

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL**  
**CAMPUS ARAPIRACA**  
**FÍSICA - LICENCIATURA**

**TALLES TAVARES DA SILVA**

**ESTUDO DO PROCESSO DE SECAGEM DE TINTA UTILIZANDO A TÉCNICA DE  
SPECKLE DINÂMICO**

**ARAPIRACA**

**2023**

Talles Tavares da Silva

Estudo do processo de secagem de tinta utilizando a técnica de speckle dinâmico

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC),  
apresentado como requisito parcial para a  
conclusão do curso de Física Licenciatura do  
Campus Arapiraca da Universidade Federal de  
Alagoas.

Orientador: Prof. Dr. Emerson de Lima

Arapiraca

2023



Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
*Campus Arapiraca*  
Biblioteca Setorial *Campus Arapiraca* - BSCA

S586e Silva, Talles Tavares da  
Estudo do processo de secagem de tinta utilizando a técnica de speckle dinâmico  
[recurso eletrônico] / Talles Tavares da Silva. – Arapiraca, 2023.  
38 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Emerson de Lima.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Universidade Federal  
de Alagoas, *Campus Arapiraca*, Arapiraca, 2023.  
Disponível em: Universidade Digital (UD) – UFAL (*Campus Arapiraca*).  
Referências: f. 36-37.

1. Interferência (Luz). 2. Speckle dinâmico. 3. Tintas - Secagem. 4. Indústria -  
Manutenção. I. Lima, Emerson de. II. Título.

CDU 53

Talles Tavares da Silva

Estudo do processo de secagem de tinta utilizando a técnica de speckle dinâmico

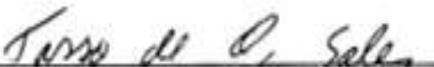
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC),  
apresentado como requisito parcial para a conclusão  
do curso de Física Licenciatura do Campus  
Arapiraca da Universidade Federal de Alagoas.

Data de aprovação: 06/02/2023.

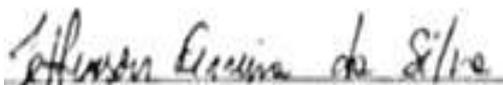
**Banca Examinadora**



Prof. Dr. Emerson de Lima  
Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Campus Arapiraca  
(Orientador)



Prof. Dr. Tasso de Oliveira Salles  
Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Campus Arapiraca  
(Examinador)



Prof. Dr. Jefferson Ferreira da Silva  
Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Campus Arapiraca  
(Examinador)

Dedico este trabalho a toda a minha família, principalmente aos meus pais, José Tavares e Veralúcia, pelo esforço e dedicação que sempre tiveram para que eu pudesse estudar.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, pela oportunidade dessa longa jornada, por cada desafio e conquistas.

Quero agradecer principalmente a minha família, meus pais, José Tavares e Veralúcia, que sempre priorizaram os estudos, tanto o meu, quanto de minha irmã Talita Tavares, que sempre me aconselhou em várias dificuldades nesse caminho.

A todos os meus professores que se dedicaram a me ensinar desde o ensino médio como a Prof. Vera, Eliane, Juvinião, Geovane, Wanessa, Graciedja, Janielma entre outros. Já no curso aos Prof. André, Henrique, Jeferson, Lidiane, Samuel e ao grande Prof. Emerson, que fez a minha experiência no curso ser incrível, obrigado pelas orientações, aprendizagens, confiança e sua amizade. E outra pessoa que não posso esquecer é o técnico Geraldo, por toda paciência, conselhos de vida e ensinamentos sobre Física aplicada.

Meus agradecimentos aos meus amigos Dayane, Emanuel, Felipe, Guttemberg, Jorio, Mateus, Rivaldo, Tay, Ithowith, Celio e todos que me ajudaram em minha formação, principalmente ao Victor Eduardo pela ajuda fundamental nesse trabalho, a Ana Maria pela paciência em me explicar o que não entendia nos cálculos, Hérica Soares sempre me colocando para trabalhar pesado em quase todos os projetos, André Vilela com suas ideias e parceria nos desafios e a Regiane Farias pelos puxões de orelha e motivação no curso, vocês foram amigos incríveis nessa jornada, se tornando como irmãos para mim, assim como todos citados acima, muito obrigado.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, deixo meus agradecimentos.

## RESUMO

Neste trabalho utilizamos a técnica de speckle dinâmico aplicada ao processo de secagem de tintas, para isso utilizamos substratos metálicos. Um problema presente nas indústrias é o processo e controle de secagem de tintas em superfícies metálicas, essa camada de proteção é de grande relevância, tanto para produtos quanto para o próprio maquinário, quando não é realizada a secagem com o tempo certo pode ocorrer corrosões e outros problemas. As ligas metálicas escolhidas nesse trabalho estão presentes no nosso dia a dia, mas com aplicabilidades e características diferentes. A técnica de speckle dinâmico é fundamentada no fenômeno de interferência da luz. Uma vantagem de usar essa técnica é que os ensaios não são destrutivos, preservando o material estudado. Para a análise dos dados utilizamos métodos de processamentos de imagens. Os resultados mostram que esta técnica tem potencial de ser aplicada no processo de secagem de tintas e que a escolha do substrato tem influencia no tempo de secagem.

**Palavras-chave:** interferência da luz; speckle dinâmico; secagem de tintas; manutenção industrial

## **ABSTRACT**

In this work we study the dynamic speckle technique applied to the paint drying process, for which we use metallic substrates. A problem present in industries is the process and control of drying of paints on metallic surfaces, this layer of protection is of great relevance, both for products and for the machinery itself, when drying is not carried out with the right time, corrosion and corrosion can occur. other problems. The metallic alloys chosen in this work are present in our daily lives, but with different applicability and characteristics. The dynamic speckle technique is based on the phenomenon of light interference. An advantage of using this technique is that the tests are non-destructive, preserving the studied material. For data analysis we used image processing methods. The results show that this technique has the potential to be applied in the paint drying process and that the choice of substrate influences the drying time.

**Palavras-chave:** light interference; speckle and drying; paint drying; industrial maintenance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Motor elétrico, apresentando desgaste em sua carcaça	11
Figura 2 – Interação entre a energia radiante e o material alvo	14
Figura 3 – Reflexão especular	15
Figura 4 - Reflexão difusa	16
Figura 5 - Esquema de interação da luz em uma interferência construtiva	18
Figura 6 - Esquema de interação da luz em uma interferência destrutiva	18
Figura 7 - Imagem de uma TV fora de sintonia, analogia com o padrão de speckle	20
Figura 8 – Representação da construção de um exemplar de THSP	21
Figura 9 - Representação de uma COM	22
Figura 10 - Amostras analisadas. (Foto tirada pelo autor)	24
Figura 11 - Foto do módulo laser e sua regulagem	27
Figura 12 - Foto faixa de luz incidindo no material analisado	26
Figura 13 - Ilustração do aparato experimental	27
Figura 14 - Interface do programa STMD	28
Figura 15 - Três THSP iniciais do material, aço 1020, aço rápido e alumínio	29
Figura 16 - THSP primeiro minuto de secagem, aço 1020, aço rápido e alumínio	30
Figura 17 - MCO primeiro minuto de secagem, aço 1020, aço rápido e alumínio	30
Figura 18 - Quatro MCO dos minutos 4, 6, 8 e 10 do alumínio	31

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1- Entropia das amostras, aço 1020, aço rápido e alumínio	32
Gráfico 2 - Homogeneidade das amostras, aço 1020, aço rápido e alumínio.	33
Gráfico 3 - Momento de Inércia das amostras, aço 1020, aço rápido e alumínio	34

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CCD	Charge-Coupled Device
MDI	Módulos de Dispersão de Intensidade
THSP	Time History Speckle Pattern
MOC	Matriz de Coocorrência
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	11
<b>2</b>	<b>O QUE É SPECKLE?</b>	13
2.1	INTERAÇÃO LUZ E MATÉRIA	13
2.2	REFLEXÃO ESPECULAR E REFLEXÃO DIFUSA	14
2.3	ESPALHAMENTO	16
2.4	INTERFERÊNCIA CONSTRUTIVA E DESTRUTIVA	17
<b>3</b>	<b>SPECKLE LASER</b>	19
3.1	SPECKLE	19
3.2	EVOLUÇÕES DO PADRÃO DO SPECKLE NO TEMPO ( THSP)	20
3.3	MATRIZ DE CO-OCORRÊNCIA	21
3.4	GRÃOS DE SPECKLE	23
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	24
4.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	24
4.2	APARATO EXPERIMENTAL	25
4.3	COLETA DE DADOS	27
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	29
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	35
	<b>REFERÊNCIAS</b>	36

## 1 INTRODUÇÃO

Uma ocorrência recorrente em indústrias são corrosões em máquinas e estruturas, hoje em dia boa parte de processos indústrias utilizam ligas metálicas por causa de suas características, tanto em estruturas quanto em máquinas, mas esses materiais necessitam de uma proteção específica para manter suas propriedades, uma delas é a utilização de tintas que protegem a superfície do oxigênio presente na atmosfera (RENNER, 2006).

