

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGEM

INSPEÇÃO EM JUNTAS COLADAS DE TUBOS FEITOS POR COMPÓSITOS
POR TERMOGRAFIA ATIVA PULSADA

Artur Gianini Bezerra de Melo
Engenheiro de Materiais

Dissertação para obtenção de título de
Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional,
Especialidade Engenharia de Inspeção de Equipamentos

Porto Alegre – RS
2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGEM

INSPEÇÃO EM JUNTAS COLADAS DE TUBOS FEITOS POR COMPÓSITOS POR
TERMOGRAFIA ATIVA PULSADA

ARTUR GIANINI BEZERRA DE MELO
Engenheiro de Materiais

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Engenharia de Inspeção de Equipamentos.

Área de Concentração: Ciência dos Materiais

Porto Alegre – RS
2009

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Engenharia de Inspeção de Equipamentos e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Co-orientador: Dr. Sérgio Damasceno Soares

Banca Examinadora:

Dr. Marcio Humberto Silva Siqueira – PETROBRAS

Prof. Dr. Romeu Ricardo da Silva – Centro de Tecnologia SENAI-RJ Solda

Dr. Marcelo Eurípedes Ferreira Napolião – PETROBRAS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

Porto Alegre, agosto de 2009

À minha mãe Eleny, meu pai Lamarck e irmão Luiz.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Afonso Reguly, pelo apoio e orientação na execução deste trabalho.

Ao PPGEM da UFRGS, pela oportunidade da realização do estudo.

A Petrobras, empresa que acredita na formação profissional, pelo financiamento, estímulo e apoio.

Aos engenheiros Carla Marinho e Sergio Damasceno, pela constante orientação, com olhar agudo e grandes idéias, na batalha laboratorial.

Ao engenheiro Daniel Pipa, pelo grande auxílio na ferramenta Matlab[®].

Aos engenheiros Henrique Garcia e Marcio Humberto Siqueira, por tornar realidade a possibilidade de realização do trabalho, com a mais perfeita harmonia de coordenação.

À toda equipe da coordenação de ENDS da gerência TMEC do Cenpes, pelo apoio, prestatividade e dividir o espaço de trabalho.

Em especial ao amigo e colega de trabalho Cláudio Jarreta Neto, pela atenção de sempre e ajuda na realização de todo o trabalho.

À toda a turma do CEINSP 2008, pelo companheirismo de todo um ano de trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1.0. INTRODUÇÃO.....	1
2.0. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Termografia Infravermelha.....	4
2.1.1. Princípio Físico da Termografia Infravermelha.....	5
2.1.2. Métodos de Termografia Infravermelha	10
2.1.3. Câmeras Infravermelhas	13
2.2. Materiais compósitos	15
2.3. Tubulações de Epóxi reforçado com Fibra de Vidro.....	19
2.4. Imagens Digitais	20
3.0. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1. Corpos de Prova.....	24
3.2. Procedimento Experimental.....	28
3.2.1. Análise dos parâmetros experimentais.....	32
3.2.2. Métodos de análise de imagens.....	37
4.0. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
4.1. Análise dos Parâmetros Experimentais.....	45

4.1.1.	Distância e modo do aporte térmico	45
4.1.2.	Distância da câmera termográfica.....	47
4.1.3.	Campo e nível da escala de temperaturas	51
4.1.4.	Discussões gerais sobre os parâmetros experimentais.....	54
4.2.	Avaliação dos métodos de análise	55
5.0.	CONCLUSÕES.....	58
6.0.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
7.0.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Curvas da lei de Planck enfatizando o lócus visível do espectro eletromagnético (1).....	7
Figura 2.2	Esquema básico de diferença de temperatura na superfície, causado por uma descontinuidade.....	9
Figura 2.3	Esquema geral da termografia ativa, que pode ser realizada por reflexão (a) ou transmissão (b).....	11
Figura 3.1	Características das descontinuidades nos corpos de prova. (a) Perda de espessura feita por usinagem (Descontinuidade volumétrica) (b) Simulação de descolamento ou falta de adesivo ou na junta ponto e bolsa de tubulação (Descontinuidade planar).....	25
Figura 3.2	CP1. Fotografia com suas dimensões (a) e posicionamento e nomenclatura adotada das descontinuidades (b).....	26
Figura 3.3	CP2. Fotografia com suas dimensões (a) e posicionamento e nomenclatura adotada das descontinuidades (b).....	27
Figura 3.4	(a) CP3. Fotografia e local da descontinuidade inserida. (b) CP4. Fotografia e as duas descontinuidades inseridas.....	28
Figura 3.5	Esquema geral dos experimentos.....	30
Figura 3.6	Seqüências de fotos, realizadas por termografia ativa pulsada, consideradas (a) boa e (b) ruim.....	33
Figura 3.7	Exemplo de três tempos de aquecimentos para a mesma fonte térmica, onde $t_3 > t_2 > t_1$. Aquecimento insuficiente (a), aquecimento ideal (b) e superaquecimento (c).....	34
Figura 3.8	Forma de aquecimento uniforme do corpo de prova.....	36
Figura 3.9	Exemplo de característica de resfriamento do CP1, observado na linha vermelha da Figura 3.6(a).....	40
Figura 3.10	Exemplo de característica de resfriamento do CP1, observado na linha preta da Figura 3.6(a).....	40
Figura 3.11	Exemplo do Método da Diferença de Linhas de uma região com defeito e outra sem defeito.....	41
Figura 3.12	Exemplo do Método das Diferenças de Linhas em duas regiões sem defeito.....	42
Figura 3.13	Exemplo de superfície resultado do Método da Soma.....	42
Figura 3.14	Exemplo de resultado do Método da Diferença.....	43

Figura 4.1	Ensaio termográfico com aporte térmico parado na região central (a) e distribuído em toda a superfície do material (b)	47
Figura 4.2	CP1 – Exemplos ilustrativos da variação da distância da câmera termográfica para 10s de pulso térmico, para as distâncias de 300mm (a), 450mm (b) e 600mm (c)	48
Figura 4.3	CP2 – Exemplos ilustrativos da variação da distância da câmera termográfica para 20s de pulso térmico, para as distâncias de 300mm (a), 450mm (b) e 600mm (c)	49
Figura 4.4	CP3 – Exemplos ilustrativos da variação da distância da câmera termográfica para 10s de pulso térmico, para as distâncias de 300mm (a), 450mm (b) e 600mm (c)	50
Figura 4.5	CP4 – Exemplos ilustrativos da variação da distância da câmera termográfica para 15s de pulso térmico, para as distâncias de 300mm (a), 450mm (b) e 600mm (c)	51
Figura 4.6	Termogramas obtidos para o CP1 com o mesmos parâmetros de ensaio, variando apenas o tamanho do campo de temperaturas: 20 a 30 °C (a), 20 a 40 °C (b) e 20 a 50 °C (c)	54
Figura 4.7	Gráfico representativo das ocorrências obtidas como resultado do estudo dos métodos computacionais	56
Figura 4.8	Exemplo de detecção da descontinuidade F do método da diferença de linhas (b), que não foi detectado pelo método visual (a)	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Propriedades de um complexo epóxi - fibra de vidro.....	18
Tabela 3.1	Diâmetro e profundidade das descontinuidades do CP1 representados na Figura 2.1(b)	26
Tabela 3.2	Diâmetro e profundidade das descontinuidades do CP2 representados na Figura 2.2(b)	27
Tabela 3.3	Características físicas da câmera termográfica infravermelha utilizada.	28
Tabela 3.4	Campo de visão e comprimento relativo de pixel para cada distância da câmera termográfica.....	36
Tabela 3.5	Campo de escala de temperaturas usados nos ensaios.....	37
Tabela 3.6	Condições de ensaio utilizadas no estudo dos métodos computacionais de análise de termogramas.....	44
Tabela 4.1	Variação da distância do soprador térmico para diferentes tempos de aporte térmico (B: bom; RG: Regular; R: Ruim).....	45
Tabela 4.2	Variação do modo de aplicação do pulso térmico para diferentes tempos desse pulso (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)	46
Tabela 4.3	Resultados do estudo da distância da câmera termográfica para o CP1, escala de cores de 20 a 30°C (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)	47
Tabela 4.4	Resultados do estudo da distância da câmera termográfica para o CP2, escala de cores de 20 a 30°C (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)	49
Tabela 4.5	Resultados do estudo da distância da câmera termográfica para o CP3, escala de cores de 20 a 30°C (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)	50
Tabela 4.6	Resultados do estudo da distância da câmera termográfica para o CP4, escala de cores de 20 a 30°C (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)	50
Tabela 4.7	Resultados do estudo do campo da escala de temperaturas para o CP1 (B: bom; RG: Regular; R: Ruim).....	52
Tabela 4.8	Resultados do estudo do campo da escala de temperaturas para o CP2 (B: bom; RG: Regular; R: Ruim).....	52
Tabela 4.9	Resultados do estudo do campo da escala de temperaturas para o CP3 (B: bom; RG: Regular; R: Ruim).....	52
Tabela 4.10	Resultados do estudo do campo da escala de temperaturas para o CP4 (B: bom; RG: Regular; R: Ruim).....	53
Tabela 4.11	Resultados obtidos para cada método, separado para cada descontinuidade do CP1 (B: bom; RG: Regular; R: Ruim).....	55

Tabela 4.12	Ocorrências observadas nos resultados do estudo dos métodos de análise de imagens (B: bom; RG: Regular; R: Ruim).....	56
-------------	---	----

RESUMO

Pela velocidade e facilidade de inspeção, o ensaio não destrutivo de termografia ativa pulsada vem emergindo como uma nova ferramenta para avaliação da qualidade da adesão de juntas coladas de tubos confeccionados por materiais compósitos. No entanto, na indústria do petróleo pouco se conhece dessa técnica, sendo a indústria aeroespacial a maior detentora da tecnologia. Dessa forma, este trabalho tem por objetivo estudar alguns parâmetros do ensaio termográfico, avaliando os parâmetros físicos do ensaio e propondo alguns métodos de avaliação dos resultados. Neste sentido, quatro corpos de prova, com descontinuidades conhecidas, foram confeccionados em plástico reforçado por fibra de vidro e o ensaio de termografia foi realizado, avaliando a distância da câmera termográfica, tempo de estímulo térmico, forma de aplicação do estímulo térmico e parâmetros de escala de temperaturas da câmera termográfica. Foi percebido que esses parâmetros influenciam diretamente na resolução dos termogramas. Foram desenvolvidos, também, quatro métodos computacionais de tratamento de dados, com objetivo de melhorar a detectabilidade das descontinuidades presentes nos corpos de prova. Bons resultados foram obtidos com esses métodos, porém maiores desenvolvimentos devem ser feitos para a sua aplicação em inspeções no campo.

ABSTRACT

Active Pulsed Thermography has been emerging as a new technique of non destructive testing to evaluate bonded joints of pipes fabricated with composite materials. Currently, oil and gas industry has little knowledge in this field, being the aeronautic industry the largest user of this technology. Thus, this study aims to investigate some parameters of the active pulsed thermography test, in special its physical parameters and new mathematical methods to evaluate its results. Accordingly, four specimens, taken from composite pipes, were produced with known machined defects and evaluated by active pulsed thermography under different test conditions. It was observed that these parameters affect directly the quality of the results. Also, it were developed four computational methods aiming to improve the detectability of discontinuities. The new methodology show promises results, but further studies should be made prior to its application in real inspection cases.

1.0. INTRODUÇÃO

Em muitas aplicações de engenharia e outras ciências, mesmo em tempos muito antigos, sempre foi uma necessidade humana conhecer o perfil ou distribuição de temperaturas em objetos. Esse “mapa térmico” pode fornecer informações extremamente importantes para qualquer que seja a aplicação. Essa forma de planificar um perfil de temperaturas é chamada de termografia, ou seja, formar uma imagem que represente a distribuição térmica de uma região qualquer (1). Para construir esse “mapa térmico”, ou termografia de um componente qualquer, é necessário que se tenha equipamentos capazes de detectar temperaturas em pontos distintos, a fim de se montar um arranjo visual de distribuição térmica do objeto em um determinado instante de tempo. Essa distribuição pode ser tratada de várias formas, sendo a mais comum em forma de imagem ou termografia.

Entre várias técnicas de termografia, destaca-se principalmente a termografia infravermelha, que tem por principais vantagens a velocidade de realização do ensaio e resolução dos termogramas obtidos. A termografia infravermelha tem como fundamento a detecção, por meio de equipamentos especializados, das ondas eletromagnéticas que todos os corpos emitem como consequência da vibração térmica das moléculas. Essas ondas eletromagnéticas são emitidas em uma distribuição de comprimentos de ondas que, para os materiais e temperaturas usuais, têm como moda de distribuição a região do espectro infravermelho. Com o aumento da temperatura essa distribuição tende a correr para perto do espectro visível e em baixas temperaturas a tendência é migrar para o espectro do baixo infravermelho. Dessa forma, as câmeras infravermelhas são equipamentos capazes de detectar e planificar as diferentes temperaturas através dos diferentes comprimentos de ondas infravermelhas emitidas pelos corpos em diferentes temperaturas.

O ensaio de termografia infravermelha se divide basicamente em duas técnicas: passiva e ativa. A termografia passiva é realizada no estado estacionário de

temperaturas, enquanto que a termografia ativa é feita no estado transiente de temperaturas. Ou seja, a primeira é realizada observando as diferentes temperaturas presentes no componente ensaiado sem excitação térmica, ao contrário da segunda, em que uma instabilidade térmica é aplicada, tendo finalidade de se estudar como se dá a transferência de calor no componente. Por essas características, estas diferentes técnicas são usadas em diferentes demandas.

No campo da indústria do petróleo, principalmente em instalações marítimas (*off-shore*), por motivos óbvios de redução de peso das embarcações, vem se buscando novos materiais para os equipamentos embarcados. Neste contexto, as tubulações feitas de plástico reforçado por fibra de vidro vêm sendo particularmente interessantes nessas aplicações, pois possuem resistência mecânica específica elevada, além de não apresentarem os tradicionais problemas de corrosão que as tubulações metálicas possuem. No entanto, duas dificuldades básicas são impostas pelos materiais compósitos. Primeiramente estes não permitem grandes instabilidades operacionais de planta, o que acarreta em falhas inesperadas em operação. A segunda é a dificuldade de se desenvolver técnicas de ensaios não destrutivos para se inspecionar estes materiais, visto que o enorme número de interfaces entre as fases constituintes desses materiais interferem nas técnicas tradicionais de ENDs.

Porém, os materiais compósitos, por suas características de baixa condutividade térmica e alta efusividade térmica, apresentam ótimas condições de se aplicar as técnicas de termografia infravermelha. Com essas características dos compósitos, estes ensaios podem ser realizados com câmeras infravermelhas comuns, o que não ocorre com metais que demandam câmeras de alta frequência, por apresentar altas taxas de transferência de calor (1).

Assim, defeitos encontrados em tubulações de plástico reforçados por fibras de vidro começam a ser inspecionados pela técnica do ensaio termográfico, principalmente no que se refere às juntas dessas tubulações, quando a falha dessa união colada vem sendo a principal causa de problemas nessa aplicação (2). Para se obter uma boa resposta do ensaio é de extrema importância ter conhecimento dos parâmetros de teste e condições que possam influenciar na resposta do ensaio. Então, diversas variáveis estão em jogo, começando com a própria coleta, como temperatura ambiente, ajustes da câmera termográfica, até os métodos de análise das imagens coletadas. Estudar algumas

destas variáveis, sabendo como podem influenciar na detecção de descontinuidades, por termografia ativa, em juntas de tubos feitos de materiais compósitos, é o objeto principal deste trabalho.

É também objetivo, trabalhar em métodos de análise de imagens que auxiliem na detecção das descontinuidades. Esses métodos se baseiam em fundamentos de imagens digitais, principalmente no que se refere no aumento de contraste entre as regiões com ou sem descontinuidades.

Para alcançar tais objetivos, ensaios laboratoriais de termografia ativa pulsada de reflexão foram conduzidos em quatro corpos de prova de plástico reforçado por fibra de vidro, com descontinuidades inseridas, em cada um, de maneira diferente, a fim de se obter parâmetros, sejam experimentais, sejam em análise de imagens, que melhorem a detectabilidade de descontinuidades, através deste ensaio.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: O capítulo 2 apresenta os princípios do ensaio, fazendo ênfases no que vem sendo publicado na literatura a respeito. Os capítulos 3, 4 e 5 abordam a presente pesquisa laboratorial, mostrando como foram conduzidos os experimentos, o que se pode ter como resposta e as conclusões. Por fim, o capítulo 6 apresenta algumas considerações como sugestões de trabalhos futuros.

Com a conclusão deste trabalho, almeja-se obter algumas ferramentas para que futuramente se chegue a um procedimento de inspeção de juntas coladas de tubos de compósitos, por termografia ativa pulsada. Esse trabalho fez parte de projeto de estudos da gerência TMEC do Cenpes – Petrobras.

2.0. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A termografia infravermelha ativa vem emergindo com uma nova forma de ensaio não destrutivo. Ela pode ser realizada de várias maneiras diferentes, dependendo de sua aplicação. No caso de inspeção de juntas de plástico reforçado por fibra de vidro, uma das técnicas mais utilizadas tem sido a termografia infravermelha ativa pulsada, em especial por reflexão. Aliada ao método de coleta de imagens, alguns tratamentos podem ser feitos a fim de se otimizar os resultados obtidos pelo ensaio. Este capítulo tem como objetivo apresentar estes pontos, descrever os princípios físicos envolvidos e o que vem sendo discutido pela literatura especializada sobre o assunto. Importante entender que, atualmente pouco se conhece dessa técnica na indústria do petróleo, sendo o ramo aeroespacial os pioneiros e grandes detentores dessa tecnologia.

