

Universidade Federal Fluminense

HÉLIO CAMARGO SOARES

**Análise de Superfícies Metálicas em Movimento
Utilizando o Expoente de Hurst**

Volta Redonda

2012

HÉLIO CAMARGO SOARES

Análise de Superfícies Metálicas em Movimento Utilizando o Expoente de Hurst

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Área de Concentração: Física Computacional, Estudo de Materiais e Superfícies Via Métodos Opto-Digitais.

Orientador:

José Augusto Oliveira Huguenin

Coorientador:

Diomar Cesar Lobão

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Volta Redonda

2012

Análise de superfícies Metálicas em Movimento Utilizando o Expoente de Hurst

Hélio Camargo Soares

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Área de Concentração: Física Computacional- Estudo de Materiais e Superfícies Via Métodos Opto-Digitais.

Aprovada por:

Prof. Jose Augusto de O. Huguenin, D.Sc. /
MCCT-UFF(Presidente)

Prof. Diomar Cesar Lobao, Ph.D. / MCCT-UFF

Prof. Aquino Lauri Espindola, D.Sc. / MCCT-UFF

Prof. Wellington Gomes Dantas, D.Sc. / MCCT-UFF

Dr. Bernardo Coutinho dos Santos /CENPES

Dr. Carlos Eduardo Galhardo -INMETRO

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, pela vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Augusto de Oliveira Huguenin pela dedicação, paciência, inestimáveis conhecimentos transmitidos e sincera demonstração de apreço que foi além da relação professor-aluno;

Ao meu co-orientador, Prof. Diomar Cesar Lobão, Ph. D. pela distinção e cortesia no tratamento; pela paciência ; transmissão de experiência e conhecimentos não só na co-orientação como nas aulas;

Ao Prof. Dr. Ladário da Silva, pela distinção de sua amizade e pela importante ajuda desinteressada;

A meus Pais por tudo que representam na minha vida;

Aos colegas e amigos ao longo desta jornada, pelas ajudas e descontrações nos momentos bons e nos difíceis;

Finalmente, à minha esposa, Vera Lúcia, pela ajuda, apoio e incentivo em todos os momentos e a compreensão do meu afastamento quando da execução deste trabalho. Sem sua presença, tudo seria muito mais difícil.

Resumo

Vive-se hoje uma situação tecnológica que leva a uma exigência cada vez maior na precisão dos equipamentos e produtos utilizados. Uma das áreas mais afetadas por essa necessidade é justamente a metrologia pois dela depende a verificação da conformidade dos produtos. Neste trabalho apresenta-se um estudo de caracterização de superfícies metálicas em movimento utilizando a técnica do expoente de Hurst de padrões de speckle gerados por superfícies rugosas. A técnica utiliza luz laser para iluminar a superfície, gerando um padrão de speckle registrado em uma imagem digital. O padrão de speckle está relacionado com o grau de acabamento da superfície em análise. Esta imagem é tratada computacionalmente, utilizando-se um algoritmo baseado na técnica desenvolvida pelo engenheiro inglês Edwin Hurst, que gera um valor (expoente de Hurst) o qual varia de acordo com o acabamento da superfície.

Revisita-se o trabalho original onde foi apresentada a técnica do expoente de Hurst para padrão de speckle. Variando a intensidade da iluminação das amostras, mostra-se que o expoente de Hurst cresce com a rugosidade conforme o esperado, porém, observa-se que um polinômio de terceiro grau ajusta os pontos experimentais.

Apresenta-se o estudo inédito do cálculo do expoente de Hurst, para padrões de speckle gerado por superfícies rugosas em movimento em diferentes velocidades. Observa-se que o expoente de Hurst dos padrões de speckle gerados pelas superfícies em movimento é praticamente insensível à velocidade.

Por fim, estudou-se a análise da superfície com defeitos. Mostrou-se que esta técnica pode identificar defeitos em superfícies em movimento.

Abstract

We live today in a situation that technology leads to a growing demand on the accuracy of equipment and products used. One of the areas most affected by this need for precision metrology is precisely because it depends on the verification of conformity of products. In this paper we present a study of characterization of moving metallic surfaces using the technique of Hurst exponent of speckle patterns generated by rough surfaces. The technique uses laser light to illuminate the surface, creating a standard speckle, recorded in a digital image. The speckle pattern is related to the degree of the surface finishing in analysis. This image is computationally treated, using an algorithm based on the technique developed by British engineer Edwin Hurst, which generates a value (Hurst exponent) which varies with surface finish.

Revisit up where the original work was presented to the Hurst exponent technique for speckle pattern. Varying the intensity of illumination of the samples shows that the Hurst exponent increases with surface roughness as expected, however, it is noted that a third degree polynomial fit of the experimental points.

It presents unprecedented study of calculating the Hurst exponent for speckle patterns generated by the rough surfaces moving at different velocities. It is noted that the Hurst exponent of speckle patterns generated by the moving surfaces is practically insensitive to velocity.

Finally, we study the analysis of surface defects. It was shown that this technique can identify in moving surfaces.

Palavras-chave

1. Expoente de Hurst
2. Rugosidade
3. Speckle
3. Superfícies Metálicas
5. Espalhamento de luz
6. Processamento de imagens

Tabela de Símbolos

S	: Desvio padrão
R	: Valor determinado por Hurst, a ser acumulado para manter a descarga média do rio N
R/S	: Rescaled Shape
N	: Quantidade de dados obtidos em uma série para estudos
H	: Expoente de Hurst
\bar{H}	: Expoente de Hurst médio
B	: Áreas de Padrão Speckle Iluminadas
P	: Áreas de Padrão Speckle não Iluminadas
ABNT	: Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ra	: Rugosidade média
Rq	: Raiz quadrada média
Rsk	: Assimetria da rugosidade
Rku	: Kurtosis, ou fator de achatamento da rugosidade
GR	: Função de correlação
P(I)	: Densidade de probabilidade
$\langle I \rangle$: Valor médio da intensidade
δ	: Contraste speckle
CCD	: Charge Coupled Device (sensor para captação de imagens)
ISO	: International Standard Organization
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão para Normatização.)

Sumário

1	Introdução	10
2	Expoente de Hurst	13
2.1	Séries Temporais	13
2.2	Definições e Propriedades Gerais do Expoente de Hurst	14
2.3	Aplicações do Expoente de Hurst	16
3	Rugosidade e Padrões de Speckle	18
3.1	Rugosidade	18
3.1.1	Estatísticas de Primeira Ordem da Rugosidade de Uma Superfície .	19
3.1.2	Técnicas de Medidas de Rugosidade	20
3.2	Padrão de Speckle Gerado por Luz Laser	21
3.2.1	Laser	21
3.2.2	Padrão de Speckle Gerado por Luz Laser	21
3.3	Estatísticas dos Padrões de Speckle Produzidos Por Superfície Rugosa . . .	24
3.3.1	Estatísticas de primeira ordem	24
3.3.2	Estatísticas de Segunda Ordem	25
3.3.3	Padrões Speckle Parcialmente Desenvolvidos	25
3.4	Medidas de Rugosidade Usando Padrão de Speckle	26
4	Estudo de Rugosidade de Superfícies Metálicas Através do Expoente de Hurst.	27
4.1	Cálculo do Expoente de Hurst de Um Padrão de Speckle Digital.	27

4.2	Aplicação do Expoente H de Padrões de Speckle no Estudo de Rugosidade de Superfícies Metálicas	29
4.2.1	Obtenção Dos Padrões de Speckle	29
4.2.2	Estudo da Rugosidade Com o Expoente de Hurst da Imagem Digital	32
5	Análise de Superfícies Metálicas em Movimento com Método de Hurst para Imagens Digitais	35
5.1	Preparação das Amostras	35
5.2	Experimento	37
5.3	Análises das Amostras em Regiões sem Defeitos	40
5.3.1	Análise Estática da Amostra de Alumínio	40
5.3.2	Análise Estática da Amostra de Aço	40
5.3.3	Análises Dinâmicas das Amostras em Regiões Sem Defeitos	43
5.4	Análise de Defeitos	53
5.4.1	Análise Estática das Regiões com Defeito	54
5.4.2	Análise Dinâmica das Regiões com Defeito	54
6	Conclusões e Perspectivas	63
	Referências	65
7	Apêndice	67

Capítulo 1

Introdução

Em 1906, Harold Edwin Hurst engenheiro civil trabalhando para o governo do Egito, pesquisando como prever a vazão do rio Nilo[1], desenvolveu um teste para séries temporais de longa duração baseado em correlações entre as flutuações do rio e descreveu-as em termos de uma lei de potência [1,2]. Atualmente o expoente desta lei de potência é conhecido como *expoente de Hurst*. O processo, por ele adotado é denominado '*rescaled range*' e vem a ser a soma parcial dos desvios de uma série temporal dividida pelo desvio padrão da série. Tal procedimento tem a finalidade de *uniformizar* as séries originais. Posteriormente, vários pesquisadores observaram que o expoente de Hurst pode ser aplicado em diversos campos do conhecimento tais como ecologia, engenharia, física, medicina e ,também, na análise de séries que não tem relação com tempo, como por exemplo, na análise de imagens digitais.

A rugosidade de uma superfície (imperfeições causadas por processos de fabricação e/ou acabamento) tem uma grande importância, principalmente no emprego de materiais em situação onde é requerida uma alta precisão, de forma que a determinação da rugosidade necessita ser acurada. Existem dois métodos básicos para determinação da rugosidade: os métodos de contato e os métodos indiretos. O método por contato faz uso de equipamentos tais como um rugosímetro de contato o qual tem uma ponta de prova que percorre a superfície e os rugosímetros a laser, que faz o levantamento da superfície utilizando um feixe laser incidindo sobre a superfície. Ambos fazem o levantamento do perfil da superfície registrando os picos e vales que determinam a rugosidade. Os rugosímetros que utilizam ponta de prova, além de ter menos precisão do que os equipamentos que utilizam o laser, causam danos à superfície sendo examinada. Os rugosímetros que utilizam os métodos indiretos, fazem o levantamento da rugosidade através a interpretação das imagens geradas pela superfície, utilizando técnicas como a do contraste, B/D e o

expoente de Hurst. [3,4,5,6,7].

Em alguns experimentos de óptica, dependendo da situação e dos meios empregados, pesquisadores notaram um fenômeno, inicialmente considerado incômodo, que era o espalhamento aleatório de luz coerente ¹ incidindo em determinadas superfícies, formando um padrão denominado **padrão de speckle** [6]. Posteriormente, notou-se que este padrão tinha alguma relação com o tipo de superfície sobre a qual incidiam [6]. A partir daí, outras pesquisas determinaram que efetivamente existia esta relação e iniciaram novos estudos que permitiram a determinação de características da superfície, tal como sua rugosidade.

O estudo da rugosidade utilizando-se de métodos ópticos baseados na análise dos padrões de speckle, é um campo ativo no meio acadêmico. Há técnicas que associam o contraste do padrão speckle com a rugosidade [6], que tem mostrado resultados muito acurados. O estudo de correlação também foi empregado. A análise de estatísticas de áreas do padrão speckle iluminadas (B) e não iluminadas (D), mostrou que a razão $\frac{B}{D}$ depende da rugosidade das superfícies que geram o padrão de speckle [7].

O trabalho de Kayahan e outros [8] mostra que para um padrão de speckle no plano imagem e na direção especular a razão $\frac{B}{D}$ decai exponencialmente com a rugosidade. Em trabalho recente foi mostrado que a razão $\frac{B}{D}$ cresce exponencialmente com a rugosidade, medindo-se a luz na direção normal às superfícies geradoras dos padrões de speckle, que foram observados no plano de difração [7]. A medida de rugosidade em superfícies em movimento foi estudada em [9], usando-se a técnica $\frac{B}{D}$.

Existem dois ingredientes básicos na fabricação de materiais metálicos: o processo de manufatura e as ferramentas utilizadas. Durante algum tempo a determinação da rugosidade era considerada irrelevante, entretanto, percebeu-se que medir a rugosidade seria uma forma de controlar o processo de fabricação. Isso inclui avaliar o desgaste das ferramentas, ou seja, se as superfícies dos produtos permanecem inalteradas significa que o processo está sob controle. A capacidade de ser utilizada como um procedimento para controle de processos de manufatura cresceu devido ao o advento das análises por processos aleatórios já que a rugosidade deve ser tratada estatisticamente por ser aleatória [6].

Recentemente foi apresentada a aplicação do expoente de Hurst para imagens digitais de padrões de speckle provenientes do espalhamento da luz em superfícies rugosas [7]. Os autores adaptaram o cálculo do expoente de Hurst para um padrão de speckle digital gerado por superfícies metálicas com diferentes rugosidades. Foi observado que o expoente de Hurst associado ao padrão de speckle crescia com a aumento da rugosidade.

¹luz formada por ondas de mesma frequência e direção que mantém uma relação de fase constante entre si.

Neste estudo as amostras permaneciam estáticas durante as medidas.

Nesta dissertação, são aprofundados os estudos da utilização da técnica de avaliação de superfícies por métodos óticos, com um trabalho inédito do cálculo do expoente de Hurst de padrões de speckle gerados por superfícies metálicas em movimento. Explora-se dois tipos de materiais amplamente utilizados na indústria: o alumínio comercial e o Aço 1020. Como será visto, os resultados deste estudo mostram que método é aplicável para diferentes velocidades da amostra e sensível a defeitos destes materiais. Assim, mostra-se que esta técnica tem potencial para aplicações industriais no controle de qualidade de chapas metálicas em linha de produção.

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira: no capítulo 2, apresenta-se o expoente de Hurst; no capítulo 3 é definido, usando uma revisão bibliográfica, o speckle e medidas de rugosidade; no capítulo 4 é apresentado o estudo da rugosidade associada ao expoente de Hurst com as amostras estáticas; no capítulo 5 é apresentado um estudo da avaliação de superfícies em deslocamento e, finalmente, no capítulo 6, apresenta-se as conclusões e considerações finais para futuros trabalhos.

Capítulo 2

Expoente de Hurst

Neste capítulo é apresentado o expoente de Hurst. Inicialmente será vista uma breve descrição de séries temporais e em seguida definições e propriedades gerais do expoente de Hurst.

2.1 Séries Temporais

Uma série temporal é uma sequência de pontos medida em espaços de tempo sucessivos[11]. Por exemplo, medidas de vendas a varejo de determinado produto em um ano compreende uma série temporal, porque as vendas são bem definidas e são consistentemente medidas em intervalos de tempo igualmente espaçados. Estas séries tem uma ordenação temporal natural e isto faz com que a análise de uma série temporal seja distinta da análise de séries que não tenham este ordenamento temporal. A análise de uma série temporal deve levar em conta o fato de que os pontos de dados sobre o tempo pode ter uma estrutura interna que deve ser levada em consideração, tais como uma autocorrelação, tendências ou uma variação sazonal. A análise de uma série temporal tem dois objetivos fundamentais: obter um entendimento da estrutura que produziu os dados observados e ajustar um modelo para prever, monitorar ou mesmo ter um controle de eventos futuros.

2.2 Definições e Propriedades Gerais do Expoente de Hurst

Avaliando registros antigos sobre o Rio Nilo, em seus trabalhos de projeto para construções de barragens, Hurst concluiu que o fluxo do rio Nilo para dentro dos reservatórios não era aleatório, ainda que os métodos estatísticos não demonstrassem nenhuma correlação entre os dados observados [1]. A partir daí Hurst desenvolveu um estudo estatístico que proporcionava o exame de dados que não apresentavam uma distribuição gaussiana.

Nas suas investigações, Hurst tomou as séries de descarga do rio Nilo e calculou a média de armazenamento necessário para proporcionar uma descarga anual igual à média do período. O método utilizado foi o de tirar a média dos valores observados, computar a diferença entre os valores e a média, fazer a soma acumulada dos resultados e, por fim, fazer a diferença entre o maior e o menor valor desta soma. A este valor, Hurst chamou de R e é o que deveria ser acumulado para manter a descarga média para o período[1]. No entanto, este é um valor teórico que não leva em consideração fatores como vazamentos e reduções no projeto. Como os registros do rio eram escassos, foram acrescentados fenômenos naturais como chuvas, pressão atmosférica e temperaturas. Hurst então notou que a relação entre este número R e o desvio padrão da série $S - \frac{R}{S}$ aumentava com o tamanho das séries. Em determinado ponto, Hurst concluiu que deveria determinar uma relação matemática entre $\frac{R}{S}$ e N (quantidade de dados obtidos na série), cujos membros seguissem uma distribuição gaussiana e fossem independente uns dos outros. O resultado disto, foi que para grandes valores de N :

$$\frac{R}{S} = \sqrt{\frac{1}{2}N\pi} = 1.25\sqrt{N}. \quad (2.1)$$

Como esta equação não produziu os resultados esperados, Hurst fez outras análises e concluiu que o valor de $\frac{R}{S}$ poderia ser expresso na forma

$$\frac{R}{S} = \left(\frac{N}{2}\right)^K, \quad (2.2)$$

onde K é variável, com valores normalmente distribuídos em torno de 0,73, com um desvio padrão de 0,09 e parecia aleatoriamente distribuído, pois não tinha nenhuma correlação entre os valores de K para períodos sucessivos do mesmo fenômeno [1].

Chama-se a atenção para o fato que a letra K atualmente é substituída pela letra H em homenagem a Hurst.

O desvio padrão é calculado da seguinte forma:

$$S = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - 1/n(\sum x_i)^2}{n-1}} \quad (2.3)$$

O ponto chave da análise de Hurst é que esta escala ($\frac{R}{S}$) tem um incremento de tempo regido por uma lei de potência de valor igual a H , ou seja, através do rescalonamento Hurst pôde comparar períodos de tempo separados por vários anos. Este rescalonamento é um ajuste na série, baseado no seu desvio padrão.

Os valores de H estão entre 0 e 1, sendo que se $H = 0.5$ o sistema tem um comportamento aleatório. Valores diferentes de 0.5, significam que as observações não são independentes; cada uma transporta uma memória dos eventos que as precede. Então, três valores definem a tendência da série [2]:

- $H = 0.5$

Série independente. A série é aleatória [2].

- $0 \leq H < 0.5$

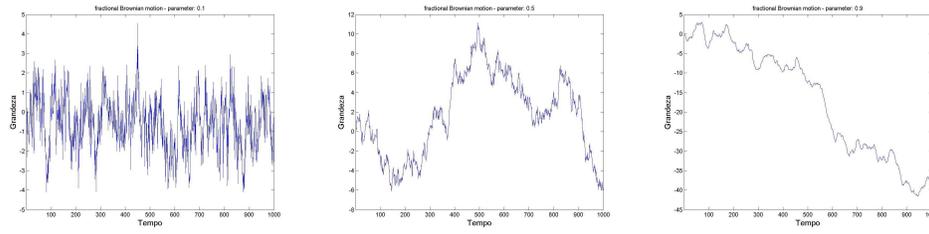
Série antipersistente. O sistema tem uma tendência de reversão, ou seja, se está aumentando provavelmente irá diminuir no próximo período; se está diminuindo, é mais provável que estará aumentando no período seguinte [2].

