



ANDERSON RODRIGO MIRA

**A DESCRIÇÃO DA FORMA DOS GRÃOS DE
SPECKLE NA SECAGEM DE ADESIVO
EPÓXI POR EXPANSÃO EM SÉRIES DE
FOURIER**

LAVRAS-MG

2016

ANDERSON RODRIGO MIRA

**A DESCRIÇÃO DA FORMA DOS GRÃOS DE *SPECKLE* NA SECAGEM
DE ADESIVO EPÓXI POR EXPANSÃO EM SÉRIES DE FOURIER**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós - Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Processamento Digital de Imagens, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador:

Prof. Dr. Héctor Jorge Rabal

Coorientador:

Prof. Dr. Roberto Alves Braga Jr.

LAVRAS-MG

2016

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Mira, Anderson Rodrigo.

A descrição da forma dos grãos de *speckle* na secagem de adesivo epóxi por expansão em Séries de Fourier / Anderson Rodrigo Mira. – Lavras : UFLA, 2016.

82 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de Lavras, 2016.

Orientador(a): Hector Jorge Rabal.

Bibliografia.

1. Descritores de Fourier. 2. Speckle Laser Dinâmico. 3. Análise de Bordas. 4. Análise de Imagens. 5. Transformada de Fourier. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

ANDERSON RODRIGO MIRA

**A DESCRIÇÃO DA FORMA DOS GRÃOS DE *SPECKLE* NA SECAGEM
DE ADESIVO EPÓXI POR EXPANSÃO EM SÉRIES DE FOURIER**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós - Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Processamento Digital de Imagens, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 25 de fevereiro de 2016.

Dr. Adilson Machado Enes	UFS
Dr. Héctor Jorge Rabal	UFLA
Dr. Jose Alberto Casto Nogales Vera	UFLA
Dr. Marcelo Trivi	UNLP
Dr. Roberto Alves Braga Jr.	UFLA

Prof. Dr. Héctor Jorge Rabal
Orientador
Prof. Dr. Roberto Alves Braga Jr.
Coorientador

**LAVRAS-MG
2016**

*À todas as pessoas que nunca perdem o humor, o amor e o entusiasmo diante dos
absurdos da vida.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força nos momentos de fraqueza.

À minha família pelo apoio incondicional e compreensão, em especial à minha mãe, Maria Rodrigues Neves Mira (*in memoriam*), que me guia com seu eterno amor, ao meu pai, Marcos Mira, por ser meu porto seguro e à minha tia-mãe, Antônia Mira, por mostrar que, apesar de tudo, devemos sorrir para a vida mesmo que ela insista em nos fazer chorar.

À Universidade Federal de Lavras por minha formação acadêmica.

Ao meu orientador Hector Jorge Rabal e meu coorientador Roberto Alves Braga Júnior pela grande ajuda, atenção e paciência.

Ao Ciop (Centro de Investigações Ópticas - Argentina) pela ótima recepção e disponibilizar o espaço para desenvolver parte dos estudos.

Ao CEDIA (Centro de Instrumentação Aplicada à Agropecuária - UFLA) pelo espaço cedido para desenvolvimento e análise do trabalho.

À Nelly Cap (Ciop) pela enorme ajuda com o software Matlab.

Ao Eduardo Grumel (Ciop) pela ajuda com a captura das imagens do adesivo epóxi.

À Ellen Contado pelos conselhos que me motivaram a não desistir!

À CAPES pelo apoio financeiro.

Às secretárias do Departamento de Engenharia, Fernanda Botelho e Helem Carmo, por estarem sempre dispostas a ajudar no que for preciso para o desenvolvimento do trabalho.

A todos os meus amigos por estarem ao meu lado, em especial à Jacinta Veloso de Carvalho pelas sinceras risadas e ótimos conselhos e à Rita Teske pelas valiosas correções do texto.

Muitíssimo Obrigado!

"Quando tudo parece terminado, surgem novas forças.
Isto significa que você está vivo".

Franz Kafka

RESUMO

O fenômeno do *speckle* laser dinâmico tem sido considerado como uma técnica óptica de grande sensibilidade capaz de monitorar pequenos movimentos em superfícies iluminadas pelo laser. A modificação da forma e da claridade dos grãos *speckle* são notados devido à alteração de posição dos diversos dispersores de luz presentes no material monitorado. E estas modificações de forma e claridade nos grãos, portanto, são utilizadas por diversos meios para quantificar indiretamente o grau de mudança associando-o à atividade de um material. Nesse contexto, o presente trabalho foi proposto para quantificar diretamente a modificação da forma dos grãos *speckle* ao longo de um período, utilizando descritores de Fourier como índice. Para as análises foi utilizada uma amostra de cola/adesivo epóxi submetida à iluminação laser durante 1024 segundos sob iluminação de um laser HeNe e imagens capturadas por uma câmera CCD. Os resultados mostraram que os descritores de Fourier se modificam em relação à modificação temporal das formas dos grãos. Nos primeiros momentos da secagem, as modificações dos descritores de Fourier foram intensas, especialmente nos dois primeiros descritores, sendo que as modificações se reduziram e paralisaram a medida em que a cola secava.

Palavras-chave: Descritores de Fourier, *Speckle Laser* Dinâmico, Análise de Bordas, Análise de Imagens, Transformada de Fourier, Reconstrução de Bordas, Adesivo Epóxi.

ABSTRACT

The phenomenon known as dynamic laser speckle is used as a sensitive technique to monitor tiny movements in surfaces illuminated by a laser. The changes in the speckle pattern, in shape and clarity, are due to the movement of the scatterers of light and they are indirectly associated to the activity of a monitored material. In this context, this work aimed to present a direct way to quantify the movement by means of the shape monitoring of the speckle grains using the Fourier descriptors. It was used an epoxy glue during a drying process of 1024 seconds. The glue was illuminated by a HeNe laser and the images acquired by a CCD camera. The results showed that the Fourier descriptors follow the change in the grains along time, and that the first descriptors, particularly the first two, change more intensively their values than the last ones. The changes were more intense in the first moments of the drying process than when the glue was completely dry.

Keywords: Fourier descriptors, Speckle Laser Dynamic, Edge Analysis , Analysis Images , Fourier transform , Edge Reconstruction , Adhesive Epoxy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Imagem speckle da cola epoxi.	20
Figura 2	Arranjo experimental para captura de imagens <i>speckle</i> (MOREIRA, 2014).	21
Figura 3	Transformada (\mathfrak{F}) e Antitransformada (\mathfrak{F}^{-1}) de Fourier. Adaptado de Figueiredo (2012).	24
Figura 4	Exemplos de similaridade de forma baseada em contorno e região (BOBER, 2001).	26
Figura 5	Representação de uma fronteira digital (adaptada de Gonzalez e Wood, 2000).	27
Figura 6	Exemplos de formas em que descritores com base em contorno são aplicáveis (BOBER, 2001).	29
Figura 7	(a) Vizinhaça de 4 e (b) Vizinhaça de 8.	31
Figura 8	Vizinhaça-de-26 (PINTO, 2001).	31
Figura 9	Representação geométrica de vetores.	32
Figura 10	Soma de vetores	33
Figura 11	Grupo funcional epóxi (MARK et al. , 1986; CARNEIRO, 2010).	35
Figura 12	Imagens originais (a) 1.tif (b) 2.tif e (c) 3.tif.	37
Figura 13	Imagens com ajuste <i>threshold</i> 162.	38
Figura 14	Análise e reconstrução de descritores de Fourier de bordas de imagem binária (Zahn; Roskies, 1972).	41
Figura 15	Variação do grão de <i>speckle</i> no tempo em relação a um ponto (nove primeiras imagens da sequencia).	43
Figura 16	Variação do grão de <i>speckle</i> no tempo em relação a um ponto (nove imagens centrais da sequência).	44
Figura 17	Variação do grão de <i>speckle</i> no tempo em relação a um ponto (nove últimas imagens da sequencia).	45
Figura 18	Representação das bordas de todos os grãos das nove primeiras imagens capturadas da cola epóxi.	46
Figura 19	Bordas selecionadas para análise das três primeiras imagens de cada parcela.	46
Figura 20	Descrição de um grão.	47
Figura 21	Descrição do grão da Figura 20 pelo ponto de vista do Teorema de Nyquist.	48
Figura 22	Modificação temporal do grão 14, considerado ótimo para análises, sem anomalias aparentes.	50

Figura 23	Modificação temporal dos grãos 3 e 10, apresentando possível anomalia do grão 3 e grande diferença de tamanho ao longo da alteração do grão 10.	51
Figura 24	Representação da borda de um dos <i>frames</i> que continha o grão 3, as bordas analisadas pela rotina do MatLab foram as externas (como esperado), nesse caso, a anomalia seria o ponto dentro do grão, esse ponto foi desconsiderado.	51
Figura 25	Variação temporal das componentes dos 15 grãos.	54
Figura 26	Desvio-padrão das componentes dos grãos 1, 2, 3, 4, 5 e 6.	55
Figura 27	Desvio-padrão das componentes dos grãos 7, 8, 9, 10, 11 e 12.	56
Figura 28	Desvio-padrão das componentes dos grãos 13 e 14.	56
Figura 29	Desvio-padrão das componentes do grão 15.	57
Figura 30	Variação temporal das componentes dos grãos, com divisão de atividades oscilatórias.	58
Figura 31	Variação temporal das componentes dos grãos, excluídos os grãos de número 3 e 10, com alteração de escala e C_n com (a) $n \geq 4$ e (b) $n \geq 6$	61
Figura 32	Variação temporal das componentes dos grãos, excluídos os grãos de número 3 e 10, com alteração de escala e C_n com (a) $n \geq 8$ e (b) $n \geq 10$	62
Figura 33	Comportamento de cada uma das 14 componentes em 14 grãos analisados em relação à suas médias e desvios-padrão. Nos subgráficos, os eixos das abscissas são referentes ao tempo e nos gráficos maiores é referente às componentes.	65
Figura 34	Variação Média de Energia por duplas de <i>frames</i>	67
Figura 35	Desvio Padrão por duplas de <i>frames</i>	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Quantidade de frames analisados por grão.	49
Tabela 2	Cálculo do produto escalar de C_2 e C_3	52
Tabela 3	Valores da Média (μ) e Desvio-padrão (σ) da componente C_2 . . .	64
Tabela 4	Fragmento da tabela de dados de um dos grãos analisados. . . .	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	<i>Laser</i>	19
2.2	<i>Speckle Laser</i> Dinâmico	19
2.3	Séries de Fourier	21
2.4	Coefficientes de Fourier	23
2.5	Transformada de Fourier	23
2.6	Descritores	24
2.6.1	Descritores de Formas	25
2.6.2	Descritores de Fourier	28
2.7	Análise de bordas	29
2.7.1	Representação de curvas fechadas	29
2.8	Vizinhança de <i>pixels</i>	30
2.8.1	Produto Escalar	31
2.8.2	Particularidades de vetores	32
2.9	A cola/adeseivo epóxi	34
2.9.1	Resina epóxi	34
3	MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1	<i>Softwares</i> utilizados	36
3.2	Processamento das imagens	37
3.3	Seleção do ponto para a análise temporal e espacial	37
3.4	Seleção e separação das imagens	39
3.5	Descrição dos grãos de <i>speckle</i>	39
3.6	Variação Média de Energia	42
3.6.1	Modificação das formas dos grãos	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Análise da variação do grão de <i>speckle</i> no tempo	43
4.2	Descrição dos grãos de <i>speckle</i> via série de Fourier	45
4.3	Análise das componentes de grãos	47
4.3.1	Teorema de Nyquist	47
4.3.2	Modificação das componentes	48
4.3.3	Modificação das formas dos grãos	66
4.3.4	Reconstrução dos grãos	69
5	CONCLUSÃO	70
6	Trabalhos futuros	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1 INTRODUÇÃO

A transformada de Fourier tem se mostrado de grande utilidade em processamento de imagens digitais. A facilidade do uso dessa técnica se relaciona com a visão de imagens analisadas no domínio da frequência e a comodidade de usar técnicas de filtragens digitais mais simples.

Ao se falar de domínio da frequência logo vem a mente o conhecido Efeito Doppler, que consiste na sobreposição de ondas sonoras com frequências diferentes podendo ser analisado por um espectro de frequência.

A partir da transformada de Fourier pode-se obter dados importantes, como os chamados descritores de Fourier. Esses descritores podem ser explicados como uma maneira de descrever objetos por meio do uso de dados obtidos aplicando os cálculos da transformada de Fourier em dados previamente coletados, como por exemplo, soma de ângulos.

Os descritores de Fourier são uma coleção de valores de representação de formas. Zhao e Belkasim (2012) afirmam que os descritores de formas possuem enorme importância a ponto de desempenhar um papel essencial em análise de imagens. Existem dois tipos de descritores de formas: de região e de contorno, sendo que os de região provêm de uma visão global da imagem e os de contorno são formados por pontos mais restritos da imagem, ou seja, o contorno da imagem propriamente dito. Para Zhao e Belkasim (2012), os descritores de contorno são mais eficientes, nessa classe de descritores que se encaixam os descritores de Fourier.

Segundo Dalitz (2013), o uso de descritores de Fourier é um método poderoso de reconhecimento de formas bidimensionais, abrangendo uma grande variedade de descritores de formas sendo obtido pelo cálculo da transformada de

Fourier discreta de representações de contorno fechado.

Das imagens que podem ser usadas para a aplicação dos métodos dos descritores de Fourier pode-se destacar as imagens capturadas pela técnica *Speckle* ou *Biospeckle Laser* Dinâmico. Essa tecnologia consiste na iluminação de algum material biológico (*biospeckle*) ou não (*speckle*) por uma luz coerente (*laser*), tal objeto espalha essa luz de maneira aleatória produzindo um conjunto de imagens, capturadas por um tipo de câmera ou *scanner*, que se assemelham a "chuviscos" em preto e branco, como uma TV fora de sintonia (fora do ar). A essa aparência, Braga Jr. (2000), atribui-se o nome de granulado e que a princípio era considerado como ruído óptico que atrapalhava as pesquisas que utilizavam *lasers*, que até então eram realizadas, geralmente, por físicos. Freitas (2010) salienta que com o decorrer dos anos estes granulados mostraram grande potencialidade do ponto de vista da pesquisa.

