

Universidade de São Paulo  
Instituto de Física



# MEDIDA DE RUGOSIDADE POR *ex-1* CORRELAÇÃO ANGULAR DE SPECKLE

LUIZ ALBERTO BORBELY

SBI-IFUSP



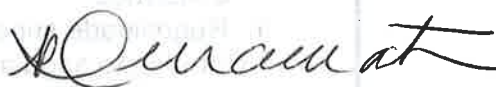
305M810T4199

Banca Examinadora

Prof. Dr. Mikiya Muramatsu (orientador)- IFUSP

Prof. Dr. Sadao Isotani - IFUSP

Prof. Dr. Oswaldo Horikawa - EP/USP

  
Orientador: Prof. Dr. Mikiya Muramatsu

Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Física para a obtenção do título de Mestre em Ciências

São Paulo  
Fevereiro / 2005

  
Prof. Armando Corbani Ferraz  
Presidente da Comissão de Pós Graduação

del. 18/01/05

535  
B 726 m

M

ex. 1

**FICHA CATALOGRÁFICA**  
**Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação**  
**do Instituto de Física da Universidade de São Paulo**

- Borbely, Luiz Alberto

Medida de rugosidade por correlação angular de  
speckle. São Paulo - 2005

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo  
Instituto de Física - Departamento de Física Geral.

Orientador: Prof. Dr. Mikiya Muramatsu.  
Área de Concentração: Física.

**Unitermos**

1. Rugosidade superficial ; 2. Laser-speckle ; 3. Ótica
- Correlação angular de speckle ; 4. Processamento da  
imagem.

USP/IF/SBI-003/2005

*À minha querida e amada esposa Edna, que em momento algum me  
deixou fraquejar diante das grandes dificuldades.*

## **Agradecimentos**

Ao **Prof. Dr. Mikiya Muramatsu** pela orientação, pela oportunidade de realizar esse trabalho e principalmente pela confiança em mim depositada.

Ao amigo **Raul Dias Paiva Jr.** pela paciência em me explicar como era o arranjo experimental do rugosímetro e como eram feitas as aquisições das imagens.

Ao amigo **Eduardo Ferrara** pelos incentivos quando lhe mostrava partes desse trabalho.

Ao amigo **Douglas** do Laboratório de Metrologia do IPT pelas medidas de rugosidades das minhas amostras.

A todos os amigos do Laboratório de Óptica que me ajudaram sempre que precisei.

A todos os professores que me ensinaram, e que sem eles esse trabalho nunca teria sido realizado.

A todos os amigos da Itaotec que sempre me apoiaram e incentivaram para que eu completasse esse trabalho.

## **Resumo**

Esse trabalho apresenta o método de correlação angular de speckle. Esse método foi melhorado para ser aplicado na medição de rugosidade na faixa de  $30\mu\text{m}$  a  $0,1\mu\text{m}$ . Um programa de computador foi desenvolvido para processar imagens e calcular a correlação angular, e novas fórmulas matemáticas foram deduzidas.

## **Abstract**

This work presents the speckle pattern angular correlation method. This method was improving to be applicable in the roughness measuring in the range of  $0,1\mu\text{m}$  to  $30\mu\text{m}$ . A software was developed to process image and to calculate the angular correlation, and new mathematical equations were formulating.

# Índice

1- INTRODUÇÃO .....	9
2- FORMAÇÃO DO PADRÃO DE SPECKLE .....	11
2.1- Fenômeno de Interferência .....	11
2.2- Rede de Difração .....	12
2.3- O Padrão de Speckle.....	14
3- PARÂMETROS E TÉCNICAS DE MEDIÇÃO .....	16
3.1- Parâmetros de Rugosidade .....	16
3.1.1 - Parâmetro Ra .....	16
3.1.2 - Parâmetro Rq .....	17
3.2- Técnicas de Medição de Rugosidade .....	17
3.2.1- Comparação Através dos Sentidos.....	18
3.2.2- Microscopia .....	18
3.2.3- Perfilômetros Mecânicos.....	18
3.2.4- Perfilômetros Ópticos.....	19
3.2.5- Micro-interferômetros .....	19
3.2.6- Rugosímetros baseados no espalhamento de luz .....	19
3.2.6.1- Espalhamento Integrado Total (TIS).....	19
3.2.6.2- Espalhamento por Resolução em Ângulo .....	19
3.2.6.3- Contraste do Padrão de Speckle.....	20
4- DEDUÇÃO TEÓRICA .....	21
4.1- Correlação Angular de Speckle (CAS) .....	21
4.2- Condição de Alinhamento entre Padrões de Speckle.....	28

4.3-	Cálculo da Correlação entre Imagens com 256 tons de cinza.....	29
4.4-	Correção no Cálculo da Correlação entre Imagens de Speckle .....	31
5-	MONTAGEM EXPERIMENTAL.....	34
5.1-	Arranjo Experimental da Correlação Angular .....	34
5.2-	Alinhamento da Montagem .....	36
5.3-	Aquisição das Imagens e Cálculo da Correlação .....	38
5.4-	Procedimento na Medição da Rugosidade .....	40
6-	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	42
6.1-	Alinhamento entre Padrões de Speckle.....	42
6.2-	Correção na Posição do Pixel Correspondente .....	46
6.2.1-	Amostra Preparada com Lixa 80 .....	47
6.2.1.1-	Medida 1 .....	47
6.2.1.2-	Medida 2.....	50
6.2.1.3-	Medida 3 .....	53
6.2.1.4-	Comparação Com o Rugosímetro Mecânico .....	56
6.2.2-	Amostra Preparada com Lixa 100.....	57
6.2.2.1-	Medida 1 .....	57
6.2.2.2-	Medida 2.....	60
6.2.2.3-	Comparação Com o Rugosímetro Mecânico .....	63
6.2.3-	Amostra Preparada com Lixa 120.....	64
6.2.3.1-	Medida 1 .....	64
6.2.3.2-	Medida 2.....	67
6.2.3.3-	Comparação Com o Rugosímetro Mecânico .....	69
6.2.4-	Amostra Preparada com Lixa 150.....	70



6.2.4.1- Medida 1 .....	70
6.2.4.2- Medida 2 .....	73
6.2.4.3- Comparação Com o Rugosímetro Mecânico .....	75
6.2.5- Amostra Preparada Através de Ataque Químico .....	76
6.2.5.1- Medida 1 .....	76
6.2.5.2- Comparação Com o Rugosímetro Mecânico .....	78
6.3- Resumo das Medições .....	79
7- PROGRAMA RUGO .....	80
7.1- Método de Alinhamento .....	81
8- CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	82
9- PERSPECTIVAS FUTURAS .....	83
9.1- Melhorias no Método de Correlação .....	83
9.2- Automação do Rugosímetro .....	83
9.3- Melhorias no Programa Rugo.....	83
10-REFERÊNCIAS .....	84

# 1- INTRODUÇÃO

A rugosidade de superfícies corresponde a uma propriedade importante de materiais e componentes usados em tecnologia. Em muitas aplicações a rugosidade deve ser cuidadosamente controlada para se obter as características desejadas dos equipamentos. Como exemplos em que a rugosidade deve ser controlada temos:

- No encaixe de peças mecânicas;
- Em superfícies que se movem em relação a outras;
- No controle do atrito, do desgaste e da lubrificação (retenção do lubrificante);
- No acabamento de superfícies ópticas para controlar a reflexibilidade e difusibilidade, inclusive em superfícies de elementos usados em iluminação;
- No acabamento de peças, para controlar a aparência e a funcionalidade, como retenção de poeira, adesão de colas, tintas e adesivos;
- Na indústria de tintas e revestimentos para acabamentos de superfícies;
- Nas indústrias gráfica e de filmes fotográficos;
- Na bioengenharia, em fabricação de próteses e de equipamentos que entram em contato com tecidos e fluidos biológicos;
- Na odontologia, no controle da rugosidade em restaurações dos dentes, para se evitar acúmulo de bactérias;
- Nas superfícies de tubulações para transporte de fluidos;
- Nas superfícies de catalisadores;
- Na fabricação de elementos de armazenamento de informação em computação, tais como discos e fitas magnéticas e discos ópticos (CDs);
- No acabamento de superfícies, visando preservá-las de agentes corrosivos;
- Nos processos industriais de usinagem, laminação, e injeção.

O uso da óptica para a determinação dos parâmetros de rugosidade apresenta várias características metrológicas interessantes:

- Não há contato mecânico entre o “apalpador”, que no caso é a luz, e o objeto a ser caracterizado, não havendo portanto desgaste;
- O procedimento pode ser rápido e a área varrida pode ser variada dentro de amplos limites;
- O processo se presta facilmente a processamento automático, usando-se técnicas de aquisição e processamento de imagens, fornecendo parâmetros que podem ser correlacionados com aqueles fornecidos por apalpadores mecânicos;
- os resultados obtidos dependem de parâmetros mensuráveis e do comprimento de onda da luz utilizada, que se mantém muito estável e pode ser determinada com grande precisão.

Se existem tantos métodos para se medir rugosidade como os citados no capítulo 3 por que então desenvolver mais um como o de Correlação Angular de Speckle ? A resposta para essa pergunta é bem simples, todos os métodos existentes tem suas limitações e para supri-las buscamos novos métodos.

Alguns dos motivos que nos levaram a desenvolver esse método é a sua simplicidade e precisão.

A originalidade desse trabalho está na ampliação da faixa de medição de rugosidade do método de Correlação Angular de Speckle, que antes era possível apenas utilizá-lo em superfícies com  $R_q$  entre 30 a  $1\mu\text{m}$ . Foi ampliada para até  $0,1\mu\text{m}$ , o que a princípio parecia algo impossível, pois eram necessários deslocamentos angulares maiores do que os possíveis na prática, além da fórmula principal considerar deslocamentos angulares pequenos.

Para que isso fosse possível foram necessários novas fórmulas, novas considerações no cálculo da correlação angular e também o desenvolvimento de um programa de computador para alinhamento das imagens dos padrões de speckle.

## 2- FORMAÇÃO DO PADRÃO DE SPECKLE

Para entendermos a formação do padrão de speckle são necessárias algumas noções do fenômeno óptico de interferência devido a natureza ondulatória da luz.

### 2.1- Fenômeno de Interferência

A luz é uma onda eletromagnética transversal que se caracteriza por um campo elétrico e um campo magnético que variam com o tempo. Vamos por convenção considerar apenas o campo elétrico, pois é esse que na maioria dos casos interage com a superfície refletora de modo muito mais intenso que o campo magnético.

Vamos considerar duas ondas elétricas de amplitude  $A$  da mesma fonte, mas caracterizadas por uma diferença de fase  $\alpha$ . Podemos escrever essas ondas como:

$$E_1 = Ae^{-i(kx - wt)} \quad \text{e} \quad E_2 = Ae^{-i(kx - wt + \alpha)} \quad (2.1)$$

Superpondo-se essas duas ondas teremos:

$$E = 2Ae^{-i(kx - wt)} e^{-i\alpha/2} \cos(\alpha/2) \quad (2.2)$$

A intensidade luminosa  $I$  é dada por:

$$I(x, t) = E^*(x, t)E(x, t) \quad (2.3)$$

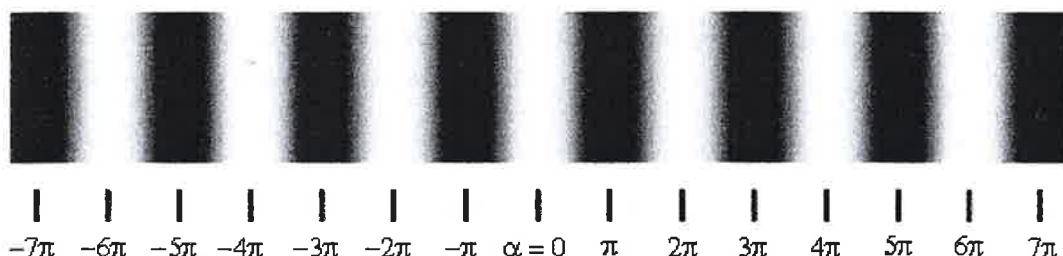
onde  $E^*(x, t)$  representa o conjugado complexo do campo elétrico.

Substituindo-se 2.2 em 2.3 temos:

$$I = 4A^2 \cos^2(\alpha / 2) \quad (2.4)$$

A intensidade dos feixes superpostos pode variar entre 0 e o dobro da soma  $2A^2$  das intensidades dos feixes individuais.

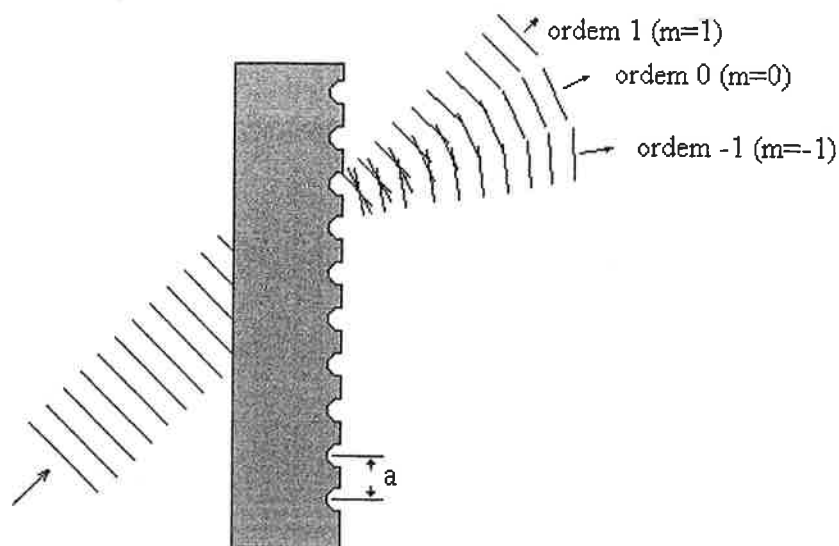
A figura 2.1 mostra o efeito da interferência em 256 tons de cinza. Nos pontos onde a intensidade é máxima, ou seja,  $4A^2$ , o valor do tom do pixel é igual a 255 (branco) e onde é mínima, ou seja, 0, o valor do tom do pixel é igual a 0 (preto).



**Figura 2.1** - Intensidade dada pela expressão 2.4 para valores de  $\alpha$  igual a múltiplos de  $\pi$ . Os valores estão representados em 256 tons de cinza em escala linear, onde o tom branco é igual a 255 e o preto é igual a 0.

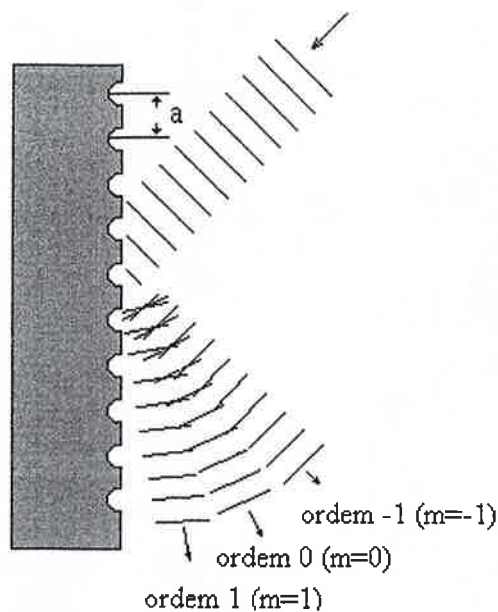
## 2.2- Rede de Difração

Uma rede de difração é o conjunto repetitivo de elementos difratores, esses elementos são aberturas ou obstáculos na superfície que produzem alterações periódicas na fase, na amplitude ou em ambas. Na figura 2.2 temos uma rede de difração, cujos elementos difrativos estão espaçados de  $a$ , e que produzem alterações na fase transformando o feixe de luz incidente no feixe refratado principal de ordem 0 e nos feixes refratados secundários de ordem 1 e -1.



**Figura 2.2** - Rede de difração com elementos difrativos espaçados periodicamente de  $a$ . Os elementos difrativos provocam alteração na fase transformando o feixe incidente no feixe refratado principal de ordem 0 e nos feixes refratados secundários de ordem 1 e -1.

De forma semelhante, temos também a rede de reflexão. Neste caso é utilizada uma superfície refletora. Na figura 2.3 temos uma rede de reflexão, cujos elementos difrativos estão espaçados de  $a$ , e que produzem alterações na fase transformando o feixe de luz incidente no feixe refletido principal de ordem 0 e nos feixes refletidos secundários de ordem 1 e -1.

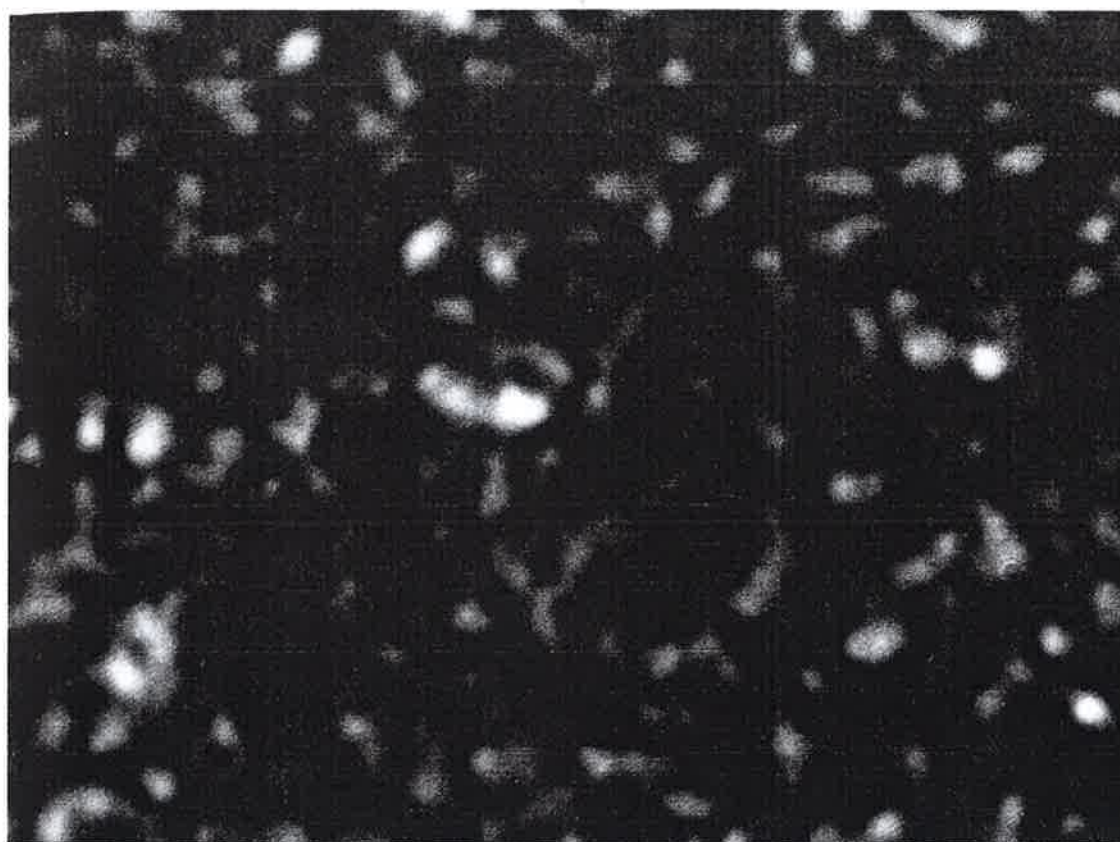


**Figura 2.3** - Rede de reflexão com elementos difrativos espaçados periodicamente de  $a$ . Os elementos difrativos provocam alteração na fase transformando o feixe incidente no feixe refletido principal de ordem 0 e nos feixes refletidos secundários de ordem 1 e -1.

### 2.3- O Padrão de Speckle

Quando temos uma rede de difração ou de reflexão cujos elementos difrativos estão posicionados de forma aleatória na superfície, ou seja, não há uma formação periódica, o que temos é a formação do padrão de speckle e não mais os feixes de ordem 0, 1 e -1.

A imagem 2.1 mostra um padrão de speckle formado através de uma superfície com irregularidades aleatórias. Podemos considerar essas irregularidades como sendo os elementos difrativos. Vale ainda lembrar que essa imagem é um padrão de intensidade de luz formado pela interferência de ondas eletromagnéticas e não uma imagem das irregularidades da superfície.