O processo de secagem de tinta está relacionado com uma boa aderência da camada protetora, a estrutura do material interfere diretamente nas propriedades química (MARTIRE, 2000). Podendo ocorrer corrosões nas mais diversas ligas metálicas presentes em indústrias, ocasionando custos de manutenção e tempo de produção.

Figura 1 – Motor elétrico, apresentando desgaste em sua carcaça.



Fonte: Disponível em: [img.freepik.com/fotos-premium/motor-eletrico-riscado-e-oxidado-velho](http://img.freepik.com/fotos-premium/motor-eletrico-riscado-e-oxidado-velho). Acesso em: 25 jan. 2023.

Como podemos observar na figura 1, esse motor está apresentando um problema comum que ocorre em algumas indústrias e com diversos equipamentos, a carcaça danificada mostra um desgaste natural com o uso do equipamento, caso eles não tenham uma manutenção correta essa exposição da superfície do material diretamente exposta a atmosfera pode ocasionar uma um processo de oxidação, trazendo mais prejuízo (RENNER, 2006).

A partir de vários objetos estudados com o passar do tempo pela ciência, um dos que mais se destaca é a utilização do LASER (Amplificação de emissão estimulada de luz). Sua relevância nas mais diversas áreas da sociedade se destaca pela sua precisão e coerência, entre outras vantagens, sendo o princípio de várias outras descobertas importantes (BAGNATO, 2008). Além das mais diversas aplicabilidades como na medicina e odontologia

(CAVALCANTI *et al.*, 2011). Logo após o início dos estudos de holografia foi possível observar um tipo de ruído óptico não desejável (MANUEL, 2011), mas com estudos bem mais aprofundados sobre esse ruído foi possível descobrir que na verdade ele transporta informações do objeto na qual é refletido (RODRIGO, 2007). Quando analisados eles têm um padrão de granular, tipo um “chuvisco”, parecido com de uma TV fora de sintonia. Esse tipo de informação vinda de amostras permite fazer um tipo de análise estatísticas dos materiais a partir de sistemas computadorizados (RODRIGO; MURAMAYSU, 2007), sendo possível caracterizar determinados matérias por essa técnica. Ela nos permite abranger um vasto campo de estudo, como na agronomia, medicina, odontologia, biologia, geologia, na física e entre outras áreas. Neste trabalho temos como proposta principal uma análise estatística sobre o tempo de secagem de tinta em diferentes tipos de ligas de metálicas.

O Speckle Laser é uma técnica que ficou conhecida por se basear na análise da reflexão difusa da luz, ou seja, é um padrão de interferência, necessitando de uma fonte de luz coerente ser direcionada a uma superfície que contenha uma rugosidade (LIMA, 2010). Mas conforme mudamos as características do material analisado temos um comportamento diferente, como podemos observar que mudando simplesmente a liga metálica que foi pintado, temos resultados diversos.

A metodologia aplicada permiti-se a partir de uma revisão bibliográfica montar uma proposta de pesquisa baseada em um experimento simples, mas com um grande potencial de análise, sobre uma área de estudo pouco explorada, mas que apresenta uma forma rápida e confiável nos resultados, que podem ajudar no desenvolvimento de produtos na área industrial. Que conseguindo uma pequena melhoria no preparo de alguns produtos pode criar uma grande economia e um avanço na qualidade.

## 2 O QUE É SPECKLE?

O Speckle é uma interferência óptica procedente de uma interação entre ondas eletromagnéticas, após ser espalhadas por um objeto. Para podermos compreender a origem sobre o Speckle, temos que entender que as superfícies de todos os materiais têm uma certa rugosidade, com aproximadamente a ordem de grandeza de um laser comum, próximo a 514nm. Por esse motivo quando uma luz contém uma certa coerência, entre outras características que explicaremos mais a frente, e atinge um objeto ele acaba transmitindo algumas informações daquela região. E essas informações são espalhadas na forma de reflexão, transmissão e absorção da luz. Mas nesse caso específico o que importa é a luz refletida pelo objeto, no qual pode-se caracterizar padrões do material.

### 2.1 INTERAÇÃO LUZ E MATÉRIA

A interação entre a luz e a matéria é a responsável fundamental pelos fenômenos de espalhamento na qual pode-se observar tudo ao redor. As primeiras teorias na qual interpretam a luz de forma ondulatória veio do físico holandês Christian Huygens em 1678, “Todos os pontos de uma frente de onda se comportam como fontes pontuais de ondas secundárias. Depois de um intervalo de tempo  $t$  a nova posição da frente de onda é dada por uma superfície tangente a essas ondas secundárias.” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016, Pag. 180) . Somente tempos depois Maxwell apresenta sua teoria do eletromagnetismo.

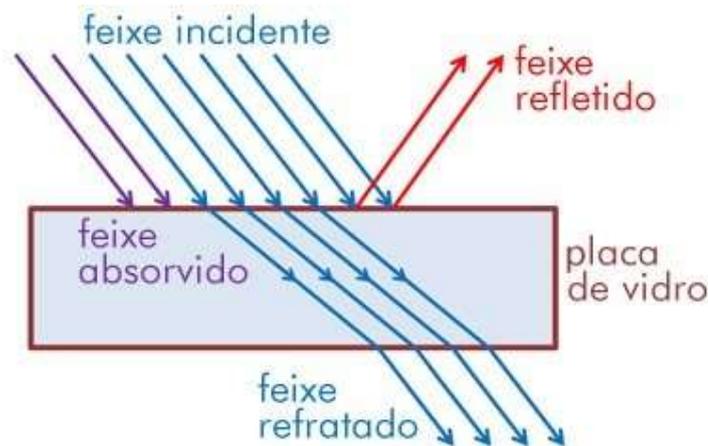
Quando analisamos o comportamento da luz quando atinge algum objeto, temos três possíveis fenômenos: a transmissão, reflexão ou absorção. A transmissão acontece quando o meio em que a luz atinge faz com que ela atravesse o material, como por exemplo, um vidro ao ser iluminado em uma de suas faces por uma onda eletromagnética e ocorre a transmissão dessa onda para o outro lado.

A reflexão é o fenômeno que nos possibilita observar tudo ao nosso redor, ocorre quando uma onda eletromagnética ao se encontrar com qualquer superfície vai ocorrer uma interação entre os mesmos, e a luz seja refletida de volta para o próprio meio. As características da onda como frequência interagem criando uma ressonância com os átomos do material, a ressonância ocorre quando a estrutura do átomo tem a mesma frequência natural que a luz ao iluminar o mesmo, quando isso não acontece essa luz é refletida de volta ao meio de propagação, e podemos observar ela diretamente nos objetos, mas quando a frequência da luz cria uma ressonância com o material ele o absorve completamente, podendo estimular o

aumento na temperatura térmica no objeto como exemplo.

Uma forma que podemos demonstrar essas mudanças com o meio de reflexão está apresentada na figura 2, quando incidimos um feixe de luz em uma superfície sólida com uma certa intensidade, ela é a soma das energias transmitida, absorvida e refletida, pelo material.

Figura 2 - Interação entre a energia radiante e o material alvo.



Fonte: Disponível em : [www.apoioescolar24horas.com/fenômenos\\_opticos](http://www.apoioescolar24horas.com/fenômenos_opticos). Acesso em: 25 fev. 2023.

A radiação incidente no material é a quantidade de energia que cedemos para o sistema, a interação entre ela e o material resulta nos três tipos de dispersão. A fração transmitida é a quantidade de radiação que consegue atravessar o material por suas características. Quando a energia incidente é retida no material através da ressonância, dizemos que ela foi absorvida e transformada em outra forma de energia, como por exemplo energia térmica. A fração refletida é o foco do nosso estudo nesse trabalho, ela é o motivo pela qual podemos observar o mundo ao nosso redor, essa quantidade de energia que volta para o meio de propagação inicial nos permite descobrir informações da superfície como por exemplo textura do material, cor, atividade biológica e sua capacidade de reflexão.