Essas imagens são armazenadas e devidamente processadas para análises em várias áreas do conhecimento. Nos últimos tempos a metodologia *speckle* foi muito difundida em pesquisas nas ciências agrárias para análise metabólica, usando sementes e sêmen bovino, por exemplo. Esta técnica de análise se amplia cada vez mais no campo biológico devido ao fato de ser uma ferramenta não destrutiva e não invasiva dos materiais utilizados. Alves (2012) enfatiza esse ponto como virtude, pois, além de não necessitar de contato com o material a técnica possui grande sensibilidade se comparada aos processos convencionais, além de apresentar visualização imediata da atividade em tempo real.

Braga Jr.(2000), Costa (2009) e Alves (2012) destacam que o uso do *speckle* possui caráter automatizado, objetivo e economia de tempo.

Importante salientar que, de acordo com Kurenda, Adamiak e Zdunek (2012) e Zdunek e Herppich(2012) e Alves (2012), esse método é limitado quando

se trata da interpretação fisiológica/metabólica, pois, em muitas aplicações, não permite distinguir quais os processos fisiológicos que ocorrem na atividade observada na amostra.

Partindo das ideias apresentadas, este trabalho teve como objetivo geral o uso de descritores de Fourier para análise do *Speckle Laser* Dinâmico. O qual teve como ponto inicial a iluminação de uma alíquota de cola/adesivo epóxi. Especificamente, buscou-se analisar os descritores de Fourier para os grãos de *speckle* ao longo do tempo, isto é, fazer uma análise temporal da variação desses descritores e, através deles, reconstruir os dados destes grãos com o cálculo da Transformada Inversa de Fourier.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 *Laser*

Segundo Costa (2009), pesquisas relacionadas a fenômenos ópticos e processamento digital de imagens fundamentadas em visão de máquinas vêm crescendo de maneira representativa, isso se dá pela facilidade de manuseio e resultados importantes em diversas áreas do conhecimento.

Sabe-se, a princípio, que o *laser* é um feixe de luz; essa definição lógica nos remete ao estudo da óptica que, segundo Bagnato (2001), é um ramo da Física que se dedica a entender a origem e propagação da luz e, principalmente, sua interação com os materiais em geral.

Bagnato (2001) afirma que o *laser* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) é um instrumento eficaz em análises científicas e tecnológicas devido às suas propriedades únicas. Tais propriedades da luz *laser* estão relacionadas à quasi-monocromaticidade, direcionabilidade, intensidade e coerência do feixe.

2.2 *Speckle Laser Dinâmico*

Visto inicialmente como ruído que atrapalhava análises científicas (BRAGA JR., 2000) o *speckle* apresenta-se, atualmente, como uma ferramenta eficaz. Com auxílio do *laser* e processamentos adequados de imagem suas aplicações se estendem em várias áreas, por exemplo nas ciências agrárias pode ser utilizado para análise de sementes (BRAGA JR, 2000), viabilidade de sêmen animal (NASCI-MENTO, 2005; COSTA, 2009) e maturação de frutos (RABELO et al., 2005; PA-JUELO, 2003; NOBRE, 2008), na medicina pode-se usar essa técnica para estudo de fluxo sanguíneo cerebral (DUNN et al, 2001). Esses exemplos mencionados

são, comumente, conhecidos como *biospeckle*, esse termo se refere a técnica *speckle* restrita a materiais biológicos (BRAGA JR, 2000). Como exemplos do uso do *speckle* em materiais não biológicos tem-se o monitoramento de atividades de secagem de tinta em moeda (FREITAS, 2010) e de cola epóxi.

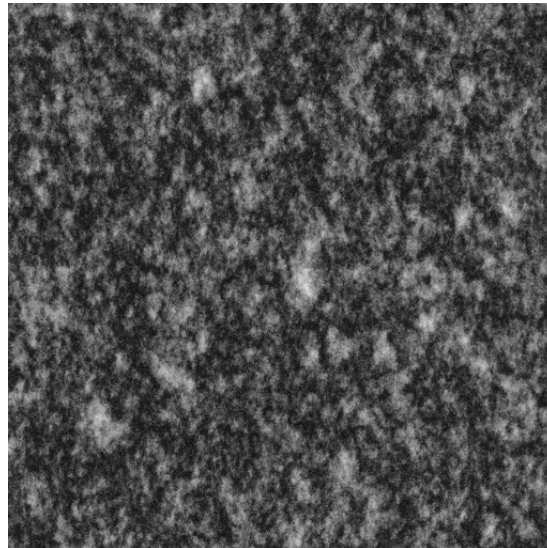


Figura 1 Imagem *speckle* da cola epoxi.

Um objeto iluminado por uma luz coerente (nesse caso a luz de um *laser*), espalha essa luz de maneira aleatória e isso ocorre devido a rugosidade e não absorção da iluminação por esse objeto (HUANG et al, 2012). Essa rugosidade, segundo Silva (2011), e o comprimento de onda utilizado são de mesma ordem de grandeza, por isso acontece tal fenômeno óptico. A essa interferência da luz dá-se o nome de "*padrão speckle*" ou, de maneira mais formal, segundo o princípio de Huygens, padrão intrínseco ao sistema.

As imagens *speckle* e/ou *biospeckle* são capturadas seguindo uma montagem experimental básica (PAIXÃO, 2009), formada por um computador, uma

câmera CCD (*charge-coupled device*) ou *scanner* e um emissor de luz *laser* (Figura 2).

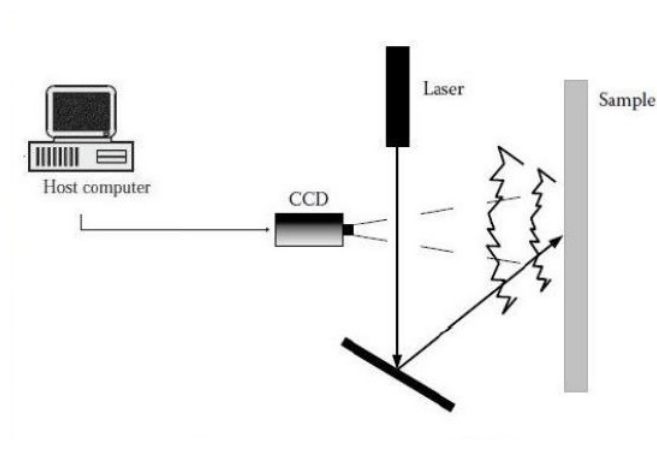


Figura 2 Arranjo experimental para captura de imagens *speckle* (MOREIRA, 2014).

2.3 Séries de Fourier

Muitos estudantes limitam os estudos das Séries ou Análises de Fourier às aplicações, geralmente, do ponto de vista da física. Os estudos desse assunto são introduzidos pelo estudo das equações do calor e da onda e suas teorias.

As Séries de Fourier, no ponto de vista tecnológico, permitiram desenvolvimento de tecnologias aplicadas a diversas áreas: como processamento digital de sinais, telecomunicações e teoria musical (FILHO, 2006). Na estatística, segundo Morettin e Toloí (2004), em análises de processos estocásticos em Séries Temporais o objetivo é aproximar funções do tempo por combinação linear de harmônicas, isto é, componentes senoidais através das Séries de Fourier.

Filho (2006) esclarece que representações por Série de Fourier não se limitam a fenômenos oscilatórios, mesmo que seja muito aplicada à análises de sons,

imagens, ondas eletromagnéticas, vibrações e notas musicais, tendo utilidade em outros fenômenos de naturezas diversas.

Figueiredo (2012) enfatiza as Séries de Fourier como funções expressas como séries de senos e/ou cossenos. Além disso, dadas condições iniciais deve-se analisar minuciosamente as condições de fronteira. No caso da condução de calor de uma barra de ferro, essas condições iniciais podem ser as temperaturas dadas T_1 e T_2 das extremidades da barra, isto é, $u(0,t) = T_1$ e $u(L,t) = T_2$. Sendo 0 a extremidade de comprimento inicial, L a extremidade de comprimento total e t o tempo analisado.

A série de Fourier pode ser apresentada de formas diferentes que possuem o mesmo objetivo e mesmo desenvolvimento matemático.

$$f(x) \sim \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (1)$$

Na equação (1), a função f é dada tal que $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ é periódica de período $2L$ (período fundamental de $\cos \frac{n\pi x}{L}$ é período para as demais funções *seno* e *cosseno* da série), sendo a expressão do lado direito a série de Fourier de f em um ponto x . Neste caso, valores conhecidos como coeficientes de Fourier podem ser calculados se, além da periodicidade, f for integrável e absolutamente integrável (FIGUEIREDO, 2012).

Nota-se que na equação (1) a expressão não foi apresentada como igualdade, em muitos casos f é igual a sua série de Fourier, mas aqui foi tomado um caso mais geral. Figueiredo (2012) esclarece tal afirmação, segundo o autor nem sempre essa igualdade ocorre e, além disso, enfatiza que a série de Fourier pode até divergir. A divergência de Séries de Fourier não é um tema muito comentado.

2.4 Coeficientes de Fourier

No somatório da representação matemática da série de Fourier, apresentada na sessão anterior, tem-se a_n e b_n , tais valores são conhecidos como coeficientes de Fourier e podem ser calculados da seguinte maneira (FIGUEIREDO, 2012):

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx, n \geq 0; \quad (2)$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx, n \geq 1. \quad (3)$$

O a_0 também possui uma fórmula especial, mas não é considerado como coeficiente, todavia seu valor é importante para o cálculo das Séries de Fourier:

$$a_0 = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) dx; \quad (4)$$

2.5 Transformada de Fourier

Segundo Neto (1999), a tecnologia computacional vem se desenvolvendo cada vez mais e com ela desenvolve-se também a capacidade de memória e velocidade de processamento de computadores digitais. Com isso, os usos de ferramentas para o processamento digital de imagem vêm se tornando mais frequentes e ainda mais aplicáveis e uma delas é, certamente, a transformada de Fourier.

A ferramenta mencionada possui muitas vantagens como a observação de imagens em domínios de frequência, o que facilita sua análise e seu processamento. Segundo Neto (1999), o processamento para o uso dessa transformada é, geralmente, a aplicação de filtros digitais, isso torna a técnica menos complexa.

Em outras palavras, o uso de qualquer método de transformada é simplificar a resolução de certos problemas, como a palavra já indica, transformando-o

em um problema de fácil resolução.

Figueiredo (2012) introduz a ideia de Transformada de Fourier como um diagrama de caixas e setas, a Figura 3 mostra, de forma adaptada para mapa conceitual, a comparação feita pelo autor. A primeira seta indica a função $f(x)$ a ser transformada e a segunda seta representa a função $F(\xi)$, tal função é a função $f(x)$ após ser transformada ou, em outro termo, operada. Na Figura 3, \mathfrak{F} é a Transformada de Fourier e \mathfrak{F}^{-1} é sua Transformada Inversa.

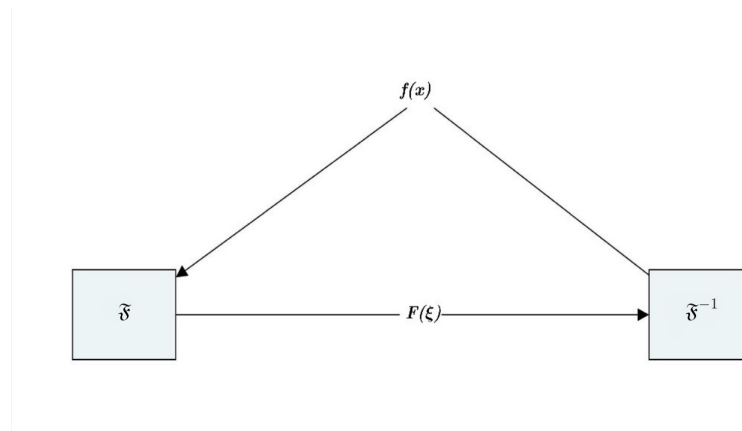


Figura 3 Transformada (\mathfrak{F}) e Antitransformada (\mathfrak{F}^{-1}) de Fourier. Adaptado de Figueiredo (2012).

2.6 Descritores

Os descritores são de grande importância no cotidiano, os conceitos de descritores são apresentados regularmente a todo instante. Imaginemos uma compra feita via internet (BOBER, 2001), muitas vezes o modelo 3-D do objeto a ser comprado não é conhecido, todavia o cliente tem a imagem mental do que quer adquirir, essa imagem é um conjunto de descritores 2-D combinados que geram propriedades 3-D do objeto.

2.6.1 Descritores de Formas

Segundo Bober (2001), os descritores de formas possuem diversas aplicações, como no comércio eletrônico e em câmeras de segurança. O objetivo do uso desses descritores está relacionado a agilidade e simplicidade do manuseio.

A noção de forma de objetos é claramente intuitiva, porém possui muitos significados. Deve-se ter em mente que a análise de forma é o mesmo que analisar silhuetas, o que nos limita às informações de contornos de objetos. A ideia de contorno nos remete à similaridade de formas, isto é, os descritores de formas podem ser similares em relação à sua região ou ao seu contorno (BOBER, 2001).

Os descritores baseados em contorno apresentam as propriedades relacionadas à sua fronteira (ou borda), enquanto que os baseados em região consideram os *pixels* contidos em toda a região da imagem e não apenas o seu contorno (OLIVEIRA et al., 2012).

As diferenças dessas similaridades estão apresentadas na Figura 4. Tomemos, como exemplo, o objeto da primeira linha e primeira coluna da figura, se o compararmos com os demais da primeira linha teríamos uma similaridade baseada em região e por contorno caso a comparação fosse feita em relação aos demais objetos da primeira coluna.

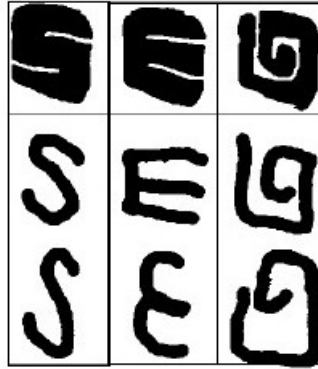


Figura 4 Exemplos de similaridade de forma baseada em contorno e região (BOBER, 2001).

A Figura 5 ilustra uma imagem de fronteira digital de coordenadas (x,y) e ponto arbitrário (x_0,y_0) . Segundo Dalitz (2013), para que a invariância quanto a translação seja alcançada, esse ponto arbitrário pode ser descartado devido ao fato de, entre todos os pontos presentes no contorno, ser o único que depende da translação. Todavia, não foi descartado, pois é peça importante para a demonstração a seguir.