- $0.5 < H \leq 1$

Série persistente. O sistema tem uma tendência de manter a situação anterior, ou seja, se o sistema aumenta em um período é mais provável que se manterá aumentando no período seguinte [2].

Para ilustrar esta discussão, apresenta-se na Figura 2.1, os gráficos de três séries geradas com diferentes valores de H . Elas foram geradas a partir de um script em MatLab [®]. A figura a) apresenta um exemplo de série anti-persistente ($H = 0.1$). Nota-se que os trechos de ascendência são seguidos por trechos de descendência. Na figura b) observa-se um exemplo de série aleatória ($H = 0.5$). Por fim, na figura c) é apresentado um exemplo de série persistente ($H = 0.9$). Como pode ser visto a tendência inicial é mantida ao longo do tempo.

Em seguida, são abordadas algumas variadas aplicações desta versátil ferramenta.



(a) Fig. a) $H = 0.1$. Série antipersistente
 (b) Fig. b) $H = 0.5$. Série randômica
 (c) Fig. c) $H = 0.9$. Série persistente

Figura 2.1: *Imagens de padrões de speckle formados por superfícies com diferentes acabamentos*

2.3 Aplicações do Expoente de Hurst

O expoente de Hurst tem encontrado várias aplicações nas mais diversas áreas científicas. Iniciando-se com um exemplo para o estudo de processos hidrometeorológicos. Na referência [12] o autor estuda as variações climáticas e o expoente de Hurst tomando várias séries obtidas em lugares distintos da Europa. Em todas as observações, são notadas flutuações nos dados ao longo do tempo sendo que estas flutuações são quantificadas através o expoente de Hurst. Koutsoyiannis [12] conclui que uma representação estocástica das séries hidrometeorológicas que respeitam o expoente de Hurst são consistentes com as hipóteses de variações climáticas. Na área ecológica, Wang e outros [13] mostram as características não lineares da dinâmica populacional de várias famílias de roedores, através do expoente de Hurst. Por sua vez em [14], Nickolaenko aplica a análise $\frac{R}{S}$ fim determinar o coeficiente de Hurst para sinais naturais de rádio em frequências extremamente baixas. Neste estudo o expoente de Hurst é utilizado para classificação de sinais aleatórios e caóticos. Já em [15] Martini e outros fazem uso da técnica $\frac{R}{S}$, para estudar as alterações no expoente de Hurst nos intervalos dos batimentos cardíacos durante atividades físicas. Ainda na área médica, o artigo de De Petrillo e outros [16] mostra que o método desenvolvido por Hurst pode ser utilizado para obter estimativas do expoente H de diversos conjuntos de eletrocardiogramas. Na referência [17], Serrano apresenta a possibilidade do uso do expoente de Hurst para determinação de patologias precoces da mama, através avaliação de imagens geradas por termografia. Na área econômica, pode-se apontar o expoente de Hurst sendo usado para classificar séries de dados financeiros representando diferentes períodos de tempo, como o artigo de Bo Qian e outros [18].

Em relação às análises de séries não temporais, o método de Hurst também é empregado, desde que se tenha dados organizados de alguma forma. Por exemplo, na análise de

imagens digitais, tendo sido esta imagem devidamente tratada como uma matriz, pode-se considerar as linhas ou colunas como uma série podendo assim serem analisadas através a metodologia proposta por Hurst, gerando daí um coeficiente demonstrativo da tendência da série. Então, mesmo quando se tem uma série proveniente da observação de qualquer fenômeno que não em função do tempo, o expoente de Hurst pode ser relacionado com o fenômeno observado. Desta forma, pode-se relacionar algumas propriedades de uma superfície com o expoente de Hurst, criando várias possibilidades para o estudo destas superfícies. Como exemplo, na referência [7] os autores apresentam a análise de superfícies metálicas colocadas estaticamente, análise esta baseada no expoente de Hurst, com resultados positivos. A análise feita neste trabalho é a base para nossa pesquisa de superfícies metálicas em movimento.

Capítulo 3

Rugosidade e Padrões de Speckle

Este capítulo inicia-se com uma definição de rugosidade e observações quanto às suas medidas estatísticas. Em seguida, são apresentadas algumas técnicas de medidas da rugosidade e medidas tomando como referências as normas da ABNT [19]. Na seção seguinte define-se o speckle laser e suas medidas estatísticas para, finalmente, apresentar as medidas de rugosidade através do speckle laser.

3.1 Rugosidade

Rugosidades são imperfeições nas superfícies metálicas, devido ao tipo de acabamento, da ferramenta ou do processo de fabricação empregado. Nos dias atuais, em que a precisão tem importância fundamental, é importante que ela seja rigidamente controlada. Por exemplo, pode-se apontar as seguintes áreas onde a rugosidade tem especial importância: (a) na dinâmica dos fluidos: o escoamento é influenciado pela rugosidade do tubo onde corre; (b) no controle de qualidade na fabricação de componentes que tenham necessidade de precisão acurada. O argumento é que se os parâmetros de rugosidade permanecem constantes, então o processo e as ferramentas utilizadas estão sob controle [5]; (c) no controle de qualidade no torneamento de peças, a avaliação da rugosidade da superfície é usada para avaliar o excesso de vibração da ferramenta que causa tanto um acabamento ruim como redução na vida útil do equipamento [20]

Da mesma forma que a dureza, a rugosidade depende da escala de medida e tendo implicações estatísticas também devem ser considerados fatores como o tamanho da amostra e o intervalo de amostragem [5].

3.1.1 Estatísticas de Primeira Ordem da Rugosidade de Uma Superfície

A rugosidade pode ser vista como as alterações dos "picos" e "vales" de uma superfície [5]. Sendo uma característica aleatória e isotrópica, fica justificado o emprego da estatística para a sua caracterização. Obviamente, o primeiro parâmetro usado para a sua medida é o valor médio da variação das alturas, conhecido como a rugosidade média [6]. Este parâmetro, R_a , muito utilizado para superfícies usinadas é dado por

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

onde l é o comprimento de avaliação e $Z(x)$ é a altura do perfil em determinada posição, relativa à linha média [19].

Já que o conceito de rugosidade tem implicações estatísticas, pode-se calcular o valor da rugosidade média quadrática, R_q , definida como [19]:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx}. \quad (3.2)$$

Uma outra forma de observar a rugosidade é através da assimetria, R_{sk} , que vem a ser uma tendência das alturas da superfície na direção positiva ou negativa, comparada com uma distribuição gaussiana. Uma superfície suave tem uma alta assimetria positiva, com ocasionais, mas largas colinas e uma superfície com buracos tem uma assimetria negativa [6]. Matematicamente, a assimetria é definida como o quociente do valor médio dos valores $Z(x)$ e R_a ao cubo, no comprimento de avaliação [19].

$$R_{sk} = \frac{1}{R_a^3} \left[\frac{1}{l} \int_0^l Z^3(x) dx \right] \quad (3.3)$$

sendo R_a o valor da raiz quadrada média [19]

O fator de achatamento, ou kurtosis, que tem a sigla R_{ku} , é definido de maneira similar à assimetria, mas em termos da quarta potência dos desvios das alturas da superfície, no comprimento da amostragem [19] e dado como:

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \left[\frac{1}{l} \int_0^l Z^4(x) dx \right], \quad (3.4)$$

onde R_q é o valor da rugosidade média quadrática, l o comprimento da amostragem e $Z(x)$ a altura do perfil na posição [19].

Observa-se que o comprimento da amostragem pode ser o comprimento para o perfil de rugosidade (l_r), de ondulação (l_w) ou para o perfil primário (l_p).

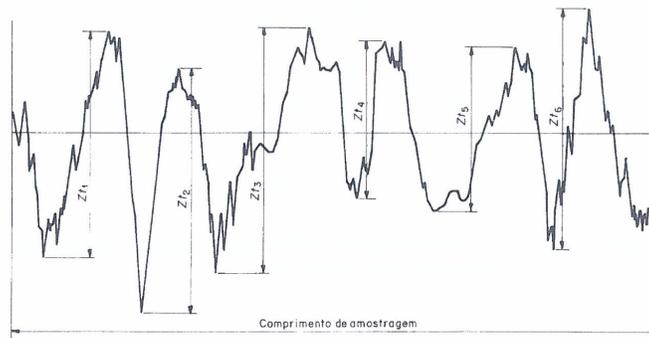


Figura 3.1: *Perfil típico de uma superfície rugosa*

A figura 3.1.1 ilustra um perfil típico de uma superfície rugosa.

3.1.2 Técnicas de Medidas de Rugosidade

As medidas de rugosidade podem ser feitas por contato (forma direta) ou de forma indireta. As medidas diretas podem ser feitas com perfilômetros mecânicos, que utilizam uma ponta de prova de diamante acoplada a um instrumento de medida micrométrico. Uma outra forma de executar a medição é acoplar à ponta de prova um transdutor que converte o deslocamento em sinal elétrico. Este sinal é processado por um instrumento eletrônico para calcular o deslocamento vertical da ponta de prova e, conseqüentemente, a rugosidade da superfície. Este processo tem um fator complicador a mais que é o tipo de transdutor utilizado, o qual pode afetar em muito o desempenho do instrumento [5]. O limite de precisão do equipamento é o diâmetro da ponta de prova, tendo em vista que rugosidades menores do que a ponta de prova não serão registradas. Além disso, a aplicação de uma carga na ponta de prova maior do que a recomendada pode causar danos à superfície. O tamanho típico de uma ponta de prova de diamante é de $5\mu m$.

As medidas por contato, também podem ser feitas por rugosímetros a laser, que substituem a ponta de prova mecânica por um feixe laser. As vantagens são a maior precisão na medida, o alcance de menores rugosidades (o feixe laser tem um diâmetro menor do que a ponta de prova) e não causam danos à superfície. Já as medidas indiretas são executadas por processos que medem as variações da superfície através a observação da variação da intensidade dos pontos luminosos da imagem gerada pela superfície quando iluminada por uma luz coerente. Entre estas técnicas está o emprego do coeficiente de Hurst, para medir o padrão de speckle gerado pela superfície.

3.2 Padrão de Speckle Gerado por Luz Laser

3.2.1 Laser

A palavra "laser" é uma acrônimo para "*Light Amplification by Stimulated Emission Radiation*". Nos dias atuais, o termo luz é utilizado para radiação eletromagnética de uma faixa de frequência, que vai do ultra violeta, passando pelo visível, até o infra-vermelho. A luz emitida pelo laser é notável pelo seu alto grau de coerência espacial e temporal. Esta particularidade permite que sejam observados fenômenos como interferência e difração com alta visibilidade, o que permite grande acurácia para técnicas que utilizam luz laser e oferecem resolução para tamanhos da ordem do comprimento de onda. O laser, de acordo com a sua fonte de geração, pode ser observado na faixa da luz visível, 400 nm(violeta) até 700 nm(vermelho). Restrições impostas pela ressonância da cavidade, produzem um feixe luminoso cuja propagação é unidirecional, com a intensidade concentrada em pequenas áreas, seguindo uma distribuição gaussiana. Este feixe pode ser focalizado em áreas muito pequenas, alcançando uma alta potência de radiação eletromagnética. Trata-se de ferramenta de amplas aplicações, tais como na engenharia para medições de distância; na área militar como guia para mísseis, na indústria como ferramenta de corte de precisão, medicina para procedimentos cirúrgicos minimamente invasivos e na física para execução de medidas de precisão (metrologia óptica).

3.2.2 Padrão de Speckle Gerado por Luz Laser

Quando iluminadas com luz laser, as superfícies rugosas geram uma imagem resultante com vários pontos de intensidades luminosas diferentes e dispostos de maneira aleatória. No início, os pesquisadores consideravam isto um problema, pois era visto como um ruído. Posteriormente, observou-se que existia uma relação entre a luz espalhada e a rugosidade das superfícies [6]. Aos pontos gerados pelo espalhamento deu-se o nome de *speckle*. As diferentes intensidades observadas devem-se as diferenças de fase dos caminhos óticos percorridos pela luz espalhada. Desta forma acontecem interferências construtivas (quando a diferença de fase é a mesma ou múltipla de 2π) e destrutivas (quando a diferença de fase é π ou múltiplo de $(2n + 1)\pi$). Assim é formado um padrão denominado *padrão de speckle*, gerado pela área iluminada. Este padrão é formado por pontos com intensidades que variam de zero, relativo à interferência destrutiva, até um valor máximo que representa a interferência construtiva, portanto, a variação das intensidades é contínua e não discreta e não obedece a um padrão específico tendo em vista a característica aleatória

da rugosidade da superfície.

Observa-se, na figura 3.2 a luz espalhada/refletida por uma superfície, a partir da incidência do feixe laser.

O feixe incide fazendo um ângulo θ com a normal à superfície. Observa-se que a

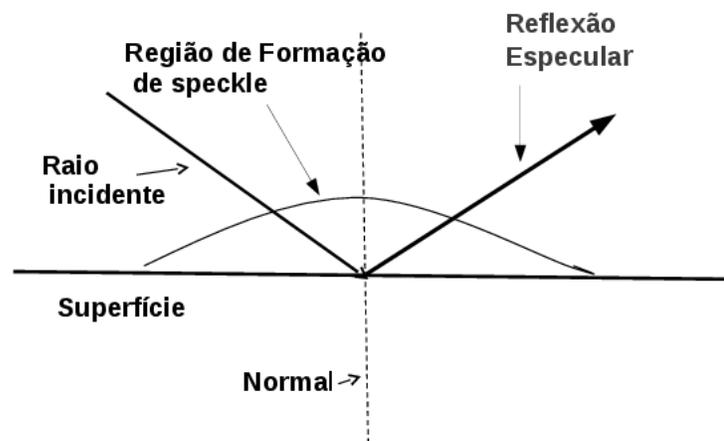


Figura 3.2: *Raio incidente, reflexão especular e região de formação de speckle*

formação do padrão de speckle em toda a região compreendida no semicírculo à frente da amostra, depende da rugosidade da superfície. Há duas direções que são geralmente estudadas: a direção especular e a direção normal.

A reflexão especular é aquela típica dos espelhos, cujas superfícies são ultra polidas e nenhum espalhamento é observado em outras direções. O espalhamento difuso provém das imperfeições da superfície, cujas dimensões são maiores do que o comprimento de onda da luz incidente. Este espalhamento é que dá origem ao padrão de speckle.

Se a luz espalhada propaga-se diretamente ao plano de observação, este plano é dito um plano de difração. Se entre a superfície de formação da luz espalhada e o plano de

observação for colocada uma lente, neste plano será formada uma imagem, portanto o plano de observação passa a ser denominado plano imagem. A figura 3.3 ilustra o plano de difração e o plano imagem.

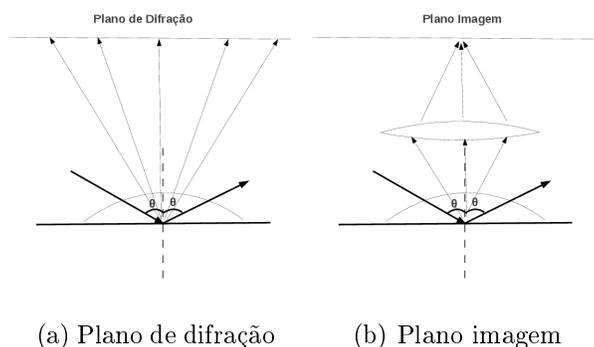


Figura 3.3: *Plano de Observação*

A partir do entendimento que o padrão speckle é resultante da rugosidade da superfície, conclui-se que a medida da intensidade dos pontos gerados na imagem do padrão speckle é proporcional à rugosidade.

Na Figura 3.4 é apresentado um padrão de speckle típico obtido pela iluminação de uma superfície metálica rugosa com luz laser. Este padrão de speckle foi registrado no plano de difração e direção normal.

Observa-se que a distribuição dos pontos no plano de difração é aleatória.

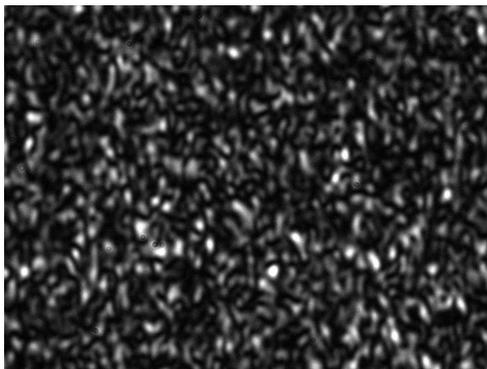


Figura 3.4: *Padrão speckle gerado por uma superfície metálica rugosa.*

3.3 Estatísticas dos Padrões de Speckle Produzidos Por Superfície Rugosa

A estatística tem um importante papel em se tratando de análise de um padrão speckle gerado pela rugosidade de uma superfície, tendo em vista a natureza aleatória do padrão speckle gerado.

3.3.1 Estatísticas de primeira ordem

As estatísticas de primeira ordem descrevem as propriedades ponto por ponto e não se preocupam com o relacionamento das intensidades entre os pontos (correlação de intensidades) [6]. Para a descrição das propriedades ponto a ponto do padrão, deve-se calcular a densidade de probabilidade das intensidades, I , que é encontrada seguindo uma lei exponencial negativa [6]:

$$P(I) = \frac{1}{\bar{I}} e^{-\frac{I}{\bar{I}}} \quad (3.5)$$

onde a probabilidade é dada por :

$$p = \int_0^{\infty} P(I) dI = 1 \quad (3.6)$$

A figura 3.5 apresenta um gráfico do produto entre a intensidade média e densidade de probabilidade, $\bar{I}P(I)$, versus a relação $\frac{I}{\bar{I}}$.

Nota-se que as maiores probabilidades da intensidade estão em valores cuja relação $\frac{I}{\bar{I}}$ é próxima de zero. Por sua vez, as probabilidades muito baixas estão relacionadas à valores muito altos de $\frac{I}{\bar{I}}$.

O desvio padrão é outra importante propriedade de primeira-ordem pois apresenta o espalhamento dos valores de intensidade em torno da média, ou seja, representa o contraste (diferença de tons ou de luz na imagem). De acordo com [6], conclui-se que o padrão speckle ótimo tem uma relação $S = \bar{I}$, ou seja, o desvio padrão é igual a intensidade média da imagem. O desvio padrão é calculado seguindo a fórmula

$$S = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - 1/n(\sum x_i)^2}{n - 1}}, \quad (3.7)$$

onde x é a intensidade do speckle. Na prática o padrão de speckle tem um desvio padrão menor do que a intensidade média e é observada como uma redução no contraste padrão [6].

