Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada, v.3,n.1, junho de 2016.

Estudo do tempo de secagem em amostras líquidas com a técnica de *speckle*

Estudio del tiempo del secado en muestras neto con la técnica *speckle*

Study of the drying time in liquid samples with the technique of speckle

Sidney L. da Silva[1]; Carlos N. Junior; Mateus A. de Jesus; Renan Walsechi; Charles R. da Silva; Thamires C. de A. Amorim; Samuel de Oliveira

Resumo: Nesse trabalho, utilizou-se a técnica de *speckle* para estudar o tempo médio de secagem em amostras líquidas: corretivo líquido, *liquid paper*, colas de madeira e branca. Os dados, vídeos, foram capturados por uma câmera digital após o laser interagir, por reflexão, com a superfície das amostras. Cada vídeo foi separado em 16 grupos de 256 quadros, utilizados para obtenção dos arquivos THSP, *Time History Speckle Pattern*, que foram transformados em arquivos MOC, Matrizes de Coocorrências. Cada matriz MOC foi transformada em um valor de MI, Momento de Intensidades. Como cada MI está associado à um intervalo de tempo, foram construídos gráficos MI versus tempo para obtenção dos tempos de secagem das amostras. Com esses resultados, concluiu-se que o método apresentado é eficiente na determinação de tempos de secagem das amostras líquidas utilizadas nesse trabalho.

Palavras-chave: óptica; interferência; *speckle*; THSP; MI.

Resumen: En este trabajo, hemos utilizado la técnica del speckle para estudiar el tiempo de secado en muestras líquidas: líquido corrector, *liquid paper*, adhesivo para madera y pegamento blanco. Los datos, videos, fueron capturados por una cámara digital, después de que el láser se reflecta en la superficie de la muestra. Cada vídeo fue separado en 16 grupos de 256 marcos, utilizados para componer los archivos THSP, *Time History Speckle Pattern*, que fueron transformados en los archivos MOC, matrizes de ocurrencia simultanea. Cada serie se ha tranformado en um valor MI, momento de la intensidad. Devido a que cada MI se asocia con un intervalo de tiempo, fueron construidos gráficos de MI en función del tiempo para obtener el tiempo de secado de las muestras. Con estos resultados se concluye que el método presentado es eficaz en la determinación de los tiempos de secado en muestras líquidas usadas en este trabajo.

Palabras-clave: óptico; interferencia; *speckle*; THSP; MI.

Abstract: *In this work, we used the speckle technique to study the time of drying in liquid samples: correction fluid, wood glue and white glue. The data, videos, were captured by a digital camera after the laser interaction, by reflection, with the surface of the sample. Each video was separated into 16 groups of 256 frames each and used to obtain the THSP files, Time History Speckle Pattern, which was transformed into MOC files, co-occurrences Matrix. Each MOC file was transformed into a MI value, moment of intensities. As each MI is associated with a time interval, were constructed graphs of MI versus time to obtain the drying time of the samples. With these results it was concluded that the presented method is effective in determining drying times of liquid samples used in this work.*

Key-words: *Optics;Interference; Speckle, THSP, MI.*

[1]Bacharel em Física Aplicada e Instrumentação, Mestre em Ciências (Física), Doutorando em Ciências (Física), pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo; Professor e Pesquisador da Fatec de Itaquera Prof. Miguel Reale, *e-mail*: fatec.professor.sidney@gmail.com

1. Introdução

Diversas técnicas ópticas como *speckle*, holografia, fotoelasticidade etc., podem ser utilizadas para caracterização ou confirmação de determinadas propriedades físicas de materiais. Dentre essas técnicas, o *speckle*, vem se destacando por possuir uma configuração experimental simples. Alguns trabalhos, que utilizam essas técnicas foram realizados com muitas áreas de aplicação, tanto científicas quanto tecnológicas, (KON, 2006; SILVA e MURAMATSU, 2007).

Isaac Newton, em seu tratado *Optiks*, foi o primeiro a descrever qualitativamente o granulado óptico que surgia quando uma onda luminosa incidia em superfícies de materiais (NEWTON, 2015). Mais tarde, em um trabalho publicado em 1877, Exner descreveu a estrutura fibrosa vista quando a onda luminosa de uma lâmpada de mercúrio atravessava uma placa de vidro onde condensava vapor de sua respiração. Por volta de 1900, o pesquisador De Hass atribuiu a estrutura fibrosa à não monocromaticidade da radiação incidente. O formalismo matemático para o fenômeno inicialmente descrito por Newton foi introduzido por von Loue e lord Rayleigh na primeira década de XX. (ARIZAGA, TRIVI e RABAL, 1999)

A invenção do laser na década de 1960 proporcionou o avanço da técnica, hoje conhecida como *speckle*, que juntamente com seus diversos métodos, tem sido largamente utilizada nos dias atuais para análise de superfícies de diversos materiais em diversas áreas do conhecimento, como Física, Engenharia Mecânica e de Materiais, Odontologia, Medicina etc.

