



UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE TERMOGRAFIA E DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS EM COMPÓSITOS DE FIBRA
DE CARBONO

Nicole Villalva Vilardo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Rio de Janeiro
Agosto de 2018

UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE TERMOGRAFIA E DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS EM COMPÓSITOS DE FIBRA
DE CARBONO

Nicole Villalva Vilardo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:



Prof. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.



Eng. Cesar Giron Camerini, D.Sc.



Eng. Sérgio Damasceno Soares, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO DE 2018

Vilardo, Nicole Villalva

Utilização da Técnica de Termografia e de Simulação Computacional para Detecção de Defeitos em Compósitos de Fibra de Carbono/ Nicole Villalva Vilardo. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XIII, 69p.: il.; 29,7cm

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 66-69.

1. Termografia. 2. Fibra de carbono. 3. Simulação computacional. I. Pereira, Gabriela Ribeiro. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

*“Dificuldades preparam pessoas comuns para
destinos extraordinários”*

C.S. Lewis

Agradecimentos

Agradeço a Deus, porque até aqui tem me sustentado e capacitado para enfrentar com sabedoria os desafios, e por ter me dado bom ânimo para concluir mais uma etapa em minha vida. *Soli Deo Gloria*.

A minha mãe Cristina Villalva, pelo seu exemplo, por sempre me amar, ser minha melhor amiga, acreditar no valor dos meus sonhos e por me incentivar a perseverar ao longo da caminhada. Amo muito você!

Aos meus familiares Alda, Ana, Eliane, Daniel, Davi, Josué por sempre estarem junto comigo, apoiando, torcendo e intercedendo em todos os momentos.

A minha amiga e irmã de coração Mariana Gaudencio, por todo carinho, amizade e companheirismo ao longo de todos esses anos.

A professora Gabriela Ribeiro, pela orientação, pela oportunidade de cursar o Mestrado, por acreditar em mim, me aconselhar, e principalmente pela amizade.

A M.Sc. Marcella Grosso Lima, pela amizade, pela co-orientação neste projeto, por sempre dividir gentilmente seu conhecimento comigo e por todos os ensinamentos compartilhados. Muito obrigada por me acolher, aconselhar e acreditar no meu trabalho.

A toda equipe do LNDC, pelo convívio, suporte técnico, companheirismo e descontração. Em especial, agradeço aos meus amigos do Laboratório de Ensaio Não Destrutivo Iane Soares, Natalie Chaves, Lucas Braga, Raphael, Cesar e Tibério.

Aos meus vizinhos e colegas do grupo de caronas, pelo companheirismo e por transformarem meus deslocamentos diários até o Laboratório em momentos muito mais divertidos e únicos.

Ao CNPq, a Faperj e a Petrobras pelo apoio financeiro a este trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE TERMOGRAFIA E DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS EM COMPÓSITOS DE FIBRA
DE CARBONO

Nicole Villalva Vilaro

Agosto/2018

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Este trabalho tem por objetivo principal analisar a capacidade da técnica não destrutiva de termografia ativa pulsada para a inspeção de materiais compósitos poliméricos reforçados por fibra de carbono (CFRP) e detecção de defeitos que podem ocorrer nestes materiais. Foram confeccionados corpos de prova, extraídos a partir de um corte de secção reta de um tubo CFRP, onde foram usinados defeitos com diferentes diâmetros e profundidades. Além disso, foi construído um modelo de sólido virtual correspondente para simulação computacional da técnica, a fim de reproduzir numericamente os fenômenos físicos presentes nos ensaios termográficos. Através da validação do modelo de simulação computacional e do conjunto de dados obtidos experimentalmente, foi possível analisar a influência dos parâmetros geométricos dos defeitos no contraste térmico dos mesmos e também estimar o limite de detecção da técnica de termografia ativa pulsada para inspeção destes materiais pelo lado oposto dos defeitos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

USE OF THE THERMOGRAPHY AND COMPUTACIONAL SIMULATION
TECHNIQUE FOR DETECTING DEFECTS IN CARBON FIBER COMPOSITES

Nicole Villalva Vilaro

August/2018

Advisor: Gabriela Ribeiro Pereira

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The main objective of this work is to analyze the nondestructive technique of pulsed active thermography for the inspection of carbon fiber reinforced polymer composites (CFRP) and detection of defects that may occur in these materials. Test specimens were extracted from a cross section of a CFRP tube, where defects with different diameters and depths were machined. In addition, a corresponding virtual solid model was constructed for computational simulation of the technique, in order to reproduce numerically the physical phenomena present in thermographic tests. Through the validation of the computational simulation model and the data set obtained experimentally, it was possible to analyze the influence of the geometric parameters of the defects in the thermal contrast of the same and also to estimate the detection limit of the technique of pulsed active thermography for inspection of these materials by the side opposite the defects.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Ensaios Não Destrutivos	3
2.2. Termografia	3
2.2.1. Conceitos Físicos	6
2.2.2. Termografia Ativa	7
2.2.2.1 Termografia Ativa Pulsada	8
2.3. Compósitos	10
2.3.1. Métodos de fabricação e tipos de avarias em compósitos	12
2.3.2. Compósitos reforçados por fibras	14
2.3.3. Fibra de carbono	16
2.3.4. Aplicações de fibra de carbono	17
2.3.4.1 Indústria de óleo e gás	17
2.3.4.2 Setor aeroespacial	19
2.3.5. Exemplos de avarias em materiais CFRP em serviço	20
2.3.6. Utilização de ensaios não destrutivos na inspeção de compósitos CFRP	21
2.3.7. Detecção de falhas em CFRP utilizando Termografia	23
2.4. Simulação Computacional	24
3. Materiais e Métodos	27
3.1. Material	27
3.2. Metodologia	27
3.2.1. Construção do modelo de simulação computacional	28
3.2.1.1 Definição de parâmetros limitadores na avaliação da resposta térmica	29
3.2.2. Ensaios Experimentais	30
3.2.2.1 Obtenção preparação dos corpos de prova	30
4. Resultados e Discussão	32
4.1. Amostra CP1	37
4.1.1. Ensaio Experimental CP1	37
4.1.2. Simulação Computacional CP1	40
4.2. Amostra CP2	45
4.2.1. Ensaio Experimental CP2	45
4.2.2. Simulação Computacional CP2	48
4.3. Amostra CP3	51
4.3.1. Ensaio Experimental CP3	51
4.3.2. Simulação Computacional CP3	52
4.4. Amostra CP4	55
4.4.1. Ensaio Experimental CP4	55
4.4.2. Simulação Computacional CP4	57
4.5. Limite para detecção por Termografia Ativa Pulsada para defeitos em CFRP	61
4.6. Comparação para detectabilidade de defeitos em CFRP utilizando outras técnicas não destrutivas	62

5. Conclusão.....	64
6. Propostas para Trabalhos Futuros.....	65
7. Referência Bibliográfica.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo do posicionamento do excitador térmico para (a) modo de reflexão e (b) modo de transmissão (adaptado de AVDELIDIS, 2004).....	8
Figura 2 - Exemplo: (a) de imagem termográfica obtida para amostra de revestimento isolante contendo defeitos inseridos, (b) curva de temperatura para pontos localizados em região com e sem defeito, (c) evolução do contraste térmico absoluto para os defeitos analisados	10
Figura 3 - Exemplo de componentes compósitos em operação <i>offshore</i> : (a) tubo flexível multicamadas, (b) tubulações, (c) reparo <i>in situ</i> em linhas de distribuição, (d) suporte para tubos, (e) estrutura de cobertura (Fonte: <i>Offshore Magazine</i>).....	18
Figura 4 - Representação da distribuição de materiais na aeronave <i>Boeing 787</i>	20
Figura 5 - Análise qualitativa do espectro sônico sobre a região de indicação de defeito e vizinhança: (A) perfil típico de áreas sem indicação de defeito, (B) e (C) mudanças no espectro quando o cabeçote é posicionado sobre defeitos (Willeman, 2008).	22
Figura 6 - Imagens: (A) padrões de franja de interferência obtidos em juntas compósitas sem falha de adesão e (B) resultado após inspeção por <i>shearografia</i> indicando presença de falhas (Willeman, 2008).	22
Figura 7 - (A) Representação do painel laminado compósito plano, (B) resultado obtido por termografia aplicada à placa plana num tempo de 0,1 s e (C) imagem formada num tempo de 4,5 s contendo os três defeitos introduzidos na peça (MIRANDA, 2011).....	23
Figura 8 - Esquema representativo da configuração para o ensaio termográfico da face interna da junta, com região contendo os dois defeitos em destaque (GROSSO <i>et al.</i> , 2016).	26
Figura 9 - Comparação entre: (A) imagem obtida por simulação para melhor contraste térmico da distribuição de temperatura na superfície interna da junta e (B) imagem termográfica obtida para o tempo de melhor contraste térmico, realizada a partir do lado interno da junta (GROSSO <i>et al.</i> , 2016).....	26
Figura 10 - Imagem do duto como recebido.....	27
Figura 11 - Esquema representativo do plano de corte das amostras.....	30
Figura 12 - Geometria criada com COMSOL: (a) vista frontal dos defeitos na placa e (b) vista da seção transversal da placa.	32
Figura 13 - Imagem ilustrando a distribuição de temperaturas na superfície do sólido virtual nos seguintes tempos: (a) 0s, (b) 5s, (c) 10s, (d) 14s, (e) 20s, (f) 40s, (g) 50s e (h) 60s.	34

Figura 14 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo obtidas pela simulação computacional para os cinco defeitos e para uma região sem defeito contido neste sólido virtual	35
Figura 15 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela simulação computacional para cada um dos cinco defeitos contidos neste sólido virtual.....	36
Figura 16 - Imagem termográfica de melhor contraste obtida para o CP1.....	38
Figura 17 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo para o ensaio termográfico na amostra CP1.	39
Figura 18 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela termografia ativa pulsada para cada um dos defeitos contidos na amostra CP1.	39
Figura 19 - Imagem ilustrando a distribuição de temperaturas do CP1 na simulação do modelo para o tempo de 20 s.	40
Figura 20 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo obtidas pela simulação computacional para os quatro defeitos e para uma região sem defeito na amostra CP1.....	41
Figura 21 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela simulação para cada um dos defeitos contidos na amostra CP1.	41
Figura 22 - Comparação entre a evolução da temperatura obtida experimentalmente e pela simulação do CP1 para: (a) região sem defeito, (b) defeito 1, (c) defeito 2 e (d) defeito 4.....	42
Figura 23 - Imagem da distribuição de temperaturas do CP1 obtidos do modelo para o tempo de aquecimento de: a) 20s e b) 30s.	43
Figura 24 - Curvas da evolução da temperatura e contraste térmico absoluto, obtidas pela simulação computacional para o CP1 com os tempos de aquecimento de: (a) 20s e (b) 30s.	44
Figura 25 - Imagem termográfica de melhor contraste obtida para o CP2.....	46
Figura 26 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo para o ensaio termográfico na amostra CP2.	47
Figura 27 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela termografia ativa pulsada para os defeitos detectados na amostra CP2.	47
Figura 28 - Imagem ilustrando a distribuição de temperaturas do CP2 na simulação do modelo para o tempo de 12 s.	48
Figura 29 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo obtidas pela simulação computacional para os quatro defeitos e para uma região sem defeito na amostra CP2.....	49

Figura 30 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela simulação para cada um dos defeitos contidos na amostra CP2.	49
Figura 31 - Comparação entre a evolução da temperatura obtida experimentalmente e pela simulação do CP2 para: (a) região sem defeito, (b) defeito A1 e (c) defeito A2... 50	50
Figura 32 - Imagem termográfica de melhor contraste obtida para o CP3.....	52
Figura 33 - Imagem ilustrando a distribuição de temperaturas do CP3 na simulação do modelo para os tempos de: (a)11 s e (b) 20 s.....	53
Figura 34 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo obtidas pela simulação computacional para os quatro defeitos e para uma região sem defeito na amostra CP3.....	54
Figura 35 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela simulação para cada um dos defeitos contidos na amostra CP3.	54
Figura 36 - Imagem termográfica de melhor contraste obtida para o CP4.....	56
Figura 37 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo para o ensaio termográfico na amostra CP4.	56
Figura 38 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela termografia ativa pulsada para os defeitos detectados na amostra CP4. 57	57
Figura 39 - Imagem ilustrando a distribuição de temperaturas do CP4 na simulação do modelo para os tempos de: (a)12 s e (b) 20 s.....	58
Figura 40 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo obtidas pela simulação computacional para os quatro defeitos e para uma região sem defeito na amostra CP4.....	59
Figura 41 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela simulação para cada um dos defeitos contidos na amostra CP4.	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos e classificações de avarias em compósitos (adaptado de PIFFER, 2016).	13
Tabela 2 - Características de materiais usados para reforço com fibras (CALLISTER, 2002).	15
Tabela 3 – Características dos defeitos nos CP’s.....	31
Tabela 4 – Características dos defeitos.....	33
Tabela 5 - Parâmetros referentes às condições adotadas no ensaio experimental CP1.	37
Tabela 6 - Parâmetros referentes às condições adotadas no ensaio experimental CP2.	45
Tabela 7 - Parâmetros referentes às condições adotadas no ensaio experimental CP3.	51
Tabela 8 - Parâmetros referentes às condições adotadas no ensaio experimental CP4.	55
Tabela 9 - Valores de máximo Contraste Térmico Absoluto obtidos para cada um dos defeitos presentes nos corpos de prova experimental e de simulação.....	61

1. Introdução

Nos últimos anos, a busca por novos materiais - em alternativa as tradicionais ligas metálicas - que atendessem a requisitos de tolerância a danos e agregassem características de resistência mecânica aliadas à baixa densidade e menor custo, possibilitou o desenvolvimento e uso de materiais compósitos poliméricos reforçados por fibras em diversos setores da economia. Sobretudo no setor petroquímico, nos últimos vinte anos, cresceu a incorporação de estruturas fabricadas em material compósito para aplicações *offshore* em exploração de reservas em águas profundas, a exemplo dos *risers* e outras estruturas secundárias nas plataformas, tais como grades, corrimãos e escadas. A indústria aeronáutica comercial também apresentou um acelerado crescimento no emprego de compósitos, a exemplo da aeronave *Boeing 787 Dreamliner*, lançada em 2011, cujo percentual em massa de compósitos poliméricos nas suas estruturas primárias e secundárias alcançou a cifra de 54% (GRIFFITHS, 2005) (WILLIAMS, 2009) (MRAZOVA, 2013).

A crescente demanda pelo uso desses materiais fez surgir a necessidade de um controle de qualidade criterioso para detecção de falhas estruturais e descontinuidades durante os processos produtivos, desde as etapas de fabricação do compósito assim como a sua posterior inspeção em serviço. Nesse contexto, técnicas de ensaios não destrutivos despontaram como alternativa promissora confiável para detecção, localização, dimensionamento de regiões defeituosas e avaliação da integridade tanto superficial como subsuperficial porque se baseiam na capacidade de inspecionar os materiais e estruturas sem danificá-los e sem interferência na vida em serviço.

Dentre as técnicas não destrutivas empregadas na inspeção de componentes compósitos na indústria atualmente, pode-se citar: inspeção visual, ultrassom, emissão acústica, radiografia de raios-X, termografia infravermelha e *shearografia*. Dentre essas, a termografia ganha destaque devido à sua possibilidade de inspecionar áreas amplas em um tempo relativamente curto, dispensando preparo da superfície e o contato físico com o material. O ensaio termográfico viabiliza o mapeamento rápido de danos/defeitos em inspeções preliminares que pode ser seguido pela aplicação de técnicas não destrutivas complementares para confirmação destes ao longo da espessura e que demandem maior tempo de ensaio para detecção dos mesmos.

No contexto da pesquisa científica brasileira, algumas universidades têm se dedicado ao avanço das metodologias de inspeção por termografia nos últimos anos, sendo relevante citar especificamente o grupo de pesquisadores do Laboratório de Ensaios

Não Destrutivos Corrosão e Soldagem (LNDC) da COPPE/UFRJ, que tem trabalhos recentes publicados na área de inspeção por termografia de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro. Motivado pelo trabalho de GROSSO *et al.* (2016) que utiliza um modelo de simulação computacional para validação experimental da inspeção por termografia de juntas compósitas adesivas, o presente trabalho se propõe a continuar essa linha de pesquisa, estendendo as aplicações da técnica para detecção de defeitos em compósitos de fibra de carbono.

O objetivo principal desta dissertação é avaliar a capacidade da técnica não destrutiva de termografia ativa na modalidade pulsada para inspeção de materiais compósitos de fibra de carbono e detecção de defeitos subsuperficiais que podem ocorrer nestes materiais. Um modelo de simulação computacional da técnica será utilizado para recriar as condições dos ensaios experimentais.

Com intuito de estimar o limite de detecção da técnica para estes defeitos e ainda avaliar a influência dos aspectos geométricos dos defeitos no contraste térmico, foi feita uma correlação entre os resultados de simulação e os obtidos experimentalmente.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Ensaio Não Destrutivos

Os ensaios não destrutivos podem ser descritos como um conjunto de técnicas capaz de caracterizar materiais e inspecionar estruturas através da identificação e dimensionamento de irregularidades, descontinuidades e defeitos, sem qualquer prejuízo na integridade destes materiais ou em suas funcionalidades futuras.

A partir dos valores obtidos nas medições de inspeção é possível avaliar se a extensão e localização dos danos no material oferecem risco relacionado ao desempenho deste componente em serviço, bem como estimar a vida útil do material e ainda determinar se o tamanho da descontinuidade está dentro de um critério de aceitação/rejeição previamente estabelecido em documentação específica para cada caso, e se este valor caracteriza ou não um risco de falha da peça. Dessa forma, o ensaio não destrutivo torna-se uma importante ferramenta de controle de qualidade nos processos de fabricação de materiais e na manutenção e monitoramento de equipamentos em serviço.

De acordo com a ASNT (*American Society for Nondestructive Testing*), os métodos de ensaios não destrutivos estão classificados em categorias, conforme apresentadas abaixo, cada qual regida por um princípio físico diferente. A referida metodologia de inspeção em cada uma das categorias envolve técnicas, procedimentos e equipamentos distintos. São estas as categorias:

- Visual;
- Radiação penetrante (radiografia, tomografia);
- Vibração (ultrassom, emissão acústica);
- Eletromagnética (correntes parasitas, ACFM);
- Térmica (termografia);
- Eletroquímica.

Neste trabalho, o foco do estudo será a técnica de termografia.

2.2. Termografia

A técnica não destrutiva de termografia é baseada no princípio físico de que materiais com propriedades termofísicas diferentes produzem comportamentos térmicos distintos que podem ser reveladas por um sensor infravermelho, tal como uma câmera térmica. Portanto, o objetivo do ensaio termográfico é analisar a distribuição de temperaturas na

superfície do corpo e a partir dos valores mensurados correlacionar eventuais alterações na temperatura do material com a presença de defeitos nesta superfície ou abaixo dela. A alteração no valor medido de temperatura na superfície do material é uma resposta à variação que ocorre no fluxo de calor localmente quando este se depara com uma descontinuidade no material. Sendo assim, este é considerado o principal mecanismo de detecção de defeitos pela técnica de termografia (MALDAGUE, 2001) (CASTANEDO *et al.*, 2013).

Baseado no princípio de que o nível de radiação infravermelha emitida por um corpo é diretamente proporcional à elevação da sua temperatura, a excitação térmica do corpo é necessária para induzir um aumento nesse nível de radiação. De acordo com o modo de excitação térmica, que pode ser estacionária ou transiente, a termografia pode ser classificada em: termografia passiva e termografia ativa (MALDAGUE, 2001).

No modelo de termografia ativa, o aquecimento ou resfriamento são os principais mecanismos responsáveis por gerar uma diferença significativa de temperatura no material, facilitando desta forma a detecção de descontinuidades. Nesta modalidade, é necessária a utilização de uma fonte externa de calor, geralmente sendo empregadas lâmpadas halógenas. Dentro da modalidade ativa, existe ainda a diferenciação entre as modalidades de termografia ativa pulsada (*pulsed thermography*), termografia de fase pulsada (*pulsed phase thermography*) e termografia ativa modulada (*lock-in thermography*).

No modelo de termografia passiva, o material dispensa a necessidade de excitação térmica externa para o seu aquecimento ou resfriamento, pois possui diferenças de temperatura suficientes para que sejam reconhecidas pela câmera. Esse modelo é empregado em casos de manutenção de equipamentos nos quais são comuns ocorrências de sobreaquecimento localizado de algumas partes, de modo que nos termogramas se revelam como pontos quentes.

Em ambas as modalidades o princípio do ensaio termográfico é o mesmo; a radiação térmica (infravermelha) emitida pelo corpo é detectada através de um sensor infravermelho contido na câmera termográfica e a radiação é então convertida em sinal elétrico, que será comparado com a curva de calibração contida na câmera, sendo posteriormente convertido para valores de temperatura e apresentado na forma de imagens termográficas denominadas termograma. Basicamente, um termograma é o registro permanente, na forma digital, das diferentes temperaturas locais no componente, apresentado na forma de gradientes de coloração (escala policromática) ou de tonalidades de cinza (escala monocromática). Cada *pixel* da imagem corresponde

ao valor da temperatura naquele ponto do material, ilustrando assim a distribuição de temperaturas ao longo da superfície do objeto em estudo. (MALDAGUE, 2001) (MALDAGUE *et al.*, 2004) (MIRANDA, 2011).

A termografia tem se destacado como um método de inspeção não destrutivo bem aceito em diversos setores da indústria e apresenta um grande campo de aplicações que vão desde a área médica como uma forma não invasiva para identificar disfunções vasculares, ortopédicas, dermatológicas e reumatológicas auxiliando no diagnóstico de doenças, até segmentos do setor elétrico, para manutenção preditiva de sistemas geradores e transmissores de energia elétrica. Também podem ser citadas aplicações por inspeção termográfica no setor siderúrgico, para levantamento de perfil térmico dos fundidos e inspeção de revestimentos refratários dos fornos; no setor metalúrgico, para monitoramento em tempo real de processos de soldagem; no setor químico e petroquímico, para controle de reatores e torres de refrigeração e estimar volume de substâncias estocadas em tanques e detecção de corrosão; no setor de construção civil para avaliação de isolamento térmico de edifícios e vazamentos; no setor aeronáutico para redução dos custos de inspeção durante estágios de manufatura e manutenção periódica de componentes estruturais de forma a favorecer a obtenção de resultados confiáveis quanto ao tamanho e a localização de defeitos e danos em laminados compósitos de maneira rápida e eficiente (MALDAGUE, 2001) (MALDAGUE *et al.*, 2001).

Na indústria de materiais nos últimos anos, os ensaios não destrutivos se consolidaram como uma forma de garantir a qualidade dos processos produtivos e a segurança dos componentes em serviço. Neste cenário, a termografia tem ganhado espaço frente a outras técnicas não destrutivas como ultrassom, corrente parasita, radiografia, por ser uma técnica de inspeção rápida, que dispensa o contato físico com o material, permite a inspeção *in situ* de grandes estruturas e não oferece riscos prejudiciais à saúde do inspetor.

Tais características fizeram a técnica tornar-se uma poderosa ferramenta para detecção de descontinuidades/defeitos superficiais e subsuperficiais em materiais metálicos, compósitos e poliméricos, onde a inspeção pelos métodos convencionais apresenta reconhecida dificuldade (MALDAGUE *et al.*, 2001) (HUNG *et al.*, 2009).

Em contrapartida, as principais desvantagens são: limitação para grandes espessuras (a profundidade de detecção é diretamente proporcional ao tamanho da descontinuidade), custo dos equipamentos é elevado, necessita da superfície

visualmente livre para inspeção e sofre influência do ambiente no resultado (MALDAGUE *et al.*, 2001) (GENEST *et al.*, 2009).

Para ajudar na compreensão dos principais fenômenos físicos que ocorrem no ensaio termográfico, serão apresentados a seguir alguns conceitos físicos relacionados que ajudam a descrever a parte térmica do ensaio.

2.2.1. Conceitos Físicos

O cerne da técnica termográfica consiste na análise da distribuição de temperaturas na superfície do material a partir das variações locais do fluxo de calor. Sendo assim, cabe aqui ressaltar o conceito de temperatura e de calor (MALDAGUE *et al.*, 2001).

Temperatura pode ser definida como uma medida da intensidade de movimentação atômica, molecular ou iônica de uma substância, ou seja, é uma medida da energia cinética média dos seus constituintes. As unidades utilizadas para expressar temperatura são: Kelvin (K), Centígrados (°C) ou Fahrenheit (°F).