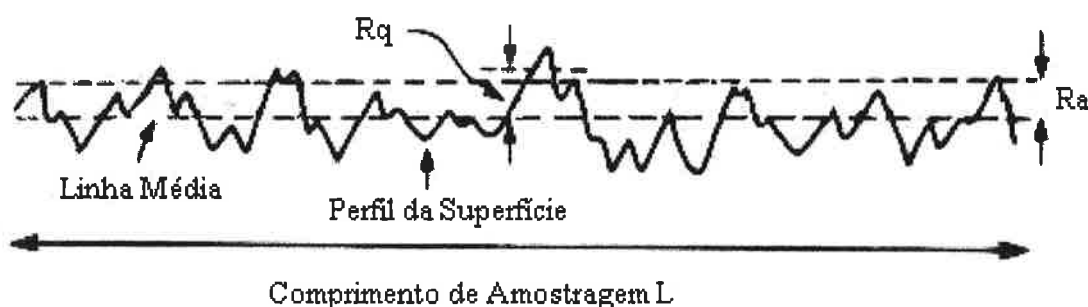
*Imagem 2.1 - Padrão de speckle formado através de uma superfície com irregularidades aleatórias.*



### 3- PARÂMETROS E TÉCNICAS DE MEDIÇÃO

#### 3.1- Parâmetros de Rugosidade

Existem diversas normas técnicas definindo parâmetros de rugosidade, por exemplo: DIN (alemã), JIS (japonesa) e ISO (internacional). Os parâmetros mais utilizados nos trabalhos desenvolvidos em nosso laboratório são: a média aritmética de alturas ( $R_a$ ) e a rugosidade quadrática média ( $R_q$ ). A figura 3.1 mostra as linhas de rugosidades  $R_a$  e  $R_q$  em relação a linha média do perfil da superfície de comprimento de amostragem  $L$ .



**Figura 3.1** - Rugosidade  $R_a$ ,  $R_q$  e linha média de um perfil de superfície de comprimento  $L$ .

##### 3.1.1- Parâmetro $R_a$

O parâmetro  $R_a$  é a média aritmética dos valores absolutos das alturas do perfil de superfície dentro de um comprimento de amostragem  $L$ . A rugosidade  $R_a$  é expressa matematicamente como <sup>[7]</sup>:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |h(x)| dx \quad (3.1)$$

onde  $L$  é o percurso total medido do perfil da superfície e  $h(x)$  é a altura do perfil em relação a linha média.

### 3.1.2- Parâmetro $R_q$

O parâmetro  $R_q$  é a raiz quadrática média dos valores das alturas do perfil de superfície dentro de um comprimento de amostragem  $L$ . A rugosidade  $R_q$  é expressa matematicamente como <sup>[7]</sup>:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L h^2(x) dx} \quad (3.2)$$

onde  $L$  é o percurso total medido do perfil da superfície e  $h(x)$  é a altura do perfil em relação a linha média.

No caso em que as alturas da superfície obedecem a uma distribuição Gaussiana pode-se mostrar que vale a relação <sup>[4]</sup>:

$$R_q = 1,25R_a \quad (3.3)$$

## 3.2- Técnicas de Medição de Rugosidade

Existem diversas técnicas de medição de rugosidade. Entre elas estão a Comparação Através dos Sentidos, a Microscopia, Perfilômetros Mecânicos, Perfilômetros Ópticos, Micro-Interferômetros e os Rugosímetros baseados no espalhamento de luz.

Entre os Rugosímetros baseados no espalhamento de luz <sup>[8]</sup> temos o método de Correlação Angular de Speckle (CAS), tema desse trabalho e apresentado com detalhes no capítulo 4, o Espalhamento Integrado Total (TIS), o Espalhamento por Resolução em Ângulo e o Contraste do Padrão de Speckle.

### **3.2.1- Comparação Através dos Sentidos**

Esse método é baseado na comparação da superfície de interesse com padrões conhecidos através da visão, do tato ou de vibrações sentidas passando-se a unha na superfície e nos padrões por exemplo. Com esse método é possível apenas ter um idéia grosseira da rugosidade da superfície.

### **3.2.2- Microscopia**

Esse método consiste em se caracterizar a superfície através da imagem obtida através de microscópio permitindo que as irregularidades sejam vistas. Algumas das dificuldades desse método são a necessidade de imagens em diversos ângulos, o fato de cobrir uma área muito pequena da superfície, a dificuldade na quantificação das observações e a preparação da amostra.

### **3.2.3- Perfilômetros Mecânicos**

Esse método consiste em traçar o perfil da superfície, como por exemplo o da figura 3.1, com uma agulha de diamante através de um movimento horizontal e paralelo a superfície. O movimento vertical do braço que contém a agulha acompanha o perfil da superfície e com uma calibração prévia através de um perfil com rugosidade conhecida é possível quantificar o perfil traçado da superfície. Embora sejam muito práticos, os perfilômetros mecânicos também têm seus problemas. Pela sua própria concepção, traçam apenas um perfil correspondente a um corte segundo um determinado plano perpendicular à superfície em cada medição. A medição da rugosidade fornecida por eles usa uma amostragem bidimensional, alturas medidas ao longo de um determinado comprimento, para caracterizar uma microtopografia que é tridimensional. Além disso, há sempre a possibilidade de existirem fissuras nas quais a ponta de diamante não possa penetrar. E também pelo fato da ponta ser de diamante, é quase que impossível evitar que a superfície fique riscada no local da medição. Esse problema inviabiliza a utilização desse método em materiais que não sejam razoavelmente duros.

### **3.2.4- Perfilômetros Ópticos**

Esse método é semelhante ao Perfilômetro Mecânico, a diferença é a sonda óptica no lugar da ponta de diamante, resolvendo-se assim o problema do contato mecânico com a superfície.

### **3.2.5- Micro-interferômetros**

Esse método consiste em obter um mapa de alturas de uma região bem pequena ao invés de uma linha através da interferometria. São necessárias diversas medidas em pontos diferentes da superfície, devido ao fato da região medida por esse método ser bem pequena, para se obter a rugosidade, o que torna esse método muito dispendioso.

### **3.2.6- Rugosímetros baseados no espalhamento de luz**

Os métodos apresentados a seguir tem em comum o fato de serem adequadas para a medição de rugosidades bastante baixas, cujas irregularidades da superfície sejam bem menores que o comprimento de onda da luz utilizada.

#### **3.2.6.1- Espalhamento Integrado Total (TIS)**

Por esse método, obtém-se a rugosidade da superfície através da razão entre a luz refletida e a luz espalhada por ela <sup>[8]</sup>.

#### **3.2.6.2- Espalhamento por Resolução em Ângulo**

Esse método é parecido com o de Espalhamento Integrado Total, a intensidade da luz é medida sob cada ângulo de espalhamento através de um detector que desloca ao redor da amostra <sup>[9]</sup>.

### 3.2.6.3- Contraste do Padrão de Speckle

Esse método é baseado na variação do contraste do padrão de speckle. Para uma superfície totalmente lisa, ou seja, rugosidade zero, não há a formação do padrão de speckle e o que temos é um padrão de intensidade constante cujo contraste é igual a zero. Para uma determinada rugosidade, cuja superfície possui irregularidades da ordem de  $\lambda/4$  (onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz utilizada na iluminação da superfície), ocorre a formação de um padrão de speckle bem desenvolvido cujo contraste é igual a um. Controlando-se então os diversos fatores que também contribuem para a variação do contraste, é possível se obter a rugosidade da superfície à partir de um determinado valor do contraste do padrão de speckle<sup>[10]</sup>.

## 4- DEDUÇÃO TEÓRICA

### 4.1- Correlação Angular de Speckle (CAS)

O método de correlação angular de speckle baseia-se na comparação entre dois padrões de speckle. Obtém-se o primeiro padrão de speckle iluminando-se a superfície com um ângulo de incidência  $\theta_1$  e medindo-se a intensidade da luz espalhada na direção de espalhamento  $\theta_2$ . Obtém-se o segundo padrão de speckle iluminando-se a mesma região da superfície com um ângulo de incidência  $\theta_1 + \phi_1$  e medindo-se a intensidade da luz espalhada na direção de espalhamento  $\theta_2 + \phi_2$ .

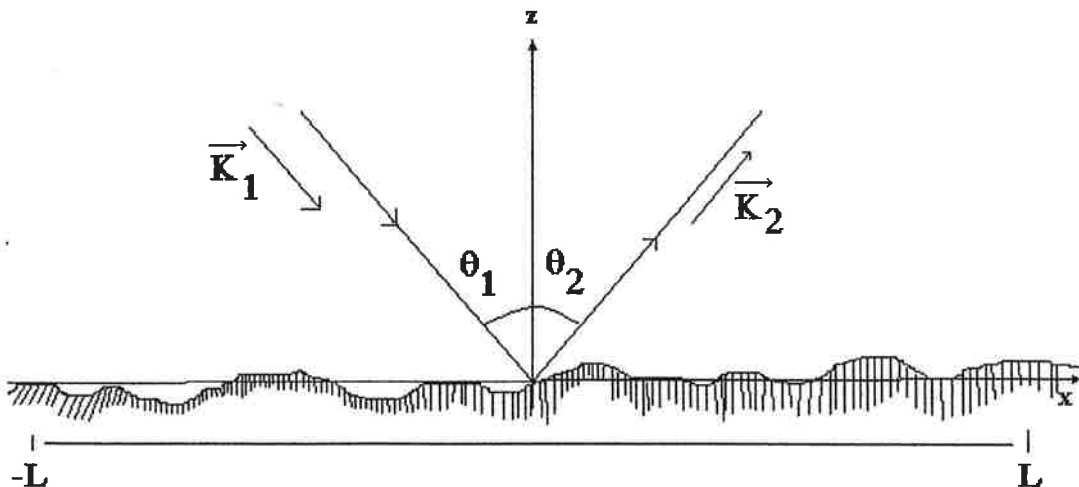


Figura 4.1 - Ângulo de incidência  $\theta_1$  e ângulo de espalhamento  $\theta_2$

No modelo da figura 4.1, a amplitude do campo elétrico  $E_2(\theta_1, \theta_2)$  na direção de espalhamento de  $\theta_2$  é dado por<sup>[1]</sup>:

$$E_2(\theta_1, \theta_2) = \frac{E_{20} F_2}{2L} \int_{-L}^L e^{i[V_x x + V_z \xi(x)]} dx \quad (4.1)$$

$V_x$ ,  $V_z$  e  $F_2$  são dados por:

$$V_x = \frac{2\pi}{\lambda} (\text{sen } \theta_1 - \text{sen } \theta_2) \quad (4.2)$$

$$V_z = -\frac{2\pi}{\lambda} (\text{cos } \theta_1 + \text{cos } \theta_2) \quad (4.3)$$

$$F_2 = \frac{1 + \text{cos } \theta_1 \text{cos } \theta_2 - \text{sen } \theta_1 \text{sen } \theta_2}{\text{cos } \theta_1 (\text{cos } \theta_1 + \text{cos } \theta_2)} \quad (4.4)$$

Onde  $2L$  é comprimento iluminado da superfície espalhadora,  $E_{20}$  é a amplitude do campo elétrico refletido na direção especular ( $\theta_1 = \theta_2$ ) considerando-se uma superfície plana e perfeitamente condutora nas mesmas dimensões, distância de observação e ângulo de incidência, iluminada com onda plana horizontalmente polarizada,  $\xi(x)$  é a distribuição de alturas da superfície rugosa e  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz coerente que ilumina a superfície rugosa.

Considerando-se uma mudança no ângulo de incidência para  $\theta_1 + \phi_1$  e uma mudança na direção de espalhamento para  $\theta_2 + \phi_2$  temos através de 4.1:

$$E_2(\theta_1 + \phi_1, \theta_2 + \phi_2) = \frac{E_{20} F_2'}{2L} \int_{-L}^L e^{i[V_x' x + V_z' \xi(x)]} dx \quad (4.5)$$

$V_x'$ ,  $V_z'$  e  $F_2'$  são dados por:

$$V_x' = \frac{2\pi}{\lambda} [\text{sen}(\theta_1 + \phi_1) - \text{sen}(\theta_2 + \phi_2)] \quad (4.6)$$

$$V_z' = -\frac{2\pi}{\lambda} [\cos(\theta_1 + \phi_1) + \cos(\theta_2 + \phi_2)] \quad (4.7)$$

$$F_2' = \frac{1 + \cos(\theta_1 + \phi_1) \cos(\theta_2 + \phi_2) - \text{sen}(\theta_1 + \phi_1) \text{sen}(\theta_2 + \phi_2)}{\cos(\theta_1 + \phi_1) [\cos(\theta_1 + \phi_1) + \cos(\theta_2 + \phi_2)]} \quad (4.8)$$



Correlacionando-se as amplitudes obtidas nas expressões 4.1 e 4.5 obtemos:

$$E_2(\theta_1, \theta_2) E_2^*(\theta_1 + \phi_1, \theta_2 + \phi_2) = \left( \frac{E_{20}}{2L} \right)^2 F_2 F_2' * \\ * \int_{-L}^L e^{i[V_x x_1 + V_z \xi(x_1)]} dx_1 \int_{-L}^L e^{-i[V_x' x_2 + V_z' \xi(x_2)]} dx_2 \quad (4.9)$$

Usando-se o mesmo formalismo de Rebollo <sup>[4]</sup> obtemos:

$$\frac{\langle E_2(\theta_1, \theta_2) E_2^*(\theta_1 + \phi_1, \theta_2 + \phi_2) \rangle}{\langle E_2(\theta_1, \theta_2) E_2^*(\theta_1, \theta_2) \rangle} = \text{sinc}(\Delta V_x L) e^{(-\frac{\sigma^2}{2} \Delta V_z^2)} \quad (4.10)$$

onde  $\Delta V_x$  e  $\Delta V_z$ :

$$\Delta V_x = V_x' - V_x \quad (4.11)$$

$$\Delta V_z = V_z - V_z' \quad (4.12)$$

Considerando-se a direção especular, onde  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$  e  $\phi_1 = \phi_2 = \phi$ , obtemos de 4.2, 4.3, 4.6 e 4.7:

$$\Delta V_x = 0 \quad (4.13)$$

$$\Delta V_z = -\frac{4\pi}{\lambda} [\cos \theta - \cos(\theta + \phi)] \quad (4.14)$$

Utilizando-se a relação deduzida em Léger<sup>[6]</sup> obtemos:

$$C_I(\theta_1, \theta_2, \theta_1 + \phi_1, \theta_2 + \phi_2) = \left( \frac{\langle E_2(\theta_1, \theta_2) E_2^*(\theta_1 + \phi_1, \theta_2 + \phi_2) \rangle}{\langle E_2(\theta_1, \theta_2) E_2^*(\theta_1, \theta_2) \rangle} \right)^2 \quad (4.15)$$

De 4.10, 4.13, 4.14 e 4.15 obtemos:

$$C_I(\theta, \theta + \phi) = e^{\left\{ -\left( \frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 [\cos \theta - \cos(\theta + \phi)]^2 \right\}} \quad (4.16)$$

Onde  $\sigma$  é a rugosidade quadrática média da superfície rugosa ( $R_q$ ).

A expressão 4.16 é deduzida nas seguintes condições:

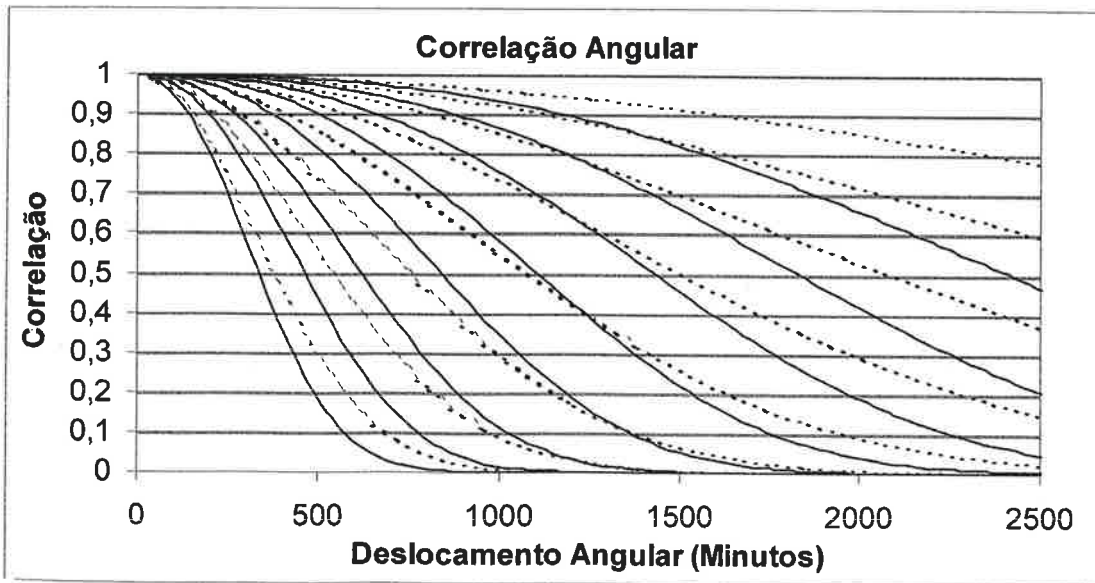
- A superfície é perfeitamente condutora;
- Múltiplos espalhamentos e efeito de sombra não são considerados;
- A onda incidente é plana, linearmente polarizada, perfeitamente coerente e monocromática;
- O raio de curvatura das irregularidades é bem maior do que o comprimento de onda;
- O plano de observação encontra-se afastado da superfície espalhadora para que se possa considerar válida a aproximação de Fraunhofer para a luz difratada;
- A comprimento iluminado  $L$  é muito maior que o comprimento de onda ( $\lambda$ );
- As flutuações de fase introduzidas pela superfície espalhadora são maiores que  $2\pi$ ;
- No processo de espalhamento não há despolarização da luz, ou seja, o padrão de speckle é perfeitamente polarizado;
- A distribuição de alturas das irregularidades da superfície espalhadora obedece uma função densidade de probabilidade Gaussiana;
- As amplitudes e as fases das ondículas espalhadas pela superfície são estatisticamente independentes entre si e umas das outras;
- As fases das ondículas espalhadas pela superfície têm distribuição uniforme no intervalo  $(-\pi, \pi)$ ;
- Para cada ponto no plano de observação existem contribuições de ondículas provenientes de um grande número de centros espalhadores na superfície.

Para pequenos deslocamentos angulares podemos aproximar  $\cos\phi \approx 1$  e  $\text{sen}\phi \approx \phi$  e após algumas manipulações em 4.16 obtemos:

$$C_I(\theta, \theta + \phi) = e^{-\left(\frac{2\pi\sigma}{\lambda}\right)^2 (2\phi \text{sen}\theta)^2} \quad (4.17)$$

A expressão 4.17 foi usada em Paiva Jr. [5] na medição de rugosidade na faixa de 30  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$ .

O gráfico 4.1 mostra a diferença entre as duas expressões para rugosidade abaixo de 1  $\mu\text{m}$ . Pode-se notar que o valor da correlação cai mais rapidamente na expressão 4.16 do que na 4.17 e que a curva dada pela expressão 4.17 se afasta mais da curva dada pela expressão 4.16 para rugosidades mais baixas inviabilizando a utilização da expressão 4.17 nas medidas de rugosidade abaixo de 1  $\mu\text{m}$ .

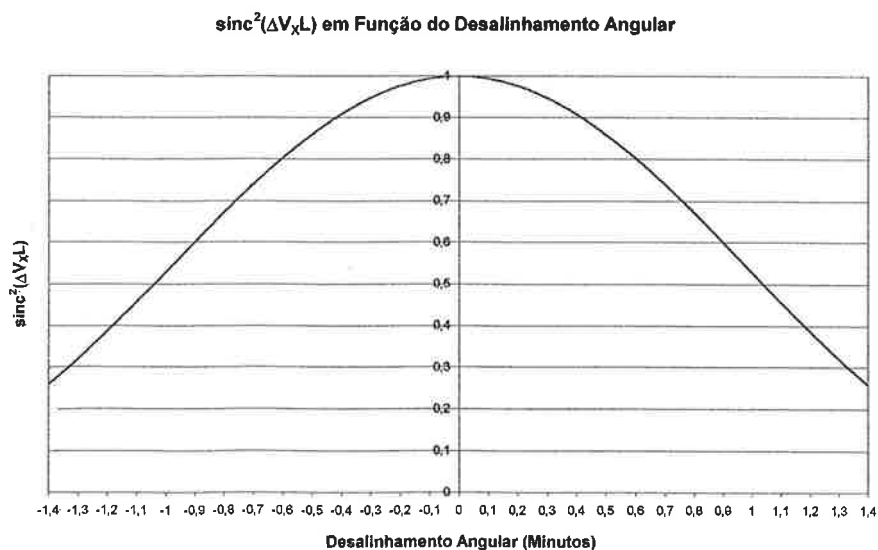


**Gráfico 4.1** - As linhas pontilhadas representam as curvas teóricas utilizando-se a expressão 4.17 e as linhas cheias representam as curvas teóricas utilizando-se a expressão 4.16. Da esquerda para a direita as rugosidades são 1  $\mu\text{m}$ , 0,7  $\mu\text{m}$ , 0,5  $\mu\text{m}$ , 0,35  $\mu\text{m}$ , 0,25  $\mu\text{m}$ , 0,18  $\mu\text{m}$ , 0,13  $\mu\text{m}$ , 0,09  $\mu\text{m}$ .

## 4.2- Condição de Alinhamento entre Padrões de Speckle

Antes de podermos correlacionar dois padrões de speckle, obtidos experimentalmente na direção especular, precisamos garantir o alinhamento entre eles. Para isso vamos recorrer ao termo  $\Delta V_x$  da expressão 4.10. Quando é considerada a direção especular esse termo se anula e o termo  $\text{sinc}^2(\Delta V_x L)$  se torna unitário não aparecendo na expressão 4.16 utilizada para se obter a rugosidade da superfície em questão. Porém isso não acontece se considerarmos que a imagem correlacionada está ligeiramente deslocada da direção especular. Pode-se perceber então que ao afastar-se da direção especular, a correlação entre os padrões decai rapidamente conforme o termo  $\text{sinc}^2(\Delta V_x L)$ . Essa função não é definida no ponto  $\Delta V_x = 0$  e nesse caso consideramos o limite da função quando  $\Delta V_x$  tende a zero, que assume o valor um. Pode-se perceber então que o alinhamento ocorre quando a correlação é máxima, ou seja, quando  $\Delta V_x = 0$ .