2.1. Termografia Infravermelha

A termografia é uma de várias técnicas usadas para se poder ver o invisível (3). Como implica seu nome, a termografia é uma forma de mostrar ou planificar uma distribuição de temperaturas da superfície de um corpo, como forma de ter acesso a estrutura ou comportamento do que está abaixo da superfície de um componente, pela sua resposta térmica.

Basicamente, existem duas formas de termografia: com contato, chamada apenas de termografia e sem contato, chamada termografia infravermelha, que possui vantagens distintas. A termografia com contato pode ser realizada aplicando uma pintura de cristais líquidos especiais, na superfície de um objeto, e monitorado a variação de cores, decorrentes da variação de temperatura do material, sendo assim monitorada por uma câmera de vídeo convencional. As diferentes temperaturas acarretam diferentes colorações, que são comparadas com padrões. Outra forma simples, com contato, é fazer um arranjo de termopares. A termografia sem contato, por sua vez, trabalha detectando, por meios de equipamentos especializados, as diferentes frequências de

raios infravermelhos, que são emitidos pelos corpos, consequência de diferentes temperaturas. Após a detecção, esses equipamentos planificam as diferentes frequências de radiação infravermelha, que foi recebido em seu arranjo de detectores, formando uma imagem bidimensional, que são os termogramas (4).

Os primeiros detectores infravermelhos foram desenvolvidos pela indústria militar, mais precisamente nas duas grandes guerras. Somente nos anos 60, graças às primeiras câmeras termográficas, iniciaram as primeiras aplicações desta tecnologia como alternativa aos ensaios não destrutivos comuns (4). Nos últimos anos, a termografia infravermelha vem emergindo como uma técnica vastamente utilizada como método de ensaio não-destrutivo, principalmente no âmbito da indústria aeroespacial. Essas técnicas oferecem vantagens para detecção de descontinuidades subsuperficiais como: vasta área de inspeção, não requer contato com o corpo inspecionado e velocidade de ensaio (5).

2.1.1. Princípio Físico da Termografia Infravermelha

A termografia infravermelha é a técnica de planificar um perfil de temperaturas a partir das ondas eletromagnéticas, no espectro do infravermelho, emitidas pelos corpos, decorrente da vibração térmica das moléculas. A medida dessa radiação é chamada de radiometria. Essa técnica de medida parte do princípio que, respeitando algumas hipóteses e com correta calibração, é possível traduzir valores de radiação medidos por um equipamento, como uma câmera termográfica, para valores de temperaturas (5).

Radiação é a emissão de energia pela matéria e seu transporte não exige a presença de qualquer meio material. A radiação térmica é a energia emitida por um corpo pelo fato de sua temperatura estar acima do zero absoluto e a ela podem ser atribuídas as propriedades típicas de uma onda, ou seja, a frequência e comprimento de onda. Essa radiação se distingue das demais, como ondas de rádio e raios X, porque é a única que é consequência da temperatura do corpo (6).

Dois conceitos fundamentais para termografia infravermelha são o corpo negro e a lei de Planck. O corpo negro seria o radiador térmico ideal, um corpo hipotético que emite ou absorve radiação eletromagnética, em todos os comprimentos de onda, de

forma que toda a radiação incidente é completamente absorvida e a máxima radiação possível para a temperatura do corpo é emitida, em todos os comprimentos de onda e em todas as direções. Neste conceito, afirma-se que a radiação do corpo negro é isotrópica, isto é, não depende da direção (7). Para um corpo negro em equilíbrio térmico, o espectro de radiação é definido pela lei de Planck, que é:

$$N_{\lambda,b} = \frac{2h_c^2}{\lambda^5 \left(\exp \frac{hc}{\lambda KT} - 1 \right)} \quad [2.1]$$

onde:

$N_{\lambda,b}$ = radiância espectral em $W/m^2 \cdot \mu m$;

h = constante de Planck, igual a $6,63 \times 10^{-34}$ J/s;

K = constante de Boltzmann, igual a $1,381 \times 10^{-23}$ J/K;

c = velocidade da luz, igual a 3×10^8 m/s;

λ = comprimento de onda da radiação emitida em μm ;

T = temperatura do corpo negro em K;

b = corpo negro.

A Figura 2.1 apresenta as curvas de espectro de radiação, em várias temperaturas, para corpos negros emitindo em diferentes temperaturas, obtidas pela lei de Planck. Como pode ser visto, para uma temperatura de 6000K, temperatura aproximada do sol, a emissão é no espectro do visível (0,4 a 0,8 μm), enquanto que o corpo humano, com temperatura em torno de 300K, tem moda de emissão na banda das ondas longas (8 a 12 μm) (5).

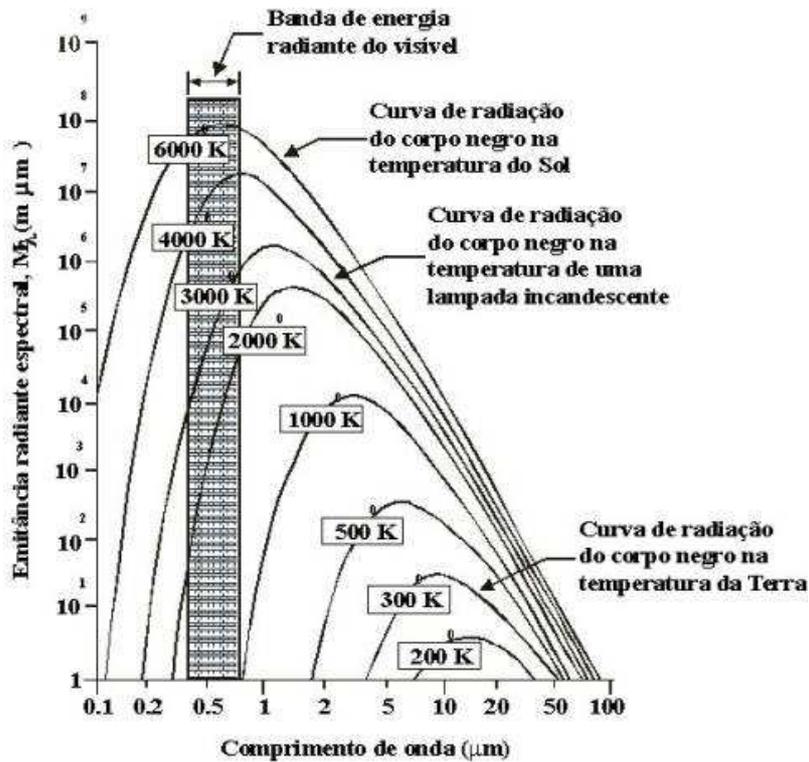


Figura 2.1 Curvas da lei de Planck enfatizando o lócus visível do espectro eletromagnético (1)

No caso dos objetos reais, cuja absorvância é limitada, apenas parte da energia é radiada a partir da superfície. Essa fração relativa do corpo real relacionada com o espectro do corpo negro é chamada emissividade ϵ . Então, para esses corpos reais, o espectro de radiação é dado por:

$$N_{\lambda} = \epsilon N_{\lambda,b}(\lambda, T) \quad [2.2]$$

Geralmente, a emissividade ϵ é dependente do comprimento de onda λ , temperatura T , ângulo de visão θ e as condições superficiais, como rugosidade e contaminações físicas ou químicas. Depende também de propriedades de superfície do material, como reflexão, transmissão e absorção de radiação (3). No entanto, na maioria das aplicações de termografia infravermelha, que os valores reais de temperatura não são fatores relevantes, a emissividade é ajustada apenas como um valor de 0 a 1, relativa a emissão do objeto comparado com o corpo negro.

Uma superfície com baixos valores de ϵ tende a se comportar com um espelho (8). Neste caso, é muito difícil de realizar o ensaio termográfico, pois o nível de ruído

será muito alto, tido que o a quantidade de radiação refletida será da mesma ordem ou superior a quantidade de radiação emitida pelo corpo. Por outro lado, altos valores de ϵ , ou seja, corpos que se reagem próximos ao comportamento do corpo negro, são bons para se fazer termografia, visto que o nível de ruído do ensaio será baixo.

A equação fundamental da termografia infravermelha relaciona a radiação N_{cam} recebida pela câmera, como soma das radiações N_{sur} emitidas pela superfície a uma dada temperatura e N_{amb} do ambiente circundante considerado como corpo negro, negligenciando a contribuição de radiação emitida pelo próprio gás atmosférico. Para a termografia infravermelha, a atmosfera é considerada transparente aos comprimentos de onda de interesse, principalmente para pequenas distâncias, então pode se afirmar que:

$$N_{cam} \approx \epsilon N_{sur} + (1 - \epsilon) N_{amb} \quad [2.3]$$

Se a emissividade do objeto é alta, essa equação pode ser reduzida a:

$$N_{cam} \approx \epsilon N_{sur} \quad [2.4]$$

Então, o ajuste de uma câmera termográfica pode ser feito através da comparação da temperatura real do objeto com a medida pela radiação recebida, bastando ajustar corretamente o valor da emissividade. Este ajuste pode ser feito experimentalmente com corpos negros comerciais colocados em diferentes temperaturas na frente da câmera. No entanto, normalmente as câmeras termográficas comerciais já possuem um ajuste automático e contínuo da sua calibração (5).

Podemos, assim, afirmar que um dos fatores mais importantes para o ensaio termográfico é a emissividade do material a ser inspecionado. Em outras palavras, é importante que o material inspecionado seja efetivamente emissor de energia infravermelha, pois, de forma contrária, a quantidade de energia recebida dos demais corpos presentes seria muito maior que a do objeto em inspeção, tendo um nível de ruído muito alto (1).

Dessa forma, o princípio básico do ensaio de termografia infravermelha é a “leitura”, por meio de equipamentos apropriados, da quantidade de energia radiada da superfície de um objeto, como conseqüência da temperatura superficial do componente. Então, como a temperatura da superfície é diretamente influenciada pela temperatura das partes internas do objeto, descontinuidades que causem interferência na

transferência de calor, do interior da peça para a superfície ou no sentido inverso, causarão diferentes temperaturas na superfície do objeto em pesquisa (1).

A Figura 2.2 apresenta um esquema básico de descontinuidade que pode ser detectada por termografia ativa. Neste caso, o calor flui da parte inferior para a superior da peça. A descontinuidade, região em branco, causa uma diferenciação na transferência de calor em relação à parte sem descontinuidade. Se a descontinuidade possuir coeficiente de transferência de calor maior que o material a parte imediatamente acima da descontinuidade irá necessariamente apresentar maior temperatura, inclusive na superfície do material. No entanto, se possuir um menor coeficiente, como por exemplo, uma bolha de ar, a transferência de calor será dificultada pela descontinuidade e a parte logo acima da superfície irá apresentar menor temperatura.

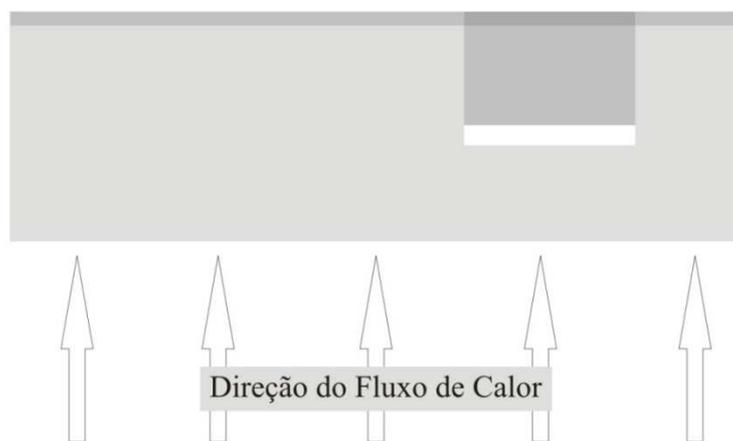


Figura 2.2 Esquema básico de diferença de temperatura na superfície, causado por uma descontinuidade

Como a temperatura da superfície, na Figura 2.2, será afetada pela presença da descontinuidade, essa diferença de temperatura pode ser detectada por uma câmera termográfica, pois as diferentes temperaturas acarretarão numa diferença do pico de energia emitida, segundo a lei de Planck (equação 2.1).

2.1.2. Métodos de Termografia Infravermelha

O ensaio de termografia infravermelha pode ser realizado de várias maneiras diferentes, embora seu esquema geral seja sempre baseado no descrito na Figura 2.2. De maneira geral, a termografia infravermelha pode ser dividida de acordo com a presença ou não de um estímulo térmico. Assim, a termografia infravermelha é dividida em passiva e ativa, sem e com aporte térmico, respectivamente.

A primeira lei da termodinâmica diz respeito ao princípio da conservação de energia. Dessa forma, uma importante quantidade de energia térmica é absorvida ou liberada, por qualquer processo que se realize trabalho, como as instalações industriais, por causa da lei da entropia. Dessa forma, a temperatura é um parâmetro essencial para se medir se as instalações estão em perfeito funcionamento. Na termografia passiva, perfis anormais de temperaturas indicam um problema potencial. Esse tipo de termografia é dito de passiva, pois não trabalha com estímulo térmico, ou seja, trabalha no estado constante de temperaturas (1). Essa técnica é muito usada em manutenções preditivas e preventivas e responde pela imensa maioria das aplicações da termografia (5).

A termografia é dita ativa quando é baseada na análise da resposta térmica de um objeto a um estímulo térmico, ou seja, analisa o aquecimento ou resfriamento do componente. Em outras palavras, analisa o componente no estado transiente de temperatura (9). Esse tipo de técnica pode ser feito de várias maneiras diferentes, de acordo com o objetivo da pesquisa. Essa variação é basicamente na forma de aquecimento, ou seja, forma do aporte térmico (5).

Dentre os tipos de termografia ativa, se destaca a termografia ativa pulsada (10). Esta técnica tem como característica pequenos estímulos térmicos, de poucos milissegundos para materiais bastante condutores até poucos segundos para materiais de baixa condutividade (11) (3). Dessa forma, o procedimento básico é fazer um breve aquecimento de um objeto e observar o seu decaimento de temperatura.

A forma de se observar esse decaimento de temperaturas pode ser feito de duas formas: reflexão e transmissão. A Figura 2.3 apresenta estas duas formas. Pode ser observado que, na termografia ativa pulsada de reflexão, a câmera termográfica observa

a superfície do mesmo lado do aquecimento, contrario a transmissão, que a câmera observa o lado oposto ao aquecimento.

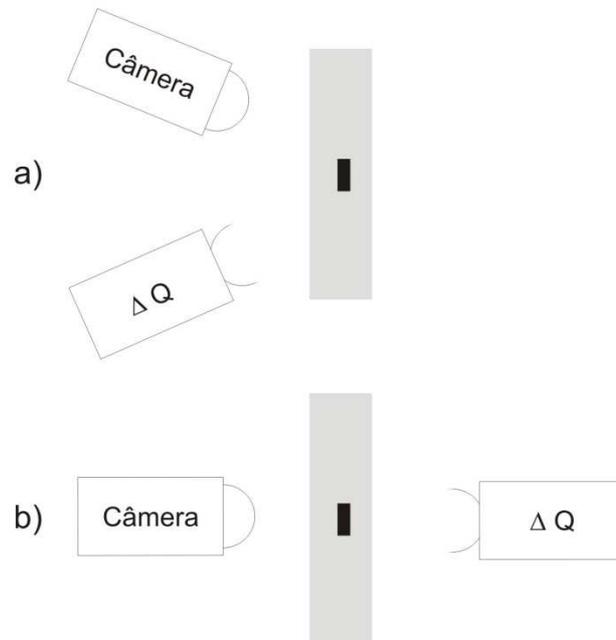


Figura 2.3 Esquema geral da termografia ativa, que pode ser realizada por reflexão (a) ou transmissão (b)

Geralmente, o método de reflexão é usado para detectar descontinuidades próximas a superfície aquecida, enquanto a transmissão é usada na detecção de descontinuidades próximas a outra superfície (12). Isso é devido ao efeito de espalhamento de energia térmica na sua propagação. Obviamente, se a superfície oposta à emissão não for acessível, a técnica de transmissão não é possível.

Ainda mais, a técnica de transmissão não permite a estimativa da profundidade da descontinuidade, pois a distância que a onda de calor viaja, dentro do material, é a mesma na região da descontinuidade e na região sem descontinuidade. No entanto, a técnica de transmissão normalmente permite melhor visualização das descontinuidades, pois não ocorrerá o fenômeno de inundação térmica da superfície oposta ao pulso térmico (5).

Assim, independente do sentido do aquecimento, a termografia pulsada consiste em um breve aquecimento de um objeto e, após isso, o monitoramento das

características do decaimento de temperatura. Qualitativamente, o fenômeno ocorre da seguinte forma:

1. A temperatura do material, inicialmente, sobe durante o pulso térmico;
2. Após o final do pulso térmico, a temperatura decai, pois a energia térmica propaga por difusão térmica abaixo da superfície;
3. Por fim, se houver presença de descontinuidade subsuperficial, a transferência de calor irá ser alterada no seu setor e esse efeito será percebido como alteração térmica na superfície, que pode ser detectado por uma câmera termográfica.

