

**PATRICK MATHAUS MOREIRA LACERDA**

**SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA  
TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA APLICADA A  
MATERIAIS COMPÓSITOS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2022

**PATRICK MATHAUS MOREIRA LACERDA**

**SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA  
TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA APLICADA A  
MATERIAIS COMPÓSITOS**

**Projeto de Fim de Curso** apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Fernandes Coelho

**Uberlândia – MG**

**2022**

**PATRICK MATHAUS MOREIRA LACERDA**

**SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA  
TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA APLICADA A  
MATERIAIS COMPÓSITOS**

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Henrique Fernandes Coelho - Orientador

Universidade Federal de Uberlândia

---

Jefferson Gomes do Nascimento

Universidade Federal de Uberlândia

**Uberlândia – MG**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar a oportunidade de concluir o curso de Engenharia Mecânica com méritos e também a todos os professores e colegas de faculdade que possibilitaram meu aprendizado.

Em segundo lugar, à minha mãe que sempre me apoiou em tudo o que foi preciso e mais um pouco. Obrigado também aos meus irmãos Pierry e Rogerio Gregorio, que sempre fazem minha alegria e são meus companheiros pra vida toda.

Também agradeço ao companheirismo dos meus irmãos da Irmandade, amigos que fiz durante a escola e levo para sempre em meu coração. Igualmente, aos Moreiras, meus primos que sempre fizeram eu largar qualquer coisa aqui para ir pra Patos.

E por fim, concluo esse curso em memória de meu pai Rogerio que iria ficar muito orgulhoso do filho e homem que me tornei.

## RESUMO

Os compósitos são materiais de extrema importância na indústria moderna, pois garantem propriedades que outros materiais atuando sozinhos não conseguiriam, já que eles unem a dureza e resistência com uma massa específica reduzida.

Dada sua importância, o presente trabalho busca encontrar uma forma mais efetiva de se identificar inclusões e defeitos em peças produzidas em materiais compósitos. Utilizando ensaios de termografia infravermelha, em que a peça é submetida a um fluxo de calor e cada material reage de uma maneira diferente, é possível identificar padrões que indicam a presença de uma inclusão.

Com o auxílio da simulação computacional, pode-se criar um padrão de imagens que irá facilitar a identificação dessas falhas em materiais compósitos e auxiliar em um possível reparo ou troca do material.

## **ABSTRACT**

Composites are extremely important materials in the modern industry since they guarantee properties that other materials acting alone could not, as they combine hardness and strength with a reduced mass.

Given its importance, the present study seeks to find a more effective way of identifying inclusions and defects in parts produced in composite materials. Using infrared thermography tests, the part is subjected to a heat flow and each material reacts differently, and it is possible to identify patterns that indicate the presence of an inclusion.

With a computational materials simulation device, an image pattern can be created that will facilitate the use of composite defects and aid in a repair or material change.

## INDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. As três formas de transferência de calor .....	6
Figura 2. Variantes da Termografia.....	7
Figura 3. Esquematização da Termografia Modulada.....	9
Figura 4. Esquematização da Termografia Pulsada.....	10
Figura 5. Esquematização da Vibrotermografia .....	11
Figura 6. Esquematização do LST.....	11
Figura 7. Malha de Elementos Finitos.....	13
Figura 8. Exemplo da distribuição das inclusões na placa .....	14
Figura 9. Peça do tipo 1 com inclusões nas profundidades 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 mm.....	14
Figura 10. Peça do tipo 2 com inclusões nas profundidades 1,0; 1,2; 1,4 e 1,6 mm.....	15
Figura 11. Função Retângulo que define o pulso de tempo que o fluxo de calor atua nas peças .....	16
Figura 12. Malha que será estudada obtida no software.....	16
Figura 13. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 1 com lado 4,0 mm.....	18
Figura 14. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 2 com lado 4,0 mm.....	19
Figura 15. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 1 com lado 2,0 mm.....	20
Figura 16. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 1 com lado 2,0 mm.....	21
Figura 17. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 1 com lado 1,0 mm.....	22
Figura 18. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 2 com lado 1,0 mm.....	22
Figura 19. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 1 com lado 0,5 mm.....	23
Figura 20. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 2 com lado 0,5 mm.....	23

# SUMÁRIO

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. MATERIAIS COMPÓSITOS .....</b>	<b>2</b>
2.1. <i>HISTÓRIA DOS MATERIAIS COMPÓSITOS.....</i>	<i>2</i>
2.1. <i>MATRIZ E REFORÇO .....</i>	<i>3</i>
<b>3. TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA.....</b>	<b>4</b>
3.1. <i>HISTÓRIA DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA.....</i>	<i>4</i>
3.2. <i>TRANSFERÊNCIA DE CALOR E EQUAÇÃO DO CALOR.....</i>	<i>5</i>
3.2. <i>VARIANTES DA TERMOGRAFIA.....</i>	<i>7</i>
3.3. <i>TÉCNICAS DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA.....</i>	<i>8</i>
<b>4. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....</b>	<b>12</b>
4.1. <i>CONCEITOS INICIAIS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....</i>	<i>12</i>
4.2. <i>MEF APLICADO A PROBLEMAS DA TERMOGRAFIA.....</i>	<i>13</i>
4.3. <i>DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO .....</i>	<i>15</i>
<b>6. RESULTADOS.....</b>	<b>18</b>
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>24</b>
<b>8. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>25</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos se tornaram essenciais na indústria aeronáutica devido à busca por materiais que fossem mais leves, mas que continuassem com as propriedades estruturais de metais, substituindo-os (Materiais Junior, 2020). Eles são compostos por duas fases, uma ou mais descontínuas, que servem como reforço, e uma contínua, a matriz. A partir disso, trabalha-se as proporções entre essas duas fases, de acordo com as propriedades que se deseja alcançar.

A termografia infravermelha é um tipo de ensaio não destrutivo e não invasivo utilizado para a inspeção de discontinuidades em vários tipos de materiais, incluindo os compósitos. É uma técnica realizada com sistemas infravermelhos para a medição de temperaturas ou padrões de distribuição de calor, conferindo informações importantes à condição do material.

A termografia permite uma inspeção rápida e de fácil aplicação, permitindo uma grande versatilidade de aplicações, inclusive em peças de difícil acesso ou em que só um lado está ao alcance. E a partir da análise dos resultados obtidos na termografia infravermelha é possível identificar falhas na estrutura do material compósito e conseqüentemente tomar a decisão de consertar ou substituir a peça para um melhor funcionamento do sistema.

Contudo, a análise da termografia não é um processo simples e muitas vezes é demorado pois os sinais obtidos são bem sutis e precisam passar por uma série de processamentos de dados. Isso faz com que se busquem métodos de monitoramento que utilizam da inteligência artificial para poder interpretar de forma correta vários fenômenos e detectar possíveis falhas no material.

O objetivo desse trabalho é então propor a utilização da termografia infravermelha associada a uma análise computacional que identifica a existência de falhas em materiais compósitos através de softwares de simulação e criar um banco de imagens para que possa ser analisado futuramente por inteligência artificial e aprendizagem profunda.

## 2. MATERIAIS COMPÓSITOS

Com os constantes avanços tecnológicos, é preciso encontrar os melhores materiais e com o melhor custo benefício para determinada utilização, tornando-o cada vez mais especializados em aplicações específicas. Os materiais compósitos são um exemplo claro dessa evolução, em que se busca as mesmas propriedades do metal como dureza e resistência mecânica, mas com características que não são típicas dos metais, como uma baixa massa específica.

Os compósitos são materiais que possuem duas ou mais fases, caracterizando uma mistura não solúvel dessas fases, que possuem diferentes propriedades, composições e estruturas que são combinadas a fim de se obter o resultado desejado para determinada aplicação. O uso dos compósitos em grande escala começou na área aeroespacial, nas peças e fuselagem das aeronaves, mas hoje em dia é utilizada em diversas outras áreas, como construção civil, em argamassas e concreto armado, e também no automobilismo, em partes do motor e em componentes elétricos e eletrônicos.

### 2.1. HISTÓRIA DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

O uso dos materiais compósitos remete à antiguidade, no Egito Antigo se utilizava de uma mistura de palha e barro, que produzia os tijolos de adobe utilizado em diversas construções. E também o concreto, que tem sua origem com Vitruvius na arquitetura romana, que diferenciava tipos de agregados próprios para cada utilização.

Foi nos anos 40, com a Segunda Guerra Mundial, em que era preciso a utilização de materiais cada vez mais resistente e mais leves, principalmente na aviação onde o uso de elementos de elevada massa é indesejado. Além disso, a indústria dos polímeros começa a ganhar força na mesma época, e seus laboratórios buscam cada vez mais aumentar as propriedades mecânicas dos plásticos.

Desde então, o uso desse tipo de material é amplamente difundido em toda área da indústria, como em carros, motos e bicicletas. Capacetes e coletes à prova de balas utilizam do kevlar para proteção individual e também diversos esportes utilizam das fibras de carbono para diminuir a massa de seus instrumentos, como as varas de atletismo, pranchas de surf, raquetes de tênis, entre outros.

## 2.1. MATRIZ E REFORÇO

As duas fases presentes são divididas em uma ou mais fases descontínuas que são misturadas à uma fase contínua, a matriz. Essa por sua vez, garante ao material compósito a coesão entre a fase descontínua, e além disso é responsável pela proteção e distribuição do carregamento das fibras.