Calor pode ser entendido como energia em trânsito dentro de um sistema que possui um gradiente térmico em seu interior, de forma que a transferência de calor ocorra entre um ponto de mais alta temperatura para outro de temperatura mais baixa. A unidade de calor no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o joule (J), que equivale a 0,24 calorias. A transferência de calor pode ocorrer de três modos:

- Convecção - a transferência de calor envolve a movimentação de massa, de um gás ou de moléculas de um líquido, ao longo de grandes deslocamentos. Este fenômeno ocorre em líquidos e gases, e só ocorrerá entre dois sólidos caso haja a presença de um fluido ou gás entre eles.
- Condução - a energia térmica propaga-se entre corpos sólidos que estão em contato ou entre partes do mesmo sólido, quando há um gradiente de temperatura entre eles. Nesta forma de transferência, o calor propaga-se por difusão de energia cinética entre átomos, e o fluxo na condução é direcionado da região de temperatura mais alta para a mais baixa. As propriedades do material que são importantes neste processo são a condutividade térmica e a difusividade térmica.
- Radiação infravermelha – a radiação é o modo de transferência de calor através de ondas eletromagnéticas. Em um corpo, as ondas produzidas pela vibração dos átomos ao redor de suas posições de equilíbrio

produzem ondas eletromagnéticas, que serão mais intensas à medida que a agitação aumentar. Quando o comprimento de onda dessa radiação emitida se encontra dentro da região do espectro correspondente ao infravermelho, então ela é nomeada radiação infravermelha. Todos os corpos acima da temperatura de zero absoluto emitem naturalmente radiação eletromagnética, sendo a intensidade dessa emissão proporcional à temperatura do material, de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann, que relaciona a intensidade da energia radiante de um sólido com a sua temperatura e emissividade.

A emissividade varia em função da temperatura, composição química e condição da superfície do material. Materiais não metálicos apresentam um valor de emissividade elevado em relação aos metálicos. Sendo assim, a técnica de termografia apresenta um grande sucesso na inspeção de materiais com alta emissividade, como compósitos de matriz polimérica por exemplo.

Dentre os três modos de transferência de calor apresentados, a condução e a radiação infravermelha são considerados mais relevantes para a análise do ensaio termográfico (MALDAGUE *et al.*, 2001).

2.2.2. Termografia Ativa

A modalidade de termografia ativa encontra numerosas aplicações dentro do campo de inspeções não destrutivas e nos últimos anos, se tornou uma importante ferramenta para detecção de defeitos superficiais e subsuperficiais em diferentes tipos de materiais (metálicos, poliméricos ou compósitos), devido a sua alta velocidade de inspeção e possibilidade de avaliação à distância (MONTANINI, 2010).

Na termografia ativa, a medição de temperaturas é feita no estado transiente, sendo necessário que ocorra um estímulo térmico com uma fonte de excitação externa, de forma que o material seja submetido a um fluxo de aquecimento ou resfriamento que seja capaz de induzir uma diferença de temperatura entre a região defeituosa e a região livre de defeito da amostra, ao longo do tempo de observação. A análise dos dados é feita através da diferença de contraste térmico, observados numa sequência de termogramas, onde é possível analisar a evolução da temperatura para cada ponto da imagem (*pixel*) ao longo do tempo. Após processamento dos dados, são obtidas informações a respeito da dimensão e profundidade do defeito. Os principais excitadores térmicos utilizados nesta técnica são: lâmpadas de alta potência,

sopradores de ar, *flashes* fotográficos, feixes ultrassônicos, correntes parasitas, entre outros.

Há dois modos de posicionamento do excitador térmico em relação ao corpo de prova inspecionado: reflexão e transmissão. No modo de reflexão, o excitador e a câmera estão posicionados do mesmo lado, sendo este modo o mais indicado para detecção de descontinuidades próximas da superfície a ser excitada termicamente. Já no modo de transmissão, o excitador está na face oposta a câmera, o que favorece a detecção de descontinuidades que estejam localizadas próximas a superfície oposta a de excitação térmica. A visualização do defeito depende de uma série de parâmetros, dentre eles a temperatura alcançada pela fonte térmica durante a excitação e a faixa espectral da câmera. Sendo assim, o modo de transmissão apresenta pelo menos uma limitação em relação ao de reflexão, pois a superfície oposta à câmera nem sempre é acessível (MALDAGUE *et al.*, 2001).

De acordo com o tipo de excitação térmica e o respectivo pós-processamento dos dados de temperatura obtidos na sequência de termogramas, a termografia ativa pode ainda ser classificada em: Pulsada, Fase Pulsada, *Step Heating*, *Lockin*, *Pulsed Eddy Current Thermography* e *Vibrothermography*, cada qual com suas características e aplicações específicas (MALDAGUE, 2001) (GROSSO, 2016).

A Figura 1 apresenta um esquema com o posicionamento do excitador térmico em relação ao corpo de prova nos modos de reflexão e transmissão.

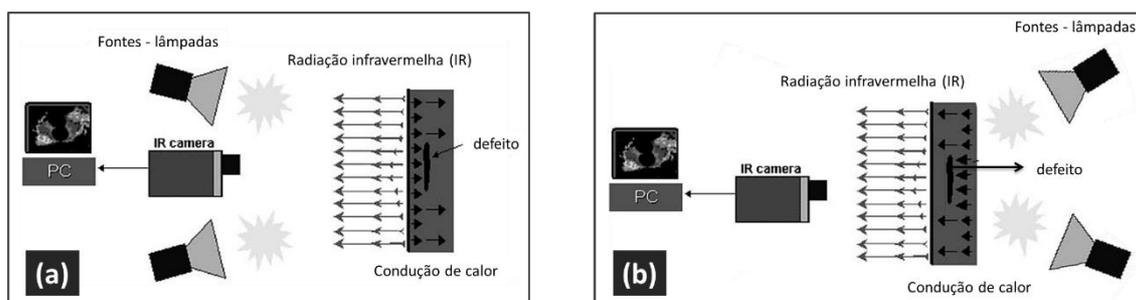


Figura 1 - Esquema representativo do posicionamento do excitador térmico para (a) modo de reflexão e (b) modo de transmissão (adaptado de AVDELIDIS, 2004).

Dentre as classificações da termografia ativa citadas, a modalidade pulsada será abordada a seguir.

2.2.2.1 Termografia Ativa Pulsada

Na termografia ativa pulsada, a fonte de calor utilizada para o aquecimento da superfície do material é controlada por pulsos de energia que variam em intervalos de tempo da ordem de alguns milissegundos, para materiais com alta condutividade térmica como os metais, até alguns segundos para materiais de baixa condutividade, como polímeros e

compósitos. O pulso térmico gerado pela fonte externa atinge o objeto e penetra no material, provocando um rápido aumento de temperatura devido à propagação da onda térmica, que adentra pela superfície externa e caminha por difusão até a parte interna do material. Quando houver presença de uma descontinuidade no material, haverá uma alteração tanto na taxa de difusão quanto no caminho do fluxo térmico de calor. No posterior monitoramento da evolução da temperatura em função do tempo, a presença de descontinuidades será percebida como uma área com valor de temperatura diferente do restante do material. O contraste térmico observado no termograma pode então ser relacionado com a profundidade da descontinuidade ao longo da espessura do material.

A correspondência dessa resposta térmica para valores que indicam posição é feita por meio de algoritmos, capazes de avaliar a profundidade das descontinuidades detectadas. Estes algoritmos baseiam-se em características temporais dos sinais, correspondentes a resposta térmica recebida na superfície que recebeu a excitação térmica. Seu princípio de funcionamento consiste na análise da curva de evolução temperatura versus tempo, para pontos de referência no termograma. Estes pontos são tomados de modo que seja escolhido preferencialmente um ponto em uma região onde não há presença de descontinuidades e pontos onde descontinuidades foram detectadas no termograma. Dessa forma, ao realizar a subtração entre estas curvas, tendo como referência a área livre de defeitos, o resultado obtido é uma única curva, que pode ser denominada de contraste térmico absoluto, conforme Equação 1 (MALDAGUE *et al.*, 2011).

$$C_a(t) = T_{def}(t) - T_{ref}(t) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$C_a(t)$ – Contraste térmico absoluto;

$T_{def}(t)$ – Temperatura no ponto (área) considerado defeito;

$T_{ref}(t)$ – Temperatura no ponto (área) considerado de referência.

A análise das curvas de contraste térmico de um material é uma importante ferramenta para estimar a influência da profundidade do defeito sobre o nível de contraste térmico obtido. Descontinuidades de pequena espessura ou que se encontram próximas da superfície observada respondem com um contraste térmico maior e são detectadas para picos de máximo contraste térmico em menor tempo se comparadas com as descontinuidades mais profundas ou de espessura maiores.

A título de ilustração dos resultados da técnica, a Figura 2 - (b, c) exibe um exemplo típico de curvas de temperatura e do contraste térmico obtidas na comparação dos resultados termográficos por termografia pulsada para defeitos de mesma espessura, porém possuindo diferentes tamanhos, inseridos em uma camada do isolamento térmico de motores de foguetes sólidos.

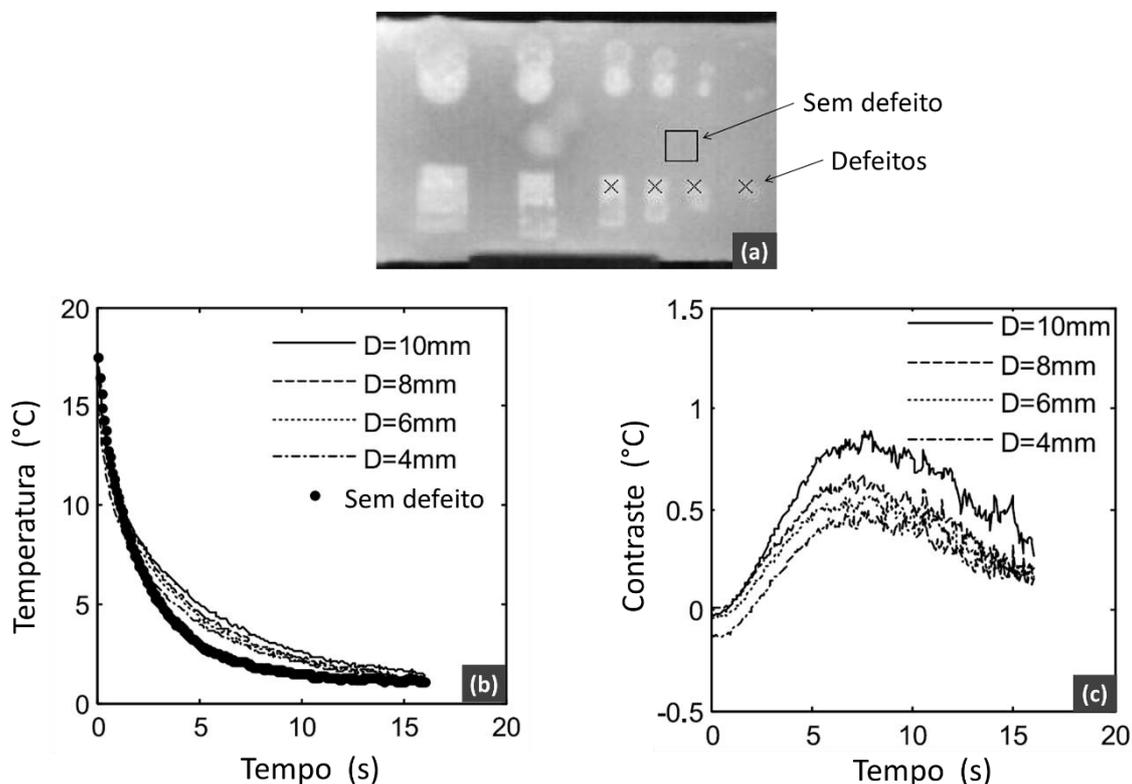


Figura 2 - Exemplo: (a) de imagem termográfica obtida para amostra de revestimento isolante contendo defeitos inseridos, (b) curva de temperatura para pontos localizados em região com e sem defeito, (c) evolução do contraste térmico absoluto para os defeitos analisados (GUO *et al.*, 2015).

2.3. Compósitos

A designação material compósito é atribuída a qualquer material multifásico, que exiba em sua constituição proporção significativa das propriedades de pelo menos duas fases distintas, sendo uma delas contínua, chamada de matriz, e outra dispersa, nomeada fase de reforço. Uma grande vantagem dos compósitos é agregar, de acordo com princípio de ação combinada, as melhores propriedades de materiais diferentes, que não seriam alcançadas de maneira independente (CALLISTER, 2002). Estas propriedades podem ser previstas por relações denominadas regra das misturas direta e inversa, que levam em conta as peculiaridades de cada um dos constituintes proporcionalmente à fração volumétrica dos mesmos. Essas relações são capazes de fornecer propriedades como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e

densidade. Aumentar ou diminuir a quantidade de qualquer uma das fases permite aperfeiçoar as propriedades para a aplicação que se deseja (SILVA, 2014).

De acordo com o tipo de reforço, os compósitos podem ser classificados em três grandes grupos, são eles: compósitos reforçados por partículas, compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais. O reforço, como a nomenclatura sugere, é a fase responsável por suportar as solicitações mecânicas impostas ao material. Já a matriz, é a fase que envolve o reforço, ela está em contato direto com o ambiente e com as solicitações mecânicas, devendo possuir as propriedades necessárias para preservar a integridade do reforço (MALLICK, 1993) (SCHWARTZ, 1997). Para a boa operação em serviço do compósito, é de fundamental importância que a ligação da interface matriz-reforço seja bem feita, de maneira que a matriz transfira de modo eficaz os esforços impostos a ela. Se não houver uma adesão adequada entre o reforço e a matriz, o reforço não será eficaz e a resistência mecânica pode ser inferior a do material da matriz utilizado individualmente; isto porque a fase de reforço ao invés de reforçar acabará atuando como um concentrador de tensões na matriz (CHAWLA, 1987).

Dependendo dos tipos de materiais utilizados e do processo de manufatura, algumas vantagens em termo de propriedades que os compósitos podem apresentar são: alta resistência mecânica específica, baixa densidade, elevada rigidez, elevada resistência à corrosão, amortecimento inerente, dentre outras. As principais desvantagens incluem custo da matéria-prima e fabricação, degradação ambiental da matriz (alguns termoplásticos não são muito resistentes a determinados solventes) e possível fraqueza das propriedades transversais (SCHWARTZ, 1997) (LEITE, 2009).

O uso de materiais compósitos tem crescido de modo acelerado no mundo todo, em estruturas de todos os tipos, com maior impacto já sendo sentido na indústria aeroespacial, onde o uso de compósitos reduziu o peso das estruturas e aumentou diretamente a capacidade em combustível de aeronaves, tanto da área comercial como da nova geração de aeronaves na esfera militar. Esse avanço tem capitalizado desenvolvimentos que foram resultado direto de um grande investimento na tecnologia nas últimas duas décadas (SCHWARTZ, 1997).

Inovações e modificações dos processos básicos produtivos para compósitos têm sido realizadas recentemente, propiciando uma maior utilização desses compósitos nos setores de transporte, artigos esportivos, médicos e, mais recentemente, na área da engenharia de construção (REZENDE, 2000).

2.3.1. Métodos de fabricação e tipos de avarias em compósitos

Os principais métodos de fabricação de compósitos são:

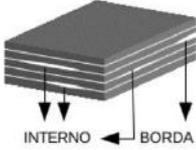
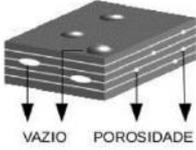
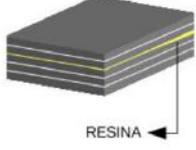
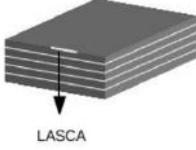
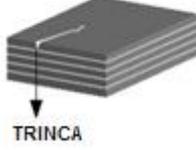
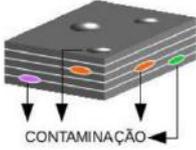
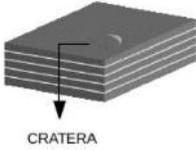
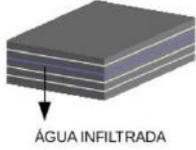
- Laminação manual (*hand lay-up*), utilizado na fabricação de compósitos laminados, como por exemplo, cascos para embarcações;
- Enrolamento filamentar (*filament winding*), utilizada para fabricação de componentes de revolução ou axissimétricos, como tubos e dutos;
- Pultrusão, utilizado para fabricação de peças com seção transversal constante ou variável, como por exemplo, componentes estruturais tais como bastões, tubos ocos, chapas planas e diversos tipos de viga.
- Produção de Prepreg, utilizado para aplicações estruturais. Nesse processo, a fibra contínua utilizada como reforço é impregnada com uma resina polimérica (apenas parcialmente curada) e armazenada sob a forma de uma fita, podendo ser moldado diretamente no local a ser utilizado; a cura do produto ocorrerá sem necessidade de nova adição de resina.

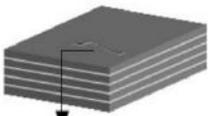
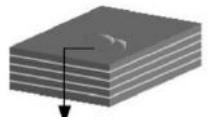
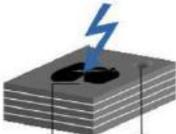
Em todos estes métodos, o monitoramento nas diferentes etapas de processamento, desde a adição das fases de reforço até o controle adequado de temperatura e tempo na cura das resinas, é de suma importância para prevenir descontinuidades e a inserção de bolhas de gás no sólido, que podem levar a avarias na estrutura (NETO, 2006).

A ocorrência de uma avaria em compósito pode ser classificada, de acordo com a origem, como defeito ou dano. Avarias provenientes do processo de manufatura são consideradas defeitos, enquanto os danos remetem a ocorrências mais dinâmicas, quando o componente já está em operação. Dentro dessa classificação, há ainda uma distinção para danos/defeitos interno ou externo, dependendo da(s) camada(s) atingida(s). A avaria que não é possível de ser detectada por inspeção visual é denominada interna, já aquela perceptível visualmente, ainda que não seja possível determinar suas proporções, é dita externa. Independentemente do tipo de avaria ou sua localização, a presença de uma descontinuidade na estrutura do material representa alterações nas propriedades físicas e mecânicas do componente (PIFFER, 2016).

A Tabela 1 elenca os principais tipos de avarias que se apresentam em materiais compósitos e suas classificações.

Tabela 1 - Tipos e classificações de avarias em compósitos (adaptado de PIFFER, 2016).

Tipo	Definição	Classificação	Esquema
Delaminação (<i>Delamination</i>)	Separação, descolamento das camadas de um laminado. Oriunda de preparação inadequada da superfície, inclusão de material estranho ou dano causado por impacto	Dano ou defeito interno	
Vazios (<i>Voids</i>)	Formação de pequenas bolhas de ar ou gás ao longo de todo o laminado e por todas as camadas. Falhas na distribuição da pressão de vácuo e inadequado fluxo de resina	Defeito interno	
Variações de Resina (<i>Resin Variations</i>)	Falhas internas no laminado, pela falta ou excesso de resina. Pode ainda, ser derivado da inadequada pressão na compactação. Ambos devido a procedimentos de cura incorretos	Defeito interno	
Lasca (<i>Chip</i>)	Pequena ruptura na borda ou na superfície da peça	Dano externo	
Trinca (<i>Crack</i>)	Ruptura superficial ou profunda de uma ou mais camadas do laminado	Dano interno e/ou externo	
Inclusão ou Contaminação (<i>Inclusion</i>)	Presença de um corpo estranho no interior do laminado	Defeito interno	
Crateras (<i>Pit</i>)	Pequena deformação na superfície do laminado, com largura e profundidade em mesma ordem de grandeza	Dano externo	
Infiltração de água (<i>Moisture Bubbles</i>)	Presença de água entre as camadas do laminado	Defeito ou dano interno	

Entalhe (<i>Scratch</i>)	Sulco ou marca rasa, com remoção superficial de material	Dano externo	 ENTALHE
Mossa (<i>Dint</i>)	Depressão superficial causada por impacto de ferramentas ou material estranho, resultando em fibras deformadas sem ruptura	Dano externo	 MOSSA
Raios (<i>Lighting Strike</i>)	Queima, desgaste ou abertura de buracos, causados por raios disparados contra a superfície. Avarias desse tipo acarretam em mudança de cor visível do material	Dano interno e externo	 QUEIMA DO MATERIAL BURACO

2.3.2. Compósitos reforçados por fibras

Dentre os vários tipos de compósitos, o potencial para eficiência de reforço é maior para aqueles que são reforçados com fibras. Nestes casos, uma carga aplicada é transmitida e distribuída entre as fibras através da fase matriz, que em geral é moderadamente dúctil. Assim como uma forte ligação fibra-matriz é necessária para um reforço significativo, o diâmetro e o comprimento da fibra são características que também interferem na eficiência do reforço. Em relação ao diâmetro e à natureza, as fibras são agrupadas em três classificações: *whiskers*, fibras e arames (CALLISTER, 2002).

Os compósitos reforçados com fibras são algumas vezes classificados de acordo com o tipo de matriz; nesse esquema, existem três classificações, quais sejam: compósitos com matriz de polímero, compósitos com matriz metálica e compósitos com matriz cerâmica. Os compósitos de matriz polimérica são os mais comuns e podem ser reforçados principalmente com fibras de vidro, de carbono e aramidas. Os materiais usados como fibras de reforço possuem elevados limites de resistência à tração. A Tabela 2 apresenta características de alguns dos materiais usados para reforço com fibras em compósitos.

Tabela 2 - Características de materiais usados para reforço com fibras (CALLISTER, 2002).

Material (Tipo de fibra)	Densidade Relativa	Limite de Resistência à Tração [GPa (10 ⁶ psi)]	Resistência Específica (GPa)	Módulo de Elasticidade [GPa (10 ⁶ psi)]	Módulo Específico (GPa)
Grafita (<i>whyskers</i>)	2,2	20	9,1	700	318
Carbeto de Silício (<i>whyskers</i>)	3,2	20 (3)	6,25	480 (70)	150
Aramida (Fibra)	1,44	3,6 - 4,1 (0,525-0,600)	2,5-2,85	131 (19)	91
Carbono (Fibra)	1,78-2,15	1,5 - 4,8 (0,22-0,70)	0,70-2,70	228 - 724 (32-100)	106-407
Vidro E (Fibra <i>E-Glass</i>)	2,58	3,45 (0,5)	1,34	72,5 (10,5)	28,1
Aço de alta resistência (Arame)	7,9	2,39 (0,35)	0,30	210 (30)	26,6
Molibdênio (Arame)	10,2	2,2 (0,32)	0,22	324 (47)	31,8

O objetivo de muitos compósitos com matriz de polímeros é a obtenção de elevada resistência específica e/ou módulo específico elevado, o que exige que os materiais empregados como matriz possuam baixa densidade. Outros compósitos mais avançados são os compósitos carbono-carbono (fibras de carbono inseridas no interior de uma matriz de carbono pirolisada), e os híbridos (contendo pelo menos dois tipos diferentes de fibras) (CALLISTER, 2002). Nesse contexto, os polímeros reforçados com fibra de carbono CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastic*) se destacam por apresentar uma combinação interessante peso/resistência, com elevado módulo de elasticidade e baixa densidade relativa, o que o torna uma alternativa promissora para substituir as tradicionais ligas metálicas na fabricação de componentes com exigência reconhecida de elevada resistência. Na seção seguinte, serão apresentadas características das fibras de carbono.

2.3.3. Fibra de carbono

Fibras de carbono, mais do que todas as outras fibras de reforço, forneceram a base para o desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica como materiais avançados de engenharia estrutural. As fibras de carbono estão comercialmente disponíveis com uma variedade de módulos de tensão que variam entre 207 GPa a 1035 GPa. Em geral, as fibras de baixo módulo têm menor densidade específica, menor custo, maior resistência à tração e compressão, e tensão de ruptura mais elevada do que fibras de alto módulo. Entre as vantagens das fibras de carbono encontram-se a sua resistência à tração excepcionalmente elevada, coeficientes de dilatação térmica baixos (que proporcionam estabilidade dimensional em aplicações tais como antenas espaciais) e alta resistência à fadiga. As desvantagens são a sua baixa resistência ao impacto e a alta condutividade elétrica, o que pode causar "curto-circuito" em máquinas elétricas desprotegidas. O elevado custo da fibra de carbono tem impedido seu uso em aplicações comerciais generalizadas, tendo sido empregadas principalmente na indústria aeroespacial, onde a economia de peso é considerada mais crítica do que o custo (SCHWARTZ, 1997).

Estruturalmente, as fibras de carbono contêm uma mistura de carbono amorfo e carbono grafitico. O seu elevado módulo de tensão resulta da forma grafitica, na qual os átomos de carbono estão dispostos em planos de hexágonos regulares cristalograficamente paralelos. Os planos dos átomos de carbono são mantidos juntos por forças fracas de *Van der Waals*, e existe uma forte ligação covalente entre os átomos de carbono de um plano. Isto resulta em propriedades físicas e mecânicas altamente anisotrópicas para a fibra (SCHWARTZ, 1997).