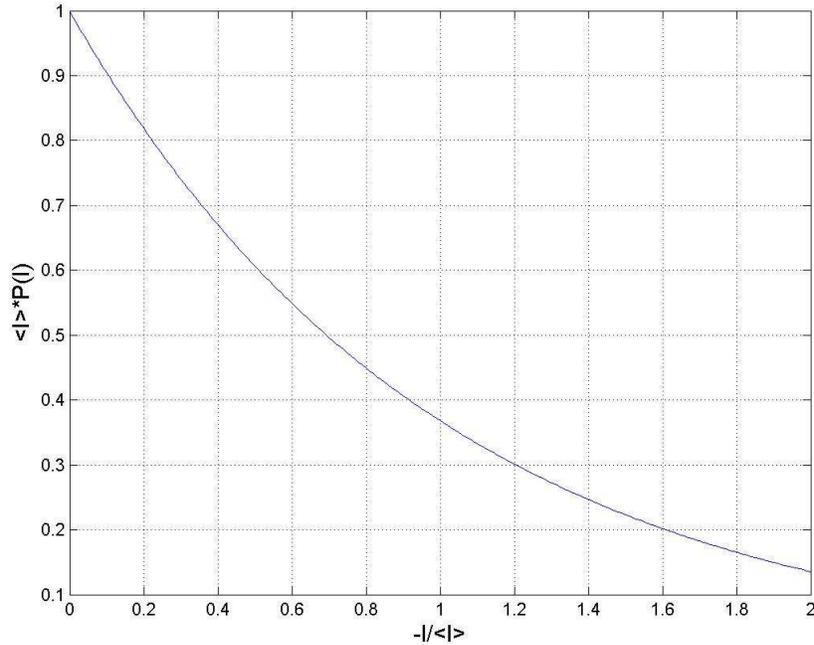


Figura 3.5: *Gráfico da probabilidade de ocorrências de intensidade*

3.3.2 Estatísticas de Segunda Ordem

As estatísticas de segunda ordem de um padrão speckle descrevem quão rapidamente a intensidade varia de ponto a ponto no padrão. Isto dá uma indicação do tamanho dos speckles e a distribuição destes tamanhos no padrão [6].

3.3.3 Padrões Speckle Parcialmente Desenvolvidos

As estatísticas de primeira ordem assumem que a luz incidente é totalmente coerente (luz cuja largura espectral tende a ser a menor possível em relação ao comprimento de onda) e que a superfície é rugosa comparada com o comprimento de onda da luz. A relação $S = \bar{I}$ na prática não é alcançada tendo em vista que normalmente o desvio padrão é menor do que a intensidade média. Desta forma é usual definir o contraste speckle como a razão do desvio padrão e a intensidade média [6]:

$$\delta = \frac{S}{\bar{I}}. \quad (3.8)$$

Para um padrão totalmente desenvolvido o contraste é definido como sendo a unidade:

$$\delta = \frac{S}{\bar{I}} = 1. \quad (3.9)$$

Padrões speckle parcialmente desenvolvidos (algumas vezes chamados de padrões speckle reduzidos) exibem alto contraste, com $\delta < 1$ [6]. Várias causas podem interferir no contraste do speckle, sendo que a mais óbvia é uma fonte de luz com baixa coerência. Acrescentando, também, um fundo uniforme de luz, que pode ser coerente ou incoerente com o padrão speckle, altera-se o seu contraste. O contraste tem grande importância no padrão de speckle, pois nas operações de metrologia óptica um baixo contraste entre o speckle e o plano de fundo geram medidas imperfeitas. Daí a importância do controle da iluminação do objeto e a manutenção das condições de iluminação do ambiente durante as medidas, conforme será visto no capítulo 5 quando da descrição do experimento apresentado nesta dissertação.

3.4 Medidas de Rugosidade Usando Padrão de Speckle

Como já mencionado, os padrões de speckle são aleatórios e só podem ser descritos em termos estatísticos. Portanto, é lógico que sejam utilizados para medir rugosidades, que também são fenômenos aleatórios. As estatísticas de primeira e segunda ordem tratam tão somente das propriedades do padrão ponto a ponto e a rapidez da variação da intensidade de um ponto para outro. O contraste do speckle aparece gradualmente com o aumento da rugosidade, com tendência de alcançar a unidade de acordo com a aproximação da rugosidade para o comprimento de onda da luz. Assim, é possível medir a rugosidade a partir do padrão de speckle gerado pela superfície.

Ao ser medida a rugosidade da superfície através do padrão speckle, na realidade está se medindo as propriedades das ondas refletidas pela superfície, de forma que o grande problema na obtenção dos resultados é o relacionamento das flutuações das ondas refletidas e as ondulações da superfície [21].

Já que o contraste tem importância fundamental na medida da intensidade do speckle, as condições de iluminação devem ser rigidamente controladas para que não haja variações significativas que possam mascarar os resultados, tendo em vista que o padrão seria alterado. Outro problema que deve ser observado é o ângulo de incidência do feixe de luz sobre a superfície, pois alguma luz será refletida com intensidade máxima e esta reflexão estará fornecendo um fundo coerente para o padrão speckle, reduzindo o contraste [6]. Por fim, tem-se a potência da luz sobre a superfície que causa uma saturação na imagem, aumentando o contraste e alterando significativamente as medidas de intensidade no padrão provocando resultados errôneos.

Capítulo 4

Estudo de Rugosidade de Superfícies Metálicas Através do Expoente de Hurst.

Neste capítulo é apresentado o estudo da rugosidade de superfícies metálicas através do expoente de Hurst. Na realidade, o expoente de Hurst, H , é determinado através a análise de uma imagem digital gerada pelo padrão speckle da superfície. A imagem é analisada computacionalmente, através de um script no MatLab®e, a partir daí, calculado em função da rugosidade média.

4.1 Cálculo do Expoente de Hurst de Um Padrão de Speckle Digital.

As imagens digitais são representadas por uma matriz de tamanho $m \times n$, onde m representa o número de pixels na horizontal e n o número de pixels na vertical, lembrando que um pixel é a menor partição da imagem. Quanto menor o tamanho deste pixel, maior a resolução da imagem. Cada pixel é sensibilizado pela luz e a imagem digital é então formada pelo conjunto de pixels iluminados. A posição (i, j) da matriz armazena o valor da intensidade $\zeta_{i,j}$. As imagens podem ser em preto e branco, como nosso caso, ou colorida. Na imagem em preto e branco, os pixels assumem valores que vão de 0 (preto) a 255 (branco) ¹ para uma imagem de 8 bits, isto é o que se chama de tons de cinza. A tabela 4.1 representa uma imagem 3×3 em tons de cinza, onde os números são a intensidade $\zeta_{i,j}$ de cada pixel.

A figura 4.1 representa uma imagem referente à matriz apresentada anteriormente. A partir desta imagem inicia-se o cálculo do expoente de Hurst. A imagem é lida e

¹Alguns autores ou aplicativos utilizam 0 para branco e 255 para preto

0	32	255
120	92	247
28	0	122

Tabela 4.1: *Tabela 4.1 representando uma imagem digital*Figura 4.1: *Representação de uma imagem digital*

representada como uma matriz bidimensional por um script MatLab®. As séries para os cálculos são formadas pelas linhas ou colunas da matriz. O desenvolvimento é feito da seguinte forma: seja $\zeta(p)$ a intensidade da imagem do padrão de speckle no pixel p da coluna j . Seja $X(p)$ o valor acumulado de $\zeta(p)$ a partir da média $\bar{\zeta}_\tau$, dado por [7]:

$$X(p, \tau) = \sum_{u=1}^p \zeta(u) - \bar{\zeta}_\tau, \quad (4.1)$$

sendo τ o número de linhas. O intervalo R é a diferença entre as quantidades máximas e mínimas do acumulado contidas na série sendo avaliada (neste caso, uma coluna). Isto pode ser escrito como

$$R = \max(X(p, \tau)) - \min(X(p, \tau)), \quad 1 \leq p \leq \tau. \quad (4.2)$$

O desvio padrão S é calculado seguindo:

$$S = \frac{1}{\tau} \left[\sum_{u=1}^p \zeta(u) - \bar{\zeta}_\tau \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4.3)$$

Os dados da intensidade e do número de linhas (τ) são relacionadas para a série redimensionada (R/S) e para um expoente H, tal que [7]:

$$\frac{R}{S} = (\tau)^H \quad (4.4)$$

Logo, H pode ser obtido por:

$$H = \frac{\log(\frac{R}{S})}{\log\tau} \quad (4.5)$$

Como exemplo de aplicação, apresenta-se os cálculos abaixo, que tem como base a primeira coluna da tabela 4.1

$$media = \frac{(0+128+28)}{3} = 52$$

$$dif = (0 - 52), (120 - 52), (28 - 52) = -52 \quad 76 \quad -24$$

$$acum = -52 \quad 24 \quad 0$$

$$R = \max(acum) - \min(acum) = 76$$

$$S = \text{desviopadrão} = 67.290$$

$$R/S = 1.1294$$

$$H = \log(H) / \log(3) = 0.11079$$

4.2 Aplicação do Expoente H de Padrões de Speckle no Estudo de Rugosidade de Superfícies Metálicas

4.2.1 Obtenção Dos Padrões de Speckle

Para obtenção dos padrões de speckle são preparadas 5 (cinco) amostras de alumínio com lixamento manual, obedecendo à técnica padrão de polimento. Isto é, inicia-se com a lixa de maior grão (80 mesh) e, para obtenção de superfícies mais polidas, usa-se, suavemente, lixas de grão mais finos (150, 220, 1200 e 1500 mesh). O lixamento se dá em uma única direção, empregando sempre a mesma pressão sobre a lixa.

A tabela 4.2.1 abaixo mostra a relação da granularidade da lixa com a rugosidade obtida. Os valores de rugosidade foram obtidos no rugosímetro laser da Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda (EEIMVR).

O gráfico da Figura 4.2 mostra a variação da rugosidade medida em cada amostra com a granulometria utilizada para o acabamento final. Como esperado, a lixa de maior grão produziu a amostra de maior rugosidade, que decai com a diminuição do tamanho do grão.

Granularidade	Rugosidade
80	$0.26\mu m$
150	$0.24\mu m$
220	$0.21\mu m$
1200	$0.17\mu m$
1500	$0.10\mu m$

Tabela 4.2: *Granularidade da lixa e rugosidade medida em laboratório com rugosímetro laser.*

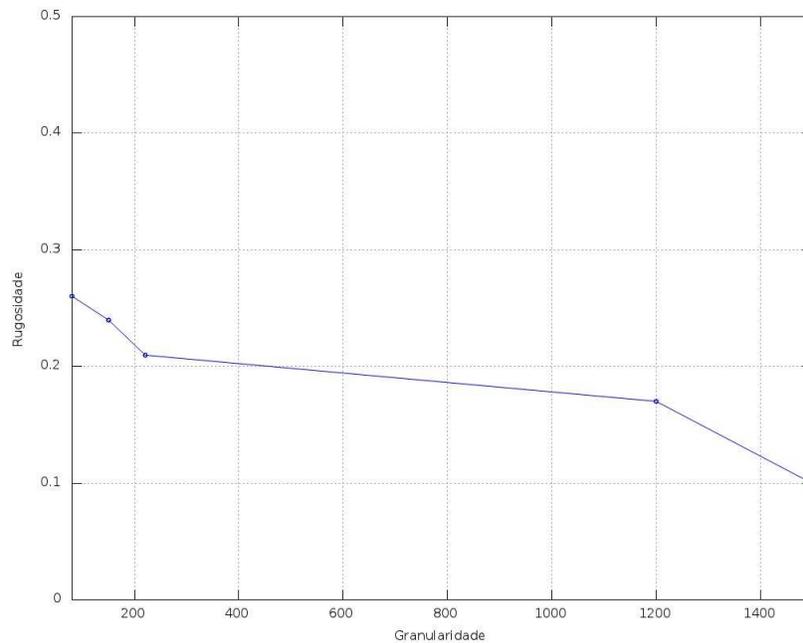


Figura 4.2: *Gráfico da rugosidade em relação à granularidade de cada lixa*

Com estas amostras e utilizando a esquema da figura 4.3, são gerados os padrões de speckle digital de cada uma delas. A imagem digital é captada pela câmera CCD (Charge Couple Device), disposta em um plano paralelo ao plano da superfície da amostra que a transmite ao computador para análise. O ângulo de incidência é mantido fixo em 45° para todas as imagens e a câmera CCD não possui lente. A luz sensibiliza diretamente o CCD e, portanto, o padrão de speckle analisado é no plano de difração. A intensidade do laser é ajustada para evitar saturação da câmera CCD, por isso procura-se trabalhar com intensidades baixas, de forma que as imagens dos padrões speckle ficam muito longe do regime de saturação do CCD.

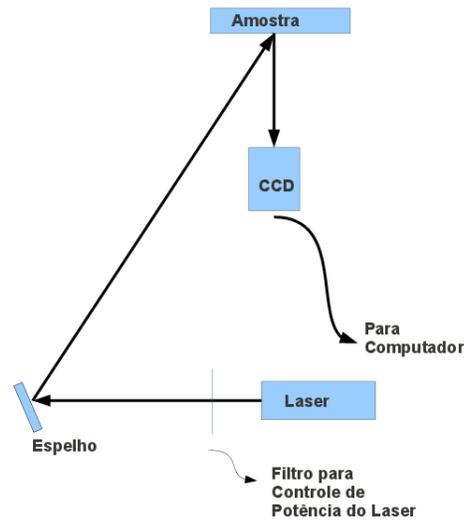
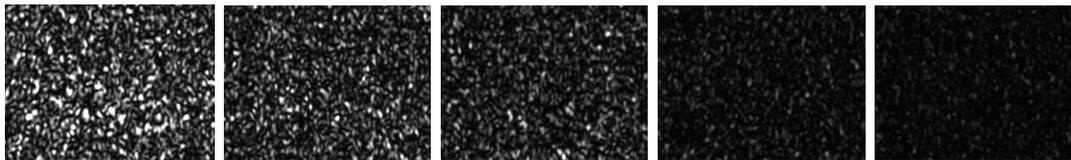


Figura 4.3: *Esquema do experimento*



(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Fig.1:Lixa	Fig.2:Lixa	Fig.3:Lixa	Fig.4:Lixa	Fig.5:Lixa
80.	150. $R_a =$	220. $R_a =$	1200. $R_a =$	1500. $R_a =$
$R_a = 0.26\mu m$	$0.24\mu m$	$0.21\mu m$	$0.17\mu m$	$0.10\mu m$

Figura 4.4: *Imagens de padrões de speckle formados por superfícies com diferentes acabamentos*

Imagens típicas são apresentadas na figura 4.4. A resolução destas imagens é 1024×768 . Cada padrão de speckle é identificado pela rugosidade da superfície que o gerou. Como pode ser visto, o padrão speckle varia com a rugosidade de forma que a amostra mais rugosa produz o padrão com mais luminosidade, conforme o esperado.

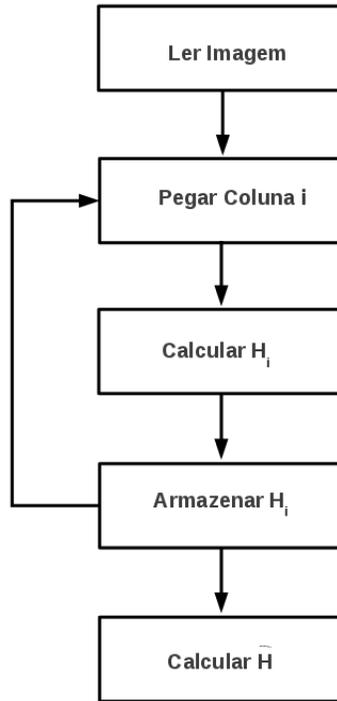


Figura 4.5: Fluxograma para cálculo de H

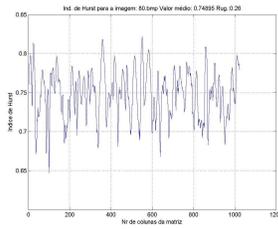
4.2.2 Estudo da Rugosidade Com o Expoente de Hurst da Imagem Digital

Após ter capturado a imagem gerada pelo padrão speckle, executa-se no ambiente MatLab® um script baseado no procedimento descrito na seção 4.1, relativo à obtenção do expoente de Hurst. Estes cálculos foram feitos tomando-se cada coluna da matriz como uma série, com o número de linhas fazendo o papel de tempo. Em seguida o resultado para cada uma das séries é armazenado em um vetor para realizar o cálculo do expoente médio de cada imagem, que é tomado em relação ao número de colunas. O fluxograma da Figura 4.2.2 ilustra o processo de obtenção de H .

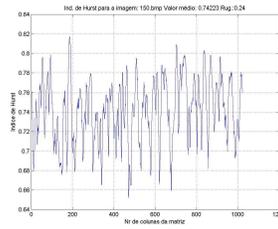
O gráfico da figura 4.6 a) apresenta o H para cada coluna da imagem do padrão de speckle referente à superfície de rugosidade $Ra = 0.26\mu m$ da Figura 4.4; 4.6 b), c), d) e e) apresentam a variação de H em função das imagens dos padrões de speckle gerados pelas superfícies de rugosidade $Ra = 0.24\mu m$, $Ra = 0.21\mu m$, $Ra = 0.17\mu m$ e $Ra = 0.10\mu m$ da Figura 4.4, respectivamente.

A tabela 4.2.2 mostra os resultados do expoente \bar{H} para cada rugosidade. Em acordo com a referência [7], observa-se que \bar{H} aumenta com a rugosidade.

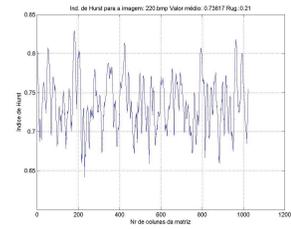
4.2 Aplicação do Exponente H de Padrões de Speckle no Estudo de Rugosidade de Superfícies Metálicas³²



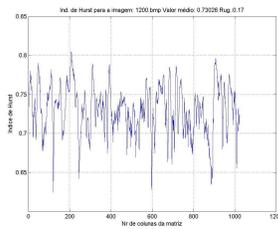
(a) Gráfico 1: $R_a = 0.26$



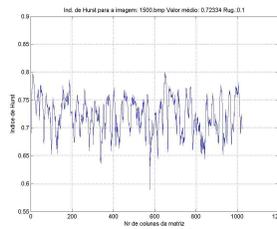
(b) Gráfico 2: $R_a = 0.24$



(c) Gráfico 3: $R_a = 0.21$



(d) Gráfico 4: $R_a = 0.17$



(e) Gráfico 5: $R_a = 0.10$

Figura 4.6: Gráficos de diversas granularidades em relação ao coeficiente de Hurst

Rugosidade	\overline{H}
$0.26\mu m$	0.749
$0.24\mu m$	0.742
$0.21\mu m$	0.736
$0.17\mu m$	0.730
$0.10\mu m$	0.723

Tabela 4.3: Resultados obtidos pela medida de rugosidade em laboratório (rugosímetro laser) e expoente de Hurst de cada amostra

A figura 4.7, apresenta a variação do expoente de Hurst com a rugosidade média. O cálculo do expoente de Hurst pode ser executado de duas maneiras: tomando como séries as colunas a imagem ou usando tomando as linhas. A curva superior do gráfico (curva simbolizada pelo sinal "+") mostra a variação do expoente de Hurst fazendo as séries a partir das colunas. O ajuste desta curva foi feita com o polinômio $9.8134x^3 - 4,4512x^2 + 0,7591x + 0.6800$ tendo sido obtido um $R^2 = 1$. A curva inferior (curva simbolizada por "o") mostra o cálculo tomando-se as linhas da imagem como as séries. O ajuste desta curva foi feito com o polinômio $-4,5575x^3 + 1,7661x^2 + 0,0148x + 0,68867$, tendo sido obtido o coeficiente de determinação $R^2 = 0.949$. A curva intermediária (curva de linha de sólida) mostra os valores médios para os dois cálculos. Observa-se que os valores do expoente de Hurst são diferentes, mas a tendência de aumento de H com a rugosidade é

mantida.