As propriedades mais visadas para uma matriz são a resistência mecânica e ductilidade, além da melhora nas propriedades térmicas e químicas. Por isso os materiais mais utilizados são os polímeros (termofixos ou termoplásticos), metais, entre outros.

Já a outra fase presente nos materiais compósitos são os reforços, que como o nome diz, são usados para garantir a estrutura do material um reforço, ou seja, deixa-la mais resistente. Os reforços podem ser encontrados de duas formas, em fibras contínuas ou descontínuas, dependendo da escolha das propriedades desejadas.

As fibras mais utilizadas como reforços hoje em dia são a de vidro, a de carbono e a de aramida (Kevlar), todas elas têm suas determinadas características e seu uso é variável, porém sempre melhorando a resistência mecânica do compósito.

### 3. TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A termografia infravermelha é uma técnica não destrutiva, não invasiva e sem contato que permite mapear os padrões térmicos da superfície dos objetos. É uma inspeção rápida, de fácil aplicação e segura que é utilizada em peças de difícil alcance e outras várias aplicações. (FERNANDES, 2015).

A termografia não tem seu uso restringido a nenhum objeto, pois todos os corpos a uma temperatura maior que o zero absoluto emitem radiação, que é absorvido ou emitido por tudo a seu redor.

O uso da termografia infravermelha é difundido em diversas áreas para diagnósticos e monitoramento, seja de componentes elétricos, construções, na medicina, veterinária e na odontologia. Também é claro, está presente na detecção de descontinuidades em materiais compósitos, como corrosões, trincas e danos em geral, além de suas propriedades térmicas e da orientação de suas fibras.

#### 3.1. HISTÓRIA DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A radiação infravermelha tem sua descoberta no século XIX com o físico e astrônomo alemão Willian Herschel (1738 - 1832) que fazia experimentos com a luz solar. Em um desses experimentos, o físico fez com que a luz solar atravessasse um prisma que emitisse as cores do espectro visível.

Com isso, ele pôde medir a temperatura de cada uma dessas cores com um termômetro de mercúrio e descobriu que a temperatura aumentava do azul ao vermelho e aumentava ainda mais ao sair da luz vermelha, em uma área que ele denominou “calor escuro”. Essa região do espectro eletromagnético ficou conhecida desde então como calor infravermelho.

Mais tarde, em 1880, o também físico e astrônomo Samuel Langley (1834 – 1906) inventou um aparelho precursor do termovisor, o bolômetro, que podia medir pequenas diferenças de temperatura por meio da resistência elétrica de um metal e sua variação de temperatura.

Mas foi entre 1916 e 1918, que o físico americano Theodore Case (1888 – 1944) inventou os primeiros termovisores, conhecidos primeiramente como detectores de fotocondução. Seu funcionamento se baseava na interação direta entre fótons da radiação

infravermelha e elétrons do material do aparelho, com isso ele conseguia produzir um sinal mais rápido e mais sensível.

Com a Segunda Guerra Mundial, a tecnologia infravermelha foi voltada a usos militares, com um sistema de visão noturna utilizado pelos alemães e uma câmera infravermelha (FLIR), utilizada pelo exército americano para localização de inimigos. Foi a partir da década de 60 que começaram os usos extramilitares dessa tecnologia, porém era bem limitado e um processo demorado.

No início da década de 80, a geração de imagens térmicas já era amplamente utilizada para fins medicinais, indústria e na inspeção de construção civil. Com os anos, esse sistema foi evoluindo cada vez mais, os resfriadores foram aperfeiçoados, a imagem foi ficando mais nítida e o preço também foi abaixando cada vez mais.

Além de tudo isso, o uso de softwares de computadores e o processamento de imagens ajudaram para que os modernos sistemas de infravermelho sejam capazes de realizar análises e relatórios em tempo real e compartilha-los da maneira desejada.

### 3.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR E EQUAÇÃO DO CALOR

Sabe-se que a maioria dos materiais estão sujeitos a transmissão (passagem da energia através do material), absorção (captação dessa energia) e emissão (descarga da energia) de radiação a todo momento. A termografia infravermelha é capaz justamente de medir tais comportamentos e observar então, a diferença de temperatura no tempo por toda a peça.

Portanto é necessário analisar o comportamento do calor em determinado material e para isso utiliza-se a transferência de calor, que estuda o comportamento de um sistema em determinado tempo até uma temperatura de equilíbrio. Podendo assim verificar a distribuição de temperatura e a taxa de transferência de calor sabendo as condições iniciais, baseados nos moldes básicos de transferência: condução, convecção e radiação.



Figura 1. As três formas de transferência de calor

Retirado: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-conveccao-transferencia-de-calor-por-conveccao-definicao/>

A radiação é a única forma de transferência pelo vácuo, e é a energia transportada pelas ondas eletromagnéticas. Essa energia, ao encontrar com a superfície de um material pode ser refletida, absorvida e transmitida, resultando na relação entre absorção ( $\alpha$ ), transmissão ( $\tau$ ) e reflexão ( $\rho$ ):

$$\alpha + \tau + \rho = 1$$

Já a convecção é a forma de transferência de calor interna de líquidos e gases através do movimento interno dos mesmos. Ela ocorre pela densidade do meio, que é menor quando este está mais aquecido e maior em uma temperatura mais baixa, fazendo assim essa movimentação que permite que o meio se equilibre com o tempo (Nick Connor, 2020).

Por fim, a condução ocorre internamente dentro de um material ou entre dois materiais que estão em contato direto. Para uma transferência em um plano, a taxa de transferência é proporcional ao gradiente de temperatura e a área da seção.

Em um exemplo real, na condução em três dimensões, a taxa de transferência de calor é também proporcional ao gradiente de temperatura e é dada pela equação:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Para os experimentos de termografia infravermelha, os únicos efeitos que serão analisados são os da condutividade.

### 3.2. VARIANTES DA TERMOGRAFIA

Com a popularidade crescente da termografia infravermelha, melhorias foram sendo desenvolvidas e várias técnicas e fatores podem ser mudados conforme a aplicação desejada. Para cada situação, são diferentes configurações que podem ser alteradas para que o resultado obtido seja o melhor possível.

A Figura 2 mostra os aspectos que podem ser variados e abaixo segue uma explicação para cada um deles.

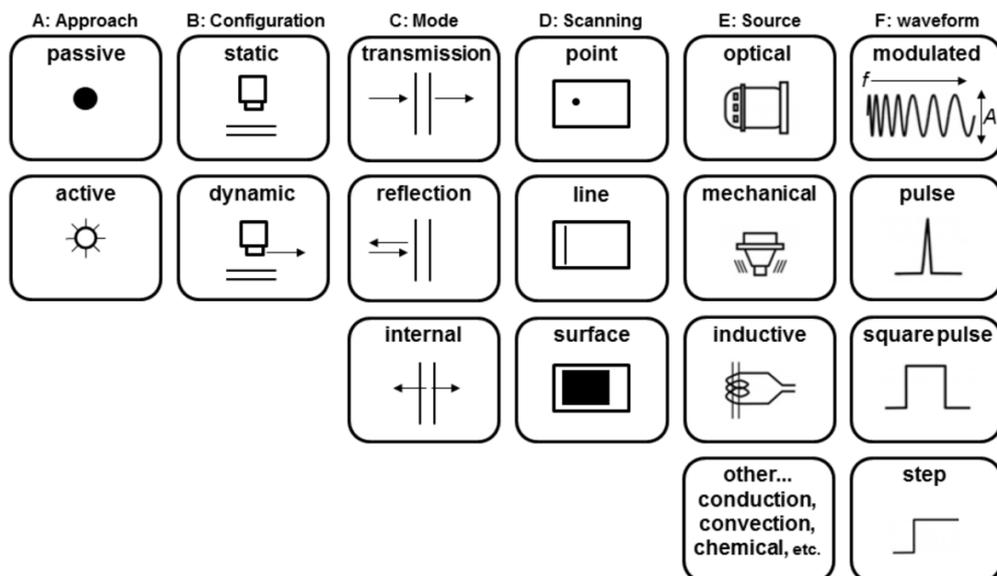


Figura 2. Variantes da Termografia

Retirado: [https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/13136/1/2015fernandes\\_JONE.pdf](https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/13136/1/2015fernandes_JONE.pdf)

**Abordagem:** está relacionado com o contraste térmico entre o objeto e o fundo; se o contraste é evidente, a abordagem é passiva. Caso contrário, a abordagem se torna ativa e é preciso aquecer o objeto para que se alcance um contraste necessário.

**Configuração da câmera:** essa variante indica se a câmera está se movendo (dinâmica) ou não (estática) em relação ao objeto. A configuração dinâmica é a mais utilizada já que abrange todas as formas de objetos e não só aqueles em que é possível realizar a inspeção de um só ponto.

**Modo:** se relaciona em como a energia é transferida para o objeto. Pode ser por transmissão, em que a câmera é posicionada do lado oposto à fonte térmica, ou por reflexão, em que a câmera é posicionada junto à fonte térmica, ou até mesmo interno, em que se realiza um aquecimento interno do objeto.

**Escaneamento:** está relacionada a qual lugar da superfície do objeto é aquecida. Pode ser realizada de forma pontual, linear e também de forma superficial, em que a superfície é inteiramente estimulada.