A estrutura e as propriedades das fibras de carbono dependem da matéria-prima utilizada e das condições de manufatura. O processo de fabricação envolve a oxidação, pirólise e grafitização de uma fibra precursora contendo carbono; tipicamente são usados precursores de poliacrilonitrilo (PAN) e piche (um subproduto do refino de petróleo); sendo o piche um precursor de menor custo que o PAN. Os átomos de carbono no piche são dispostos em padrões de anel aromático de baixo peso molecular. O aquecimento a temperaturas superiores a 300 °C polimeriza estas moléculas em estruturas longas, bidimensionais, em forma de folhas. O estado altamente viscoso do piche nesta fase é referido como "mesofase". Os filamentos de piche são produzidos por fusão em altíssima velocidade (*melt spinning*) dessa "mesofase" através de uma fiação (SCHWARTZ, 1997).

2.3.4. Aplicações de fibra de carbono

A principal aplicação da fibra de carbono é como fase de reforço em compósitos de matriz polimérica. Devido a suas reconhecidas propriedades, tais como: baixo peso, alta resistência à ruptura, boa rigidez, resistência à corrosão, resistência à vibração e baixa expansão térmica, os plásticos reforçados com fibras de carbono (CFRP) são indispensáveis em aplicações de alta tecnologia, onde a alta resistência e boa rigidez são essenciais, assim como o baixo peso.

Dentre as aplicações recentes deste tipo de compósito, podem ser incluídos usos em artigos esportivos (tacos de golfe, raquetes de tênis, capacetes automobilísticos), chassis de carros de fórmula 1, reabilitação e reforço de estruturas de concreto na construção civil (pontes, viadutos), restauração de obras de arte, equipamentos bélicos, próteses ortopédicas, fuselagem de aeronaves (asa, turbinas, trem de pouso) e setor de óleo e gás (dutos e umbilicais). Destas aplicações citadas, o uso de CFRP na indústria de óleo e gás e no setor aeroespacial, será abordado em maior detalhe nas seções subsequentes.

2.3.4.1 Indústria de óleo e gás

Materiais compósitos oferecem diversos atributos atraentes para o serviço *offshore*; alta resistência específica juntamente com alta resistência à corrosão, excelente amortecimento e desempenho em fadiga, bom isolamento térmico e alta rigidez específica. Estas propriedades combinadas com a adaptabilidade inigualável de fibras de reforço ao longo do sentido de carregamento motivaram a indústria a promover o uso de compósitos em várias aplicações de suporte de carga crítica, particularmente para *risers*, tubulações e amarras (OCHOA, 2005).

A corrosão e o controle de peso são os dois fatores que inicialmente motivam o interesse e promoveram o crescimento do uso de componentes compósitos em operações de exploração e produção *offshore* de petróleo e gás. Controlar e inibir a corrosão e a substituição periódica de componentes metálicos custa à indústria petrolífera grandes volumes de dinheiro. Reduzir o peso das plataformas tornou-se uma prioridade elevada e os compósitos de baixa densidade produzem a solução mais eficaz. Materiais compósitos geralmente podem ser escolhidos porque resistirão à corrosão e serão compatíveis com os produtos químicos utilizados nos poços e em alto mar por um período de tempo superior aos metálicos. Componentes críticos de segurança, tais como tubulação de água para incêndios, bem como estruturas secundárias, incluindo

grades, corrimãos e escadas construídas de fibra de vidro e resina polimérica são agora rotineiramente especificados para plataformas de águas profundas (WILLIAMS, 1999).

Tubos de materiais compósitos têm sido usados em vários segmentos industriais, incluindo a indústria do petróleo (WILLEMANN, 2008). Foram feitos avanços significativos em materiais (resina fenólica resistente ao fogo) e nos métodos de concepção e fabricação utilizados para resolver questões de segurança e melhorar o desempenho e confiabilidade. Construção híbrida combinando diferentes materiais para atingir o desempenho estrutural necessário, minimizando custos, é outro benefício derivado da flexibilidade de projeto inerente com compósitos (WILLIAMS, 1999). Um *riser*, ou tubo de elevação flexível, que transporta fluidos do leito do mar para unidades flutuantes pode ser descrito como uma estrutura compósita de tubo constituído por fios metálicos enrolados helicoidalmente, como armaduras de pressão e de tração, que são intercaladas com invólucros poliméricos. Os *risers* flexíveis têm sido utilizados com sucesso na indústria de petróleo e gás desde 1970 (GAUTAM, 2016). Outra vantagem dos compósitos é a possibilidade de testar/monitorar seu desempenho estrutural em serviço. Fibras ópticas ou condutores elétricos podem ser integrados na estrutura compósita, proporcionando um meio protegido e não intrusivo para o transporte de informações do monitoramento estrutural de locais remotos ou de fundo de poço. A Figura 3 ilustra diferentes componentes confeccionados em material compósito para operações *offshore*.

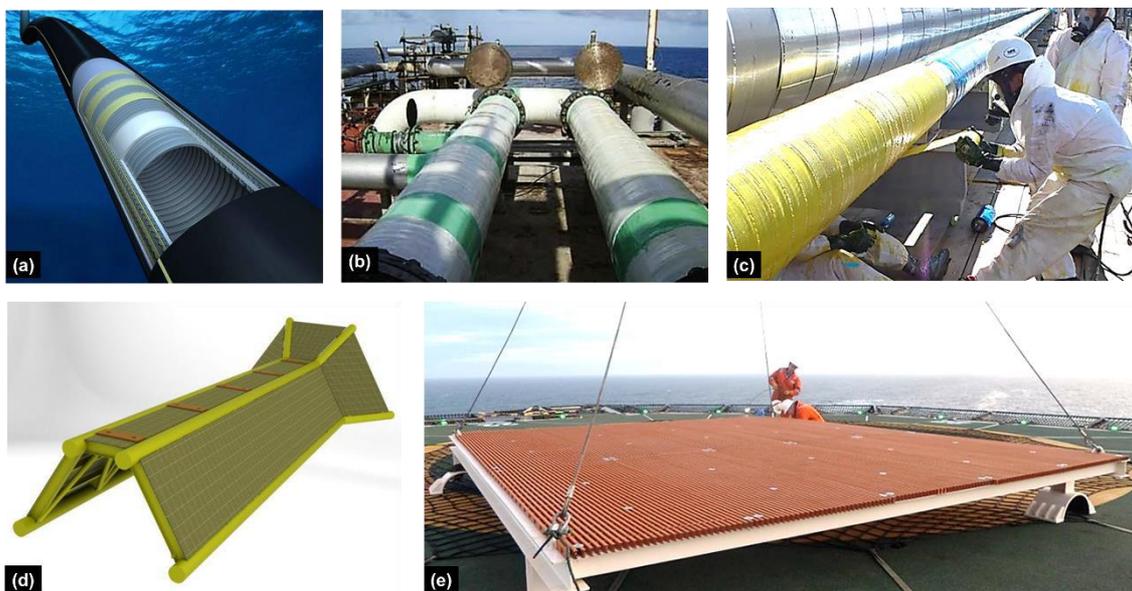


Figura 3 - Exemplo de componentes compósitos em operação *offshore*: (a) tubo flexível multicamadas, (b) tubulações, (c) reparo *in situ* em linhas de distribuição, (d) suporte para tubos, (e) estrutura de cobertura (Fonte: *Offshore Magazine*).

2.3.4.2 Setor aeroespacial

A partir da década de 60, os materiais compósitos de alto desempenho foram introduzidos de maneira definitiva na indústria aeroespacial. O desenvolvimento de fibras de carbono, boro, quartzo ofereceram oportunidade de flexibilização dos projetos atendendo as necessidades de desempenho em voo de aeronaves e veículos de reentrada. Em paralelo, os compósitos carbono/carbono (CFRC), com maior resistência à oxidação, e tecidos de fibra de quartzo também foram desenvolvidos e utilizados em partes externas de veículos submetidos à reentrada na atmosfera terrestre, em cones de exaustão de aviões supersônicos e em gargantas de tubeiras de foguetes impulsionados à base de propelente sólido (REZENDE, 2000).

Muitos componentes das modernas aeronaves estão sendo manufaturados em compósitos poliméricos. Laminados de resina epóxi modificada reforçada com fibras de carbono contínuas, com comprimento igual à dimensão do componente, são empregados em estruturas primárias e secundárias para reduzir o peso e melhorar o desempenho operacional (CÂNDIDO, 2012). A substituição do alumínio por compósitos poliméricos estruturais, por exemplo, traz grandes benefícios ao projeto de aeronaves, como a melhoria do desempenho em fadiga com pré-impregnados reforçados com fibra de carbono e também uma redução de peso de 20 a 30% em comparação com alumínio, além de 25% na redução do custo final de obtenção de peças no setor aeronáutico (REZENDE, 2000).

Apesar de a matriz epóxi ser muito utilizada no processamento de compósitos, uma nova geração de resina termorrígida modificada com termoplásticos, as bismaleimidas (BMI), começam a despontar em complexas e importantes aplicações do setor aeronáutico, podendo-se citar as aeronaves F-22, F-117 e B-2 do programa militar dos Estados Unidos da América. Os compósitos com BMI apresentam combinação única de alta temperatura em serviço, excelentes propriedades mecânicas até 180 °C em condições úmidas e exibem tolerância a danos superior às melhores resinas epóxi. Certas BMI são capazes de serem utilizadas na faixa de temperatura de 232-288 °C, apresentando comportamento semelhante à poliimida (PMR-15).

Algumas empresas já produzem componentes compósitos em larga escala há pelo menos quarenta anos, tendo vasta experiência em fibra de carbono e compósitos avançados para aeronaves comerciais e de defesa, helicópteros e motores, e também em compósitos leves, incluindo peças de engenharia de núcleo, componentes e estruturas completas (MRAZOVA, 2013). Mais de 50% da estrutura do Boeing 787 e do Airbus A350XWB, por exemplo, são compósitos de fibra de carbono.

A Figura 4 mostra a distribuição dos diferentes tipos de materiais utilizados como componentes da aeronave *Boeing 787*.

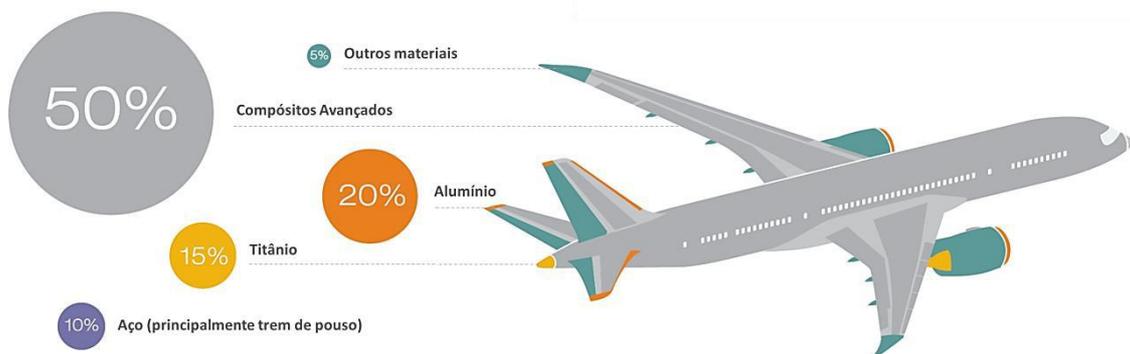


Figura 4 - Representação da distribuição de materiais na aeronave *Boeing 787*
(Fonte: *Aero Boeing- Aeromagazine*, 2006).

2.3.5. Exemplos de avarias em materiais CFRP em serviço

Situações envolvendo falhas de componentes CFRP em serviço podem estar associadas a condições de operação que excedem as especificações de projeto (temperatura, pressão, tensão) ou a danos que ocorrem na superfície do material, ocasionados por choques ou impactos severos, e podem induzir a formação de delaminações, rachaduras ou lascas.

Modos de falha de compressão para compósitos incluem delaminação e cisalhamento, que envolve micro deformações (flambagem) das fibras. Além disso, as propriedades da matriz e da fibra podem afetar os modos de falha e a resistência. Uma estrutura de compósito quando submetida a cargas de impacto pode ser danificada pela possibilidade de ocorrer descolamento das partes laminadas, micro trincas na matriz, ruptura das fibras e/ou delaminação entre as camadas. Desta forma, o processo de fratura de materiais compósitos de elevado desempenho estrutural é relativamente complexo, pois envolve mecanismos de dano intralaminar e/ou interlaminar.

Uma situação que se apresenta como um defeito observado em material semelhante (compósito reforçado com fibra de vidro - GFRP) aplicado como tubo na indústria do petróleo é a falha de adesão (áreas sem adesivo), que ocorre durante a montagem de juntas adesivadas para união de tubos de compósitos adjacentes. Em situações como esta, técnicas não destrutivas como *shearografia* e ultrassom são empregadas para detectar e avaliar esses defeitos neste tipo de estrutura (WILLEMANN, 2008).

Outra situação que se apresenta como dano é o desgaste ou queima ocasionado por raios em componentes CFRP utilizados em fuselagem. Sabe-se que um dos riscos de

aeronaves em curso de voo é o de serem atingidas por raios. Compósitos reforçados com fibra de carbono são mais suscetíveis a danos causados por raios do que o alumínio porque um CFRP é um condutor pobre de eletricidade e não tem a capacidade de dissipar a eletricidade como um metal. O método mais comum de proteger CFRP contra danos causados pelos raios é o uso de metalização de superfície. Isto é conseguido por pulverização ou por moldagem numa camada de malha de alumínio (SCHWARTZ, 1997).

Dependendo da localização ou da extensão da avaria, a integridade do componente pode ser ameaçada. Para auxiliar na investigação e prevenir perdas ainda maiores, técnicas não destrutivas têm sido utilizadas para análises de componentes CFRP.

2.3.6. Utilização de ensaios não destrutivos na inspeção de compósitos CFRP

Como já citado anteriormente, nas últimas décadas tem havido um crescente interesse no uso de materiais compósitos, em particular o plástico reforçado com fibra de carbono (CFRP), na indústria aeroespacial e de energias renováveis, devido ao baixo peso e propriedades mecânicas melhoradas em relação aos metais. Componentes feitos de CFRP tais como, pás de turbina eólica e fuselagem de aeronave, precisam ser testados para a avaliação da qualidade após a fabricação e monitorados durante a operação em serviço para aumentar a vida útil do componente. Para isso, utilizam-se técnicas de ensaios não destrutivos (CHENG, 2011).

O teste ultrassônico é um dos métodos mais utilizados para a inspeção de materiais compósitos, e tem a vantagem de poder detectar defeitos no interior do material. No entanto, este método apresenta uma série de limitações, que incluem a necessidade de um acoplante para a introdução de ondas acústicas, e a grande atenuação das ondas acústicas quando se propagam através da estrutura multicamada de compósitos.

Outras técnicas não destrutivas também são comumente aplicadas à inspeção de materiais compósitos, como: radiografia, emissão acústica, corrente parasita, *shearografia* e termografia. Cada técnica apresenta características diferentes, mas a maioria dos métodos tem limitações em relação à detecção em larga escala, imagem e medição abrangente ou tem problemas de segurança. A principal vantagem da termografia em relação a outras técnicas é o seu potencial para a rápida inspeção de uma grande área em um curto espaço de tempo, no entanto, existe uma compensação entre o tamanho do defeito detectável e a área de inspeção.

Com o intuito de ilustrar comparativamente como diferentes técnicas de inspeção apresentam seus resultados, a Figura 5 mostra os resultados de leitura por ultrassom e a Figura 6 apresenta a análise por *shearografia*, ambas aplicadas para detecção de defeitos em juntas adesivadas de tubos compósitos.

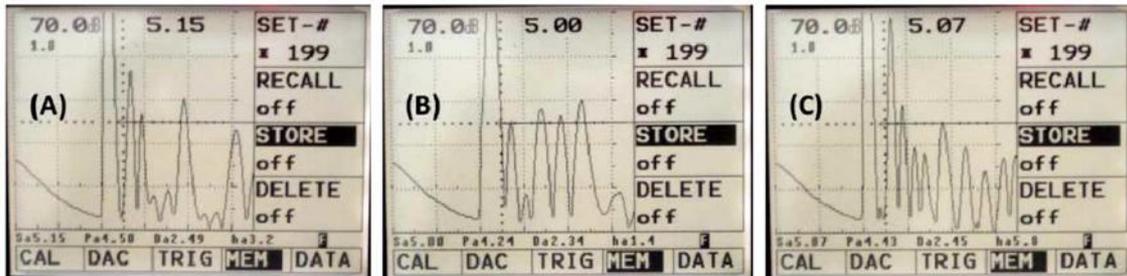


Figura 5 - Análise qualitativa do espectro sônico sobre a região de indicação de defeito e vizinhança: (A) perfil típico de áreas sem indicação de defeito, (B) e (C) mudanças no espectro quando o cabeçote é posicionado sobre defeitos (Willeman, 2008).

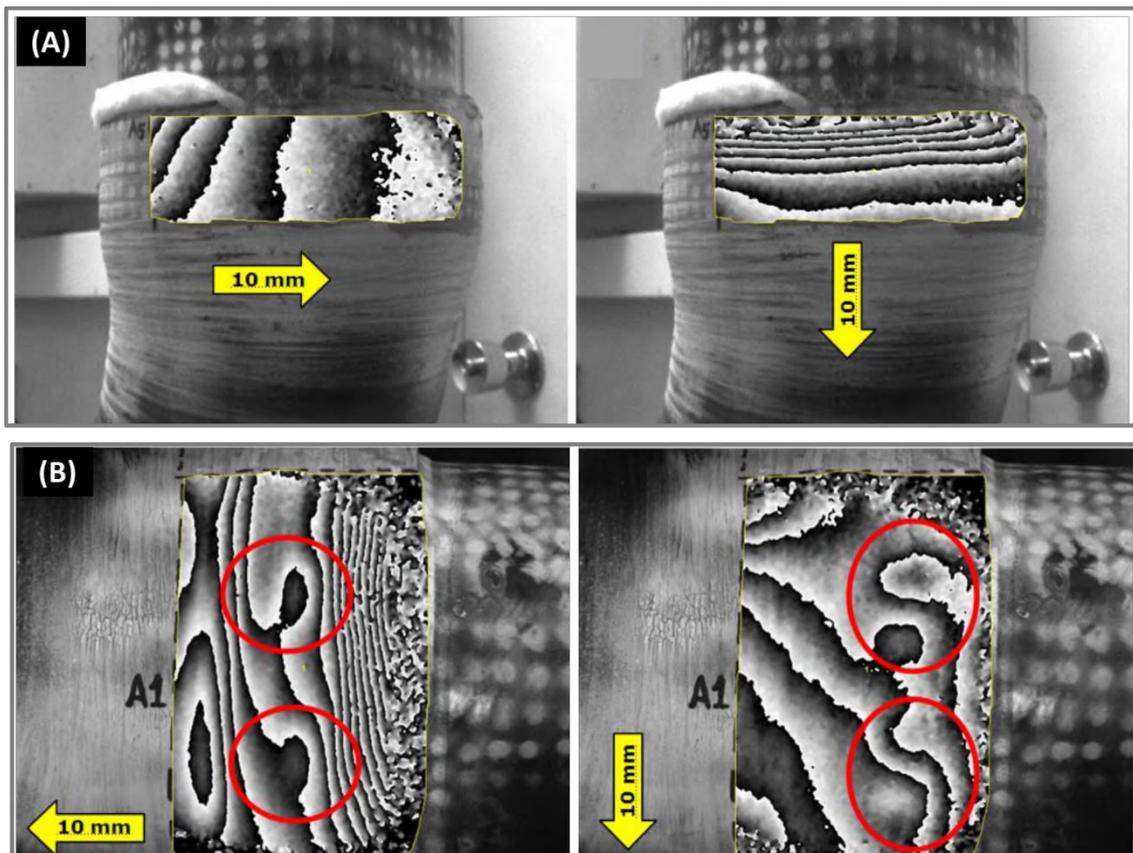


Figura 6 - Imagens: (A) padrões de franja de interferência obtidos em juntas compósitas sem falha de adesão e (B) resultado após inspeção por *shearografia* indicando presença de falhas (Willeman, 2008).

Exemplos de situações aonde a termografia é utilizada como técnica de inspeção serão apresentados a seguir.

2.3.7. Detecção de falhas em CFRP utilizando Termografia

A termografia é aplicável a uma ampla gama de materiais, incluindo fibra de vidro, compósitos de fibra de carbono e materiais metálicos, onde técnicas de excitação específicas são adequadas para diferentes situações. Abaixo são apresentados alguns exemplos recentes onde a inspeção termográfica de materiais compósitos foi bem sucedida para detecção de defeitos.

No trabalho de MIRANDA (2011) a termografia ativa pulsada foi utilizada para inspecionar uma placa-plana com 1,0 mm de espessura, confeccionada em laminado pre-preg bidirecional de fibra de carbono com resina epóxi, possuindo três discontinuidades do tipo delaminação (ou falha de adesão), com diâmetros diferentes e profundidades distintas ao longo da espessura do componente. Os resultados mostraram que todas as discontinuidades internas foram detectadas, conforme visto na Figura 7. A delaminação mais rasa apresentou uma indicação máxima (*hottest spot*) num tempo de 4,5 segundos após a incidência do pulso de calor sobre a face frontal da peça. Já os tempos de ensaio para detecção das delaminações posicionadas em profundidades maiores foi superior ao tempo para detecção da delaminação mais rasa.

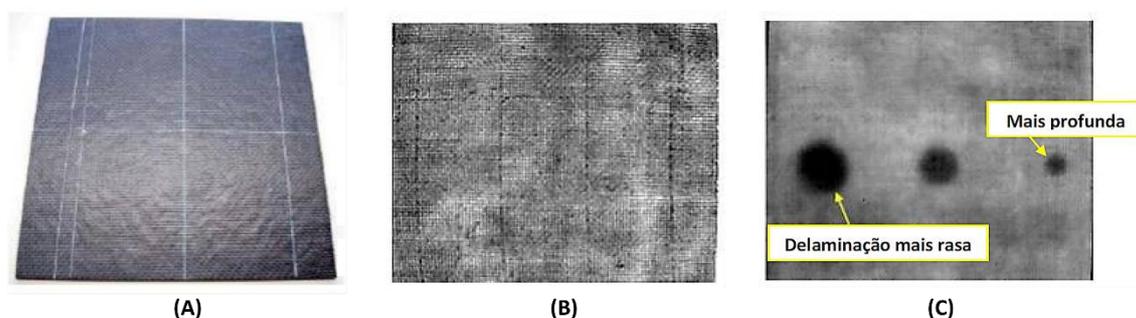


Figura 7 - (A) Representação do painel laminado compósito plano, (B) resultado obtido por termografia aplicada à placa plana num tempo de 0,1 s e (C) imagem formada num tempo de 4,5 s contendo os três defeitos introduzidos na peça (MIRANDA, 2011).

Outro estudo, apresentado por GENEST *et al.* (2008) utiliza a termografia pulsada para avaliação não destrutiva e monitoramento do crescimento de danos em reparos de folhas de grafite epóxi ligadas, com espessura nominal de 1,52 mm. Os resultados apresentados pelos autores demonstraram que um pós-processamento a partir da subtração de dados da termografia de fase pulsada de uma linha base melhora a detecção de descolamentos e as imagens obtidas (menos ambíguas). Também foi

mostrado que tanto para defeitos simulados quanto defeitos reais, o processamento aprimorado de dados de termografia pode ser usado para detectar e estimar áreas de desunião (descolamento). A técnica proposta pelos autores produziu resultados semelhantes aos de inspeção ultrassônica tradicional, o que a torna uma alternativa interessante, se aplicada periodicamente, para monitorar o crescimento de descolamentos.

O trabalho de THEODORAKEAS *et al.* (2014) investigou 3 painéis de CFRP de geometria planar, trapezoidal e curvilínea, todos com mesma espessura de 2,0 mm, contendo delaminações internas, equidistantes, de tamanhos variando de 3,0 mm a 15,0 mm de diâmetro médio. As profundidades de localização dos defeitos variaram de 0,2 mm a 1,0 mm ao longo da espessura. Os dados térmicos adquiridos foram tratados por ferramentas de processamento de sinal para aumento de detectabilidade dos defeitos e redução dos ruídos. Os resultados mostraram que a termografia ativa pulsada juntamente com a aplicação de algoritmos avançados de processamento de sinal pode ser uma técnica útil para a avaliação de ensaios não destrutivos, fornecendo informações qualitativas melhoradas.

Apenas para citar mais uma aplicação, STEINBERGER *et al.* (2006) utilizaram técnicas termográficas por infravermelho para caracterização não destrutiva de danos em compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono durante testes de fadiga por tração. Neste estudo foram investigadas as modalidades ativa e passiva, com intuito de determinar qual seria a melhor técnica de caracterização *in situ* de danos durante o teste de fadiga dos componentes CFRP mencionados. Dois quesitos foram levados em consideração na comparação entre ambas: o potencial de caracterizar os danos causados por fadiga através da condutividade térmica e a facilidade de montagem do sistema de inspeção junto ao teste de fadiga. A conclusão do estudo foi que a modalidade passiva, devido a sua concepção, é a mais adequada para a caracterização *in situ* de danos no teste de fadiga de CFRPs. Com esta técnica é possível monitorar fenômenos pontuais, como fontes de calor localizadas indicando locais de iniciação para o crescimento de trincas. A termografia ativa pulsada, por outro lado, seria difícil de implementar numa máquina de teste de fadiga.

