

AVALIAÇÃO DE DEFEITOS EM JUNTAS DE DUTOS UTILIZANDO
MATERIAIS COMPÓSITOS, ATRAVÉS DA TÉCNICA TERMOGRÁFICA.

Gustavo Adolfo Cavalcanti Freitas

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, D.Sc.

Prof. Fernando Luiz Bastian, D.Sc.

Prof. Luiz Carlos Pereira, D.Sc.

Prof. Protasio Ferreira Castro, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2004

FREITAS, GUSTAVO ADOLFO CAVALCANTI

Avaliação de Defeitos em Juntas de Duto Utilizando Materiais Compósitos, Através da Técnica Termográfica [Rio de Janeiro] 2004

XVIII, 142p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Metalúrgica, 2004)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1 – Digitalização de Imagens;

2 – Detecção de defeito com termografia ativa transiente em juntas coladas de dutos em materiais compósitos;

3 – Avaliação de defeitos através da digitalização e tratamento de imagens termográficas.

I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

*Dedico aos meus avós Dr João e Dna Ruth (in memorian)
e a minha esposa Sheila por serem o meu incentivo para ir em frente.*

AGRADECIMENTOS

- Ao professor João Marcos Alcoforado Rebelo pela orientação, motivação e compreensão durante o trabalho de tese.
- Aos professores Luiz Carlos Pereira e Fernando Luiz Bastian, pelo apoio no início da tese.
- A minha esposa Sheila e filhas Daniella e Isabella, por suportarem os momentos de ausência.
- Aos engenheiros Marcelo Velho (Panmarine/AMERON) e Marco Antonio (MMP/CENTRON) por ter fornecido os corpos-de-prova para a tese.
- Aos engenheiros Cesar Jose Moraes Del Vecchio, Ricardo de Oliveira Carneval, Cláudio Soligo Camerini (PETROBRÁS/CENPES/PDEP/TMEC) e Marcos Guedes Gomes Moraes (PETROBRAS/ENGENHARIA/IEEPT /IEDS) pelo apoio.
- Aos colegas do LABOEND: Antonio, Romeu, Ivan, Claudia e Marcio pelo apoio durante a realização do trabalho.
- Ao colega Anderson, que efetuou os testes de laboratório, sendo peça chave da tese.

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

AVALIAÇÃO DE DEFEITOS EM JUNTAS DE DUTOS UTILIZANDO MATERIAIS COMPÓSITOS, ATRAVÉS DA TÉCNICA TERMOGRÁFICA.

Gustavo Adolfo Cavalcanti Freitas

Março / 2004

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

O objetivo do presente trabalho foi a detecção de defeitos em juntas tubulares de material compósito utilizando a inspeção termográfica ativa transiente. Para tanto, foram simulados os defeitos mais ocorrentes em juntas conforme definido em literatura específica, perfazendo um total de quatro corpos-de-prova. Para ativação (aquecimento) foram utilizados dois tipos de fontes: lâmpadas halógenas e soprador térmico.

As imagens termográficas obtidas foram digitalizadas e processadas com o uso do programa Image Pro para análise.

Foi possível, com a técnica termográfica ativa transiente e tratamento de imagens, detectar os defeitos simulados (vazios, falta de adesivo e delaminação).

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

DEFECT EVALUATION IN COMPOSITE PIPE JOINTS BY
THERMOGRAPHIC TECHNIQUES

Gustavo Adolfo Cavalcanti Freitas

March / 2004

Advisor: João Marcos Alcoforado Rebello

Department: Materials and Metallurgical Engineering

The present work aimed to detect the discontinuities in tubular joints of composite pipes, through the use of Pulse Thermography Inspection. For that, it was produced four specimens where it was simulated the most current joint discontinuities according to specific literature. For thermal stimulation of the specimens it was used two kinds of sources such as halogen lamps and heat gun.

The acquired thermographic images was digitalized and processed through the use of Image Pro software in order to be analyzed.

Based on the results of the tests, it follows that Pulsed Thermography Technique added to image treatment it was possible to detect the simulated defects such as voids, lack of adhesive and delaminations.

ÍNDICE

FICHA CATALOGRÁFICA	ii
DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO EM PORTUGUÊS	v
RESUMO EM INGLÊS	vi
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE QUADROS	xi
ÍNDICE DE TABELAS – ANEXO 1	xv
1. OBJETIVO	19
2. HISTÓRICO	19
3. MOTIVAÇÃO	20
4. ESTRATÉGIA	20
5. REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA	21
5.1. ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS	21
5.2. INSPEÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	22
5.3. MATERIAIS COMPÓSITOS	22
5.4. DANOS EM JUNTAS COLADAS	24
5.5. TERMOGRAFIA	24
5.5.1. TEMPERATURA	25
5.5.2. CONDUÇÃO	25
5.5.3. RADIAÇÃO INFRAVERMELHA	26
5.5.4. EMISSIVIDADE	29
5.6. ENSAIO TERMOGRÁFICO APLICADO A MATERIAIS NÃO METÁLICOS	31
5.6.1. TÉCNICA DE EXCITAÇÃO PASSIVA (CONVENCIONAL)	32
5.6.2. TÉCNICA DA EXCITAÇÃO ATIVA PULSADA	32
5.6.2.1. CONTRASTE	35
5.6.2.2. VARIANTES DA TÉCNICA DE TERMOGRAFIA ATIVA PULSADA	36
5.6.2.2.1. TÉCNICA DA EXCITAÇÃO ATIVA MODULADA	38
5.6.2.2.2. TERMOGRAFIA ATIVA TRANSIENTE COM AVALIAÇÃO DE ÂNGULO DE FASE	41
5.6.2.3. EXCITADORES UTILIZADOS EM TERMOGRAFIA ATIVA	43
5.7. SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS TERMOGRÁFICOS	44
5.7.1. DETECTORES DE INFRAVERMELHO	45
5.7.2. EQUAÇÃO DA CÂMERA TERMOGRÁFICA	46
5.8. DIGITALIZAÇÃO DE IMAGEM	47
5.9. SISTEMAS DE TRATAMENTO DE IMAGEM	50
5.9.1. ORIGEM DOS RUÍDOS	50

5.9.2.	TRATAMENTO DE IMAGEM	51
5.9.3.	MODIFICAÇÃO DA INTENSIDADE	52
5.9.3.1.	SUBTRAÇÃO DE IMAGENS (FILTRO ESPECIAL).....	54
5.9.3.2.	SEGMENTAÇÃO	54
5.9.4.	APLICAÇÃO DE FILTROS ESPACIAIS	56
5.9.4.1.	FILTROS LINEARES	56
5.9.4.2.	FILTROS NÃO LINEARES	57
5.9.5.	MANIPULAÇÃO DE FREQUÊNCIAS DA IMAGEM.....	57
5.10.	LIMITES DE DETECTABILIDADE DE DEFEITO DA METODOLOGIA TERMOGRÁFICA.....	59
6.	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	60
6.1.	METODOLOGIA.....	60
6.2.	ESCOLHA DOS CORPOS - DE - PROVA.....	61
6.2.1.	AMOSTRA	62
6.2.2.	CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	63
6.2.2.1.	DELAMINAÇÃO.....	64
6.2.2.2.	FALTA DE ADESIVO OU VAZIOS	65
6.2.2.3.	FALTA DE ADESÃO	67
6.3.	TERMÓGRAFO.....	67
6.4.	INTERFACE ENTRE O TERMÓGRAFO E COMPUTADOR E PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS.....	70
6.5.	COMPUTADOR	70
6.6.	PROGRAMA DE TRATAMENTO DE IMAGEM E SINAIS	71
6.7.	MÉTODOS DE EXCITAÇÃO	71
6.7.1.	LÂMPADAS.....	72
6.7.2.	SOPRADOR TÉRMICO	72
6.7.3.	FORNO	72
6.8.	PROCEDIMENTOS DE TESTE	72
6.8.1.	TESTES COM EXCITADOR TIPO LÂMPADA HALÓGENA	76
6.8.1.1.	TESTE 1L	76
6.8.1.2.	TESTE 2L	76
6.8.1.3.	TESTE 3L	77
6.8.1.4.	TESTE 4L	77
6.8.1.5.	TESTE 5L	78
6.8.1.6.	TESTE 6L	78
6.8.1.7.	TESTE 7L	79
6.8.2.	TESTES COM EXCITADOR TIPO SOPRADOR TÉRMICO	80
6.8.2.1.	TESTE 1S	80
6.8.2.2.	TESTE 2S	80
6.8.2.3.	TESTE 3S	81
6.8.2.4.	TESTE 4S	81
6.8.2.5.	TESTE 5S	82
6.8.2.6.	TESTE 6S	83
6.8.2.7.	TESTE 7S	83

6.9.	AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS	84
6.9.1.	LÂMPADAS HALÓGENAS	85
6.9.1.1.	AVALIAÇÃO 1 (Posição - Pos).....	85
A)	TEMPO DE AQUECIMENTO DE 5 SEGUNDOS.....	86
B)	TEMPO DE AQUECIMENTO DE 10 SEGUNDOS.....	94
C)	TEMPO DE AQUECIMENTO DE 15 SEGUNDOS.....	97
6.9.1.2.	AVALIAÇÃO 2 (Distância - d).....	99
A)	TEMPO DE AQUECIMENTO DE 5 SEGUNDOS.....	99
B)	TEMPO DE AQUECIMENTO DE 15 SEGUNDOS.....	101
6.9.1.3.	AVALIAÇÃO 3 (Tempo de aquecimento - te)	103
A)	REFLEXÃO CONVEXA (Rconv).....	103
B)	TRANSMISSÃO (Trans).....	105
6.9.1.4.	AVALIAÇÃO 4 – Estado da superfície (com ou sem pintura)	106
A)	REFLEXÃO CONVEXA	106
B)	TRANSMISSÃO	108
6.9.2.	SOPRADOR TÉRMICO	110
6.9.2.1.	AVALIAÇÃO 1 (Posição - Pos).....	110
A)	TEMPO DE AQUECIMENTO DE 10 SEGUNDOS.....	110
B)	TEMPO DE AQUECIMENTO DE 30 SEGUNDOS.....	112
C)	TEMPO DE AQUECIMENTO DE 60 SEGUNDOS.....	114
6.9.2.2.	AVALIAÇÃO 2 (Distância – d).....	116
A)	TEMPO DE AQUECIMENTO DE 30 SEGUNDOS (Rconv).....	116
B)	TEMPO DE AQUECIMENTO DE 30 SEGUNDOS (Trans).....	117
6.9.2.3.	AVALIAÇÃO 3 (Tempo de aquecimento - te)	119
A)	REFLEXÃO CONVEXA (Rconv).....	119
B)	TRANSMISSÃO (Trans).....	120
6.9.2.4.	AVALIAÇÃO 4 – Estado da superfície (com ou sem pintura)	122
A)	REFLEXÃO CONVEXA	122
B)	TRANSMISSÃO	124
6.9.2.5.	AVALIAÇÃO 5 – VAZÃO DO SOPRADOR (Vz).	125
A)	REFLEXÃO CONVEXA (Rconv).....	126
B)	TRANSMISSÃO (Trans).....	127
6.9.3.	REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS	129
6.10.	AVALIAÇÃO DE DEFEITOS	130
6.10.1.	CORPO-DE-PROVA 1 (CP1)	130
6.10.2.	CORPO-DE-PROVA 2 (CP2)	132
6.10.2.1.	ESTUDO DA DELAMINAÇÃO	132
6.10.2.2.	ESTUDO DA FALTA DE ADESIVO (VAZIO)	136
6.10.3.	CORPO-DE-PROVA 3 (CP3)	137
6.10.4.	CORPO-DE-PROVA 6 (CP6)	140
7.	DISCUSSÃO	142
7.1.	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS	142
7.1.1.	LÂMPADA	142
A)	POSIÇÃO/ EXCITAÇÃO COM LÂMPADA	142
B)	DISTÂNCIA COM EXCITAÇÃO ATRAVÉS DE LÂMPADA	144
C)	TEMPO DE EXCITAÇÃO COM LÂMPADA.....	145
D)	ESTADO SUPERFÍCIE / EXCITAÇÃO COM LÂMPADA	145
7.1.2.	SOPRADOR	145

A)	POSIÇÃO/ EXCITAÇÃO COM SOPRADOR.....	145
B)	DISTÂNCIA/ EXCITAÇÃO COM SOPRADOR	146
C)	TEMPO DE EXCITAÇÃO COM SOPRADOR	146
D)	ESTADO SUPERFÍCIE/ EXCITAÇÃO COM SOPRADOR.....	146
E)	VAZÃO DO SOPRADOR	147
7.2.	REPETIBILIDADE.....	147
7.3.	DISCUSSÃO FINAL DOS TESTES PARA DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS COM CP1	147
7.4.	AVALIAÇÃO DE DEFEITOS	149
7.4.1.	CP1	149
7.4.2.	CP2.....	149
7.4.3.	CP3.....	149
7.4.4.	CP6.....	150
7.4.5.	GERAL	150
8.	CONCLUSÃO	151
9.	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	152
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	153
	ANEXO 1 – TABELAS	1

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades da fibra de vidro - tipo E [7].	22
Quadro 2 – Propriedades da matriz epoxi (bisfenol - A)[7].	23
Quadro 3 – Formatos de imagem	49
Quadro 4 – Características do CP influentes no ensaio.	61
Quadro 5 – Valores das variáveis do termógrafo	69
Quadro 6 – Tipos e valores das variáveis de teste	73
Quadro 7 – Estados do teste 1L	76
Quadro 8 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 1L.	76
Quadro 9 – Estados do teste 2L	76
Quadro 10 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 2L.	77
Quadro 11 – Estados do teste 3L	77
Quadro 12 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 3L.	77
Quadro 13 – Estados do teste 4L	77
Quadro 14 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 4L.	78
Quadro 15 – Estados do teste 5L	78
Quadro 16 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 5L.	78
Quadro 17 – Estados do teste 6L	78
Quadro 18 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 6L	79
Quadro 19 – Estados do teste 7L	79
Quadro 20 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 7L	79
Quadro 21 – Estados do teste 1S	80
Quadro 22 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 1S	80
Quadro 23 – Estados do teste 2S	80
Quadro 24 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 2S	81
Quadro 25 – Estados do teste 3S	81
Quadro 26 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 3S	81
Quadro 27 – Estados do teste 4S	82
Quadro 28 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 4S	82
Quadro 29 – Estados do teste 5S	82
Quadro 30 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 5S	82
Quadro 31 – Estados do teste 6S	83
Quadro 32 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 6S	83
Quadro 33 – Estados do teste 7S	83

Quadro 34 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 7S	84
Quadro 35 – Variáveis do teste.....	87
Quadro 36 – Quadro estatístico dos dados do CP1 na posição Rconv.....	88
Quadro 37 – Quadro estatístico dos dados do CP1 na posição Rconc	89
Quadro 38 – Quadro estatístico dos dados do CP1 na posição Trans	90
Quadro 39 – Quadro estatístico dos dados do CP1 nas posições Rconv, Rconc e Trans...	91
Quadro 40 – Estatística dos dados filtrados (alisados) do CP1 nas 3 posições, testadas.	92
Quadro 41 – Variáveis do teste.....	94
Quadro 42 – Estatística dos dados do CP1 na posição Rconv.	95
Quadro 43 – Estatística dos dados do CP1 na posição Rconc.....	95
Quadro 44 – Estatística dos dados do CP1 na posição Trans.....	95
Quadro 45 – Estatística dos dados do CP1 nas 3 posições, testadas.	96
Quadro 46 – Estatística dos dados filtrados do CP1 nas 3 posições, testadas.....	96
Quadro 47 – Variáveis do teste.....	97
Quadro 48 – Estatística dos dados do CP1 na posição Rconv.	97
Quadro 49 – Estatística dos dados do CP1 na posição Rconc.....	98
Quadro 50 – Estatística dos dados do CP1 na posição Trans.....	98
Quadro 51 – Estatística dos dados do CP1 nas três posições testadas.	98
Quadro 52 – Estatística dos dados filtrados do CP1, nas três posições testadas.	99
Quadro 53 – Variáveis do teste.....	100
Quadro 54 – Estatística dos dados do CP1 nas três distâncias testadas.	100
Quadro 55 – Estatística dos dados filtrados do CP1 nas três distâncias testadas.	101
Quadro 56 – Variáveis do teste.....	101
Quadro 57 – Estatística dos dados do CP1 nas três distâncias testadas.	102
Quadro 58 – Estatística dos dados filtrados do CP1 nas três distâncias testadas.	102
Quadro 59 – Variáveis do teste.....	103
Quadro 60 – Estatística dos dados do CP1 para os tempos testados.	103
Quadro 61 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para os tempos testados.....	104
Quadro 62 – Variáveis do teste.....	105
Quadro 63 – Estatística dos dados do CP1 para os tempos testados.	105
Quadro 64 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para os tempos testados.....	106
Quadro 65 – Variáveis do teste.....	107
Quadro 66 – Estatística dos dados do CP1 para os tipos de superfície testados.	107

Quadro 67 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para os tipos de superfície testados..	108
Quadro 68 – Variáveis do teste.....	108
Quadro 69 – Estatística dos dados do CP1 para os tipos de superfície testados.	109
Quadro 70 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para os tipos de superfície testados..	109
Quadro 71 – Variáveis do teste.....	110
Quadro 72 – Estatística dos dados do CP1 para as 3 posições testadas.	111
Quadro 73 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para as 3 posições testadas.....	111
Quadro 74 – Variáveis do teste.....	112
Quadro 75 – Estatística dos dados do CP1 para as 3 posições testadas.	112
Quadro 76 - Estatística dos dados filtrados do CP1 para as 3 posições testadas.....	113
Quadro 77 – Variáveis do teste.....	114
Quadro 78 – Estatística dos dados do CP1 para as 3 posições testadas.	114
Quadro 79 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para as 3 posições testadas.	115
Quadro 80 – Variáveis do teste.....	116
Quadro 81 – Estatística dos dados do CP1 para as 3 distâncias testadas.	116
Quadro 82 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para as 3 distâncias testadas.....	117
Quadro 83 – Variáveis do teste.....	117
Quadro 84 – Estatística dos dados do CP1 para as 3 distâncias testadas.	118
Quadro 85 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para as 3 distâncias testadas.....	118
Quadro 86 – Variáveis do teste.....	119
Quadro 87 – Estatística dos dados do CP1 para os 3 tempos de excitação testados. ...	119
Quadro 88 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para os 3 tempos de excitação testados.	120
Quadro 89 – Variáveis do teste.....	120
Quadro 90 – Estatística dos dados do CP1 para os 3 tempos de excitação testados. ...	121
Quadro 91 – Estatística dos dados do CP1 para os 3 tempos de excitação testados, com filtragem.	121
Quadro 92 – Variáveis do teste.....	122
Quadro 93 – Estatística dos dados do CP1 para os tipos de superfície testados.	122
Quadro 94 – Estatística dos dados do CP1 para os tipos de superfície testados com filtragem.	123
Quadro 95 – Variáveis do teste.....	124
Quadro 96– Estatística dos dados do CP1 para os tipos de superfície testados.	124

Quadro 97 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para os tipos de superfície testados..	125
Quadro 98 – Variáveis do teste.....	126
Quadro 99 – Estatística dos dados do CP1 para as vazões V1 e V2.	126
Quadro 100 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para as vazões V1 e V2.....	127
Quadro 101 – Variáveis do teste.....	127
Quadro 102 – Estatística dos dados do CP1 para as vazões V1 e V2.	128
Quadro 103 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para as vazões V1 e V2.....	128
Quadro 104 – Variáveis do teste.....	129
Quadro 105 – Estatística dos dados de repetibilidade filtrados do CP1.....	129
Quadro 106 – Variáveis do teste.....	130
Quadro 107 – Variáveis do teste.....	132
Quadro 108 – Variáveis do teste.....	137
Quadro 109 – Variáveis do teste.....	140
Quadro 110 – Resumo da avaliação do corpo-de-prova 1 com reflexão.	147
Quadro 111 – Resumo da avaliação do corpo-de-prova 1 com transmissão.....	148

ÍNDICE DE TABELAS – ANEXO 1

Tabela A.1 – Valores de line profile do corpo-de-prova na posição Rconv (primeira parte).....	2
Tabela A.2 – Valores de line profile do corpo-de-prova na posição Rconv (segunda parte).....	2
Tabela A.3 – Valores de line profile do corpo-de-prova na posição Rconv (terceira parte).....	3
Tabela A.4 – Valores de line profile do corpo-de-prova na posição Rconv (quarta parte)	3
Tabela A.5 – Valores de line profile do corpo-de-prova na posição Rconv (última parte)	4
Tabela B.1 – Valores de line profile do corpo-de-prova na posição Rconc (primeira parte).....	4
Tabela B.2 – Valores de line profile do corpo-de-prova na posição Rconc (segunda parte).....	5
Tabela B.3 – Valores de line profile do corpo-de-prova na posição Rconc (terceira parte).....	5
Tabela B.4 – Valores de line profile do corpo-de-prova na posição Rconc (quarta parte)	6
Tabela B.5 – Valores de line profile do corpo-de-prova na posição Rconc (última parte)	6
Tabela C.1 – Valores de line profile do corpo-de-prova na posição Trans (primeira parte).....	7
Tabela C.2 – Valores de line profile do corpo-de-prova na posição Trans (segunda parte).....	7
Tabela C.3 – Valores de line profile do corpo-de-prova na posição Trans (terceira parte)	8
Tabela C.4 – Valores de line profile do corpo-de-prova na posição Trans (quarta parte)8	
Tabela C.5 – Valores de line profile do corpo-de-prova na posição Trans (última parte).	9
Tabela D – Tabela com os dados dos 3 modos de posição.....	9

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Espectro de radiação eletromagnética [18].	27
Figura 2 – Espectros de radiação com indicação de máximo pela linha tracejada [18].	29
Figura 3 – Efeito da emissividade na banda de radiação [12].	30
Figura 4 – Interação de radiação com o corpo [11].	31
Figura 5 – Sistema típico para termografia ativa baseada em excitação fototérmica e câmera de infravermelhos [17].	33
Figura 6 – (a) Curvas de contraste obtidas pela subtração pela 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 [17].	34
Figura 7 – Relação da resposta térmica (temperatura) com a espessura [17].	36
Figura 8 – Curvas de contraste $C_A(t)$	36
Figura 9 – Variação no ângulo de fase do sinal termográfico	38
Figura 10 – Sistema de termografia ativa modulada (esquemático) [14].	40
Figura 11 – Imagens tomadas durante um ciclo de modulação [14].	40
Figura 12 – Obtenção de imagem com avaliação de ângulo de fase com modulação em 0,93 Hz (Lock-in thermography)	40
Figura 13 – Evolução da temperatura com o tempo (a) e espectro de frequências (b) [19].	41
Figura 14 – Corpo de prova utilizado para análise comparativa das técnicas.	42
Figura 15 – Imagem via técnica Lock-in Thermography .	43
Figura 16 – Imagem obtida via termografia transiente com avaliação de fase.	43
Figura 17 – Esquemático de excitação com ultra-som.	44
Figura 18 – Esquemático dos internos de um termógrafo.	45
Figura 19 – Representação da operação de digitalização [30].	48
Figura 20 – Comparação entre o sinal digital e analógico [25].	50
Figura 21 – Componentes que geram ruído na imagem termográfica [28].	50
Figura 22 – Histogramas de imagem [29]	53
Figura 23 – Fator gama.	54
Figura 24 – Aplicação de segmentação	55
Figura 25 – Nível de Segmentação (threshold) aplicado ao histograma da imagem.	55
Figura 26– Esquemático do processo de filtragem linear.[31].	56
Figura 27 – Aplicação de filtros de frequência [25].	58
Figura 28 – Corpo de prova (CP), com defeito.	59
Fotografia 1 – Amostra da AMERON. No detalhe, a junta tipo ponta e bolsa.	63

Figura 29 – Seção do tubo para corte, e o detalhe dos setores de 60 mm de comprimento.....	63
Figura 30 – Simulação de junta colada.....	64
Figura 31 – Representação da delaminação real (dimensionado por ultra-som) do CP 6 (região hachurada).....	65
Figura 32 – Peças coladas para a simulação do problema de adesão [17].	65
Figura 33 – Simulação da falta de adesão através de filmes desmoldantes (CP2) [17].	66
Figura 34 – Simulação da falta de material adesivo através de vazios (furos internos, parte côncava, seção superior – CP1). [17].	66
Figura 35 - Furos simulando vazios nas seções a serem ensaiadas (CP3) [17].....	67
Fotografia 2 – Termógrafo utilizado na tese	68
Figura 36 – Tomada de imagem térmica.....	74
Figura 37 – Fases de manipulação da imagem.....	86
Figura 38 – Perfis no domínio da frequência (a) e espaço (b e c) do CP1.	92
Figura 39 – Perfis referentes aos quadros 39 e 40.....	93
Figura 40 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 45 e 46.....	96
Figura 41 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 51 e 52.....	99
Figura 42 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 54 e 55.....	101
Figura 43 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 57 e 58.....	102
Figura 44 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 60 e 61.....	104
Figura 45 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 63 e 64.....	106
Figura 46 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 66 e 67.....	108
Figura 47 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 69 e 70.....	109
Figura 48 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 72 e 73.....	111
Figura 49 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 75 e 76.....	113
Figura 50 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 78 e 79.....	115
Figura 51 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 81 e 82.....	117
Figura 52 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 84 e 85.....	118
Figura 53 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 87 e 88.....	120
Figura 54 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 90 e 91.....	121
Figura 55 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 93 e 94.....	123
Figura 56 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 96 e 97.....	125
Figura 57 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 99 e 100.....	127
Figura 58 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 102 e 103.....	128
Figura 59 – Medição do corpo-de-prova 1	131

Figura 60 – Termogramas e perfis do CP2.....	133
Figura 61 – Resfriamento do CP 2	134
Figura 62 – Termograma segmentado e perfil da segmentação.	135
Figura 63 – Medida plana da imagem segmentada.	135
Figura 64– Termogramas e perfis do CP2 (Falta de cola).....	136
Figura 65 – Termograma segmentado e perfil da segmentação.	137
Figura 66 – Esquemático do CP3 e o melhor termograma.....	138
Figura 67 – Resultado de subtração de fundo.....	138
Figura 68 – Perfil dos defeitos da parte superior e inferior.	139
Figura 69 – Perfil dos defeitos da parte superior do CP3.....	139
Figura 70 – Perfil dos defeitos da parte inferior do CP3.....	140
Figura 71 – Operação de subtração com o CP6.....	141
Figura 72 – Segmentação do termograma resultante da subtração.	141
Figura 73 – Contraste ao longo do tempo do CP6.....	142

1. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo a definição de parâmetros de referência que subsidiem o desenvolvimento de metodologia de avaliação, qualitativa e quantitativa, de defeitos em juntas coladas utilizadas em dutos fabricados em materiais compósitos de base polimérica, mais especificamente, polímero reforçado com fibra de vidro. Todo o trabalho será desenvolvido com base nos dados obtido via termografia e técnicas de tratamento e interpretação de dados de imagens, como ferramenta complementar.

2. HISTÓRICO

Através dos tempos, com o avanço da tecnologia, surgem desafios cada vez maiores para os equipamentos, e paralelamente para os materiais que os compõe, tendo estes que dispor de características, as mais amplas possíveis, para desempenho adequado em condições consideradas como extremas (críticas) para os materiais convencionalmente utilizados. Um grande problema que assombra a era do aço desde o seu início é a corrosão. Diversas soluções têm sido desenvolvidas, mas todas de caráter temporário (revestimentos sintéticos) ou de elevado custo, como o uso de ligas especiais (monel, inconel e etc).

Dentro do cenário industrial químico e de processo, os riscos associados e custos envolvidos são por demais elevados, sendo imprescindíveis medidas que garantam a integridade dos equipamentos durante sua campanha, evitando, assim, a possibilidade de lucro cessante, danos ambientais e até perda de vidas humanas. Sendo os produtos e subprodutos gerados em indústrias petroquímicas de alta corrosão associada, os materiais compósitos, principalmente os de base polimérica, têm ganhado importância, por suas características de excelente relação peso/resistência e notável resistência à corrosão [1].

3. MOTIVAÇÃO

Com a inserção dos materiais compósitos de base polimérica no contexto industrial, tem se discutido como avaliar os sistemas nestes materiais ao longo de sua vida operacional. Assim surge a necessidade de se dispor de métodos de exame que sejam adequados às características específicas destes novos materiais, que apresentam grande diferença em relação aos materiais metálicos usuais. Os métodos de ensaios não destrutivos, usualmente aplicados, apresentam limitações devido às particularidades dos novos materiais (alta heterogeneidade; irregularidades superficiais; anisotropia e baixa condutividade térmica) e precisam ser ajustados.

Dentre os métodos de avaliação não destrutivos para materiais compósitos, o ultra-som [2], a emissão acústica [3] e a termografia [4] destacam-se dos demais. As principais características destes métodos não-destrutivos são a alta sensibilidade, boa produtividade e possibilidade de automação.

4. ESTRATÉGIA

Como ensaio não-destrutivo, para a avaliação de materiais poliméricos reforçados com fibra de vidro (PRFV), optou-se pela termografia por ser a técnica que reúne características mais adequadas às particularidades do material em questão, ou seja, imune sob certos aspectos, à rugosidade superficial e anisotropia apresentada por componentes em materiais compósitos. Uma outra razão é a baixa difusibilidade desses materiais, o que cria possibilidades interessantes para certas metodologias aplicadas em termografia, no caso a termografia ativa com excitação transiente, o que será abordado posteriormente de forma pormenorizada. Os dados obtidos foram gravados em meio eletrônico com a utilização de sistema de digitalização de imagem e posterior tratamento e interpretação com a utilização de programa específico para manipulação de imagens.

Na confecção dos corpos-de-prova, foram considerados os tipos e geometria dos defeitos mais ocorrentes na prática, reportados pela bibliografia especializada, normas técnicas e histórico levantados em campo, ao longo da vida operacional de sistemas em materiais poliméricos reforçados com fibra de vidro.

5. REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA

5.1. ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS

A partir de 1920 surgem os primeiros ensaios não destrutivos (END), ou seja, surge nesta época a novidade de se examinar sem provocar danos ao objeto sob análise e desde então estes têm sido desenvolvidos de modo, principalmente, a aumentar confiabilidade, produtividade e minimizar custos. Com o desenvolvimento contínuo da tecnologia dos materiais e equipamentos para atender aos anseios de crescimento do homem, inclusive dos itens de segurança, é exigido, também, o desenvolvimento simultâneo das metodologias de avaliação via END, tendo estes que serem melhorados continuamente de forma a atender aos requisitos dos novos cenários industriais, tais como, novas condições de operação, tensão, novos materiais e novas regras governamentais em segurança e meio ambiente. A importância dos ensaios não destrutivos para a indústria está diretamente ligada à qualidade dos produtos que esta gera e/ou o grau de risco relacionado ao desempenho de determinado equipamento ou peça testada, ou seja, o impacto da falha quando em operação.