**Fonte:** como o nome diz, está ligada a forma como o objeto é estimulado, sua fonte de aquecimento. Podem ser ópticos, como em lâmpadas de halogênio; podem ser físicos, como a excitação de uma onda ultrassônica; e também podem ser indutivos, como em correntes elétricas.

**Formas de Ondas:** por fim podem ser utilizadas diferentes formas de ondas para se analisar o sinal obtido, podem ser do tipo pulsada, degrau ou modulada.

### 3.3. TÉCNICAS DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A partir dos vários parâmetros que podem ser alterados de acordo com cada necessidade de análise de um material em determinada situação, algumas técnicas se tornaram mais utilizadas e possuem um manual a se seguir. Algumas dessas técnicas serão explicadas abaixo.

*Lock-in Thermography (LT):* é conhecida também como termografia modulada, pois utiliza feixes de luz de intensidade modulada a fim de injetar ondas térmicas no objeto. É uma técnica derivada da radiometria fototérmica, que em 1861, auxiliou o físico sueco Anders Ångström (1814 – 1974) na medição da difusividade térmica de uma barra sólida aquecida periodicamente, ou seja, com temperatura modulada, e identificou um gradiente de temperatura no interior da barra e denominou-o fonte de calor.

Na termografia modulada, o princípio é basicamente o mesmo da radiometria. A superfície em análise é periodicamente iluminada com um feixe de luz de intensidade modulada e a resposta térmica da superfície é gravada por uma câmera IR (Infravermelha) e é decomposta por um amplificador lock-in que irá extrair a amplitude e a fase de modulação da superfície.

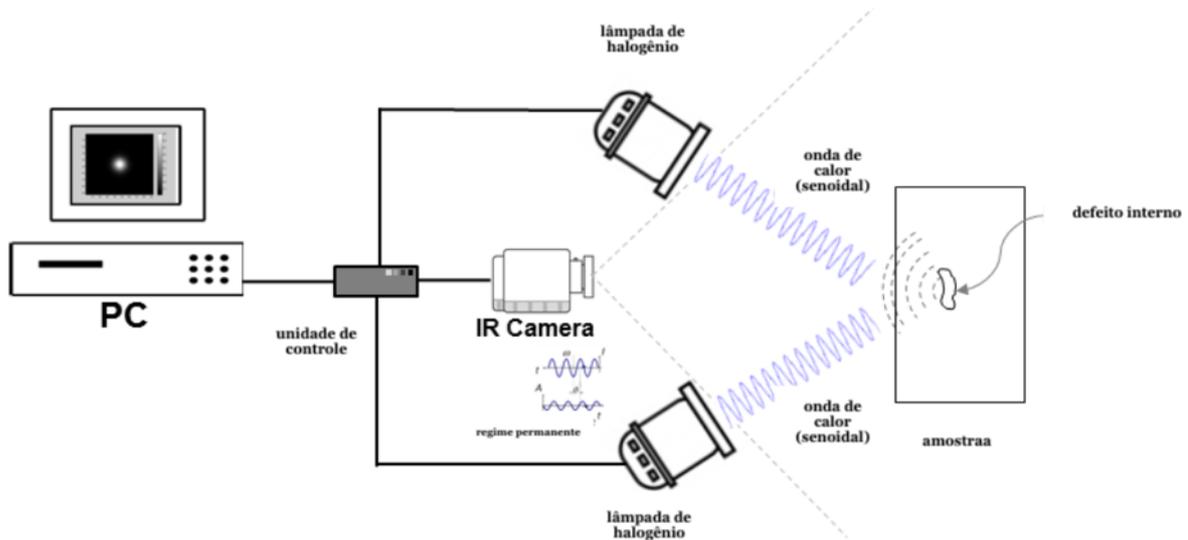


Figura 3. Esquemática da Termografia Modulada

FERNANDES, Henrique. *Fiber orientation analysis of carbon fiber-reinforced polymers by infrared thermography*

Na Figura 3, é apresentado um esquema de montagem da termografia modulada, em que a fonte de calor utilizada são lâmpadas de halogênio, que envia ondas térmicas periódicas na forma senoidal. É importante ressaltar que o aquecimento deve ser mantido até que se atinja um estado de regime permanente, para que as respostas adquiridas sejam ideais.

Devido à forma como os resultados são obtidos, necessitando previamente de um tempo de estabilização antes de atingir o regime permanente, a termografia modulada não é uma técnica tão rápida quanto as outras. Porém, a energia utilizada nesse processo é, geralmente, menor que nos outros que serão descritos.

*Pulsed Thermography* (PT): a termografia pulsada utiliza um pulso de calor ligado a uma fonte de alta potência. É uma técnica que pode utilizar, como pulso de calor, combinações de ondas periódicas em diferentes amplitudes e diferentes frequências.

Os defeitos de uma peça são descobertos a partir da forma como o equilíbrio da temperatura na peça irá ocorrer, isto é, em uma peça defeituosa, a temperatura irá se equilibrar de forma variada pela peça, em diferentes períodos de tempos. Caso contrário, e a peça não apresente defeitos, a temperatura da superfície irá decair uniformemente.

Essa diferença acontece, pois, as discontinuidades podem ser resistências ao fluxo de calor, e são detectadas por uma câmera IR.

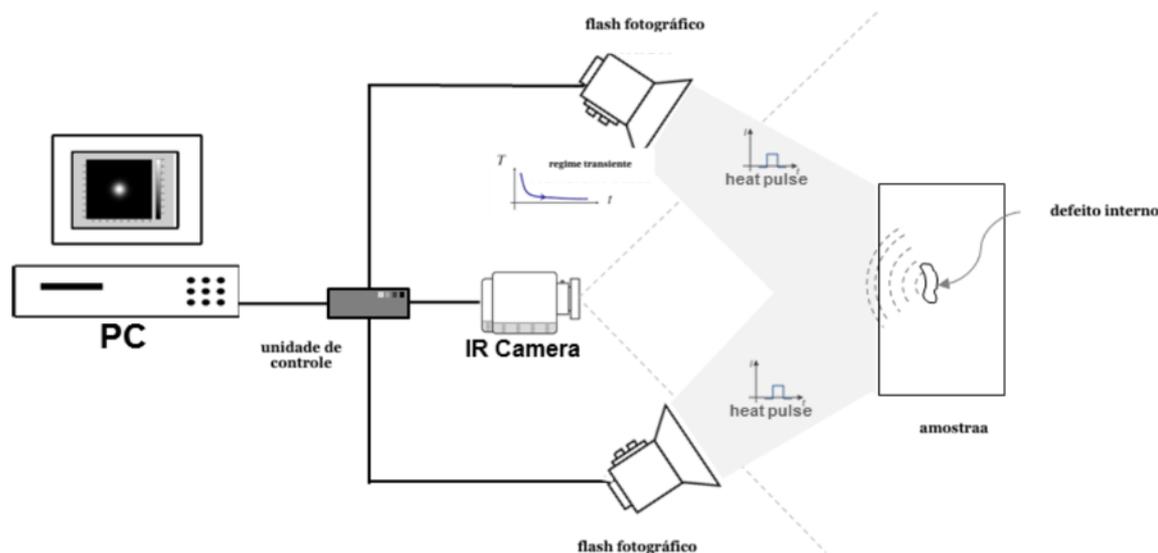


Figura 4. Esquematização da Termografia Pulsada

FERNANDES, Henrique. *Fiber orientation analysis of carbon fiber-reinforced polymers by infrared thermography*

A Figura 4 apresenta um esquema da montagem da termografia pulsada, que utiliza flashes fotográficos como fonte de calor, ligados a uma unidade de controle que faz a sincronização e controle.

Como pôde ser observado, essa técnica é mais simples e rápida que a termografia modulada, porém os dados obtidos são de difícil tratamento e análise, necessitando assim, de várias técnicas de pré processamento.

*Vibrothermography* (VT): a vibrotermografia, conhecida também como termografia de ultrassom, utiliza ondas mecânicas que estimulam o objeto internamente, sem utilizar aquecimento.

Nessa técnica, os defeitos são identificados por produzirem absorção, redução e dispersão das ondas mecânicas, e tais fenômenos se manifestam em forma de calor, sendo detectados por uma câmera IR.

As ondas ultrassônicas são produzidas por um transdutor que atua como um martelo, que é firmemente fixado a uma parte do objeto para evitar efeitos indesejados. Após as ondas adentrarem o objeto, a energia gerada libera calor ao encontrar falhas internas, e esse calor é conduzido até a superfície do material, onde é detectado pela câmera.

A vibrotermografia é um processo ainda mais rápido que a pulsada, porém não é uma técnica que abrange toda forma de material, sendo mais recomendado para pequenos objetos. Isso acontece pois é uma técnica que depende muito da potência do transdutor, que pode

inclusive, danificar a peça e também da forma como é fixado o objeto em análise, o que limita bastante o seu uso.