A partir de (x_0,y_0) pode-se obter todos os outros pontos (pares ordenados), independente da orientação horária ou anti-horária, que compõem a fronteira $(x_0,y_0), (x_1,y_1), (x_2,y_2), \dots, (x_{N-1},y_{N-1})$ (ZHAO; BELKASIM, 2012). Tais coordenadas apresentam-se como uma série $s_t = (x_t,y_t)$, para $t = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ e cada par pode ser tratado como número complexo (DALITZ, 2013).

$$s_t = x_t + iy_t, t = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (5)$$

Assim, o eixo x é tratado como eixo real enquanto que o y é imaginário de uma sequência de números complexos. Tais coordenadas podem ser expressas

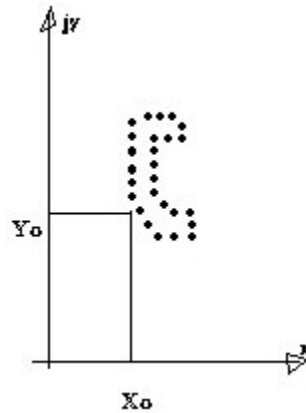


Figura 5 Representação de uma fronteira digital (adaptada de Gonzalez e Wood, 2000).

como $x(k) = x_k$ e $y(k) = y_k$, representando a própria fronteira como seqüência de coordenadas do tipo $s(k) = [x(k), y(k)]$, para $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$. Com isso, Gonzalez e Woods (2000) definem a transformada discreta de Fourier da seguinte forma:

$$a(u) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s(k) \exp[-j2\pi uk/N] \quad (6)$$

para $u = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

O termo $a(u)$ representa os coeficientes complexos chamados de descritores de Fourier da fronteira. Em suma, esses descritores possuem a particularidade de serem invariantes quanto a rotação e a escala da fronteira.

A transformada inversa de $a(u)$ reconstrói $s(k)$ (GONZALEZ; WOODS, 2000), pois, por definição

$$s(k) = \sum_{u=0}^{N-1} a(u) \exp[j2\pi uk/N] \quad (7)$$

para $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

2.6.2 Descritores de Fourier

Os descritores de Fourier são exemplos de descritores de formas com similaridade baseada em fronteira/borda (OLIVEIRA et al., 2012). Tais descritores são utilizados em pesquisas, em recuperação de objetos, além de serem considerados robustos para ruídos presentes nos contornos (BOBER, 2001).

Esses descritores apresentam características importantes, abaixo são listadas algumas delas:

- i Distinguir formas que possuem regiões semelhantes e moldar propriedades diferentes de contorno (Fig. 6a);
- ii Busca de formas semelhantes para a visão humana, mesmo havendo variabilidade intraclasse (Fig. 6b);
- iii Robustez à deformações não-rígidas (Fig. 6c) e à distorções no contorno (Fig. 6d);
- iv Invariância à escala e à rotação do objeto (Fig. 6e).

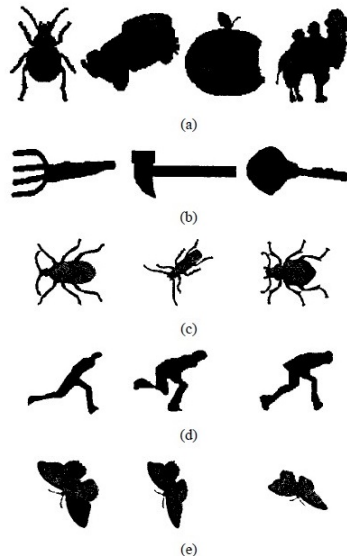


Figura 6 Exemplos de formas em que descritores com base em contorno são aplicáveis (BOBER, 2001).

2.7 Análise de bordas

Ainda usando a Figura 6, nota-se que a noção de bordas é intuitiva sendo apenas a representação visual da silhueta de alguma pessoa, animal ou objeto. Mas, na realidade, a definição de bordas é algo bem mais elaborada, ainda mais quando se trata de visão computacional. De maneira simplificada, bordas são limites de conjuntos de pontos que incluem uma região (ZHAO; BELKASIM, 2012).

2.7.1 Representação de curvas fechadas

Imagens de representação de contornos fechados são aquelas em que apresentam uma série de pontos, sendo um inicial e um final, esses dois pontos devem ser iguais para que haja o fechamento da curva.

Concordando com Zahn e Roskies (1972), uma curva é representada parametricamente como uma função de comprimento de arco, por valores acumulados

relacionados a direção da curva desde seu ponto inicial. Essa função é expandida em Séries de Fourier e seus coeficientes arranjados sob a forma de amplitude de ângulos.

2.8 Vizinhaça de *pixels*

Quando se relaciona bordas com *pixel* um conceito deve estar definido: o conceito de vizinhaça. Segundo Gonzalez e Woods (2000, p. 26) um *pixel* p em uma coordenada (x,y) possui quatro vizinhos horizontais e verticais com coordenadas

$$(x + 1, y), (x - 1, y), (x, y + 1), (x, y - 1) \quad (8)$$

Esse conjunto de coordenadas de *pixel* é chamado de *vizinhaça-de-4* do *pixel* p , ou $N_4(p)$. Quando p estiver na borda da imagem digital outros *pixels* ficarão fora dessa imagem, isso se deve a distância de cada *pixel* em relação a p (Gonzalez; Woods, 2000).

Além dos vizinhos horizontais e verticais, existem também os diagonais de p os quais possuem as coordenadas:

$$(x + 1, y + 1), (x + 1, y - 1), (x - 1, y + 1), (x - 1, y - 1) \quad (9)$$

As coordenadas de (9), juntamente com a *vizinhaça-de-4* formam a *vizinhaça-de-8* de p ou $N_8(p)$. Quando (x,y) se encontrar na borda da imagem ocorrerá o mesmo que na *vizinhaça-de-4*.

As Figuras 7(a) e 7(b) a seguir ilustram os conceitos de vizinhaça, sendo que a primeira representa o esquema $N_4(p)$ e a segunda o esquema $N_8(p)$.

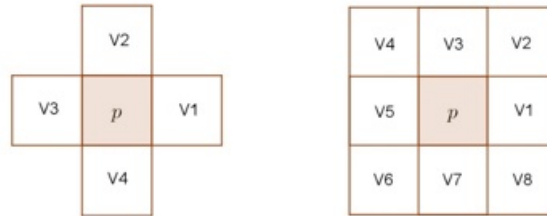


Figura 7 (a) Vizinhaça de 4 e (b) Vizinhaça de 8.

Os conceitos de vizinhaça de *pixels* não se limitam apenas aos aqui apresentados, podendo ser estendidos a imagens tridimensionais possuindo quantidades maiores de vizinhos. Para exemplificar, basta imaginar a Figura 8, de um cubo mágico.

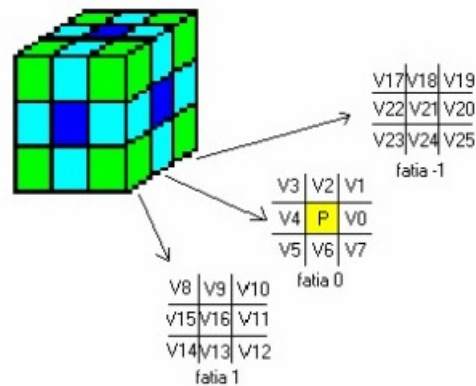


Figura 8 Vizinhaça-de-26 (PINTO, 2001).

2.8.1 Produto Escalar

Todo produto escalar é representado por uma norma sobre algum espaço no qual está definido:

$$\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle} \quad (10)$$

A forma visual de vetores é intuitiva e pode ser representada geometricamente. Como já estudado por muitos, um vetor pode ser desenhado usando critério de setas, afinal, (WINTERLE, 2000), um vetor é representado por um segmento orientado, isto é, com sentido de percurso considerado positivo.

2.8.2 Particularidades de vetores

Observe a Figura 9 e acompanhe as propriedades a seguir:

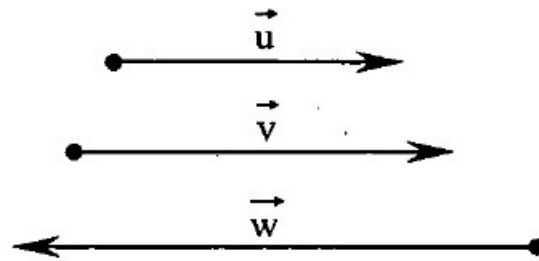


Figura 9 Representação geométrica de vetores.

- (a) Os vetores \vec{u} , \vec{v} e \vec{w} são paralelos, pois possuem a mesma direção, formalmente escreve-se $\vec{u} \parallel \vec{v} \parallel \vec{w}$.
- (b) Vetores são ditos iguais quando possuírem módulo, sentido e direção iguais.

Importante que as propriedades de vetores não se resumem a apenas essas duas, apenas foram elencadas duas de uma série de propriedades. Dessas duas, destacaremos a propriedade (b), entre dois vetores tem-se um ângulo θ , se esse

ângulo for zero e os vetores possuírem mesmo módulo assume-se que são semelhantes.

Produto escalar entre dois vetores a e b é representado por $a \cdot b$, como definido abaixo.

Definição: Produto escalar de dois vetores a e b é o escalar

$$a \cdot b = \|a\| \|b\| \cos(\theta) \quad (11)$$

onde θ é o ângulo entre os vetores, de modo que $0 \leq \theta < \pi$.

Produto escalar pode ser calculado também em função das componentes de dois vetores (ZILL; CULLEN, 2009), para simplificar, tomemos θ como um ângulo entre dois vetores

$$\begin{aligned} a &= a_1 i + a_2 j + a_3 k \\ b &= b_1 i + b_2 j + b_3 k \end{aligned} \quad (12)$$

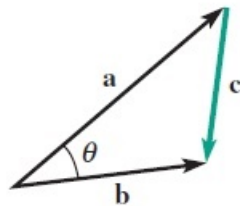


Figura 10 Soma de vetores

Ao se traçar um vetor c , como mostrado na Figura 10, teremos que

$$c = b - a = (b_1 - a_1)i + (b_2 - a_2)j + (b_3 - a_3)k \quad (13)$$

Assim, da lei dos cos-senos

$$\begin{aligned} \|a\|^2 &= a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 \\ \|b\|^2 &= b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 \\ \|b - a\|^2 &= (b_1 - a_1)^2 + (b_2 - a_2)^2 + (b_3 - a_3)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

Então,

$$a \cdot b = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 \quad (15)$$

2.9 A cola/adesivo epóxi

A cola ou adesivo epóxi é um material bicomponente (um agente principal - resina epóxi- e um catalizador - endurecedor) com rapidez de secagem e eficiência, podendo ser usada em reparos de cerâmica e diversos outros objetos (CARNEIRO, 2010).

Quando em estado líquido sua consistência é viscosa, e para que seja bem utilizada deve-se misturar seus dois componentes. A cola utilizada para a captura das imagens era líquida. Quando esses componentes se misturam é produzida uma reação química entre a resina epóxi e o endurecedor, que é curada tanto em temperatura ambiente quanto em temperaturas elevadas (CARNEIRO, 2010).

2.9.1 Resina epóxi

Carneiro (2010) caracteriza a resina epóxi como um polímero que possui "pelo menos dois anéis de três membros" denominados epóxi, epóxido, oxirano ou etano epóxi (MARK et al., 1986; CARNEIRO, 2010).

A Figura 11 mostra o grupo funcional que caracteriza a representação química de um epóxi. Essa representação é uma forma diferenciada do grupo éter, formando-se um anel que define um triângulo equilátero que o torna altamente

rígido. Tal propriedade faz com que o epóxi seja mais reativo que os outros éteres.

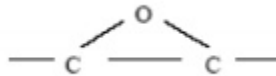


Figura 11 Grupo funcional epóxi (MARK et al. , 1986; CARNEIRO, 2010).

As resinas epóxi vem sendo comercializadas desde a década de 40 na forma líquida ou sólida. O estado físico dessa resina é explicado por Bauer (1989), segundo o autor o grau de polimerização n é determinado por divisão simples de reagentes químicos que compõe a resina, tais reagentes podem ser diferentes considerando qual resina está sendo analisada. Se o valor desse n estiver contido no intervalo entre 0 e 1 a resina é líquida, e será sólida caso ocorra um valor superior a 2.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foram disponibilizadas pelo Centro de Investigações Ópticas (Ciop) da cidade de La Plata, Argentina, uma coleção de 1280 imagens referentes a secagem de uma amostra mesclada dos componentes da cola epóxi. O laser utilizado foi do tipo He-Ne, cor vermelha com intensidade $\sim 10mW$ e comprimento de onda 633nm. As imagens foram capturadas com tempo de 0,8 segundos por imagem (*frame*).

O trabalho seguiu a seguinte ordem:

- (a) Processamento das imagens;
- (b) Seleção do ponto para a análise temporal e espacial;
- (c) Seleção das imagens utilizadas;
- (d) Descrição dos grãos de *speckle*;
- (e) Levantamento e análise de dados.

3.1 Softwares utilizados

O *software* utilizado no processamento e seleção do ponto às análises temporal e espacial foi o ImageJ versão 1.48 , Java 1.6.0_20 (32-bit), produzido por Wayne Rasband, National Institute of Health, USA, e de domínio público. As descrições dos grãos de *speckle* foram feitas em quatro rotinas de programação no Matlab R2013a (8.1.0.604), 32-bit (win32).

Os softwares foram executados em um computador desktop Windows 7, processador AMD C-70 APU com *Radeon*TM HD Graphics 1.00 GHz, 4 GB de Memória RAM e Sistema Operacional de 32 Bits.

3.2 Processamento das imagens

Primeiramente foi feito um processamento das imagens para garantir a melhoria nas análises posteriores. As imagens originais da cola epóxi, inicialmente, eram de tamanho 512x512 *pixels* e 8-bit. Para as análises, elas foram cortadas ficando com tamanho 201x204 *pixels*; 8-bit e foram aplicados às 1280 imagens o filtro gaussiano *blur 2.0*, suavizadas (*smooth*) e *threshold 162*.

Foram testados oito valores de *threshold* (121, 136, 142, 146, 150, 155, 160 e 162) e o 162 foi o que mostrou melhor qualidade das imagens dos grãos.