Os ensaios não destrutivos podem ser definidos como um grupo de ciências que se ocupa dos aspectos de uniformidade, qualidade e aplicabilidade de materiais e estruturas. A ciência dos ensaios não destrutivos incorpora todas as tecnologias para a detecção e medição de propriedades e características significantes, bem como discontinuidades, de determinado corpo ou sistema sem alterar o estado, característica ou condição destes para uso futuro.

De acordo com a ASNT (**American Society for Nondestructive Testing**), classificam-se em seis grupos as principais metodologias de ensaios não destrutivos:

- visual;
- radiação penetrante (radiografia);
- vibração (ultra-som, emissão acústica);
- eletromagnética (ACFM);
- térmica (termografia);
- eletroquímica (potenciais eletroquímicos);

No presente trabalho a metodologia a ser utilizada será a termografia

5.2. INSPEÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são fortemente heterogêneos por definição, fato que gera complicações importantes na aplicação de alguns ensaios não destrutivos que devem em geral ser adaptados para estes materiais. Métodos que são alternativos para materiais tradicionais podem se tornar clássicos para materiais compósitos.

5.3. MATERIAIS COMPÓSITOS

Materiais compósitos são aqueles constituídos por dois ou mais materiais, com o objetivo de atingir uma potencialização de propriedades mecânicas e químicas, centralizando em um só elemento o que é particular de cada material constituinte. Os materiais compósitos de matriz polimérica oferecem diversas vantagens quando comparados aos materiais convencionais para diversas aplicações, como redução de peso, resistência à intempérie, facilidade de instalação (montagem sem a necessidade de aporte térmico) e grande flexibilidade no atendimento de requisitos de projeto (geometria) [5].

Há uma vasta variedade de matrizes e fibras para constituição de materiais compósitos. As propriedades do material compósito são dependentes das propriedades dos seus constituintes. Os materiais compósitos reforçados por fibra de vidro, são os mais utilizados no mercado [6]. Os quadros 1 e 2 apresentam as propriedades da fibra de vidro e matriz de base epoxídica, que serão de interesse do presente trabalho. No caso em estudo, serão considerados os polímeros reforçados com fibras de vidro, ou seja, uma matriz polimérica de base epoxídica contendo fibras em seu interior.

Quadro 1 – Propriedades da fibra de vidro - tipo E [7].

PROPRIEDADES			
Densidade (kg m^{-3})	Capacidade Térmica ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Condutividade Térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Módulo de Elasticidade (E) (MPa)
2.490	710	3,0	72.400

Quadro 2 – Propriedades da matriz epoxi (bisfenol - A)[7].

PROPRIEDADES			
Densidade (kg m-3)	Capacidade Térmica (J kg-1 K-1)	Condutividade Térmica (W m-1 K-1)	Módulo de Elasticidade (E) (MPa)
1.250	1.050	0,3	2.750

Dessas propriedades resultam as características do compósito de acordo com as equações de Chamis [8], abaixo:

$$V_f + V_m = 1 \quad [1]$$

$$\rho_l = V_f \rho_f + V_m \rho_m \quad [2]$$

$$C_l = 1/\rho_f (V_f \rho_f C_f + V_m \rho_m C_m) \quad [3]$$

$$k_{L11} = V_f k_{F11} + V_m k_m \quad [4]$$

$$k_{L22} = (1 - \sqrt{V_f})k_m + (k_m \sqrt{V_f}) / (1 - \sqrt{V_f} (1 - (k_m / k_{F22}))) \quad [5]$$

Onde:

C_f - capacidade térmica da fibra;

C_l - capacidade térmica do laminado (compósito);

C_m - capacidade térmica da matriz;

V_m - fração volumétrica da matriz;

V_f - fração volumétrica da fibra;

k_{F11} - condutividade térmica da fibra ao longo do seu eixo longitudinal;

k_{F22} - condutividade térmica da fibra no sentido transversal;

k_{L11} - condutividade térmica do laminado (compósito) no sentido longitudinal;

k_{L22} - condutividade térmica do laminado (compósito) no sentido transversal;

k_m - condutividade térmica da matriz;

ρ_f - densidade da fibra;

ρ_l - densidade do laminado (compósito);

ρ_m - densidade da matriz.

Como as propriedades térmicas podem apresentar grande caráter anisotrópico, avaliam-se as mesmas em duas direções, no mínimo [9].

5.4. DANOS EM JUNTAS COLADAS

Em juntas coladas, em geral, os defeitos com maior possibilidade de ocorrer, são as porosidades, trincas e falta de adesivo (vazios). Na interface entre o adesivo e as superfícies a serem coladas, caso existam substâncias estranhas como graxas ou óleos, haverá contato mais não haverá resistência (aderência entre superfícies). O defeito mais comum, freqüente em sistemas utilizando dutos em polímero reforçado com fibra de vidro, se concentra na falta de adesivo, descolamento ou delaminações em juntas coladas [10], que podem ser detectadas por vazamento na fase de ensaio hidrostático ou somente, quando a falta de adesivo não é completa, em operação devido às vibrações induzidas, que fazem as regiões com quantidade de adesivo abaixo do recomendado, vir a falharem. Tem sido relatado que a maioria das falhas em serviço dos sistemas em materiais compósitos, origina-se de erros cometidos na fase de montagem. A importância do fato mostra a necessidade de se dispor de ferramentas de avaliação que permitam, além da detecção, a formação de banco de dados para qualificação de projetos e procedimento de montagem destes sistemas.

5.5. TERMOGRAFIA

A termografia é uma técnica baseada na detecção de radiação térmica emitida pelos corpos. Como qualquer corpo acima da temperatura de zero absoluto, emite radiação contendo a freqüência ou comprimentos de onda na faixa da região do infravermelho do espectro eletromagnético da luz, a faixa de trabalho dos sensores de termografia se situa dentro desta faixa (0.75 à 1000 μm) [11]. Na área de termografia, este intervalo se subdivide em outros com nomenclaturas próprias e que classificam os equipamentos de termografia, destacando-se o infravermelho de campo próximo (**NIR – Near infrared**), infravermelho de onda média (**MWIR – Mid-wavelength infrared**) e infravermelho de onda longa (**LWIR – Long wavelength infrared**). Grande parte das câmeras termográficas trabalha na faixa do infravermelho de onda média.

Como a emissão de radiação dos corpos ocorre em função da movimentação, a nível atômico, dos seus constituintes, a intensidade dessa emissão é proporcional a temperatura do corpo. Na presença de alguma descontinuidade, o fluxo de calor sofrerá alterações, que resultarão em diferenças de temperatura na superfície do material, sendo este o principal mecanismo de detecção de dano com o uso da técnica termográfica.

Existem três formas de transferência de calor: radiação, condução e convecção, sendo importantes para termografia, a condução e a radiação.

5.5.1. TEMPERATURA

A variável Temperatura é definida como a medida da energia cinética média dos átomos, moléculas ou íons de uma substância, dada em graus Centígrados, Kelvin ou Fahrenheit. Sempre que existir um gradiente de temperaturas no interior de um sistema haverá transferência dessa energia no sentido das temperaturas mais altas para as mais baixas. Essa energia em trânsito é chamada Calor, e, o processo de transporte é denominado Transmissão de Calor.

Tanto a Temperatura como o Calor são grandezas estatísticas, não passíveis de observação direta, mas medidas através de alterações físicas e químicas em corpos de referência. Ou seja, a medida de temperatura sempre está associada à algum tipo de resposta do corpo sob exame, sendo uma medida indireta, e desta forma passível de todas as influências de relações entre as propriedades utilizadas como referência.

5.5.2. CONDUÇÃO

É a transferência (fluxo) de energia entre partes adjacentes de um sólido em consequência da existência de um gradiente térmico no mesmo. Na condução, o calor se transfere a camadas sucessivas do material através da difusão da energia cinética média das moléculas. Essa energia é maior nas regiões mais quentes e menor nas mais frias. A condutibilidade térmica (k) é o parâmetro que determina a maior ou menor capacidade de um material em conduzir calor.

A transferência pode ser no estado estacionário ou variar com o tempo, o que se denomina estado não estacionário. No estado não estacionário, o fluxo de calor varia com o tempo. Esse comportamento se mantém até que o fluxo de calor não mais varie, alcançando-se assim o estado de equilíbrio.

Na teoria do fluxo no estado não estacionário, a temperatura a uma certa profundidade da espessura de determinado material varia com o tempo segundo a equação abaixo [12]:

$$T_d = T_n - \left[(T_n - T_a) \times f_e \times \left(\frac{x}{\sqrt{\alpha t}} \right) \right] \quad [6]$$

Onde:

f_e - função de erro gaussiano para $\sqrt{\alpha t}$;

T_a - temperatura original do material e, conseqüentemente do meio ambiente;

T_d - temperatura em um ponto, ao longo da espessura;

T_n - nova temperatura da superfície;

t - tempo decorrido;

α - difusividade térmica.

A difusividade térmica do material expressa a velocidade com que o calor o atravessa e é expressa como uma razão da mudança de temperatura com o tempo. É muito usada no fluxo de estado não estacionário de calor. Cada material tem uma difusividade térmica diferente e obtida da equação 7, abaixo [12]:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \times C_p} \quad [7]$$

Onde:

k – condutividade térmica;

ρ - densidade;

C_p – calor específico.

5.5.3. RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

Radiação é a transferência de calor através de ondas eletromagnéticas. Todos os corpos emitem naturalmente radiação eletromagnética em função da temperatura absoluta de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann e desta forma podem trocar calor sem qualquer contato físico, mesmo no vácuo. A maior ou menor capacidade do corpo em emitir radiação eletromagnética é dada pela sua emissividade (ϵ), parâmetro que pode variar entre 0 e 1.

Quando uma superfície é aquecida ocorre um aumento em energia das partículas atômicas que levam a um correspondente aumento da temperatura e da energia emitida

por essa partícula. A agitação térmica dessas partículas atômicas produz uma forma de radiação de energia eletromagnética conhecida como radiação infravermelha. O **quantum** de energia do infravermelho produz frequências (comprimentos) de ondas localizadas entre as microondas e a luz visível no espectro magnético. Figura 1, abaixo.

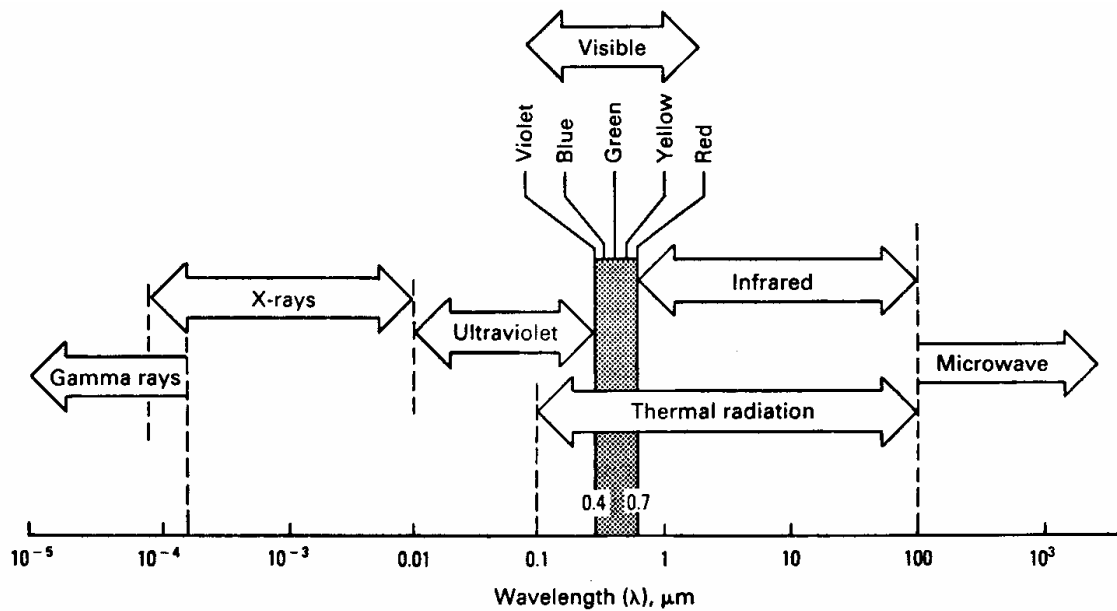


Figura 1 – Espectro de radiação eletromagnética [18].

A intensidade de radiação emitida por um sólido depende da temperatura e da natureza da superfície. Em baixas temperaturas a intensidade de radiação é baixa e consiste em sua maior parte de comprimentos de onda longos. Em temperaturas mais elevadas, a intensidade da radiação aumenta e a banda de comprimentos de onda assume valores menores.

Pode-se escrever a intensidade da taxa de emissão de energia, de modo independente da temperatura, através da Lei de Stefan-Boltzmann, equação 8, abaixo:

$$W = \varepsilon BT^4 \quad [8]$$

Onde:

W – intensidade da taxa de emissão de energia radiante por unidade de área (Wm^{-2});

ε – emissividade;

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

T – temperatura absoluta (K).

A intensidade de radiação para cada comprimento de onda de uma partícula diferente pode ser obtida a partir da lei de distribuição de Planck:

$$W(\lambda) = \left(\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \right) \times \left(\frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT} \right)} - 1} \right) \quad [9]$$

Onde:

$W(\lambda)$ – taxa de emissão de energia radiante por área, em função do comprimento de onda (Wm^{-2});

h – constante de Planck = $6,625 \times 10^{-34} \text{ Js}$;

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

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

O comprimento de onda de intensidade de radiação máximo é dado pela avaliação de uma única temperatura através da Lei de Wien:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad [10]$$

Onde:

λ_{\max} - comprimento de onda de intensidade de radiação máximo (μm);

b - constante de Wien = $2,897 \mu\text{m/K}$.

T - temperatura absoluta (K).

As leis de Planck e de Wien são úteis na determinação da emissão de energia máxima do feixe de radiação. Por exemplo, um corpo a uma temperatura de 27°C (300°K) apresenta pico de emissão para comprimentos de onda entre 9 e $10 \mu\text{m}$. Abaixo, segue a figura 2, exemplificando bandas de comprimentos de onda em três situações:

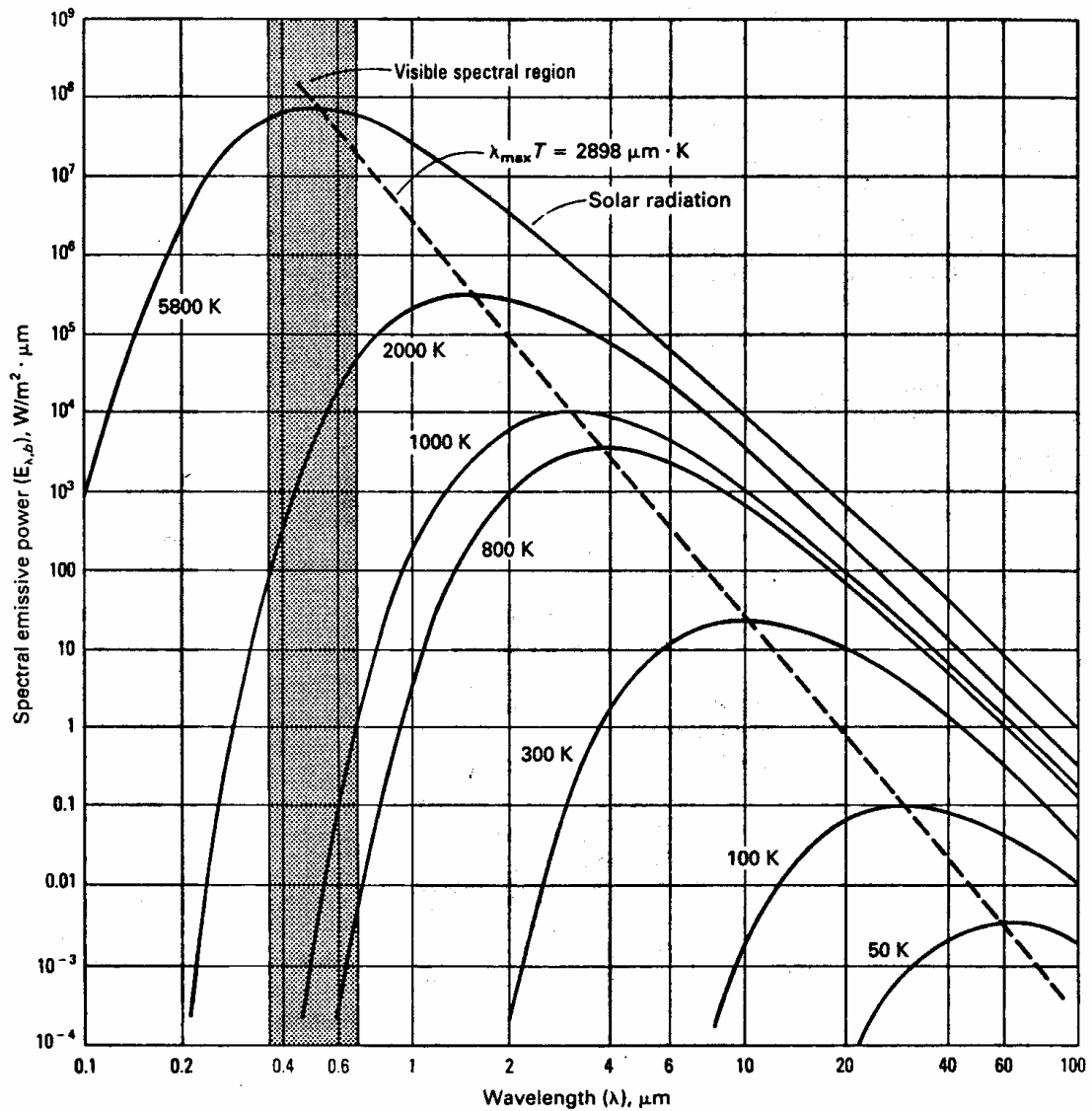


Figura 2 – Espectros de radiação com indicação de máximo pela linha tracejada [18].

5.5.4. EMISSIVIDADE

A emissividade é definida como sendo a razão entre a energia total irradiada por um sólido cuja superfície está a uma certa temperatura e um corpo negro a mesma temperatura [13]. Um corpo negro é uma fonte de radiação infravermelha hipotética que prova a maior radiação possível teoricamente, a uma dada temperatura. O corpo negro absorverá toda a energia à que ele foi submetido. O corpo negro tem emissividade igual a 1,0. Os demais materiais têm emissividades entre 0 e 1,0.

O efeito da emissividade, em uma curva de radiação, é dado na figura 3.

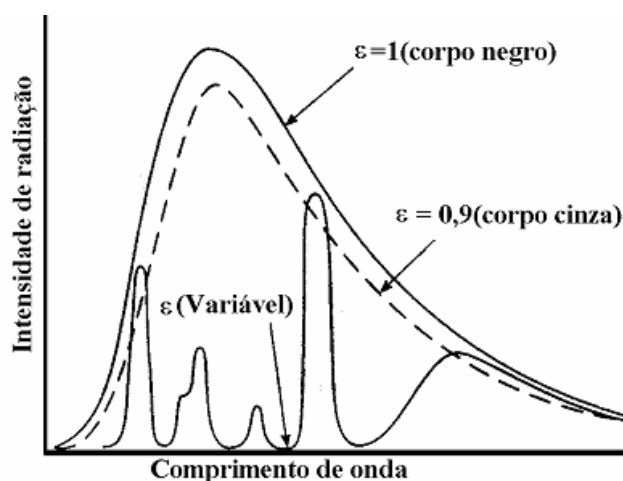


Figura 3 – Efeito da emissividade na banda de radiação [12].

A emissividade é um fenômeno que depende da condição e da composição da superfície. Materiais polidos têm emissividade menor do que materiais rugosos. Metais polidos têm emissividade menor do que metais oxidados. Os não metálicos, geralmente, têm emissividades maiores do que os metais. Negro de fumo e certas poeiras metálicas, utilizadas em certos compósitos, possuem emissividades muito elevadas. Sendo um dos objetivos da termografia medir mudanças de temperatura em uma superfície, a emissividade pode ser uma variável incontornável. Variações de emissividade ao longo da superfície de um material podem causar indicações falsas. Quando a emissividade diminui em uma determinada região, a intensidade de radiação também diminui, apresentando falsas indicações de redução de temperatura e vice-versa. Assim, superfícies com valores de emissividade baixos são mais difíceis de serem examinados por termografia do que as de maiores emissividades.

Todos os materiais estão em contínua e simultaneamente irradiando e absorvendo energia infravermelha. Quando um material está mais quente do que a sua vizinhança, a sua emissão será maior do que a sua taxa de absorção, provando uma queda de temperatura. O oposto também ocorre. Quando o material e sua vizinhança alcançam a mesma temperatura, cada corpo estará emitindo radiação com a mesma taxa que absorve. Materiais de emissividades diferentes, presentes na vizinhança do material ou área sob análise, podem trazer ruídos para o ensaio termográfico.

A relação básica que descreve a troca de radiação acima é definida pela Lei das trocas de Prevost [12]. Para o caso de um corpo envolvido pelas paredes de outro, a Lei das trocas de Prevost é:

$$W = \varepsilon_2 B T_2^4 - \varepsilon_1 B T_1^4 \quad [11]$$

Onde:

W – o ganho ou perda de intensidade de radiação;

ε – emissividade;

B – constante de Stefan-Boltzmann;

T – temperatura absoluta.

Outra relação determina o quanto da energia incidente foi absorvida, refletida ou transmitida, conforme a equação abaixo e figura 4 [11]:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad [12]$$

Onde:

α = coeficiente de absorção;

ρ = coeficiente de reflexão;

τ = coeficiente de transmissão.

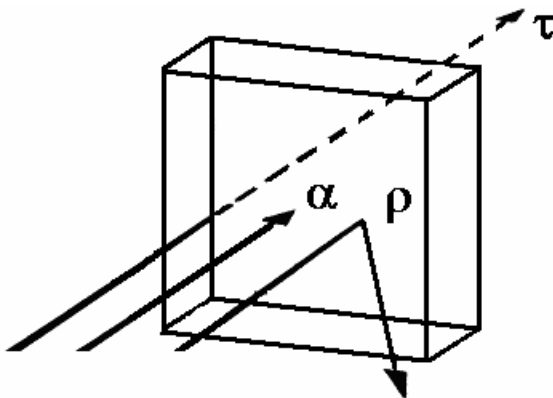


Figura 4 – Interação de radiação com o corpo [11].

5.6. ENSAIO TERMOGRÁFICO APLICADO A MATERIAIS NÃO METÁLICOS

Sendo classificado como um ensaio não-destrutivo, ou seja, aquele que se baseia na idéia de que uma amostra ou peça pode ser caracterizada através de sua resposta a

um certo tipo de excitação [14], o uso do ensaio termográfico para a inspeção de materiais compósitos com matriz polimérica e reforçado por fibras tem sido bastante freqüente [15], principalmente no setor aeroespacial que é tradicionalmente um dos principais usuários destes novos materiais.

5.6.1. TÉCNICA DE EXCITAÇÃO PASSIVA (CONVENCIONAL)

O ensaio termográfico, em sua forma mais comum, tem sido utilizado para observação, remota, do perfil de temperaturas ao longo da superfície de um corpo, geralmente o corpo tem alguma fonte interna, ou vizinha, de excitação térmica constante. Como exemplo pode-se citar a inspeção da superfície externa de fornos, para avaliação da eficiência e estado dos revestimentos internos. Esta metodologia poderia ser caracterizada como termografia passiva.

5.6.2. TÉCNICA DA EXCITAÇÃO ATIVA PULSADA

Termografia ativa consiste em expor o objeto a uma excitação térmica transiente, a qual é aplicada, no presente caso, através de um pulso de aquecimento sob a superfície a ser inspecionada, seguida da aquisição de dados (imagens/termogramas) do estágio de aquecimento e/ou resfriamento (observação da distribuição de temperatura) ao longo do tempo. Esta técnica tem sido largamente aplicada em função de sua velocidade e possibilidade de avaliação a distância. A figura 5 apresenta o desenho esquemático de um sistema de termografia ativa. A temperatura medida em cada ponto da imagem termográfica é uma função das propriedades térmicas do material e a sua variação no tempo. Este princípio tem sido usado para desenvolver algoritmos para avaliar a profundidade dos defeitos detectados, estes podem se basear e serem calibrados através da análise de uma curva de evolução temperatura x tempo, resultantes do aquecimento de corpos de mesmas características térmicas e diferentes espessuras, onde se observam diferenças entre as curvas adquiridas de regiões de diferentes espessuras. Tomando-se como referência a curva proveniente da região mais espessa e subtraindo-se desta, as curvas provenientes de outras espessuras, serão obtidas diferenças, que em termos de imagem traduzem-se em contraste. Geralmente, trabalha-se com um ponto característico da curva, ou seja, uma temperatura de referência, sendo

as temperaturas das outras regiões subtraídas da temperatura de referência, restando-se assim somente o contraste. Pode-se observar, através da figura 6a, que para pequenas espessuras (ou p/ descontinuidades mais próximas da superfície sob exame) o contraste é maior e ocorre mais rapidamente (tempo do pico de contraste é menor). Este tempo em que ocorre o maior contraste (t_{pico}) é dependente do quadrado da espessura do material (z^2), figura 6b, dividido pelo coeficiente de difusão do calor (α), ou seja,

$$t_{pico} \propto \frac{z^2}{\alpha} \quad [13]$$

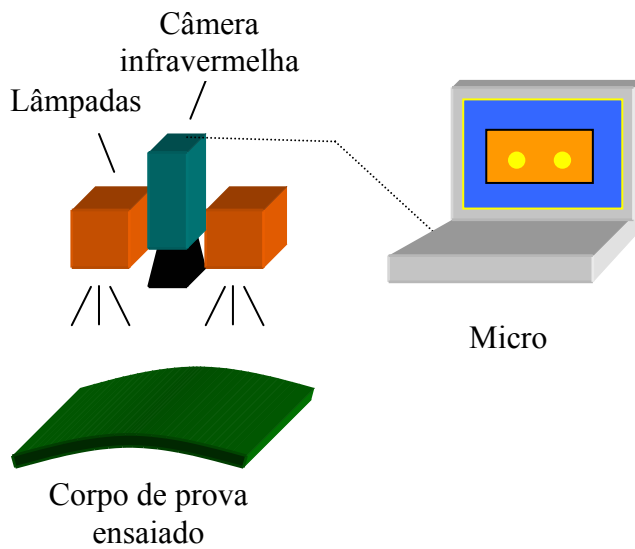


Figura 5 – Sistema típico para termografia ativa baseada em excitação fototérmica e câmera de infravermelhos [17].

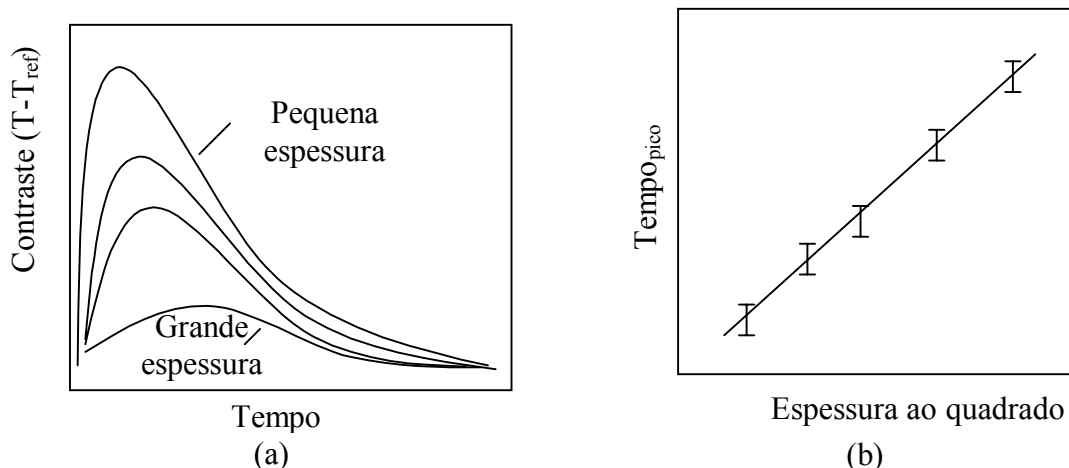


Figura 6 – (a) Curvas de contraste obtidas pela subtração pela referência das curvas “temperatura-tempo” para diferentes regiões da amostra com espessuras diferentes e (b) relação linear entre o tempo em que ocorre o máximo contraste e a espessura [17].

A baixa difusibilidade térmica dos materiais compósitos poliméricos, foi um dos motivos que permitiu o desenvolvimento de técnicas de termografia ativa, usando câmeras de infravermelhos convencionais, enquanto que para boa parte das aplicações em metais exigiria câmeras extremamente rápidas.

Defeitos nos componentes examinados induzirão um contraste na superfície dos termogramas (imagem obtida quadro a quadro através da câmera termográfica). Esse contraste pode ser tratado e relacionado à profundidade de localização do defeito ao longo da espessura, e dessa forma estabelecer a gravidade do dano em relação à integridade do componente [16].

Têm se utilizados algoritmos que se baseiam nas características temporais dos sinais correspondentes a resposta térmica recebida das superfícies excitadas. Os algoritmos utilizados 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 da área sem dano e outra proveniente da área com a presença do defeito, em um mesmo corpo. Mas para isto, são necessários alguns cuidados como se obter uma curva de contraste sem ruídos [16].

5.6.2.1. CONTRASTE

Calcular o contraste térmico resume-se em extrair duas curvas de evolução da temperatura com o tempo, uma para o ponto (área) sob inspeção e outra para o ponto, considerado como referência, área de referência ($T(t)$ e $T_R(t)$, respectivamente). Uma vez obtidas as curvas, parte-se para etapa de escolher-se qual o momento (t), que melhor caracteriza o defeito, ou seja, aquele em que ocorre a maior diferenciação entre as curvas de referência e a de exame. Esta diferenciação pode ser expressa sob a forma de contraste e tempo via curva $C(t)$.

