolveria mais amostras e repetições que garantiriam acesso a margem de erro, entre outras coisas.

A Figura 5.4 apresenta o resultado do CPR, definido na seção 2.6, em função da rugosidade  $R_a$  das amostras de rugosidade. O CPR é uma ferramenta ótima e rápida para analisarmos o índice de depolarização da amostra. Por exemplo, ao vermos a Figura 5.4 obtemos a informação instantânea de que para a amostra mais rugosa houve uma depolarização de quase 23%, ou seja, quase um quarto do feixe inicial teve sua polarização alterada. Além disso, podemos observar também que a depolarização aumenta com a rugosidade, estando de acordo com a Ref.[56].

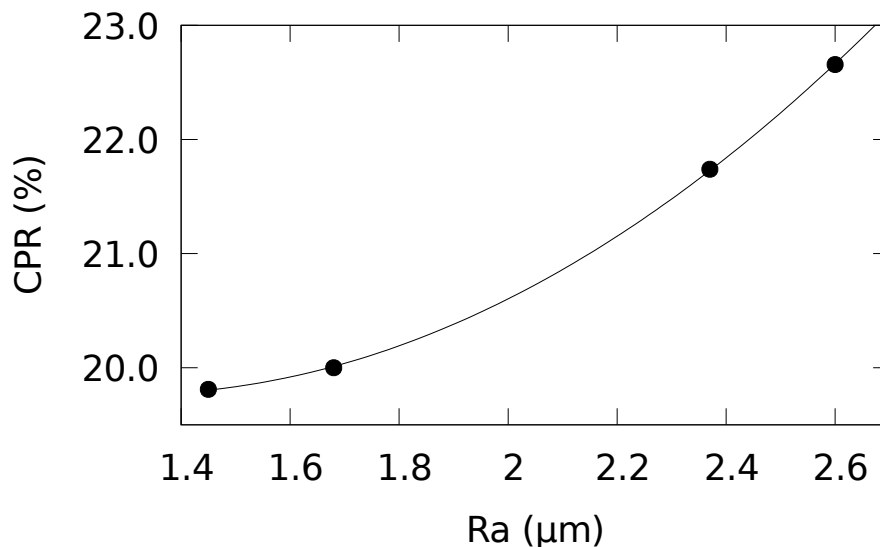


Figura 5.4: Índice CPR de acordo com a rugosidade das amostras.

Vale destacar que na Ref. [56] o estudo foi feito para superfícies com rugosidade randômica enquanto nossas amostras apresentam um acabamento regular, ou seja, não randômico, mais próximo de acabamentos industriais. Desta forma, com base nessas informações, podemos concluir que o CPR pode

ser um ótimo instrumento de calibração para medida indireta de rugosidades em amostras.

A função que melhor se ajustou aos pontos foi  $CPR = 1,72R_a^2 - 4,49R_a + 22,69$ , com  $R^2 = 0.98$ . É importante notar que para criar uma curva de calibração é preciso o estabelecimento de um processo. Nossos resultados são uma prova de princípio.

Como vemos, para estas amostras de rugosidades regulares, não randômicas, apenas a variação de intensidade de luz depolarizada ajusta uma curva exponencial, mais sensível do que polinômios (curva que ajustou a variação do CPR). Sendo assim, nossos resultados indicam que para amostras não randômicas pode ser mais interessante monitorar a intensidade de luz depolarizada, evitando um processamento a mais (cálculo de CPR).

Naturalmente, para que este princípio seja utilizado para medida indireta de rugosidade é necessário a realização de um processo envolvendo mais amostras para construção das curvas de calibração, além de repetições para estabelecimento de precisão e margens de erro.

# Capítulo 6

## Conclusões

Neste trabalho utilizamos o espalhamento da luz em superfícies metálicas para o estudo de rugosidade. Foram propostas duas abordagens. Uma explorou o padrão de speckle gerado pelo espalhamento da luz nas superfícies. Os padrões de speckle foram estudados através do cálculo do expoente de Hurst ( $H$ ). A outra abordagem estudou a rugosidade a partir do efeito de depolarização usando o índice  $CPR$  (*cross polarization ration*) do feixe espalhado pela amostra.