Por se tratar de uma técnica que não danifica o material de estudo, promove grande interesse tanto na área científica quanto na tecnológica, despertando grande curiosidade nas indústrias e nos centros de pesquisa e caracterização de materiais. Outra vantagem desta técnica é a facilidade de montagem de sua configuração experimental. Com a computação, a dinâmica de análise dos dados se torna quase imediata e os resultados podem ser obtidos de maneira sistemática e com grande precisão.

O propósito desse trabalho é, então, o de apresentar um estudo sobre o tempo de secagem em amostras líquidas: corretivo líquido, *liquid paper*, cola de madeira e cola tenaz. Como perspectiva de sequência do estudo inicialmente proposto, pretende-se comparar e verificar a validade dos resultados obtidos utilizando o método de correlação indicado por (SILVA, 2007).

2. O Método *Time History Speckle Pattern*

Speckle é uma área da óptica que estuda o comportamento estático ou dinâmico do fenômeno de interferência em superfícies iluminadas por uma onda de luz coerente ao longo do tempo (SILVA e MURAMATSU, 2007). A **Figura 1** mostra uma foto da interferência formada durante a iluminação de uma gota de corretivo líquido, *liquid paper*, por um laser de Hélio-Neônio. A imagem é similar a um conjunto de grãos claros e escuros, criando um efeito granulado que na língua inglesa é comumente conhecido como *speckle*.

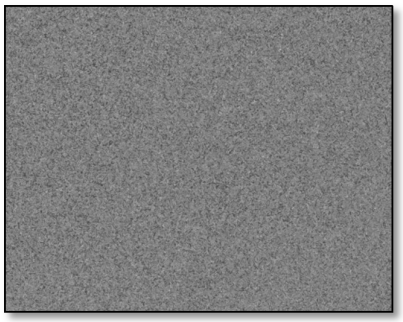

Figura 1: Imagem em 8 bits, preto e branco, do padrão estático de *speckle* de uma gota de corretivo líquido, quando iluminada por laser de He-Ne.
Fonte: Grupo de óptica da Fatec de Itaquera

Dentre os diversos métodos para análise de *speckle* dinâmico, destaca-se o *Time History Speckle Pattern*, THSP, ou história temporal do padrão de *speckle* (JUNIO, 2013). O método consiste em registrar, computacionalmente, a história temporal de um padrão de *speckle* em uma imagem bidimensional, através da coleta de uma linha de pixels de uma determinada direção da imagem, por exemplo horizontal, em instantes sucessivos e organizá-los em outra direção, por exemplo vertical, lado a lado, em uma imagem intermediária, o THSP. O esquema da **Figura 2** ilustra esse procedimento.

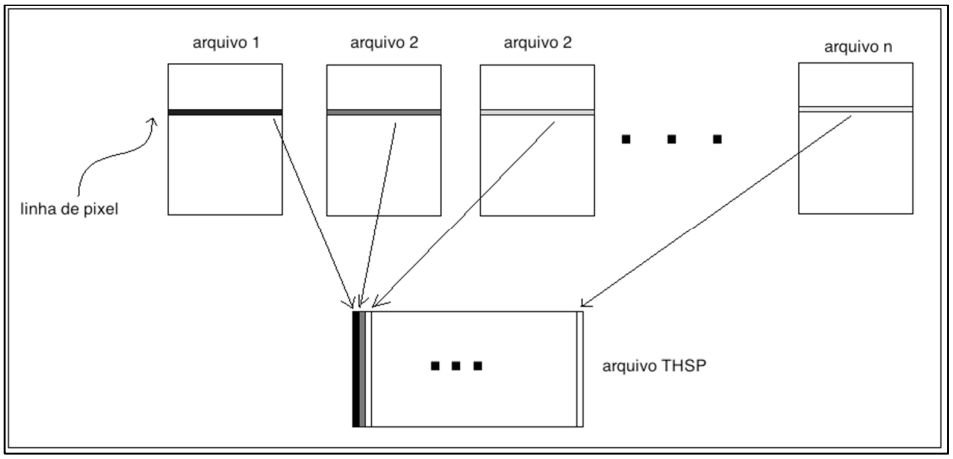

Figura 2: Esquema da criação do arquivo THSP. Cada linha de pixels dos arquivos separados do vídeo são transportados, ordenadamente, a uma coluna no arquivo THSP.
Fonte: Sidney Leal da Silva

A **Figura 3** apresenta uma imagem THSP de 256 linhas verticais, obtida a partir de imagens de *speckle* dinâmico registrada por uma câmera digital.