De fato, no caso de haver um aumento de resistência térmica, como na falta de adesivo em uma junta colada, teremos um acúmulo de energia térmica na observação por reflexão. Isso vai ser mais bem evidenciado se a descontinuidade estiver próxima da superfície, pois de maneira contrária, irá existir um grande espaço para que ocorra um espalhamento da energia térmica (13) (14). Maldague (2001), em uma primeira tentativa de se relacionar quantitativamente o tempo t como função da profundidade z da descontinuidade, mostrou que:

$$t \approx \frac{z^2}{\alpha} \quad [2.5]$$

onde:

α = difusividade térmica do material.

Por essa aproximação podemos inferir que materiais que possuam maiores difusividades térmicas, como os metais, respondem em baixos valores de tempo a reflexão da onda térmica causada por uma descontinuidade que esteja a uma profundidade qualquer da superfície, contrário a um polímero, por exemplo, que responderia em um tempo muito maior. Uma regra muito usada diz que o raio da menor descontinuidade detectável deve estar, ao menos, uma ou duas vezes maior que sua profundidade abaixo da superfície, para ser detectável, visto que a distância da superfície causará muito espalhamento térmico.

2.1.3. Câmeras Infravermelhas

Nos dias atuais, câmeras infravermelhas vêm sendo usadas em áreas diversas, desde ferramentas de ensaios não destrutivos, até em aplicações de visão noturna e vigilância espacial, sendo que nestes dois último casos, os recursos dos sistemas são mais limitados. A introdução das câmeras infravermelhas, nos meados dos anos 60, trouxe um grande avanço para a o ensaio de termografia, principalmente por eliminar a necessidade de contato, no ensaio, de um detector com o objeto em pesquisa. Os primeiros detectores de radiação infravermelha eram precários, usualmente eram poucos, levando a câmeras de baixa resolução, aproximadamente 64 x 64 detectores na vertical e horizontal, formando imagens com os mesmos números de pixels. Outras características das primeiras câmeras é que estas trabalhavam com baixas frequências, em torno de 1 Hz, além de ter pouca sensibilidade térmica, aproximadamente 1 °C. As câmeras termográficas evoluíram bastante desde os primeiros modelos. Hoje, câmeras trabalham rotineiramente com 60 Hz, mas já existem câmeras trabalhando com 1 kHz no mercado. As sensibilidades das câmeras modernas, atualmente, variam em torno de 20 mK (1).

Atualmente, o padrão são as câmeras com arranjo focal plano, que consiste de uma matriz de sensores ópticos localizado no plano focal de um sistema de lentes, que são capazes de transformar radiação infravermelha em pulsos elétricos (15). Estas são baseadas em dois tipos de arranjo de detectores, ou seja, arranjo de células sensíveis à radiação infravermelha: detectores fotônicos resfriados (*photonic cooled detectors*) e microbolômetros não resfriados (*uncooled microbolometers*) (16). A evolução dos detectores começou com a necessidade de resfriamento criogênico, passando pela concepção de resfriamento eletrônico até que se atingisse o estágio atual de detectores não resfriados (17).

Os detectores fotônicos resfriados de arranjo focal plano são baseados da medição direta da excitação gerada pelos fótons incidentes. A excitação fotônica é medida pela mudança da condutividade elétrica ou medindo a mudança de voltagem gerada. Essas câmeras infravermelhas têm as seguintes características:

- Resolução de aquisição de imagem de 320 x 240 ou 640 x 512 detectores;

- Boa construção de detectores, com baixo número de pixels ruins;
- Baixo ruído;
- Alta taxa de aquisição, podendo ser tomados seqüências em alguns kilohertz;
- Alta linearidade;
- Fácil capacidade de sincronizar as aquisições;
- Requer resfriamento dos detectores para temperaturas criogênicas, aproximadamente $-77\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Alto custo;

Pelo seu baixo custo e praticidade, câmeras baseadas em microbolômetros não resfriados de arranjo focal plano, tornaram-se imensamente populares para ensaio não destrutivo de termografia infravermelha e são basicamente a única tecnologia oferecida no mercado nos dias de hoje. Seu princípio físico está baseado na variação de propriedades elétricas, causadas pelas diferentes radiações, nos detectores arrançados no plano focal da câmera. Estes equipamentos têm as seguintes características (5):

- Não requerem resfriamento criogênico, no entanto uma estabilização termoelétrica é realizada internamente;
- A matriz de detectores térmicos de 320 na horizontal e 240 na vertical, levando a resolução máxima de 320 por 240 pixels;
- Baixo preço quando comparado com câmeras que trabalham com detectores fotônicos, o que faz este tipo de câmera líder de mercado;
- Alta portabilidade por poder ser construída em dimensões ultra compactas;
- Relativo baixo tempo de resposta devido à necessidade do aquecimento dos detectores. Esse tempo está na ordem de poucos milisegundos, podendo ainda se aplicar a frequências usuais, 60 Hz;

A seleção do equipamento a se utilizar é baseada em vários critérios. No entanto dois chamam mais atenção, pois afetam de forma muito contundente a fidelidade da resposta do ensaio de termografia infravermelha.

O primeiro é a seleção do campo espectral que a câmera trabalha, ou seja, a banda de comprimento de onda eletromagnética do equipamento (5). Nas aplicações

mais comuns, a porção usual do espectro utilizado varia entre a de 0,8 a 20 μm . Entre os principais critérios para definir o campo do equipamento a se usar, podemos citar a distância de operação, se a aplicação vai ser interna ou externa, temperatura e emissividade dos corpos de interesse. Como estipula a lei de Planck (equação 2.1), corpos com altas temperaturas emitem mais em baixos comprimentos de onda, conseqüentemente, altos comprimentos de onda serão de maior interesse em temperaturas próximas a ambiente. Alias, a radiação emitida, na maioria dos casos, na temperatura ambiente, tem pico de radiação na faixa de longos comprimentos de onda. Esta faixa também é preferida para aplicações externas, pois os sinais serão menos afetados como reflexão das radiações emitidas pelo sol. Para aplicações com distâncias pequenas, se ausente de nevoeiro ou outras contaminações atmosféricas, a absorção da atmosfera tem pequeno efeito na termografia infravermelha (8).

O segundo, e também importante critério, é o material do componente a ser inspecionado, em especial conhecer a difusividade térmica do material (1). A difusividade térmica indica a velocidade no qual o calor viaja dentro do material. Para materiais de alta difusividade térmica, como os metais, o calor propaga de forma muito rápida, então para realizar a termografia infravermelha, tem-se a necessidade de possuir equipamento com altas taxas de excitação térmica, por exemplo, os detectores fotônicos resfriados. De maneira contrária, materiais com baixa difusividade térmica, como os compósitos, por possuir na maioria dos casos fase matriz de resina polimérica, permite realizar o ensaio de termografia infravermelha com câmeras mais lentas, como as equipadas com detectores microbolômetros não resfriados.

2.2. Materiais compósitos

Não existe um real consenso na literatura e em meios acadêmicos quanto a uma definição de materiais compósitos. De maneira geral os materiais compósitos podem ser tratados como materiais multifásicos, oriundos de uma combinação de dois ou mais materiais distintos, não miscíveis (18), que possuam interface reconhecível entre eles (19). No entanto, por motivos de demanda comercial e aplicações, os compósitos são comumente classificados como materiais que contenham reforços envoltos em um material aglomerante (20).

Vários exemplos destes materiais podem ser citados, desde compósitos de ocorrência natural como a madeira – fibras de celulose, que são resistentes e flexíveis, impregnadas por lignina, uma resina natural mole – até materiais compósitos de fabricação humana, como resinas poliméricas reforçadas com fibras. Aços podem ser também classificados como compósitos, pois combinam fases com distintas estruturas e propriedades, que conferem as características finais do material (21).

No entanto, no contexto deste trabalho, serão tratados como materiais compósitos somente aqueles que forem de origem artificial e que as fases constituintes forem quimicamente dissimilares e separadas por interface distinta. Desta forma, não serão tratados como compósitos ligas metálicas e materiais cerâmicos porque suas múltiplas fases são normalmente formadas como consequência de fenômenos naturais (18).

Atualmente, o número de aplicações dos materiais compósitos é tão grande que, catalogados, se encontram mais de quarenta mil aplicações. Muitas das conquistas tecnológicas atuais, nos demais diversos setores de engenharia, remetem aos recentes avanços nos materiais compósitos. Na indústria do petróleo e gás, os materiais compósitos já vêm sendo aplicados em vários segmentos, como: dutos, tubulações, tanques, reservatórios, grades de piso, calha para passagem de instalações elétricas, guarda corpos, escadas, risers, etc (22).

As principais vantagens desse tipo de material são a baixa densidade, resistência a corrosão e boas propriedades mecânicas. A resistência a corrosão, por exemplo, é de fundamental importância para a indústria petrolífera, pois diminui em muito o tempo de parada dos equipamentos, por espessura mínima operacional (23). Outra excepcional propriedade é a alta resistência mecânica específica, pois permite fabricar objetos com alta resistência e baixo peso, ótimo para instalações marítimas (*off-shore*) onde lastro é um parâmetro que deve ser muito bem estudado e otimizado.

Com a inserção dos materiais compósitos de base polimérica no contexto industrial, tem-se discutido como avaliar os sistemas nestes materiais ao longo de sua vida operacional. Assim surge a necessidade de se dispor de métodos de exame que sejam adequados às características específicas destes novos materiais, que apresentam grande diferença em relação aos materiais metálicos usuais. Os métodos de ensaios não

destrutivos, usualmente aplicados, apresentam limitações devido às particularidades dos novos materiais (alta heterogeneidade; irregularidades superficiais; anisotropia e baixa condutividade térmica) e precisam ser ajustados. Dentre os métodos de avaliação não destrutivos para materiais compósitos, o ultra-som, a emissão acústica e a termografia destacam-se dos demais. As principais características destes métodos não-destrutivos são a alta sensibilidade, boa produtividade e possibilidade de automação (2).

Vários são os métodos de fabricação de materiais compósitos. Dependente das propriedades finais desejadas, podem ser citados alguns desses métodos. Importante ressaltar que os processos de conformação de materiais compósitos ainda estão em grande desenvolvimento. São:

- Laminação manual (*Hand layup*);
- Laminação a pistola (*Spray up*);
- Bobinamento helicoidal filamentar (*Filament Winding*);
- Centrifugação;
- Moldagem por compressão;
- Injeção;
- Pultrusão;

Dentre os processos de conformação acima citados, para a aplicação tubulações de compósitos na indústria do petróleo, destaca-se o bobinamento helicoidal filamentar (*Filament Winding*). Essa técnica é empregada na fabricação de sólidos de revolução, como cilindros ou esferas. É bastante usada na produção de tubos, vasos de pressão, tanques grandes para indústria química e eixos de transmissão (24).

A máquina usada no bobinamento helicoidal filamentar tem um mandril, que serve como um molde (para tubos, no diâmetro interno do tubo), no qual serão enroladas as fibras como um carretel e aplicado a resina. O posicionamento e ângulo das fibras podem ser controlados, de acordo com as propriedades requeridas no projeto, na sua aplicação no molde, que é feito junto com um pré-impregnamto com a resina. Uma das principais vantagens desse método é poder produzir peças com alta fração volumétrica de fibra, com ótima uniformidade de distribuição, em curtos intervalos de tempo (25).

Conforme discutido acima, os compósitos possuem, normalmente, duas fases constituintes: matriz e reforço. Assim, as propriedades finais dos objetos feitos desses materiais são totalmente dependentes das propriedades de cada fase constituintes, das suas disposições no complexo e a interação de interface. Então, o processo de fabricação, a forma que os carregamentos são aplicados, o mecanismo de dano desenvolvido, a presença ou não de condições adversas, as respectivas frações de volume e as propriedades da interface, presença de vazios, além das propriedades dos elementos constituintes, contornam o comportamento em serviço dos compósitos (22).

Dentre os fatores que afetam as propriedades dos materiais compósitos, a mais significativa é a fração e forma em que as fibras estão arrançadas na fase matriz. Isso porque, normalmente, essas duas fases têm propriedades extremamente distintas (24). Para exemplificar essa diferença, a Tabela 2.1 apresenta algumas propriedades mecânicas e térmicas do complexo epóxi - fibra de vidro tradicional. Esse complexo é o mais usual na fabricação de tubulações, na indústria do petróleo, fabricado por bobinamento helicoidal filamentar (2). A forma que as fibras estão arrançadas, por sua vez, acarretam uma forte anisotropia, com propriedades extremamente dependentes da direção que as fibras estão dispostas.

Tabela 2.1 Propriedades de um complexo epóxi - fibra de vidro

Material	Capacidade Térmica (J. kg ⁻¹ . K ⁻¹)	Condutividade Térmica (W.m ⁻¹ . K ⁻¹)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Densidade (kg. m ⁻³)
Fibra E-glass	710	3,0	72400	2,490
Epoxi Bisfenol A	1050	0,3	2750	1,250

Os materiais compósitos, assim como qualquer outro, adquirem danos originados de carregamentos e outras exposições, que podem ocorrer em diferentes passos do processo de manufatura, durante a instalação ou durante a vida em serviço. Os principais danos encontrados nesses materiais são (18) (20) (2):

- Fissuração na matriz: presença de fissuras na matriz do compósito;
- Ruptura de fibras: ocorrência de fratura da fibra;

- Descolamento fibra-matriz: quando ocorre um descolamento da interface fibra-matriz;
- Delaminação: falta de aderência entre as camadas do compósito na forma de laminados;
- Microflambagem: deformação que ocorre nas fibras do material quando o mesmo está submetido a esforços de compressão, causando pequenos descolamentos fibra-matriz.

Tradicionalmente, a inspeção realizada pelos fabricantes constitui-se de uma combinação de ensaios visuais, controles dimensionais e testes hidrostáticos (no caso de tubulações e vasos de pressão). Estes métodos não fornecem informações satisfatórias quando aplicados na inspeção de montagem ou em serviço, ou nem mesmo podem ser executados em todos os estágios da vida do material, fazendo-se necessário então investir-se outras técnicas de avaliação (26).

2.3. Tubulações de Epóxi reforçado com Fibra de Vidro

A utilização dos tubos de compósitos, na indústria do petróleo, data de 1948, porém somente nos anos cinquenta que tubos de maiores diâmetros se tornaram disponíveis (22). Suas principais vantagens são as suas altas resistências químicas e mecânicas específicas. Isso elimina a necessidade de camadas de proteção, comuns em tubulações metálicas, além de diminuir muito o peso das instalações industriais.

As tubulações de compósitos oferecem grande versatilidade de projeto com amplo leque de diâmetros, conexões e acessórios disponíveis. Essa gama, possibilita inúmeras aplicações dessas tubulações, sendo as mais comuns as dispostas abaixo (2):

- | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| • Processos químicos; | • Efluentes e resíduos industriais; |
| • Água potável; | • Saneamento; |
| • Dessalinização; | • Irrigação; |
| • Sistemas de refrigeração; | • Águas pluviais; |
| • <i>Down-hole tubing e casing</i> ; | • Campos de petróleo; |
| • Esgotamento sanitário; | • Adutoras; |
| • Dutos de ventilação; | • <i>Topside piping</i> . |
| • Transporte de água do mar; | |

Embora existam vários processos de fabricação para tubos, pela velocidade e qualidade da fabricação, o processo mais usado é o bobinamento helicoidal filamentar. Esse processo permite fabricação de tubos com elevado teor de fibras, ótimo acabamento superficial e boa precisão geométrica.

Para a seleção de um correto tubo de compósito, obviamente, necessitamos que os parâmetros de projeto sejam muito bem ajustados. Assim, devem-se conhecer as propriedades do compósito utilizado, requisitos de classe de pressão e rigidez, além das condições de instalação e operação que o tubo será submetido. Por fim, os principais aspectos que devem ser levados em conta na concepção de tubos em compósitos são (22):

- Diâmetro nominal;
- Pressão e temperatura de trabalho;
- Sobre-pressão em manobras de abertura e fechamento de válvulas e partida do bombeamento;
- Vácuo;
- Propriedades do material circundante do tubo;
- Fluido transportado.

No caso específico de juntas coladas, como juntas em luva ou ponta e bolsa, os defeitos mais recorrentes são as porosidades, trincas, falta de adesivo e falta de adesão. Estes podem ser encontrados por meio do teste hidrostático (se houver falha ou falta de estanqueidade) ou em operação por falhas devido à vibração ou pressões de serviço. Relatos vêm apontando que as maiores falhas nessas juntas são atribuídas a erros na fase de construção e montagem da linha o que corrobora com a idéia de ter ferramentas de detecção desses defeitos para que se construam banco de dados, levando a uma melhora nos processos de montagem desses tubos (2).

2.4. Imagens Digitais

A representação e manipulação, de uma imagem em computador, requerem a definição de um modelo matemático adequado da imagem. Uma *imagem* pode ser definida como uma função de intensidade luminosa, denotada $f(x, y)$, cujo valor de amplitude nas coordenadas espaciais (x, y) fornece a intensidade luminosa ou o brilho

naquele ponto. Como a maioria das técnicas de análise é realizada por meios de processamento computacional, essa função imagem deve ser convertida da forma contínua para a forma discreta. Dessa forma, uma imagem digital pode ser obtida por um processo denominado *digitalização*, o qual envolve duas etapas, a amostragem e a quantização (27).

A amostragem consiste em discretizar o domínio de definições da imagem nas direções x e y, chegando a uma matriz com $M \times N$ amostras. A quantização se diz respeito ao número inteiro L referente à intensidade ou nível da cor permitido para cada ponto da imagem. Assim temos o vetor:

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & \cdots & f(M-1,0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f(0,N-1) & \cdots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad [2.6]$$

Então, cada elemento $f(x, y)$ dessa matriz de amostras é denominado pixel (do inglês *picture element* – é a menor representação da imagem, equivalente a um ponto da matriz de representação da imagem), com $0 \leq x \leq M-1$ e $0 \leq y \leq N-1$. Dessa forma, a imagem contínua é aproximada por uma matriz de dimensão M pixels na horizontal e N pixels na vertical. Assim, a dimensão de cada pixel, ao longo dos eixos coordenados, está relacionada com o espaçamento físico entre as amostras, ou seja, a porção de espaço contínuo que o pixel vai representar discretamente.