Na primeira abordagem, o objetivo foi analisar a relação do expoente de Hurst ( $H$ ) do perfil topográfico da amostra, obtido por microscopia confocal, com o expoente de Hurst do padrão de speckle gerado pela mesma. Para o comportamento de  $H$  do padrão de speckle, mesmo observando no plano imagem, obtivemos um resultado em excelente acordo com a literatura, pois também observamos que o expoente de Hurst do padrão de speckle aumenta com a rugosidade. Considerando o perfil topográfico das superfícies, nosso trabalho é de uma contribuição inédita, pois mostrou que o expoente de Hurst do perfil também aumenta com a rugosidade. Simulações simples de perfis mostraram que quanto mais regular for a superfície, maior a persistência,

ou seja, maior será o valor de  $H$ . Desta forma, foi possível estabelecer uma relação unívoca entre o expoente de Hurst do padrão de speckle ( $H_s$ ) e o expoente de Hurst do perfil da superfície geradora ( $H_p$ ). A Relação  $H_s \times H_p$  nos permite, em princípio, obter propriedades estatísticas do perfil através do padrão de speckle, uma técnica muito menos custosa comparada à técnicas de levantamento topográficos.

Com o objetivo de investigar a sensibilidade destes métodos, também foi analisada a influência da quantidade de pontos em cada série no cálculo do expoentes de Hurst. Ou seja, não usar todos os *pixels* da imagem do speckle, nem todos os pontos da topografia gerada pelo microscópio confocal. O resultado de uma simulação computacional feita, a princípio com diferentes funções genéricas, mostrou que a diferença seria de um aumento no valor absoluto do  $H$ , com excessão da função totalmente aleatória, já que na teoria temos que o  $H$  de uma função aleatória sempre se aproxima de 0.5. Ao realizarmos essa diferença de pontos nos dados do experimento, foi possível confirmar este comportamento. Quanto maior a quantidade de pontos, maior o valor absoluto de  $H$ , porém o comportamento geral da função se mantém. As curvas ajustadas mantiveram a mesma função, mudando apenas alguns parâmetros.

A segunda abordagem deste trabalho consistiu de analisar o efeito da depolarização da luz incidente em uma amostra rugosa não aleatória. A configuração experimental nos forneceu informações, a partir de um *PBS* (*polarized beam splitter*), a respeito do quanto de intensidade inicial do laser teve sua polarização alterada.

O feixe transmitido pelo *PBS*, ou seja, o feixe que não alterou sua polarização, apresentou o comportamento esperado: sua intensidade cresce com a rugosidade. Este resultado é corroborado pelas imagens do padrão de speckle



que mostram claramente uma maior iluminação para a luz expalhada pela superfície mais rugosa. Por outro lado, o feixe refletido pelo *PBS*, que neste caso é o feixe que foi depolarizado, também apresentou o comportamento esperado: quanto maior a rugosidade, maior a intensidade da luz depolarizada. Apenas com esta informação, já podemos concluir que as amostras mais rugosas depolarizam mais, como discutido na teoria. Porém, esta informação não diz muito sobre a configuração total, ou seja, não relaciona a depolarização com a intensidade geral inicial do laser. Para isso, usamos a definição da razão de polarização cruzada: o *CPR*. Esta razão analisa a depolarização levando em conta o feixe incidente na amostra. O resultado do *CPR* foi análogo aos anteriores: a porcentagem cresceu com a rugosidade. Dessa maneira podemos ver que o feixe não apenas depolarizou, mas o fez mantendo a proporção em relação ao feixe total inicial. Com esta taxa é fácil e rápido compreender a depolarização da configuração experimental de uma maneira global.

Estes resultados também podem ser usados para construirmos uma curva de calibração para medida indireta da rugosidade. Embora o *CPR* seja o parâmetro introduzido para superfícies randômicas, mostramos que para superfícies não randômicas, similar a acabamentos industriais, ele também é aplicável. Nossos resultados indicam, ainda, que no caso de amostras não randômicas apenas a intensidade de luz depolarizada cresce univocamente com a rugosidade, podendo ser este parâmetro usado para construção de curvas de calibração e medidas indiretas.

Como perspectivas futuras para o trabalho, as provas de princípio apresentadas abrem a possibilidade de realização de processos de validação das técnicas para medida indireta da rugosidade. Isso equivale a se fazer um estudo com muitas amostras de forma obter uma curva de calibração de

alto grau de onfiança, repetibilidade e também verificação de aplicação em outros materiais que não os metálicos.

