

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

**TERMOGRAFIA APLICADA A DETECÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE
DESCONTINUIDADES EM TUBULAÇÕES DE MATERIAL COMPÓSITO**

CLÁUDIO JARRETA NETO
Engenheiro de Materiais

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

Porto Alegre

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

**TERMOGRAFIA APLICADA A DETECÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE
DESCONTINUIDADES EM TUBULAÇÕES DE MATERIAL COMPÓSITO**

CLÁUDIO JARRETA NETO
Engenheiro de Materiais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia 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.

Porto Alegre

2009

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção de 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 Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly, PPGEM/UFRGS
Co-orientador: Dr. Sérgio Damasceno Soares, CENPES/PETROBRAS

Banca Examinadora:

Dr. Germano Xavier de Pádua, PETROBRAS

Dr. Marcio Humberto Silva Siqueira, PETROBRAS

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

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

Porto Alegre, Agosto de 2009.

Dedico esta dissertação a meus pais, Gilmar e Ivana,
meu irmão David e à Josiane, forças motrizes da
minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Afonso Reguly, pela orientação e apoio.

À Petrobras, pela chance única de aprendizado e pela mentalidade de seus colaboradores, que acreditam na formação, preparação e desenvolvimento técnico de qualidade para seus profissionais.

Ao engenheiro Henrique Garcia da Silva, pela orientação no Curso de Formação CEINSP 2008/2009 e ao engenheiro Marcio Humberto Silva Siqueira, pela orientação e pelo projeto de mestrado profissional na parceria entre UFRGS e Petrobras.

Ao colega e amigo Artur Gianini Bezerra de Melo, pela parceria, ajuda e paciência durante as etapas de revisão da literatura, grande parte do procedimento experimental do trabalho e por escutar e criticar minhas idéias.

Aos engenheiros Sérgio Damasceno e Carla Marinho, co-orientadores do trabalho pela empresa Petrobras, que demonstraram grande atenção, cuidado e interesse. Que este trabalho possa ser também uma pequena ajuda em seus projetos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XIII
RESUMO.....	XIV
ABSTRACT	XV
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Compósitos.....	3
2.1.1 Histórico e Definições Gerais.....	3
2.1.2 Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro (PRFV).....	6
Matrizes Poliméricas.....	6
Reforço de Fibras	8
Resina Epóxi	9
Fibra de Vidro.....	13
2.1.3 Compósito de Resina Epóxi com Fibra de Vidro.....	15
Propriedades e Aplicações	15
Tubos de Material Compósito de Resina Epóxi com FV	16
2.1.4 Defeitos em Compósitos.....	19
Defeitos de Fabricação e Montagem em Tubos de PRFV	21
Defeitos em Serviço.....	23
Reparos.....	25
2.2 Conceitos Relativos à Transferência de Calor.....	25
2.2.1 Condução, Irradiação e Convecção	26
2.2.2 Radiação Infravermelha.....	27
2.2.3 Considerações sobre Radiometria, Emissividade e Medidas de Temperatura	29
2.2.4 Transferência de Calor em PRFV	33
2.3 Ensaios Não Destrutivos (END's) para Compósitos.....	34
2.3.1 Definições Gerais de END's	34
2.3.2 END's para Compósitos.....	35
2.3.3 Termografia	36
Termografia Ativa Pulsada e Outros Tipos de Termografia.....	37

2.3.4	Termografia em Tubulações de ERFV	40
2.3.5	A Câmera Termográfica.....	41
2.3.6	Tratamento de Dados e Imagens Termográficas	42
3.0	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	44
3.1	Metodologia	44
3.2	Materiais e Equipamentos Utilizados	45
3.2.1	Corpos de Prova.....	45
	Propriedades e Confeção dos Corpos de Prova	45
	Dimensões e Defeitos.....	48
	Falta de Adesivo e Falta de Adesão	51
3.2.2	Câmera Termográfica	53
3.2.3	Computador e Programas de Aquisição e Tratamento de Imagens...	54
3.2.4	Excitação Térmica	55
3.3	Procedimento Experimental	56
3.3.1	O Ensaio e os Parâmetros Variados	56
3.3.2	Método de Excitação Térmica.....	59
3.3.3	Distância da Câmera (D_C) e do Soprador (D_S)	61
3.3.4	Tempo de Aquecimento.....	61
3.3.5	Campo de Temperaturas	62
3.3.6	Aquisição de Imagens	63
3.4	Tratamento de Dados e Avaliação das Descontinuidades.....	64
3.4.1	Avaliação Prévia das Imagens.....	64
3.4.2	Detecção de Descontinuidades e Curvas Características.....	65
3.4.3	Obtenção das Curvas de Resfriamento (CP01 e CP02)	68
3.4.4	Avaliação e Dimensionamento das Descontinuidades (CP01 e CP02).....	69
	Cálculo de Volume da Descontinuidade pelo Método da Integral das Curvas de Resfriamento	70
	Cálculo Tradicional da Profundidade da Área da Descontinuidade	73
3.4.5	Cálculo da Área do Defeito (CP03 e CP04)	74
	Método da Medição Simples.....	74

4.0	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	76
4.1	Análise das Imagens de Termografia e Definição das Melhores Condições de Ensaio	76
4.1.1	Detecção de Defeitos	77
	Corpo de Prova CP01.....	78
	Corpo de Prova CP02.....	80
	Corpos de Prova CP03 e CP04	82
4.2	Proposta de Procedimento de Teste em Campo.	83
4.2.1	Distância da Câmera Termográfica	83
4.2.2	Aporte Térmico	84
4.2.3	Distância do Aquecedor.....	86
4.2.4	Escala de Temperatura (Campo).....	86
4.3	Dimensionamento de Descontinuidades	86
4.3.1	Cálculo de Volume do Defeito.....	87
	Método Tradicional	87
	Métodos das Integrais das Curvas de Decaimento de Temperatura	89
4.3.2	Defeitos nas Juntas Coladas (CP03 e CP04)	95
	Detecção e Dimensionamento	96
5.0	CONCLUSÕES	99
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Classificação dos materiais.....	3
Figura 2.2	Padrão de deformação da matriz ao redor da fibra no caso de aplicação de tensão de tração.....	8
Figura 2.3	Estrutura química geral do anel oxirano/epóxi.....	11
Figura 2.4	Fórmula estrutural do pré-polímero de resina epóxi (bisfenol-A).....	11
Figura 2.5	Em (a) uma junta colada do tipo ponta e bolsa e, em (b) uma junta laminada	17
Figura 2.6	Fotografia (visão externa) de uma junta tipo luva de tubulação de ERFV..	18
Figura 2.7	Fluxograma da relação entre os mecanismos de falha em compósitos reforçados por fibras.....	20
Figura 2.8	Em (a) a usinagem da superfície que ficará em contato com o adesivo para a fabricação da junta colada tipo luva, em tubulação de ERFV. Em (b) a superfície pronta para o processo de aplicação do adesivo.....	22
Figura 2.9	Em (a) o adesivo misturado com o agente de cura e catalisador para aplicação na junta colada; e o processo de aplicação manual do mesmo, sob a superfície usinada, em (b).....	23
Figura 2.10	Em (a) delaminação causada por “golpe de aríete” na tubulação e em (b), dano interno por impacto.....	24
Figura 2.11	Falha na junta de tubulação de PRFV com desalinhamento.....	25
Figura 2.12	Radiância espectral de um corpo negro em função do comprimento de onda e temperatura.....	30
Figura 2.13	Em (a) as curvas de contraste obtidas pela subtração da referência das curvas temperatura-tempo para diferentes regiões da amostra com espessuras diferentes e (b) relação linear entre o tempo em que ocorre o máximo contraste e a espessura.....	39
Figura 3.1	Exemplo de uma junta tipo luva (a) e visão interna da secção da junta com as interfaces junta/adesivo/tubo, (b), CP03.....	46
Figura 3.2	Corpo de prova CP01 em (a) e suas descontinuidades em (b).....	49
Figura 3.3	Corpo de prova CP02 (a) e suas descontinuidades (b).....	50
Figura 3.4	Corpos de prova CP03 (a) e CP04 (b) e indicações de suas descontinuidades.....	51
Figura 3.5	Aspecto interno dos tubos e interfaces na junta colada do CP03.....	52

Figura 3.6	Tipos de descontinuidades encontradas nos corpos de prova, representando perda de espessura/massa (a) e falta de adesivo/adesão (b).....	53
Figura 3.7	Fotografia representando a câmera termográfica utilizada no trabalho.....	53
Figura 3.8	Soprador térmico utilizado nos ensaios de termografia ativa pulsada.....	56
Figura 3.9	Esquema do ensaio de termografia ativa pulsada transiente de reflexão, mostrando posicionamento genérico para a câmera termográfica, soprador térmico e o corpo de prova.....	57
Figura 3.10	Cenário para a realização dos testes de termografia ativa.....	58
Figura 3.11	Soprador térmico parado à distância de 20 mm do CP01.....	59
Figura 3.12	Soprador térmico em movimento de zigue-zague à distância de 20 mm do CP01.....	60
Figura 3.13	Esquema de aplicação de jato de ar quente em movimento de “zigue-zague”, mostrando a área padronizada de aquecimento, e a frente do corpo de prova.....	60
Figura 3.14	Termograma do CP01 em escala de cinza, mostrando campo de temperaturas automático.....	63
Figura 3.15	Sequências de termogramas a partir de 20 até 45 segundos de resfriamento, com intervalo entre imagens de 5 em 5 segundos. Campo de temperaturas de 20-30°C, e tempo de aquecimento/excitação de 10 segundos em (a) e 15 segundos em (b).....	66
Figura 3.16	Em (b) o termograma original colorido e em (a) o mesmo em escala de cinza. Em (a) aparece a linha de perfil, cuja representação de intensidade em função da distância está em (c).....	67
Figura 3.17	Resfriamento do defeito “D” (CP01). Áreas com defeito e sem defeito. A partir do ponto 20s as curvas começam a se diferenciar.....	70
Figura 3.18	Resfriamento do defeito “D” (CP01) a partir dos 45 segundos e da região sem descontinuidade adjacente a partir dos 20 segundos. Áreas com defeito e sem defeito mostrando tendência exponencial de decaimento de temperatura.....	71
Figura 3.19	Termograma do CP04 com áreas de descontinuidade de falta de adesivo ou adesão. Imagem original em (a), em tons de cinza de 8 bits em (b). Em (c) a imagem filtrada para melhoria de contraste e indicação da largura de uma das descontinuidades.....	75
Figura 4.1	Imagens consideradas de bom contraste e boa definição das descontinuidades, no CP01. Em (a) os defeitos centrais, campo de 20-30°C, aporte térmico de 10 segundos e 30 segundos de resfriamento. Em (b) defeitos laterais em escala de 20-30°C, 15 segundos de aquecimento e mais 15 segundos de resfriamento. Na imagem (c) é usado campo de 30-40°C para os defeitos centrais em aquecimento de 30 segundos e resfriamento de 15 segundos.....	80

Figura 4.2	Em (a) os defeitos laterais (“G” e “H”) do CP02 em campo de 20-30°C, aquecimento durante 30 segundos e mais 25 segundos de resfriamento. Imagem (b) representa defeitos centrais (“D” e “E”) em campo de 30-40°C com aquecimento de 40 segundos e resfriamento a 25 segundos.....81
Figura 4.3	Imagens referentes ao CP04 em escala de 20-30°C, aquecimento de 15 segundos e resfriamento por 35 segundos em (a). Em (b) com campo de 30-40°C, 20 segundos de aquecimento e 65 de resfriamento.....83
Figura 4.4	Imagens comparando distâncias da câmera ao corpo de prova. No caso, CP01, em escala de 20-30°, com 10 segundos de aquecimento e 30 segundos de resfriamento, a 300 mm da câmera (a), 450 mm (b) e 600 mm (c).....84
Figura 4.5	Gráfico de tempo de pico de maior contraste em função do quadrado da espessura, para condições específicas de ensaio nos corpos de prova CP01 e CP02.....88
Figura 4.6	Gráfico da diferença de áreas (curvas de resfriamento) em função do volume dos defeitos, para CP01 e CP02, em diferentes condições de ensaio.....90
Figura 4.7	Curvas de resfriamento dos defeitos “D” e “G”, na condição de 20-30° de campo e 10 segundos de aquecimento com pontos experimentais.....92
Figura 4.8	Curvas de resfriamento dos defeitos “D” e “G”, na condição de 20-30° de campo e 10 segundos de aquecimento, reajustadas a partir das equações características de cada defeito e com correção aplicada aos defeitos laterais.....93
Figura 4.9	Diferença de áreas ou de integrais das curvas de resfriamento em função da profundidade em defeitos no CP01 e CP02 em várias condições de ensaio.....95
Figura 4.10	CP04 em escala de 20-30°C, aporte térmico de 15 segundos e resfriamento de 35 segundos. Em (a) a imagem original, em (b) a mesma em tons de cinza; e em (c) o uso de ferramentas do programa para melhor detecção e visualização de defeitos.....97
Figura 4.11	Medição das dimensões dos defeitos do CP04. Em (a) a largura e em (b), comprimento.....98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Algumas propriedades da resina epóxi (bisfenol-A).....	13
Tabela 2.2	Propriedades da fibra de vidro tipo E.....	14
Tabela 3.1	Propriedades físicas da tubulação de resina epóxi reforçada com FV utilizada.....	47
Tabela 3.2	Propriedades mecânicas de tubulação de resina epóxi reforçada com FV utilizada, curada com IPD, às temperaturas de 21°C e 93°C.....	47
Tabela 3.3	Dimensões principais dos corpos de prova.....	48
Tabela 3.4	Dimensões dos defeitos do CP01.....	49
Tabela 3.5	Dimensões dos defeitos do CP02.....	50
Tabela 3.6	Características importantes da câmara utilizada.....	54
Tabela 3.7	Valores das variáveis essenciais da câmara termográfica durante os testes realizados.....	54
Tabela 3.8	Tabela de campo de visão para as distâncias de câmara utilizadas nos ensaios.....	61
Tabela 4.1	Dimensões e integral da curva de resfriamento (0 a 70 segundos) dos defeitos circulares de perda de espessura, centrais e laterais, do CP01 em escala de 20-30°C e tempo de aquecimento de 10 segundos.....	92
Tabela 4.2	Dimensões dos defeitos de falta de adesão/adesivo do CP04.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

FRP	<i>"Fiber Reinforced Plastic"</i> (plástico reforçado por fibras)
GRP	<i>"Glass Reinforced Plastic"</i> (plástico reforçado por fibras de vidro)
UHMWPE	polietileno de ultra alto peso molecular
FV	fibra de vidro
<i>E-glass</i>	fibra de vidro do tipo E
σ_R	limite de resistência ou resistência mecânica do material
E	módulo de elasticidade ou de Young do material
ρ	peso específico
ERFV/ GRE	epóxi reforçado por fibra de vidro/ <i>glass reinforced epoxy</i>
PRFV	plástico reforçado com fibra de vidro
END's	ensaios não destrutivos
TOFD	<i>Time of Flight Diffraction</i>
IRIS	<i>Internal Rotary Inspection System</i>
ACFM	<i>Alternated Current Field Measurement</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
FPA	<i>Focal Plane Arrays</i>
Petrobras	Petróleo Brasileiro S.A.
Cenpes	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello
TMEC	Laboratório de Tecnologia, Materiais e Corrosão do Cenpes
IPD	isofurano diamina
MDA	diaminodifenil metano
RGB	red green blue
JPEG	joint photographic experts group

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar a técnica de termografia ativa pulsada de reflexão, aplicada para detecção e dimensionamento de descontinuidades sub-superficiais em tubulações e juntas coladas tipo luva, fabricadas em material compósito ERFV (resina epóxi reforçada com fibra de vidro). Foram variados parâmetros práticos de ensaio para se estudar um possível procedimento que possa ser aplicado em campo; e estes foram discutidos em relação à base teórica da técnica, para melhoria de detectabilidade no que concerne a contraste e definição. As descontinuidades nos corpos de prova simulavam perda de espessura em tubulações de transporte de água industrial e falta de adesão/adesivo em juntas coladas dessas mesmas tubulações. O dimensionamento das descontinuidades também foi investigado, em referência a um método tradicional da bibliografia. Outro método foi proposto para se estimar o volume das descontinuidades de perda de espessura em tubos, levando em conta as curvas de resfriamento características de regiões com e sem defeito e diferenças entre elas, a partir de análise de perfil de linha dos termogramas digitalizados. A área superficial de descontinuidades planares nas juntas coladas foi calculada com auxílio de programas de processamento de imagens, de maneira simples e rápida. Tanto o método tradicional quanto o das integrais de curvas de resfriamento geram uma curva de calibração específica que se restringe ao corpo de prova e à condição única e particular do ensaio.

ABSTRACT

This work aims to investigate the technique of pulsed thermography in reflection, applied for detection and sizing of sub-surface discontinuities in pipes and adhesive-bonded joints made of composite material GFRE (glass fiber reinforced epoxy). Practical parameters were tested to study a possible procedure that could be applied in in-service pipes, and these were discussed according to the theoretical basis of the technique, for detection improvement (contrast and resolution). The discontinuities in the samples simulated loss of thickness in industrial water pipes and lack of adherence/adhesive in adhesive-bonded joints. The discontinuities dimensions have been investigated in reference to a traditional method of literature. Another method was proposed to estimate the volume of the discontinuities of loss of thickness in pipes, taking into account the characteristics of cooling curves of regions with and without defects and the differences between them, from analysis of line profile of the scanned thermograms. The surface area of planar discontinuities in bonded joints was calculated using a program for image analysis, in a simple and fast way. Both the traditional method as the curves of cooling integral one generate a specific calibration curve which is limited to the sample and the unique and particular condition of test.

1.0 INTRODUÇÃO

A aplicação de materiais compósitos, mais especificamente os de matriz polimérica reforçados por fibras, na indústria do petróleo, vem aumentando nos últimos anos em decorrência do maior desenvolvimento destes como materiais estruturais, uma melhor adaptação de técnicas de ensaios não destrutivos, antes só aplicadas a metais, e maior conhecimento da mecânica que rege os mecanismos de deformação e falha desses materiais.

As tubulações fabricadas em ERFV (epóxi reforçado com fibra de vidro) e suas juntas coladas, aqui estudadas, geralmente transportam água (industrial ou salgada) ou óleo. A faixa de temperatura de trabalho pode variar da ambiente ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) até 60°C , à pressão atmosférica; podendo resistir até cerca de 93°C e 1,6 MPa. Os defeitos mais comuns podem ter origem na fabricação e montagem das juntas das tubulações (falta de adesão ou adesivo), ou na operação (degradação-erosão no corpo do tubo, delaminação, defeitos de impacto ou golpes de aríete).

Em vista disso, visando a integridade estrutural de linhas, a técnica de termografia surge como uma opção interessante para detecção de descontinuidades sub-superficiais em compósitos (PRFV) até determinadas espessuras de parede. A baixa difusividade térmica permite que tubulações fabricadas nestes materiais possam ser inspecionadas com o uso de uma câmera termográfica disponível no mercado, com custo acessível; ao contrário de materiais metálicos que precisariam de câmeras de alta velocidade.

A termografia ativa pulsada de reflexão foi a técnica selecionada para o estudo de quatro corpos de prova com descontinuidades simulando perda de espessura e falta de adesivo/adesão. Os objetivos principais são a investigação da técnica juntamente com uma revisão bibliográfica sobre o tema, visando desenvolver parâmetros de teste e, se possível, contribuir para um procedimento de ensaio termográfico para tubulações de ERFV no campo.

A motivação principal está em melhorar a detectabilidade e confiabilidade da técnica, testando variações de parâmetros, para os tipos de defeitos citados; e investigar sobre o dimensionamento destes defeitos, uma vez que tal assunto não é tratado de forma muito clara e objetiva pela literatura especializada.

No procedimento experimental serão variados parâmetros de ensaio visando melhoria de contraste de imagem e definição das descontinuidades presentes nos corpos de prova. Os resultados apresentarão o que foi obtido e considerado como mais importante para os testes realizados, para melhoria da qualidade do ensaio.

Na análise quantitativa serão avaliados os resultados obtidos em relação ao dimensionamento pelo método dito tradicional (bibliografia) e também em relação a outro método proposto para possível análise.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compósitos

2.1.1 Histórico e Definições Gerais

A história da civilização humana, e seu desenvolvimento tecnológico e científico através das eras, está intimamente ligada aos materiais usados por esta para suas tarefas e trabalhos específicos. Muitas vezes, o avanço técnico e científico em certa direção esbarra na necessidade de materiais de melhores propriedades, o que leva ao desenvolvimento cada vez maior nessa área do conhecimento.

Atualmente, existem dezenas de milhares de materiais de engenharia patenteados no mundo. Estes podem ser classificados, de forma geral, em materiais metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos, além de biomateriais.

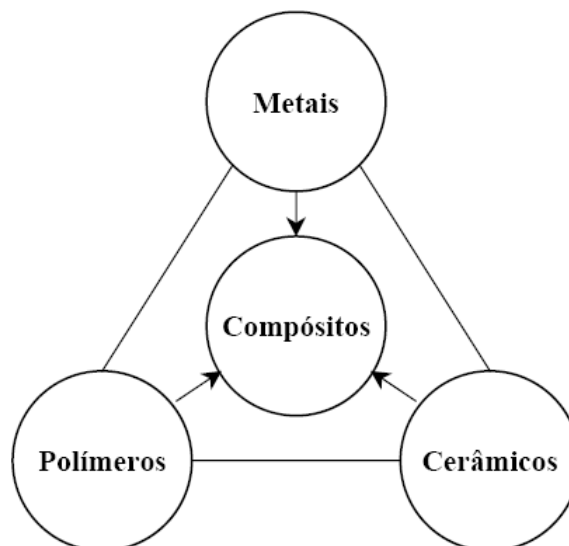


Figura 2.1 Classificação dos materiais [1].

Materiais compósitos ou conjugados podem ser considerados, numa definição simplificada, como uma combinação de dois ou mais materiais de classes ou propriedades diferentes para se atingir propriedades conjugadas e/ou específicas para

uma determinada aplicação. No entanto, ainda hoje não há uma definição muito clara a respeito. Compósitos são definidos como sendo uma combinação macroscópica de dois ou mais materiais distintos, havendo uma interface reconhecível entre eles [2]. Talvez esta seja uma das definições mais aceitas no mundo científico nos dias atuais. Esses materiais são largamente utilizados porque atingem combinações de propriedades que não são encontradas em materiais convencionais das classes de materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos.

Desde o passado distante, o ser humano tem usado compósitos em sua vida cotidiana. Desde o uso de madeira (fibras de hemicelulose em matriz de lignina) e ossos (apatita e colágeno), biocompósitos naturais; também tijolos reforçados com palha, passando pelo concreto (agregados de cascalho grosso e areia fina em matriz de cimento hidratado), plásticos reforçados com tecidos, depois o uso dos compósitos de fibras de vidro, fibras de carbono, de boro, aramida, alumina, polietileno de ultra alto peso molecular e outros utilizados hoje em dia para as indústrias aeroespacial, automobilística, bélica, petroquímica, biomédica, eletro-eletrônica e de energia [3].

Por definição, o compósito é composto por uma matriz (fase contínua) e o reforço (fase dispersa ou descontínua), podendo englobar mais que um tipo de reforço e até mais de um tipo de matriz. Podem também ser dos tipos laminares ou multicamadas (camadas de diferentes materiais). A matriz pode ser constituída de materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos, ou de biomateriais, assim como o reforço. No entanto, como dito anteriormente, deve haver uma interface nítida e definida entre eles. Isso exclui ligas metálicas e compostos cerâmicos (misturas de diferentes óxidos, rede cristalina de átomos de diferentes elementos químicos) do domínio de materiais compósitos [3]. A fase dispersa é chamada de reforço no caso de compósitos com aplicações mecânicas, em que esta contribuiria para reforçar a resistência mecânica e rigidez do material multifásico.

Os reforços ou fase dispersa podem ser de inúmeros tipos: fibrosos (fibra longa, fibra curta, *whiskers*) ou particulados (cargas minerais, metal em pó, negro-de-fumo, grafite, elastômeros), sendo essa definição dada em relação às dimensões e forma do reforço ou razão de aspecto (relação comprimento/diâmetro). Além disso, outros tipos comuns de fase dispersa são do tipo "*flake*", microesferas (oca ou maciça), nanoargilas e nanotubos de carbono (nanocompósitos) e outros. A maioria dos compósitos utilizados atualmente são reforçados por fibras ou por particulados.

Ao se juntar dois ou mais tipos de materiais, formando um compósito, pode-se buscar aumento de propriedades mecânicas (limite de resistência, limite de escoamento,

módulo de elasticidade, resiliência), resistência à fadiga, melhoria de propriedades referentes à tenacidade à fratura, resistência ao impacto, e também melhoria de propriedades de resistência química (deterioração) em determinados meios, propriedades óticas, térmicas (resistência a fluência), tribológicas e de saúde e segurança das pessoas e ambiente (toxicidade). Por isso, estes têm sido muito usados como materiais estruturais, de forma a melhorar a integridade de estruturas, garantindo maior vida útil e maior segurança, com custos compatíveis.

As propriedades do compósito são geralmente governadas pela distribuição, interação, fração volumétrica ou em massa e propriedades de seus constituintes. Além disso, as propriedades e comportamento da interface matriz/fase dispersa são de fundamental importância para o estudo destes materiais. A interface pode ser definida como a região superficial de contorno entre a fase dispersa e a matriz. É uma região através da qual parâmetros dos materiais tais como concentração de certo elemento, módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmica, densidade e outros mudam de um lado para outro. As cargas de solicitação mecânica são transferidas da matriz para o reforço através da interface. Os parâmetros mais importantes para definir a eficiência da região interfacial são a molhabilidade do reforço pela matriz e a adesão reforço/matriz (ligações químicas e físicas). As forças adesivas da interface fibra/matriz, no caso de compósitos reforçados com fibra, devem ser fortes, portanto a resistência da adesão é um importante fator na escolha da combinação de qual matriz será utilizada com determinada fibra e vice-versa.

Compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras têm a grande vantagem de combinação de propriedades de diferentes materiais para propriedades diversas (aspecto multifuncional), com alta flexibilidade de escolhas de matrizes e fases dispersas. A característica de alta resistência e rigidez específicas (economia de peso entre 25 e 50% em relação aos materiais metálicos), resistência à corrosão em variados meios, baixo coeficiente de expansão térmica, ótimas propriedades de resistência à fadiga e tenacidade à fratura, estão dentre as principais vantagens no uso deste tipo de material.

No entanto, desvantagens importantes são a anisotropia elevada, a baixa resistência térmica se comparado a materiais metálicos e cerâmicos e o alto custo do material e de alguns processos de fabricação, que também podem ser complexos. Há um conhecimento insuficiente sobre as reais condições de comportamento mecânico em serviço (principalmente impacto e fadiga). Os mecanismos de fratura são mais complexos que materiais metálicos e costumam causar dificuldades no caso de ensaios não destrutivos. Outra questão é a dificuldade de reciclagem, principalmente no caso de resinas termofixas. Atualmente não se tem tecnologia viável economicamente de

reciclagem química deste tipo de material, sendo seu descarte também uma dificuldade ambiental.

2.1.2 Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro (PRFV)

Materiais compósitos de matriz polimérica com reforço de fibras são muito utilizados em aplicações estruturais em que alta resistência e rigidez com baixa densidade (altas resistência e rigidez específicas) são exigidas. Além disso, têm excelente resistência à corrosão em vários meios e fluidos. Podem ter propriedades específicas de condução de calor ou de corrente elétrica. Dessa forma, vêm constantemente substituindo materiais metálicos.

Para o presente trabalho, é importante definir conceitos relacionados ao caso específico de compósitos de matriz polimérica termofixa com reforço fibroso contínuo de fibra de vidro, para fins estruturais e de resistência mecânica e à corrosão.

Matrizes poliméricas

Materiais poliméricos podem ser subdivididos em termoplásticos, termofixos e elastômeros. Termoplásticos, quando aquecidos, amolecem e se liquefazem; ao serem resfriados, endurecem num processo reversível e que pode ser repetido (processo este relacionado à diminuição de forças secundárias intermoleculares com o aumento da temperatura). A degradação irreversível acontece quando a temperatura do termoplástico fundido atinge níveis em que as vibrações moleculares são violentas o suficiente para quebrar ligações primárias covalentes intramoleculares [4].

Polímeros lineares e com algumas ramificações flexíveis geralmente formam termoplásticos e são produzidos através da polimerização em cadeia ou em etapas (aplicação de pressão e temperatura com catalisadores específicos) de monômeros de baixa massa molar. Polímeros termofixos tornam-se permanentemente duros e rígidos quando calor (ou outro método de cura, normalmente químico) é aplicado numa reação irreversível, e não amolece com aplicação subsequente de calor. Isto acontece porque, durante o processo de cura (por processo térmico ou químico) do oligômero ou pré-polímero (moléculas de alta massa molar, mas não o suficiente para serem considerados polímeros), ligações covalentes são formadas entre as moléculas adjacentes, dando origem a ligações intermoleculares primárias ou ligações cruzadas. Essas ligações ancoram as cadeias entre si para resistir aos movimentos rotacionais e vibracionais a altas temperaturas [4], formando uma estrutura tridimensional. Apenas o aquecimento a

temperaturas excessivas causa a quebra dessas ligações e a degradação do polímero. Por isso, termofixos geralmente são mais rígidos e resistentes mecanicamente que termoplásticos, com maior estabilidade dimensional [4].

Elastômeros ou borrachas são materiais formados por longas cadeias poliméricas (alta massa molar) conectadas por ligações cruzadas. Após o processo de vulcanização ou cura, um líquido de alta viscosidade (látex ou goma) torna-se um produto de características elastoméricas, exibindo grande capacidade de se deformar no campo elástico quando solicitado mecanicamente. No entanto, a grande diferença destes para os termofixos é o grau de cura ou densidade de ligações cruzadas (percentagem de unidades repetitivas que estão conectadas por ligações cruzadas) e o tipo de cadeia de polímero ou pré-polímero a ser curado.

Termofixos, formados por cadeias relativamente curtas antes da cura, dão origem a sólidos com alta densidade de ligações cruzadas, formados por retículo tridimensional (polímeros em rede). Elastômeros, com cadeias longas antes da cura, têm também menos sítios ativos para ligações cruzadas, e mantêm propriedades de alta elasticidade proporcionada pela alta massa molar, elevado número de enrosocos ou enovelamento molecular, e presença de ligações cruzadas em extensão de acordo com o nível de rigidez e resistência mecânica exigidos.

Os compósitos de uso mais comum e difundido, principalmente na indústria aeroespacial e bélica, que iniciaram seu uso, são conhecidos como “*Fiberglass*” ou simplesmente pelo termo geral “*Composites*” (são também muito comuns os termos FRP – “*Fiber Reinforced Plastic*” e GRP – “*Glass Reinforced Plastic*”), e são constituídos de uma matriz polimérica termofixa (geralmente resinas de poliéster insaturado, fenólica, epóxi, éster vinílico) por razões de propriedades finais obtidas, facilidade de processamento e custo; e fibras de reforço como fase dispersa ou descontínua, sendo mais utilizadas as fibras de vidro, carbono, aramida, boro, UHMWPE (polietileno de ultra-alto peso molecular), carboneto de silício, alumina e outras. Entretanto, as fibras de vidro (principalmente tipo E) e de carbono são as mais utilizadas industrialmente, com destaque para as fibras de vidro em aplicações menos técnicas que a fibra de carbono, que também possui maior custo, de forma geral.

A facilidade de processamento das resinas termofixas advém de sua baixa viscosidade antes da cura, ainda no estado de pré-polímero, que facilita a impregnação das fibras, melhorando a molhabilidade em um processo que dará origem a melhor adesão fibra/matriz e melhores propriedades de interface no produto final.

