

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

VICTOR EDUARDO PEREIRA DA SILVA FERREIRA

**APLICAÇÃO DO SPECKLE DINÂMICO NO ESTUDO DA LEI DE RESFRIAMENTO
DE NEWTON**

**ARAPIRACA
2023**

Victor Eduardo Pereira da Silva Ferreira

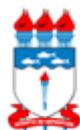
Aplicação do speckle dinâmico no estudo da lei de resfriamento de Newton

Monografia apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Licenciado em Física em Física
- Licenciatura da Universidade Federal de Alagoas -
UFAL, Campus Arapiraca.

Orientador: Prof. Dr. Emerson de Lima

Arapiraca

2023



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus Arapiraca
Biblioteca Campus Arapiraca - BCA

F383a Ferreira, Victor Eduardo Pereira da Silva
Aplicação do speckle dinâmico no estudo da lei de resfriamento de Newton /
Victor Eduardo Pereira da Silva Ferreira. – Arapiraca, 2023.
31 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. 31.

1. Resfriamento dos metais 2. Metais - Tratamento térmico 3. Speckle 4.
Padrão de speckle I. Lima, Emerson de II. Título.

CDU 53

Victor Eduardo Pereira da Silva Ferreira

Aplicação do speckle dinâmico no estudo da lei de resfriamento de Newton

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, Física Licenciatura.

Data de Aprovação: 15/12/2023

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente



EMERSON DE LIMA

Data: 28/12/2023 14:46:34-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Emerson de Lima
Universidade Federal de Alagoas - UFAL
(Orientador)

Documento assinado digitalmente



LIDIANE MARIA OMENA DA SILVA LEAO

Data: 22/12/2023 10:22:32-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Lidiane Maria Omena da Silva Leão
Universidade Federal de Alagoas - UFAL
(Examinador)

Documento assinado digitalmente



JOSE PEREIRA LEO NETO

Data: 21/12/2023 12:56:25-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. José Pereira Leão Neto
Universidade Federal de Alagoas -UFAL
(Examinador)

AGRADECIMENTOS

À medida que concluo esta importante etapa da minha jornada acadêmica, não posso deixar de expressar minha sincera gratidão a todos aqueles que contribuíram para a minha formação e Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).

Primeiramente, quero agradecer à Deus e ao meu orientador, Emerson de Lima, pela orientação e pelos valiosos sugestões que foram fundamentais para a condução e conclusão deste trabalho. Sua orientação perspicaz e apoio constante foram verdadeiramente inspiradores.

À minha família, expressei minha profunda gratidão. Seu apoio inabalável, incentivo e compreensão ao longo deste desafiador processo foram a âncora que me sustentou. Cada palavra de encorajamento e gesto de apoio foram fontes de motivação durante as longas horas dedicadas ao TCC.

Aos amigos Hérica, Talles e todos os outros que fiz na minha volta a qual que compartilharam suas experiências e conhecimentos, minha gratidão sincera. As discussões construtivas, as trocas de ideias e o apoio mútuo foram componentes essenciais para o desenvolvimento do meu trabalho.

Quero também estender meu agradecimento aos professor(a) Samuel, Emerson, Henrique, Neto e Lidiane que, ao longo da minha jornada acadêmica, compartilharam seu conhecimento e paixão pela área de estudo, contribuindo para a minha formação.

Por fim, agradeço a todos aqueles cujo apoio esteve presente, mesmo que de forma indireta. Cada palavra de incentivo, gesto amigável e energia positiva contribuíram para o sucesso deste projeto.

Este TCC não é apenas um reflexo do meu esforço, mas também um testemunho do apoio incrível que recebi. A conclusão deste capítulo marca não apenas meu crescimento acadêmico, mas também o fortalecimento dos laços que formei ao longo desta jornada.

Obrigado a todos por fazerem parte desta conquista significativa em minha vida acadêmica. Sua colaboração e apoio foram fundamentais, e estou verdadeiramente grato por ter cada um de vocês ao meu lado.

RESUMO

A lei de resfriamento de Newton descreve o comportamento da temperatura sob certas condições, dependendo de fatores como a diferença de temperatura entre o corpo e o meio externo, a superfície do corpo exposta, o calor específico da substância, as condições ambientais e o tempo de exposição ao ambiente. Esses fatores podem influenciar a taxa de resfriamento dos materiais. O speckle é um fenômeno de interferência diretamente relacionado à coerência da luz, podendo ser classificado como estático ou dinâmico. Com o intuito de investigar a taxa de resfriamento do alumínio, cobre e ferro, foi utilizado o método do speckle dinâmico para monitorar a movimentação dos centros espalhadores de luz durante o processo de resfriamento de cada material. O objetivo é identificar parâmetros que possam descrever a lei de resfriamento de Newton para esses materiais. Empregamos o software STMD (Speckle – THSP – MOC – Descritores) para processar todas as imagens geradas durante o experimento. Isso nos permitiu extrair dados essenciais para a THSP (Time History Speckle pattern), MCO (Matriz de Co-Ocorrências), entropia e MDI (Módulo de Dispersão de Intensidade). Esses parâmetros são cruciais para conduzir uma investigação abrangente sobre a taxa de resfriamento de cada material, proporcionando uma compreensão mais profunda do comportamento térmico e das características específicas de cada substância.

Palavras-chave: fenômeno de interferência; speckle dinâmico; taxa de resfriamento; coerência da luz.

ABSTRACT

Newton's law of cooling describes the behavior of temperature under certain conditions, depending on factors such as the temperature difference between the body and the external environment, the surface area of the body exposed, the specific heat of the substance, the environmental conditions and the time of exposure to the environment. These factors can influence the cooling rate of materials. Speckle is an interference phenomenon directly related to the coherence of light and can be classified as static or dynamic. In order to investigate the cooling rate of aluminum, copper and iron, the dynamic speckle method was used to monitor the movement of the light scattering centers during the cooling process of each material. The aim is to identify parameters that can describe Newton's cooling law for these materials. The use of STMD (Speckle - THSP - MOC - Descriptors) software to process all the images generated during the experiment allowed us to extract essential data for THSP (Time History Speckle pattern), MCO (Matrix of Co-Occurrences), entropy and MDI (Intensity Dispersion Modulus). These parameters are crucial for conducting a comprehensive investigation into the cooling rate of each material, providing a deeper understanding of the thermal behavior and specific characteristics of each substance.

Keywords: interference phenomenon; dynamic speckle; cooling rate; light coherence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Propagação de uma onda eletromagnética	10
Figura 2 – Conceito quântico para a propagação da luz	10
Figura 3 – Comportamento das ondas para cada coerência da luz	11
Figura 4 – Procedimento da emissão da luz laser	12
Figura 5 – Reflexão difusa em um superfície rugosa	12
Figura 6 – Ilustração dos centros espalhadores de luz	13
Figura 7 – Ilustração da propagação do calor em materiais sólidos	13
Figura 8 – Modelo da estrutura da rede de vibração	14
Figura 9 – Resultado final dos materias a serem analisados	17
Figura 10 – Módulo laser com suas configurações	18
Figura 11 – Representação esquemática da montagem experimental utilizada para captura dos dados	19
Figura 12 – Interface do programa STMD	20
Figura 13 – Ilustração da formação da THSP	21
Figura 14 – THSP dos materias antes do aquecimento	22
Figura 15 – THSP dos dois minutos iniciais do resfriamento	22
Figura 16 – Movimentação na superfície a partir da análise da THSP	23
Figura 17 – Decaimento da movimentação na superfície do alumínio	24
Figura 18 – Decaimento da movimentação na superfície do cobre	24
Figura 19 – Decaimento da movimentação na superfície do ferro	24
Figura 20 – Tabelas com a variação da temperatura do resfriamento para dois pontos distintos	25
Figura 21 – Gráfico do comportamento da entropia no alumínio	26
Figura 22 – Gráfico do comportamento da entropia no cobre	26
Figura 23 – Gráfico do comportamento da entropia no ferro	27
Figura 24 – Gráfico do comportamento da entropia no ferro	27
Figura 25 – Gráfico do Momento de inércia dos centros espalhadores na superfície alumínio	28
Figura 26 – Gráfico do Momento de inércia dos centros espalhadores na superfície cobre	28
Figura 27 – Gráfico do Momento de inércia dos centros espalhadores na superfície ferro	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	REVISÃO DA LITERATURA	10
2.1	CONCEITO DO QUE É A LUZ	10
2.2	COERÊNCIA DA LUZ	11
2.3	FENÔMENO LASER	11
2.4	SPECKLE	12
2.5	SPECKLE DINÂMICO	12
2.6	COMPORTAMENTO MICROSCÓPICO DE MATERIAIS SÓLIDOS AO RECEBER CALOR	13
2.7	CAPACIDADE TÉRMICA E CALOR ESPECÍFICO	14
2.8	LEI DE RESFRIAMENTO DE NEWTON	14
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	17
3.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	17
3.2	APARATO EXPERIMENTAL	18
3.3	COLETA DE DADOS	19
3.4	TRATAMENTO DOS DADOS	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
5	CONCLUSÃO	30
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

Do ponto de vista clássico, a matéria é tudo o que possui massa, formada por moléculas e átomos, ocupando um lugar no espaço (Munoz, 20..). A estrutura atômica de cada átomo, segundo o modelo de Bohr, é composta por elétrons, que se movimentam aleatoriamente ao redor, e por prótons e nêutrons, formando o núcleo do átomo (Munoz, 20..). Contudo, por mais que cada átomo possuísse a mesma estrutura atômica, cada matéria se diferencia pelas suas características e propriedades intrínsecas.