# Referências Bibliográficas

- [1] D. Raoufi, A. Kiasatpour, H. R. Fallah, A. S. H. Rozatian. Surface characterization and microstructure of ITO thin films at different annealing temperatures. *App. Surf. Sci.* **253**,9085–9090 (2007).
- [2] A. Kurhekar, P.R. Apte, and S. Duttagupta. Growth and Characterization of High-Quality Dielectric Sputtered Zinc Oxide Films from the First Principle. *Braz J Phys* **44**, 665–672 (2014).
- [3] M. Rajabi,R.S. Dariani, and A. Irajizad, Growth of ZnO Nanostructures on Porous Silicon and Oxidized Porous Silicon Substrates. *Braz J Phys.* **41**, 113 (2011).
- [4] S.L.A. Maranhão, L.C. Cides da Silva, A.F. Michels, F. Horowitz, J.R. Matos, and M.C.A. Fantini, Structure and Morphology of SBA-15 Thin Films on Different Substrates. *Braz J Phys.* **44**, 346–355 (2014).
- [5] G. Ertl, D. Prigce, R. Schloegl, M. Weiss. Surface Characterization of Ammonia Synthesis Catalysts. *J. Catal.***79**, 359–377 (1983).
- [6] E. H.-J. Kim, X. D. Chen, D. Pearce. Surface characterization of four industrial spray-dried dairy powders in relation to chemical composition, structure and wetting property. *Coll. Surf. B* **26**, 197–212 (2007).

- [7] G. Ertl, D. Prigge, R. Schloegl, M. Weiss. Surface Characterization of Ammonia Synthesis Catalysts. *J. Catal.* 79:359–377.(1983)
- [8] E. H.-J. Kim, X. D. Chen, D. Pearce. Surface characterization of four industrial spray-dried dairy powders in relation to chemical composition, structure and wetting property. *Coll. Surf. B*; 26:197–212.(2007)
- [9] T. Balusamy, T. S. N. S. Narayanan, K. Ravichandran, I. S. Park, M. H. Lee. Influence of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on the corrosion behaviour of AISI 304 stainless steel. *Cor. Sci.* 74:332–344.(2013)
- [10] H. Yun-wei , D. Bo, Z. Cheng, J. Yi-ming , L. Jin. Effect of Surface Mechanical Attrition Treatment on Corrosion Behavior of 316 Stainless Steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*; 16:68–72.(2009)
- [11] T. R. Thomas, *Rough Surfaces*. London, Longman. 1982.
- [12] D. B. Barker, M. E. Fourney. Displacement measurements in the interior of 3-D bodies using scattered-light speckle patterns. *Exp. Mech.*; 16:209–214. (1976)
- [13] R. J. Adrian. Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurement of fluid flow: speckle velocimetry vs particle image velocimetry. *App. Opt.* 23:1690–1691.(1984)
- [14] J. A. Leendertz. Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect. *J. Phys. E: Sci. Instrum*; 3:214–218.(1970)

- [15] E. Archbold, J. M. Burch, A. E. Ennos, Recording of n-plane surface displacement by double-exposure speckle photography, *Opt. Acta*; 17:883–898.(1970)
- [16] A. E. Ennos. Speckle Interferometry. *Prog. Optics*; 16:233-288.(1978)
- [17] T. Fricke-Begemann et al., Corrosion monitoring with speckle correlation, *Appl. Opt*;38:5948–5955.(1999)
- [18] O.J. Løkberg. Speckle Techniques for Use in Biology and Medicine. *Opt.Biomed. Sci.* 31:144-153. (1982)
- [19] S. E. Murialdo, H. Sendra, L.I. Passoni, R.Arizaga, J. Froiln Gonzalez, H.Rabal, M.Trivi. Analysis of bacterial chemotactic response using dynamic laser speckle. *J. Biomed. Opt.* 14:064015.(2009)
- [20] T. Yoshizawa, *Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications*, Taylor & Francis Group, LLC, 2008.
- [21] L. C. Leonard, V. Toal. Roughness measurement of metallic surfaces based on the laser speckle contrast method Author links open overlay panel. *Opt. Laser Eng.* 30:433–440.(1998)
- [22] U. Persson. Surface roughness measurement on machined surfaces using angular speckle correlation. *J. Mater. Process. Technol.* 180:233–238. (2006)
- [23] E. Kayahan et al., Measurement of surface roughness of metals using binary speckle image analysis, *Tribol. Int.* 43:307–311.(2010)
- [24] J. B. Meireles et al., Effect of metallic surface roughness on the speckle patterns formation at diffraction plane, *Opt. Lasers Eng.* 50:1731–1734.(2012)