A matriz do compósito tem a função de proteger as fibras do ambiente externo, mantendo-as unidas, além de transferir tensões para estas e aumentar a tenacidade do compósito, relacionado a mecanismos de microdeformação ativados na interface (mecanismos de “*fiber debonding*” e “*fiber pull-out*”; descolamento e arrancamento da fibra). A fase contínua deve evitar que uma trinca de fratura frágil se propague de uma fibra para outra, que poderia resultar em falha catastrófica.

Reforço de fibras

Compósitos reforçados por fibras podem possuir diferentes propriedades mecânicas dependendo da geometria (formato), dimensões (razão de aspecto: comprimento/diâmetro), orientação (distribuição aleatória ou orientada), arranjo (ângulo entre diferentes orientações inter-camadas), tipo de material da fibra (vidro, carbono, aramida) e propriedades desta, além da força de adesão na interface fibra/matriz (sinergia de propriedades entre fibra e matriz e tratamento superficial da fibra).

A matriz polimérica possui relativa ductilidade enquanto que a fibra geralmente constitui material duro e frágil, de elevada resistência mecânica.

Para que haja transferência de tensões da matriz para a fibra, a força de adesão entre elas deve ser alta. No final do comprimento da fibra a adesão fibra/matriz termina, produzindo um padrão de deformação da matriz, esquematizado na Figura 2.2.

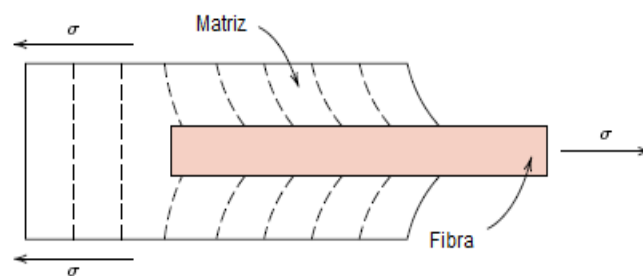


Figura 2.2 Padrão de deformação da matriz ao redor da fibra no caso de aplicação de tensão de tração. [4]

Para ocorrer reforço efetivo do compósito pela presença da fibra, esta deve possuir um comprimento mínimo crítico, que é função do diâmetro, resistência a tração da fibra e da resistência de adesão fibra/matriz; de acordo com a Equação 1.

$$l_c = \sigma_F^* d / 2 \tau_c \quad (1)$$

Sendo: l_c - comprimento mínimo crítico da fibra
 σ_F^* - resistência mecânica à tração da fibra
 d - diâmetro da fibra
 τ_c - resistência ao cisalhamento da interface fibra/matriz (adesão)
ou da matriz, o que for menor. [4]

À medida que se aumenta o comprimento da fibra, o efeito de reforço se torna cada vez maior. Para comprimentos de fibra muito maiores que o crítico ($l > l_c$), considera-se o reforço como de fibras contínuas ou de tamanho infinito para efeito de cálculos.

Em relação à orientação, mencionando casos extremos, as fibras podem estar todas alinhadas em uma só direção (caso comum de fibras contínuas) ou alinhadas aleatoriamente, totalmente ou parcialmente (geralmente em compósitos de fibras descontínuas).

É importante ressaltar que, no caso de fibras contínuas e alinhadas em uma direção, há uma anisotropia intrínseca no material, já que este terá propriedades diferentes dependendo da direção em que for solicitado, por causa da disposição das fibras e os tipos de micro-mecanismos de deformação que serão ativados ou não em determinada direção. O compósito terá melhores propriedades de resistência à tração e módulo de elasticidade se for solicitado na direção do eixo longitudinal, onde atinge reforço máximo, do que na direção transversal em relação às fibras, com reforço mínimo.

Portanto, ao tratar de compósitos de matriz polimérica termofixa com reforço de fibras contínuas, tem-se um material de elevadíssima anisotropia. Mas alguns processos de fabricação, ao se fabricar produtos em camadas múltiplas, com as fibras em diferentes orientações a cada passe, diminuirão essa característica.

Resina epóxi

As primeiras aplicações industriais significativas de resinas epóxi foram em revestimentos e recobrimentos (“*coatings*”) e também no encapsulamento de componentes elétricos e eletrônicos. A produção em larga escala iniciou-se em 1950, nos EUA. Em meados da mesma década de 50, já foi produzido o primeiro tanque de combustível de um jato F-84 e tubos de resina epóxi com fibra de vidro pelo processo de bobinamento filamental (“*filament winding*”) [5].

O custo, em comparação às resinas fenólica e poliéster, inicialmente era um impedimento à penetração da resina epóxi em aplicações diferentes das de revestimento. Diferentemente dos dias atuais, onde aplicações da resina em laminados, compósitos e adesivos, produtos de elevada performance, têm justificado o maior custo [5].

As principais vantagens da resina epóxi são:

- excelente adesão a vários tipos de substratos e reforços; sendo esta a característica marcante desse material.

- baixa contração durante a cura, o que gera baixos níveis de tensões residuais no compósito, em comparação com outras resinas. Resultado da ausência de voláteis na reação de cura.

- ausência de voláteis (subprodutos) na cura, que poderiam gerar defeitos como vazios, bolhas e plastificação.

- boas propriedades mecânicas e elétricas; provendo excelentes características de isolamento, caráter dielétrico e alta resistividade, mesmo sob condições severas de operação;

- boa resistência química e à corrosão/degradação em variados meios (incluindo resistência simultânea a bases, ácidos e solventes);

- estabilidade térmica;

- boa resistência à absorção de umidade;

- boa estabilidade dimensional e resistência à fadiga;

- alta versatilidade (vários modos de cura, muitos tipos de resinas, modificações e combinações possíveis).

De forma geral, a resina epóxi pode ser caracterizada como um grupo de materiais oligoméricos que contêm um ou mais grupos epóxi (oxirano ou óxido de etileno) por molécula. Esta pode ser processada numa grande variedade de produtos como revestimentos de proteção, adesivos e componentes estruturais, através do processo de cura (uso de agentes de cura), transformando-se em uma resina termofixa.

Resinas epóxi são uma família de produtos cujo pré-polímero ou oligômero (antes da cura) que variam desde líquidos de baixa viscosidade (0,5 – 1,0 Pa.s), com massa molar menor que 500 g/mol, até sólidos frágeis com massa molar pouco maior que 3000 g/mol [5]. Disto provém uma vasta gama de composições a serem formuladas, visto que

também podem ter diferentes processos de cura utilizando agentes diferentes, além da auto-polimerização ou homopolimerização, sem o uso de agentes de cura, com as próprias moléculas da resina formando as ligações cruzadas.

Geralmente a resina epóxi é curada com poliaminas (alifáticas ou aromáticas), poliamidas, poliácidos e anidridos cíclicos ou lineares; como agentes de cura. São usados também catalisadores e aceleradores para acelerar ou diminuir a taxa de cura, se necessário no processo, o que também irá influir nas propriedades mecânicas do produto.

O grupo epóxi ou oxirano é formado por um anel tripartite, constituído de um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono, que também estão ligados entre si. A natureza instável desse anel o faz altamente reativo, contribuindo para as características da resina.

A Figura 2.3 mostra o anel oxirano, característico da resina epóxi.

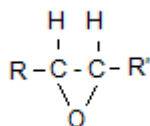


Figura 2.3 Estrutura química geral do anel oxirano/epóxi.

Resinas epóxi líquidas (pré-polímero), como as utilizadas para processo de bobinamento filamentar para produção de tubos, são fabricadas a partir de uma reação de policondensação do bisfenol-A e epícloridrina (geralmente em excesso), gerando bisclorohidrina, que, em meio básico, é dehidroalogenada para produzir a resina epóxi. A fórmula química da resina epóxi tradicional, fabricada a partir de bisfenol-A, está representada na Figura 2.4.

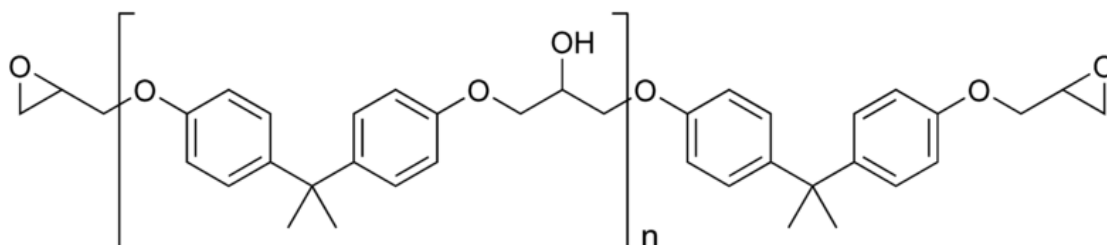


Figura 2.4 Fórmula estrutural do pré-polímero de resina epóxi (bisfenol-A).

Resinas com número “n” alto (alto grau de polimerização) são curadas através da funcionalidade do grupo hidroxila, diferentemente das resinas cujo “n” é baixo, cujos agentes de cura irão reagir com o grupo epóxi na molécula. Para compósitos reforçados por fibras, os requisitos da resina são baixa viscosidade para maior facilidade de manuseio e fluxo. Esta deve ter valores de n baixo e é curada através do anel epóxi.

Para aplicações estruturais e de não-revestimento como pré-formados, encapsulamento e bobinamento filamentar (“*filament winding*”), resinas epóxi líquidas são muito usadas por oferecerem o melhor balanço entre manuseio, reatividade e propriedades de performance [5].

Resinas epóxi são intermediários reativos, compostos geralmente de uma mistura de oligômeros contendo um ou mais grupos epóxi por molécula. Para convertê-la em produtos de uso comercial (polímero termofixo pós-cura) esta deve ser curada para obter ligações cruzadas entre as moléculas, por reação química, e transformada em uma rede tridimensional infusível; através do uso de agentes de cura. Estes agentes de cura funcionam reagindo ou causando a reação do grupo epóxi ou hidroxila na molécula da resina.

Os agentes de cura mais importantes são as aminas e os anidridos ácidos, sendo as primeiras mais importantes. E em ambos os casos a reação ocorre com o anel epóxi da molécula do pré-polímero. As aminas ou poliaminas podem ser alifáticas (incluindo poliamidas), cicloalifáticas e aromáticas; gerando produtos de diferentes propriedades e aplicações. Poliaminas alifáticas promovem cura à temperatura ambiente e são usadas com resinas líquidas de baixa viscosidade devido à dificuldade de mistura. Chama-se “*pot life*” o tempo em que o sistema ativado (resina termofixa + agente de cura + catalisador) mantém viscosidade baixa o suficiente para ser processada. As resinas curadas com poliamidas têm boa adesão a vários substratos incluindo metais e vidro e mantêm excelentes propriedades mecânicas até 80°C. Aminas cicloalifáticas requerem aplicação de calor para cura, mas mantêm boa estabilidade de cor, baixa viscosidade e boa resistência química. As aminas aromáticas são agentes de cura de alto desempenho devido à alta resistência mecânica, térmica e química do sistema após a cura. Anidridos ácidos já requerem altas temperaturas e presença de catalisadores para atingir boas propriedades, mas possuem um alto “*pot life*”, baixa viscosidade, baixa exotermia durante a cura e melhor estabilidade térmica ao ar em altas temperaturas que as aminas [5].

Para o processo de bobinamento filamentar ou “*filament winding*”, discutido mais adiante, as aminas alifáticas, cicloalifáticas e os anidridos são os agentes de cura mais utilizados, assim como misturas de aminas aromáticas; devido a fato de produzirem um

sistema pré-polímero/agente de cura de baixa viscosidade e maior “*pot life*”, o que facilita o processo, por exemplo, para a fabricação de tubos.

Na Tabela 2.1 podemos ver algumas propriedades físicas e mecânicas da resina epóxi pós-cura, sem reforço, para comparação mais à frente, com as propriedades da fibra de vidro e do compósito final.

Tabela 2.1 Algumas propriedades da resina epóxi (bisfenol-A).

Propriedades da Resina Epóxi	Unidade	Valor
Resistência Mecânica (σ_R)	MPa	83
Módulo de Elasticidade (E)	GPa	2,5
Peso Específico (ρ)	kg.m ⁻³	1250
Capacidade Térmica	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	1050
Condutividade Térmica	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	0,3

Fibra de vidro

Fibras de vidro são utilizadas em grande variedade de aplicações: materiais compósitos estruturais, tubos resistentes à corrosão com capacidade de estocagem na indústria química e petroquímica, partes constituintes na indústria aeroespacial e outros.

As fibras de vidro em geral apresentam resistência à corrosão e ao fogo, alta resistência mecânica, baixo peso específico, e propriedades óticas, elétricas e térmicas específicas. São aplicadas de forma contínua (fibras longas), com distribuição linear e arranjo paralelo, mesmo que com angulação variável de feixes; ou de forma descontínua (fibras curtas), onde a disposição é aleatória.

Estas são constituídas basicamente de sílica e outros óxidos metálicos. E seu grande uso como reforço em materiais conjugados é dependente das seguintes características:

- propriedades da fibra em si;
- propriedades da interface fibra de vidro/resina (superfície de interação);
- quantidade de fibra (% FV);
- orientação das fibras.

A fibra de vidro pode ser de vários tipos, dependendo de sua composição química, que estabelecerá diferentes propriedades. Podem ser do tipo E (“*electrical*”), C (“*chemical*”), S, T, e R (nomes de fabricantes). Neste trabalho os corpos de prova apresentam fibra de vidro do tipo E ou “*E-glass*”, normalmente aplicado à indústria

elétrica, e por isso de custo mais baixo, mas de propriedades mecânicas, físicas e químicas satisfatórias para aplicações em compósitos. A fibra de vidro tipo E tem a seguinte composição química: 53-54% de SiO₂, 11-15% Al₂O₃, 5-10% B₂O₃, 17-21% CaO, 0-5% MgO e 0-1% R₂O; com traços possíveis de BaO e Fe₂O₃. Uma particularidade está relacionada ao baixo nível de álcalis e borossilicato [6].

A fibra do tipo E possui as seguintes propriedades, mostradas na Tabela 2.2 abaixo:

Tabela 2.2 Propriedades da fibra de vidro tipo E. [6, 7]

Propriedades da Fibra de Vidro (tipo E)	Unidade	Valor
Resistência Mecânica (σ_R)	MPa	2400
Módulo de Elasticidade (E)	GPa	72,4
Peso Específico (ρ)	kg.m ⁻³	2500
Capacidade Térmica	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	710
Condutividade Térmica	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3

Relativamente a outros tipos de fibra (como S ou C), a fibra tipo E tem maior resistência mecânica à tração e compressão e também maior rigidez, mas possui mais baixa resistência ao impacto, no entanto com menor custo. O coeficiente de expansão térmica é baixo e a resistência ao cisalhamento é alta.

O processo de fabricação, de maneira bastante simples, constitui no vidro fundido formulado passando por matriz de furos de diâmetro muito reduzido (de acordo com o que se deseja obter), sendo em seguida resfriado, passando por tratamento superficial e enrolado (filamentação contínua). Quanto menor o diâmetro da fibra (aumento da razão de aspecto), maior é a área interfacial com a resina (aumentando o potencial de reforço), mas também maior é o custo. Utiliza-se lubrificantes (anti-abrasivos), auxiliar de fluxo, agentes acoplantes e anti-estáticos para melhoria de propriedades e melhor manuseio.

O poder de reforço fibra/resina está relacionado à área de interface (superfície de interação efetiva) e ao grau de adesividade entre ambas. No que se refere à fibra de vidro, esta passa por tratamento superficial em sua fabricação para aumentar a interação (diminuição de tensão superficial) e proteção para o uso e manuseio. Este recobrimento é comumente chamado de “*sizing*”, constituído de compostos organo-funcionais que farão a ligação inorgânica com o vidro e a ligação orgânica com o polímero. Estes são chamados agentes acoplantes e costumam ser específicos para dados sistemas matriz polimérica/tipo de fibra.

Tratando mais especificamente do material utilizado no presente trabalho, constituído de matriz de resina epóxi com fibra de vidro tipo E, utiliza-se geralmente agentes acoplantes formados por silanos/siloxanos (organo-silicatos ou complexos de Cr).

2.1.3 Compósito de Resina Epóxi com Fibra de Vidro (FV)

Qualquer sistema fibra/resina deve apresentar boas propriedades mecânicas, alta tenacidade, boas propriedades de adesividade (entre seus constituintes) e boa resistência à degradação no meio em que trabalha.

Estas propriedades são buscadas no compósito de resina epóxi com fibra de vidro, pois este apresenta-se como uma opção de material de alta performance para as aplicações em que é requerido.

Propriedades e Aplicações

Os compósitos de resina epóxi com carga de fibra de vidro têm sido usados em variadas aplicações, desde peças de resistência em máquinas agrícolas até estruturas complexas de aviões de combate. Atualmente, um de seus usos mais importantes encontra-se em tubulações e vasos de pressão nas indústrias petroquímica e de óleo e gás, em unidades terrestres e mais intensamente em unidades marítimas de exploração de petróleo, onde a resistência química (corrosão) e mecânica, combinada com baixo peso, é primordial. Também é muito comumente utilizado para reparos em tubulações metálicas e partes estruturais.

A aplicação marítima mais reconhecida é em tubulações de fluidos aquosos. A resistência química e baixo peso, mantendo alta resistência mecânica, têm a contrapartida de toxicidade e fumaça em caso de incêndio e o alto custo; comparado com outras resinas termofixas. O produto mais conhecido é o tubo de resina epóxi com fibra de vidro, fabricado pelo processo de bobinamento filamentar helicoidal, utilizado em terra, a baixas e altas pressões, com grande variedade de fluidos (até mesmo hidrocarbonetos); e no mar, a baixas pressões e com fluidos aquosos. [8]

A resistência química e temperatura máxima de uso em trabalho com determinado tipo de fluido depende do tipo de resina e endurecedor usado [8] (sistema agente de cura - catalisador - acelerador). Tubulações de ERFV (Epóxi Reforçada com Fibra de Vidro) ou GRE (“*Glass Reinforced Epoxy*”), como são mais conhecidas, são fortemente imunes aos

efeitos danosos do sulfeto de hidrogênio (H₂S) e dióxido de carbono (CO₂). Os compostos químicos que mais podem causar danos são a água (ao invés do óleo), e espécies de alta aromaticidade como tolueno e xileno. [8]

Tubos de Material Compósito de Resina Epóxi com FV

Tubulações de resina epóxi com fibra de vidro (ERFV) são fabricadas principalmente pelo processo de bobinamento filamental helicoidal (*"filament winding"*). Este processo geralmente é usado para componentes ocos e circulares ou ovais como tubulações e tanques. Os feixes de fibras passam pelo banho de resina (adicionada de agente de cura e catalisador) e são enroladas em um mandril de aço polido em diferentes orientações, de acordo com o mecanismo de alimentação das fibras e taxa de rotação do mandril [9]. Depois do enrolamento, os tubos ainda no mandril são enviados para um forno para cura e pós-cura, mantendo-se o mandril em rotação para garantir uniformidade dimensional. Depois da cura o tubo é removido do mandril por extrator hidráulico ou aplicação de pressão interna.

Trata-se de um método rápido, econômico, onde quantidade de fibra e resina pode ser controlada e que gera componentes com propriedades estruturais de alta qualidade e flexibilidade, uma vez que as fibras podem ser entrelaçadas em padrões diferentes para suportar diferentes condições de aplicação de carga (o mais comum é em ângulo de 55°). No entanto, é um processo limitado a componentes convexos, onde a superfície externa não apresenta bom acabamento. Além disso, há dificuldade de se moldar as fibras na direção do comprimento da peça, o que seria interessante mecanicamente; e devem ser utilizadas resinas de baixa viscosidade, cujas propriedades mecânicas finais pós-cura são piores e de toxicidade mais alta. O custo do mandril também pode ser alto.

Há também outros processos de bobinamento contínuo ou descontínuo, com fibras enroladas sem angulação umas em relação às outras (90° com o eixo longitudinal do mandril), mais utilizados para tubulações de pequenos diâmetros.

Uma tubulação de ERFV possui resistência à corrosão interna e externamente, mesmo sem preparação superficial ou recobrimento (pintura). A inércia química tanto da fibra de vidro quanto da resina epóxi contribuem para tal fato; que, aliado a propriedades mecânicas satisfatórias e baixa densidade, levam à aplicação deste material principalmente em tubulações da indústria petrolífera, em terra e também em instalações marinhas. Linhas de tubulação, tanques e vasos são utilizados em instalações em terra,

enquanto que há maior diversidade de aplicações em instalações marítimas, incluindo sistemas de água de injeção, água de combate a incêndio, estruturas de acesso e componentes de “risers” flexíveis.

A instalação de linhas de ERFV demanda juntas de tubulações, que são, em sua maioria, fabricadas por colagem com adesivo específico, geralmente também à base de resina epóxi. Podem ser de vários tipos: flangeada, junta ponta e bolsa, juntas rosqueadas, rosqueada com anel de selagem (“*o-ring*”), rosqueada e colada, junta tipo luva (caso especial da ponta e bolsa), e outros. De forma geral, as juntas podem ser coladas (uso de adesivos), laminadas ou juntas mecânicas. Neste estudo será dada atenção especial às juntas coladas, muito utilizadas na indústria do petróleo e aplicadas, juntamente com as laminadas, para linhas com maior pressão de projeto.

Na Figura 2.5 estão esquematizados alguns tipos comuns de juntas típicas de tubulações de ERFV: as juntas ponta e bolsa e a junta laminada, esta última sendo muito utilizada nos últimos anos.

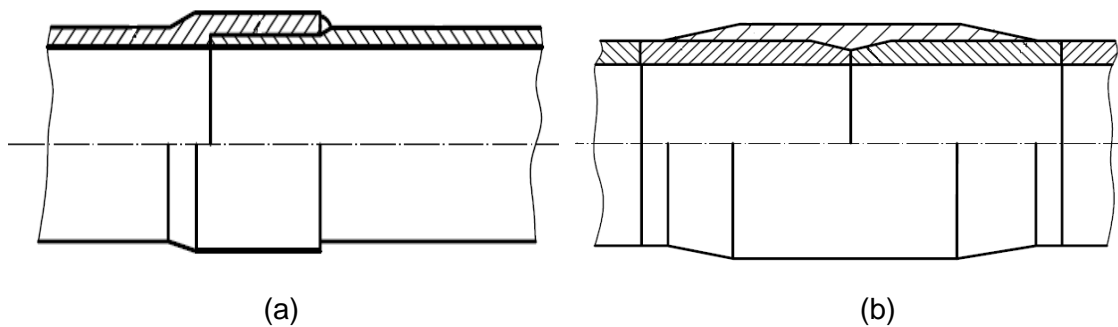


Figura 2.5 Em (a) uma junta colada do tipo ponta e bolsa e, em (b) uma junta laminada. [10]

A Figura 2.6 apresenta uma fotografia do tipo de junta colada tipo luva, um caso especial do tipo ponta e bolsa, e também, de certa forma, parecido com a laminada, uma vez que não há interposição entre os tubos dentro da junta como acontece no ponta e bolsa. Uma luva acomoda ambas as extremidades de dois tubos e faz a ligação entre eles.



Figura 2.6 Fotografia (visão externa) de uma junta tipo luva de tubulação de ERFV [11].

No caso de juntas coladas tipo luva, a junta em si também é fabricada pelo processo de bobinamento filamentar helicoidal, de acordo com o diâmetro da tubulação em que será aplicada. A preparação da superfície da parte final dos tubos, que entram em contato com o adesivo e serão colocados na junta tipo luva, é feito com maquinário de usinagem. Aplica-se o adesivo (geralmente à base de resina epóxi), devidamente misturado e ativado nas superfícies de interesse e, após o posicionamento correto do tubo dentro da junta, faz-se um aquecimento com mantas térmicas para promover a cura homogênea e obter as propriedades desejadas.

O custo da instalação rápida e sem necessidade de solda, em comparação com tubulações metálicas, recai sobre a necessidade de extremo cuidado e precisão na preparação das superfícies de tubos e aplicação do adesivo no processo de montagem das juntas na construção dos “*spools*”. Além disso, este tipo de material não possui a mesma ductilidade que o aço; assim, a aplicação de esforços para correção de problemas de falta de alinhamento deve ser evitada.

Seria também importante destacar que linhas em ERFV apresentam baixo custo de manutenção e uma maior vida em serviço, se comparada ao aço carbono, mas se utilizada dentro dos limites do material, especificados pelo fabricante; compensando um maior custo inicial de produto.

Em relação às tubulações e juntas utilizadas neste estudo, estas se aplicam na faixa de trabalho de 20 a 60°C, em linhas de transporte de água industrial fria (20°C) ou

quente (60°C). As espessuras comuns dos tubos está na faixa de 4 a 5 mm. As juntas tipo luva possuem espessura total de cerca de 10 mm, e as curvas, 15 mm.

Cuidados principais estão relacionados ao processo de fabricação e montagem das tubulações de ERFV, operação (mantendo-se limitações de fluidos, temperatura, e pressão de trabalho) e os cuidados nos reparos. Também torna-se claro que a qualidade e a aplicação correta do adesivo na montagem das juntas é de fundamental importância para o desempenho do material, uma vez que a grande maioria dos defeitos e falhas nas tubulações de ERFV acontece nas juntas coladas.

2.1.4 Defeitos em Compósitos

Consideram-se como defeitos as descontinuidades que levam a falhas nos componentes. A importância de se conhecer bem os defeitos comuns em cada tipo de material reside na necessidade da integridade estrutural dos equipamentos e componentes. De maneira geral, os fatores importantes para essa integridade são a geometria da estrutura, localização, orientação e dimensões do defeito, natureza do campo de tensões aplicado e ambiente em que opera. [12].

No caso de compósitos, há três modos de falha principais: falha da matriz, falha da fibra e falha da interface fibra/matriz; considerados iniciadores da falha geral do componente. Tais modos de falha dependem das propriedades mecânicas e químicas de seus três constituintes: matriz, fibra e interface; e das condições de carregamento e microestrutura do sistema específico, incluindo-se, neste caso, diâmetro da fibra, fração volumétrica de fibra, distribuição e orientação destas e outros [1].

Devido à grande quantidade de modos de falha possíveis para materiais compósitos em geral, estes não serão explicados individualmente. A Figura 2.7 ilustra estes modos possíveis de falha e suas relações entre si.

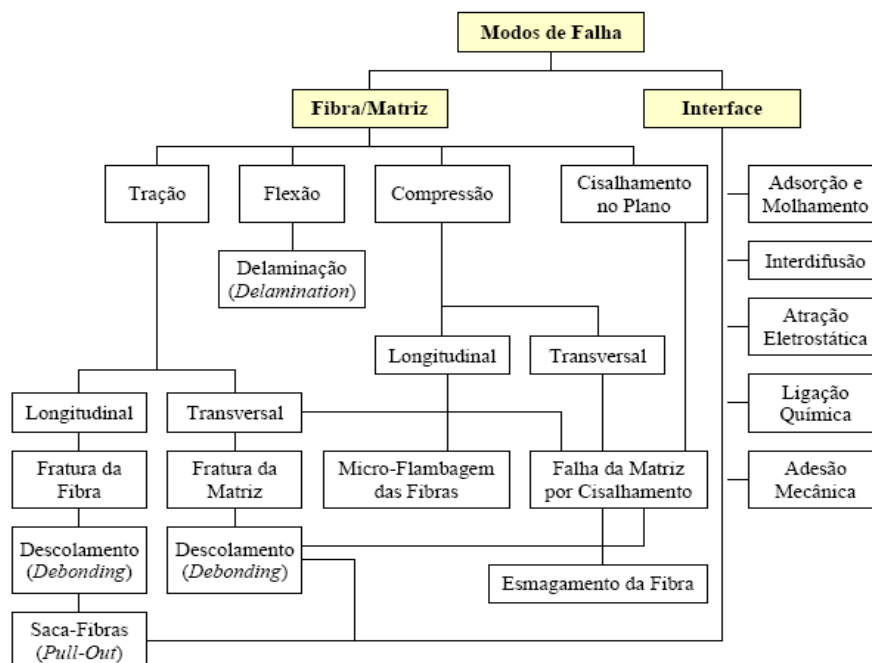


Figura 2.7 Fluxograma da relação entre os mecanismos de falha em compósitos reforçados por fibras [13].

Neste trabalho, especificamente, tratar-se-á de defeitos em tubulações de compósitos, mais especificamente nas juntas coladas de tubulação de resina epóxi com fibra de vidro e perdas de espessura em tubulações; como será visto logo à frente.

Antes disso, pode-se definir, em termos práticos, que defeitos em compósitos em geral acontecem decorrentes das etapas de fabricação e montagem ou em serviço. E também, vários tipos de defeitos ocorrem de maneira conjunta em todos os materiais compósitos reforçados por fibras, mas dependendo da microestrutura e solicitação mecânica, alguns se tornam preferenciais em relação a outros [1]. A identificação dos tipos de defeitos presentes no componente é de extrema importância para se saber quais tipos de ensaios não-destrutivos deverão ser utilizados para identificação de discontinuidades; assim como a espessura, acabamento superficial e qualidade de fabricação [14].

São fontes das discontinuidades e defeitos comuns em compósitos em geral: inclusões, porosidade, falta de adesão fibra/matriz e entre camadas, imperfeições devido à usinagem, tensões residuais na cura, degradação química e atmosférica, fadiga, fluência, cura incompleta, excessiva ou diferencial, desequilíbrio na fração volumétrica definida no processo (áreas com mais ou menos resina ou fibra), entrada de água, dano por impacto, erosão, degradação e outros. Estes levarão a defeitos ou discontinuidades

como trincas, delaminação, descolamento, variação de espessura, deformação e empenamentos que podem ou não levar à falha do componente.

No caso de tubulações de PRFV também se incluem as causas ou fontes de descontinuidades e/ou defeitos citados acima, assim como os defeitos mais comuns. Para as juntas de tubulações do mesmo material, objeto principal deste estudo, os principais defeitos ou descontinuidades são trincas, delaminações, inclusões, porosidade, degradação, erosão, descolamento, vazios, cura pobre e um caso especial de descolamento, chamado de “*kissing bond*” ou “*kissing disbond*” [11].

As trincas são provenientes de fadiga na região da junta por deslocamentos e vibração da linha ou golpes de aríete e danos por impacto. Além disso, há tensões residuais na estrutura devido a algum problema na hora da cura do tubo em fabricação ou do próprio adesivo utilizado para colar os tubos à junta. Podem ocorrer na fabricação, mas principalmente em serviço. Delaminações são regiões com falta de adesão entre resina e fibra ou entre camadas dentro da peça ou tubo. Geralmente ocorrem na fabricação, mas podem ser observadas em serviço quando de um golpe de aríete ou solicitação do material em faixas de tensão acima do seu limite de flexão.

Defeitos de Fabricação e Montagem em Tubos de PRFV

Em relação à fabricação (bobinamento filamentar helicoidal) e montagem (principalmente no tocante ao processo de colagem das juntas) dos tubos de ERFV, podemos definir as principais causas ou origens das descontinuidades ou potenciais defeitos como:

- os próprios defeitos que podem ser gerados pela natureza do processo de bobinamento filamentar (descolamento, delaminação, variação de espessura de parede, desalinhamento de fibras);
- baixa qualidade ou materiais com validade vencida;
- contaminações nos materiais e na superfície a ser colada;
- cura imprópria (excessiva ou insuficiente) ou desigual;
- aprisionamento de ar ou gases subprodutos de cura (vazios);
- usinagem imprópria ou preparação inadequada da superfície;
- má formulação e/ou má aplicação do adesivo [12]

Para o presente estudo, relativo a juntas coladas, considera-se como principais defeitos de montagem presentes a falta de adesivo e a falta de adesão (interface adesivo/aderente com baixo nível de interação e/ou adesão), subdividida em descolamentos (entre superfícies de adesivo/tubo ou adesivo/junta) e as chamadas colagens inadequadas ou “*kissing bonds*” (interface adesivo/aderendo com interação física, isto é, em contato, mas sem resistência adequada, com baixa adesão). Colagens inadequadas ou “*kissing bonds*” são também conhecidas como descolamentos de volume nulo. A falta de adesão ou baixa força de adesão entre adesivo e aderendo pode estar relacionada a baixas propriedades do adesivo (baixa qualidade, fora de validade, mistura incorreta, condições de cura incorretas) ou má preparação das superfícies da tubulação e junta.