Dentre as propriedades existentes na matéria, a térmica é uma das mais importantes, devido ao entendimento das respostas ou reação ao transferir o calor, que é a energia em trânsito, causado pela diferença de temperatura entre corpos (Propriedades..., 2010). Desta forma, microscopicamente, a energia interna aumenta, por causa do aumento da energia vibracional dos átomos de rede em torno da posição de equilíbrio, energia cinética dos elétrons livres nos átomos, orientação de dipolos magnéticos, orientação dos dipolos elétricos, fenômenos de desordem etc (Propriedades..., 2010). Durante esse processo, alguns parâmetros podem ser observados, como condutividade, capacidade, dilatação, entre outros (Propriedades..., 2010).

É importante ressaltar que o calor que é absorvido por um objeto não fica armazenado como calor, mas como energia cinética e energia potencial dos átomos e moléculas (Propriedades..., 2010). Quando um corpo absorve calor gerado por um corpo mais quente, sua temperatura se eleva, aumentando a energia interna (Silva, 2019).

O calor pode ser transferido através dos processos de convecção, que ocorrem em fluidos, radiação, emissão de ondas eletromagnéticas, e condução, propagando-se gradativamente ao longo do material (Silva, 2019). Dentre os três estados da matéria, o sólido é o melhor condutor devido à sua organização da estrutura molecular (Propriedades..., 2010).

Com o intuito de analisar alguns comportamentos em sólidos condutores, como resfriamento, capacidade térmica e o comportamento da propagação do calor ao desligar a fonte térmica, será utilizado o método de interferometria óptica.

Os métodos de interferometria óptica tiveram início após a criação do laser, próximo da década de 60, por Theodore H. Maiman (Farias et al., 2016). Um dos métodos a se destacar é a interferometria de speckle, que consiste em analisar o padrão de speckle formado ao incidir uma luz coerente sobre a superfície de um material (Farias et al., 2016).

O speckle é um fenômeno relacionado diretamente com a coerência da luz. Ao incidir esse tipo de luz sobre uma superfície opticamente rugosa, sendo sua rugosidade da ordem do comprimento de onda, é gerada uma reflexão difusa (Farias et al., 2016). Os raios refletidos pela superfície são captados pela CCD (Charge-Coupled Device), formando uma imagem do padrão de interferência semelhante a uma TV fora de sintonia, ou seja, a imagem é formada por pontos claros e escuros que representam as interferências construtivas e destrutivas (Farias et al., 2016). É importante destacar que, se a luz incidida não for coerente sobre o material, não será possível visualizar um padrão de speckle (Farias et al., 2016).

O speckle pode ser definido como dinâmico e estático (Farias et al., 2016). O dinâmico

apresenta uma evolução temporal no speckle devido à movimentação dos centros espalhadores de luz na superfície do material analisado, gerando visualmente um efeito semelhante a uma TV desintonizada (Farias et al., 2016). Já o estático, como o próprio nome diz, está parado; durante a análise, não é visível nenhuma evolução temporal e movimentação (Farias et al., 2016).

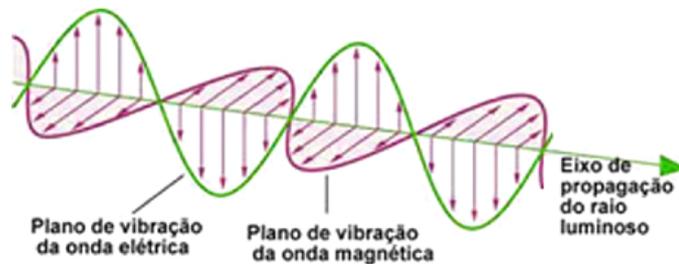
O método acima citado será utilizado como forma de investigação da taxa de resfriamento do ferro, cobre e alumínio, com o intuito de analisar o comportamento dos materiais a partir de dados gerados por algoritmos estatísticos sobre a THSP, MCO, entropia e MDI de cada material durante o monitoramento do decrescimento da temperatura.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CONCEITO DO QUE É A LUZ

A luz é um fenômeno físico complexo que exibe dualidade, comportando-se tanto como onda quanto partícula; sua definição varia conforme o contexto da análise (Halliday; Resnick, 2016). O conceito ondulatório descreve a luz como uma onda eletromagnética que se propaga pelo espaço-tempo, formada pela oscilação perpendicular dos campos elétricos e magnéticos de maneira contínua (Halliday; Resnick, 2016). Essa teoria foi confirmada no século XIX pelo cientista Young, por meio de seu experimento da dupla fenda, que permitiu a visualização dos fenômenos de interferência e difração da luz (Halliday; Resnick, 2016).

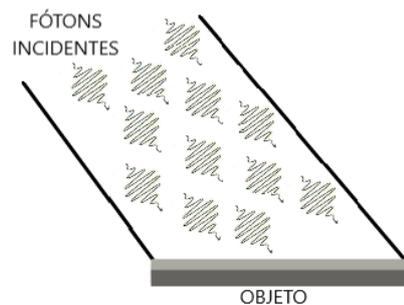
Figura 1 – Propagação de uma onda eletromagnética



Fonte: Aparecida *et al* (2016)

A teoria quântica, proposta por Max Planck em 1900, desempenhou um papel crucial na resolução do problema da catástrofe ultravioleta, que não podia ser explicado pela teoria clássica (Sussushi *et al.*, 2009). Planck postulou que a luz é quantizada, ou seja, composta por pequenos pacotes de energia chamados fótons (Susschi *et al.*, 2009). Ao aplicar a teoria quântica para explicar o efeito fotoelétrico, Einstein corroborou a validade da teoria quântica proposta por Planck, o que lhe rendeu um Prêmio Nobel anos mais tarde (Sussushi *et al.*, 2009).

Figura 2 – Conceito quântico para a propagação da luz

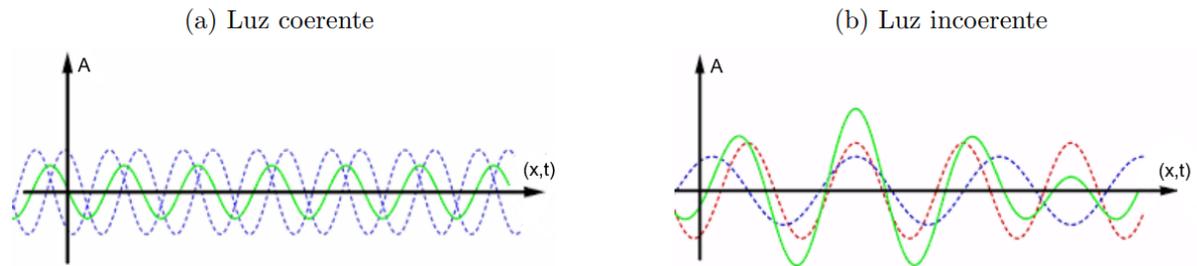


Fonte: O autor (2023)

2.2 COERÊNCIA DA LUZ

A propagação da luz pode ser classificada como coerente e não coerente. A luz coerente se propaga com fase ou diferença de fase constante em todos os pontos do espaço, enquanto a luz não coerente varia aleatoriamente com o tempo (Halliday; Resnick, 2016). A figura (3) ilustra o comportamento para ambos os casos .

Figura 3 – Comportamento das ondas para cada coerência da luz



Fonte: Webfísica (20..)

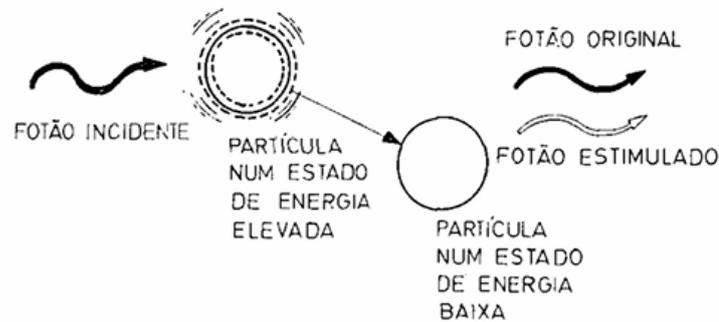
2.3 FENÔMENO LASER

O termo "laser" é uma sigla derivada do inglês (light amplification by stimulated emission of radiation), que se refere à radiação produzida por átomos ou moléculas quando emitem fótons por meio de estímulos (Teixeira; Rodrigues, 20..).

Para construir um dispositivo laser, são necessários três elementos principais: o meio ativo, que pode ser sólido, líquido ou gasoso; a fonte de energia; e a cavidade óptica (Teixeira; Rodrigues, 20..). As moléculas ou átomos presentes no meio ativo são responsáveis pela amplificação da luz; a fonte de energia energiza o meio para agitar essas partículas; e a cavidade óptica é definida por suas superfícies refletoras, que desempenham o papel de realimentar a luz amplificada (Teixeira; Rodrigues, 20..).

O fenômeno laser ocorre por meio da emissão estimulada de fótons, essencialmente quando os átomos e moléculas no meio ativo absorvem feixes de fótons (Teixeira; Rodrigues, 20..). A energia fornecida pelos fótons é convertida em energia térmica, resultando em um aumento no estado quântico do sistema, tornando-o mais vibrante (Teixeira; Rodrigues, 20..). Durante esse período, os átomos podem emitir essa energia espontaneamente por irradiação, retornando ao estado fundamental que ocupavam antes de receber os feixes de fótons ou para outro estado intermediário (Teixeira; Rodrigues, 20..). Com a aplicação de fótons externos com a mesma fase e frequência que os primeiros, é possível realizar colisões nos átomos excitados para estimular a emissão de fótons (Teixeira; Rodrigues, 20..). Além disso, para cada fóton emitido, um segundo fóton é emitido com o mesmo comprimento de onda, permitindo que o átomo retorne ao seu estado fundamental (Teixeira; Rodrigues, 20..). Dessa forma, o conjunto de emissões de fótons forma um feixe de luz coerente, o qual conhecemos como laser.