## 2.2 REFLEXÃO ESPECULAR E REFLEXÃO DIFUSA

A reflexão da luz como dito na seção 2.1 é o fato dela ser incidida em uma superfície  $I_0$ , e ser refletida  $I_R$  para o mesmo meio de propagação. Podemos descrever a reflexão como sendo:

$$R = \frac{I_R}{I_0(1)}$$

Onde  $R$  é o coeficiente de reflexão ou reflectância.

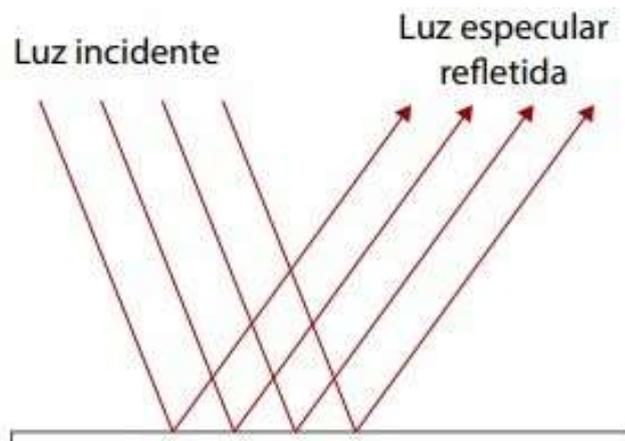
O coeficiente de reflexão é um valor menor que um, ela indica qual é o grau de reflectância do meio, já que  $I_R$  é sempre menor que  $I_0$  por causa de perdas de energia, como absorção da luz pelo material.

O fenômeno da reflexão ocorre em dois cenários, de acordo com o material a ser analisado, considerando que os raios de luz inicial são paralelos entre si. As leis da reflexão da luz descrevem que quando um raio de luz atinge um objeto em um determinado ângulo em relação a normal, esses raios serão refletidos com o mesmo ângulo de incidência.

A normal é um artifício imaginário que utilizamos na óptica para representar uma reta ortogonal ao ponto da superfície do material. Essa reta que sai do material com um ângulo de  $90^\circ$  da superfície, no local do raio de luz incide, ela representa o referencial em relação aos raios de luz.

A reflexão especular é um fenômeno que temos que pensar ele inicialmente como sendo uma situação imaginária, pois ela remete que para os raios serem refletidos sempre com o mesmo ângulo, a superfície tem que ser exatamente lisa, mas isso não acontece na vida real aonde até nas superfícies bem polidas existe um grau de irregularidade na região. Mesmo em espelhos esse fato ocorre, mas vamos considerar que um certo material tenha essa característica, na figura 2 temos uma demonstração de como os feixes de luz se comporta ao serem refletidos. Da mesma forma que a luz incide no material os raios saem formando o mesmo ângulo com a normal de cada trajetória.

Figura 3 - Reflexão especular.

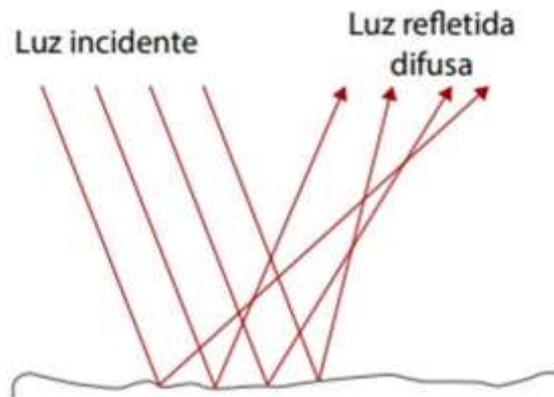


Fonte: Paiva (2014).

A figura acima seria um caso imaginário, na vida real todos os objetos têm um grau de irregularidade próximo da ordem de  $350\text{nm}$  a  $700\text{nm}$ , a mesma do comprimento de onda do

visível. Com isso quando um feixe de luz ilumina um objeto qualquer que tem sua superfície irregular as reflexões desses feixes voltam de forma aleatória. Como podemos observar na figura 3.

Figura 4 - Reflexão difusa.



Fonte: Paiva (2014).

Na figura anterior temos um exemplo de espalhamento difuso, esse fenômeno, dependendo da posição da região a sua normal é diferente de outros pontos, isso causa uma propagação arbitrária dos raios.

### 2.3 ESPALHAMENTO

Esse fenômeno é causado quando uma onda eletromagnética atinge uma superfície, o feixe de luz coerente, e refletido em um objeto pode ocorrer vários tipos de interferência. Dependendo das condições do experimento e do elemento a ser analisado, essa técnica pode caracterizar várias informações tanto biológicas ou de metrologia, como descrito por Emerson Rodrigo (SILVA, 2007).

A luz com essas características pode ser abordada de diferentes formas teóricas, segundo o tamanho das partículas. Quando as partículas têm uma dimensão menor que  $0,05\mu\text{m}$  a matéria consegue absorver a radiação e reemitir a mesma, com o comprimento de onda mais espalhado do sistema, um exemplo desse efeito é o céu azul durante o dia, como as partículas suspensas no ar da atmosfera ter dimensões menores que a faixa eletromagnética que chega na terra, elas se dispersão e os menores comprimentos de onda conseguem ultrapassar essa camada, por isso não conseguimos determinar de onde vem a cor azul do céu. Quando analisamos esses fenômenos ondulatórios de espalhamento, temos que levar em consideração

o tamanho dos centros espalhadores, as dimensões das partículas em relação ao comprimento de onda levam a 3 tipos de dispersão da luz. O espalhamento Rayleigh consiste em um sistema que as partículas iluminadas com as radiações têm dimensões menores que o comprimento de onda, com tudo a intensidade de espalhamento  $I_s$  pode ser caracterizado como (2);

$$I_s \propto \frac{I_0}{\lambda^4} \quad (2)$$

Pode-se observar na equação (1) que a intensidade de espalhamento é diretamente proporcional a intensidade total  $I_0$ , e inversamente proporcional a quarta potência do comprimento de onda que analisamos. Por tanto quanto maior o comprimento de onda menor é a intensidade  $I_s$  espalhada.

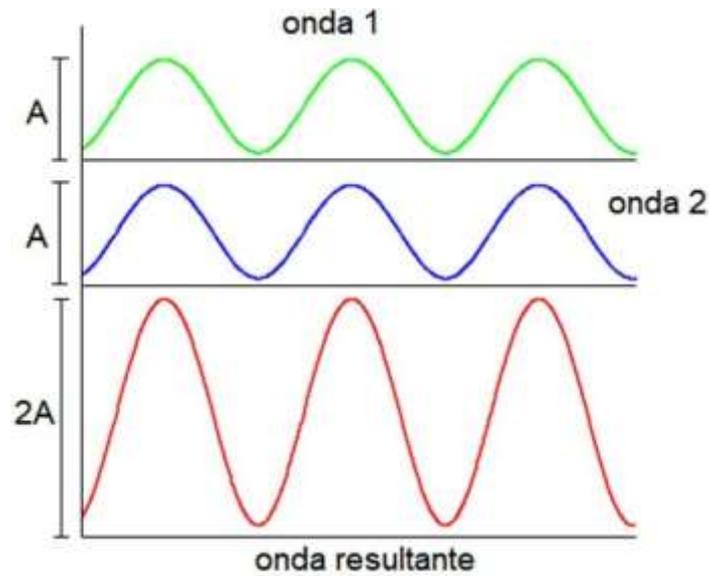
Em nosso trabalho o sistema predominante é o espalhamento Mie, quando as partículas têm dimensões próximas do comprimento de onda, a teoria de Lorenz-Mie é uma solução analítica das equações de Maxwell, em seu trabalho de espalhamento da radiação eletromagnética por partículas esféricas.

É quando os centros espalhadores têm dimensões maiores que o comprimento de onda do feixe denominamos espalhamento Geométrico, sendo junto com o espalhamento Mie um tópico a se destacar já que irá se trabalhar com partículas na ordem de grandeza de décimos de milímetro.

## 2.4 INTERFERÊNCIA CONSTRUTIVA E DESTRUTIVA

Pode-se considerar uma onda como sendo construtiva, quando a partir do caminho óptico criado por dois feixes de luz se encontram e suas fases se coincidem, assim podemos notar que quando o pico e o vale das duas ondas se encontram de forma simultânea, o resultado é uma interferência construtiva na imagem, como pode ser visto na figura 4.