A falta de adesivo em partes da junta, por aplicação incorreta do adesivo ou remoção deste no posicionamento dos tubos dentro da junta tipo luva, leva a regiões de vazios ou com pouca quantidade deste. Isso gera, assim como no caso da falta de adesão, descontinuidades praticamente planares, que enfraquecem a junta e podem levar a falhas.

A Figura 2.8 mostra a preparação de superfície em uma tubulação de ERFV para colagem da junta tipo luva. Faz-se uma usinagem na parte que estará em contato com o adesivo e que entrará no interior da junta para a união das tubulações. A etapa de preparação superficial é primordial para a qualidade da junta a ser fabricada. Deve-se também evitar a entrada de partículas ou fluidos estranhos, como poeira, óleo ou umidade na superfície usinada, com o intuito de preservar sua rugosidade e evitar a formação de descontinuidades na junta.



Figura 2.8 Em (a) a usinagem da superfície que ficará em contato com o adesivo para a fabricação da junta colada tipo luva, em tubulação de ERFV. Em (b) a superfície pronta para o processo de aplicação do adesivo [11].

Na Figura 2.9 (a) é mostrado o adesivo misturado e ativado, e sua aplicação na superfície do tubo pós-tratamento (usinagem), em (b). Esta também constitui uma etapa de grande importância e que demanda grande cuidado e experiência ao operador de montagem de tubulações, pois a maioria dos defeitos em tubulações de compósitos encontra-se nas juntas, e devido a problemas nestas etapas de fabricação e montagem.



Figura 2.9 Em (a) o adesivo misturado com o agente de cura e catalisador para aplicação na junta colada; e o processo de aplicação manual do mesmo, sob a superfície usinada, em (b) [11].

Defeitos em Serviço

Os defeitos em serviço, no caso de tubulações de ERFV, apesar de não tão comuns, têm também grande importância prática; principalmente porque uma boa parte deles acontece devido ao fato de não se estar acostumado com o tipo de material e considerá-lo com comportamento similar ou próximo ao do aço, quando em operação.

Desta forma, erros humanos como o uso de martelos ou marretas para correção ou ajuste dimensional em curvas e juntas, queda de peças ou ferramentas, que, no caso de um aço, material de alta tenacidade, não teriam grande efeito; para compósitos de resina termofixa com fibra de vidro, pode ter efeitos graves. Além disso, são muito comuns arranhões, indentações, erosão, riscos e danos por faísca; mas são considerados os mais importantes os danos por impacto, dano por vibração (fadiga), absorção de umidade (que pode levar a degradação da matriz ou descolamento na interface resina/fibra), efeitos térmicos (elevação de temperatura a uma faixa acima do limite do material), picos de pressão muito elevados (“golpes de aríete”) e envelhecimento (degradação ambiental por efeito combinado de ar ou gases presentes no meio, umidade, temperatura e radiação ultravioleta), além da degradação química dependendo do fluido em serviço.

Em termos práticos, são considerados os defeitos originados em serviço de maior importância para juntas coladas de materiais compósitos e para a tubulação em si, as delaminações (entre camadas laminadas do tubo), descolamentos (entre adesivo e aderendos na junta ou entre fibra e resina), falha do adesivo (por motivo de esforço mecânico, pressão ou temperaturas elevadas, efeito degradante de agentes químicos), perda de espessura devido à erosão e trincas (oriundas de fadiga mecânica ou dano por impacto).

A Figura 2.10 ilustra alguns defeitos comuns de operação em tubulações de compósitos. Em (a) ocorreu delaminação, com camadas de laminação descolando-se uma das outras por efeito de “golpe de aríete”, isto é, elevação súbita da pressão localmente devido a alguma razão operacional, mas que também pode ter origem na fabricação do tubo, isto é, se houve algum problema no processo de bobinamento helicoidal (por exemplo, a resina e agente de cura mal misturados ou com alta viscosidade durante o processo), que geraria uma má adesão entre camadas. Na imagem (b) é muito claro um dano por impacto, que pode ter ocorrido pela queda de alguma ferramenta ou impacto de equipamentos na tubulação. Neste caso, o descolamento das fibras em relação à matriz polimérica é bastante visível, mas geralmente só internamente à tubulação, como mostrado na figura.

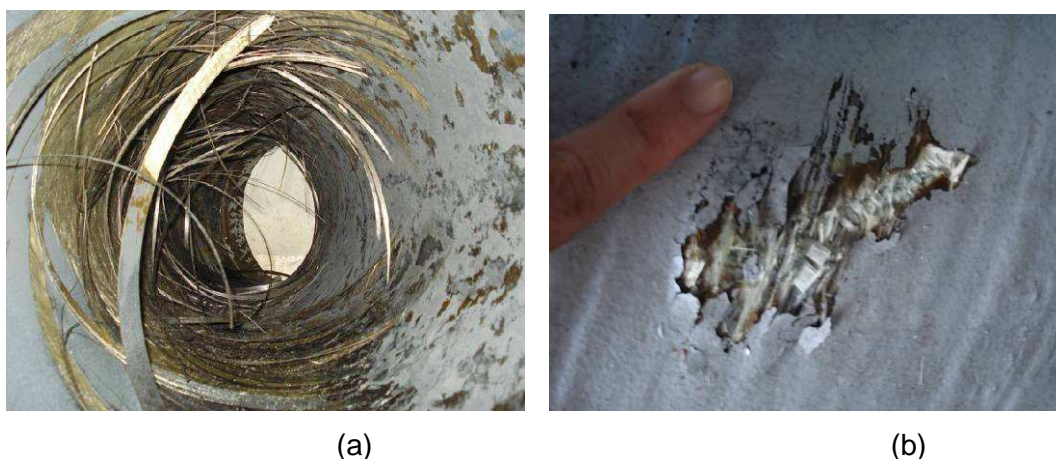


Figura 2.10 Em (a) delaminação causada por “golpe de aríete” na tubulação e em (b), dano interno por impacto [11].

A Figura 2.11 mostra um caso de falta de alinhamento em tubulação de ERFV onde ocorreu falha na junta. A junta, provavelmente com algum defeito, não suportou a tensão devido ao desalinhamento e gerou a falha.



Figura 2.11 Falha na junta de tubulação de PRFV com desalinhamento [11].

Reparos

Reparos em tubulações de PRFV ou mesmo de aço são realizados utilizando-se de resina e mantas de fibra de vidro, onde faz-se a laminação manual. Coloca-se uma camada inicial de resina ativada (catalisada e com o agente de cura) acima da região a ser reparada, depois posiciona-se a manta de fibra e aplica-se a resina ativada novamente, com auxílio de rolos para retirar o ar entre as fibras e bolhas na resina. Repete-se o processo para quantas camadas forem desejadas. Depois, com aplicação de mantas térmicas, pode-se fazer um processo de pós-cura para melhoria de propriedades.

Este processo é manual e não possui especificações claras da quantidade de fibra ou resina que deve ser aplicada na tubulação, nem quantas camadas, de acordo com o tipo e dimensões dos defeitos. Pode tornar difícil a inspeção futura da parte reparada.

2.2 Conceitos Relativos à Transferência de Calor

Para este trabalho será importante definir alguns conceitos relativos à medição de temperaturas, modos de transferência de calor e radiação infravermelha, além de alguns termos relativos à radiometria e emissividade. Isto se deve ao fato de ser utilizada a técnica de termografia de infravermelho como ensaio não destrutivo nas juntas coladas de tubulações, fabricadas em material compósito de resina epóxi reforçada com fibra de vidro.

A termografia baseia-se na detecção da radiação térmica emitida pelos corpos. Todos os corpos emitem radiação que contém a frequência e comprimento de ondas na faixa da região do infravermelho do espectro eletromagnético da luz. Os sensores

utilizados na termografia se situam nessa faixa de trabalho de comprimento de onda (0,75 a 1000 μm) [7].

Os corpos emitem radiação em função de movimentações internas de seus átomos, e esta emissão é proporcional à temperatura do corpo. O método termográfico está relacionado à perturbação do fluxo de calor (emissão de radiação infravermelha), gerada externamente ou internamente, através de uma estrutura, de acordo com diferenças na geometria ou materiais dentro dessa estrutura [15]. Tais perturbações produzem desvios na distribuição de temperaturas da superfície em análise e podem estar relacionadas a anomalias ou descontinuidades.

A temperatura é a medida da energia cinética média dos átomos, moléculas ou íons de uma determinada substância ou corpo. Sempre que houver diferença (gradiente) de temperaturas dentro de um sistema, haverá transferência dessa energia no sentido da temperatura mais alta para a temperatura mais baixa. Essa energia em trânsito é chamada de calor [7].

Temperatura e calor são grandezas estatísticas, não passíveis de observação direta, e são medidas através de alterações químicas e físicas em corpos de referência. São, portanto, medidas indiretas e relativas e que podem ter influência das relações entre as propriedades utilizadas como referência [7].

2.2.1 Condução, Irradiação e Convecção

As três formas conhecidas de transferência de calor são a condução, a radiação ou irradiação e a convecção.

A condução é a transferência de energia entre partes adjacentes (em contato) de um sólido em consequência da existência de um gradiente térmico no mesmo. O calor se transfere em camadas sucessivas do material através da difusão de energia cinética dos átomos ou moléculas (choques entre estes). Esta energia é maior nas partes quentes (maior número médio de choques entre átomos, que possuem maior energia cinética) e menor nas frias. A transferência de calor por condução pode ser no estado estacionário (fluxo não varia com o tempo) ou não-estacionário (fluxo variando com o tempo).

A condutividade térmica é o parâmetro que determina a maior ou menor capacidade de um material conduzir calor. A difusividade térmica indica a taxa em que o calor atravessa um material, e é dada pela razão entre a condutividade e o peso específico do material, multiplicada pelo seu calor específico a pressão constante (capacidade térmica). Em materiais de alta difusividade, como cobre e alumínio, o calor

se propaga rapidamente; enquanto que em materiais de baixa difusividade, como borrachas e vidro, este se propaga de forma lenta [15].

A efusividade térmica indica a inércia térmica do material, isto é, sua resistência ao aumento de temperatura quando calor é aplicado a este. É dada pela raiz quadrada do produto da condutividade térmica pela capacidade térmica do material (calor específico a pressão constante multiplicado pela massa do material). Metais têm alta efusividade, e compósitos poliméricos são considerados materiais de relativamente baixa efusividade térmica [15].

A convecção é o modo de transferência de calor que ocorre em fluidos, através de diferença de densidade, quando estes estão submetidos a gradiente de temperatura. Ocorre transporte de massa caracterizado pelo movimento do fluido devido a diferenças de densidade, de acordo com a temperatura (geralmente fluidos com mais alta temperatura apresentarão mais baixa densidade).

A radiação térmica é a radiação eletromagnética emitida pelos corpos de acordo com sua temperatura, e, ao contrário da condução e convecção, não necessita de um meio material para se propagar. Quanto maior a temperatura do corpo, maior é a frequência das ondas eletromagnéticas emitidas e menor é o comprimento de onda destas. Todos os corpos emitem radiação eletromagnética em função de sua temperatura absoluta de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann.

O espectro de radiação eletromagnética inclui vários tipos diferentes de radiação, de acordo com o comprimento de onda e frequência, incluindo: microondas, raios gama, raios-X, ultravioleta, luz visível (e as diferentes cores) e infravermelho. A radiação de origem térmica, isto é, emitida pelos corpos de acordo com sua temperatura, engloba as faixas de luz visível, radiação infravermelha e uma parte da radiação ultravioleta.

2.2.2 Radiação Infravermelha

O quantum de energia na faixa do infravermelho gera ondas com frequências e comprimentos entre as faixas de microondas (acima de 100 μm) e a faixa da luz visível (0,4 a 0,7 μm), dentro do espectro eletromagnético. Desta forma, o comprimento de onda pode variar entre 0,1 μm e 1,0 mm; e há certo desacordo entre os autores sobre essa faixa, que acaba considerando uma parte da radiação ultravioleta e das microondas.

Considera-se, geralmente, que o espectro da radiação térmica correspondente ao infravermelho pode ser subdividido em quatro regiões ou bandas: infravermelho próximo

(0,75 a 3,0 μm), infravermelho intermediário (3,0 a 6,0 μm), infravermelho distante (6,0 a 15,0 μm) e infravermelho extremo (acima de 15,0 μm).

Os aparelhos atuais de termografia encontrados no mercado trabalham com comprimento de onda acima de 3,0 μm , chamada de faixa de infravermelho termal. Abaixo dessa faixa predomina a radiação refletida (infravermelho refletido).

Ao se fornecer calor à superfície de um sólido, aumenta-se a energia de vibração de seus átomos constituintes, levando a um aumento de temperatura do sólido e aumento da emissão de energia de suas partículas. A agitação dessas partículas gera radiação de energia eletromagnética térmica, incluindo a infravermelha.

A intensidade da radiação térmica infravermelha emitida depende da temperatura e da natureza da superfície do corpo. Em altas temperaturas a energia é maior e os comprimentos de onda são menores (maior é a frequência); já em baixas temperaturas a intensidade da radiação é baixa, consistindo em sua maioria de comprimentos de onda maiores [7].

A Lei de Stefan-Boltzmann (Equação 2) descreve a intensidade de emissão de energia radiante por unidade de área do corpo negro, em função da emissividade e da quarta potência da sua temperatura absoluta.

$$W = \epsilon \cdot B \cdot T^4 \quad (2)$$

Onde: W – intensidade da taxa de emissão de energia radiante por unidade de área [W/m^2]

ϵ – emissividade do material

B – constante de Stefan-Boltzmann ($5,7 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

T – temperatura absoluta [K]

Considera-se como um corpo negro perfeito um corpo que absorve toda a radiação impingida a este em qualquer comprimento de onda, que também é igualmente capaz de emitir toda essa radiação; funcionando como um corpo de referência para o desenvolvimento das equações. Possui emissividade igual à unidade (um).

2.2.3 Considerações sobre Radiometria, Emissividade e Medidas de Temperatura

A Lei de Wien relaciona a temperatura de um corpo negro com o comprimento de onda de máxima emissão ou de pico (Equação 3).

$$\lambda_{\text{máx}} = b / T \quad (3)$$

Onde: $\lambda_{\text{máx}}$ – comprimento de onda de intensidade de radiação máxima [μm]

b – constante de Wien ($2,897 \mu\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$)

T – temperatura absoluta [K]

A equação de Planck para a distribuição de radiação do corpo negro mostrou que a energia varia de modo discreto (quantum) de acordo com o comprimento de onda; e pode ser estimada pela Equação 4.

$$W(\lambda) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{h \cdot c / \lambda \cdot k \cdot T} - 1)} \quad (4)$$

Onde: $W(\lambda)$ – taxa de emissão de energia radiante por área, em função do comprimento de onda ou emitância radiante espectral (o fluxo irradiado em uma semi-esfera por intervalo de comprimento de onda $d\lambda$) [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

h – constante de Planck ($6,625 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

c – velocidade da luz ($2,998 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

k – constante de Boltzmann ($1,380 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$)

T – temperatura absoluta [K]

λ – comprimento de onda [m]

A Figura 2.12 mostra a potência irradiada por um corpo considerado negro, em função do comprimento de onda, para três temperaturas diferentes. Observa-se que aumentando a temperatura aumenta-se o pico de potência (Lei de Wien) e a área sob a curva (Lei de Stefan-Boltzmann). Quanto maior a temperatura, menor o comprimento de onda (potência da radiação W chegando a valores mais altos).

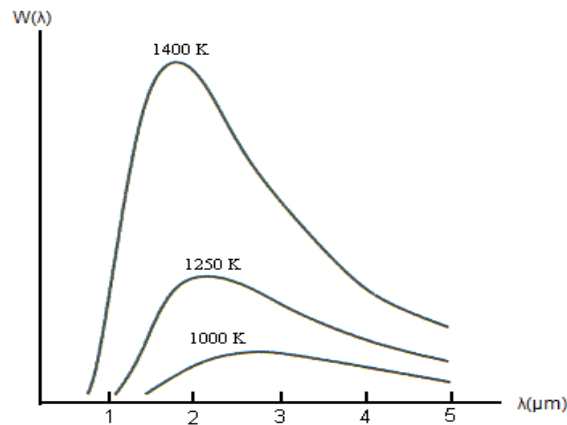


Figura 2.12 Radiação espectral de um corpo negro em função do comprimento de onda e temperatura.

Quando a radiação eletromagnética interage com a matéria observam-se diferentes fenômenos, dependendo do comprimento de onda incidente e também do material. Pode haver absorção, reflexão ou transmissão da radiação.

A absorção está relacionada à interação da radiação eletromagnética com partículas eletricamente carregadas nos átomos e ligações dentro de um retículo cristalino ou moléculas. A radiação absorvida transforma-se em energia térmica no interior do material e poderá ser reemitida posteriormente em outro comprimento de onda. A transmissão é a penetração de parte da radiação dentro do material, sem ser absorvida ou refletida (material transparente), passando através do material; mas sofrendo forte espalhamento (material translúcido). Pode ocorrer refração. Já a reflexão pode ser especular (radiação incidindo sobre uma superfície cujas saliências e reentrâncias não ultrapassam um quarto do comprimento de onda), ou difusa (espalhamento das frentes de onda em todas as direções).

A cor característica de cada material é conferida pelo resultado da absorção de alguns comprimentos de onda em conjunto com a reflexão (e/ou transmissão) de outros.

De acordo com a Lei de Kirchhoff, existe uma igualdade entre a capacidade de um corpo absorver energia incidente e sua capacidade de reemitir-la, em um mesmo comprimento de onda. Esta capacidade é chamada de emissividade de um corpo e pode ser também definida como a relação entre a energia irradiada por esse corpo, em um dado comprimento de onda, e a energia irradiada por um corpo negro, à mesma temperatura. Assume valores entre zero (0) e um (1) e é numericamente igual à fração absorvida por um corpo. O corpo negro é uma fonte de radiação infravermelha hipotética

que prova a maior radiação possível na temperatura em questão, teoricamente. As equações 5 (emissividade) e 6 demonstram o que foi acima explicitado.

$$\varepsilon = W' / W \quad (5)$$

Sendo: ε – emissividade do material ou corpo

W' – energia irradiada por um corpo qualquer a certa temperatura, em um dado comprimento de onda

W - energia irradiada por um corpo negro à mesma temperatura

Considerando os fenômenos que podem ocorrer quando da incidência de radiação num corpo, considera-se a seguinte equação, para um mesmo comprimento de onda:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (6)$$

Onde: α – fração da radiação que é absorvida

ρ – fração da radiação que é refletida

τ – fração da radiação que é transmitida

Como dito acima, a emissividade é igual à fração absorvida da radiação e assume valores entre zero e um, seguindo as seguintes equações 7 e 8, sendo igual à unidade menos a fração refletida e transmitida da radiação.

$$\varepsilon = \alpha \quad (7)$$

$$\varepsilon = 1 - \rho - \tau \quad (8)$$

Os corpos, em relação à emissividade, podem ser considerados negros ($\varepsilon=1$), cinza ($\varepsilon < 1$) ou radiadores seletivos, que se aproximam mais dos casos reais, onde a emissividade varia de acordo com o comprimento de onda da radiação incidente no corpo.

Segundo o modo como interagem com a radiação, os corpos podem ser considerados negros ($\varepsilon = \alpha = 1$), opacos ($\tau = 0$) ou transparentes ($\alpha, \rho, \tau \neq 0$).

A emissividade depende do comprimento de onda da radiação, como já foi dito, uma vez que a transparência e refletividade variam de acordo com essa variável também;

além disso, a emissividade está muito relacionada à textura do material, isto é, uma relação entre o comprimento de onda e o tamanho das imperfeições da superfície do material. Esse fator pode ser afetado por alterações provocadas pela mudança na composição química superficial do objeto (por exemplo, a formação de camada de óxidos em metais, degradação térmica e ambiental em compósitos de matriz polimérica), assim como pintura e deposição de poeira. Variando o ângulo de observação, pode-se observar também uma mudança aparente de emissividade (diminuição) quando se ultrapassa o ângulo de 60° com a normal (linha perpendicular à superfície).

Dessa forma, podemos concluir que a emissividade, que determina quanto de energia um corpo emite em dado comprimento de onda, afeta a quantidade de energia captada por um receptor (ou equipamento captor) externo. Considerando-se um corpo opaco (maioria dos casos práticos e para simplificação), a energia captada é a somatória da energia emitida mais a refletida; segundo a Equação 9.

$$W = W_E + W_R \quad (9)$$

Onde: W – energia captada

$$W_E = \varepsilon \cdot B \cdot T_o^4 \text{ (energia emitida)}$$

$$W_R = B \cdot T_a^4 (1 - \varepsilon) \text{ (energia refletida)}$$

ε – emissividade do objeto ou corpo

B – constante de Stefan-Boltzmann ($5,7 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

T_o – Temperatura absoluta do objeto

T_a – Temperatura absoluta do ambiente

Assim, quanto menor a emissividade, maior é a componente de energia refletida que será captada pelo receptor, gerando reflexos e devendo ser evitado na medição remota de temperaturas, uma vez que pode gerar indicações falsas.

A emissividade depende da composição e condições de uma superfície. Assim, materiais polidos têm emissividade menor que materiais rugosos. Não metálicos como cerâmicos ou polímeros, em geral, tem emissividade maior que metais. Superfícies de emissividade baixa são mais difíceis de serem examinadas por termografia que superfícies de emissividade alta, pois a intensidade de radiação emitida é mais baixa.

2.2.4 Transferência de calor em PRFV

Não-metals tendem, normalmente, a apresentar emissividade alta e que diminui com o aumento da temperatura. Por esta razão, tubulações e juntas, fabricadas em compósito de resina epóxi reforçados com fibra de vidro, podem ser inspecionados por termografia, uma técnica baseada na emissão de radiação infravermelha. Além disso, estes apresentam baixa ou intermediária difusividade térmica; o que é benéfico para o teste, já que áreas de mais baixa espessura ou com anomalias tenderão a manter uma temperatura mais alta por um tempo maior que áreas sem essas discontinuidades, aumentando o tempo da emissão de radiação infravermelha (tempo de transiente associado a anomalias), o que facilita a detectabilidade destas com os equipamentos usuais.

Compósitos poliméricos têm relativamente baixas efusividades térmicas, e tipicamente originam sinais infravermelhos fortes que estão bem acima do limiar da radiação infravermelha e ruído de instrumentação [15], não necessitando de preparação de superfície. Esta baixa efusividade também contribui para os ensaios de termografia, uma vez que ocorre maior aumento de temperatura em resposta à excitação.

Tubulações de compósitos, fabricadas pelo processo de bobinamento filamental helicoidal, apresentam anisotropia térmica, pois a condutividade térmica na direção longitudinal à orientação das fibras é cerca de dez vezes maior que na direção perpendicular a estas. É importante salientar que na termografia ativa o calor é gerado na superfície da amostra e espera-se que flua até a superfície oposta, isto é, em direção perpendicular às fibras. Mas o calor tenderá a fluir na direção das fibras de vidro (de condutividade térmica dez vezes maior que a resina epóxi), o que dificultaria muito o teste. No entanto, o calor é aplicado a uma área da superfície que é considerada maior que a espessura da amostra [15].

Para uma fonte pontual de calor aplicada à superfície da amostra o efeito da anisotropia seria muito mais intenso, com o calor aplicado fluindo através das fibras até regiões mais frias, e uma pequena parte da energia atingindo a superfície oposta. Entretanto, quando uma área maior é aquecida, apenas as regiões próximas às bordas desta mesma área aquecida são expostas aos arredores mais frios do material e o fluxo primário acontece em direção à superfície oposta da amostra. Pode-se, desta forma, ignorar o fluxo de calor lateral, devido à anisotropia no material. Assim, aquecimento pontual ou linear pode ser usado para exame de superfície do material, enquanto que o aquecimento de uma área maior seria mais apropriado para exame do volume até uma espessura escolhida a partir do tamanho do defeito mínimo detectável necessário à inspeção.

De qualquer forma, para efeitos práticos no caso da aplicação da termografia ativa como ensaio não destrutivo, é considerado a transferência de calor unidimensional através da peça ou amostra sob exame. No caso de tubulações e juntas de resina epóxi com fibra de vidro considera-se o mesmo transporte de calor unidimensional através da espessura da parede do tubo.

Plásticos reforçados com fibra de vidro, sem pigmentação ou pintura, são considerados como materiais semi-transparentes (emissividade é função de reflectância e transmitância). Se estes possuem pigmentação, cargas ou pintura são considerados opacos (emissividade dependente apenas da reflectância).

2.3 Ensaios Não Destrutivos (END's) para Compósitos

2.3.1 Definições Gerais de END's

Os ensaios não destrutivos (END's) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los ou não alterando suas características ou estado para uso futuro; sendo executados nas etapas de fabricação, construção, montagem, manutenção e nas inspeções periódicas. Tratam-se de ferramentas de controle de qualidade de matérias-primas, produtos e equipamentos e contribuem para sua integridade através da garantia da qualidade, aumento de confiabilidade das inspeções de equipamentos, segurança das pessoas e instalações, preservação do meio ambiente, aumento de produtividade e redução de custos. São largamente utilizados nos setores petróleo/petroquímico, químico, aeronáutico, aeroespacial, siderúrgico, naval, eletromecânico, papel e celulose, entre outros [16].

Os END's incluem métodos capazes de proporcionar informações a respeito dos defeitos ou descontinuidades de certo produto ou equipamento, das características morfológicas de um material, ou ainda, da monitoração da degradação em serviço de componentes, equipamentos e estruturas.

Os métodos convencionais de END são: ensaio visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, ultra-som, radiografia (raios-X e raios Gama) e termografia (passiva); enquanto que os menos comuns ou não-convencionais são correntes parasitas, análise de vibrações (emissão acústica), estanqueidade, variantes do ultra-som (TOFD, IRIS e *Phased Array*), ACFM, ondas guiadas e análise de deformações ("shearografia").

Para obtenção de resultados satisfatórios e válidos, considera-se como elementos fundamentais: pessoal treinado, qualificado e certificado, equipamentos calibrados e procedimentos de execução de ensaios qualificados com base em normas e critérios de aceitação previamente definidos e estabelecidos [16].

2.3.2 END's para Compósitos

A grande maioria dos ensaios não destrutivos, que foram desenvolvidos para materiais metálicos, principalmente o aço; podem ser aplicados a materiais compósitos. No entanto, deve-se tomar cuidados especiais, já que esta classe de materiais apresenta pior resolução de defeitos que materiais homogêneos como o aço ou outros metais. Existe geração de ruído nas interfaces fibra/matriz.

Por serem materiais de baixa condutividade térmica e não ferromagnéticos, alguns END's baseados no eletromagnetismo não podem ser aplicados, casos do ACFM e de correntes parasitas. Os principais ensaios utilizados no caso de compósitos de matriz polimérica com reforço fibroso são o visual, vibratórios (baixa frequência e ultra-som) e o radiográfico, ditos convencionais; e também a emissão acústica, a termografia ativa e "shearografia" (não convencionais).

Os compósitos, materiais muito heterogêneos e anisotrópicos, geram certas complicações nos ensaios não destrutivos, que devem ser adaptados a estes para serem realizados. Métodos alternativos para materiais tradicionais podem se tornar comuns para compósitos.

Devido à natureza do material (ainda em estudo e desenvolvimento), grandes espessuras e complexidade de conexões, ainda há poucos procedimentos universalmente aceitos e normas para ensaios não destrutivos aplicados a compósitos. Por exemplo, a norma ISO 14692, que cobre o uso de tubulações de plástico reforçado com fibra de vidro na indústria do petróleo e gás natural, considera a inspeção visual, ultra-som e radiografia. A termografia é considerada mas não muito detalhada.

No presente trabalho será utilizada a termografia como ensaio não destrutivo na análise de juntas de tubulações de material compósito (resina epóxi com fibra de vidro); de acordo com sua metodologia, baseamento teórico-científico, vantagens e limitações.

2.3.3 Termografia

A termografia é um ensaio não destrutivo que se baseia na perturbação do fluxo de calor, gerado interna ou externamente, através de uma estrutura devido a diferenças de geometria ou materiais dentro desta [15]. Tais perturbações produzem desvios na distribuição de temperaturas na superfície do objeto que são captadas através de um equipamento receptor de ondas na faixa do infravermelho, que poderá transformá-las em imagens.

A inspeção termográfica utiliza a radiação infravermelha para medir temperaturas e observar padrões diferenciais de distribuição de temperaturas, com o objetivo de fornecer informações relativas à condição operacional ou de fabricação de um componente, equipamento ou processo.

O potencial da termografia de infravermelho para grandes áreas, inspeção de equipamentos em funcionamento, e como técnica de ensaio não destrutivo sem contato é bastante reconhecido há muitos anos, mas somente na última década é que se tornou popular como teste. Antes disso, a termografia era utilizada como um adjunto às outras técnicas de investigação não destrutiva convencionais, ou em aplicações de manutenção preditiva e preventiva [15] de sistemas elétricos e na construção civil. Seu primeiro uso em mais larga escala e com grande aceitação foi na área de compósitos para a indústria aeroespacial, geralmente substituindo ultra-som ou radiografia, tanto na fabricação como em serviço; na detecção de delaminações, porosidade, água aprisionada e descolamento de adesivos [15].

Na termografia, a temperatura da superfície da amostra é monitorada para permitir a identificação de regiões onde o fluxo de calor (medido pela intensidade de energia radiante infravermelha) é modificado por anomalias sub-superficiais [15].

A termografia de infravermelho pode ser dividida em dois tipos: termografia passiva e ativa. A termografia passiva testa materiais e estruturas que estão naturalmente a diferentes (geralmente maior) temperaturas que o ambiente, enquanto que no caso da ativa um estímulo externo é necessário para induzir contraste térmico relevante. Conhecendo-se características desse estímulo externo (por exemplo, tempo durante o qual é aplicado) pode ser feita uma caracterização quantitativa como a medida da profundidade de um descolamento detectado [17].

Como todo ensaio não destrutivo, a termografia tem suas vantagens e limitações, listadas abaixo:

Vantagens:

- teste rápido e sem contato (sem necessidade de acoplante);
- segurança (não há perigo de radiação);
- resultados relativamente fáceis de serem interpretados (no caso de fotografias).
Imagens podem ser processadas para extração de maiores informações, tornando a tarefa mais complexa;

Desvantagens:

- dificuldade de obtenção de estímulo térmico rápido, intenso e uniforme sobre uma superfície grande;
- efeito de perdas térmicas (convectivas e radiativas) induzindo contrastes falsos, afetando a confiabilidade da interpretação;
- custo do equipamento;
- capacidade de detecção apenas de descontinuidades que resultam em mudanças das propriedades térmicas (por exemplo, trincas e descolamentos são detectados somente se induzirem resistências térmicas na interface) [17].
- limitação de espessura.

Termografia Ativa Pulsada e outros Tipos de Termografia

Como já foi dito, há a termografia ativa ou transiente e a passiva. Dependendo da forma como é feito o estímulo (excitação térmica) e a obtenção de dados (no aquecimento ou resfriamento), diferentes tipos de termografia ativa têm sido desenvolvidos: termografia pulsada, termografia *step-heating*, termografia *lock-in* e vibrotermografia [17].

A termografia passiva baseia-se na medida de temperaturas através da captação de radiação infravermelha, e visualização de potenciais problemas em processo ou componentes em funcionamento na indústria, indicados por perfis de temperatura anormais; isto é, temperaturas diferentes da referência, ou pontos quentes. É um teste qualitativo, uma vez que apenas aponta anomalias.