Figura 4 – Procedimento da emissão da luz laser

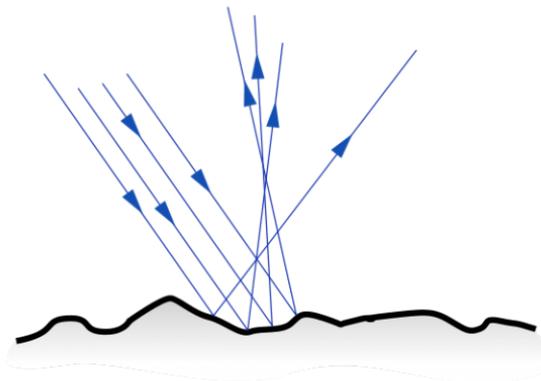


Fonte: Ribau e Carvalho, (20..)

2.4 SPECKLE

O speckle é um fenômeno de interferência óptica que ocorre devido à coerência da luz (Farias et al., 2016). Quando uma luz laser, que é coerente, incide sobre um material, ocorre uma reflexão difusa devido a uma superfície opticamente rugosa (Farias et al., 2016). Em outras palavras, o ângulo de incidência de cada raio de luz é diferente do ângulo de reflexão devido à orientação da normal, que é sempre perpendicular à superfície (Farias et al., 2016). Com isso, os raios de luz são refletidos em direções aleatórias.

Figura 5 – Reflexão difusa em um superfície rugosa



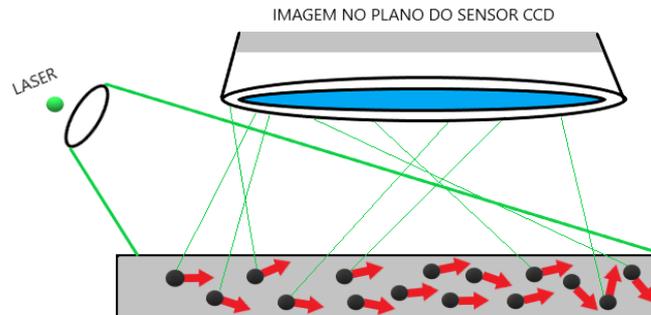
Fonte: Bruno (20..)

2.5 SPECKLE DINÂMICO

O speckle pode ser definido como estático ou dinâmico. Quando se analisam materiais nos quais os centros espalhadores de luz apresentam movimentação, é possível visualizar uma evolução temporal do padrão speckle, assemelhando-se a uma TV dessintonizada, e com isso

classificar como speckle dinâmico (Farias et al., 2016). Com o speckle estático, não é possível visualizar nenhuma movimentação, e, conseqüentemente, a evolução temporal é inexistente (Farias et al., 2016).

Figura 6 – Ilustração dos centros espalhadores de luz

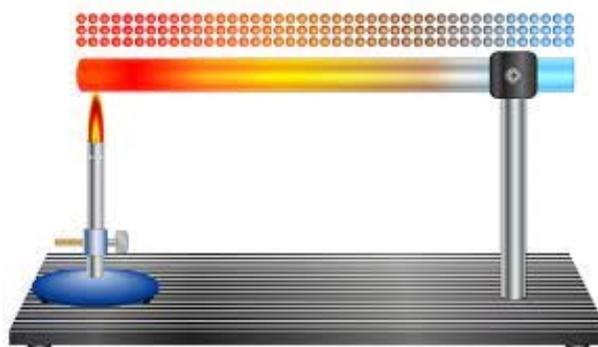


Fonte: O autor (2023)

2.6 COMPORTAMENTO MICROSCÓPICO DE MATERIAIS SÓLIDOS AO RECEBER CALOR

Para gerar calor, que é a energia em trânsito entre dois objetos, é necessário que exista uma diferença de temperatura (Moysés, 2014). Sua propagação ocorre através da convecção, radiação e condução (Halliday; Resnick, 2008). Ao aquecer materiais sólidos, o calor se propaga pela condução, transportando-o por todo o material até regiões mais frias (Propriedades..., 2010). Microscopicamente, ao receber a energia transferida, o sólido aumenta a energia vibracional da rede ao redor da posição de equilíbrio e a energia cinética dos elétrons livres dos átomos (Propriedades..., 2010). Com isso, a temperatura, que mede o grau de agitação das moléculas, aumenta junto com a energia interna (Moysés, 2014). Contudo, é importante ressaltar que o calor absorvido não fica armazenado como calor, mas como energia cinética e potencial das moléculas e dos átomos (Propriedades..., 2010).

Figura 7 – Ilustração da propagação do calor em materiais sólidos



Fonte: Helerbrock (20..)

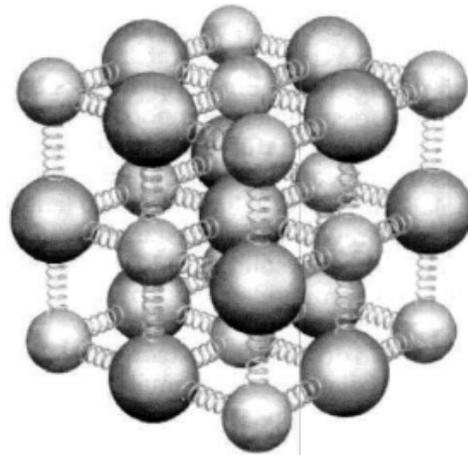
2.7 CAPACIDADE TÉRMICA E CALOR ESPECÍFICO

A capacidade térmica de qualquer material é a quantidade de energia necessária para provocar uma variação de temperatura no material (Moysés, 2014). Matematicamente, a capacidade térmica pode ser definida como a taxa de variação do calor cedido em relação à temperatura.

$$C = \frac{\partial Q}{\partial T} \quad (1)$$

A energia térmica de um material sólido pode ser assimilada à energia vibracional da rede (Propriedades..., 2010). Dessa forma, a energia térmica, manifestada na forma de vibrações de rede, é teoricamente considerada como uma série de ondas superpostas, com um espectro de frequência determinado pelas propriedades elásticas do cristal (Propriedades..., 2010, p. 308). Em outras palavras, cada material possui propriedades elásticas únicas que influenciam diretamente na frequência das vibrações da rede (Propriedades..., 2010). Devido a isso, cada material requer uma quantidade específica de calor para elevar sua temperatura em 1°C.

Figura 8 – Modelo da estrutura da rede de vibração



Fonte: Propriedades térmicas de materiais (20..)

2.8 LEI DE RESFRIAMENTO DE NEWTON

Quando um corpo com temperatura T_A é exposto um ambiente de temperatura T_B , sendo que $T_A \gg T_B$, pela segunda lei da termodinâmica, o calor sempre flui do corpo mais quente para o corpo mais frio (Halliday; Resnick, 2008). Desta forma, após um certo tempo, o corpo perde temperatura atingindo o equilíbrio térmico com o ambiente. O procedimento realizado gera uma taxa de resfriamento que depende de fatores como a diferença de temperatura entre o corpo e o meio externo, a superfície do corpo exposta, o calor específico da substância que o constitui, as condições do ambiente no qual este corpo foi colocado e o tempo de permanência em contato com o ambiente (Sias, 20..). O fluxo de calor transferido do quente para o frio por unidade de

tempo é definido como $\frac{dQ}{dt}$ (Pereira et al., 2003). Além disso, a diferença de temperaturas ($T_A - T_B$) entre o sistema e o ambiente é diretamente proporcional (Pereira et al., 2003).

$$\frac{dQ}{dt} = hA(T_A - T_B) \quad (2)$$

em que h é uma constante característica de cada sistema e A é área de contato entre o sistema e o meio. Para encontrar a equação que expressa a taxa de resfriamento vamos utilizar a equação (2).