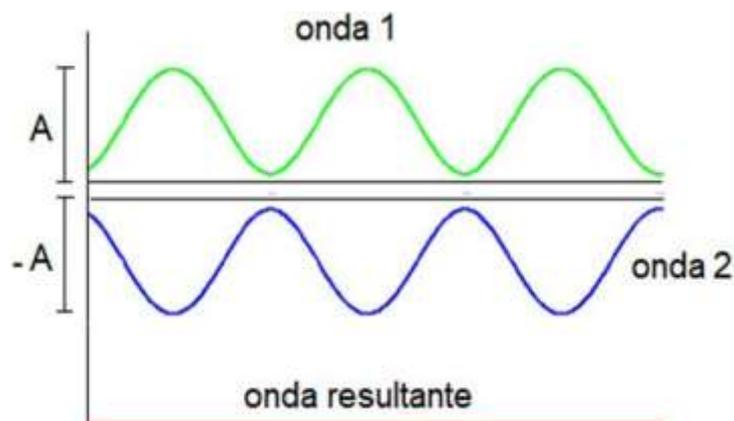
Figura 5 - Esquema de interação da luz em uma interferência construtiva.



Fonte: infoescola.com/física/interferência-entre-ondas. Acesso em: 27 fev 2023.

Na figura 4 pode ser observado que somando a interação das ondas 1 e 2 o resultado é uma elevação na amplitude da onda, mas se duas ondas estiverem com fases diferentes como na figura 5 a seguir. Podemos observar que a amplitude resultante da interação da onda é nula, causando pontos escuros na imagem.

Figura 6 - Esquema de interação da luz em uma interferência destrutiva.



Fonte: infoescola.com/física/interferência-entre-ondas. Acesso em: 27 fev 2023.

Observando o comportamento das ondas 1 e 2 na figura 5, a resultante do sistema só obtém esse valor nulo se as ondas estiverem exatamente sincronizadas com meio comprimento de onda atrasado. Dessa forma cada vez que o valor da onda 1 for máximo o da onda 2 será mínimo criando um equilíbrio, apresentando um ponto escuro da região da imagem.

### 3 SPECKLE LASER

Uma das ferramentas essenciais para análise de speckle foi desenvolvida na década de 60 por um físico norte americano chamado Theodoro Maiman, o LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) é um sistema capaz de gerar uma emissão amplificada de luz, com um alto nível de coerência óptica e ser monocromática tendo uma frequência de onda bem definida.

Sabe-se que o speckle é o resultado de uma interferência causada por inúmeros feixes de luz, refletido pela superfície, esse comportamento claramente ondulatório. Quando obtemos essas informações em um determinado ponto do espaço com uma câmera CCD (Charge-Coupled Device), observamos a resultante das interferências causadas pela superfície, os pontos claros representam uma formação construtiva dos feixes, e as regiões escuras mostram os lugares das interferências destrutivas.

#### 3.1 SPECKLE

O Speckle Laser é um procedimento capaz de analisar o comportamento das superfícies de uma determinada amostra, em uma escala de nanômetros é possível caracterizar informações do material. Essa técnica tem bastante relevância nas áreas como agronomia, zootecnia, medicina e na física. Quando aplicado a objetos biológicos chamasse Biospeckle.

Esse fenômeno criado pela interação do laser em uma amostra sem danificar suas propriedades, e seu meio de processamento de imagem onde a correlação de cada pixel com seu histórico temporal pode fornecer dados sobre o objeto. (CARDOSO, 2011)

O laser após ser criado por volta da década de 60, foi se aperfeiçoando até os dias de hoje alcançando um extremo grau de coerência temporal e espacial, quando ele atinge um objeto segundo o princípio de Huygens, aonde afirma que a cada raio de luz que atinge uma superfície, a região que o laser atinge atua como um emissor secundário (RODRIGO, 2007).

As características do laser são muito importantes para esse fenômeno, com alto grau direcional podendo nos ajudar a analisar regiões específicas, a coerência do laser garante uma confiabilidade no processo de análise, nos proporcionando um resultado mais confiável sobre a amostra. Por esses motivos e outros o laser revolucionou vários campos da física e fora dela (MARQUES, 2008).

Uma consequência sobre as superfícies serem opticamente rugosas, é que a reflexão da luz laser no objeto se torna aleatória. Quando o feixe de luz atinge a superfície com

deformações, cada microrregião (pequenas deformações na superfície) vai fornecer ângulos diferentes para a dispersão da luz, criando caminhos ópticos distintos, essa trajetória arbitrária faz com que as fases dos feixes refletido possam criar interferências construtivos e destrutivas, correspondendo a pontos claros e escuros nas imagens analisadas.

Quando obtemos as imagens do sistema ela se assemelha muito com uma televisão fora de sintonia, uma forma de salpicado, como pode ser visto ver na figura 6 a seguir.

Figura 7 - Imagem de uma TV fora de sintonia, analogia com o padrão de speckle.



Fonte: Disponível: [br.pinterest.com/pin/424675439853517442](https://br.pinterest.com/pin/424675439853517442). Acesso em: 28 fev 2023.

Quando olhamos para essa imagem temos informações que nos apresenta o comportamento da superfície, caso o objeto analisado seja de natureza biológica os pontos claros e escuros vão se movimentar com uma intensidade próxima à da superfície analisada, além das vantagens de não ser uma técnica destrutiva nos possibilita a uma análise quantitativa como iremos ver a seguir. E quando observamos com essa mesma técnica objetos não biológicos a imagem fica estática, mostrando o comportamento do mesmo.

### 3.2 EVOLUÇÕES DO PADRÃO DO SPECKLE NO TEMPO (THSP)

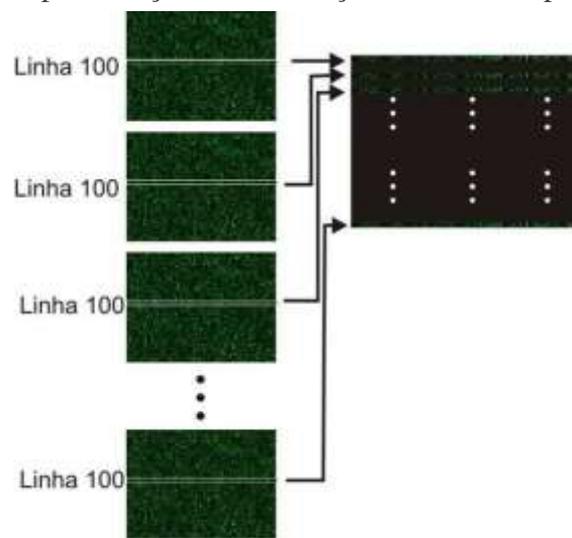
Uma das maneiras para caracterizar as informar geradas pela câmera e a utilização da THSP (Time History Speckle Pattern), essa forma de processamento consiste em pegar uma gravação de speckle, e transformar em uma única imagem que representa a movimentação dos centros espalhadores da superfície no intervalo de tempo (BAGNATO, 2001).

O programa responsável por realizar o processo da THSP recebe um conjunto de imagens em preto e branco do vídeo da análise, e remove uma determinada linha de cada imagem, e com elas reorganiza cada linha em uma ordem de cima para baixo em uma nova

figura que representa a amostra. Como sempre é retirado a mesma linha então consideramos que seja o mesmo local analisado durante o vídeo, e com a movimentação o seu padrão muda conforme o tempo passa, essa mudança fica ressaltado em uma nova figura que representa o que aconteceu naquela região.

Na figura 7 abaixo temos uma ilustração da THSP sendo formada, nesse exemplo foi utilizado a linha 100, dessa forma quando olhamos para o resultado final da imagem THSP de cima para baixo temos um histórico temporal da formação de speckle daquela região.

Figura 8 - Representação da construção de um exemplar da THSP.



Fonte: Silva (2007).

Portanto se a imagem formada pela THSP tiver um comportamento dinâmico, parecido com a figura 6, podemos determinar que a amostra tem uma atividade biológica, e somente com outra análise computacional sobre a imagem poderemos quantificar o comportamento da amostra, mas quando aplicado a amostras não biológicas, o comportamento da THSP muda, se assemelhando a um código de barras, isso indica que não houve nenhuma mudança temporal dos centros espalhadores, porém somente após uma análise computacional podemos confirmar se realmente houve ou não tal mudança (como poderemos ver na figura 8).

### 3.3 MATRIZ DE CO-OCORRÊNCIA

A Matriz de co-ocorrência (MCO) é uma tabulação de quantas combinações diferentes de valores de intensidade dos pixels (níveis de cinza) ocorrem em uma imagem (VASCONCELOS, Simone, 2011). Sendo sua principal função caracterizar texturas em uma imagem através de um conjunto de estatísticas para as ocorrências de cada nível de cinza em

pixels diferentes ao longo de diferentes direções. As matrizes de co-ocorrência são ferramentas para a classificação de imagens (MARQUES, 2008). Essa análise nos possibilita a determinação das características de textura de uma imagem como: homogeneidade, momento de inércia, correlação, entropia, energia, contraste, organização estrutural, complexidade e a natureza das transições dos níveis de cinza.