Como exemplo podem-se considerar três curvas tempo versus resposta térmica (temperatura), de um compósito conforme a figura 7[17]. Sendo a área de maior espessura do compósito (figura 7a), considerada a de referência (R). Nota-se que as regiões com variação de espessura, apresentam uma curva com um claro desvio em relação à curva de referência $T_R(t)$ (figura 7b). Outro ponto a observar é que existe uma faixa de tempo no qual os desvios são mais perceptíveis. Portanto, existe contraste térmico, sendo possível caracterizar as diferenças de espessura que podem ser interpretadas como descontinuidades. Uma forma comum para a função contraste é dada pela expressão 14 abaixo:

$$C(t) = \frac{(T(t) - T_R(t))}{T_R(t)} \quad [14]$$

A figura 8 [17] mostra a curva de contraste da região A do compósito (figura 7a). Orienta-se antes de gerar a curva utilizar-se um filtro para os dados obtidos, para reduzir os ruídos inerentes do sistema de aquisição (câmera termográfica e sistemas de digitalização). Muitos pontos característicos de tempo da curva de contraste podem ser identificados como parâmetros capazes de serem relacionados com a variação de espessura, como por exemplo, t_{\max} e $t_{0,7}$, mostrados na figura 8. Outro ponto característico que tem sido identificado como uma referência de bons resultados seria o momento em que a curva de contraste tem um pico de inclinação. Este ponto é descrito como a primeira derivada da função contraste $C(t)$. A escolha de um ou mais destes parâmetros como referência é a chave para avaliação qualitativa de defeitos via termografia. As bibliografias têm reportado que $t_{0,7}$ é um parâmetro mais estável que t_{\max} [16], ou seja, tem a maior relação com as variações de espessura.

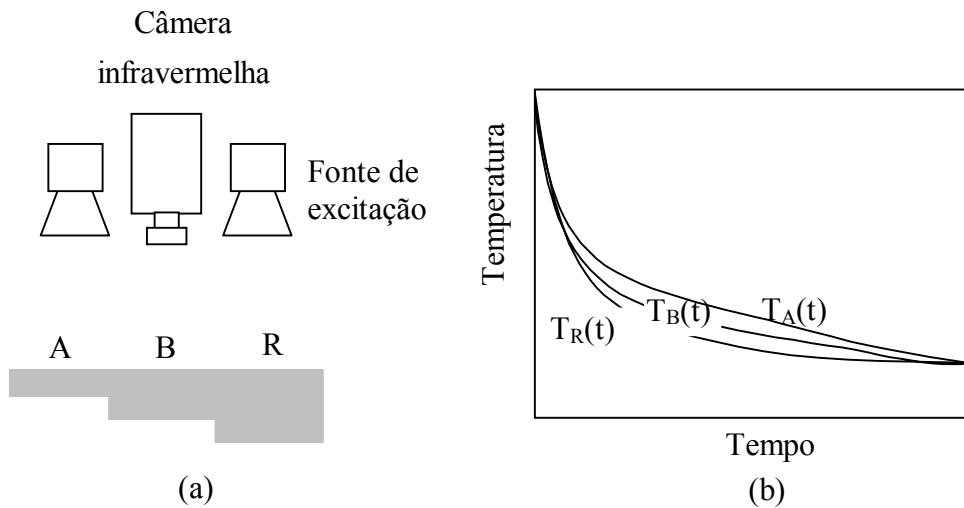


Figura 7 – Relação da resposta térmica (temperatura) com a espessura [17].

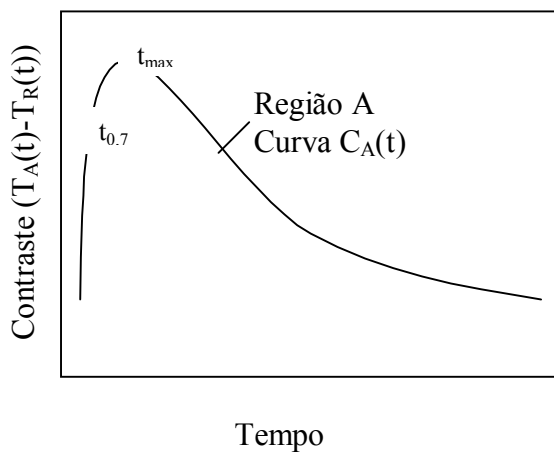


Figura 8 – Curvas de contraste $C_A(t)$.

5.6.2.2. VARIANTES DA TÉCNICA DE TERMOGRAFIA ATIVA PULSADA

Atualmente estão em desenvolvimento dois métodos de termografia ativa:

- Termografia Ativa Transiente;
- Termografia Ativa Modulada (Lock-in Thermography).

Na termografia ativa transiente, o material é aquecido através de um pulso de energia (luz, ultra-som ou ar quente), e a resposta térmica do corpo sob exame é gravada decorrido certo tempo, geralmente o necessário para se obter o contraste máximo ($t \sim x^2 / \alpha$). O resultado é uma imagem infravermelha que contém informações de defeitos em diferentes profundidades, mas usualmente, também contém informações de regiões de

aquecimento não homogêneo e efeitos de superfície (diferenças de emissividade), que funcionam como ruído e podem inviabilizar a análise e localização dos defeitos.

O uso de sistemas trabalhando com ondas térmicas monofrequência é a essência da técnica de termografia modulada (**Lock-in Thermography**). Nesta técnica, o termógrafo está sincronizado com a amplitude da frequência de modulação. Um exemplo seria a excitação via ultra-som em 20Hz, onde o termógrafo começa a leitura em tempo determinado após o tiro ultra-sônico, a partir daí somente sinais com determinada frequência são gravados, no caso de materiais compósitos de matriz polimérica, a literatura cita valores em torno de 0,03 Hz [19]. Uma vez obtido o sinal na frequência determinada, avalia-se a amplitude e a fase deste sinal. A avaliação tendo como referência o ângulo de fase tem como vantagem, quando comparado com o sinal transiente:

- independe de variações locais de excitação (iluminamento diferenciado);
- emissividade diferenciada da superfície.

Entretanto, se as características térmicas do objeto sob exame, são desconhecidas ou defeitos em diferentes profundidades devem ser detectados, então as avaliações de amplitude de fase têm que ser efetuadas em diferentes frequências, o que implica em grande número de medições ou repetições de ensaio. A figura 9, mostra como seria o critério de escolha de uma frequência para avaliação de espessura de revestimento em material não metálico, via variação de ângulo de fase, observa-se que o sinal modulado em 0,5 Hz é mais sensível a variação de espessura, ou seja, pode-se em um sinal de 0,5 Hz, relacionar a variação do ângulo de fase com a variação de espessura do revestimento. Agora para seleccionar-se o valor ideal de frequência implica em várias tentativas e tempo.

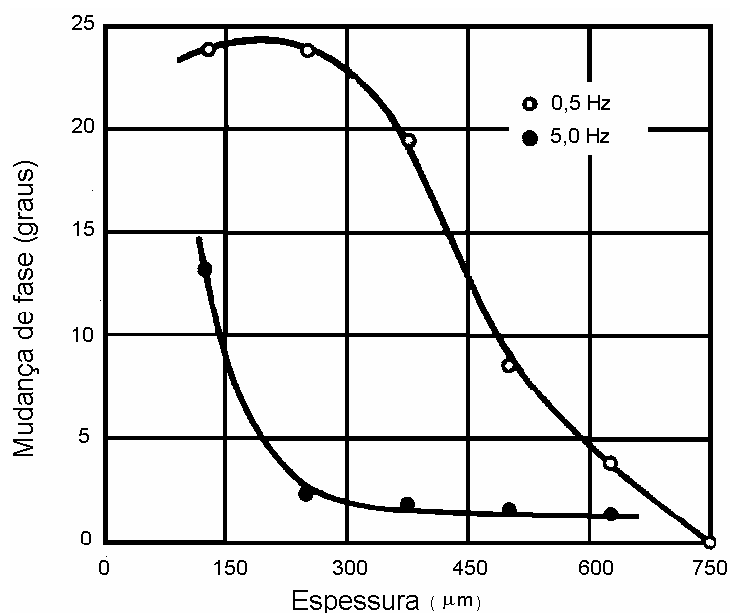


Figura 9 – Variação no ângulo de fase do sinal termográfico

Um modo de se otimizar o processo é usar uma técnica híbrida, ou seja, soma das potencialidades da técnica transiente (pulso com grande número de informações) com a da técnica modulada, discriminação de profundidades de defeitos com a utilização de pós – tratamento do sinal. Abaixo, são discutidas as duas técnicas de termografia ativa (Termografia Ativa Modulada e Termografia Ativa Transiente com Avaliação de fase), de forma pormenorizada.

5.6.2.2.1. TÉCNICA DA EXCITAÇÃO ATIVA MODULADA

A termografia com o uso da técnica de excitação ativa modulada, também chamada de **Lock-In Thermography** [19], tem sido bastante utilizada para inspeção de compósitos, principalmente daqueles considerados espessos. Este sistema baseia-se no fato de que uma onda térmica senoidal é gerada ao longo da área sob inspeção. Como os sinais termográficos (resposta do material à excitação) têm forma senoidal, a amplitude e o ângulo de fase destes sinais podem ser calculados através de dados de quatro pontos por período de modulação. Um ótimo exemplo, seria a iluminação (excitação via lâmpadas de alta potência) de toda a superfície sob exame, e a utilização de um termógrafo para observar a evolução, modulada (em determinada frequência), da temperatura (figura 10). O ângulo de fase e a intensidade de cada **pixel** são calculados de forma simples através da aquisição de quatro termogramas (S1 a S4) durante um

ciclo de modulação, ou seja, entre cada termograma existe um ângulo de fase constante igual a 90° (figura 11) [14]. Isto mostra, basicamente, o espaço de tempo entre a aplicação da excitação térmica de uma fonte posicionada remotamente e a resposta térmica detectada por um termógrafo também colocado remotamente. Esta resposta traz informações térmicas obtidas ao longo da espessura da área examinada, sendo a discriminação para cada profundidade dada pelo comprimento de difusão, o que pode ser conseguido através da modulação de frequência.

A penetração da onda térmica depende do comprimento de difusão. Esta característica pode transformar-se em vantagem se o aquecimento for composto por um espectro de vários comprimentos de onda, pois se for possível discriminar a resposta de excitação de cada uma destas ondas podemos associar cada uma das respostas a uma determinada profundidade. A resposta à cada comprimento ou frequência de onda pode ser monitorado via variação de ângulo de fase e amplitude, sendo que o ângulo de fase se torna um parâmetro mais interessante, pois é imune a variações de iluminação ou emissividade da superfície, figura 12 [20]. Entretanto se as características térmicas do material sob inspeção são desconhecidas ou defeitos em diferentes profundidades devem ser detectados, necessita-se adquirir sinais em diferentes frequências e em cada frequência monitorar a variação do ângulo de fase para formação de uma imagem final com informações de toda a espessura, o que poderia aumentar significativamente o tempo necessário para o ensaio. Para se avaliar 0.1 mm de espessura de polímero (matriz), se necessita de 1 Hz para um determinado ângulo de fase [14].

A associação de excitação pulsada e a avaliação de ângulo de fase [21] podem combinar as vantagens dos dois métodos (excitação pulsada e modulada). O resultado seria um longo pulso de excitação térmica com aplicação da Transformada de Fourier para avaliação do ângulo de fase.

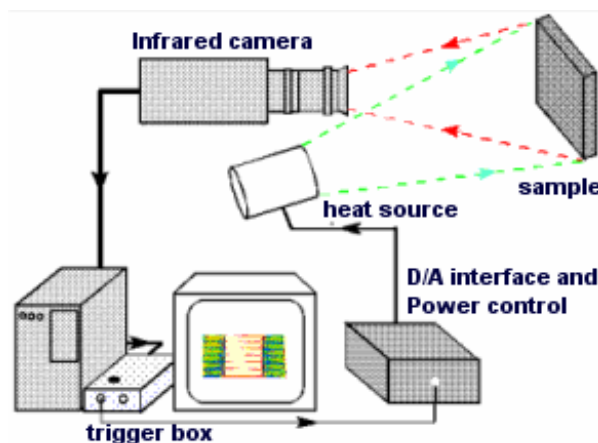


Figura 10 – Sistema de termografia ativa modulada (esquemático) [14].

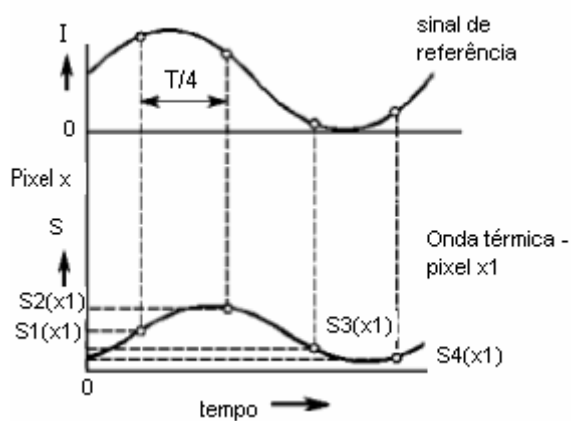


Figura 11 – Imagens tomadas durante um ciclo de modulação [14].

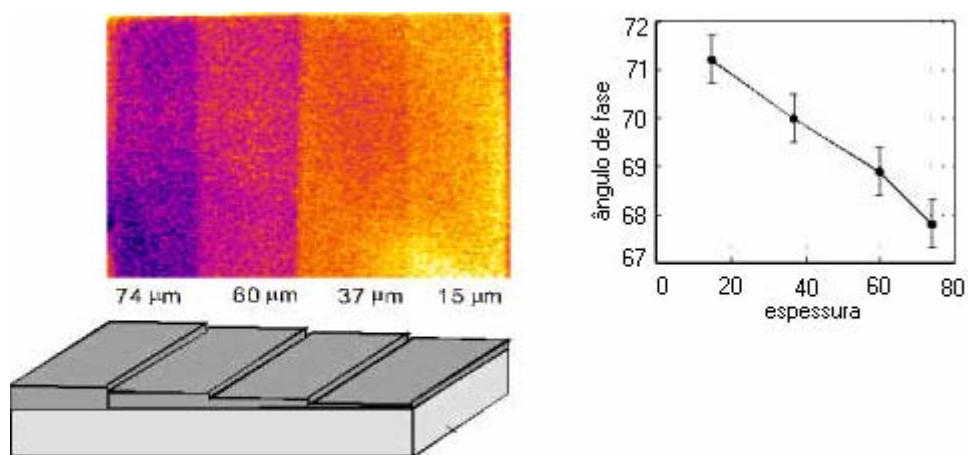


Figura 12 – Obtenção de imagem com avaliação de ângulo de fase com modulação em 0,93 Hz (**Lock-in thermography**)

5.6.2.2. TERMOGRAFIA ATIVA TRANSIENTE COM AVALIAÇÃO DE ÂNGULO DE FASE

Sinais transientes diferem de sinais senoidais pelo fato de apresentarem vários componentes de frequência. Se um corpo-de-prova é aquecido com pulso e, posteriormente, é gravada a fase de aquecimento e resfriamento com termógrafo, então o ângulo de fase e a amplitude podem ser discriminadas com o uso da Transformada de Fourier da seqüência na base de tempo [19], conforme abaixo:

$$F(w) = TF(f(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-jwt} dt \quad [15]$$

Onde:

$$e^{-jwt} = \cos(wt) - j \sin(wt) \text{ [Equação de Euler]}$$

$$j = \sqrt{-1}$$

Através da transformada de Fourier (FT), um sinal é decomposto em combinação linear de duas séries de funções cosseno ($\cos(wt)$) e seno ($\sin(wt)$) correspondentes ao exponencial complexo $\exp(jwt)$. A figura 13, abaixo, mostra a transformação [22]:

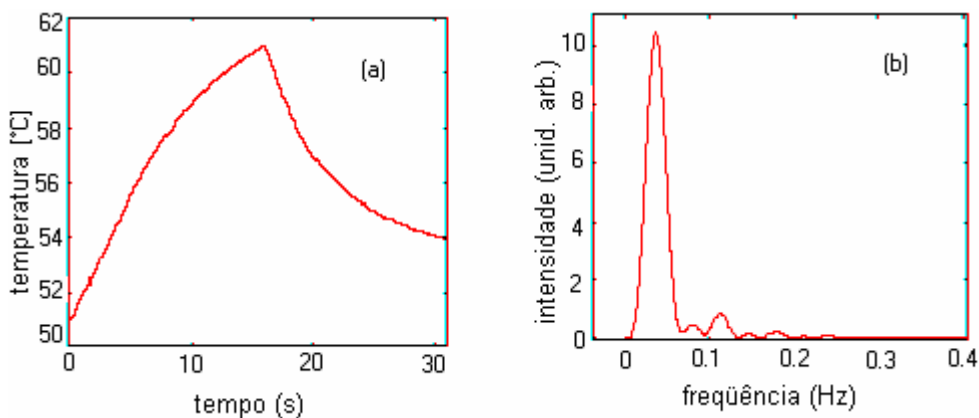


Figura 13 – Evolução da temperatura com o tempo (a) e espectro de frequências (b) [19].

A figura 13(a) representa evolução da temperatura do corpo sob inspeção, tanto a fase de aquecimento como o resfriamento, ou seja, o ciclo completo. A figura 13(b) é resultante da aplicação da Transformada de Fourier que tratou um sinal na base de tempo 13(a) e transformando-o na base de frequência. A figura 13(b) mostra as frequências envolvidas na operação de aquecimento ou resfriamento, ou seja, quais as frequências dominantes na formação do sinal e conseqüentemente a imagem termográfica. Verifica-se que as frequências de valor 0,03 Hz e 0,11Hz são as mais representativas, ou seja, as imagens formadas possuem maioria de sinais nestas modulações, sendo estas eleitas para análise de fase, por serem as que contêm maior número de informações de espessura do corpo sob inspeção.

Como a transformação pode ser executada a várias frequências, podem se obter imagens que são similares a metodologia **Lock-In Thermography** tomadas as mesmas frequências, com a vantagem de menor tempo para execução do ensaio [19]. Isto porque o sinal utilizado para excitação foi um pulso longo contendo todo o pacote de frequências necessárias. Para se ter uma idéia de tempo de ensaio, uma amostra contendo micro resistências posicionadas em diferentes profundidades, dentro de um corpo em material polimérico (figura 14), tem suas imagens obtidas via técnica modulada (**Lock-in Thermography**), medida que levou 99 segundos (figura 15) e outra obtida via Termografia Transiente (figura 16) com medição de fase, medição que levou 30 segundos.

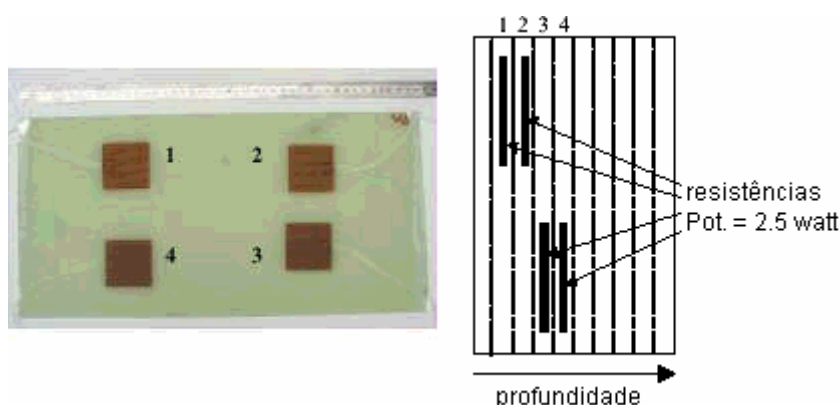


Figura 14 – Corpo de prova utilizado para análise comparativa das técnicas.

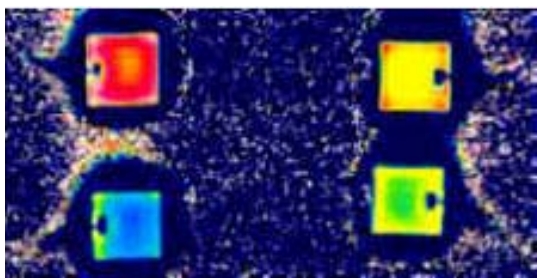


Figura 15 – Imagem via técnica **Lock-in Thermography**.

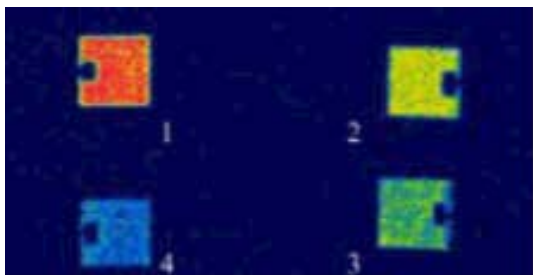


Figura 16 – Imagem obtida via termografia transiente com avaliação de fase.

5.6.2.3. EXCITADORES UTILIZADOS EM TERMOGRAFIA ATIVA

Os excitadores utilizados em termografia ativa definem-se como a fonte de calor necessária para gerar aquecimento que gerem perfil de temperaturas (onda térmica) ao longo da espessura do objeto sob exame em tempo adequado para geração de transiência. Destacam-se os sopradores térmicos, as lâmpadas de alta potência e os ultra-sônicos.

Os excitadores ultra-sônicos aplicados em materiais compósitos de matriz polimérica, trabalham com baixas frequências (20 Hz), o que gera ondas acústicas de maior energia, capazes de penetrar ao longo da espessura do material. A interação das ondas acústicas com defeitos (delaminações e trincas) gera uma perda e esta transforma-se em calor, seria a transformação da onda elástica em onda térmica, conforme figura 17. A potência necessária aos geradores de pulso sônicos se situa em torno de 300 W. Após, ter sido iniciado o pulso sônico, o termógrafo é ativado e inicia leitura modulando a frequência, quando utilizando-se a técnica de modulação **Lock-in**, neste caso a técnica denomina-se **ULT (Ultrasound Lock-in Thermography)**. Têm se relatado frequências de modulação da ordem de 0.03 Hz [23].

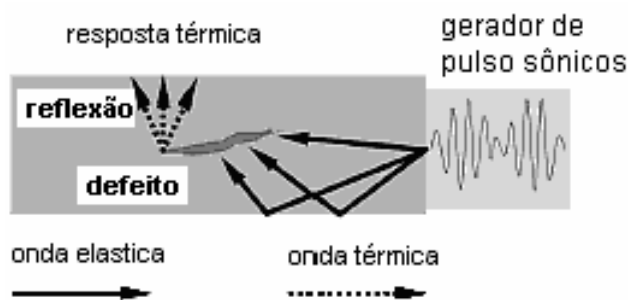


Figura 17 – Esquemático de excitação com ultra-som.

Da variação de uma metodologia para outra de termografia ativa, as fontes podem ser as mesmas aqui citadas, mudando, porém o seu comando de ativação, que, por exemplo, no caso da termografia modulada, a fonte é acoplada a um acionador (**trigger**) comum ao termógrafo que aciona ambos a uma mesma frequência selecionado no teste (ver figura 10).

5.7. SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS TERMOGRÁFICOS

Para aquisição de dados termográficos são utilizados aparelhos chamados radiômetros ou câmeras infravermelhas. Estes aparelhos normalmente consistem em um dispositivo ótico através do qual é coletada, magnificada e focalizada a radiação infravermelha sobre um sensor (detector). Este converte a radiação infravermelha em sinal elétrico, que após passarem por processamento eletrônico formam a imagem termográfica. Esta imagem é formada por variações de contraste ou intensidade, correspondentes a variação de temperatura ao longo da área sob observação. A sensibilidade de tais instrumentos radiográficos, geralmente é da ordem de $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0,05\text{ K}$). Os radiômetros geralmente são câmeras do tipo scanner ou vídeo, com aquisição em tempo real. As câmeras tipo scanner são aquelas em que o processo de formação da imagem se dá através de um sistema ótico mecânico de distribuição de informações sobre o detector infravermelho, a figura 18, abaixo, mostra o esquema de funcionamento. No caso das câmeras tipo vídeo, utilizando arranjo de detectores (**detector array**). Este sistema tem como principal vantagem o fato de cada elemento detector monitorar as emissões da superfície sob exame durante todo o tempo do ensaio ou filmagem enquanto o sistema mecânico capta os sinais ponto a ponto durante seu movimento em intervalos. Objetos com temperaturas muito próximas da ambiente, caso

freqüente em ensaios não destrutivos termográficos, a intensidade das emissões infravermelhas podem ser muito baixas, desta forma a característica de monitoração permanente dos detectores do arranjo melhora significativamente a qualidade do dado adquirido.

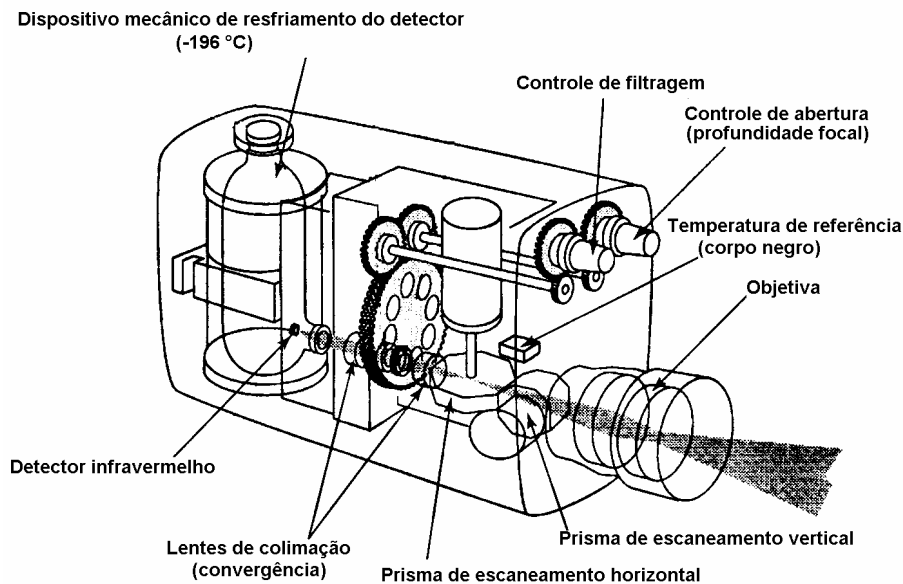


Figura 18 – Esquemático dos internos de um termógrafo.

5.7.1. DETECTORES DE INFRAVERMELHO

O detector é o componente principal do termógrafo e é o dispositivo sensível à radiação infravermelha que converte esta radiação em sinal elétrico mensurável composto geralmente por intensidade e posição temporal. Os detectores podem ser únicos (singulares) ou múltiplos (arranjo). Quando o termógrafo utiliza sensor único, este tem que possuir um sistema de distribuição mecânico (**scanning system**), das informações adquiridas do corpo sob exame, de forma que o sensor tenha uma total visualização da área de interesse [28].

Dentre os sensores térmicos existentes, destacam-se os fotodetectores abaixo:

- Siliciureto de Platina (PtSi): É o sensor mais difundido na indústria termográfica, sendo sensível ao intervalo espectral de 1,0 a 5,5 μ m. Não opera bem para temperaturas abaixo de 0°C e necessita de resfriamento em torno de 70°K.

- Antimoneto de Índio (InSb): Estes sensores operam bem na região de 2,5 a 7,0 μm .
- Telureto de Mercúrio Cadmíum (HgCdTe): Bastante utilizado para levantamentos que envolvam comprimentos de onda de 7,0 a 15,0 μm .

A detectabilidade dos sensores térmicos tem grande importância, embora não seja uma variável a ser manipulada para o trabalho aqui desenvolvido, por estar o termógrafo já definido. A detectabilidade é medida através da monitoração do comportamento das propriedades do material do detector quando atingido por certa intensidade de radiação e a propriedade tomada como referência é a condutividade elétrica. Vale citar que a resposta do detector é independente do comprimento de onda, sendo possível somente selecionar comprimentos através do uso de filtros colocados entre a radiação incidente e o sensor. [27]:

5.7.2. EQUAÇÃO DA CÂMERA TERMOGRÁFICA

A energia advinda do corpo sob inspeção, sofre alterações até sua chegada ao detector térmico, o que pode ser descrito pela equação abaixo:

$$S_n^* = \tau \varepsilon_n S_n + \tau (1 - \varepsilon_n) S_a + (1 - \tau) S_{atm} \quad [16]$$

Onde:

S_n^* - radiação do corpo sob exame que atinge a lente do termógrafo;

S_n - radiação que atinge a lente do termógrafo proveniente de um corpo negro;

S_a - radiação que atinge a lente do termógrafo proveniente de corpos que circundam o corpo sob exame;

S_{atm} - radiação devido a presença da atmosfera;

τ - transmissão atmosférica;

ε_n - emissividade do corpo observado.

A equação acima pode ser dividida em três componentes, ou seja, o componente relativo a emissão do corpo observado ($\tau \varepsilon_n S_n$), o componente correspondente a reflexão da superfície do corpo observado ($\tau (1 - \varepsilon_n) S_a$), e finalmente a componente relativa a radiação atmosférica ($(1 - \tau) S_{atm}$).

A partir do conhecimento destas variáveis, pode-se atuar durante os ensaios de forma a mitigar seus efeitos de interferência. Nos ensaios laboratoriais, por exemplo, o efeito da atmosfera, bem como da transmissão é pouco ou quase nada observado, em função do ambiente ser praticamente controlado. Quanto a parcela da reflexão, deve-se atentar para o isolamento da área com materiais isolantes e o afastamento mínimo do termógrafo ao corpo ensaiado. Restando somente a parcela de interesse, ou seja, aquela referente à emissão do corpo observado, o que é representado pela emissão do corpo negro hipotético corrigido pela emissividade do corpo real examinado.

Deve-se observar que até então a equação só tratou do sinal até a lente, sem nada considerar desta até o sensor. Neste caminho, a radiação sofre efeitos provenientes dos componentes óticos como a transmissão da lente da objetiva, efeitos de deformação (aberrações da objetiva) e abertura do diafragma ($n^\circ f$). Estes fatores não serão abordados por não poderem ser manipulados durante os testes ou serem mantidos constantes ao longo dos mesmos, em função de durante os ensaios sempre se utilizar o mesmo equipamento.

5.8. DIGITALIZAÇÃO DE IMAGEM

A digitalização é a forma de se transformar a imagem em um código inteligível pelos sistemas eletrônicos e dessa forma possibilitar a manipulação de suas informações usando todo o potencial dos sistemas de processamento disponíveis, com destaque para análise de imagem com tomada de decisão usando os recursos de inteligência artificial (Redes neurais).

O processo de digitalização de imagem, basicamente, seria aquele que divide uma imagem analógica (contínua) em uma matriz bidimensional ou plano de distribuição de pontos de imagem ou **picture elements (pixel)** (figura 19).

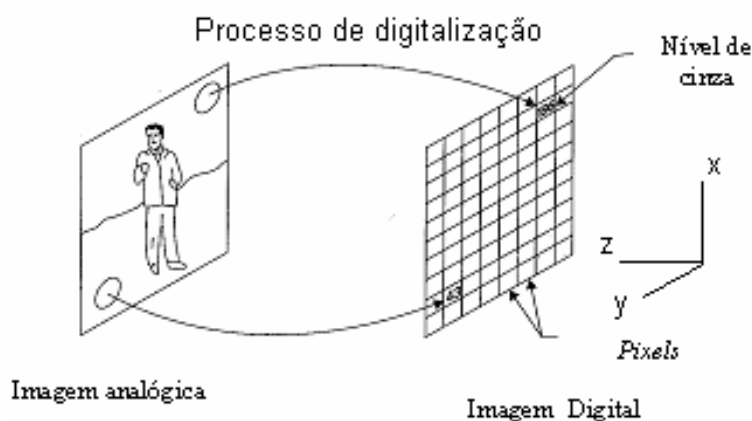


Figura 19 – Representação da operação de digitalização [30].