- [25] R. D. Corrêa et al., Fractal structure of digital speckle patterns produced by rough surfaces, *Phys. A* 392:869–874.(2013)
- [26] A. L. Sampaio, D. C. Lobão, P. A. M. Santos, L. C. S. Nunes, L. Silva, J. A. O. Huguenin, Hurst exponent determination for digital speckle patterns in roughness control of metallic surfaces. *Opt. Lasers Eng.* 49:32–35.(2011)
- [27] H. C. Soares L. da Silva, D.C. Lobão, D.P. Caetano, J.A.O. Huguenin. Hurst exponent analysis of moving metallic surfaces, *Physica A* 392:5307–5312. (2013)
- [28] M.H.M. Passos, M.R.Lemos, S.R. Almeida, W.F.Balthazar,L. Silva and J.A.O.Huguenin. Speckle patterns produced by an optical vortex and its application to surface roughness measurements. *Appl. Opt.*56: 330–335. (2017)
- [29] O. S. Martinez, J. A. M. Salgado, D. M. Cruz, J. U. Chavarin and E. S. Bustos. Rough Surfaces Profiles and Speckle Patterns Analysis by Hurst Exponent Method. *Mater. Sci. Eng. B* 12:759-766. (2013)
- [30] Leica DCM3D Version 3.3 Manual. Leica Microsystems Wetzlar GmbH. 2012.
- [31] T. Balusamy, T. S. N. S. Narayanan, K. Ravichandran, I. S. Park, M. H. Lee. Influence of surface mechanical attrition treatment (SMAT)on the corrosion behaviour of AISI 304 stainless steel. *Cor. Sci.* **74**, 332–344 (2013).
- [32] H. Yun-wei , D. Bo, Z. Cheng, J. Yi-ming , L. Jin. Effect of Surface Mechanical Attrition Treatment on Corrosion Behavior of 316 Stainless Steel. *Journal of Iron and Steel Research International* **16**, 68–72 (2009).

- [33] T. R. Thomas, *Rough Surfaces*. London, Longman. 1982.
- [34] T.V.Vorburger and E.C.Teague. Optical techniques for on-line measurement of surface topography. *Precision Engineering* **3**, 61-83 (1981).
- [35] Whitefield, R. J. Noncontact optical profilometer. *Applied Optics* **14**, 2480-2485 1975
- [36] Lin, Yu-Kai; Chang, Chun-Wei; Hou, Max T.; Hsu, I-Jen. Vibration-immune high-sensitivity profilometer built with the technique of composite interferometry. *Applied Optics* **55**, 1885–1889 (2016).
- [37] Liu, Zhuang; Zhong, Qize; Yu, Xia; Wang, Qi Jie; Zhang, Ying. High-resolution fiber profilometer for hard-to-access areas. *Applied Optics* **54**, 7205–7209 (2015).
- [38] J. W. Goodman. Some fundamental properties of speckle. *J. Opt. Soc. Am.***66**, 1145-1150 (1976).
- [39] D. Leger and J. C. Perrin. Real-time measurement of surface roughness by correlation of speckle patterns. *J. Opt. Soc. Am.* **66**, 1210–1217 (1976).
- [40] C. J. Tay, S. E. Toh, H. M. Shang, and J. B. Zhang. Whole-field determination of surface roughness by speckle correlation. *Appl. Opt.* **34**, 2324–2335 (1995).
- [41] U. Persson. Surface roughness measurement on machined surfaces using angular speckle correlation. *J. Mater Process Technol*; **180** **233** (2006).