Quando o programa processa a imagem THSP ele faz inúmeros cálculos correlacionando as intensidades de cada pixel com o seu vizinho, a MCO (Matriz de co-ocorrência) pode ser descrita como:

$$MCO = [N_{ij}]$$

(3)

Onde  $N_{ij}$  mostra quantas vezes o pixel de intensidade de  $i$  é seguido do valor de intensidade de  $j$  na direção e sentido da evolução temporal do padrão speckle.

Portanto a MCO representa de forma numérica e visual a partir de um gráfico a relação que a THSP apresenta, quanto maior a movimentação da imagem o gráfico apresentado uma dispersão na diagonal, enquanto se o objeto for estático a representação é uma linha reta na diagonal como vamos ver a seguir.

Toda matriz de co-ocorrência é uma matriz quadrada, e a quantidade de linhas e colunas é igual ao nível de quantização da imagem, portanto se a THSP tiver em tons de cinza a matriz terá 256 linhas e colunas. E como podemos analisar ela é simétrica ao redor da diagonal central, na figura 8 temos uma amostra da MCO realizada de uma caixa de papel.

Figura 9 - Representação de uma MCO, resultante da secagem de tinta.



Fonte: O autor (2022).

Quando o programa calcula as dispersões causadas pelo material como na figura a cima, é calculado diversas informações que nos apresenta parâmetros para comparação dessa amostra

com o passar de tempo ou com outras amostras. A base dos cálculos é relacionada com o comportamento desse gráfico, quanto maior a dispersão na diagonal mais informações sobre homogeneidade, contraste, momento de inércia.

### 3.4 GRÃOS DE SPECKLE

As imagens capturadas pela câmera é um conjunto de pontos que denominamos como grãos de speckle, que mudam de intensidade conforme a amostra. Esses grãos são formados pela interação da luz entre si, que foi refletida do material em diversos pontos. Sobre as dimensões apresentadas dos grãos na imagem tem em suma três variáveis principais como descreve (RODRIGO, 2007), o comprimento de onda utilizado no experimento, distância entre o ponto de observação e o objeto espalhador, o diâmetro da área iluminada do difusor. Essas variáveis são responsáveis pelo tamanho do grão representado na imagem de speckle.

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho foi realizado no laboratório de Caracterização de Materiais no curso de Física Licenciatura da Universidade Federal de Alagoas – Campus Arapiraca.

### 4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras escolhidas para a análise da secagem de tinta foram coletadas no próprio campus Arapiraca, foram selecionados 3 tipos de materiais com características diferentes como podemos ver na imagem 9. O primeiro material escolhido foi o alumínio, um elemento muito abundante na crosta terrestre, como aparência, baixa densidade, propriedades físicas e mecânicas e resistência a corrosão, é o que fazem o uso deste metal e suas ligas, econômicos e atrativos, tornando-os os mais utilizados nos dias atuais pela sociedade moderna (VASCONCELOS, 2008). O segundo material foi o aço 1020, sendo um aço de carbono, este possui plasticidade e soldabilidade excelente, sua capacidade de endurecimento é inferior aos outros aços de sua categoria. É muito utilizado em engrenagens, pinos e eixos em geral.

A última amostra é conhecida como aço rápido, e largamente usado como ferramentas de usinagem, devido sua alta dureza, boa tenacidade (Resistência à ruptura ou ao fraturamento) e principalmente resistência ao desgaste, contém um alto teor de elementos de liga como o tungstênio, o molibdênio (Ele aumenta a temperabilidade e a resistência à temperatura elevada e também melhora a resistência à corrosão), cromo, cobalto (FERRARI, 2008).

Na imagem 9 estão uma foto das amostras tirada depois do experimento ser realizado. O primeiro na sequência é o aço rápido, aço 1020 e o outro o alumínio.

Imagem 10 - Amostras analisadas: chapas de ferro, aço rápido, aço 1020 e alumínio.



Fonte: O autor (2022).

Inicialmente em cada amostra foi realizado uma preparação, com uma lixa grão 120 foi lixada a superfície aonde seria feito o experimento, e limpo posteriormente.

A primeira análise foi feita com o alumínio, já com os aparatos experimentais prontos. Logo após a preparação foi realizada uma pintura uniforme sobre a superfície com uma tinta spray de uso geral, de cor cinza na qual foi utilizada em todos os testes, imediatamente após a pintura foi colocada para ser analisada pelo aparato, o aparato experimental apresentado a seguir.

A segunda amostra foi o aço 1020, como já era perceptível uma pequena camada de ferrugem em sua face, foi necessário realizar o procedimento de lixar com um pouco mais de esforço, para que ficasse com a região limpa e uniforme, logo após foi limpo para retirar fuligens da lixa, pintada cobrindo aproximadamente a mesma região da primeira amostra e exposta ao laser para a análise.

Terceira e última análise com o aço rápido foi mais simples, por causa de sua superfície mais polida e uniforme, mas mesmo assim foi realizado o processo de lixamento e limpeza, antes de ser pintado.

A tinta utilizada foi uma lata de tinta spray de uso geral na cor cinza claro na marca ChemiColor, um produto recomendado tanto para uso interno ou externo em materiais como ferro, madeira, gesso, entre outros. Sua composição química apresenta resina hidrocarbônica, metil, etil, cetona, xilol, gás butano, e propano.

#### 4.2 APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental que foi utilizado nesse trabalho foi um módulo laser da marca LASERLine com um comprimento de onda de 532nm, esse módulo laser tem uma regulagem em sua corrente aonde nos possibilita o aumento da potência do feixe. Na imagem a seguir temos a foto do equipamento utilizado para o experimento.

Imagem 11 - Foto do módulo laser e sua regulagem.



Fonte: O autor (2022).

A imagem mostrada acima representa a regulagem do laser em todas as análises realizadas com as tintas. Após o laser incidir na superfície da mesma, acontecerá diversas interferências como já foi discutido em um capítulo anterior. O espalhamento da interação da luz com o material foi captada por uma CCD (Charge Coupled Devide). Disposta como na figura 11 abaixo.

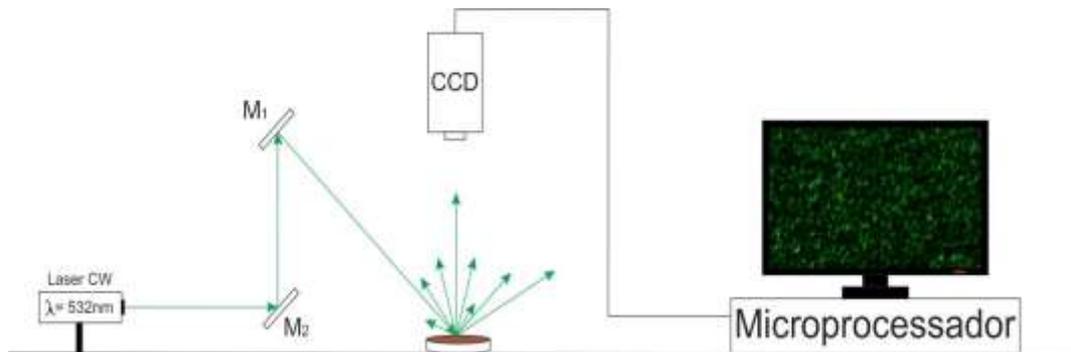
Imagem 12 - Foto faixe de luz incidindo no material analisado.



Fonte: O autor (2022).

Na imagem a cima mostra como foi realizado os testes, a fonte do laser foi refletida em dois espelhos para melhor incidência na amostra, e com a câmera CCD esta paralela a superfície da amostra.

Imagem 13 - Ilustração do aparato experimental.



Fonte: Lucena 2012.

#### 4.3 COLETA DE DADOS

Com o aparato experimental demonstrado acima, quando acionamos o módulo laser ele realiza um percurso através dos espelhos dispostos para melhorar a inclinação da luz laser com o material. A reflexão da luz com as informações do material “o Speckle”, atinge o sensor da câmera CCD conectada ao computador, na interface do programa onde conseguimos controlar o tempo em que cada vídeo foi gravado, configuramos o programa para realizar pequenos vídeos com duração de 1 minuto. Foi utilizado um tempo total de 10 minutos por tinta para realizar essa análise, então os 10 vídeos de 1 minuto cada um foi armazenado conforme sua ordem.