A termografia ativa pulsada é baseada no estímulo térmico curto variando de alguns milisegundos para materiais de alta condutividade (metais), até alguns segundos

para materiais de baixa condutividade (plásticos). Consiste em aquecer rapidamente a amostra e capturar o decaimento de temperatura. A temperatura do material cai rapidamente depois do pulso térmico inicial porque a frente térmica propaga para o interior do material por difusão, e também pelas perdas por radiação e convecção. A presença de descontinuidades modifica a taxa de difusão, portanto, observando a temperatura da superfície, estas apresentam-se como áreas de diferentes temperaturas em relação aos arredores, assim que a frente de calor as alcance [18]. A temperatura na área de descontinuidade é maior que nos arredores, devido à menor taxa de difusão de calor nessa área ou volume, levando a um acúmulo de energia.

Desta forma, descontinuidades mais profundas são observadas mais tarde e com um contraste térmico reduzido, como indicado na Figura 2.13 (a). Existe uma relação aproximada para o tempo de observação (ou tempo de pico, em que o contraste na imagem é máximo) em função do quadrado da profundidade da descontinuidade sub-superficial (ou espessura da parede do corpo sob exame), mostrado na Equação 10 e na Figura 2.13 (b).

$$t = z^2 / \alpha \quad (10)$$

Onde: t – tempo de observação ou tempo de pico

z – profundidade da descontinuidade ou espessura do material

α – difusividade térmica do material

A Figura 2.13 mostra em (a) um gráfico do contraste na imagem termográfica, calculado em relação a uma temperatura de referência, em função do tempo de resfriamento da amostra. Em (b), um gráfico de tempo de pico de contraste em função da espessura do corpo sob exame (no caso uma tubulação), ou espessura da descontinuidade (distância desta em relação à superfície de aplicação do calor).

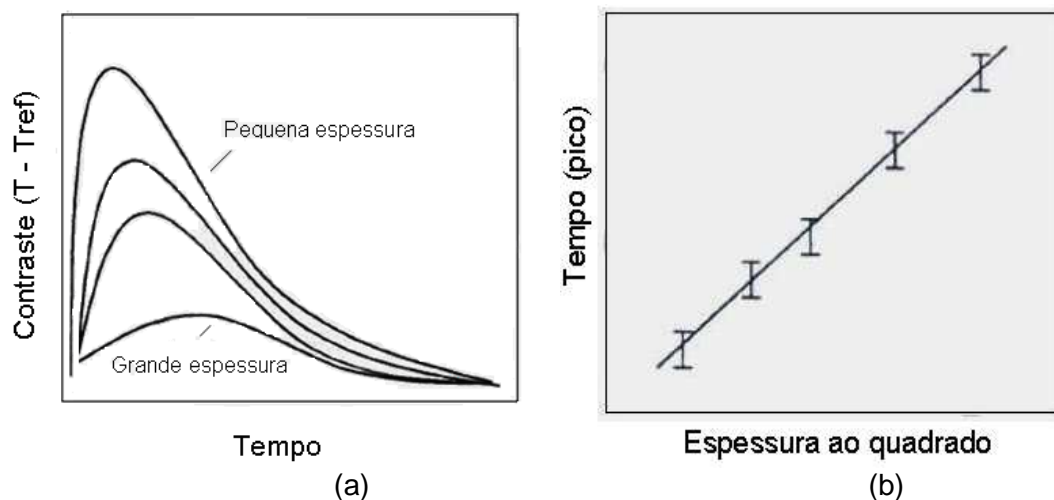


Figura 2.13 Em (a) as curvas de contraste obtidas pela subtração da referência das curvas temperatura-tempo para diferentes regiões da amostra com espessuras diferentes. Em (b) a relação linear entre o tempo em que ocorre o máximo contraste e a espessura [19].

Uma regra comumente usada em termografia pulsada para materiais isotrópicos e homogêneos diz que o raio da menor descontinuidade detectável deve ser pelo menos uma ou duas vezes maior que sua profundidade sob a superfície [17].

Para a termografia ativa pulsada, várias configurações de teste são possíveis: aquecimento pontual (feixe de raio *laser* ou de luz focalizado), linear (lâmpadas, fios aquecidos, jato de ar quente ou frio) e superficial (lâmpadas, ar quente ou frio, *flashes* de luz, microondas). A configuração de aquecimento superficial é muito usada, mesmo apresentando o problema comum de falta de uniformidade.

Se a temperatura da parte que precisa ser testada já é maior que a ambiente, pode ser válido o uso de uma fonte térmica fria, como um jato de ar frio. O que importa é que haja o diferencial de temperatura entre a fonte térmica e a amostra, que gera o transiente na transferência de calor, captada pelo receptor da câmera termográfica.

A observação do teste (localização da câmera termográfica ou receptor de sinal infravermelho) pode ser em reflexão (fonte térmica e detector localizados no mesmo lado do componente inspecionado) ou em transmissão (fonte térmica de um lado e detector do outro, em relação à posição do componente).

Na termografia do tipo *step heating* (pulso longo) o aumento da temperatura da superfície é monitorado durante a aplicação do pulso de calor. Esse tipo de ensaio encontra aplicação na avaliação de espessura de revestimentos, inspeção de ligação do

revestimento e substrato, e avaliação de estruturas de compósitos, incluindo multicamadas [18].

Já a termografia ativa modulada (termografia *lock-in*), ou radiometria fototérmica, é baseada nas ondas de calor geradas no interior da amostra analisada e detectadas remotamente. A geração de ondas é, por exemplo, realizada por deposição periódica de calor na superfície do objeto, enquanto que o campo de temperaturas oscilante resultante, no estado estacionário, é gravado remotamente pela emissão de radiação térmica infravermelha. O termo “*Lock-in*” está relacionado à necessidade de se monitorar a dependência exata de tempo entre o sinal de saída e o de entrada (referência); feito com um amplificador do tipo *lock-in* [18].

A vibrotermografia é uma técnica ativa onde, sob efeito de vibrações mecânicas induzidas externamente à estrutura, com a conversão direta de energia mecânica à térmica, calor é liberado por fricção precisamente em locais onde descontinuidades como trincas e delaminações estão localizadas [18].

2.3.4 Termografia em Tubulações de ERFV

A baixa difusividade térmica dos materiais compósitos de matriz polimérica foi um dos motivos que contribuiu para o desenvolvimento de técnicas de termografia ativa, usando câmeras de infravermelho convencionais, uma vez que para aplicação em metais é necessário o uso de câmeras extremamente rápidas (alta frequência).

Para aplicações em tubulações de compósito de matriz de resina epóxi com reforço de fibra de vidro, a termografia ativa pulsada é muito utilizada, devido à facilidade de aplicação (necessidade apenas de fonte de calor e câmera termográfica), possibilidade de inspeção de grande área em tempos não muito longos e sem preparação de superfície. É sensível a certos tipos de defeitos, com dimensões e profundidade limitados; subsuperficiais e com sua profundidade máxima de detecção proporcional à maior dimensão destes.

O método é aplicável aos seguintes tipos de descontinuidades: delaminações, descolamentos (adesivo/aderendo, casos na junta entre adesivo/junta e adesivo/tubo), vazios, inclusões, danos por impacto, porosidade, ingresso de água, contaminação por fluido, erosão e mudança localizada de espessura. Entre as descontinuidades em que a detecção é difícil, destacam-se: *kissing bonds* (ou *kissing disbonds*), trincas e inclusões de material similar.

As principais complicações e dificuldades em relação ao ensaio estão relacionadas às reflexões e superfícies curvadas, principalmente no caso de tubulações de menor diâmetro. Além disso, a resolução diminui com o aumento da espessura, praticamente desaparecendo em grandes espessuras. A interpretação das imagens é subjetiva, e o processamento destas, para melhoria da detecção e dimensionamento das descontinuidades, ainda é um campo em desenvolvimento e assunto deste trabalho.

2.3.5 A Câmera Termográfica

A termografia utiliza dois diferentes tipos de câmeras de infravermelho: radiômetros de varredura e arranjos de plano focal (FPA – *Focal Plane Arrays*), disponíveis em uma ou duas dimensões. As imagens de infravermelho são chamadas de termogramas [18].

Radiômetros de varredura são equipados com uma referência interna de temperatura que é considerada pelo detector durante a varredura para que o sinal de saída seja calibrado diretamente. No caso do arranjo de plano focal a imagem infravermelha da cena é diretamente projetada numa matriz de detecção sem varredura. As informações referentes a todos os *pixels* (menor elemento de imagem num dispositivo de exibição, menor ponto de uma imagem digital) são adquiridas simultaneamente. Atinge-se uma taxa de captação de imagens de alta velocidade e a calibração da temperatura é feita externamente [18].

Existem duas famílias de detectores de infravermelho, os detectores térmicos (não refrigerados) e os fotônicos (refrigerados). No caso dos térmicos (considerados no presente trabalho), a radiação incidente aquece a superfície afetando a propriedade do material aquecido que a transforma em variações de sinal de saída. Não requerem resfriamento e sua resposta é independente do comprimento de onda. Um exemplo desses arranjos são os microbolômetros, agora disponíveis como FPA. Os detectores fotônicos refrigerados são baseados na medição direta da excitação causada por fótons incidentes. O aquecimento da superfície não é necessário. A excitação fotônica é medida pela mudança na condutividade elétrica ou pela voltagem gerada.

Atualmente, os arranjos de plano focal (FPA), baseados em microbolômetros não refrigerados, são os mais utilizados; devido principalmente ao seu baixo custo relativo. O princípio consiste em ter-se a superfície do arranjo de plano focal com ranhuras de modo a formar um mosaico de massas térmicas [17]. Essas massas de alguns micrômetros de dimensão são aquecidas pela radiação infravermelha incidente para que uma de suas

propriedades (como condutividade elétrica) seja alterada. Uma medida dessas mudanças leva a medições no infravermelho [17].

As características principais dessas câmeras são:

- não necessidade de refrigeração criogênica (estabilização termoelétrica realizada internamente);
- uma matriz de detectores térmicos de infravermelho (horizontal e vertical);
- resposta espectral larga, ajustável à demanda (com filtro de interferência colocado à frente do arranjo);
- baixo custo em comparação à câmera de detectores fotônicos refrigerados;
- portabilidade da câmera (equipamento pequeno e de baixo peso) e facilidade de gravar resultados;
- relativamente baixo tempo de resposta devido à necessidade de aquecimento das massas térmicas (na ordem de alguns milisegundos).

Na seleção de um tipo de sistema de detecção, um importante aspecto é a seleção da banda de comprimento de onda que será usado em operação (geralmente na faixa de 0,8 a 20 μm); de acordo com algumas características do teste: distância câmera-objeto, ensaio realizado em ambiente fechado ou externo, temperatura e emissividade dos corpos de interesse. Na prática, as faixas são somente duas em termos de equipamentos: 3 -5 μm e 7-14 μm . Os microbolômetros trabalham em 95% dos casos na segunda faixa.

2.3.6 Tratamento de Dados e Imagens Termográficas

Defeitos nos componentes examinados induzirão um contraste nos termogramas. Esse contraste pode ser tratado e relacionado à profundidade de localização da descontinuidade ao longo da espessura e dessa forma estabelecer a gravidade do dano em relação à integridade do componente. [7]

A temperatura medida em cada ponto da imagem termográfica é função das propriedades térmicas do material e da variação destas em relação ao tempo. Este princípio tem sido usado para desenvolver algoritmos para avaliar a profundidade das descontinuidades detectadas. Tais algoritmos podem se basear e serem calibrados através da análise de uma curva temperatura *versus* tempo, resultante do aquecimento e

resfriamento de corpos de mesma características térmicas e diferentes espessuras, expresso em curvas diferentes para diferentes espessuras, como na Figura 2.13 (a). Tomando-se como referência a curva da região mais espessa e subtraindo-se esta das curvas referentes a espessuras menores, obtém-se uma diferença, que, em termos de imagem, pode ser chamada de contraste.

Geralmente trabalha-se com um ponto característico da curva (no caso desse trabalho, a curva de resfriamento do corpo de prova), uma temperatura de referência, a qual é subtraída das temperaturas de outras regiões para chegar ao contraste.

O teste e a análise dos resultados baseiam-se na Equação 10 e na Figura 2.13, onde, para pequenas espessuras (ou descontinuidades mais próximas à superfície da amostra sob exame) o contraste é maior e ocorre mais rapidamente (tempo de pico é menor).

Os algoritmos utilizados baseiam-se nas características temporais dos sinais correspondentes à resposta térmica recebida das superfícies excitadas. Estes parametrizam a profundidade do defeito tendo como referência um ponto específico (característico e momentâneo) na curva de contraste térmico ou a divergência entre duas curvas de contraste, uma referente a uma área sem descontinuidade, e outra referente à área com presença da descontinuidade, no mesmo corpo, no mesmo teste e condições. São necessários alguns cuidados para se minimizar os ruídos das curvas de contraste, para uma maior precisão de resultados.

O cálculo do contraste térmico resume-se em extrair duas curvas de evolução da temperatura em relação ao tempo para o ponto ou área sob inspeção e para um ponto ou área de referência [7]. A literatura [15, 17, 18, 19] diz que, uma vez obtidas as curvas, escolhe-se qual o momento nesta que melhor caracteriza a descontinuidade, isto é, que ocorre a maior diferenciação entre a curva de referência e a curva do ponto sob exame. Esta diferenciação pode ser expressa na forma de uma curva de contraste em relação ao tempo.

No presente trabalho serão consideradas as curvas de decaimento de temperatura (resfriamento) das amostras de descontinuidades nos corpos de prova em relação a uma área sem descontinuidades. Isto é, não se considerará temperatura máxima no aquecimento para comparação, e sim os tempos de pico de intensidade de contraste e posicionamento e forma das curvas de resfriamento; além da área sob estas, de forma a encontrar uma relação válida para cálculo da profundidade das descontinuidades.

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 Metodologia

O intuito do presente trabalho é colaborar para um procedimento de ensaio de termografia ativa em juntas coladas de material compósito, para detecção e avaliação de defeitos. Para isto visualiza-se em imagens a emissão de ondas infravermelhas no resfriamento, após excitação térmica, em corpos de prova pré-fabricados pela empresa fornecedora, com defeitos de perda de massa (diferentes espessuras de parede) ou falta de adesivo e/ou adesão na junta entre dois tubos. O método usado foi o de termografia ativa pulsada transiente de reflexão, onde excitou-se o material com uma fonte de calor (no caso, um soprador térmico, de maneira manual e buscando uma maior uniformização na distribuição de calor na peça em exame) durante diferentes intervalos de tempo (ciclos de aquecimento/aporte térmico) e observou-se o resfriamento deste, obtendo-se imagens (fotografias) com um termógrafo (câmera termográfica) como sistema de detecção. Variou-se também o campo ou escala (faixa observável de temperatura mostrada na imagem produzida pela câmera), que consiste nas temperaturas mais alta e mais baixa identificáveis; com o intuito de se estudar o resfriamento em diferentes regiões do corpo de prova, reduzindo o número de variáveis em questão. Outros parâmetros estudados foram distância da câmera e excitador térmico em relação ao corpo de prova, modo de aplicação do calor e defeitos de diferentes dimensões em diferentes posições no corpo cilíndrico do tubo em exame.

As imagens ou termogramas foram digitalizadas através de um programa de interface entre a câmera e um microcomputador convencional (ThermaCAM® *QuickView*). Essas imagens foram processadas em programas de tratamento de imagens (*Image Pro Plus*® 6.0, 2006) e de operações com estas, de modo a melhorar ou permitir a visualização dos defeitos, além de contribuir para os cálculos de dimensionamento. Todo este tratamento de imagens e avaliação de defeitos existentes teve a intenção de se qualificar o procedimento experimental usado para o ensaio, chegando a parâmetros práticos úteis para a técnica aplicada em campo; além uma investigação sobre métodos para dimensionar defeitos volumétricos de perda de espessura e calcular a área de defeitos planares em juntas.

Também se considerou o fato de utilizar equipamentos de fácil acesso no mercado, e de fácil uso. A utilização do método reflexivo ao invés de transmissivo também contribui para o fato de se desenvolver um procedimento prático aplicável na área industrial em transporte de fluidos.

3.2 Materiais e Equipamentos Utilizados

3.2.1 Corpos de Prova

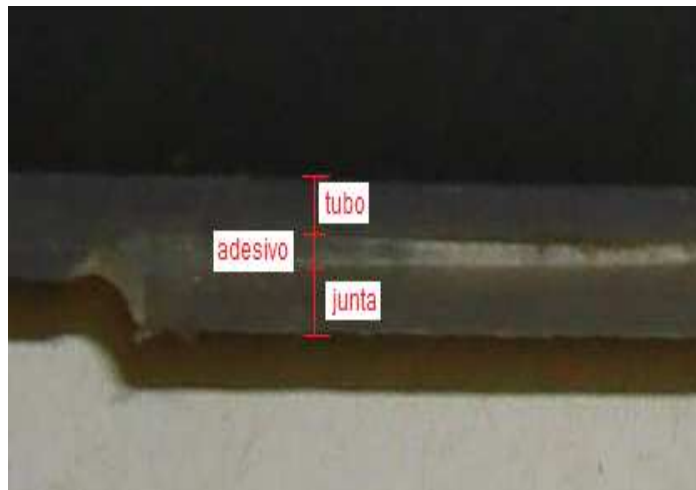
Propriedades e Confeção dos Corpos de Prova

Os corpos de prova utilizados constituem-se de “meios tubos/canas” ou calhas, isto é, metade de um tubo real (corte na direção longitudinal) de material compósito, mais especificamente resina epóxi com reforço de fibra de vidro. Estes foram fabricados por empresa fornecedora de tubos em materiais compósitos para aplicações marítimas (*off-shore*). Foram inseridos defeitos artificiais em tais amostras para que ensaios não destrutivos pudessem ser realizados e desenvolvidos em pesquisas previamente desenvolvidas pela Petrobras/Cenpes/TMEC, neste tipo de material e formato. Os trechos de tubos são fabricados pelo processo de bobinamento filamentar helicoidal (“*filament winding*”), inclusive a junta, e depois cortados ao meio com serra manual.

São utilizados neste trabalho quatro corpos de prova, sendo dois deles trechos retos de tubulação (CP01 e CP02) com defeitos de perda de espessura localizados (furos circulares de fundo chato de determinados diâmetros e profundidades), produzidos por usinagem. E dois outros formados por terminações de dois tubos unidas por junta colada, similar à ponta e bolsa, também chamado de junta tipo luva (CP03 e CP04); com defeitos de falta de adesão ou falta de adesivo. Esta escolha baseia-se na maior facilidade de detecção e dimensionamento das descontinuidades de perda de espessura localizada para validação da técnica e parâmetros de ensaio (CP01 e CP02); além da aplicação desta em casos mais próximos dos reais, representados pelos corpos de prova com falta de adesivo (CP03 e CP04); de detecção um pouco mais complexa. Essa falta de adesão representada em alguns corpos de prova foi feita com colocação de fita adesiva na interface tubo/junta, de modo a simular um defeito de falta de adesivo, a cura prematura deste, ou a falta de adesão interfacial adesivo/aderendo (tubo ou junta tipo luva), conforme indicado na Figura 3.1. A fita, por ter condutividade térmica diferente (mais baixa que a resina epóxi carregada com a fibra de vidro), faz o papel da descontinuidade para o ensaio de termografia.



(a)



(b)

Figura 3.1 Exemplo de uma junta tipo luva (a) e visão interna da secção da junta com as interfaces junta/adesivo/tubo, (b), CP03. [11]

A resina usada corresponde ao produto 2000M da Ameron, sendo uma resina epóxi tradicional de epícloridrina com bisfenol A, curada com diaminas – IPD (isofurano diamina) ou MDA (diaminodifenil metano) – à quente.

O adesivo usado é fabricado pela mesma empresa e deve ter alto nível de interação com o tubo de material epóxi. Desta forma, este é formulado basicamente por resina epóxi-siloxano (pré-polímero) mais carga de silicatos. Antes de ser aplicado nas superfícies a serem coladas, deve ser misturado com um “endurecedor”, que é composto pelo agente de cura da resina (também uma amina) e um catalisador de reação.

A fibra de vidro é do tipo *E-Glass* e suas propriedades físicas de maior interesse estão citadas na Revisão Bibliográfica (item 2.1.2, Tabela 2.2). Os corpos de prova possuem cerca de 60 a 80% de fibra de vidro em massa na sua constituição. As propriedades de um tubo desta resina são apresentadas na Tabela 3.1. A temperatura máxima de operação, especificada pelo fabricante, é de 121°C; e a pressão máxima

("pressure rating"), 1,6 MPa (16 bar). Na Tabela 3.2 são mostradas propriedades mecânicas típicas de uma tubulação de compósito de uma resina epóxi com fibra de vidro, à temperatura ambiente (21°C) e à quente, em temperatura próxima à máxima de operação (93°C).

Tabela 3.1 Propriedades físicas da tubulação de resina epóxi reforçada com FV utilizada [20].

Propriedades Físicas	Unidade	Valor
Condutividade térmica na parede	W/m.K	0,33
Coeficiente de expansão térmica linear	10^{-6} mm/mm °C	18
Peso Específico	Kg/m ³	1800

Tabela 3.2 Propriedades mecânicas de tubulação de resina epóxi reforçada com FV utilizada, curada com IPD, às temperaturas de 21°C e 93°C [20].

Propriedades Mecânicas	Unidade	Valor	
Tubo curado com IPD		21°C	93°C
<u>Biaxial</u>			
Tensão circunferencial final na ruptura	N/mm ²	300	-
<u>Circunferencial</u>			
resistência à tração	N/mm ²	380	-
módulo em tração	N/mm ²	23250	18100
razão de Poisson	-	0,93	1,04
<u>Longitudinal</u>			
resistência à tração	N/mm ²	65	50
módulo em tração	N/mm ²	10000	7800
razão de Poisson	-	0,40	0,45
resistência à flexão axial			
<u>Flexão</u>			
módulo de elasticidade aparente	N/mm ²	9200	7000
<u>Dimensionamento Hidrostático</u>			
estático	N/mm ²	148 (a 65°C)	-

Os corpos de prova CP01, CP03 e CP04 são do mesmo fabricante e apresentam propriedades praticamente iguais. Já o CP02 foi fabricado por outra empresa, no entanto, mantém propriedades bem próximas dos outros três, com exceção da condutividade térmica que é a metade do valor considerado na Tabela 3.1. Trata-se de uma resina com pigmentação de cor azul, opaca.

Dimensões e Defeitos

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de termografia ativa e seus defeitos artificiais são apresentados nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4. As dimensões principais: altura (L), espessura de parede (e) e diâmetro externo relativo ao tubo original (d), mostradas nestas figuras, estão quantificadas na Tabela 3.3. Em seguida estão apresentadas as dimensões dos defeitos (furos na superfície interna, com fundo plano e profundidade homogênea) usinados conforme as dimensões citadas nas Tabelas 3.4 e 3.5.. Os corpos de prova CP03 e CP04, que apresentam defeitos de falta de adesão/adetivo, são mostrados com o contorno do defeito destacado em caneta colorida na Figura 3.4.

Tabela 3.3 Dimensões principais dos corpos de prova.

<u>Corpo de Prova</u>	<u>Diâmetro (d) [mm]</u>	<u>Altura (L) [mm]</u>	<u>Espessura (e) [mm]</u>
CP 01	154,0	120,0	5,0
CP 02	65,0	120,0	8,0
CP 03	86,0	100,0	8,0
CP 04	86,0	100,0	8,0

O CP01 é fabricado de resina translúcida e possui dez áreas de perda de massa uniforme com profundidades diferentes. Serão consideradas para ensaio apenas as descontinuidades D, E, F, G, H e I, devido principalmente à maior uniformidade de medidas e melhor acabamento destas, além do fato das descontinuidades A, B e C terem pequeno diâmetro em relação à espessura da amostra, o que dificulta a detecção. O diâmetro externo do tubo original é de 154 mm e o comprimento do corpo de prova, 120 mm.

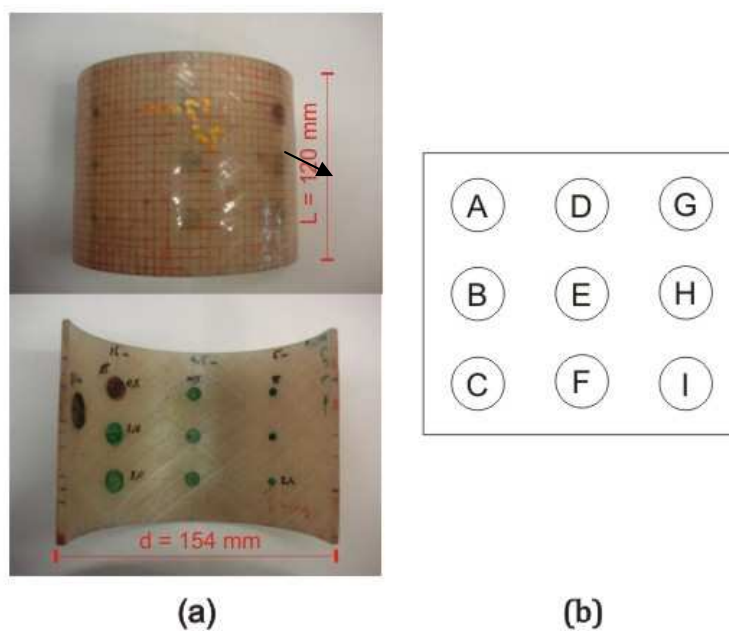


Figura 3.2 Corpo de prova CP01 em (a) e suas descontinuidades em (b).

Tabela 3.4 Dimensões dos defeitos do CP01.

Corpo de Prova CP01	Defeitos								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Dimensão	*1	*1	*1						
Diâmetro [mm]				10,0	10,0	10,0	15,0	15,0	15,0
Espessura (profundidade) do furo [mm]				2,2	1,2	0,4	2,0	1,0	0,2
Espessura remanescente da parede [mm]				2,8	3,8	4,6	3,0	4,0	4,8

O CP02 é fabricado de resina opaca azul e possui também dez áreas de perda de massa uniforme, localizadas e de profundidades diferentes. Consideradas para ensaio apenas as descontinuidades D, E, F, G e H, pelas mesmas razões consideradas para o CP01. O tubo original possui diâmetro externo de 65 mm e comprimento de 120 mm.

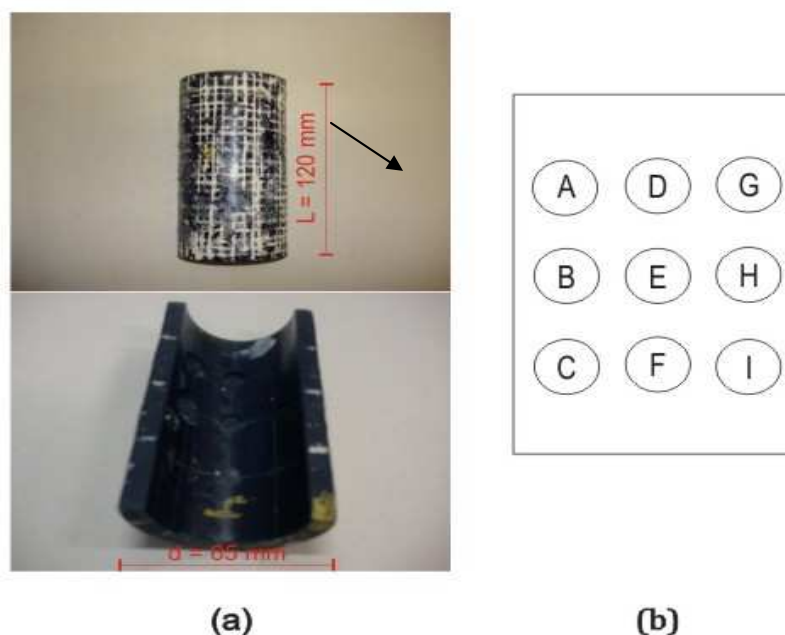


Figura 3.3 Corpo de prova CP02 (a) e suas descontinuidades (b).

Tabela 3.5 Dimensões dos defeitos do CP02.

Corpo de Prova CP02	Defeitos								
Dimensão	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Diâmetro [mm]	*1	*1	*1	10,0	10,0	10,0	15,0	15,0	*2
Espessura (profundidade) do furo [mm]	*1	*1	*1	3,7	2,0	0,4	3,0	1,3	*2
Espessura remanescente da parede [mm]	*1	*1	*1	4,3	6,0	7,6	5,0	6,7	*2

*1 Essas dimensões referentes aos defeitos A, B e C do CP01 e do CP02 não foram quantificadas, pois não foram utilizadas no presente trabalho.

*2 Essas dimensões foram desconsideradas devido à falha em se realizar o furo com profundidade de aproximadamente 0,5 mm nesta posição da peça, durante a confecção do corpo de prova.

Os CP03 e CP04 são fabricados de resina opaca cinza e possuem uma e duas áreas, respectivamente, de falta de adesivo. Estes simulam juntas tipo luva em tubulações, sendo a espessura total da área a ser analisada cerca de 8 mm (somatório das espessuras do tubo, junta tipo luva e camada de adesivo).

Em relação aos CP03 e CP04, de dimensões aproximadamente iguais, o diâmetro e a espessura indicados na Tabela 3.3 são valores médios obtidos fora da junta já que estas dimensões variam muito neste corpo de prova; devido ao processo de fabricação, e própria natureza do material. A altura ou comprimento (L) indicado corresponde ao comprimento da junta analisada, e não do corpo de prova total. Estas juntas têm diâmetro

médio de 92,0 mm e espessura de aproximadamente 8,0 mm, enquanto que o tubo em si tem diâmetro (d) de 86,0 mm e espessura (e) de 4,4 mm.

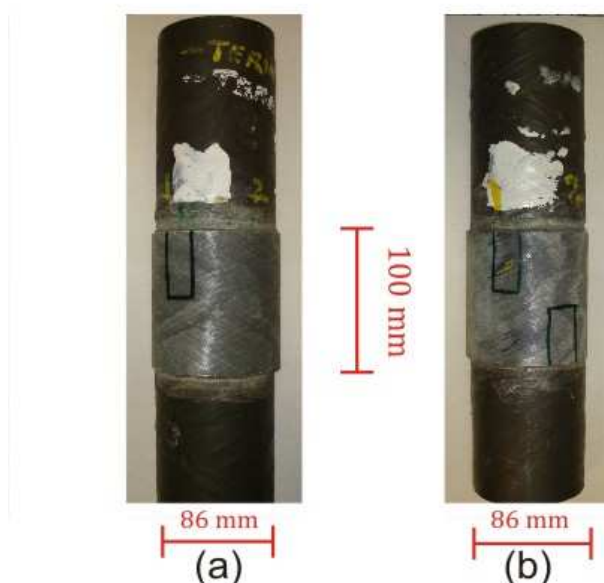


Figura 3.4 Corpos de prova CP03 (a) e CP04 (b) e indicações de suas descontinuidades.

É importante destacar que serão analisados apenas alguns defeitos específicos nos corpos de prova CP01 e CP02, constituindo regiões de interesse nas quais se basearão o tratamento e análise de imagens. No caso, corpos de prova CP01 (defeitos D, E, F, G, H e I) e CP02 (defeitos D, E, F, G, H) formam as regiões em que se concentrou a análise final; pois possuem dimensões e posicionamento compatíveis para visualização e experimentação. Nas Tabelas 3.4 e 3.5, as dimensões referentes aos defeitos A, B e C foram desconsideradas, pois seu diâmetro é muito pequeno em relação à espessura do corpo de prova [17] e também não foram analisados nos ensaios, pois sua detecção tornou-se muito difícil. Além disso, os defeitos F e I (para CP01 e CP02) tiveram sua detecção comprometida também devido ao fato de estarem próximos ao apoio do corpo, na parte inferior, como será comentado mais adiante.

Falta de Adesivo e Falta de Adesão

A falta de adesivo ou de adesão foi simulada no experimento com a confecção dos corpos de prova CP03 e CP04. Estas amostras representam juntas coladas. A falta do adesivo (por problema na aplicação na montagem e instalação), falha deste em aderir

à superfície do tubo ou junta (falta de adesão, por cura prematura), falta de compatibilidade química (má formulação do sistema pré-polímero/agente de cura/catalisador na montagem da junta) ou pela infiltração de fluido em serviço, constituem o tipo de defeito que se quer detectar no ensaio, visando aplicação em serviço.