Nos ambientes dos sistemas de processamento, a imagem é representada por uma matriz digital ou mapa de micro-informação (**bitmap**). Cada ponto constituinte da imagem é identificado por sua posição na matriz digital e este definido por um número de linha (x) e um número de coluna (y). Por convenção os pontos sempre têm sua posição referenciada ao extremo superior esquerdo da matriz. Quando uma imagem é digitalizada, os seus pontos têm valores definidos em termos de brilho, geralmente representados por números inteiros (quantização), o que é chamado de valor do ponto, representado na figura 19 pela coordenada z . Estes valores são representados por bits, e o número de bits utilizados é chamado de profundidade do ponto (**pixel deph**) ou bits-por-ponto (**BPP**). Este valor de profundidade significa quantos tons de cores a imagem pode possuir [25]. Dentre as classes existentes e de interesse da dissertação, destacam-se as representadas pelo quadro 3, abaixo:

Quadro 3 – Formatos de imagem

DENOMINAÇÃO	BITS POR PONTO (BPP)	DESCRIÇÃO
Tons de cinza	8	É a forma de tons de cinza mais comum. Utilizado para imagens monocromáticas, como as de extensão TIFF, PCX e etc.
Tons de cinza	12	É o formato de tons de cinza, muito utilizado por sistemas especializados. Os valores de intensidade são representados por “palavras” de 12 bits, ou seja, 4096 possibilidades de tons de cinza.
Tons de cinza	16	Muito utilizado por sistemas especializados também.(65536 possibilidades de tons de cinza).
Ponto flutuante	32	Não é um formato com aplicação específica, mas é aplicável para operações de filtragem.

A imagem nos formatos de tons de cinza de 12 ou 16 bits é o tipo, freqüentemente, gerado por sistemas termográficos (infravermelho) e muito indicado para operação de tratamento de imagem por facilitar estas operações.

As imagens no formato ponto flutuante não têm uma escala fixa de intensidades, ou seja, o valor de menor intensidade presente na imagem é mostrado como preto e o de maior é apresentado como branco. Como este formato ajusta seus limites de acordo com a imagem não tem a perda de informação, devido às intensidades presentes na imagem estarem fora de intervalo, como ocorrem nos outros formatos. Outra característica deste formato é a não ocorrência de valores negativos de intensidade de **pixel**, após aplicação de operação de filtragem. Em sistemas utilizando tons de cinza, estes valores seriam considerados como zero, ou seja, se perderia esta informação da imagem.

Uma limitação da digitalização em relação ao sinal analógico (imagem analógica), é a perda de algumas informações de continuidade da imagem, como pode ser observado na figura 20. Percebe-se, graficamente, que a curva é transformada em vários trechos de reta e desta forma os valores de intensidade muito próximos são tratados como se fossem iguais. Entretanto esta limitação tem sido minimizada com o aumento da resolução dos sistemas de digitalização e processamento, ou seja, os trechos de reta vistos na figura 20, têm seu comprimento cada vez menor, o que pode ser traduzido pelo número de bits que representa a profundidade do **pixel**.

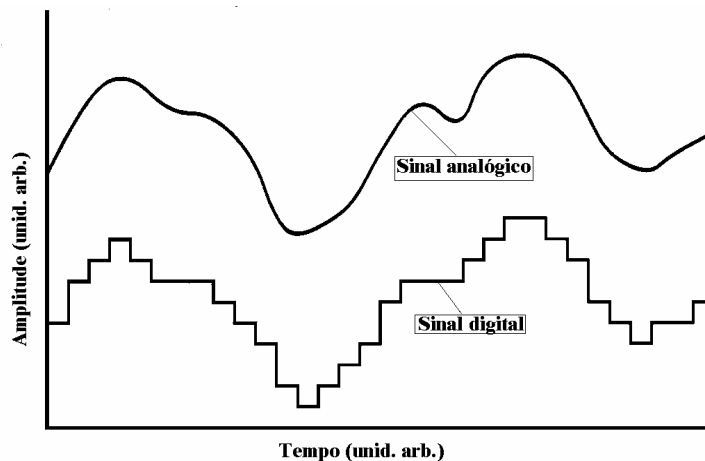


Figura 20 – Comparação entre o sinal digital e analógico [25].

5.9. SISTEMAS DE TRATAMENTO DE IMAGEM

Enfatiza-se, inicialmente, que o tratamento de imagens é usado, neste trabalho, como ferramenta complementar e, por isso, acreditamos não caber aqui um aprofundamento ou detalhamento nos princípios do conteúdo a ser apresentado. Portanto dá-se, a seguir, uma breve descrição dos principais recursos utilizados.

5.9.1. ORIGEM DOS RUÍDOS

Características dos sistemas termográficos e de armazenamento e visualização, conteúdo do objeto observado, transmitância atmosférica, corpos a volta e outros afetam a qualidade da imagem termográfica, ou seja, de alguma forma insere informações não desejáveis na imagem. A figura abaixo mostra, resumidamente, quais as variáveis geralmente envolvidas na geração de ruído na imagem termográfica.

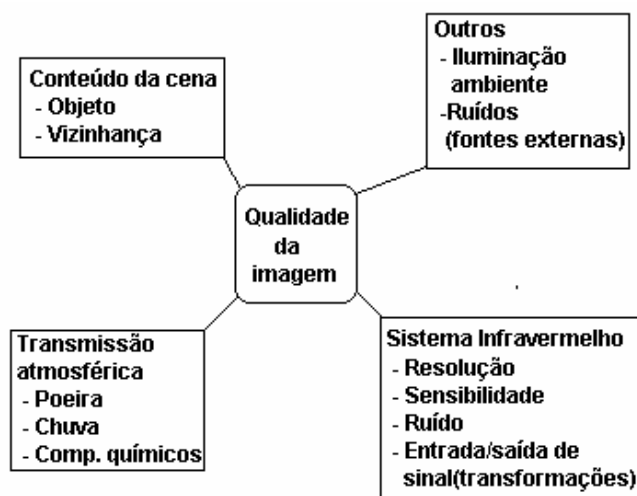


Figura 21 – Componentes que geram ruído na imagem termográfica [28].

Discutindo cada um dos componentes citados:

Conteúdo:

- Como todo objeto emite radiação infravermelha, durante a aquisição da imagem do objeto de interesse, pode haver a interferência de outros corpos nas vizinhanças do mesmo. Na definição do cenário de testes deve ser levada em consideração esta característica.
- As características do objeto, como por exemplo, as características da sua superfície devem ser consideradas.

Transmissão atmosférica:

- O ambiente de teste deve ter sua atmosfera conhecida e se possível controlada durante a duração dos testes.

Sistema infravermelho:

- As características do sistema devem ser conhecidas e adequadas ao fim, bem como as variáveis de controle. Tanto o sistema eletrônico da câmera, como o ótico introduzem ruídos ou defeitos na imagem, como aberração, reflexão (Narcissus), resolução vertical ou horizontal.

Outros:

- Os sistemas de interface, bem como os de armazenamento podem inserir interferências eletrônicas, importantes, durante a conversão.

5.9.2. TRATAMENTO DE IMAGEM

O tratamento de imagens via processamento computacional é uma ferramenta poderosa que pode ser aplicada para duas finalidades distintas e principais:

- melhoramento da aparência visual;
- preparação de imagens para medidas de características específicas, presentes.

As imagens são elementos ricos em informações, mas nem sempre estas informações são visíveis pelo olho humano ou mesmo através de dispositivos comuns de visualização. As imagens sempre contêm ruídos dos mais diversos tipos. Os ruídos podem ser gerados pelo ambiente onde ocorreu a captura da imagem (interferências de outros corpos), pelo próprio objeto visualizado (superfície com diferentes emissividades), sistemas de aquisição (instabilidade elétrica) e etc. Desta forma, geralmente, é necessário algum tipo de tratamento para que seja possível extrair da imagem as informações de interesse. As técnicas de melhoramento de imagem variam desde as mais simples como a manipulação de contraste e brilho até técnicas complexas de filtragem.

Basicamente, podem se resumir em 3, os modos de tratamento de imagem, conforme abaixo:

- Modificação da ordem ou distribuição de intensidade de brilho;
- Aplicação de filtros espaciais;
- Manipulação das frequências da imagem.

Como na dissertação será utilizado o programa Image Pro, a partir de agora as técnicas tratadas tem como base os recursos deste programa.

5.9.3. MODIFICAÇÃO DA INTENSIDADE

Agora serão descritas as formas de melhorar a intensidade de brilho de uma imagem, de acordo com a sua aparência, a fim de realçar as informações de interesse.

A primeira etapa deste processo é gerar um histograma da imagem, que relaciona o número de **pixels** com os seus valores de nível de cinza, ou seja, o histograma mostra como está a distribuição de intensidade de brilho na imagem. A figura 22 mostra quatro possibilidades hipotéticas de um histograma de imagem e o resultado correspondente. Verifica-se que a imagem de melhor distribuição de brilho é a correspondente ao gráfico d, da figura 22, ou seja, uma imagem de alto contraste, realçando as diferenças.

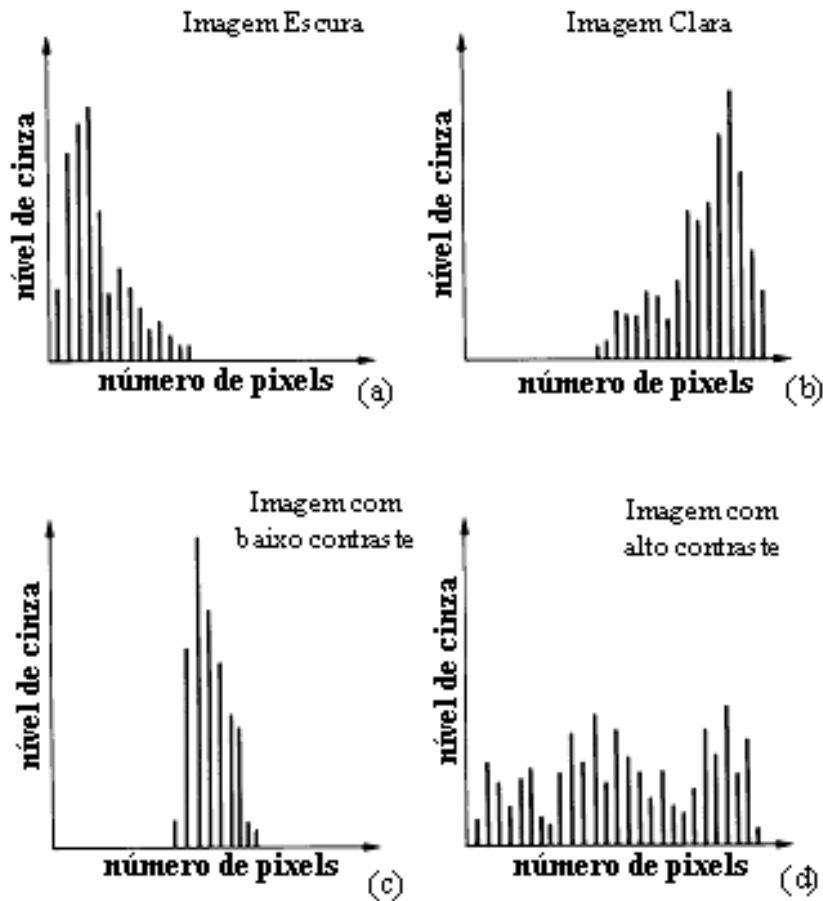


Figura 22 – Histogramas de imagem [29]

Pode-se mudar o histograma de uma imagem, através da manipulação direta das variáveis brilho, contraste e fator gama (γ), presentes nos programas de tratamento de imagem. O fator gama está relacionado com a razão de resposta em intensidade de brilho (luz) da imagem e a voltagem correspondente do sistema de aquisição (sensor). A figura 23 mostra o comportamento da imagem de acordo com os valores do fator gama, ou seja, tomando o valor 1 como referência, a imagem para valores de gama maiores que 1, tende a clarear e aumentar o contraste nas áreas escuras. Imagens com valores de gama menores que 1, tendem a escurecer, aumentando o contraste nas áreas claras.

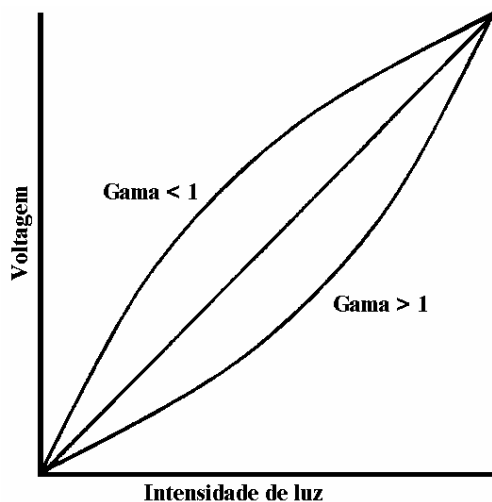


Figura 23 – Fator gama.

5.9.3.1. SUBTRAÇÃO DE IMAGENS (FILTRO ESPECIAL)

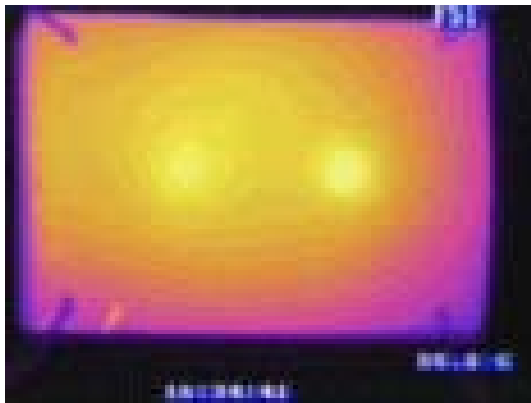
Sendo a imagem uma matriz, a diferença entre duas imagens $f(x, y)$ e $h(x, y)$ é expressa como:

$$g(x,y) = f(x,y) - h(x,y) \quad [17]$$

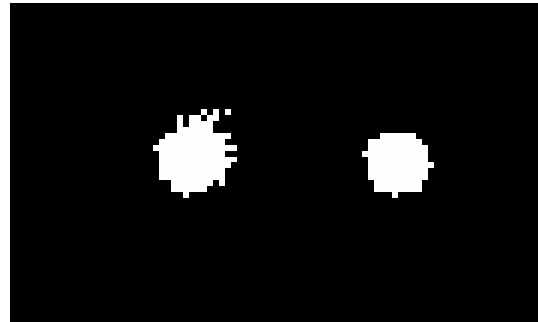
$g(x,y)$ é obtido pelo processamento da diferença entre os pares correspondentes de **pixels** de f e h . A subtração de imagens tem aplicações importantes em segmentação e processamento de um modo geral, como por exemplo, na subtração da imagem original do seu fundo, com a finalidade de se obter somente os objetos de interesse da imagem [25]. Pode-se aplicar também a subtração de imagens provenientes de estados diferentes, ou seja, subtração entre termogramas de um mesmo ensaio, mas de momentos distintos que apresentam contrastes também distintos.

5.9.3.2. SEGMENTAÇÃO

A segmentação, em linhas gerais, define-se como a divisão marcante da imagem em regiões de diferentes colorações (2 tonalidades), mas com resumo ou diminuição de tonalidades presentes na imagem, de modo a simplificar o conteúdo da imagem. Tal recurso facilita a evidência de detalhes da imagem, tornando mais fácil a análise de ocorrências particulares bem como a possibilidade de análise automática. A segmentação transforma os níveis de cinza da imagem em apenas dois níveis, preto e branco (primeiro plano e fundo) [25]. As figuras 24 e 25 mostram o tratamento de imagem usando este recurso.



a)Imagem original



b)Imagem segmentada.

Figura 24 – Aplicação de segmentação

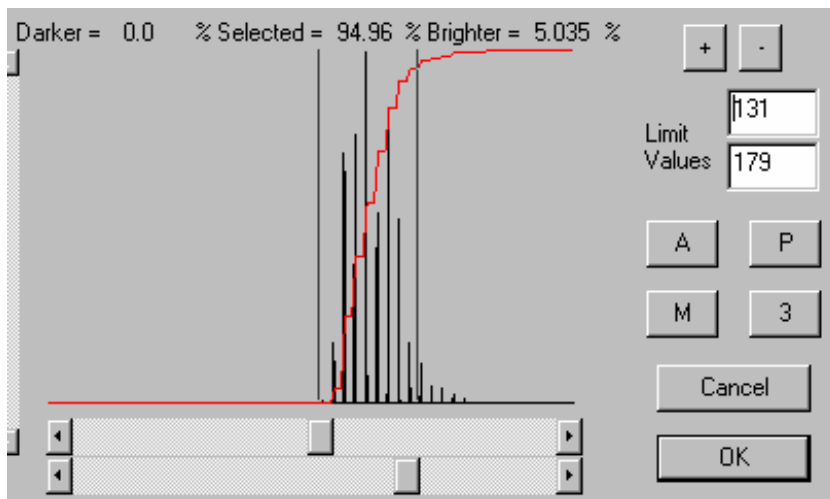


Figura 25 – Nível de Segmentação (**threshold**) aplicado ao histograma da imagem.

A figura 24 mostra o resultado da segmentação de uma imagem termográfica em pseudocores (figura 24a). A aplicação da segmentação evidenciou de forma marcante as discontinuidades (figura 24b). A figura 25 evidencia o nível de segmentação aplicado (threshold), ou seja, a partir de valores ou dentro de que limites de valor de brilho trato como uma tonalidade. Tudo que estiver fora do limite é interpretado por outra tonalidade. No caso em questão, os limites (janela) estão definidos em 179 (valor máximo de brilho) e 131 (valor mínimo de brilho). Esse nível de segmentação significou a seleção de 94,96% dos pixels e dentre estes, somente 5,03% eram os mais claros (brilhantes).

5.9.4. APLICAÇÃO DE FILTROS ESPACIAIS

Os filtros espaciais são divididos em duas categorias:

- Filtros lineares ou de convolução;
- Filtros não lineares ou morfológicos.

Abaixo, segue uma abordagem básica sobre o que é cada um dos processos de filtragem espacial.

5.9.4.1. FILTROS LINEARES

Um exemplo de operação com filtros lineares seria a multiplicação do valor da vizinhança do **pixel** a ser tratado, por uma matriz de coeficientes de filtragem. Esta matriz é chamada de Kernel ou operador matricial. Os operadores lineares efetuam geralmente adições e multiplicações no interior de uma região ou janela de convolução.[31]

Considerando uma imagem original formada por um conjunto de **pixels** com valores determinados de intensidade de níveis de cinza e aplicando-se sobre a mesma um filtro linear com janela de convolução dimensionada em 3 x 3 (dimensão de referência), observa-se pela figura 26, abaixo, que a mesma para cada **pixel** a ser tratado (P_{filtrado}), contém 9 **pixels**, sendo o **pixel** a ser filtrado localizado na região central da janela P_{22} . Esta janela pode então ser multiplicada pelo operador matricial Z .

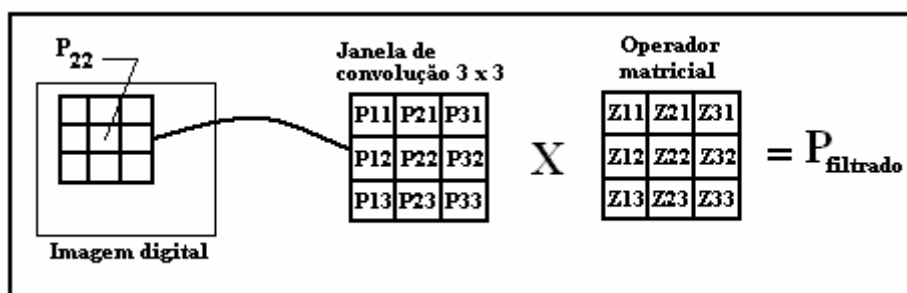


Figura 26– Esquemático do processo de filtragem linear.[31]

O **pixel** resultante (P_{filtrado}) é proporcional à soma dos **pixels** vizinhos multiplicados, cada um, pelo seu correspondente no operador matricial, conforme a equação [18], sendo este o novo valor do *pixel* P_{22} . Esta operação é repetida para cada **pixel** constituinte da imagem.

$$P_{\text{filtrado}} = P_{11}Z_{11} + P_{21}Z_{21} + P_{31}Z_{31} + P_{12}Z_{12} + P_{22}Z_{22} + P_{32}Z_{32} + P_{13}Z_{13} + P_{23}Z_{23} + P_{33}Z_{33} \quad [18]$$

Uma característica importante dos filtros lineares é que o uso do mesmo, não modifica irreversivelmente a informação básica da imagem. Como exemplo de filtros lineares pode-se citar os seguintes tipos principais e suas variações:

- Passa-baixo (Média e Gauss): Atenua ou elimina ruídos, mas geralmente provoca um embaçamento das bordas dos detalhes, tornando as fronteiras menos perceptíveis.
- Passa-alto (Sobel, Roberts e Laplaciano): Realça as bordas e outros detalhes finos da imagem. Elimina ou atenua os componentes responsáveis pela pequena variação de características da imagem, com risco de se perder detalhes de baixo contraste.

5.9.4.2. FILTROS NÃO LINEARES

Os filtros não lineares ou morfológicos são baseados no princípio da janela, embora não exista um operador linear contendo os fatores multiplicativos, conforme os filtros lineares (figura 26). O que ocorre é que os valores originais de **pixel** contidos na janela são manipulados com interação entre os mesmos através do tratamento matemático e / ou estatístico. Como exemplo de filtros não-lineares pode-se citar os do tipo Passa-baixo, como Mediana e Sigma.

5.9.5. MANIPULAÇÃO DE FREQUÊNCIAS DA IMAGEM

As operações com imagens podem desenvolver-se tendo como referência a imagem original diretamente (domínio do espaço) ou a imagem transformada em assinaturas de frequência (domínio da frequência). Trabalhar-se no domínio da frequência traz algumas vantagens, dentre elas o tamanho de imagem e a caracterização

de certas particularidades da imagem, como ruídos periódicos. Dentre os transformadores de imagem do domínio espacial para o domínio da frequência destaca-se a Transformada Rápida de Fourier. Este recurso permite uma interpretação matemática da imagem e deste modo, permite obter e analisar informações de textura e forma. Desta forma, filtros de frequência são filtros baseados na aplicação da Transformada Rápida de Fourier à imagem para extração de ruídos periódicos, para os quais os filtros espaciais não têm eficiência. Para aplicação destes filtros é necessária a conversão da imagem para tons de cinza. Estes filtros, quando aplicados, geram a conversão da imagem para o domínio da frequência. Para a imagem nesta condição, o brilho representa a amplitude e a forma da onda e a posição, representam a frequência. Desta forma as frequências características de ruído podem ser retiradas ou filtradas. Posteriormente se faz a inversão da imagem representada no domínio da frequência para imagem original (domínio do espaço), agora sem ruídos. A figura 27 mostra uma sequência característica de aplicação do processo.

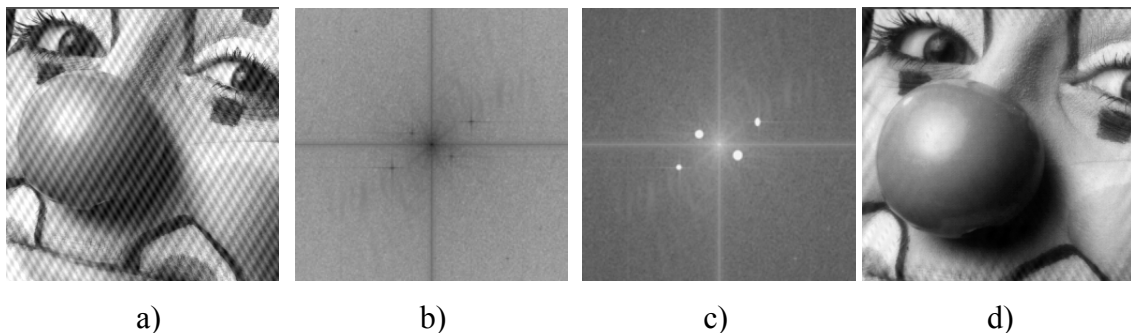


Figura 27 – Aplicação de filtros de frequência [25]

Na figura 27 o fotograma “a”, mostra uma imagem no domínio do espaço, com a ocorrência de ruído periódico. No fotograma “b”, representa-se a imagem no domínio da frequência. Nesta condição, o centro da figura representa as altas frequências e partindo em direção as extremidades vai ocorrendo um abaixamento das frequências. No fotograma em questão (b), verifica-se quatro pontos de coloração escura, os quais representam o ruído periódico ocorrente na imagem original (ruído de frequência elevada). No fotograma “c”, verifica-se que estes pontos foram retirados, via recurso específico do programa de tratamento de imagem. Com a aplicação da transformada inversa, recupera-se a imagem para o domínio do espaço, agora sem a presença de ruído (d). A chave para um bom desempenho dos filtros de frequência é discriminar as frequências das informações de interesse da imagem e isolá-

las. Isto pode ocorrer através da aplicação de filtros sob a imagem no domínio da frequência, como os do tipo passa-alto e passa-baixo.

Os filtros, aqui abordados terão aplicação na fase de testes a fim de verificar qual o mais adequado.

5.10. LIMITES DE DETECTABILIDADE DE DEFEITO DA METODOLOGIA TERMOGRÁFICA

Os limites de detectabilidade estão ligados, intimamente, em maior ou menor grau, a cada ente participante da avaliação, ou seja, características dos excitadores ou aquecedores (potência e distribuição), limitações do equipamento de detecção (sensibilidade e equação do termógrafo) e principalmente pelas características do corpo a ser examinado, pois este é o que possui as maiores possibilidades de variações, como por exemplo, a morfologia e posição do defeito, características térmicas e de superfície.

Como para a metodologia termográfica a onda de calor é o elemento monitorado e através da interação desta com o defeito é que ocorre a detecção, pode-se falar de algumas limitações devido a este mecanismo. A presença de descontinuidades reduz a velocidade de difusão (α) da frente de onda térmica. Daí surge uma primeira limitação de detectabilidade, ou seja, para descontinuidade mais distantes da região de observação e excitação, mais tardiamente ocorrerá a interação da frente de onda com a mesma, o que pode se traduzir em não detecção, pois o contraste que proporciona identificação da descontinuidade na imagem, é proporcionalmente afetado e em magnitude maior que o tempo [28]. As equações [13] e [19] e a figura 28 mostram esta relação.

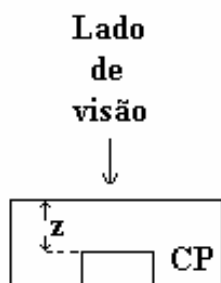


Figura 28 – Corpo de prova (CP), com defeito.

$$t \cong \frac{z^2}{\alpha} \quad [13]$$

$$C \cong \frac{1}{z^3} \quad [19]$$

Onde:

t – tempo para o aparecimento do dano na imagem;

z – distância da descontinuidade à superfície de observação;

α - difusibilidade térmica;

C – contraste máximo

Conclui-se que quanto mais longe da superfície o defeito, mais difícil será detectá-lo, pois mais baixa será a diferença provocada na imagem devido a sua presença.

Outro fator que influencia a detectabilidade seria a dimensão do defeito. Empiricamente, para materiais anisotrópicos (objeto da tese), o raio da menor descontinuidade detectável deve ser pelo menos 10 vezes maior que a profundidade (z), tomando-se como referência um material compósito de Alumínio – Epóxi – Alumínio.[28]

6. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

6.1. METODOLOGIA

Como citado anteriormente, o objetivo da dissertação é desenvolver uma metodologia de investigação não destrutiva, que avalie juntas coladas utilizadas em tubos que, utilizem materiais compósitos de base polimérica. Para isto foram obtidos corpos - de - prova (CP's) que simulam da melhor forma possível o que vem sendo aplicado nas indústrias que atualmente utilizam tais materiais. O sistema de detecção utilizado foi um termógrafo convencional e a excitação térmica foi do modo ativo (pulsado), com a gravação de dados em meio eletrônico através de interface (sistema de digitalização) de ligação entre o termógrafo e um microcomputador convencional. A gravação, durante o ensaio, ocorreu sem nenhum tratamento preliminar, sendo os dados gravados (digitalizados) totalmente brutos. Estes dados, posteriormente, foram

analisados utilizando-se do programa Image Pro e seus recursos de tratamento de imagem. Dos resultados do tratamento surgiram padrões e comparações, evidenciando-se as variáveis importantes para o ensaio que se transformaram em parâmetros de controle e assim os resultados finais da tese.

6.2. ESCOLHA DOS CORPOS - DE - PROVA

Como citado acima, a escolha do CP teve o compromisso de representatividade com o que se vem utilizando na indústria em termos de tubulações não metálicas. Além disto, também estabeleceram-se outras premissas a serem atendidas pelo CP, como suas principais características construtivas.

Preliminarmente, elegeram-se como as principais características que poderiam influenciar nos ensaios e que foram consideradas para confecção dos CP's. Estas foram agrupadas conforme quadro 4:

Quadro 4 – Características do CP influentes no ensaio.

Modalidade	Características
Efeitos da geometria da peça sob exame	Curvatura da superfície;
	Uniformidade da espessura;
	Rugosidade.
Efeitos da composição do material	Qualidade do material e homogeneidade;
Características dos defeitos	Tamanho, posição plana e profundidade dos defeitos;
	Formato e natureza dos defeitos.

Como citado anteriormente, a intenção foi a avaliação de juntas coladas em dutos, por serem estas a que tem maior frequência de utilização no mercado atual de material compósito de base polimérica. Os defeitos mais ocorrentes em juntas coladas tipo ponta e bolsa, reportados pela literatura especializada têm sido descritos como falta de adesivo no espaço anular das juntas (vazios), falta de adesão, ou seja, embora haja contato entre as superfícies não há ancoramento (detecção de interface) e delaminações na junta ou substrato devidas, principalmente, a um impacto externo. Como na maioria das aplicações o reforço tem sido fibra de vidro e as matrizes de base epoxídica, os corpos-de-prova tiveram esta formulação.