Da equação (1) sabemos que $dQ = CdT$, como o calor é cedido para o ambiente fica com o sinal negativo. Assim,

$$-\frac{CdT}{dt} = hA(T_A - T_B) \quad (3)$$

$$\frac{C}{hA} \frac{dT}{dt} = -(T_A - T_B) \quad (4)$$

Vamos dizer que $\frac{C}{hA} = \kappa$ para facilitar o cálculo,

$$\kappa \frac{dT}{dt} = -(T_A - T_B) \quad (5)$$

Multiplicando ambos o lados por dt temos:

$$\kappa \frac{dT}{dt} dt = -(T_A - T_B) dt \quad (6)$$

A equação (7) pode ser reescrita como:

$$\frac{dT}{(T_A - T_B)} = -\kappa dt \quad (7)$$

Integrando ambos os lado,

$$\int \frac{dT}{(T_A - T_B)} = -\kappa \int dt \quad (8)$$

$$\ln(T_A - T_B) + d = -t\kappa + c \quad (9)$$

$$\ln(T_A - T_B) = -t\kappa + c - d \quad (10)$$

Como a Exponencial é a função inversa do logaritmo natural vamos aplicar em ambos os lado para simplificar.

$$e^{\ln(T_A - T_B)} = e^{-t\kappa + c - d} \quad (11)$$

Pela propriedade de potenciação podemos escrever a equação (10) como:

$$T_A - T_B = e^{-t\kappa} e^c e^{-d} \quad (12)$$

$$T_A - T_B = e^{-t\kappa} e^{c-d} \quad (13)$$

A expressão e^{c-d} pode ser relacionada à variação da temperatura inicial do objeto em relação ao meio. Se associarmos d à temperatura inicial do objeto T_a e c à temperatura do meio T_B , podemos ter uma interpretação relacionada à variação da temperatura e definir como:

$$(T_B - T_a) = e^{c-d} \quad (14)$$

Substituindo (14) em (13),

$$T_A - T_B = (T_B - T_a) e^{-t\kappa} \quad (15)$$

$$T_A = (T_B - T_a) e^{-t\kappa} + T_B \quad (16)$$

κ representa todos os fatores que podem interferir no resfriamento, como o calor específico do material, a área de contato do objeto com o ambiente, as características do meio no qual o objeto está inserido e capacidade térmica.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

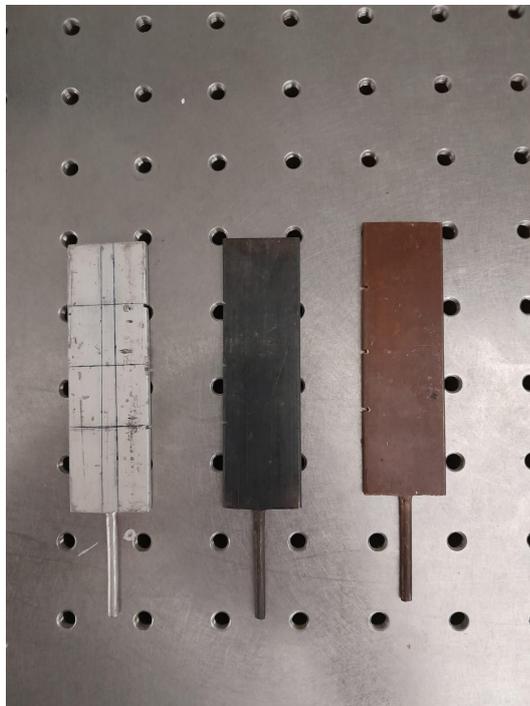
3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Os materiais metálicos utilizados para a realização do experimento foram o cobre, o alumínio e o ferro. A princípio, foi desafiador encontrar diferentes metais com as mesmas medidas, mas no final cada material foi adquirido de forma distinta: o cobre foi comprado, o alumínio foi encontrado na UFAL e o ferro foi obtido em uma serralaria.

Para preparar os metais para a análise experimental, utilizamos o laboratório de ensino. Neste local, iniciamos o planejamento do formato da peça, fazendo as medições necessárias. Em seguida, começamos a cortar o alumínio, que foi a primeira peça, para criar uma extremidade fina que se encaixasse no ferro de solda. Após concluir os cortes, usamos uma lima para dar o acabamento à peça, moldando-a no formato cilíndrico e garantindo um encaixe perfeito no ferro de solda. Esse último procedimento levou, em média, 3 horas para ser concluído, embora o tempo necessário para o acabamento possa variar dependendo da rigidez do material.

No caso das peças de cobre e ferro, seguimos os mesmos procedimentos mencionados anteriormente, com o objetivo de deixar as três peças o mais próximas possível em termos de medidas. A figura (9) mostra como as peças ficaram após a conclusão da preparação das amostras.

Figura 9 – Resultado final dos materiais a serem analisados

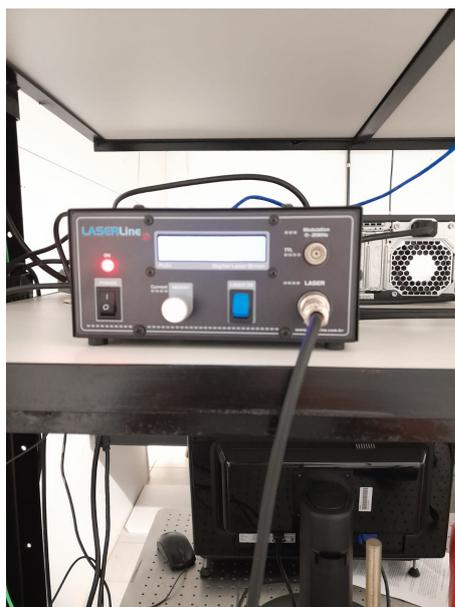


Fonte: O autor (2023)

3.2 APARATO EXPERIMENTAL

Para realizar o experimento, utilizamos um módulo laser da marca LASERline com um comprimento de onda $\lambda = 532nm$. No entanto, a potência do laser pode ser ajustada de acordo com a corrente elétrica, que neste caso era de $123mA$. Na figura abaixo, é possível visualizar o equipamento utilizado.

Figura 10 – Módulo laser com suas configurações



Fonte: O autor (2023)

A figura acima mostra todas as opções e configurações possíveis a serem feitas no módulo. Ao ligar o módulo e ajustar o laser na configuração desejada, utilizamos dois espelhos para direcionar o feixe do laser para o ponto desejado no material. O espelho E_1 , que é responsável pela primeira reflexão, está posicionado a uma distância $25,6\text{ cm}$ em relação ao laser e altura $10,0\text{ cm}$ em relação à mesa. Já o espelho E_2 se encontra a uma posição $10,0\text{ cm}$ em relação a E_1 e altura $25,6\text{ cm}$ em relação à mesa.

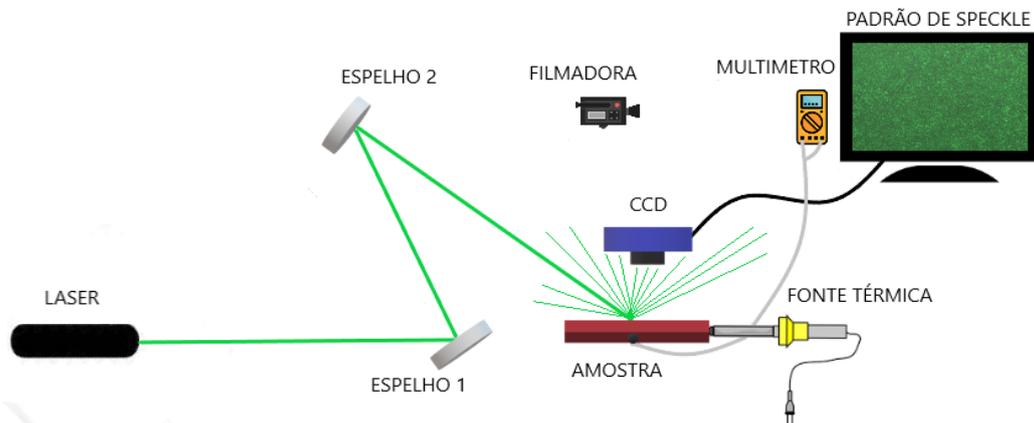
Após posicionar os espelhos, a peça metálica foi fixada no ferro de solda, que funcionou como fonte térmica. Em seguida, ela foi encaixada em um suporte, ficando a uma altura de $12,5\text{ cm}$, para permitir o posicionamento do feixe do laser no ponto de análise desejado. Quando o feixe do laser está posicionado no ponto desejado, uma câmera chamada CCD é posicionada a uma altura 20 cm paralela à amostra para capturar a dispersão luminosa gerada quando o feixe incide na superfície do material.

Através de um software chamado 'Tcapture', é realizado o processamento das informações contidas nos raios refletidos pela superfície e capturados pela câmera, gerando um padrão de interferência, semelhante a uma TV fora do ar, conhecido como padrão de speckle.

Próximo à tela onde o padrão de speckle era gerado, foi posicionado um multímetro para monitorar a temperatura usando um termopar do tipo K. Para registrar o tempo que cada

temperatura levou para atingir, utilizamos uma câmera filmadora.

Figura 11 – Representação esquemática da montagem experimental utilizada para captura dos dados



Fonte: O autor (2023)

3.3 COLETA DE DADOS

Para realizar a análise do resfriamento de cada material, primeiramente foi necessário focalizar o laser, que é uma luz coerente, no centro do material para gerar uma reflexão difusa devido à rugosidade do material. Essa reflexão é captada pela CCD, que está conectada ao computador. Com isso, é possível gravar a evolução temporal do padrão speckle utilizando o software 'Tcapture'.