A localização desses defeitos pode ser observada na Figura 3.4, (a) e (b), para os corpos de prova CP03 e CP04; respectivamente. A Figura 3.5 mostra um exemplo de junta colada vista pela parte interna, e as interfaces junta/adesivo/tubo, no caso do CP03.



Figura 3.5 Aspecto interno dos tubos e interfaces na junta colada do CP03.

Tais defeitos foram simulados com a colocação de fita adesiva durante a preparação da junta antes da aplicação do adesivo. Assim, a região em que se encontra a fita corresponde não a um vazio, mas sim a uma região de condutividade térmica diferente, com muito pouco ou sem adesivo, em comparação com as regiões adjacentes na própria junta. As dimensões das áreas cobertas com fita não foram previamente dimensionadas, mas sua medição será parte integrante dos resultados. No caso dos corpos de prova CP01 e CP02, os defeitos de perda de espessura são bem definidos e de mais fácil identificação tendo sido considerados para um cálculo de profundidade (dimensionamento). A intenção é conseguir dimensionar profundidade de defeitos (sub-superficiais, pois a metodologia de trabalho adotada não é efetiva para grandes espessuras) em corpos de prova mais simples, usando tratamento de imagens, para que se passe, mais adiante, em trabalhos posteriores, a dimensioná-los também em corpos de prova mais complexos e casos reais.

Os tipos de defeitos nos corpos de prova utilizados podem ser esquematizados, de maneira geral, na Figura 3.6. A Figura 3.6 (a) é representativa do CP01 e CP02, e a Figura 3.6 (b) representativa dos corpos de prova CP03 e CP04.

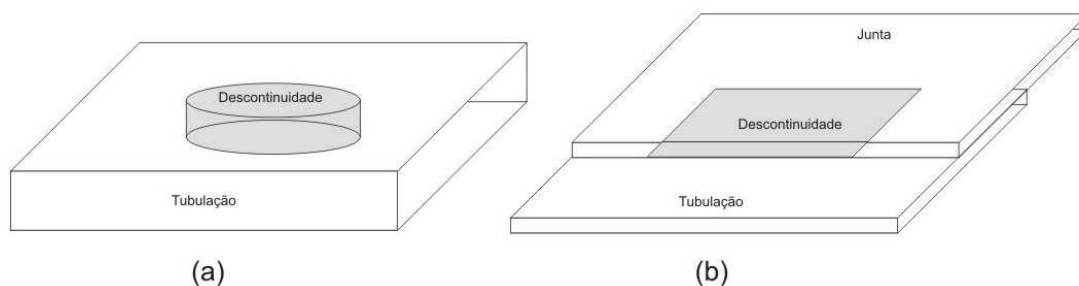


Figura 3.6 Tipos de descontinuidades encontradas nos corpos de prova, representando perda de espessura / massa (a) e falta de adesivo / adesão (b).

3.2.2 Câmera Termográfica

O equipamento ou termógrafo utilizado para captar a radiação eletromagnética na faixa do infravermelho durante o resfriamento dos corpos de prova, e fazer a aquisição de imagens no ensaio termográfico, foi uma câmera termográfica ou termocâmera tradicional. Estas câmeras mostram imagens térmicas em tempo real e também podem gravá-las na forma de fotografias térmicas em sequência, com intervalo de tempo pré-definido entre fotos, bem como na forma de filmes.

O modelo de câmera termográfica utilizado para os ensaios deste trabalho está mostrado na Figura 3.7, em uma fotografia. Suas características mais importantes estão detalhadas na Tabela 3.6.



Figura 3.7 Fotografia representando a câmera termográfica utilizada no trabalho.

Tabela 3.6 Características importantes da câmera utilizada.

Característica	ThermaCAM® P65
Campo de visão (lente)	24°H x 18°V / 30 cm (35 cm)
Resolução espacial (IFOV)	1,3 mrad
Sensibilidade térmica (NEDT)	0,08 a 30°C
Frequência da imagem	50/60 Hz
Tipo de detector	FPA - Arranjo focal plano, microbolômetro não refrigerado 320 x 240 pixels visual 640 x 480 <i>pixels</i>
Faixa espectral	7,5 a 13 µm
Faixa de temperatura	-40 a 500°C
Precisão (repetibilidade)	2% ou 2°C (o que for maior)
Temperatura de trabalho	-15 a 50°C
Temperatura de armazenamento	-40 a 70°C
Umidade	10 a 95%
Fabricante	FLIR Systems
Visor	colorido
Lente	Distância focal de 36 mm
Níveis de cor para formação de imagem	RGB
Foco	Automático ou manual

A Tabela 3.7 mostra os valores das variáveis essenciais adotadas nos experimentos.

Tabela 3.7 Valores das variáveis essenciais da câmera termográfica durante os testes realizados.

Variáveis da Câmera durante os Ensaios	
Foco	ajuste automático / manual
Emissividade	0,90
Polaridade	Pontos quentes em coloração clara
Controle de Ganho	automático
Controle de Nivel (Escala)	fixo
Temperatura de Fundo	20°C
Temperatura Refletida	22°C
Temperatura Atmosférica	22°C
Umidade Relativa	50%

3.2.3 Computador e Programas de Aquisição e Tratamento de Imagens

A interface entre a câmera termográfica e o computador, para que seja feita a digitalização e análise das imagens, foi realizada através de cabo *FireWire* ou cartão *Compact Flash* e um programa instalado no computador, parte integrante do pacote da câmera, chamado *ThermaCAM® QuickView*. A câmera gera imagens em formato JPEG radiométrico, que é transformado pelo *Quickview®* em arquivo de formato JPEG comum,

que pode ser processado em outros programas para tratamento de imagem (neste caso, o *Image Pro Plus 6.0* para *Windows*, fabricante: *Media Cybernetics*). Além desses, o programa Excel, do pacote Microsoft Office 2003 também foi utilizado para construção de gráficos e tabelas, utilizando dados do *Image Pro Plus*.

O programa ThermaCAM®QuickView também tem a função de alterar o campo ou escala de temperatura das imagens, isto é, uma imagem ou sequência de imagens de certo corpo de prova, feita numa escala de 20°C a 300°C, com tempo de aporte de dez (10) segundos, pode ser transformada numa sequência de escala ou campo 30-400°C, com o mesmo tempo de aporte. Este fato pode levar a certa otimização de tempo no processo experimental. Esta ferramenta é útil para ajustes de escala pós aquisição de imagens, já que em tempo real este mesmo ajuste pode ser feito diretamente pelo inspetor de termografia através do controle manual do equipamento.

O programa *Image Pro* foi selecionado como principal ferramenta para processamento e análise de imagens devido à variedade de recursos disponíveis e, principalmente, pelas possibilidades de conversão para escala de cinza e de medida de intensidade destes tons no plano da imagem. Desta forma, pode-se comparar a região do defeito com as regiões adjacentes a este em relação à intensidade e posição, para tempos diferentes no resfriamento. A função de perfil de linha ou "*line profile*" foi a mais utilizada para dimensionamento de defeitos nos corpos de prova e será detalhada mais adiante no item 3.4.

3.2.4 Excitação Térmica

Como método de excitação térmica nos ensaios foi escolhido a aplicação de ar quente com um soprador térmico industrial de potência nominal de 1400 Watts, modelo HL-1500 (Steinel), tensão de 127 Volts. Este apresenta volume de ar na saída de 400 l/min e duas opções de temperatura de saída: 300°C ou 500°C. Foi utilizada nos ensaios a temperatura de 500°C. O soprador possibilita um jato de ar de aproximadamente 2 cm de diâmetro e pode ser observado na Figura 3.8.



Figura 3.8 Soprador térmico utilizado nos ensaios de termografia ativa pulsada.

3.3 Procedimento Experimental

3.3.1 O Ensaio e os Parâmetros Variados

O ensaio de termografia ativa em reflexão que foi realizado neste trabalho consistiu, basicamente, em fornecer calor ao corpo de prova através do soprador térmico e gravar imagens radiométricas da emissão deste em resfriamento, com a câmera termográfica. Desta forma, vários parâmetros do experimento puderam ser variados, sendo eles:

- Forma de excitação térmica (modo de aplicação do aporte térmico);
- Tempo de excitação térmica (tempo de ciclo do aporte térmico);
- Distância do termógrafo ao corpo sob exame;
- Distância do soprador/excitador em relação ao corpo sob exame;
- Tipo e dimensão da descontinuidade no corpo de prova;
- Escala ou campo de temperaturas.

É importante ressaltar que as variáveis e ensaios executados, assim como os parâmetros utilizados (por exemplo, as distâncias utilizadas da câmera em relação ao objeto em estudo e os tempos de excitação) levaram em conta o intuito principal do trabalho que é o de desenvolver uma metodologia ou procedimento para esse tipo de teste não destrutivo em campo. Desta forma, utilizou-se valores razoáveis para aplicação prática e que podem ser repetidos em tubulações reais, fora do laboratório; otimizando tempos de execução e simplificando aplicação e interpretação de resultados.

As variáveis foram definidas de acordo com o que é considerado na literatura e o que foi discutido durante o trabalho. Seus valores foram depreendidos de trabalhos anteriores [21, 22] ou escolhidos de maneira aleatória e testados até se chegar a valores coerentes e aplicáveis. É de grande importância destacar que este estudo consiste em uma continuidade do trabalho realizado pelos pesquisadores do laboratório TMEC do CENPES. Foram colhidas experiências de estudos anteriores [21, 22], inclusive considerando alguns dos corpos de prova de um projeto maior.

A Figura 3.9 ilustra um ensaio de termografia ativa pulsada transiente pelo método de reflexão, correspondente ao que foi realizado para o trabalho. A câmera termográfica está a uma distância " D_C " do corpo de prova, a um ângulo " θ_C " da normal em relação à superfície deste. Assim, o soprador térmico está a uma distância " D_S " do corpo de prova, a um ângulo " θ_S " em relação à normal.

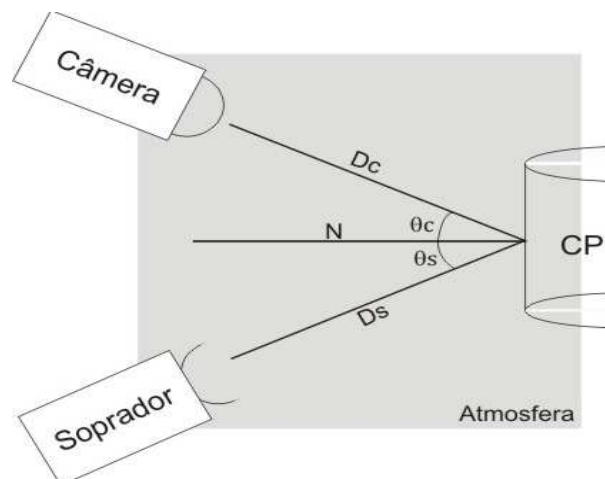


Figura 3.9 Esquema do ensaio de termografia ativa pulsada transiente de reflexão, mostrando posicionamento genérico para a câmera termográfica, soprador térmico e o corpo de prova.

Descrição:

D_C : Distância da câmera ao corpo de prova

D_S : Distância do soprador térmico ao corpo de prova

θ_C : Ângulo entre eixo de captação da câmera e reta normal em relação à superfície do corpo de prova

θ_S : Ângulo entre eixo de aplicação do jato do soprador e reta normal em relação à superfície do corpo de prova

A montagem do cenário de testes efetuou-se da seguinte maneira:

1º - Sobre a bancada posicionou-se os corpos de prova sobre um suporte, tomando o cuidado de colocá-lo nivelado à altura em que foi colocada a câmera.

2º - Com o uso de um tripé, montou-se a câmera e ajustou-se a sua altura em relação ao apoio e posição de colocação do corpo de prova.

3º - Posicionou-se um anteparo atrás do local onde se colocou o corpo de prova para diminuir reflexões. Em seguida, colocou-se o corpo de prova em análise com a superfície externa convexa da calha (ou tubo) para fora, de frente para a câmera, tomando o cuidado de escolher quais descontinuidades seriam analisadas (centrais ou laterais no CP01 e CP02).

4º - Ajuste fino de altura da imagem da câmera em relação ao corpo de prova e apoio, e centralização deste observando a imagem na câmera e uma referência no objeto em análise. Tomou-se o cuidado de garantir que a área onde se encontram as descontinuidades estivesse no campo de visão da câmera.

5º - Ajuste do foco da imagem pelo método automático e ajuste fino manualmente.

6º - Ajuste dos parâmetros a serem utilizados na câmera termográfica durante a captura de imagens. (ver Tabela 3.7, item 3.2.2)

A Figura 3.10 mostra o cenário de testes montado para a realização dos ensaios.



Figura 3.10 Cenário para a realização dos testes de termografia ativa.

O ensaio em si é detalhado na seguinte sequência, logo após a montagem do cenário de testes:

a) Aplicação do jato de ar quente sobre a superfície da peça, respeitando a área de aquecimento pré-determinada e o tempo de aporte específico. (Quando do início da

aplicação de calor, inicia-se simultaneamente um cronômetro para delimitar esse tempo de excitação térmica).

- b) Ao final do tempo de aporte, retira-se o soprador da direção da peça simultaneamente com o início de captura de imagens pela câmera termográfica.
- c) Quando a imagem termográfica não mais apresenta contraste definido a olho nu, a sequência de fotos é interrompida e gravada.

3.3.2 Método de Excitação Térmica

Para a avaliação da técnica de termografia ativa em compósitos e definição de um procedimento padrão para ensaios em campo, é de grande importância que se defina o modo de aplicação do calor (aporte térmico), pois este não deve ser concentrado em determinadas partes da peça, o que iria levar a má interpretação de resultados devido à própria reflexão e aquecimento diferente causados, o que, de certa forma, “polui” a imagem. Além disso, uma distribuição não homogênea de calor causaria um resfriamento diferente em posições diferentes, podendo gerar falsas indicações de discontinuidades.

Desta forma, experimentou-se duas formas básicas de aquecimento dos corpos de prova:

- Soprador térmico parado a diferentes distâncias ($D_S = 20, 150$ e 300 mm), centralmente ao corpo de prova ($\theta_S = 0^\circ$); vide Figura 3.11.

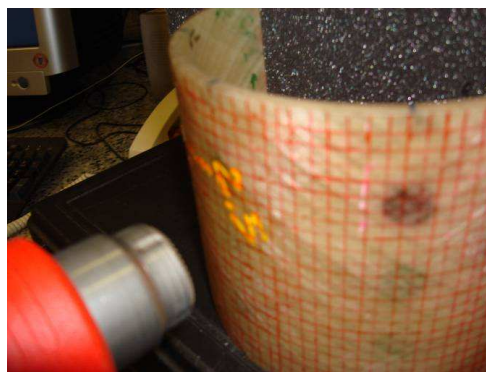


Figura 3.11 Soprador térmico parado à distância de 20 mm do CP01.

- Soprador térmico em movimento de “zigue-zague” em área padronizada de aquecimento, com $D_S = 20$ mm e $\theta_S = 0^\circ$; vide Figuras 3.12 e 3.13.



Figura 3.12 Soprador térmico em movimento de zigue-zague à distância de 20 mm do CP01.

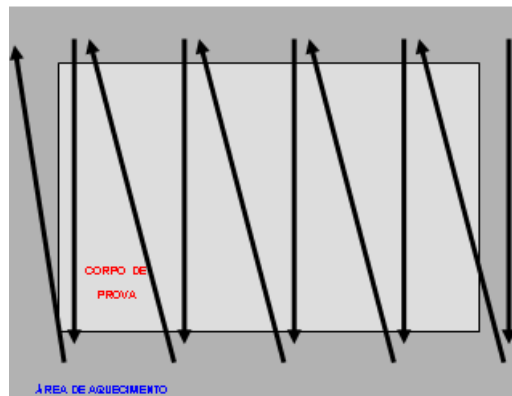


Figura 3.13 Esquema de aplicação de jato de ar quente em movimento de “zigue-zague”, mostrando a área padronizada de aquecimento, e a frente do corpo de prova.

Testou-se também o aquecimento com o soprador parado e em ângulo ($\theta_s \neq 0^\circ$), mas os resultados não foram satisfatórios.

O modo de aplicação de calor em zigue-zague, com o soprador próximo à peça e respeitando uma área de aquecimento pré-estabelecida (retângulo de 140 mm x 130 mm) foi a técnica utilizada no presente trabalho, visto que, sem o movimento do soprador, gera-se falsas indicações e prejudica-se a visualização de descontinuidades.

Para estes casos avaliou-se a qualidade das imagens produzidas e detecção de defeitos identificados a olho nu nos termogramas. Os efeitos dessa técnica nos resultados obtidos, utilizando uma área de aquecimento fixada, tanto para detecção como para análise e dimensionamento de descontinuidades, será discutido no capítulo de Resultados de Discussões.

3.3.3 Distância da Câmera (D_C) e do Soprador (D_S)

A posição do soprador térmico em relação ao corpo de prova, como foi dito no item anterior, foi testado para $\theta_S = 0^\circ$ (isto é, aplicação do jato normal à superfície) e distância em relação ao corpo de prova (D_S) de 20, 150 e 300 mm, para o caso do soprador parado e a 20 mm, homoganeamente, utilizando a aplicação em zigue-zague dentro de uma área de aquecimento fixada. Para isto, analisou-se contraste nos termogramas, de modo a se definir os defeitos de forma satisfatória, o que é obtido quando se tem um aquecimento uniforme do corpo em exame, ocasionando o resfriamento diferencial nas áreas de defeito. Apenas será considerada a condição de aquecimento homogêneo, visto que o teste com aquecedor parado mostrou-se muito ineficiente para as outras condições fixadas neste trabalho.

O termógrafo ou câmera foi colocado a distâncias de 300, 450 e 600 mm em relação aos corpos de prova e com ângulo em relação à normal da superfície do objeto (θ_C) de 0° . Essa distância leva a diferentes tamanhos observados do corpo de prova e de seus defeitos, o que influencia na detecção destes na observação das imagens.

Para as distâncias de câmera utilizadas nos experimentos tem-se diferentes campos de visão, representando a quantidade de *pixels* em cada milímetro para cada uma dessas distâncias. Essas informações estão representadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 Tabela de campo de visão para as distâncias de câmera utilizadas nos ensaios.

Distância da Câmera [mm]	300	450	600
Campo de Visão Horizontal [mm]	120	180	240
Campo de Visão Vertical [mm]	90	135	180
Campo de Visão Instantâneo [mm]	0,375	0,562	0,750

Por exemplo, a uma distância da câmera em relação ao objeto em análise de 300 mm, cada *pixel* da imagem corresponderá a um quadrado de lado 0,375 mm. Esta informação será importante para o cálculo de dimensionamento de descontinuidades no que se refere ao cálculo de área pelo método de medição simples, mostrado no item 3.4.5.

3.3.4 Tempo de aquecimento

Um dos principais parâmetros para a realização do ensaio termográfico é o aporte térmico, isto é, a quantidade de calor que é fornecida à peça. O tempo de aquecimento,

ou tempo em que o soprador permanece emitindo ar quente sobre a peça, é diretamente proporcional ao aporte térmico.

No experimento foram testados basicamente seis tempos de aquecimento diferentes: 10, 15, 20, 30, 40 e 50 segundos. Sendo que de 10 a 30 segundos foram os mais utilizados, e os tempos de 40 e 50 segundos sendo pouco usados, apenas em alguns casos especiais onde o campo ou escala de temperaturas estava em um nível mais alto.

Para cada escala ou campo de temperaturas utilizado, descontinuidades centrais ou laterais nos corpos de prova (CP01 e CP02), e distâncias de câmera ao corpo sob exame, foram testados pelo menos os tempos de aquecimento de 10, 15, 20 e 30 segundos. Até os campos de temperatura que não foram testados a esses tempos de aquecimento tiveram suas sequências obtidas através do programa *ThermaCAM®QuickView* a partir de uma sequência em qualquer outro campo, testada diretamente nos tempos de aporte citados.

3.3.5 Campo de Temperaturas

O chamado campo de temperatura corresponde à escala de temperaturas que aparece nos termogramas representando as temperaturas máximas e mínimas observáveis e suas cores de representação correspondentes. Está relacionado à faixa de temperaturas que está sendo diferenciada na imagem. Na Figura 3.14 podemos ver um exemplo de termograma com campo automático (que se ajusta à medida que a temperatura vai mudando para mostrar uma imagem com o máximo contraste). A imagem mostrada na Figura 3.14 está em tons de cinza e serve apenas como exemplificação. Os termogramas extraídos da câmera para o programa, na execução deste trabalho, são coloridos (padrão RGB). A temperatura de 21,5°C é o limite inferior e de coloração mais escura (preta), portanto qualquer temperatura indicada na imagem, igual ou inferior a esta, terá coloração preta. O limite superior está representado pela temperatura de 57,3°C e, analogamente, tudo que na imagem apresentar coloração branca terá esta temperatura ou qualquer outra que seja maior.

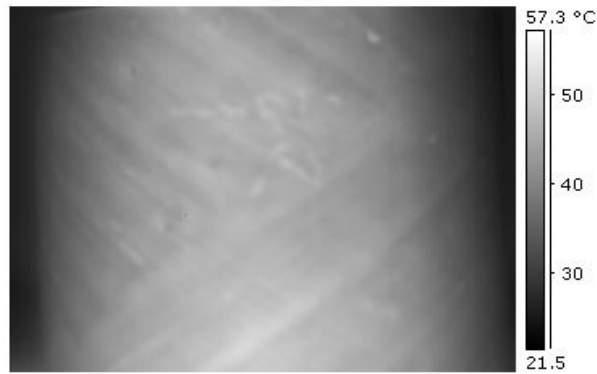


Figura 3.14 Termograma do CP01 em escala de cinza, mostrando campo de temperaturas automático.

No presente estudo trabalhou-se com campos de temperatura diversos, no entanto estes eram fixados e mantidos constantes, isto é, não se manteve no modo automático que busca maior contraste a todo instante. Isto se deve principalmente ao fato de que para analisar tais defeitos, no que se refere a dimensionamento, durante o resfriamento seria essencial observar quando obtém-se uma imagem de maior contraste e depois a diminuição gradual deste com o tempo; e daí tirar relações de intensidade de regiões com e sem descontinuidades, em função do tempo, e em descontinuidades de dimensões diferentes.

Avaliou-se campos com intervalos de temperatura (amplitude) de 10°C a 30°C, em variados níveis, sendo estes: 20 a 30°C, 20 a 40°C, 20 a 50°C, 30 a 40°C, 40 a 50°C. No entanto os ensaios poderiam ter sido feitos a uma condição única (30 a 40°C, por exemplo) e depois ter o campo alterado no programa *ThermaCAM®QuickView*, para o intervalo desejado. Mas o experimento a diferentes condições é de grande valia para se observar o comportamento do material em aquecimento e resfriamento, em diferentes escalas de temperatura.

A mudança de campo com a utilização do programa citado pode demandar certo tempo (deve ser feito individualmente para cada foto de uma sequência), portanto, fazer um novo ensaio de poucos minutos pode também ser vantajoso tanto no laboratório quanto na prática.

3.3.6 Aquisição de Imagens

A câmera ou termógrafo utilizado pode fazer a aquisição de imagens em forma de filme ou sequência de fotos. No corrente trabalho foi utilizada a função de sequência de termogramas, cujo intervalo de tempo entre uma imagem gravada e outra, durante o

resfriamento do corpo de prova, foi de cinco segundos; o mínimo possível para o equipamento usado.

Uma vez gravadas as imagens das sequências de resfriamento para cada condição específica e corpo de prova, estas foram transferidas para o computador em que se procedeu a análise.

3.4 Tratamento de Dados e Avaliação das Descontinuidades

Os itens a seguir descrevem como as imagens adquiridas pela câmera termográfica foram avaliadas inicialmente quanto à possibilidade de identificação das descontinuidades e depois como foram processadas, isto é, como que, a partir de cada sequência de termogramas, pode-se avaliar a detectabilidade das descontinuidades e chegar-se a um procedimento para avaliar as dimensões dessas descontinuidades por métodos comparativos, já que suas dimensões já eram previamente conhecidas. O objetivo também é encontrar um método para dimensionar descontinuidades novas, a partir do conhecimento de referências, isto é, descontinuidades previamente medidas.

3.4.1 Avaliação Prévia das Imagens

Inicialmente as imagens feitas pela câmera termográfica e extraídas para o computador, após serem transformadas para formato JPEG comum, eram analisadas quanto à possibilidade de identificação das descontinuidades conhecidas previamente, a olho nu. O método de avaliação, nesse caso, foi estritamente qualitativo, considerando uma sequência de termogramas em determinada condição de ensaio como boa ou ruim, relacionado a contraste e definição de áreas com e sem descontinuidades. Esse método será exemplificado mais à frente.

Outro aspecto importante a se destacar reside na tentativa de detectar, através de processamento das imagens, a presença de descontinuidades nas sequências onde o contraste e definição são ruins, isto é, buscar uma forma de encontrá-las com uma técnica mais sensível que a visão humana. No entanto, este não será o foco principal deste trabalho, sendo este mais voltado à tentativa de dimensionamento de descontinuidades já detectadas. Mas, de certa forma, a detecção destes não será negligenciada e será mostrada de maneira simplificada nos itens a seguir e no capítulo de Resultados e Discussões.

A Figura 3.15 exemplifica uma sequência de termogramas com bom nível de contraste e boa definição, em comparação com outra sequência onde tal estado não foi possível de ser obtido durante o resfriamento. Ambas são correspondentes ao corpo de prova CP01, na condição de campo de 20 a 30°C, sendo a primeira, Figura 3.15 (a), com tempo de aquecimento de 10 segundos e a segunda, Figura 3.15 (b), 15 segundos. Exemplificando a grande sensibilidade do contraste com relação ao aporte térmico. Na sequência (a) as descontinuidades estão evidentes, com exceção do terceiro furo, localizado mais abaixo dos dois primeiros, e com maior espessura remanescente, isto é, menor volume do furo ou descontinuidade. Na sequência (b) as descontinuidades não ficam evidenciadas devido ao aporte excessivo para o campo de temperaturas utilizado, extrapolando o limite superior deste campo e de certa forma “poluindo” a imagem.

3.4.2 Detecção de Descontinuidades e Curvas Características

Os primeiros passos para o processamento e análise das imagens termográficas obtidas pela câmera consiste na utilização do programa com esse objetivo, o *Image Pro Plus*. Segue a sequência de ações usada para análise:

- a) Inicia-se o programa, abre-se todas as imagens da sequência de interesse para a condição específica.
- b) Escolhe-se na sequência uma das fotos de melhor contraste para se definir melhor posicionamento da linha de perfil que será utilizada.
- c) Usa-se a função “line profile” para obter-se uma linha onde o perfil de intensidade de tons de cores ao longo desta linha será mostrado em gráfico. Nesta etapa a preocupação principal é a de posicionar bem a linha, de modo a esta cortar a área de descontinuidade, que, nesse caso, aparecerá de forma clara e bem definida; contendo também áreas aproximadamente simétricas antes e depois desse possível defeito (furos, nos casos dos CP01 e CP02), e centralizada horizontalmente e verticalmente. (ver Figura 3.16)

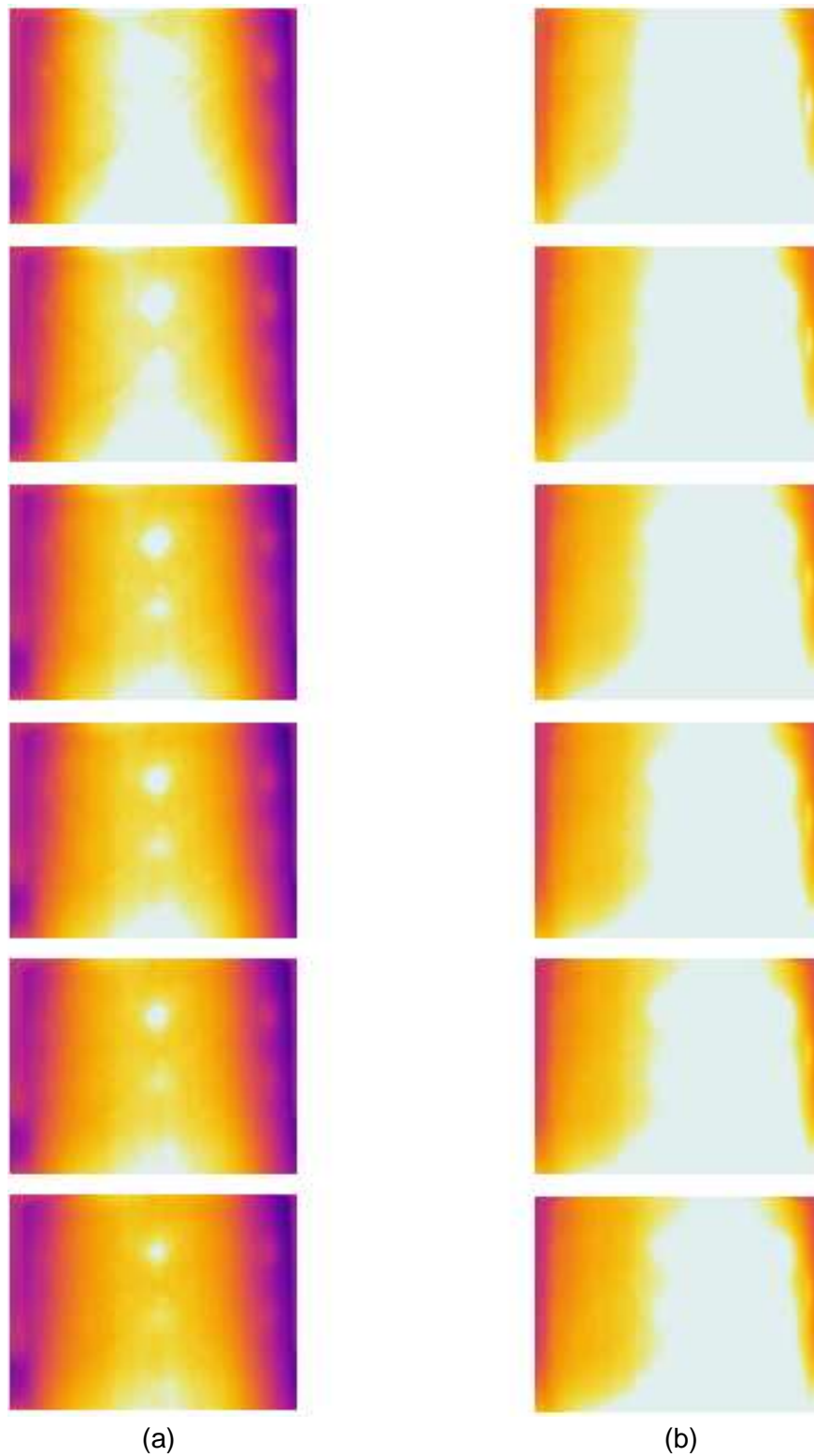
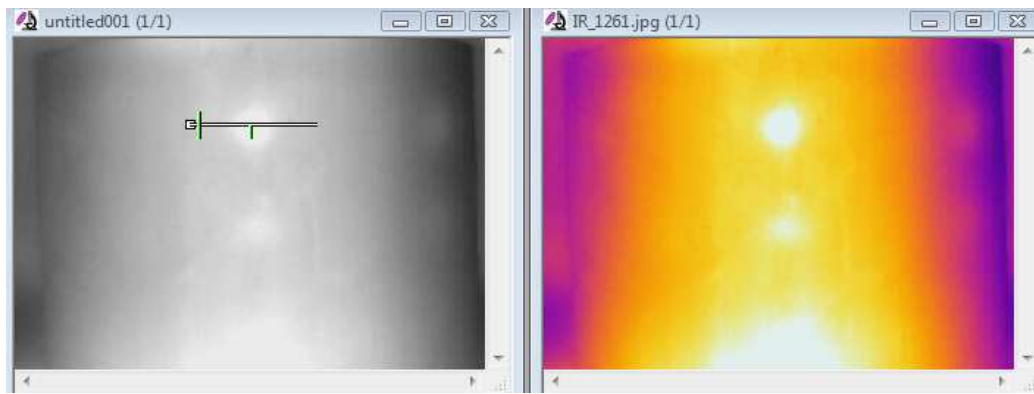
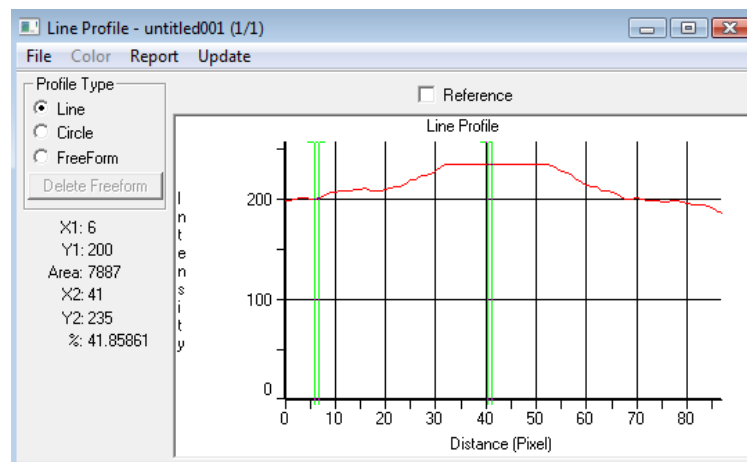


Figura 3.15 Sequências de termogramas a partir de 20 até 45 segundos de resfriamento, com intervalo entre imagens de 5 em 5 segundos. Campo de temperaturas de 20-30°C, e tempo de aquecimento/excitação de 10 segundos em (a) e 15 segundos em (b).