O gráfico 4.2 mostra a função  $\text{sinc}^2(\Delta V_x L)$  em função do desalinhamento angular para  $\lambda = 0,6328\mu\text{m}$ ,  $\theta = 21^\circ$ ,  $\phi = 1^\circ$  e  $L = 500\mu\text{m}$ . O valor é máximo quando o desalinhamento é zero.



**Gráfico 4.2** -  $\text{sinc}^2(\Delta V_x L)$  em função do desalinhamento angular para  $\lambda = 0,6328\mu\text{m}$ ,  $\theta = 21^\circ$ ,  $\phi = 1^\circ$  e  $L = 500\mu\text{m}$ .

### 4.3- Cálculo da Correlação entre Imagens com 256 tons de cinza

O cálculo de correlação entre imagens com 256 tons de cinza é feito correlacionando-se o valor de cada pixel da imagem de referência com o valor do pixel correspondente da imagem correlacionada.

Usando-se os conceitos usuais de estatística, a correlação entre duas imagens em coordenadas cartesianas com a origem no canto superior esquerdo da imagem, considerando-se que pode haver um erro de posicionamento da imagem correlacionada, pode ser expressa como:

$$C = \frac{\sum_{x=a}^b \sum_{y=c}^d (f_r(x, y) - \overline{f_r}) (f(x + x_0, y + y_0) - \overline{f})}{\sqrt{\sum_{x=a}^b \sum_{y=c}^d (f_r(x, y) - \overline{f_r})^2} \sqrt{\sum_{x=a}^b \sum_{y=c}^d (f(x + x_0, y + y_0) - \overline{f})^2}} \quad (4.18)$$

onde o tamanho das imagens é (M+1) colunas x (N+1) linhas.

$f_r(x, y)$  Representa o valor do pixel na posição (x,y) da imagem de referência,

$\overline{f_r}$  representa o valor médio dos pixels da imagem de referência,

$f(x + x_0, y + y_0)$  representa o valor do pixel na posição (x+x<sub>0</sub>,y+y<sub>0</sub>) da imagem correlacionada,

$\overline{f}$  representa o valor médio dos pixels da imagem correlacionada.

Os valores de a, b, c e d são dados por:

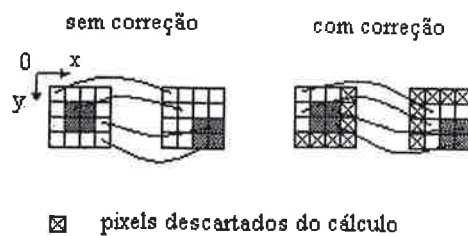
$$a = \begin{cases} 0 & \text{se } x_0 \geq 0 \\ -x_0 & \text{se } x_0 < 0 \end{cases}$$

$$c = \begin{cases} 0 & \text{se } y_0 \geq 0 \\ -y_0 & \text{se } y_0 < 0 \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} M - x_0 & \text{se } x_0 \geq 0 \\ M & \text{se } x_0 < 0 \end{cases}$$

$$d = \begin{cases} N - y_0 & \text{se } y_0 \geq 0 \\ N & \text{se } y_0 < 0 \end{cases}$$

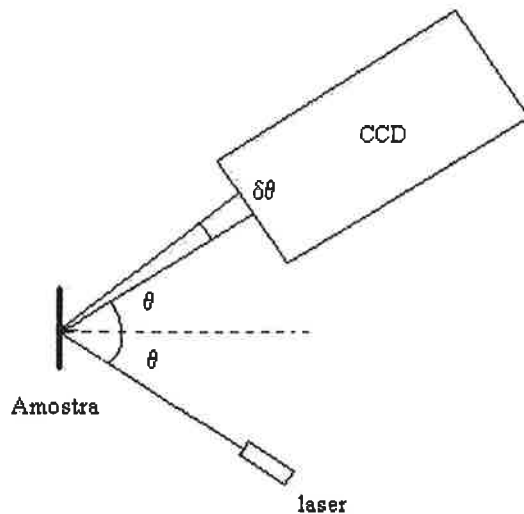
A figura 4.2 apresenta um exemplo do alinhamento entre a imagem de referência e a imagem correlacionada.



**Figura 4.2** - Esquema de correção entre duas imagens com deslocamento (1,1). A imagem da esquerda é a referência e a da direita a imagem deslocada.

#### 4.4- Correção no Cálculo da Correlação entre Imagens de Speckle

Em Paiva Jr.<sup>[5]</sup>, todos os pontos da CCD são considerados como estando no mesmo ângulo de espalhamento que o da coluna central, porém essa consideração não é válida para grandes deslocamentos angulares.



*Figura 4.3 - Esquema do ângulo de espalhamento para um ponto deslocado de  $\delta\theta$  da coluna central na CCD com espalhamento  $\theta$ . O desenho da CCD está bem maior para facilitar a visualização.*

Considerando-se o centro da imagem do padrão de speckle como sendo a direção angular  $\theta$ , vide figura 4.3, para um ponto na imagem, deslocado de  $\delta\theta$  da posição central da imagem, a direção angular será dada por  $\theta + \delta\theta$ . Para se calcular corretamente a correlação angular entre duas imagens de padrões de speckle, deve-se correlacionar o pixel da imagem de referência com o seu correspondente na imagem correlacionada. Dessa forma teremos:

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta, & \theta_2 = \theta + \delta\theta \\ \phi_1 = \phi, & \phi_2 = \phi + \delta\phi \end{cases} \quad (4.19)$$

Substituindo-se as condições de 4.19 em 4.2 e 4.6 obtém-se:



$$V_x = \frac{2\pi}{\lambda} [\text{sen } \theta - \text{sen}(\theta + \delta\theta)] \quad (4.20)$$

$$V'_x = \frac{2\pi}{\lambda} [\text{sen}(\theta + \phi) - \text{sen}(\theta + \delta\theta + \phi + \delta\phi)] \quad (4.21)$$

Usando-se o fato de que no alinhamento  $\Delta V_x = 0$ , obtém-se após algumas manipulações a correção angular  $\delta\phi$ , dada por:

$$\delta\phi = \arcsen[\text{sen}(\theta + \phi) - \text{sen } \theta + \text{sen}(\theta + \delta\theta)] - \theta - \phi - \delta\theta \quad (4.22)$$

Deve-se então correlacionar o pixel da posição  $\delta\theta$  da imagem do padrão de speckle de referência com o pixel da posição  $\delta\theta + \delta\phi$  da imagem correlacionada.

O gráfico 4.3 apresenta a variação da correção angular  $\delta\phi$  em função da variação angular  $\phi$  considerando-se a posição  $\delta\theta = -10'$  e uma imagem de referência obtida com um ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$ .

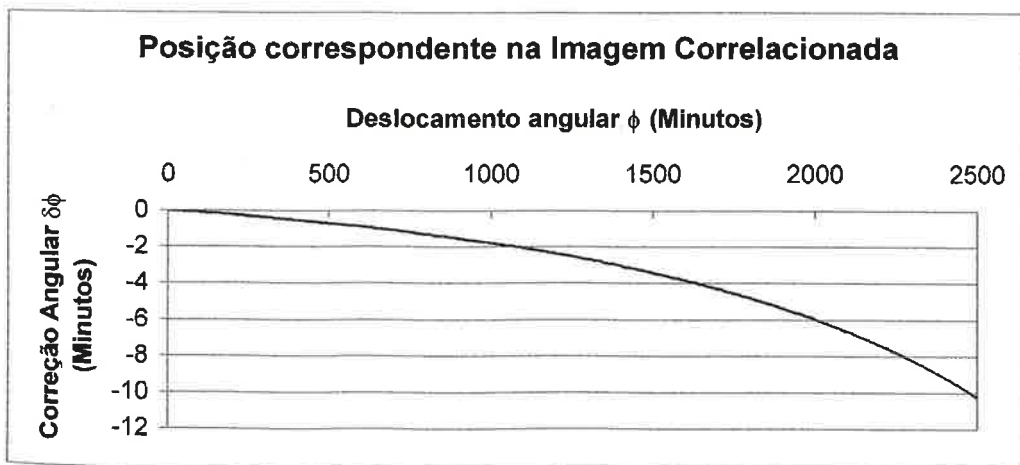
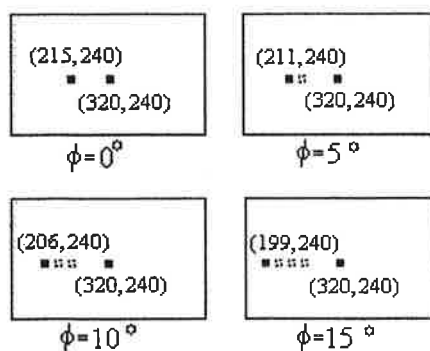


Gráfico 4.3 - Posição correspondente na imagem correlacionada para  $\theta = 21^\circ$  e  $\delta\theta = -10'$ .

Na figura 4.4 são considerados quatro imagens e dois pontos pretos em cada uma delas. Está sendo considerado como centro das imagens, direção angular  $\theta = 21^\circ + \phi$ , a posição (320, 240). As imagens possuem 640 pixels na horizontal e 480 na vertical e a posição (0,0) é o canto superior esquerdo. Nesse exemplo, 105 pixels corresponde a um  $\delta\theta$  de  $10'$ . Na imagem de referência, onde  $\theta = 21^\circ$  e  $\phi = 0^\circ$ , temos um ponto preto na posição (320,240), ou seja, no centro da imagem onde  $\delta\theta = 0$ , e outro na posição (215,240) onde  $\delta\theta = -10'$ . Como para o ponto central a correção é zero, vide gráfico 4.3, deve-se correlacioná-lo com os pontos centrais (320,240) das imagens com  $\phi = 5^\circ$ ,  $\phi = 10^\circ$  e  $\phi = 15^\circ$ . O ponto (215,240) da imagem de referência, onde  $\delta\theta = -10'$ , deve ser correlacionado com os pontos (211,240), (206,240) e (199,240) das imagens com  $\phi = 5^\circ$ ,  $\phi = 10^\circ$  e  $\phi = 15^\circ$  respectivamente. Temos então nesse caso a expansão do padrão de speckle.



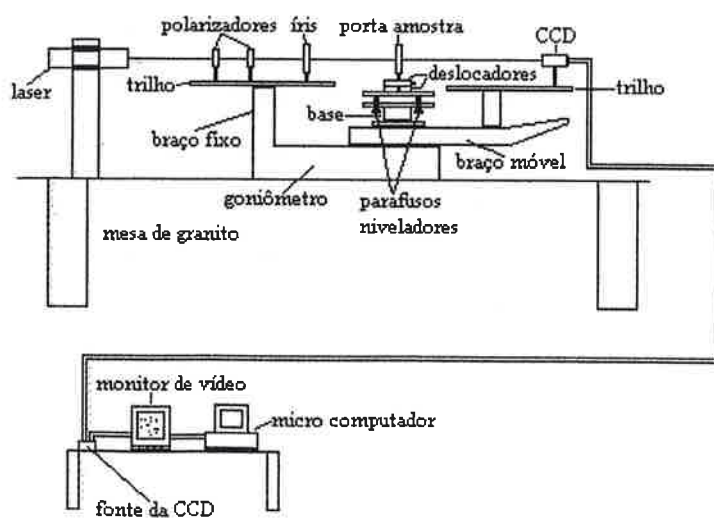
**Figura 4.4** - Posição correta dos pixels a serem correlacionados. O ponto (215,240) em  $\phi = 0^\circ$  deve ser correlacionado com (211,240), (206,240) e (199,240) em  $\phi = 5^\circ$ ,  $\phi = 10^\circ$  e  $\phi = 15^\circ$  respectivamente. Nesse caso ocorre a expansão do padrão de speckle.

## 5- MONTAGEM EXPERIMENTAL

### 5.1- Arranjo Experimental da Correlação Angular

O arranjo experimental utilizado na medição de rugosidade de superfície metálica através do método de correlação angular de speckle é o mesmo que o utilizado por Paiva Jr.<sup>[5]</sup> exceto pela inclusão de mais um polarizador entre o laser e o polarizador existente.

O arranjo está montado sobre uma mesa de granito apoiada em uma estrutura de madeira bastante robusta com uma camada de espuma para amortecimento de vibrações. A figura 5.1 apresenta o esquema do arranjo experimental.



*Figura 5.1 - Desenho esquemático da montagem experimental da correlação angular*

Os ângulos de incidência e observação são controlados através de um goniômetro com escala graduada. Essa escala permite observar um deslocamento angular com precisão de segundos. O goniômetro possui um braço fixo, um móvel e uma base giratória. No braço fixo é montado um trilho no qual são fixados dois polarizadores para controle de

intensidade e polarização do feixe de luz laser e um diafragma do tipo íris para controlar o diâmetro do feixe incidente na superfície da amostra. No braço móvel é montado um trilho no qual é fixada a câmara CCD. Na base giratória é montado o porta amostra apoiado em dois deslocadores horizontais fixados perpendicularmente entre si. Esses deslocadores são necessários para garantir que a região iluminada da amostra fique no eixo de rotação da base, dessa forma podemos girar a base sem mudar a região iluminada da amostra . A base possui ainda parafusos niveladores para controle da inclinação do porta amostra.

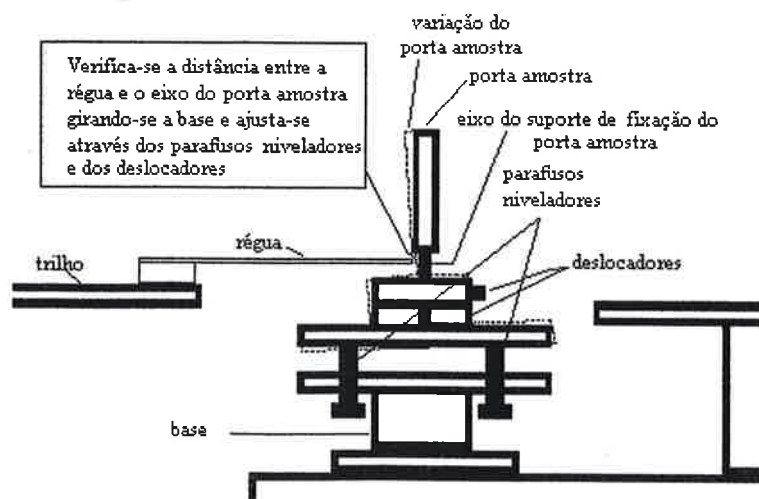
A fonte de laser utilizada é de HeNe com comprimento de onda de 632,8 nm e potência de 15 mW e é fixada, através de um suporte rígido, diretamente na mesa de granito. Essa forma de fixação tornou a montagem mais estável, anteriormente era fixada no braço do goniômetro e devido a vibração tornava-se instável.

A câmara CCD utilizada é do modelo KP-M1U, da Hitachi Denshi Ltda. e é usada nessa montagem sem a objetiva.

A câmara CCD é conectada através do cabo de vídeo a um monitor, no qual é observado o speckle em tempo real, e desse para a placa digitalizadora da Data Translation, modelo DT55-60, que se encontra instalada internamente ao micro computador ,e que transforma esses sinais de vídeo em imagem digital de 640 pixels de largura por 480 pixels de altura e 256 tons de cinza com o auxílio do software Global Lab.

## 5.2- Alinhamento da Montagem

Com o auxílio de um medidor de nível, alinha-se os dois braços e o conjunto do goniômetro. Centraliza-se os dois deslocadores que apoiam o suporte de fixação do porta amostra, fixa-se um guia (régua) no trilho do braço fixo de forma que o mesmo fique bem próximo ao eixo do suporte de fixação do porta amostra na base giratória, monta-se o porta amostra no suporte para facilitar a centralização do eixo do suporte e gira-se a base verificando se a distância entre o guia e o eixo sofre alteração, caso sofra, o ajuste é feito através dos parafusos niveladores da base e através dos deslocadores. O processo é repetido até que a distância permaneça constante. Esse ajuste é apenas preliminar. A figura 5.2 representa uma situação na qual é necessário o ajuste.

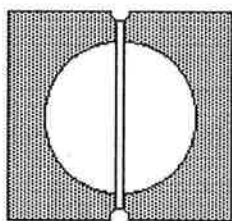


**Figura 5.2** - Desenho esquemático do ajuste preliminar do porta amostra, ao girar-se a base ocorre variação na distância entre a régua e o eixo do suporte do porta amostra.

Fixa-se o laser no suporte rígido de forma que a altura do feixe fique acima dos braços do goniômetro. Fixa-se a íris no lugar do porta amostra, isso não afeta o alinhamento preliminar pois somente o porta amostra é retirado. Posiciona-se o conjunto do goniômetro de forma que o feixe do laser passe pelo centro da íris. Retira-se a íris e recoloca-se o porta

amostra. Coloca-se então um espelho plano no porta amostra e ajusta-se a posição do laser de forma que o feixe refletido volte na mesma direção do feixe incidente. Coloca-se a íris no trilho montado no braço fixo e ajusta-se novamente a posição do conjunto do goniômetro, dessa vez de forma que o feixe passe pelo centro da íris mesmo que essa seja deslocada ao longo do trilho. Adota-se o mesmo procedimento para o braço móvel deslocado de  $180^\circ$  em relação ao laser. Dessa forma garante-se o ajuste preliminar do conjunto. Monta-se então a íris e os dois polarizadores de forma que os mesmos fiquem quase que perpendicularmente ao feixe do laser, isso é feito para impedir que o feixe refletido pelos polarizadores retorne na mesma direção do feixe principal causando instabilidades.

Ainda é necessário fazer um ajuste preciso na posição do porta amostra para garantir que o ponto de iluminação da amostra esteja no centro do eixo de rotação. Para isso usamos uma chapa metálica com uma abertura central atravessada por um fio de náilon conforme a figura 5.3 :



**Figura 5.3** - Chapa metálica com fio de náilon no eixo central

Coloca-se essa chapa metálica no porta amostra de forma que o fio de náilon fique na posição vertical e seja iluminado pelo feixe do laser, observa-se então a intensidade dos dois pontos centrais mais intensos da figura de difração formada num anteparo branco, ajusta-se o deslocador perpendicular ao feixe de forma que esses dois pontos tenham a mesma intensidade, gira-se a base e observa-se se os dois pontos continuam com a mesma

intensidade, caso não, ajusta-se a posição através do deslocador paralelo ao feixe. Quando não ocorre o ajuste é necessário deslocar bem pouco o conjunto do goniômetro e refazer o ajuste através dos deslocadores. Esse deslocamento do conjunto do goniômetro não deve afetar os ajustes preliminares. O feixe do laser deve passar no centro do eixo de rotação, somente dessa forma é possível o alinhamento. Quando o náilon está localizado no eixo de rotação a intensidade dos dois pontos permanece constante ao girar a base. Ao final desse ajuste retira-se a chapa metálica.

Fixa-se então a câmara CCD no trilho do braço móvel, diminui-se a intensidade do feixe do laser através do polarizador e desloca-se o braço móvel de forma a obter a intensidade mais forte no centro da imagem que é observada em tempo real no monitor de vídeo, coloca-se então um espelho apoiado na frente da câmara CCD e gira-se levemente a câmara CCD, mantendo-se o braço móvel na mesma posição, de forma que o feixe refletido volte na mesma direção do feixe incidente no espelho, repete-se o processo até que não seja necessário nem mover o braço ou a câmara CCD. Com o auxílio do computador faz-se uma aquisição de imagem através do programa Global Lab e verifica-se se a região mais clara da imagem encontra-se no centro, posição (320,240), caso não esteja, desloca-se o braço móvel até centralizá-la. Posiciona-se então a escala do goniômetro em 180°. Coloca-se um espelho no porta amostra e desloca-se o braço móvel até a posição na escala do goniômetro indicar 42°, solta-se então a escala da base giratória e posiciona-se de forma que o feixe seja refletido na câmara CCD e a região mais intensa fique posicionada no centro da imagem. Fixa-se então a escala na base giratória. Nesse momento o conjunto está alinhado de forma a Ter um ângulo de incidência na amostra igual ao espalhado de 21°.

### **5.3- Aquisição das Imagens e Cálculo da Correlação**

Executamos no micro computador ao mesmo tempo, sob o sistema operacional Windows 95, os programas Global Lab Image e Rugo. No programa Global Lab Image são feitas as aquisições e gravações das imagens dos padrões de speckle e também verificada a intensidade média dos pixels das imagens e a quantidade de pixels com tom de cinza numa determinada faixa de intensidade, 0 para o tom de cinza mais escuro e 255 para o tom mais claro.