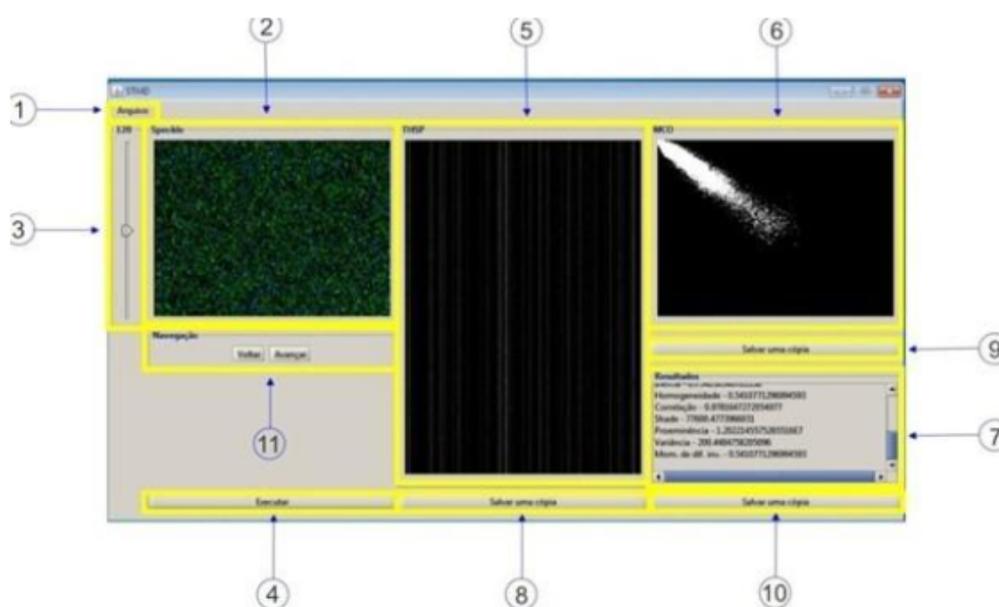
Antes de iniciar a análise do resfriamento, cada material foi aquecido por 15 minutos. O alumínio atingiu uma temperatura de 167°C, o cobre alcançou 205°C e o ferro atingiu 114°C. Após o registro de cada temperatura, foi necessário aguardar a sua estabilização, uma vez que a condução do calor eleva a temperatura registrada em 15 minutos. Ao estabilizar, iniciamos o processo de gravação do resfriamento utilizando a CCD até que cada material atingisse a temperatura inicial. Para atingir a temperatura inicial, cada material levou tempos distintos, sendo que o alumínio levou 15 minutos em seu resfriamento, o cobre 44 minutos e o ferro 34 minutos. Além disso, também registramos a variação de temperatura ao longo do tempo com a câmera filmadora.

3.4 TRATAMENTO DOS DADOS

Para coletar informações dos vídeos gerados, é necessário, primeiramente, fazer os cortes dos vídeos utilizando o seguinte comando com o ffmpeg: **ffmpeg -i (nome do vídeo).avi -ss**

00:00:00 -to 00:02:00 -c copy (nome do recorte gerado).avi". Para cada recorte, foi escolhido um intervalo de 2 minutos. Por exemplo, se o vídeo tem 6 minutos, foram escolhidos intervalos de 0 a 2, 2 a 4 e 4 a 6 minutos, gerando assim 3 vídeos de 2 minutos cada. Ao recortar os vídeos de 30,44 e 34 minutos gravados no monitoramento da taxa de resfrição, foram obtidos 15 vídeos para o alumínio, 22 para o cobre e 17 para o ferro. Em seguida, utilizamos o comando "**ffmpeg -i (nome do vídeo).avi -r 3 -s 320x240 -f image2d.png**" para gerar imagens consecutivas a partir dos vídeos de 2 minutos. O número de imagens é ajustado com base na escolha dos frames em cada vídeo, variando entre 3 e 4 frames, com o objetivo de produzir um número o mais próximo possível de 360 imagens. Após essa etapa, utilizamos o software STMD (Speckle – THSP – MOC – Descritores) para o processamento das imagens geradas, com o intuito de extrair informações relacionadas a THSP (Time history Speckle pattern), MCO (Matriz de Co-ocorrência), entropia e outros parâmetros. Ao analisar todos os vídeos de 2 minutos gerado pelo alumínio, cobre e ferro é possível caracterizar a evolução temporal de cada material.

Figura 12 – Interface do programa STMD



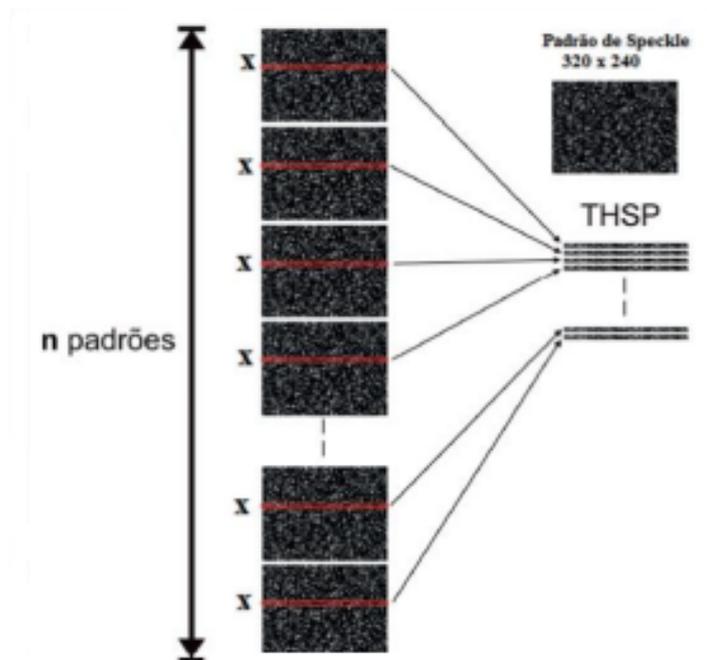
Fonte: Ferreira (2015)

Na figura acima, é possível observar as funcionalidades do programa em sua interface. Em (1), você pode localizar a pasta desejada contendo as imagens a serem abertas no programa. Em (2), temos uma ilustração de uma imagem que pode ser substituída por outra usando a função (11) no conjunto de imagens abertas no programa. Em (3), como mencionado anteriormente, escolhemos uma linha para análise e coleta de dados. Após a seleção da linha, em (4), executamos o comando de processamento do conjunto de imagens pelo software, o que resulta na geração de THSP em (5), MCO em (6) e dados experimentais em (7). Cada conjunto de informações pode ser salvo de forma independente nas opções (8), (9) e (10).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A THSP é uma técnica utilizada para analisar o comportamento temporal e espacial dos padrões de speckle em imagens ao longo de diferentes intervalos de tempo (Farias et al., 2016). Para isso, uma imagem é gerada copiando uma linha de cada padrão de speckle, com 320 pixels de largura e 240 pixels de altura (Farias et al., 2016). Em termos mais simples, os pixels de cada linha dos padrões gerados são replicados um abaixo do outro, formando assim uma imagem que representa as variações das linhas de pixels de cada imagem ao longo do tempo e do espaço (Farias et al., 2016). A Figura (13) ilustra visualmente como esse processo ocorre.

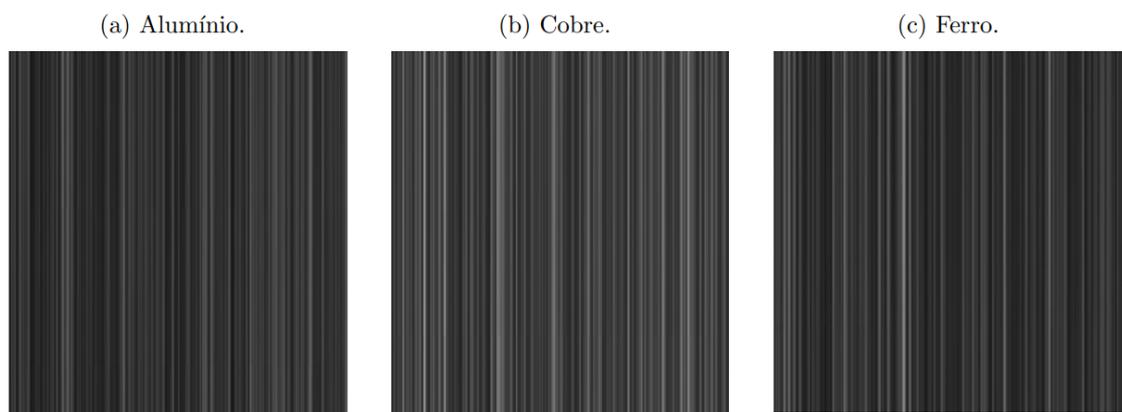
Figura 13 – Ilustração da formação da THSP



Fonte: Lucena (2012)

Na figura abaixo, é possível observar a THSP das três amostras a uma temperatura inicial de 24°C. Isso nos permite analisar o comportamento dos materiais antes do aquecimento. O formato dos códigos de barras nas imagens indica que há apenas uma variação na intensidade dos pixels na direção vertical, ou seja, os centros espalhadores de luz permanecem estáticos, indicando a ausência de movimentação na superfície dos materiais (Farias et al., 2016).

Figura 14 – THSP dos materiais antes do aquecimento



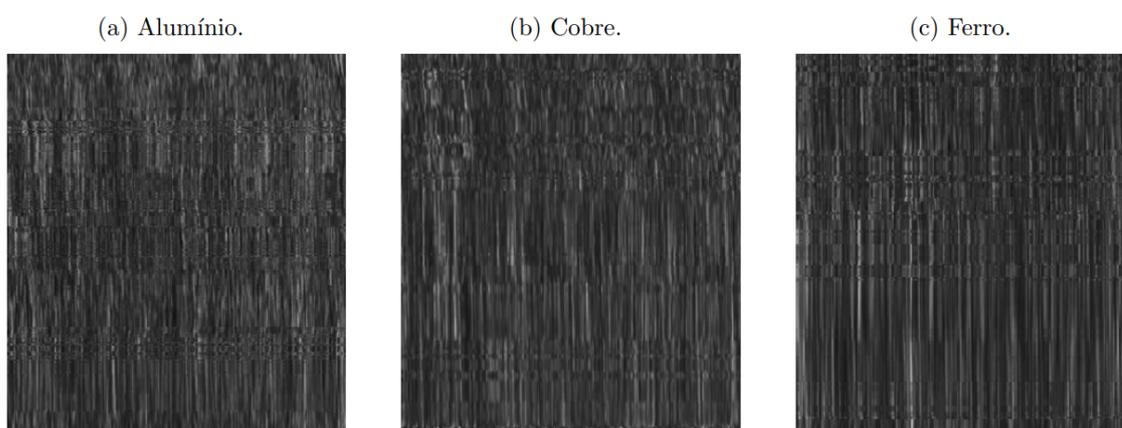
Fonte: O autor (2023)

No entanto, ao ligar o ferro de solda, a resistência contida em seu interior começa a causar uma variação de temperatura. Com isso, uma onda de calor se propaga pelo material devido à vibração das moléculas ao receber o calor gerado pela resistência, aumentando a movimentação dos centros espalhadores e modificando as THSP nas figuras (14a), (14b) e (14c) (SILVA, 2019).