A intensidade f , por sua vez, é relativa à cor de cada ponto (x, y) . No caso de tons de cinza para um sistema que trabalha com oito bits, a cor preta é representada pelo nível de cinza mais escuro (por exemplo, 0) e o branco o mais claro (por exemplo, 255) (28).

Diante do exposto acima, pode-se conceituar então a *resolução espacial* e a *profundidade* de uma imagem digital. A primeira está associada à densidade de pixels da imagem. Quanto menor o intervalo de amostragem entre os pixels da imagem, ou seja, quanto maior a densidade de pixels, maior será a resolução espacial de uma imagem. É importante ressaltar que uma imagem com grande número de pixels não necessariamente possui maior resolução que outra com número menor de pixels. Isso irá, na verdade, depender da porção espacial real que cada pixel vai representar (27). Por exemplo, uma imagem que represente uma região de $20 \times 20 \text{ cm}^2$ (400 cm^2), consistindo em 20 amostras uniformemente espaçadas na direção x e 20 igualmente na

direção y, cada pixel iria possuir dimensão de $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$. Uma resolução maior seria ter 40 elementos em cada direção, cada pixel representando, agora, $0,5 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm}$.

A profundidade, por sua vez, é o fator associado ao número de níveis de cor, normalmente de cinza, que a imagem pode ter. Como a informação computacional é composta de bits, o número de níveis de quantização da imagem $f(x, y)$ é normalmente uma potência de 2, ou seja, $L = 2^b$, onde L é o número de níveis de cor da imagem e b é chamado de profundidade da imagem (28). Assim, por exemplo, uma imagem de 256 cores possui profundidade de 8 bits por pixel. Dessa forma, quanto maior for a profundidade, maior serão as possibilidades de cores em cada pixel, melhorando a qualidade da imagem.

Uma imagem digital pode ser representada por meio de uma matriz bidimensional, na qual cada elemento da matriz corresponde a um pixel da imagem. Há varias vantagens de se usar matrizes ao invés de imagens, pois matrizes são estruturas mais simples para se armazenar, manipular e visualizar dados. Esse tipo de representação é essencial para se fazer manipulações matemáticas nas imagens (27).

Em uma imagem digital monocromática, o valor do pixel é um escalar entre L_{\min} e L_{\max} . Porém podem existir imagens nas que cada pixel associado a um valor vetorial $f(x, y) = (L_1, L_2, \dots, L_n)$, onde $L_{\min} \leq L_i \leq L_{\max}$ e $i = 1, 2, \dots, n$. Essas imagens são chamadas de multibandas ou multiespectrais (27). Nesse tipo de imagem digital, o valor L_i pode representar grandezas diferentes, tais como temperatura, pressão ou frequência, amostradas nos pontos (x, y) . No caso de termografias, alguns equipamentos de termografia infravermelha gravam os termogramas em formato radiométrico, no qual as imagens são gravadas com valores de cores, dependentes da escala selecionada, e valores de temperaturas. Também são gravados em imagens desses equipamentos informações de emissividade dos materiais. Assim, pode-se afirmar que essas termografias infravermelhas são imagens multibandas.

Existem situações em que é necessária uma extensão dos conceitos de imagens bidimensionais para uma terceira dimensão, como uma seqüência temporal de imagens como um vídeo, por exemplo. Nesse caso, a terceira dimensão representa o tempo, mas em outras aplicações pode representar o espaço, como em representações tridimensionais do espaço. Dessa forma, uma imagem digital pode ser representada

como uma seqüência de imagens monocromáticas ou multibandas na forma $f(x, y, z)$. No caso de matrizes, essa imagem seria representada como uma seqüência de matrizes sobrepostas gravadas em um único vetor (27).

Para melhoria de aparência de determinadas características de imagens, tornando-a mais adequada para a aplicação em questão, utilizam-se técnicas de realce de imagens, que se dividem em duas categorias: métodos do domínio espacial e métodos do domínio da freqüência. O domínio espacial refere-se ao próprio plano de imagem, sendo que as abordagens nessa categoria são baseadas na manipulação direta dos pixels da imagens. Já as técnicas de processamento no domínio da freqüência são baseadas na modificação da imagem com a aplicação da transformadas, como, por exemplo, a de Fourier (28). No escopo do presente trabalho, apenas a primeira abordagem foi utilizada.

No domínio espacial, dentre várias manipulações que podem ser feitas, destacam-se as manipulações que trabalham com o brilho e contraste. O brilho está associado à sensação visual da intensidade luminosa de uma fonte. O contraste, por sua vez, pode ser definido como uma medida da variação relativa da luminância, ou seja, da intensidade luminosa por unidade de área (27).

Dispostos desses dois conceitos, métodos no domínio do espaço vem sendo desenvolvidos em vários campos de atuação, a fim de se aumentar o contraste em regiões distintas, dependendo da aplicação. Da mesma forma no ensaio termográfico ativo pulsado, em que aumento de contraste entre regiões com e sem descontinuidades é de interesse (3) (1).

3.0. MATERIAIS E MÉTODOS

Corpos de prova, confeccionados a partir de partes de tubulações de epóxi reforçado com fibra de vidro, com descontinuidades conhecidas, foram submetidos à análise de termografia ativa pulsada. Primeiramente, sequências de termogramas foram capturadas para se estudar influência dos parâmetros físicos do ensaio termográfico – distância da câmera termográfica ao corpo de prova, distância e forma de aplicação do aporte térmico, tempo de aplicação do aporte térmico e ajuste de escala de temperatura visível na câmera termográfica – na resposta térmica, captada pela câmera termográfica, do calor radiado pelos corpos de prova. Depois, alguns métodos foram desenvolvidos na tentativa de melhorar a detecção de descontinuidades, pois a análise visual algumas vezes compromete a percepção do contraste entre as áreas com e sem descontinuidades. Nesse sentido, rotinas computacionais usando a ferramenta Matlab[®] foram desenvolvidas para melhorar a detectabilidade de descontinuidades.

3.1. Corpos de Prova

Foram utilizados quatro corpos de prova, baseados em parte de tubulações, confeccionados em resina epóxi reforçados com fibra de vidro, com descontinuidades já introduzidas em cada um deles. Cada um se apresenta em forma de cana (meia-calha), oriundos de um corte longitudinal de uma parte de tubulação. Dois desses, denominados CP1 e CP2, apresentam descontinuidades da forma de perda de espessura feitas por usinagem na parte interna da tubulação, esquematicamente representado na Figura 3.1(a), onde o a espessura da descontinuidade l é menor que a da tubulação L . Outros dois, chamados de CP3 e CP4, com intuito de simular um descolamento ou perda de adesivo, possuem descontinuidade superficial entre as duas partes da junta de ponta e bolsa, ou seja, foram introduzidas descontinuidades na região de adesão, entre as partes que compõem a junta, como representa esquematicamente a Figura 3.1(b).

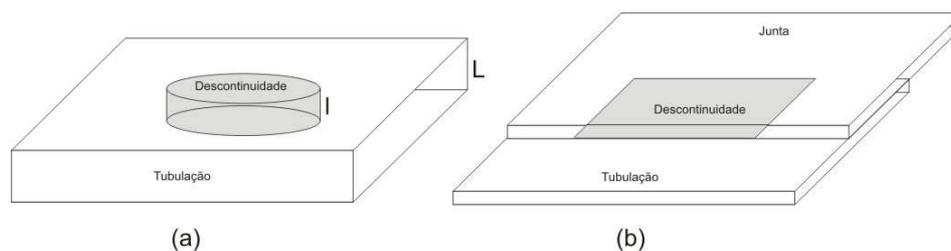


Figura 3.1 Características das descontinuidades nos corpos de prova. (a) Perda de espessura feita por usinagem (Descontinuidade volumétrica) (b) Simulação de descolamento ou falta de adesivo ou na junta ponto e bolsa de tubulação (Descontinuidade planar)

Todos os corpos de prova foram extraídos de tubulações cuja fase matriz é constituída de epiclorigrina bisfenol-A curada a quente, uma resina polimérica termofixa tradicional. A sua fase reforço são novelos de fibra de vidro E-Glass. A conformação da tubulação foi feita por bobinamento filamental helicoidal.

A Figura 3.2(a) apresenta o corpo de prova denominado CP1. O CP1 é uma calha semicircunferencial de 120,0 mm de comprimento, retirado de uma tubulação de 154,0 mm de diâmetro externo e 5,0 mm de espessura média de parede. As descontinuidades, usinadas internamente, deste corpo de prova, estão representadas esquematicamente na Figura 3.2(b), como vista da parte convexa do CP1. Essas descontinuidades foram nomeadas de A até F conforme Figura 3.2(b) e suas dimensões de diâmetro (D) espessura (E) estão apresentadas pela Tabela 3.1. Também são apresentadas na Tabela 3.1 as espessuras remanescentes (ER) de material, referentes a cada descontinuidade usinada.

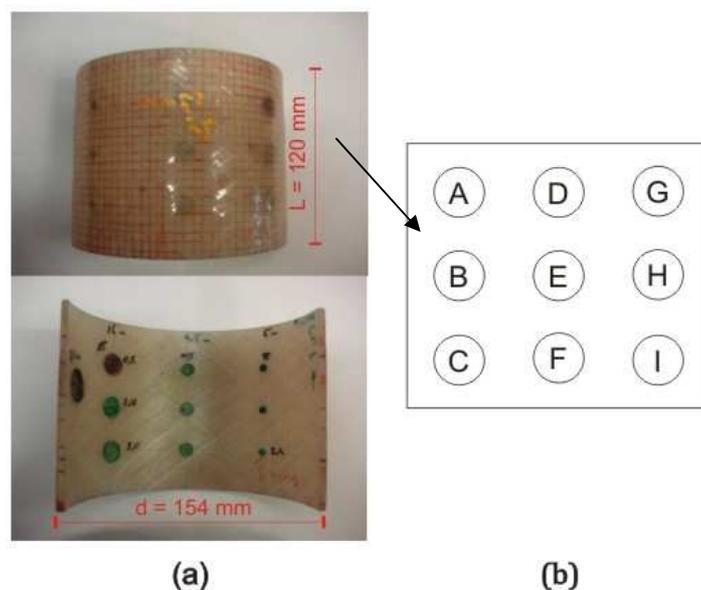


Figura 3.2 CP1. Fotografia com suas dimensões (a) e posicionamento e nomenclatura adotada das descontinuidades (b)

Tabela 3.1 Diâmetro e profundidade das descontinuidades do CP1 representados na Figura 2.1(b)

Dimensão	A	B	C	D	E	F	G	H	I
D (mm)	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	15,0	15,0	15,0
E (mm)	2,5	1,5	0,5	2,2	1,2	0,4	2,0	1,0	0,2
ER (mm)	2,5	3,5	4,5	2,8	3,8	4,6	3,0	4,0	4,8

Como pode ser observado através da Figura 3.2(b) e Tabela 3.1 que as descontinuidades foram colocadas de forma que, a variação nas linhas reflitam em variação na espessura da descontinuidade e, nas colunas, a variação do diâmetro das descontinuidades.

O CP2, da mesma forma que o CP1, está representado na Figura 3.3 e as dimensões das suas descontinuidades na Tabela 3.2. Este corpo de prova de 120 mm de comprimento foi retirado de um trecho de tubulação de 65 mm de diâmetro externo e 8 mm de espessura de parede. Da mesma maneira do CP1 o arranjo de descontinuidades foi concebido para haver variação de diâmetro e espessura.

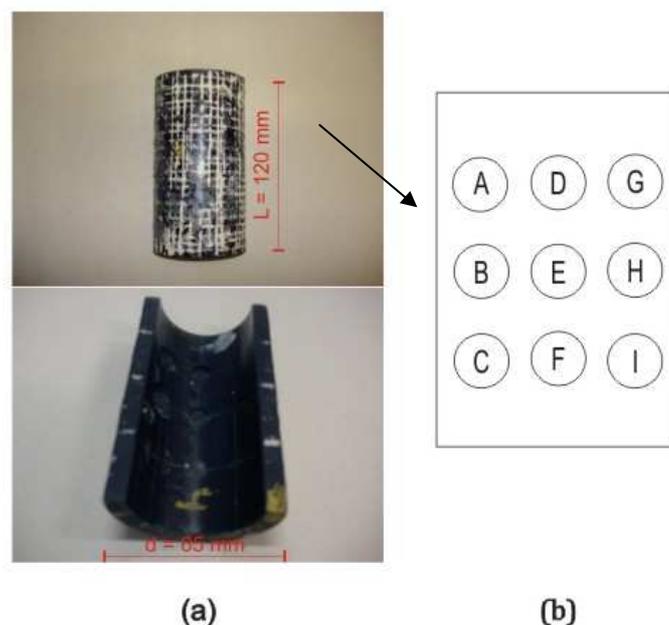


Figura 3.3 CP2. Fotografia com suas dimensões (a) e posicionamento e nomenclatura adotada das descontinuidades (b)

Tabela 3.2 Diâmetro e profundidade das descontinuidades do CP2 representados na Figura 2.2(b)

Dimensão	A	B	C	D	E	F	G	H	I
D (mm)	* ¹	* ¹	* ¹	10,0	10,0	10,0	15,0	15,0	15,0
E (mm)	* ¹	* ¹	* ¹	3,7	2,0	0,4	3,0	1,3	* ²
ER (mm)	* ¹	* ¹	* ¹	4,3	6,0	7,6	5,0	6,7	8,0

A Figura 3.4(a) apresenta o corpo de prova CP3. Este corpo de prova é derivado de um corte de uma junta, tipo ponto e bolsa, de uma tubulação. A tubulação tem diâmetro externo médio de 86,0 mm e espessura média de 4,4 mm a junta possui 92,0 mm de diâmetro externo médio por 100,0 mm de comprimento, com espessura média de 8,0 mm. A descontinuidade foi introduzida na região de adesão, com objetivo de simular uma possível falta de adesivo ou descolamento da junta, possuindo dimensões desconhecidas. Essa descontinuidade está apontada pela seta na Figura 3.4(a).

¹ As medidas em asterisco foram desprezadas neste estudo devido seu pequeno diâmetro quando comparado com a espessura do corpo de prova.

² A descontinuidade I não foi completamente conformada por usinagem no corpo de prova, por isso, desprezada neste trabalho.

O CP4 é apresentado na Figura 3.4(b). Este possui características geométricas idênticas ao CP3, salvo a quantidade de suas descontinuidades. São duas descontinuidades, com mesmas características do CP3, que estão apontadas pelas setas na Figura 3.4(b).

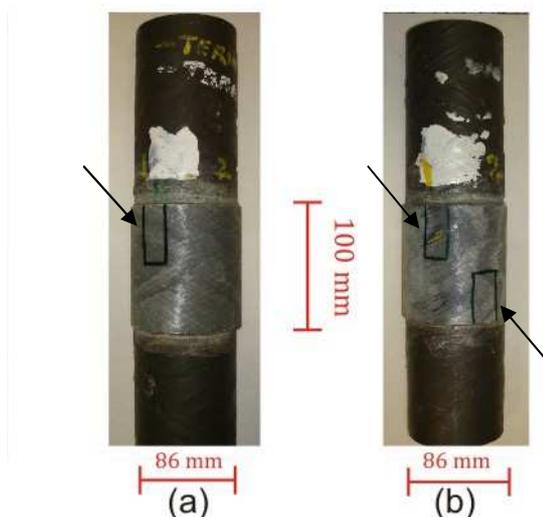


Figura 3.4 (a) CP3. Fotografia e local da descontinuidade inserida. (b) CP4. Fotografia e as duas descontinuidades inseridas

3.2. Procedimento Experimental

Nessa pesquisa, foi utilizada uma câmera termográfica infravermelha FLIR SYSTEMS® Thermacam P65. A resolução das fotos utilizada, na aquisição dos termogramas, foi 320 x 240 pixels em RGB, gravados em seqüência de fotos, capturadas a cada cinco segundos. Algumas outras características da câmera estão elencadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Características físicas da câmera termográfica infravermelha utilizada

Característica	FLIR SYSTEMS® Thermacam P65
Campo de Visão (lente)	24° Horizontal – 18° Vertical
Resolução Espacial	1,3 m.rad
Tipo de detector	Microbolômetros não resfriados em arranjo focal plano
Faixa espectral	7,5 a 13 μ m
Faixa de temperatura detectável	-40°C a 500°
Sensibilidade Térmica	0,08°C a 30°C

Na câmara, a emissividade foi ajustada em 0,9, valor médio e recorrente entre os presentes na literatura para epóxi reforçado com fibra de vidro (2). As temperaturas de fundo, refletida e atmosférica foram colocadas na câmara em 20°C e a umidade relativa do ar em 50%, condições aproximadas do laboratório onde foram realizados os ensaios.

O procedimento experimental utilizado na presente pesquisa deriva das abordagens inicialmente propostas por Freitas (2), Marinho et al (26) e trabalhos em andamento no Cenpes na Petrobras. Porém, melhorias foram desenvolvidas durante os experimentos, através do que foi encontrado na literatura, em especial em publicação de Shepard (1).