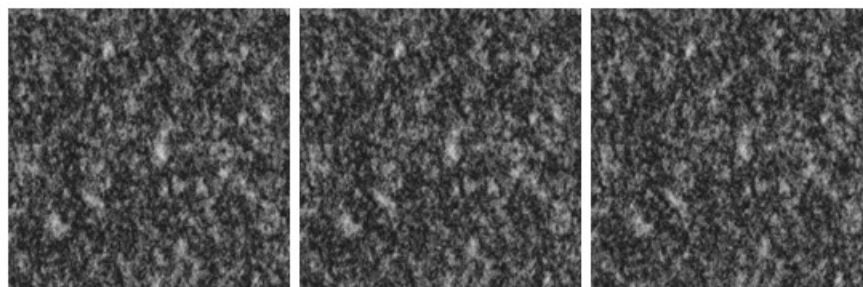


Figura 12 Imagens originais (a) 1.tif (b) 2.tif e (c) 3.tif.

As imagens usadas eram todas do tipo *.tiff* (*Tagged Image File Format*) e salvas como *poxifrag* (*poxipol fraguado*) + número referente a sua posição na sequência, como por exemplo *epoxi0001.tif*. As originais foram apenas enumeradas, na Figura 12 estão três primeiras imagens originais capturadas da secagem do adesivo epóxi.

3.3 Seleção do ponto para a análise temporal e espacial

O ponto foi colocado na sequência de imagens, podendo ser em qualquer local, mas, por comodidade resolveu-se colocá-lo dentro de um dos grãos de *speckle* presente na primeira imagem. Esse ponto foi tido como "ponto de referência".

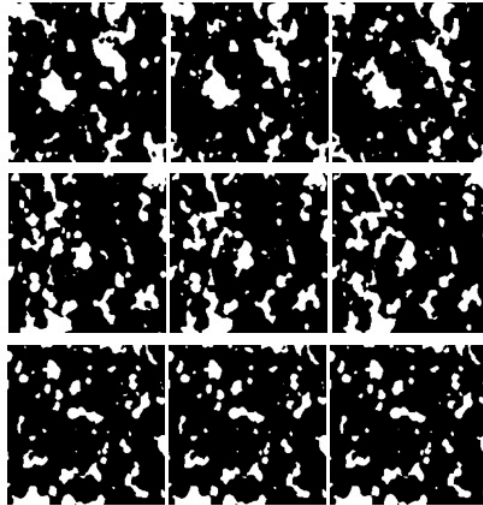


Figura 13 Imagens com ajuste *threshold* 162.

As imagens foram convertidas de 8-bit para RGB (*Red-Green-Blue*) o que facilitou a inserção do ponto vermelho nas imagens.

As imagens inseridas no software ImageJ são colocadas em um plano cartesiano de coordenadas x e y , usando a ferramenta de inserção de ponto (*point tool*) pode-se escolher uma coordenada qualquer que esteja em um dos grãos. Além dos valores de x e y , o *software* mostra outros dois valores, z e *value*, z corresponde a imagem observada (imagem 0, 1, 2, ...) e *value* é o valor referente a cor, no caso das imagens serem 8-bit e já processadas, esse valor é 0 (preto) e 255 (branco). Como as imagens foram convertidas para RGB houve alteração nos valores sendo 0 (branco) e 255 (preto). Assim, quando o ponto se localizava em 255 o ponto não estava contido no grão, o que ocorreu em várias imagens.

O ponto escolhido foi o de coordenadas $(x, y) = (70, 117)$, $z = 0, 1, 2, \dots, 8$ (a primeira imagem foi numerada como zero) e *value* = 0 (imagens RGB), isto é, o ponto estava dentro do grão representado pela área branca.

3.4 Seleção e separação das imagens

Para a análise do ponto, das 1280 imagens foram selecionadas 240, divididas em três grupos sendo o primeiro formado pelas 80 imagens iniciais, o segundo pelas 80 localizadas exatamente no centro da sequência de imagens e o último grupo constituído pelas 80 finais.

Na descrição dos grãos, foram escolhidos *frames* ao longo da sequência que continham os grãos a serem avaliados. Foram 15 grãos, sendo dois das imagens iniciais, 11 em *frames* intermediários e dois das últimas imagens, sendo assim, da sequência de 1280 imagens foram selecionadas 15 subsequências, cada uma para um grão diferente. Desses grãos, dois apresentaram anomalias em relação aos demais, essas anomalias serão discutidas mais adiante, devido a isso, as 11 subsequências intermediárias analisadas foram reduzidas à apenas nove, contabilizando, ao todo, 341 imagens (*frames*). Cada imagem foi descrita separadamente e seus dados armazenados para análise.

Quanto a análise das componentes dos grãos, para cada grão observado o número de *frames* varia, dependendo da quantidade de frames que contenha o grão analisado.

3.5 Descrição dos grãos de *speckle*

Na fase de levantamento de dados e descrição dos grãos de *speckle* utilizou-se quatro rotinas de programação no Matlab. A primeira para a apresentação das bordas, limitou-se ao destaque apenas dos grãos em que as bordas fossem maiores ou iguais a 50 *pixels*. A segunda rotina destinou-se a eliminar qualquer tipo de interferência nas bordas, tornando-as mais suaves e bem definidas.

Antes de aplicar a transformada de Fourier, desenvolveu-se uma rotina para calcular a soma consecutiva de ângulos das trajetórias dos *pixels* presentes

nos grãos das imagens. Os descritores de Fourier foram obtidos ao se aplicar a transformada de Fourier, tendo como dados de entrada os valores das somas consecutivas de ângulos.

Além da Transformada de Fourier, a última rotina feita no MatLab calculou também a transformada inversa de Fourier. No cálculo da Transformada de Fourier os dados de entrada eram os valores das somas de ângulos e da Transformada Inversa, os valores de entrada eram os da transformada, na Figura 3 da seção 2.5 onde pode-se observar esse processo. O cálculo da transformada inversa de Fourier foi utilizado para reconstruir a soma de ângulos que foram os dados iniciais para todo o processo desenvolvido, isto é, a reconstrução dos grãos.

A Figura 14 simplifica todo o processo realizado:

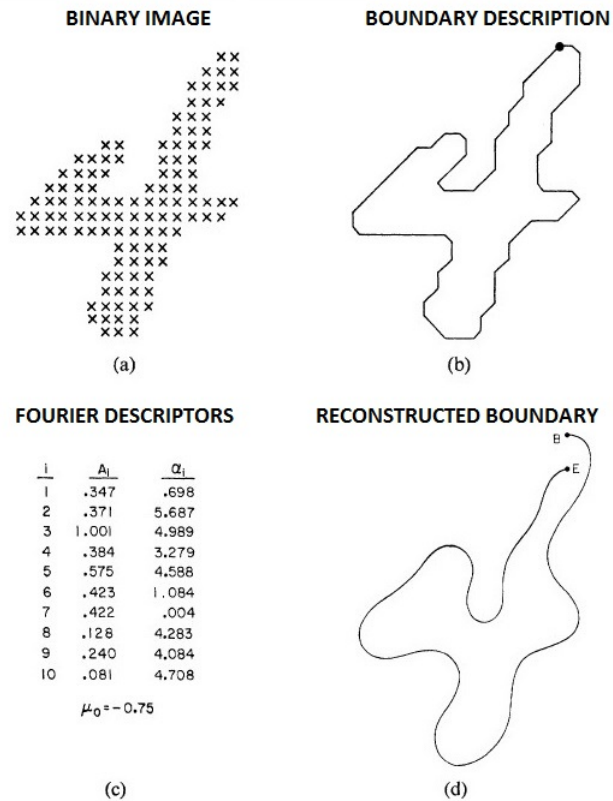


Figura 14 Análise e reconstrução de descritores de Fourier de bordas de imagem binária (Zahn; Roskies, 1972).

Na Figura 14(a) tem-se uma imagem binária de representação de borda em formato do número "4". 14(b) representa a descrição da borda poligonal da imagem que é utilizada para a extração do que Zahn e Roskies (1972) chamaram de pares de amplitude harmônica e fase angular 14(c). Esses pares são representados como $A_k, a_k, k \in \mathbb{R}$. Na Figura 14(d) está a reconstrução da imagem inicial através dos dados de 14(c).

3.6 Variação Média de Energia

3.6.1 Modificação das formas dos grãos

Essa etapa foi realizada submetendo 50 imagens iniciais e 50 finais analisadas duas a duas, de maneira que fossem calculadas as diferenças de variação dos coeficientes (Equação 16) de um frame a seu consecutivo.

$$\Delta C_n = C_n(t + 1) - C_n(t) \quad (16)$$

Em seguida essa equação foi utilizada para o cálculo do Quadrado da Variação (Equação 17) de cada componente de cada grão.

$$(\Delta C_n)^2 = (C_n(t + 1) - C_n(t))^2 \quad (17)$$

A Equação 17 foi aplicada para eliminar valores negativos que apareciam como resultado da aplicação da Equação 16, facilitando o cálculo da Variação Média de Energia das componentes com maior atividade dos grãos analisados.

Nessa etapa, analisou-se as seis primeiras componentes dos grãos em duplas de frames, dando grande atenção às iniciais e finais. A Variação Média de Energia (VME) de cada umas das componentes dos grãos nos frames foi calculada segundo a Equação 18.

$$VME = \sum_{n=2}^6 \frac{(\Delta C_n)^2}{m} \quad (18)$$

Sendo que m é a quantidade de grãos *homólogos* analisados em cada dupla de frames. Nesse trabalho, todas as duplas possuíram a mesma quantidade de grãos, 12 grãos, com a quantidade de componentes $2 \leq n \leq 6$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise da variação do grão de *speckle* no tempo

Levando em consideração as modificações de grãos de *speckle* ao longo do tempo, a série de 1280 imagens foi analisada fixando-se um ponto dentro de um dos grãos.

A Figura 15 mostra os nove primeiros *frames* da sequência de imagens, notou-se que o grão sofreu grandes modificações. A atividade foi maior nas primeiras imagens, isso ocorreu devido o processo de secagem da cola epóxi. Segundo Pereira (2007), o endurecimento do adesivo epóxi é por polimerização (reação exotérmica). Esse fenômeno explica a diminuição da atividade *speckle* ao longo do processo apresentado, isto é, ao longo do tempo a atividade *speckle* vai se tornando menor o que faz com que ocorra a modificação, inicialmente rápida, desses grãos e/ou do grão observado.

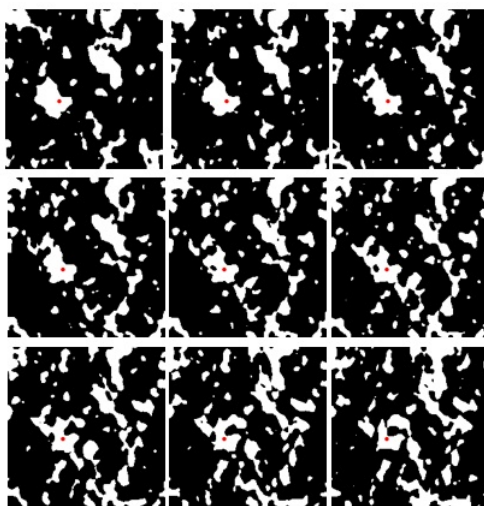


Figura 15 Variação do grão de *speckle* no tempo em relação a um ponto (nove primeiras imagens da sequência).

Para melhor comparação, a Figura 16 mostra mais nove imagens, dessa vez foram escolhidas imagens situadas mais no centro da sequência. As coordenadas do ponto são as mesmas das imagens apresentadas anteriormente.

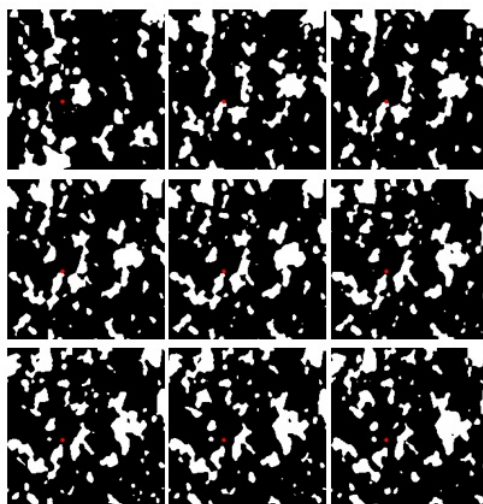


Figura 16 Variação do grão de *speckle* no tempo em relação a um ponto (nove imagens centrais da sequência).

O programa usado nessa fase do trabalho acusava de forma rápida a posição do ponto em relação aos grãos; sempre que o local do ponto era preto os valores RGB eram representados por 000 e em local branco os mesmos eram dados por 255. Lembrando que o ponto de referência se manteve nas mesmas coordenadas mencionadas anteriormente.

Na Figura 16, o ponto se apresenta dentro do grão em apenas alguns *frames*, o que não aconteceu nas últimas imagens. A Figura 17 mostra que o grão selecionado para a análise com o ponto já não existia mais, a cola já havia secado e a atividade *speckle* já havia sessado.

Após essas observações o estudo foi direcionado ao uso dos coeficientes

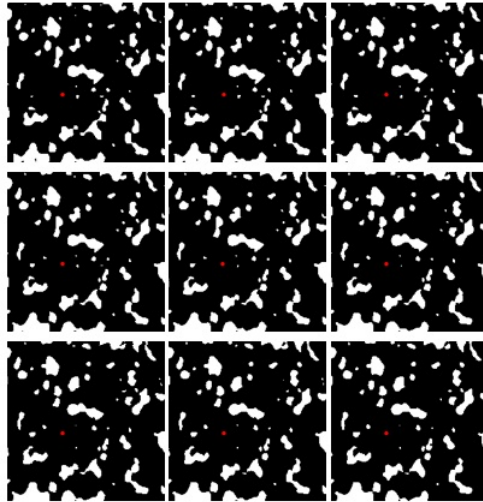


Figura 17 Variação do grão de *speckle* no tempo em relação a um ponto (nove últimas imagens da sequência).

de Fourier para que fosse observado a mesma variação dos grãos no tempo.

4.2 Descrição dos grãos de *speckle* via série de Fourier

A Figura 18 mostra as primeiras imagens capturadas da cola epóxi com a representação das bordas de todos os grãos presentes nelas.

Os descritores de Fourier foram calculados através do módulo da transformada de Fourier, como realizado no estudo comparativo de Zahn e Roskies (1972). Esse cálculo teve como base a soma consecutiva de ângulos presentes nas bordas dos grãos das imagens, a Figura 19 mostra as três primeiras imagens de três parcelas de imagens, sendo das imagens iniciais, centrais e finais.

