

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

Nicole Villalva Vilaro<sup>1</sup>  
Marcella Grosso Lima<sup>2</sup>  
Gabriela Ribeiro Pereira<sup>3</sup>

## Resumo

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.

**Palavras-chave:** Termografia; Fibra de Carbono; Simulação Computacional.

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

### Abstract

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.

**Keywords:** Thermography; Carbon Fiber; Computer Simulations.

<sup>1</sup> Engenheira Metalúrgica, Aluna de Mestrado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Ensaaios Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira Metalúrgica, M.Sc., Aluna de Doutorado, Pesquisadora, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Ensaaios Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

- <sup>3</sup> Física, D.Sc., Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Rio Janeiro, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Materiais compósitos reforçados por fibras têm sido aplicados em diversos setores da economia, sobretudo no setor petroquímico e na indústria aeronáutica. A incorporação de estruturas fabricadas em material compósito se deve especialmente à sua elevada relação peso/resistência mecânica e alta resistência à corrosão [1]. A crescente demanda pelo uso desses materiais fez surgir a necessidade de um controle de qualidade para detecção de falhas estruturais e descontinuidades, desde as etapas de fabricação do compósito assim como a sua posterior inspeção em serviço. Nesse contexto, técnicas de ensaios não destrutivos despontam como alternativa promissora confiável para detecção, localização e dimensionamento de regiões defeituosas e avaliação da integridade. A termografia se apresenta como uma poderosa ferramenta frente às demais técnicas não destrutivas por ser uma técnica de fácil inspeção e armazenamento de dados, que dispensa o contato com o material e permite alta velocidade de inspeção [2,3,4].

A termografia se baseia em analisar o perfil de temperaturas na superfície do material e, através desta análise, detectar regiões que, por diferença de temperaturas, apresentem alterações no fluxo de calor na região dos defeitos superficiais ou sub-superficiais [2]. O objetivo deste trabalho é utilizar a termografia ativa e a simulação computacional para avaliar a capacidade da técnica em detectar defeitos nos materiais CFRP.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Material

Para o presente estudo, o material utilizado é um CFRP, recebido na forma de um tubo sem emendas. A peça foi produzida pelo processo de laminação manual e compactação a vácuo, e possui dimensões 110 mm de diâmetro externo e espessura de 5 mm. A partir deste tubo, extraíram-se corpos de prova (CP's), e os entalhes foram usinados na região correspondente a parte interna do tubo, situados em diferentes profundidades a fim de simular delaminações, como esquematizado na Figura 1.

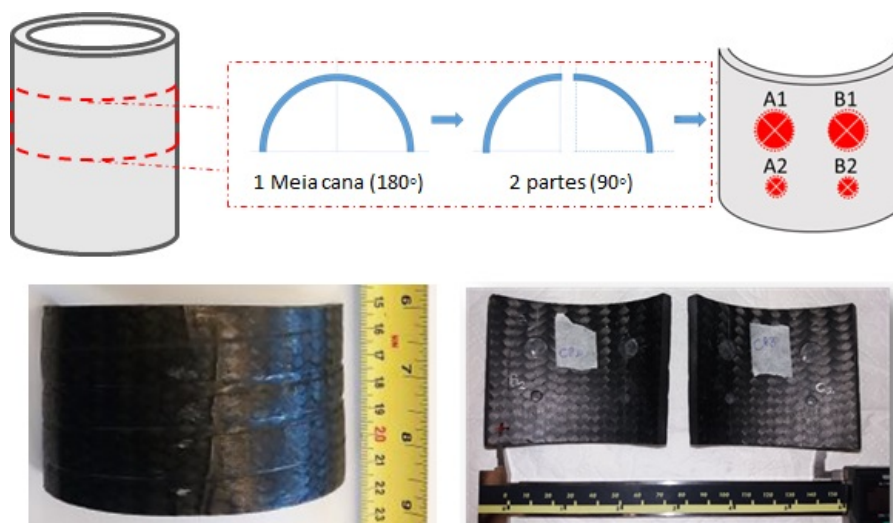


Figura 1. Esquema representativo do plano de preparação das amostras.