(a)

(b)



(c)

Figura 3.16 Em (b) o termograma original colorido e em (a) o mesmo em escala de cinza. Em (a) aparece a linha de perfil, cuja representação de intensidade em função da distância está em (c).

- d) Posicionada a linha, define-se um comprimento base para esta, considerando regiões com e sem discontinuidades, antes e depois desta, como indicado na Figura 3.16 (a). As próximas imagens que forem analisadas com essa função do programa já aparecerão com a linha sempre na mesma posição, se este não for fechado e/ou reiniciado.
- e) Toma-se a primeira foto da sequência (zero segundos de resfriamento, logo após a retirada do jato de ar quente), convertendo-a para escala de cinza de 8 bits. As discontinuidades não serão visíveis. Abre-se a função de perfil de linha (a linha base aparecerá exatamente onde foi posicionada na foto de melhor contraste). O gráfico de intensidade de tons de cinza *versus* distância (em *pixels*) será gerado automaticamente, como indicado na Figura 3.16 (c).
- f) Na Figura 3.16 (c), observa-se as colunas, correspondente às posições (X1,Y1) e (X2,Y2), genéricas, que podem ser escolhidas aleatoriamente no

gráfico. Posiciona-se uma delas na região correspondente ao centro da descontinuidade e a outra fora da região de furo ou descontinuidade, como na Figura 3.16 (a) e (c). Essa região distante da descontinuidade deve estar a uma distância, em *pixels*, calculada de acordo com uma observação no corpo de prova, de uma área longe da borda do furo e ao mesmo tempo não tão distante de modo a sofrer as conseqüências da convexidade do corpo de prova tubular (por exemplo, se 1 *pixel* = 0,375 mm, no caso de distância da câmera em relação ao corpo de prova de 300 mm, 10 mm na medida real corresponderão a aproximadamente 27 *pixels* na imagem).

- g) Anota-se os valores de Y1 e Y2, correspondentes à intensidade de tons de cinza locais, no centro da descontinuidade e numa região adjacente, sem descontinuidade. Sendo $|X1 - X2|$ igual à distância em *pixels* entre o ponto do centro da descontinuidade e o ponto escolhido fora desta.
- h) Exporta-se os dados das curvas de intensidade *versus* distância, do perfil de linha da foto em análise, para o programa Microsoft Office Excel, gerando uma linha ou coluna numa tabela.
- h) Repete-se os passos (e), (f), (g) e (h) para todas as outras fotos da sequência. Obtém-se uma tabela para poder se construir os gráficos de intensidade *versus* distância, para cada tempo de resfriamento (de 5 em 5 segundos, a partir do zero), e compará-los. Tem-se também uma lista com os valores de Y1 e Y2 para cada tempo do decaimento, que será usado para construção de curva de resfriamento.
- i) Repete-se todos os itens anteriores para as outras descontinuidades identificáveis na sequência de imagens.

3.4.3 Obtenção das Curvas de Resfriamento (CP01 e CP02)

A partir das curvas de resfriamento de descontinuidades de dimensões diferentes e áreas ou pontos sem descontinuidades, sob condições de teste diferentes, pretende-se quantificar os volumes dessas descontinuidades referentes a perdas de espessura, simulando casos de erosão em tubulações; ou mesmo testando os métodos para se dimensionar áreas de falta de adesivo ou de adesão (descontinuidades aproximadamente planares).

Para a obtenção das curvas de resfriamento de áreas com e sem descontinuidades, correspondentes a pontos dentro (ao centro) e fora da descontinuidade

na imagem termográfica, procede-se montando uma tabela com os tempos de resfriamento de cada imagem (a partir do momento inicial em que cessa o aquecimento da superfície sob exame) e os valores de intensidade de tons de cinza no ponto usado, correspondente aos valores Y1 e Y2, citados anteriormente. Assim, com os dados obtidos na etapa (g) do item 3.4.2, determina-se alguns pontos e monta-se o gráfico de intensidade de tom de cinza nos pontos em questão (no caso, substituindo a variável temperatura, da imagem radiométrica para a digitalizada) *versus* tempo de resfriamento (equivalente de cada imagem da sequência) e obtêm-se as curvas características desejadas.

O resfriamento é melhor representado por uma função de decaimento de temperatura exponencial (Lei de Resfriamento de Newton), o que é observado no caso do resfriamento das regiões com e sem descontinuidade, com diferenças entre elas. O que será considerado para cálculo do volume do potencial defeito.

3.4.4 Avaliação e Dimensionamento das Descontinuidades (CP01 e CP02)

Para o cálculo do volume da descontinuidade (mais especificamente as referentes à simulação de perda de espessura nos corpos de prova CP01 e CP02), onde pode se ter uma idéia da área desta pelo termograma, mas não de sua profundidade; ou o cálculo de profundidade de descontinuidades planares, de maior risco à integridade do equipamento, em que o volume não é tão relevante (espessura muito pequena), neste estudo considerou-se métodos diferentes.

Será avaliado o método tradicional, citado pela literatura [15, 17, 18, 19], para cálculo da profundidade de localização de descontinuidades como falta de adesão (descolamento) ou falta de adesivo, e aplicação deste método também para se estimar profundidade de defeitos volumétricos de perda de espessura. Além disso, será considerado um método de cálculo de volume para as descontinuidades volumétricas através do cálculo prévio de integrais das curvas de resfriamento de áreas com e sem descontinuidade.

Para este objetivo, considerou-se apenas o corpo de prova CP01, devido aos melhores resultados de detecção de descontinuidades, tanto na quantidade de defeitos observados, como qualidade das imagens geradas. Tais cálculos foram feitos para várias condições de teste, variando principalmente aporte térmico, distância da câmera ao corpo de prova, escala de temperatura, posição do defeito (central ou lateral) e dimensões destes defeitos.

Cálculo de Volume da Descontinuidade pelo Método da Integral das Curvas de Resfriamento

Para ilustrar este método de cálculo aproximado de volume de descontinuidades, será considerado apenas o corpo de prova CP01, na condição de campo de temperatura variando de 20 a 30°C, distância da câmera de 300 mm e tempo de aporte térmico de 15 segundos, e as descontinuidades centrais D e E (ver item 3.2.1); constituindo um exemplo de cálculo.

Inicialmente, com as curvas de resfriamento construídas (ver item 3.4.3), referentes a áreas com e sem descontinuidades, para pelo menos duas descontinuidades de profundidades diferentes e, neste caso, conhecidas; escolhe-se o tempo a partir do qual é visível a diferenciação entre as curvas de decaimento de temperatura (intensidade) dos diferentes defeitos “D” e “E” entre si e em relação a uma área sem defeito. A Figura 3.17 mostra o decaimento de temperatura do defeito “D” e da área sem defeito adjacente a este. Nota-se a diferenciação das curvas a partir do tempo de 20 segundos. O patamar superior de intensidade de tom de cinza equivalente a 235 corresponde à coloração mais clara observável para a escala de temperatura usada para a conversão da imagem radiométrica para imagem digital de 8 bits; sendo uma limitação do método.

Na verdade as curvas reais seriam de tendência exponencial em toda sua extensão, a partir do tempo zero (fim do aquecimento) até os 70 segundos.

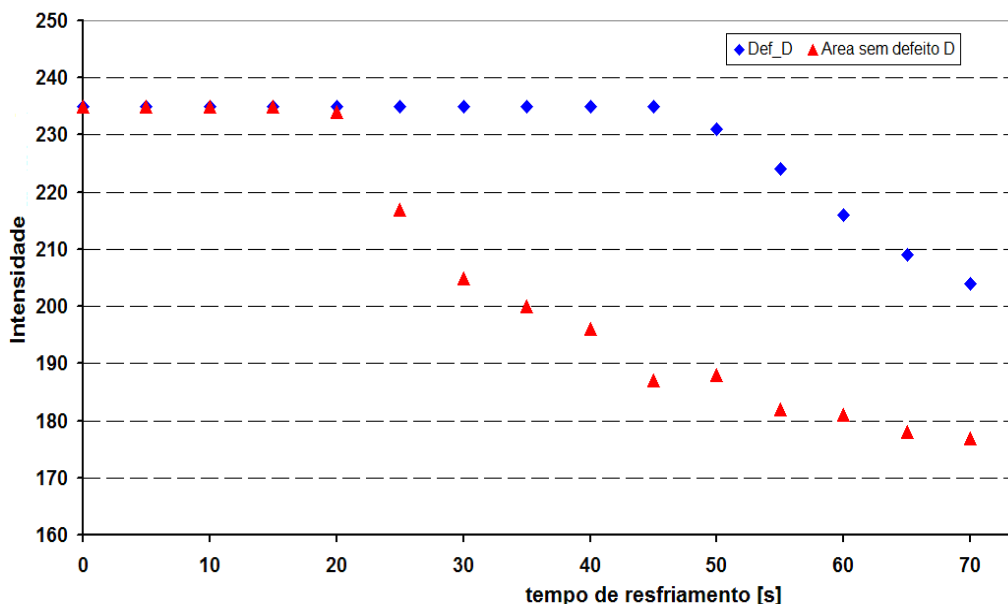


Figura 3.17 Resfriamento do defeito “D” (CP01). Áreas com defeito e sem defeito. A partir do ponto 20s as curvas começam a se diferenciar.

Separam-se os pontos que representam a parte exponencial até o fim do resfriamento observado e ajusta-se uma equação das curvas, tomando-se o cuidado de se separar a parte que ainda é constante (devido a efeito de limite de tons de cinza) da parte onde o decaimento exponencial se inicia. Por exemplo, no caso do defeito D do CP01, até o tempo de 45s o decaimento exponencial não é observado na Figura 3.17 (somente por questões de escala de intensidade de cores), mas a partir daí, inicia-se essa tendência, como ilustrado na Figura 3.18 abaixo; assim como para a região sem defeito adjacente. Para efeito de cálculo, considera-se que a área sem defeito inicia seu decaimento exponencial a partir do tempo de 20s (ver Figura 3.17) e a partir daí tem sua equação característica indicada na Figura 3.18.

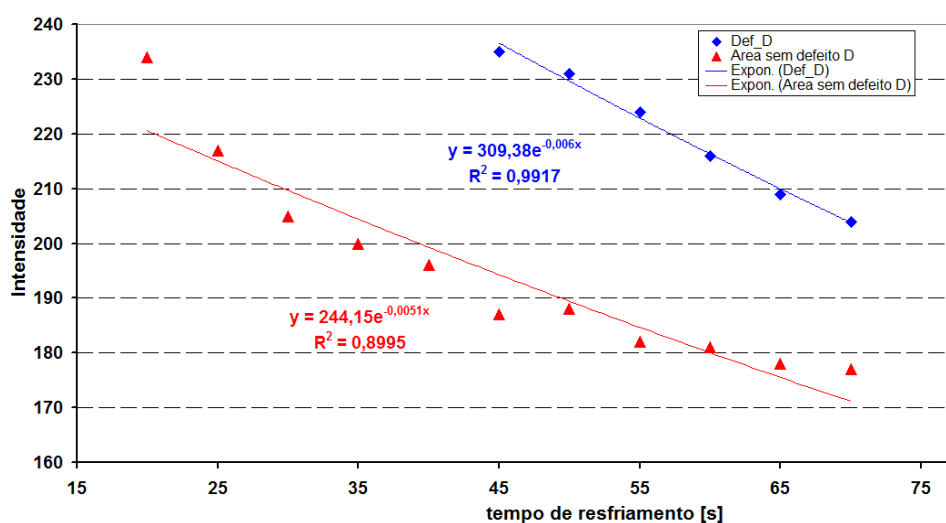


Figura 3.18 Resfriamento do defeito “D” (CP01) a partir dos 45 segundos e da região sem descontinuidade adjacente a partir dos 20 segundos. Áreas com defeito e sem defeito mostrando tendência exponencial de decaimento de temperatura.

É importante lembrar que a curva de decaimento de temperatura, para todos os casos citados, é considerada como uma função exponencial desde o início do resfriamento ($t=0$); e o que é obtido através da digitalização de imagens e posterior uso da função de perfil de linha do programa, gerando dados para a formação da curva de resfriamento, apenas demonstra comportamento diferente (parte da curva aproximadamente constante) pela limitação de escala de temperatura imposta e quantidade limitada de tons de cinza com a conversão da imagem radiométrica para imagem digital.

Embora a equação ajustada e apresentada na figura 3.18 seja exponencial, o trecho apresentado no gráfico parece ser linear, principalmente devido à escala adotada.

Calcula-se a integral (área sob a curva) das equações referentes ao defeito D e a sua correspondente área sem defeito (parte exponencial), a partir do tempo de zero segundos até o tempo final do resfriamento observado, no caso da Figura 3.17 e 3.18, 70 segundos. Para ambas as regiões (com defeito e sem defeito) a área calculada para o método será a integral da equação mostrada na Figura 3.18 nos limites de 0 a 70 segundos. Com esses cálculos de áreas sob curvas em mãos, deve-se fazer algumas operações, considerando as equações a seguir:

$$I_D - I_{sd D} = Da_D \quad (12)$$

Onde: I_D – integral da curva do defeito “D”

$I_{sd D}$ – integral da curva referente à área sem defeito, comparativa ao defeito “D”

Da_D – diferença de áreas referente ao defeito “D”

Deve ser feito cálculo similar para a outra descontinuidade na mesma sequência de termografias, isto é, para o defeito “E” (ver item 3.2.1). Assim, outra relação pode ser escrita:

$$I_E - I_{sd E} = Da_E \quad (13)$$

Onde: I_E – integral da curva do defeito “E”

$I_{sd E}$ – integral da curva referente à área sem defeito, comparativa ao defeito “E”

Da_E – diferença de áreas referente ao defeito “E”

Portanto, outras relações devem ser levadas em consideração, referentes ao volume do defeito. As diferenças de áreas relativas aos defeitos “D” e “E” e suas respectivas áreas sem defeito são proporcionais a um volume sem defeito (definido com a mesma área de secção transversal que o defeito, mas sem perda de massa, isto é, com altura igual à espessura do tubo) menos o volume remanescente na região do defeito. Assim, tem-se:

$$Da_D \propto V_{sd} - V_{r D} \quad (14)$$

$$Da_E \propto V_{sd} - V_{r E} \quad (15)$$

E, desta forma, conclui-se que estas mesmas diferenças de áreas, seguindo raciocínio análogo, são proporcionais ao volume da descontinuidade ou do furo usinado na amostra em si, seguindo as Equações 16 e 17.

$$Da_D \propto V_{\text{furo } D} \quad (16)$$

$$Da_E \propto V_{\text{furo } E} \quad (17)$$

Sendo: V_{sd} – volume da área sem defeito

V_{rD} – volume remanescente na área do defeito “D”

V_{rE} - volume remanescente na área do defeito “E”

$V_{\text{furo } D}$ – volume do furo ou do vazio no defeito “D”

$V_{\text{furo } E}$ - volume do furo ou do vazio no defeito “E”

O objetivo final é encontrar uma relação de diferenças de áreas *versus* volume da descontinuidade, isto é, uma equação, para cada condição de teste, que relacione a diferença de áreas sob curvas de resfriamento (da região da descontinuidade em relação ao uma região intacta) para uma descontinuidade nova encontrada em uma tubulação, comparando essa diferença de áreas com a de outro defeito padrão, para se chegar a um volume da descontinuidade, tendo uma medida aproximada da perda de massa ou espessura localizada; ou, no caso de um defeito planar de dimensões suficientemente grandes para serem detectados, a que profundidade este se encontra.

Esta relação de diferença de área sob curva de resfriamento e volume da descontinuidade constituiria uma curva de calibração para dimensionamento das novas descontinuidades encontradas.

Cálculo Tradicional da Profundidade da Área da Descontinuidade

De acordo com a literatura consultada [17, 18], a profundidade de um defeito como falta de adesão ou de adesivo, ou a perda de espessura localizada em tubulações industriais de material compósito pode ser estimado através dos cálculos e gráficos como os mostrados no item 2.3.3 e Figura 2.13, (a) e (b).

Um decaimento mais acentuado de temperatura é observado nas partes mais espessas da amostra, cuja curva serve como referência no cálculo das regiões de espessura menor ou com presença de defeito. Para cada ponto as curvas são subtraídas da referência, restando, desta forma, apenas o contraste.

Em regiões de menor espessura (ou para descontinuidades mais superficiais) o contraste é maior e ocorre mais rapidamente (tempo de pico de contraste é menor); seguindo a Equação 10. A Equação 10 é utilizada para se estabelecer uma curva de

calibração para as condições de ensaio em questão e, a partir desta, se estimar valores de profundidades de defeitos ou espessuras de novas descontinuidades encontradas no teste, como mostrado na Figura 2.13 (b).

Uma vez obtidas as curvas referentes ao resfriamento de descontinuidades com diferentes dimensões (furos usinados simulando perda de espessura, por exemplo), e também de região sem defeitos adjacente; faz-se a normalização dos dados através de subtração de uma temperatura de referência (região sem defeito), gerando as curvas de contraste por tempo.

O tempo em cada uma das curvas, correspondente ao contraste máximo de cada descontinuidade, é, por sua vez, relacionado ao quadrado da profundidade da mesma descontinuidade. Tem-se então a curva de calibração, para a condição específica em questão, que estima a dimensão de uma nova descontinuidade encontrada a partir de seu tempo de pico de contraste.

3.4.5 Cálculo da Área do Defeito (CP03 e CP04)

Para os corpos de prova CP03 e CP04, que simulam partes de juntas de tubulações com descontinuidades de falta de adesão ou de adesivo, isto é, descontinuidades praticamente bidimensionais, o volume ou profundidade não é de tanta importância. Estes provavelmente se encontrem na interface adesivo/aderendo (adesivo/junta ou adesivo/tubo), onde já se sabe qual é a localização; e seu volume é o produto de sua área superficial, a ser calculada, pela espessura, geralmente muito pequena, podendo ser desconsiderada em razão da importância da área ser muito maior para a integridade do equipamento.

Desta forma, para juntas de tubulações de PRFV, o cálculo da área superficial da descontinuidade de falta de adesivo ou adesão é de grande importância, pois a resistência da junta como um todo dependerá da porcentagem desta que mantiver uma força de adesão suficiente entre tubo, adesivo e junta suficiente para resistir às tensões impostas pela operação.

Método de Medição Simples

A maneira mais simples de medir a área de descontinuidade em uma junta de tubulações, a partir de imagens termográficas, consiste em selecionar na sequência de termogramas obtidos na condição de ensaio, as imagens de maior contraste e definição

da descontinuidade. Devem ser selecionados os termogramas onde as linhas correspondentes às bordas da descontinuidade estão bem definidas.

No entanto, isso não é tão simples. Analisando uma sequência de imagens termográficas observa-se que as dimensões das descontinuidades parecem se alterar, com as linhas de borda “movendo-se”. A escolha da imagem que melhor representa o dano é de fundamental importância, assim como a forma como esta pode ser tratada para melhor visualização do potencial defeito.

Uma vez selecionada a melhor imagem ou termograma, este é convertido para escala de cinza de 8 bits (isto pode ser realizado antes, para se fazer um histograma da imagem para definir a melhor dentre a sequência) e analisado com algumas ferramentas do programa *Image Pro* para melhoria de contraste e definição de linhas de fronteira entre descontinuidade e arredores. Isso pode ser melhor visualizado na Figura 3.19, onde na Figura 3.19 (a) há um termograma do CP04 em que as descontinuidades de falta de adesão ou adesivo não estão tão claras, apesar de serem detectáveis. Na Figura 3.19 (b) tem-se a mesma imagem convertida para tons de cinza (8 bits) e na Figura 3.19 (c) a imagem digital em escala de cinza com aplicação de filtro passa baixa frequência e dimensão da descontinuidade (largura) indicada em *pixels*, realizados com ferramentas do programa.

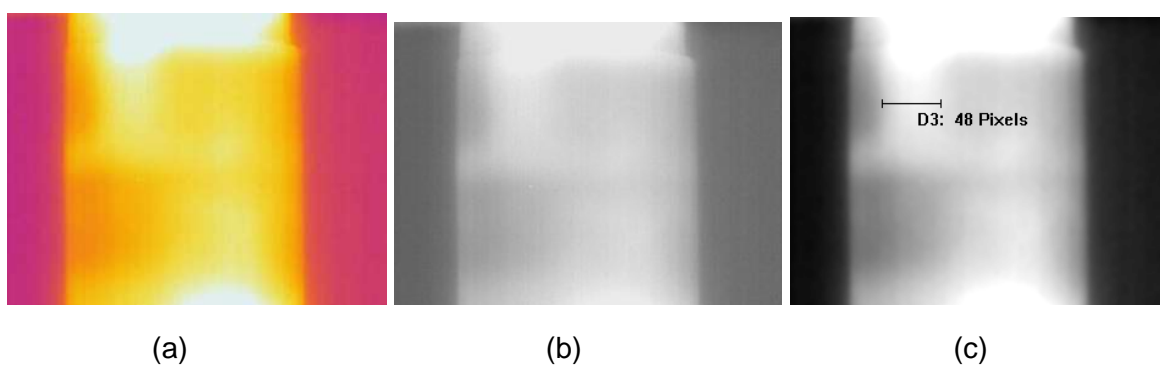


Figura 3.19 Termograma do CP04 com áreas de descontinuidade de falta de adesivo ou adesão. Imagem original em (a), em tons de cinza de 8 bits em (b). Em (c) a imagem filtrada para melhoria de contraste e indicação da largura de uma das descontinuidades.

Para o cálculo da dimensão real da descontinuidade basta multiplicar o valor medido pela função do programa, em *pixels* (no caso da Figura 3.19, 48 *pixels*), pelo valor do campo de visão instantâneo em relação à distância da câmera ao objeto em exame (equivalência do tamanho do *pixel* para milímetros), indicado na Tabela 3.8, item 3.3.3 (para 300 mm de distância da câmera ao corpo de prova, um *pixel* é equivalente a 0,375 mm, caso da condição do CP04 na Figura 3.19).

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise das Imagens de Termografia e Definição das Melhores Condições de Ensaio

Capturadas as imagens para cada condição específica nos quatro corpos de prova, procedeu-se a análise destas de modo a definir tanto na observação a olho nu, como na avaliação computacional (uso do programa *Image Pro*), as melhores condições para identificar a presença do defeito; sua melhor definição e contraste de imagem.

No caso restrito à detecção das descontinuidades nas diferentes condições de ensaio, neste trabalho é considerado um critério apenas qualitativo, isto é, um termograma é considerado como de bom contraste (ou de boa qualidade) se as descontinuidades forem de fácil visibilidade na imagem inicial, sem tratamento posterior. Já para o caso do dimensionamento destas, as imagens foram avaliadas pelo contraste encontrado entre as regiões com e sem descontinuidades, considerando os valores de intensidade de cor calculados pelo programa de tratamento de imagens na função do perfil de linha, após a digitalização, com ou sem alteração de condições de brilho e contraste através de ferramentas do programa.

O intuito principal é gerar, no procedimento prático, boas imagens, com defeitos bem definidos, de forma a serem visualizados rapidamente mesmo a olho nu durante a inspeção e/ou possam ser processadas de forma simples em programas de processamento de imagens para qualificar e dimensionar esses potenciais defeitos. O uso rápido e prático em ambiente industrial é o objetivo maior, para que possa se tornar uma ferramenta de uso simples, inclusive para usuários não tão familiarizados com a técnica.

Assim poderá se avaliar quais condições de teste geram melhor contraste para cada tipo de defeito nos corpos de prova, de diferentes dimensões, em cada condição específica de ensaio (tamanho e nível da escala de temperatura, modo de aplicação e intensidade de aporte térmico, distância da câmera ao corpo de prova); e chegar a valores práticos que possam ser utilizados no dia a dia da indústria.

4.1.1 Detecção de Defeitos

Para a detecção das descontinuidades foi considerado um campo ou escala de temperaturas fixo. Desta forma mantém-se uma referência visual, com limite superior, limite inferior e intervalos definidos (representados pelas suas cores características) para que não haja variação nesses limites de escala e em suas amplitudes. A variação destes limites poderia dificultar a visualização do evento.

Para a obtenção da temperatura não há prejuízo se for obtida de uma imagem cuja escala de temperatura foi ajustada no automático (limites variantes) ou manualmente (limites fixos). A temperatura vem do processamento de sinal do detector, que armazena o estímulo emitido pelo corpo de prova da mesma forma, isto é, como informação radiométrica; e não varia de acordo com as alterações de escala de temperatura/cor indicadas na imagem.

O ajuste manual foi considerado interessante no presente estudo, pois, embora não se tenha o melhor contraste possível (o que ocorre no caso do ajuste automático), a representação de cada temperatura, em função de sua cor representante, não varia com o tempo. Portanto, no caso de sequências de imagens termográficas, para uma análise numérica do decaimento de temperatura em função do tempo (tentativa de se encontrar um padrão relativo a descontinuidades), a constância da relação temperatura/cor torna-se muito importante. Além disso, a escala fixa constitui uma alternativa de qualidade e menor custo, por não ser necessário obter programas específicos dos fabricantes de câmeras para processamento das imagens no formato radiométrico.

No programa de visualização de imagens do equipamento, para análise e pós-processamento, existe a possibilidade de acesso às temperaturas e estas não se modificarão com as alterações de escala de temperatura e/ou no ajuste do padrão de cor escolhido. Somente haverá alterações nos valores se houver mudanças nos parâmetros do objeto (emissividade, temperatura ambiente e refletiva, umidade relativa e distância operacional).

Ao se digitalizar as imagens perdem-se as informações radiométricas de temperatura e passa-se a ter intensidades de tons de cinza, restringindo, de certa forma, o processamento para o programa utilizado. No entanto, a análise pode ser simplificada e passada para o âmbito visual na detecção, isto é, rapidez em se descobrir a presença ou não de descontinuidades em tubulações ou juntas de materiais compósitos.

Além disso, adotou-se a escala fixa, caso a caso, para vários intervalos diferentes de temperatura, com o intuito de simular condições diferentes de teste, tanto o caso de tubulações trabalhando a diferentes temperaturas em operação, como fatores externos

ao sistema (umidade, vento, luz solar, luz artificial, variações de temperatura ambiente, chuva e outros). Desta forma também se reduz uma das variáveis para estudo do sistema.

A partir disso, tentou-se mostrar a validade do método de tratamento de imagens para dimensionar as descontinuidades presentes nos corpos de prova, com objetivo de desenvolver um procedimento prático operacional para descontinuidades reais.

O problema de visualização de imagens, isto é, as imagens consideradas como ruins ou de baixo contraste ou baixa qualidade de visualização de descontinuidades, poderia ser resolvido pelo ajuste da escala do aparelho, passando-o para o modo automático. Mas há limitações em relação ao aporte térmico, que não poderá ser alto o suficiente para tornar a visualização de descontinuidades impossível, isto é, ultrapassar os limites auto-ajustáveis do modo automático (aumento de temperatura em uma taxa não acompanhada pela escala do equipamento).

A seguir serão apresentados, para cada corpo de prova, nas mesmas condições de ensaio (temperatura, umidade, refletividade ambiente e emissividade), quais parâmetros de teste obtiveram melhores resultados e as discussões cabíveis a cada um deles.

Corpo de Prova CP01

O corpo de prova CP01, com defeitos circulares de perda de espessura apresentou imagens de melhor contraste e definição na região de defeito nas seguintes condições de ensaio, considerando temperatura ambiente de aproximadamente 20°C:

- campo ou escala de temperaturas de 20 a 30°C e tempos de aquecimento de 10 segundos para os defeitos centrais “D” e “E”; e 15, 20 e 30 segundos para os defeitos laterais “G” e “H”. Distância da câmera ao corpo de prova de 300 mm.

- campo ou escala de temperaturas de 30 a 40°C e tempos de aquecimento de 15, 20 e 30 segundos para os defeitos centrais e 15, 20, e 30 segundos para os laterais. Distância da câmera ao corpo de prova de 300 mm.

À medida que se aumenta o nível do campo ou escala de temperaturas é necessário que se aumente também o aporte térmico, de forma a manter as descontinuidades visíveis. Se o campo é aumentado (por exemplo, passando de 20-30°C para 30-40°C) e se for mantido o mesmo aporte, as descontinuidades podem não aparecer ou aparecendo, rapidamente sua indicação se dissipe, prejudicando a detecção. Além disso, esta pode não ser revelada de maneira completa, também comprometendo seu dimensionamento.

O inverso também é verdadeiro, isto é, para campos em níveis de temperaturas mais baixas, o aporte não pode ser excessivo para não “inundar” a amostra com calor, impedindo ou prejudicando a visualização de descontinuidades na condição descrita.

Para o CP01 na mudança de escala de 20-30°C para 30-40°C, mantendo o aporte, não houve problemas de visualização das descontinuidades laterais, mas para as centrais sim, portanto o tempo de aplicação de calor precisou ser aumentado. Os defeitos ou descontinuidades centrais também não puderam ser bem observados na escala de 20-30°C com aporte térmico de mais de 15 segundos; os laterais foram bem detectados acima disso.

As descontinuidades laterais, por se localizarem em região próxima à extremidade do corpo de prova, em relação aos centrais, possuem características de resfriamento diferentes. A transferência de calor nesta região mostrou-se distinta em relação à região central, no tocante às descontinuidades presentes analisadas. Por se localizarem próximas à borda, há menor volume ou massa de material entre a descontinuidade e o exterior da amostra. Isso indicou uma maior taxa de resfriamento dessas descontinuidades (caso do CP01, defeitos “G” e “H”), o que vai ter maiores implicações também no dimensionamento destas, como será visto mais à frente.

No entanto, este fato não tem tanta importância prática, visto que em tubos reais (não em “meias-canas”) esse problema não será enfrentado.

A Figura 4.1 apresenta alguns exemplos de termogramas do CP01 em diferentes condições, ilustrando os comentários acima. Na Figura 4.1 (a) os defeitos centrais (“D” e “E”) do CP01, com escala de 20-30°C e 10 segundos de aquecimento. O termograma representa a imagem após 30 segundos de resfriamento, assim que cessado o aquecimento. O defeito “F” (assim como o defeito “I”, para defeitos laterais), também de detecção mais difícil devido à reduzida profundidade ou alta espessura (maior profundidade em relação à superfície em análise), não é visível também devido ao reflexo do apoio na parte inferior do corpo de prova, que também aquece e prejudica algumas imagens. A Figura 4.1 (b) mostra os defeitos laterais “G” e “H”, campo de 20-30°C, com aquecimento de 15 segundos e tempo de resfriamento de 15 segundos. Na Figura 4.1 (c), com objetivo de mostrar os defeitos centrais, revela-se também os laterais, numa escala de 30-40°C e tempo de aquecimento de 30 segundos. A imagem é referente ao resfriamento de 15 segundos após o fim do aquecimento. Nota-se na Figura 4.1 (b) um defeito bem maior, à direita, mais bem definido em decorrência de sua maior área e proximidade da superfície; que não é considerado neste estudo.