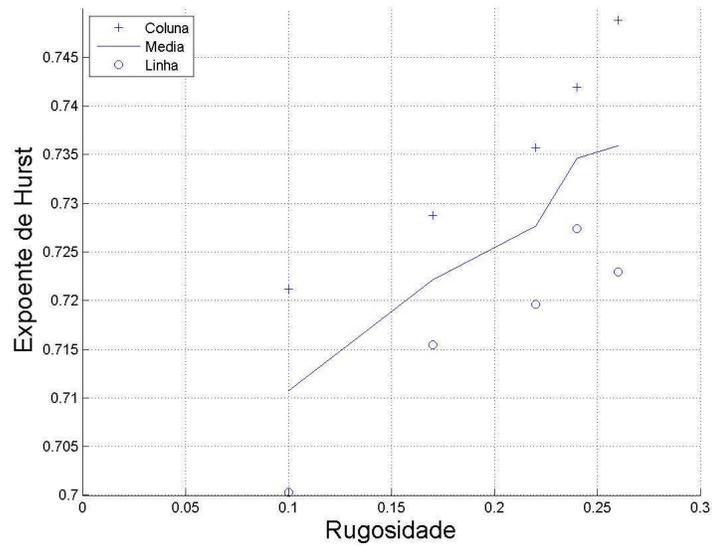


Figura 4.7: Comparação do cálculo do coef. de Hurst por linha e por coluna da matriz

De acordo com os resultados obtidos, observa-se uma relação entre o índice de Hurst e a rugosidade da amostra, indicando que é possível avaliar a rugosidade do material utilizando uma curva de calibração. Isto leva à possibilidade de executar medidas indiretas da rugosidade de superfícies metálicas, ou seja, através deste expoente é possível analisar o acabamento de uma superfície.

Capítulo 5

Análise de Superfícies Metálicas em Movimento com Método de Hurst para Imagens Digitais

No capítulo 4 estudou-se a relação do expoente de Hurst com a rugosidade, com as amostras estáticas. Este capítulo inicia-se com a descrição da preparação das amostras onde foram introduzidos os defeitos para análise. Em seguida é realizada a análise estática das superfícies em regiões sem defeitos e o papel do movimento das amostras no expoente de Hurst. Na seção seguinte, a análise nas regiões com defeito é feita tanto estática, quanto dinamicamente.

5.1 Preparação das Amostras

Para a realização deste trabalho, utiliza-se uma amostra de alumínio com as dimensões de 2,5 cm de largura e 1,2 cm de espessura e uma amostra de aço com as dimensões de 3,9 cm de largura e 1,4 cm de espessura. Em função da capacidade de processamento do computador utilizado, foi determinado que o comprimento varrido, para cada amostra, iria variar com a velocidade de deslocamento, sendo de 6 cm para a velocidade mais baixa e de 10 cm para velocidades maiores.

As amostras foram preparadas da seguinte forma: a amostra de alumínio foi preparada através de uma plaina com passo lateral de $0,25\text{mm}$ na velocidade de 39GPM (Golpes por Minuto), com os defeitos introduzidos através dois riscos feitos por ferramenta pontiaguda no sentido perpendicular ao acabamento, com as larguras de $0,5\text{cm}$ e $0,3\text{cm}$. A amostra de Aço 1020 foi preparada em uma retífica plana e defeitos introduzidos através riscos com ferramenta pontiaguda e lixamento no sentido perpendicular ao do acabamento

original, com as seguintes dimensões: $0,2\text{cm}$, $0,1\text{cm}$ e $2,0\text{cm}$.

As figuras 5.1 e 5.2 mostram as duas amostras.

Para avaliar a qualidade das superfícies das amostras, foram realizadas medidas da



Figura 5.1: *Amostra de alumínio utilizada no experimento*

rugosidade das peças. Estas medidas foram realizadas com o rugosímetro a laser da Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, marca Mahr, modelo LS10. As medidas foram realizadas, segundo as normas DIN 4768 ISO 4287/1 e 4288, tendo sido obtidos os seguintes resultados (média de cinco passagens pelas áreas consideradas):

- Aço 1020: $Ra : (0,18 \pm 0,03)\mu\text{m}$
- Alumínio comercial: $Ra : (0,28 \pm 0,04)\mu\text{m}$

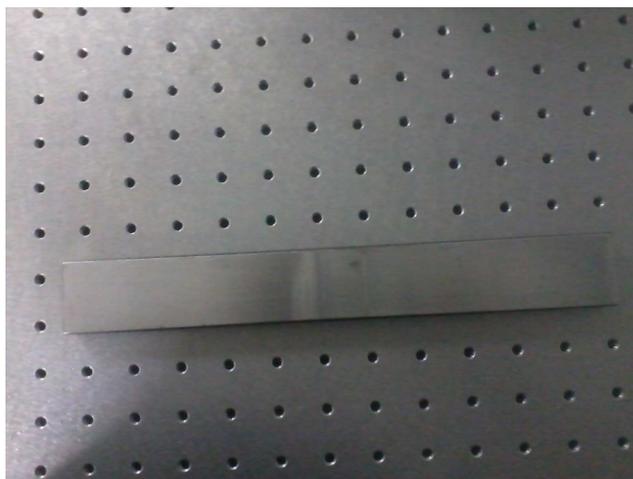


Figura 5.2: *Amostra de aço utilizada no experimento*

5.2 Experimento

O experimento consiste em iluminar um ponto das amostras em movimento com luz laser e captar a luz espalhada na direção normal, formando os chamados padrão de speckle. O esquema experimental está representado na Figura 5.2.

Para o movimento, as amostras foram fixadas em uma plataforma móvel unidi-

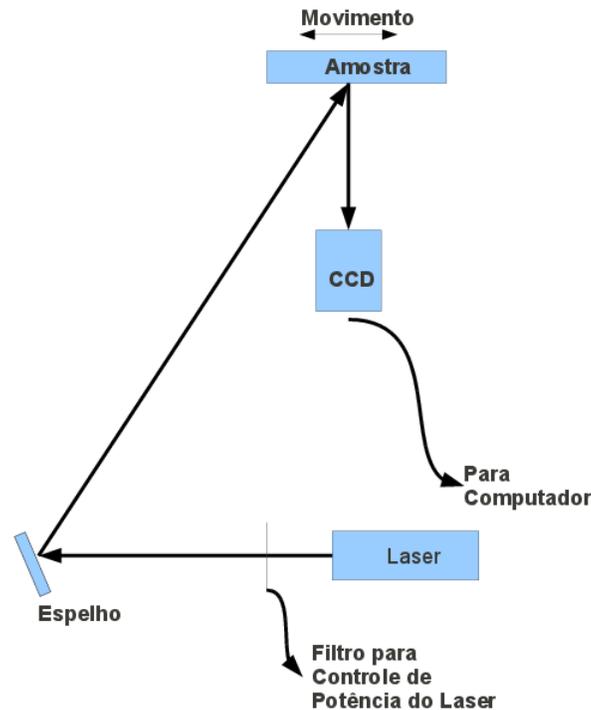


Figura 5.3: *Esquema do experimento dinâmico. Câmara CCD com as seguintes características: resolução de 1024 x 768 pixel, tamanho do pixel: $4,65\mu\text{m} \times 4,65\mu\text{m}$*

mensional de velocidade variável do fabricante Optron®. Escolheu-se trabalhar com três valores diferentes de velocidade, V_1 , V_2 e V_3 . Uma velocidade mais baixa ($V_1 = 0,073 \text{ cm/s}$), uma velocidade intermediária ($V_2 = 0,16 \text{ cm/s}$) e a maior velocidade possível ($V_3 = 0,33 \text{ cm/s}$). Para as três velocidade, as amostras foram sempre deslocadas à velocidade constante. As imagens foram capturadas por uma câmera CCD (Charge Coupled Device) marca *ImagingSource*, modelo *DMK 31BF03 FireWire CCD Mono*, resolução de 1024 x 768 pixel, tamanho do pixel $H : 4,65\mu\text{m}, V : 4,65\mu\text{m}$, com capacidade

de registrar até 30 quadros por segundo.

Como mostrado na Figura 5.2, é colocada em um plano paralelo à superfície da amostra e controlada pelo software MatLab® através a ferramenta *imaqtool* (interface gráfica que permite o controle de equipamentos de aquisição de imagens), instalado em um computador com placa mãe Intel, processador Intel Core Duo, com CPU's E7300 @ 2.66 GHz de clock e com 2.0 Giga Bytes de memória de acesso aleatório.

As amostras foram iluminadas por um laser verde de comprimento de onda $532nm$ e com $100\mu W$ de potência, controlada através um filtro neutro, mostrado na Figura 5.4. O laser incide nas amostras segundo um ângulo de 45^0 que é mantido para todo o experimento. Inicialmente, foram feitas imagens estáticas (amostras paradas) nas regiões com e sem defeito e posteriormente, com o deslocamento nas velocidades V_1 V_2 e V_3 . Tendo em vista a capacidade do computador utilizado, foi necessário limitar um máximo de 2300 quadros em cada filmagem e foi estabelecido um comprimento máximo para as amostras de $6cm$ quando na velocidade V_1 e $10cm$ para as velocidades V_2 e V_3 .

As amostras, devidamente fixadas na plataforma móvel, foram deslocadas dentro das distâncias previstas para cada velocidade e iluminadas pelo laser. As imagens capturadas foram sendo armazenadas no computador para posterior análise. Inicialmente, foram feitas imagens estáticas e dinâmicas das regiões sem defeitos e posteriormente das regiões com defeitos.

Fato importante observado foi a necessidade do controle da potência do feixe laser. Um feixe com potência acima de $200\mu W$ causou uma saturação da imagem o que pode mascarar alguns defeitos.

As imagens foram armazenadas em filmes de formato ".avi" e analisadas quadro a quadro. O MatLab® faz a leitura e digitalização dos quadros individualmente, os quais geram uma matriz de pontos, com o registro da intensidade em cada pixel. Cada quadro contém o padrão de speckle gerado por uma determinada porção da amostra. Este padrão de speckle é analisado segundo a metodologia apresentada no capítulo 4, item 4.1. Tem-se, então, um expoente de Hurst para cada quadro e pode-se verificar como o expoente H varia para cada posição da amostra.

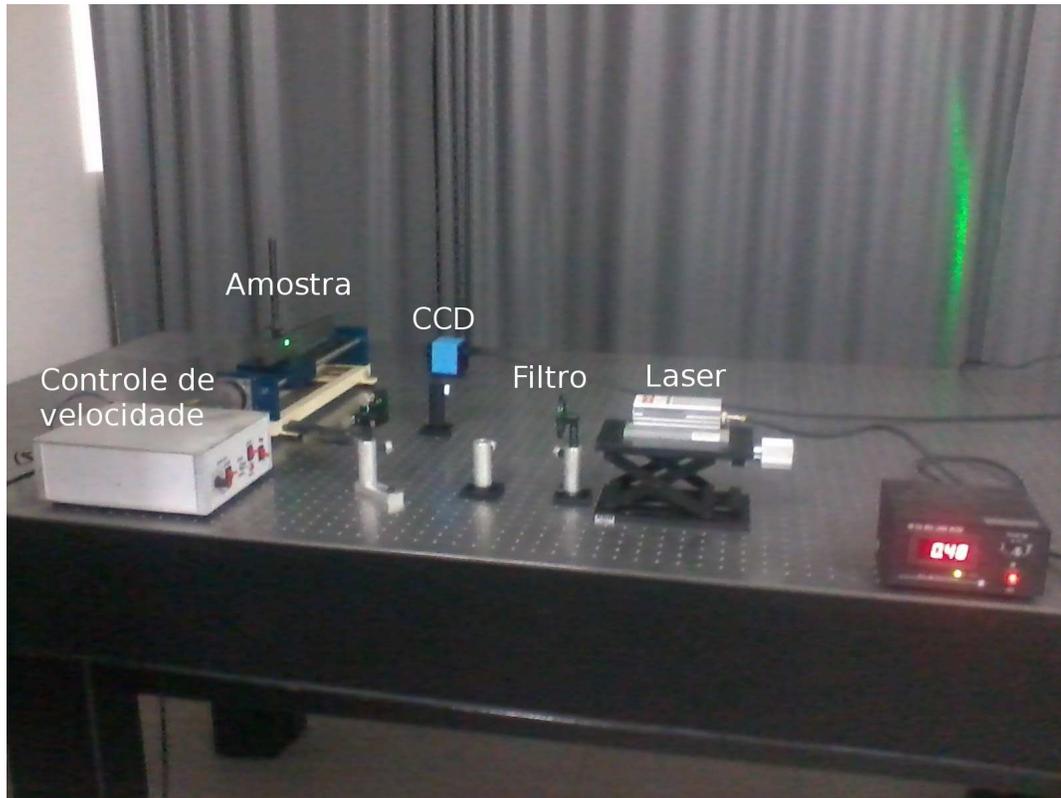


Figura 5.4: Foto da montagem dos equipamentos para os experimentos

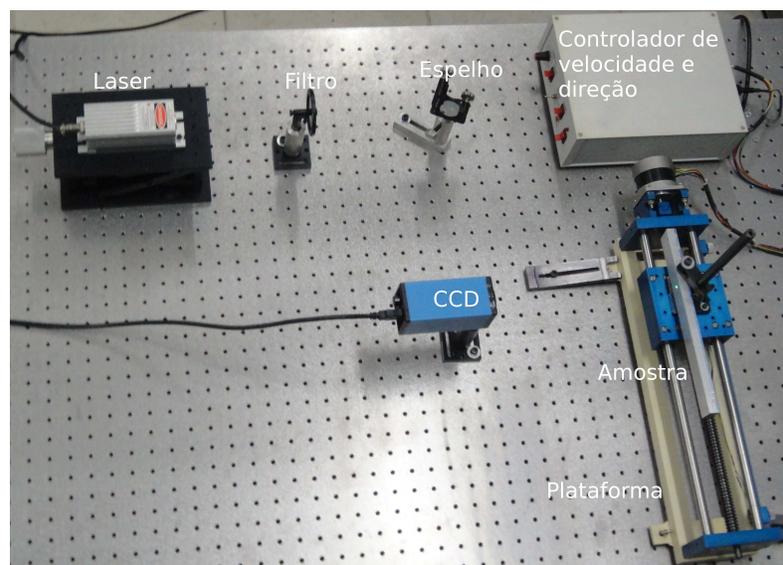


Figura 5.5: Foto de topo da montagem dos equipamentos para os experimentos

5.3 Análises das Amostras em Regiões sem Defeitos

Antes das análises das amostras com defeitos, realiza-se análises das regiões sem defeitos, estática e dinamicamente, com a finalidade de observar o efeito do movimento no cálculo do expoente de Hurst.

5.3.1 Análise Estática da Amostra de Alumínio

Na Figura 5.14 são apresentados três padrões de speckle típicos da série obtida, para a amostra de Alumínio comercial. Como pode ser observado, eles não apresentam grandes diferenças. Ressalta-se que estas imagens são as complementares do padrão de speckle, ou seja, nela a intensidade é dada por $255 - \zeta_{ij}$. Isto leva à uma troca entre as regiões escuras e claras. Isto foi feito para facilitar a observação dos padrões de speckle. Os cálculos, contudo, foram realizados com as imagens originais.

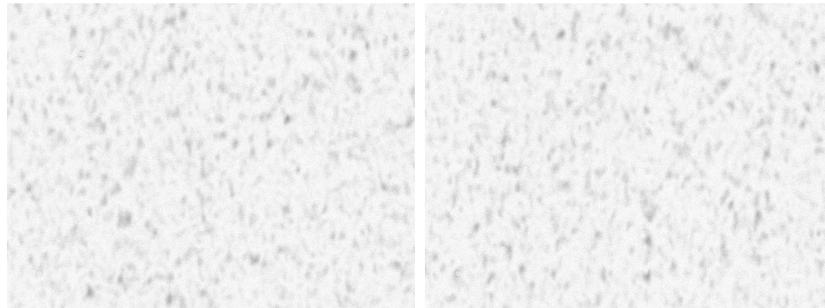
A figura 5.7 exibe o gráfico resultante da análise da região sem defeitos da amostra de alumínio, que foi dividida em 20 porções separadas aproximadamente de $1,5\text{cm}$ cada. Cada uma das posições foi fotografada deslocando-se a amostra com a finalidade de obter o expoente de Hurst (H) para cada uma das porções e analisar a variação de H com posição, obtendo o expoente médio de toda a região pesquisada. No eixo vertical estão representados os valores de H e no eixo horizontal as imagens correspondentes.

O valor de H médio resultou em $0,671$ com desvio padrão $S = 0,005$. Considerando o erro estatístico podemos afirmar que $\bar{H} = 0,671 \pm 1,0 \times 10^{-3}$.

Conforme o esperado, verifica-se que o expoente H mantém-se praticamente constante, uma vez que a amostra foi preparada de maneira uniforme, com uma rugosidade $R_a = (0,28 \pm 0,04)\mu\text{m}$. O erro estatístico é muito pequeno e este resultado está de acordo com a referência [7].

5.3.2 Análise Estática da Amostra de Aço

Agora apresenta-se, na figura 5.21, três padrões de speckle para a varredura feita na amostra de aço.