## 2.2 Ensaio Termográfico

O aparato utilizado para o ensaio termográfico é uma câmera FLIR SC640, além de conjunto de lâmpadas halógenas de potência 5 kW, para excitação térmica de 10 segundos, com resposta captada no modo de reflexão e tempo total de observação da temperatura de 60 segundos.

Para simular defeitos na peça e determinar os parâmetros a serem empregados, foi utilizado o software COMSOL Multiphysics®, com a interface correspondente ao módulo de transferência de calor em sólidos, aplicados em três dimensões, sendo a evolução da temperatura dependente do tempo.

O material escolhido para representar os defeitos no compósito foi o ar. 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 dos parâmetros utilizados para as propriedades foram os mesmos fornecidos pela literatura [5], sendo: calor específico à pressão constante  $C_p = 902$  [J/KgK], densidade  $\rho = 1550$  [Kg/m<sup>3</sup>], condutividade térmica  $K = 1.0$  [w/mk] e emissividade  $\epsilon = 0.920$ .

## 2.3 Caracterização dos defeitos

Inicialmente, as simulações que representam CP's foram feitas utilizando um sólido virtual de geometria cilíndrica construído no COMSOL, com as dimensões das amostras confeccionadas para os testes experimentais, possuindo 8,0 mm de altura e aproximadamente 5,6 mm de espessura. Os defeitos, todos internos, equidistantes e circulares foram construídos com diferentes diâmetros e situados em profundidades diferentes. Na Tabela 1, são apresentadas as especificações de cada defeito dos CP's.

**Tabela 1.** Características dos defeitos nos CP's

Amostra	Defeito	Diâmetro	Espessura do CP	Profundidade do Defeito	Espessura Remanescente
CP1	d1	5,0	5,66	4,38	1,28
	d2	10,0		4,55	1,11
	d3	10,0		2,35	3,31
	d4	10,0		4,24	1,42
CP2	A1	10,0	5,80	4,04	1,76
	A2	5,0		4,03	1,77
	B1	10,0		2,86	2,94
	B2	5,0		3,10	2,70
CP3	C1	10,0	5,60	2,20	3,40
	C2	5,0		2,63	2,97
	D1	10,0		2,13	3,47
	D2	5,0		2,31	3,29
CP4	E1	10,0	5,60	3,06	2,54
	E2	5,0		3,57	2,03
	F1	10,0		2,92	2,68
	F2	5,0		3,26	2,34

*Todas as unidades de medida da tabela 1 estão em milímetros.*

Na caracterização dos defeitos, a correspondência da resposta térmica do material inspecionado para valores que indicam posição é feita por meio de algoritmos, capazes de avaliar a profundidade das discontinuidades 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.

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 tempos de pico menores se comparadas com as descontinuidades mais profundas ou de espessura maiores.

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

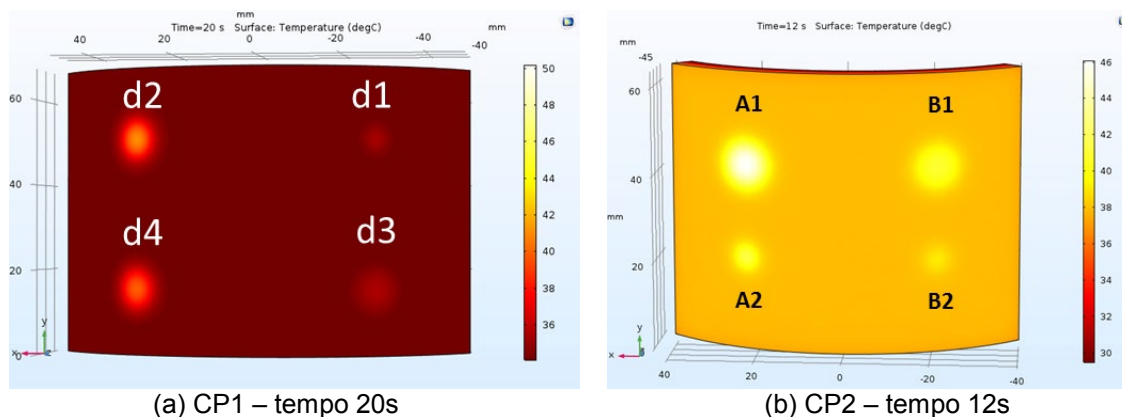
### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Análise dos termogramas – Simulação computacional