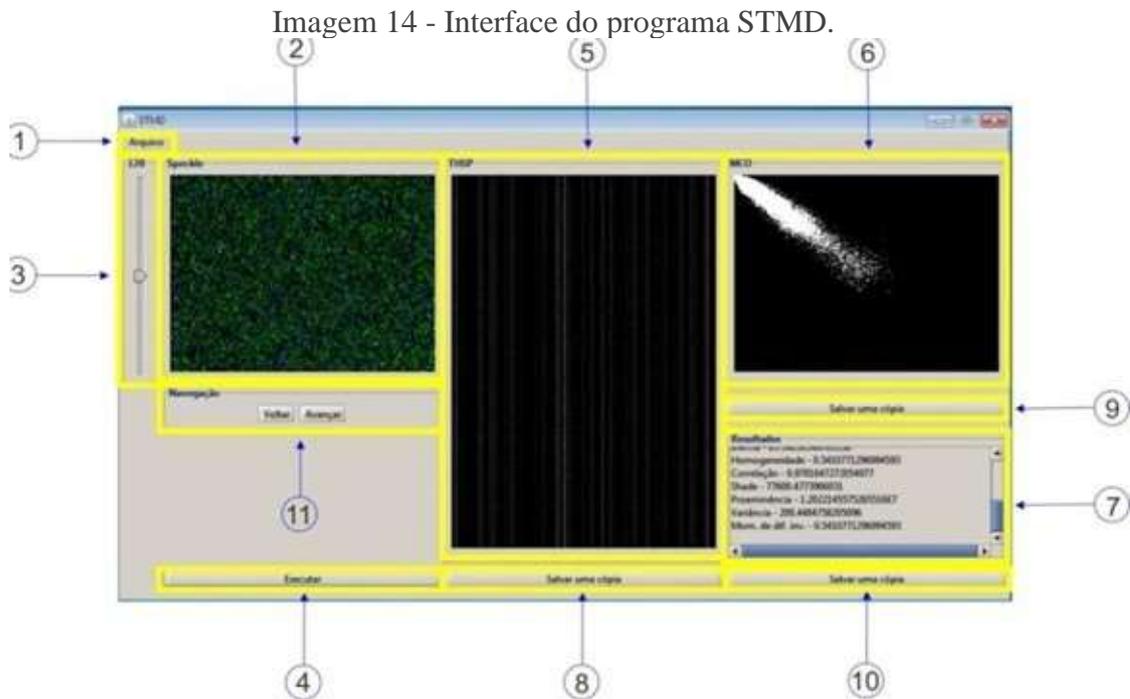
Utilizando um código no “ Prompt de comando” para realizar cortes de frames nos vídeos, foi retirado 5 frames por segundo para obtermos um total de 300 imagens a cada vídeo de 1 minuto da secagem.

Em seguida utilizamos o software em Java descrito como STMD (Speckle – THSP – MOC – Descritores). Este software foi criado por alunos do curso de Ciência da computação e alunos do curso de Licenciatura em Física ambos da Universidade Federal de Alagoas Campus Arapiraca. O programa tem uma interface simples e direta sobre o tratamento das imagens a serem analisadas, as imagens são relacionadas por matrizes de co-ocorrência, levando em conta os tons de cinzas de cada pixel.

A interface do programa demonstrada na figura 13 abaixo, representa as funções do STMD aonde temos que em (1) podemos encontrar aonde se encontra os arquivos de imagens a serem processadas, e abrir no programa, em (2) temos uma imagem do conjunto do arquivo para demonstrativo do conjunto, podendo ser alterado, e em (3) podemos escolher qualquer linha das imagens na qual vai ser criada posteriormente o THSP, essa função é de extrema importância quando é observado alguma anomalia em algum canto da gravação. Depois de

escolher a linha correta em (3), a função (4) executa a ordem de montagem da THSP retirando a linha escolhida de todas as imagens.

Após a executar a função (4) temos a THSP na região (5), no espaço (6) temos a apresentação da MCO do conjunto da imagem. Os dados gerados pelo programa são apresentados no espaço (7), nas funções (8) podemos salvar de forma independente a THSP como arquivo de imagem, igual a função (9) para a MCO gerada, em (10) podemos salvar os resultados no formato de documento de texto.



Fonte: Ferreira (2015).

Este programa transforma em parâmetros as informações de cada conjunto de imagens executada. Como usamos vários vídeos em sequência conseguimos obter parâmetros da amostra daquele momento e relacionar com o seu histórico, nos possibilitando a montagem de gráficos relacionando essas informações.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 14, nos mostra a THSP de 3 amostras sem a presença de tinta na superfície, nela podemos observar o comportamento do material antes de ser analisado. A semelhança com um código de barras representa o comportamento dos centros espalhadores do material, conforme o histórico temporal da imagem e montado é possível observar a mudança que ocorre localmente na região determinada. E como os centros espalhadores do objeto são maiores do que o comprimento de onda incidente que é de 532nm, ocorre um espalhamento Geométrico.

Figura 15 - Três THSP iniciais do material: aço 1020, aço rápido e alumínio.



Fonte: O autor (2022).

Com tudo quando aplicamos a camada de tinta no material e iniciamos o experimento, a tinta cria uma película sobre o material que rapidamente fica uniforme, e começa o processo de evaporação do diluente composto na tinta, criando uma camada homogênea sobre o material que começa a se solidificar de dentro para fora.

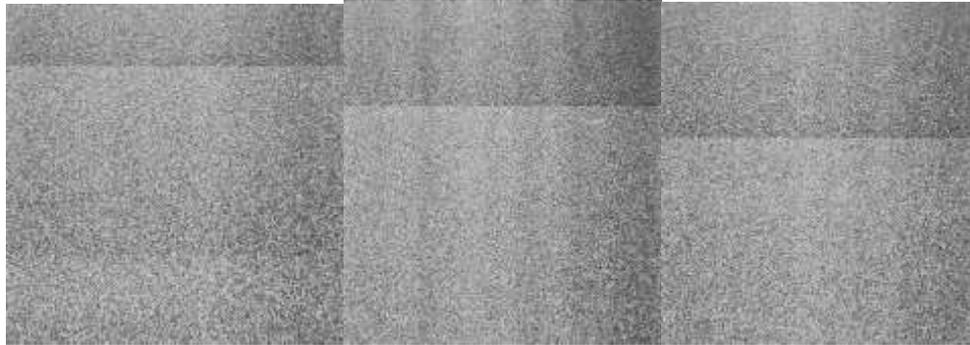
Esse processo pode sofrer alterações dependendo de fatores externo, como por exemplo o laser utilizado para gerar o Speckle, mesmo sendo uma técnica que não interfere nas propriedades do material, ela ainda pode realizar pequenas alterações em algumas informações de Speckle retiradas do material, como nesse caso pode modificar a taxa de evaporação do diluente da tinta na região em que a luz incide. Por tanto em todas as análises utilizamos o mesmo laser, com a mesma potência para poder minimizar os efeitos causados por essa interferência nas 3 amostras.

O fator temperatura também pode afetar a relação entre o tempo de secagem, como o fabricante da tinta recomenda não aplicar esse produto com uma temperatura menor que 18°C, mantemos a sala em uma temperatura de 20°C e sempre deixando as 3 amostras próximas para ocorrer o mínimo de variações.

A representação da THSP do primeiro minuto de gravação podemos observar o instante

de maior movimentação do sistema, como na figura 15, logo após a tinta ser aplicada a superfície não está totalmente uniforme, e a porcentagem de diluente está no máximo.

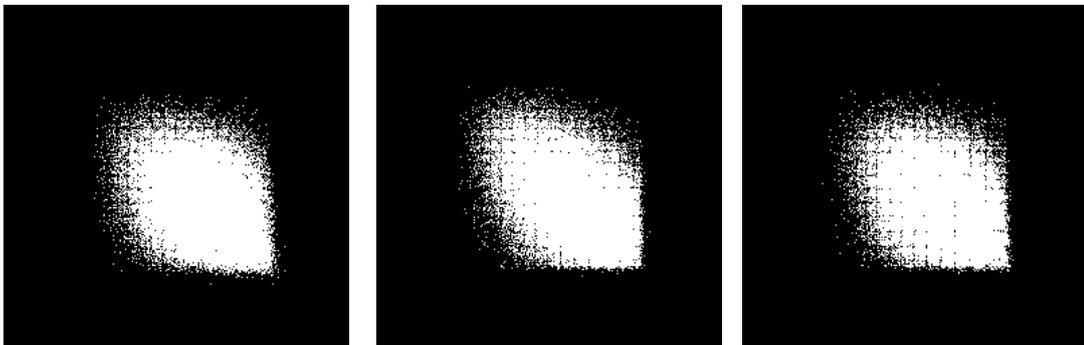
Figura 16 - THSP primeiro minuto da secagem: aço 1020, aço rápido e alumínio.