(a) Região 1 sem defeitos da amostra de alumínio

(b) Região 2 sem defeitos da amostra de alumínio



(c) Região 3 sem defeitos da amostra de alumínio

Figura 5.6: *Fotos da amostra de alumínio comercial em regiões sem defeitos*

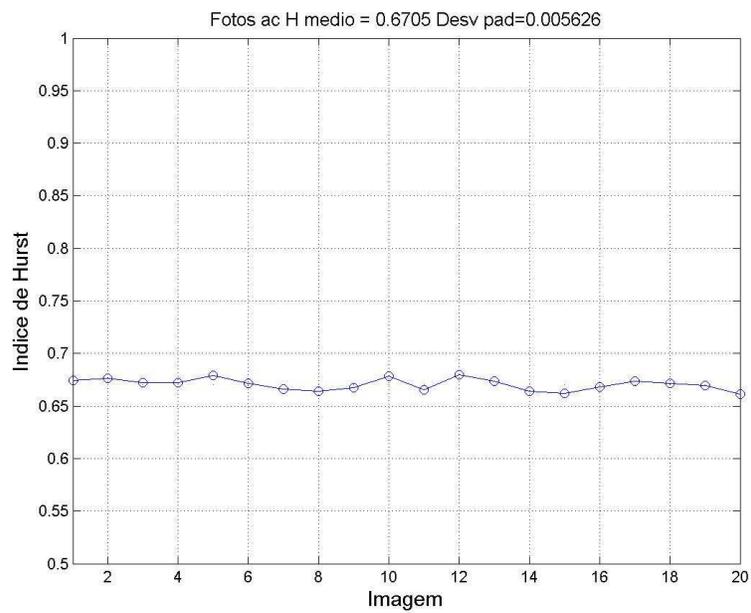
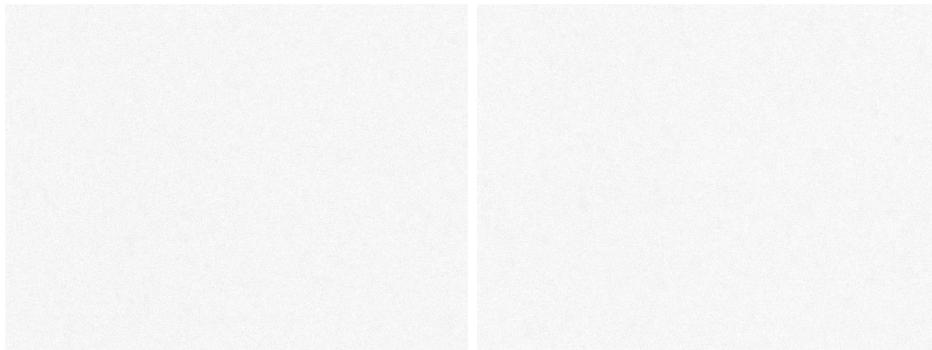
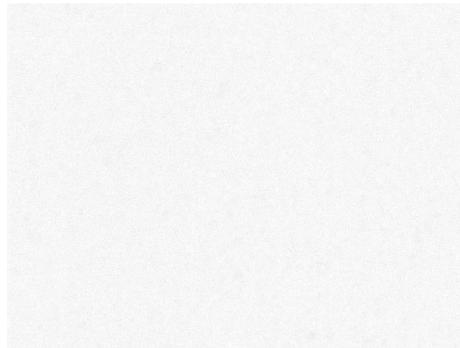


Figura 5.7: *Gráfico da amostra de alumínio sem defeitos. Situação: estática*



(a) Região 1 sem defeitos da amostra de aço

(b) Região 2 sem defeitos da amostra de aço



(c) Região 3 sem defeitos da amostra de aço

Figura 5.8: *Fotos da amostra de aço na região sem defeitos*

O gráfico da Figura 5.9, é resultado da análise de 25 fotos da região sem defeitos da amostra de aço. No eixo vertical, os valores dos índices H e no eixo horizontal as respectivas imagens. O valor de H médio ficou em 0,536 com $S = 0,005$. Da mesma forma que na análise anterior, considerando o erro estatístico pode-se afirmar que $\overline{H} = 0,536 \pm 1.0 \times 10^{-3}$. Como pode-se ver, o comportamento de H para as diferentes posições da amostra de aço também é coerente com o esperado.

Comparando o valor de \overline{H} da amostra de alumínio ($\overline{H_a} = 0,671 \pm 1.0 \times 10^{-3}$) cuja rugosidade média é $R_a = (0,28 \pm 0,04)\mu m$ e o valor de \overline{H} para o aço ($\overline{H} = 0,586 \pm 1,0 \times 10^{-3}$, cuja rugosidade média é $R_a = (0,18 \pm 0,03)\mu m$, conclui-se que este resultado está em concordância com a referência [7], pois conforme foi mostrado, H cresce com R_a . O fato novo é que esta relação foi observada para amostra de materiais diferentes, preparada por técnicas diferentes, demonstrando que o comportamento geral de H não depende do material, mas da rugosidade apenas. Evidentemente diferenças muito grandes na refletividade do material pode gerar desacordos, porém, para as amostras metálicas estudadas o expoente H respondeu de forma muito coerente com o esperado.

5.3.3 Análises Dinâmicas das Amostras em Regiões Sem Defeitos

Em seguida, apresenta-se os gráficos resultantes das análises realizadas nas amostras de forma dinâmica, ainda nas regiões sem defeito. Os deslocamentos foram realizados nas velocidades $V_1 = 0,073cm/s$, $V_2 = 0,160cm/s$ e $V_3 = 0,330cm/s$, para cada amostra.

Na figura 5.14 são mostrados três padrões de speckle típicos. Para a velocidade V_1 , foram associados os quadros 100, 1000 e 2000 às posições inicial, média e final da varredura, respectivamente, sem grande distinção do padrão de speckle.

No filme pode ser observado que o padrão de speckle tem uma dinâmica por pontos iluminados variando a intensidade conforme a amostra se movimenta.

Na figura 5.11 é exibido o gráfico do resultado obtido pela filmagem da amostra de alumínio na velocidade V_1 , com os valores de H no eixo vertical e os quadros no eixo horizontal.

Observa-se o valor de $\overline{H} = 0,658$ e $S = 0,006$, sendo que foram analisados um total de 2250 quadros para esta velocidade, limitado este número pela capacidade do equipamento computacional utilizado. O tamanho da amostra varrida foi de $6cm$. Considerando o erro estatístico, podemos concluir que $\overline{H} = 0.6580 \pm 1,3 \times 10^{-04}$. A pequena variação de H é devido à irregularidades na amostra, quanto ao movimento da mesma.

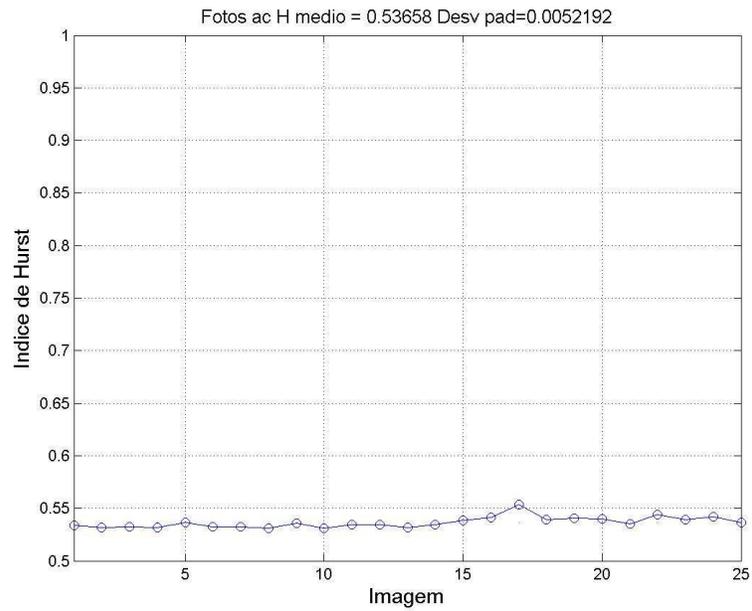
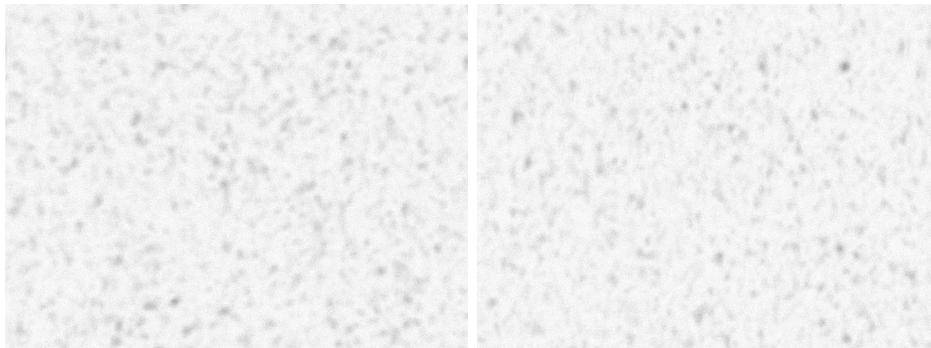
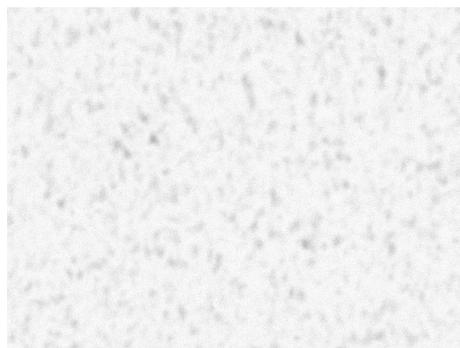


Figura 5.9: Gráfico da amostra de aço sem defeito. Situação: estática



(a) Amostra de alumínio na região sem defeitos(quadro 10)

(b) Amostra de alumínio na região sem defeitos(quadro 1100)



(c) Amostra de alumínio na região sem defeitos(quadro 2200)

Figura 5.10: Fotos da amostra de alumínio na região sem defeitos, velocidade V_1

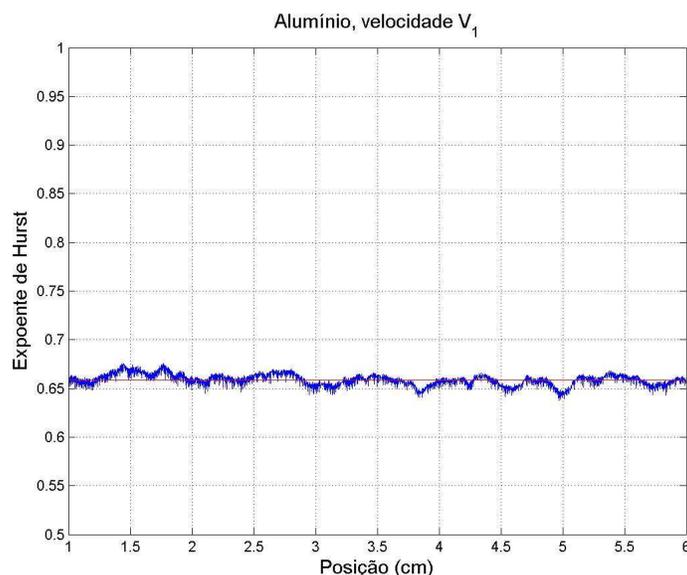


Figura 5.11: Gráfico da amostra de alumínio sem defeitos na velocidade V_1

Na figura 5.14 são apresentados três padrões de speckle típicos da amostra com velocidade V_2 . Foram tomados os quadros 100, 1000 e 2000. Novamente, não se percebe uma grande variação do padrão de speckle.

Na figura 5.13 é exibido o gráfico resultante da análise da filmagem da mesma amostra, agora na velocidade $V_2(0,16\text{cm/s})$, com os valores de H no eixo vertical e a posição no eixo horizontal.

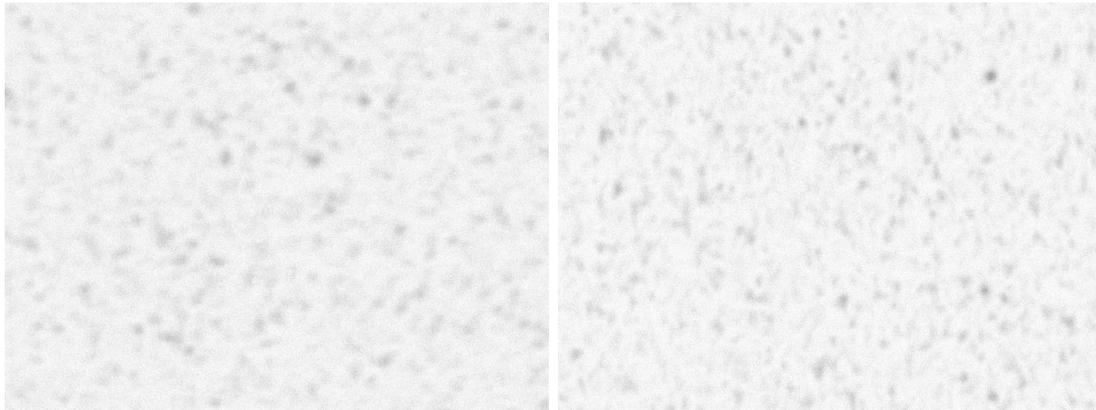
Nesta velocidade o número de quadros foi de 2000, para um tamanho de 10cm da varredura. Este aumento no comprimento foi possibilitado devido ao aumento da velocidade. Observa-se que $\bar{H} = 0,642$ e $S = 0,007$ e considerando o erro estatístico, $\bar{H} = 0,6420 \pm 16 \times 10^{-04}$.

Na figura 5.14 são apresentados três padrões de speckle típicos, da amostra com velocidade V_3 . Para esta velocidade, o total de quadros obtidos foi de 1000, com o tamanho da varredura de 10cm . Tomou-se os quadros 10, 490 e 970, correspondendo, respectivamente, às posições inicial, intermediária e final da varredura.

Na figura 5.15 o gráfico resultante da análise da filmagem da amostra de alumínio, com os valores de H no eixo vertical e posição no eixo horizontal.

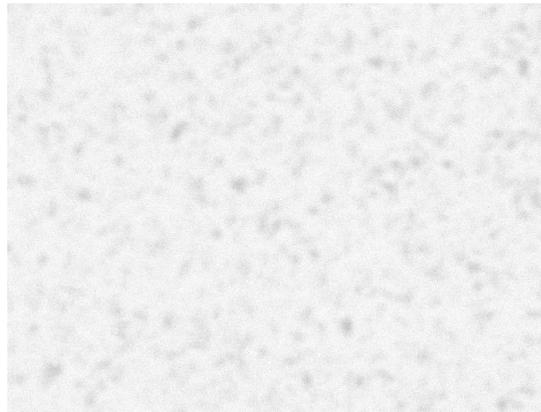
Observa-se que $\bar{H} = 0,630$ e $S = 0,007$ e considerando-se o erro estatístico o valor de $\bar{H} = 0,6300 \pm 2,2 \times 10^{-04}$. Os erros estatísticos são muito pequenos. Pode-se notar também que o desvio padrão é praticamente o mesmo para as três velocidades.

No gráfico da figura 5.16, compara-se os resultados das análises da amostra de alumínio, nas situações estática e dinâmica. No eixo vertical os valores de H e no eixo horizontal os valores das velocidades, partindo de 0.



(a) Amostra de alumínio na região sem defeitos(quadro 10)

(b) Amostra de alumínio na região sem defeitos(quadro 1000)



(c) Amostra de alumínio na região sem defeitos(quadro 2000)

Figura 5.12: Fotos da amostra de alumínio na região sem defeitos, velocidade V_2

Observa-se que os valores obtidos nas diversas velocidades são próximos dos valores da análise estática, havendo uma diminuição de H no intervalo das velocidades analisadas. A barra de erros foi feita pelo desvio padrão obtida para cada velocidade.

Como pode-se observar houve uma pequena variação de H com a velocidade, de cerca de 4,3%. A variação de H com a velocidade pode ser ajustada pela curva exponencial

$$H = 0,058e^{-4,6V} + 0,6177 \quad (5.1)$$

A variação de H está relacionada, não só à intensidade do padrão speckle, mas também ao número de pixels iluminados. Neste caso, para o alumínio, a maior velocidade da amostra irá ocasionar uma maior dinâmica do padrão de speckle. Esta dinâmica é ocasionada pelas irregularidades da amostra e introduz mudanças aleatórias, mesmo que

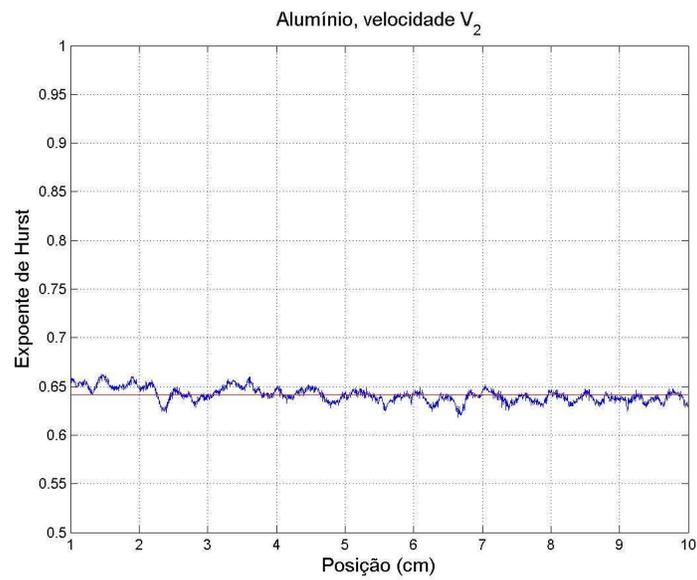
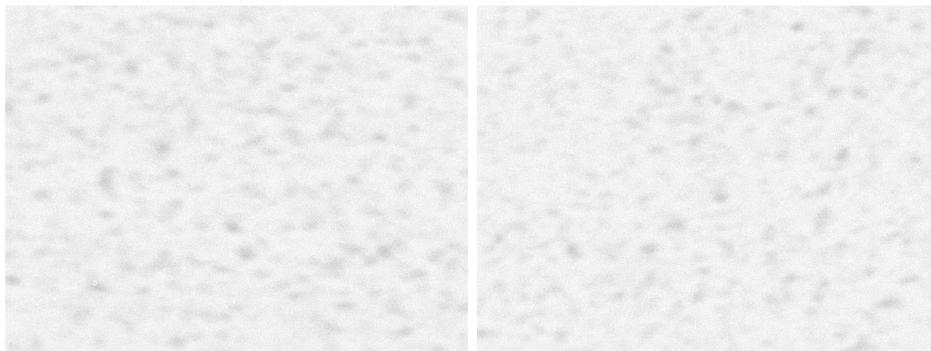
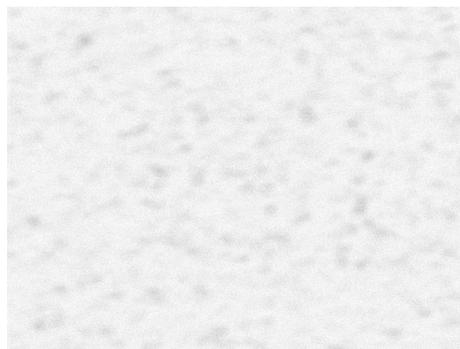


Figura 5.13: Gráfico da amostra de alumínio sem defeitos na velocidade V_2



(a) Amostra de alumínio na região sem defeitos(quadro 10)

(b) Amostra de alumínio na região sem defeitos(quadro 490)



(c) Amostra de alumínio na região sem defeitos(quadro 970)

Figura 5.14: Fotos da amostra de alumínio na região sem defeitos, velocidade V_3

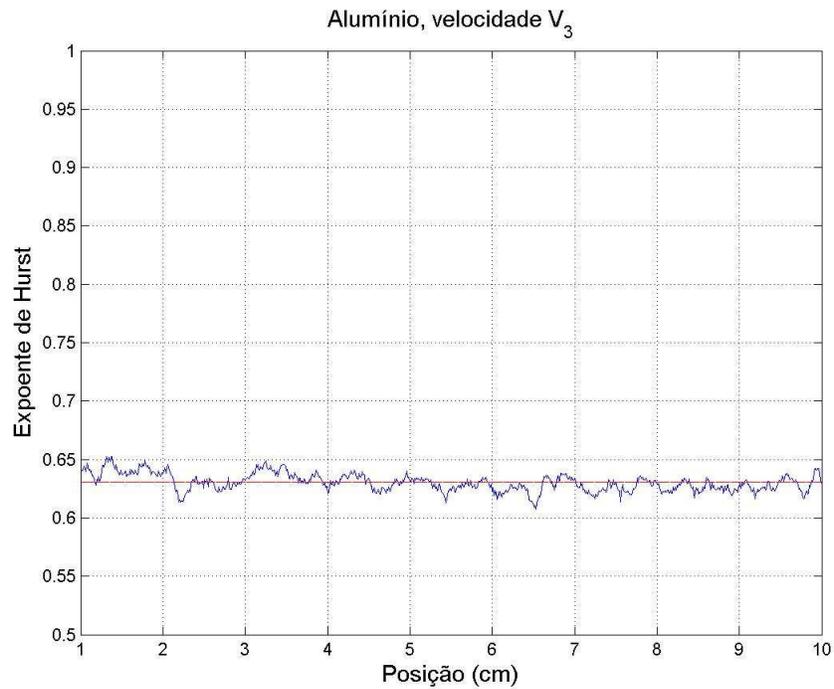


Fig. 5.15: Gráfico com os valores resultantes das análises estática e dinâmica da amostra de alumínio, na região sem defeitos, para a velocidade V_3 .