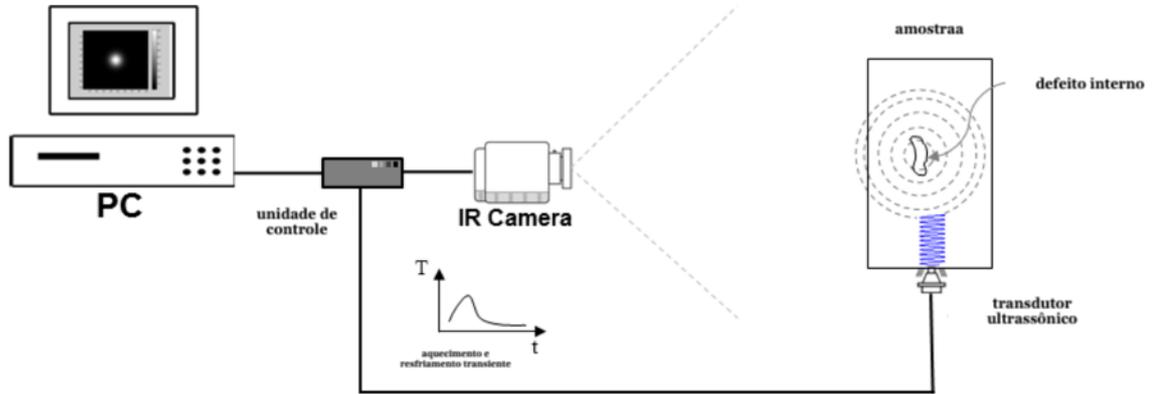


Figura 5. Esquemática da Vibrotermografia

FERNANDES, Henrique. *Fiber orientation analysis of carbon fiber-reinforced polymers by infrared thermography*

*Line Scan Thermography* (LST): é uma técnica dinâmica, em que a câmera ou o objeto estão em movimento, em que o material é aquecido linearmente e a câmera IR obtém uma série de termogramas. Em ambos os casos, a câmera ou o objeto estão em movimento, a linha é precisamente analisada, controlando apenas a velocidade da fonte de calor e a coleta de dados.

A aquisição permite obter a variação no tempo e não no espaço, seguindo cada ponto da linha do objeto, fazendo isso linha por linha. Por esse motivo, essa técnica é muito demorada, podendo levar até dois dias para se obter o resultado desejado.

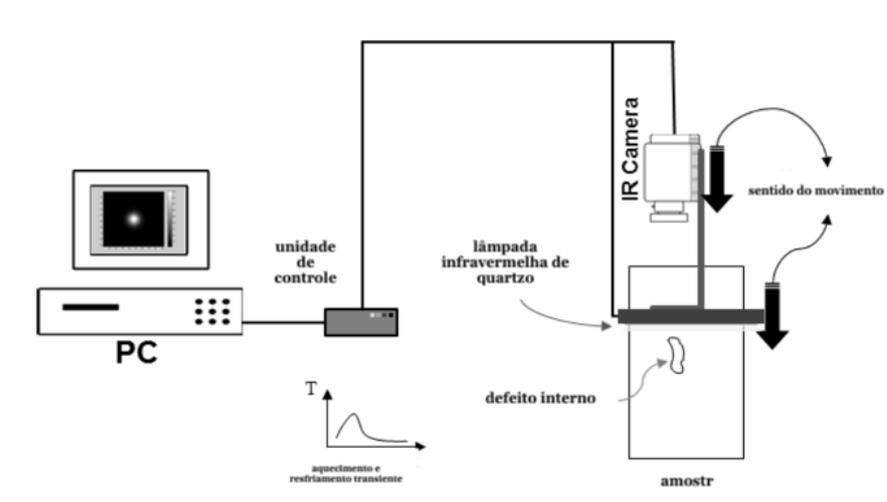


Figura 6. Esquemática do LST

FERNANDES, Henrique. *Fiber orientation analysis of carbon fiber-reinforced polymers by infrared thermography*

## 4. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Existe uma necessidade, visível para qualquer um, do uso de diversos tipos de materiais em diversos contextos interagindo entre si, assim como nos compósitos. Assim é preciso antecipar o comportamento desses materiais e em cada condição que ele irá se submeter.

Assim surge o Método dos Elementos Finitos (MEF), que é utilizado para realizar simulações e previsões, analisando assim, se um objeto se comporta como o esperado e se foi bem dimensionado. Sua aplicação em softwares de simulação poupa horas de trabalho manual e até recursos financeiros, deixando projetos mais viáveis (SOARES MAIA, 2018).

Ao simular um objeto e todo seu comportamento diante da complexidade da realidade, inúmeros fatores podem interferir em sua ação. Faz-se então necessário a discretização do contínuo, ou seja, enxergar um objeto complexo em pequenas partes, os elementos finitos.

Assim então, é possível analisar diversos fenômenos físicos, que são descritos através de equações diferenciais parciais, com determinadas condições de contorno e talvez com condições iniciais, se o problema varia no tempo. Portanto, o Método dos Elementos Finitos é bastante genérico e pode ser aplicado em inúmeros problemas da engenharia.

### 4.1. CONCEITOS INICIAIS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A ideia básica do MEF consiste em tornar o problema contínuo em uma série de problemas mais simples, dividindo-o em sub-regiões de geometria mais simples, como triângulos, retângulos ou outros.

Dado um contorno de uma superfície, ele é dividido em várias partes menores, os elementos finitos, que são conectados entre si por nós, ou os pontos nodais. O conjunto de elementos finitos e pontos nodais se dá o nome de malha, conforme pode ser visto na figura 7.

A precisão do MEF diz respeito a forma como os elementos e os nós estão presentes na malha, quanto menor for e quanto mais tiverem, mais precisos serão os resultados da análise, porém o cálculo envolvido será proporcionalmente maior.

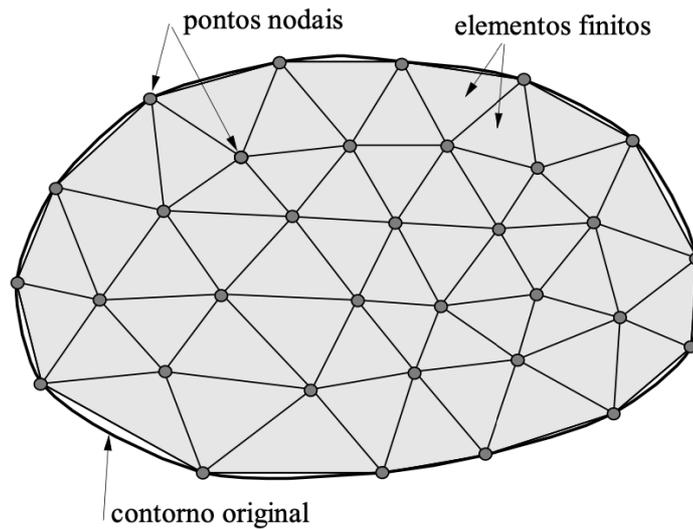


Figura 7. Malha de Elementos Finitos

Retirado: [https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/4341/2/SamuelVSM\\_ART.pdf](https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/4341/2/SamuelVSM_ART.pdf)

Outro conceito que deve ser levado em conta são os graus de liberdade de cada elemento. Ele tem origem em problemas da Mecânica, em que um ponto tem necessariamente 3 graus de liberdade de translação e um sólido possui 6 graus de liberdade, 3 de translação e 3 de rotação.

Portanto o comportamento de cada elemento na malha se dá pelo seu posicionamento, seu número de nós e pelo número de graus de liberdade que este possui.

#### 4.2. MEF APLICADO A PROBLEMAS DA TERMOGRAFIA

O método dos elementos finitos pode então substituir um experimento por um modelo computacional que irá simular o comportamento da dissipação de calor no material, assim como seria em uma experiência de termografia infravermelha real.

Como visto anteriormente o fenômeno da dissipação nos sólidos pode ser representado pela equação diferencial do calor, que descreve a variação de temperatura numa região específica em determinado tempo.

$$k_2 \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + k_1 \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} + k_1 \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} - \rho C_p \frac{\partial T_s}{\partial t} = Q$$

Para resolver tal equação é preciso utilizar o método dos elementos finitos, pois analiticamente seria muito trabalhoso. O software utilizado para essa tarefa foi o COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>.

O modelo utilizado para análise foram 8 peças construídas em um software de desenho CAD, o Autodesk Fusion 360<sup>®</sup>. As peças em questão têm uma construção bem simples e foram desenhadas em 10 camadas de mesma espessura com as inclusões distribuídas igualmente pela placa como mostra a Figura 8 e o que as diferencia são o tamanho das inclusões e a sua profundidade na placa. Todas as placas são no formato retangular de 15,0 mm de altura e 30,0 mm de comprimento, com espessura total de 2,0 mm.



Figura 8. Exemplo da distribuição das inclusões na placa

As oito placas construídas têm duas variações de profundidade e quatro variações de área das inclusões (todas possuem a mesma espessura de 0,06 mm). O primeiro tipo de placa é o que possui as inclusões mais perto da superfície com estas distribuídas pelas camadas de tal maneira que tem 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 mm de profundidade. Foram construídas 4 placas desse tipo com inclusões retangulares com lado de 0,5 mm, 1,0 mm, 2,0 mm e 4,0 mm.