Outro ponto importante, levado em conta na confecção dos corpos-de-prova, refere-se ao “efeito de borda”, que em ensaios que envolvem transmissão de calor pode

ser traduzido como efeitos da difusibilidade lateral (α_{lateral}). Dependendo da posição, a descontinuidade pode ter sua detectabilidade fortemente influenciada. Os sinais gerados por uma descontinuidade presente em um corpo-de-prova, podem ser totalmente diferentes, quando comparado aos sinais gerados pela mesma descontinuidade presente em um corpo contínuo, ou seja, uma tubulação comparada a um setor da mesma. Este fenômeno mascara os resultados e cria ruídos que podem tornar a detecção impossível. Embora “efeito de borda” seja um fenômeno inerente de testes em escala reduzida, a usinagem das descontinuidades foi preferencialmente na região central dos corpos-de-prova de forma a mitigar tal comportamento.

Embora tenham sido confeccionados oito corpos de prova (CP) para os testes a serem desenvolvidos, somente quatro foram aproveitados. Isto pode ser observado através da codificação não seqüencial dos corpos de prova que serão citados daqui para frente. A retirada dos quatro CPs foi motivada pelo fato de os mesmos não apresentarem variação de posicionamento e dimensão de defeito (variação de configuração) de interesse dos testes.

6.2.1. AMOSTRA

Foi utilizada uma amostra de tubo cedida pelo fabricante AMERON, conforme foto 1, apresentando as características abaixo [26]:

- Material: Fibra de vidro em matriz epóxi.
- Referência: Bondstrand series 2000QL.
- Diâmetro interno: 6 in
- Comprimento: 900 mm
- Espessura: 4 mm
- Tipo de junta: Ponta e bolsa.



Fotografia 1 – Amostra da AMERON. No detalhe, a junta tipo ponta e bolsa.

O diâmetro de 6in além de representar bem as aplicações ocorrentes no mercado, fez com que os resultados da tese tivessem uma maior validade na direção dos maiores diâmetros, pois com relação a geometria, quanto menor o diâmetro (maior curvatura) mais difícil a avaliação.

6.2.2. CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

Na confecção dos corpos-de-prova (CP) e seus defeitos artificiais, levou-se em consideração os defeitos mais frequentes conforme citado anteriormente. Na preparação dos corpos-de-prova, cortou-se uma seção, do tubo, de 80 mm de comprimento, este foi dividido em vários setores de 60 mm de comprimento e espessura de 4 mm, conforme figura 29.

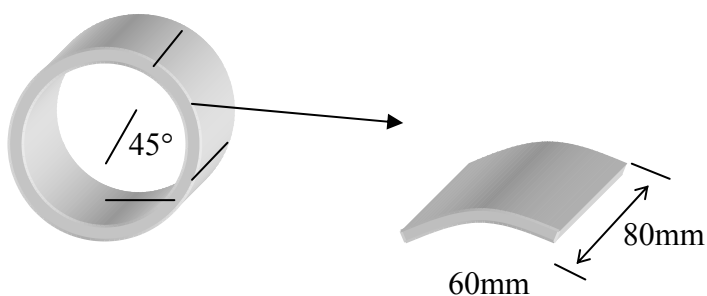


Figura 29 – Seção do tubo para corte, e o detalhe dos setores de 60 mm de comprimento.

Os setores obtidos, conforme mostra a figura 29, foram agrupados dois a dois. Em cada dupla, selecionou-se um setor e neste foi usinado um defeito de acordo com os tipos a simular, e posteriormente este setor foi unido a outro por meio de adesivo de forma a obter-se uma junta colada, conforme a figura 30.

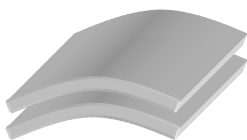


Figura 30 – Simulação de junta colada.

Abaixo mostra-se, para cada tipo de dano a simular, qual a distribuição dos defeitos usinados e suas dimensões. Todos os desenhos esquemáticos mostrando defeitos nos corpos-de-prova (CP), têm como vista a superfície convexa e possuem também um pequeno quadrado de cor vermelha, que foi utilizado como referência de posição para os testes.

6.2.2.1. DELAMINAÇÃO

Para simular delaminação, um dos setores obtidos (figura 29) sofreu o impacto de uma massa de 3 Kg de forma a gerar delaminação interna. Esta delaminação foi dimensionada por ultra-som e o CP foi identificado como 6. Foi utilizado ultra-som manual com a seguinte configuração:

- Cabeçote normal de 2,25 MHz, com cristal piezocompósito (MSWQC);
- Aparelho de ultra-som digital (Karl Deutsch – Echograph 1080).

A figura 31 representa a localização da delaminação real em coloração mais escura (cinza). É apresentada em vermelho a marca de referência de posição. A delaminação está situada exatamente no meio da espessura.

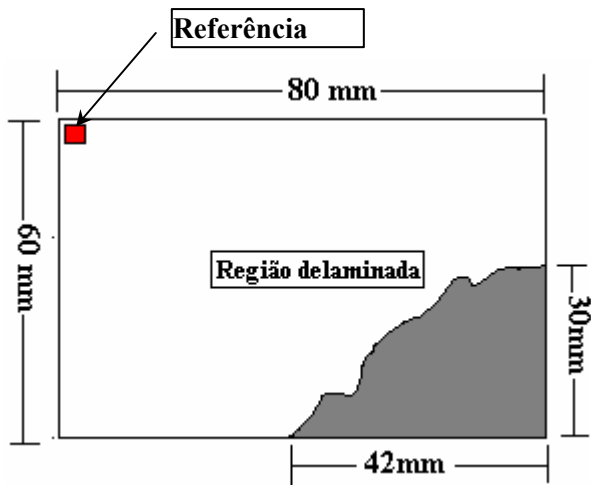


Figura 31 – Representação da delaminação real (dimensionado por ultra-som) do CP 6 (região hachurada).

6.2.2.2. FALTA DE ADESIVO OU VAZIOS

Para simular a falta de adesivo foram coladas duas peças como mostra a figura 32, de forma a produzir regiões com adesivo e sem adesivo. A figura 33 mostra a dimensão do corpo-de-prova 2 (CP2) e suas características. Este corpo-de-prova, também, foi utilizado para simulação de falta de adesão.

As figuras 34 e 35 mostram uma outra forma de simular a falta de adesivo. A figura 34 mostra o corpo-de-prova 1 (CP1) onde foram usinados dois furos de pequena profundidade (defeito 1 = 1,6 mm e defeito 2 = 1,2 mm) que foram protegidos por um filme desmoldante para que se evitasse a entrada de adesivo e se garantisse o vazio, nesta região. Já a figura 35 apresenta uma variação maior de profundidades (profundidade dos furos) e extensão de vazio (diâmetro dos furos). Este corpo-de-prova (CP3), não foi montado em junta.



Figura 32 – Peças coladas para a simulação do problema de adesão [17].

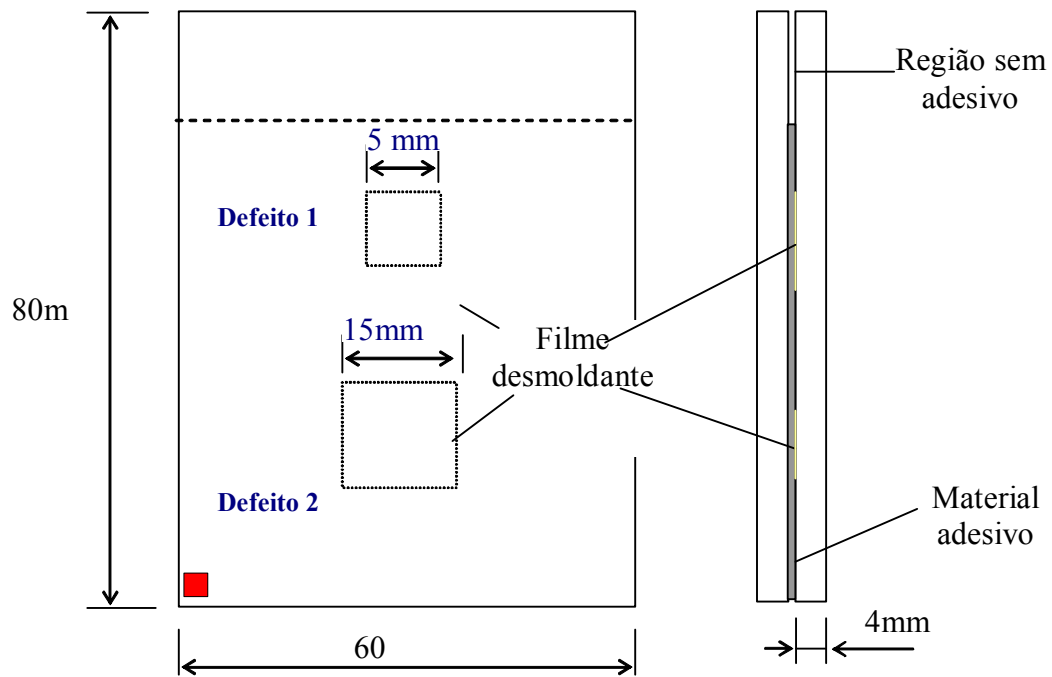


Figura 33 – Simulação da falta de adesão através de filmes desmoldantes (CP2) [17].

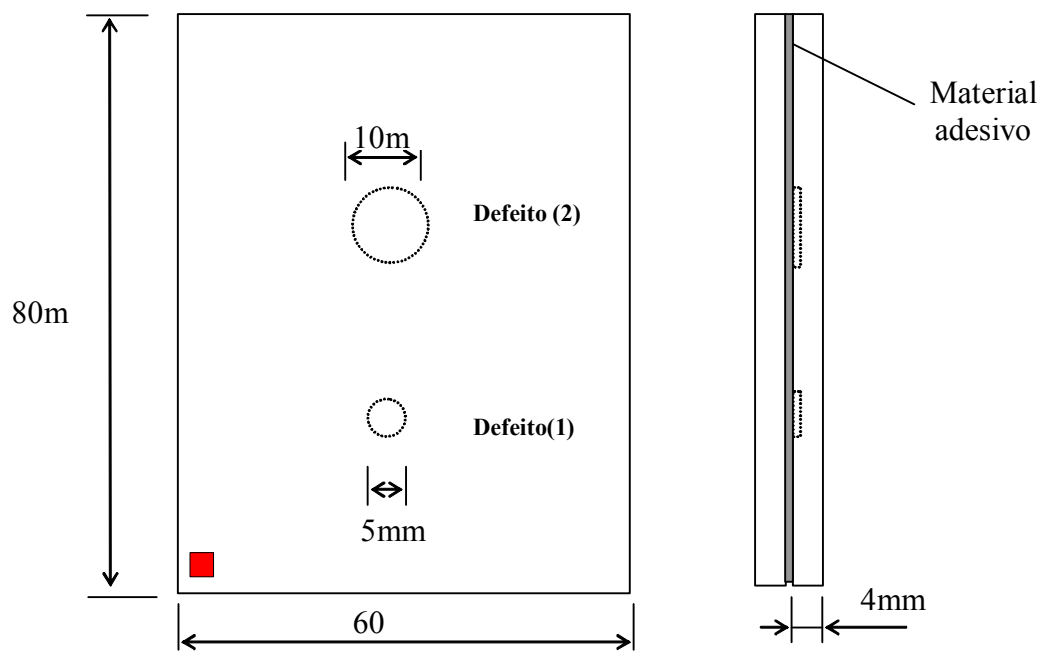


Figura 34 – Simulação da falta de material adesivo através de vazios (furos internos, parte côncava, seção superior – CP1). [17].

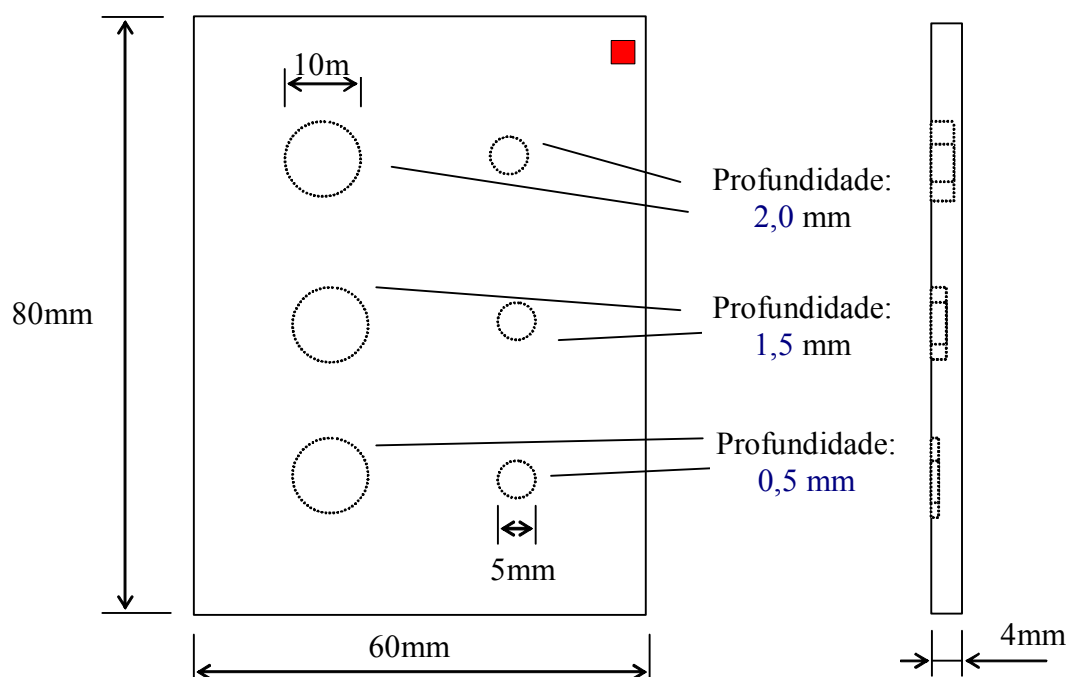


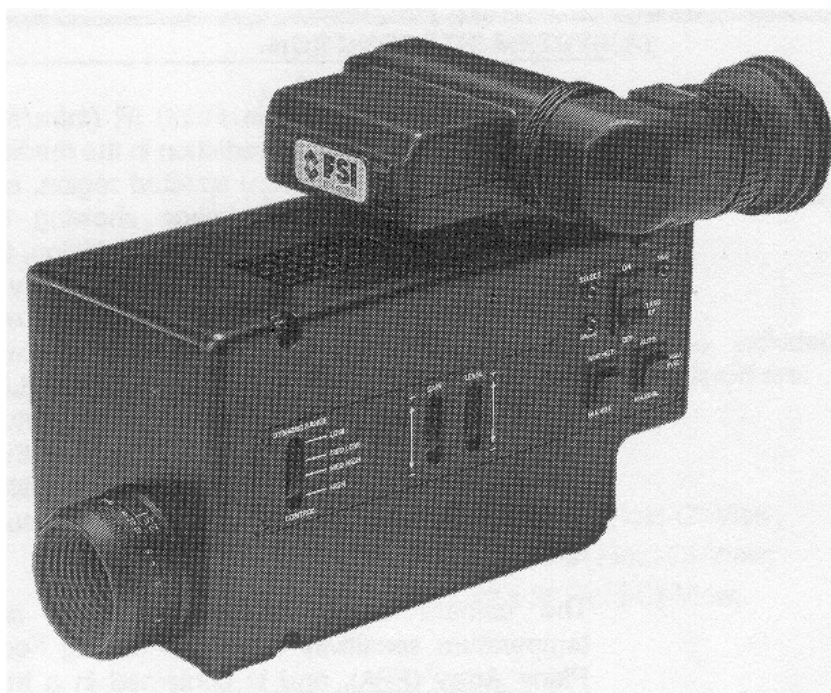
Figura 35 - Furos simulando vazios nas seções a serem ensaiadas (CP3) [17].

6.2.2.3. FALTA DE ADESÃO

Para criar uma região de baixa adesão foi usado de um filme desmoldante em duas regiões centrais do CP2. A figura 33 mostra a exata posição dos filmes desmoldantes.

6.3. TERMÓGRAFO

O equipamento utilizado para aquisição das imagens, foi uma câmera termográfica convencional. As câmeras termográficas são usadas para detectar radiações de comprimento de onda situadas dentro da região espectral do infravermelho e desta forma mostrar imagens provenientes desta aquisição em tempo real. Estas imagens têm como componentes de formação a intensidade da radiação emitida pela região observada, ou seja, o que gera o contraste (diferenças) ao longo da imagem. A fotografia 2, mostra o termógrafo utilizado nos testes.



Fotografia 2 – Termógrafo utilizado na tese

Ficha técnica do equipamento:

Fabricante: FSI – Flir Systems;

Tipo: Prism Single Point;

Visor: Preto e branco;

Lente: 50 mm (distância focal) – F50;

Campo de visão: 8,5°(horizontal) x 6,5° (vertical)

Distância focal mínima: 600 mm

Detector:

Tipo: Arranjo focal plano (FPA) – (CCD);

Material termosensível: Siliciureto de Platina (PtSi);

Distribuição dos fotosensores: 320 x 244 pontos;

Intervalo espectral: 3 a 5 μm (região média do espectro - MWIR);(Objetos terrestres emitem menos radiação nesta região do espectro. Pequenas mudanças na diferença de temperatura, criam grandes mudanças no sinal de saída. Entretanto para temperaturas de background baixas (-10), a variação resultante é muito pequena e pode se tornar ruidosa). Cuidados devem ser tomados com a presença de CO₂, para comprimentos da ordem de 4,2 μm e reflexos do sol na superfície;

Resfriamento do sensor térmico infravermelho: mecânico (minicompressor de gás);

Temperatura de operação do sensor: - 196°C(77°K);

Mínima variação detectável (MDT): 0,1 @ 30°C (traduz a capacidade de detecção do sistema);

Mínima temperatura detectável (MRT): - 20°C (traduz a capacidade do sistema detectar detalhes);

Resolução espacial: 1,0 mrad ;

Intervalo válido de medidas: -20 a 250°C;

Acurácia: +/- 4 graus;

Níveis de cor para formação da imagem: 256 níveis de cinza;

Intervalo dinâmico do infravermelho: 10 bits;

Sinal de saída de imagem: 60Hz NTSC.

Ajuste (**set up**) do equipamento para os testes

O quadro 5, abaixo, mostra o estado das variáveis do termógrafo usado nos testes realizados.

Quadro 5 – Valores das variáveis do termógrafo

Descrição da variável	Estado
Foco	Ajustado com o uso de anel de referência com 10 mm. O ajuste é repetido a cada alteração no cenário de testes.
Emissividade	Definido em 0,86 ¹ conforme quadro do equipamento para materiais poliméricos
Controle de range dinâmico	Nível baixo (Posição LOW) ²
Polaridade	Pontos quentes em coloração escura (BLK HOT)
Controle de ganho (Gain)	Automático
Controle de nível (Level)	Automático
Modo de medida de temperatura (Mode)	Temperatura de pico (Peak Temperature)
Temperatura de fundo (Background)	Definida com o valor da temperatura do ambiente de teste (23 °C)
Correção de não uniformidade (NUC)	A cada acionamento do termógrafo usar a função, por 3 segundos, com foco no infinito.

Notas:

¹- Os valores para aço situam-se em 0,21 e para alumínio 0,09.

²- Esta variável foi fixada no nível baixo (low), em função dos limites mínimos e máximos definidos por esta configuração conterem os valores presentes nos testes, ou

sejam, temperaturas da ordem de 80°C (aquecimento máximo) e 25°C (temperatura mínima após ciclo resfriamento), respectivamente.

6.4. INTERFACE ENTRE O TERMÓGRAFO E COMPUTADOR E PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS

O sistema de interfaceamento entre o termógrafo e o computador, que digitalizava as imagens era um dispositivo externo. O programa de aquisição de imagens utilizado era compatível ao dispositivo externo, inclusive fornecido em um só conjunto, denominado Pinnacle Studio. O sistema Pinnacle Studio, se divide em duas partes, ou sejam, o sistema de interface física e o programa de aquisição de imagens.

Variáveis do sistema:

Taxa de captura de vídeo de até 30 quadros/s;

Resolução de captura de vídeo 320x240;

Formatos de entrada (NTSC): composta RCA (sinal analógico)

Formatos de saída: imagem digital com extensão AVI.

Ajustes do modo de gravação do sistema Pinnacle Studio:

O sistema foi ajustado para salvar as imagens durante um minuto com no mínimo um quadro a cada segundo. Como resultado das gravações obtiveram-se, para cada corpo-de-prova avaliado, uma média de 900 fotogramas, dada a taxa de amostragem do sistema (até 30 quadros por segundo). Todas as imagens foram salvas em padrão AVI. Imagens com esta extensão são compatíveis com o programa de tratamento de imagens (Image Pro).

6.5. COMPUTADOR

PC Pentium IV (2 GHz)

- 512 Mb de memória RAM;
- 64 Mb de memória de placa de Vídeo;
- Disco de Rígido de 40 Gb;
- Gravador de CD 40× – LG;
- Driver de leitura de CD-ROM 40×.

6.6. PROGRAMA DE TRATAMENTO DE IMAGEM E SINAIS

Image Pro Plus 4.0 for Windows

➤ Fabricante: Media Cybernetics (1997)

Foi selecionado o Image Pro como principal ferramenta de processamento de imagens em função dos diversos recursos disponíveis, entre estes destacam-se os filtros passa-baixo, passa-alto, filtros não-lineares, controle de brilho e contraste, ajuste e equalização de histograma e FFT, assim como referências de medidas de intensidade e possibilidades de medidas de danos no plano, inclusive com o recurso de calibração. O programa Image Pro é totalmente compatível para manipulação de imagens com extensão AVI, que é a base de dados da tese.

Outro aplicativo utilizado foi o Origin, para comparação entre dados adquiridos em várias configurações em modo gráfico, o uso de filtros como passa-baixo e média móvel (alisamento) e geração de quadros estatísticos.

Filtro média-móvel do Origin: Este recurso executa o alisamento de um conjunto de dados. Através do número de pontos a ser considerado na média, define-se o grau de alisamento a ser aplicado através do numero de pontos a serem considerados na média. Este número sempre será ímpar e quando selecionado par, será adicionado de uma unidade. No caso do presente estudo o número de pontos a ser considerado será 10 (11 quando em operação), ou seja, para cada valor escolhido, cinco menores e cinco maiores, adjacentes, serão incluídos na média.

6.7. MÉTODOS DE EXCITAÇÃO

Na escolha dos métodos de excitação, o compromisso foi com a portabilidade e possibilidade de utilização em ambiente industrial. Foram três os métodos utilizados, conforme abaixo:

6.7.1. LÂMPADAS

Dispositivo contendo 5 lâmpadas halógenas instaladas em um suporte com superfície refletora de modo que a emissão luminosa ocorre somente em uma direção. A intensidade luminosa incidente na amostra é estimada em 3 W/cm^2 . O dispositivo tem seu controle via timer, para controle de vários tempos de acendimento. A potência nominal total é de 2500 watts.

Especificação: Marca Osram, linha haloline 500w, 230v, referência. C8b8

6.7.2. SOPRADOR TÉRMICO

Soprador industrial de ar quente com potência nominal de 1500 watts. O equipamento tem a possibilidade de manipulação da vazão de ar quente em duas configurações, conforme abaixo:

- Posição1: vazão de 280 l/min (V1) com temperaturas do ar em torno de 300°C ;
- Posição 2: vazão de 480 l/min (V2) com temperaturas do ar em torno de 500°C .

O soprador possibilita um jato de ar quente de aproximadamente 2 cm de diâmetro.

Especificação: Marca Great Wall, HG – GW – 1500 A

6.7.3. FORNO

A fim de se verificar o efeito da homogeneidade de aquecimento e a importância do tempo de aquecimento (transiência) nos testes foi utilizado um forno (estufa), com capacidade máxima de aquecimento igual a 120°C .

6.8. PROCEDIMENTOS DE TESTE

Os testes foram executados de forma a atender a premissa de gerar uma metodologia adequada para aplicação na indústria, o que pode ser traduzido através da otimização de tempos de execução, simplicidade de aplicação e interpretação da

informação. Outro compromisso foi desenvolver cenários que ocorrem nas situações industriais, ou seja, o objetivo é avaliar juntas sem a necessidade de acesso ao interior do duto e a uma distância do objeto de interesse que seja possível no campo e com fontes de excitação que existam no mercado, ou sejam, facilmente montadas. Outro ponto tem relação com os danos a detectar, ou seja, objetiva-se detectar o que a literatura corrente informa como os danos mais frequentes em juntas coladas.

A primeira etapa dos procedimentos de teste foi definir quais seriam as variáveis dos cenários de teste a serem montados, o que foi definido conforme abaixo:

- Distância do termógrafo ao corpo sob exame (d), em milímetros;
- Tempo de excitação (aquecimento) do corpo sob exame (t_e), em segundos;
- Posição do termógrafo e excitador em relação ao corpo sob exame (Pos);
- Características da superfície do corpo sob exame (S);
- Tipo de excitador usado (Ex);
- Tipo / posição de descontinuidade no corpo sob exame, identificado pelo corpo-de-prova (CP).

Estas variáveis foram definidas com base no que foi depreendido da revisão bibliográfica. Os valores ou tipos de cada uma delas, foram definidas em certos casos baseados em trabalhos anteriores ou aleatoriamente, para se necessário ser ajustada e alterada de acordo com o observado.

No quadro abaixo são informados os valores ou tipos de variáveis utilizadas durante os testes:

Quadro 6 – Tipos e valores das variáveis de teste

d (mm)	t_e (s)	Pos	S	Ex	CP
600	5	Reflexão convexa (Rconv)	Sem revestimento	Soprador térmico	CP1, CP2* e CP3 (Vazio)
				Vazão	
				V1 V2	
700	10	Reflexão côncava (Rconc)	Com revestimento	Lâmpadas halógenas	CP6 (Delaminação)
800	20	Transmissão (Trans)		Forno	CP2* (Falta de adesivo)
	30				
	60				

Nota:* O CP2 contém dois tipos de dano.

A variável posição tem 3 condições possíveis, conforme o quadro 6. Na condição de tomada de imagem por reflexão convexa (Rconv), o termógrafo e o excitador apontam para a superfície convexa do corpo-de-prova (CP), conforme a figura 36(a). De modo semelhante ao representado através da figura 36(a), na tomada de imagem por reflexão côncava, o termógrafo e o excitador ficam do mesmo lado, só que apontam para a superfície côncava do CP. Finalmente, na condição de tomada de imagem via transmissão, o termógrafo aponta para a superfície convexa do CP e o excitador para a superfície côncava, conforme a figura 36(b). O excitador é sempre mantido a menor distância possível do corpo-de-prova e manuseado de forma a homogeneizar o máximo a distribuição de calor.

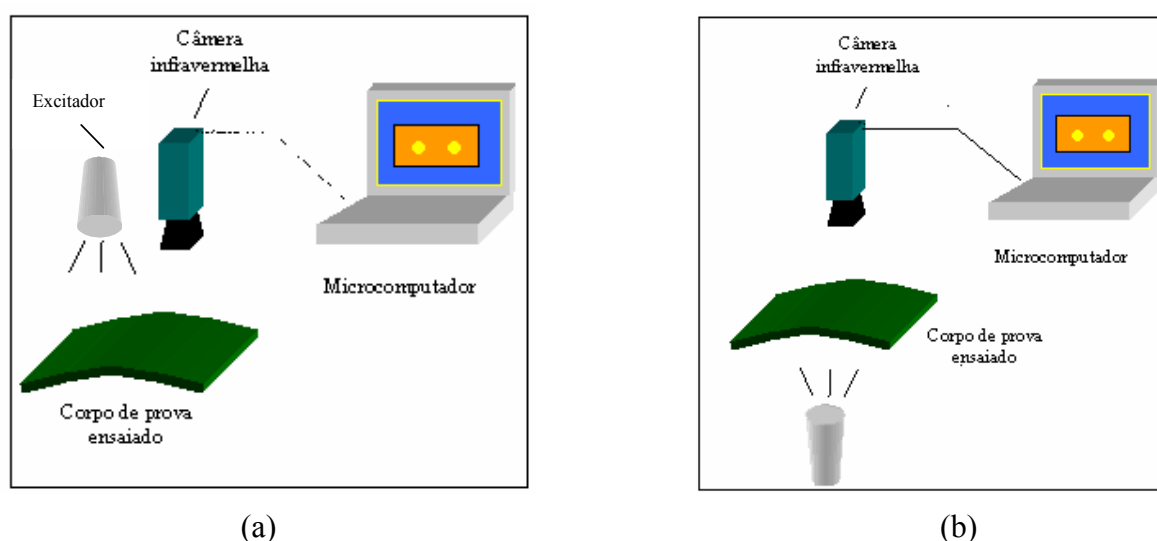


Figura 36 – Tomada de imagem térmica.

O excitador tipo soprador, tem mais uma variável que origina-se das duas vazões (V_z) de ar possíveis conforme descrito no item 6.7.2 (soprador térmico) da tese. Logo, para os testes com soprador esta será mais uma variável evidenciada nos quadros (Vazão1 – 280 l/min e Vazão 2 – 480l/min).

Para o início dos testes o primeiro passo foi elaborar procedimentos de execução, os quais possuíam orientações desde o valor das variáveis do termógrafo, até como codificar os corpo-de-prova de acordo com o cenário. Estes procedimentos foram divididos por tipo de excitador e para cada excitador, as variáveis do quadro 6 foram combinadas entre si, em seus diversos valores, desenvolvendo-se um certo número de cenários. Para os 4 corpos-de-prova, foram criadas codificações de acordo com o cenário de teste.

Abaixo segue um resumo da sequência de montagem de um cenário de testes.

1º- Posiciona-se o termógrafo (em base acrílica) sobre a bancada, conectando-se o mesmo no sistema de digitalização (**Pinnacle**) e este conecta-se ao micro..

2º- O corpo-de-prova (CP) é fixado ao suporte de teste e posicionado na distância definida para o cenário, de forma a garantir a centralização e paralelismo com o plano da objetiva do termógrafo. A referência é o centro do CP.

3º- Definida a distância, efetua-se o foco no termógrafo.

4º- Define-se o **set up** do programa de aquisição (**Pinacle**), a taxa de aquisição mínima (1 quadro/segundo) e o tempo total de aquisição (60s).

5º- Posiciona-se o excitador a uma distância mínima do CP e inicia-se o aquecimento durante o tempo definido para o cenário.

6º- Findo o tempo de aquecimento, retira-se o excitador e inicia-se a aquisição de imagens.

7º- Passado os 60s de aquisição, executa-se o procedimento de armazenamento da sequência.

A seguir, enumeram-se os testes por tipo de excitador.

6.8.1. TESTES COM EXCITADOR TIPO LÂMPADA HALÓGENA

6.8.1.1. TESTE 1L

O quadro abaixo mostra os valores fixados para as variáveis

Quadro 7 – Estados do teste 1L

Variável	Estado/valor
d	600 mm
t _e	10 s
S	Sem pintura

Em seguida o quadro 8, mostra os CP's testados e codificação utilizada para o teste 1L.

Quadro 8 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 1L.