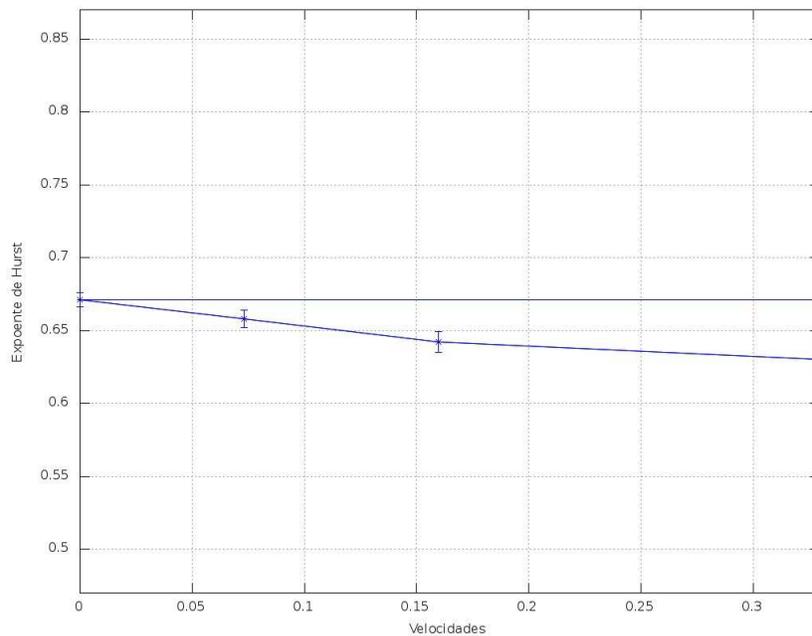
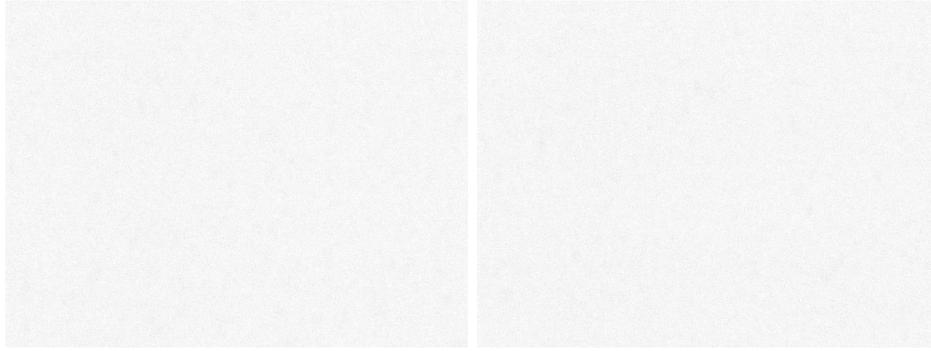


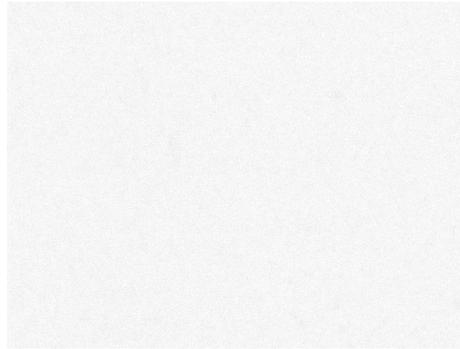
Figura 5.16: Gráfico com os valores resultantes das análises estática e dinâmica da amostra de alumínio, na região sem defeitos.

pequenas, no padrão de speckle, contribuindo para a diminuição de H . Velocidades muito altas poderiam produzir uma dinâmica do padrão de speckle que a taxa de aquisição da câmera pode não suportar, ocasionando uma saturação do valor de H . De fato observando a equação 5.1 pode-se ver que para altas velocidades o primeiro termo tende a zero e o



(a) Foto 1: Amostra de aço na região sem defeitos(quadro 10)

(b) Foto 2: Amostra de aço na região sem defeitos(quadro 1000)



(c) Foto 3: Amostra de aço na região sem defeitos(quadro 2300)

Figura 5.17: *Fotos da amostra de aço na região sem defeitos, Velocidade V_1*

valor de H tende ao valor fixo de 0,6177.

Em seguida são apresentados os estudos para a amostra de aço, nas regiões sem defeitos, nas três velocidades.

A figura 5.21 apresenta três imagens do padrão speckle, retiradas da filmagem da amostra na velocidade V_1 . As imagens referem-se aos quadros 10, 1000 e 2300, respectivamente, nas posições inicial, intermediária e final da filmagem.

O gráfico da figura 5.18 resulta da análise da amostra, na velocidade V_1 . A região abrangida é de 6cm, em virtude das limitações computacionais já mencionadas. Foram registrados um total de 2250 quadros.

Para \overline{H} foi obtido o valor de 0,540 com $S = 0,002$. Considerando o erro estatístico $\overline{H} = 0,540 \pm 4,2 \times 10^{-05}$.

A figura 5.21 apresenta três imagens do padrão speckle, retiradas da filmagem da amostra na velocidade V_2 . As imagens referem-se aos quadros 10, 1000 e 2000, respectivamente, nas posições inicial, intermediária e final da filmagem.

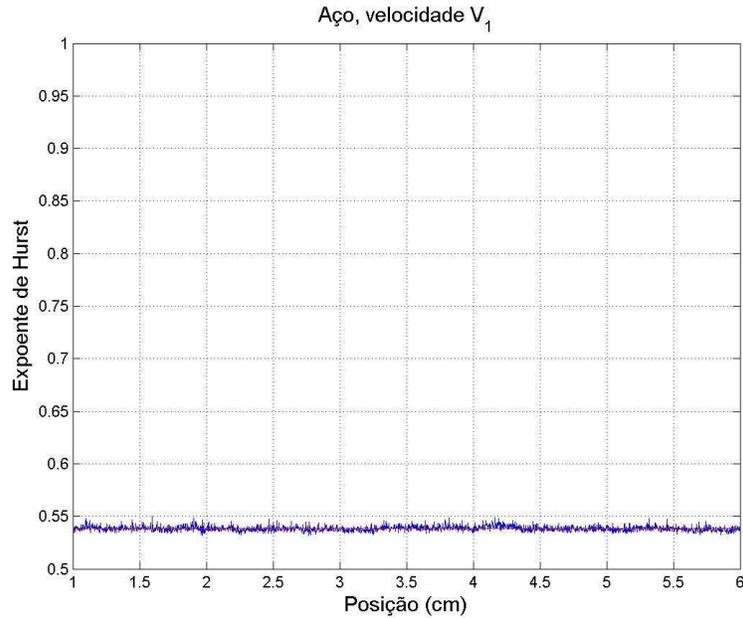


Figura 5.18: Gráfico da amostra de aço sem defeitos na velocidade V_1

O gráfico da figura 5.20 é resultado da análise da amostra, na velocidade V_2 . A região abrangida foi de 10cm e um total de 2000 quadros foram capturados na filmagem.

A análise resultou em um valor de $\overline{H} = 0,532$ e $S = 0,002$. Considerando os erros estatísticos, tem-se $\overline{H} = 0,53231 \pm 4,2 \times 10^{-05}$.

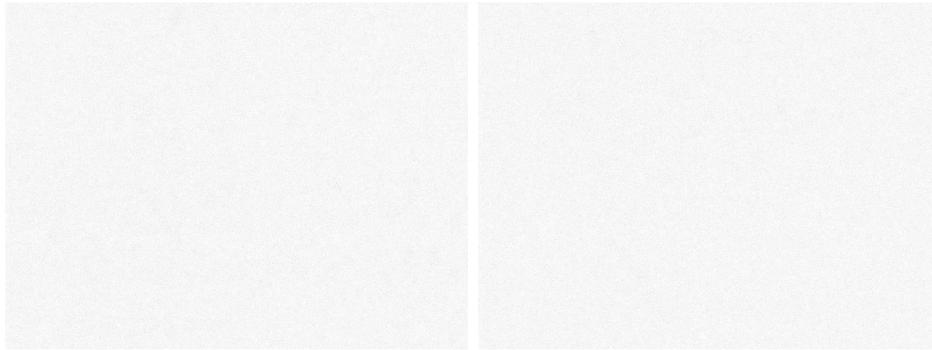
A figura 5.21 apresenta três imagens do padrão speckle, retiradas da filmagem da amostra na velocidade V_3 . As imagens referem-se aos quadros 10, 480 e 970, respectivamente, nas posições inicial, intermediária e final da filmagem.

O gráfico da figura 5.22 demonstra o resultado da análise da amostra de aço, na velocidade V_3 . A região abrangida foi de 10cm e um total de 1000 quadros capturados.

Os valores obtidos foram: para $\overline{H} = 0,531$ e para $S = 0,004$. Considerando os erros estatísticos, pode-se escrever que o $\overline{H} = 0,5314 \pm 1,26 \times 10^{-04}$

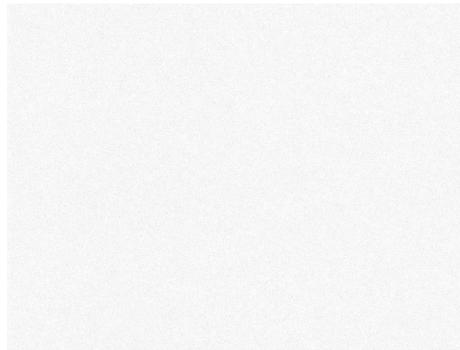
Na figura 5.23, observa-se os resultados das análises da amostra de aço, nas situações estática e dinâmica. No eixo vertical os valores de H e no eixo horizontal os valores das velocidades, partindo de 0, caso em que é analisada a amostra parada. Não foi possível, neste caso, ajustar com qualidade a curva exponencial. Grafica-se, então, o valor de H da análise estática (linha horizontal). Analisando a barra de erros vê-se que a variação de H com a velocidade praticamente não existe.

Os filmes mostram uma dinâmica do padrão de speckle muito mais suave para a amostra de aço comparada com a de alumínio. A menor rugosidade da amostra de aço produz um menor espalhamento da luz, fazendo com que o movimento da amostra não contribua tanto com a variação do padrão de speckle. Acrescenta-se a isto a regularidade



(a) Foto 1: Amostra de aço na região sem defeitos(quadro 10)

(b) Foto 2: Amostra de aço na região sem defeitos(quadro 1000)



(c) Foto 3: Amostra de aço na região sem defeitos(quadro 2000)

Figura 5.19: Fotos da amostra de aço na região sem defeitos, Velocidade V_2

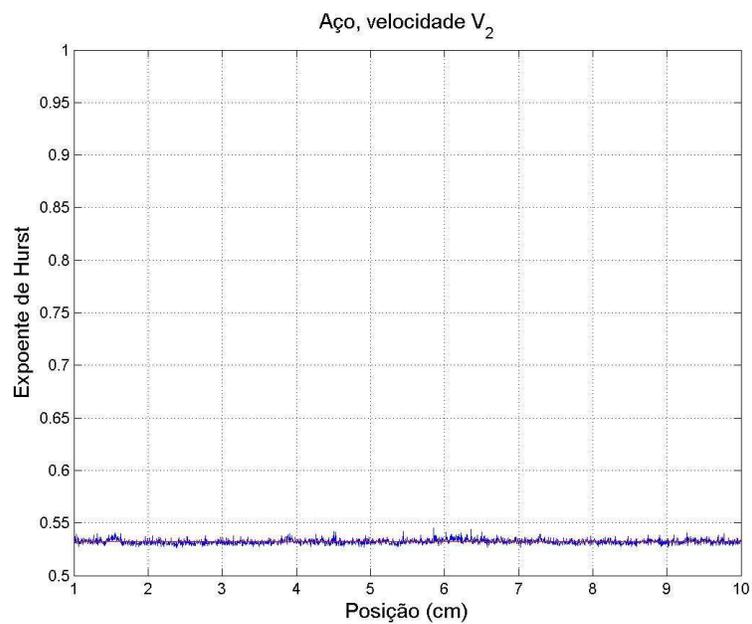
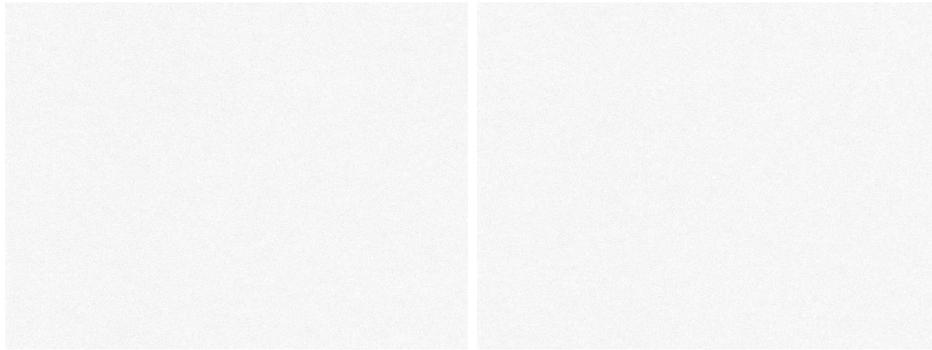


Figura 5.20: Gráfico da amostra de aço sem defeitos na velocidade V_2



(a) Foto 1: Amostra de aço na região sem defeitos(quadro 10)

(b) Foto 2: Amostra de aço na região sem defeitos(quadro 480)



(c) Foto 3: Amostra de aço na região sem defeitos(quadro 970)

Figura 5.21: Fotos da amostra de aço na região sem defeitos, velocidade V_3

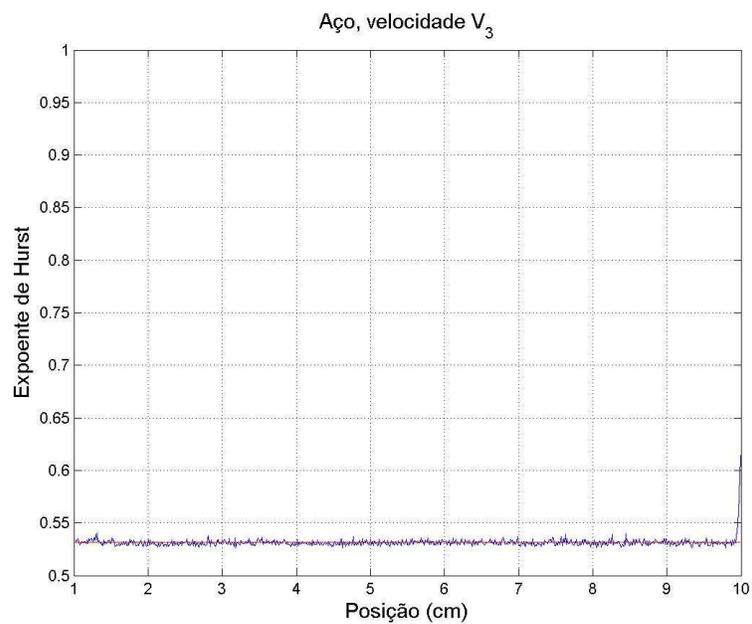


Figura 5.22: Gráfico da amostra de aço sem defeitos na velocidade V_3

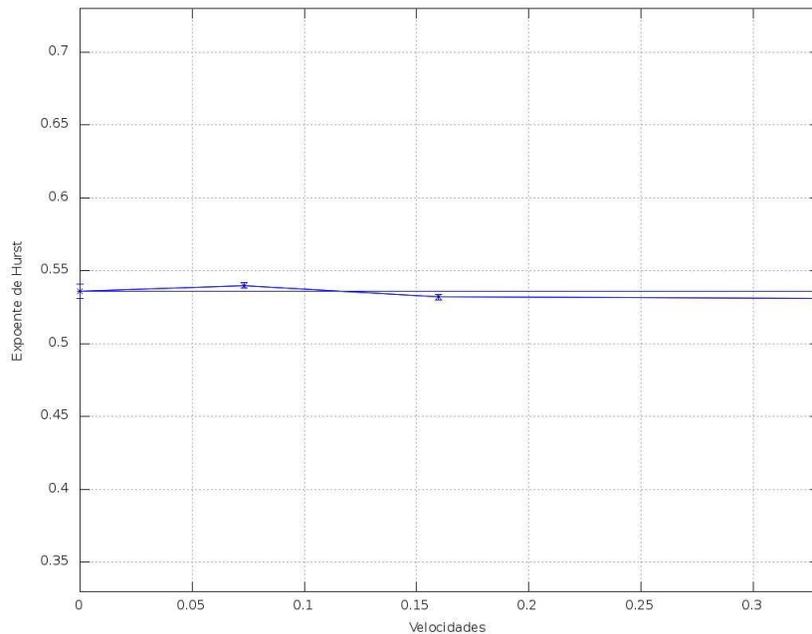


Figura 5.23: Gráfico com os valores resultantes das análises estática e dinâmica da amostra de aço

da amostra. A preparação do aço com a retífica produz um acabamento mais uniforme do que com a plaina usada para preparar o alumínio.

Observando o gráfico da figura 5.16 poderia-se dizer que para este acabamento da superfície H estaria muito próximo da região de saturação, conforme discutido anteriormente.

Um resultado muito importante neste estudo é que para uma dada velocidade da amostra, H é praticamente constante para uma superfície uniforme. Tal comportamento faz vislumbrar sua aplicação para detectar defeitos com superfícies em movimento. Aborda-se este assunto na próxima seção.