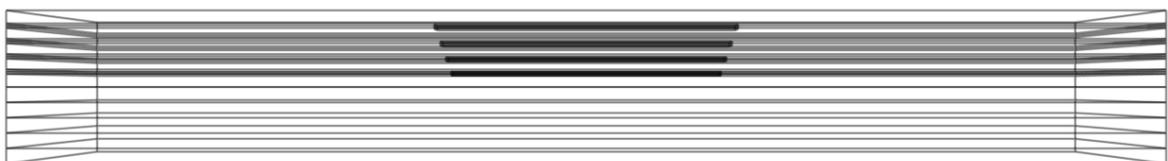


Figura 9. Peça do tipo 1 com inclusões nas profundidades 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 mm

O segundo tipo de placa é o que possui as inclusões mais longe da superfície com estas distribuídas pelas camadas de tal maneira que tem 1,0; 1,2; 1,4 e 1,6 mm de profundidade. Foram construídas 4 placas desse tipo com as mesmas inclusões retangulares com lado de 0,5 mm, 1,0 mm, 2,0 mm e 4,0 mm.

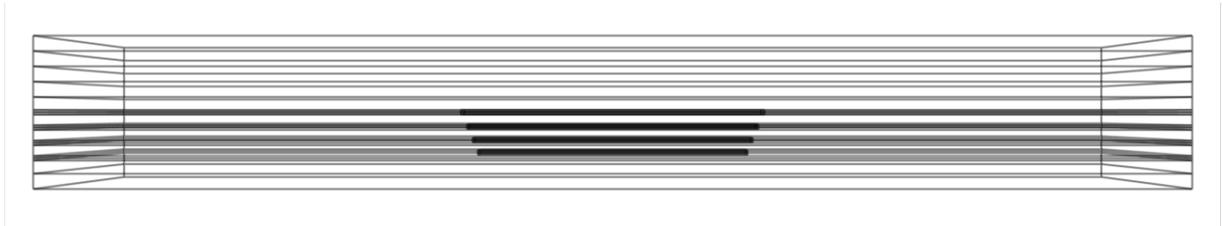


Figura 10. Peça do tipo 2 com inclusões nas profundidades 1,0; 1,2; 1,4 e 1,6 mm

Essa análise de diferentes placas facilita a identificação de vários tipos de defeitos de diversos tamanhos e profundidades em uma possível análise por inteligência artificial, criando um gigantesco banco de imagens.

#### 4.3. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

No COMSOL, as peças foram submetidas a uma análise térmica por meio da transferência de calor nos sólidos. O material de todas as inclusões da peça são fitas de poliimida, material que opera com grande resistência ao calor e resistência mecânica e à tração.

Já o material de cada camada do compósito é de fibra de carbono com epóxi com uma construção de tal maneira que o material tenha as fibras orientadas em 0/90/0/90, que torna o material dito quase isotrópico, ou seja, suas propriedades como resistência e rigidez são iguais independentes de qualquer rotação do sistema e em todas as direções.

Em seguida é definida a física envolvida no experimento para todas as placas, que no caso é a transferência de calor nos sólidos e foi estabelecida uma temperatura inicial de 273 K e a temperatura ambiente de 296,15 K.

Também foi adicionado um fluxo de calor na fronteira da peça a partir de  $t = 0,02$  s que varia de acordo com uma função retângulo, ou seja, possui um valor de 1800 W em um pulso de tempo de 5 milissegundos e 0 W quando esse pulso se findar, conforme a curva abaixo.

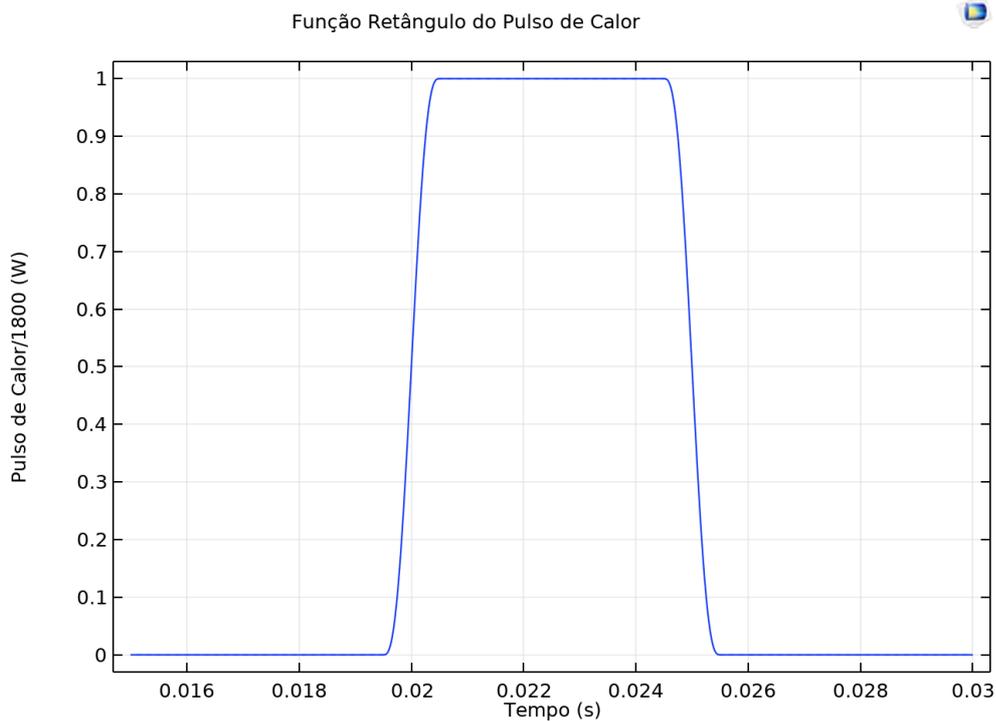


Figura 11. Função Retângulo que define o pulso de tempo que o fluxo de calor atua nas peças

Por fim, é adicionada uma radiação da superfície da peça para o ambiente, caracterizada por uma emissividade térmica de 0,9 que é definida também na fronteira.

Após finalizada a física do experimento, é definida uma malha e o estudo que será aplicado ao problema. A malha é definida pelo próprio software que ajusta uma malha com o tamanho dos elementos e o número dos elementos de acordo com solicitação feita pelo usuário.

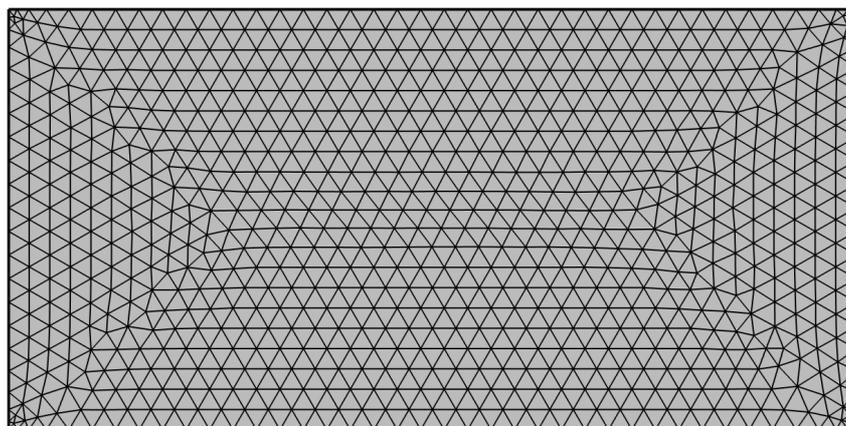


Figura 12. Malha que será estudada obtida no software

O estudo é feito com dependência do tempo até que se atinja o regime permanente, e vai de 0 a 12 segundos com um intervalo de 0,018 segundos que gera cerca de 667 imagens para cada estudo, que serão discutidas nos resultados.

## 6. RESULTADOS

Após a análise por método dos elementos finitos no software de simulação COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>, foram obtidas milhares de imagens nos mais variados tempos de exposição ao fluxo de calor nas peças e pôde-se observar uma diferença de absorção da temperatura em diferentes materiais, o compósito de fibra de carbono e as inclusões em poli imida.

Assim, em uma análise da superfície da peça em cada tempo mostra o quanto as inclusões são aparentes à medida que o tempo avança, alterando a intensidade conforme muda o tamanho e a profundidade em que as mesmas se encontram.

A primeira análise é na peça com inclusões com lado 4,0 mm e comparado as placas do tipo 1 e do tipo 2, e suas diferentes profundidades.