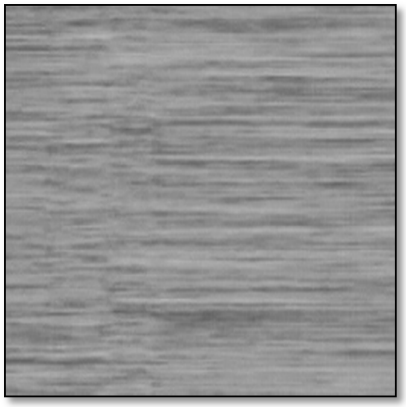

Figura 3: Imagem de um THSP, de 256 linhas verticais, que apresenta a história temporal de imagens de *speckle* dinâmico.
Fonte: Grupo de óptica da Fatec de Itaquera

Uma das possibilidades de análise dos arquivos THSP é determinar as Matrizes de Ocorrências (MOC) e utilizá-las para determinação dos momentos de intensidade, também denominados Momentos de Inércia (MI), e relacioná-los com os tempos de duração de cada THSP (JUNIO, 2013).

Para ilustrar a ideia da construção de uma MOC (COSTA, 2009), suponha um arquivo bidimensional de 2 bits. Então a MOC terá dimensão 4x4 e o número de valores de intensidade que um pixel qualquer adquire quando a imagem é transformada em uma matriz numérica é 4, pois o pixel pode variar, em intensidade, de 0 a 3. Para efetuar a contagem, pega-se o valor de intensidade, não repetido, da célula i-j e conta-se, ao longo de toda a matriz THSP, o número de repetições. O resultado das contagens é armazenado na célula i-j da matriz MOC. A **Figura 4** ilustra, em dois exemplos, a sequência de transformação de uma imagem THSP em uma imagem MOC:

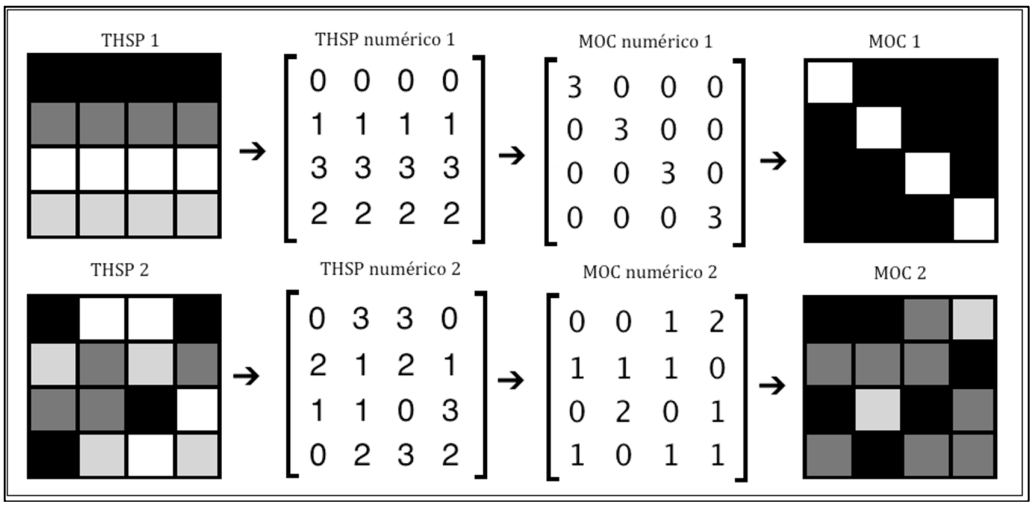

Figura 4: transformação de imagem THSP em MOC, para dois exemplos de 2 bits.
Fonte: Sidney Leal da Silva.