Desenvolvi o programa Rugo inicialmente com o objetivo de implementar o cálculo da correlação angular corrigindo-se o posicionamento das imagens, garantindo-se assim uma aquisição mais rápida do que com a utilização do programa Person6 utilizado anteriormente, e tornar o processo independente do observador. Com a utilização do programa Person6, a imagem já deveria estar alinhada, então eram feitas algumas aquisições de imagens com o programa Global Lab Image e algumas intervenções na montagem para garantir o alinhamento e só então era utilizado o programa Person6 para se obter a correlação entre as imagens, esse procedimento era um pouco demorado e dependia muito do observador, ou seja, da pessoa que estivesse fazendo as aquisições das imagens.

Ao longo do desenvolvimento desse trabalho, o programa Rugo foi sendo alterado para comportar as diferentes considerações no cálculo da correlação entre imagens de padrões de speckle, citadas nos itens 4.3 e 4.4.



## 5.4- Procedimento na Medição da Rugosidade

Para a medição da rugosidade através do método de correlação de speckle, são utilizados os seguintes passos:

- Calibração do valor em pixels para um desalinhamento na imagem de 10 minutos

Faz-se a aquisição e gravação da imagem de referência com  $\phi = 0$ , gira-se 10 minutos o braço móvel do goniômetro,  $\phi = 10'$ , faz-se a aquisição e gravação da imagem de 10'. Abre-se os dois arquivos de imagem no programa Rugo e calcula-se a correlação entre elas, serão obtidos então o valor da correlação, que será próximo de um e depende da estabilidade da montagem, e o valor do deslocamento  $x_0$  entre as imagens, esse é o valor em pixels para um desalinhamento na imagem de 10 minutos. Retorna-se então o braço do goniômetro para a posição inicial,  $\phi = 0$ .

- Teste de estabilidade da amostra

Faz-se aquisições e gravações de imagens com intervalo de um minuto,  $\phi = 0$ , e calcula-se a correlação entre elas usando-se a primeira imagem como referência. Quando a amostra está estável, a correlação para a imagem adquirida após 5 minutos fica acima de 0,99.

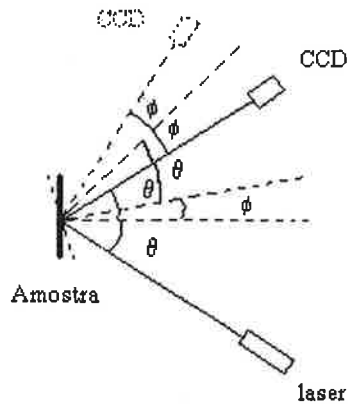
- Aquisição da imagem de referência,  $\phi = 0$

Após o teste de estabilidade é então feita a aquisição e gravação de mais uma imagem. Essa imagem será a de referência.

- Aquisição das imagens para diferentes deslocamentos angulares

Após gravada a imagem de referência, gira-se a base do goniômetro de um ângulo  $\phi$  e o braço móvel de  $2\phi$ . A figura 5.4 mostra a representação do deslocamento. Dessa forma temos um ângulo de incidência de  $\theta + \phi$ , que é igual ao de espalhamento no centro da câmara CCD. Faz-se então a aquisição e gravação da imagem para esse ângulo. Abre-se os arquivos de imagem no programa Rugo e inicia-se o cálculo da correlação com a correção do item 4.4 e usando-se a calibração obtida para um deslocamento de 10'. Repete-se os deslocamentos para diversos valores do ângulo  $\phi$ . Ao final volta-se a base e o braço móvel

do goniômetro para a posição inicial, posição da imagem de referência, e faz-se a aquisição e gravação da imagem de retorno. Calcula-se então a correlação com a imagem de referência. Com esse valor tem-se a idéia da estabilidade da montagem.



**Figura 5.4** - Representação esquemática do deslocamento angular.

- Ajuste da curva teórica para os valores de correlação obtidos.

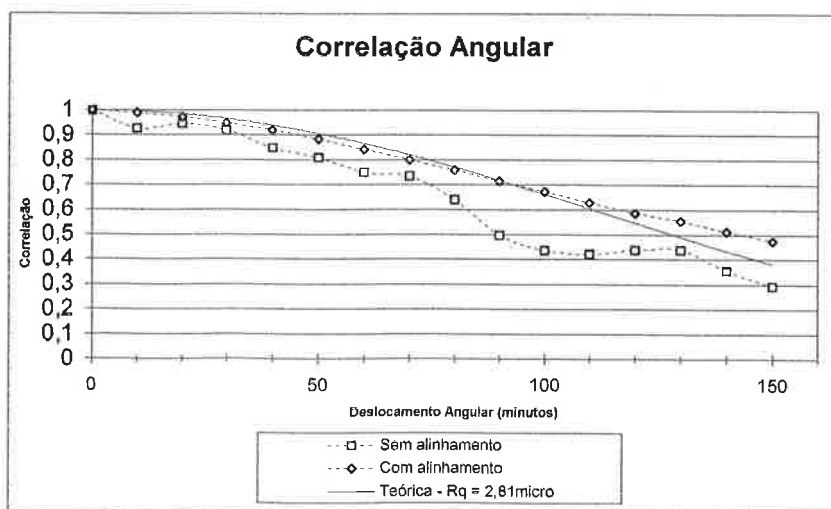
Ajusta-se então a curva teórica da expressão 4.16 aos valores de correlação obtidos para os diversos deslocamentos angulares, obtendo-se assim o valor da rugosidade quadrática média da superfície ( $R_q$ ).

## 6- RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 6.1- Alinhamento entre Padrões de Speckle

Um dos desafios na medição de rugosidade através da correlação angular era garantir que as imagens dos padrões de speckle obtidas estivessem alinhadas com a imagem de referência. Esse problema foi resolvido através do desenvolvimento do programa Rugo que considera o erro de posicionamento da imagem correlacionada.

O primeiro teste de alinhamento entre padrões de speckle com o programa Rugo foi feito em imagens obtidas pelo nosso laboratório no ano de 1997. Para essa amostra, o valor de  $R_q$  medido experimentalmente por outro método foi de  $2,81 \mu\text{m}$ . O ângulo de incidência de referência utilizado foi de  $22,5^\circ$ . O gráfico 6.1 mostra os pontos para as correlações angulares obtidas com e sem alinhamento. A utilização do alinhamento no cálculo da correlação de speckle diminuiu bastante a oscilação nos pontos experimentais. Para as curvas experimentais com e sem alinhamento foram obtidos, com o programa Origin, os valores de rugosidade quadrática média ( $R_q$ ) de  $(2,65 \pm 0,03)\mu\text{m}$  e  $(3,50 \pm 0,11)\mu\text{m}$  respectivamente. Sem a correção do posicionamento das imagens, o valor obtido para a rugosidade da superfície é sempre maior.



**Gráfico 6.1** - Gráfico dos pontos experimentais e curva teórica da correlação angular para  $R_q = 2,81 \mu\text{m}$ . O cálculo da correlação considerando-se o alinhamento entre as imagens de padrões de speckle diminuiu a oscilação da curva experimental.

A tabela 6.1 mostra os valores numéricos das correlações e também a diferença da posição da imagem correlacionada em pixels.

<b>Deslocamento Angular (minutos)</b>	<b>Correlação sem alinhamento</b>	<b>Correlação com alinhamento</b>	<b>X<sub>0</sub> (pixel)</b>	<b>Y<sub>0</sub> (pixel)</b>
0	1	1	0	0
10	0,9259	0,9895	-2	1
20	0,9452	0,9716	-1	1
30	0,9191	0,9473	0	2
40	0,8479	0,9193	-1	2
50	0,8086	0,8835	-1	2
60	0,7485	0,841	-2	2
70	0,7335	0,7999	0	3
80	0,6389	0,7577	-2	3
90	0,4971	0,7154	-4	3
100	0,4369	0,6716	-5	3
110	0,4217	0,6282	-5	3
120	0,4381	0,586	-4	3
130	0,4376	0,5538	-2	4
140	0,3556	0,5133	-4	4
150	0,2938	0,4742	-5	4

**Tabela 6.1** - Valores da correlação angular com e sem alinhamento e deslocamentos em pixel das imagens correlacionadas.

Como visualmente é muito difícil fazer o alinhamento usando-se sempre a imagem de referência, pois a imagem do padrão de speckle sofre mudanças, é usada a imagem anterior como referência no alinhamento visual. Com isso temos um acúmulo de erros no deslocamento como podemos perceber na tabela 6.1. Para obter a imagem do padrão de speckle com deslocamento angular de 100 minutos, por exemplo, foi utilizada como referência visual a imagem obtida em 90 minutos.

Há uma diminuição desse erro quando é utilizado o programa Rugo pois não é feita nenhuma intervenção no conjunto para a correção do posicionamento do goniômetro.

Para que se tenha uma idéia da dificuldade em comparar as imagens visualmente, basta observar a imagem de referência (Imagem 6.1) e a imagem com deslocamento angular de 100 minutos (Imagem 6.2).



**Imagem 6.1** - Imagem do padrão de speckle com ângulo de incidência  $\theta = 22,5^\circ$  e deslocamento angular igual a zero.



**Imagem 6.2** - Imagem do padrão de speckle com ângulo de incidência  $\theta = 22,5^\circ$  e deslocamento angular igual a 100 minutos.

## 6.2- Correção na Posição do Pixel Correspondente

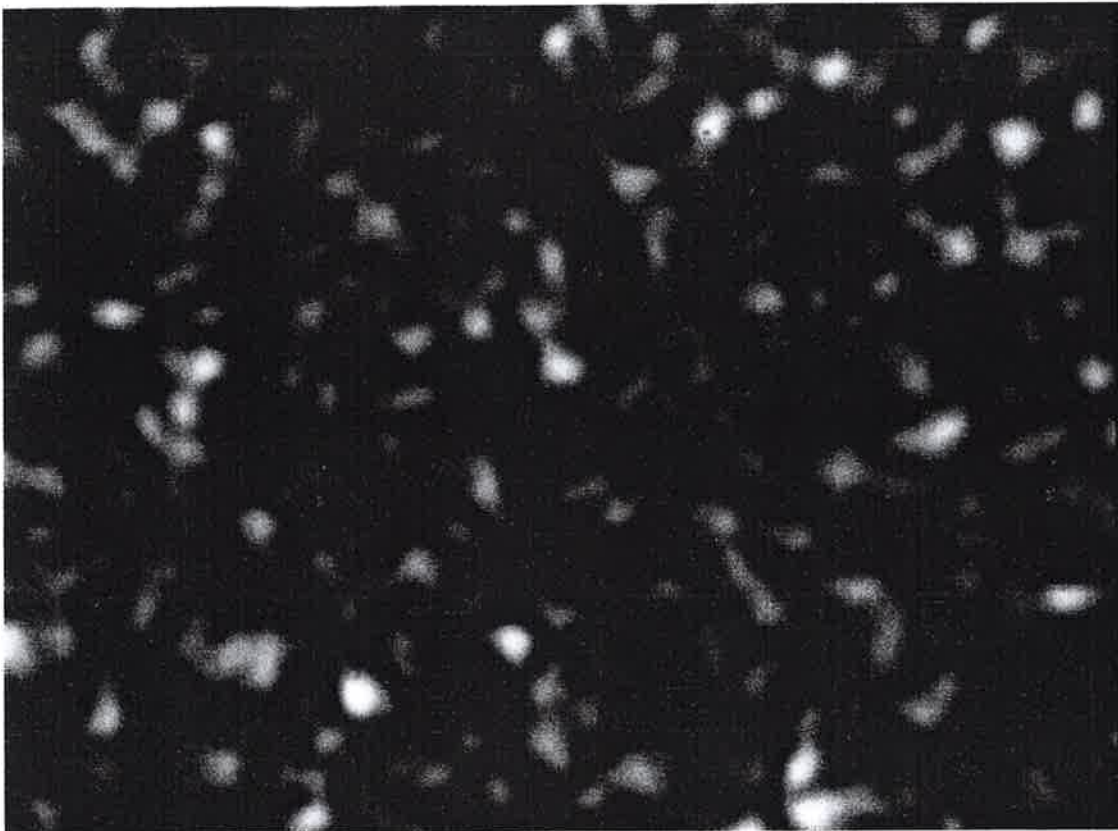
Apesar do alinhamento entre as imagens correlacionadas resolver o problema da flutuação nos valores de correlação e propiciar maiores deslocamentos do goniômetro, as curvas experimentais e os valores de rugosidade obtidos para amostras com rugosidade abaixo de  $1\mu\text{m}$  não estavam de acordo com o modelo teórico adotado inicialmente por Paiva Jr.<sup>[5]</sup>, foi então que desenvolvi uma nova concepção do ângulo de espalhamento para cada pixel da imagem e implementando uma pequena correção dada pela fórmula 4.22.

## 6.2.1- Amostra Preparada com Lixa 80

Para essa amostra foram realizadas três sequências de medidas. A primeira medida foi realizada mantendo-se a posição do polarizador em  $0^\circ$ . A segunda medida foi realizada mantendo-se a mesma posição da amostra porém com o polarizador em  $45^\circ$  e a terceira em outra posição da amostra e o polarizador em  $45^\circ$ .

### 6.2.1.1- Medida 1

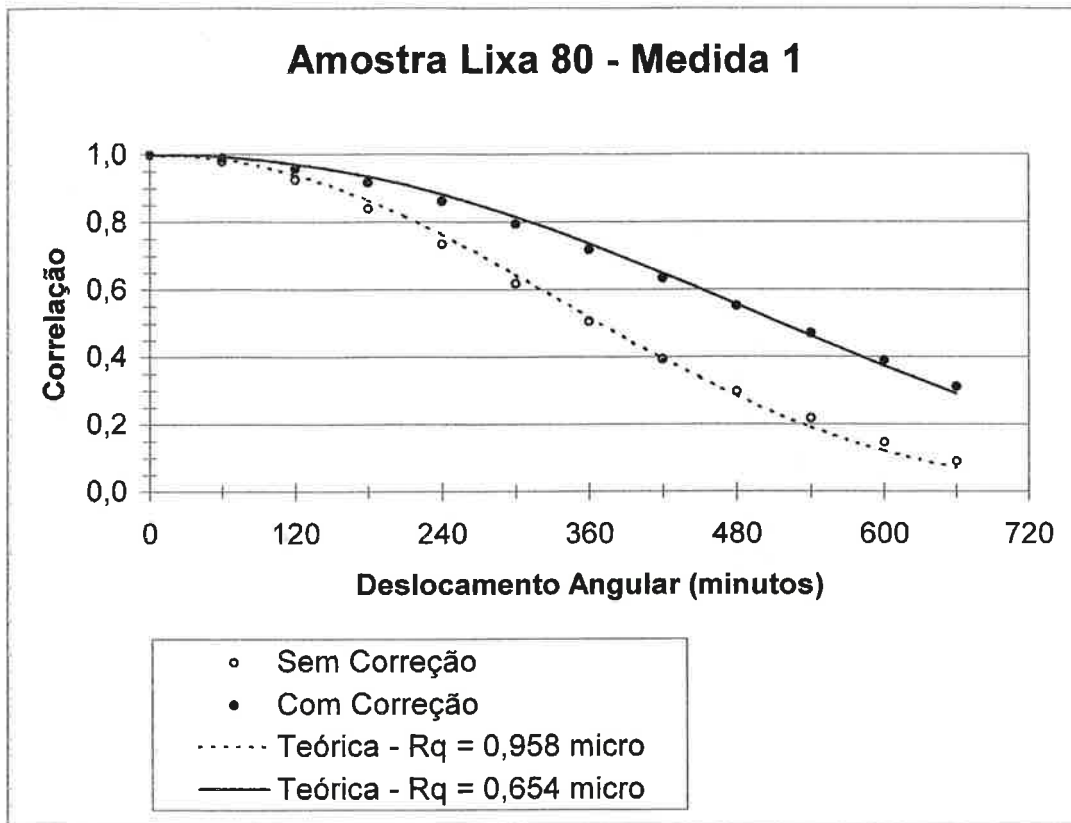
A imagem 6.3 é a referência para a primeira sequência de imagens.



*Imagem 6.3 - Imagem do padrão de speckle, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $0^\circ$ , usada como referência na primeira medida da amostra preparada com lixa 80.*



O gráfico 6.2 mostra os valores experimentais e as curvas ajustadas com o programa Origin com e sem a correção na posição dos pixels correspondentes na imagem correlacionada.



**Gráfico 6.2** - Gráfico dos pontos experimentais e curvas ajustadas à expressão teórica da correlação angular, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $0^\circ$ .

A tabela 6.2 apresenta os valores experimentais e teóricos da correlação angular bem como o deslocamento ( $X_0, Y_0$ ) da imagem correlacionada. Os valores de rugosidade obtidos através do ajuste dos pontos experimentais à expressão teórica através do programa Origin são:

$$Rq_{\text{sem correção}} = (0,958 \pm 0,011) \mu\text{m}$$

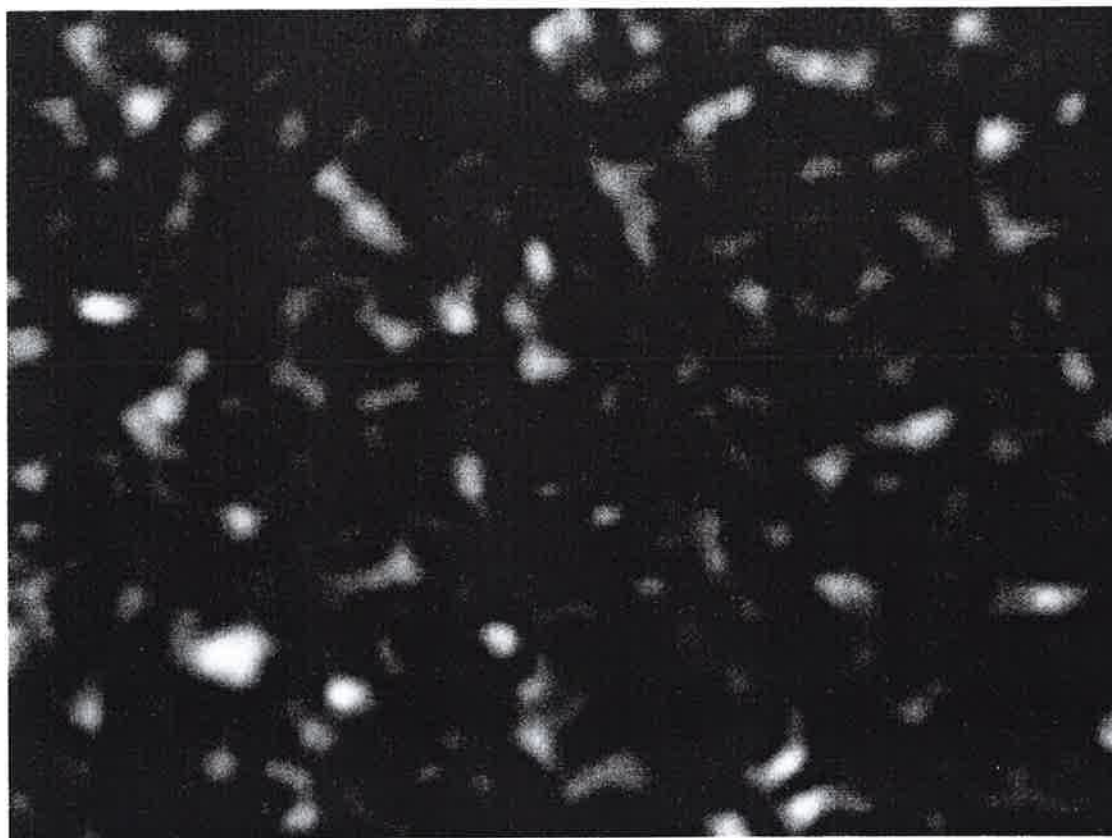
$$Rq_{\text{com correção}} = (0,654 \pm 0,006) \mu\text{m}$$

Deslocamento Angular (Minutos)	Correlação Sem Correção	Correlação Com Correção	Correlação Teórica Sem Correção	Correlação Teórica Com Correção	$X_0$ (pixel)	$Y_0$ (pixel)
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0	0
60	0,9801	0,9882	0,9853	0,9931	-2	0
120	0,9253	0,9589	0,9400	0,9715	-1	0
180	0,8400	0,9173	0,8647	0,9344	-3	0
240	0,7343	0,8612	0,7639	0,8819	-2	1
300	0,6181	0,7943	0,6452	0,8151	-3	1
360	0,5048	0,7185	0,5187	0,7362	-2	1
420	0,3941	0,6347	0,3952	0,6485	-1	1
480	0,2972	0,5514	0,2840	0,5558	-3	1
540	0,2178	0,4704	0,1915	0,4626	-4	1
600	0,1468	0,3895	0,1207	0,3729	-6	1
660	0,0888	0,3120	0,0707	0,2906	-6	2

**Tabela 6.2** - Valores experimentais e teóricos da correlação angular com e sem correção na posição do pixel correspondente e deslocamento em pixel das imagens correlacionadas.  $Rq_{\text{sem correção}} = (0,958 \pm 0,011) \mu\text{m}$  e  $Rq_{\text{com correção}} = (0,654 \pm 0,006) \mu\text{m}$ .

### 6.2.1.2- Medida 2

A imagem 6.4 é a referência para a segunda sequência de imagens.