2.4. Simulação Computacional

Nos últimos anos, a simulação computacional vem assumindo uma importância cada vez maior como ferramenta de aquisição de conhecimento. Esta técnica consiste em resolver equações matemáticas utilizando linguagem de programação, dentro de um modelo numérico (elementos finitos), para tentar replicar formas de comportamento de

um sistema real através de um modelo virtual (programa de computador). Dessa forma, situações futuras podem ser modeladas, de forma que experimentos dentro do modelo criado virtualmente permitem prever o que acontecerá na realidade.

Nas aplicações em ensaios não destrutivos, a simulação computacional geralmente é utilizada em conjunto com métodos analíticos e experimentais visando redução de custos, otimização de tempo e recursos, além de permitir a avaliação da sensibilidade de resposta de um determinado sistema.

Em termografia, o desenvolvimento de modelos de simulação computacional busca reproduzir numericamente os fenômenos físicos de transferência de calor que ocorrem durante a inspeção termográfica. Uma vez que os fenômenos físicos que ocorrem durante a inspeção pela técnica são governados pelas equações diferenciais de transferência de calor, o princípio básico da simulação computacional para este caso consiste em resolver numericamente estas equações, possibilitando a comparação entre os resultados obtidos por meio dessa metodologia com os obtidos experimentalmente (GROSSO, 2016).

Atualmente, é possível a construção de modelos que empreguem a análise de fenômenos de condução de calor em três dimensões (3D). Em um estudo realizado por GROSSO *et al.* (2016) foi desenvolvido um modelo de simulação computacional utilizando elementos finitos para a reprodução de fenômenos físicos encontrados pela termografia ativa pulsada em juntas tubulares adesivas de GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*). Defeitos foram incluídos durante a fabricação da junta, conforme Figura 8, para avaliar a capacidade de detecção da técnica de termografia pulsada ativa neste tipo de material e configuração conjunta. Os resultados experimentais obtidos com a câmera termográfica foram comparados com uma aproximação numérica obtida através do modelo de simulação desenvolvido para o estudo (*software COMSOL Multiphysics®*). Os valores encontrados pelo método experimental e pela simulação do modelo criado foram muito similares, tanto para a distribuição de temperaturas na superfície da amostra quanto para a resposta térmica da região defeituosa e não defeituosa, conforme Figura 9, sendo possível concluir que o modelo proposto serviu para validar a técnica de inspeção na detecção dos dois defeitos de falta de adesivo investigados. Outra conclusão que pode ser inferida é que a inspeção pela face interna da junta e pela face externa apresentam resultados bem diferentes, ou seja, o limite de detecção de defeitos ao longo da espessura está atrelado ao comprimento de parede que a onda térmica precisa atravessar até atingir o defeito.

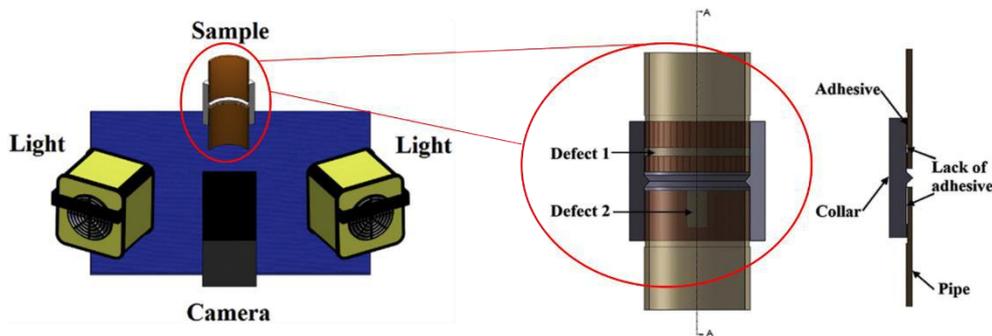


Figura 8 - Esquema representativo da configuração para o ensaio termográfico da face interna da junta, com região contendo os dois defeitos em destaque (GROSSO *et al.*, 2016).

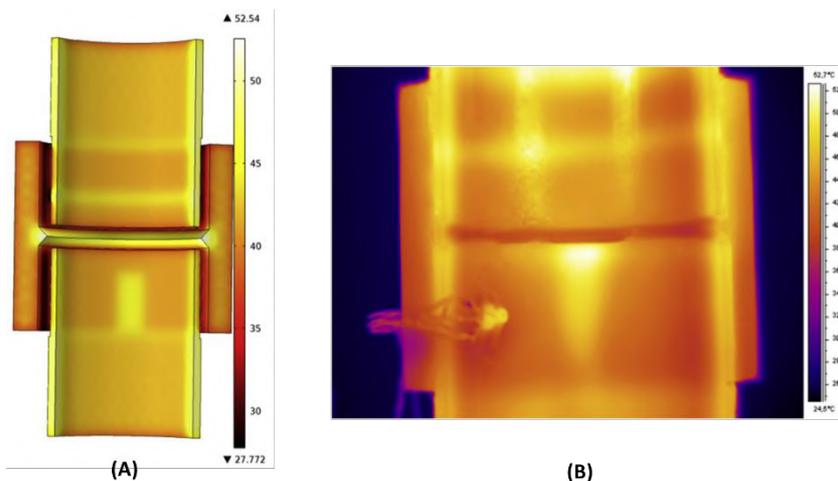


Figura 9 - Comparação entre: (A) imagem obtida por simulação para melhor contraste térmico da distribuição de temperatura na superfície interna da junta e (B) imagem termográfica obtida para o tempo de melhor contraste térmico, realizada a partir do lado interno da junta (GROSSO *et al.*, 2016).

Outra característica observada foi que a imagem resultante da simulação computacional mostra os contornos dos defeitos em maior definição do que a imagem obtida pelo método experimental, uma vez que na simulação todos os fenômenos físicos são reproduzidos sob condições de teste ótimas e os fatores externos (que não podem ser medidos) que influenciam no teste são eliminados. Além disso, a reflexão das lâmpadas apresentadas nas imagens (como linhas verticais de cor mais clara) resultantes do método experimental é um parâmetro que não pode ser facilmente reproduzido na simulação computacional.

3. Materiais e Métodos

3.1. Material

Para o presente estudo, o material utilizado é um compósito polimérico reforçado com fibra de carbono (CFRP), recebido na forma de um tubo sem emendas. O tubo possui dimensões 110,0 mm de diâmetro externo, 5,5 mm de espessura e 340,0 mm de comprimento, conforme mostrado na Figura 10.



Figura 10 - Imagem do duto como recebido.

A peça adquirida da empresa *F-Composites* foi produzida pelo processo de laminação manual e compactação a vácuo de fibra de carbono aeroespacial 12k (34 Msi *Modulus*/ 640ksi *Tensile Strength*) de filamentos contínuos sem emendas e com matriz epóxi de cura à temperatura ambiente, homologada pela *Luftfahrtbundesamt* (Autoridade Aeronáutica da Alemanha).

3.2. Metodologia

Com o intuito de simular falhas de perda de espessura do substrato devido à delaminações e também danos subsuperficiais provocados por impacto, foram confeccionados corpos de prova com defeitos controlados, com dimensão e localização conhecidas e de diferentes diâmetros. Estes defeitos inseridos serviram como um referencial de análise da capacidade da técnica.

Para um estudo preliminar de simulação, um sólido virtual foi criado no COMSOL com configuração geométrica de chapa plana, por ser uma geometria mais simples de avaliar. Nos estudos subsequentes, foi utilizada uma geometria cilíndrica, mais próxima do formato do tubo real, com as dimensões exatas das amostras confeccionadas para os ensaios experimentais. Para a obtenção dos resultados experimentais, a modalidade de termografia ativa pulsada foi escolhida para os ensaios. A metodologia utilizada neste

trabalho consiste na avaliação dos termogramas obtidos, utilizando como parâmetro de análise o valor do contraste térmico dos defeitos.

No presente trabalho, foram adotadas as seguintes configurações dos equipamentos:

- Câmera termográfica modelo SC640 (*Flir Systems*) com sensor InSb e resolução espacial 640x512 *pixels*, utilizada na frequência de 30 Hz, conectada a um computador para posterior aquisição das imagens termográficas;
- Conjunto de lâmpadas halógenas (*Automation Technology*) de potência total 5 kW, com capacidade para realização de pulso, que foi utilizado como excitador térmico posicionado no modo de reflexão;
- Corpo de prova a ser analisado posicionado na frente da câmera termográfica, a 40 cm de distância.
- As condições de ensaio foram definidas de acordo com os melhores resultados obtidos em estudos anteriores (GROSSO, 2016) e em conformidade com as normas específicas para prática padrão de termografia infravermelha em painéis compósitos, como por exemplo, a ASTM E2582 e a ASTM E2533.
- Os parâmetros referentes às condições adotadas no ensaio termográfico para todos os CP's são:

Tempo aquecimento	10 s
Tempo total ensaio	60 s
Emissividade (ϵ)	0.92
Capacidade Térmica (C_p)	902 J/(Kg.K)
Densidade (ρ)	1550 Kg/m ³
Condutividade Térmica (κ)	1.0 W/(m.K)

- O *software* utilizado tanto para aquisição das imagens termográficas como também para análise dos resultados foi o *Flir Researcher*®, fornecido pelo próprio fabricante da câmera termográfica. Em conjunto o *software* IR-NDT foi utilizado para o controle do disparo das lâmpadas halógenas e configuração do seu pulso térmico.

3.2.1. Construção do modelo de simulação computacional

A utilização de um modelo de simulação computacional capaz de reproduzir os fenômenos físicos presentes nos ensaios experimentais serviu de motivação para este estudo, pois possibilita a determinação dos melhores parâmetros a serem empregados

para inspeção do material avaliado, além de reduzir custos referentes à fabricação de diversos corpos de prova e utilização de equipamentos.

Neste trabalho foi utilizado o *software* COMSOL Multiphysics®, nas versões 4.4 e 5.1., empregando a interface correspondente ao módulo de transferência de calor em sólidos, aplicados no espaço em três dimensões, com a evolução da temperatura dependente do tempo.

3.2.1.1 Definição de parâmetros limitadores na avaliação da resposta térmica

O modelo computacional é uma importante ferramenta a ser utilizada para o conhecimento dos limites de detecção de defeitos pela técnica termográfica. As principais etapas para construir um modelo de simulação fidedigno são descritas abaixo:

- definição da geometria dos constituintes;
- escolha do(s) materiais utilizado(s) em cada corpo de prova, tanto dos substratos como dos defeitos,
- definição das principais propriedades térmicas desses materiais (capacidade térmica, condutividade térmica, densidade);
- definição dos processos físicos que serão considerados para reprodução do comportamento da temperatura (no caso, transferência de calor);
- escolha do tipo e tamanho de malha que será aplicada para solução das equações;
- determinação do intervalo de tempo de observação total da temperatura e o intervalo de exibição das imagens ao longo do tempo total de observação;

A validação do modelo teórico proposto na simulação é muito importante porque serve para saber se ele está reproduzindo fielmente o ensaio real da técnica. Depois de validado é que se torna possível estimar os limites de detecção. Uma boa correlação entre os resultados obtidos pela simulação e pelo ensaio experimental permitirá que o modelo proposto seja considerado validado. Ou seja, a validação é que dirá se o modelo teórico está condizente com o que é observado na prática, pois não seria efetivo criar um modelo e este não apresentar semelhança com a realidade de inspeção da técnica. Uma vez construído um modelo válido de equações, parâmetros como a quantidade, o tipo e a distribuição dos defeitos no material podem ser alterados um número ilimitado

de vezes, e para cada nova configuração é possível avaliar a resposta térmica do material para o ensaio termográfico.

3.2.2. Ensaio Experimentais

3.2.2.1 Obtenção | preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de termografia ativa pulsada foram extraídos do tubo recebido, e os entalhes inseridos usinados na região correspondente a parte interna do tubo, situados em diferentes profundidades. A Figura 11 ilustra o plano de preparação de amostras.

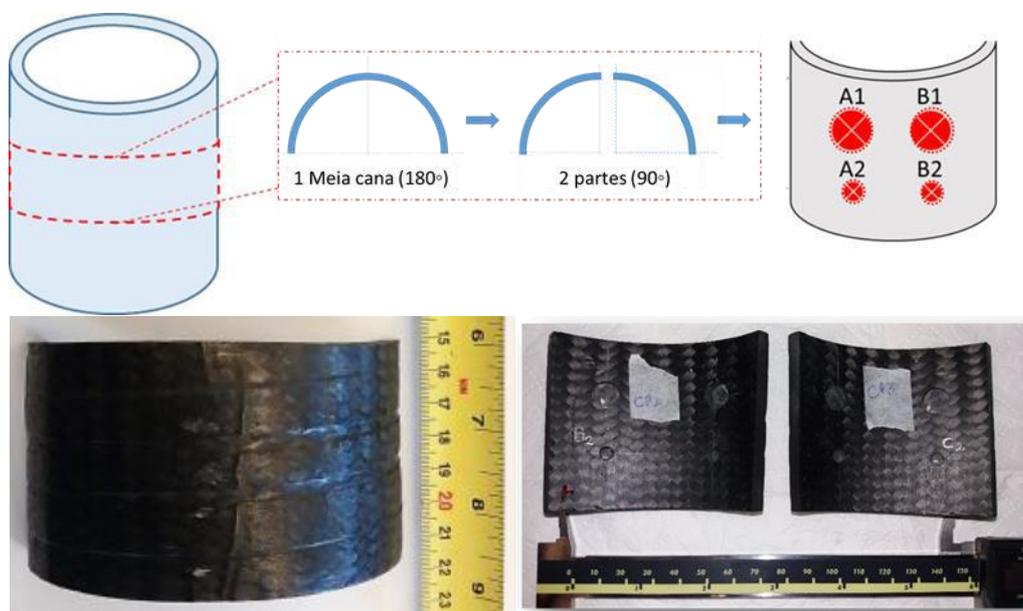


Figura 11 - Esquema representativo do plano de corte das amostras.

Ao todo, foram produzidos quatro corpos de prova, denominados: CP1, CP2, CP3 e CP4; todos contendo defeitos internos, equidistantes e circulares. Na Tabela 3 são apresentadas as especificações e as características de cada amostra. O parâmetro espessura remanescente corresponde a diferença entre a espessura total da parede da amostra e a profundidade onde se inicia o defeito inserido.

Tabela 3 – Características dos defeitos nos CP's

Amostra	Defeito	Diâmetro	Espessura CP	Profundidade do Defeito	Espessura Remanescente
CP1	d1	5,0 mm	5,66 mm	4,38 mm	1,28 mm
	d2	10,0 mm		4,55 mm	1,11 mm
	d3	10,0 mm		2,35 mm	3,31 mm
	d4	10,0 mm		4,24 mm	1,42 mm
CP2	A1	10,0 mm	5,8 mm	4,04 mm	1,76 mm
	A2	5,0 mm		4,03 mm	1,77 mm
	B1	10,0 mm		2,86 mm	2,94 mm
	B2	5,0 mm		3,10 mm	2,70 mm
CP3	C1	10,0 mm	5,6 mm	2,20 mm	3,40 mm
	C2	5,0 mm		2,63 mm	2,97 mm
	D1	10,0 mm		2,13 mm	3,47 mm
	D2	5,0 mm		2,31 mm	3,29 mm
CP4	E1	10,0 mm	5,6 mm	3,06 mm	2,54 mm
	E2	5,0 mm		3,57 mm	2,03 mm
	F1	10,0 mm		2,92 mm	2,68 mm
	F2	5,0 mm		3,26 mm	2,34 mm

4. Resultados e Discussão

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados obtidos a partir de ensaios termográficos feitos por simulação no COMSOL e os dados referentes de resposta térmica apresentada para as condições de ensaio estabelecidas.

Inicialmente, as simulações que representariam os corpos de prova foram feitas utilizando um sólido virtual (construído no próprio *software* COMSOL Multiphysics®), em forma de chapa plana. A construção de sólidos com geometria mais complexa no COMSOL é mais difícil, então após o estudo preliminar nesta configuração geométrica plana, para os demais corpos de prova, optou-se por utilizar o *software SolidWorks* para a construção dos modelos de geometria cilíndrica em 3D com as dimensões dos CP's confeccionados. Esses sólidos virtuais foram então exportados para o COMSOL onde foram feitas as simulações.

A Figura 12 exibe o sólido virtual construído para este estudo inicial, com dimensões 300 mm x 300 mm x 2 mm. Os defeitos inseridos no sólido possuem dimensões variando de 3 mm a 15 mm de diâmetro médio equivalente (\emptyset), conforme mostrado na Tabela 4. Os defeitos são internos, estão situados numa mesma profundidade e foram distribuídos de modo equidistantes uns dos outros e em relação às bordas da placa.

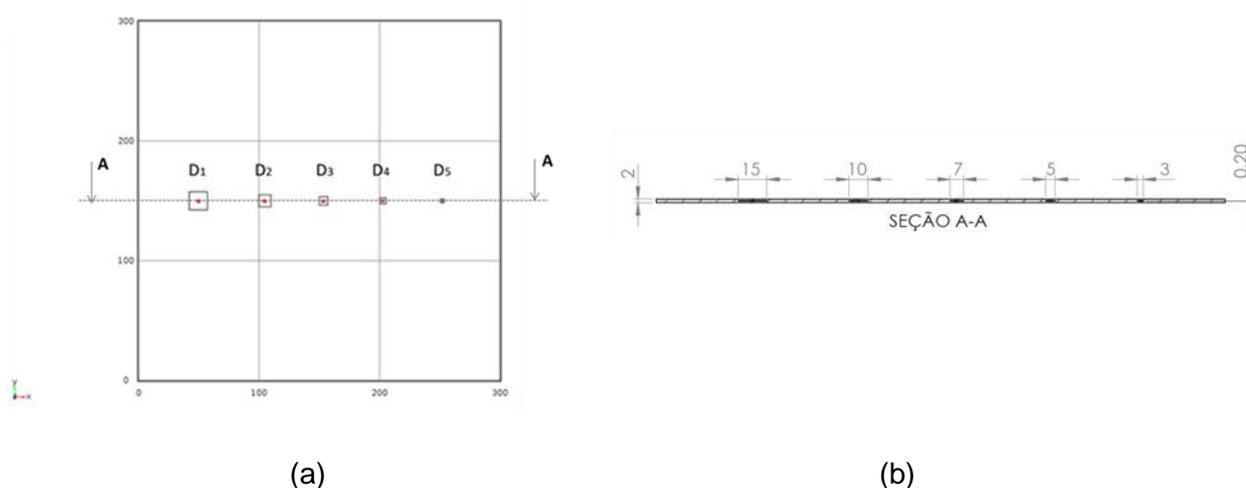


Figura 12 - Geometria criada com COMSOL: (a) vista frontal dos defeitos na placa e (b) vista da seção transversal da placa.

Tabela 4 – Características dos defeitos

Defeito	Geometria	Dimensão	Espessura	Ø equivalente
D1	Quadrado	15 x 15 mm	0,2 mm	15 mm
D2	Quadrado	10 x 10 mm	0,2 mm	10 mm
D3	Quadrado	7 x 7 mm	0,2 mm	7 mm
D4	Quadrado	5 x 5 mm	0,2 mm	5 mm
D5	Quadrado	3 x 3 mm	0,2 mm	3 mm

Para esta configuração apresentada, os materiais escolhidos para representarem os defeitos e a placa foram: o ar e o compósito de fibra de carbono, respectivamente. Os valores utilizados para as propriedades referentes ao material dos defeitos foram os valores disponíveis na biblioteca do *software*. Já para a fibra de carbono, os valores referentes à densidade (ρ), condutividade térmica (κ) e calor específico à pressão constante (C_p) foram fornecidos pela literatura, FERNANDES (2016). O tempo de excitação térmica foi de 10 s e o intervalo de tempo de observação total da temperatura foi de 60 s. A malha escolhida possui tamanho de elemento mais fino, contendo 95675 elementos de domínio, 57992 elementos de limite e 1288 elementos de borda.

Na Figura 13 é apresentado o resultado da simulação computacional realizada neste sólido virtual, ilustrando a distribuição de temperatura na sua superfície ao longo do tempo de ensaio. As regiões mais claras nos termogramas representam as discontinuidades do material. Analisando este resultado é possível observar que todos os cinco defeitos foram detectados, indicando desta forma que a técnica é capaz de detectar defeitos nos quais o diâmetro médio equivalente varia de 3 mm a 15 mm e com profundidade de 1 mm.

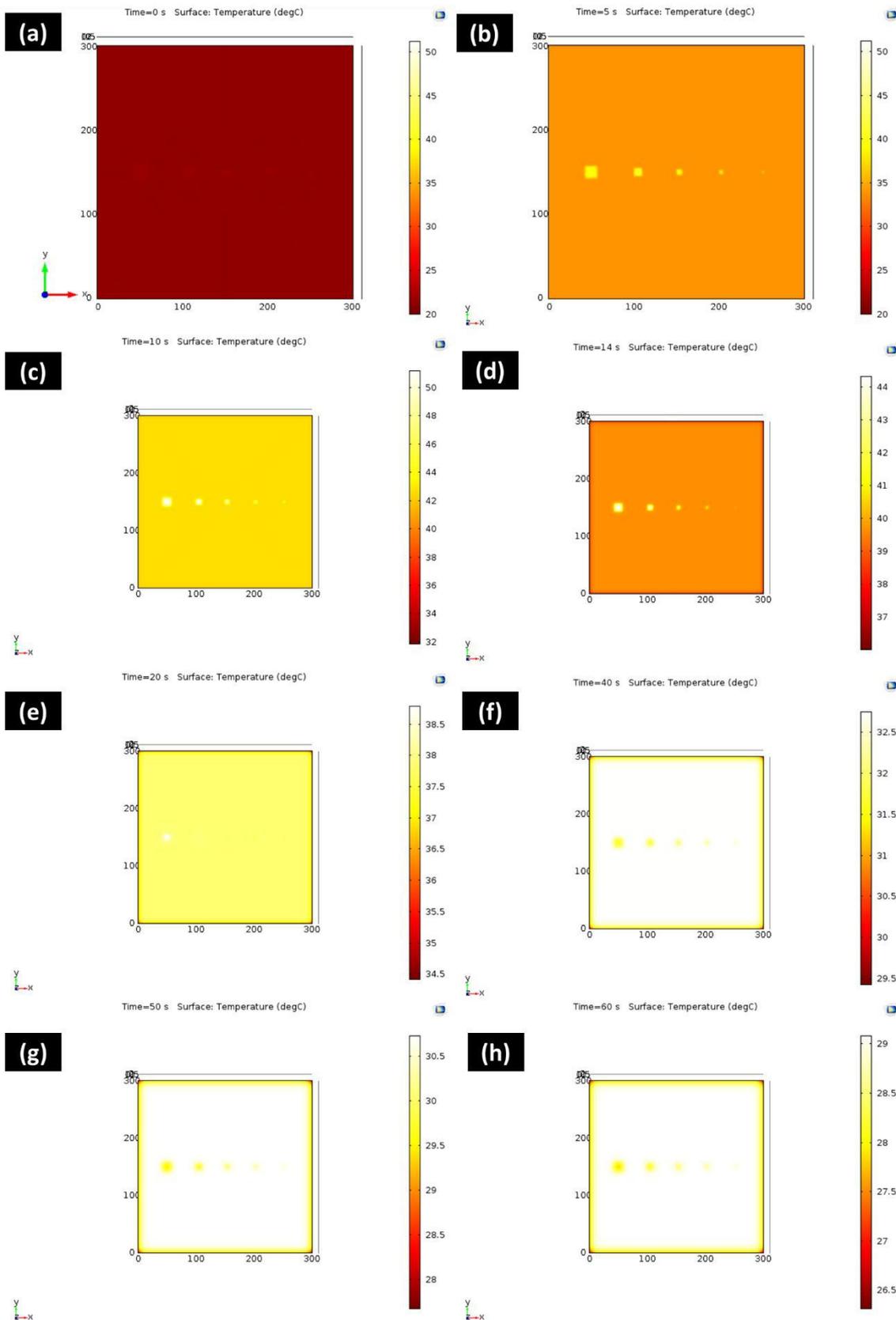


Figura 13 - Imagem ilustrando a distribuição de temperaturas na superfície do sólido virtual nos seguintes tempos: (a) 0s, (b) 5s, (c) 10s, (d) 14s, (e) 20s, (f) 40s, (g) 50s e (h) 60s.