5.4 Análise de Defeitos

Nas próximas subseções são apresentados os resultados das análises das regiões com defeitos das amostras. Inicialmente são analisados os registros estáticos e posteriormente os dinâmicos, sendo que ao fim é feita uma comparação dos resultados nas duas situações. Os resultados são discutidos posteriormente.

5.4.1 Análise Estática das Regiões com Defeito

Na figura 5.24, são apresentados cinco padrões de speckle típicos correspondendo às imagens 4(sem defeito); 9(com defeito); 10(sem defeito); 11(com defeito) e 13(sem defeito) do gráfico da figura 5.25. Como pode ser visto, as imagens com e sem defeitos são absolutamente diferentes.

O gráfico da figura 5.25 retrata o resultado da análise da amostra de alumínio com 20 fotos, com defeitos inseridos. No eixo vertical os valores de H e no eixo horizontal as respectivas imagens.

Este resultado está de acordo com o esperado, pois as regiões sem defeito mantém o valor de H obtido anteriormente e percebe-se um aumento significativo de H para as regiões com defeito. Calculado o \overline{H} para as regiões sem defeitos os resultados obtidos foram: $\overline{H} = 0,597$ com desvio padrão $S = 0,005$. Considerando o erro estatístico, tem-se que $\overline{H} = 0,597 \pm 0,001$. Como pode ser observado o valor de H para as regiões com defeitos é superior à média para as regiões sem defeitos cerca de 148 vezes o desvio padrão da média, mostrando a segurança do método, ou seja, o método empregado detecta de forma segura os defeitos introduzidos na amostra.

Fazendo o mesmo procedimento para a amostra de aço, observa-se o mesmo comportamento. Na figura 5.26, são apresentados cinco padrões de speckle típicos referentes à imagem 8(sem defeito); imagem12(com defeito); imagem 14(sem defeito); imagem 16(com defeito) e imagem 18(sem defeito) da figura 5.27. O comportamento observado é o mesmo apresentado pela amostra de alumínio, conforme o esperado.

O gráfico da figura 5.27 apresenta o resultado da análise da amostra de aço com 26 fotos. No eixo vertical os valores de \overline{H} e no eixo horizontal as respectivas imagens.

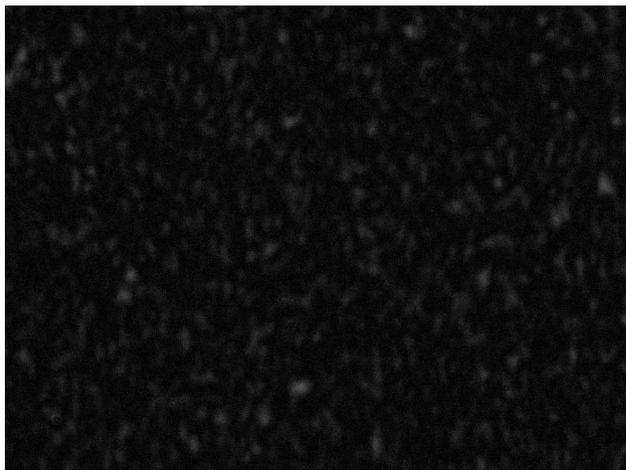
O valor de \overline{H} para a região com defeitos teve como resultado $\overline{H} = 0,536$ com desvio padrão $S = 0,005$. Considerando o erro estatístico, tem-se que $\overline{H} = 0,5360 \pm 0,0009$.

Da mesma forma como observado para a amostra de alumínio comercial, o valor de H para regiões com defeito ficou muito acima da média para as regiões sem defeitos(142 vezes o valor do desvio padrão).

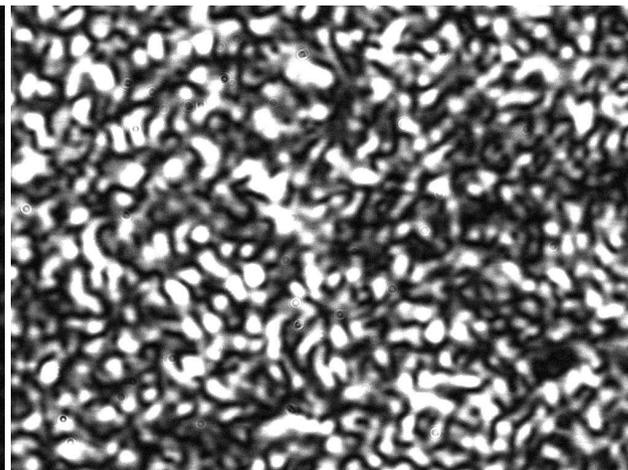
A brusca variação dos expoentes de Hurst, observados nos gráficos, é em função dos defeitos introduzidos.

5.4.2 Análise Dinâmica das Regiões com Defeito

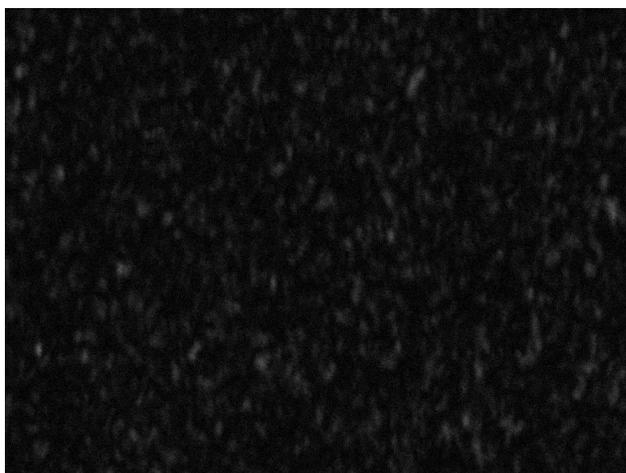
Nesta subseção são apresentadas as análises dos resultados da utilização do método do expoente de Hurst para as amostras em deslocamento, nas regiões com defeitos.



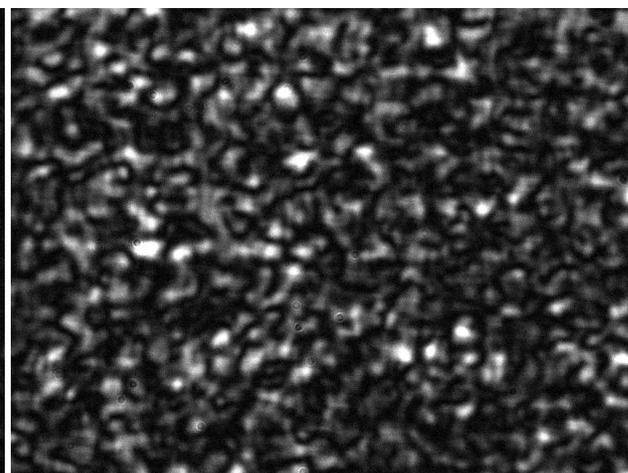
(a) Foto 4: região sem defeito



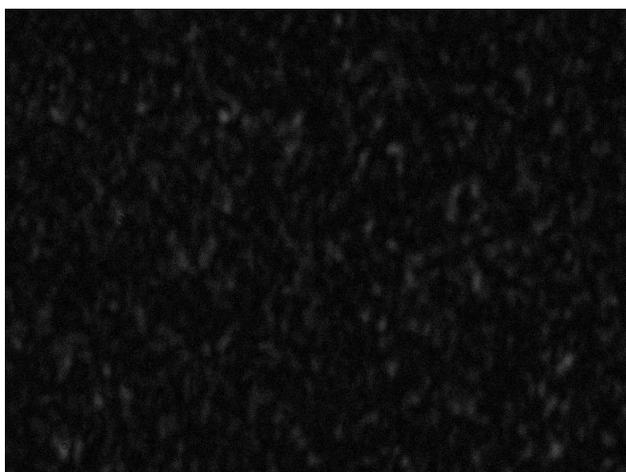
(b) Foto 9: região com defeito



(c) Foto 10: região sem defeito



(d) Foto 11: região com defeito



(e) Foto 13: região sem defeito

Figura 5.24: Fotos da amostra de alumínio com e sem defeitos.

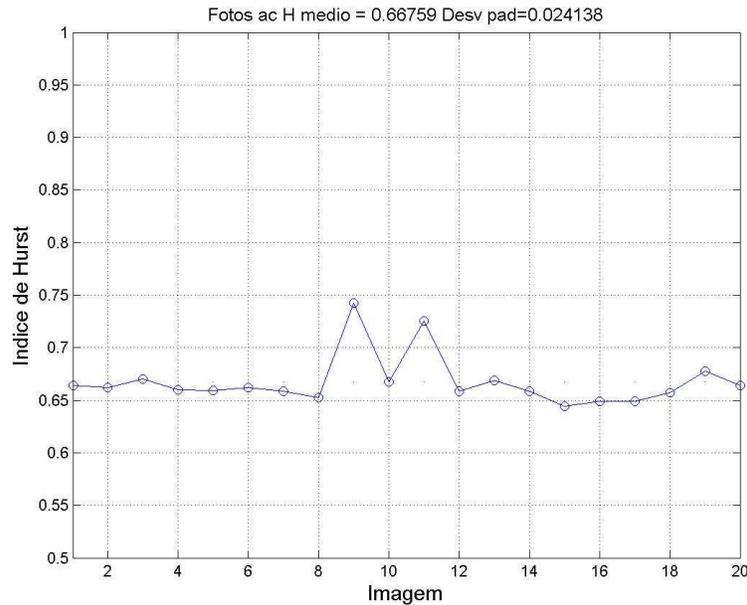
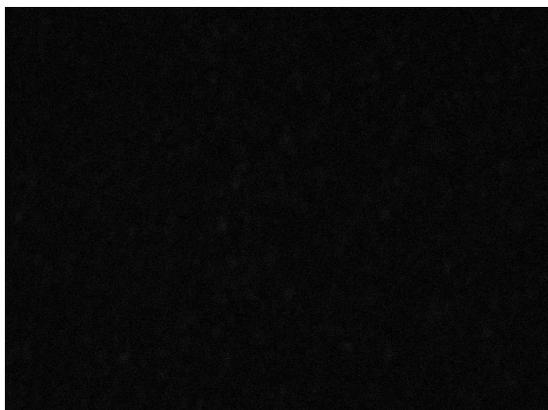


Figura 5.25: Gráfico da amostra de alumínio, com defeitos

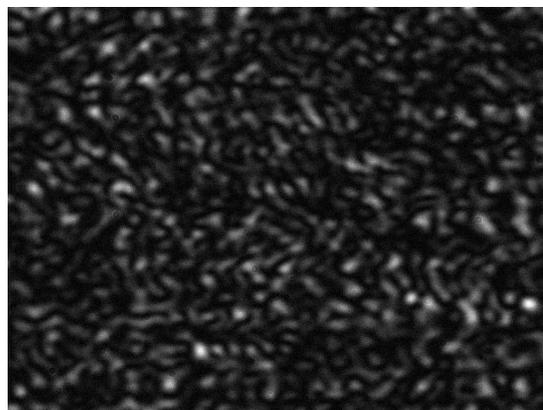
O gráfico da figura 5.28 refere-se ao resultado da análise da amostra de alumínio, na região com defeitos, na velocidade V_1 . No eixo vertical são lidos os valores de H e no eixo horizontal as posições dos defeitos na amostra, em cm. Foram analisados 2200 quadros.

A linha sólida indica o valor médio para as regiões sem defeitos ($\bar{H} = 0,650$). Observa-se os valores de H muito acima do valor médio em virtude dos defeitos introduzidos. O primeiro defeito, medindo-se a largura a meia altura, tem uma extensão de $0,47\text{cm}$, aproximadamente, com um valor de pico de $\bar{H} = 0,75$. Lembrando que o valor medido com o paquímetro foi de $0,50\text{cm}$, percebe-se que as medidas estão em excelente acordo. Para o segundo defeito a medida, pelo gráfico, foi de $0,29\text{cm}$ e de $0,30\text{cm}$ com o paquímetro, mostrando novamente excelente acordo.

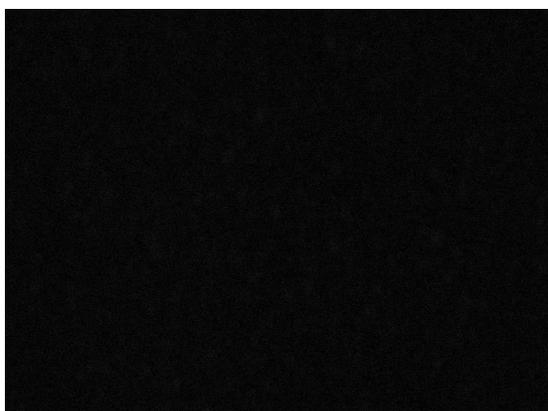
No gráfico da figura 5.29, observa-se o resultado para a análise da amostra de alumínio com defeito, na velocidade V_2 . Foram analisados 2250 quadros. No eixo vertical os valores de H para cada quadro e no eixo horizontal os valores das posições na amostra, em cm. O tamanho da amostra analisada é 10cm . A linha sólida indica o valor médio de H ($\bar{H} = 0,597$) para a amostra sem defeitos, nesta velocidade. Observa-se, também, os dois picos de \bar{H} muito acima do valor médio, justamente nas posições dos defeitos. O primeiro defeito tem um valor de pico para \bar{H} de $0,75$. A largura medida a meia altura, no gráfico é de $0,41\text{cm}$. O segundo defeito tem um valor de pico para \bar{H} em, aproximadamente, $0,75$. A largura deste defeito é de $0,32\text{cm}$. Observando que as medidas com o paquímetro foram de $0,50\text{cm}$ para o primeiro defeito e de $0,30\text{cm}$ para o segundo defeito, conclui-se que as medidas continuam sendo muito próximas.



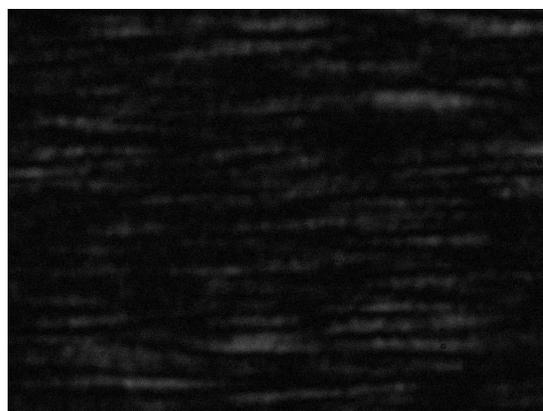
(a) Foto 8: região sem defeito



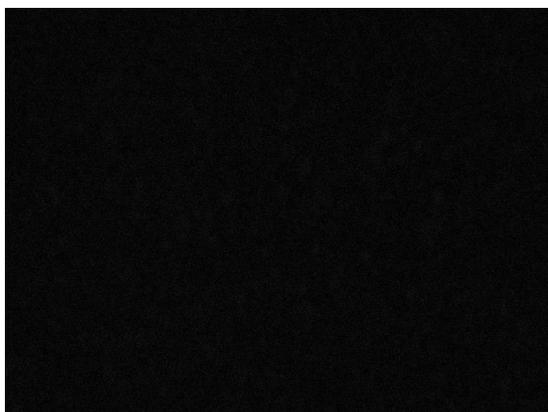
(b) Foto 12: região com defeito



(c) Foto 14: região sem defeito



(d) Foto 16: região com defeito



(e) Foto 18: região sem defeito

Figura 5.26: *Fotos da amostra de aço com e sem defeitos*

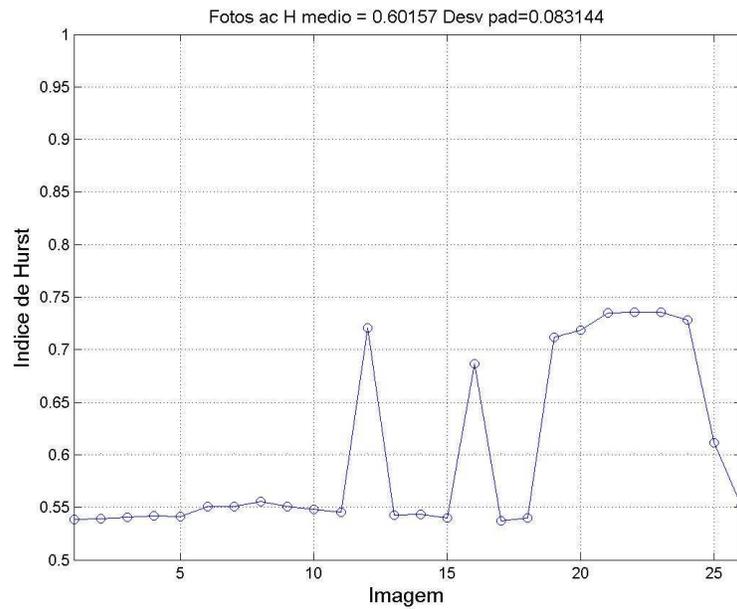


Figura 5.27:
Gráfico da amostra de aço com defeito

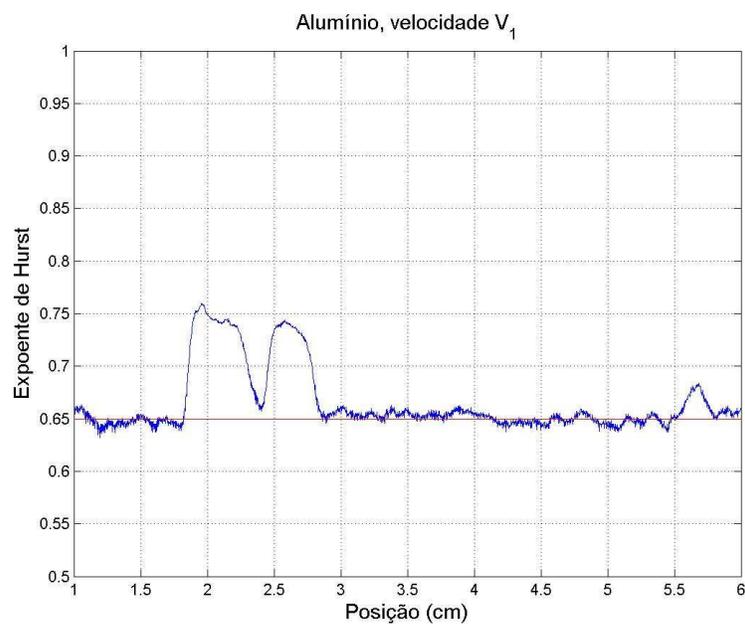


Figura 5.28: Gráfico da amostra de alumínio com defeito, velocidade V_1

No gráfico da figura 5.30, tem-se os resultados para a análise da amostra de alumínio filmada na velocidade V_3 , com um total de 1000 quadros capturados.