Após atingir uma certa temperatura em quinze minutos, foi necessário esperar o resfriamento até atingir a temperatura marcada em quinze minutos para iniciar o processo de observação do comportamento dos materiais ao longo do seu resfriamento. Como a temperatura interfere na medição do resfriamento, foi necessário manter a temperatura da sala sempre em 24°C (SIAS, 20..). Para isso, antes de cada medição, a temperatura da sala era verificada com um termômetro.

Na figura 15, é representada a THSP dos primeiros dois minutos de gravação do resfriamento dos materiais. Observa-se o momento de maior movimentação na superfície do material, evidenciado pela variação da intensidade dos pixels na vertical e do espaço na horizontal.

Figura 15 – THSP dos dois minutos iniciais do resfriamento



Fonte: O autor (2023)

A MCO é utilizada para caracterizar as imagens geradas na THSP por meio de um conjunto de estatísticas que analisam cada tonalidade de cinza dos diferentes pixels ao longo de

diversas direções e distâncias (Farias et al., 2016). A construção de cada matriz é da ordem $n \times n$, em que 'n' representa o número de tonalidades de cinza na imagem (Farias et al., 2016). Cada elemento a_{ij} representa o número de vezes que ocorre a transição do nível de cinza Z_i para Z_j , levando em consideração a distância 'd' entre os pixels vizinhos 'i' e 'j' na direção (Eliel et al., 2016, p. 158). Dessa forma, podemos definir seu descritor como:

$$MCO = N_{ij} \quad (17)$$

O N_{ij} indica quantas vezes o pixel de intensidade 'i' é seguido pelo valor de intensidade 'j' na direção e sentido da evolução temporal do padrão speckle (Farias et al., 2016).

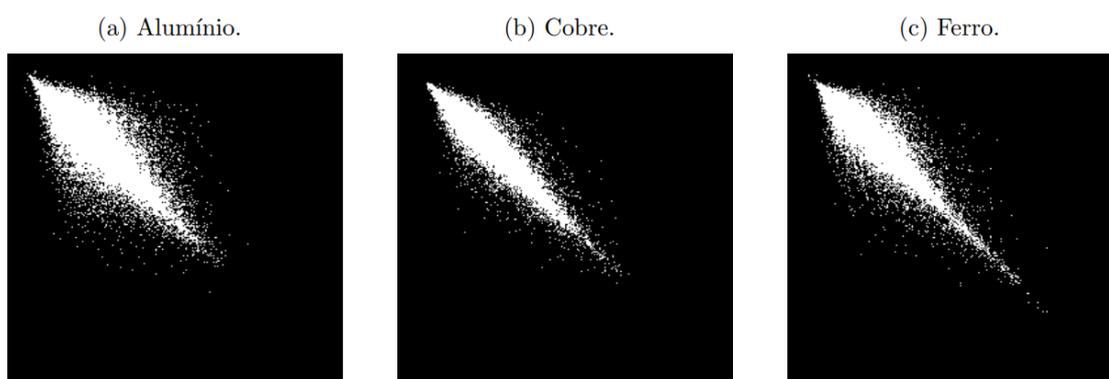
Normalizando a equação (1):

$$M_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_j N_{ij}} \quad (18)$$

Para normalizar, realiza-se a divisão do valor de cada célula da matriz pelo somatório dos valores contidos nas células da matriz. Assim M_{ij} representa a posição de cada ponto para cada elemento na formação da diagonal principal (Farias et al., 2016).

Ao utilizar os métodos estatísticos de primeira ordem contidos na Matriz de Co-ocorrência para analisar as Figuras (15a), (15b) e (15c), são geradas imagens para cada figura contendo informações sobre a movimentação detectada na superfície. Quanto maior for o espalhamento da diagonal principal, maior é a movimentação dos centros espalhadores na superfície dos materiais. Nas Figuras, é possível observar os espalhamentos gerados (Farias et al., 2016).

Figura 16 – Movimentação na superfície a partir da análise da THSP

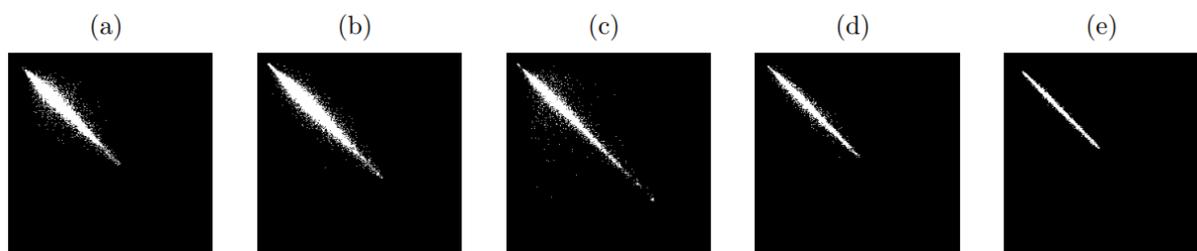


Fonte: O autor (2023)

Nas imagens acima, é nítido um grande espalhamento ao longo da diagonal principal nas figuras (16a), (16b), (16c). Isso indica que durante o processo de resfriamento no intervalo de dois minutos, a superfície ainda apresenta uma alta movimentação. No entanto, é importante destacar que os três materiais exibem padrões de espalhamento diferentes, evidenciando que a superfície de cada material se comporta de maneira distinta durante o processo de resfriamento.

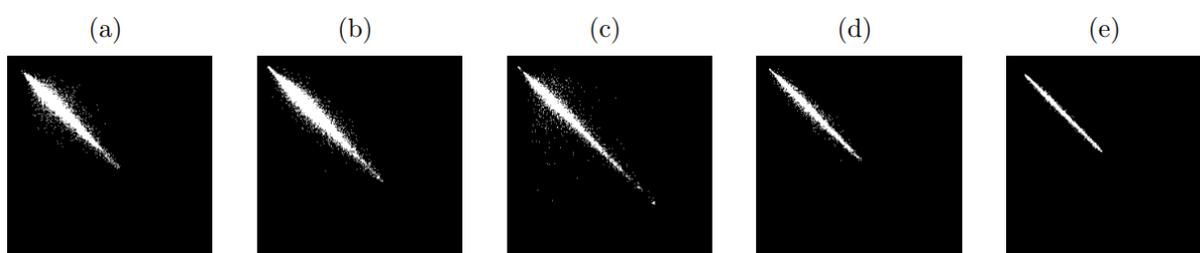
As figuras (17), (18) e (19) exibem a evolução temporal da MCO nos minutos 4, 6, 8, 10 e 12 durante o processo de resfriamento.

Figura 17 – Decaimento da movimentação na superfície do alumínio



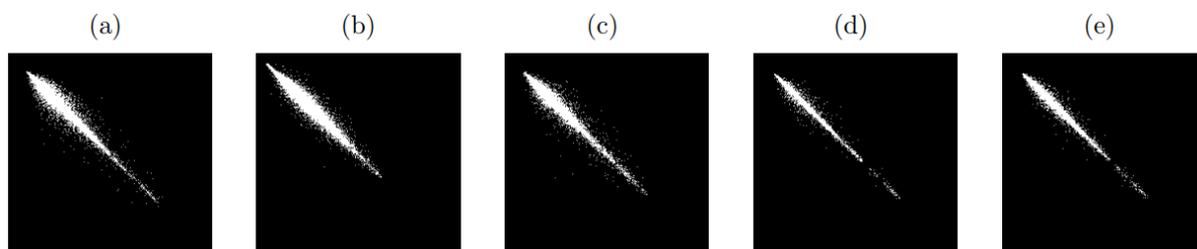
Fonte: O autor (2023)

Figura 18 – Decaimento da movimentação na superfície do cobre



Fonte: O autor (2023)

Figura 19 – Decaimento da movimentação na superfície do ferro



Fonte: O autor (2023)

Cada figura exibe a diminuição do movimento dos centros espalhadores na superfície do material à medida que o calor diminui. No entanto, é notório que essa diminuição não é regular; em certos intervalos, há um pequeno aumento na movimentação. Esse fato pode ser justificado pela interferência do ferro de solda, que é composto por uma liga metálica diferente e possui uma taxa de resfriamento distinta. Além disso, devemos levar em consideração a contínua propagação do calor até o ponto analisado, devido à temperatura não ser uniforme na barra.

As tabelas abaixo exibem a variação de temperatura durante o resfriamento com intervalos de 30 segundos para Alumínio (*Al*), Cobre (*Cb*) e Ferro (*Fe*) em dois pontos distintos para cada material, com um distanciamento de dois centímetros. Os pontos (*Al*₁), (*Cb*₁) e (*Fe*₁) são os pontos utilizados na coleta de dados, enquanto os pontos (*Al*₂), (*Cb*₂) e (*Fe*₂), localizados a 2cm do ponto analisado, foram medidos para comparar as temperaturas entre os diferentes pontos.