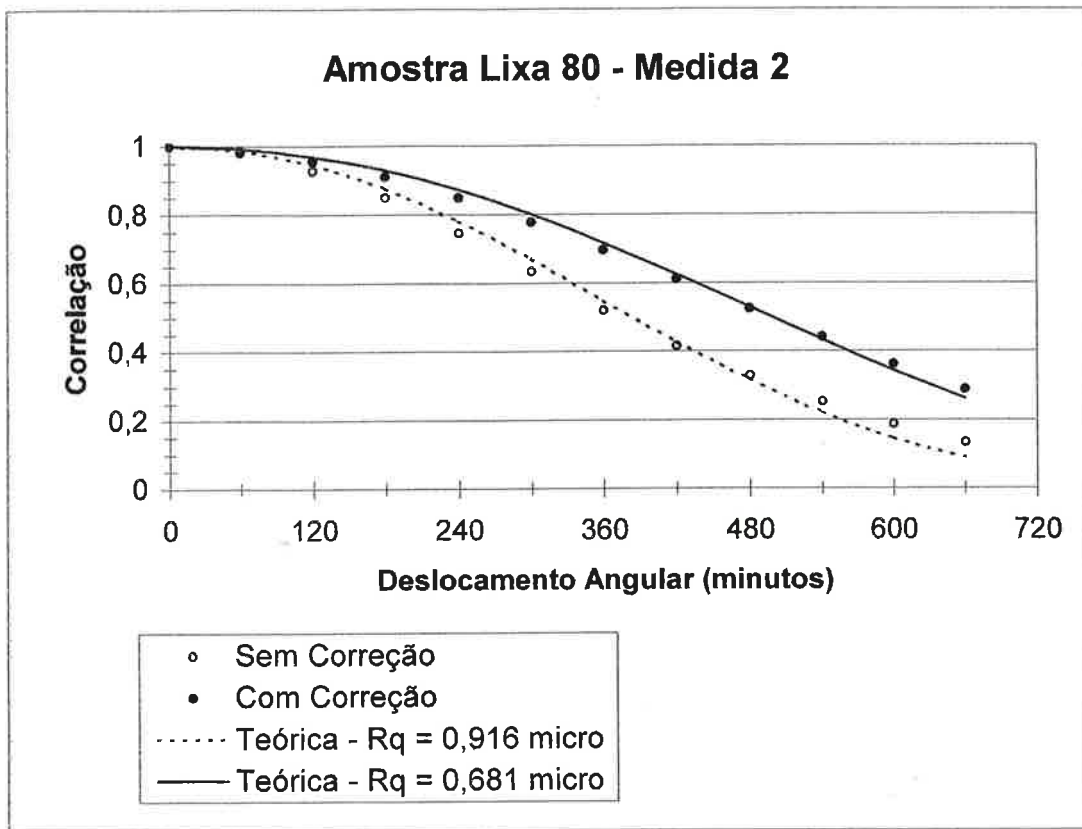


*Imagem 6.4 - Imagem do padrão de speckle, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $45^\circ$ , usada como referência na segunda medida da amostra preparada com lixa 80.*



ex. 1

O gráfico 6.3 mostra os valores experimentais e as curvas ajustadas com o programa Origin com e sem a correção na posição dos pixels correspondentes na imagem correlacionada.



**Gráfico 6.3** - Gráfico dos pontos experimentais e curvas ajustadas à expressão teórica da correlação angular, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $45^\circ$ .

A tabela 6.3 apresenta os valores experimentais e teóricos da correlação angular bem como o deslocamento ( $X_0, Y_0$ ) da imagem correlacionada. Os valores de rugosidade obtidos através do ajuste dos pontos experimentais à expressão teórica através do programa Origin são:

$$Rq_{\text{sem correção}} = (0,916 \pm 0,016) \mu\text{m}$$

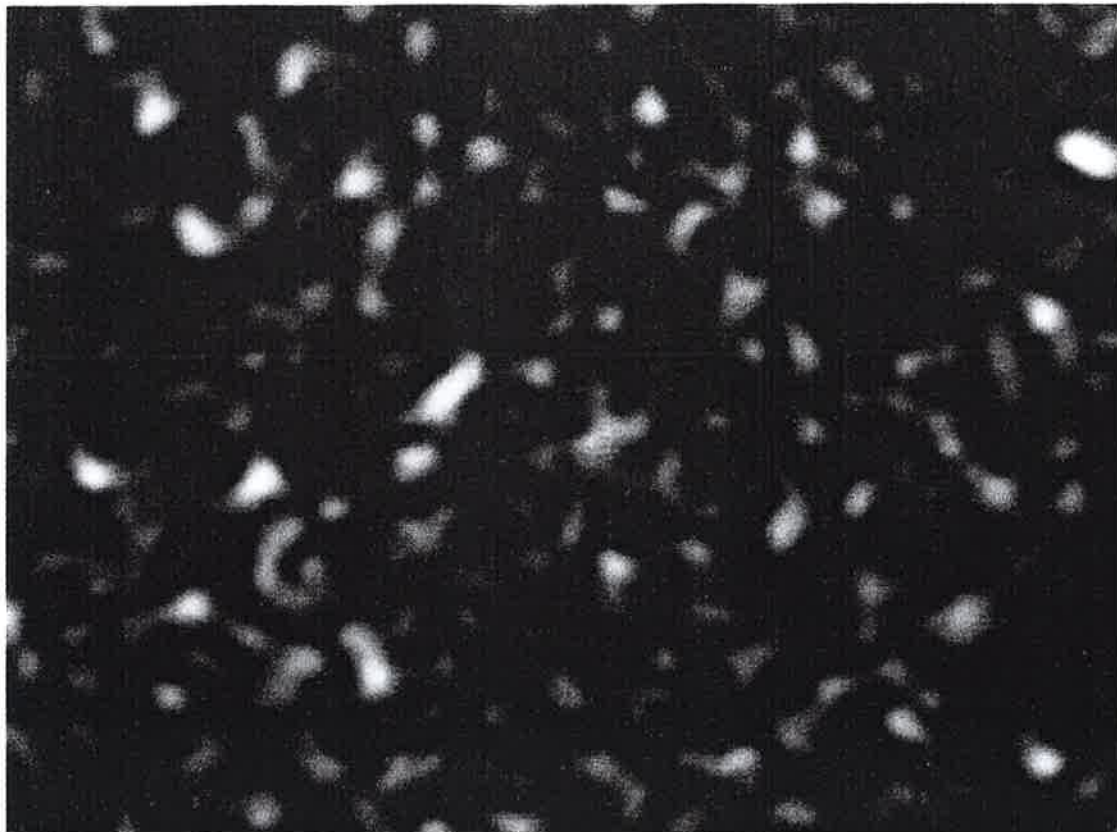
$$Rq_{\text{com correção}} = (0,681 \pm 0,007) \mu\text{m}$$

Deslocamento Angular (Minutos)	Correlação Sem Correção	Correlação Com Correção	Correlação Teórica Sem Correção	Correlação Teórica Com Correção	$X_0$ (pixel)	$Y_0$ (pixel)
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0	0
60	0,9810	0,9855	0,9866	0,9925	0	0
120	0,9279	0,9566	0,9450	0,9692	1	0
180	0,8485	0,9114	0,8756	0,9292	1	-1
240	0,7455	0,8501	0,7818	0,8728	0	1
300	0,6327	0,7775	0,6701	0,8014	2	1
360	0,5191	0,6970	0,5490	0,7177	3	1
420	0,4162	0,6115	0,4282	0,6256	3	1
480	0,3274	0,5249	0,3166	0,5294	3	1
540	0,2519	0,4417	0,2209	0,4339	2	1
600	0,1877	0,3624	0,1449	0,3436	-2	2
660	0,1321	0,2892	0,0889	0,2622	-2	2

**Tabela 6.3** - Valores experimentais e teóricos da correlação angular com e sem correção na posição do pixel correspondente e deslocamento em pixel das imagens correlacionadas.  $Rq_{\text{sem correção}} = (0,916 \pm 0,016) \mu\text{m}$  e  $Rq_{\text{com correção}} = (0,681 \pm 0,007) \mu\text{m}$

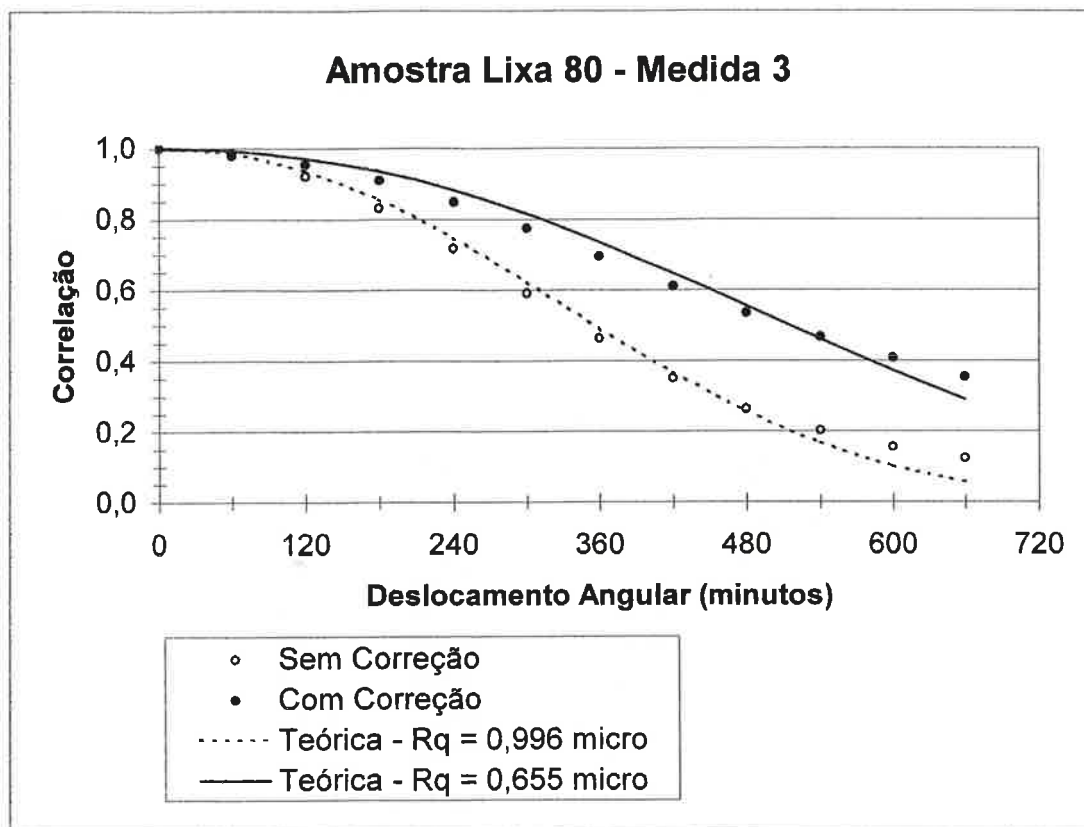
### 6.2.1.3- Medida 3

A imagem 6.5 é a referência para a terceira sequência de imagens.



*Imagem 6.5 - Imagem do padrão de speckle, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $45^\circ$ , usada como referência na terceira medida da amostra preparada com lixa 80.*

O gráfico 6.4 mostra os valores experimentais e as curvas ajustadas com o programa Origin com e sem a correção na posição dos pixels correspondentes na imagem correlacionada.



**Gráfico 6.4** - Gráfico dos pontos experimentais e curvas ajustadas à expressão teórica da correlação angular, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $45^\circ$ .

A tabela 6.4 apresenta os valores experimentais e teóricos da correlação angular bem como o deslocamento ( $X_0, Y_0$ ) da imagem correlacionada. Os valores de rugosidade obtidos através do ajuste dos pontos experimentais à expressão teórica através do programa Origin são:

$$Rq_{\text{sem correção}} = (0,996 \pm 0,020) \mu\text{m}$$

$$Rq_{\text{com correção}} = (0,655 \pm 0,014) \mu\text{m}$$

Deslocamento Angular (Minutos)	Correlação Sem Correção	Correlação Com Correção	Correlação Teórica Sem Correção	Correlação Teórica Com Correção	$X_0$ (pixel)	$Y_0$ (pixel)
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0	0
60	0,9790	0,9850	0,9841	0,9931	0	0
120	0,9212	0,9540	0,9353	0,9715	0	1
180	0,8312	0,9085	0,8548	0,9343	1	1
240	0,7177	0,8482	0,7477	0,8817	0	1
300	0,5914	0,7743	0,6230	0,8148	1	1
360	0,4631	0,6939	0,4923	0,7357	-2	1
420	0,3507	0,6113	0,3670	0,6479	-2	1
480	0,2639	0,5359	0,2569	0,5551	-3	1
540	0,2022	0,4676	0,1679	0,4618	-5	1
600	0,1561	0,4085	0,1020	0,3721	-4	0
660	0,1247	0,3546	0,0572	0,2898	-6	0

**Tabela 6.4** - Valores experimentais e teóricos da correlação angular com e sem correção na posição do pixel correspondente e deslocamento em pixel das imagens correlacionadas.  $Rq_{\text{sem correção}} = (0,996 \pm 0,020) \mu\text{m}$  e  $Rq_{\text{com correção}} = (0,655 \pm 0,014) \mu\text{m}$



### 6.2.1.4- Comparação Com o Rugosímetro Mecânico

A tabela 6.5 mostra os valores de rugosidade  $R_q$  obtidas com os rugosímetros mecânicos para regiões diferentes da amostra e também os valores obtidos com a correção na posição do pixel correspondente.

	Medidas						Rq média ( $\mu\text{m}$ )
	1	2	3	4	5	6	
Mecânico	0,63	0,65	0,62	0,49	0,56	-	0,59 $\pm$ 0,07
Mecânico-IPT	0,39	0,38	0,47	0,31	0,43	0,68	0,44 $\pm$ 0,13
Correlação Angular	0,654	0,681	0,655	-	-	-	0,663 $\pm$ 0,015

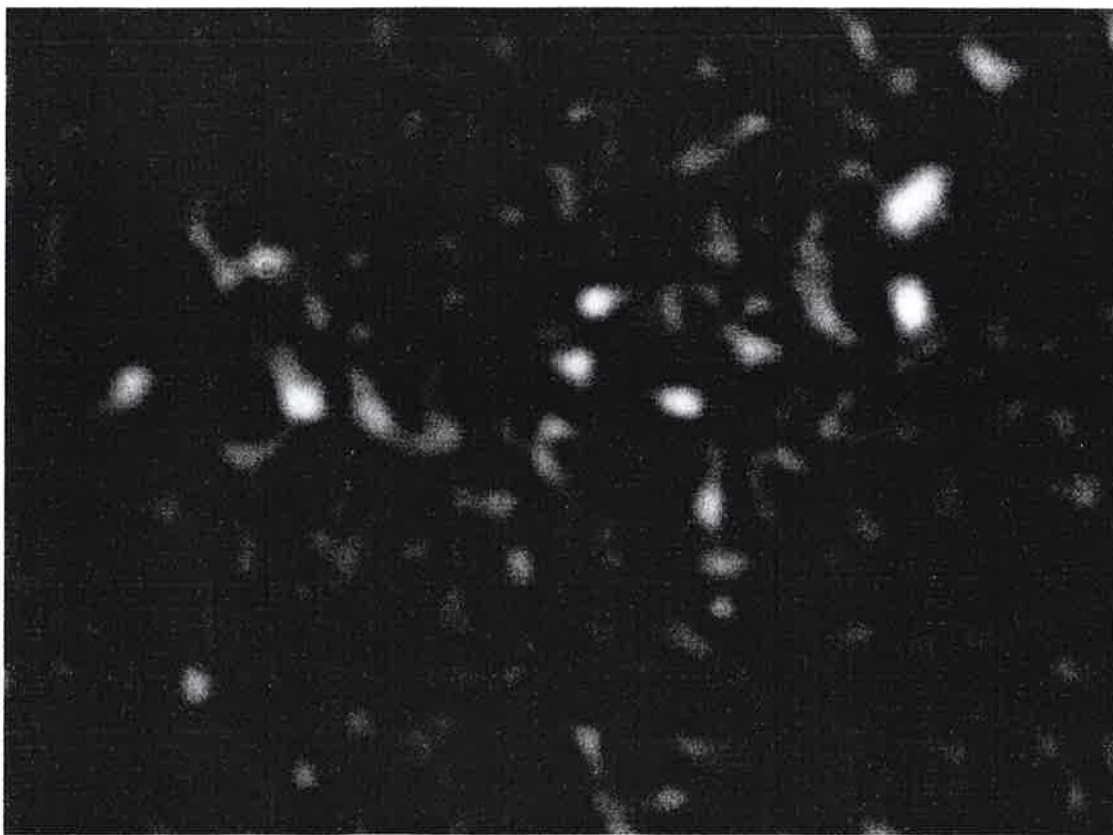
**Tabela 6.5** - Valores experimentais obtidos com os rugosímetros mecânicos e através do método de correlação angular de speckle com correção da posição do pixel correspondente. O erro apresentado é o desvio padrão calculado através dos valores de rugosidade medidos.

## 6.2.2- Amostra Preparada com Lixa 100

Para essa amostra foram realizadas duas sequências de medidas. A primeira medida foi realizada mantendo-se a posição do polarizador em  $0^\circ$ . A segunda medida foi realizada em outra posição da amostra também com o polarizador em  $0^\circ$ .

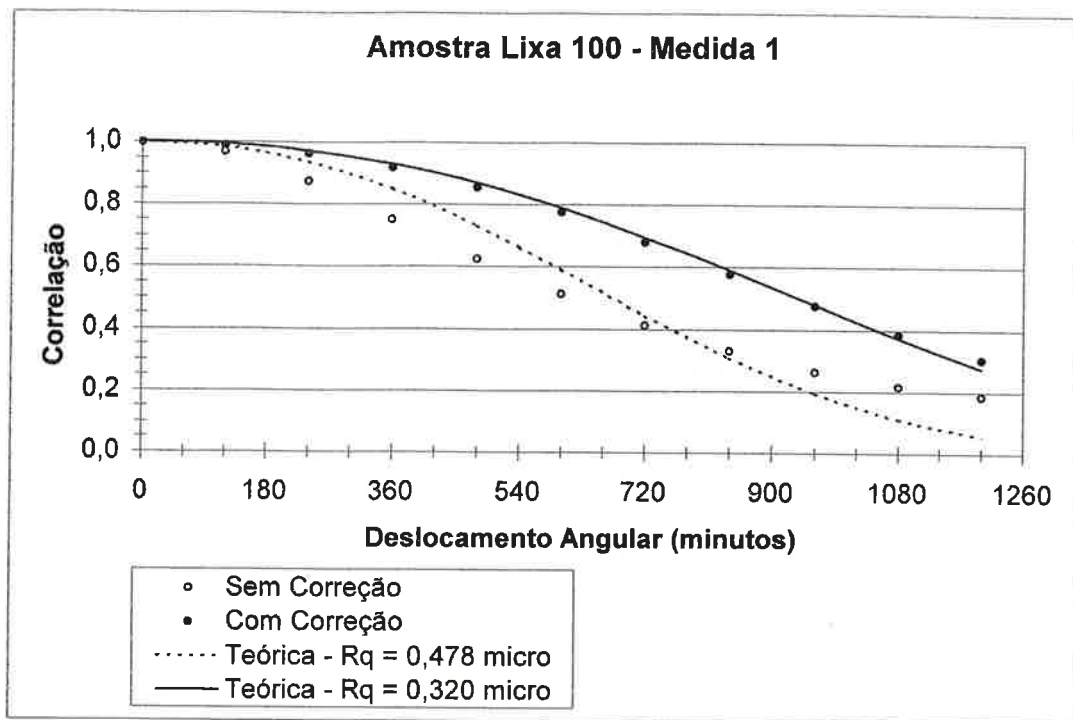
### 6.2.2.1- Medida 1

A imagem 6.6 é a referência para a primeira sequência de imagens.



**Imagem 6.6** - Imagem do padrão de speckle, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $0^\circ$ , usada como referência na primeira medida da amostra preparada com lixa 100.

O gráfico 6.5 mostra os valores experimentais e as curvas ajustadas com o programa Origin com e sem a correção na posição dos pixels correspondentes na imagem correlacionada.



**Gráfico 6.5** - Gráfico dos pontos experimentais e curvas ajustadas à expressão teórica da correlação angular, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $0^\circ$ .