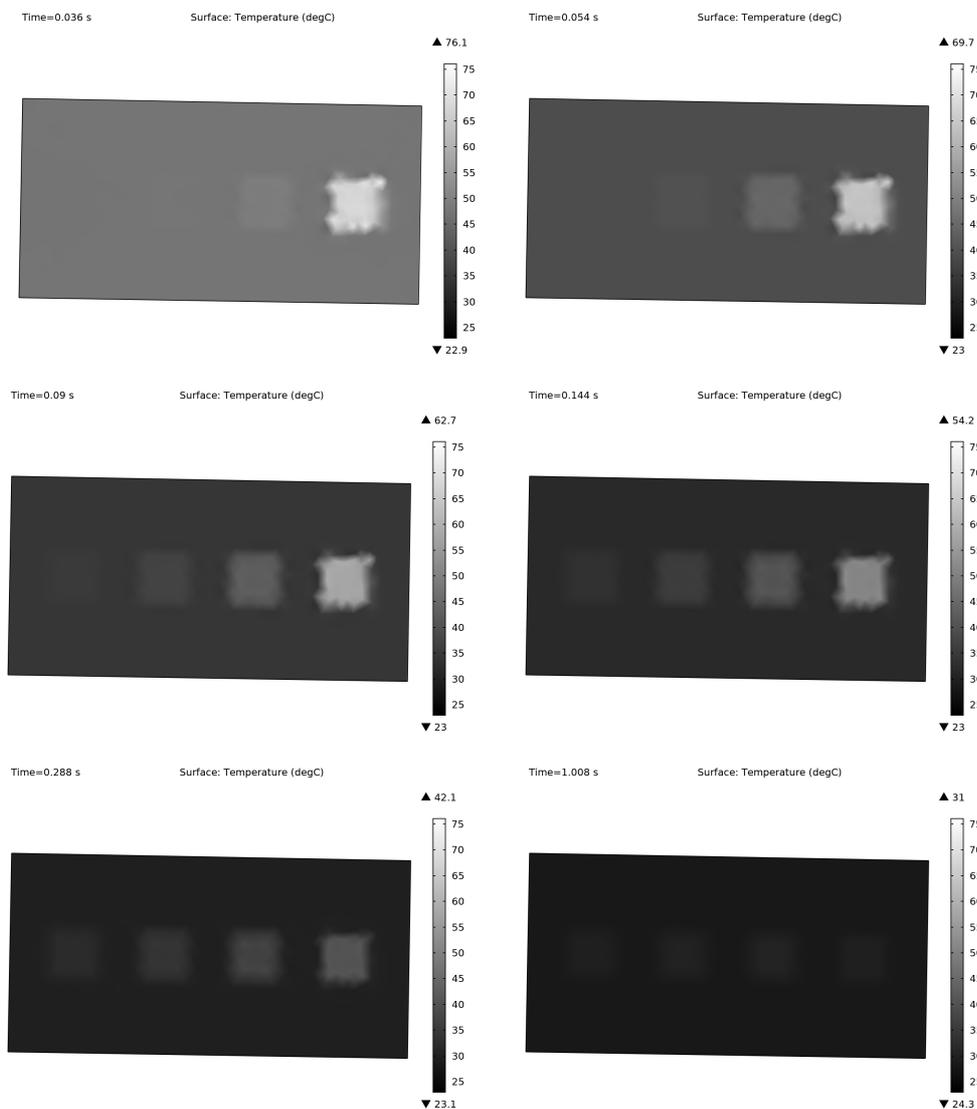


Figura 13. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 1 com lado 4,0 mm

É possível observar que logo nos primeiros segundos de experimento, as inclusões já começam a aparecer visivelmente na superfície da placa. Logicamente a mais próxima à superfície é a primeira a ser notada e com um brilho superior as demais ao longo do estudo. Com o passar do tempo as outras três inclusões também aparecem no resultado, porém um pouco menos visíveis, pois estão mais profundas na placa.

Como será observado nos próximos experimentos com placas do tipo 1, o equilíbrio de temperatura se dá logo nos primeiros milissegundos, e a partir de 1.008 s, as inclusões já não são tão facilmente identificáveis.

A segunda análise é dos mesmos tipos de inclusões, quadrangulares de lado 4,0 mm, porém agora em placas do tipo 2, que possuem inclusões nas profundidades 1,0 mm, 1,2 mm, 1,4 mm e 1,6 mm.

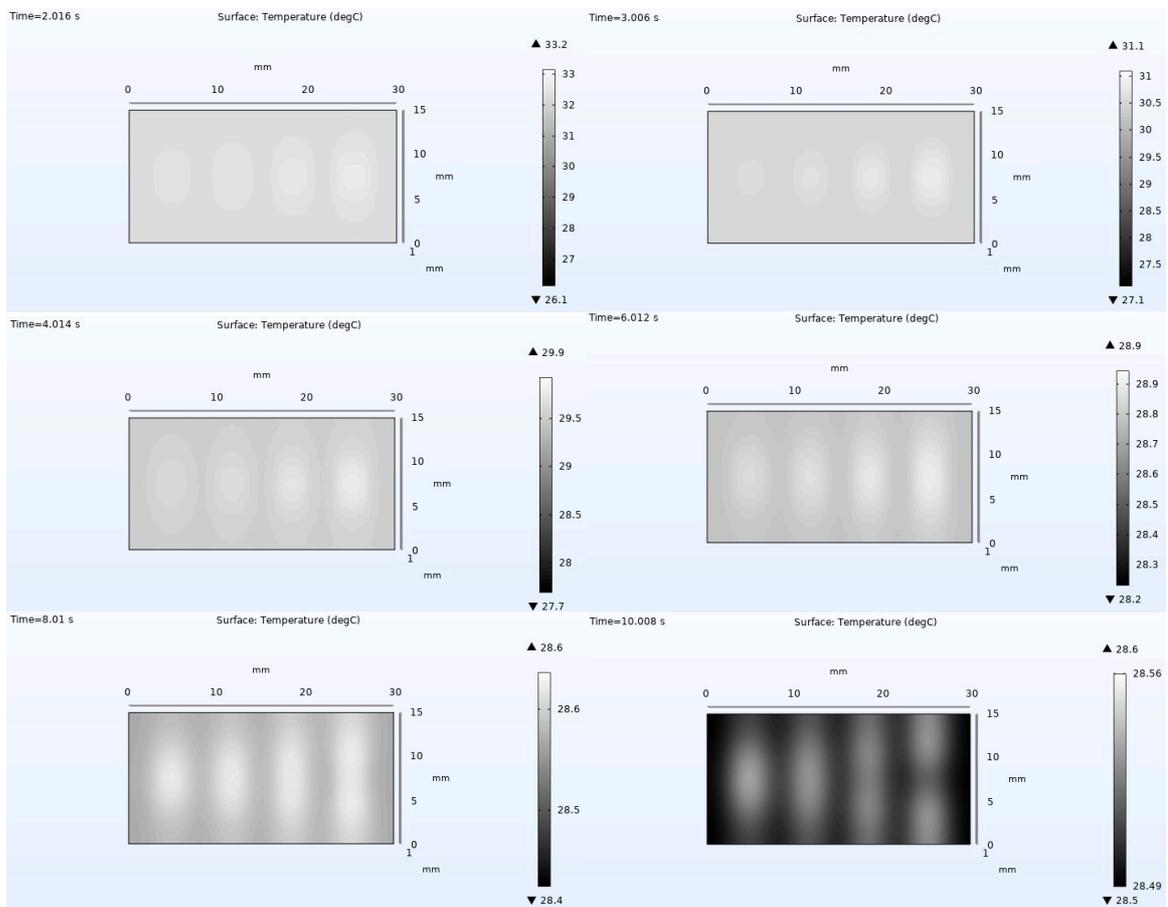


Figura 14. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 2 com lado 4,0 mm

Diferentemente das placas do tipo 1, nas placas do segundo tipo, as inclusões demoram a aparecer nos resultados. Como pôde ser visto, somente a partir de 2 segundos de experimento que começaram a surgir as primeiras marcas das inclusões, sempre com a mais rasa aparecendo primeiro e com mais brilho que as demais que estão mais profundas.

Também é possível notar que o equilíbrio entre a placa e as inclusões requer um tempo muito maior e a diferença de temperatura é bem sutil, tornando assim, inclusões desse tipo mais difícil de serem identificadas.

Agora, serão apresentadas as placas do tipo 1 e 2 com inclusões de lado 2,0 mm.

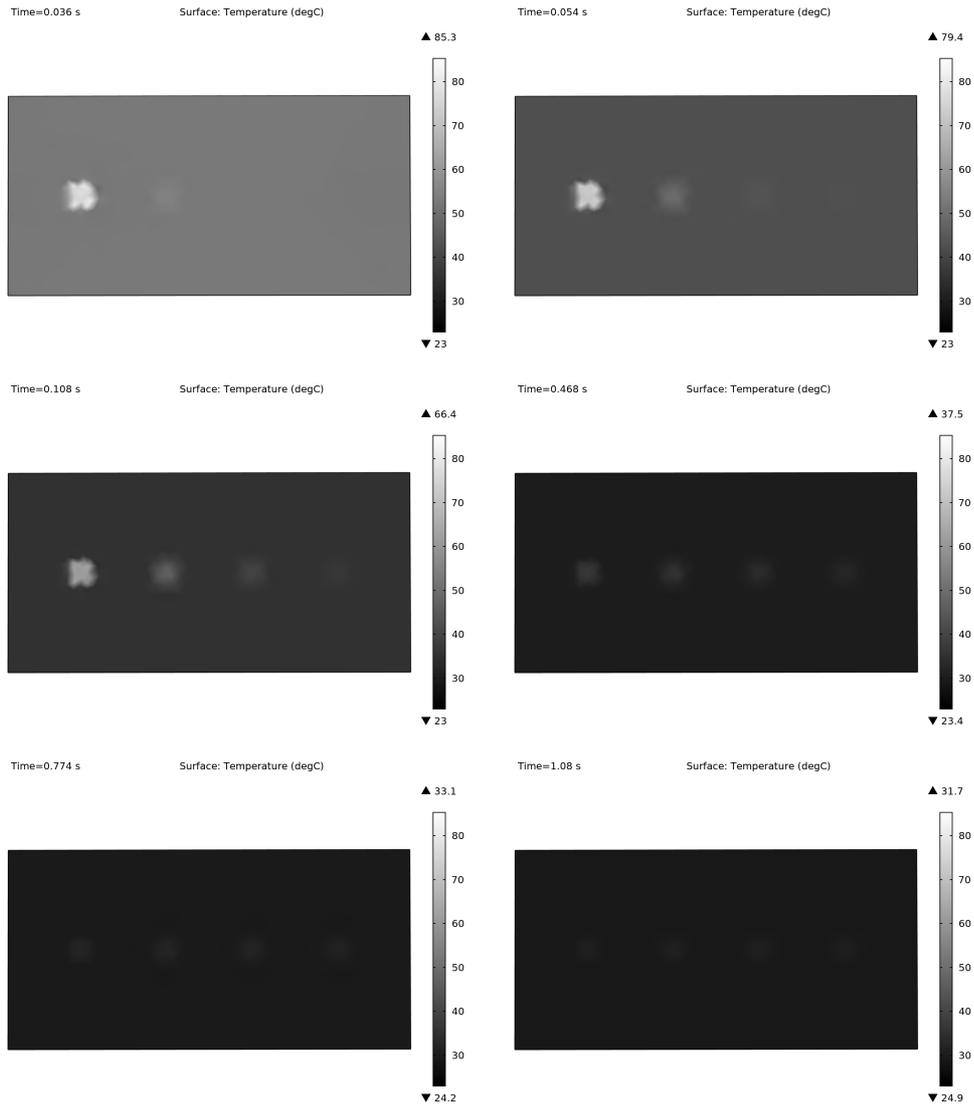


Figura 15. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 1 com lado 2,0 mm