Nas primeiras imagens os grãos que possuíam quantidade de *pixels* maiores ou iguais a 50 tinham um tamanho maior, nas imagens localizadas mais no centro da sequência de imagens esses grãos ficaram menores, porém com uma

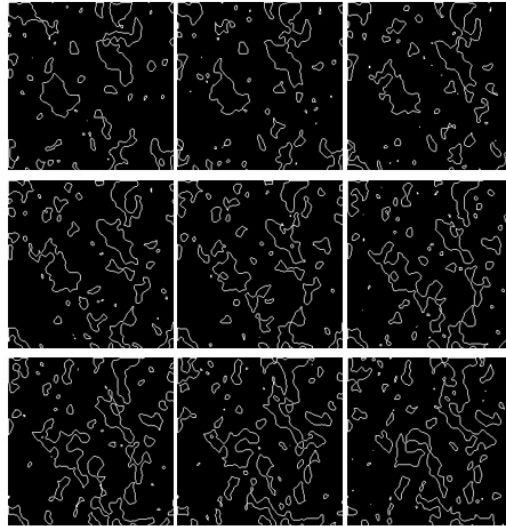


Figura 18 Representação das bordas de todos os grãos das nove primeiras imagens capturadas da cola epóxi.

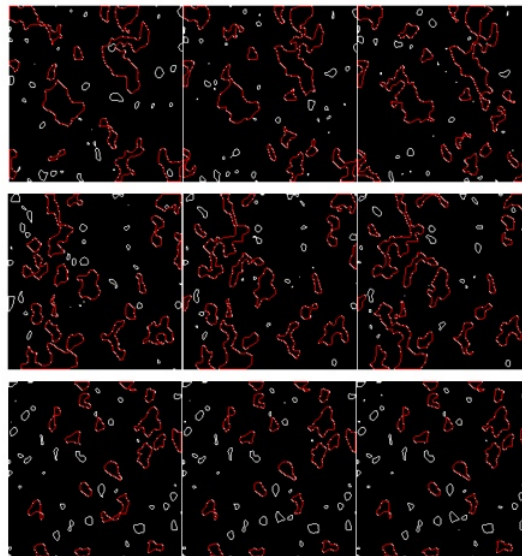


Figura 19 Bordas selecionadas para análise das três primeiras imagens de cada parcela.

grande atividade. Nas últimas imagens as atividades foram cessando apresentando uma quantidade pequena de grãos, mas quase inertes.

4.3 Análise das componentes de grãos

4.3.1 Teorema de Nyquist

Ao descrever um grão depara-se com a necessidade de se entender o Teorema de Nyquist, ou Teorema da Amostragem. Na Figura 20 um grão foi descrito com os descritores de Fourier, o termo descritores foi substituído por componentes e numerados, termo utilizado por Zhan e Roskies (1972).

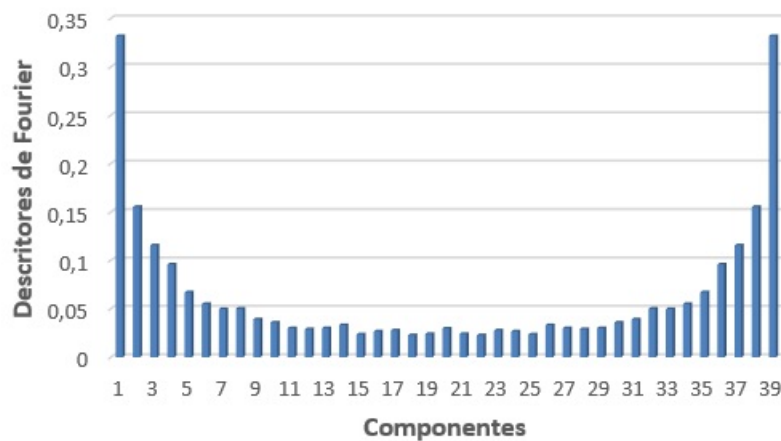


Figura 20 Descrição de um grão.

No gráfico da Figura 20 notou-se que a partir de uma certa componente, as frequências tomam valores iguais ao que se tinha anteriormente, os dados se repetem de "forma reflexiva". Na Figura 21 os descritores desse grão foram reorganizados para ilustrar essa "reflexão", conhecida como transformada ótica.

O teorema de Nyquist, segundo Back e Tedesco (2012), afirma que a

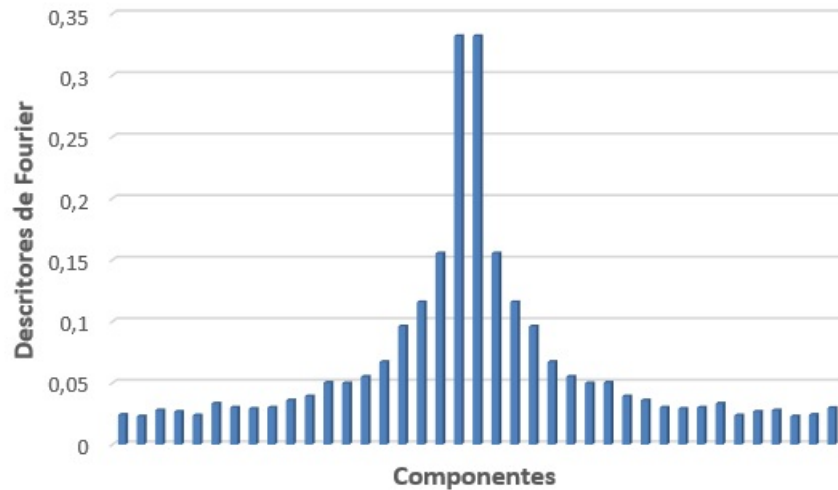


Figura 21 Descrição do grão da Figura 20 pelo ponto de vista do Teorema de Nyquist.

frequência da amostragem deve ser maior que o dobro da frequência máxima do sinal a ser amostrado, ou seja,

$$f_s = 2f_M \quad (19)$$

sendo f_s a frequência de amostragem em hertz, H_z , e f_M a frequência máxima do sinal analógico em H_z .

4.3.2 Modificação das componentes

A ideia principal do uso de componente surgiu dos estudos de vetores, por exemplo, tomemos D como um conjunto de descritores de um grão G presente em um conjunto de imagens (*frames*). Esse D será um vetor composto por descritores, tal que cada um deles está presente em uma imagem, esses são chamados compo-

nentes (C_n) do vetor D . Essas componentes foram enumeradas conforme foram realizados os cálculos da soma de ângulos, respeitando o sentido anti-horário dessa soma, até que todo o grão fosse percorrido formando a borda desse grão.

Foi feita a análise temporal de 15 grãos, contando que cada um deles apresentava uma sequência de imagens contendo sua modificação, assim foram observadas o total de 341 imagens. A Tabela 1 mostra os grãos analisados e a quantidade de imagens que os continham ao longo do tempo. Não houve um padrão na quantidade de *frames* em relação aos grãos, isto é, enquanto uns grãos estavam presentes em poucas imagens outros desapareciam em subsequência maiores de imagens. Os dois grãos iniciais estavam presentes na mesma subsequência de imagens, o mesmo ocorreu com os dois últimos grãos.

Tabela 1 Quantidade de frames analisados por grão.

Grãos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>Frames</i>	20	14	43	19	15	20	17	19	42	18	17	30	31	50	50

A Tabela 1 mostra a quantidade de *frames* que cada grão se manteve visível, mas é de grande relevância saber que essa quantidade está relacionada ao tempo. Tomemos o grão 1 e o grão 6 como exemplos, os 20 *frames* do grão 1 representam esse grão do seu surgimento ao seu desaparecimento, o mesmo aconteceu ao grão seis, porém o primeiro grão estava nas 20 primeiras imagens (0000 a 0019) e o sexto entre as imagens de número 0652 e 0672 (20 *frames*).

Devido à grande atividade dos grãos nas primeiras imagens, os grãos desapareciam rapidamente, com isso eram poucos os *frames* que continham o mesmo grão. Nas subsequências finais, os grãos se mantiveram em mais imagens, pois não havia mudança brusca em suas formas. Vale ressaltar que as imagens capturadas não apresentam a cola totalmente seca (estado conhecido como cura), com isso as atividades de modificação dos grãos se mantiveram até a última imagem da

sequência.

A título de ilustração, a Figura 22 mostra a variação do grão 14 nas 50 últimas imagens da sequência. Visualmente, a modificação desse grão ao longo do tempo foi muito intensa, mesmo sendo um conjunto de *frames* finais da sequência, nos últimos, o grão manteve-se em forma constante até que as atividades de secagem paravam.

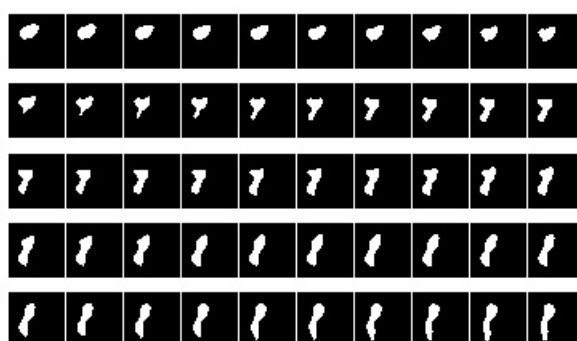


Figura 22 Modificação temporal do grão 14, considerado ótimo para análises, sem anomalias aparentes.

A escolha dos grãos foi realizada de forma que seguisse alguns critérios de observação, como a quantidade de *frames* com a modificação dos grãos, pois a maioria deles se modificavam de forma muito intensa, o que apresentou poucos *frames* de sua modificação. O segundo aspecto considerado na escolha foi de anomalias, buscou-se desconsiderar grão que possuíssem aparências duvidosas causadas muitas vezes pela aplicação do *threshold* ou alguma interferência entre os grãos, por exemplo o grão 3. O grão 10 ilustra o último ponto usado para escolha: o tamanho dos grãos; muitos grãos possuíssem tamanhos extremamente pequenos, devido a isso buscou-se analisar grãos maiores. Foram considerados grãos ótimos os de aparência similar ao grão 14 (Figura 22), por apresentar estrutura mais simples de analisar.

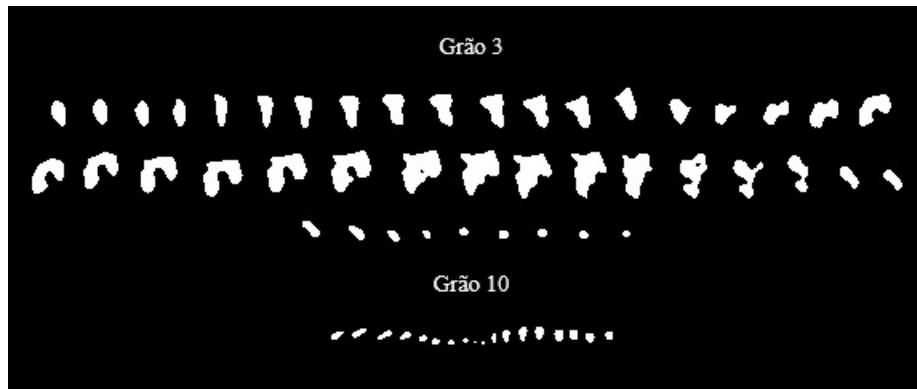


Figura 23 Modificação temporal dos grãos 3 e 10, apresentando possível anomalia do grão 3 e grande diferença de tamanho ao longo da alteração do grão 10.

O grão 3 mostrou mudança totalmente inesperada, o que, possivelmente, está relacionada a sobreposição de grãos, em uma dessas alterações o grão apresentou "buraco" na sua forma (Figuras 23 e 24), esse "buraco" foi desconsiderado pela rotina do MatLab. Nesse caso os dados foram coletados pela borda externa do grão, desconsiderando o ponto negro dentro do mesmo. O grão 10 reduziu de tamanho bruscamente e aumentou em proporções parecidas, quando houve esse aumento nada garantiu que ainda era o mesmo grão.



Figura 24 Representação da borda de um dos *frames* que continha o grão 3, as bordas analisadas pela rotina do MatLab foram as externas (como esperado), nesse caso, a anomalia seria o ponto dentro do grão, esse ponto foi desconsiderado.

Considerando as componentes dos grãos (Figura 25), pode-se constatar

que as componentes C_2 e C_3 apresentam produto escalar semelhante. Na Tabela 2, os valores de $\cos\theta$ do produto escalar de C_2 e C_3 em todos os grãos são menores ou iguais que 1 e os valores de θ se aproximam de zero. Em resumo, se $\cos\theta \approx 1$ então $\theta \approx 0$, o que prova a semelhança entre eles em relação ao ângulo θ .

Tabela 2 Cálculo do produto escalar de C_2 e C_3

Grão	Produto Escalar	$\cos \theta$
1	1,060949	0,996436
2	0,878641	0,991342
3	2,590838	0,992014
4	0,998149	0,996436
5	0,93508	0,995017
6	1,137831	0,994925
7	0,968093	0,996635
8	1,127964	0,995319
9	2,390993	0,98509
10	1,273723	0,976693
11	1,017461	0,995613
12	2,614381	0,997184
13	1,774042	0,997803
14	2,860696	0,998105
15	2,909968	0,99694

Os gráficos das Figuras 26 à 29 são do tipo "Desvio-padrão dos descritores x Componentes", os mesmos mostraram uma comparação entre as 14 componentes dos 15 grãos, o que demonstrou o comportamento desses descritores ao longo da descrição de cada grão. As componentes seguem uma ordem decrescente em relação aos valores das formas dos grãos, sendo que em todos eles a componente C_2 se mostrou mais representativa, pois os valores dos descritores que o compõe são maiores, seguido da componente 3 (C_3) e as demais. Com isso, sabe-se que quanto maior a frequência das componentes, mais representam a forma do grão.

A componente 1, em todos os grãos, apresentou valores constantes iguais

a 1, devido a isso essa componente não foi analisada pelo fato de não haver modificações.

A componente 2 também se destacou quando se observou a variação, isto é, a instabilidade dos dados presente nessa componente foi mais evidente, o que a tornou importante do ponto de vista geral dos grãos. O gráfico da Figura 25 possui momentos em que as componentes estão cortadas, cada corte representa os dados de um grão (o mesmo ocorre nas Figuras 30, 31 e 32, porém com 13 grãos), os grãos coletados seguem a ordem temporal apresentada. Notou-se, na Figura 25, que o terceiro e décimo conjuntos de dados foram muito diferentes dos demais, apresentando grandes picos. Esses dois conjuntos de dados são referentes aos grãos 3 e 10, respectivamente.