No exemplo 1, THSP1 da **Figura 4**, o resultado da MOC apresenta valores de contagem somente na diagonal principal, devido ao padrão estático do *speckle*. No exemplo 2, THSP2 da **Figura 4**, o resultado da MOC apresenta valores de contagem em torno da diagonal principal, indicando dinamismo no padrão *speckle*. O resultado da MOC apresenta valores de contagem em torno da diagonal principal, indicando o dinamismo no padrão de *speckle*. Para um padrão menos dinâmico há menos contagens em torno da diagonal, como a MOC 1 da **Figura 4**. Para um padrão mais dinâmico há mais contagens em torno da diagonal, como a MOC 2 da **Figura 4**. A partir da MOC numérica, determina-se o Momento de Intensidade (MI) (COSTA, 2009; ARIZAGA, TRIVI e RABAL, 1999), através do cálculo que utiliza a distância de cada ponto da MOC até a diagonal principal multiplicada pelo peso de cada ponto, que representa o número de ocorrências. A expressão geral é

$$MI = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} M_{ij} \cdot (i-j)^2 \quad (1)$$

$M_{ij} = N_{ij} / \sum_i \sum_j N_{ij}$ é a matriz de coocorrências normalizada, também conhecida como matriz de coocorrência modificada, N_{ij} é o número de ocorrências de intensidades sucessivas na MOC e $\sum_i \sum_j N_{ij}$ é a soma total de todas as intensidades da MOC, também chamada de termo de normalização. A **Figura 5** exemplifica os cálculos dos momentos de intensidades a partir das MOC's da **Figura 4**.

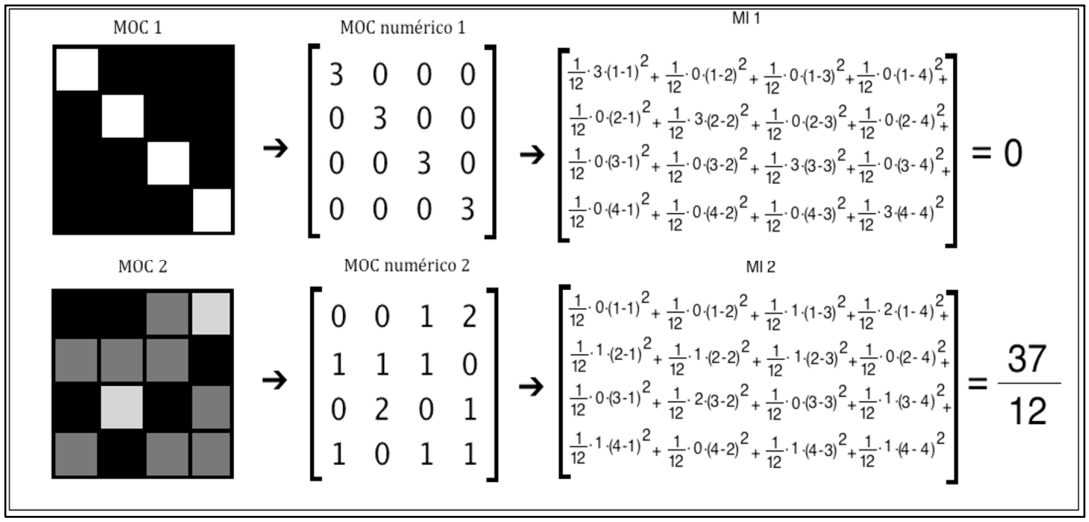

Figura 5: Cálculo dos valores de Momento de Intensidade para as MOC's 1 e 2 da Figura 4.
Fonte: Sidney Leal da Silva.

No primeiro exemplo, MOC da **Figura 5**, MI1 = 0 indica um padrão estático de *speckle*. No segundo exemplo, MOC 2 da **Figura 5**, MI2 = 37/12 indica um padrão dinâmico de *speckle*. O resultado da MI apresenta valores que indicam o dinamismo relativo no padrão de *speckle*. Para um padrão menos dinâmico o MI é menor, como MI1 = 0, a partir da MOC 1 na Figura 5. Para um padrão mais dinâmico o MI é maior, como MI2 = 37/12, a partir da MOC 2 na **Figura 5.**

3. Materiais, técnicas e métodos

3.1. Amostras

As amostras utilizadas nesse trabalho foram: corretivo líquido à base de água, BIC, conteúdo 18 ml; cola de madeira, resina alifática, também conhecida como cola de marceneiro, Cascola, conteúdo 100 g; cola branca, lavável Tenaz, acetato de polivinil, Henkel, conteúdo 225 ml. O tempos nominais de secagem fornecidos por Pizzani Química Industrial foram: corretivo líquido (não especificado); cola de madeira (30 min); cola branca (30 min a 1 hora).