A tabela 6.6 apresenta os valores experimentais e teóricos da correlação angular bem como o deslocamento ( $X_0, Y_0$ ) da imagem correlacionada. Os valores de rugosidade obtidos através do ajuste dos pontos experimentais à expressão teórica através do programa Origin são:

$$Rq_{\text{sem correção}} = (0,478 \pm 0,025) \mu\text{m}$$

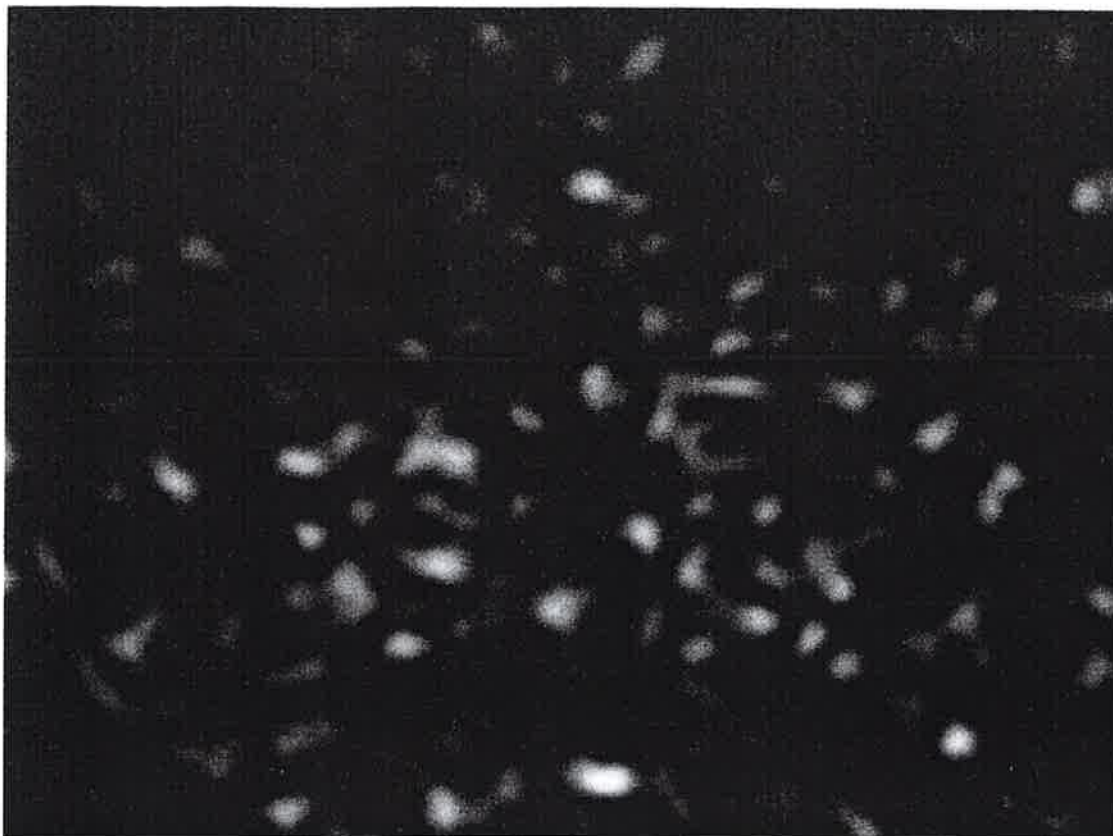
$$Rq_{\text{com correção}} = (0,320 \pm 0,003) \mu\text{m}$$

Deslocamento Angular (Minutos)	Correlação Sem Correção	Correlação Com Correção	Correlação Teórica Sem Correção	Correlação Teórica Com Correção	$X_0$ (pixel)	$Y_0$ (pixel)
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0	0
120	0,9670	0,9876	0,9847	0,9931	0	0
240	0,8743	0,9624	0,9352	0,9704	0	0
360	0,7514	0,9189	0,8493	0,9294	0	0
480	0,6257	0,8560	0,7311	0,8690	-4	0
600	0,5128	0,7766	0,5909	0,7899	-6	0
720	0,4127	0,6810	0,4441	0,6951	-7	-1
840	0,3298	0,5782	0,3073	0,5893	-8	-1
960	0,2622	0,4757	0,1938	0,4793	-11	-1
1080	0,2168	0,3838	0,1103	0,3722	-14	0
1200	0,1857	0,3034	0,0560	0,2747	-15	0

**Tabela 6.6** - Valores experimentais e teóricos da correlação angular com e sem correção na posição do pixel correspondente e deslocamento em pixel das imagens correlacionadas.  $Rq_{\text{sem correção}} = (0,478 \pm 0,025) \mu\text{m}$  e  $Rq_{\text{com correção}} = (0,320 \pm 0,003) \mu\text{m}$ .

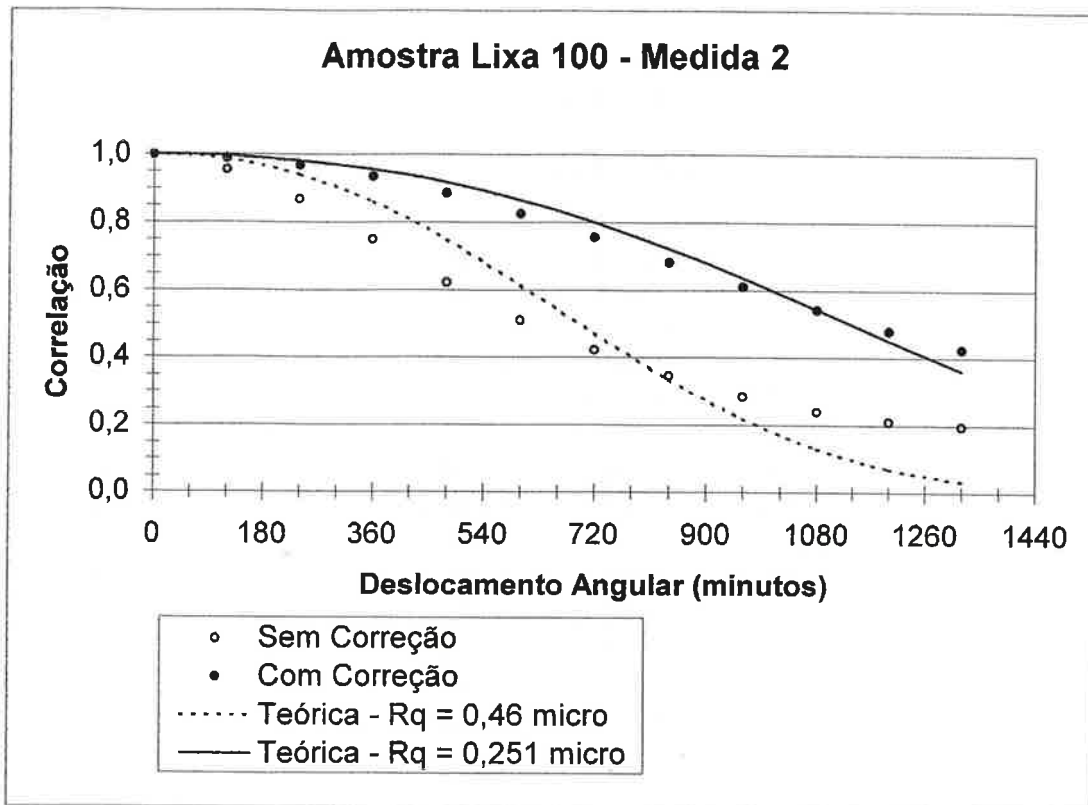
### 6.2.2.2- Medida 2

A imagem 6.7 é a referência para a segunda sequência de imagens.



*Imagem 6.7 - Imagem do padrão de speckle, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $0^\circ$ , usada como referência na segunda medida da amostra preparada com lixa 100.*

O gráfico 6.6 mostra os valores experimentais e as curvas ajustadas com o programa Origin com e sem a correção na posição dos pixels correspondentes na imagem correlacionada.



**Gráfico 6.6** - Gráfico dos pontos experimentais e curvas ajustadas à expressão teórica da correlação angular, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $0^\circ$ .

A tabela 6.7 apresenta os valores experimentais e teóricos da correlação angular bem como o deslocamento ( $X_0, Y_0$ ) da imagem correlacionada. Os valores de rugosidade obtidos através do ajuste dos pontos experimentais à expressão teórica através do programa Origin são:

$$Rq_{\text{sem correção}} = (0,46 \pm 0,03) \mu\text{m}$$

$$Rq_{\text{com correção}} = (0,251 \pm 0,006) \mu\text{m}$$

Deslocamento Angular (Minutos)	Correlação Sem Correção	Correlação Com Correção	Correlação Teórica Sem Correção	Correlação Teórica Com Correção	$X_0$ (pixel)	$Y_0$ (pixel)
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0	0
120	0,9539	0,9876	0,9858	0,9958	0	-2
240	0,8679	0,9677	0,9398	0,9817	-1	-3
360	0,7492	0,9347	0,8596	0,9560	0	-4
480	0,6217	0,8852	0,7482	0,9173	-2	-5
600	0,5097	0,8252	0,6143	0,8650	-2	-7
720	0,4233	0,7551	0,4716	0,7995	-4	-9
840	0,3471	0,6817	0,3353	0,7223	-6	-11
960	0,2853	0,6104	0,2188	0,6361	-8	-12
1080	0,2393	0,5415	0,1298	0,5444	-8	-14
1200	0,2117	0,4804	0,0693	0,4516	-11	-16
1320	0,1970	0,4264	0,0330	0,3620	-14	-19

**Tabela 6.6** - Valores experimentais e teóricos da correlação angular com e sem correção na posição do pixel correspondente e deslocamento em pixel das imagens correlacionadas.  $Rq_{\text{sem correção}} = (0,46 \pm 0,03) \mu\text{m}$  e  $Rq_{\text{com correção}} = (0,251 \pm 0,006) \mu\text{m}$

### 6.2.2.3- Comparação Com o Rugosímetro Mecânico

A tabela 6.7 mostra os valores de rugosidade  $R_q$  obtidas com os rugosímetros mecânicos para regiões diferentes da amostra e também os valores obtidos com a correção na posição do pixel correspondente.

	Medidas					Rq média ( $\mu\text{m}$ )
	1	2	3	4	5	
Mecânico	0,19	0,26	0,43	0,36	0,27	0,30 $\pm$ 0,09
Mecânico-IPT	0,11	0,16	0,22	0,16	0,05	0,14 $\pm$ 0,06
Correlação Angular	0,320	0,251	-	-	-	0,28 $\pm$ 0,05

**Tabela 6.7** - Valores experimentais obtidos com os rugosímetros mecânicos e através do método de correlação angular de speckle com correção da posição do pixel correspondente. O erro apresentado é o desvio padrão calculado através dos valores de rugosidade medidos.

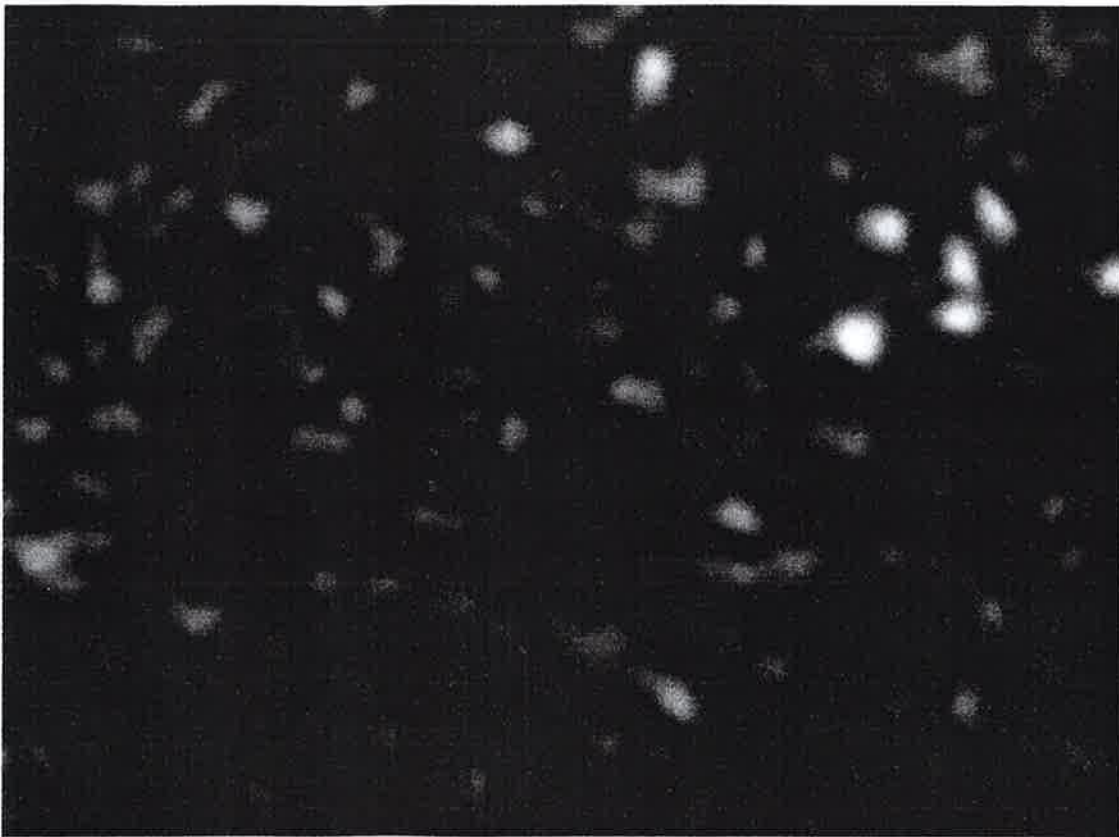


### 6.2.3- Amostra Preparada com Lixa 120

Para essa amostra foram realizadas duas sequências de medidas. A primeira medida foi realizada mantendo-se a posição do polarizador em  $0^\circ$ . A segunda medida foi realizada em outra posição da amostra também com o polarizador em  $0^\circ$ .

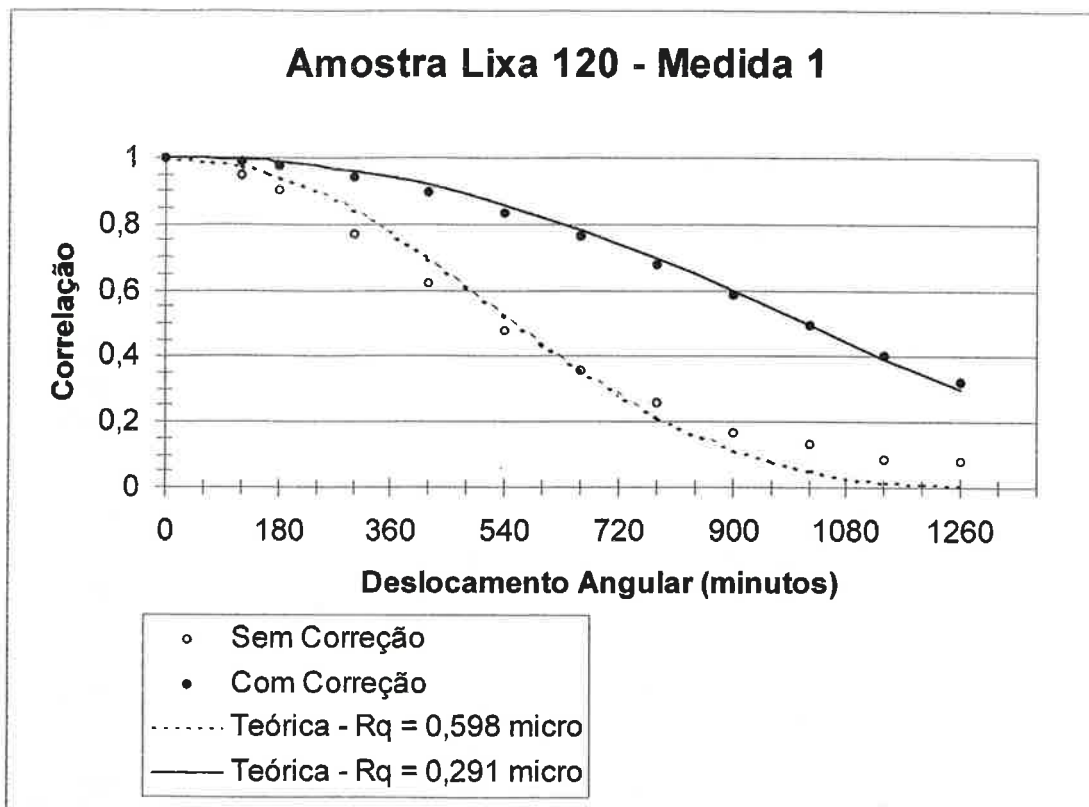
#### 6.2.3.1- Medida 1

A imagem 6.8 é a referência para a primeira sequência de imagens.



*Imagem 6.8 - Imagem do padrão de speckle, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $0^\circ$ , usada como referência na primeira medida da amostra preparada com lixa 120.*

O gráfico 6.7 mostra os valores experimentais e as curvas ajustadas com o programa Origin com e sem a correção na posição dos pixels correspondentes na imagem correlacionada.



**Gráfico 6.7** - Gráfico dos pontos experimentais e curvas ajustadas à expressão teórica da correlação angular, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $0^\circ$ .

A tabela 6.8 apresenta os valores experimentais e teóricos da correlação angular bem como o deslocamento ( $X_0, Y_0$ ) da imagem correlacionada. Os valores de rugosidade obtidos através do ajuste dos pontos experimentais à expressão teórica através do programa Origin são:

$$Rq_{\text{sem correção}} = (0,598 \pm 0,024) \mu\text{m}$$

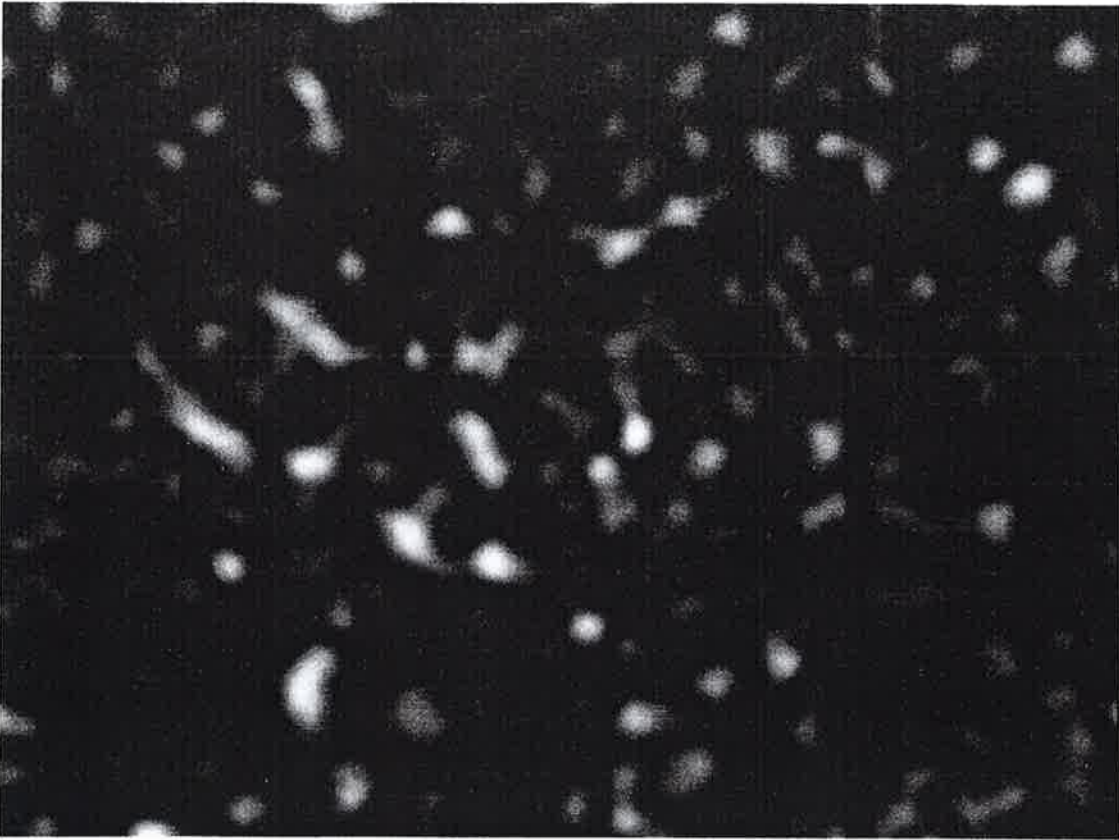
$$Rq_{\text{com correção}} = (0,291 \pm 0,003) \mu\text{m}$$

Deslocamento Angular (Minutos)	Correlação Sem Correção	Correlação Com Correção	Correlação Teórica Sem Correção	Correlação Teórica Com Correção	$X_0$ (pixel)	$Y_0$ (pixel)
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0	0
120	0,9484	0,9865	0,9762	0,9943	-2	1
180	0,9035	0,9764	0,9450	0,9867	-1	2
300	0,7703	0,9447	0,8431	0,9604	-2	3
420	0,6198	0,8977	0,6966	0,9179	-4	5
540	0,4788	0,8349	0,5254	0,8586	-6	6
660	0,3588	0,7634	0,3564	0,7832	-10	8
780	0,2583	0,6798	0,2141	0,6942	-13	9
900	0,1682	0,5885	0,1121	0,5956	-13	9
1020	0,1327	0,4946	0,0504	0,4928	-19	14
1140	0,0888	0,4021	0,0191	0,3917	-22	17
1260	0,0780	0,3245	0,0060	0,2979	-26	20

**Tabela 6.8** - Valores experimentais e teóricos da correlação angular com e sem correção na posição do pixel correspondente e deslocamento em pixel das imagens correlacionadas.  $Rq_{\text{sem correção}} = (0,598 \pm 0,024) \mu\text{m}$  e  $Rq_{\text{com correção}} = (0,291 \pm 0,003) \mu\text{m}$

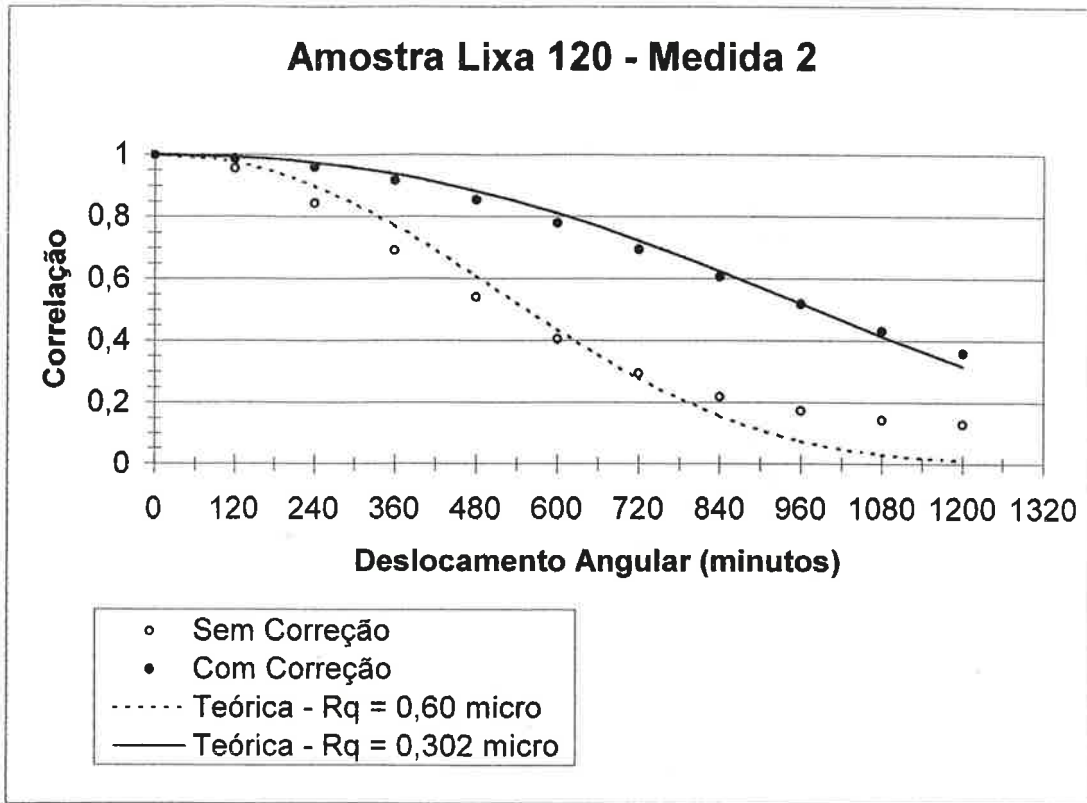
### 6.2.3.2- Medida 2

A imagem 6.9 é a referência para a segunda sequência de imagens.