Figura 20 – Tabelas com a variação da temperatura do resfriamento para dois pontos distintos

Tabela 1 – Alumínio

Al_1	Al_2
167°C	162°C
163°C	159°C
152°C	153°C
143°C	141°C
134°C	132°C
123°C	150°C
114°C	114°C
104°C	105°C
97°C	98°C
90°C	91°C
83°C	84°C
78°C	79°C
73°C	74°C
69°C	69°C
64°C	65°C
60°C	61°C
57°C	57°C
54°C	55°C
51°C	52°C
49°C	49°C
47°C	47°C

Tabela 2 – Ferro.

Fe_1	Fe_2
114°C	100°C
110°C	98°C
107°C	95°C
102°C	93°C
98°C	89°C
93°C	86°C
90°C	83°C
85°C	79°C
82°C	76°C
78°C	73°C
74°C	69°C
70°C	66°C
66°C	63°C
62°C	61°C
61°C	58°C
58°C	56°C
56°C	54°C
54°C	52°C
52°C	50°C
50°C	49°C
48°C	46°C

Tabela 3 – Cobre

Cb_1	Cb_2
205°C	179°C
201°C	175°C
192°C	168°C
183°C	159°C
173°C	151°C
164°C	142°C
151°C	132°C
142°C	125°C
134°C	119°C
126°C	111°C
119°C	105°C
112°C	100°C
106°C	95°C
100°C	88°C
95°C	84°C
91°C	80°C
86°C	77°C
82°C	74°C
78°C	70°C
75°C	67°C
72°C	64°C

Fonte: O autor (2023)

O conceito de entropia no processamento de imagens consiste em medir a quantidade de desordem presente em uma imagem através da avaliação da complexidade da distribuição de intensidade de pixels na imagem, ou seja, quanto maior a incerteza ou a desordem devido a distribuição dos pixels, maior a entropia (Farias et al., 2016).

A intensidade dos pixels está ligada ao brilho e à escala, sendo que cada cor tem sua própria escala de intensidade (Farias et al., 2016). Por exemplo, para representar diferentes níveis de pixels cinzas, é necessário realizar uma variação dentro de uma escala de 0 (preto) a 255 (branco). Muitos valores nulos apresentam pouca informação (Farias et al., 2016).

Para calcular a entropia, utilizamos o descritor abaixo.

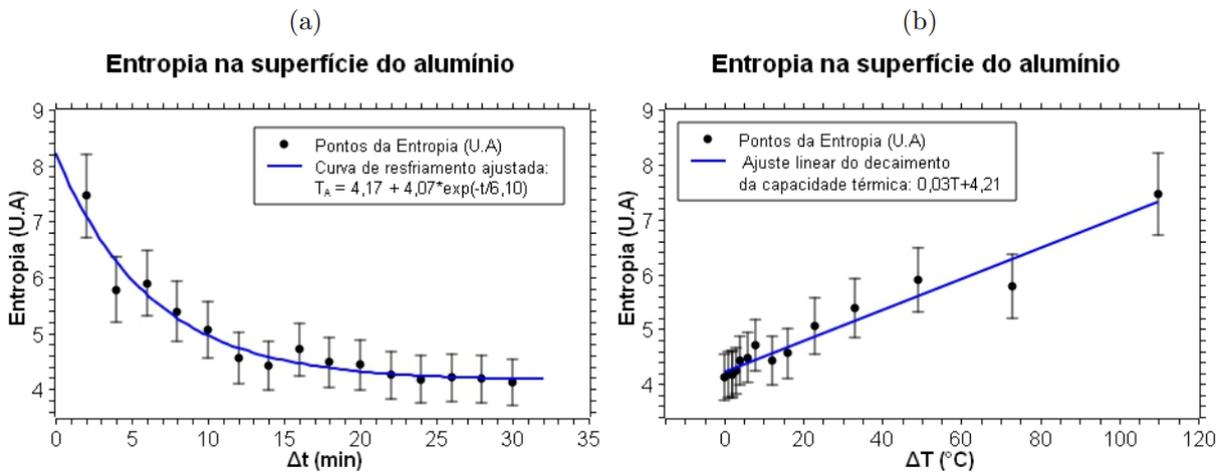
$$\sum_{i,j} P(i,j) \log P(i,j) \quad (19)$$

As variáveis i e j representam o valor da intensidade do pixel dentro da escala do nível de tonalidade da cor. $P(i,j)$ é a probabilidade de os dois eventos ocorrerem, ou seja, se dentro da

escala de cinza for escolhido a intensidade 55 e 56 qual seria a chance de as duas aparecerem na imagem? Essa análise é realizada para todas as intensidades de cinza presente na imagem. O logaritmos foi aplicado em $P(i, j)$ para reduzir a escala dos valores com probabilidades pequenas.

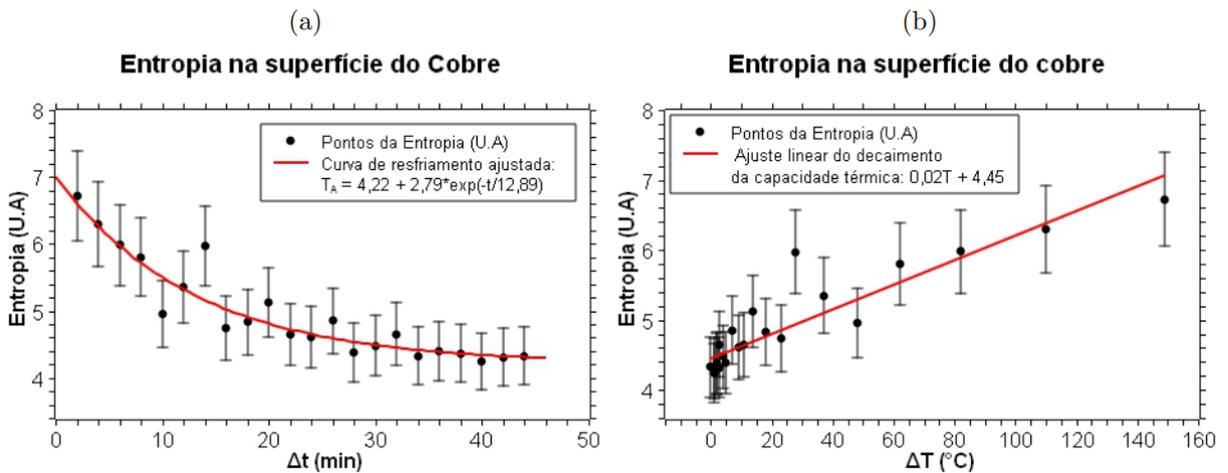
A partir dos valores da entropia gerados pelo software STMD, através do descrito acima, foram construídos os gráficos para analisar seu comportamento em função do tempo e da variação da temperatura para cada material nas figuras.

Figura 21 – Gráfico do comportamento da entropia no alumínio



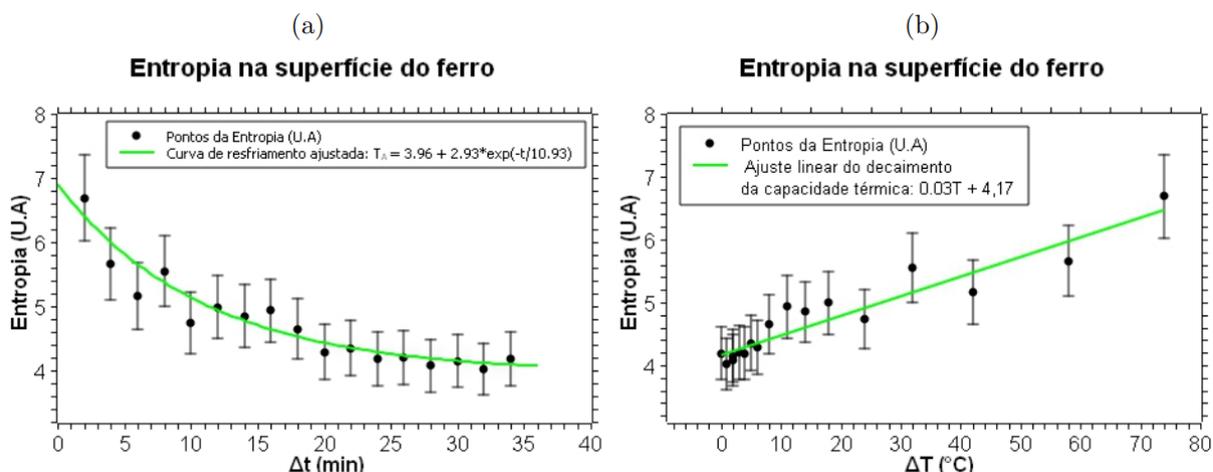
Fonte: O autor (2023)

Figura 22 – Gráfico do comportamento da entropia no cobre



Fonte: O autor (2023)