Ao calcular o desvio padrão dos grãos, percebeu-se que os grãos 3 e 10 *realmente* possuíam uma grande diferença no comportamento de suas componentes ao longo da descrição dos grãos. O uso de desvio-padrão é um dos métodos mais empregados em diagnósticos de comportamento de intensidade *speckle* (SILVA; MURAMATSU, 2007). Essa diferença se deu pelo estágio de mudança da cola, o que é normal, pois a alíquota usada para as análises não estava em seu ponto de cura. O ponto de cura pode durar de 1 hora e 30 minutos a 24 horas para ser atingido (PEREIRA; MEDEIROS, 2012), mesmo havendo uma substância catalizadora na mistura do adesivo.

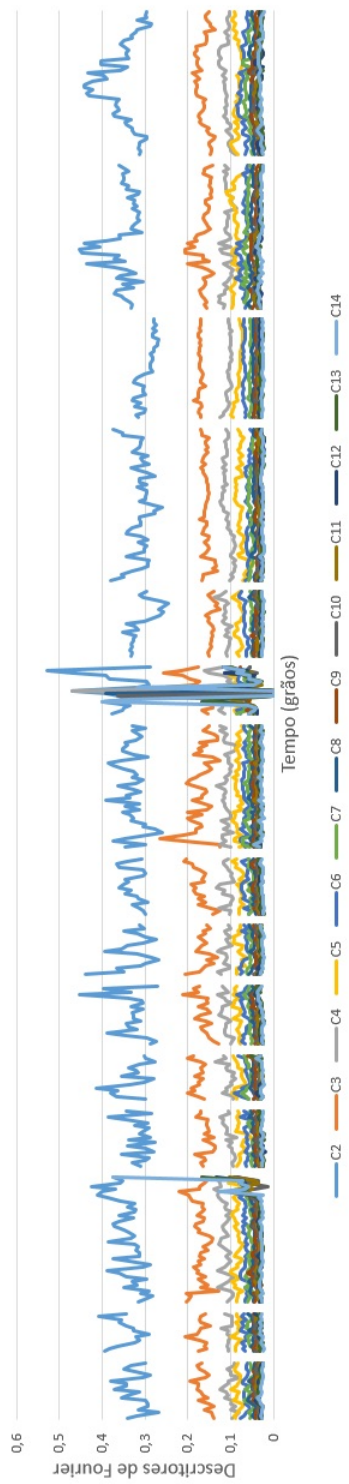


Figura 25 Variação temporal das componentes dos 15 grãos.

A tendência dos descritores dos grãos foi de forma decrescente, exceto nos grãos 3 e 10 que apresentaram tendência crescente, em resultados apresentados notou-se que ao longo da descrição os valores decaem devido a atividade estar mais concentrada nos primeiros descritores.

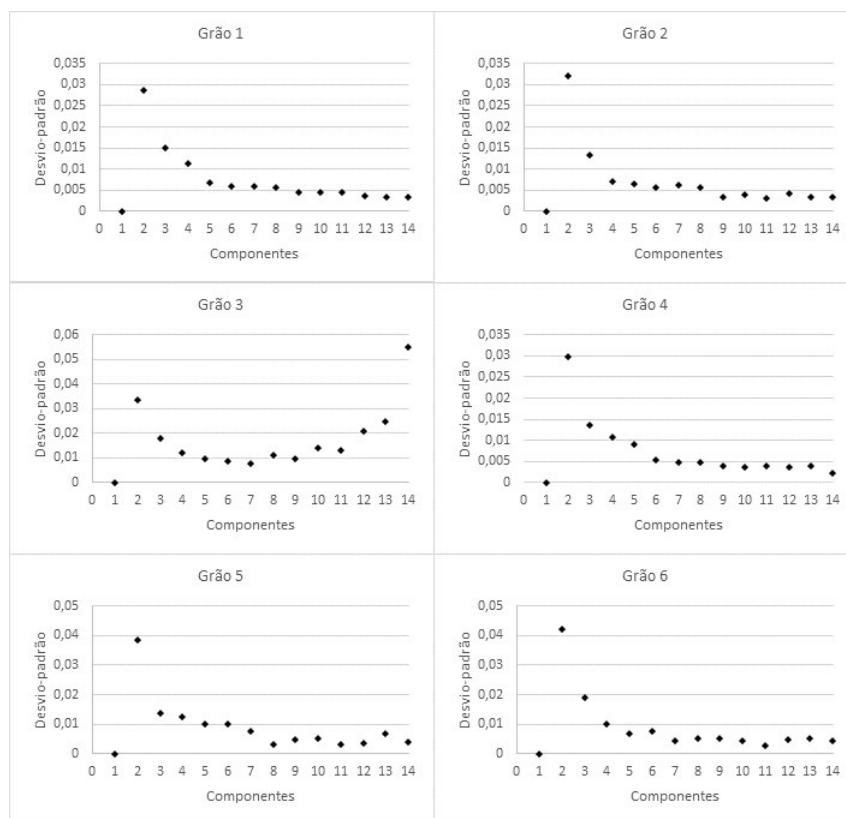


Figura 26 Desvio-padrão das componentes dos grãos 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

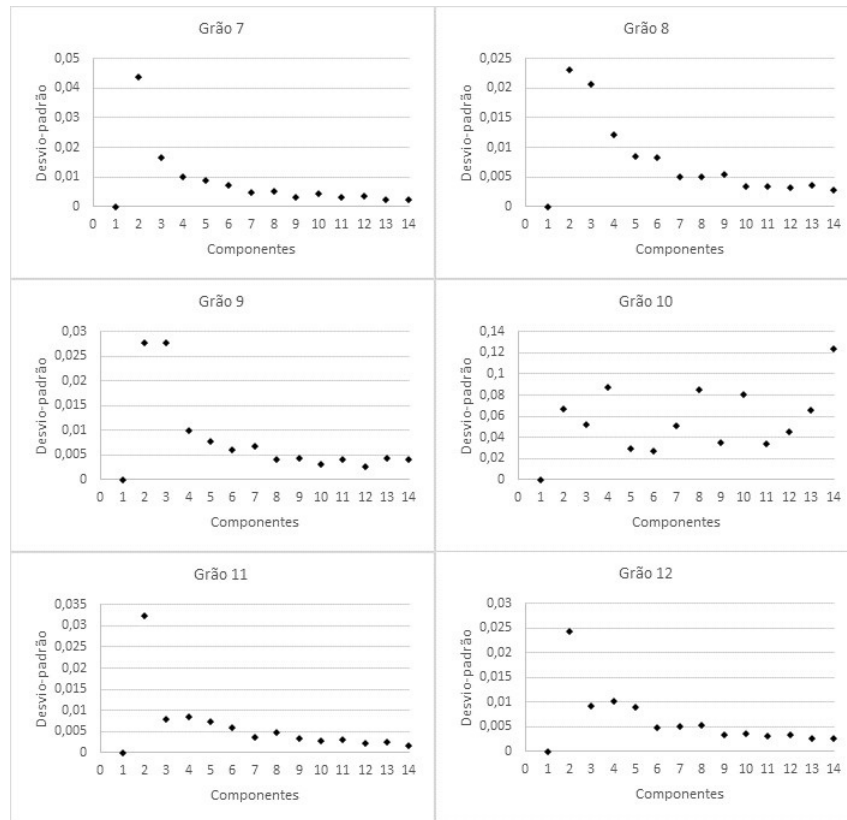


Figura 27 Desvio-padrão das componentes dos grãos 7, 8, 9, 10, 11 e 12.

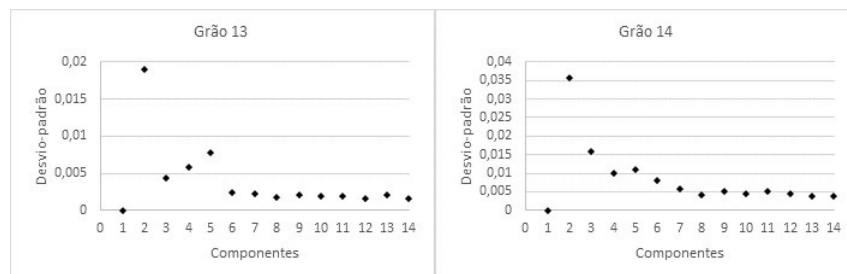


Figura 28 Desvio-padrão das componentes dos grãos 13 e 14.

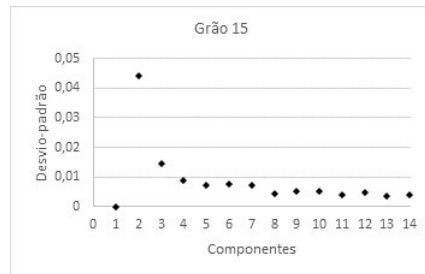


Figura 29 Desvio-padrão das componentes do grão 15.

Devido a grande diferença entre o comportamento dos grãos 3 e 10, resolveu-se analisar os 13 grãos restantes. Os dados estão apresentados na Figura 30.

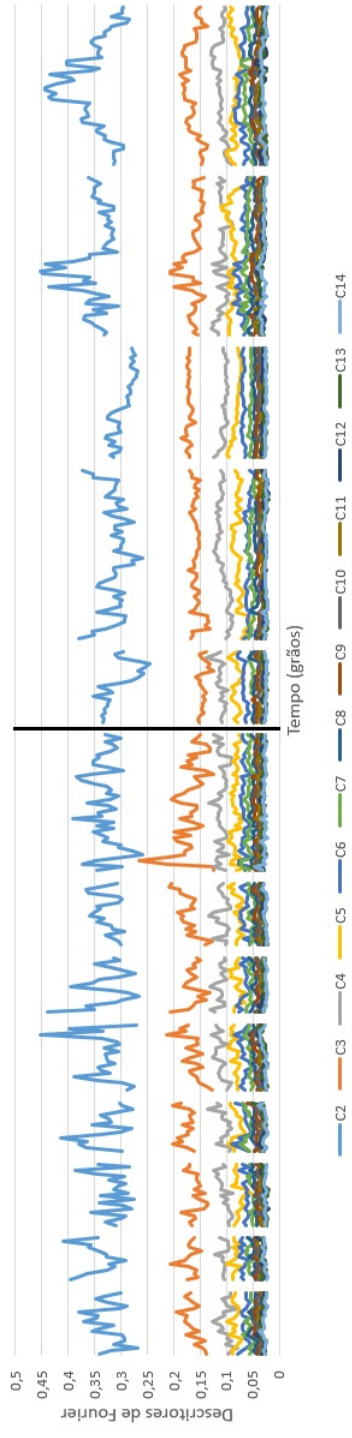


Figura 30 Variação temporal das componentes dos grãos, com divisão de atividades oscilatórias.

Os gráficos das Figuras 30, 31 e 32 mostraram os mesmos resultados das Figuras 26, 27, 28 e 29: a componente C_2 foi mais representativa, seguida das demais e quanto menor a frequência das componentes, menos representam a forma do grão.

A linha negra divide os gráficos, das Figura 30, 31 e 32, pelo grau de atividade dos grãos, os dados do lado direito da linha estão presentes próximos às primeiras imagens e os do lado esquerdo às imagens finais. À esquerda os dados possuem grande instabilidade, isto é, oscilam muito enquanto que na direita os dados possuem oscilações mais leves. Nota-se que, dos grãos observados, a partir do grão oito os dados não apresentam grande atividade, isso foi observado em todas as suas componentes. O grão 8 é representado por um conjunto de 19 *frames*, com isso as imagens a partir desse conjunto possuem diminuição das suas atividades, tendo em vista os momentos de escolha dos grãos.

Observando ainda os gráficos das Figuras 30, 31 e 32, fica evidente que com os descritores de Fourier pode-se diferenciar facilmente grãos iniciais e grãos finais, pois o grau de oscilação dos dados são claramente notáveis.

Ao longo da descrição dos grãos, observou-se que as componentes vão apresentando valores muito próximos como se a variação da forma em relação a elas fosse pouca, enquanto que as primeiras componentes são mais ativas. Isso é melhor observado ao diminuir a escala do gráfico da Figura 30, a alteração da escala está mostrada nas Figuras 31 e 32.

Ao alterar a escala dos gráficos percebeu-se que as componentes que anteriormente eram indiferenciáveis possuem certa significância entre elas. As Figuras 31 e 32 confirmam que, juntamente com os gráficos mostrados anteriormente, as componentes ao longo da formação da borda ficaram cada vez menos representativas em relação a amplitude do grão, aproximando-se cada vez mais do valor zero.

Isso ocorre até certa componente em razão do teorema de Nyquist, que prevê a mesma reação após a metade da quantidade total de frequências das componentes dos grãos (aconselha-se observar novamente as Figuras 20 e 21).

As oscilações foram observadas em todos os momentos analisados, pois a cola epóxi é um tipo de cola que possui duas etapas: secagem e cura. E para a captura das imagens a amostra da cola epóxi foi submetida a iluminação por alguns minutos.

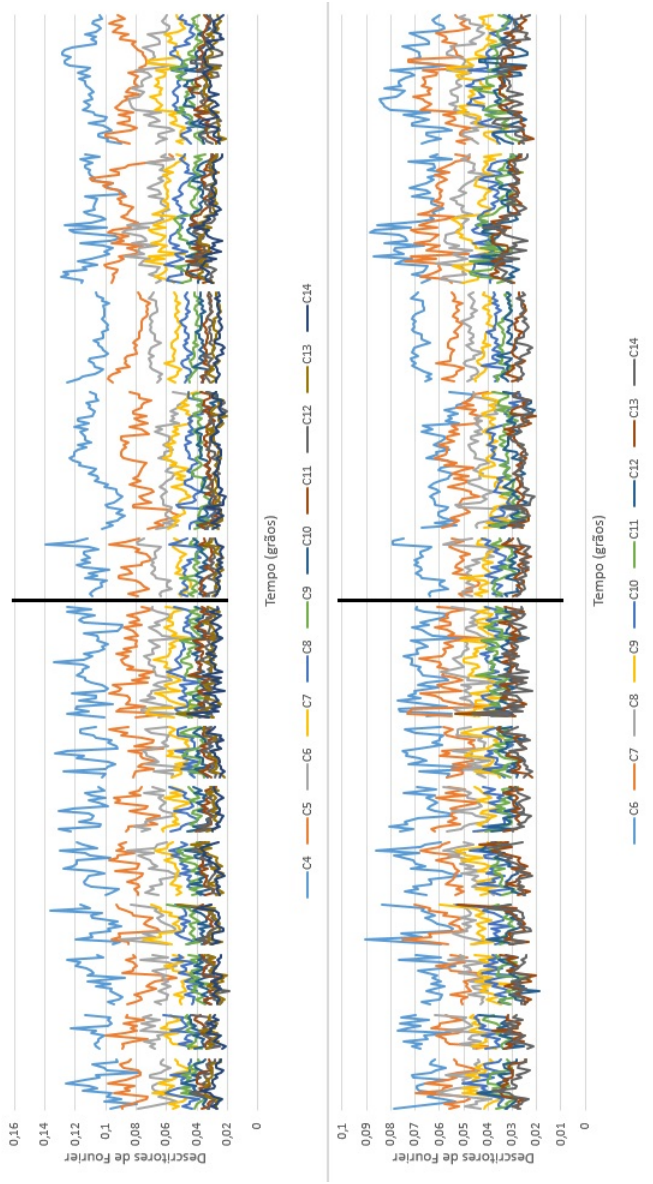


Figura 31 Variação temporal das componentes dos grãos, excluídos os grãos de número 3 e 10, com alteração de escala e C_n com (a) $n \geq 4$ e (b) $n \geq 6$.