Foi usado, para o aquecimento das amostras, o soprador térmico HL1500 da Steinel[®], operando em rede de 127 V. Foi selecionada a potência em 1400 W que produz um jato de ar com 400 l/min de vazão a 500°C em uma área circular de 20 mm de diâmetro.

O arranjo experimental básico, conforme Figura 3.5, constitui-se em se colocar a câmara termográfica a uma distância D_c do corpo de prova a um ângulo θ_c em relação a uma normal N do corpo de prova. O corpo de prova foi submetido ao aquecimento pelo soprador térmico de ar, que foi colocado a uma distância D_s e ângulo θ_s do corpo de prova, sendo observado o perfil de resfriamento do corpo de prova pela câmara termográfica em reflexão, ou seja, a câmara termográfica posicionada do mesmo lado do aquecimento do corpo de prova. Essa técnica é denominada Termografia Ativa Pulsada (3). Neste trabalho foram utilizados apenas os ângulos de aporte térmico e da câmara, respectivamente, θ_s e θ_c em 0° , ou seja, perpendiculares ao corpo de prova.

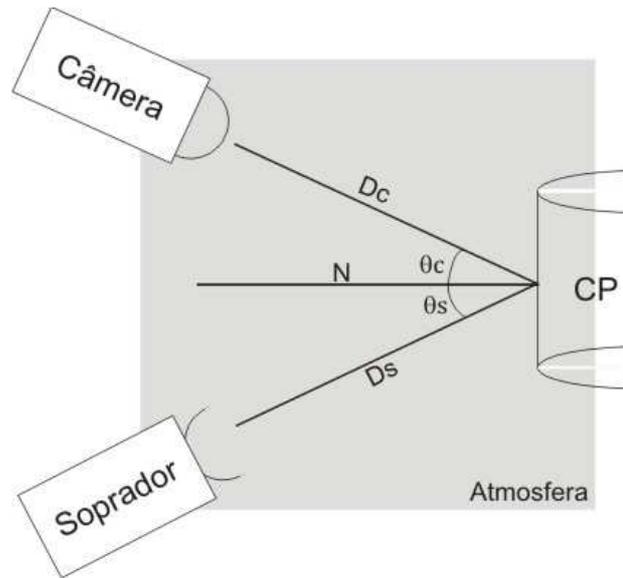


Figura 3.5 Esquema geral dos experimentos

A escala de cores registrada pela câmera termográfica é em cores RGB em escala de tons de ferro, ou seja, varia de um azul escuro (cor de ferro frio) até um amarelo claro (cor de ferro incandescente). Essa escala fixa de cores representa uma gama de temperaturas ajustada na câmera no modo manual ou automático. Logo, quanto maior for o campo de temperaturas que se queira ver, menor vai ser a sensibilidade em se detectar diferentes temperaturas, pois a escala de cores é fixa para uma escala de temperaturas variável. Por outro lado, quanto menor a escala selecionada, maior será a sensibilidade à variação de temperaturas, visto que existirá um número muito maior de cores representando uma pequena variação de temperatura, o que é bom no caso da termografia ativa pulsada, onde pequenos pulsos térmicos são aplicados que acarretam pequenas elevações de temperatura na superfície do material.

O trabalho foi dividido em duas partes. Uma delas foi avaliar as influências dos parâmetros físicos do ensaio termográfico, na resposta coletada pelos termogramas, ou seja, na detectabilidade das discontinuidades presentes nos corpos de prova. A segunda foi desenvolver métodos computacionais com objetivo de se melhorar a detectabilidade das discontinuidades presentes nos corpos de prova, pois em muitos casos, o contraste entre as partes com e sem discontinuidades não é suficiente para ser percebido pelo olho humano.

Porém, antes de descrever esses procedimentos de análise, é importante enfatizar o comentário acerca do ajuste da escala visível de temperaturas na câmera termográfica, pois esse ajuste interfere diretamente na coleta e interpretação do ensaio termográfico. A câmera utilizada no presente trabalho tem dois ajustes básicos de escala visível de cores, representando as temperaturas: automático e manual. No ajuste automático, a câmera trabalha para que sejam exibidas, no visor, todas as temperaturas entre a maior e a menor que é recebida pelo grupo de sensores no determinado campo focal. Neste caso, existe uma variação temporal da escala com o tempo, ou seja, para cada instante varia a representação das cores referentes à escala de temperatura. Por outro lado, o ajuste manual permite que se insira uma escala, de acordo com a necessidade do operador. Dessa forma, a escala não varia com o tempo, ou seja, cada cor representa uma temperatura durante o tempo.

É importante ressaltar que o ajuste da escala de temperaturas visíveis não é, na verdade, um ajuste dos níveis de radiação recebidos e processados pela câmera termográfica e, através de programas especializados, pode ser alterada, pois o processamento e gravação das imagens, pelo equipamento utilizado nesta pesquisa, é feito na forma de radiação infravermelha. No entanto, por motivos comerciais, os fabricantes protegem essa informação para que sejam lidas apenas em programas especializados e vendidos pelos próprios fabricantes, deixando apenas a informação de imagem, em formatos de imagens digitais tradicionais, disponíveis para coleta via câmera termográfica. Então, em alguns casos, para melhor conforto do operador, a escala de cores pode ser alterada.

Neste trabalho, a opção manual de escala de temperaturas foi utilizada, pois embora possam ocorrer interpretações equivocadas devido ao fato de que temperatura, algumas vezes, ultrapassar os valores ajustados na escala, o valor de cor para cada temperatura não varia, podendo assim ser feita a análise do seqüenciamento de fotos por programas de edição de imagens tradicionais ou por manipulações computacionais, este último transformando as imagens em representação matricial.

Em todo o trabalho, tanto na parte de estudo dos parâmetros experimentais, quando na segunda parte, na qual métodos computacionais foram testados, o julgamento do resultado, ou seja, da detecção de defeitos foi conduzido de forma semelhante. Para cada um, o resultado dado para cada análise realizada pode ser classificado como *bom* –

B – quando a descontinuidade é perfeitamente detectada, *regular – RG* – para quando há apenas indicações da ocorrência da descontinuidade e *ruim – R* – quando não se detectou a descontinuidade. É também característica dos métodos que a natureza da interpretação da resposta, para se julgar a presença ou não de descontinuidade, demanda uma boa sensibilidade da pessoa que está analisando.

3.2.1. Análise dos parâmetros experimentais

O estudo dos parâmetros experimentais foi conduzido, analisando a distância e modo do estímulo térmico, distância da câmera termográfica, campo e nível da escala de temperaturas.

Para a análise de imagens no estudo dos parâmetros experimentais foi utilizado o método de observação direta das termografias, doravante denominado *Método Visual*. A Figura 3.6(a) exemplifica uma análise pelo método visual em uma seqüência de imagens obtida pela técnica de termografia ativa pulsada considerada de bom resultado, contrário a Figura 3.6(b), que não teve bom resultado, ambos para o mesmo corpo de prova CP1. Assim, conforme descrito anteriormente, podem ser classificados em (a) uma condição *B* e em (b) uma condição *R*.

O método visual, neste trabalho, foi o único em que as termografias foram utilizadas de maneira direta. Como exemplo da Figura 3.6 onde se analisa o corpo de prova CP1, pode ser dito que a parte (a) ficou boa para se detectar as descontinuidades D e E. Não se detectou a descontinuidade F. Na parte (b) nenhuma descontinuidade foi detectada. Ou seja, o método visual trabalha com a capacidade do aparelho ocular humano de detectar as descontinuidades pelo contraste de cores acarretado pela diferença de temperaturas na superfície.

No mesmo caso da Figura 3.6 (a), se observa um efeito de borda, que interfere no aquecimento do corpo de prova, durante o pulso térmico. Na parte inferior, pode-se observar um acúmulo de calor devido à superfície que o corpo de prova está apoiado. Já na parte superior, que está em contato com o ar, nota-se menor acúmulo de calor. Isto interfere diretamente na leitura dos defeitos D e F próximos às bordas, então, apenas a descontinuidade central, ou seja, a descontinuidade E será considerada nesta etapa do estudo, minimizando assim outra variável que, nas aplicações industriais, não existe,

devido à continuidade das linhas de tubulações. Isso é válido apenas no raciocínio do CP1 e CP2.

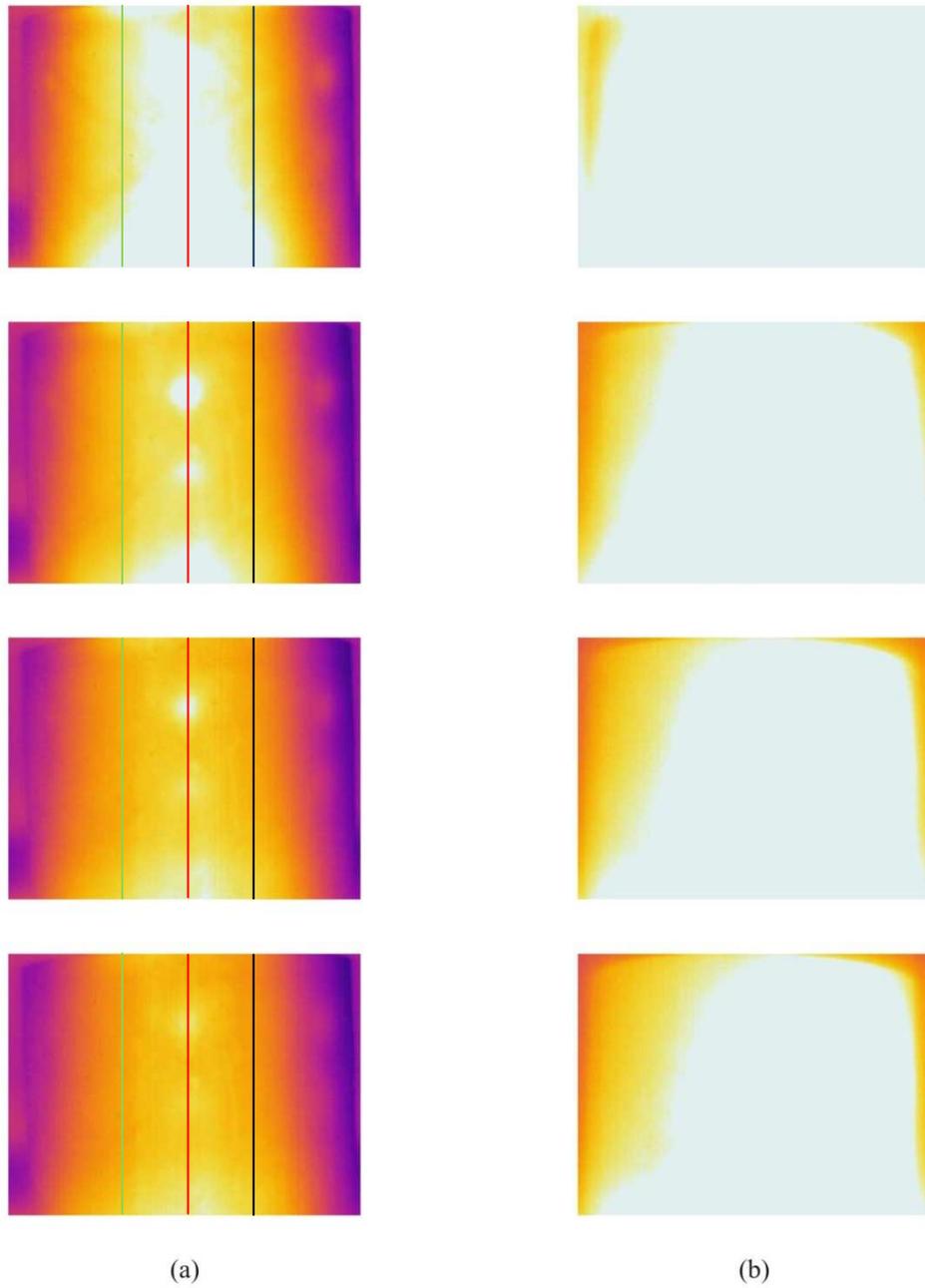


Figura 3.6 Sequências de fotos, realizadas por termografia ativa pulsada, consideradas (a) boa e (b) ruim

No caso do CP3 e CP4 todas as descontinuidades foram consideradas, sendo a classificação da detectabilidade realizadas da mesma forma. Única diferença que qualquer descontinuidade é tratada sem particularização, então se apenas uma foi bem detectada o resultado é tido como bom.

No ensaio de termografia ativa pulsada, o aporte térmico é tido como o principal parâmetro a ser controlado, pois será ele o responsável por gerar a diferença térmica da superfície com relação ao interior do material, que será força motriz para a transferência de calor (3). A Figura 3.7 apresenta três esquemas de aquecimento que, tendo a mesma fonte térmica numa mesma distancia, variou-se apenas o tempo de aquecimento, no qual $t_3 > t_2 > t_1$. Através dessa figura se observa que com um baixo tempo de aquecimento, Figura 3.7 (a), a diferença de temperatura entre a região aquecida e o outro lado da peça será baixa, resultando em baixo transito de energia térmica. Já na Figura 3.7 (b) percebe-se uma grande diferença entre os dois lados, levando a altas transferências térmicas da superfície aquecida para o interior. Por fim na Figura 3.7 (c), com tempo muito alto de aquecimento, todo o corpo do objeto tende a se equalizar em alta temperatura, diminuindo novamente o transito térmico entre as partes.

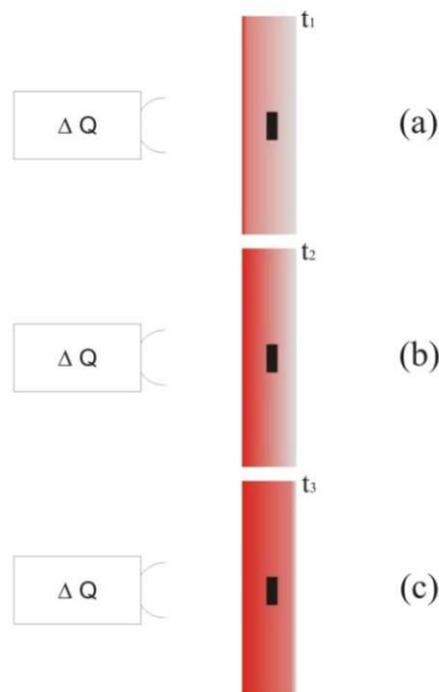


Figura 3.7 Exemplo de três tempos de aquecimentos para a mesma fonte térmica, onde $t_3 > t_2 > t_1$. Aquecimento insuficiente (a), aquecimento ideal (b) e supraaquecimento (c)

Dessa forma, para todos os tópicos que serão discorridos, referentes às variações nos parâmetros do ensaio termográfico, foram realizados experimentos variando o tempo de aporte térmico, normalmente de 10, 15, 20 e 30 segundos.

Distância e modo de aplicação do aporte térmico

O aporte térmico, na termografia ativa pulsada, com uso de um jato de ar quente, pode ser feito de várias formas diferentes. Em busca do melhor resultado, foi feita a variação da distância e modo de aporte. Esse estudo foi feito apenas para o CP1, com o método visual, câmera na distancia de 300 mm e escala ajustada de 20 a 30 °C.

A distância do aporte térmico foi estudada nos comprimentos de 20, 150 e 300 mm. O comprimento de 20 mm não teve exata precisão, pois foi uma distância tida como a mais próxima possível que não ocasionasse algum impacto ou descontrole do aquecimento da amostra. Para essas distâncias, variou-se o tempo de aquecimento em 10, 15, 20 e 30 s.

O modo de aplicação foi feito de duas formas e, para ambas, o tempo de aporte térmico foi variado em 10, 15, 20 e 30s, para uma distância fixa de 20 mm. A primeira forma consiste em se deixar o aquecedor parado em uma posição. Na segunda forma o calor foi distribuído uniformemente por toda a superfície, conforme a Figura 3.8. Nesta figura, pode-se observar que a área de aquecimento é maior que as dimensões do corpo de prova, para se estabelecer uma área uniforme de aquecimento durante todos os ensaios. Importante ressaltar que o ciclo de aquecimento uniforme é rápido, então ao final de um ciclo de aquecimento, em sua duração, o ciclo era retomado da parte de inicio, indo da ultima para a primeira seta da Figura 3.8.

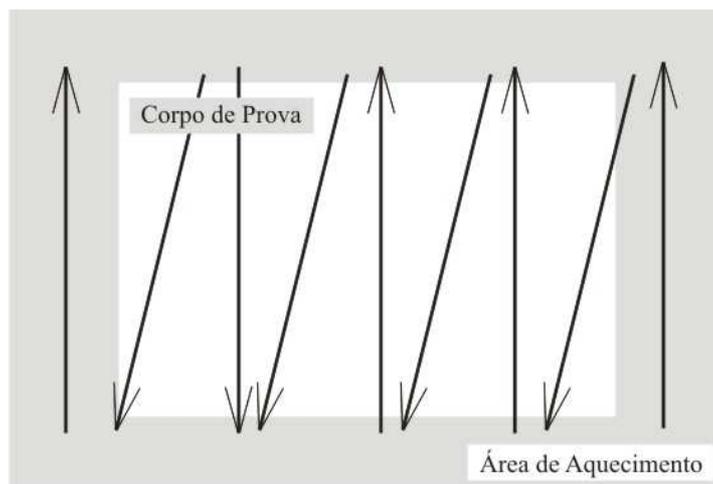


Figura 3.8 Forma de aquecimento uniforme do corpo de prova

Distância da câmera termográfica

Com os tempos de aporte térmico variando em 10, 15, 20 e 30 s, para o CP1, CP2, CP3 e CP4, foi realizado o estudo da distância da câmera termográfica. Nessa etapa, foi feita a aquisição das seqüências de termografias com a câmera nas distâncias de 300, 450 e 600 mm.