Na Figura 2 são apresentadas as imagens termográficas da superfície do material durante a simulação, ilustrando a distribuição de temperaturas na superfície ao longo do tempo de ensaio para regiões com e sem defeito. As regiões mais claras nos termogramas representam as descontinuidades do material.

Além da análise da influência do diâmetro equivalente e profundidade dos defeitos também foi avaliada a influência destes parâmetros na evolução da temperatura e no contraste térmico para cada um dos defeitos.

As curvas de evolução do contraste térmico absoluto, calculadas a partir da diferença entre a temperatura na região com defeito e a temperatura no ponto considerado de referência na amostra, deixa evidente que o parâmetro de área também gera uma influência no valor do contraste térmico dos defeitos. Portanto, é possível avaliar a relação entre a geometria (dimensão) do defeito e a capacidade de detecção da técnica.



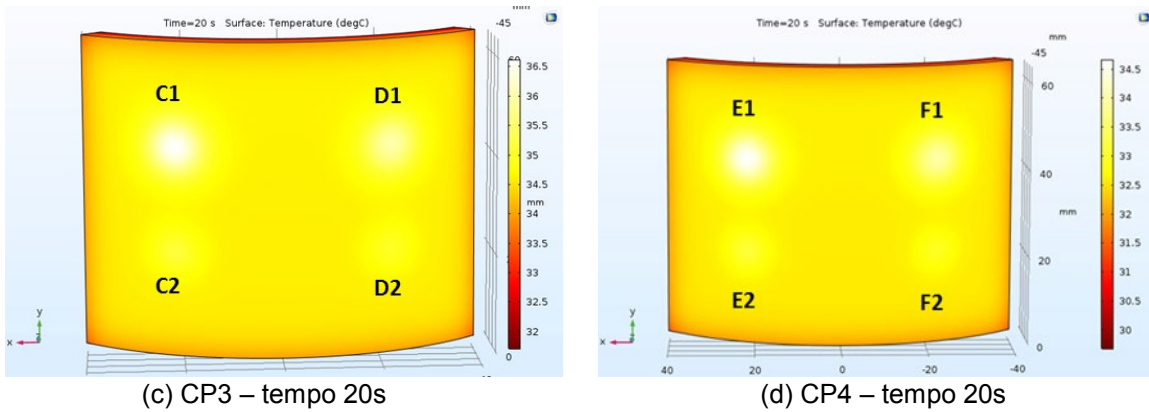
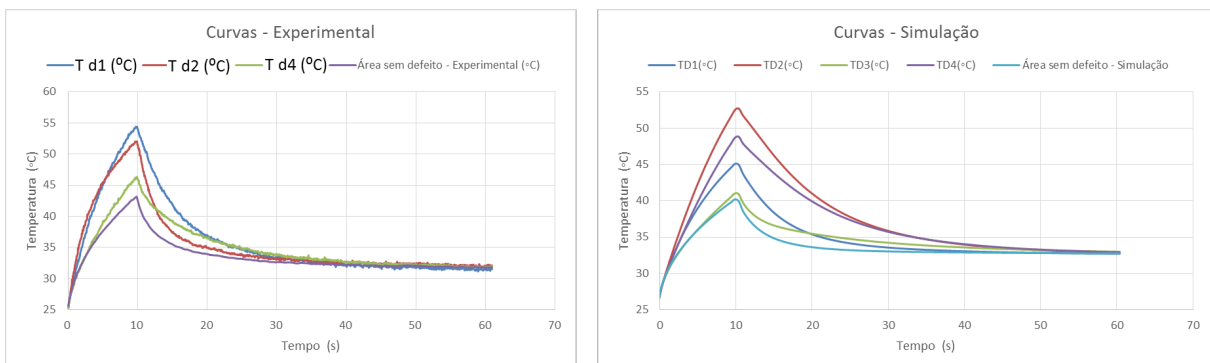