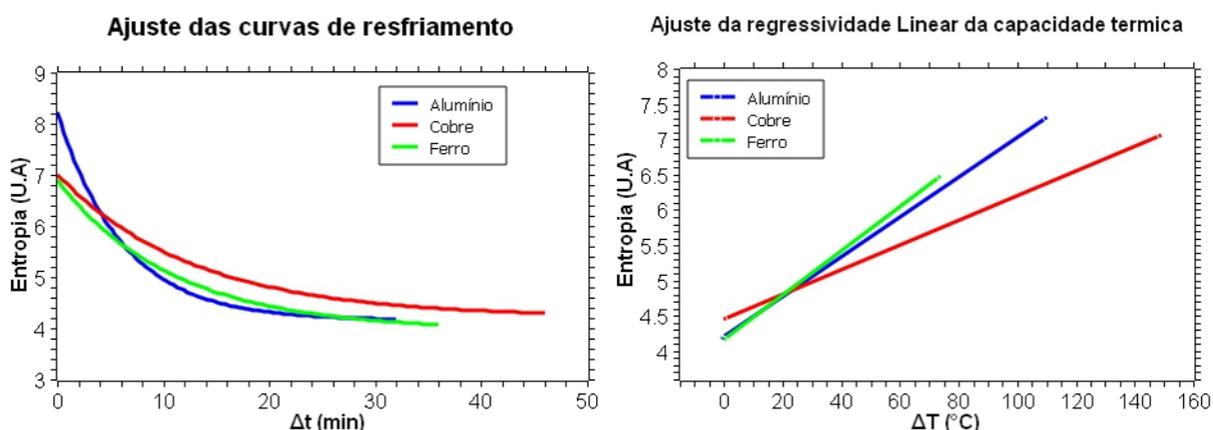
Figura 23 – Gráfico do comportamento da entropia no ferro



Fonte: O autor (2023)

As figuras acima mostram que, para cada material e variável, a entropia exibe diferentes curvas. Nas figuras (20a), (21a), (22a), é possível visualizar uma regressão não linear caracterizando as curvas de resfriamento de cada material. Já as figuras (20b), (21b) e (21b) apresentam uma regressão linear mostrando a diminuição da capacidade térmica ao trocar calor com o meio. As flutuações presentes nos gráficos das figuras são causadas pelos relatos citados anteriormente. Ao fazer o ajuste da função para os gráficos acima, é possível ver o comportamento da taxa de resfriamento e a diminuição da capacidade térmica nas figuras (24).

Figura 24 – Gráfico do comportamento da entropia no ferro



Fonte: O autor (2023)

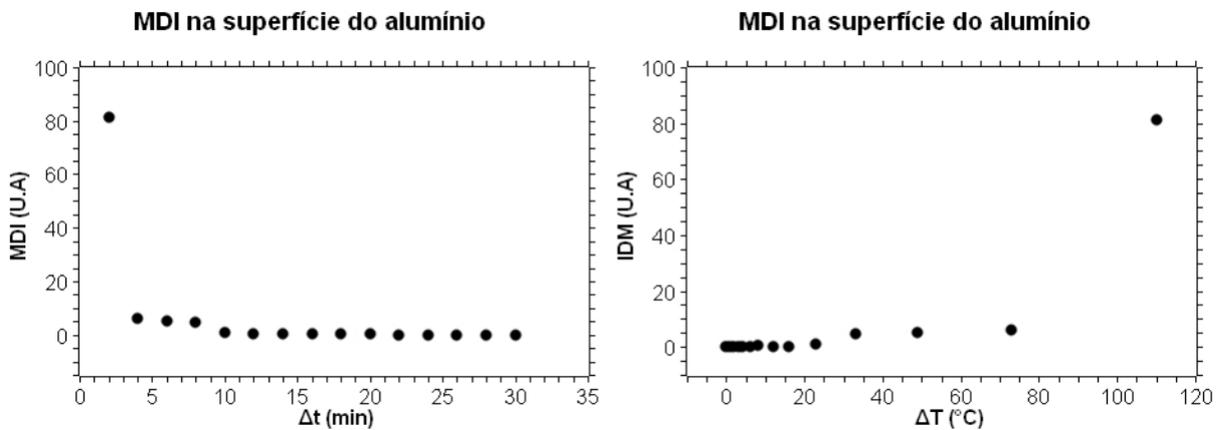
O MDI é um parâmetro que se baseia na dispersão da intensidade de pixels em relação ao ponto médio de intensidade, o qual é calculado pela média das intensidades dos pixels (Farias et al., 2016). Quanto mais próximas as intensidades dos pixels estiverem do ponto médio, menor será o momento de inércia; se estiverem mais dispersas, maior será o momento de inércia (Farias et al., 2016). Para realizar essa análise, é necessário aplicá-lo sobre a THSP com o

objetivo de atribuir valores às variações de intensidade (Farias et al., 2016). Esse processo consiste na soma dos valores das probabilidades multiplicados pela distância ao quadrado entre cada elemento (Eliel et al., 20..., p. 159). Dessa forma, o descritor do MDI é definido como:

$$\sum_{i,j} P(i,j)(i - \bar{j})^2 \quad (20)$$

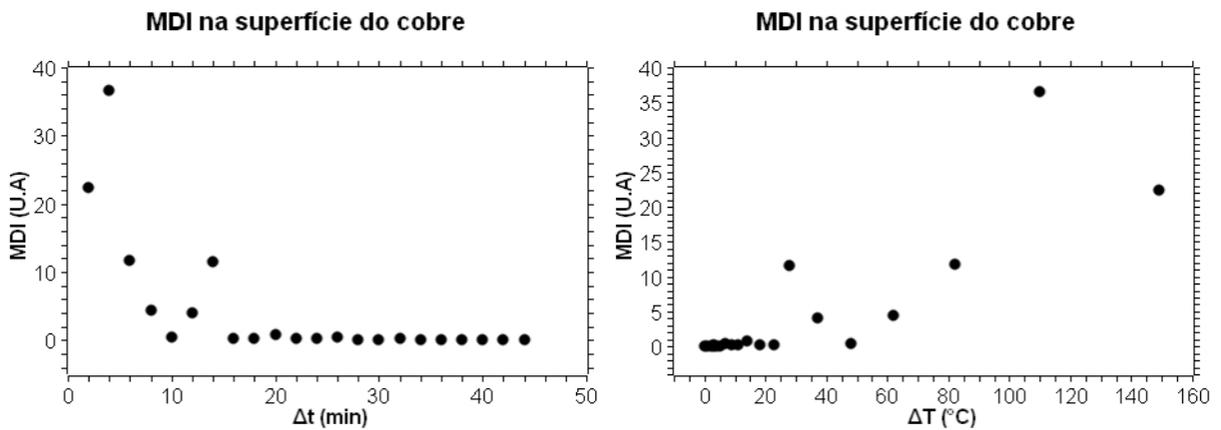
Sendo que P_{ij} é a probabilidade da imagem conter as intensidades i e j . $(i - \bar{j})^2$ é a variância da intensidade dos pixels. As figuras (24), (25), (26) exibem os gráficos do MDI em função do tempo e da temperatura.

Figura 25 – Gráfico do Momento de inércia dos centros espalhadores na superfície alumínio



Fonte: O autor (2023)

Figura 26 – Gráfico do Momento de inércia dos centros espalhadores na superfície cobre



Fonte: O autor (2023)

5 CONCLUSÃO

O estudo apresentou uma técnica que utiliza algoritmos estatísticos, possibilitando analisar o comportamento de cada material durante o decréscimo da temperatura. Durante esse processo, foi possível extrair informações relacionadas ao MDI, MCO, THSP e entropia para compreender como o material se comportava durante o resfriamento e qual a taxa de resfriamento para cada material. Contudo, ao realizar a análise da entropia e do MDI em função do tempo e da variação da temperatura em cada gráfico, obtivemos a taxa de resfriamento, a capacidade térmica e o comportamento da propagação do calor ao desligar o reservatório térmico. Desta forma, é possível afirmar que o método do speckle dinâmico pode ser aplicado para analisar o comportamento de materiais sólidos durante seu resfriamento.

REFERÊNCIAS

- FARIAS, E.; LIMA, E.; SILVA, A.; SILVA, J.; LUCENA, D.; OLIVEIRA, M.; SANTOS, C.; ROCHA, S.; MOURA, M.; CHAGAS, E. **Aplicação da técnica de biospeckle em pesquisa da região Amazônica**. 5. ed. Boa Vista-RR: UFRR, 2016.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de física: gravitação, ondas e termodinâmica**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de física: óptica e física moderna**. 10. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2016.
- MOYSÉS, H. **Curso de Física Básica 2: fluidos, oscilações, ondas e calor**. 5. ed. São Paulo: Blutcher, 2014.
- MUNOZ, S. **Estrutura da matéria**. 1. ed. São Paulo - SP: CEPA, 20..
- PEREIRA, W.; JURGEN, W.; PRECKER, C.; SILVA, D.; SILVA CLEITON, D. Medida de calor específico e lei de resfriamento de newton: Um refinamento na análise dos dados experimentais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, p. 392–398, 2003.
- PROPRIEDADES térmicas de materiais. *In*: MORA, Nora Diaz (compiladora). **Apostila de materiais elétricas**. Foz do igualçú: Unioeste/lamat, 2010. p.302-354.
- RIBEIRO, J. **Uma investigação sobre a aprendizagem da reflexão luminosa no ensino médio a partir da arquitetura brasiliense**. 2019. 231p. Tese (Doutorado em educação em ciências) — Universidade Brasília. Brasília-DF, 2019. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/handle/capes/609512>. Acesso em: 07. nov. 2023.
- SIAS, D. B. **Resfriamento de um corpo**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas, Pelotas - RS, p. 1–8, 20..
- SILVA, M. **Transferência de calor em copos térmicos: um estudo de caso do copo stanley**. 2022. 39p. Tese (graduação em engenharia mecânica) — Centro universitário do sul de minas. Varginha - MG, 2019. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/275>. Acesso em: 15. nov. 2023.
- SUSSUCHI, E.; SAMÍZIA, M.; MORAIS, V. **Química I**. 1. ed. São Cristovão - SE: CESAD/UFS, 2009. v. 1.
- TEIXEIRA, M.; RODRIGUES, F. Princípio do laser. **laser português, 25 anos depois**, Sacavém, p. 1–7, 20..