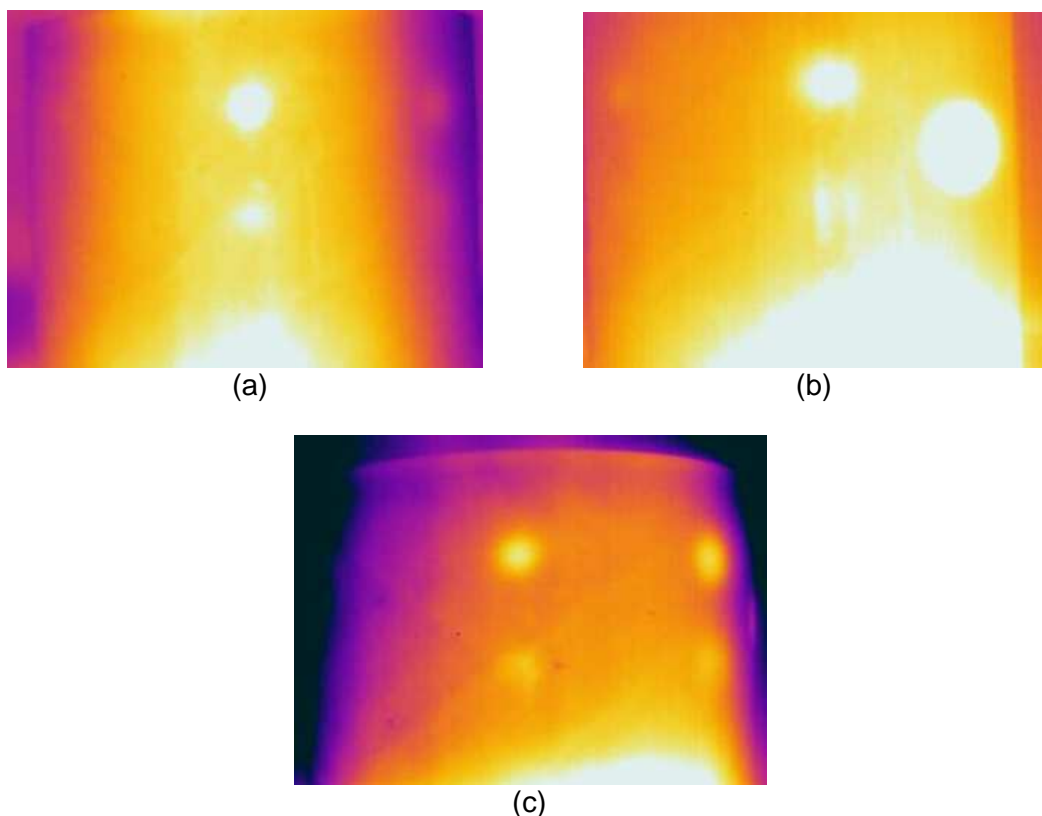


Figura 4.1 Imagens consideradas de bom contraste e boa definição das discontinuidades, no CP01. Em (a) os defeitos centrais, campo de 20-30°C, aporte térmico de 10 segundos e 30 segundos de resfriamento. Em (b) defeitos laterais em escala de 20-30°C, 15 segundos de aquecimento e mais 15 segundos de resfriamento. Na imagem (c) é usado campo de 30-40°C para os defeitos centrais em aquecimento de 30 segundos e resfriamento de 15 segundos.

Corpo de Prova CP02

O corpo de prova CP02, também com defeitos circulares de perda de espessura, foi avaliado nas condições descritas, apresentando imagens de melhor contraste e definição na região de defeito nas seguintes condições de ensaio, considerando temperatura ambiente de aproximadamente 20°C:

- campo ou escala de temperaturas de 20 a 30°C e tempo de aquecimento de 30 segundos para os defeitos laterais (apenas o “G”, mais profundo, foi visível); distância da câmera ao corpo de prova de 300 mm.

- campo ou escala de temperaturas de 30 a 40°C e tempo de aquecimento de 40 segundos para os defeitos centrais e laterais. Distância da câmera ao corpo de prova de 300 mm.

Indicações das descontinuidades puderam ser observadas em várias condições, mas apenas em algumas delas, citadas acima, a visualização foi um pouco melhor. O CP02 mostrou certa dificuldade na inspeção, devido principalmente à sua espessura (cerca de 8 mm), em comparação com o CP01 (5 mm). Uma maior espessura gera uma maior dissipação do calor dentro da peça antes deste entrar em contato com a descontinuidade e gerar, pelo aquecimento diferencial em relação aos arredores, o sinal de indicação do defeito na imagem.

Devido à baixa ou intermediária difusividade térmica do compósito, regiões de menor espessura tenderão a manter uma temperatura mais alta por um tempo maior. No caso do CP02 esta espessura mais baixa na região de descontinuidade, para as condições ensaiadas, não é suficiente para gerar indicações de boa definição. De acordo com a Equação 10 e a Figura 2.13 (a), descontinuidades mais profundas (maior espessura remanescente) levam um tempo maior para serem detectadas e aparecem com um contraste reduzido.

Alguns exemplos de termogramas do CP02 são apresentados na Figura 4.2, para exemplificar o que foi comentado nos parágrafos anteriores. Na Figura 4.2 (a) apresenta-se um termograma referente aos defeitos laterais do CP02, em campo de 20-30°C, com aporte térmico de 30 segundos e tempo de resfriamento de 25 segundos. Já na Figura 4.2 (b), uma imagem de pior definição, mas os defeitos centrais podem ser percebidos, assim como o lateral “G”, num campo de 30-40°C e aporte de 40 segundos, com resfriamento de 25 segundos.

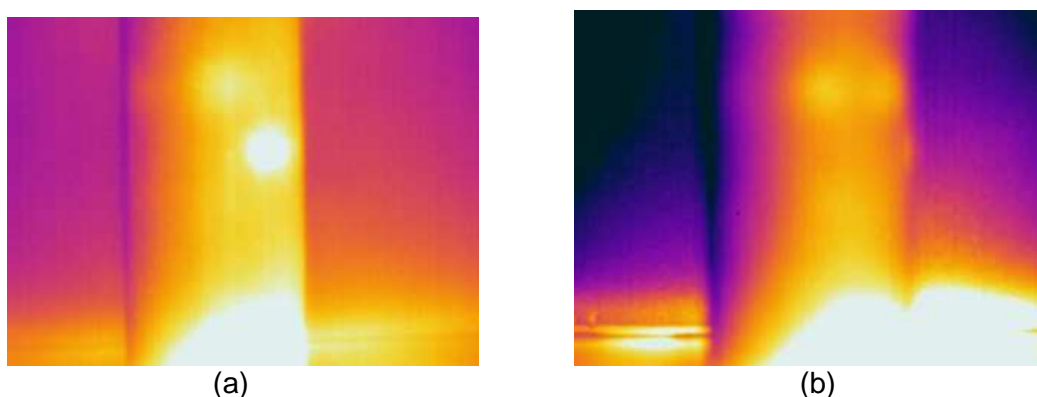


Figura 4.2 Em (a) os defeitos laterais (“G” e “H”) do CP02 em campo de 20-30°C, aquecimento durante 30 segundos e mais 25 segundos de resfriamento. Imagem (b) representa defeitos centrais (“D” e “E”) em campo de 30-40°C com aquecimento de 40 segundos e resfriamento a 25 segundos.

Corpos de Prova CP03 e CP04

Os ensaios relativos aos corpos de prova CP03 e CP04 apresentaram dificuldades na detecção de descontinuidades, assim como no caso do CP02. Isto foi devido, principalmente, a maior espessura da junta em relação ao tubo. No entanto, as descontinuidades foram visíveis com maior facilidade em algumas condições particulares de teste:

- campo ou escala de temperaturas de 20 a 30°C e tempo de aquecimento de 15 segundos (apenas CP04). Distância da câmera ao corpo de prova de 300 mm.

- campo ou escala de temperaturas de 30 a 40°C e tempo de aquecimento de 20 segundos (apenas detecção no CP03). Distância da câmera ao corpo de prova de 300 mm.

Os corpos de prova CP03 e CP04, representando as juntas e não as tubulações em si, simulam bem situações reais onde se busca descontinuidades nessas juntas, localização muito comum da origem de falhas. Suas dimensões são praticamente iguais, assim como as descontinuidades, portanto não há grandes diferenças em relação à análise individual de cada um.

A espessura de cerca de 8 mm (somatório das espessuras do tubo, junta tipo luva e camada de adesivo), assim como no CP02, representa uma dificuldade quando comparado com a detectabilidade obtida para o CP01. Entretanto, é possível identificar as descontinuidades. Para o caso de dimensionamento, algum processamento de imagens será requerido para melhor definição de limites das regiões com e sem defeito.

A Figura 4.3 mostra dois termogramas referentes ao CP04 nas condições de campo de 20-30°C, com 15 segundos de aporte térmico e resfriamento de 35 segundos (Figura 4.3 (a)) em comparação com a imagem já ao fim do resfriamento (65 segundos) em campo de 30-40°C e com 20 segundos de aquecimento (Figura 4.3 (b)). Na Figura 4.3 (a) são visíveis as descontinuidades na parte superior esquerda e inferior direita, com intensidades diferentes dos arredores (mais claras), mas não com contraste e definição muito bons. O mesmo acontece na Figura 4.3 (b) onde um campo de temperaturas em nível mais alto leva a uma visibilidade das descontinuidades muito rápida em relação aos arredores, mais ainda definíveis como visto na imagem, pela diferença de cor.

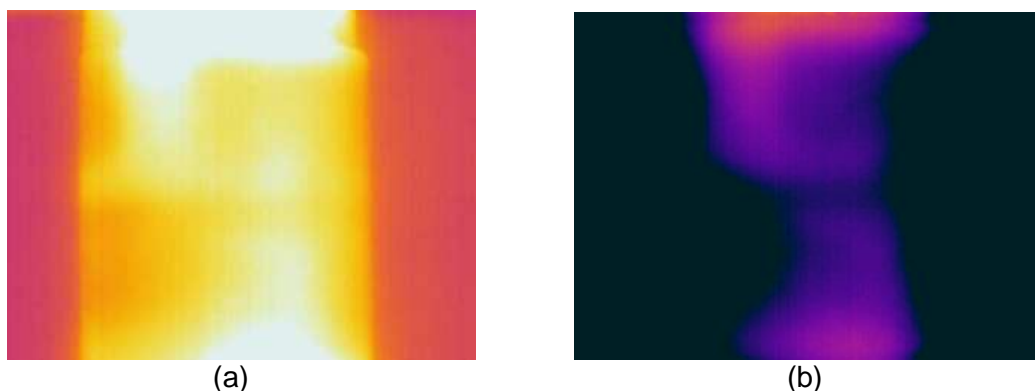


Figura 4.3 Imagens referentes ao CP04 em escala de 20-30°C, aquecimento de 15 segundos e resfriamento por 35 segundos em (a). Em (b) com campo de 30-40°C, 20 segundos de aquecimento e 65 de resfriamento.

4.2 Proposta de Procedimento de Teste em Campo

Um dos objetivos deste estudo é colaborar para um procedimento de teste que possa ser utilizado em campo na inspeção de tubulações reais de compósitos por termografia. A seguir serão considerados alguns parâmetros e comentários em relação ao ensaio que poderiam ser utilizados na prática.

4.2.1 Distância da Câmera Termográfica

A partir dos testes realizados considerou-se que uma distância aceitável do termógrafo ao equipamento ou peça sob exame, e que proporciona boa visualização, considerada para o ensaio de termografia ativa pulsada em reflexão, seria de 300 mm (ou 30 cm).

A Figura 4.4 ilustra a mesma condição de campo de temperaturas, aquecimento (aporte térmico), e tempo de resfriamento, a distâncias da câmera ao corpo de prova, diferentes: 300, 450 e 600 mm. A visualização de descontinuidades é prejudicada pela distância, pois o contraste não é o mesmo. No caso, para o CP01, são mostradas sempre as descontinuidades centrais (visíveis os defeitos “D” e “E”) para o campo de 20-30°C, tempo de aquecimento de 10 segundos e para 30 segundos de resfriamento.

É importante comentar sobre sensibilidade e resolução, relacionados à distância da câmera aos corpos de prova, na Figura 4.4. Na Figura 4.4 (a), por exemplo, o contraste é maior, mas a resolução é menor, se comparada com a Figura 4.4 (c); que possui uma diferenciação de cores mais dificultada, mas resolução da imagem do corpo de prova um pouco melhor.

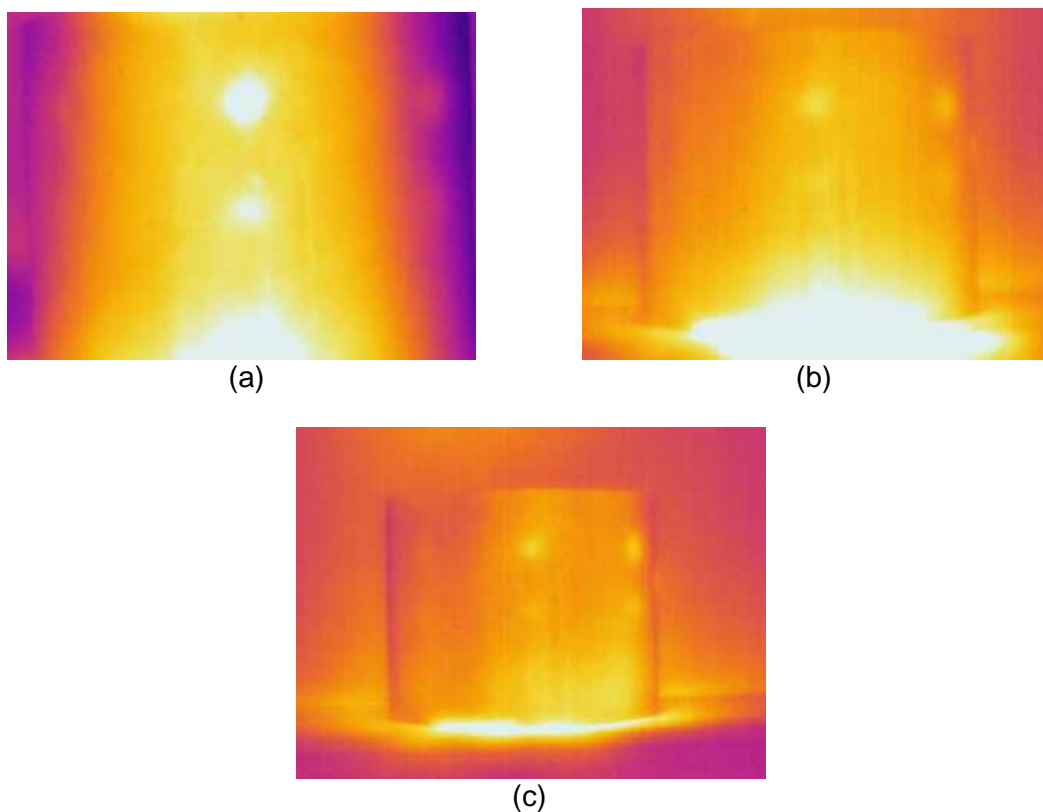


Figura 4.4 Imagens comparando distâncias da câmera ao corpo de prova. No caso, CP01, em escala de 20-30°, com 10 segundos de aquecimento e 30 segundos de resfriamento, a 300 mm da câmera (a), 450 mm (b) e 600 mm (c).

A distância de 300 mm possibilita a aplicação do pulso de calor pelo aquecedor de ar, sem maiores dificuldades, e também contribui para menor efeito de reflexões de outros objetos nas imagens obtidas e redução da transmissão atmosférica.

4.2.2 Aporte Térmico

Em relação ao modo de aplicação do soprador de ar quente como fonte térmica para o ensaio de termografia ativa, o modo em “zigue-zague” em área pré-determinada demonstrou vantagens em relação ao aquecimento com o soprador parado (estacionário). Para que o modo estacionário dê origem a um aquecimento homogêneo da superfície em exame este deve estar a certa distância do corpo de prova, para não aquecer demasiadamente uma região específica (principalmente devido à baixa difusividade térmica do material em questão) e manter uma potência suficiente para aquecê-lo na intensidade suficiente para revelar discontinuidades. Isto não foi obtido nos

testes. Nas distâncias testadas a 20, 150 e 300 mm do corpo de prova, ou o aquecimento foi excessivo (20 mm), ou foi insuficiente (150 e 300 mm).

O aquecimento dinâmico, com movimento em “zigue-zague”, respeitando os limites de uma área específica, mostrou homogeneidade muito maior e resultados práticos indiscutíveis e foi selecionado como modo padrão em todos os ensaios. O tempo de aplicação do calor foi definido com método de tentativa e erro, de acordo com a escala de temperatura utilizada.

Os corpos de prova são calhas, portanto apresentam convexidade (no caso de ensaio por reflexão), isto é, são corpos curvos e não tem uma superfície de análise totalmente reta em relação à câmera, que capta os sinais de infravermelho; além disso, descontinuidades, mesmo que fossem idênticas, em partes diferentes da peça, apresentariam respostas diferentes em relação à emissão de radiação infravermelha, com um aquecimento igual. Isto se deve aos efeitos de forma do corpo de prova, tanto a convexidade quanto a questão de resfriamento diferencial em áreas centrais ou de borda. Tudo isso demonstrou grande influência no ensaio.

Ao aplicar calor nos defeitos centrais dos corpos de prova CP01 e CP02, e respeitando a área de aquecimento padronizado, está se aquecendo parte considerável do corpo de prova ao redor das descontinuidades que se quer observar, obtendo-se depois, no resfriamento, certo padrão de transferência de calor. Já ao se aquecer descontinuidades laterais nestes mesmos corpos de prova, e também se respeitando a área padronizada, uma parte considerável do jato de ar quente será direcionada para fora do corpo de prova, além do fato que estes defeitos laterais estão nas bordas da peça. Portanto, o padrão de transferência de calor no resfriamento será muito diferente. Tanto áreas de defeito como sem defeito apresentarão temperaturas (e intensidade de tom de cinza na imagem) diferentes (teoricamente menor) em relação a uma mesma imagem de uma descontinuidade central, exatamente nas mesmas condições de ensaio.

Outra questão fundamental para o ensaio termográfico está relacionada às influências das reflexões do ambiente ou arredores. O ensaio realizado no laboratório foi em ambiente fechado, teve temperatura controlada, assim como baixa luminosidade natural e artificial, o que reduziu a influência de radiação e transmissão atmosférica.

Na prática seria importante testar diferentes tempos de aporte térmico, no modo de aplicação em “zigue-zague” com uma área definida, buscando homogeneidade de aquecimento na superfície que se quer ensaiar. O uso comum de módulos para reduzir luminosidade e outras influências externas (radiação infravermelha de outros corpos nos arredores, chuva, umidade e outras) é muito válido.

4.2.3 Distância do Aquecedor

Para o método de aplicação escolhido, de “zigue-zague” em área definida e buscando homogeneização, a distância padrão do soprador térmico ao corpo de prova foi de 20 mm, o que mostrou resultados satisfatórios.

4.2.4 Escala de Temperatura (Campo)

No ensaio em campo a escala automática de temperatura pode ser utilizada para maximizar o contraste e se conseguir melhor detecção das descontinuidades, como explicado no item 4.1.1. Mas, uma vez detectadas, as descontinuidades poderiam ser melhor avaliadas e dimensionadas se feitas sequências de termogramas em escala fixa.

Para a escala fixa, devem ser tomar cuidados com o aporte térmico (tempo de aplicação) e na própria seleção dos limites inferior, superior e intervalo. Para o que foi analisado neste estudo, um intervalo de 10°C e um limite inferior de temperatura sendo a ambiente ou 5 a 10°C acima desta leva a resultados satisfatórios.

4.3 Dimensionamento de Descontinuidades

Para avaliar o risco e gravidade referente a um defeito existente, o conhecimento de sua localização e, principalmente, de suas dimensões, é fundamental. Uma perda de adesão ou falta de adesivo de cerca de 25% da área superficial total da junta colada [23], ou uma redução de espessura significativa podem gerar uma falha catastrófica e acidentes.

Desta forma, são apresentados métodos para estimar a profundidade (ou espessura) em defeitos de perda de espessura (CP01 e CP02) e a área de uma descontinuidade encontrada em juntas (CP03 e CP04).

Para os corpos de prova CP01 e CP02, em que já se conhece a área e espessura das descontinuidades, considera-se o cálculo do volume da descontinuidade (área x espessura), visto que ambos são importantes no dimensionamento e variações durante o ensaio, assim como para a avaliação de integridade da estrutura e do método em si.

Para este estudo considerou-se um método frequentemente citado pela literatura [15, 17, 18, 19], chamado de tradicional, na tentativa de se dimensionar a profundidade de uma descontinuidade usinada de perda de espessura (CP01 e CP02), e também como forma de estudar este dimensionamento, através do ensaio termográfico, para outras descontinuidades como falta de adesão ou de adesivo em juntas coladas. O

objetivo seria avaliar este método proposto pela literatura e sua aplicação para os casos estudados.

Em comparação a este método tradicional, outro foi pensado para tentar suprir alguma deficiência do anterior. Este método, aqui chamado de método das integrais ou das diferenças de áreas leva em conta o resfriamento da região de descontinuidade e fora dela, após o fim do aquecimento, como forma de caracterizar a região sob análise e se encontrar uma relação que leve, assim como o método tradicional, a uma curva de calibração do ensaio. Esta curva, criada a partir de descontinuidades padrão, dimensionaria novas descontinuidades encontradas.

No caso dos corpos de prova CP03 e CP04 as descontinuidades são localizadas, mas apenas dimensionadas no caso do CP04, onde foram obtidas imagens com melhor definição. Este dimensionamento é realizado através de simples medição da área de defeito utilizando ferramenta do programa de processamento de imagens.

4.3.1 Cálculo de Volume do Defeito

Os cálculos de espessura dos defeitos dos corpos de prova CP01 e CP02 são muito importantes para o cálculo de defeitos reais de falta de adesão ou adesivo em juntas coladas, pois representam uma situação de mais simples detecção, para desenvolvimento da técnica; além do defeito de perda de espessura. Uma falta de adesão ou adesivo não deixa de ser também uma perda de espessura localizada entre duas superfícies (junta + tubo), pois é uma área de vazio, com condutividade térmica diferente da condutividade do compósito em estudo.

A seguir são apresentados os resultados do dimensionamento de descontinuidades pelo método tradicional [17, 18] e pelo método desenvolvido neste trabalho, o método das integrais das curvas de decaimento de temperatura ou simplesmente método das integrais.

Método Tradicional

Para os testes realizados com os corpos de prova CP01 e CP02, e a tentativa posterior de se dimensionar suas descontinuidades com o uso deste método, alguns comentários podem ser feitos.

O método descrito pela literatura para criação de uma curva de calibração, a fim de se encontrar espessura ou profundidade de defeitos em função de tempo de maior

contraste, foi testado; mas não em sua totalidade, uma vez que os corpos de prova utilizados (CP01 e CP02) possuíam poucas descontinuidades visíveis por sequência de termogramas (apenas duas, já que a terceira, na parte inferior era encoberta pelo calor conduzido e refletido pelo apoio). O método tem a intenção de gerar uma curva de calibração específica que se restringe ao corpo de prova em questão, seus defeitos presentes na superfície sob exame e aquela condição específica de distância de câmera ao objeto, escala de temperatura e aporte térmico. Todos esses itens influenciam na intensidade de tom de cinza na imagem digitalizada que é utilizada no processamento, fazendo com que a curva de calibração seja única para aquele momento em que ocorreu o teste e necessite de grande número de descontinuidades avaliadas ao mesmo tempo para ser considerada precisa. Tal fato não foi possível de ser reproduzido.

Foi possível encontrar indícios de que os resultados obtidos seguem a Equação 10 e que a curva de calibração obtida é similar à mostrada na Figura 2.13 (b), mas com poucos pontos experimentais em cada condição de teste, como pode ser observado na Figura 4.5; o que não valida os resultados obtidos nos testes deste estudo, em relação à teoria.

Na Figura 4.5 temos o tempo de pico de contraste em função do quadrado da espessura para os defeitos no CP01 e CP02. Pontos interligados representam defeitos que estão nas mesmas condições de ensaio e de posicionamento no corpo de prova.

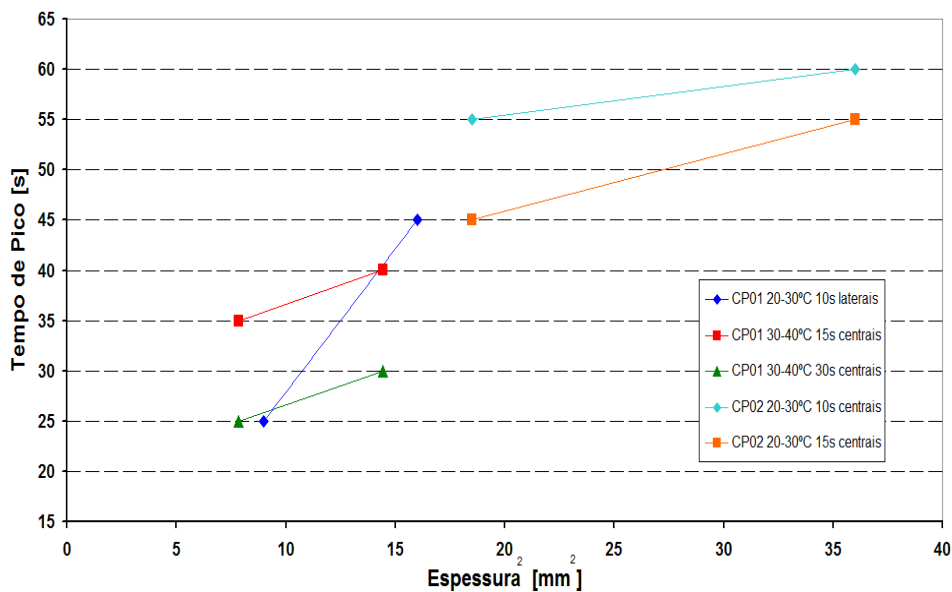


Figura 4.5 Gráfico de tempo de pico de maior contraste em função do quadrado da espessura, para condições específicas de ensaio nos corpos de prova CP01 e CP02.

Fica evidente a divisão entre os pontos referentes ao CP01 e CP02, sendo os primeiros localizados à esquerda e abaixo na Figura, devido a menores tempos de pico. Isto seria esperado, visto que os defeitos têm menor espessura (a própria espessura do corpo de prova é menor) e são visualizados mais cedo que defeitos mais rasos, onde a espessura remanescente é maior, caso do CP02.

Em todos os casos é observada a tendência crescente esperada dos pontos a mesmas condições de ensaio, isto é, quanto maior a espessura, maior o tempo de detecção em maior contraste, ou tempo de pico.

A intensidade e contraste na região do defeito em comparação com região sem defeito não deveria considerar apenas um ponto para se dimensionar a profundidade. A área do defeito poderia ser levada em conta, talvez até todo o seu volume (área e profundidade ou espessura), uma vez que o volume terá influência na transferência de calor (maior o volume do defeito, menor massa ao redor do ponto utilizado como referência), resultando em diferentes valores para intensidade de tons de cinza e, por consequência, contraste. Isto leva a diferentes valores de tempo de máximo contraste nas curvas do tipo da Figura 2.13 (a), de contraste em função do tempo de resfriamento; que por sua vez irá gerar diferentes resultados na curva de tempo de pico em função da espessura (Figura 4.5).

Não foram utilizados filtros para reduzir ruídos inerentes do sistema de aquisição (câmera termográfica e sistemas de digitalização), mas talvez o maior problema para se conseguir obter uma curva de calibração ajustada com maior precisão seja realmente a falta de pontos experimentais ou maior número de descontinuidades no corpo de prova.

Métodos das Integrais das Curvas de Decaimento de Temperatura

Para o cálculo do volume ou profundidade de descontinuidades de perda de espessura nos corpos de prova CP01 e CP02, utilizando o método das integrais, procedeu-se como explicado no item 3.4.4 do capítulo de Materiais e Métodos Experimentais.

Os resultados são mostrados na Figura 4.6. Esta mostra a diferença de área sob a curva de resfriamento (diferença entre as integrais das equações exponenciais de resfriamento das regiões com e sem defeito) em função do volume do defeito de perda de espessura, casos do CP01 e CP02. Os pontos apresentados são referentes a diferentes condições de ensaio, defeitos de área e profundidade diferentes (diferentes volumes), e em posições distintas nos corpos de prova (centrais ou laterais).

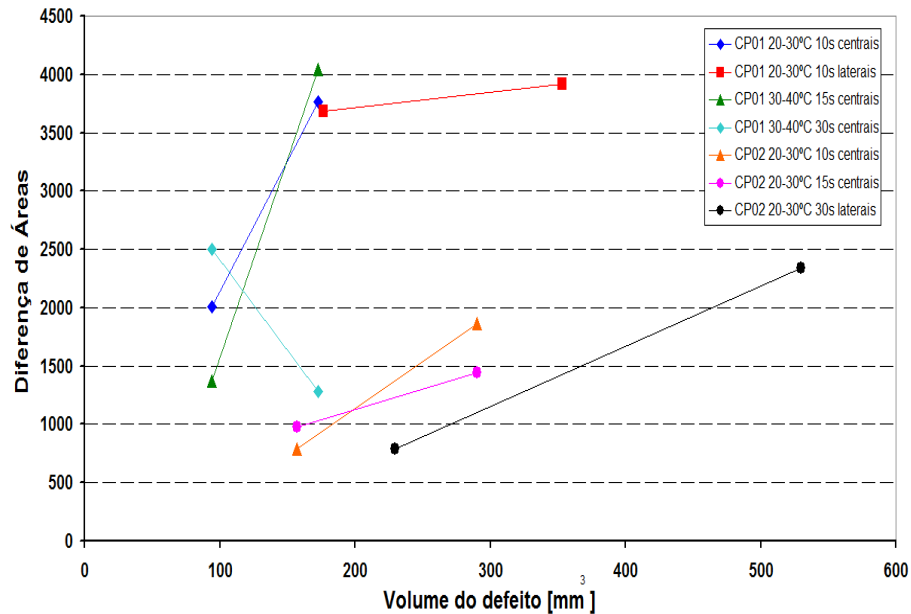


Figura 4.6 Gráfico da diferença de áreas (curvas de resfriamento) em função do volume dos defeitos, para CP01 e CP02, em diferentes condições de ensaio.

Nota-se que, para praticamente todas as condições mostradas (com exceção dos defeitos centrais do CP01 com escala de 30-40°C, 30 segundos de aquecimento, que podem até ser desconsiderados), um volume de defeito maior, dentro das mesmas condições de ensaio, leva a uma maior diferença de áreas. Isto é coerente, visto que um defeito de maior volume (vazio) terá um resfriamento diferente (mais lento) e mais desviado em relação ao resfriamento de uma região sem defeito que um defeito de volume menor.

Para cada condição de ensaio foi calculada uma área sob curva do resfriamento de uma região sem defeito, e esta foi utilizada como referência para todos os defeitos, sendo subtraída das integrais equivalentes aos outros defeitos presentes na mesma condição testada. No entanto, é necessário destacar que esta integral da área intacta foi diferente para cada condição de teste, isto é, a curva de resfriamento desta apresentou comportamento diferente em cada caso. De alguma forma isto seria esperado, pois, além de aportes térmicos diferentes em alguns casos (gerando maior ou menor aumento de temperatura total do corpo de prova), têm-se diferentes escalas de temperatura (alterando cores na imagem), resfriamentos diferentes em cada parte da meia-cana (devido a efeitos de borda) e reflexões diversas atuando durante os ensaios. Todos esses fatores afetam a intensidade de tons de cinza na imagem digitalizada final, que é analisada no perfil de linha do programa *Image Pro*, que, por sua vez, gera dados para se traçar as curvas de resfriamento.