Todas as amostras, sem alteração das composições originais vindas nos frascos que as continham, foram posicionadas em um pedaço de folha de papel cartão cortados em forma de quadrados de aproximadamente 2 cm de arestas, em uma área circular de aproximadamente 1 cm de diâmetro. Para posicioná-las, foi utilizado um conta gotas de 10 ml para cada amostra, no sentido de evitar misturas. A quantidade variou de amostra para amostra, levando em consideração o tempo de secagem. Para o corretivo líquido, foi utilizado um quarto do volume do conta gotas, aproximadamente, 2,5 ml e, para as colas de madeira e branca, foram utilizados um vigésimo do volume do conta gotas, aproximadamente, 0,5 ml. As amostras foram preparadas em tempo muito próximo à coleta dos dados, para que o tempo de contagem estivesse, ao máximo, próximo à retirada do conteúdo dos frascos. Todas as medições foram efetuadas na faixa de temperatura entre 20 e 30ºC, à mesma pressão atmosférica de aproximadamente 1 atm e umidade relativa entre 40 e 60%.

3.2. Técnica de *speckle* por reflexão

3.2.1. Configuração experimental de *speckle* por reflexão

Utilizando 10 grupos de cada tipo de amostra preparadas para coleta de dados, capturou-se vídeos com 4096 quadros. Para isso, utilizou-se a configuração experimental de registro de *speckle* por reflexão, apresentada da **Figura 6**.

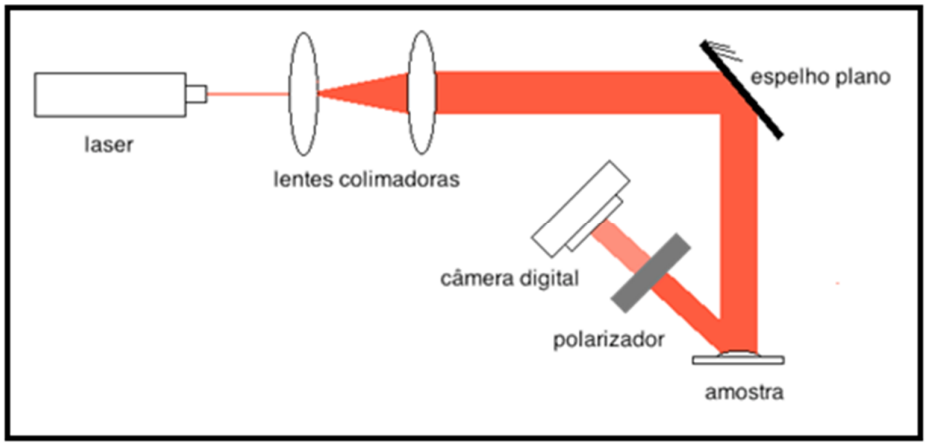

Figura 6: Esquema da configuração experimental de *speckle* por reflexão.
Fonte: Sidney Leal da Silva.

A fonte de luz foi de um laser (FERREIRA, 2003) com comprimento de onda $\lambda = 6{,}328 \cdot 10^{-7}$ m, faixa do vermelho, potência $5 \cdot 10^{-3}$ W. Em seguida, duas lentes fizeram com que a luz seguisse como uma onda plana de intensidade aproximadamente constante. Após passar pelas lentes, a onda refletiu em um espelho plano, que a direcionou até a amostra, produzindo reflexões e, em seguida interferências (EUGENE, 2002), formando o granulado estático ou dinâmico do *speckle*. Esse padrão, após um acerto de contraste por meio de um polarizador, foi registrado durante um certo intervalo de tempo numa câmera digital. O resultado produziu vídeos que foram utilizados como dados para a determinação dos tempos desejados.

3.2.2.Processo de captura dos dados

O processo de captura de dados, em cada amostra, de cada grupo, foi organizado da seguinte forma:

-registrou-se um vídeo com N quadros da amostra seca;

-registrou-se vídeos com N quadros da amostra, ao ser retirada do frasco;

3.3. Método THSP

A análise foi feita por programas computacionais, confeccionados na plataforma MATLAB, e seguiram as seguintes etapas:

-separou-se os vídeos em quadros, que foram armazenados em arquivos de imagens;

-ordenadamente, foram criados grupos de quadros;

-criou-se os arquivos de imagens THSP, a partir dos quadros de cada grupo, criados no item anterior;

-a partir dos arquivos de imagens THSP, criou-se as matrizes de coocorrências, MOC;

-utilizando as MOC's, calculou-se os valores dos momentos de intensidade, MI, também denominados momentos de inércia ou níveis de atividade;

-com os diversos valores MI's, para cada amostra, determinou-se os seus valores médios;

-construiu-se gráficos de MI x t (tempo), em cada amostra, com as médias determinadas no item anterior.