Na Tabela 3.4 estão dispostas as dimensões verticais (C_V) e horizontais (C_H) do campo de visão associadas a cada distância de câmera ao corpo de prova. Em outra coluna, na mesma tabela, estão também dispostos os comprimentos reais equivalentes (L_P) de cada pixel na imagem termográfica, para cada distância da câmera ao objeto. É fácil perceber que, quanto maior a distância da câmera ao objeto, maior é o campo de visão e maior é o comprimento real representado por cada pixel.

Tabela 3.4 Campo de visão e comprimento relativo de pixel para cada distância da câmera termográfica

Distância (mm)	C_V (mm)	C_H (mm)	L_P (mm)
300	90	120	0,375
450	135	180	0,563
600	150	200	0,625

Nesta fase do estudo, a escala de cores foi ajustada para mostrar de 20 a 30°C.

Campo e nível da escala de temperaturas

A escala de temperaturas visível na câmera pode ser ajustada, conforme discutido anteriormente, pelo operador. O campo diz respeito ao tamanho da escala, ou seja, a diferença da menor e a maior temperatura que pode ser detectada. O nível, por sua vez, diz respeito a altura da escala que pode ser observada.

O estudo do campo foi realizado variando o seu comprimento de 10, 20 e 30°C, com o a temperatura mínima variando da ambiente, ambiente mais dez graus e ambiente mais vinte graus Celsius, tomando como temperatura ambiente 20°C, temperatura do laboratório na realização dos ensaios. A Tabela 3.5 apresenta os campos utilizados. Para cada um desses, três ensaios foram feitos com tempos de excitação térmica de 10, 15 e 20s, em todos os corpos de prova.

Tabela 3.5 Campo de escala de temperaturas usados nos ensaios

Tamanho do campo (°C)	Campo (°C)
10	20 – 30; 30 – 40; 40 – 50
20	20 – 40
30	20 – 50

A termografia ativa pulsada tem por princípio analisar as diferentes temperaturas superficiais, decorrentes das possíveis variações de transferência de calor na parte interna do material. Neste sentido, a seleção do nível e campo da escala de temperaturas é função, principalmente, da excitação térmica e da temperatura ambiente, pois são esses dois componentes que causam a diferença de temperaturas entre a superfície aquecida e a parte interna do corpo, antes na temperatura ambiente.

3.2.2. Métodos de análise de imagens

Tendo o conhecimento da estrutura básica do arranjo experimental, foi sentida uma carência de ferramentas de análise de dados de termografia, ou seja, meios que subsidiem uma interpretação do que seria coletado pela câmera termográfica. Então, para fazer uma melhor análise dos termogramas, alguns métodos foram desenvolvidos

com objetivo de se detectar as discontinuidades presentes nos corpos de prova. Esses métodos propostos são próprios, desenvolvidos a partir da observação das necessidades do estudo.

Esses métodos foram desenvolvidos através de rotinas computacionais com auxílio da ferramenta Matlab[®], com objetivo de melhorar a detectabilidade das discontinuidades nos corpos de prova, ou seja, desenvolvendo métodos matemáticos em que se melhorasse o contraste entre as regiões com e sem discontinuidade.

Para elaborar esses métodos, partiu-se do princípio de que uma imagem RGB, de resolução 320 x 240 pixels, caso das termografias coletadas no presente trabalho, na qual são formadas de informações de intensidade das três cores primárias (vermelho, azul e verde), associadas à posição de cada pixel $x - y$, pode ser transformada em tons de cinza de 8 bits. Dessa forma, esta imagem pode ser transformada em uma matriz que possui 240 linhas por 320 colunas, na qual cada elemento da matriz representa a intensidade de cor de cada pixel, variando de 0 a 255, com coordenadas x e y , que são, respectivamente, o número da coluna e da linha da matriz. Assim, cada uma das imagens das seqüências obtidas foi transformada em matriz que, com qualquer software de análises matemáticas, pode sofrer tratamento numérico com métodos computacionais. Para efeito de cálculos, a intensidade em tons de cinza foi transformada para a intensidade normalizada I , que varia de 0 a 1, chamado transformação para modo *double*. O formato *double* possui maior precisão numérica que o formato de números naturais, pois a discretização passa ter muito mais valores possíveis do que os 256 do modo tons de cinza de 8 bits.

Nesse raciocínio, em uma seqüência, cada termografia pode ser escrita como uma matriz da seguinte forma:

$$\begin{pmatrix} A_{1,1} & \dots & A_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m,1} & \dots & A_{m,n} \end{pmatrix}_t$$

sendo m e n o número de linhas e colunas da matriz, representando o numero de pixels na vertical e horizontal na termografia, e t representando a termografia na seqüência, sabendo que $t = 5s$.

Dessa forma, pode ser escrito um vetor que represente toda a seqüência de matrizes, com t variando de 1 até o número de total de matrizes, que tenham elementos I em *double* associados às coordenadas x e y variando respectivamente de 1 até n e m . Logo, forma-se um vetor que represente toda a seqüência que possui quatro dimensões: x , y , I e k , sendo k o número de matrizes associadas a termogramas no vetor.

Todos os métodos computacionais têm como objetivo melhorar a detectabilidade de defeitos que não sejam detectados pelo método visual, diretamente nos termogramas. Dessa forma, algumas possíveis formulações matemáticas foram feitas com esse intuito. Quatro métodos foram desenvolvidos, cada um com uma particularidade que exploram caminhos diferentes de alcançar uma melhora de contraste, ou seja, aumentar a diferença dos sinais de temperatura das regiões sem descontinuidades das regiões com descontinuidades.

Basicamente, o primeiro método computacional, denominado *Método da Linha*, constituiu-se em se observar a característica do resfriamento, em uma linha imaginária fixa, de uma seqüência de fotos, como representado na linha vermelha da seqüência da Figura 3.6(a). Este resfriamento foi transformado em forma de uma superfície gráfica do comportamento de intensidade de cor I , para cada ponto da coordenada y (pixel) da linha, para cada foto, ou seja, para cada tempo t (cada foto equivale a 5s). Como exemplo, a Figura 3.9 apresenta o comportamento de resfriamento da linha vermelha da Figura 3.6(a). Importante frisar que a dimensão y cresce da parte superior para inferior nas termografias e que a dimensão I não representa diretamente um valor exato de temperatura e sim um valor relativo de temperatura para cada ensaio, pois o objetivo é análise das diferenças de temperaturas causadas pelas descontinuidades. O eixo do tempo tem escala representada com 5s, pois cada termograma foi obtido com o tempo de cinco segundos.

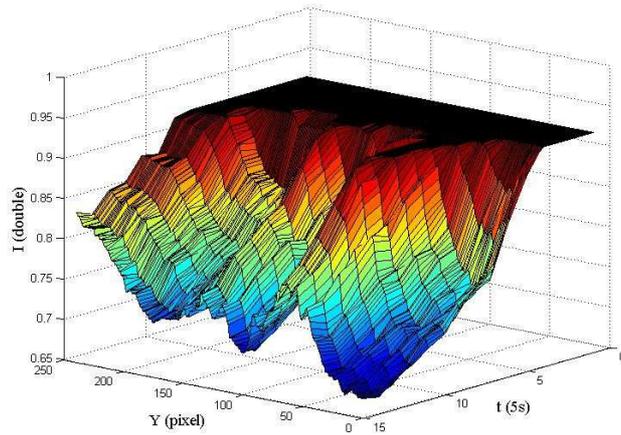


Figura 3.9 Exemplo de característica de resfriamento do CP1, observado na linha vermelha da Figura 3.6(a)

Para exemplificar uma região sem defeito pelo Método da Linha, foi extraído da linha preta da Figura 3.6(a) o perfil de resfriamento, que está representado na Figura 3.10.

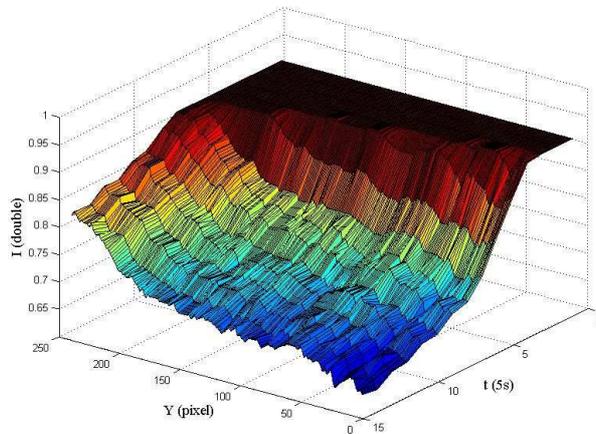


Figura 3.10 Exemplo de característica de resfriamento do CP1, observado na linha preta da Figura 3.6(a)

Comparando visualmente as duas regiões pelo método das linhas, é fácil observar o efeito de ondulação, causado pela variação térmica na região das discontinuidades. Essa visualização não precisa ser feita, necessariamente, em forma

gráfica tridimensional. A representação pode ser feita de outras formas, como por exemplo, bidimensional traçando várias curvas para cada unidade de tempo (termograma).

Decorrente do Método das Linhas foi feito a subtração de duas curvas de resfriamento sob duas linhas na seqüência de termogramas. Primeiramente, como exemplo, foi feita a diferença do decaimento de temperaturas entre as linhas preta e vermelha da Figura 3.6 (a), como mostra a Figura 3.11. Pode ser visto claramente que as três discontinuidades centrais do CP1 – D, E e F – puderam ser detectadas, um avanço, neste caso, em relação ao Método Visual e ao Método da Linha, em que a discontinuidade F não foi identificada. Esse método foi denominado *Método da Diferença de Linhas*. A Figura 3.12 apresenta o Método da Diferença de Linhas aplicado em duas regiões onde não haviam discontinuidades, representado pela diferença do decaimento de temperatura entre as regiões das retas verde e preta da Figura 3.6 (a). Como era de se esperar, o efeito das discontinuidades não foi detectado.

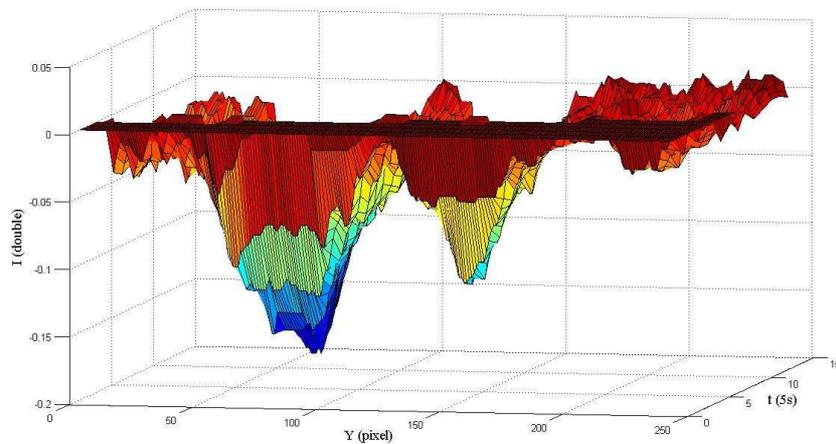


Figura 3.11 Exemplo do Método da Diferença de Linhas de uma região com defeito e outra sem defeito

Mudando o raciocínio de uma linha para a análise do termograma como um todo, foi estabelecido o *Método da Soma*, no qual todas as imagens da seqüência foram somadas com objetivo de se aumentar a diferença da região com discontinuidade da região sem discontinuidade.

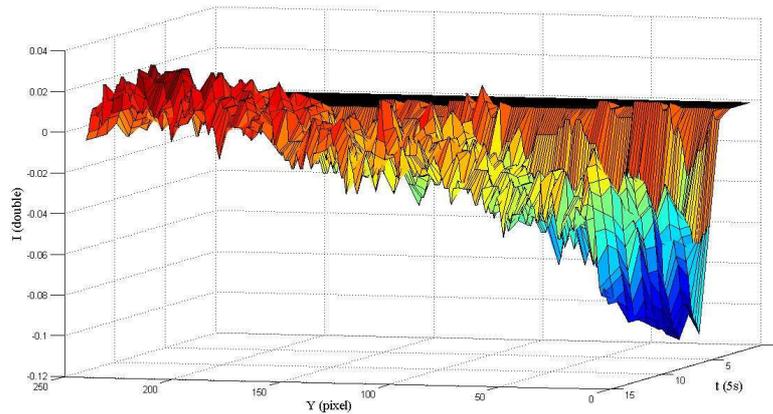


Figura 3.12 Exemplo do Método das Diferenças de Linhas em duas regiões sem defeito

O princípio deste método é: se existem regiões que, por ter descontinuidades, sempre se apresentam de forma mais quente e a forma mais quente representa maiores valores de I quando transformados em *double*, o resultado da soma dessas matrizes, representando a soma das imagens, irá apresentar valores muito maiores na região mais quente que na mais fria. Como exemplo do resultado do Método da Soma da seqüência apresentada na Figura 3.6(a) foi feito o gráfico representado na Figura 3.13. Nesse gráfico, assim como no Método da Linha, as descontinuidades D e E do CP1 podem ser facilmente detectadas.

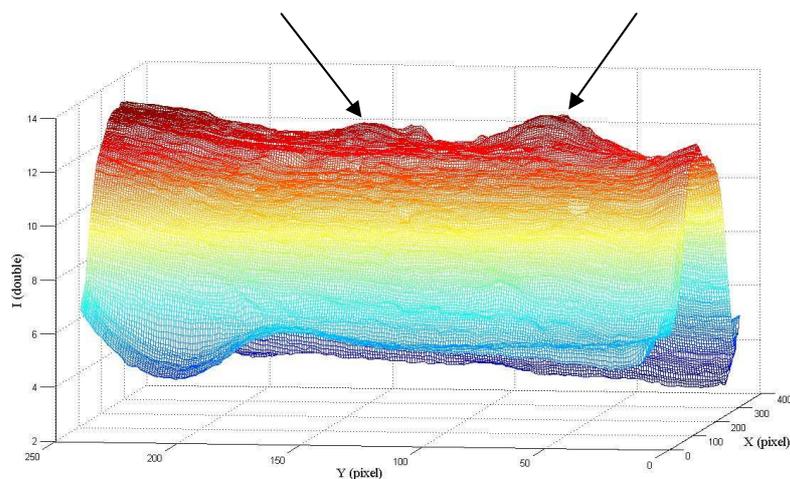


Figura 3.13 Exemplo de superfície resultado do Método da Soma

Por fim, foi estabelecido o *Método da Diferença*. Nesse método, inicialmente foi criada uma rotina que detectasse qual das imagens na seqüência de termografias apresentava maior contraste, na área de interesse, ou seja, no setor dos defeitos D, E e F. A imagem de maior contraste é aquela que apresenta maior variância de dados numéricos referentes à cor, ou seja, o que apresente maiores diferenças de temperatura em termografias. Com isso, foi feita a diferença da primeira imagem da seqüência com a de maior contraste e foi traçado o gráfico desta diferença. A Figura 3.14 apresenta, como exemplo da seqüência da Figura 3.6(a), o resultado deste método.

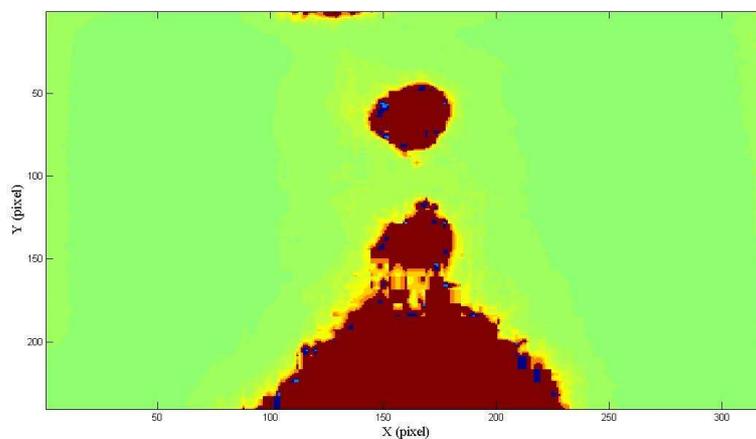


Figura 3.14 Exemplo de resultado do Método da Diferença

Para a análise dos quatro métodos propostos, foram selecionadas nove condições diferentes. Todas foram feitas no CP1, com distância da câmera de 300 mm, com variações na escala de cores e tempo de aquecimento. Para o estudo dos métodos computacionais, foi levado em conta as descontinuidades D, E e F do CP1, diferente do estudo dos parâmetros físicos do ensaio, que apenas a descontinuidade E foi considerada. A Tabela 3.6 apresenta as cinco condições que foram usadas no estudo dos métodos.

Tabela 3.6 Condições de ensaio utilizadas no estudo dos métodos computacionais de análise de termogramas

Condição	Escala de Cores (°C)	Tempo de Aquecimento (s)
I	20 – 30	10
II	20 – 30	15
III	20 – 40	10
IV	20 – 40	20
V	30 – 40	15
VI	30 – 40	30
VII	40 – 50	30
VIII	40 – 50	40
IX	40 – 50	50

4.0.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões do que foi observado durante os experimentos. As análises estarão pautadas nos métodos de análise, conforme o descrito no capítulo anterior. O encadeamento será primeiramente analisando os parâmetros físicos do ensaio e, por fim, atacando com breves discussões, a robustez dos métodos de análise usados. Todas as seqüências de termografias coletadas em laboratório podem ser encontradas no CD, em anexo.