Além da análise da influência do diâmetro equivalente e profundidade dos defeitos também foi avaliado a influência destes parâmetros na evolução de temperatura e no contraste térmico obtido para cada um dos defeitos presentes neste sólido virtual. Na Figura 14 são apresentadas as curvas de evolução de temperatura ao longo do tempo para cada um dos defeitos avaliados neste sólido virtual e na Figura 15, são apresentadas as curvas de evolução do contraste térmico, calculadas a partir da diferença entre a temperatura no ponto (área) considerado defeito e a temperatura no ponto (área) considerado de referência na placa; para os defeitos D1, D2, D3, D4 e D5.

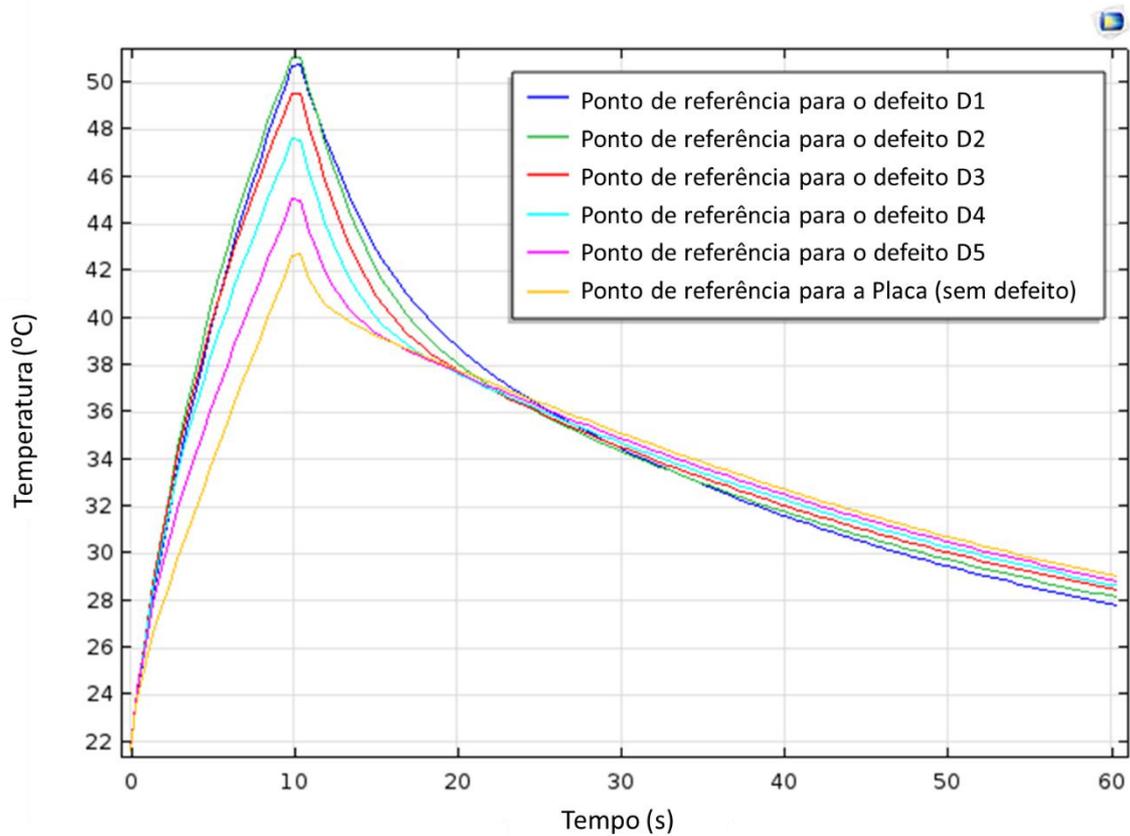


Figura 14 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo obtidas pela simulação computacional para os cinco defeitos e para uma região sem defeito contido neste sólido virtual

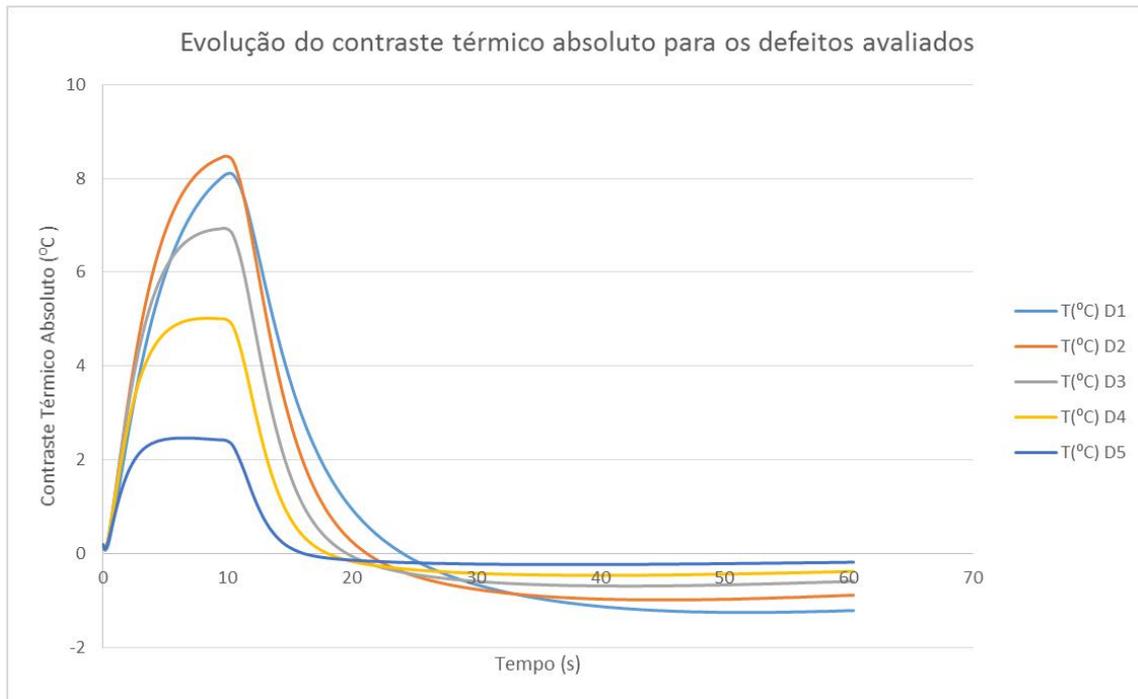


Figura 15 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela simulação computacional para cada um dos cinco defeitos contidos neste sólido virtual.

Além da análise virtual através de imagens, também foi feita uma análise numérica dos dados de temperatura obtidos. A partir do gráfico mostrado na figura 15, fica claro que o parâmetro de área também gera uma influência no valor do contraste térmico dos defeitos. Portanto, foi possível avaliar a relação entre a geometria (dimensão) do defeito e a possibilidade de detecção da técnica.

Nos modelos virtuais contendo maior quantidade de defeitos, seria suficiente apresentar apenas o resultado (imagem) de melhor contraste térmico para o defeito mais crítico, ou seja, aquele de menor tamanho, pois se o menor tamanho de defeito pode ser detectado naquele tempo de inspeção, então defeitos de tamanho superior também o serão.

4.1. Amostra CP1

4.1.1. Ensaio Experimental CP1

Neste item serão apresentados os resultados obtidos pela modalidade de Termografia Ativa Pulsada na forma de imagens termográficas para a amostra CP1, sem nenhum tipo de pós-processamento aplicado. O contraste térmico entre os defeitos e a região sem defeito no corpo de prova foi calculado a partir da sequência de imagens termográficas obtidas para o ensaio. Foi escolhida a imagem que apresentou o maior valor de contraste térmico dentro da sequência.

Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros referentes às condições do ambiente no momento de realização do ensaio e às configurações do teste de termografia ativa pulsada. Foram adotados para propriedades físicas da fibra de carbono, valores utilizados no trabalho de PEETERS *et al.* (2017).

Tabela 5 - Parâmetros referentes às condições adotadas no ensaio experimental CP1.

Ensaio Experimental CP1	
T ambiente	303,15 K
T inicial material CFRP	298,55 K
Umidade	34%

A seguir, será apresentado o termograma de maior contraste térmico para o corpo de prova em estudo. A imagem termográfica foi exportada utilizando a paleta de cores RAINBOW (os pixels são apresentados em cores na escala RGB), contida no próprio *software* Altair de aquisição da sequência.

A Figura 16 apresenta a imagem termográfica obtida para o corpo de prova CP1, com ensaio termográfico sendo realizado na superfície oposta àquela que contém os defeitos inseridos. Através da análise desta imagem, é possível observar que três dos quatro defeitos inseridos no corpo de prova foram detectados.

O defeito d3 não foi detectado nessas configurações de ensaio. Essa limitação provavelmente se deve a profundidade deste defeito em relação à superfície do corpo de prova que foi inspecionada. Este resultado não teve como base apenas uma única observação. Muitas inspeções foram realizadas para o mesmo CP, em dias diferentes, com condições ambientais de temperatura atmosférica e umidade variadas, e em todos os ensaios houve reprodutibilidade deste resultado. Portanto pode-se afirmar que 3,31 mm de espessura remanescente de parede é um valor não detectável

experimentalmente por termografia ativa pulsada em material CFRP para defeitos de 10,0 mm de diâmetro.

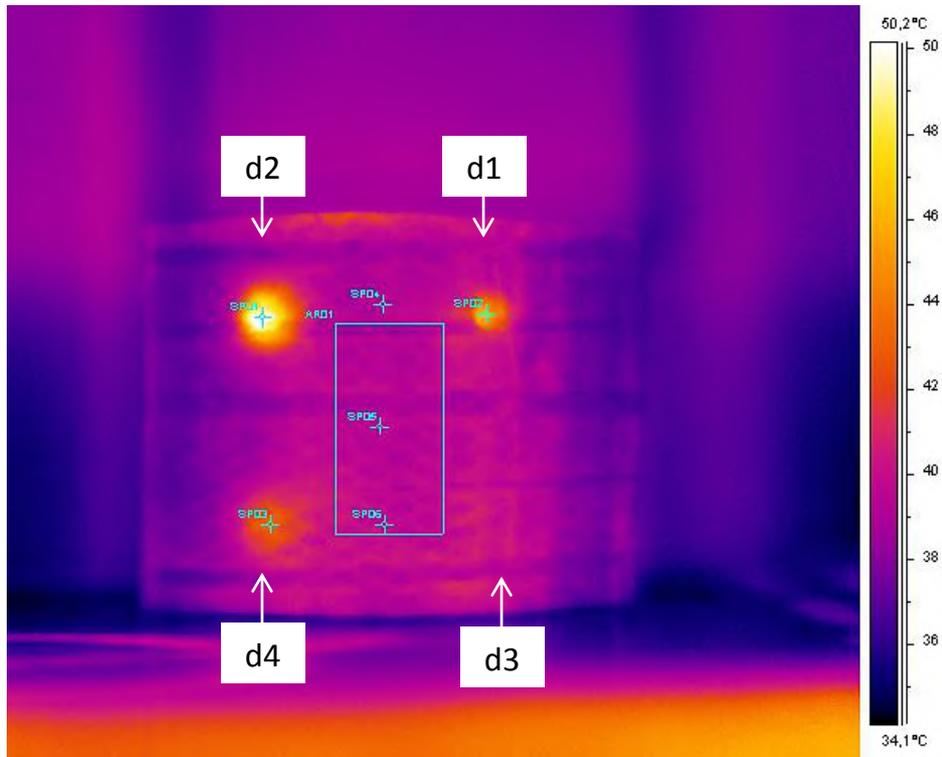


Figura 16 - Imagem termográfica de melhor contraste obtida para o CP1.

Na Figura 17 é apresentado o gráfico de evolução da temperatura ao longo do tempo obtido para o ensaio experimental do corpo de prova CP1. As curvas correspondem a cada um dos defeitos inseridos e a uma região central sem defeito na amostra.

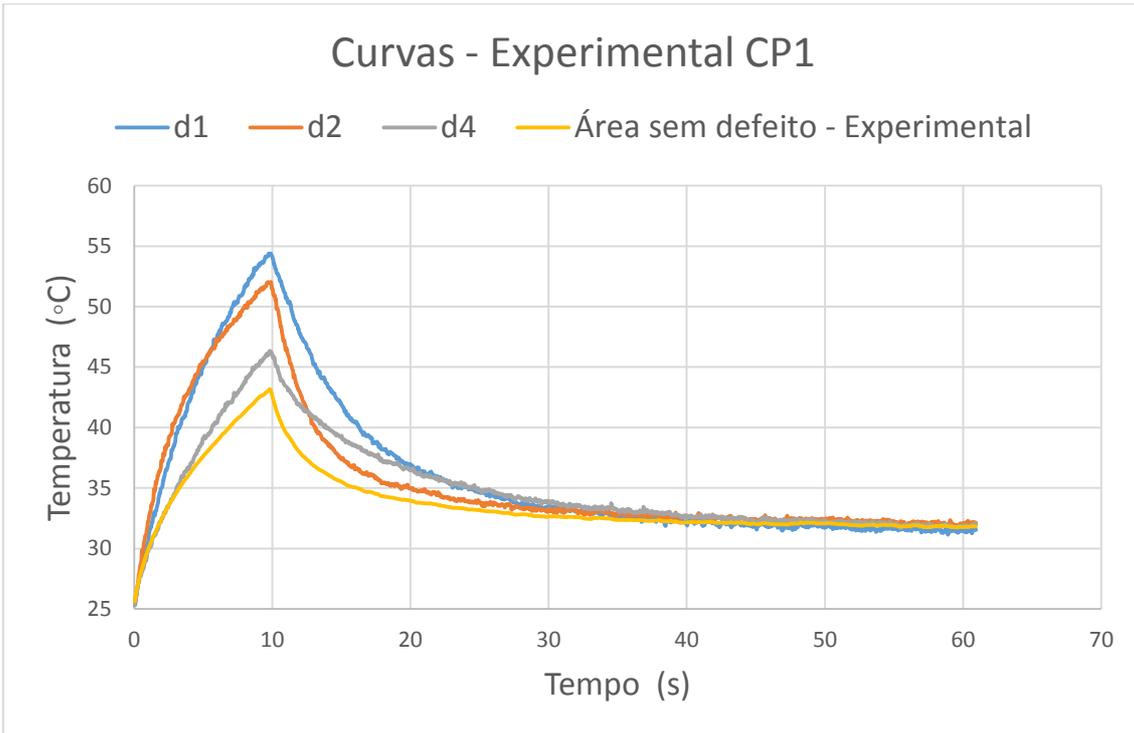


Figura 17 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo para o ensaio termográfico na amostra CP1.

Na Figura 18 são apresentadas as curvas de evolução do contraste térmico absoluto, calculadas a partir da diferença entre a temperatura no ponto considerado defeito e a temperatura no ponto considerado de referência na região central da amostra; para os defeitos d1, d2, e d4.

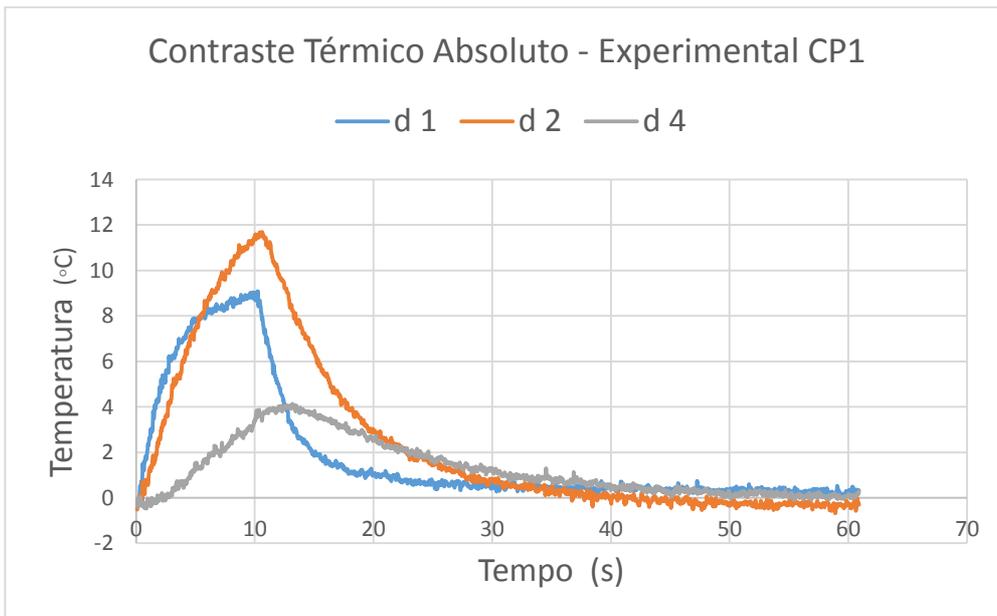


Figura 18 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela termografia ativa pulsada para cada um dos defeitos contidos na amostra CP1.

A curva correspondente ao defeito d4 apresenta o menor valor de pico para o contraste térmico absoluto dentre as demais, aproximadamente 4°C, mas ainda assim foi possível considerar este defeito detectável.

4.1.2. Simulação Computacional CP1

O resultado obtido para simulação computacional do sólido virtual CP1 é apresentado na Figura 19, ilustrando a distribuição de temperaturas na superfície do corpo de prova para um tempo de observação $t = 20$ s ao longo da sequência. Os parâmetros e configurações do ensaio seguiram os valores descritos na Tabela 5, sendo o parâmetro adotado para construção da malha no modelo *mesh - Size Extremely fine*.

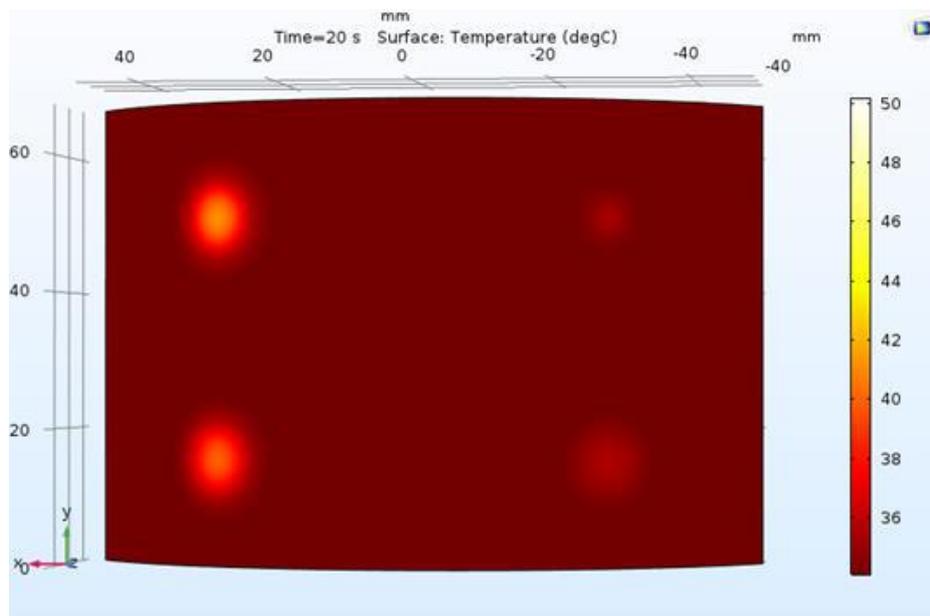


Figura 19 - Imagem ilustrando a distribuição de temperaturas do CP1 na simulação do modelo para o tempo de 20 s.

Analisando os resultados obtidos pela simulação computacional é possível observar que todos os defeitos foram detectados. As curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo para a simulação na amostra CP1 são apresentadas na Figura 20.

O valor do contraste térmico absoluto para a região dos defeitos d1, d2, d3 e d4 também foi calculado e as curvas correspondentes a cada defeito são apresentadas na Figura 21.

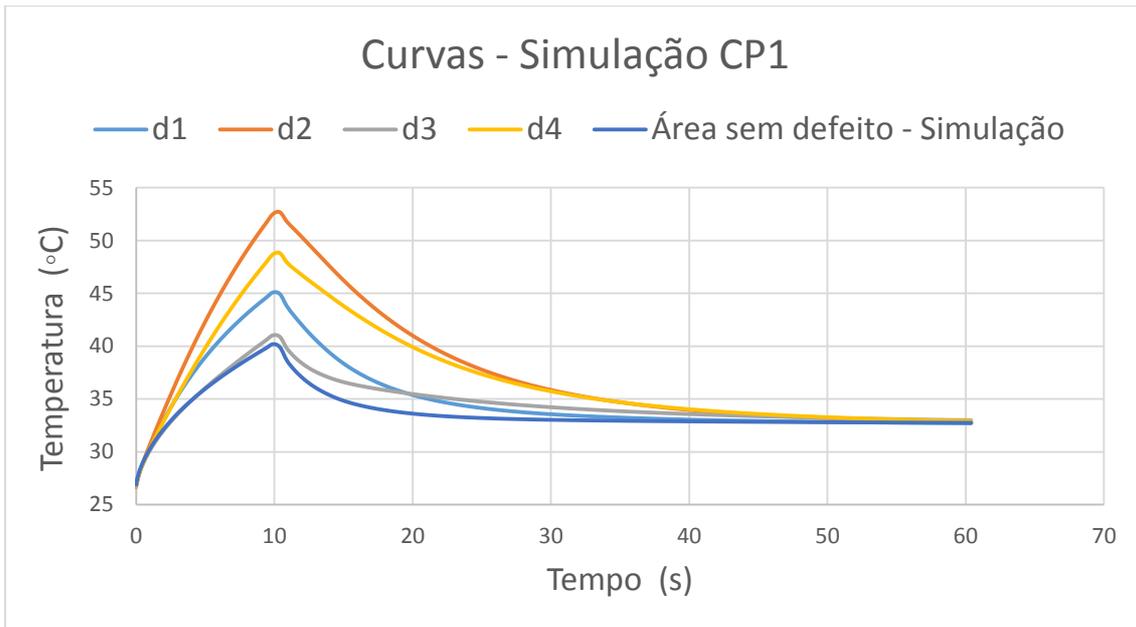


Figura 20 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo obtidas pela simulação computacional para os quatro defeitos e para uma região sem defeito na amostra CP1.

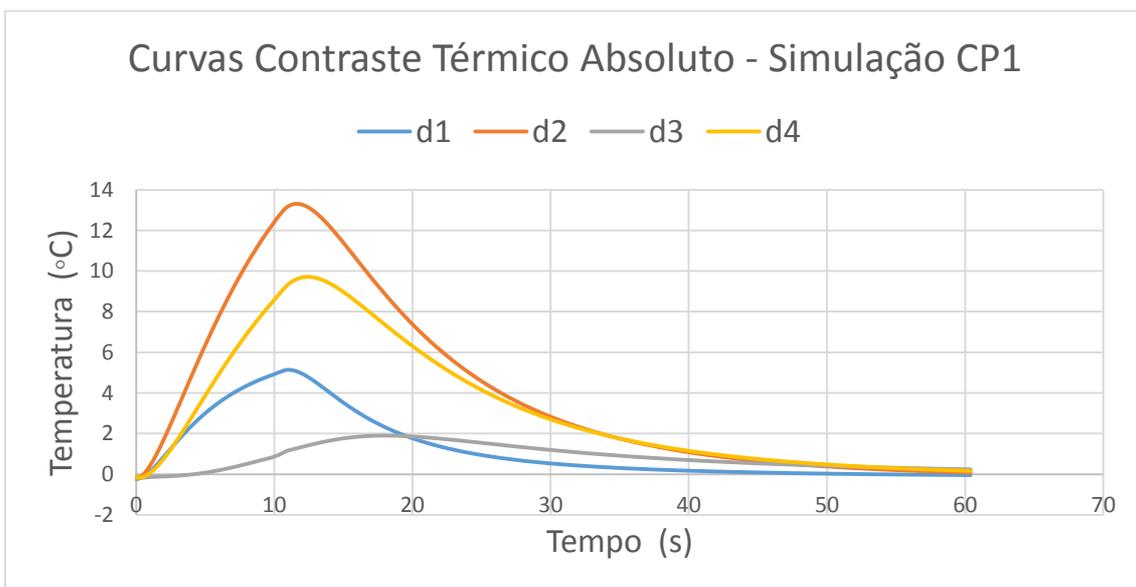


Figura 21 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela simulação para cada um dos defeitos contidos na amostra CP1.

Um aspecto importante a ser destacado é que o defeito 3, não detectado experimentalmente, apresentou o menor valor de contraste térmico em relação aos demais defeitos nas curvas de simulação, sendo o valor máximo de apenas 2°C. Embora no termograma da Figura 19 este defeito 3 tenha sido visualmente percebido para este tempo de análise, o valor de contraste térmico é considerado insuficiente para

ser considerado um defeito detectável pelo modelo experimental pois ficaria no limite do intervalo de erro tolerável de leitura pelo fabricante da câmera (erro de $\pm 2^{\circ}\text{C}$).

Cabe ressaltar também que assim como nos resultados obtidos experimentalmente, os defeitos d1, d2 e d4 presentes no corpo de prova foram detectados. Este aspecto indica uma boa correlação entre o modelo de simulação computacional desenvolvido e os resultados experimentais. As imagens da Figura 22 apresentam os mesmos dados já exibidos nas figuras anteriores para as curvas de temperatura, porém comparados individualmente por defeito e para região sem defeito para o corpo de prova CP1, mostrando a diferença entre as curvas no modelo experimental e de simulação para o corpo de prova CP1.