Rconv	Rconc	Trans
1iq10	1.1iq10	1.2iq10
2iq10	2.1iq10	2.2iq10
3iq10	3.1iq10	3.2iq10
6iq10	6.1iq10	6.2iq10

6.8.1.2. TESTE 2L

O quadro abaixo mostra os valores fixados para as variáveis, destacando a variável que mudou em relação ao teste anterior.

Quadro 9 – Estados do teste 2L

Variável	Estado/valor
D	600 mm
t _e	15 s
S	Sem pintura

Em seguida o quadro 10, mostra os CP's testados e codificação utilizada para o teste 2L.

Quadro 10 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 2L.

Rconv	Rconc	Trans
1iq15	1.1iq15	1.2iq15
2iq15	2.1iq15	2.2iq15
3iq15	3.1iq15	3.2iq15
6iq15	6.1iq15	6.2iq15

6.8.1.3. TESTE 3L

O quadro abaixo mostra os valores fixados para as variáveis, destacando a variável que mudou em relação ao teste anterior.

Quadro 11 – Estados do teste 3L

Variável	Estado/valor
D	600 mm
Te	5 s
S	Sem pintura

Em seguida a quadro 12, mostra os CP's testados e codificação utilizada para o teste 3L

Quadro 12 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 3L.

Rconv	Rconc	Trans
1iq5	1.1iq5	1.2iq5
2iq5	2.1iq5	2.2iq5
3iq5	3.1iq5	3.2iq5
6iq5	6.1iq5	6.2iq5

6.8.1.4. TESTE 4L

O quadro abaixo mostra os valores fixados para as variáveis, destacando a variável que mudou em relação ao teste anterior.

Quadro 13 – Estados do teste 4L

Variável	Estado/valor
D	700 mm
Te	5 s
S	Sem pintura

Em seguida o quadro 14, mostra os CP's testados e codificação utilizada para o teste 4L.

Quadro 14 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 4L.

Rconv	Rconc	Trans
1iq57	1.1iq57	1.2iq57
2iq57	2.1iq57	2.2iq57
3iq57	3.1iq57	3.2iq57
6iq57	6.1iq57	6.2iq57

6.8.1.5. TESTE 5L

O quadro abaixo mostra os valores fixados para as variáveis, destacando a variável que mudou em relação ao teste anterior.

Quadro 15 – Estados do teste 5L

Variável	Estado/valor
d	800 mm
te	15 s
S	Sem pintura

Em seguida o quadro 16, mostra os CP's testados e codificação utilizada para o teste 5L.

Quadro 16 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 5L.

Rconv	Rconc	Trans
1iq158	1.1iq158	1.2iq158
2iq158	2.1iq158	2.2iq158
3iq158	3.1iq158	3.2iq158
6iq158	6.1iq158	6.2iq158

6.8.1.6. TESTE 6L

O quadro abaixo mostra os valores fixados para as variáveis, destacando a variável que mudou em relação ao teste anterior.

Quadro 17 – Estados do teste 6L

Variável	Estado/valor
d	800 mm
te	5 s
S	Sem pintura

Em seguida o quadro 18, mostra os CP's testados e codificação utilizada para o teste 6L.

Quadro 18 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 6L

Rconv	Rconc	Trans
1iq58	1.1iq58	1.2iq5
2iq58	2.1iq58	2.2iq5
3iq58	3.1iq58	3.2iq5
6iq58	6.1iq58	6.2iq5

6.8.1.7. TESTE 7L

O quadro abaixo mostra os valores fixados para as variáveis, destacando a variável que mudou em relação ao teste anterior.

Quadro 19 – Estados do teste 7L

Variável	Estado/valor
d	700 mm
te	15 s
S	Sem pintura

Em seguida o quadro 20, mostra os CP's testados e codificação utilizada para o teste 7L.

Quadro 20 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 7L

Rconv	Rconc	Trans
1iq157	1.1iq157	1.2iq157
2iq157	2.1iq157	2.2iq157
3iq157	3.1iq157	3.2iq157
6iq157	6.1iq157	6.2iq157

Observa-se que no quadro 20 não se têm todos os CP's marcados, isto porque durante os testes e análises paralelas foram se aperfeiçoando os métodos de avaliação de modo que para certas verificações somente determinado corpo-de-prova era suficiente em função dos danos que este apresentava. Por outro lado, também, no decorrer das análises foram necessárias outras combinações de variáveis para determinados corpos-de-prova. Vale citar que os testes com soprador foram executados anteriormente aos com lâmpada, apesar dos resultados destes testes estarem aparecendo mais cedo na

dissertação. Isto pode ser explicado pelo fato de as análises terem começado pelos testes com lâmpadas e os resultados preliminares terem parecido mais promissores e com a vantagem de tempos menores de excitação.

6.8.2. TESTES COM EXCITADOR TIPO SOPRADOR TÉRMICO

6.8.2.1. TESTE 1S

O quadro abaixo mostra os valores fixados para as variáveis

Quadro 21 – Estados do teste 1S

Variável	Estado/valor
d	600 mm
te	30 s
S	Sem pintura
V	480 l/min

Em seguida o quadro 22, mostra os CP's testados e a codificação utilizada para o teste 1S.

Quadro 22 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 1S

Rconv	Rconc	Trans
1ii	1.1ii	1.2ii
2ii	2.1ii	2.2ii
3ii	3.1ii	3.2ii
6ii	6.1ii	6.2ii

6.8.2.2. TESTE 2S

O quadro abaixo mostra os valores fixados para as variáveis, destacando a variável que mudou em relação ao teste anterior.

Quadro 23 – Estados do teste 2S

Variável	Estado/valor
d	600 mm
te	60 s
S	Sem pintura
V	480 l/min

Em seguida o quadro 24, mostra os CP's testados e a codificação utilizada para o teste 2S.

Quadro 24 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 2S

Rconv	Rconc	Trans
1ii60	1.1ii60	1.2ii60
2ii60	2.1ii60	2.2ii60
3ii60	3.1ii60	3.2ii60
6ii60	6.1ii60	6.2ii60

6.8.2.3. TESTE 3S

O quadro abaixo mostra os valores fixados para as variáveis, destacando a variável que mudou em relação ao teste anterior.

Quadro 25 – Estados do teste 3S

Variável	Estado/valor
D	600 mm
Te	10 s
S	Sem pintura
V	480 l/min

Em seguida o quadro 26, mostra os CP's testados e a codificação utilizada para o teste 3S.

Quadro 26 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 3S

Rconv	Rconc	Trans
1ii10	1.1ii10	1.2ii10
2ii10	2.1ii10	2.2ii10
3ii10	3.1ii10	3.2ii10
6ii10	6.1ii10	6.2ii10

6.8.2.4. TESTE 4S

O quadro abaixo mostra os valores fixados para as variáveis, destacando a variável que mudou em relação ao teste anterior.

Quadro 27 – Estados do teste 4S

Variável	Estado/valor
D	700 mm
te	30 s
S	Sem pintura
V	480 l/min

Em seguida o quadro 28, mostra os CP's testados e a codificação utilizada para o teste 4S.

Quadro 28 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 4S

Ronv	Rconc	Trans
1ii307	1.1ii307	1.2ii307
2ii307	2.1ii307	2.2ii307
3ii307	3.1ii307	3.2ii307
6ii307	6.1ii307	6.2ii307

6.8.2.5. TESTE 5S

O quadro abaixo mostra os valores fixados para as variáveis, destacando a variável que mudou em relação ao teste anterior.

Quadro 29 – Estados do teste 5S

Variável	Estado/valor
D	800 mm
Te	30 s
S	Sem pintura
V	480 l/min

Em seguida o quadro 30, mostra os CP's testados e a codificação utilizada para o teste 5S.

Quadro 30 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 5S

Rconv	Rconc	Trans
1ii308	1.1ii308	1.2ii308
2ii308	2.1ii308	2.2ii308
3ii308	3.1ii308	3.2ii308
6ii308	6.1ii308	6.2ii308

6.8.2.6. TESTE 6S

O quadro abaixo mostra os valores fixados para as variáveis, destacando a variável que mudou em relação ao teste anterior.

Quadro 31 – Estados do teste 6S

Variável	Estado/valor
D	800 mm
Te	60 s
S	Sem pintura
V	280 l/min

Em seguida o quadro 32, mostra os CP's testados e a codificação utilizada para o teste 6S.

Quadro 32 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 6S

Rconv	Rconc	Trans
1i608	1.1i608	1.2i608
2i608	2.1i608	2.2i608
3i608	3.1i608	3.2i608
6i608	6.1i608	6.2i608

6.8.2.7. TESTE 7S

O quadro abaixo mostra os valores fixados para as variáveis, destacando a variável que mudou em relação ao teste anterior.

Quadro 33 – Estados do teste 7S

Variável	Estado/valor
D	600 mm
Te	30 s
S	Com pintura
V	280 l/min

Em seguida o quadro 34, mostra os CP's testados e a codificação utilizada para o teste 7S.

Quadro 34 – Codificação dos corpos-de-prova do teste 7S

Rconv	Rconc	Trans
1i306p	1.1i306p	1.2i306p
2i306p	2.1i306p	2.2i306p
3i306p	3.1i306p	3.2i306p
6i306p	6.1i306p	6.2i306p

Alguns dos cenários de teste podem não constar desta parte da dissertação mas serem necessários no decorrer de avaliação dos cenários.

6.9. AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS

Os resultados dos cenários mostrados conforme procedimentos do item 6.8 serão analisados agora. A estratégia foi analisar um determinado corpo-de-prova para todos os cenários nos quais o mesmo foi testado, e a partir deste ponto comparar os resultados para cada variação elegendo a que caracterizou melhor a descontinuidade. O corpo-de-prova 1 foi escolhido como referência, em função de conter defeitos mais fáceis de caracterizar (fato observado durante avaliações preliminares envolvendo os vários corpos-de-prova). Através do estudo das variáveis do corpo-de-prova 1, objetiva-se definir cenários ideais, ou sejam, valores ou condições otimizadas das variáveis envolvidas, que facilitam o estudo para os outros corpos-de-prova, o que pode ser interpretado como a calibração da metodologia.

O critério inicial de avaliação e comparação entre cenários foi o nível de intensidade de brilho (recurso **line profile** do Image Pro) ao longo das regiões com e sem defeito, a fim de verificar e comparar qual a magnitude da diferença de brilho entre a região com e sem defeito, sendo eleita a melhor configuração aquela que apresentar a maior diferença, o que pode ser traduzido como maior contraste.

O procedimento de avaliação foi desenvolvido através da implementação dos seguintes itens:

- Abertura da sequência correspondente no Image Pro;
- Conversão da apresentação em pseudocores para o padrão de tons de cinza (12 bits);
- Uso do comando de perfil de intensidade de brilho ou tons cinza (line profile) do Image Pro;

- Gravação dos perfis (formato HST) dos diversos termogramas espaçados de 100 em 100 quadros, inclusive o primeiro e último quadros*;
- Importação para o programa Origin;
- Criação de quadro com os dados dos perfis, no ambiente do programa Origin;
- Normalização dos dados (divisão de todos os valores pelo valor máximo);
- Repete-se o processo acima para todas as outras seqüências a comparar;
- Geram-se os gráficos contendo as várias curvas de perfil (**line profile**);
- Aplica-se alisamento através de filtro tipo média móvel, com 11 pontos considerados, ou seja, o alisamento considera a cada ponto, mais 5 de cada lado para deste modo calcular média entre os onze;
- Através do quadro estatístico do programa Origin, identifica-se a seqüência de maior intervalo (intervalos - range), ou seja, diferença entre maior e menor valor, que corresponde ao maior contraste;
- Com a melhor seqüência define-se o melhor fotograma, ou seja, a temperatura que melhor caracteriza o defeito.
- Finalmente define-se o melhor valor da variável sob análise.

* A decisão de se ter escolhido uma amostragem de 100 em 100 quadros, deveu-se ao fato de nas observações dos perfis, as alterações entre estes quadros serem de muito baixa intensidade, não alterando significativamente os formatos e valores (amplitude x comprimento) dos gráficos. Outro fato deveu-se a no conjunto dos quadros obtidos sempre estarem incluídos os máximos (maior temperatura) e mínimos (menor temperatura).

Abaixo serão apresentados os resultados por excitador tendo como base o corpo-de-prova 1.

6.9.1. LÂMPADAS HALÓGENAS

6.9.1.1. AVALIAÇÃO 1 (Posição - Pos)

A) TEMPO DE AQUECIMENTO DE 5 SEGUNDOS

Este teste visa avaliar a variável posição, ou seja, os modos reflexão convexa (Rconv), Reflexão côncava (Rconc) e Transmissão (Trans), para o corpo-de-prova 1 com excitação via lâmpadas halógenas.

O primeiro passo foi passar a imagem em pseudocores (figura 37 a) para tons de cinza (figura 37 b) e em seguida gerar o perfil de intensidade (**line profile**), conforme apresentado na figura 37 c. O gráfico da figura 37 c, abaixo, é apenas ilustrativo, pois corresponde a um dos termogramas em uma das seqüências a serem comparadas. Geralmente obteve-se, para cada seqüência, uma média de 900 termogramas, dos quais foram selecionados 10 para cada configuração a avaliar, ou seja, foi selecionado um termograma a cada intervalo de 100, com o primeiro e último quadros inclusive, conforme a figura 37 d.

O corpo-de-prova em cada seqüência é identificado, de acordo com a posição como, CP1iq5 (Rconv), CP11iq5(Rconc) e CP12iq5(Trans).

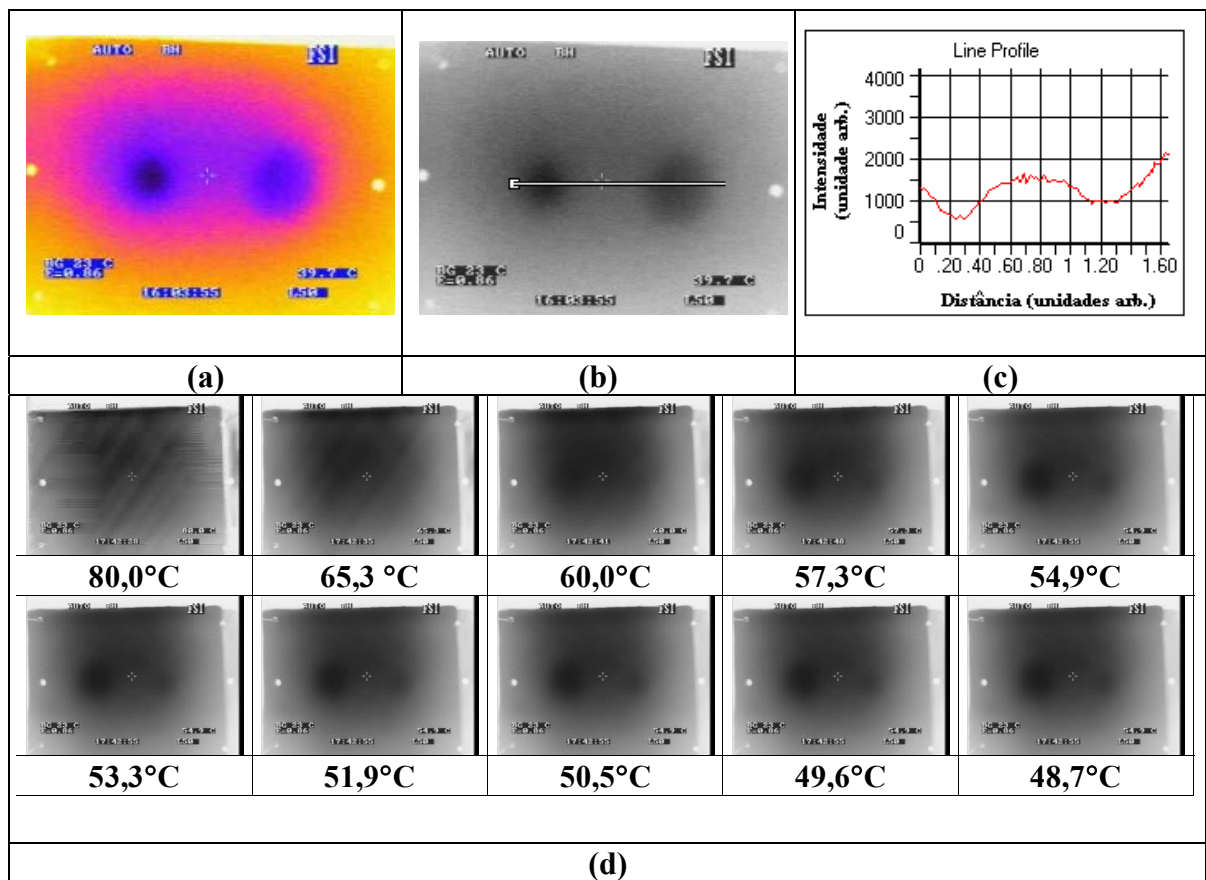


Figura 37 – Fases de manipulação da imagem

O quadro abaixo resume as variáveis do teste

Quadro 35 – Variáveis do teste

Variável fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Lâmpada
t_e	5s
D	600 mm
Variável analisada	Estados possíveis
Pos	Rconc/ Rconv/Trans

Primeiramente, para cada posição foi selecionado o melhor termograma dentre os dez analisados. A análise, conforme explicado anteriormente, foi feita pegando-se o perfil correspondente a cada termograma e importando-os para o ambiente do programa Origin. Ao fim desta operação, obteve-se um quadro de dados onde cada coluna corresponda aos valores de brilho (intensidade de cinza) de um determinado termograma.

Os quadros (de dados e estatística) e os gráficos obtidos para o corpo-de-prova (CP1) nas posições Rconv, Rconc e Trans, são apresentados a seguir.

Abaixo é apresentada a metodologia de escolha do melhor termograma para a posição reflexão convexa (Rconv), do CP1, com os parâmetros definidos no quadro 35.

As tabelas A (A.1 a A.5 do anexo 1), apresentam os valores dos perfis (**line profile**) dos dez termogramas selecionados para a posição Rconv.

Notar, nas tabelas A.1 a A.5 do anexo 1, que para cada termograma (coluna), existem 128 linhas que correspondem aos valores de tons de cinza de cada ponto da linha de referência do perfil (**line profile**), conforme mostrado na figura 37(b). Nos quadros estatísticos, na coluna correspondente ao número total de pontos considerados (**Sum(y)**), os valores são menores que 128, isto deve-se ao fato de na manipulação dos dados, para que os valores de máximo (Rconc e Rconv) ou mínimo (Trans) se concentrassem na região central, alguns dados terem sido desprezados.

Com os valores das tabelas A.1 a A.5 do anexo 1, partiu-se para a análise estatística dos dados, de modo a verificar qual dos termogramas (Term) apresentava o maior nível de diferença entre máximos e mínimos, ou seja, a maior diferença em tons de cinza entre região sem e com a presença de defeito. Pode-se observar na tabela A.2, a existência de uma coluna de valor igual a 1, este representa o valor máximo causado por interferência da referência de “mira” do termógrafo na imagem. O valor máximo igual a um é resultado da operação de normalização, fato que será observado em todos os valores de máximos dos testes executados. Os valores iguais devem-se ao fato de ser sempre o mesmo objeto para todos os termogramas.

O quadro estatístico é apresentado abaixo:

Quadro 36 – Quadro estatístico dos dados do CP1 na posição Rconv.

	Termogramas(°)	Mean(Y)	sd(YEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Term1	0,40233	0,10949	0,24742	1	0,75258	51,49828
2	Term100	0,49073	0,12588	0,22171	1	0,77829	62,81321
3	Term200	0,4969	0,13149	0,21647	1	0,78353	63,60375
4	Term300	0,45582	0,12562	0,2163	1	0,7837	58,34548
5	Term400	0,45896	0,13369	0,22145	1	0,77855	58,74642
6	Term500	0,47686	0,1314	0,24694	1	0,75306	61,03837
7	Term600	0,47406	0,11903	0,26114	1	0,73886	60,67905
8	Term700	0,49269	0,09533	0,29317	1	0,70683	63,06447
9	Term800	0,51394	0,08313	0,39279	1	0,60721	65,78372
10	Term900	0,51661	0,08212	0,38136	1	0,61864	66,1265

Analisando o quadro 36, nota-se que o termograma 300 é o que possui a maior diferença (intervalo), ou seja, define o momento no qual os defeitos estão mais visíveis, em função do maior contraste. O momento pode ser traduzido em temperatura, ou seja, para o corpo-de-prova 1, na posição reflexão convexa e mais as características do quadro 35, ocorrem o maior contraste para seus defeitos na temperatura de 42°C, com aquecimento máximo de 50°C. O que será comparado com os resultados das outras posições será o **line profile** correspondente ao termograma 300.

Posteriormente, foi feito todo o processo acima, separadamente, para cada defeito, onde os resultados mostraram que para o menor defeito (\varnothing 5 x 1,6 mm) a temperatura de melhor evidência foi 42 °C e para o maior (\varnothing 10 x 1,2 mm), foi 38 °C, ou seja, o defeito mais próximo da superfície (defeito 1) foi o detectado primeiro conforme define a equação [13], reproduzida, abaixo, onde t é o tempo de detecção, z é a profundidade do defeito em relação à superfície de observação e α a difusibilidade:

$$t \cong \frac{z^2}{\alpha} \quad [13]$$

São apresentadas, no anexo 1, as tabelas B.1 a B.5, com dados do CP1 para seleção do melhor termograma na posição reflexão côncava (Rconc).

Com os valores definidos nas tabelas B.1 a B.5 no anexo 1, executou-se tratamento estatístico, gerando como resultado o quadro resumo, abaixo:

Quadro 37 – Quadro estatístico dos dados do CP1 na posição Rconc

	Termograma(X)	Mean(Y)	sd(y Er±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Termograma 1	0,46209	0,08232	0,31033	1	0,68967	59,14755
2	Termograma 100	0,37716	0,07928	0,26734	1	0,73266	48,27652
3	Termograma 200	0,35963	0,08043	0,24399	1	0,75601	46,03231
4	Termograma 300	0,36855	0,08753	0,25918	1	0,74082	47,17421
5	Termograma 400	0,38561	0,08603	0,25194	1	0,74806	49,35782
6	Termograma 500	0,38433	0,0954	0,22863	1	0,77137	49,19436
7	Termograma 600	0,39599	0,09428	0,24279	1	0,75721	50,6869
8	Termograma 700	0,40873	0,09296	0,26187	1	0,73813	52,31721
9	Termograma 800	0,40188	0,09664	0,2444	1	0,7556	51,44009
10	Termograma 900	0,4239	0,09437	0,26754	1	0,73246	54,25921
11		--	--	--	--	--	--

De acordo com o quadro 37 e sua coluna intervalo (**range**), o termograma que melhor demonstra o defeito, é o de número 500, sendo o perfil (**line profile**) deste termograma utilizado para a comparação de posição.

A análise dos dados do CP1, para a posição transmissão(Trans), é apresentada abaixo, através das tabelas de valores dos 10 termogramas selecionados e quadro estatístico.

Com os dados das tabelas C.1 a C.5, do anexo 1, gerou-se o quadro estatístico que é apresentada abaixo:

Quadro 38 – Quadro estatístico dos dados do CP1 na posição Trans .

	Termograma(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Termograma1	0,87808	0,04743	0,78431	1	0,21569	112,39477
2	Termograma100	0,88192	0,05173	0,762	1	0,238	112,88559
3	Termograma200	0,87912	0,05776	0,77328	1	0,22672	112,52759
4	Termograma300	0,85653	0,06535	0,70897	1	0,29103	109,63536
5	Termograma400	0,85785	0,07494	0,72681	1	0,27319	109,80468
6	Termograma500	0,85443	0,0697	0,72276	1	0,27724	109,36643
7	Termograma600	0,84655	0,08282	0,69599	1	0,30401	108,35878
8	Termograma700	0,84993	0,08649	0,68654	1	0,31346	108,79088
9	Termograma800	0,8494	0,08628	0,65771	1	0,34229	108,72312
10	Termograma900	0,81114	0,08424	0,64357	1	0,35643	103,82614

De acordo com o quadro 38, através da coluna que representa o valor dos maiores intervalos (**range**), o termograma que melhor demonstra o defeito, é o de número 900, sendo o perfil (**line profile**) deste termograma utilizado para a comparação de posição.

Após definir-se os melhores termogramas para cada posição de acordo com o cenário definido conforme o quadro 35, passa-se para a fase de comparação dos mesmos, a fim de saber qual a melhor posição.

A tabela D do anexo 1, mostra os valores de **line profile** oriundos dos melhores termogramas, por posição.

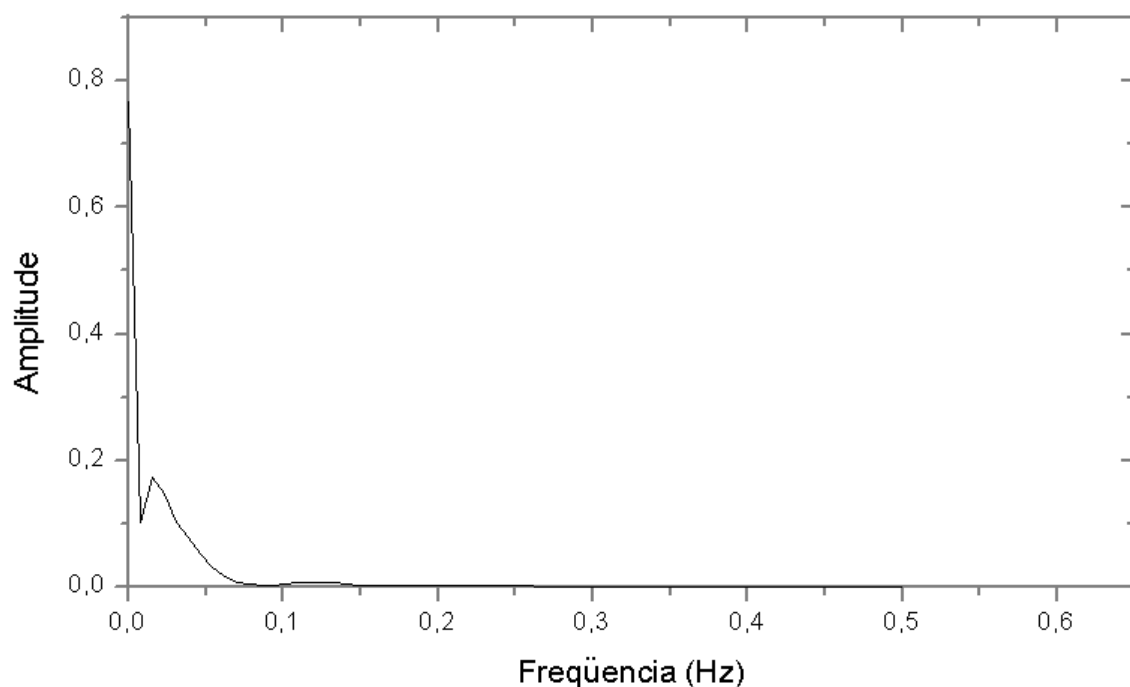
Pode-se observar que algumas células da tabela D, não têm valor. Isto se justifica, pelo fato daqueles valores terem sido desconsiderados para que os máximos (Rconv e Rconc) ou mínimos (Trans) ficassem concentrados na região central do corpo-de-prova, área entre os defeitos.

Com os dados da tabela D, que foram normalizados, pôde-se gerar o quadro estatístico abaixo.

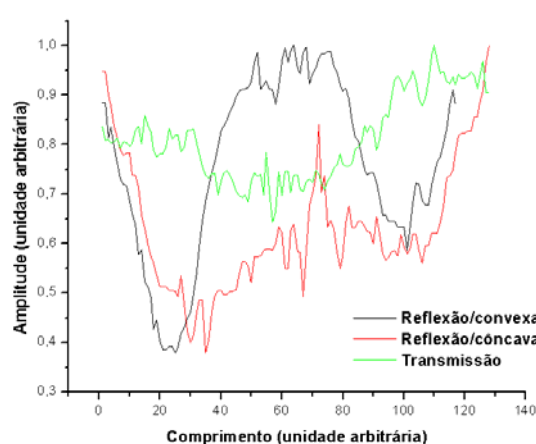
Quadro 39 – Quadro estatístico dos dados do CP1 nas posições Rconv, Rconc e Trans.

	Posição(X)	Mean(Y)	sd(YEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Rconv	0,75903	0,17898	0,37895	1	0,62106	88,80661
2	Rconc	0,63146	0,13004	0,37995	1	0,62004	80,82637
3	Trans	0,81114	0,08424	0,64357	1	0,35643	103,82614

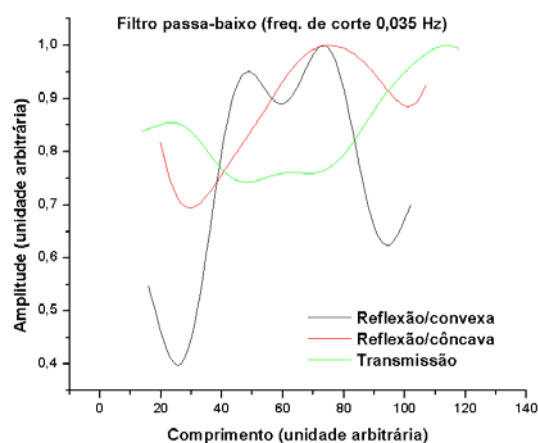
Através da análise da coluna de intervalos (**range**) do quadro acima, verifica-se que o maior contraste corresponde à posição Rconv. Através dos dados do teste também foi gerado o gráfico da figura 38 (b). Observando o gráfico, verifica-se o grande nível de ruído dos sinais, sendo assim foi feita a filtragem do perfil com o uso de filtro passa-baixo do programa Origin com frequência de corte igual a 0,035Hz. A frequência foi escolhida através do método de tentativa e erro, mas balizado pelo resultado da aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) no perfil, passando o sinal do domínio do espaço para o domínio da frequência. O gráfico da figura 38 (a) mostra o resultado do tratamento no sinal oriundo do perfil na posição transmissão, a título de exemplo.



(a)



(b)



(c)

Figura 38 – Perfis no domínio da frequência (a) e espaço (b e c) do CP1.

Como o filtro passa-baixo, alterou a forma do sinal e em alguns casos a amplitude aumentou (fato ilógico), foi decidido não utilizá-lo, aplicando-se alternativamente a operação de filtragem no modo alisamento através do filtro média móvel do programa Origin, o que gerou bons resultados.

Quadro 40 – Estatística dos dados filtrados (alisados) do CP1 nas 3 posições, testadas.

	Posição(°)	Mean(γ)	sd(γEr±)	Min(γ)	Max(γ)	Range(γ)	Sum(γ)
1	Rconv	0,78061	0,17379	0,41688	1	0,58312	91,331
2	Rconc	0,6911	0,1287	0,48754	1	0,51246	88,4609
3	Trans	0,85526	0,08442	0,75057	1	0,24942	109,47302

Abaixo, mostra-se o perfil resultante da operação de alisamento.