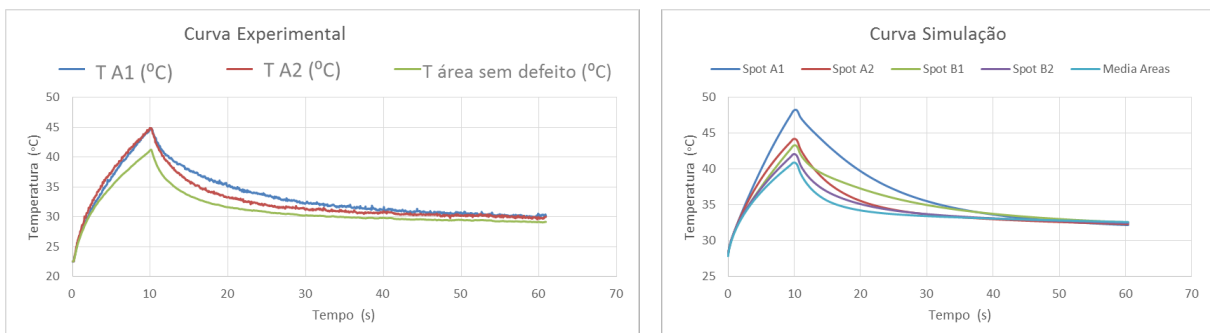
Figura 2. Imagem termográfica da distribuição de temperaturas do sólido virtual para as amostras CP1, CP2, CP3 e CP4.

### 3.2 Análise dos termogramas – Ensaio Experimental

Na Figura 3 são apresentadas, para cada uma das amostras, as curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo de ensaio por termografia ativa. Os resultados obtidos para a diferença entre as curvas de evolução da temperatura experimental e de simulação observada no intervalo de tempo entre 10s – 60s está coerente com resultados da literatura, sugerindo que o modelo construído pode ser validado. Os defeitos que não foram detectados experimentalmente para as condições do ensaio, apresentam uma espessura remanescente de parede superior a 2,94 mm. Alguns defeitos, mesmo para espessuras remanescentes inferiores a 2,94 mm, não puderam ser detectados. Isto confirma que a influência do diâmetro também é um fator que interfere na detecção, e não somente a localização do defeito em relação à superfície inspecionada.

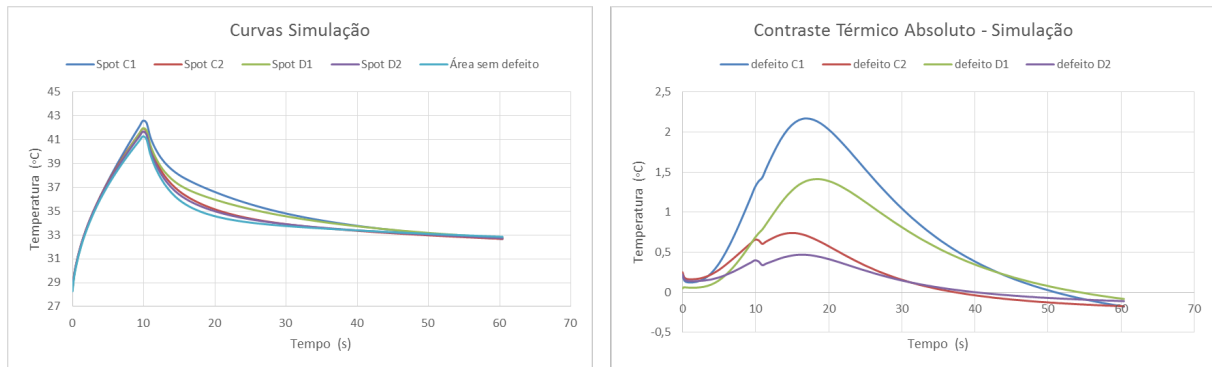


(a) Curvas para a amostra CP1 – o defeito d3 não foi detectado experimentalmente.