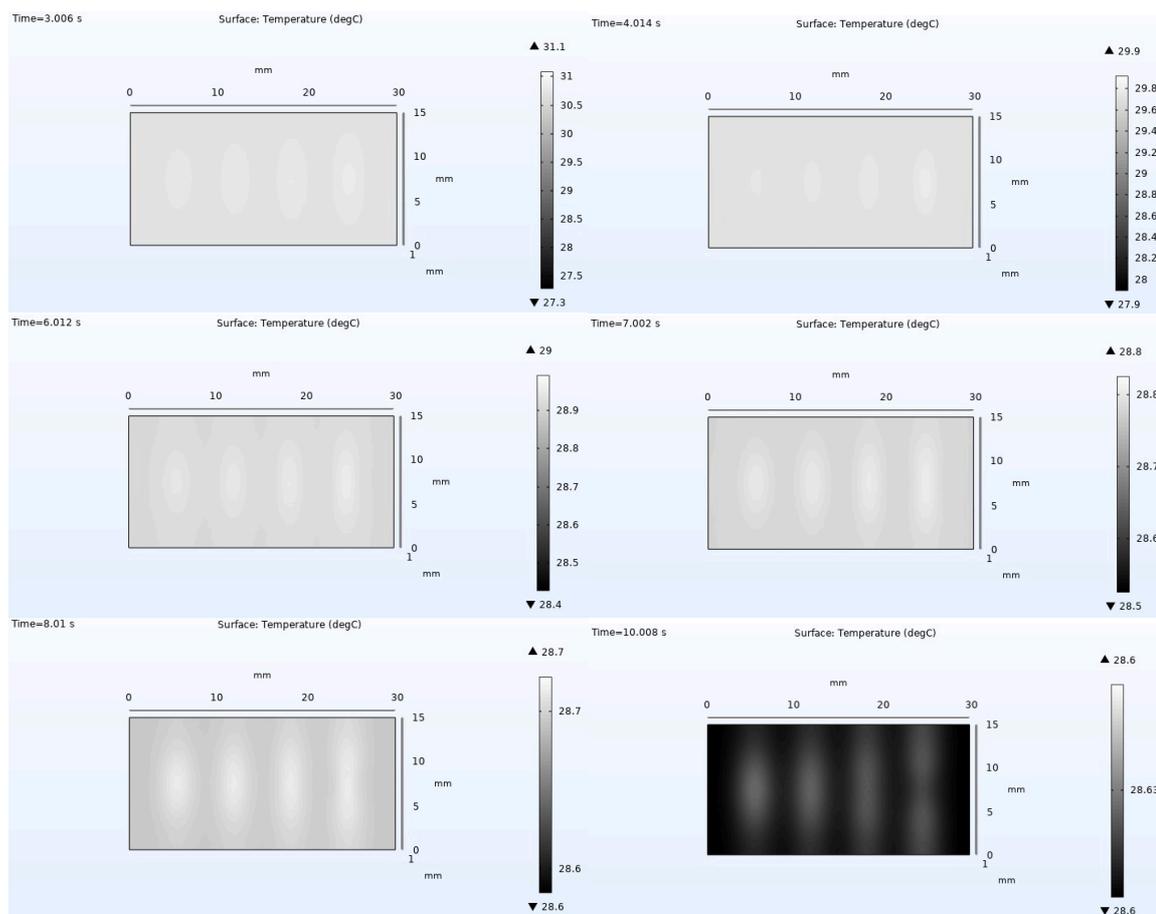


Figura 16. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 1 com lado 2,0 mm

A primeira impressão são os tamanhos das inclusões que agora tem a metade do tamanho das apresentadas anteriormente. Mas o padrão de surgimento das inclusões nas peças se mantém o mesmo, com estas surgindo nos primeiros milissegundos nas placas do tipo 1 e demorando bem mais a serem vistas nas placas do tipo 2.

Esse é um comportamento que será recorrente nas placas com inclusões menores, alterando apenas o tempo em que irão se tornar visíveis, sendo mais rápido quando estas estão mais perto da superfície e desaparecendo mais rápido proporcionalmente ao seu menor tamanho.

E atuando de forma contrária, quando as inclusões estão mais afastadas da superfície, elas atuam de maneira semelhante, demorando cada vez mais a se tornarem visíveis no estudo, à medida que seu tamanho diminui.

A seguir serão mostradas amostras de tempo de placas do tipo 1 e 2 com inclusões de lado 1,0 mm e 0,5 mm.

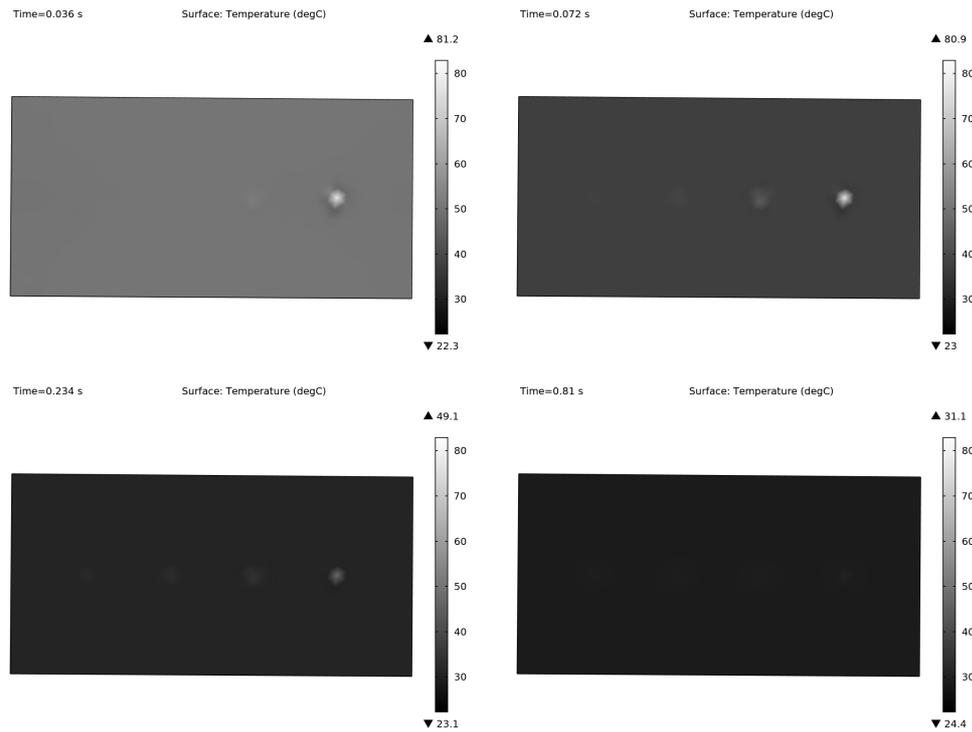


Figura 17. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 1 com lado 1,0 mm