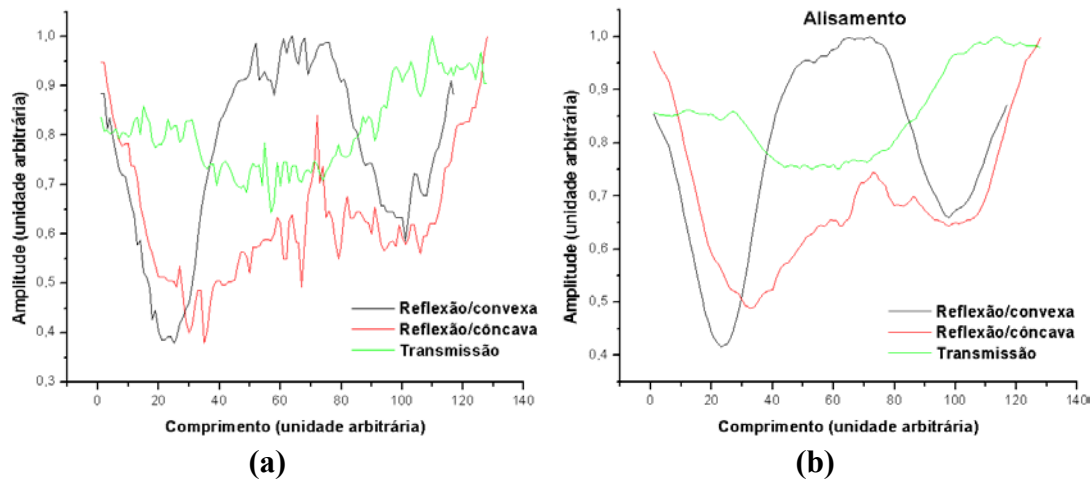


Figura 39 – Perfis referentes aos quadros 39 e 40.

Através do quadro 40, defini-se a posição no modo **reflexão convexa** como a de melhor resultado, pois este modo apresenta o maior intervalo (maior contraste). A diferença dos valores de intervalo (**range**), entre as posições avaliadas é de 57,22 %, ou seja, entre os valores de Rconv e Trans. O resultado de transmissão apresenta um sinal de amplitude diferencial menor e grande intensidade de ruído (figura 39a) e sem boa definição quanto à presença do defeito. Isto pode ser associado a um tempo insuficiente de aquecimento, o que gerou uma frente de onda térmica de baixa energia e desta forma fortemente influenciada pela espessura percorrida e sua interação com o meio heterogêneo (espalhamento) culminando em elevado grau de ruído. O resultado de reflexão convexa também apresenta um grande nível de ruído, mostrando a sensibilidade do processo ao aumento da distância do defeito à superfície de observação. O resultado é importante devido ao fato de habilitar a posição reflexão convexa, como a melhor entre as outras posições, para o tempo em questão. Embora esteja se avaliando os três modos, o modo mais viável para a indústria, dentre os três avaliados é a reflexão convexa.

Outra observação importante, é que sempre houve diminuição do intervalo (**range**) para as posições após a filtragem, o que mostra o nível de ruído envolvido. Para a posição em reflexão convexa houve redução de 6,10% do valor do intervalo, para reflexão côncava 17,35% e para a posição transmissão 30,02% de redução do valor do

intervalo, ou seja, a operação de alisamento retirou muito mais componentes dos sinais de reflexão côncava e transmissão, por serem estes os mais ruidosos.

B) TEMPO DE AQUECIMENTO DE 10 SEGUNDOS

O quadro abaixo resume o estado das variáveis para esta nova etapa de avaliação (novo tempo excitação de 10 s). Nesta etapa, será suprimida a apresentação de algumas passagens do processo de avaliação para que não se torne repetitiva a abordagem, desta forma, já serão apresentados os resultados, por exemplo, do melhor fotograma para cada posição.

Quadro 41 – Variáveis do teste

Variável fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Lâmpada
t_e	10s
D	600 mm
Variável analisada	Estados possíveis
Pos	Rconc/ Rconv/Trans

O melhor fotograma para a posição Rconv foi o de número 200, conforme o quadro 42. Logo será este o fotograma utilizado na comparação de posição com tempo de excitação de 10 segundos.

Quadro 42 – Estatística dos dados do CP1 na posição Rconv.

	Termograma(X)	Mean(Y)	sd(y Er±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Termograma1	0,64218	0,14551	0,3394	1	0,6606	83,48326
2	Termograma100	0,55336	0,16633	0,21856	1	0,78144	71,93735
3	Termograma200	0,55579	0,17192	0,21087	1	0,78913	72,25258
4	Termograma300	0,56297	0,16853	0,25692	1	0,74308	73,18601
5	Termograma400	0,52973	0,17032	0,22838	1	0,77162	68,86492
6	Termograma500	0,5528	0,17395	0,25872	1	0,74128	71,86413
7	Termograma600	0,51103	0,16151	0,24324	1	0,75676	66,43343
8	Termograma700	0,53769	0,16311	0,2754	1	0,7246	69,8995
9	Termograma800	0,51395	0,14781	0,32026	1	0,67974	66,81354
10	Termograma900	0,52705	0,14796	0,33465	1	0,66535	68,51637

Para a posição Rconv, o melhor fotograma foi o de número 800, conforme o quadro 43.

Quadro 43 – Estatística dos dados do CP1 na posição Rconv.

	Termograma(X)	Mean(Y)	sd(y Er±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Termograma1	0,74176	0,11671	0,57808	1	0,42192	96,42837
2	Termograma100	0,67403	0,1312	0,52051	1	0,47949	87,62416
3	Termograma200	0,63201	0,12194	0,48302	1	0,51698	82,16151
4	Termograma300	0,60169	0,1343	0,41648	1	0,58352	78,22028
5	Termograma400	0,58652	0,14074	0,37741	1	0,62259	76,24732
6	Termograma500	0,61807	0,14043	0,40159	1	0,59841	80,34068
7	Termograma600	0,62792	0,14243	0,39885	1	0,60115	81,62984
8	Termograma700	0,63883	0,14903	0,40086	1	0,59914	83,04796
9	Termograma800	0,5861	0,14116	0,36334	1	0,63666	76,19301
10	Termograma900	0,60575	0,14309	0,36624	1	0,63376	78,74783

Para a posição Trans, o melhor fotograma foi o de número 900.

Quadro 44 – Estatística dos dados do CP1 na posição Trans.

	Termograma(X)	Mean(Y)	sd(y Er±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Termograma1	0,85652	0,06376	0,7542	1	0,2458	111,34799
2	Termograma100	0,84849	0,0702	0,72232	1	0,27768	110,30363
3	Termograma200	0,82516	0,09481	0,62663	1	0,37337	107,27111
4	Termograma300	0,75185	0,11721	0,55817	1	0,44183	97,74051
5	Termograma400	0,75814	0,12641	0,50064	1	0,49936	98,55768
6	Termograma500	0,73603	0,14415	0,46285	1	0,54715	95,68382
7	Termograma600	0,71195	0,15125	0,44787	1	0,55213	92,55343
8	Termograma700	0,67838	0,16582	0,4131	1	0,5869	88,18895
9	Termograma800	0,68646	0,16861	0,42556	1	0,57444	89,23923
10	Termograma900	0,71023	0,16903	0,39475	1	0,60525	92,33036

Comparando-se os melhores resultados de cada posição (quadro 45), chega-se à conclusão que o melhor modo é a transmissão, no caso de tempo de excitação igual a 10 segundos.

Quadro 45 – Estatística dos dados do CP1 nas 3 posições, testadas.

	Posição(°)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Rconv	0,7472	0,21268	0,30591	0,99999	0,69408	81,44478
2	Rconc	0,81026	0,13054	0,56496	1,00001	0,43505	72,92299
3	Trans	0,71023	0,16903	0,39475	1	0,60525	92,33036

Embora a maior diferença ou contraste eleja a posição transmissão (Trans), para o tempo de excitação com duração igual a 10 segundos, o gráfico da figura 40 (a), mostra que o que melhor caracteriza o defeito do CP1 é a posição reflexão convexa devido a forma do sinal e comportamento (menor nível de ruído). De forma a melhorar a forma de verificação, abaixo é mostrado o resultado de filtragem dos perfis com filtro tipo média-móvel (alisamento) (figura 40 b).

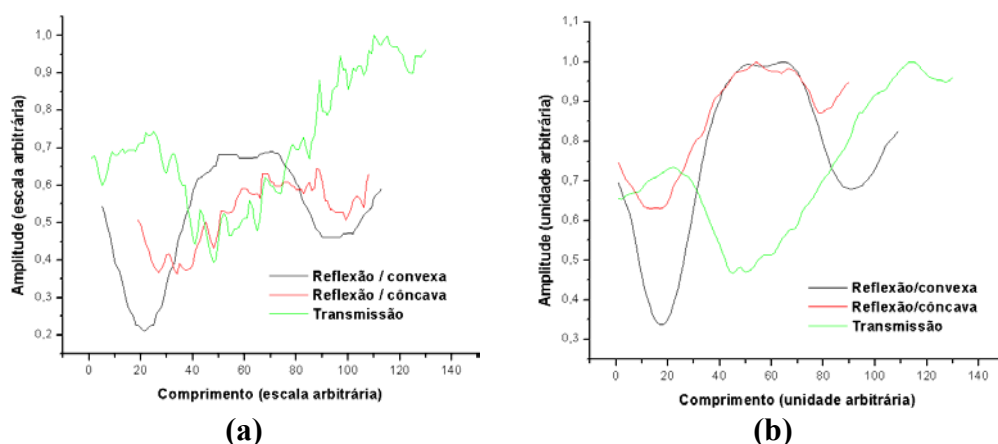


Figura 40 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 45 e 46.

A partir dos dados filtrados gerou-se o quadro estatístico 46, onde o melhor resultado é o referente à reflexão convexa, corroborando a indicação anterior.

Quadro 46 – Estatística dos dados filtrados do CP1 nas 3 posições, testadas.

	Posição(°)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Rconv	0,75215	0,20568	0,33741	1,00001	0,6626	81,98402
2	Rconc	0,85058	0,1291	0,63073	1,00001	0,36927	76,5518
3	Trans	0,72473	0,1676	0,46672	1	0,53328	94,21468

C) TEMPO DE AQUECIMENTO DE 15 SEGUNDOS

A partir de agora a variável posição, será avaliada com o tempo de excitação 15 segundos. O quadro abaixo resume o estado das variáveis.

Quadro 47 – Variáveis do teste

Variável fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Lâmpada
Te	15s
D	600 mm
Variável analisada	Estados possíveis
Pos	Rconc/ Rconv/Trans

Seguindo o mesmo procedimento anterior, serão apresentados os melhores fotogramas para cada posição. Para a posição Rconv, o melhor termograma foi o de número 300, conforme o quadro 48 (coluna intervalo - **range**).

Quadro 48 – Estatística dos dados do CP1 na posição Rconv.

	Termograma(X)	Mean(Y)	sd(y Est)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Termograma1	0,51088	0,09403	0,33962	0,64361	0,30398	51,08805
2	Termograma100	0,66733	0,20453	0,3485	0,93176	0,58327	66,73274
3	Termograma200	0,68375	0,23563	0,37374	0,99301	0,61927	68,37529
4	Termograma300	0,68716	0,2266	0,33918	0,99269	0,65351	68,71564
5	Termograma400	0,66934	0,21862	0,31956	0,94215	0,62259	66,93388
6	Termograma500	0,68525	0,21338	0,32025	0,95317	0,63292	68,52479
7	Termograma600	0,67408	0,19923	0,33787	0,92507	0,58719	67,40804
8	Termograma700	0,65929	0,18572	0,3133	0,89264	0,57934	65,9291
9	Termograma800	0,65279	0,17973	0,32087	0,8688	0,54793	65,27872
10	Termograma900	0,63525	0,16804	0,32675	0,82505	0,4983	63,52485

Para a posição Rconc, o melhor termograma é o de número 600 conforme o quadro 49.

Quadro 49 – Estatística dos dados do CP1 na posição Rconc.

	Termograma(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Termograma1	0,72378	0,11591	0,54619	1	0,45381	83,95887
2	Termograma100	0,64508	0,12704	0,48669	1	0,51331	74,82913
3	Termograma200	0,60287	0,12813	0,44047	1	0,55953	69,93307
4	Termograma300	0,57668	0,13293	0,38557	1	0,61443	66,89504
5	Termograma400	0,57388	0,1397	0,33962	1	0,66038	66,57023
6	Termograma500	0,60619	0,14125	0,36711	1	0,63289	70,31783
7	Termograma600	0,58407	0,14741	0,32288	1	0,67712	67,75183
8	Termograma700	0,59472	0,14461	0,32851	1	0,67149	68,98749
9	Termograma800	0,62018	0,14785	0,35447	1	0,64553	71,94126
10	Termograma900	0,61327	0,14702	0,33023	1	0,66977	71,13915

Para a posição Trans, o melhor termograma é o de número 600, conforme o quadro 50.

Quadro 50 – Estatística dos dados do CP1 na posição Trans.

	Termograma(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Termograma1	0,8201	0,08283	0,68011	1	0,31989	95,1312
2	Termograma100	0,75411	0,10717	0,60112	1	0,39888	87,47652
3	Termograma200	0,74501	0,1405	0,53538	1	0,46462	86,4211
4	Termograma300	0,73472	0,17152	0,45498	1	0,54502	85,22793
5	Termograma400	0,68837	0,20403	0,37245	1	0,62755	79,85034
6	Termograma500	0,65573	0,22557	0,34553	1	0,65447	76,06492
7	Termograma600	0,63634	0,2374	0,27016	1	0,72984	73,81586
8	Termograma700	0,66363	0,23752	0,31953	1	0,68047	76,981
9	Termograma800	0,62165	0,22815	0,30132	1	0,69868	72,11164
10	Termograma900	0,64824	0,23982	0,30833	1	0,69167	75,19583

A partir deste momento, comparam-se as três posições a fim de se verificar qual a que melhor evidencia o defeito. Abaixo, apresenta-se o quadro dos dados estatísticos comparando os valores de posição.

Quadro 51 – Estatística dos dados do CP1 nas três posições testadas.

	Posição(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Rconv	0,74183	0,20476	0,35098	1	0,64902	77,15054
2	Rconc	0,80592	0,18254	0,48016	1	0,51984	74,14465
3	Trans	0,63634	0,2374	0,27016	1	0,72984	73,81586

Verifica-se, através do quadro 51, que a posição de melhor resultado é a Transmissão, tomando-se como referência a coluna denominada intervalo (**range**). Por outro lado, observando o gráfico da figura 41 (a), verifica-se que sob o aspecto de forma do sinal, o de melhor desempenho é aquele originado da posição reflexão convexa,

inclusive sob o aspecto ruído. Uma nova verificação é efetuada com filtragem através de filtro média móvel. O resultado é apresentado pelo gráfico da figura 41 (b).

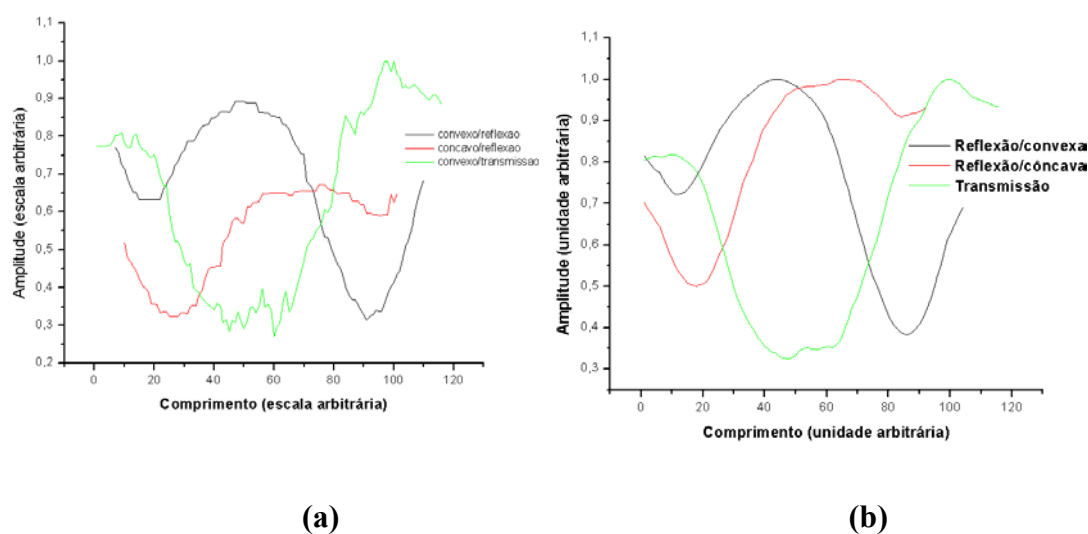


Figura 41 – Perfis (**line profile**) referentes aos quadros 51 e 52.

O quadro 52 mostra o resultado estatístico dos dados filtrados, confirmando a posição transmissão como melhor para o maior dos tempos testados na configuração com excitação com lâmpadas.

Quadro 52 – Estatística dos dados filtrados do CP1, nas três posições testadas.

	Posição(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Rconv	0,74714	0,20005	0,38343	1	0,61657	77,70247
2	Rconc	0,818	0,18077	0,50074	1	0,49927	75,256
3	Trans	0,65972	0,24085	0,32634	1	0,67366	76,5273

6.9.1.2. AVALIAÇÃO 2 (Distância - d)

A) TEMPO DE AQUECIMENTO DE 5 SEGUNDOS

Esta fase tem a finalidade de avaliar a variável distância do corpo-de-prova ao termógrafo. Conforme informado será mantido o corpo-de-prova 1 como referência. Foi escolhida posição Rconv em função dos bons resultados desta posição e conclusões anteriores (sensibilidade da transmissão com o meio e distância a ser percorrida). Serão avaliados os tempos de excitação extremos, ou seja, 5 e 15 segundos. O quadro a seguir

mostra o resumo das variáveis. A distância mínima definida para os testes (600 mm), corresponde à distância focal mínima do termógrafo para a lente utilizada (F50).

Quadro 53 – Variáveis do teste

Variável fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Lâmpada
t _e	5s
Pos	Rconv
Variável analisada	Estados possíveis
D	600,700 e 800 mm

Da mesma forma do que foi praticado nos testes anteriores, foram selecionados os melhores fotogramas para cada distância e gerados os perfis (**line profile**) e em seguida os valores dos perfis foram passados para um quadro de dados e a partir desta gerada um quadro estatístico (quadro 54) a fim de verificar qual destes apresentava a maior diferença através do resultado apresentado na coluna intervalo (**range**).

Quadro 54 – Estatística dos dados do CP1 nas três distâncias testadas.

	d(×)	Mean(γ)	sd(γEr±)	Min(γ)	Max(γ)	Range(γ)	Sum(γ)
1	600 mm	0,75501	0,19592	0,33512	1	0,66488	80,03101
2	700 mm	0,71791	0,17724	0,37706	1	0,62294	67,48311
3	800 mm	0,73741	0,17299	0,47435	1	0,52565	42,76961

Através dos resultados do quadro 54, verifica-se que o melhor resultado apresentado foi o correspondente à distância de 600 mm, ou seja, a menor distância. O gráfico da figura 42(a), mostra os perfis (**line profile**) gerados pelo teste e correspondente a cada distância estudada e o gráfico da figura 42(b), os mesmos perfis com filtragem com o uso de filtro média móvel. Após a operação de filtragem, gerou-se o quadro estatístico dos dados filtrados, onde se confirmou a distância de 600 mm como sendo a de melhor resultado o cenário testado.

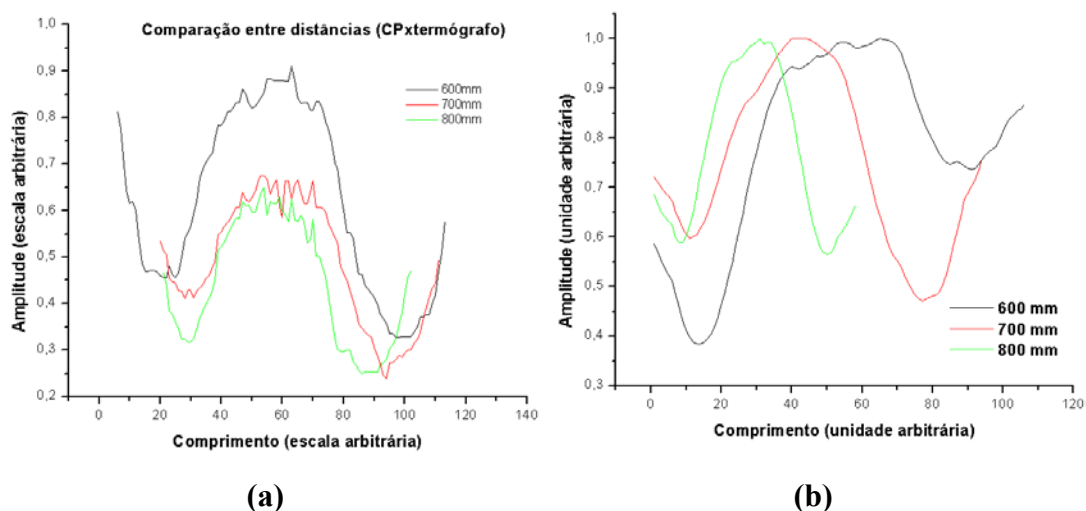


Figura 42 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 54 e 55.

Quadro 55 – Estatística dos dados filtrados do CP1 nas três distâncias testadas.

	d(X)	Mean(Y)	sd(YEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	600 mm	0,78083	0,19514	0,38409	1	0,61591	82,7682
2	700 mm	0,74542	0,1726	0,47093	1	0,52907	70,06912
3	800 mm	0,77098	0,15831	0,56487	1	0,43513	44,7171

B) TEMPO DE AQUECIMENTO DE 15 SEGUNDOS

A partir de agora, será avaliadas a distância com alteração do tempo de excitação. O quadro 56 resume o estado das variáveis.

Quadro 56 – Variáveis do teste

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Lâmpada
t_e	15s
Pos	Rconv
Variável analisada	Estados possíveis
D	600,700 e 800 mm

Abaixo, mostra-se o quadro estatístico dos resultados das distâncias avaliadas.

Quadro 57 – Estatística dos dados do CP1 nas três distâncias testadas.

	Posição(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	600 mm	0,66162	0,24215	0,29337	1,00001	0,70664	54,91439
2	700 mm	0,68887	0,2267	0,31132	1	0,68868	64,06453
3	800 mm	0,70913	0,2279	0,32796	1	0,67204	74,45902

Independente do tempo de excitação a distância de melhor resultado é a menor, ou seja, 600 mm.

A fim de verificar comportamento do sinal, a figura 43 (a) mostra o perfil resultante (**line profile**) sem filtragem. Já a figura 43 b, mostra o resultado da filtragem com uso do filtro média móvel. E em seguida mostra-se, através do quadro estatístico 58, que mesmo após a retirada dos ruídos, permanece o resultado, elegendo a menor distância como a melhor.

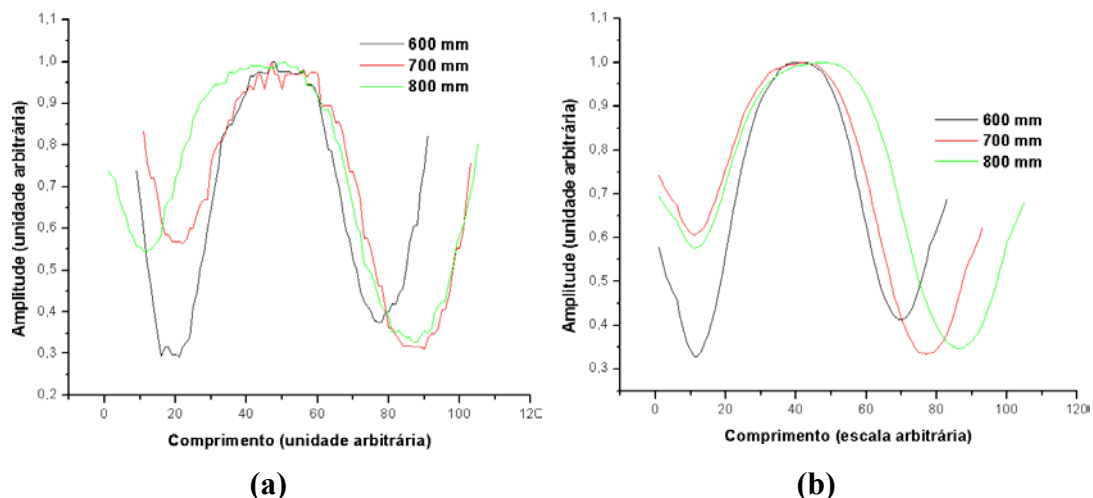


Figura 43 – Perfis (**line profile**) referentes aos quadros 57 e 58.

Quadro 58 – Estatística dos dados filtrados do CP1 nas três distâncias testadas.

	d(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	600 mm	0,6724	0,22971	0,32925	1	0,67075	55,80915
2	700 mm	0,70776	0,22318	0,33499	1	0,66501	65,82161
3	800 mm	0,71445	0,22166	0,34753	1	0,65247	75,017

6.9.1.3. AVALIAÇÃO 3 (Tempo de aquecimento - te)

Neste momento será avaliado o tempo de excitação isoladamente. Com base nos resultados anteriores, será focalizado no CP1, nas posições reflexão convexa (Rconv) e transmissão (Trans).

A) REFLEXÃO CONVEXA (Rconv).

O quadro, abaixo, traz o resumo do estado das variáveis para este teste.

Quadro 59 – Variáveis do teste.

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Lâmpada
D	600 mm
Pos	Rconv
Variável analisada	Estados possíveis
Te	5,10 e 15 segundos

Abaixo, mostra-se o quadro estatístico dos resultados dos tempos de excitação (te) avaliados no teste

Quadro 60 – Estatística dos dados do CP1 para os tempos testados.

	te(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	5 segundos	0,72193	0,19399	0,30716	1	0,69284	80,13376
2	10 segundos	0,75009	0,21058	0,30592	1,00001	0,69409	84,00996
3	15 segundos	0,65685	0,20937	0,29768	1	0,70233	72,91062

Através do quadro acima é verificado que o tempo de 15 segundos de excitação, é o de melhor desempenho para a posição reflexão convexa (Rconv). Após a filtragem o melhor resultado passou a ser o correspondente ao tempo de excitação de 10 segundos.

Nos testes anteriores onde se comparavam posições nos diversos tempos de excitação, os melhores resultados para a posição Rconv se deram para o tempo de excitação 5 segundos, ou seja, comparativamente a posição Rconv é melhor em 5 segundos pois neste momento as outras posições têm desempenho ruim.

O sinal proveniente do tempo de excitação (t_e) igual a 10 segundos apresenta um comportamento e geometria compatível com o dano presente no CP e comportamento que exprime baixo nível de ruído quando comparado, por exemplo, ao sinal proveniente de $t_e = 5s$ (figura 44 a). A fim de verificar o comportamento do sinal, após a filtragem foi gerado o gráfico da figura 44b e o quadro estatístico dos dados filtrados (quadro 61).

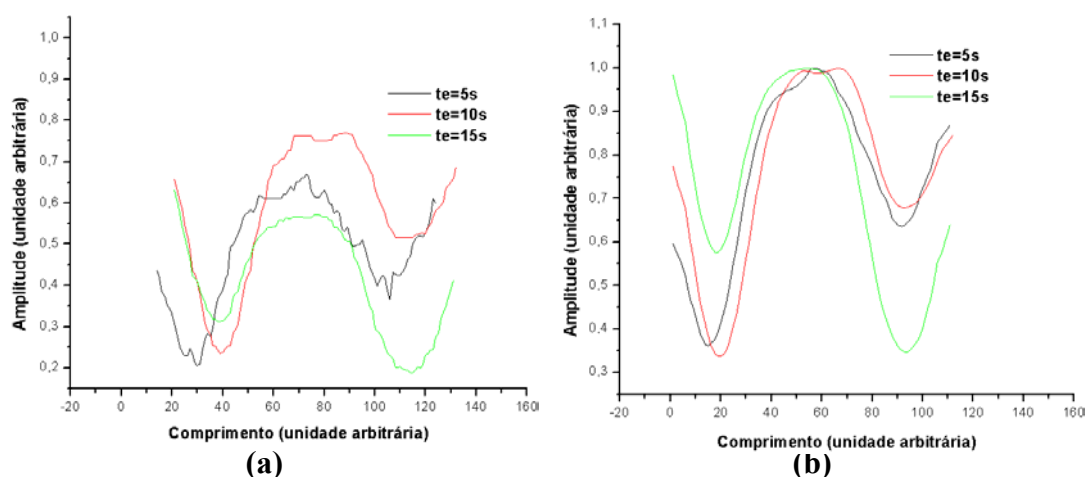


Figura 44 – Perfis (**line profile**) referentes aos quadros 60 e 61.

Quadro 61 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para os tempos testados.

	te(s)	Mean(Y)	sd(y Er±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	5 segundos	0,74752	0,1929	0,36208	1	0,63792	82,9742
2	10 segundos	0,75514	0,20267	0,33741	1	0,6626	84,57549
3	15 segundos	0,72878	0,22166	0,34753	1	0,65247	80,89513

Através do quadro acima se confirma o tempo de 10 segundos como o melhor tempo de excitação para a posição reflexão convexa. O tempo de excitação igual a 15 segundos, apresentou inversão de intensidade de nível de cinza com relação aos defeitos. O defeito 1 é mais profundo que o 2, estando mais próximo da superfície e sendo o mais quente que o defeito 2 no momento considerado para temperaturas máximas menores atingidas no ensaio. Pode-se, concluir que com a maior quantidade de energia (maior tempo de aquecimento), o maior e mais profundo defeito passou a apresentar maior contraste, devido a sua maior temperatura neste outro momento, ou seja, defeitos localizados em maior profundidade necessitam de maior quantidade de energia.

B) TRANSMISSÃO (Trans).

A posição transmissão será avaliada quanto ao tempo de excitação de forma isolada. O quadro abaixo traz o resumo do estado das variáveis.

Quadro 62 – Variáveis do teste.

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Lâmpada
d	600 mm
Pos	Trans
Variável analisada	Estados possíveis
te	5,10 e 15 segundos

O quadro estatístico abaixo mostra os resultados comparativos do teste.