Fonte: O autor (2022).

Aplicando o cálculo da Matriz de co-ocorrência para analisar a figura 15, temos a representação visual da MCO do primeiro minuto da secagem das tintas, ela representa que quanto maior o espalhamento da diagonal principal maior é a movimentação detectada na superfície como podemos observar na figura 16.

Figura 17 - MCO do primeiro minuto das amostras: aço 1020, aço rápido e alumínio.

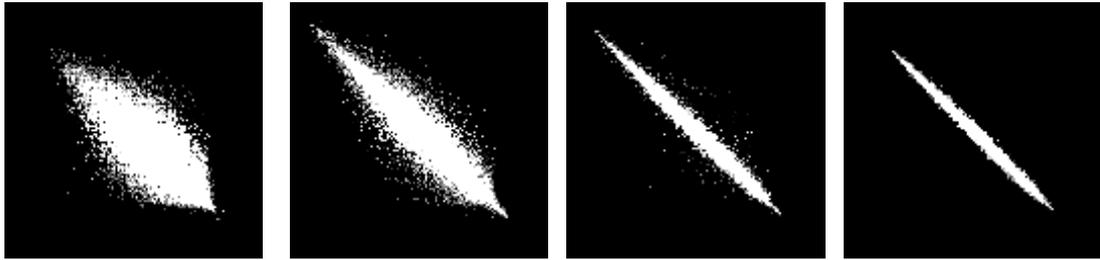


Fonte: O autor (2022).

A representação das MCO da figura 16 mostra um ponto interessante de como nas 3 amostras o primeiro minuto de secagem teve o mesmo comportamento, indiferente do material utilizado a tinta teve o mesmo comportamento inicial. A interação do laser com o material contido na região analisada não teve interferência nas ligas metálicas.

Na figura 17 temos a representação do comportamento da MCO no minuto 4, 6, 8 e 10 da secagem de tinta no alumínio. Ela mostra como na evolução temporal a tinta foi perdendo o movimento da superfície.

Figura 18 - Quatro MCO dos minutos 4, 6, 8 e 10 do alumínio.



Fonte: O autor (2022).

O comportamento temporal da secagem de tinta no alumínio fica visivelmente expressa na sequência de imagens a cima, conforme a tinta perde seu diluente para o ambiente o restante da pigmentação se solidifica na superfície criando uma camada sólida com o material.

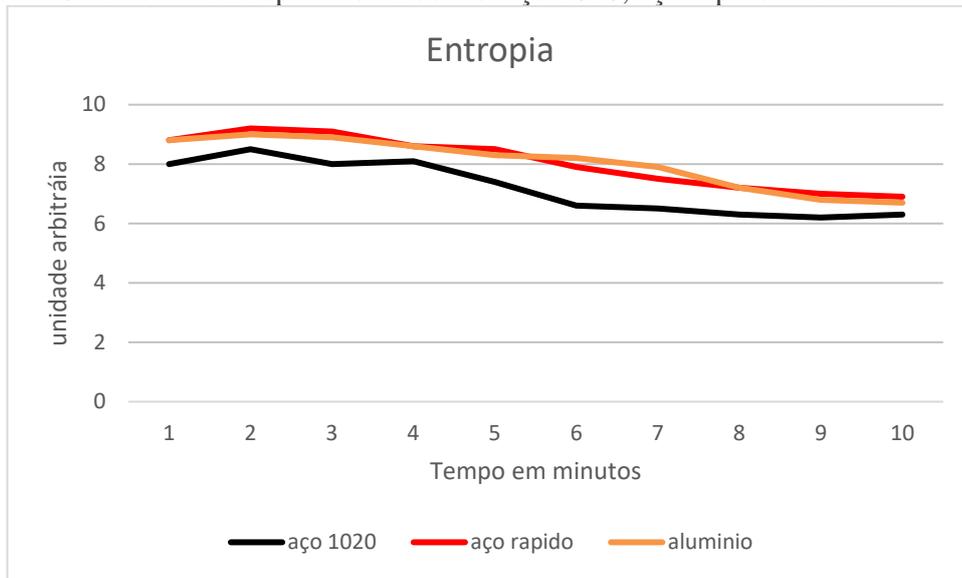
Analisando o comportamento do descritor de textura que mede a variação de intensidade de pixels, a Entropia relaciona uma medida que cai calcular a desordem do sistema (SILVA,2018). No gráfico 1 podemos analisar o procedimento de como a entropia se comporta no intervalo de 10 minutos nas 3 amostras.

Este descritor de textura mede a informação contida na mudança de intensidade de ‘i’ a ‘j’, fornecendo o grau de dispersão de níveis de cinza da imagem, logo fornece uma medida que visa se comprometer em calcular a desordem do sistema que com muitos valores nulos tende a ter pouca informação e a entropia tende a diminuir (SILVA, 2018).

$$Entropia = \sum_{ij} N_{(ij)} \log(ij)^{-1}$$

A partir dos resultados da entropia representada acima, dentro do programa THSP podemos comparar no gráfico o comportamento das 3 amostras com esse descritor.

Gráfico 1 - Entropia das amostras: aço 1020, aço rápido e alumínio.



Fonte: : O autor (2022).

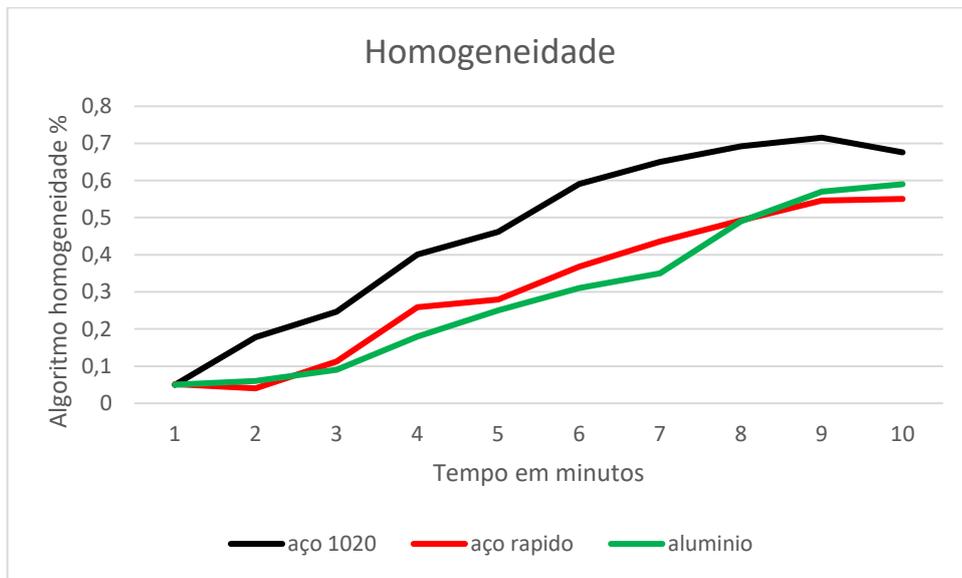
Observando o gráfico 1, o comportamento do aço rápido e o aço 1020 tem um aumento da entropia de forma rápida até o minuto dois, e uma queda um pouco mais suave até se estabilizar próximo ao mesmo ponto. Já o alumínio representado na cor verde sobe até o minuto 2 de uma forma leve, e tem uma queda suave até o minuto 9 onde começa a se estabilizar.

Podemos analisar a Homogeneidade do sistema como sendo uma relação que compara a distribuição dos elementos da diagonal principal da matriz de co-ocorrência, quanto maior for a frequência de padrões do mesmo nível de cinza a superfície apresenta uma homogeneidade maior (REIS, 2021). Na equação a seguir temos a relação entre os pixes analisados.

$$\sum_{i,j} \frac{1}{1+(i-j)^2} P(i,j)$$

Como podemos observar no gráfico 2 o comportamento da homogeneidade das 3 amostras se relaciona de formas parecidas.

Gráfico 2 - Homogeneidade das amostras: aço 1020, aço rápido e alumínio.



Fonte : O autor (2022).

As unidades de medida para homogeneidade ficam entre 0 e 1, quanto maior for esse valor mais homogeneia é a amostra. Podemos reparar que no gráfico do aço rápido e aço 1020 os gráficos apresentam um comportamento parecido conforme as tintas secam, a elevação continua se aproximando dos valores mais altos.