**Imagem 6.9** - Imagem do padrão de speckle, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $0^\circ$ , usada como referência na segunda medida da amostra preparada com lixa 120.

O gráfico 6.8 mostra os valores experimentais e as curvas ajustadas com o programa Origin com e sem a correção na posição dos pixels correspondentes na imagem correlacionada.



**Gráfico 6.8** - Gráfico dos pontos experimentais e curvas ajustadas à expressão teórica da correlação angular, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $0^\circ$ .

A tabela 6.9 apresenta os valores experimentais e teóricos da correlação angular bem como o deslocamento ( $X_0, Y_0$ ) da imagem correlacionada. Os valores de rugosidade obtidos através do ajuste dos pontos experimentais à expressão teórica através do programa Origin são:

$$Rq_{\text{sem correção}} = (0,60 \pm 0,03) \mu\text{m}$$

$$Rq_{\text{com correção}} = (0,302 \pm 0,005) \mu\text{m}$$

Deslocamento Angular (Minutos)	Correlação Sem Correção	Correlação Com Correção	Correlação Teórica Sem Correção	Correlação Teórica Com Correção	$X_0$ (pixel)	$Y_0$ (pixel)
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0	0
120	0,9551	0,9864	0,9760	0,9939	0	1
240	0,8435	0,9596	0,8998	0,9736	-1	1
360	0,6914	0,9167	0,7731	0,9369	0	2
480	0,5405	0,8540	0,6105	0,8825	1	2
600	0,4064	0,7794	0,4365	0,8106	0	3
720	0,2942	0,6944	0,2784	0,7233	1	3
840	0,2179	0,6062	0,1558	0,6244	0	4
960	0,1738	0,5177	0,0754	0,5195	1	4
1080	0,1438	0,4324	0,0310	0,4147	2	5
1200	0,1292	0,3609	0,0106	0,3164	4	6

**Tabela 6.9** - Valores experimentais e teóricos da correlação angular com e sem correção na posição do pixel correspondente e deslocamento em pixel das imagens correlacionadas.  $Rq_{\text{sem correção}} = (0,60 \pm 0,03) \mu\text{m}$  e  $Rq_{\text{com correção}} = (0,302 \pm 0,005) \mu\text{m}$

### 6.2.3.3- Comparação Com o Rugosímetro Mecânico

A tabela 6.10 mostra os valores de rugosidade  $Rq$  obtidas com os rugosímetros mecânicos para regiões diferentes da amostra e também os valores obtidos com a correção na posição do pixel correspondente.

	Medidas					Rq média ( $\mu\text{m}$ )
	1	2	3	4	5	
Mecânico	0,2	0,46	0,44	0,36	0,28	0,35 $\pm$ 0,11
Mecânico-IPT	0,31	0,46	0,35	0,33	0,29	0,35 $\pm$ 0,07
Correlação Angular	0,291	0,302	-	-	-	0,296 $\pm$ 0,008

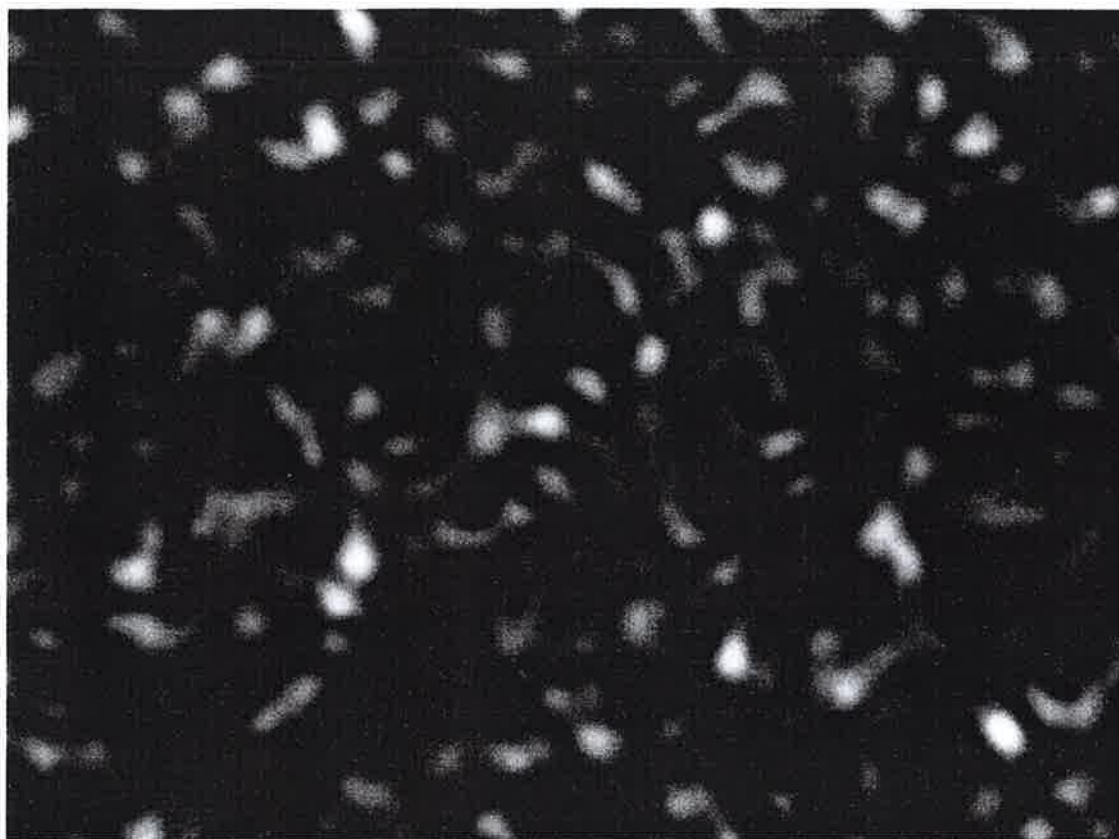
**Tabela 6.10** - Valores experimentais obtidos com os rugosímetros mecânicos e através do método de correlação angular de speckle com correção da posição do pixel correspondente. O erro apresentado é o desvio padrão calculado através dos valores de rugosidade medidos.

## 6.2.4- Amostra Preparada com Lixa 150

Para essa amostra foram realizadas duas sequências de medidas. A primeira medida foi realizada mantendo-se a posição do polarizador em  $0^\circ$ . A segunda medida foi realizada em outra posição da amostra também com o polarizador em  $0^\circ$ .

### 6.2.4.1- Medida 1

A imagem 6.10 é a referência para a primeira sequência de imagens.



*Imagem 6.10 - Imagem do padrão de speckle, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $0^\circ$ , usada como referência na primeira medida da amostra preparada com lixa 150.*

O gráfico 6.9 mostra os valores experimentais e as curvas ajustadas com o programa Origin com e sem a correção na posição dos pixels correspondentes na imagem correlacionada.

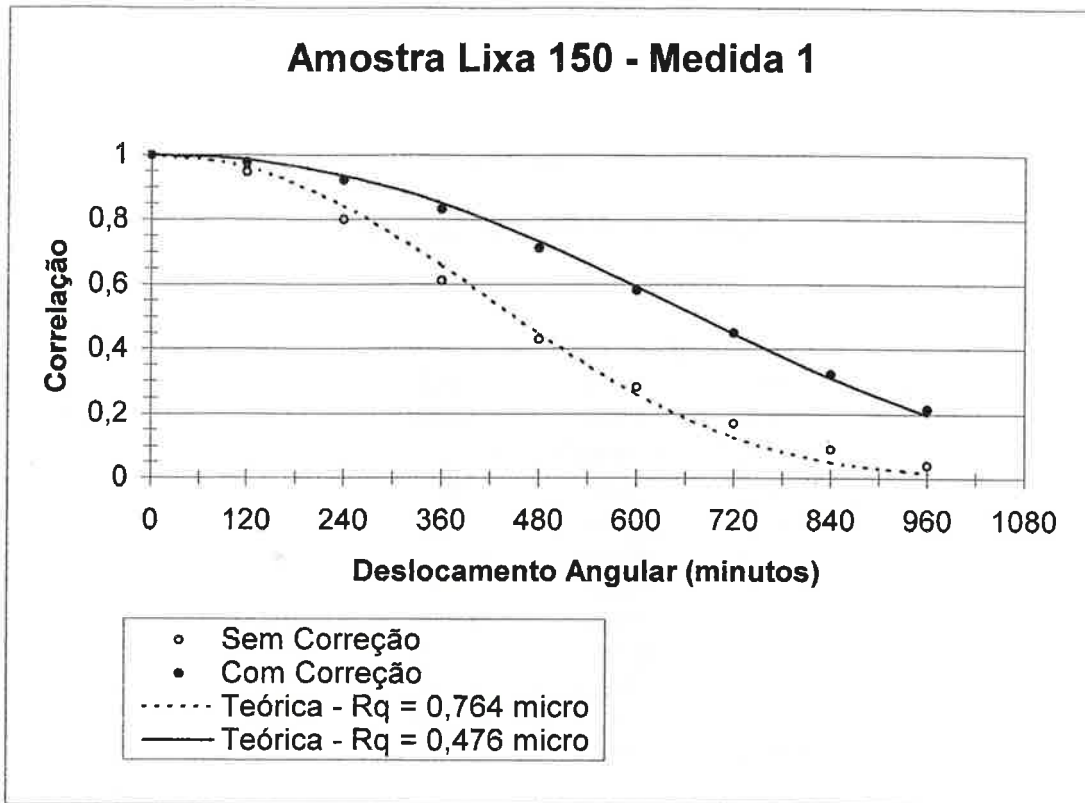


Gráfico 6.9 - Gráfico dos pontos experimentais e curvas ajustadas à expressão teórica da correlação angular, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $0^\circ$ .



A tabela 6.11 apresenta os valores experimentais e teóricos da correlação angular bem como o deslocamento ( $X_0, Y_0$ ) da imagem correlacionada. Os valores de rugosidade obtidos através do ajuste dos pontos experimentais à expressão teórica através do programa Origin são:

$$Rq_{\text{sem correção}} = (0,764 \pm 0,019) \mu\text{m}$$

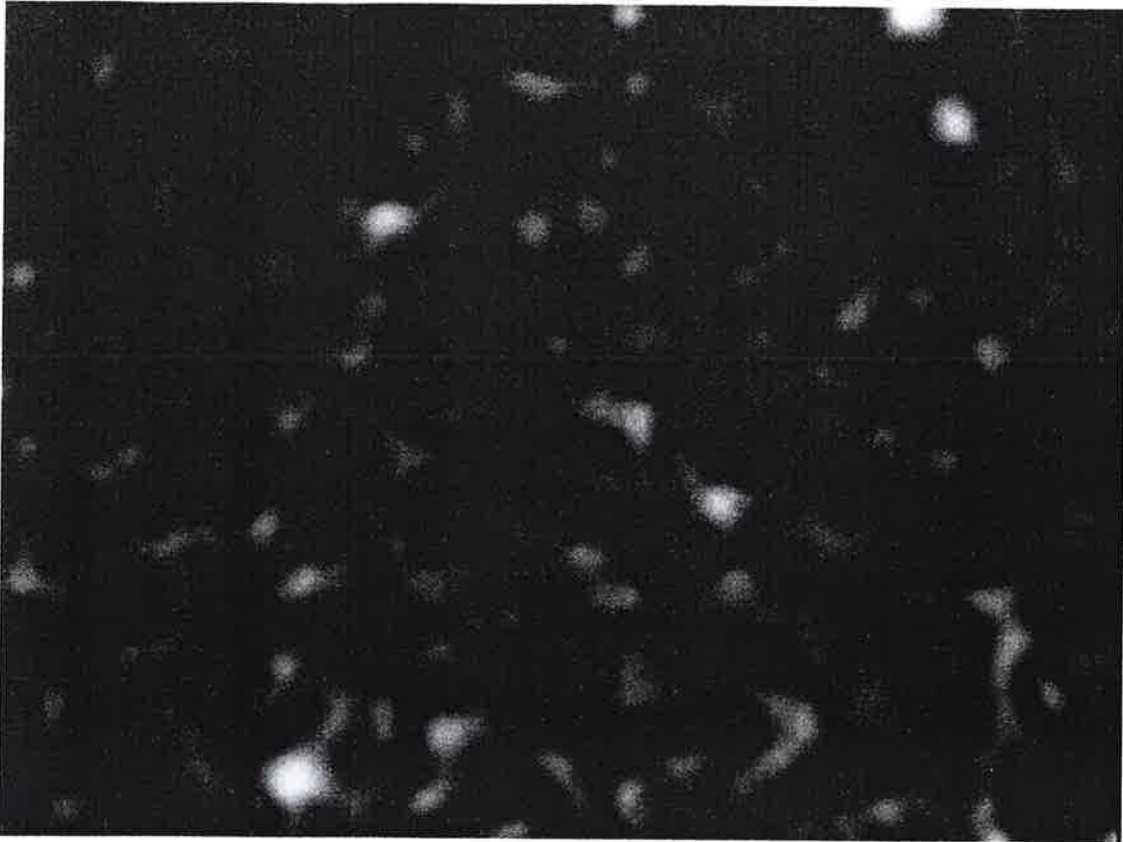
$$Rq_{\text{com correção}} = (0,476 \pm 0,005) \mu\text{m}$$

Deslocamento Angular (Minutos)	Correlação Sem Correção	Correlação Com Correção	Correlação Teórica Sem Correção	Correlação Teórica Com Correção	$X_0$ (pixel)	$Y_0$ (pixel)
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0	0
120	0,9467	0,9772	0,9614	0,9848	0	0
240	0,8008	0,9212	0,8426	0,9357	1	0
360	0,6115	0,8321	0,6589	0,8505	0	1
480	0,4303	0,7130	0,4492	0,7330	2	1
600	0,2821	0,5827	0,2608	0,5935	-1	1
720	0,1690	0,4500	0,1257	0,4471	-1	1
840	0,0898	0,3224	0,0491	0,3104	-3	2
960	0,0401	0,2151	0,0151	0,1965	-2	1

**Tabela 6.11** - Valores experimentais e teóricos da correlação angular com e sem correção na posição do pixel correspondente e deslocamento em pixel das imagens correlacionadas.  $Rq_{\text{sem correção}} = (0,764 \pm 0,019) \mu\text{m}$  e  $Rq_{\text{com correção}} = (0,476 \pm 0,005) \mu\text{m}$

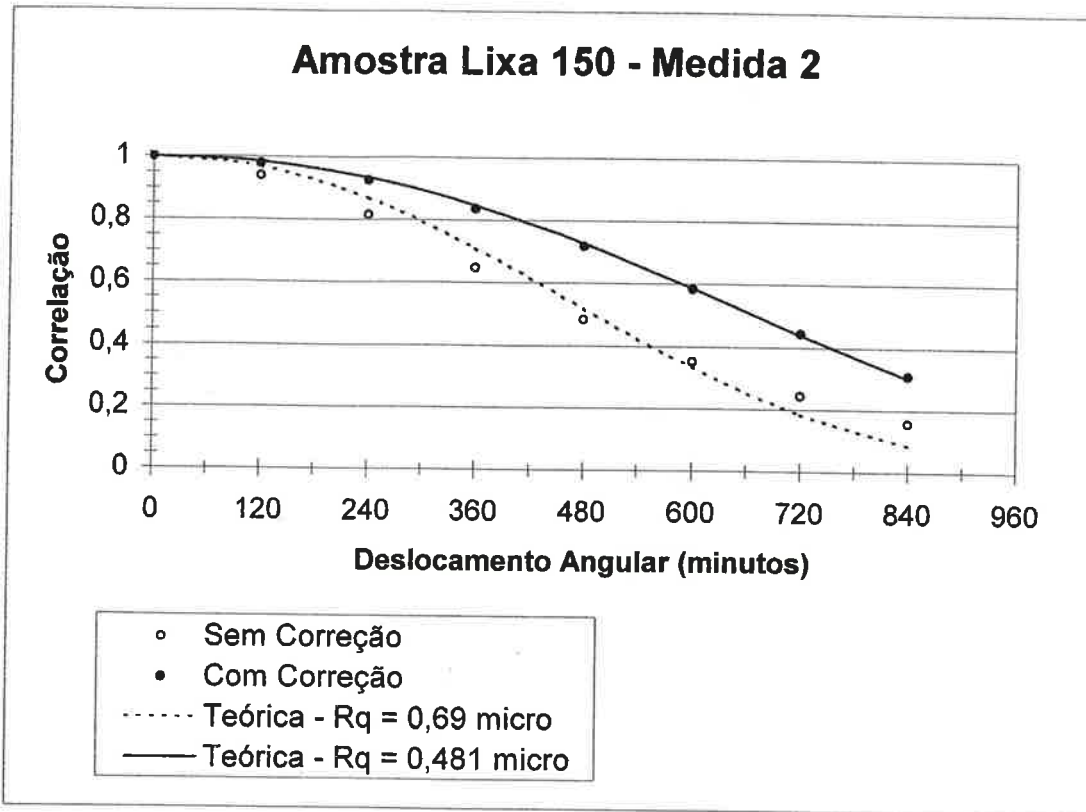
### 6.2.4.2- Medida 2

A imagem 6.11 é a referência para a segunda sequência de imagens.



**Imagem 6.11** - Imagem do padrão de speckle, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $0^\circ$ , usada como referência na segunda medida da amostra preparada com lixa 150.

O gráfico 6.10 mostra os valores experimentais e as curvas ajustadas com o programa Origin com e sem a correção na posição dos pixels correspondentes na imagem correlacionada.



**Gráfico 6.10** - Gráfico dos pontos experimentais e curvas ajustadas à expressão teórica da correlação angular, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  e polarizador em  $0^\circ$ .