4.1. Análise dos Parâmetros Experimentais

4.1.1. Distância e modo do aporte térmico

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos quando variada a distância entre o soprador de calor e o corpo de prova. Uma menor distancia aumenta a energia térmica incidente na superfície, no entanto dificulta uma uniformidade de distribuição na superfície do objeto.

Tabela 4.1 Variação da distância do soprador térmico para diferentes tempos de aporte térmico (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)

Distância (mm)	Tempo (s)			
	10	15	20	30
20	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>	<i>R</i>
150	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>
300	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>

Pode-se perceber que o aumento da distância propiciou uma baixa qualidade nos resultados nos termogramas. Provavelmente, o aumento de distância do soprador acarretou em uma baixa incidência térmica na superfície, levando a uma baixa taxa de aquecimento da mesma. Dessa forma, a diferença de temperatura entre a superfície e o interior foi muito pequena, acarretando uma baixa transferência térmica para o interior da peça, causa provável de uma baixa resolução das descontinuidades internas.

Também, notou-se que o aumento do tempo de aporte térmico, mesmo para uma pequena distância levou a resultados ruins. Isso pode ser causado, provavelmente, pelo fato de ter havido uma inundação de energia térmica do corpo de prova, não havendo mais, assim, transferência de calor da superfície para o outro lado da peça. Outra provável causa, é que a temperatura se elevou na superfície a temperaturas maiores que as lidas na escala adotada, levando a uma falsa inundação térmica.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos no estudo da forma de aporte térmico. Foi observado que os melhores resultados foram obtidos com o soprador térmico em movimento, ou seja, fazendo uma uniforme distribuição térmica por todo o corpo de prova. Isso pode ser explicado pelo fato de que o soprador parado pode levar a um superaquecimento localizado, interferindo na transferência de calor nas regiões vizinhas, levando a resultados não satisfatórios. Esse fenômeno pode ser observado através da Figura 4.1.

Tabela 4.2 Variação do modo de aplicação do pulso térmico para diferentes tempos desse pulso (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)

Modo	Tempo (s)			
	10	15	20	30
Parado	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>
Movimento	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>	<i>R</i>

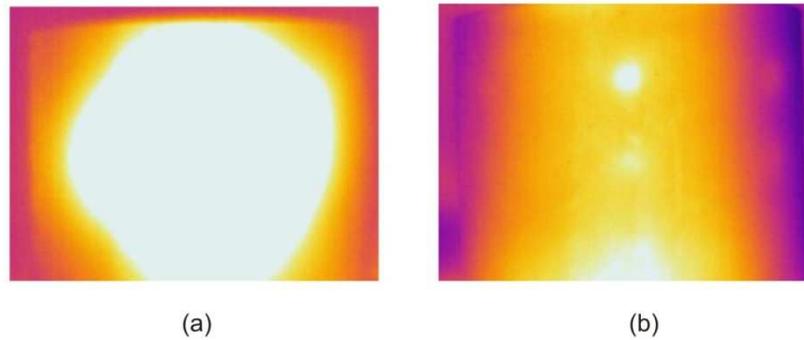


Figura 4.1 Ensaio termográfico com aporte térmico parado na região central (a) e distribuído em toda a superfície do material (b)

Uma possível abordagem para o estudo realizado é a focalização do pulso térmico. No entanto, nada conclusivo foi realizado neste trabalho, considerando uma importante possibilidade quanto a trabalho futuro.

4.1.2. Distância da câmera termográfica

A Tabela 4.3 apresenta os resultados da observação da descontinuidade conhecida, quando variada a distância da câmera termográfica para o CP1. Foi observado que, para este caso, a distância da câmera termográfica, nos comprimentos estudados, não teve grande influência na detecção das descontinuidades. As diferenças encontradas não foram grandes, e estas são consideradas normais pela grande sensibilidade da técnica que, com o jogo de lentes utilizado, a câmera ainda mantém uma resolução de 19,5 mm em uma distância de 10 m (informação pessoal da engenheira do Cenpes, Carla Marinho, em seis de julho de 2009).

Tabela 4.3 Resultados do estudo da distância da câmera termográfica para o CP1, escala de cores de 20 a 30°C (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)

Distância (mm)	Tempo (s)			
	10	15	20	30
300	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>	<i>R</i>
450	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>
600	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>R</i>

A Figura 4.2 apresenta três termogramas, para ilustrar a pouca diferença na detectabilidade da descontinuidade, coletados com tempo de 10s de aquecimento, com 300mm (a), 450mm (b) e 600mm (c) de distância da câmera para o corpo de prova. Nota-se apenas uma pequena perda de definição do defeito, provavelmente porque o aumento da distância implica em menor número de pixels para representar o mesmo comprimento. No entanto, essa pequena perda, não comprometeu a observação da descontinuidade. Importante, mais uma vez, salientar que apenas a descontinuidade central – E – está sendo observada no estudo.

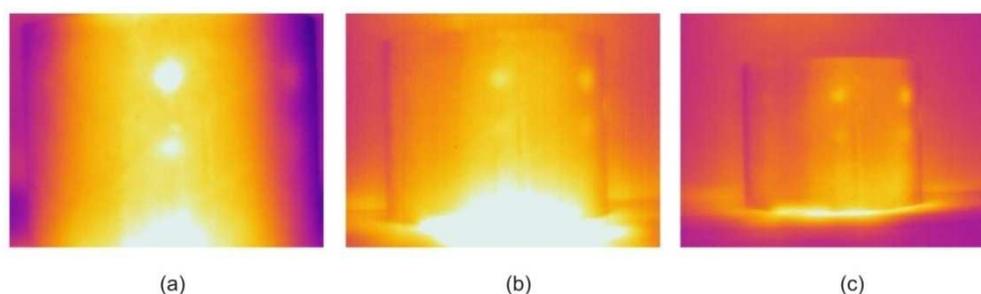


Figura 4.2 CP1 – Exemplos ilustrativos da variação da distância da câmera termográfica para 10s de pulso térmico, para as distâncias de 300mm (a), 450mm (b) e 600mm (c)

Os resultados obtidos para o CP2 estão dispostos na Tabela 4.4. Da mesma forma que para o CP1, pouco se observou de influencia da distância da câmera para o corpo de prova. No mesmo sentido, observou-se uma leve perda de resolução. Para se ilustrar essa perda de resolução, a Figura 4.3 apresenta três termogramas obtidos com 20s de aquecimento para as distâncias de 300 mm (a), 450 mm (b) e 600 mm (c).

Tabela 4.4 Resultados do estudo da distância da câmera termográfica para o CP2, escala de cores de 20 a 30°C (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)

Distância (mm)	Tempo (s)			
	10	15	20	30
300	<i>RG</i>	<i>RG</i>	<i>RG</i>	<i>B</i>
450	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>RG</i>	<i>B</i>
600	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>B</i>

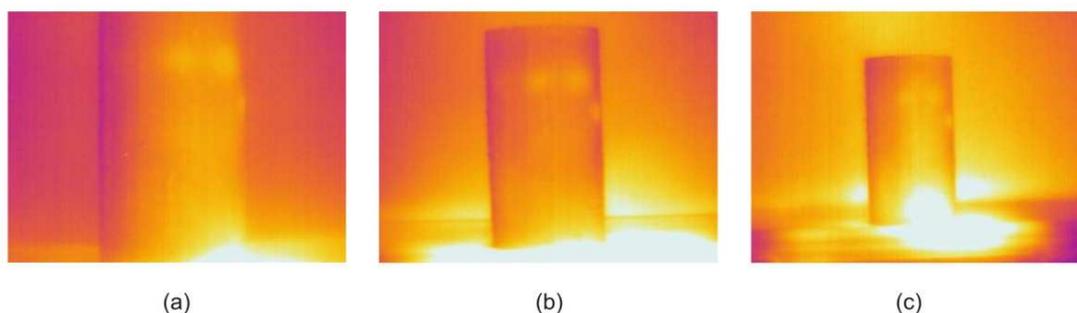


Figura 4.3 CP2 – Exemplos ilustrativos da variação da distância da câmera termográfica para 20s de pulso térmico, para as distâncias de 300mm (a), 450mm (b) e 600mm (c)

Uma diferença importante entre o comportamento do CP1 e CP2 foi percebida, no tocante ao tempo de pulso térmico. Os melhores resultados do CP1 aconteceram com pouco tempo de aquecimento, enquanto que no CP2 com grandes tempos de aquecimento. Isso é devido, possivelmente, a diferença de espessura. O CP2, por apresentar espessura maior, necessita de mais aquecimento para que se consiga um estímulo térmico ideal.

A Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos para o CP3. Também para este corpo de prova, apenas uma pequena perda de resolução foi percebida com o aumento da distância, que, para esses comprimentos, não influenciaram o ensaio termográfico. Como exemplo do comportamento apresentado pela Tabela 4.5, a Figura 4.4 apresenta o CP3 ensaiado com 10s de aporte térmico.

Tabela 4.5 Resultados do estudo da distância da câmera termográfica para o CP3, escala de cores de 20 a 30°C (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)

Distância (mm)	Tempo (s)			
	10	15	20	30
300	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>R</i>
450	<i>RG</i>	<i>RG</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>
600	<i>R</i>	<i>RG</i>	<i>RG</i>	<i>RG</i>

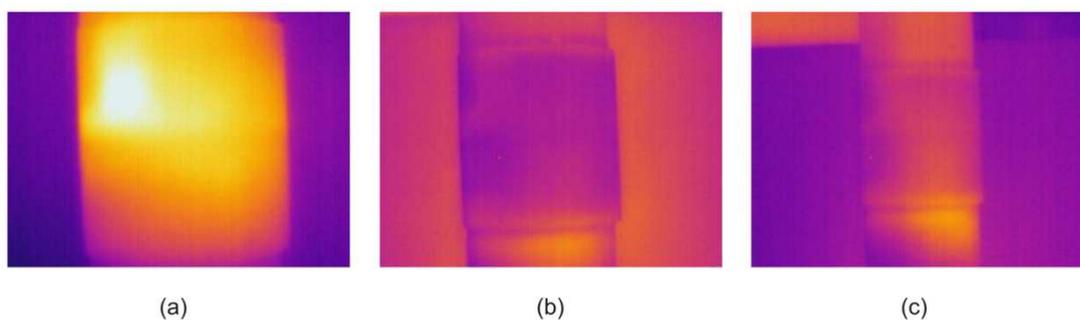


Figura 4.4 CP3 – Exemplos ilustrativos da variação da distância da câmera termográfica para 10s de pulso térmico, para as distâncias de 300mm (a), 450mm (b) e 600mm (c)

Por fim, na Tabela 4.6 estão apresentados os resultados, nas mesmas condições, para o CP4. Novamente, igual aos demais corpos de prova, a distância da câmera não comprometeu a detectabilidade das discontinuidades, embora maiores distâncias tendam a perder resolução, pelo fato de que um pixel irá representar um espaço real maior. Também como exemplo, a Figura 4.5 representa as três distâncias para um tempo de aporte de 15s.

Tabela 4.6 Resultados do estudo da distância da câmera termográfica para o CP4, escala de cores de 20 a 30°C (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)

Distância (mm)	Tempo (s)			
	10	15	20	30
300	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>
450	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>RG</i>
600	<i>R</i>	<i>RG</i>	<i>RG</i>	<i>RG</i>

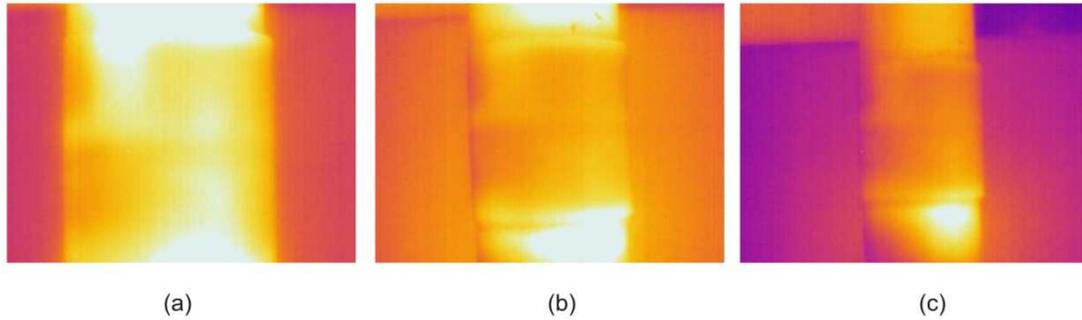


Figura 4.5 CP4 – Exemplos ilustrativos da variação da distância da câmera termográfica para 15s de pulso térmico, para as distâncias de 300mm (a), 450mm (b) e 600mm (c)

Embora as descontinuidades presentes no CP3 e CP4 sejam do tipo planar, nas distâncias de trabalho entre a câmera infravermelha e o corpo de prova utilizadas nesta pesquisa, não foi encontrado problemas na detecção das descontinuidades. No entanto, o limite dimensional mínimo para a detecção de descontinuidades ainda é uma incógnita, pois se considera que os testes realizados não sejam suficientes para tratar de um limite de detectabilidade. Sabe-se que este limite é influenciado pela relação da profundidade com o diâmetro da descontinuidade (3).

Também, para o CP3 e o CP4, as melhores condições foram encontradas com pequenos tempos de estímulo térmico. Isso, provavelmente, tem relação direta com a espessura baixa desses corpos de prova, no entanto uma pesquisa mais aprofundada na relação tempo de aporte espessura é aconselhada. Esta última afirmação também é válida no raciocínio do CP1 e CP2.

4.1.3. Campo e nível da escala de temperaturas

Os resultados obtidos para CP1, CP2, CP3 e CP4 estão dispostos, respectivamente, nas Tabelas 4.7 a 4.10, relativos ao estudo do campo e nível de escala de temperaturas na variação do tempo de aquecimento.

Tabela 4.7 Resultados do estudo do campo da escala de temperaturas para o CP1 (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)

Campo (°C)	Tempo (s)		
	10	15	20
20 – 30	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>
30 – 40	<i>RG</i>	<i>B</i>	<i>B</i>
40 – 50	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>
20 – 40	<i>RG</i>	<i>B</i>	<i>B</i>
20 – 50	<i>RG</i>	<i>RG</i>	<i>RG</i>

Tabela 4.8 Resultados do estudo do campo da escala de temperaturas para o CP2 (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)

Campo (°C)	Tempo (s)		
	10	15	20
20 – 30	<i>RG</i>	<i>RG</i>	<i>B</i>
30 – 40	<i>R</i>	<i>RG</i>	<i>RG</i>
40 – 50	<i>R</i>	<i>RR</i>	<i>R</i>
20 – 40	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>RG</i>
20 – 50	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>

Tabela 4.9 Resultados do estudo do campo da escala de temperaturas para o CP3 (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)

Campo (°C)	Tempo (s)		
	10	15	20
20 – 30	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>
30 – 40	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>B</i>
40 – 50	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>
20 – 40	<i>RG</i>	<i>RG</i>	<i>RG</i>
20 – 50	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>

Tabela 4.10 Resultados do estudo do campo da escala de temperaturas para o CP4 (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)

Campo (°C)	Tempo (s)		
	10	15	20
20 – 30	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>RG</i>
30 – 40	<i>R</i>	<i>RG</i>	<i>B</i>
40 – 50	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>
20 – 40	<i>RG</i>	<i>R</i>	<i>RG</i>
20 – 50	<i>R</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>

Em relação aos resultados obtidos no CP1 e CP2, pôde ser observada uma relação da espessura do corpo de prova com o tempo de aquecimento, para se obter os melhores resultados. Ou seja, quanto maior a espessura maior tempo de aquecimento será necessário para deixar ótimo o sistema de transferência de calor que tragam melhores resultados.

Observando agora os resultados dos quatro corpos de prova, duas características mais marcantes foram observadas.

A primeira, diz respeito ao tamanho do campo de temperatura da escala. Escalas maiores, de maneira geral, levaram a piores resoluções de temperatura. Isso provavelmente está ligado à capacidade de representar diferentes temperaturas pela câmera termográfica. De maneira mais clara, em menores campos de escalas de temperatura, existirão mais cores para representar um conjunto de temperaturas. Para exemplificar essa sensibilidade da escala de temperaturas a Figura 4.6 apresenta o CP1, ensaiado com 10s de aquecimento para três diferentes campos na escala de temperaturas: 20 a 30 °C (a), 20 a 40 °C (b) e 20 a 50 °C (c). Nessa figura, é perceptível que, para menores tamanhos de escala de temperaturas, existe uma maior quantidade de cores para representar as temperaturas do termograma, do que quando comparado com grandes escalas.

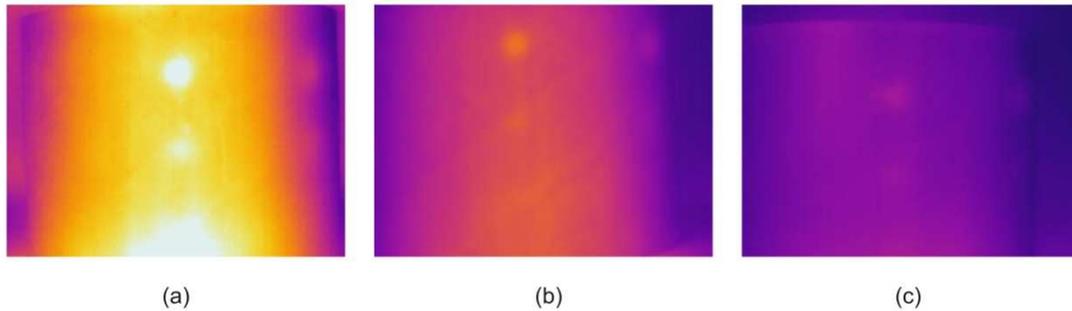


Figura 4.6 Termogramas obtidos para o CP1 com o mesmos parâmetros de ensaio, variando apenas o tamanho do campo de temperaturas: 20 a 30 °C (a), 20 a 40 °C (b) e 20 a 50 °C (c)

A segunda característica observada é que foram obtidos melhores resultados, na maior parte dos casos, em baixos níveis de escala de temperatura e baixos tempos de excitação térmica. Esse comportamento observado requer maiores estudos, mas ocorreu, possivelmente, por que menores tempos de aquecimento provocam maior diferença térmica entre a superfície e interior da peça, associada à câmera ajustada para colher essa pequena variância de temperatura, elevada pouco acima da temperatura ambiente pelo curto pulso térmico.