Por meio de um ajuste de curva, pelo método dos mínimos quadrados, encontrou-se as funções MI(t). Com essas funções e o valor de MI da amostra seca, encontrou-se os tempos médios de secagem para cada amostra;

4. Análise de dados e resultados

Durante o processo de captura, foram criados arquivos de vídeo com 8 bits, na escala de cinza, com 4096 quadros em uma taxa de coleta de 30 quadros por segundo. Esses arquivos armazenaram os padrões estático e dinâmico de *speckle* para todas amostras de 1 a 10, nos três grupos. O padrão estático foi obtido com as amostras secas. Cada um dos arquivos foi separado em 16 grupos de 256 quadros e, a partir da taxa de coleta, determinou-se o tempo de duração de cada grupo, 8,53 s.

Por meio de programas computacionais, cada grupo gerou um THSP, que gerou um MOC, que gerou um MI, pela teoria apresentada. Os 16 valores de MI versus tempo, para cada situação estática e dinâmica de todas as amostras, foram armazenados em tabelas para construção dos gráficos com os pontos experimentais. Na situação estática, cada grupo de amostras apresentou um valor médio de momento de intensidades, $\langle MI \rangle$, cujos resultados estão apresentados na **Tabela 1**.

Tabela 1: Valores médios de MI para as amostras secas.

	Corretivo líquido	**Cola de madeira**	**Cola branca**
$\langle MI \rangle$ (10^3)	7,9 ± 0,1	7,1 ± 0,1	7,2 ± 0,1

Fonte: Grupo de óptica da Fatec de Itaquera.

Essa média foi utilizada como referência na determinação dos tempos de secagem, em cada amostra, através da intersecção da curva ajustada aos pontos experimentais de MI em função do tempo, com a linha que passa por $\langle MI \rangle$.

Como ilustração, a **Figura 7** apresenta os gráficos médios de MI em função dos tempos de secagem para os três grupos de amostras utilizadas nesse trabalho.