- [42] E. Kayahan, H. Oktemb, F. Hacizade, H. Nasibov, O. Gundogdu. Measurement of surface roughness of metals using binary speckle image analysis. *Tribol. Int.* 43, 307–311 (2010).
- [43] J.B. Meireles, L. da Silva, D.P. Caetano, J.A.O. Huguenin. Effect of metallic surface roughness on the speckle pattern formation at diffraction plane. *Opt. Lasers Eng.* 50 1731–1734 (2012).
- [44] R.C. Correa, J.B. Meireles, J.A.O. Huguenin, D.P. Caetano, L. da Silva. Fractal structure of digital speckle patterns produced by rough surfaces *Physica A* 392 869–874 (2013).
- [45] H.C. Soares, J.B. Meireles, A.O. Castro Junior, J.A.O. Huguenin, A.G.M. Schmidt, L. da Silva. Tsallis threshold analysis of digital speckle patterns generated by rough surfaces. *Physica A* 432 1-8 (2015).
- [46] M.R.B. Dias, D. Dornelas, W.F. Balthazar, J.A.O. Huguenin, L. da Silva. Lacunarity study of speckle patterns produced by rough surfaces. *Physica A* 486, 328–336 (2017).
- [47] A.L. Sampaio, D.C. Lob/ ao, P.A.M. Santos, L.C.S. Nunes, L. Silva, J.A.O. Huguenin. Hurst exponent determination for digital speckle patterns in roughness control of metallic surfaces. *Opt. Lasers Eng.* 49 32–35 (2011).
- [48] M.H.M. Passos, M.R. Lemos, S.R. Almeida, W.F. Balthazar, L. da Silva, and J.A.O. Huguenin. Speckle patterns produced by an optical vortex and its application to surface roughness measurements. *Applied optics* 56, 330–335 (2017).



- [49] W. T. Welford. Optical estimation of statistics of surface roughness from light scattering measurements. *Opt Quant Electron* 9, 269-287 (1977).
- [50] C. S. West and K. A. O' Donnell. Observations of backscattering enhancement from polaritons on a rough metal surface. *J. Opt. Soc. Am. A* 12, 390–397 (1995).
- [51] R. L. Voti, G. L. Leahu, S. Gaetani, C. Sibilìa, V. Violante, E. Castagna, and M. Bertolotti. Light scattering from a rough metal surface: theory and experiment. *J. Opt. Soc. Am. B* 26, 1585 (2009).
- [52] K. E. Torrance, E. M. Sparrow, and R. C. Birkebak. Polarization, Directional Distribution, and Off-Specular Peak Phenomena in Light Reflected from Roughened Surfaces. *J. Opt. Soc. Am.* 56, 916–925 (1966).
- [53] E. Bahar and X. Shi. The scattering and depolarization of electromagnetic waves by random rough surfaces with different scales of roughness: New full wave solutions. *Int. J. Remote Sens.* 19, 2171–2185 (1998).
- [54] B. J. DeBoo, J. M. Sasian, and R. A. Chipman. Depolarization of diffusely reflecting man-made objects. *Appl. Opt.* 44, 5434 (2005).
- [55] J. M. S. Crespo and M. N. Vesperinas. Electromagnetic scattering from very rough random surfaces and deep reflection gratings. *J. Opt. Soc. Am. A* 6, 367-384(1989).

- [56] L. Liu, X. Li, and K. Nonaka. Light depolarization in off-specular reflection on submicro rough metal surfaces with imperfectly random roughness. *Review of Scientific Instruments* 86, 023107 (2015).

# Apêndice A

## Lista de trabalhos produzidos

### A.1

#### **Comparative study between surface profile and the generated speckle patterns by using Hurst exponent**

A.L.P. Camargo,<sup>1,2</sup> M.R. Lemos,<sup>2</sup> M.M. Mello,<sup>3</sup> L. da Silva,<sup>1,3</sup> P.A.M. dos Santos,<sup>4</sup> and J. A. O. Huguenin<sup>1,2, a)</sup>

<sup>1)</sup>*Instituto de Ciências Exatas,*

*Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda - RJ, CEP 27213-145, Brazil.*

<sup>2)</sup>*Programa de Pós-Graduação em Física,*

*Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ, CEP 24240-145, Brazil.*

<sup>3)</sup>*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,*

*Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda,*

*Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda - RJ, CEP 27255-125, Brazil.*

<sup>4)</sup>*Instituto de Física,*

*Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ, CEP 24240-145, Brazil.*

(Dated: 31 January 2018)

This work expands the use of Hurst exponent in the study of surface roughness and surface analyses. We applied the Hurst exponent technique in a experimental study and analysis for surface profile ( $H_p$ ) and the generated speckle patterns ( $H_s$ ). A clear correlation between them is observed showing that, in principle, information of Hurst exponent of the profile can be obtained from Hurst exponent of the generated speckle patterns. By means of a very simple profile simulation we show that the Hurst exponent is sensitive to different profile defects. We present a proof of principle that speckle patterns can also reveal finishing characteristics of metallic surfaces in a very simple way.