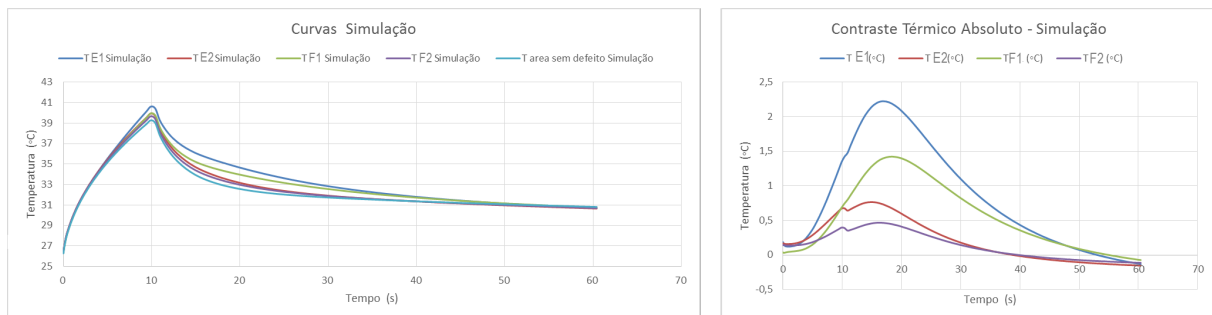


(b) Curvas para a amostra CP2 – os defeitos B1 e B2 não foram detectados experimentalmente.





(c) Curvas para amostra CP3 – os defeitos C1, C2, D1 e D2 não foram detectados experimentalmente.



(d) Curvas para amostra CP4 – os defeitos E2 e F2 não foram detectados experimentalmente.

**Figura 3.** Curvas de distribuição da temperatura para as amostras CP1, CP2, CP3 e CP4.

Os resultados obtidos para as curvas de contraste térmico absoluto pela simulação em COMSOL revelaram valores de temperatura inferiores a 2<sup>o</sup>C para todos os defeitos simulados no CP3, exceto para C1. Mas sendo o valor de pico para o defeito C1 muito próximo desse valor, é possível afirmar que estes defeitos também não foram detectados satisfatoriamente pela simulação.

## 4 CONCLUSÃO

O estudo empregando simulação computacional mostrou que a técnica é efetiva para detecção de defeitos sub-superficiais em compósitos do tipo CFRP, sendo o tamanho do defeito, um fator a ser elencado quando da escolha do tamanho da malha utilizada nos cálculos do COMSOL. Portanto, esta ferramenta de simulação, uma vez validada pelos ensaios termográficos feitos experimentalmente, se mostra capaz de estimar o limite de detecção da técnica.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, a FAPERJ e a Petrobras pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 Schwartz MM. Composite Materials. New Jersey: Prentice Hall; 1997.
- 2 Maldague X. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. New York: John Wiley & Sons; 2001.
- 3 Castanedo CI, Tarpani JR, Maldague X. Nondestructive testing with thermography. European Journal of Physics. 2013; v. 34: p. 91-109.

- 4 Grosso M, Lopez JEC, Silva VMA, Soares SD, Rebello JMA, Pereira GR. Pulsed thermography inspection of adhesive composite joints: computacional simulation model and experimental validation. Composites Part B. 2016; v.106: p.1-9.
- 5 Peeters J, Castanedo CI, Sfarra S, Maldague X, Dirckx JJJ, Steenackers G. Robust quantitative depth estimation on CFRP samples using active thermography inspection and numerical simulation updating. NDT & E International. 2017; v.87: p.119-123.