Durante os trabalhos laboratoriais, foi notado que a escolha do campo e nível da escala de cores deve levar em conta às condições ambientes, porém nada conclusivo pode ser descrito. Esse último deve ainda ser mais bem estudado, para melhor compreensão, em trabalhos futuros, mas não deixa de ser de extrema importância para evitar sinais espúrios.

4.1.4. Discussões gerais sobre os parâmetros experimentais

Todos os parâmetros de ensaio estudados mostraram forte ou alguma influencia na qualidade do ensaio de termografia ativa pulsada. Porém, o que se mostrou maior influencia, foi o aporte térmico. A forma e distância do estímulo térmico, o tempo de estímulo, ou seja, a precisão do aquecimento mostrou enorme influencia no ensaio.

Essa dependência da excelência de aporte térmico ainda não é bem compreendida, devendo ser mais bem estudada, principalmente no que se refere a sua

relação com a espessura do corpo a ser ensaiado e com a escala de cores a ser selecionada na câmera termográfica. Nesse sentido, maiores estudos devem ser conduzidos no intuito de se tentar elaborar um procedimento preciso de inspeção de juntas coladas de tubos feitos com material compósito, por termografia ativa pulsada.

4.2. Avaliação dos métodos de análise

A Tabela 4.11 apresenta os resultados obtidos para os quatro métodos de análise de termogramas, desenvolvidos nessa pesquisa. O julgamento foi feito separadamente para cada descontinuidade: D, E e F. Pôde ser percebido que os métodos foram satisfatórios na detecção da descontinuidades. No entanto, quando comparado com o método visual, foi observada uma pequena melhora na detectabilidade das descontinuidades. O maior diferencial foi observado para o método da diferença de linhas, que foi capaz de detectar a descontinuidade F várias vezes, contrário ao método visual, onde ela nunca é detectada.

Tabela 4.11 Resultados obtidos para cada método, separado para cada descontinuidade do CP1 (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)

Condição	Linha			Diferença Linhas			Soma			Diferença		
	D	E	F	D	E	F	D	E	F	D	E	F
I	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>
II	<i>RG</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>	<i>RG</i>	<i>RG</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>
III	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>
IV	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>
V	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>
VI	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>R</i>
VII	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>
VIII	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>
IX	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>RG</i>	<i>R</i>

Para uma melhor avaliação acerca dos métodos, a Tabela 4.12 e a Figura 4.7 mostram a distribuição de amostragem de ocorrências dos resultados, observados na Tabela 4.11, para cada descontinuidade. Pode ser observado através da Tabela 4.12 e da

Figura 4.7 que os métodos obtiveram bom sucesso na detecção das descontinuidades, principalmente nas descontinuidades mais profundas, D e E. Isso significa que, embora os métodos sejam válidos para a detecção e possível análise numérica das descontinuidades, estes dependem fortemente da qualidade dos termogramas obtidos diretamente no ensaio.

Tabela 4.12 Ocorrências observadas nos resultados do estudo dos métodos de análise de imagens (B: bom; RG: Regular; R: Ruim)

Resultado	Linha			Diferença Linhas			Soma			Diferença		
	D	E	F	D	E	F	D	E	F	D	E	F
Bom	8	7	0	8	8	5	8	5	0	6	1	0
Regular	1	2	0	1	1	3	1	3	1	0	4	0
Ruim	0	0	9	0	0	1	0	1	8	3	4	9

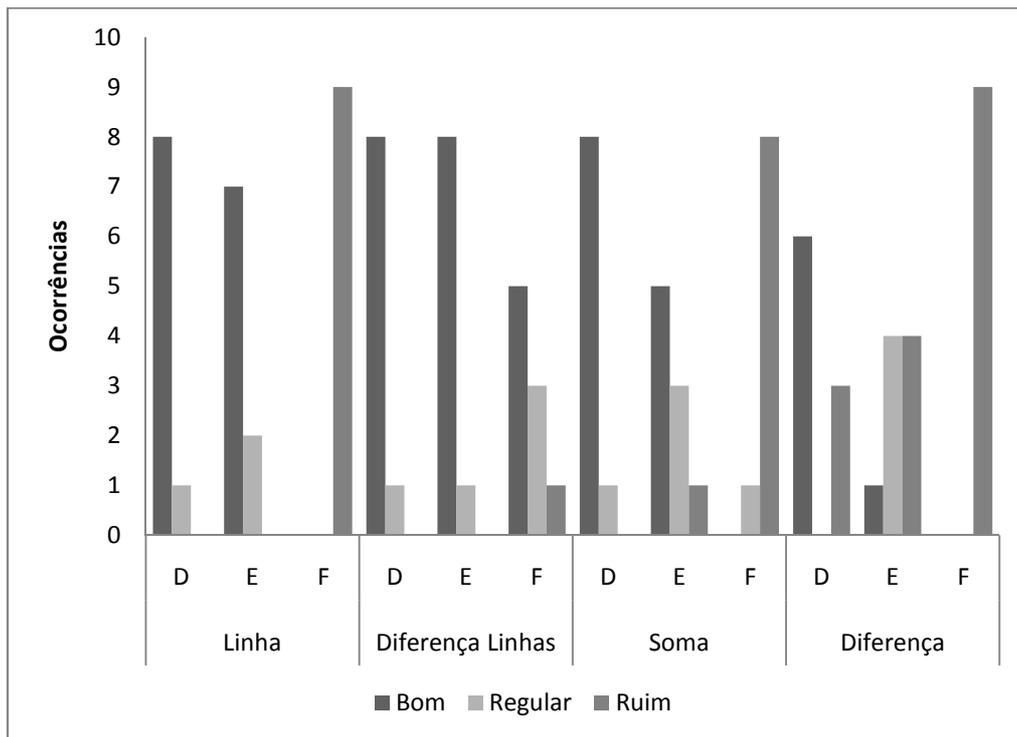


Figura 4.7 Gráfico representativo das ocorrências obtidas como resultado do estudo dos métodos computacionais

Porém, se destaca o método da diferença de linhas, que foi capaz de detectar as variações de temperatura da descontinuidade de menor diâmetro, E. Isso é de fundamental importância, principalmente porque essa descontinuidade não foi vista, em momento nenhum, pelo método visual. A Figura 4.8 exemplifica um desses casos, que foi a Condição III, presente na Tabela 4.11.

Por fim, embora os métodos tenham mostrado resultados satisfatórios, ainda há muito que ser estudado, principalmente em sua confiabilidade e possíveis melhorias. O que não se deve perder de vista é que os métodos trabalham com resultados obtidos pela câmera termográfica no ensaio, dessa forma, a principal etapa sempre será um correto procedimento de aquisição de imagens, sempre levando em conta obter o máximo em qualidade na seqüência de termografias. Neste sentido, pode ser afirmado que, mesmo os métodos computacionais, apresentam resultados fortemente dependentes, também, do correto posicionamento da câmera termográfica, correto aporte térmico e correta seleção dos parâmetros da escala visível da câmera.

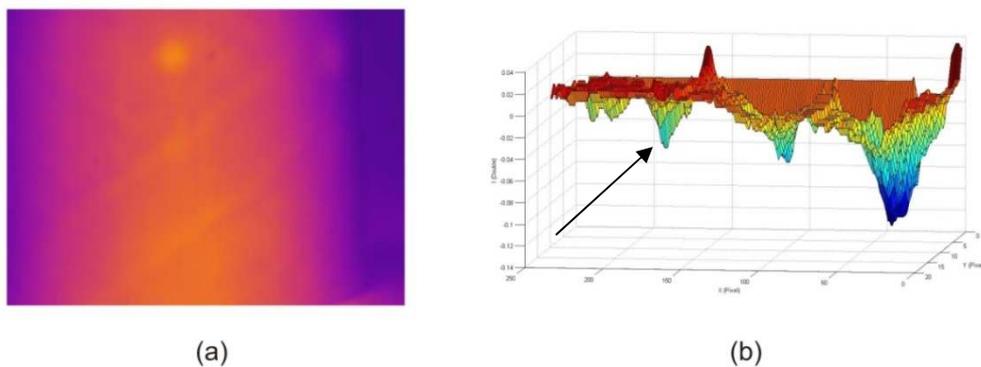


Figura 4.8 Exemplo de detecção da descontinuidade F do método da diferença de linhas (b), que não foi detectado pelo método visual (a)

5.0.CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudada a termografia ativa pulsada, aplicada como instrumento de inspeção de tubos feitos de material compósito. Foram estudados os parâmetros do ensaio de termografia e desenvolvidos alguns métodos computacionais, ambos com objetivos de estabelecer os melhores parâmetros para detecção das discontinuidades conhecidas nos quatro corpos de prova ensaiados.

Quanto ao aporte térmico, foi visto que os melhores resultados foram obtidos quando o estímulo térmico foi aplicado de forma uniforme sobre a superfície e com a menor distância possível. Dessa forma, cria-se uma maior diferença de temperatura entre a superfície e o interior da peça, uniformemente por toda a superfície.

Outro parâmetro estudado foi a distância da câmera termográfica à peça a ser inspecionada. Conclui-se que esse parâmetro não comprometeu fortemente a qualidade do ensaio, no entanto, o aumento dessa distância acarretaria numa perda de resolução ótica, pois um determinado número de pixels terá que representar um maior espaço real em longas distâncias do que em curtas.

Ainda em relação à câmera termográfica foi visto que a seleção da escala de temperaturas visível mostrou ser importante parâmetro, principalmente quando associado ao tempo de aquecimento, quando não se dispõem de recursos de programas que permitam a obtenção das imagens originais, sem defeitos de gravação, no formato radiométrico. Esses programas são proprietários e representam soluções de alto custo. A abordagem ora apresentada oferece uma solução interessante e de baixo custo. Porém, estudos mais aprofundados devem ser feitos para se achar a melhor relação entre a escala de temperaturas (cores) e tempo de aquecimento. Notou-se, também, que grandes tamanhos de escala visível acarretam, também, em perda de resolução, uma vez que teremos menor quantidade de cores para a representação de uma larga gama de temperaturas e suas pequenas variações. Os melhores resultados foram obtidos com baixos níveis de escala, para pequenos tempos de aquecimento.

O parâmetro experimental que mostrou maior influencia no ensaio de termografia ativa pulsada foi o aporte térmico, em especial o seu tempo e forma de aplicação. O tempo de aporte térmico mostrou ter íntima influência com a espessura da peça a ser ensaiada, na resposta térmica, provavelmente por corpos mais espessos possuírem maior massa para ser aquecida. Embora, neste trabalho, tenha sido observado esse fenômeno, novos estudos são recomendados para entender realmente essa influencia. Essas conclusões corroboram com o histórico de trabalhos anteriores.

Após estudar os parâmetros do ensaio de termografia, alguns métodos computacionais foram desenvolvidos com objetivo de melhorar a detecção das descontinuidades existentes nos corpos de prova, a partir de manipulações computacionais matemáticas, desenvolvidas em plataforma Matlab.

Em termos de detecção, os métodos computacionais apresentaram resultados satisfatórios, porém não apresentaram grande avanço quando comparado à análise direta dos termogramas, pois, na maioria, as descontinuidades detectadas podem ser vistas diretamente nos termogramas. Apenas um dos métodos propostos se mostrou mais robusto, pois, em muitos casos, evidenciou uma pequena descontinuidade que não foi detectada em nenhum caso, simplesmente na análise visual rotineira. Conclui-se, então, que os métodos são válidos, principalmente como alternativa quantitativa de manipulação de dados, mas novos estudos devem ser realizados para que se tenham métodos robustos capazes de ser aplicados em campo. Destaca-se o método da diferença de linhas. Por fim, ressalta-se que a abordagem então apresentada representa uma promissora solução, confiável e de baixo custo.

6.0.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, podemos citar as seguintes:

- Estudar a relação do tempo de aquecimento com o nível e campo da escala de cores, para assim ajustar a correta seleção desses parâmetros de câmera, com o aumento de temperatura que será aplicado a superfície;
- Relacionar, também, os mesmos ajustes acima citados, com as condições observadas no laboratório ou local de realização do ensaio, para evitar sinais espúrios;
- Estudar o melhor tempo de aporte térmico, relacionando, principalmente, com a espessura do material a ser inspecionado;
- Estudar outras formas de excitação térmica, como por exemplo o aquecimento por lâmpadas alógenas;
- Trabalhar melhor os métodos computacionais, em especial o método da diferença de linhas, avaliando mais precisamente sua confiabilidade e melhorando suas capacidades.
- Desenvolver análises matemáticas sobre as imagens originais geradas pela termocâmera. Isto implica na aquisição de programas proprietários que viabilizem a obtenção destes dados.

7.0.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Shepard, S.** Thermography of Composites. *Materials Evaluation*. July, 2007, pp. 690-696.
2. **Freitas, G.** *Avaliação de Defeitos de Juntas em Dutos Utilizando Materiais Compósitos, Através da Técnica Termográfica*. s.l. : Dissertação. COPPE/UFRJ, 2004.
3. **Maldague, X.** *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. New York : John Wiley & Sons, Inc, 2001.
4. **Maldague, Xavier.** NDT Techniques: Thermographic. [A. do livro] J Buschow. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. New York : John Wiley & Sons, Inc., 2008, pp. 6036-6039.
5. **Maldague, X.** Introduction to NDT by Active Infrared Thermography. *Materials Evaluation*. September, 2002, pp. 1060-1073.
6. **Chrzanowski, K.** Non Contact Thermometry - Measurement Errors. *Research and Development Treaties*. 2001, vol 7.
7. Leis de Radiação. *Universidade Federal do Paraná*. [Online] 2009. [Citado em: 21 de Maio de 2009.] <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-5.html>.
8. **DeWitt, D e Nutter, G.** *Theory and Practice of Radiation Thermometry*. New York : John Wiley & Sons, 1988.
9. **Avdelidis, N, Hawtin, B e D, Almond.** Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites. *NDT & E International*. 2003, 36.
10. **Genest, M, et al.** Pulsed Thermography for non-destructive evaluation and damage growth monitoring of bonded repairs. *Composite Structures*. 2009, 88.

11. **Schoroeder, J, et al.** Non-destructive testing of structural composites and adhesively bonded composite joints: pulsed thermography. *Composites*. 2002, Part A 33.
12. **Omar, M, et al.** Infrared thermography for inspecting the adhesion integrity of plastic welded joints. *NDT & E*. 2006, 39.
13. **Rajic, N.** Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures. *Composite Structures*. 2002, 58.
14. **Krishnapillai, M, et al.** Thermography as a tool for damage assessment. *Composite Structures*. 2005, 67.
15. **Pipa, D.** *Correção de Ruído de Padrão Fixo em Vídeo Infravermelho*. s.l. : Dissertação. COPPE/UFRJ, 2008.
16. **Maldague, X e Moore, P.** Infrared and Thermal Testing. [A. do livro] American Society for Nondestructive Testing. *Nondestructive Testing Handbook*. Columbus : ASNT, 2001.
17. **Santos, L.** *Termografia Infravermelha em subestações de alta tensão desabrigadas*. s.l. : Dissertação: Universidade Federal de Itajubá, 2006.
18. **Callister, W.** *Fundamentals of Material Science and Engineering, 5th Edition*. New York : John Wiley & Sons, Inc., 2001.
19. **Reinfort, T. e Clements, L.** *Engineered Materials Handbook. VI, Composites*. Ohio : ASM International, 1987. pp. 27-34.
20. **Kapadia, A.** *Non Destructive Testing of Composite Materials*. Great Abington, Cambridge, UK : s.n., 2006.
21. **Shackelford.** *Introduction to Materials Science for Engineers, 4th Edition*. New Jersey : Prentice-Hall, Inc., 1996.
22. **Barros, G.** *Tubulações de PRFV com adição de areia quartzosa visando sua aplicação na indústria do petróleo*. s.l. : Dissertação. UFRN, 2007.

23. **Silvestre Filho, G.** *Comportamento Mecânico do Poliuretano Derivado do Óleo de Mamona Reforçado por Fibra de Carbono: Contribuição para o Projeto de Hastes de Implante de Quadril.* s.l. : Dissertação. USP, 2001.

24. **Hilling, B.** Composite Materials. [A. do livro] M. Grayson. *Encyclopedia of Composite Materials and Components.* New York : John Wiley & Sons, Inc, 1983, pp. 367-384.

25. **Matthews, F. e Rawlings, R.** *Composite Materials: engineering and science.* London : Chapman & Hall, 1994.

26. **Marinho, C, et al.** Inspeção de Tubos de Resina Reforçada por Fibras de Vidro com Termografia. *COTEQ - Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos.* 2007, Vol. I, Anais do COTEQ.

27. **Pedrini, H e Schwartz, W.** *Análise de Imagens Digitais.* São Paulo : Thomson Learning, 2008.

28. **Paciornik, S.** *Fundamentos da Imagem Digital.* Rio de Janeiro : PUC, 2007.