Keywords: Hurst exponent; Speckle Pattern; Roughness.

## A.2

### Roughness measurement by depolarization of scattered light in rough surfaces

A.L.P. Camargo<sup>1,2</sup>, C.E. Fellows<sup>1,2</sup>, M.R. Lemos<sup>2</sup>, M.M. Mello<sup>3</sup>, L. da Silva<sup>1,3</sup>,  
and J. A. O. Huguenin<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> *Instituto de Ciências Exatas,  
Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda - RJ, CEP 27213-145, Brazil.*

<sup>2</sup> *Programa de Pós-Graduação em Física,  
Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ, CEP 24240-145, Brazil.*

<sup>3</sup> *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,  
Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda,  
Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda - RJ, CEP 27255-125, Brazil.*

<sup>4</sup> *Instituto de Física,  
Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ, CEP 24240-145, Brazil.*

---

#### Abstract

Light scattering by rough surfaces give rise to numerous proposed methods to evaluate surface's roughness. In the present work we present a study which combines different aspects in order to present a simple propose to roughness measurement by monitoring the intensity of depolarized light. A polarized laser beam shines different rough surfaces and the intensity of scattered light at normal direction is monitored. By using a polarized beam splitter we can evaluate the amount of depolarized light. We observed a monotonic dependence by respect the surface roughness, which can be used to construct a calibration curve in order to perform an indirect measurement of roughness.

*Keywords:* Scattering; Depolarization; Roughness.

---

\*Corresponding author. Email: huguenin@if.uff.br. Address: Rua Desembargador Ellis Hermydio Figueira 783, Aterrado, Volta Redonda - RJ, CEP 27.213-145, Brasil.

## Apêndice B

# Código em C para o cálculo do expoente de Hurst

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include <sys/types.h>
#include <dirent.h>
void serie(char *str);
void perfil(char *str);
void imagem(char *str);
main()
{
    int op, i;
    char str[10], *pch;
    DIR *dp;
    struct dirent *ep;
```

```

size_t size;

printf("\n*** Calculo do Expoente de Hurst ***\n\nDigite somente o
numero do que deseja calcular:\n1-Serie\n2-Perfil\n3-Imagem\n\n");
fgets(str, sizeof(str), stdin);
op = atoi(str);
switch(op)
{
    case 1:
        printf("Certifique-se de que os arquivos de entrada estao na mesma
        pasta que este programa.\n\nOs arquivos devem seguir o seguinte
        padrao: serie_#.dat\n\n");
        strcpy(str,"serie_");
        dp = opendir (".");
        if (dp != NULL)
        {
            i = 0;
            while (ep = readdir (dp))
            {
                size = strlen(ep->d_name);
                if(size >= 6 && ep->d_name[size-4] == '.' &&
                ep->d_name[size-3] == 'd' && ep->d_name[size-2] == 'a' &&
                ep->d_name[size-1] == 't' && ep->d_name[0] == 's' &&
                ep->d_name[1] == 'e' && ep->d_name[2] == 'r' &&
                ep->d_name[3] == 'i' && ep->d_name[4] == 'e' &&
                ep->d_name[5] == '_')
                {
                    serie(ep->d_name);
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        i++;
    }
    else
    {
        printf("Arquivo %s encontrado nao segue a estrutura
        \\"serie_#.dat\\"\\n", ep->d_name);
    }
}
if(i == 0)
{
    printf("A pasta nao contem nenhum arquivo que siga a
    estrutura \\"serie_#.dat\\"\\n");
}
(void) closedir (dp);
}
else
    perror ("Couldn't open the directory");
break;
case 2:
printf("Certifique-se de que os arquivos de entrada estao na mesma
pasta que este programa.\\n\\nOs arquivos devem seguir o seguinte
padrao: perfil_#.dat\\n\\n");
strcpy(str,"perfil_");
dp = opendir (".");
if (dp != NULL)
{
    i = 0;

```