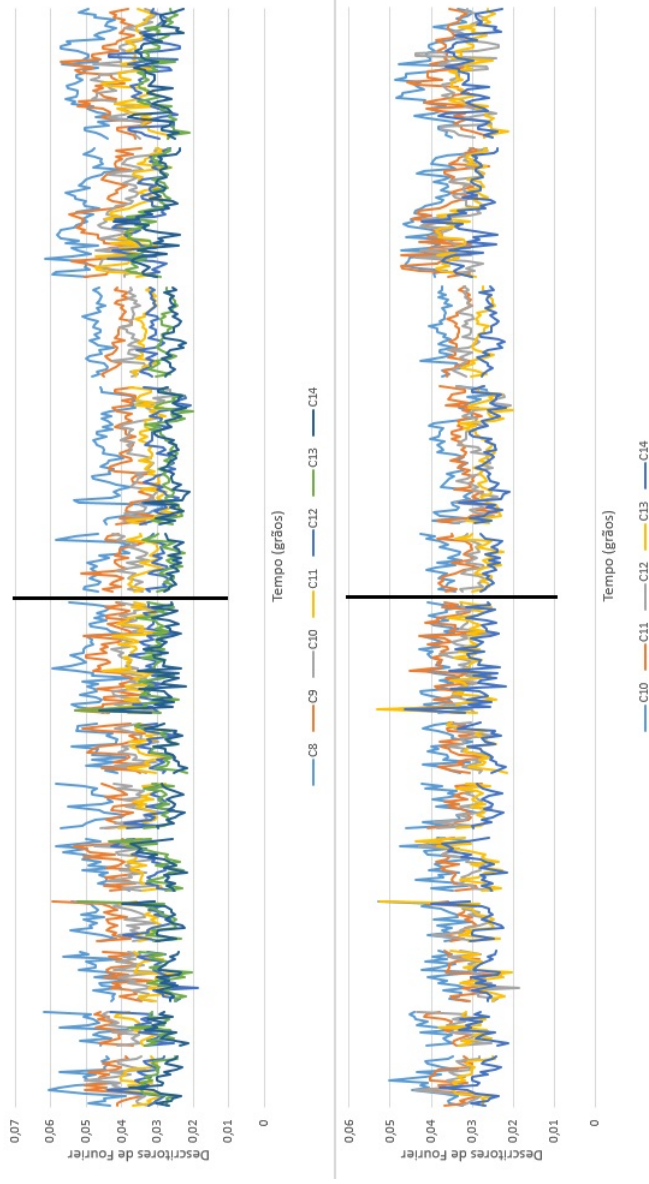


Figura 32 Variação temporal das componentes dos grãos, excluídos os grãos de número 3 e 10, com alteração de escala e C_n com (a) $n \geq 8$ e (b) $n \geq 10$.

Secagem e cura diferem pela perda da umidade e aderência do adesivo. Na secagem a cola sofre perda de umidade para o ambiente para que se finalize a colagem enquanto que a cura é a etapa que consolida a aderência e a resistência da cola. A cura ocorre logo após a secagem, conhecida também como pós-secagem, garantindo níveis máximos de aderência.

Independente dos grãos escolhidos, a média das componentes tenderam a ser semelhantes, veja no gráfico de médias na Figura 33. Tomemos o primeiro subgráfico, nele estão apresentadas as médias da componente C_2 em cada grão observado, por serem grãos distintos era esperado que os valores fossem diferentes, no decorrer das descrições de cada um desses grãos as componentes vão apresentando valores de média muito próximos uns dos outros, tendendo a zero.

Para diferenciar as componentes a análise de médias se mostrou pouco representativa, pois possuem valores similares após análise de certa componente. A partir de C_9 as componentes apresentaram médias parecidas e pouca oscilação entre esses valores, o que não apresentou grande diferença entre elas.

O desvio-padrão das componentes foi um método de comparação que apresentou oscilações interessantes, mostrando que as componentes são diferentes em cada grão. Isso tornou evidente que são componentes presentes em grãos distintos, por não serem valores contínuos como apresentados nos últimos subgráficos do gráfico de médias.

As médias se mantiveram constantes, exceto as médias das componentes C_2 e C_3 que apresentaram grande oscilação, o mesmo aconteceu com o desvio padrão. Nas seis primeiras componentes, não houve destaque entre elas, porém os dados foram decaindo, isto é, as imagens foram se tornando mais escuras, pelo fato de não terem grande atividade, caso contrário os pontos brancos estariam mais evidentes. Segundo Freitas (2010, p. 23), os "histogramas com médias baixas

representam imagens mais escuras enquanto que histogramas com médias altas representam imagens mais claras".

Tabela 3 Valores da Média (μ) e Desvio-padrão (σ) da componente C_2 .

Componente (C_2)		
Grão	μ	σ
1	0,323778	0,028759
2	0,347131	0,031969
3	0,342084	0,033728
4	0,314495	0,029795
5	0,329036	0,038681
6	0,330024	0,042172
7	0,327142	0,043615
8	0,326597	0,023222
9	0,329648	0,027827
10	0,305287	0,032287
11	0,312741	0,024369
12	0,295132	0,018907
13	0,350447	0,035562
14	0,351342	0,044248

Na Tabela 3 tem-se os valores de C_2 apresentados no primeiro subgráfico nos gráficos de desvio-padrão e de média da Figura 33.

Freitas (2010) confirma a relação entre desvio-padrão e variabilidade ao mencionar que valores baixos representam imagens homogêneas e valores altos imagens heterogêneas. Entende-se por imagens homogêneas e heterogêneas aquelas que possuem pouca variabilidade e alta variabilidade, respectivamente, no caso desse trabalho, em relação ao comportamento das componentes.

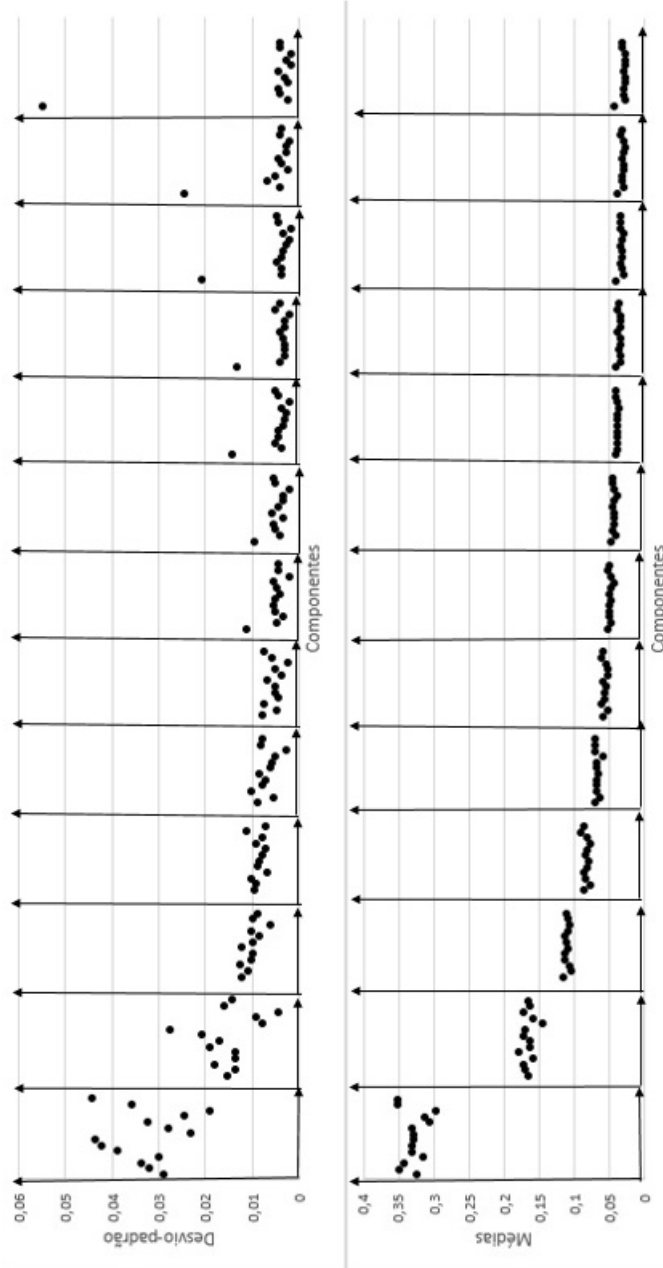


Figura 33 Comportamento de cada uma das 14 componentes em relação à suas médias e desvios-padrão. Nos subgráficos, os eixo das abscissas são referentes ao tempo e nos gráficos maiores é referente às componentes.

Os gráficos da Figura 33 são um conjunto de gráficos das 14 componentes analisadas nos grupos de imagens de cada grão dispostos no tempo, isto é, cada gráfico possui 14 subgráficos, cada subgráfico representa o comportamento de cada componente. O primeiro subgrupo é o dos valores de μ e σ da componente C_2 (Tabela 3), os outros subgrupos são dos mesmos cálculos, porém das demais componentes. Destaca-se que C_1 não está sendo analisada, por motivo mencionado anteriormente.

O gráfico da média demonstra, *mais uma vez*, que as componentes C_2 e C_3 representam melhor os grãos por possuírem médias maiores que as demais componentes. As primeiras componentes são as que mais expressam a grande modificação dos grãos, em outros termos, apresentam maior variação dos valores (Figura 33).

4.3.3 Modificação das formas dos grãos

Ao se comparar os *frames* com seus consecutivos, notou-se que há uma tendência importante das atividades médias das componentes mais ativas. Tal tendência tende a zero, o que implica ser uma tendência de secagem.

Os adesivos epóxi são quimicamente categorizados como termofixos (ou termorrígidos), por serem capazes de resistir a altas temperaturas (SOARES et al, 2013). Por ser bicomponente, um deles age como catalizador que adianta o efeito exotérmico do componente para que atinja o ponto de cura. Nesse ponto o adesivo se torna altamente rígido e resistente, porém até atingir tal ponto a mistura apresenta variações quanto a sua viscosidade e colagem, sendo susceptível à absorção e perda de água do ambiente. Esse efeito de troca de umidade com o ambiente assemelha-se a um fenômeno conhecido como higroscopicidade. O que explica as oscilações presentes na variação dos dados apresentados nos gráficos.

Quando se atinge o ponto extremo de cura do adesivo epóxi, os dados apresentam forma contínua devido o término da variação de suas formas, em outras palavras, as componentes já não se alteram mais.

Inicialmente as componentes apresentaram atividade intensa, com isso as formas dos grãos também se modificavam, juntamente com suas variações apresentadas nos *frames*. A cura do adesivo marca o fim dessas modificações da forma dos grãos, apresentando valores das médias de variação de energia próximas ou iguais a zero em gráfico contínuo, pois com a secagem os grãos *speckle* não se modificam mais.

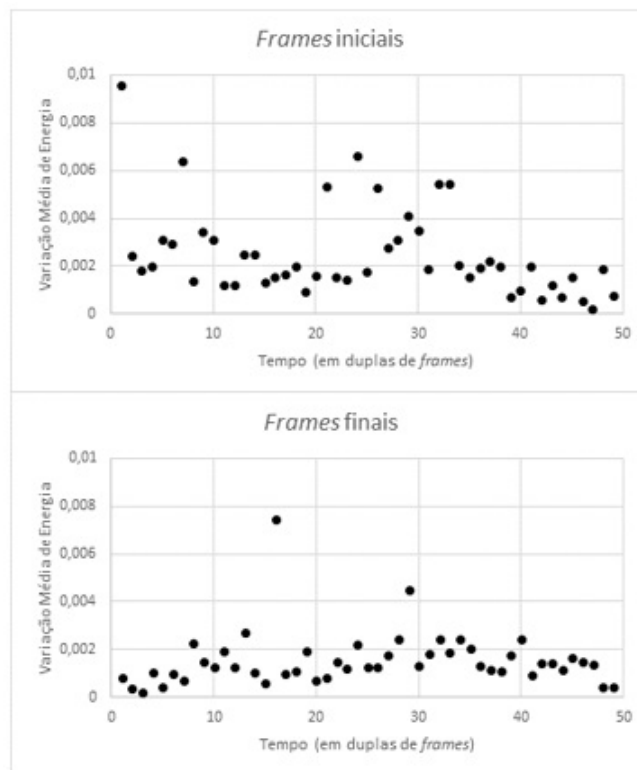


Figura 34 Variação Média de Energia por duplas de *frames*.

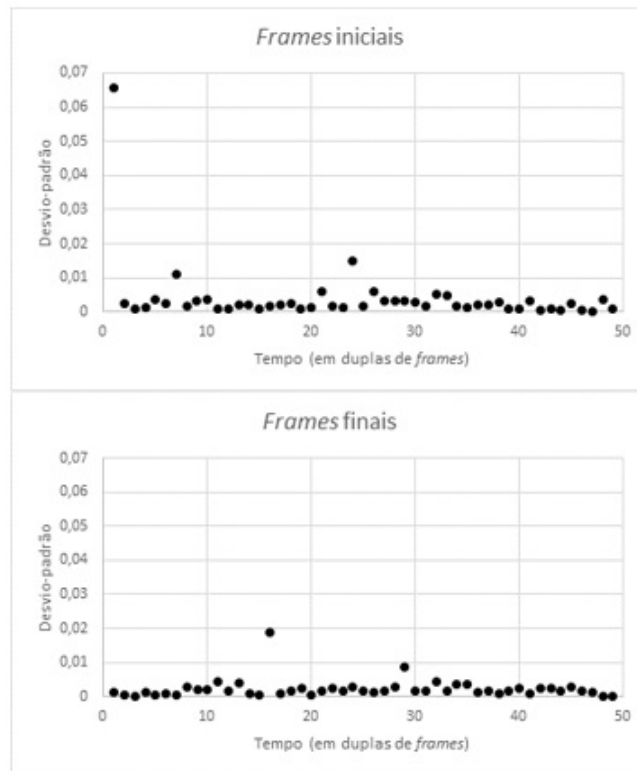


Figura 35 Desvio Padrão por duplas de *frames*.