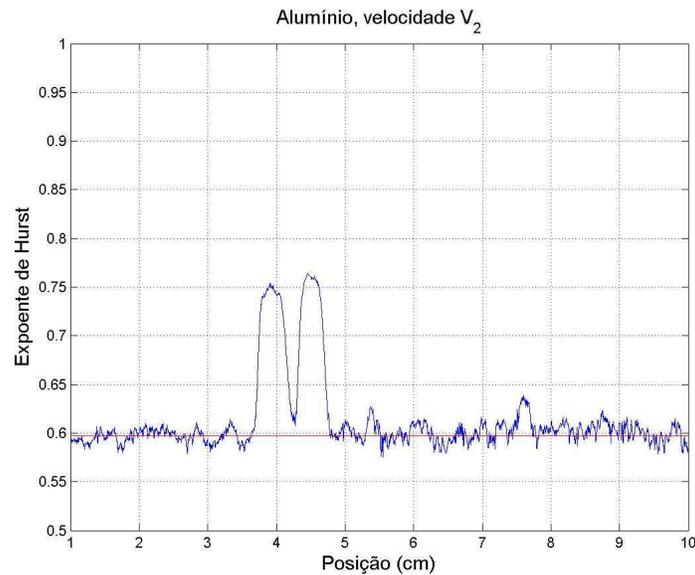


Figura 5.29: Gráfico a amostra de alumínio com defeito, velocidade V_2

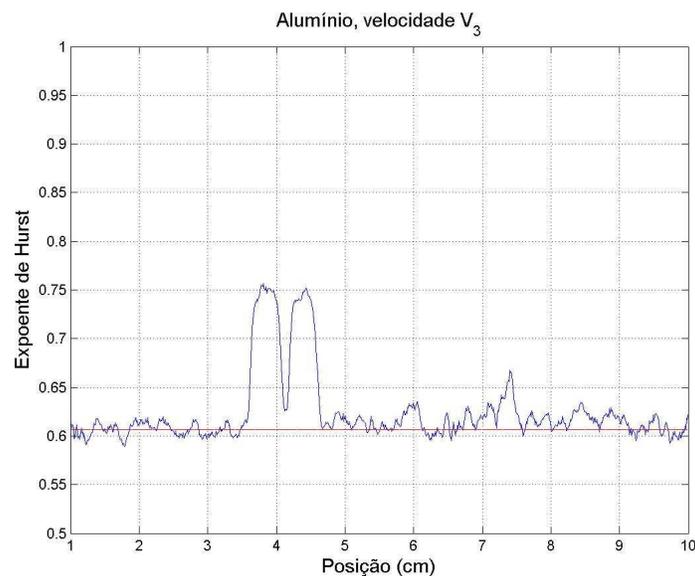


Figura 5.30: Gráfico da amostra de alumínio com defeito, velocidade V_3

A linha contínua representa o valor médio encontrado para a região sem defeitos ($\bar{H} = 0,607$). O primeiro defeito, apresenta um valor de $\bar{H} = 0,75$, com uma extensão medida na largura média do gráfico de $0,44\text{cm}$. O segundo defeito apresenta um valor para $\bar{H} = 0,75$, com uma largura de $0,37\text{cm}$. Constata-se que também nesta velocidade a precisão continua muito boa.

Os valores de posições encontrados são diferentes para a velocidade V_1 e as velocidades V_2 e V_3 , tendo em vista que o tamanho da amostra para a velocidade V_1 é de 6cm e para as demais velocidades 10cm , ou seja, mudou-se o referencial. Contudo vale destacar que

o tamanho do defeito esteve bem próximo dos valores obtidos diretamente na peça, para as diferentes velocidades.

Agora são apresentados os resultados para a peça de aço. Como descrito na seção 5.1 (preparação da amostra) a peça de aço apresenta três defeitos que foram evidenciados no estudo estático da seção 5.4.

O gráfico da figura 5.31 é resultado da análise da amostra de aço na velocidade V_1 ,

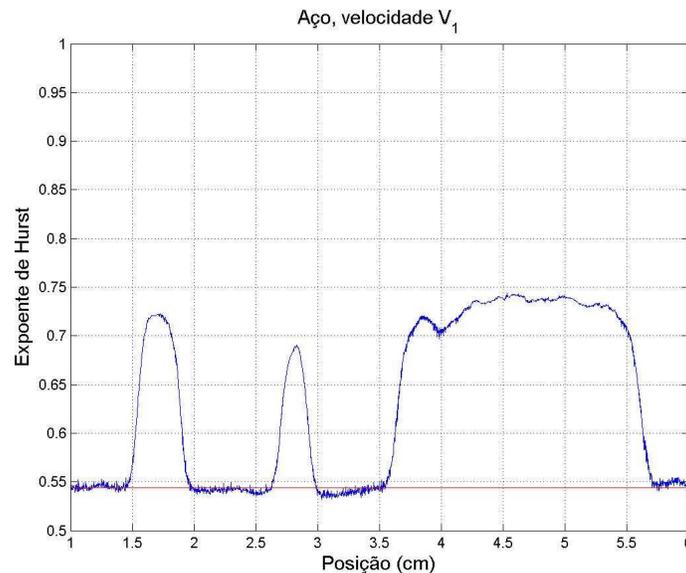


Figura 5.31: *Gráfico a amostra de aço com defeito, velocidade V_1*

sendo o tamanho da amostra 6cm . No eixo vertical os valores de \overline{H} e no eixo horizontal as posições na amostra em cm.

A linha contínua representa o valor médio de H , $\overline{H} = 0,544$. Observa-se três valores fora dos padrões que correspondem aos defeitos introduzidos, sendo que o primeiro defeito apresentou um valor para $\overline{H} = 0,73$, com uma largura de $0,32\text{cm}$. O segundo defeito tem uma largura de $0,2\text{cm}$, com pico de \overline{H} no valor de $0,68$. O terceiro defeito tem uma largura de $2,0\text{cm}$ e com um valor máximo de \overline{H} em $0,75$.

A medida direta da largura destes defeitos com um paquímetro resulta em $0,2\text{cm}$ para o primeiro defeito, $0,1\text{cm}$ para o segundo e $2,0\text{cm}$ para o terceiro defeito. Observa-se que os resultados medidos pelo expoente de Hurst estão em bom acordo com as medidas diretas e verifica-se que para a amostra de aço esta técnica também é capaz de apontar defeitos com uma boa precisão.

O gráfico da figura 5.32 é resultado da análise da amostra de aço na velocidade V_2 ,

sendo o tamanho da amostra 10cm . No eixo vertical os valores de \overline{H} e no eixo horizontal as posições na amostra em cm .

O valor médio para esta velocidade, na região sem defeito, representado pela linha

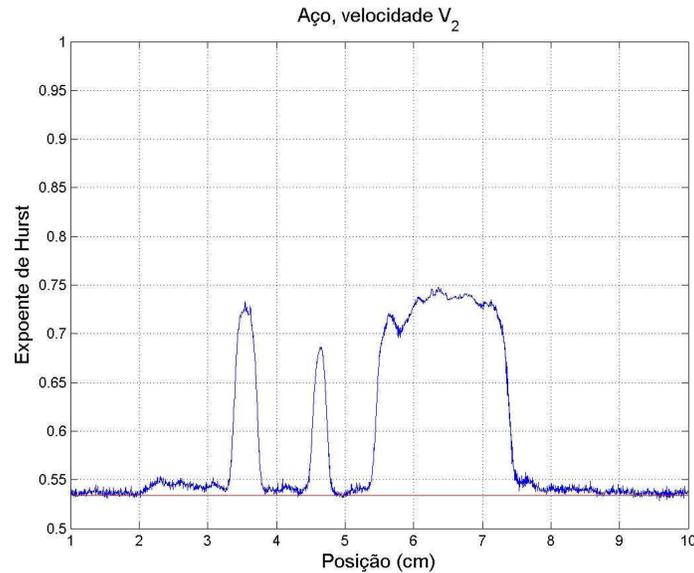


Figura 5.32: figure
Gráfico a amostra de aço com defeito, velocidade V_2

sólida, é de $\overline{H} = 0,534$. Neste gráfico observa-se também os três os três defeitos de forma nítida. O primeiro defeito tem uma largura $0,31\text{cm}$ com pico do expoente \overline{H} em $0,73$. O segundo defeito tem uma largura de $0,2\text{cm}$ com pico do expoente \overline{H} em $0,68\text{cm}$ e por fim o terceiro defeito tem uma largura de $2,0\text{cm}$ com pico máximo para o \overline{H} em $0,75$. Novamente, observa-se muito boa concordância com a medida direta da largura do defeito também para a velocidade V_2 .

Os resultados para a velocidade V_3 são mostrados no gráfico da figura 5.33, sendo o tamanho da amostra 10cm .

O valor médio para a região sem defeitos, obtido para esta velocidade é de $\overline{H} = 0.531$. O primeiro erro, medido como todos os anteriores na largura média do gráfico, apresenta uma largura de $0,32\text{cm}$, com pico de \overline{H} em $0,73$. Para o segundo defeito, a largura medida foi de $0,23\text{cm}$ com um pico de \overline{H} em $0,67$. Por fim o terceiro defeito apresenta uma largura de $1,93\text{cm}$ com pico máximo para \overline{H} em $0,75$. Novamente o acordo com as medidas diretas é muito bom, indicando que método funciona bem para o intervalo de velocidades utilizado.

Observa-se que as análises das velocidades V_2 e V_3 apresentam as mesmas posições para os defeitos em ambas as amostras já que o tamanho considerado é o mesmo (10cm). Já para a amostra na velocidade V_1 as posições são diferentes das demais tendo em vista

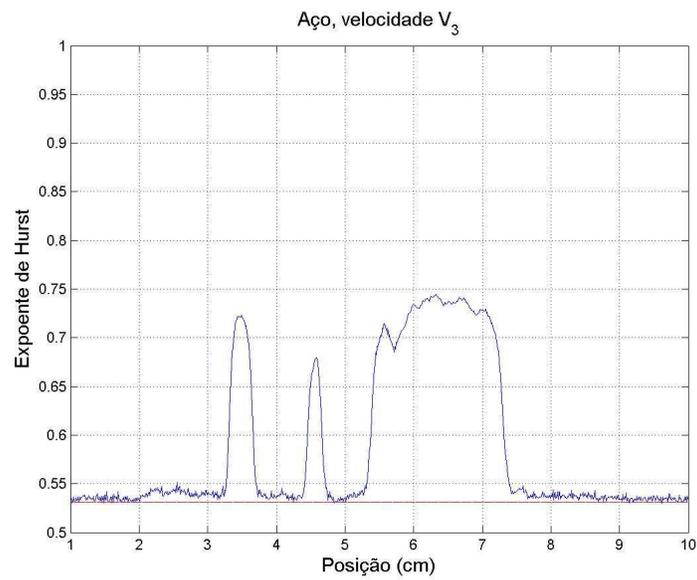


Figura 5.33: Gráfico a amostra de aço com defeito, velocidade V_3

a região de amostragem ser diferente (6cm). Em relação ao expoente de Hurst e desvios padrão, os valores encontrados foram bem próximos em todas as situações. Isto demonstra que o método utilizado pode ser ajustado à velocidade adequada para diferentes tipos de operações.

Capítulo 6

Conclusões e Perspectivas

Neste trabalho estuda-se o uso do expoente de Hurst calculado a partir de uma imagem digital de um padrão de speckle gerado por uma superfície rugosa em movimento, iluminada por uma luz laser.

No capítulo 4 revisita-se o estudo da referência [7], porém diminuindo a intensidade da luz laser incidente. Neste trabalho os autores iluminaram a amostra com intensidade do laser imediatamente abaixo do valor de saturação. Foi mostrado que \overline{H} crescia com a rugosidade e esta variação foi analisada a partir de um ajuste linear. Nesta dissertação observa-se também o aumento de \overline{H} com a rugosidade, porém com ajuste de um polinômio de grau 3. Com isto verificou-se que para utilizar esta técnica como uma medida direta da rugosidade, é preciso observar o melhor ajuste para se obter a Ra (rugosidade média).

Em seguida, apresenta-se no capítulo 5 um estudo inédito, que é a obtenção de H com as superfícies em movimento com diferentes velocidades. Inicialmente, utiliza-se duas amostras (aço e alumínio), com acabamento controlado e rugosidades conhecidas, medidas através perfilômetro óptico. Estudou-se, portanto a dependência de \overline{H} com a velocidade de cada amostra. Foi observada uma variação muito pequena de \overline{H} com a velocidade.

Em seguida, foram introduzidos defeitos nas amostras, que consistiram em ranhuras transversais. Com estes defeitos introduzidos, foi feito um estudo das amostras de forma estática. Os expoentes de Hurst encontrados então mostraram valores bem acima da média em comparação com as regiões sem defeito. Tendo esta confirmação prosseguiu-se para o experimento em velocidades variadas. A diferença dos valores de Hurst obtidos para as regiões defeituosas foi considerada desprezível em relação aos valores encontrados no estudo estático, demonstrando que a dinâmica introduzida não esconde os defeitos na amostras, pelo contrário as dimensões dos defeitos introduzidos foram confirmadas para todas as velocidades.

Como perspectivas, tem-se a possibilidade de testar o método em local de produção fim realizar o controle de qualidade. Também é possível determinar a medida da rugosidade, através a calibração das curvas de ajuste.

Referências

- [1] Hurst H.E, Black R.P., Simaika Y.M. Long Term Storage- An Experimental Study
- [2] Steeb W. The Non Linear Workbook, World Scientific, 2001
- [3] Paiva Jr. R. D., Muratsumo M., Desenvolvimento de um Rugosímetro A Laser, Revista de Física Aplicada e Instrumentação, vol 17, número 2, junho 2004
- [4] Whitehouse D. J. Surface Characterization and Roughness Measurement in Engineering, University of Warwick, Photomechanics , Topics App. Phys. 77, 413-461,2000
- [5] Whitehouse, Surface Metrology, Review Article, University of Warwick, Meas.Sci . Technol, 8(1997) 955-972.
- [6] Speckle Metrology , edited by Sirohi, Rajpal S. , Indian Insitute of Technology, Madras , India, 1993
- [7] Sampaio A. L., Lobão D. C., Nunes L. C. S., Santos, do P.A. M., Silva L., Huguenin L. A. O. Hurst Exponent Determination for Digital Speckle Patterns in Roughness Control of Metallic Surfaces, Optics and Lasers in Engineering 49(2011) 32-35
- [8] Meireles, J.B., Silva,L., Caetano D.P., Huguenin J.A.O. Effect of metalic surface roughness on the speckle patterns formation at diffraction plane
- [9] Kayahan E, Oktemb H, Hacizade F, Nasibov H, Gundogdu O. Measuremant of roughness of metals using binary speckle image analysis. Tribol Int 2010;43:307
- [10] Wong PL, Li KY. In Process measurement on moving surfaces. Opt Laser Technol 1999; 31:453
- [11] <http://www.britannica.com/ebchecked/topic/596188/times-series>
- [12] Koutsoyiannis D. Climate change, Hurst phenomenon and hydrologic statistics, Department of Water Resources, Faculty of Civil Enginnering, National Technical University
- [13] Wang Yu-Zhi, Wang Ren-Qing, Jing-Su, Reng Xiao-Xia Application of the Hurst Exponent in Ecology,article, Computers and Mathematics with Applications 61(2011) 2129-2131
- [14] Nickolaenko, A.P. Application of the Hurst Exponent in the analysys of Natural ELF Eletromagnetic Noise- , Usikov Institute of Radio- Physics and Eletronics, Ukrainian National Academy of Sciences,2000
- [15] Martinis M., Knežević A. Changes in the Hurst Exponent of Heart Beat Intervals During Phisycal Activities

-
- [16] De Petrillo P.B., Speers d'Ármond, Rutmman U.E., Determining the Hurst Exponent of Fractal Time Series and its Application to Eletrocardiographic Analysis. *Computers in Biology and Medicine* 29 (1999) 393-406.
 - [17] Serrano R.C., Análise da Viabilidade do Uso do Coeficiente de Hurst e da Lacunaridade no Auxílio ao Diagnóstico Precoce de Patologias da Mama, Dissertação (Mestrado em Computação), UFF, 2010
 - [18] Qian B., Rasheed K. Hurst Exponent and Financial Market Predictability, University of Georgia, Department of Computer Science University of Georgia
 - [19] Especificações geométricas do produto(GPS)- Rugosidade: Método do perfil- Termos, definições e parâmetros de rugosidade- NBR ISSO 4287/ SET 2002
 - [20] Khalifa O.O., Densibali A.,Faris W. ,Image Processing for Chatter Identification on Machining Process, *Int J Adv Manuf Technol*(2006) 31:443-449
 - [21] Goodman, J. W. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* Version 8, 2006.

Capítulo 7

Apêndice

O ambiente utilizado para os cálculos e traçar gráficos foi o MatLab®. Este ambiente é uma linguagem computacional de alto-nível para computação científica e visualização de dados montado em torno de um ambiente interativo. A grande vantagem de um sistema interativo é a que os programas podem ser testados e avaliados rapidamente, permitindo ao usuário se concentrar mais nos princípios do problema em si e menos na programação. Desde que não há necessidade de compilação e ligação após cada correção, o desenvolvimento torna-se mais rápido.

Entre as vantagens sobre outras linguagens computacionais, pode-se destacar:

- O grande número de funções disponíveis;
- O extensivo apoio para gráficos que proporciona a plotagem de dados com poucas linhas de comando;
- Não há necessidade de declarar os tipos de objetos;
- A sintaxe é simples e de fácil entendimento.

Como exemplo, a figura 7.1 apresenta um código completo utilizado nesta dissertação, para o cálculo do expoente de Hurst do filme da amostra de aço, na detecção de defeitos:

Para o controle da câmera durante os experimentos em laboratório, foi utilizada a ferramenta *imaqtool*. Esta ferramenta, automaticamente, detecta o tipo de câmera sendo utilizada e seus recursos. O controle da câmera permite que sejam realizadas filmagens com a quantidade de quadros determinada pelo usuário e desta forma é possível tanto a filmagem integral como tirar fotos individuais.

```

clear all; close all; clc;
FileName=input('Entre com o nome do arquivo: ','s');
tamAmostra=input('Entre com o tamanho da amostra em
cm: ');
FilmeObj=mmreader(FileName);
nrFrames=FilmeObj.NumberOfFrames;

for k = 1:nrFrames
    mov=aviread(FileName,k);
    series=mov.cdata;
    [l c]=size(series);
    for i=1:c
        coluna=double(series( :,i));
        med=mean(coluna);
        dif=(coluna-med);
        dif_acum=cumsum(dif);
        R=(max(dif_acum)-min(dif_acum));
        S=std(coluna);
        RS=R./S;
        H=log10(RS)./log10(l);
        H_vet1(i)=H;
    end
    H_tot1(k)=mean(H_vet1);
end
H_med1=mean(H_tot1);
for i=1:nrFrames
    pos(i)= (tamAmostra * i)/ nrFrames;
end
x=1:nrFrames;
plot(pos,H_tot1,pos,H_med1,'--r');
axis([1,tamAmostra,0.5,1]);
ylabel('Expoente de Hurst','fontsize',14)
xlabel('Posição (cm)','fontsize',14)
title(['\fontsize{14}{Alumínio, velocidade V_3}']);
grid
pat='a(\w*)i';
name=regexp(FileName,pat,'jpg');
saveas(gcf,name);

```

Figura 7.1: Algoritmo para cálculo do expoente de Hurst