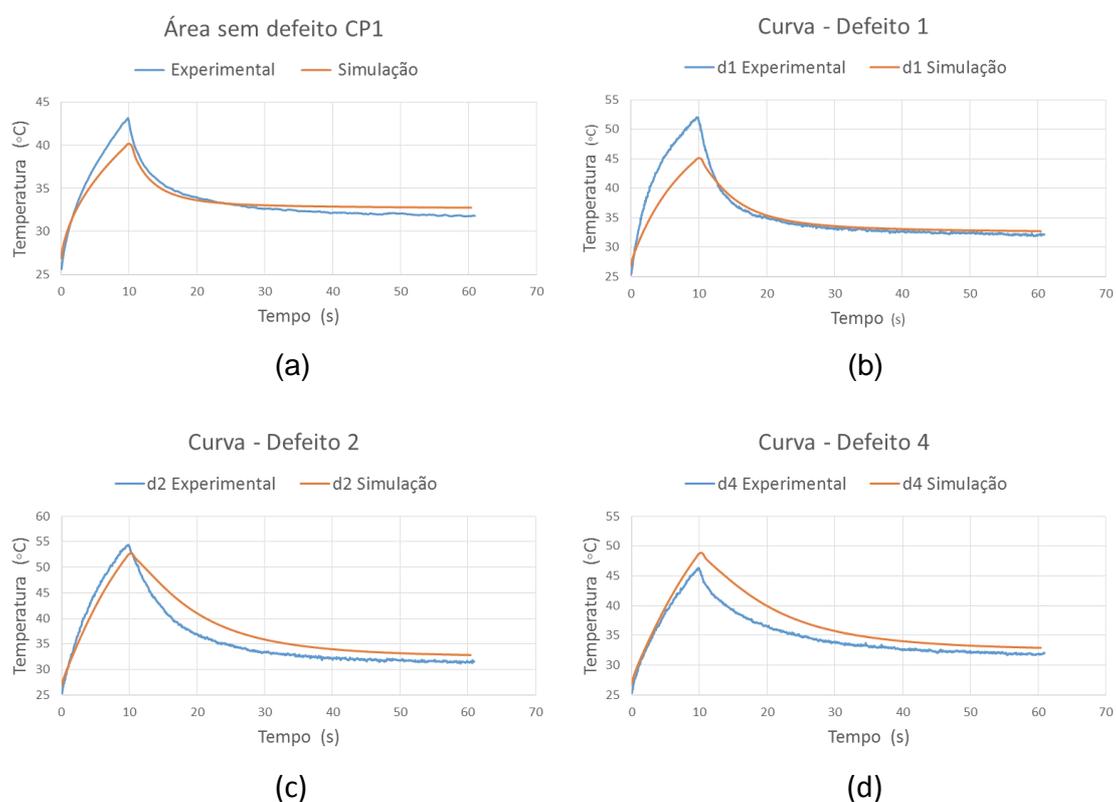


Figura 22 - Comparação entre a evolução da temperatura obtida experimentalmente e pela simulação do CP1 para: (a) região sem defeito, (b) defeito 1, (c) defeito 2 e (d) defeito 4.

A análise comparativa entre as curvas de temperatura experimental e de simulação é feita para a região de arrefecimento da amostra (intervalo de tempo entre 11-60 s). Tendo em vista que os valores de maior contraste térmico são observados na região do resfriamento da amostra, o intervalo de tempo correspondente ao período de aquecimento da amostra (0-10 s) e o valor de temperatura máxima (pico) não são levados em consideração nesta análise.

Afirma-se que há uma boa correlação entre as curvas experimental e de simulação quando as regiões das curvas correspondente ao resfriamento da amostra praticamente se sobrepõem ou apresentam valores muito próximos, facilitando uma comparação visual da escala de temperatura entre os valores obtidos nesta região.

Diferença de temperatura inferior a 5°C entre as curvas, experimental e de simulação, permite afirmar que estas apresentam boa correlação e o modelo pode ser validado. Esta metodologia de análise foi utilizada como parâmetro para todos os corpos de prova inspecionados neste trabalho.

Com base na boa correlação entre os modelos de simulação e experimental para o CP1, foram feitas duas outras simulações com mesmos parâmetros, alterando apenas o tempo de aquecimento, para avaliar se um período maior de exposição do material ao pulso de alta temperatura acarretaria um incremento significativo do valor de contraste térmico observado tanto para o defeito d1, de menor diâmetro, quanto para o defeito mais profundo não detectado experimentalmente d3. Os resultados são apresentados a seguir.

Na Figura 23 (a) e (b) é exibida a distribuição de temperaturas na superfície do corpo de prova para um tempo de aquecimento de (a) $t = 20$ s e (b) $t = 30$ s, respectivamente.

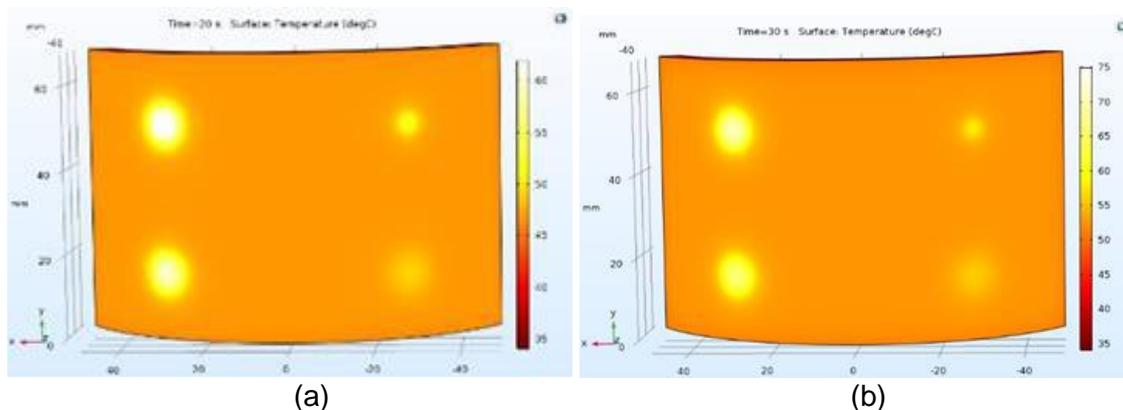


Figura 23 - Imagem da distribuição de temperaturas do CP1 obtidos do modelo para o tempo de aquecimento de: a) 20s e b) 30s.

As curvas de simulação correspondentes à evolução da temperatura ao longo do tempo e de contraste térmico absoluto para os tempos de aquecimento de (a) 20 s e (b) 30 s são exibidas na Figura 24.

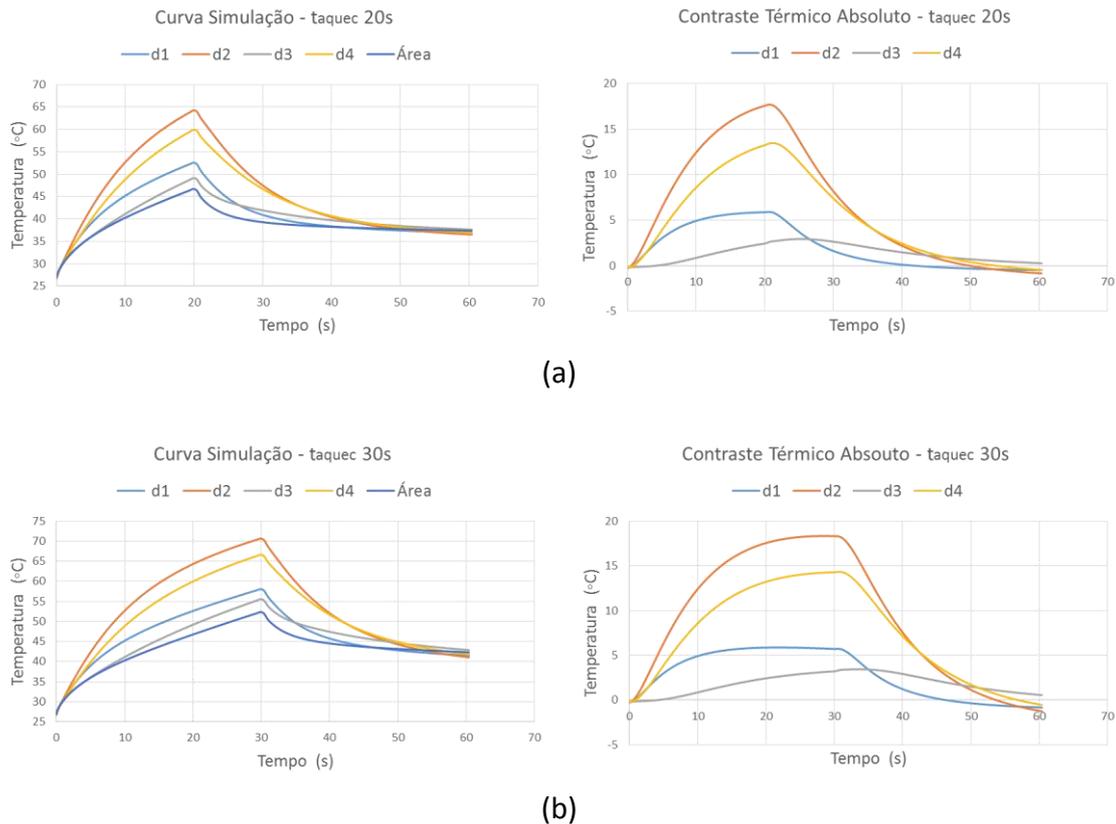


Figura 24 - Curvas da evolução da temperatura e contraste térmico absoluto, obtidas pela simulação computacional para o CP1 com os tempos de aquecimento de: (a) 20s e (b) 30s.

Considerando as curvas de evolução da temperatura para a área livre de defeito e as curvas de evolução da temperatura para o defeito 3, é possível observar que ambas estão muito próximas, tanto para a simulação com tempo de aquecimento igual a 20 s quanto para o tempo de aquecimento de 30 s.

Para as curvas relativas ao contraste térmico absoluto do defeito 3, o valor de pico alcançado em ambos os ensaios acima não sofreu incremento significativo em comparação ao valor de pico obtido para o mesmo defeito no teste com tempo de aquecimento igual a 10 s.

A curva referente ao contraste térmico absoluto do defeito 1, de menor diâmetro, apresentou valores muito próximos de máximo contraste nos tempos de aquecimento de 10 s, 20 s e 30 s, permanecendo com o valor máximo em torno dos 5°C.

Ou seja, os resultados da simulação mostraram que um maior tempo de aquecimento não se justificaria. Desta forma, pode-se afirmar que a melhor configuração de ensaio para inspeção do CP1 pela técnica de termografia ativa, foi utilizando os parâmetros de tempo de aquecimento de 10 s.

4.2. Amostra CP2

4.2.1. Ensaio Experimental CP2

Neste item serão apresentados os resultados obtidos pela modalidade de Termografia Ativa Pulsada na forma de imagens termográficas para a amostra CP2. Foi escolhida a imagem termográfica que apresentou o melhor contraste térmico dentro da sequência de *frames* do ensaio. Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros referentes às condições do ambiente no momento de realização do ensaio e às configurações do teste de termografia ativa pulsada para este corpo de prova.

Tabela 6 - Parâmetros referentes às condições adotadas no ensaio experimental CP2.

Ensaio Experimental CP2	
T ambiente	299,75 K
T inicial material CFRP	300,45 K
Umidade	43%

A Figura 25 apresenta um termograma referente ao ensaio termográfico da amostra CP2, com inspeção realizada na face oposta aos defeitos. O corpo de prova foi apoiado em um suporte e rotacionado em 90° em relação à posição de ensaio utilizada na inspeção do CP1, com o intuito de tentar reduzir os efeitos de reflexão das lâmpadas nas bordas do material devido a sua geometria curvilínea, em uma tentativa de melhorar a qualidade da imagem capturada.

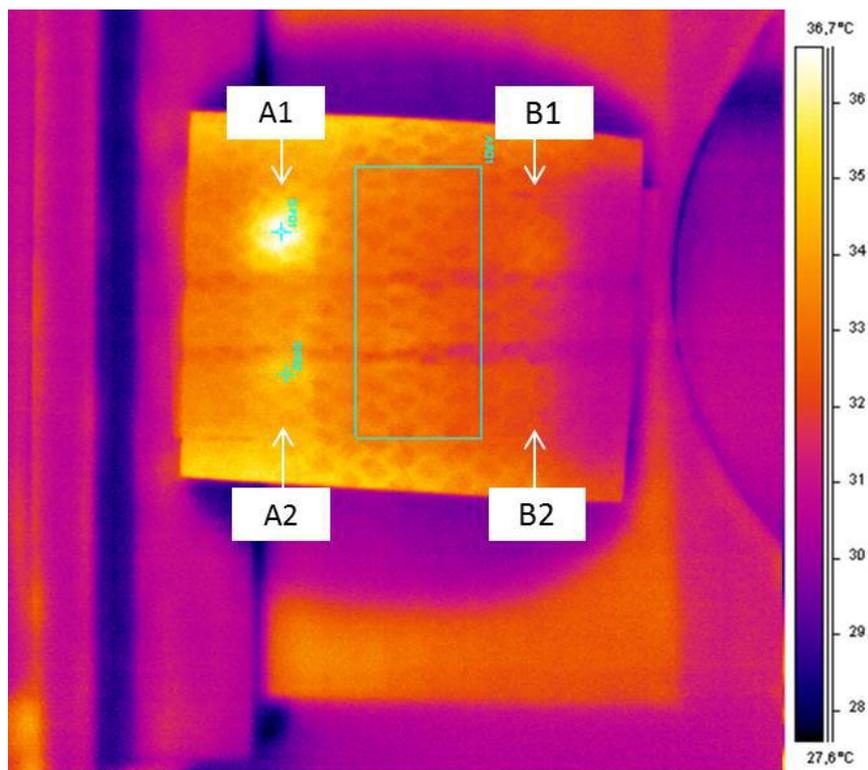


Figura 25 - Imagem termográfica de melhor contraste obtida para o CP2.

Através da análise desta imagem, é possível observar que ela apresenta bom acabamento superficial e que dois dos quatro defeitos inseridos no corpo de prova foram detectados. Os defeitos B1 e B2 não foram detectados para as configurações de ensaio utilizadas neste ensaio. Ambos estão situados numa mesma profundidade, porém possuem diâmetros diferentes. Isto indica que para uma espessura remanescente de parede de aproximadamente 2,8 mm, tanto os defeitos de 5,0 mm quanto os defeitos de 10,0 mm de diâmetro não puderam ser detectados em amostras de compósitos CFRP. Isto sugere que o padrão de detecção observado no CP1 foi mantido, tendo sido detectados defeitos subsuperficiais mais rasos tanto de diâmetro 5,0 mm quanto de 10,0 mm e defeitos mais profundos não detectados.

O defeito A2 apresenta um baixo contraste térmico em relação à região sem defeito da amostra, não sendo claramente visível na imagem. Já o defeito A1 apresenta uma região bem mais clara, o que representa uma descontinuidade detectada. Os defeitos A1 e A2 estão situados numa profundidade de 4,0 mm. Portanto, pode-se afirmar que em uma amostra com 5,8 mm de espessura de parede, o valor de 1,8 mm de espessura remanescente é um valor detectável experimentalmente por termografia ativa pulsada em material CFRP para defeitos de 5,0 mm e de 10,0 mm de diâmetro.

Na Figura 26 é apresentado o gráfico de evolução da temperatura ao longo do tempo obtido para o ensaio experimental do corpo de prova CP2. As curvas correspondem a cada um dos defeitos detectados e a uma região central sem defeito na amostra.

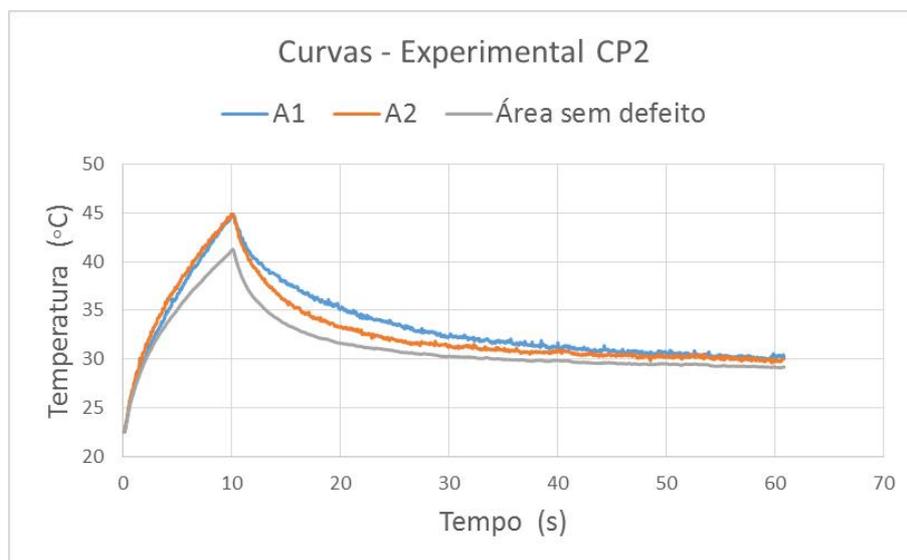


Figura 26 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo para o ensaio termográfico na amostra CP2.

Na Figura 27 são apresentadas as curvas de evolução do contraste térmico absoluto para os defeitos detectados A1 e A2, calculadas a partir da diferença entre a temperatura no ponto considerado defeito e a temperatura no ponto considerado de referência na região central da amostra CP2.

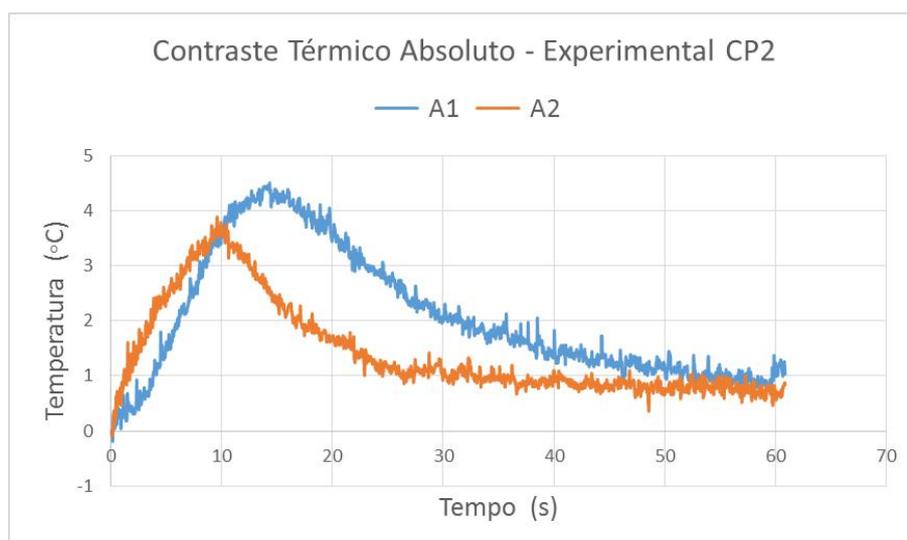


Figura 27 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela termografia ativa pulsada para os defeitos detectados na amostra CP2.

A curva correspondente ao defeito A2 apresenta um menor valor de pico para o contraste térmico absoluto em relação a curva do defeito A1. Estas curvas diferem em menos de 2°C entre si, ao longo da região do gráfico correspondente ao arrefecimento da amostra (no intervalo entre 10-60 s).

4.2.2. Simulação Computacional CP2

O resultado obtido para simulação computacional do sólido virtual CP2 é apresentado na Figura 28, ilustrando a distribuição de temperaturas na superfície do corpo de prova para um tempo de observação $t = 12$ s ao longo da sequência. Os parâmetros e configurações do ensaio seguiram os valores descritos na Tabela 6 e o parâmetro adotado para construção da malha no modelo foi *mesh - Size Extremely fine*.

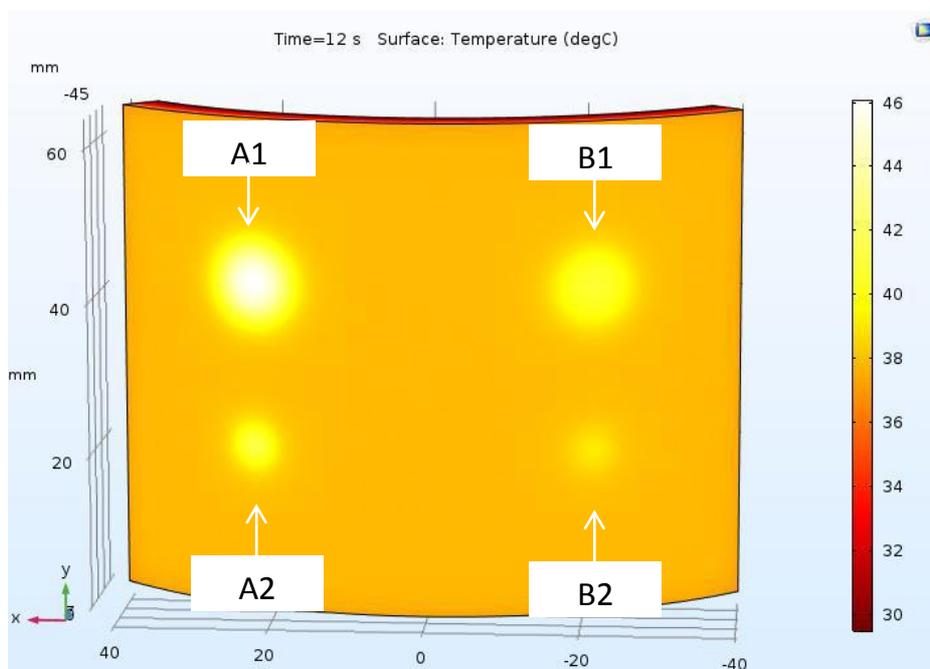


Figura 28 - Imagem ilustrando a distribuição de temperaturas do CP2 na simulação do modelo para o tempo de 12 s.

Analisando os resultados obtidos pela simulação computacional é possível observar que todos os defeitos foram detectados. As curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo para a simulação na amostra CP2 são apresentadas na Figura 29.

O valor do contraste térmico absoluto para a região dos defeitos A1, A2, B1 e B2 também foi calculado e as curvas correspondentes a cada defeito são apresentadas na Figura 30.

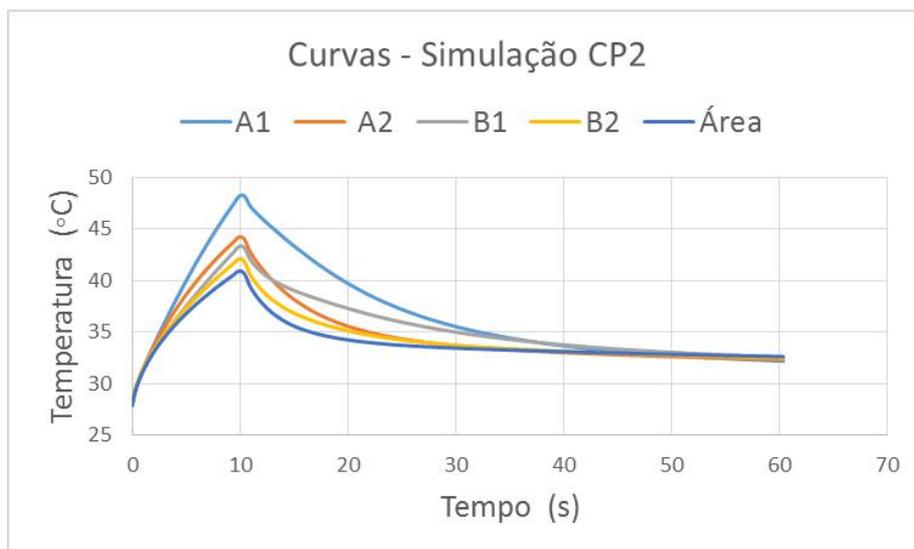


Figura 29 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo obtidas pela simulação computacional para os quatro defeitos e para uma região sem defeito na amostra CP2.