```

while (ep = readdir (dp))
{
    size = strlen(ep->d_name);
    if(size >= 7 && ep->d_name[size-4] == '.' &&
ep->d_name[size-3] == 'd' && ep->d_name[size-2] == 'a' &&
ep->d_name[size-1] == 't' && ep->d_name[0] == 'p' &&
ep->d_name[1] == 'e' && ep->d_name[2] == 'r' &&
ep->d_name[3] == 'f' && ep->d_name[4] == 'i' &&
ep->d_name[5] == 'l' && ep->d_name[6] == '_' )
    {
        perfil(ep->d_name);
        i++;
    }
}
if(i == 0)
{
    printf("A pasta nao contem nenhum arquivo que siga a
estrutura \"perfil_#.dat\"\n");
}
(void) closedir (dp);
}
else
    perror ("Couldn't open the directory");
break;
case 3:
printf("Certifique-se de que os arquivos de entrada estao na mesma
pasta que este programa.\n\nOs arquivos devem seguir o seguinte

```



```

padrao: imagem_#.jpg\n\n");
strcpy(str,"imagem_");
dp = opendir (".");
if (dp != NULL)
{
    i = 0;
    while (ep = readdir (dp))
    {
        size = strlen(ep->d_name);
        pch = strstr(ep->d_name, str);
        if(size >= 4 && ep->d_name[size-4] == '.' &&
ep->d_name[size-3] == 'j' && ep->d_name[size-2] == 'p' &&
ep->d_name[size-1] == 'g' && pch)
        {
            imagem(ep->d_name);
            i++;
        }
    }
    if(i == 0)
    {
        printf("A pasta nao contem nenhum arquivo que siga a
estrutura \"imagem_#.jpg\"\n");
    }
    (void) closedir (dp);
}
else
    perror ("Couldn't open the directory");

```

```

        break;
    }
}
void serie(char *str)
{
    int i, n;
    float *x = NULL;
    float s, media, R, max, min, S, aux, H;
    FILE *p;
    p = fopen(str,"r");
    n = 0;
    while(!feof(p))
    {
        fscanf(p, "%f\n", &s);
        n++;
    }
    fclose(p);
    x = (float*)calloc(n,sizeof(float));
    p = fopen(str,"r");
    for(i=0; i<n; i++)
fscanf(p, "%f\n", &x[i]);
    fclose(p);
    s = 0;
    for(i=0; i<n; i++)
        s+=x[i];
    media=s/n;
    x[0]=x[0]-media;

```

```

aux=x[0]*x[0];
for(i=1; i<n; i++)
{
    x[i]-=media;
    aux+=x[i]*x[i];
    x[i]=x[i]+x[i-1];
}
S=sqrt(aux/n);
max=x[0];
min=x[0];
for(i=1; i<n; i++)
{
    if(max<x[i])
        max=x[i];
    if(min>x[i])
        min=x[i];
}
R=max-min;
H = log(R/S)/log(n);
printf("\nExpoente de Hurst de %s: %.5f\n\n", str, H);
}
void perfil(char *str)
{
    int i, n, m, tamanho, fim;
    float x, y, y0, *z, s, media, R, max, min, S, aux, k, H;
    char saida[25];
    FILE *p, *q;

```

```

strcpy(saida,"saida_");
strcat(saida,str);
q = fopen(saida,"w");
fim = 0;
p = fopen(str,"r");
fscanf(p, "%f %f %f\n", &x, &y0, &s); //so para inicializar o y0
fclose(p);
while(fim == 0)
{
    p = fopen(str,"r");
    n = 0;
    do
    {
        fscanf(p, "%f %f %f\n", &x, &y, &s);
        n++;
    }while((y != y0) && !feof(p));
    m = n-1;
    while((y == y0) && !feof(p))
    {
        fscanf(p, "%f %f %f\n", &x, &y, &s);
        n++;
    }
    if(feof(p))
        fim = 1;
    else
        n = n-1;
    fclose(p);
}

```