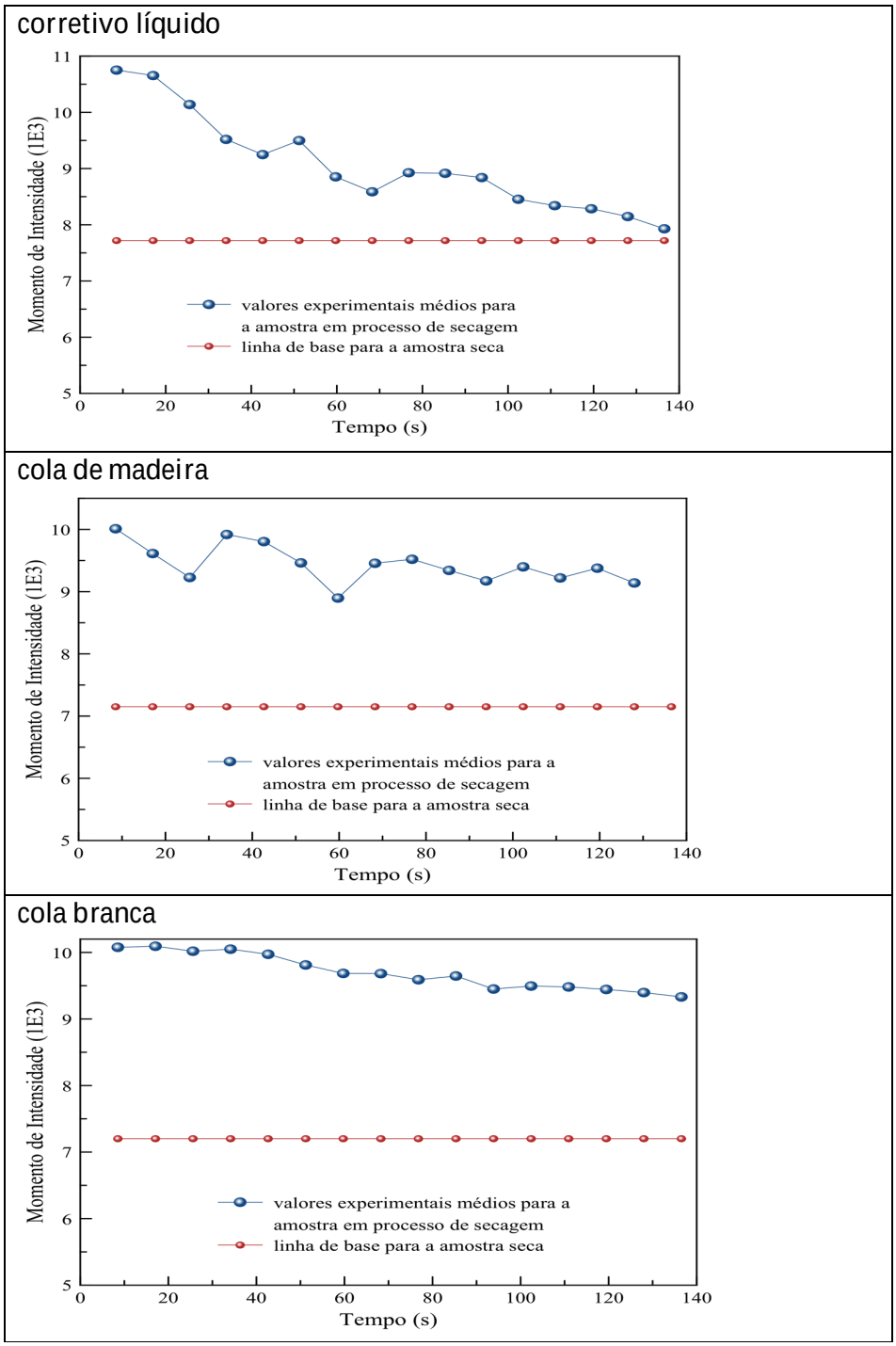

Figura 7 : Gráficos experimentais de MI em função do tempo .
Fonte: Sidney Leal da Silva.

A partir dos gráficos da **Figura 7**, com os devidos ajustes dos pontos experimentais, utilizando o método dos mínimos quadrados, foram obtidas as funções MI x t, para cada amostra. O ponto de intersecção dessas funções com as funções constantes, em vermelho, forneceu os valores médios dos tempos de secagem das amostras. A **Tabela 2** apresenta os valores dos tempos médios de secagem, das amostras estudadas, acompanhada de seus respectivos erros, obtidos também pelo método dos mínimos quadrados.

Tabela 2 : Valores médios dos tempos de secagem para as amostras em estudo.

	Corretivo líquido	Cola de madeira	Cola branca
Tempo médio de secagem	(3,8 ± 1,6) min	(28,0 ± 4,5) min	(40 ± 5) min

Fonte: Grupo de óptica da Fatec de Itaquera.

5. Discussões e conclusões

É possível observar pelos gráficos da **Figura 7** que, em média, os pontos experimentais em azul, de todas as amostras em processo de secagem, tendem aos pontos da linha base em vermelho, das amostras secas. Observa-se também, em média, que os pontos experimentais, da amostra de corretivo líquido, se aproximam muito mais rapidamente dos pontos da linha base do que as demais amostras. A amostra de cola de madeira, possui os pontos experimentais se aproximando mais rápido da linha base do que a amostra de cola branca. As observações do parágrafo anterior estão de acordo com os resultados obtidos para os tempos de secagem dessas amostras, como mostra a **Tabela 3**, onde o valor para o corretivo líquido, mesmo com 5 vezes a quantidade em relação às demais amostras, é muito menor que os valores para as amostras de cola. As quantidades de cola estudadas foram iguais, no entanto, a cola branca apresentou maior tempo médio de secagem. Esses valores, dentro das faixas de erro, estão em acordo com os valores nominais especificados, com exceção do corretivo líquido, onde não foi possível obter o valor nominal.

O erro para o tempo médio de secagem da amostra de corretivo líquido foi da ordem de 42%. Isso mostra que ajustes experimentais devem ser feitos para melhores resultados. Deve-se também comparar esses resultados com resultados obtidos em análises através do método de correlação, obtido também por THSP. Os erros para os tempos médios das demais amostras estão em menor percentual, da ordem de 16% para a cola de madeira e 12,5% para a cola branca. Isso aponta que a técnica e o método aplicados são melhores para materiais com tempos médios de secagem maiores.

Mesmo com o cuidado na preparação das amostras, a precisão nas quantidades provocou certamente erros que não foram mensurados nesse trabalho. Isso aponta para melhorias futuras no sentido de obtenção de melhores resultados.