A tabela 6.12 apresenta os valores experimentais e teóricos da correlação angular bem como o deslocamento ( $X_0, Y_0$ ) da imagem correlacionada. Os valores de rugosidade obtidos através do ajuste dos pontos experimentais à expressão teórica através do programa Origin são:

$$Rq_{\text{sem correção}} = (0,69 \pm 0,03) \mu\text{m}$$

$$Rq_{\text{com correção}} = (0,481 \pm 0,003) \mu\text{m}$$

Deslocamento Angular (Minutos)	Correlação Sem Correção	Correlação Com Correção	Correlação Teórica Sem Correção	Correlação Teórica Com Correção	$X_0$ (pixel)	$Y_0$ (pixel)
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0	0
120	0,9402	0,9787	0,9684	0,9845	1	0
240	0,8155	0,9259	0,8697	0,9344	2	-1
360	0,6465	0,8366	0,7116	0,8476	1	-2
480	0,4828	0,7196	0,5206	0,7282	-3	-2
600	0,3513	0,5857	0,3341	0,5870	-2	-3
720	0,2451	0,4443	0,1843	0,4396	-4	-4
840	0,1565	0,3092	0,0856	0,3028	-3	-5

**Tabela 6.12** - Valores experimentais e teóricos da correlação angular com e sem correção na posição do pixel correspondente e deslocamento em pixel das imagens correlacionadas.  $Rq_{\text{sem correção}} = (0,69 \pm 0,03) \mu\text{m}$  e  $Rq_{\text{com correção}} = (0,481 \pm 0,003) \mu\text{m}$

### 6.2.4.3- Comparação Com o Rugosímetro Mecânico

A tabela 6.13 mostra os valores de rugosidade  $Rq$  obtidas com os rugosímetros mecânicos para regiões diferentes da amostra e também os valores obtidos com a correção na posição do pixel correspondente.

	Medidas					Rq média ( $\mu\text{m}$ )
	1	2	3	4	5	
Mecânico	0,32	0,53	0,47	0,49	0,56	0,47 $\pm$ 0,09
Mecânico-IPT	0,36	0,41	0,40	0,35	0,49	0,40 $\pm$ 0,06
Correlação Angular	0,476	0,481	-	-	-	0,478 $\pm$ 0,004

**Tabela 6.13** - Valores experimentais obtidos com os rugosímetros mecânicos e através do método de correlação angular de speckle com correção da posição do pixel correspondente. O erro apresentado é o desvio padrão calculado através dos valores de rugosidade medidos.

### 6.2.5- Amostra Preparada Através de Ataque Químico

Essa amostra foi deixada em solução aquosa de  $\text{HNO}_3$  a 50% durante um minuto. Essa amostra foi preparada anos antes dessas medidas, por isso foi feita limpeza com Caol para retirar a oxidação. Para esta amostra foi realizada apenas uma sequência de medidas em posições diferentes. Não foi feito um controle na posição da polarização.

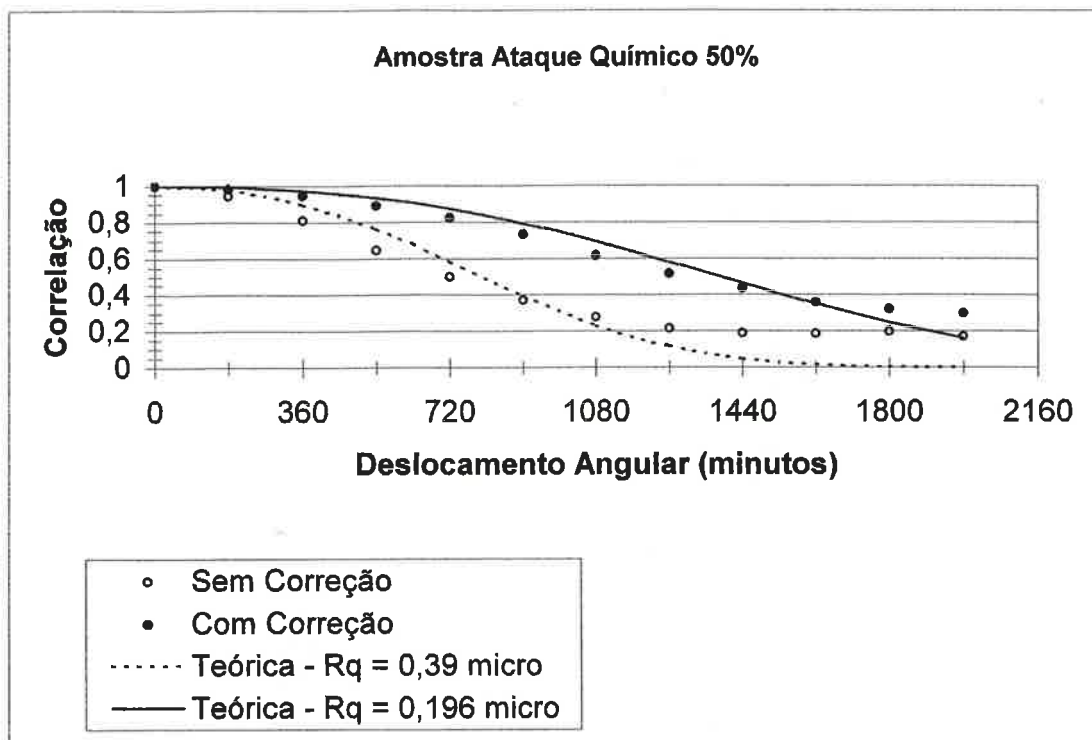
#### 6.2.5.1- Medida 1

A imagem 6.12 é a referência para a primeira sequência de imagens.



*Imagem 6.12 - Imagem do padrão de speckle com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$  usada como referência na medida da amostra preparada com ataque químico e limpa com Caol.*

O gráfico 6.11 mostra os valores experimentais e as curvas ajustadas com o programa Origin com e sem a correção na posição dos pixels correspondentes na imagem correlacionada.



**Gráfico 6.11** - Gráfico dos pontos experimentais e curvas ajustadas à expressão teórica da correlação angular, com ângulo de incidência  $\theta = 21^\circ$ .

A tabela 6.14 apresenta os valores experimentais e teóricos da correlação angular bem como o deslocamento ( $X_0, Y_0$ ) da imagem correlacionada. Os valores de rugosidade obtidos através do ajuste dos pontos experimentais à expressão teórica através do programa Origin são:

$$Rq_{\text{sem correção}} = (0,39 \pm 0,03) \mu\text{m}$$

$$Rq_{\text{com correção}} = (0,196 \pm 0,007) \mu\text{m}$$

Deslocamento Angular (Minutos)	Correlação Sem Correção	Correlação Com Correção	Correlação Teórica Sem Correção	Correlação Teórica Com Correção	$X_0$ (pixel)	$Y_0$ (pixel)
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0	0
180	0,9440	0,9822	0,9762	0,9939	-2	1
360	0,8105	0,9472	0,8970	0,9729	-1	1
540	0,6449	0,8901	0,7605	0,9332	-4	3
720	0,4969	0,8228	0,5826	0,8724	-6	4
900	0,3712	0,7283	0,3943	0,7905	-9	5
1080	0,2775	0,6150	0,2304	0,6902	-11	7
1260	0,2144	0,5173	0,1136	0,5773	-15	9
1440	0,1878	0,4341	0,0461	0,4598	-23	12
1620	0,1849	0,3569	0,0151	0,3466	-34	16
1800	0,1978	0,3192	0,0039	0,2460	-63	15
1980	0,1709	0,2954	0,0008	0,1634	-75	15

**Tabela 6.14** - Valores experimentais e teóricos da correlação angular com e sem correção na posição do pixel correspondente e deslocamento em pixel das imagens correlacionadas.  $Rq_{\text{sem correção}} = (0,39 \pm 0,03) \mu\text{m}$  e  $Rq_{\text{com correção}} = (0,196 \pm 0,007) \mu\text{m}$

### 6.2.5.2- Comparação Com o Rugosímetro Mecânico

A tabela 6.15 mostra os valores de rugosidade  $Rq$  obtidas com o rugosímetro mecânico para pontos diferentes da amostra e também os valores obtidos com a correção na posição do pixel correspondente.

	Medidas					Rq média ( $\mu\text{m}$ )
	1	2	3	4	5	
Mecânico	0,09	0,15	0,24	0,22	0,1	0,16 $\pm$ 0,07
Correlação Angular	0,196	-	-	-	-	0,196 $\pm$ 0,007

**Tabela 6.15** - Valores experimentais obtidos com o rugosímetro mecânico e através do método de correlação angular de speckle com correção da posição do pixel correspondente. O erro apresentado no mecânico é o desvio padrão calculado através dos valores de rugosidade medidos.

### 6.3- Resumo das Medições

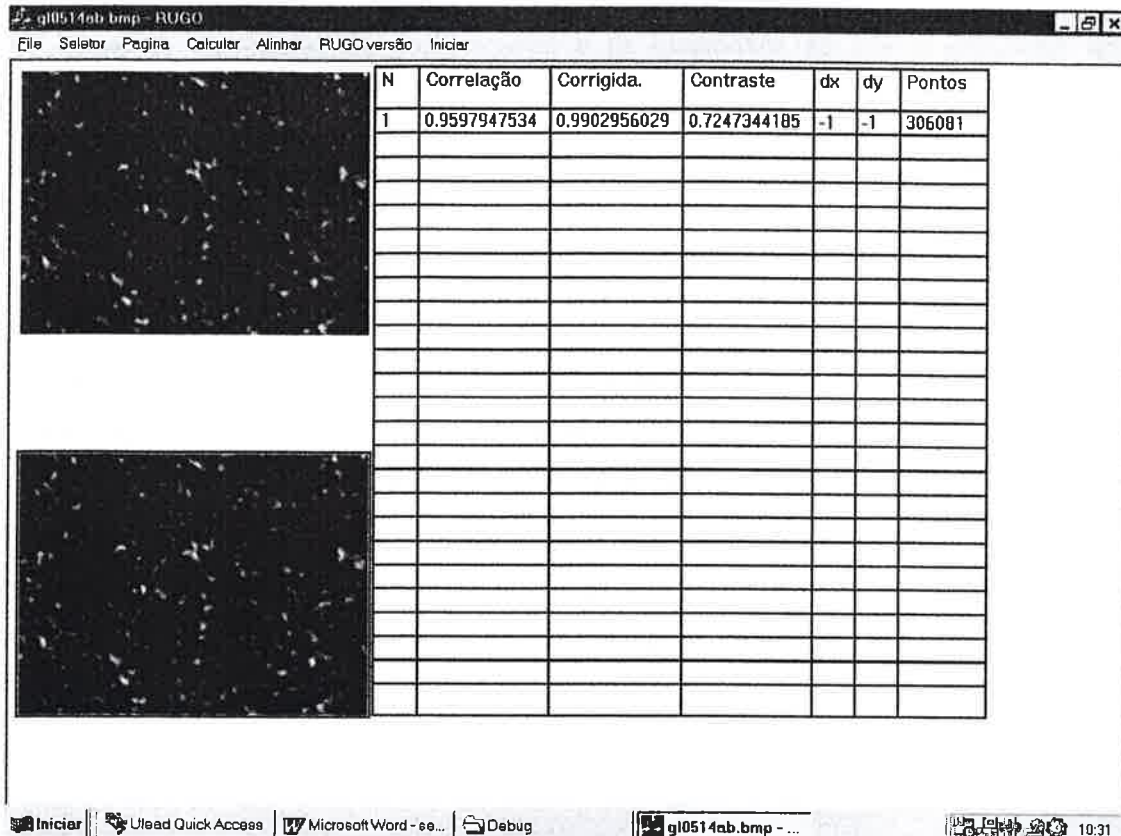
A tabela 6.16 apresenta um resumo dos valores de rugosidades obtidos. São considerados apenas os erros estatísticos (desvio padrão). Apenas para a amostra preparada com ataque químico é apresentado o erro, obtido com o programa Origin no ajuste dos pontos experimentais à curva teórica, para o valor obtido através da correlação angular de speckle.

<b>Rq média (<math>\mu\text{m}</math>)</b>			
<b>Amostras</b>	<b>Mecânico</b>	<b>Mecânico IPT</b>	<b>Correlação Angular</b>
<b>Lixa 80</b>	<b><math>0,59 \pm 0,07</math></b>	<b><math>0,44 \pm 0,13</math></b>	<b><math>0,663 \pm 0,015</math></b>
<b>Lixa 100</b>	<b><math>0,30 \pm 0,09</math></b>	<b><math>0,14 \pm 0,06</math></b>	<b><math>0,28 \pm 0,05</math></b>
<b>Lixa 120</b>	<b><math>0,35 \pm 0,11</math></b>	<b><math>0,35 \pm 0,07</math></b>	<b><math>0,296 \pm 0,008</math></b>
<b>Lixa 150</b>	<b><math>0,47 \pm 0,09</math></b>	<b><math>0,40 \pm 0,06</math></b>	<b><math>0,478 \pm 0,004</math></b>
<b>Ataque Químico</b>	<b><math>0,16 \pm 0,07</math></b>	<b>-</b>	<b><math>0,196 \pm 0,07</math></b>

*Tabela 6.16 - Resumo dos valores experimentais obtidos com o rugosímetro mecânico e através do método de correlação angular de speckle com correção da posição do pixel correspondente.*



## 7- PROGRAMA RUGO



**Imagem 7.1 -** Interface gráfica do programa Rugo.

O programa RUGO foi desenvolvido utilizando-se a linguagem visual C++ devendo ser executado no sistema operacional windows 95 ou superior . Podemos com ele:

- Abrir dois arquivos de imagens 640x480 pixel em formato bitmap de 24 bits, usando-se o menu File;
- Selecionar a posição superior ou inferior, na qual o arquivo de imagem será aberta, usando-se o menu Seletor;
- Visualizar os valores com N variando de 1 a 250 (total de 250 valores), usando-se o menu Página;
- Calcular a correlação sem correção de posicionamento entre as duas imagens utilizando-se como imagem de referência a da posição 1 através do menu Calcular;
- Calcular a correlação com correção através do menu Alinhar;

- Iniciar os valores se desejado, ou caso se obtenha os 250 valores possíveis, através do menu Iniciar. Esse comando apaga todos os valores anteriores;
- Visualizar os valores do deslocamento e da quantidade de pontos utilizados nos cálculos.

### **7.1- Método de Alinhamento**

Inicialmente é considerado  $x_0 = 0$  e  $y_0 = 0$ . São calculados então três valores de correlação considerando-se os deslocamentos  $x_0-1$ ,  $x_0$  e  $x_0+1$ . Se o valor em  $x_0$  for o maior entre os três, significa que  $x_0$  é a correção de posicionamento na direção x, caso o maior seja em  $x_0-1$  ou em  $x_0+1$  calculamos novamente em  $x_0-2$  ou  $x_0+2$  e assim sucessivamente até obtermos um valor menor do que o anterior significando que encontramos o valor de máximo no deslocamento anterior. Considerando-se o valor da correção de posicionamento na direção x adotamos o mesmo procedimento na direção y. Caso o valor de  $y_0$  seja diferente do utilizado para encontrar  $x_0$  repete-se o alinhamento utilizando-se o novo valor de  $y_0$ . Esse processo é repetido no máximo três vezes.

## 8- CONSIDERAÇÕES FINAIS

O primeiro passo desse trabalho foi desenvolver um programa de computador capaz de compensar o desalinhamento entre a imagem de referência do padrão de speckle com a imagem correlacionada antes do cálculo da correlação, pois o que ocorria era um valor de correlação menor devido ao desalinhamento entre as imagens. O resultado do alinhamento foi satisfatório pois foi observado que os pontos experimentais após o alinhamento aproximam-se mais da curva esperada e não possuem flutuações.

O segundo passo foi deduzir a expressão 4.16 permitindo-se assim grandes deslocamentos angulares. Pode-se notar através do gráfico 4.1 que as curvas de correlação da expressão 4.16 caem mais rapidamente do que as da expressão 4.17 usada por Paiva Jr.<sup>[5]</sup>, isso me motivou ainda mais pois a limitação no deslocamento do braço do goniômetro não impediria atingir rugosidade da ordem de  $0,1\mu\text{m}$ .

Apesar das considerações acima, as curvas experimentais e os valores de rugosidade obtidos para amostras com rugosidade abaixo de  $1\mu\text{m}$  não estavam de acordo com o modelo teórico adotado inicialmente por Paiva Jr.<sup>[5]</sup> para o ângulo de espalhamento, foram necessários uma nova concepção do ângulo de espalhamento e a implementação da correção angular  $\delta\phi$  dada pela fórmula 4.22. Essa correção angular indica teoricamente uma ampliação ou redução na imagem do padrão de speckle na direção horizontal, dependendo se o ângulo de incidência da imagem correlacionada é maior ou menor que o ângulo de incidência da imagem de referência. Isso foi comprovado na prática observando-se as imagens dos padrões de speckle.

Os valores de rugosidades obtidos com os rugosímetros mecânicos demonstram que as amostras apresentam uma variação muito grande sendo fortemente dependente da região medida. Já os valores obtidos com o método de correlação angular são um pouco mais estáveis pois é considerada uma área e não apenas uma linha.

Para rugosidades próximas de  $0,1\mu\text{m}$  a imagem do padrão de speckle começa a apresentar diferenças em sua homogeneidade ficando com partes mais escuras como pode ser observado na imagem 6.12

## **9- PERSPECTIVAS FUTURAS**

### **9.1- Melhorias no Método de Correlação**

Foi considerado que a amostra deve ter uma distribuição gaussiana de alturas das irregularidades da superfície. Um estudo para outros modelos de distribuição pode ser feito.

Fazer um estudo mais apurado dos erros envolvidos no método (diferenças entre as considerações teóricas e práticas).

### **9.2- Automação do Rugosímetro**

Atualmente, todas as movimentações no goniômetro são feitas manualmente. Isso torna o processo lento e trabalhoso. Está previsto a automação das movimentações através de motor de passo.

### **9.3- Melhorias no Programa Rugo**

Para se obter a rugosidade de uma amostra estamos utilizando três programas (softwares). Fazemos as aquisições das imagens e gravações dos arquivos através do programa Global Lab, abrimos os arquivos de imagens e obtemos os valores de correlação com o programa Rugo e obtemos o valor de  $R_q$  através do ajuste dos valores experimentais com o programa Origin. Podemos implementar todas essas funções no programa Rugo, dessa forma utilizaremos apenas um programa.

Na automação do rugosímetro precisaremos de um programa para controlar as movimentações. Essa função pode ser implementada no programa Rugo.

## 10- REFERÊNCIAS

- [1] Beckmann, P. and Spizzichino, A. **The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces**, Pergamon, New York, 1963.
  
- [2] Léger, D., Mathieu, E. and Perrin, J. C. **Optical Surface Roughness Determination Using Speckle Correlation Technique**, Applied Optics, Vol.14, n4, April 1975.
  
- [3] Sthel, Marcelo Silva, **Medida de Rugosidade por correlação Fotográfica Simultânea de Granulação Óptica**, Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, Julho de 1987.
  
- [4] Rebollo, Maria Aurora, **Estudio de Superficies Rugosas, Mediante el Analisis del Valor Medio de la Intensidad Dispersada y la Correlacion de Speckles**, Tesis de Doctorado - Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Exactas, Departamento de Física, La Plata, Argentina.
  
- [5] Paiva jr., Raul Dias, **Desenvolvimento de um Rugosímetro a Laser**, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo - Instituto de Física, Brasil, 2002
  
- [6] Léger, D. **Deux Methodes de Mesure de Rugosités par correlation de Speckles**. 1976. Tese de Doutorado - Université de Paris -SUD, Paris, França
  
- [7] WHITEHOUSE, David J. **Handbook of Surface Metrology**. Bristol, UK: Institute of Physics Publishing Ltd., 1994.

- [8] BENNETT, Jean M.;MATTSON, Lars. **Introduction to Surface Roughness and Scattering**. 2<sup>nd</sup> ed. Washington, D.C., USA: Optical Society of America, 1989.
- [9] SOUZA Filho, José Cândido. **Obtenção da Rugosidade Rms de Superfícies Recobertas com Ouro e Alumínio Utilizando a Técnica de Espalhamento de Luz Laser HeNe**. 1997. Dissertação de mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [10] ASAKURA, Toshimitsu. **Surface roughness measurement** in R.K.Erf, ed., *Speckle Metrology*, Academic, N.York 1978,p.11-49.
- [11] SILVA, Felix Claret da. **Aplicação do Speckle Dinâmico para o Estudo do Processo de Secagem de Pinturas**. 2000. Dissertação de mestrado - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [12] HECHT, Eugene. **Optics**. 3<sup>rd</sup> ed. Reading, USA: Addison-Wesley Longman, Inc., 1998.
- [14] MURAMATSU, Mikiya. **Técnicas Ópticas para Análise de Superfície**. 2001. Tese de Livre-Docência - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [15] GOODMAN, Joseph Wilfred. Statistical Properties of Laser Speckle Patterns. In: DAINTY, John Christopher (Ed.). **Laser Speckle and Related Phenomena**. 2<sup>nd</sup> ed. Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1984. Cap.2. (Topics in Applied Physics, vol 9).
- [16] VANIN, Vito Roberto; GOUFFON, Phillip; HELENE, Otaviano Augusto. **Tópicos Avançados em Tratamento Estatístico de Dados em Física**

**Experimental** - Notas de aula. Segunda edição. São Paulo: Laboratório do Acelerador Linear - Instituto de Física - Universidade de São Paulo, 1998.

- [17] BLANE, Kleiton; MURAMATSU, Mikiya; SILVA, Felix Claret da. **Verificação da Linearidade de Resposta da Câmera CCD**. In: Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, XXI ENFMC, junho de 1998, Caxambu-MG, Brasil. Anais de Óptica do ... editado por Lucila Cescato. Campinas: Instituto de Física "Gleb Wataghin". Gráfica da Universidade Estadual de Campinas, 1998. P.352-356.
- [18] Young, Matt. **Óptica e Lasers**. Traduzido por Yara Tavares Fornaris. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 1998.