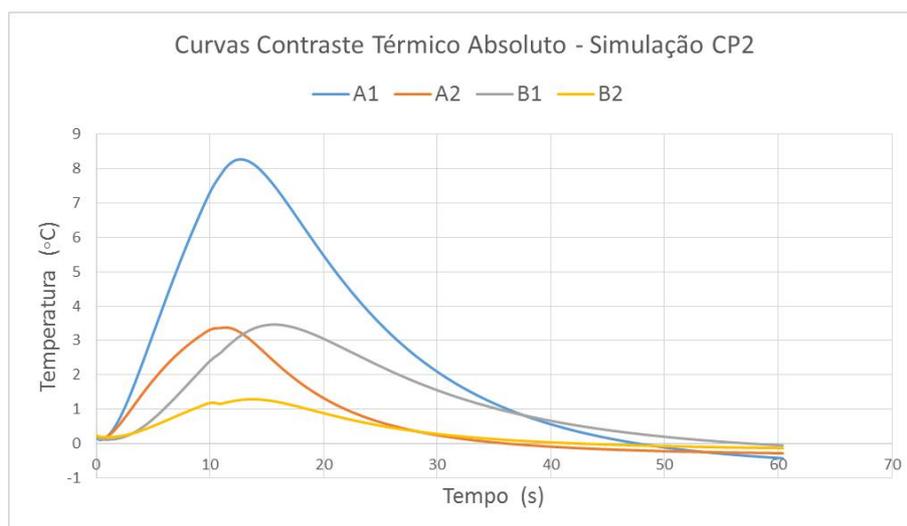


Figura 30 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela simulação para cada um dos defeitos contidos na amostra CP2.

Analisando os dois gráficos acima, percebe-se que os defeitos B1 e B2 não foram detectados experimentalmente nessas configurações de ensaio, apesar da detecção dos mesmos ter sido prevista no modelo de simulação sob as mesmas condições. Uma explicação possível poderia estar relacionada com a posição do corpo de prova ou sua inclinação em relação às lâmpadas utilizadas durante a emissão do pulso para excitação térmica do ensaio termográfico. A geometria curvilínea da superfície da amostra apresentou faixas de reflexão que coincidiam com a região que continha os defeitos, o que dificultou a interpretação dos resultados. A incidência de uma alta taxa de radiação térmica concentrada em uma região da amostra poderia acarretar a geração de

termogramas com escala de cores muito próximas ao longo de todo ensaio nesta região, e a variação da temperatura do defeito localizado abaixo dessa superfície não conseguiria ser detectada satisfatoriamente pela lente da câmera.

Os valores de máximo contraste térmico para as curvas dos defeitos A2 e B1 é praticamente o mesmo. Isto pode significar que no ensaio real, defeitos com 5,0 mm de diâmetro situados a uma profundidade de 4,0 mm, apresentam a mesma resposta térmica de um defeito de 10,0 mm situado a uma profundidade de 2,86 mm.

As imagens da Figura 31 apresentam os mesmos dados já apresentados anteriormente nesta seção referentes às curvas de temperatura, sendo agora comparados individualmente, mostrando a diferença entre as curvas de regiões com defeito e sem defeito, no modelo experimental e no modelo de simulação, para o corpo de prova CP2.

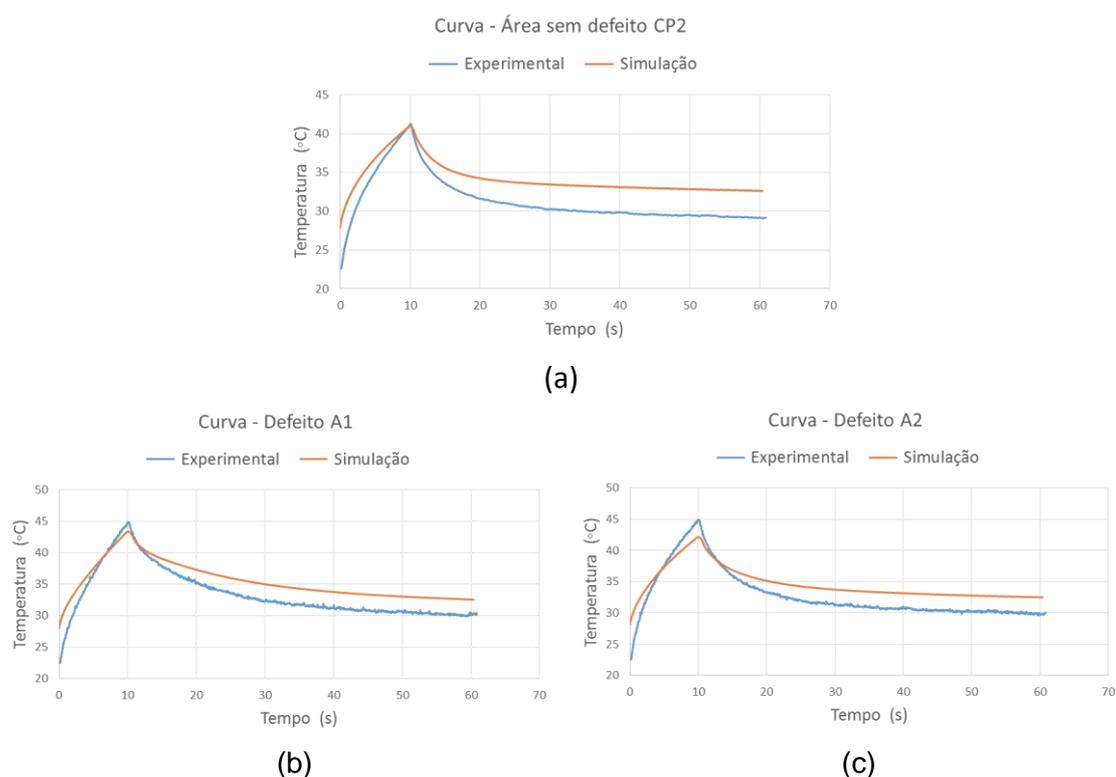


Figura 31 - Comparação entre a evolução da temperatura obtida experimentalmente e pela simulação do CP2 para: (a) região sem defeito, (b) defeito A1 e (c) defeito A2.

Observando os gráficos acima é possível comprovar tanto do âmbito da detecção dos defeitos como também no comportamento da temperatura ao longo do tempo, que o modelo de simulação desenvolvido neste estudo para reproduzir virtualmente os fenômenos físicos presentes no ensaio experimental por termografia ativa pulsada apresenta uma boa correlação com a realidade de inspeção destes materiais. Desta

forma, pode-se afirmar que o modelo proposto neste estudo foi validado para inspeção destes materiais contendo defeitos com geometria de furos.

4.3. Amostra CP3

4.3.1. Ensaio Experimental CP3

Neste item serão apresentados os resultados obtidos pela modalidade de Termografia Ativa Pulsada na forma de imagens termográficas para a amostra CP3. A imagem termográfica escolhida foi a que apresentou o melhor contraste térmico dentro da sequência de quadros do ensaio. Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros referentes às condições do ambiente no momento de realização do ensaio e às configurações do teste de termografia ativa pulsada para este corpo de prova.

Tabela 7 - Parâmetros referentes às condições adotadas no ensaio experimental CP3.

Ensaio Experimental CP3	
T ambiente	300,05 K
T inicial material CFRP	300,15 K
Umidade	43%

A Figura 32 apresenta a imagem termográfica de melhor contraste obtida para o corpo de prova CP3, com ensaio termográfico sendo realizado na superfície oposta a dos defeitos inseridos. Através da análise desta imagem, é possível observar que nenhum dos quatro defeitos inseridos no corpo de prova foram detectados.

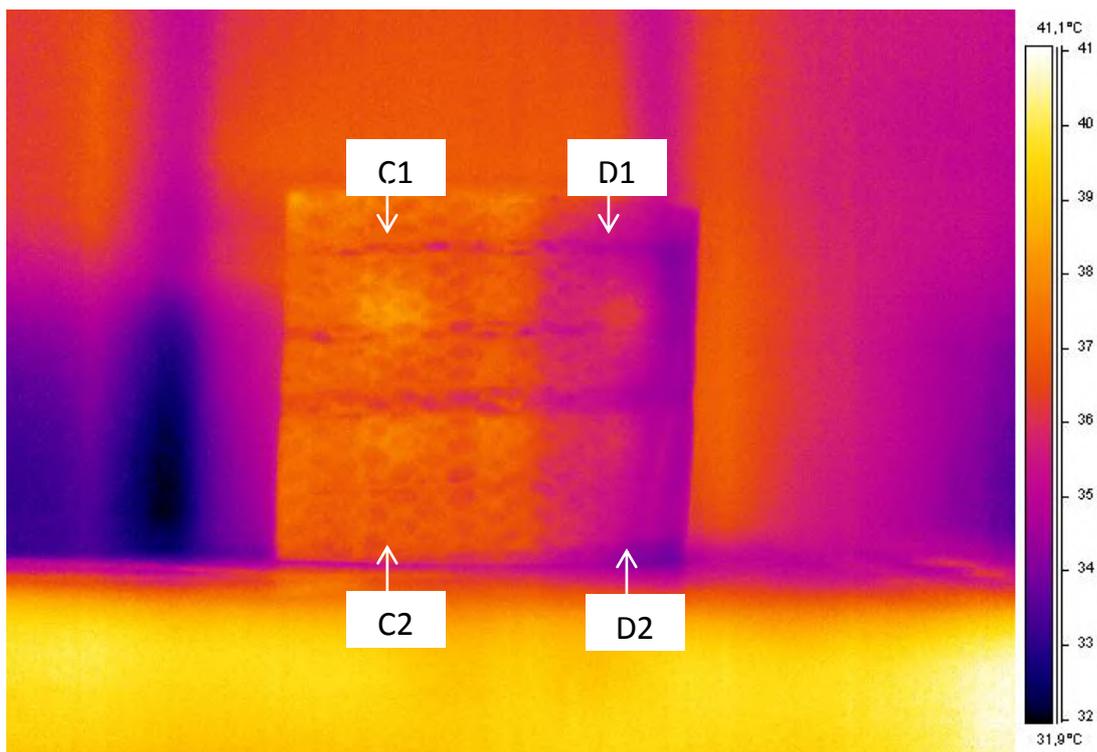


Figura 32 - Imagem termográfica de melhor contraste obtida para o CP3.

Este corpo de prova contém defeitos situados entre 2,2 mm e 2,63 mm de profundidade. Os defeitos usinados C1, C2, D1 e D2 possuem os maiores valores de espessura remanescente a serem detectados, na faixa entre 3,0-3,5 mm.

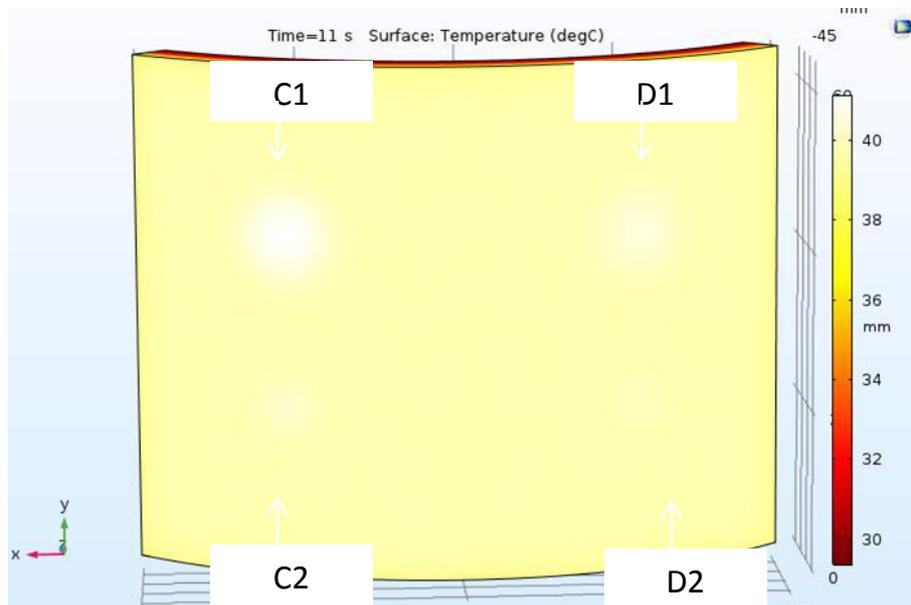
Conforme observado na imagem termográfica acima, nenhuma região representando descontinuidades foi visualmente localizada para que um marcador de temperatura pudesse ser colocado. Sendo assim, o gráfico de evolução da temperatura ao longo tempo na região dos defeitos e as curvas de contraste térmico absoluto não puderam ser construídas para o ensaio experimental da amostra CP3.

Desta forma, pode-se afirmar que nas condições de ensaio estabelecidas não foi possível detectar por termografia ativa pulsada os defeitos de diâmetro 5,0 mm e 10,0 mm situados abaixo da superfície de inspeção, em profundidades superiores a 2,97 mm. Defeitos não detectados para estas profundidades aquém de 3,0 mm, apenas reforçam os resultados de limite de detecção obtidos anteriormente e apresentados para o CP1 e CP2.

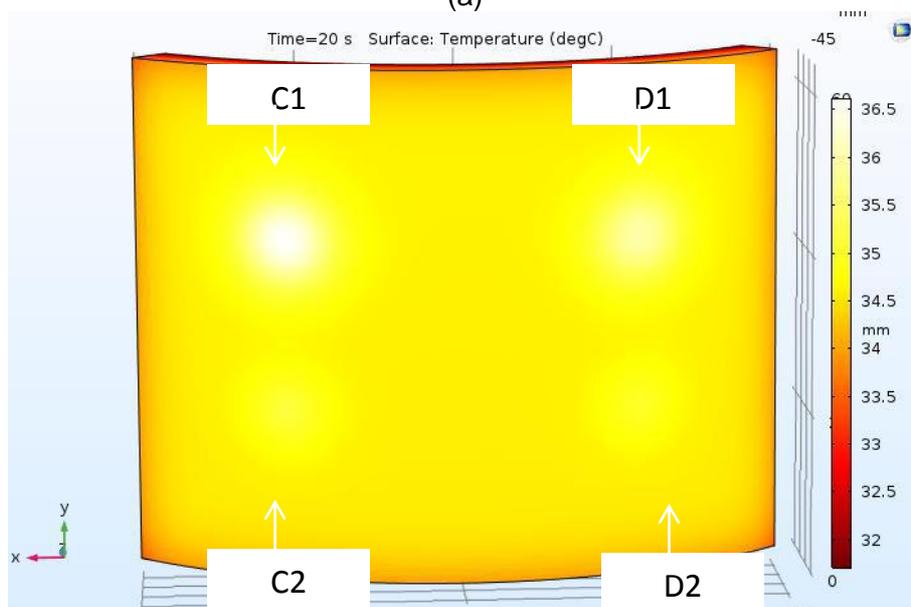
4.3.2. Simulação Computacional CP3

O resultado obtido para simulação computacional do sólido virtual CP3 é apresentado na Figura 33, ilustrando a distribuição de temperaturas na superfície do corpo de prova

para tempos de observação $t = 11$ s e $t = 20$ s, ao longo da sequência. Os parâmetros e configurações do ensaio seguiram os valores descritos na Tabela 7 e o parâmetro adotado para construção da malha no modelo foi *mesh - Size Extremely fine*.



(a)



(b)

Figura 33 - Imagem ilustrando a distribuição de temperaturas do CP3 na simulação do modelo para os tempos de: (a) 11 s e (b) 20 s.

Analisando os resultados obtidos pela simulação computacional é possível observar que apenas o defeito C1 foi detectado. Os defeitos C2, D1 e D2 apresentaram uma coloração na escala muito próxima as de regiões do sólido virtual onde não havia

descontinuidades. No decorrer do tempo de simulação, não houve variação significativa de temperatura entre os marcadores posicionados sobre os defeitos e os situados ao longo da superfície inspecionada, tornando-se difícil a localização desses defeitos. As curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo para a simulação na amostra CP3 são apresentadas na Figura 34. O valor do contraste térmico absoluto para a região dos defeitos C1, C2, D1 e D2 também foi calculado e as curvas correspondentes a cada defeito são apresentadas na Figura 35.

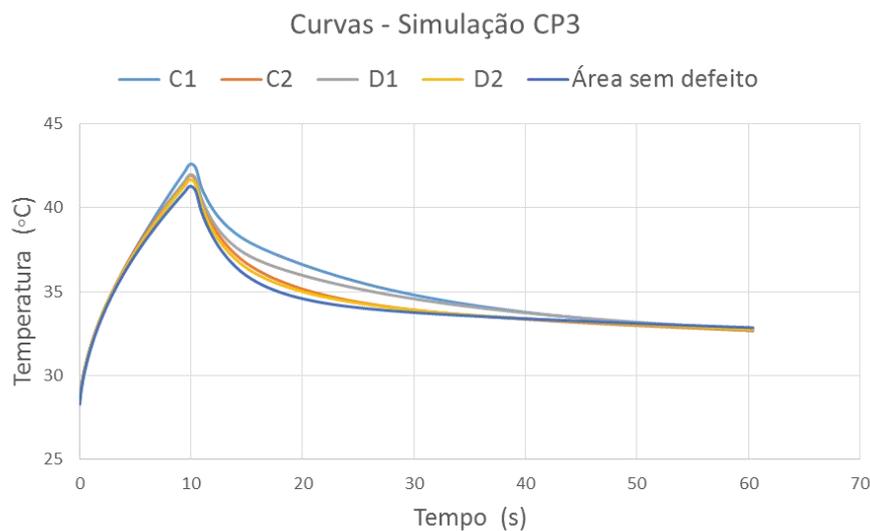


Figura 34 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo obtidas pela simulação computacional para os quatro defeitos e para uma região sem defeito na amostra CP3.

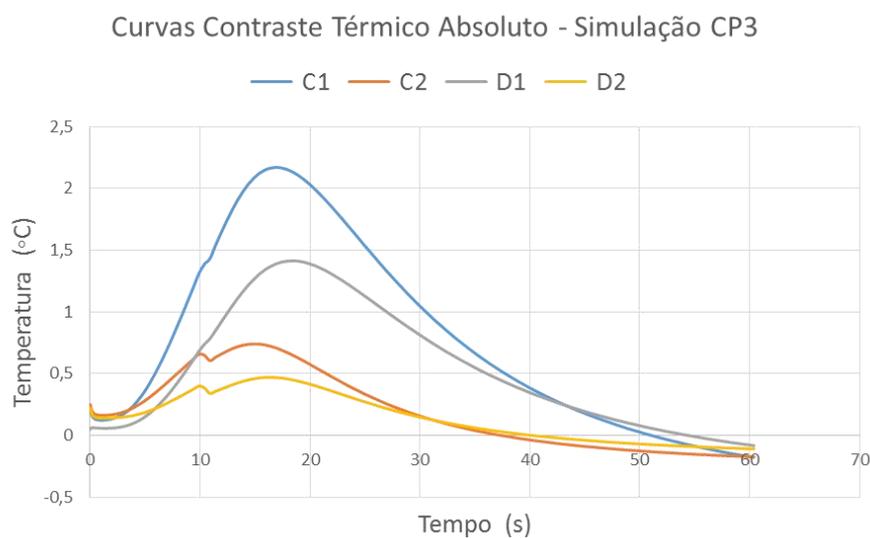


Figura 35 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela simulação para cada um dos defeitos contidos na amostra CP3.

A partir dos resultados obtidos para o gráfico de evolução da temperatura com o tempo, pode-se notar que as curvas de todos os defeitos estão muito próximas da curva correspondente à região sem defeito do sólido. Isto indica que ocorre uma mínima variação local do contraste térmico na superfície do material correspondente a essas regiões que representam defeitos.

As curvas de contraste térmico absoluto obtidas pela simulação do CP3 revelaram valores de temperatura máxima (pico) inferiores a 2°C para todos os defeitos simulados, exceto para o defeito C1, que ficou ligeiramente acima deste patamar.

Dessa forma, os valores encontrados para este modelo de simulação construído e validado, indicam que defeitos subsuperficiais situados em profundidades a partir de 2,97 mm também não puderam ser detectados de maneira satisfatória. Ou seja, os resultados para o ensaio termográfico real e os obtidos pelo modelo de simulação se confirmaram.

4.4. Amostra CP4

4.4.1. Ensaio Experimental CP4

Neste item serão apresentados os resultados obtidos pela modalidade de Termografia Ativa Pulsada na forma de imagens termográficas para a amostra CP4. A imagem termográfica escolhida foi a que apresentou o melhor contraste térmico dentro da sequência de quadros do ensaio. Na Tabela 8 são apresentados os parâmetros referentes às condições do ambiente no momento de realização do ensaio e às configurações do teste de termografia ativa pulsada para este corpo de prova.

Tabela 8 - Parâmetros referentes às condições adotadas no ensaio experimental CP4.

Ensaio Experimental CP4	
T ambiente	298,25 K
T inicial material CFRP	298,15 K
Umidade	36%

A Figura 36 apresenta a imagem termográfica de melhor contraste obtida para o corpo de prova CP4, com ensaio termográfico sendo realizado na superfície oposta a dos defeitos inseridos. Através da análise do termograma, é possível observar que dois dos quatro defeitos foram detectados.

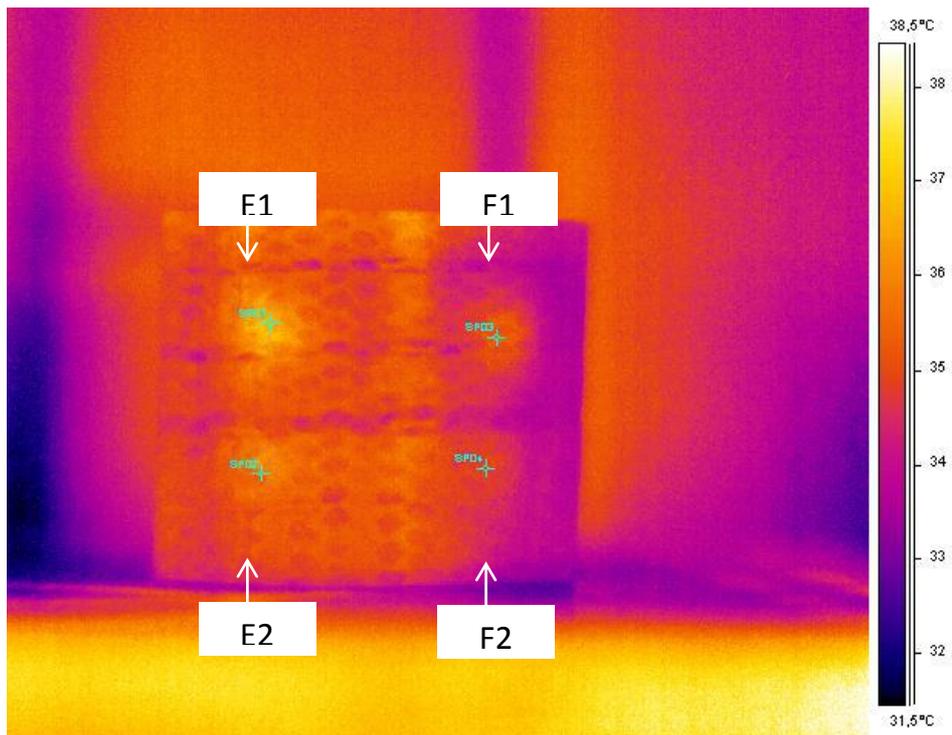


Figura 36 - Imagem termográfica de melhor contraste obtida para o CP4.

Na imagem acima é possível observar que para as configurações de ensaio utilizadas, os defeitos E1 e F1 inseridos no corpo de prova foram detectados com dificuldade e os defeitos E2 e F2 não foram detectados.

Na Figura 37 é apresentado o gráfico de evolução da temperatura ao longo do tempo obtido para o ensaio experimental do corpo de prova CP4. As curvas correspondem a cada um dos defeitos inseridos e a uma região central sem defeito na amostra.

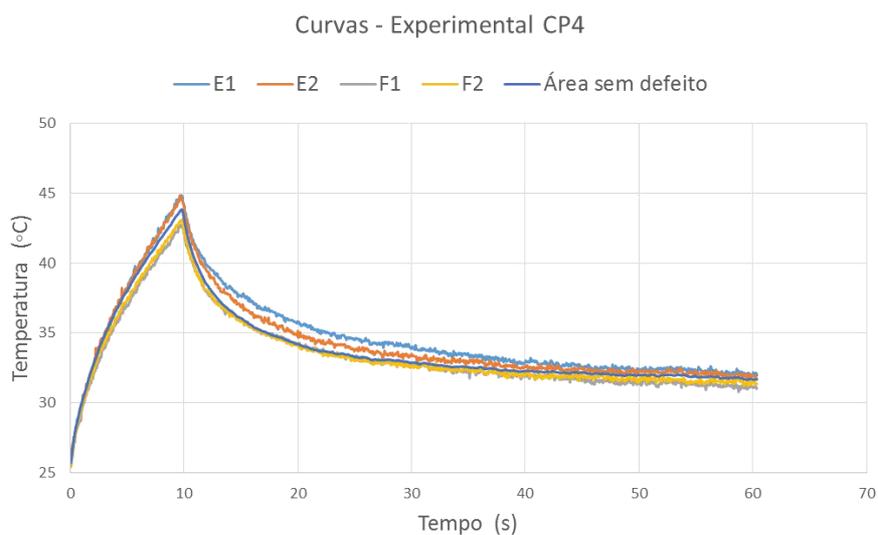


Figura 37 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo para o ensaio termográfico na amostra CP4.