Uma melhoria na técnica certamente causará também melhores resultados. Por exemplo, um laser com maior coerência traria maior qualidade nas interferências, um filtro espacial auxiliaria na diminuição dos ruídos do laser, um sistema de polarizadores produziria um melhor ajuste de intensidades e contrastes, uma câmera digital com melhor resolução e tamanhos menores de pixels, registraria imagens com maior qualidade e detalhes, finalmente um aprimoramento dos programas de tratamento de imagens causaria maior confiabilidade nos resultados.

Na próxima etapa do trabalho, uma análise comparativa entre a técnica e o método estudado com outras técnicas e métodos enriquecerá a busca da confiabilidade dos resultados, além de possibilitar construções de novas técnicas e métodos. Também será importante estudar outros materiais, principalmente os que possuem tempos médios de secagem bem distintos. Isso ajudará a estabelecer os limites da técnica e métodos utilizados.

Assim, entende-se que esse trabalho auxiliou uma melhor compreensão da técnica de *speckle* e apontou para uma continuidade dos estudos. Isso produz novas perspectivas, com as mesmas amostras e dados, para análise utilizando o método da correlação, também derivado do THSP.

6. Agradecimentos

À FATEC-Itaquera pelo espaço e parte dos materiais cedidos e ao IFUSP através do Prof. Dr. Mikiya Muramatsu, pela colaboração e parte dos materiais utilizados.

7. Referências bibliográficas

ARIZAGA, R.; TRIVI, M; RABAL, H. **Speckle time evolution characterization by the co-occurrence matriz analysis**. Optics & Laser Technology - Elselvier, vol.31 p. 163(169), La Plata - Argentina, 1999.

COSTA, R.M. **Técnicas estatística aplicadas à imagem do *speckle***. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas). Departamento de Engenharia de Sistemas, Universidade Federal de Lavras - MG.

EUGENE, H. **Óptica**. 2º Ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.

FERREIRA, M. **Óptica e Fotónica**. Lisboa: Editora Lidel-Edições Técnicas, 2003.

JUNIO, M. **Desenvolvimento de uma ferramenta computacional de livre acesso para o processamento de imagens do *speckle* laser dinâmico**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas). Departamento de Engenharia de Sistemas, Universidade Federal de Lavras - MG.

KON; DINO, J. Estudo da evolução da reação de presa do cimento de fosfato de zinco através de luz laser, aplicando a técnica óptica de speckle dinâmico. 2006. Dissertação (Mestrado em Odontologia) – Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo.

NEWTON, I. Óptica. Tradução da 4. Edição de 1730 por André Koch Torres Assis. São Paulo: EDUSP, 2015. 296 p.

SILVA, E.R. **Estudo das propriedades do biospeckle e suas aplicações**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências). Instituto de Física, Universidade de São Paulo - SP.

SILVA, E.R.; MURAMATSU, M. **O fenômeno do speckle como introdução à metrologia óptica no laboratório didático**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol.29 nº2, São Paulo, 2007.

8. Informações complementares sobre os autores:

Carlos Narducci Junior: Professor Mestre do curso de Tecnologia em Mecânica: Processos de Soldagem e colaborador de Iniciação Científica da Fatec de Itaquera Prof. Miguel Reale. *email*:carlos.narducci@fatec.sp.gov.br.

Mateus Aquino de Jesus: aluno do curso de Tecnologia em Automação Industrial e de Iniciação Científica da Fatec de Itaquera Prof. Miguel Reale, *e-mail*: mthsaqn@gmail.com.

Renan Walsechi: aluno do curso de Tecnologia em Mecânica: Processos de Soldagem e de Iniciação Científica da Fatec de Itaquera Prof. Miguel Reale, *e-mail*: renan.walsechi@hotmail.com .

Charles Rodrigues da Silva: aluno do curso de Tecnologia em Automação Industrial e membro do grupo de apoio à Iniciação Científica da Fatec de Itaquera Prof. Miguel Reale, *e-mail*: charles.crdsr@gmail.com.

Thamires Cristina de A. Amorim: aluna do curso de Tecnologia em Automação Industrial e de Iniciação Científica da Fatec de Itaquera Prof. Miguel Reale, *e-mail*: thamires.cristina1996@gmail.com.

Samuel de Oliveira: aluno do curso de Tecnologia em Automação Industrial e membro do grupo de apoio à Iniciação Científica da Fatec de Itaquera Prof. Miguel Reale, *e-mail*: samuel.oliveira2014@hotmail.com.

……...

Artigo recebido para avaliação em 11/01/2065 e aceito para publicação em 29/05/2016.