```

tamanho = n - m;
z = (float*)calloc((tamanho),sizeof(float));
p = fopen(str,"r");
for(i = 0; i < m; i++)
fscanf(p, "%f %f %f\n", &x, &y, &s);
for(i = 0; i < tamanho; i++)
    fscanf(p, "%f %f %f\n", &x, &y, &z[i]);
y = y0;
if(fim == 0)
    fscanf(p, "%f %f %f\n", &x, &y0, &s);
fclose(p);
s = 0;
for(i=0; i<tamanho; i++)
    s+=z[i];
media=s/tamanho;
z[0]=z[0]-media;
aux=z[0]*z[0];
for(i=1; i<tamanho; i++)
{
    z[i]-=media;
    aux+=z[i]*z[i];
    z[i]=z[i]+z[i-1];
}
S=sqrt(aux/tamanho);
max=z[0];
min=z[0];
for(i=1; i<tamanho; i++)

```

```

        {
            if(max<z[i])
                max=z[i];
            if(min>z[i])
                min=z[i];
        }
        R=max-min;
        H = log(R/S)/log(tamanho);
        fprintf(q, "%f %.5f\n", y, H);
        free(z);
    }
    fclose(q);
    printf("\nCalculado para o arquivo %s, salvo no arquivo %s\n\n", str,
saida);
}

void imagem(char *str)
{
    int i, n, m, count, tamanho, fim;
    float x, y, y0, *z, s, media, R, max, min, S, aux, k, H;
    char saida[25], conv[60], auxstr[25];
    FILE *p, *q;
    strcpy(conv,"convert ");
    strcat(conv,str);
    strcat(conv," -colorspace gray data.txt");
    system(conv);
    strncpy(auxstr,str,strlen(str)-3);
    strcat(auxstr,"dat");
}

```

```

q = fopen(auxstr,"w");
p = fopen("data.txt","r");
count = fscanf(p, "# ImageMagick pixel enumeration: %d"
               ",%d"
               ",%d,gray",
               &n, &m, &i);
while(!feof(p))
{
    count = fscanf(p, "%d"
                  ",%d"
                  ": (%f"
                  ") #s"
                  " gray(%d)",
                  &n, &m, &s, conv, &i);
    if (count == 5)
        fprintf(q, "%d %d %f\n", n, m, s);
}
fclose(p);
fclose(q);
strcpy(saida,"saida_");
strcat(saida,auxstr);
q = fopen(saida,"w");
fim = 0;
p = fopen(auxstr,"r");
fscanf(p, "%f %f %f\n", &x, &y0, &s); //so para inicializar o y0
fclose(p);
while(fim == 0)

```

```

{
    p = fopen(auxstr,"r");
    n = 0;
    do
    {
        fscanf(p, "%f %f %f\n", &x, &y, &s);
        n++;
    }while((y != y0) && !feof(p));
    m = n-1;
    while((y == y0) && !feof(p))
    {
        fscanf(p, "%f %f %f\n", &x, &y, &s);
        n++;
    }
    if(feof(p))
        fim = 1;
    else
        n = n-1;
    fclose(p);
    tamanho = n - m;
    z = (float*)calloc((tamanho),sizeof(float));
    p = fopen(auxstr,"r");
    for(i = 0; i < m; i++)
fscanf(p, "%f %f %f\n", &x, &y, &s);
        for(i = 0; i < tamanho; i++)
            fscanf(p, "%f %f %f\n", &x, &y, &z[i]);
    y = y0;

```



```

if(fim == 0)
    fscanf(p, "%f %f %f\n", &x, &y0, &s);
fclose(p);
s = 0;
for(i=0; i<tamanho; i++)
    s+=z[i];
media=s/tamanho;
z[0]=z[0]-media;
aux=z[0]*z[0];
for(i=1; i<tamanho; i++)
{
    z[i]-=media;
    aux+=z[i]*z[i];
    z[i]=z[i]+z[i-1];
}
S=sqrt(aux/tamanho);
max=z[0];
min=z[0];
for(i=1; i<tamanho; i++)
{
    if(max<z[i])
        max=z[i];
    if(min>z[i])
        min=z[i];
}
R=max-min;
H = log(R/S)/log(tamanho);

```

```
        fprintf(q, "%f %.5f\n", y, H);
        free(z);
    }
    fclose(q);
    system("rm data.txt");
    printf("\nCalculado para o arquivo %s, gerado o arquivo %s, expoente
de Hurst salvo no arquivo %s\n\n", str, auxstr, saida);
    strcpy(auxstr, "");
}
```