Observando os pontos referentes ao CP01, em escala de 20-30°C e tempo de aquecimento de 10 segundos, e comparando defeitos centrais com laterais, percebe-se diferentes tendências (inclinação de reta). Apesar de se ter muito poucos pontos para se fazer uma análise mais precisa, seria esperado que todos os pontos pudessem cair dentro de uma mesma tendência linear, mas isso não ocorre. Uma hipótese é que o resfriamento seja bastante diferente entre os defeitos laterais e centrais. Os laterais teriam resfriamento mais rápido devido à maior proximidade das bordas, o que levaria a resultados diferentes.

No caso dos defeitos centrais do CP02, ensaiado em escala de 20-30°C, comparando tempos de aquecimento de 10 e 15 segundos, é visível a proximidade dos pontos referentes a cada defeito. Isto poderia, de alguma forma, mostrar que, mesmo com certo aumento de aporte térmico, a mesma tendência poderia ser identificada.

Assim como para o método tradicional de dimensionamento de defeitos, para uma precisão maior de resultados, seriam necessários corpos de prova com maior número de descontinuidades e estas com maior diversidade de espessuras a serem analisados na mesma sequência de imagens, geradas nas mesmas condições.

A intenção também foi a de traçar uma curva de calibração para dimensionar novas descontinuidades encontradas no equipamento sob exame. A partir do defeito detectado, seria gerada a curva de resfriamento deste em relação a uma região sem defeito e calculado um número de diferença de áreas sob curva em relação à referência de uma região sem defeito. Com a curva de calibração e o número de diferença de áreas estima-se a profundidade ou volume (conhecendo a área) da descontinuidade. As retas da Figura 4.6 corresponderiam a estas curvas de calibração para a condição específica de ensaio que representam.

Uma fonte de erro seria o fato de se considerar, por exemplo, para o CP01 em escala de 20-30°C e tempo de aporte de 10 segundos, que o resfriamento dos defeitos centrais e laterais foi semelhante. Na verdade a proximidade dos laterais em relação às bordas influenciou os resultados, provavelmente pelo resfriamento mais rápido, como pôde ser observado em todas as outras condições ao se comparar defeitos centrais com laterais. Os defeitos “D” (central) e o “G” (lateral), de profundidades (espessuras) muito próximas, mas áreas circunferenciais diferentes (como pode ser visto na Tabela 4.1) mostraram valores de integrais muito diferentes num primeiro momento. Mas depois, com a aplicação de uma correção, obteve-se os valores mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Dimensões e integral da curva de resfriamento (0 a 70 segundos) dos defeitos circulares de perda de espessura, centrais e laterais, do CP01 em escala de 20-30°C e tempo de aquecimento de 10 segundos.

Defeito	Espessura [mm]	Área [mm ²]	Volume [mm ³]	Área sob curva
D	2,8	78,5	172,7	17895
E	3,8	78,5	94,2	16137
G	3	176,6	353,3	18049
H	4	176,6	176,6	17818

A Figura 4.7 mostra os pontos experimentais obtidos para os defeitos “D” e “G” no resfriamento do CP01 na condição citada. Nota-se que no valor de intensidade de 235 (limite superior da escala de tons de cinza) a curva do defeito “D” é praticamente constante até 45 segundos, e daí por diante apresenta decaimento exponencial de intensidade/temperatura; diferentemente do defeito “G” cuja tendência exponencial já é notada desde o tempo zero, um indício de resfriamento mais rápido. A curva real do defeito “D” também se constituiria de um decaimento exponencial desde o tempo zero.

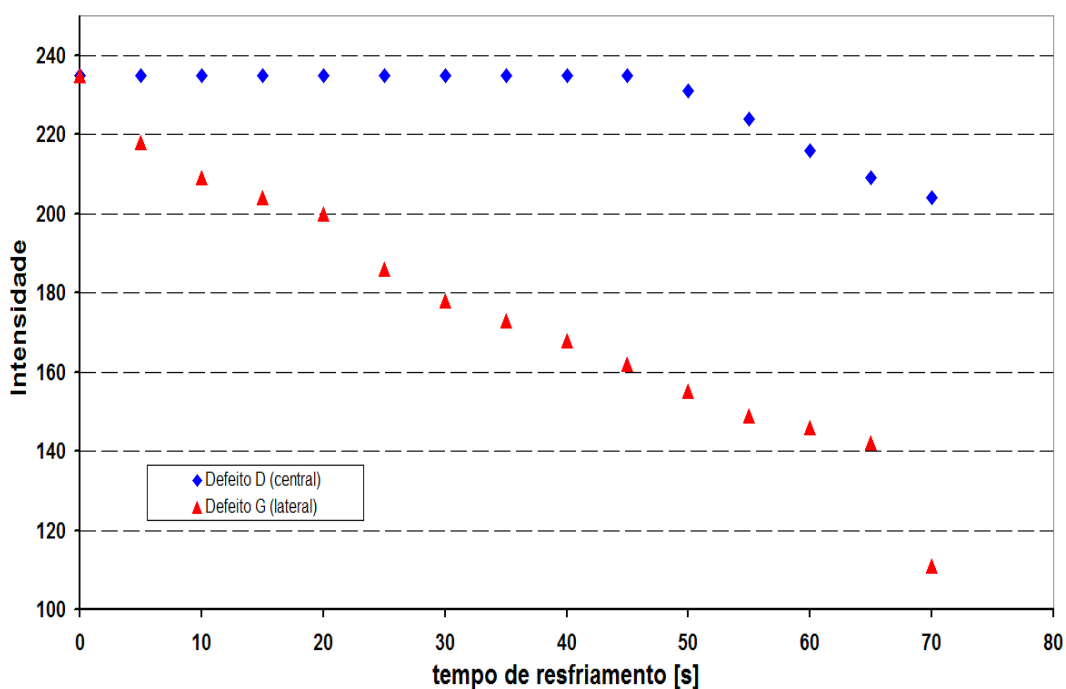


Figura 4.7 Curvas de resfriamento dos defeitos “D” e “G”, na condição de 20-30° de campo e 10 segundos de aquecimento com pontos experimentais.

Para obter uma curva estimada, próxima da real do defeito “D”, para o cálculo de integral, usa-se os pontos a partir de 45 segundos para se obter uma equação que será considerada a característica do defeito (ver item 3.4.4). No caso da curva do defeito “G”,

não é necessário este procedimento, mas uma correção da curva pode ser feita, visando deslocá-la para cima, uma vez que, pela suposição e análise de termogramas, há um resfriamento mais intenso nos defeitos laterais. Para isso, a equação da curva característica de defeito foi encontrada e calculada para tempo $x=0$, assim como a equação do defeito “D”, isto é, encontrando o valor que as curvas cruzam o eixo das ordenadas. Neste ponto, que representa o início do resfriamento, após mesmo tempo de aporte, supõe-se que ambos os defeitos estivessem em temperaturas semelhantes, já que possuem profundidades próximas, apesar de áreas circunferenciais diferentes (diâmetros diferentes). Calcula-se a diferença para tempo igual a zero e aplica-se esse número somado às intensidades em cada ponto do resfriamento para o defeito “G”. Assim, pode-se obter uma curva e equação corrigida em relação ao resfriamento mais rápido, calculando sua integral para os valores da Tabela 4.1. O mesmo procedimento foi utilizado para o defeito “H”.

Desta forma, pode se chegar às curvas reajustadas em relação a uma equação característica e corrigidas em relação ao efeito de borda, como mostrado na Figura 4.8. Pelo gráfico, fica claro a razão das integrais das curvas referentes aos defeitos “D” e “G” terem valores muito próximos, em decorrência dos pontos das curvas possuírem também valores muito semelhantes.

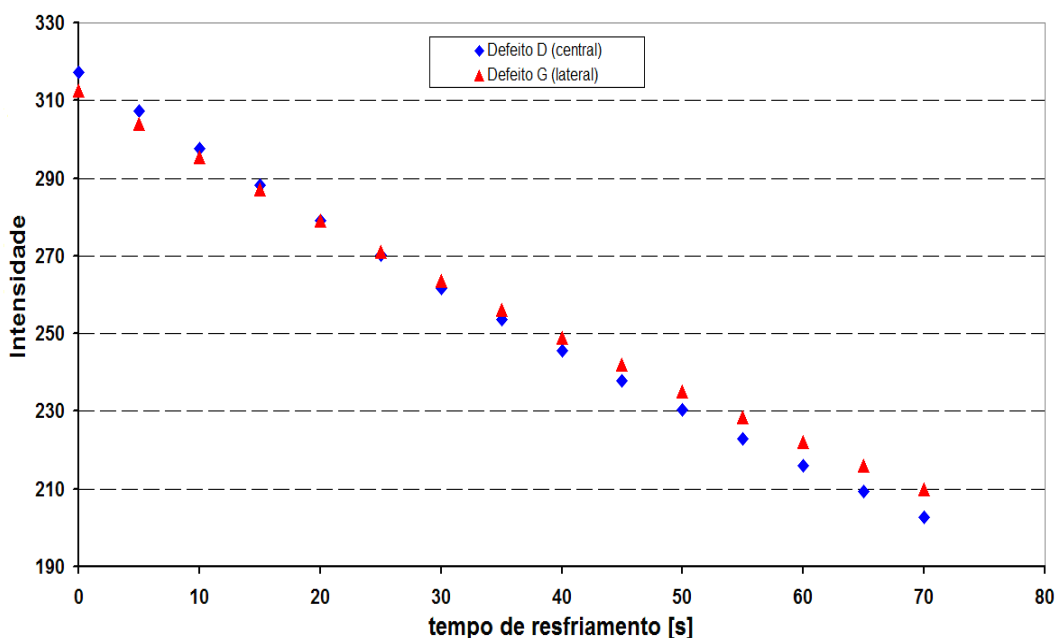


Figura 4.8 Curvas de resfriamento dos defeitos “D” e “G”, na condição de 20-30° de campo e 10 segundos de aquecimento, reajustadas a partir das equações características de cada defeito e com correção aplicada aos defeitos laterais.

Esta discussão pode se tornar um pouco complexa, visto que poderia se pensar que a integral (e por conseqüência as diferenças de áreas, que são traçadas na curva de calibração), ou o próprio resfriamento na região de defeito, é mais dependente da espessura ou profundidade do que função da área superficial deste defeito. Isto poderia ser considerado ao verificar os valores na Tabela 4.1. O par de defeitos “D” e “G”, assim como o par “E” e “H”, têm, entre si, profundidades bastante próximas e integrais também de valores semelhantes, ou não muito distantes. Mas se a comparação for feita em relação à área de seção do defeito (função do diâmetro), e por conseqüência o volume destes, parece não haver correlação linear. Por exemplo, o defeito “G” possui área 2,25 vezes maior (volume duas vezes maior) que o defeito “D”, mas integral de curva de resfriamento em valores quase iguais.

Isso leva a pensar que, provavelmente, para o caso de detecção de descontinuidades de perda de espessura em tubulações e posterior dimensionamento, a espessura ou profundidade desta, mais do que a área superficial (visível em duas dimensões) que ocupa, tem importância fundamental no cálculo através do método das integrais.

A Figura 4.9 mostra a relação da diferença de áreas sob curva de resfriamento com a espessura ou profundidade dos defeitos nos corpos de prova CP01 e CP02. À medida que se aumenta a espessura remanescente na região do defeito, isto é, diminui-se o vazio, a diferença de integrais é menor, porque a região de defeito terá menor intensidade (contraste) em relação à região sem defeito. Para este caso a curva de calibração a ser construída tem inclinação invertida em relação à curva de diferença de áreas *versus* volume do defeito.

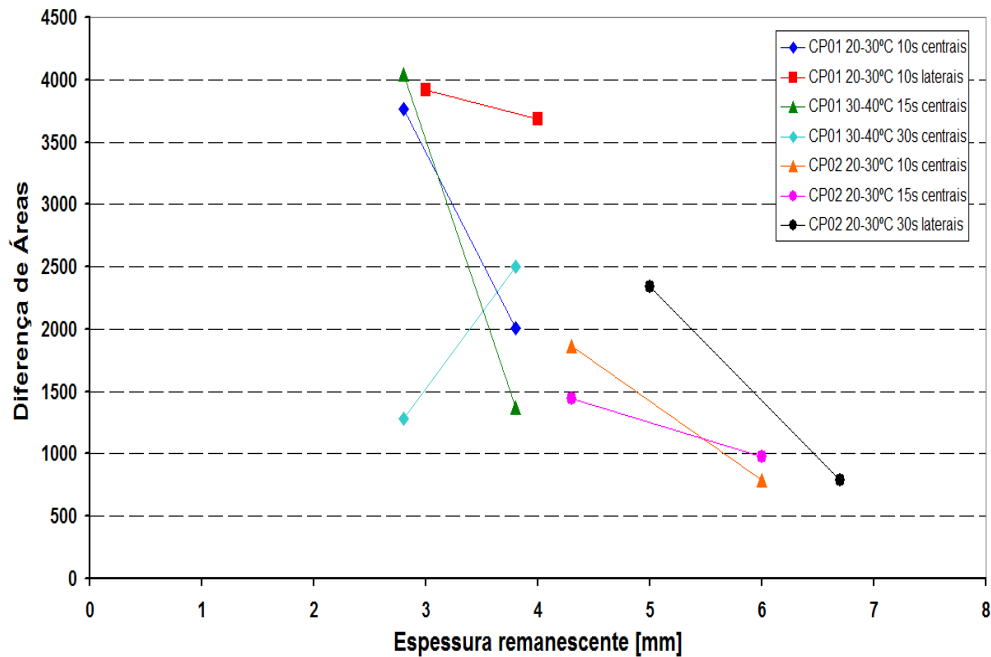


Figura 4.9 Diferença de áreas ou de integrais das curvas de resfriamento em função da profundidade em defeitos no CP01 e CP02 em várias condições de ensaio.

Entretanto, alguns outros fatores podem ser comentados. Ao se aplicar calor em uma superfície com dois defeitos de mesma espessura e áreas diferentes (caso dos defeitos “D” e “G” citados acima) haveria transferência de calor diferente, durante o resfriamento, para cada um deles; pelo menos para o método usado na análise. Como considera-se para efeito de cálculo das curvas de resfriamento apenas um ponto interno central no defeito, ao redor deste haveria um menor volume ou menor massa de fibra de vidro para conduzir o calor, no caso do defeito maior (“G”).

Portanto, supondo um aquecimento homogêneo e igual ao aquecimento do defeito “D”, o ponto no defeito “G” teria mais alta temperatura, maior intensidade (mais claro na imagem de tons de cinza), devido ao maior diâmetro. No entanto, experimentalmente, foi observado o oposto. A razão poderia ser o efeito de borda no resfriamento.

4.3.2 Defeitos nas Juntas Coladas (CP03 e CP04)

Visando os casos práticos de inspeção de juntas coladas de tubulações no campo, é de grande importância se detectar as discontinuidades, definindo sua localização e limites, para que possa ser dimensionada e avaliada.

Dependendo de suas dimensões, a discontinuidade pode caracterizar um defeito, que poderá levar a uma falha. Neste caso, deve se decidir pelo reparo ou substituição da parte danificada.

A área de região com falta de adesivo ou adesão em uma junta de tubulação deve ser estimada, pois a partir desta se verifica se terá ou não resistência de adesão para continuar operando sem vaziar ou falhar.

Detecção e Dimensionamento

Para se calcular o volume de um defeito de perda de espessura, ou decidir pela operação ou não de uma tubulação em que uma junta apresenta falta de adesão/adesivo, a área da descontinuidade deve ser calculada.

As Figuras 4.7 e 4.8 representam termogramas referentes ao CP04 e seus defeitos. Inicialmente, usa-se de ferramentas do programa de processamento de imagens para se detectar e definir melhor os contornos dos defeitos (melhoria de contraste).

Seguindo o procedimento de cálculo explicado no item 3.4.5, faz-se uma estimativa das áreas destes defeitos presentes com as medições de suas dimensões principais no plano da imagem.

O CP03 não apresentou boas sequências de termogramas. A identificação dos contornos da descontinuidade não ficou bem definida; portanto, foram dimensionados os defeitos do CP04, melhor visualizados em algumas condições específicas de ensaio.

Para se dimensionar as áreas de falta de adesão no CP04, qualquer sequência de termogramas poderia ser escolhida, contando que demonstrasse um nível de contraste satisfatório. A condição escolhida foi a de escala de temperatura 20-30°C, com 15 segundos de aquecimento, como mostrado nas Figuras 4.10 e 4.11.

A Figura 4.10 (a) representa a imagem digitalizada do termograma do CP04 na condição citada, com 35 segundos de resfriamento. Em (b) tem-se a mesma imagem em tons de cinza e em (c) com aplicação de filtro para diminuição de ruído e uso de ferramenta de melhoria de contraste. Os defeitos são visíveis na parte superior esquerda e inferior direita do corpo de prova. Além dos defeitos de falta de adesivo simulados, é possível perceber a presença de uma pequena área também com resfriamento diferente dos arredores da amostra, na parte central direita do CP04. Isto deve a uma pequena descontinuidade não simulada de mais baixa espessura na tubulação dentro da junta, não sendo considerada para o presente estudo.

São nítidas as reflexões tanto do apoio, que aqueceu, como de outras partes do corpo de prova, prejudicando a visualização de descontinuidades.

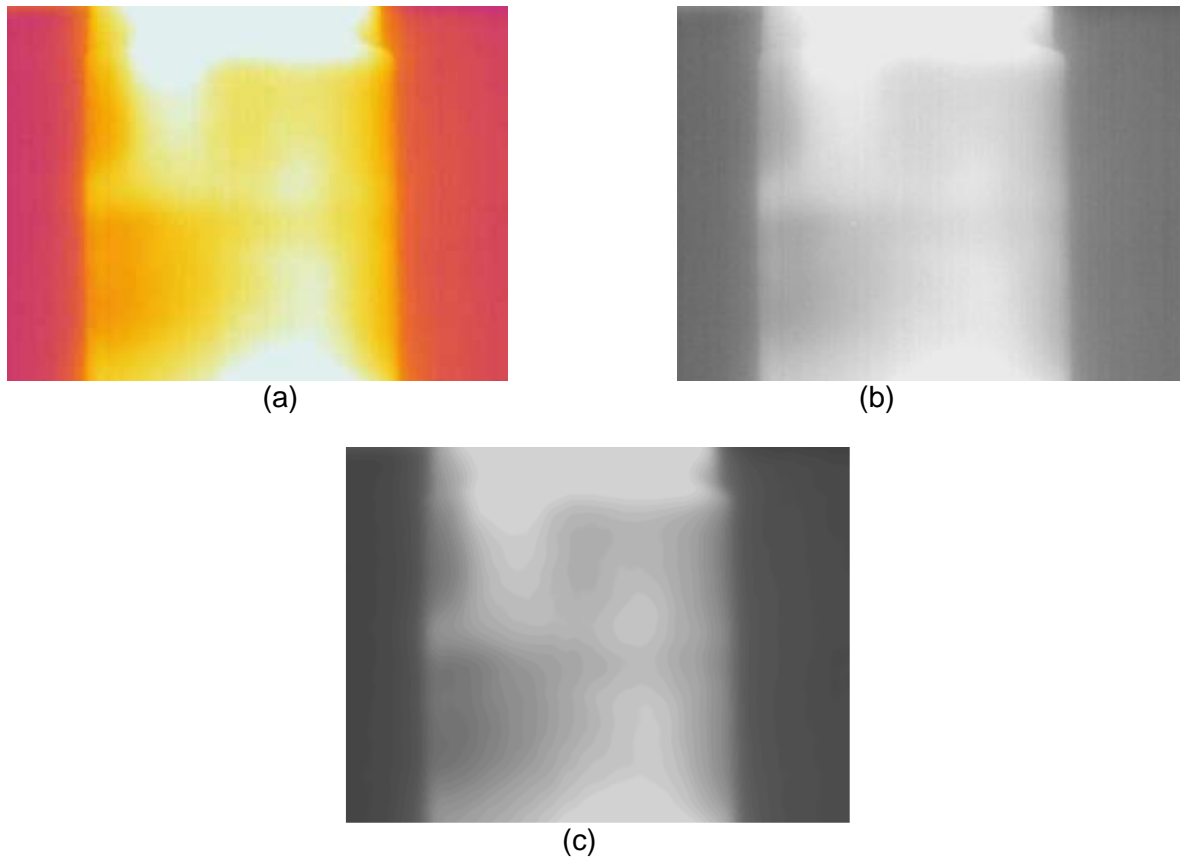


Figura 4.10 CP04 em escala de 20-30°C, aporte térmico de 15 segundos e resfriamento de 35 segundos. Em (a) a imagem original, em (b) a mesma em tons de cinza; e em (c) o uso de ferramentas do programa para melhor detecção e visualização de defeitos.

Com o uso da ferramenta de medição de distâncias do programa *Image Pro*, a partir de imagens tratadas no mesmo, foi possível estimar as medidas dos defeitos de falta de adesivo/adesão no CP04, como mostrado na Figura 4.11, e também descrito no item 3.4.5. Para obtenção das imagens e definição de fronteiras da descontinuidade foram utilizadas ferramentas de filtro de ruídos e melhoria de contraste. Neste caso, o programa fornece a distância medida em *pixels*.

A Figura 4.11 demonstra a medição das larguras (a) e dos comprimentos (b) dos defeitos, em *pixels*.

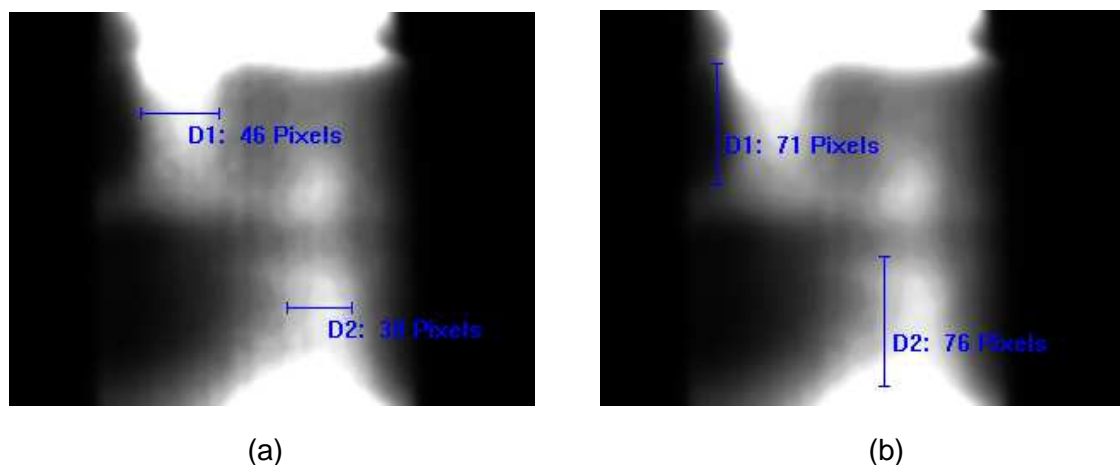


Figura 4.11 Medição das dimensões dos defeitos do CP04. Em (a) a largura e em (b), comprimento.

Estas imagens termográficas foram feitas usando distância de câmera de 300 mm; portanto, de acordo com a Tabela 3.8, um *pixel* corresponderia a um quadrado de lado 0,375 mm. Desta forma, a área das descontinuidades superior e inferior do CP04 são calculadas, de acordo com a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Dimensões dos defeitos de falta de adesão/adesivo do CP04.

Defeito	comprimento [mm]	largura [mm]	área [mm ²]
superior	26,6	17,3	459,3
inferior	28,5	14,3	406,1

Não existe grande precisão nestas medidas, considerando que os limites ou fronteiras das descontinuidades detectadas não são perfeitamente claros. O defeito superior demonstrou melhor definição e foi mais facilmente dimensionado, enquanto que o inferior demandou um tratamento de imagem mais específico. Mas não foi obtida definição suficiente para uma medida muito precisa.

5.0 CONCLUSÕES

A termografia ativa pulsada transiente em reflexão é uma técnica de ensaio não destrutivo aplicável para tubulações e juntas de material compósito em ERFV. A detecção de descontinuidades significativas de perda de espessura e falta de adesivo/adesão é possível. Descontinuidades planares em juntas e de perda de espessura em tubos podem ter suas dimensões estimadas com ajuda de ferramentas de melhoria de contraste e métodos de avaliação de perfil de curva de resfriamento e tempo de pico de contraste.

Avaliando parâmetros de teste, pode-se dizer que a distância do termógrafo ou câmera termográfica ao corpo de prova de 300 mm apresenta bons resultados, associado com aquecimento dinâmico (zigue-zague) em área pré-determinada e com soprador de ar a cerca de 20 mm da amostra. O uso da escala de temperatura automática melhora o contraste instantâneo, mas, no caso de utilização de escala fixa, para processamento de imagens ou simulação de alguma condição real, um limite inferior de temperatura ambiente ou a mesma adicionada de 10°C e um intervalo de também 10°C, até o limite superior, podem levar a resultados satisfatórios.

Tanto o método tradicional quanto o das integrais de curvas de resfriamento geram uma curva de calibração específica que se restringe ao corpo de prova em questão, seus defeitos presentes na superfície sob exame e aquela condição específica de distância de câmera ao objeto, escala de temperatura, aporte térmico, reflexões e outras influências externas. Todos esses itens influenciam na intensidade de tom de cinza na imagem digitalizada que é utilizada no processamento, fazendo com que a curva de calibração seja única para aquele momento em que ocorreu o teste.

Corpos de prova com maior número de defeitos com profundidades diferentes, aparecendo em uma mesma imagem e condição, estudados na mesma sequência de termogramas de resfriamento, poderiam levar à construção de uma curva de calibração mais precisa.

O método das integrais utilizado, levando em conta a curva característica de resfriamento das áreas com e sem defeito, deve ser mais estudado. A relação da área do defeito com sua curva de resfriamento também deve ser melhor investigada.

A medida de área de descontinuidades de falta de adesivo/adesão em juntas coladas mostrou-se simples e rápida, podendo prevenir falhas reais. Sendo o tratamento da imagem para obtenção de melhor contraste e definição de fronteiras dos defeitos o ponto mais importante.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o ensaio termográfico em campo seria interessante se testar um módulo (espécie de caixa que envolve a câmera, se prolongando até o corpo sob exame) para minimizar reflexões e influências externas gerais como vento, chuva, calor excessivo e outros. Visto que tais influências constituem fontes de erros consideráveis neste tipo de teste.

Além disso, como já explicado, realizar ensaios como os que foram feitos, mas com corpos de prova contendo número maior de defeitos de perda de espessura padronizados, seria de grande valia. Tais defeitos, em tubulação inteira (não meia-calha) de maior diâmetro e não tão alta espessura (para minimizar efeitos de convexidade e garantir bom contraste), ensaiados e processados, formariam uma fonte interessante de dados para avaliação dos métodos de dimensionamento aqui descritos.

Entender a relação da área do defeito, que é vista no plano do termograma, com sua curva de resfriamento característica provavelmente é uma tarefa complexa, mas ajudaria muito no dimensionamento de defeitos volumétricos e planares.

A realização de testes em tubulações reais ou trechos (*spool/s*), com circulação de fluido de teste e mudança de temperatura deste (aquecimento ou resfriamento), para observação de discontinuidades no transiente, seria muito interessante. Isto poderia simular casos e situações reais.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – SILVESTRE FILHO, Geraldo D. **Comportamento Mecânico do Poliuretano Derivado do Óleo de Mamona Reforçado por Fibra de Carbono: Contribuição para o Projeto de Hastes de Implante de Quadril**. Dissertação. EESC/USP, 2001.
- 2 – REINHART, T. J.; CLEMENTS, L.L. **Engineered Materials Handbook**, v.1, *Composites*. p. 27-34. Ohio, ASM International, 1987.
- 3 – SHAKELFORD, J. F. **Introduction to Materials Science for Engineers**, 4ª Edição. New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1996.
- 4 – CALLISTER, W. **Fundamentals of Material Science and Engineering**, 5ª Edição. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- 5 – BAUER, R. S. **Epoxy Resins**. *International Encyclopedia of Composites*. VCH, University of Michigan. p. 77-101, 1990.
- 6 – VAUGHAN, D. **Fiberglass Reinforcement**. *Handbook of Composites*, 2ª Edição. Chapman & Hall, p.131-155, 1998.
- 7 – FREITAS, Gustavo. **Avaliação de Defeitos em Juntas de Dutos Utilizando Materiais Compósitos, Através da Técnica Termográfica**. Dissertação. COPPE/UFRJ, 2004.
- 8 – GIBSON, A. G. **The Cost Effective Use of Fibre Reinforced Composites Offshore**. Relatório Técnico. University of Newcastle, UK, 2003.
- 9 – **NETCOMPOSITES**. *Guide to Composites: Manufacturing, Filament Winding* <<http://www.netcomposites.com/education>> Acesso em 10 de Março de 2009.
- 10 – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.
ISO 14692: Petroleum and Natural Gas Industries – Glass-Reinforced Plastics (GRP) Piping - Part 4: Fabrication, Instalation and Operation, 2002.
- 11 – MARINHO, C. et al. **Projeto de Pesquisa Avaliação de Integridade em Linhas de Fibra de Vidro**. Relatórios do Projeto PD-00743. TMEC/CENPES/PETROBRAS, 2005.

- 12 – RAJIAH, K.; RAGHAVENDRA RAO, M.N. **Damage Assessment in Composites Through NDE: Some Recent Studies in India.** Theoretical and Applied Fracture Mechanics 13, p.125-135, 1990.
- 13 – COSTA JUNIOR, A. M.; ELIAS, C. N. **A Influência da Interface na Resistência Mecânica de Materiais Compósitos Poliméricos Reforçados por Fibras.** Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 11. Águas de São Pedro, São Paulo. EPUSP, IFUSP, IPT, p.1275-1278, 1994.
- 14 – WALL, M.; FROST, S. R. **NDT of Composites – State of Art Review.** Relatório Técnico PETROBRAS/SAUDI ARAMCO. Julho, 2007.
- 15 – SHEPARD, S.M. **Thermography of Composites.** Materials Evaluation, Julho/2007, p. 690-696, 2007.
- 16 – ABENDI. **Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção.** <<http://www.abende.org.br>> Acesso em 22 de Março de 2009.
- 17 – MALDAGUE, X. P. V. **Introduction to NDT by Active Infrared Thermography.** Materials Evaluation, Setembro/2002, p. 1060-1073, 2002.
- 18 – MALDAGUE, X. P. V. **NDT Techniques: Thermographic.** *Encyclopedia of Materials: Science and Technology.* New York : John Wiley & Sons, Inc., p. 6036-6039, 2008.
- 19 – REBELLO, J. M. A. et al. **Inspeção de Materiais Compósitos por Termografia Ativa Transiente.** Soldagem e Inspeção, ano 6, nº7, p. 11-16, 2000.
- 20 – AMERON International. **Glass Fiber Reinforced Epoxy and Phenolic Pipe Systems for Offshore Applications.** <<http://www.ameron-intl.com>> Acesso em 12 de Março de 2009.
- 21 – MARINHO, C. A., DAMASCENO, S., BARBOSA, J. A., Brito, J. **Inspeção de Tubos de Resina Reforçada por Fibras de Vidro com Termografia.** 9ª COTEQ- Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador - BA, Anais do COTEQ, v. 1, 2007.
- 22 – MARINHO, C. et al. **Inspeção de Tubos de Resina Reforçada por Fibras de Vidro.** 10ª COTEQ- Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador - BA, Anais do COTEQ, v. 1, 2009.
- 23 – NORWEGIAN OFFSHORE OPERATORS ASSOCIATION. **NORSOK M-CR-622: Guideline for NDT of GRP Pipe Systems and Tanks,** 1999.