Através da análise das curvas de evolução de temperatura, pode-se perceber que elas praticamente se sobrepõem em boa parte da extensão do ensaio. A diferença de temperatura entre as curvas dos defeitos e a curva da região sem defeito não excede valores de 2,5°C.

Ao longo do trecho correspondente ao intervalo de tempo 10-60 s, as curvas referentes aos defeitos F1 e F2 se tornam praticamente uma só, sobrepondo-se de tal modo que não é possível identificar uma ou outra no gráfico. Comportamento semelhante pode ser notado em relação às curvas referentes aos defeitos E1 e E2, que decrescem sua temperatura mantendo uma diferença inferior a 2°C ao longo do tempo de ensaio.

Estes resultados numéricos confirmam a dificuldade de se conseguir um bom contraste térmico no termograma analisado na Figura 36.

A Figura 38 apresenta as curvas de contraste térmico absoluto para os defeitos detectados experimentalmente no corpo de prova CP4.

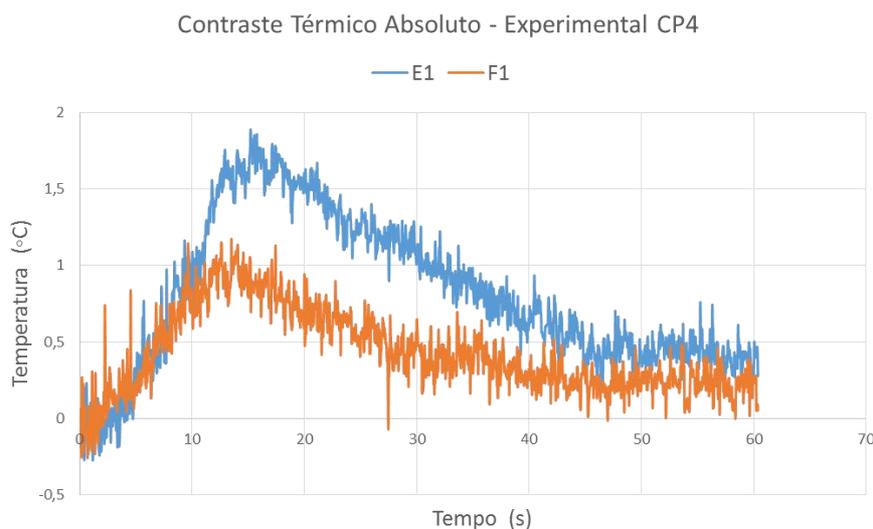
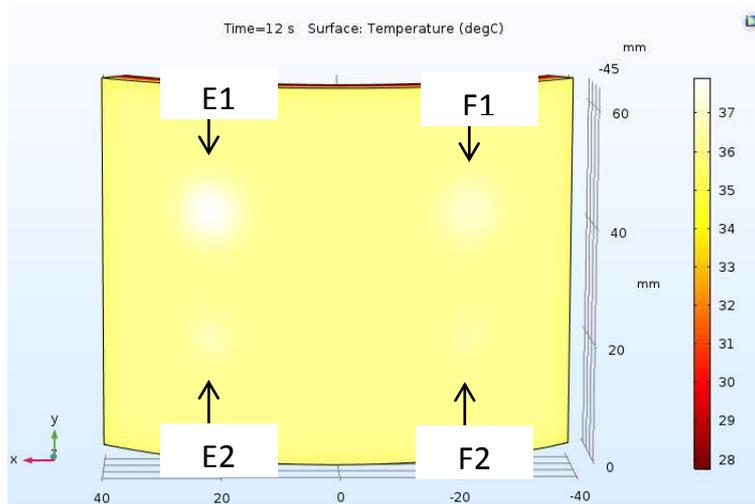


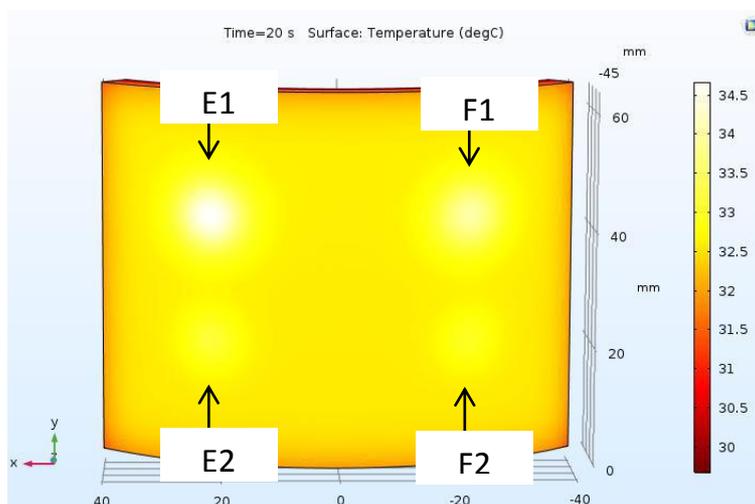
Figura 38 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela termografia ativa pulsada para os defeitos detectados na amostra CP4.

4.4.2. Simulação Computacional CP4

O resultado obtido para simulação computacional do sólido virtual CP4 é apresentado na Figura 39, ilustrando a distribuição de temperaturas na superfície do corpo de prova para tempos de observação $t = 12$ s e de $t = 20$ s, ao longo da sequência. Os parâmetros e configurações do ensaio seguiram os valores descritos na Tabela 8 e o parâmetro adotado para construção da malha no modelo foi *mesh - Size Extremely fine*.



(a)



(b)

Figura 39 - Imagem ilustrando a distribuição de temperaturas do CP4 na simulação do modelo para os tempos de: (a) 12 s e (b) 20 s.

Analisando os resultados obtidos pela simulação computacional é possível observar que apenas o defeito E1 aparece com um bom contraste nas imagens acima. O defeito F1 foi detectado com alguma dificuldade para o tempo de ensaio de 12s e praticamente não foi percebido no tempo de observação de 20s. De acordo com a escala de cores utilizada, os defeitos E2 e F2 apresentaram valores de temperatura muito próximos aos valores de temperatura de regiões do sólido livres de defeito, o que os faz ser classificados como defeitos não detectáveis para estas configurações de ensaio.

As curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo para a simulação na amostra CP4 são apresentadas na Figura 40.

O valor do contraste térmico absoluto para a região dos defeitos E1, E2, F1 e F2 também foi calculado e as curvas correspondentes a cada defeito são apresentadas na Figura 41.

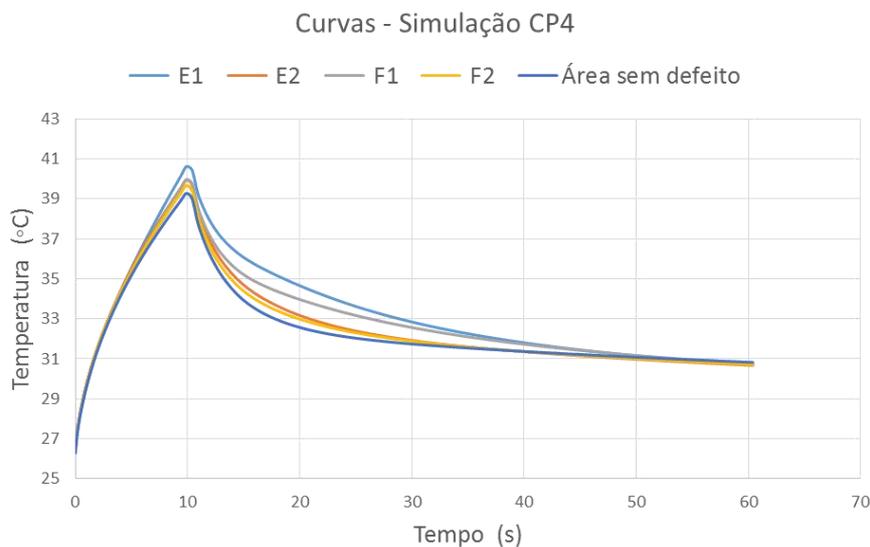


Figura 40 - Curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo obtidas pela simulação computacional para os quatro defeitos e para uma região sem defeito na amostra CP4.

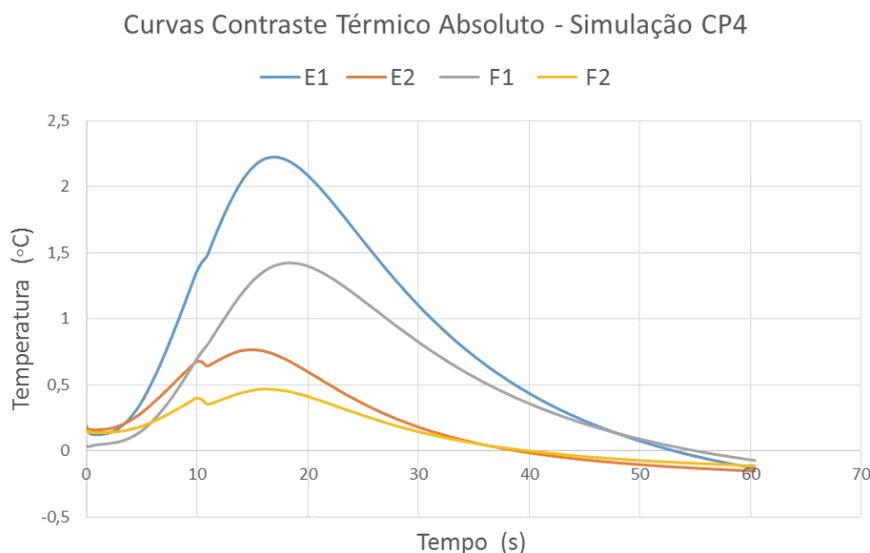


Figura 41 - Curvas de evolução do contraste térmico absoluto ao longo do tempo obtidas pela simulação para cada um dos defeitos contidos na amostra CP4.

Analisando as curvas dos dois gráficos acima, percebe-se que os defeitos F1 e F2 não foram detectados experimentalmente nessas configurações de ensaio e nem pelo modelo de simulação proposto. Apesar da detecção do defeito E2 ter sido possível na

simulação, a curva correspondente ao contraste térmico deste defeito apresentou um máximo valor de contraste térmico absoluto inferior ao valor da curva do defeito F2, que sequer foi detectado.

O defeito E2 possui diâmetro de 5,0 mm e está localizado abaixo de uma espessura remanescente de 2,03 mm, enquanto o defeito F1 possui diâmetro de 10,0 mm e localiza-se a 2,68 mm abaixo da superfície de inspeção. Este comportamento demonstra a influência do diâmetro do defeito no valor do contraste térmico em relação ao aumento de profundidade dos mesmos, confirmando os resultados obtidos no estudo de GROSSO (2016) para o efeito da área e profundidade dos defeitos no valor do contraste térmico.

4.5. Limite para detecção por Termografia Ativa Pulsada para defeitos em CFRP

A partir da avaliação dos resultados obtidos pela técnica de termografia ativa pulsada para amostras CFRP contendo defeitos circulares nas seções anteriores, e para facilitar a interpretação e análise desse conjunto de dados, são apresentados na Tabela 9 os valores de máximo contraste térmico para cada um dos defeitos contidos nas amostras que foram objeto desse estudo. Vale ressaltar que o valor da profundidade do defeito está relacionado com a distância entre a superfície inspecionada e a posição onde o defeito está localizado abaixo dessa superfície. Os campos não preenchidos nas linhas da tabela indicam que estes defeitos reais não foram detectados experimentalmente para a profundidade correspondente.

Tabela 9 - Valores de máximo Contraste Térmico Absoluto obtidos para cada um dos defeitos presentes nos corpos de prova experimental e de simulação.

Defeitos		Valor do máximo contraste térmico absoluto (°C)	
Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)	CP Simulação	CP Experimental
5,0	1,28	5,0	8,93
	1,77	3,36	3,72
	2,03	0,76	1,17
	2,34	0,47	---
	2,70	1,28	---
	2,97	0,74	---
	3,29	0,47	---
10,0	1,11	13,1	11,2
	1,42	9,7	4,02
	1,76	8,18	4,29
	2,54	2,22	1,88
	2,68	1,42	---
	2,94	3,45	---
	3,31	2,0	---
	3,40	2,17	---
	3,47	1,41	---

Correlacionando os valores da posição dos defeitos circulares em CFRP que foram detectados experimentalmente por termografia ativa pulsada e apresentados na Tabela 9, com os resultados alcançados no trabalho de MIRANDA (2011), citado na seção

2.3.7, pode-se notar que a metodologia proposta no presente trabalho foi capaz de detectar defeitos situados em profundidades superiores a 1,0 mm em relação a superfície de inspeção, apresentando ainda um bom acabamento superficial das imagens termográficas obtidas.

Os resultados de detecção para os defeitos subsuperficiais inseridos em CP's de geometria cilíndrica apresentados nesta seção obtiveram resultados de detectabilidade para profundidades com valores maiores dos que os obtidos na literatura por THEODORAKEAS *et.al.* (2014), demonstrando que as configurações adotadas para os ensaios termográficos neste estudo podem ser consideradas satisfatórias.

Os resultados deste trabalho também mostram que a técnica escolhida conseguiu bons resultados, permitindo detectar defeitos de 10 mm de diâmetro até uma profundidade de $\sim 2,5$ mm através de paredes com espessura de aproximadamente 5,5 mm.

4.6. Comparação para detectabilidade de defeitos em CFRP utilizando outras técnicas não destrutivas

Este estudo de detecção dos defeitos em materiais compósitos CFRP se propôs a estimar o limite de detecção da técnica de termografia ativa pulsada para inspeção de defeitos subsuperficiais que podem ocorrer em estruturas produzidas com este material.

Outras técnicas não destrutivas são empregadas nas investigações de defeitos subsuperficiais e de impacto em estruturas CFRP com resultados para limite de detecção de defeitos próximos aos valores obtidos neste trabalho. Em alguns trabalhos de VAVILOV (1998) (2015) (2016), os autores utilizam a modalidade de termografia pulsada em conjunto com ensaios de ultrassom para monitorar o avanço de defeitos em estruturas de CFRP. Algoritmos de simulação computacional também são empregados para modelar e prever resultados de falha para os materiais compósitos e melhorar imagens obtidas durante as inspeções.

A técnica de correntes parasitas também é outra técnica não destrutiva que tem crescido para inspeção de materiais CFRP unidirecionais através de sensores *array* BOULODENINE *et. al.*, (2017). Outros trabalhos como os publicados por DE-GOEJE (1992), utilizam os resultados de detectabilidade obtidos pela técnica para estabelecer

o tipo de defeito quando um composto é danificado, através de confirmação pela comparação de medições de correntes parasitas e ultrassônicas.

Todos esses avanços em investigação de CFRP empregando técnicas não destrutivas avançadas, apenas reforça a importância dos resultados até aqui alcançados e cria um cenário de muitas oportunidades para o desenvolvimento de pesquisas futuras.

5. Conclusão

A modalidade de Termografia Ativa Pulsada foi capaz de detectar defeitos subsuperficiais presentes nos corpos de prova, com inspeção realizada no lado oposto a superfície na qual foram inseridos os defeitos. A partir dos resultados obtidos nesta modalidade foi possível observar que a geometria dos defeitos como também a sua profundidade são fatores que interferem na detecção. Isto confirma que a influência do diâmetro também é um fator que interfere na detecção, e não somente a localização em relação à superfície inspecionada.

Através da comparação entre os resultados obtidos pelo modelo criado utilizando a simulação computacional com os dados obtidos experimentalmente para as amostras CP1, CP2, CP3 e CP4, observou-se uma elevada semelhança entre as duas metodologias. Analisando os gráficos comparativos para cada defeito detectado nos corpos de prova deste estudo, é possível observar que as pequenas diferenças de temperatura entre as curvas obtidas pela simulação e experimentalmente na região correspondente ao arrefecimento da amostra, podem ser atribuídas à influência do ambiente externo. No entanto, esta diferença não deve ser considerada significativa uma vez que seu valor é próximo ao erro tolerável de leitura da câmera termográfica utilizada nos ensaios experimentais de termografia ativa (o fabricante considera erro de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 2\%$ do valor da leitura).

Desta forma, pode-se concluir que essa pequena diferença de temperatura entre as curvas não interferiu significativamente, tendo-se ainda uma ótima correlação entre o comportamento térmico obtido experimentalmente e por simulação. Esta constatação permitiu a validação do modelo de simulação computacional nos quatro corpos de prova avaliados no estudo. Com estes resultados foi possível inferir que a técnica de Termografia Pulsada apresentou um limite de detecção real para defeitos de 10 mm de diâmetro com espessura remanescente até 2,54 mm e para defeitos de 5 mm de diâmetro, o limite de espessura remanescente observado foi de 2,03 mm.

6. Propostas para Trabalhos Futuros

Como sugestão para continuidade do estudo desenvolvido neste trabalho, propõe-se:

- Utilizar metodologias de pós-processamento de imagens como uma ferramenta para melhorar o contraste térmico dos termogramas obtidos nos ensaios termográficos, visando ganhar definição nas regiões dos contornos dos defeitos e auxiliar no seu dimensionamento;
- Continuar os ensaios experimentais em CFRP utilizando outra(s) modalidade(s) de termografia para avaliar qual a modalidade mais propícia para utilização na indústria;
- Confeção de um corpo de prova com defeitos de diferentes geometrias inseridos, simulando falha de aderência no material, para conhecer o comportamento térmico através da evolução da temperatura neste tipo de defeito;
- Estudar a partir do modelo de simulação computacional desenvolvido e validado neste trabalho, novos ajustes tanto para escolha dos materiais CFRP quanto para as configurações de ensaio em corpos de prova com geometria curvilínea;
- Utilizar outra técnica de ensaio não destrutivo, complementar, para tentar ampliar o limite de detecção de defeitos em CFRP;
- Pesquisar sobre automatização do processo de inspeção termográfica para materiais compósitos na indústria.

7. Referência Bibliográfica

AVDELIDIS, N.P., ALMOND, D.P., DOBBINSON, A., *et al.*, "Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT", *Progress in Aerospace Sciences*, v. 40, pp. 143-162, 2004.

BOULLOUDENINE, A., FELIACHI, M., LATRECHE, M., "Development of circular arrayed eddy current sensor for detecting fibers orientation and in-plane fiber waviness in unidirectional CFRP." *NDT & E International*, v. 92, p. 30-37, 2017.

CALLISTER, W.D., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2002.

CÂNDIDO, G.M., REZENDE, M.C., DONADON, M.V., *et al.*, "Fractografia de compósito estrutural aeronáutico submetido à caracterização de tenacidade à fratura interlaminar em Modo I", *Polímeros*, v. 22, n. 1, pp. 41-53, 2012.

CASTANEDO, C.I., TARPANI, J.R., MALDAGUE, X.P.V., "Nondestructive testing with thermography", *European journal of Physics*, v.34, pp. 91-109, 2013.

CHAWLA, K.K., *Composite Materials*. 1 ed. New York, Springer-Verlag, 1987.

CHENG, L., TIAN, G.Y., "Surface Crack Detection for Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Materials Using Pulsed eddy Current Thermography", *IEEE Sensors Journal*, v. 11, n. 12, pp. 3261-3268, 2011.

DE GOEJE, M. P., WAPENAAR, K. E. D., "Non-destructive inspection of carbon fibre-reinforced plastics using eddy current methods." *Composites*, v. 23, n. 3, p. 147-157, 1992.

FERNANDES, H., ZHANG, H., FIGUEIREDO, A., *et al.*, "Carbon fiber composites inspection and defect characterization using active infrared thermography: numerical simulations and experimental results", *Applied Optics*, v. 55, n. 34, 2016.

GAUTAM, M., POTLURI, P., KATNAM, K.B., *et al.*, "Hybrid composite wires for tensile armours in flexible risers: manufacturing and mechanical characterization", *Composite Structures*, v. 150, pp. 73-83, 2016.

GENEST, M., "Pulsed thermography for nondestructive evaluation and damage growth monitoring of bonded repairs", *Composite Structures*, v. 88, pp. 112-120, 2009.

GRIFFITHS, B. Boeing sets pace for composite usage in large civil aircraft. *High Performance Composites*, v. 5, n. 1, 2005. Acesso em: 24 fevereiro 2017.

GROSSO, M., *Detecção de Defeitos em Aços com Revestimentos Anticorrosivos Através da Técnica de Termografia aliada ao Emprego de Simulação Computacional*. Tese de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

GROSSO, M., LOPEZ, J.E.C., SILVA, V.M.A., et al., "Pulsed thermography inspection of adhesive composite joints: computational simulation model and experimental validation", *Composites Part B*, v. 106, pp. 1-9, 2016.

GUO, X., VAVILOV, V., "Pulsed thermographic evaluation of disbonds in the insulation of solid rocket motors made of elastomers", *Polymer Testing*, v. 45, pp. 31-40, 2015.

HALE, J. Boeing 787 from the ground up. *Aero*, v. 4, n. 24, p. 7, 2006. Acesso em 24 fevereiro 2017.

HUNG, Y.Y., CHEN, Y.S., NG, S.P., et al., "Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation", *Materials Science and Engineering*, v. 64, pp. 73-112, 2009.

LEITE, C.G.C.L., *Fabricação de Risers Rígidos de Materiais Compósitos Pelo Processo de Enrolamento Filamentar*. Projeto Final de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

MALDAGUE, X., GONZÁLEZ, D., KLEIN, M., et al., "Infrared image processing and data analysis", *Infrared Physics & Technology*, v. 46, pp. 75-83, 2004.

MALDAGUE, X., *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

MALDAGUE, X., MOORE, P.O. *Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing*. 3 ed. ASTN (American Society for Nondestructive Testing), 2001.

MALLICK, P.K. *Fiber-Reinforced Composites*. 2 ed. New York, Marcel Dekker, 1993.

MIRANDA, M., *Comparação entre Métodos de Inspeção Não-Destrutiva Aplicados a Peças Compósitas Laminadas Sólidas Estruturais Aeronáuticas*. Tese de Mestrado, UFSCAR, São Carlos, SP, Brasil, 2011.

MONTANINI, R., "Quantitative determination of subsurface defects in a reference specimen made of Plexiglas by means of lock-in and pulse phase infrared thermography", *Infrared Physics & Technology*, v. 53, pp. 363-371, 2010.

MRAZOVA, M., "Advanced composite materials of the future in aerospace industry", *Incas Bulletin*, v. 5, pp. 139-150, 2013.

NETO, F.L., PARDINI, L.C. *Compósitos Estruturais*. 1 ed. São Paulo, Edgard Blucher, 2006.

OCHOA, O.O., SALAMA, M.M., "Offshore Composites: Transition Barriers to an Enabling Technology", *Composites Science and Technology*, v.65, pp. 2588-2596, 2005.

PEETERS, J., CASTANEDO, C.I., SFARRA, S., et al., "Robust quantitative depth estimation on CFRP samples using active thermography inspection and numerical simulation updating", *NDT&E International*, v.87, pp.119-123, 2017.

PIFFER, J.N., *Termografia Aplicada como Teste Não Destrutivo em Análise estrutural de Compósitos*. Monografia, IFSP, São Carlos, SP, 2016.

REZENDE, M.C., "O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial", *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 10, 2000.

SCHWARTZ, M.M. *Composite Materials*. 1 ed. New Jersey, Prentice Hall, 1997.

SILVA, V.M.A. *Termografia Ativa Pulsada Aplicada a Juntas Compósitas Laminadas*. Projeto Final de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2014.

STEINBERGER, R., LEITÃO, T.I.V., LADSTATTER, E., et al., "Infrared thermographic techniques for non-destructive damage characterization of carbon fibre reinforced polymers during tensile fatigue testing", *International Journal of fatigue*, v. 28, pp. 1340-1347, 2006.

THEODORAKEAS, P. et al. "Pulsed thermographic inspection of CFRP structures: experimental results and image analysis tools". Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration 2014, International Society for Optics and Photonics, p. 90620F, 2014.

VAVILOV, V., et al. "Thermal tomography characterization and pulse-phase thermography of impact damage in CFRP, or why end users are still reluctant about practical use of transient IR thermography." *Thermosense Xx. International Society for Optics and Photonics*, p. 275-282, 1998.

VAVILOV, V., PAN, Y., NESTERUK, D., "Infrared thermographic inspection of water ingress in composite honeycomb panels". *Applied Optics*, v. 55, n. 34, p. D120-D125, 2016.

VAVILOV, V., PAWAR, S.S., "A novel approach for one-sided thermal nondestructive testing of composites by using infrared thermography." *Polymer Testing*, v. 44, p. 224-233, 2015.

WILLEMANN, D.P., MARINHO, C.A., SOARES, S.D., et al., "Detecção de Defeitos em Juntas Adesivadas de Tubos Compósitos com Shearografia, Termografia e Ultrassom". *12° CONAEND*, São Paulo, SP, Junho 2008.

WILLIAMS, J.G. "Composite Material Offshore Corrosion Solutions". *Workshop on Corrosion Control of Marine Structures and Pipelines*, Galveston, Texas, U.S.A., February 1999.

WILLIAMS, J. G. Offshore oil composites: Designing in cost savings. 2011. Acesso em: 24 fevereiro 2017.