Nos gráficos da Variação Média de Energia (Figura 34), observa-se a tendência decrescente com muitas oscilações. Na Figura 35, os gráficos de desvio-padrão mostrou que a partir do ponto 78 (último pico maior do gráfico dos *frames* finais), a variação é muito pequena, isso implica que a redução da atividade do adesivo foi alta, sinal que já estava quase seco.

4.3.4 Reconstrução dos grãos

Com os cálculos da Transformada de Fourier obtém-se um conjunto completo de números para cada grão, isso implica, segundo Dalitz (2013), que sua forma original pode ser reconstituída através dos descritores de forma, isto é, neste caso, os descritores de Fourier.

A reconstrução seguiu como padrão o ilustrado na Figura 14, a imagem do grão não foi representada, mas com a Transformada Inversa de Fourier obteve-se os valores das somas de ângulos. O processo de reconstrução é o inverso do que foi apresentado nesse trabalho, com os dados das somas de ângulos é simples retornar a forma dos grãos utilizando-se um método de medida de ângulos e traçando retas até que se feche a borda desse grão.

A reconstrução reproduz exatamente os valores da soma de ângulos, a Tabela 4 expõe os primeiros valores de soma de ângulos de um grão. Após aplicar a Transformada Inversa de Fourier tem-se os valores iniciais, isto é, a soma dos ângulos do grão analisado.

Tabela 4 Fragmento da tabela de dados de um dos grãos analisados.

Soma de ângulos	Transformada de Fourier	Transformada Inversa de Fourier
0.000000	1.000000	0.000000
1.570796	0.316968	1.570796
1.570796	0.203931	1.570796
6.283185	0.108238	6.283185
7.853982	0.087078	7.853982
12.566371	0.066373	12.566371
12.566371	0.059650	12.566371
17.278760	0.046527	17.278760
18.849556	0.042686	18.849556
18.849556	0.033537	18.849556

5 CONCLUSÃO

Com o tempo os coeficientes de Fourier vão apresentando valores constantes, o que já era esperado. Isso mostra que esses descritores oscilam conforme há oscilação dos dados da forma do grão, isto é, quanto maior a atividade de mudança da forma do grão mais intensa a variação dos valores dos descritores.

Os valores da variação média da energia das componentes dos grãos foram representativos, pois seus valores foram próximos de zero o que representa a redução das atividades das componentes em relação à forma dos grãos. A variação das componentes diminuiu mostrando tendência decrescente de valores.

Importante frisar que as maiores oscilações de valores desses descritores foram nos *frames* iniciais e intermediários, onde a atividade era mais intensa.

Outro ponto a se considerar é que esse método é geral, usou-se como exemplo o adesivo epóxi, porém o mesmo pode ser usado para outras amostras ativas, por exemplo em análise de imagens de grãos agrícolas como milho, feijão e soja, ou até mesmo em amostras de sangue.

Os coeficientes de Fourier são uma forma completa de descrição dos grãos, permitindo também a reconstrução desses grãos e diferenciá-los, com base em sua modificação intensa ou não, em relação à sua posição inicial ou final na análise da série de imagens.

Deve-se usar a identificação de grãos *homólogos*, assim a mudança de um frame a outro é mais simples de observar em processos mais lentos, devido a mudança intensa que os processos rápidos apresentam. Ao passar muito tempo de um frame a outro o processo seria muito rápido mostrando mudanças desconhecidas dos grãos, dificultando a escolha dos homólogos.

A existência de grãos que desaparecem, fragmentam ou se criam no tempo e não possuem homólogos dificultam a medida por esse método. Esses problemas podem ser amenizados com ajustes nas imagens, após a etapa de captura das mesmas.

A vizinhança de 4 fornece uma descrição dos grãos que pode ser melhorada utilizando a vizinhança de 8, que necessitaria de mais tempo computacional.

A partir desses resultados, pode-se concluir que os objetivos foram atingidos. Assim, pode-se comparar as mudanças das formas de grãos de *speckle* no tempo utilizando a estratégia de descrição em Séries de Fourier desses grãos.

6 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, seria desejável desenvolver um programa que processasse todos os *frames* automaticamente sem a necessidade de identificação de homólogos de grãos pelo utilizador.

Referências Bibliográficas

ALVES, J. A. **Aplicação da técnica do biospeckle laser com abordagem espectral em cenoura minimamente processada**. 2012. 74 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência dos Alimentos, Departamento de Ciências dos Alimentos, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

ANSARI, M.D.; NIRALA, A. K. Biospeckle activity measurement of Indian fruits using the methods of cross-correlation and inertia moments. **Optik: International Journal for Light and Electron Optics**. Dhanbad, India, p. 2180-2186. set. 2013.

BACK, J. A.; TEDESCO, L. P. . Proposta de um Sistema para Monitoracao e Analise de Energia Eletrica em Ambientes Industriais. In: **XXXII ENEGEP (Encontro Nacional de Engenharia de Produção)**, 2012, Bento Gonçalves - RS. Desenvolvimento Sustentável e Responsabilidade Social: As Contribuições da Engenharia de Produção, 2012.

BAGNATO, V. S. Os fundamentos da luz laser. **Física na Escola**, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 4-9, jul./dez. 2001.

Bauer, R. S.; Application of epoxy resins in advanced composites. **Tomorrow's Materials: Today**. V. 34, p. 1889 -1900, 1989.

BOBER, M.; PRETEUX, F.; KIM, W. Visual Shape Descriptors.**Introduction to MPEG 7: Multimedia Content Description Language**, p. 223-252, 2001.

BORZA, D. N.; NISTEA, Ioana T. High temporal and spatial resolution in time resolved speckle interferometry. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 50, n. 8, p. 1075-1083, 2012.

BRAGA JR., R. A. **Biospeckle: uma contribuição para o desenvolvimento de uma técnica aplicada à análise de sementes**. 2000. 150 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2000.

CARNEIRO, R. P. **Colagem de juntas de madeira com adesivo epóxi**. 2010. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Tecnologia da Universidade do Pará, Belém, Pará, 2010.

CHEN, L. C.; HAI, Hoang H. Fourier transform profilometry employing novel orthogonal elliptic band-pass filtering for accurate 3-D surface reconstruction. **Precision Engineering**, v. 38, n. 3, p. 512-524, 2014.

COSTA, R. M. **Técnicas Estatísticas Aplicadas em Imagens speckle Dinâmico**. 2009. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2009.

CRAMMOND, G.; BOYD, S. W.; DULIEU-BARTON, J. M. Speckle pattern quality assessment for digital image correlation. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 51, n. 12, p. 1368-1378, 2013.

Curso Superior de Tecnologia em Luteria. **Cola**. Universidade Federal do Paraná. 2013. Disponível em <<http://www.luteria.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2013/11/COLAS.pdf>>. Acesso em 28 de outubro de 2015.

DALITZ, C. et al. Fourier descriptors for broken shapes. **EURASIP Journal on Advances in Signal Processing**, v. 2013, n. 1, p. 1-11, 2013.

DUNN, A. K. et al. Dynamic imaging of cerebral blood flow using laser speckle. **Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism**, v. 21, n. 3, p. 195-201, 2001.

FIGUEIREDO, D. **Análise de Fourier e Equações Diferenciais Parciais** - 4ª edição. Rio de Janeiro: Instituto de Matemática Pura e Aplicada. 2012.

FILHO, V. B. **Aplicação de Séries de Fourier para análise de retorno de ativos financeiros**. 2005. 96 p. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2006.

FREITAS, P. L. S. **Análise do comportamento de métodos de classificação de padrão de speckle dinâmico**. 2010. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2010.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento digital de imagens**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 510 p.

HE, Y. et al. Astigmatism error modification for absolute shape reconstruction using Fourier transform method. **Optics Communications**, v. 332, p. 233-237, 2014.

HECHT, E. **Optics**. Massachusetts: A. Wesley, 2001. 680 p.

HUANG, Y. H. et al. Quantitative phase retrieval in dynamic laser speckle interferometry. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 50, n. 4, p. 534-539, 2012.

KUMAR, A.; WELTI, D.; ERNST, R. R. **NMR Fourier zeugmatography**. **Journal of magnetic resonance**, v. 213, n. 2, p. 495-509, 2011.

KURENDA, A.; ADAMIAK, A.; ZDUNEK, A. Temperature effect on apple biospeckle activity evaluated with different indices. **Postharvest biology and technology**, v. 67, p. 118-123, 2012.

MARK, H.F.; BIKALES, N.; OVERBERGER, C. G.; MENGES, G.; KROSCWITZ, I. J. Emulsion polymerization to fibers. **Manufacture encyclopedia of polymer science and engineering**, John-Wiley, New York, 1986.

MOREIRA, J. **Desenvolvimento de uma ferramenta computacional de livre acesso para o processamento de imagens do speckle laser dinâmico**. 2013. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2013.

MORETTIN, P.A.; TOLOI, C. M. **Análise de Séries Temporais**. Edgard Blucher. São Paulo, 2004.

MORRIS, G. A.; FREEMAN, R. Selective excitation in Fourier transform nuclear magnetic resonance. **Journal of Magnetic Resonance**, v. 213, n. 2, p. 214-243, 2011.

MUSTAFI, A.; GHORAI, S. K. A novel blind source separation technique using fractional Fourier transform for denoising medical images. **Optik-International Journal for Light and Electron Optics**, v. 124, n. 3, p. 265-271, 2013.

NASCIMENTO, A. L. *Biospeckle laser*: Uma contribuição para o desenvolvimento da técnica na avaliação biológica em meio líquido. In: Universidade Federal de Lavras (Ed.). **Academic Press**, Lavras, Minas Gerais. 2005.

NETO, J. F. **Aplicação da Transformada de Fourier no Processamento Digital de Imagens**. 1999.

NOBRE, C. M. B. et al. Biospeckle laser spectral analysis under Inertia Moment, Entropy and Cross-Spectrum methods. **Optics Communications**, v. 282, n. 11, p. 2236-2242, 2009.

OLIVEIRA, G. N.; DE OLIVEIRA, M. E.; SANTOS, P. A. M. Photorefractive Fourier transform profilometer for the measurement of 3-D object shapes. **Optics Communications**, v. 285, n. 24, p. 4906-4910, 2012.

PAJUELO, M.; BALDWIN, G.; RABAL, H.; CAP, N.; ARIZAGA, R.; TRIVI, M. Bio-speckle assessment of bruising in fruits. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 40, n. 1, p. 13-24, 2003.

PAIXÃO, C. A. **Desenvolvimento de modelo dinâmico para o biospeckle**. 2009. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2009.

PEREIRA, L. R. Dossiê técnico. Adesivos. **Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais / CETEC**. 2007. Disponível em < <http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/MTEz> > Acessado em 20 de fevereiro de 2015.

PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F. Pull Off Test to evaluate the compressive strength of concrete: an alternative to Brazilian standard techniques. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 6, p. 757-780, 2012.

RABAL, H. J.; BRAGA JR, R. A. (Ed.). Dynamic laser speckle and applications. **CRC Press**, 2008.

RABELO, G. F.; BRAGA JR, Roberto A.; FABBRO, I. Laser speckle techniques in quality evaluation of orange fruits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 570-575, 2005.

SAMPALLO, G. et al. Sistema experto para clasificación de granos de arroz pulidos. **Congreso Argentino de AgroInformática**, CAI 2013.

SHU, X.; PAN, L.; WU, X. J. Multi-scale contour flexibility shape signature for Fourier descriptor. **Journal of Visual Communication and Image Representation**, v. 26, p. 161-167, 2015.

SILVA, D. M. **Interferometria speckle com lasers de diodo multimodo para análise de materiais e dispositivos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) - Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2011.

SILVA, E. R.; MURAMATSU, M. O fenômeno do speckle como introdução a metrologia óptica no laboratório didático. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 2, p. 283-286, 2007.

SOARES, B. G. et al. As diversas aplicações dos materiais termorrígidos: do barco e avião a componentes eletroeletrônicos. **7ª Semana de Polímeros**. Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. Disponível em <<http://www.ima.ufrj.br/noticiasextensao/apresentacoes-da-7a-semana-de-polimeros/>> Acessado em 20 de fevereiro de 2015.

SRIVASTAVA, A.; TURAGA, P.; KURTEK, S. On advances in differential-geometric approaches for 2D and 3D shape analyses and activity recognition. **Image and Vision Computing**, v. 30, n. 6, p. 398-416, 2012.

SZYMANSKA-CHARGOT, M.; ADAMIAK, A.; ZDUNEK, A. Pre-harvest monitoring of apple fruits development with the use of biospeckle method. **Scientia Horticulturae**, v. 145, p. 23-28, 2012.

TEBALDI, M. et al. Speckle interferometric technique to access soap films. **Opt. Commun.** 229, 29-37 p. 2004.

YUAN, Z. et al. Description of shape characteristics through Fourier and wavelet analysis. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 27, n. 1, p. 160-168, 2014.

WINTERLE, P.; STEINBRUCH, A. **Geometria Analítica**. 2000.

ZAHN, C. T.; ROSKIES, R. Z. Fourier descriptors for plane closed curves. **Computers, IEEE Transactions on**, v. 100, n. 3, p. 269-281, 1972.

ZDUNEK, A.; HERPPICH, W. B. Relation of biospeckle activity with chlorophyll content in apples. **Postharvest Biology and Technology**, v. 64, n. 1, p. 58-63, 2012.

ZHANG, D.; LU, G. Study and evaluation of different Fourier methods for image retrieval. **Image and Vision Computing**, v. 23, n. 1, p. 33-49, 2005.

ZHAO, Y.; BELKASIM, S. Multiresolution Fourier descriptors for multiresolution shape analysis. **Signal Processing Letters, IEEE**, v. 19, n. 10, p. 692-695, 2012.

ZILL, D. G.; CULLEN, M. R. **Matemática Avançada para Engenharia-Vol II**. Bookman, 2009.