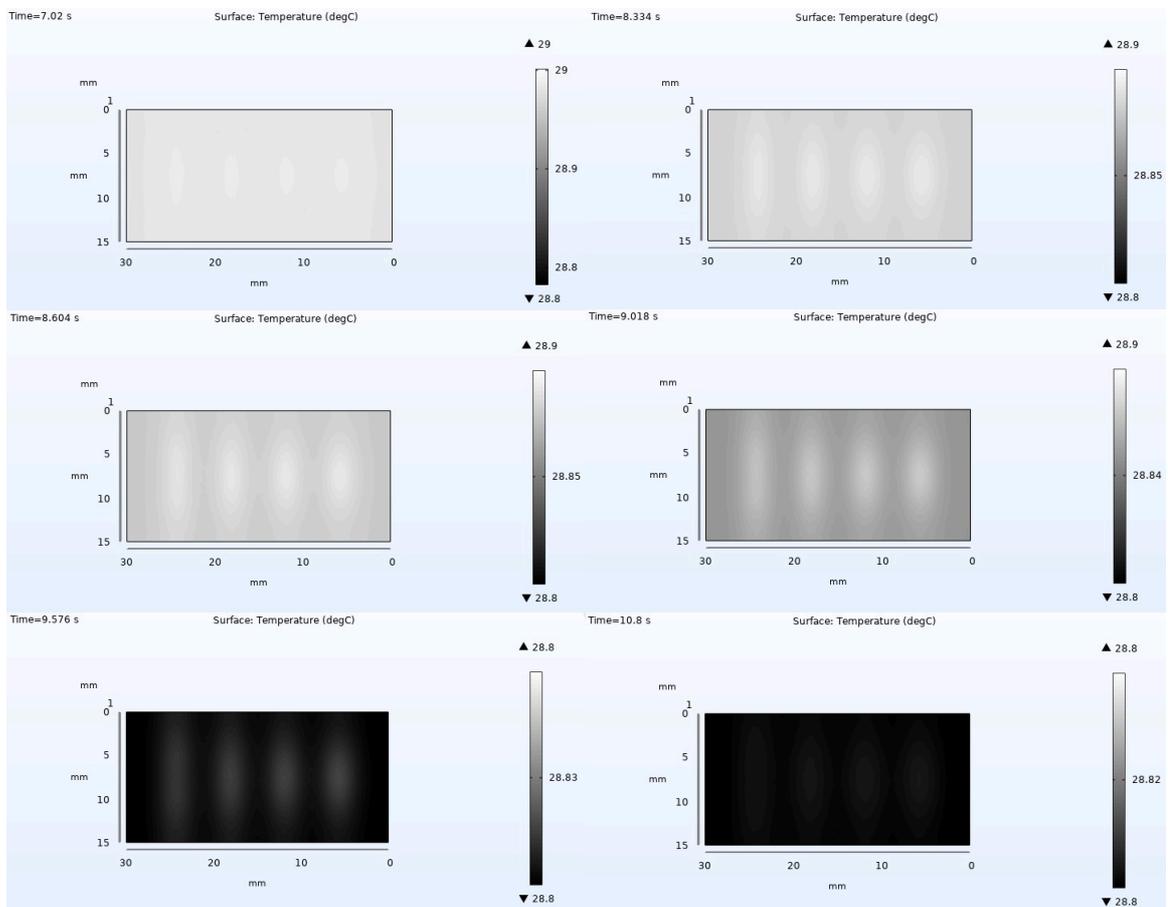


Figura 18. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 2 com lado 1,0 mm

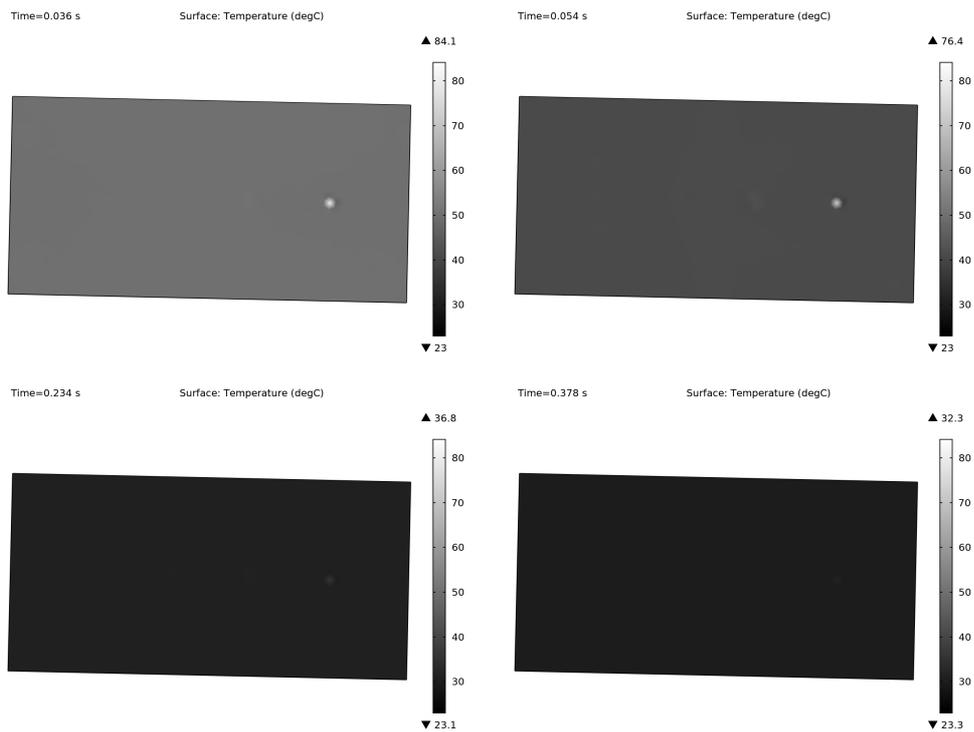


Figura 19. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 1 com lado 0,5 mm

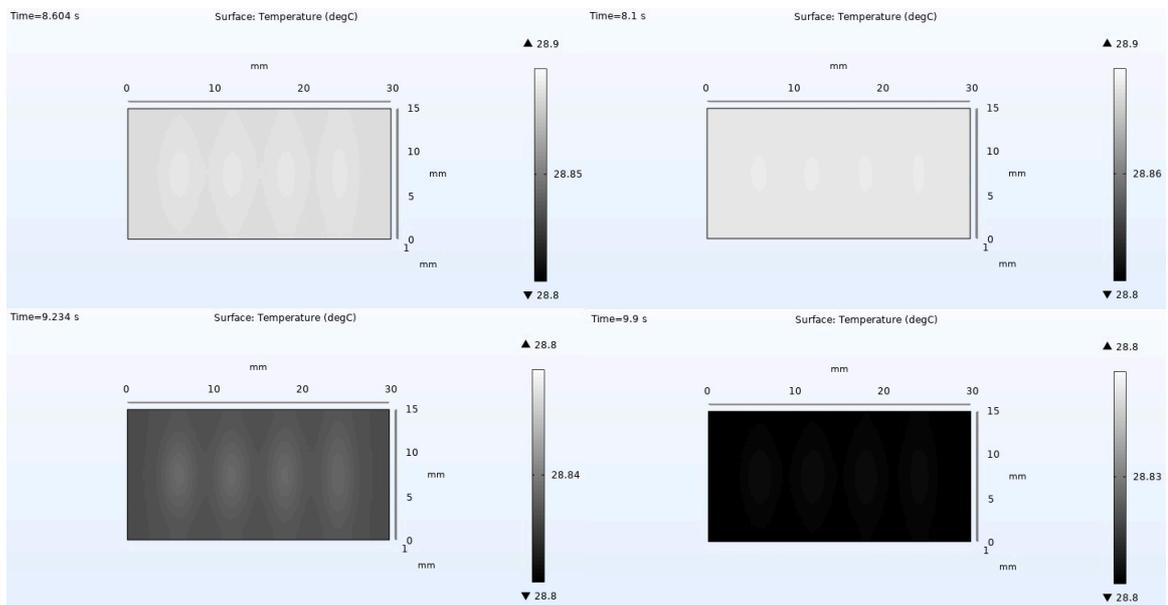


Figura 20. Amostra de alguns tempos na placa do tipo 2 com lado 0,5 mm

É possível notar que à medida que as inclusões ficam cada vez menores e mais profundas a sua detecção se torna cada vez mais difícil e sensível. Porém mesmo as de menores medidas são visíveis quando estão muito perto da superfície, mostrando que o teste de termografia pode ser útil até em casos com inclusões diminutas.

## 7. CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados pelo método dos elementos finitos obtidos pelo COMSOL é possível concluir que as inclusões presentes nas peças estudadas que são constituídas por um outro material interferem no equilíbrio da temperatura quando é submetida a um fluxo de calor, ou seja, a um ensaio de termografia infravermelha.

Assim, com um simples exame, é possível identificar falhas na estrutura de um compósito e caracterizar até mesmo seu tamanho e profundidade, verificando a necessidade de reparos ou trocas em sistemas que utilizam esse material.

Quanto à análise por inteligência artificial, é um processo demorado que requer muito estudo de diferentes tipos de imagens e que não puderam ser estudadas nesse projeto, mas que fica disponível caso no futuro, algum aluno queira continuar esse estudo para uma ainda mais rápida identificação dos defeitos nos compósitos.

## 8. REFERÊNCIAS

COELHO FERNANDES, Henrique. **Fiber orientation analysis of carbon fiber-reinforced polymers by infrared thermography**. 2015. 178 pg. Université LAVAL, Quebec, Canada.

MACIEL DOS SANTOS, Gustavo. **Termografia e inteligência artificial na detecção de falhas em transformadores**. 2017. 97 pg. Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

GOODFELLOW, Ian; BENGIO Yoshua; COURVILLE, Aaron. **Deep Learning**. MIT Press. 2016

FERNANDES, Henrique. et al. **Carbon fiber composite inspection and defect characterization using active infrared thermography: numerical simulations and experimental results**. Applied optics, Vol. 55, No 34, Dezembro 2016.

SOARES MAIA, Samuel Victor. **Análise estrutural de uma fuselagem para o aero design**. 2018. UFERSA, Mossoró.

Materiais Junior. Materiais Compósitos: origem e funcionalidades. 2020. Disponível em <https://materiaisjr.com.br/materiais-compositos-origem-e-funcionalidades/>. Acesso em 30/01/2022

CONNOR, Nick. O que é convecção. Thermal Engineering, 2020. Disponível em <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-conveccao-transferencia-de-calor-por-conveccao-definicao/>. Acesso em 20/05/2022.