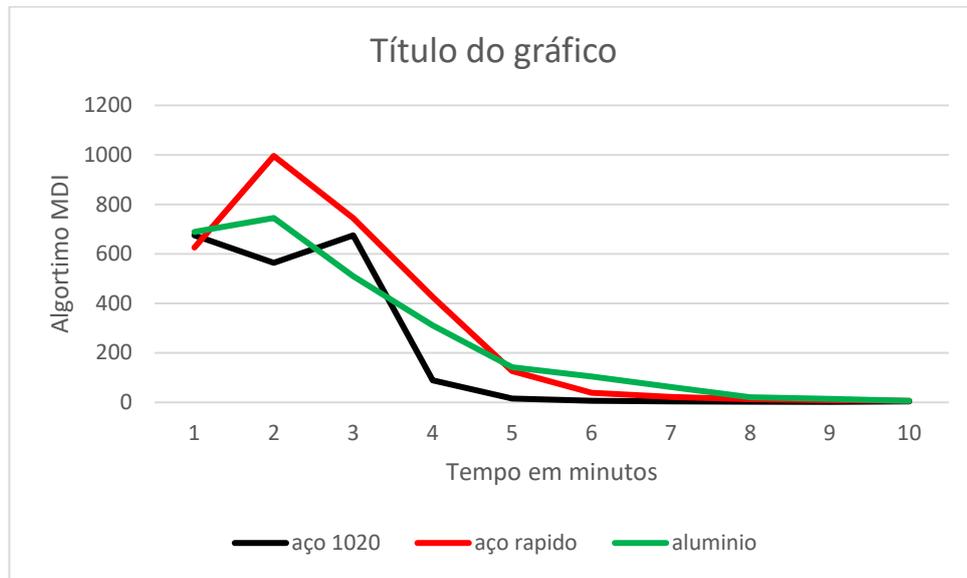
Já na superfície do alumínio no representado na cor verde o arranjo da estrutura da tinta necessita de um tempo maior para se uniformizar e criar uma face mais homogeneia.

Para conseguirmos relacionar um valor absoluto entre as variações das atividades do material temos o Momento de Inércia, que por uma forma estatística classifica a atividade do material. Na equação a seguir temos a forma em que a intensidade dos pixes se relacionam.

$$\sum_{i,j} \frac{1}{1+(i-j)^2} P(i,j)$$

Essa associação leva em consideração a mudança de um certo valor de intensidade de um pixel com o tempo, por meio de um valor adimensional, podendodeterminar os momentos de maiores e menores mudança de speckle (SILVA, 2017). Como podemos ver no Gráfico 3 a seguir.

Gráfico 3 - Momento de Inércia (MDI) das amostras: aço 1020, aço rápido e alumínio.



Fonte: : O autor (2022).

O modo em que os gráficos 3 descrevendo a ocorrência da diminuição da intensidade de movimentação da tinta, representa um interessante comportamento que é de um pico de atividade próximo, após o início da secagem.

Essa “aceleração” dos centros espalhadores com que faz o comportamento do gráfico aumentar por alguns instantes pode estar relacionado ao efeito do laser sobre a amostra, por que como vimos nos gráficos 2, com o passar do tempo a homogeneidade tende sempre aumentar mesmo com o aumento da movimentação das partículas. E após atingir o pico de movimentação a queda nos gráficos se acentuam até atingir os menores valores representando a secagem final das amostras.

O trabalho apresenta uma forma de analisar o comportamento da secagem de tinta, existe outros descritores que podem ser analisados em trabalhos futuros, como outras variáveis de estado no experimento, tipo como a mudança de temperatura e humidade pode influenciar no tempo de secagem de tintas.

## 6 CONCLUSÃO

Portanto pode-se verificar como a técnica de Speckle Laser tem uma enorme aplicabilidade junto com o seu potencial de análise, podendo ser utilizada em diversas áreas de pesquisa abrangendo da biologia a Física, da medicina a engenharia. Mesmo sendo um aparato experimental simples, as informações relacionadas aos fenômenos físicos que ocorrem têm uma precisão boa, fornecendo diversos parâmetros.

Pode-se considerar que o objetivo estabelecido no trabalho foi alcançado, conseguimos estabelecer diferença entre as análises das secagens de tinta, entre todos os descritores.

A partir dos resultados apresentados no capítulo 5, conseguiu-se concluir que mesmo sendo apenas 3 parâmetros analisados nesse trabalho suas informações corresponderam às expectativas, como os gráficos 2 em que a homogeneidade do sistema tenta atingir os maiores valores quanto ao passar do tempo, mostrando que a superfície está refletindo padrões mais próximos de intensidade, um indicativo que a tinta já criou uma película uniforme.

E ao mesmo tempo em que isso acontece os parâmetros de Momento de Inércia começam a atingir os menores indicadores de movimentação dos centros espalhadores da superfície. A técnica de Biospeckle tem muito a contribuir em diversas áreas na sociedade, suas características são de grande valor em diversas aplicações, e um experimento barato (em relação a outros) e de boa confiabilidade.

## REFERÊNCIAS

- BAGNATO, S. Vanderlei. **Laser: e suas aplicações em ciência e tecnologia**. São Paulo: Livraria da Física, 2008.
- BAGNATO, S. Vanderlei. Os fundamentos da luz laser. **Física na Escola**, v. 2, n. 2, p. 4-9, 2001.
- CABRAL, Alexandre; REBORDÃO, José Manuel; ABREU, Manuel Adler. Lasers sintonizáveis em metrologia absoluta de distâncias para instrumentação espacial. **Gazeta de Física**, Sociedade Portuguesa de Física, v.34, n.1, p. 2-7, jan. 2011.
- CAVALCANTI, Thiago Maciel *et al.* Conhecimento das propriedades físicas e da interação do laser com os tecidos biológicos na odontologia. **Anais Brasileiros de Dermatologia** v.86, n.5, out. 2011. Artigo de revisão.
- CORROSÃO em ligas metálicas poderá ser controlada. Inovação Tecnológica: tudo que acontece na fronteira do conhecimento, 2 mar. 2006. Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010170060302&id=010170060302#.ZFu64HbMK3A>. Acesso em: 26 Jan.2023
- FERRARI, Ricardo Bulcão. **Caracterização de liga metálica a base de alumínio – magnésio obtida por método convencional após tratamentos termomecânicos visando estruturas microcristalinas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- GEHRKE, Alessandro; STROHAECKER, Telmo. **Tratamento criogênico de aço rápido ABNT M2**. 1997. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Metalurgia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física, volume 4** : óptica e física moderna. Rio de Janeiro : LTC, 2009.
- INGRID, A. Reis *et al.* Reconhecimento de padrões speckle baseado em textura para sensoriamento a fibra óptica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS, 39., 2021, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza, CE: UFC, set. 2021. p. 1-5.
- LIMA, Emerson de. **Caracterização experimental do limiar laser de sistemas espalhadores com ganho**. 2010. Tese (Doutorado em Física) – Departamento de Física, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2010.
- MARTIRE NETO, Nilo. Secagem das tintas industriais. **Portal TS**, São Paulo, 11 nov. 2021. Disponível em: <https://www.portalts.com.br/secagem-das-tintas-industriais>. Acesso em: 25 Jan. 2023
- NOBRE, Cassia Marques Batista. **Análise espectral do biospeckle laser através do momento de inércia, entropia e cross-spectrum**. 2008. Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Sistemas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

SILVA, Emerson Rodrigo da. **Estudo das propriedades do biospeckle e suas aplicações**. Dissertação. 2007. (Mestrado em Física) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SILVA, Emerson Rodrigo da; MURAMAYSU, Mikiya. O fenômeno do speckle como introdução à metrologia óptica no laboratório didático. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 2, p. 283-286, 2007.

SILVA, Franlin Fernando Rocha. **Aplicabilidade da técnica do Biospeckle laser na avaliação do sangue de equino**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Zootecnia) - Universidade Federal de Alagoas, Campus Arapiraca, Arapiraca, 2017.

SILVA, Sidney Leal da *et al.* Estudo da secagem de materiais por meio de speckle dinâmico. **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada**, Ponta Grossa, v.4, n. 2, p. 12-25, dez. 2017.

VASCONCELOS, Simone. **Matrizes de co-ocorrências**. [S.l.: s.n.], 200?. Disponível em: <http://www.ic.uff.br/~aconci/co-ocorrencia.pdf>. Acesso em: 30 Jan. 2023