Quadro 63 – Estatística dos dados do CP1 para os tempos testados.

	te(s)	Mean(Y)	sd(y Er±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	5 segundos	0,81114	0,08424	0,64357	1	0,35643	103,82614
2	10 segundos	0,71023	0,16903	0,39475	1	0,60525	92,33036
3	15 segundos	0,63634	0,2374	0,27016	1	0,72984	73,81586

Conforme detectado em testes anteriores, verifica-se que os maiores tempos têm o melhor desempenho para a posição transmissão (Trans), conforme a coluna intervalo (**range**) do quadro 63. O gráfico da figura 45a mostra os perfis obtidos, sem filtragem. A fim de verificar se os altos níveis de ruído, comuns na posição transmissão afetaram o ‘critério de avaliação, aplicou-se o filtro média-móvel, o resultado é mostrado pelo gráfico da figura 45b e o quadro estatístico 64.

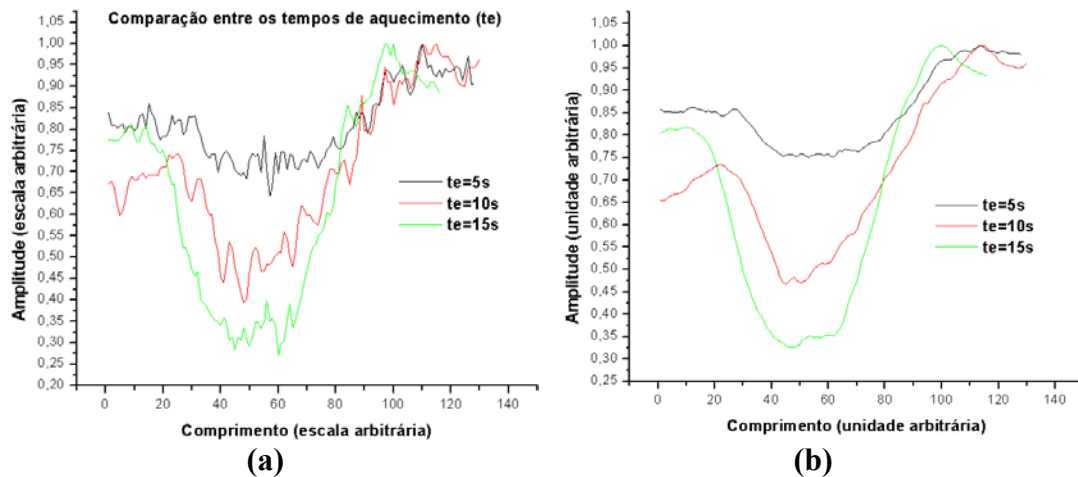


Figura 45 – Perfis (**line profile**) referentes aos quadros 63 e 64.

Quadro 64 – Estatística dos dados filtrados do CPI para os tempos testados.

	te(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	5 segundos	0,85526	0,08442	0,75057	1	0,24942	109,47302
2	10 segundos	0,72473	0,1676	0,46672	1	0,53328	94,21468
3	15 segundos	0,65972	0,24085	0,32634	1	0,67366	76,5273

Mesmo após a filtragem confirma-se o maior tempo como o mais adequado para a posição transmissão, o que pode ser verificado pela diferença entre os valores de contraste (intervalo - **range**) máximo e mínimo o que é da ordem de 62,9%.

Os sinais de transmissão sempre apresentam grande quantidade de ruído (gráfico a da figura 45), o que já havia sido detectado nos testes anteriores. A sua forma geométrica é inversa quando comparada aos sinais provenientes da posição reflexão. Isto pode ser explicado pelo fato de na reflexão as regiões avaliadas terem fluxo de calor se propagando da superfície sob exame para a posterior, logo ocorrendo o resfriamento da superfície ou diminuição de temperatura durante o ensaio.

6.9.1.4. AVALIAÇÃO 4 – Estado da superfície (com ou sem pintura)

A) REFLEXÃO CONVEXA

Visando homogeneizar as diferenças de emissividade da superfície do corpo-de-prova (CP), o que pode provocar degradação da informação obtida, foram aplicadas sobre a superfície do CP e testados separadamente, 2 tipos de recobrimento. O primeiro utilizava tinta cinza de baixo brilho e o segundo tinta preta fosca. O quadro, abaixo, mostra o estado das variáveis para o teste.

Quadro 65 – Variáveis do teste.

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Lâmpada
D	600 mm
Pos	Rconv
Te	10 s
Variável analisada	Estados possíveis
S	Com ou sem revestimento

O quadro estatístico, abaixo, mostra os resultados dos testes com pintura.

Quadro 66 – Estatística dos dados do CP1 para os tipos de superfície testados.

	Superfície(%)	Mean(Y)	sd(y Er±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Sem pintura	0,74853	0,21216	0,30591	0,99999	0,69408	82,3381
2	Preto fosco	0,6755	0,23214	0,25313	1	0,74687	78,35831
3	Cinza	0,70431	0,23313	0,29911	1	0,70089	80,9958

Através do quadro acima, verifica-se que a pintura melhorou o resultado do valor de contraste (coluna intervalo - **range**), mas em pequena magnitude, ou seja, a diferença entre maior e menor contraste ficou da ordem de 7,06%, sendo que o melhor resultado foi para o revestimento com tinta preta fosca. Este revestimento apresenta a maior emissividade.

A tinta cinza, como apresentava brilho não teve bom resultado. Entretanto analisando o gráfico da figura 46 a, verifica-se que no caso do revestimento cinza, o defeito maior (2) apresentou uma melhora significativa de amplitude, enquanto o menor (1) apresentou uma piora acentuada, quando comparado à superfície sem revestimento algum, ou seja, ocorreu a diminuição na diferença entre defeitos (queda de contraste). Após a filtragem (gráfico da figura 46 b), permaneceram os resultados, conforme o quadro 67. Analisando-se os defeitos separadamente, o revestimento preto fosco, pois apesar de não aumentar significativamente o contraste do defeito 1, não o diminui e aumenta bastante o contraste do maior defeito (2) após a filtragem.

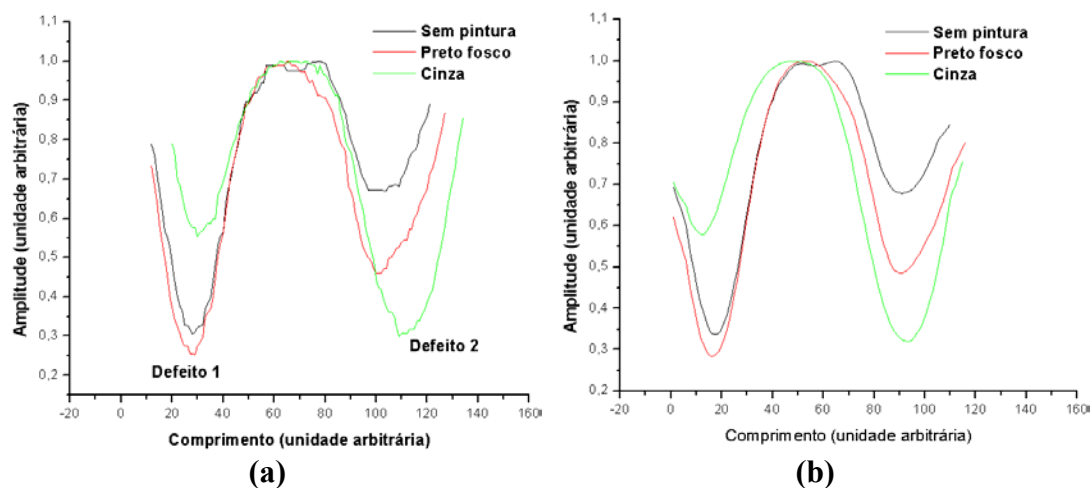


Figura 46 – Perfis (**line profile**) referentes aos quadros 66 e 67.

Quadro 67 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para os tipos de superfície testados.

	Superfície(%)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Sem pintura	0,75346	0,20507	0,33741	1	0,6626	82,88015
2	Preto fosco	0,68079	0,2244	0,28351	1	0,71649	78,97137
3	Cinza	0,7036	0,22525	0,31971	1	0,68029	80,91422

B) TRANSMISSÃO

O quadro abaixo resume o estado das variáveis.

Quadro 68 – Variáveis do teste.

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Lâmpada
D	600 mm
Pos	Trans
Te	15 s
Variável analisada	Estados possíveis
S	Com ou sem revestimento

O quadro estatístico 69 mostra os resultados do teste.

Quadro 69 – Estatística dos dados do CP1 para os tipos de superfície testados.

	Superfície(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Sem pintura	0,66415	0,23048	0,21767	1	0,78233	90,98803
2	Preto fosco	0,72037	0,16852	0,44091	1	0,55909	104,45308

Verifica-se através do quadro 69, que na posição transmissão, a presença de um revestimento na superfície piora a qualidade do sinal, provocando uma queda de contraste. A explicação para tal ocorrência deve-se ao fato de na modalidade transmissão a presença da pintura funcionar como mais uma barreira para onda térmica oriunda da face oposta. A figura 47a mostra os perfis resultantes dos testes. O gráfico (b) mostra que, o comportamento do sinal melhorou (menor nível de ruído). Aplicando alisamento através do filtro média móvel, verifica-se, conforme apresentado pelo gráfico 47b, que não houve mudança do resultado anteriormente apresentado, ou seja, a aplicação de revestimento piora o desempenho do teste utilizando-se a posição transmissão, conforme os resultados do quadro estatístico 70.

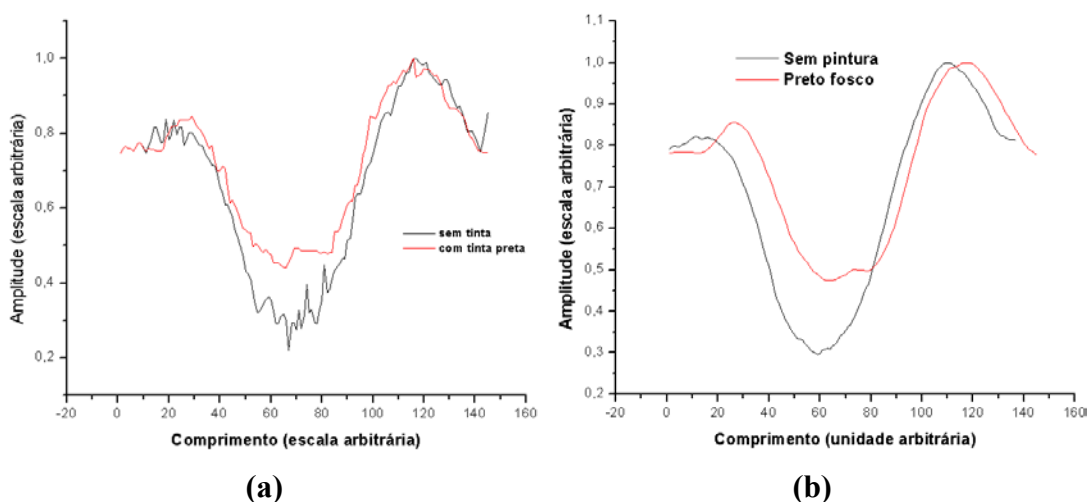


Figura 47 – Perfis (**line profile**) referentes aos quadros 69 e 70.

Quadro 70 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para os tipos de superfície testados.

	Superfície(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Sem pintura	0,67821	0,23067	0,29602	1	0,70398	92,91539
2	Preto fosco	0,74255	0,1698	0,4739	1	0,5261	107,66932

6.9.2. SOPRADOR TÉRMICO

A partir deste ponto serão avaliados os resultados obtidos tendo como fonte de excitação o soprador térmico, para posteriormente comparar-se os resultados por tipo de fonte de excitação. Seguem, abaixo, as avaliações para a nova etapa de testes.

6.9.2.1. AVALIAÇÃO 1 (Posição - Pos)

A) TEMPO DE AQUECIMENTO DE 10 SEGUNDOS

Este teste visa avaliar a variável posição, ou seja, os modos reflexão convexa (Rconv), Reflexão côncava (Rconc) e Transmissão (Trans), para o corpo-de-prova 1 com excitação através de soprador térmico. Os testes com soprador seguiram os mesmos procedimentos aplicados para lâmpadas, quanto a transformação de imagem para tons de cinza e seleção do melhor termograma, geração de perfis para comparação. Da mesma forma do que foi aplicado nos testes anteriores, foram selecionados termogramas de 100 em 100 quadros.

O corpo-de-prova nesta seqüência é identificado, de acordo com a posição como, CP11ii30 (Rconv), CP11ii30 (Rconc) e CP12ii30(Trans).

O quadro 71, resume o estado das variáveis para esta nova etapa de teste.

Quadro 71 – Variáveis do teste.

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Soprador
D	600 mm
Te	10s
Vz	V ₂
Variável analisada	Estados possíveis
Pos	Rconv/Rconc/Trans

O quadro estatístico, abaixo, mostra os resultados obtidos na comparação entre as posições com o tempo de excitação igual a 10 segundos.

Quadro 72 – Estatística dos dados do CP1 para as 3 posições testadas.

	Posição(°)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Rconv	0,75133	0,15477	0,38215	1	0,61785	93,16541
2	Rconc	0,81319	0,08474	0,64706	1	0,35294	108,15365
3	Trans	0,90354	0,04125	0,80152	1	0,19848	121,97799

Analisando-se o quadro 72, verifica-se que a posição reflexão convexa (Rconv), apresentou o melhor resultado. Verifica-se, também, que a diferença entre os valores de intervalo (**range**), é bastante acentuada, sendo o maior valor 67,87% maior que o menor valor. Os gráficos (a) e (b) figura 48 mostram o resultado da aplicação de filtragem nos perfis e o quadro 73 o resultado da estatística dos dados filtrados.

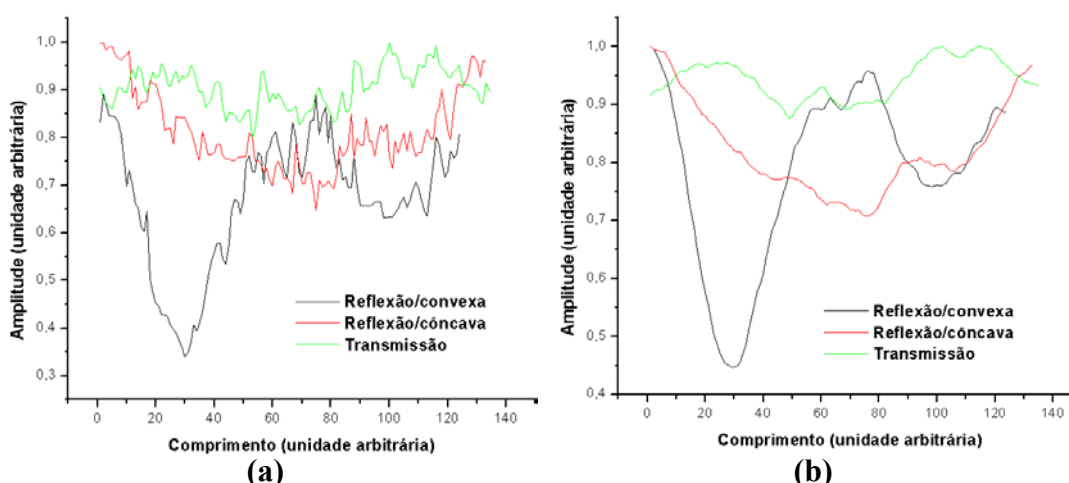


Figura 48 – Perfis (**line profile**) referentes aos quadros 72 e 73.

Quadro 73 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para as 3 posições testadas.

	Posição(°)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Rconv	0,78194	0,14984	0,44616	1	0,55384	96,96107
2	Rconc	0,82134	0,07962	0,70742	1	0,29258	109,23868
3	Trans	0,94402	0,03415	0,87621	1	0,1238	127,44268

Através do gráfico da figura 48a, percebe-se que o sinal originário de transmissão e reflexão côncava, praticamente não mostra o defeito e são muito ruidosos. O sinal proveniente de reflexão convexa, embora também muito ruidoso, apresenta de

forma marcante o defeito através de suas deflexões. O fato de o sinal de transmissão praticamente não mostrar os defeitos pode ser associado ao baixo aporte térmico em função do tempo de aquecimento, o que confere uma baixa energia a frente de onda térmica. A necessidade de maior energia para transmissão origina-se da necessidade da frente de onda ter que percorrer toda a espessura do corpo-de-prova e no caso da reflexão côncava, o aumento de distância do defeito da superfície de observação, embora pequeno (2,4 para 4 mm), teve impacto razoável no contraste que diminuiu cerca de 47,17% conforme o quadro 73. Tomando-se como base o quadro 72 (sem filtragem) a diferença cai quase a metade, pois está sendo considerado o ruído dos sinais, e o sinal proveniente de reflexão côncava tem uma intensidade de ruído muito maior que o sinal de reflexão convexa.

B) TEMPO DE AQUECIMENTO DE 30 SEGUNDOS

A partir de agora serão apresentados os resultados para excitação de 30 segundos com o uso do soprador como fonte.

O quadro, abaixo, mostra o resumo das variáveis do teste.

Quadro 74 – Variáveis do teste.

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Soprador
D	600 mm
Te	30s
Vz	V2
Variável analisada	Estados possíveis
Pos	Rconv/Rconc/Trans

O quadro estatístico, abaixo, traz os resultados obtidos na comparação entre as posições com o tempo de excitação iguais a 30 segundos.

Quadro 75 – Estatística dos dados do CP1 para as 3 posições testadas.

	Posição(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Rconv	0,6956	0,23686	0,28379	1	0,71621	77,21151
2	Rconc	0,82118	0,12943	0,56751	1,00001	0,4325	92,79307
3	Trans	0,78436	0,12825	0,54872	1	0,45128	104,32037

Através do quadro 75 (coluna intervalo - **range**), verifica-se que os resultados de reflexão convexa são os melhores. O resultado de transmissão está muito próximo do resultado de reflexão côncava, sendo ambos de baixa magnitude quando comparados a posição reflexão convexa. Agora, aplicando-se filtragem verifica-se que o resultado permanece. Abaixo, a figura 49 mostra os gráficos (a) e (b) resultantes do teste sem e com filtragem, respectivamente.

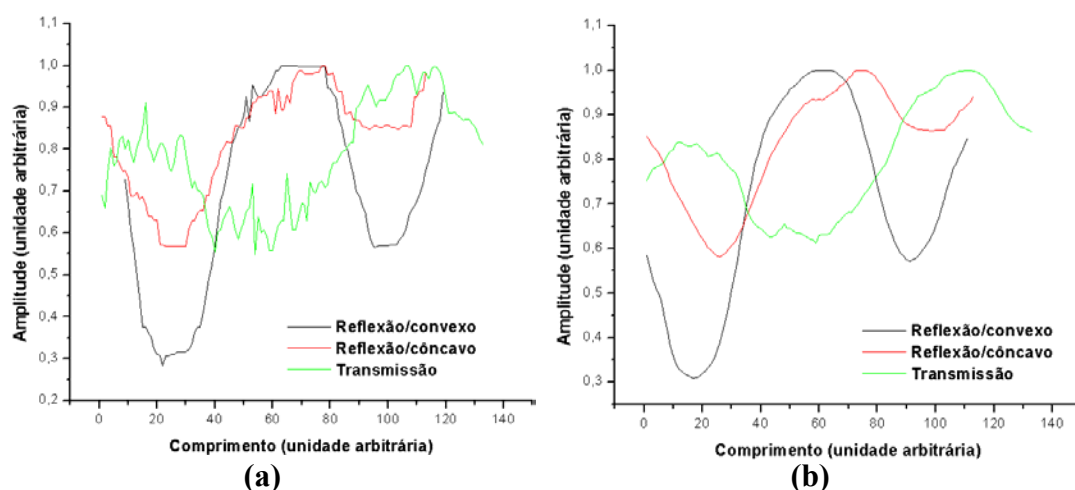


Figura 49 – Perfis (**line profile**) referentes aos quadros 75 e 76.

Através do gráfico (a) da figura 49, verifica-se que em todas as posições ocorreu a detecção do dano, sendo que o nível de ruído, na posição transmissão, é bastante elevado. No caso de transmissão, a exemplo dos testes anteriores, tem sido normal a apresentação de ruído superior em relação às outras posições, isto devido ao o fato de ocorrer grande interação da frente de onda térmica com a estrutura do material de grande heterogeneidade. Com a aplicação do filtro média móvel, os perfis passam a ter o formato visualizado através do gráfico (b) da figura 49. O quadro 76 traz o resultado estatístico dos dados filtrados.

Quadro 76 - Estatística dos dados filtrados do CP1 para as 3 posições testadas.

	Posição(%)	Mean(Y)	sd(YEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Rconv	0,69467	0,22806	0,30995	1	0,69006	77,10879
2	Rconc	0,83215	0,12595	0,58067	1	0,41933	94,03308
3	Trans	0,80242	0,12458	0,61103	1	0,38897	106,72164

O quadro 76 mostra que com a filtragem o contraste permaneceu com o seu melhor valor ocorrendo na posição reflexão convexa.

C) TEMPO DE AQUECIMENTO DE 60 SEGUNDOS

Agora serão apresentados os resultados para excitação de 60 segundos com o uso do soprador como fonte.

O quadro, abaixo, mostra o resumo das variáveis do teste.

Quadro 77 – Variáveis do teste.

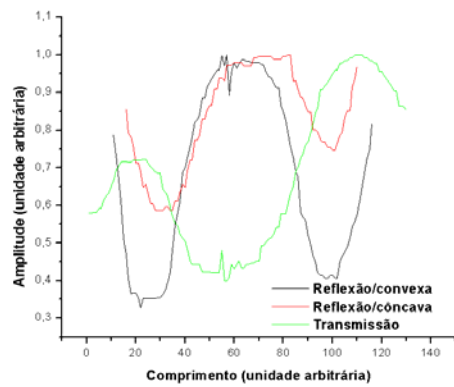
Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Soprador
d	600 mm
te	60s
Vz	V2
Variável analisada	Estados possíveis
Pos	Rconv/Rconc/Trans

O quadro estatístico, abaixo, traz os resultados obtidos na comparação entre as posições com o tempo de excitação iguais a 60 segundos.

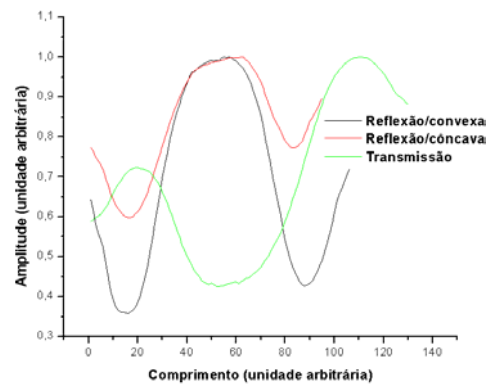
Quadro 78 – Estatística dos dados do CP1 para as 3 posições testadas.

	Posição(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Rconv	0,6707	0,23328	0,3274	1	0,67261	71,09448
2	Rconc	0,82968	0,13841	0,58746	0,99999	0,41253	78,81918
3	Trans	0,68131	0,19827	0,4	1	0,6	88,5699

Através do quadro 78, verifica-se que a posição reflexão convexa é a de melhor desempenho, a exemplo dos resultados com lâmpadas para os maiores tempos de excitação. O gráfico (a) da figura 50, mostra os perfis das três posições. Outra observação com referência à figura 50, é a alta qualidade dos sinais obtidos tanto em geometria, quanto em comportamento (baixos níveis de ruído), isto devido ao aumento de energia (aporte térmico), o que minimizou as perdas no percurso da frente da onda térmica devido a interação com o meio material, principalmente para transmissão. Aplicando-se o filtro média móvel, os perfis passam a ter o comportamento apresentado pelo gráfico (b) da figura 50. O quadro 79, mostra o resultado estatístico dos dados filtrados.



(a)



(b)

Figura 50 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 78 e 79.

Quadro 79 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para as 3 posições testadas.

	Posição(°)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Rconv	0,68773	0,2478	0,3379	1	0,6621	64,64673
2	Rconc	0,81975	0,13508	0,56243	1,00001	0,43758	74,59729
3	Trans	0,64283	0,19868	0,3981	1	0,6019	73,28317

Após a filtragem, a posição reflexão convexa foi a que apresentou o melhor resultado.

6.9.2.2. AVALIAÇÃO 2 (Distância – d)

Agora serão apresentados os resultados dos testes para avaliação da distância, utilizando-se como fonte de excitação o soprador térmico. O quadro abaixo apresenta o estado das variáveis de teste.

A) TEMPO DE AQUECIMENTO DE 30 SEGUNDOS (Rconv)

Quadro 80 – Variáveis do teste.

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Soprador
Pos	Rconv
te	30s
Vz	V2
Variável analisada	Estados possíveis
d	600,700 e 800 mm

O quadro estatístico, abaixo, traz o resumo de resultados do teste.

Quadro 81 – Estatística dos dados do CP1 para as 3 distâncias testadas.

	d(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	600 mm	0,69757	0,23522	0,28379	1	0,7162	78,82488
2	700 mm	0,68092	0,23354	0,32018	1	0,67981	66,04933
3	800 mm	0,70788	0,2321	0,29527	1	0,70473	60,87727

Através do quadro acima, tomando como referência a coluna de contraste (intervalo - **range**), verifica-se que a menor distância foi a que apresentou o melhor resultado. A figura a seguir mostra o gráfico dos perfis originados no teste (figura 51 a).

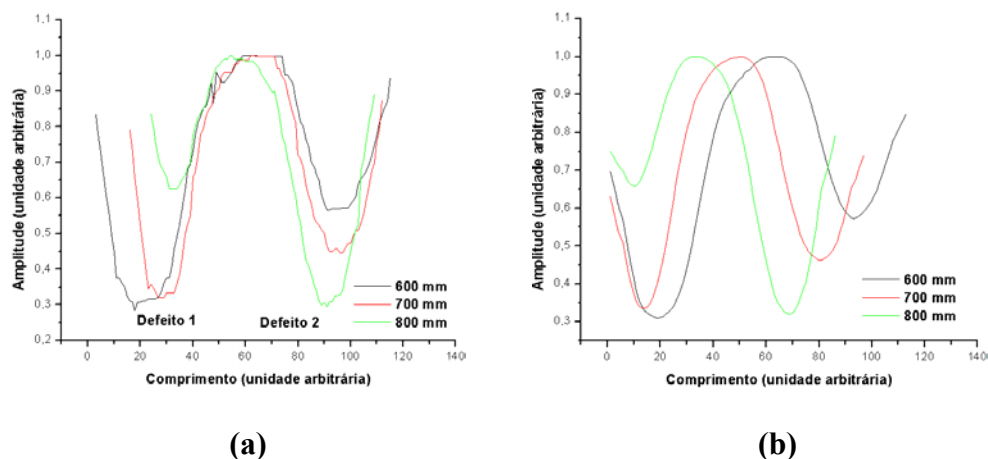


Figura 51 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 81 e 82.

Quadro 82 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para as 3 distâncias testadas.

	d(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	600 mm	0,69664	0,22479	0,30995	1	0,69005	78,72061
2	700 mm	0,68008	0,21994	0,33547	1	0,66452	65,96763
3	800 mm	0,71287	0,22004	0,31976	1	0,68024	61,30665

Filtrando-se os perfis, a menor distância permanece como a de melhor resultado.

B) TEMPO DE AQUECIMENTO DE 30 SEGUNDOS (Trans)

Agora são apresentados os resultados de avaliação de distância para a posição transmissão. O quadro abaixo mostra o estado das variáveis.

Quadro 83 – Variáveis do teste.

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Soprador
Pos	Trans
te	30s
Vz	V2
Variável analisada	Estados possíveis
d	600,700 e 800 mm

O quadro estatístico, abaixo, traz o resumo de resultados do teste na posição transmissão para as 3 distâncias.

Quadro 84 – Estatística dos dados do CP1 para as 3 distâncias testadas.

	Distância(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	600 mm	0,67655	0,20086	0,3944	1	0,6056	84,56915
2	700 mm	0,84328	0,09452	0,67621	1	0,32379	105,41061
3	800 mm	0,81589	0,09886	0,63127	1	0,36873	101,98636

Através dos resultados do quadro acima, verifica-se que o melhor resultado ocorreu para a menor distância. A lógica do resultado reside no fato, por exemplo, do menor percurso atmosférico da frente de onda térmica. O gráfico da figura abaixo, mostra os perfis de teste.

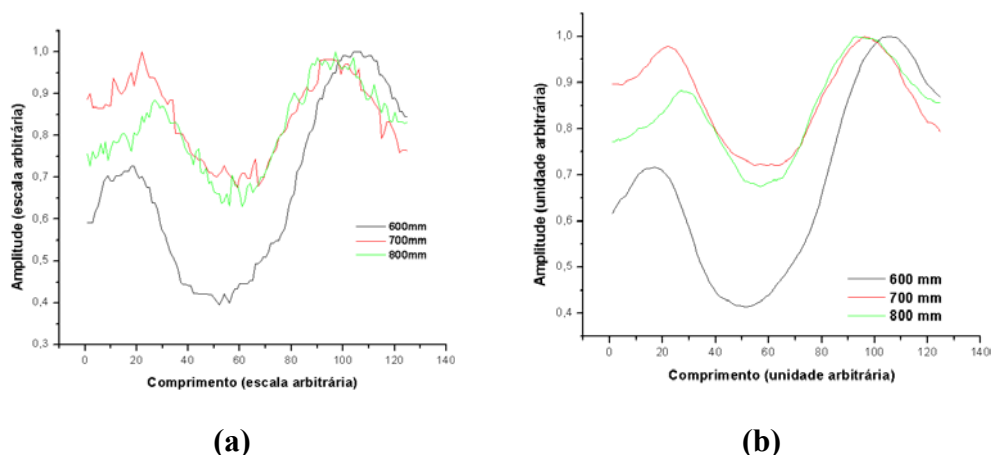


Figura 52 – Perfis (**line profile**) referentes aos quadros 84 e 85.

Através do gráfico acima, verifica-se que os resultados pioram com a distância, tanto ao nível de amplitude, como em termos de comportamento (aumento de ruído), isto devido ao aumento do percurso atmosférico e inclusão de maior número de informações na imagem, incluindo outros emissores de calor.

O quadro estatístico dos dados filtrados é apresentado abaixo:

Quadro 85 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para as 3 distâncias testadas.

	d(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	600 mm	0,68151	0,19894	0,41424	1	0,58576	85,18859
2	700 mm	0,86522	0,09214	0,72007	0,99999	0,27992	108,15222
3	800 mm	0,83692	0,09701	0,67514	1	0,32485	104,61507

O quadro 85, através da coluna intervalo (**range**), confirma o melhor resultado para a menor distância.

6.9.2.3. AVALIAÇÃO 3 (Tempo de aquecimento - te)

A) REFLEXÃO CONVEXA (Rconv)

Agora serão avaliados os tempos de aquecimento com excitação através de soprador térmico. O quadro abaixo mostra o estado das variáveis de teste.

Quadro 86 – Variáveis do teste.

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Soprador
Pos	Rconv
d	600 mm
Vz	V2
Variável analisada	Estados possíveis
te	10, 30 e 60 segundos

O quadro estatístico, abaixo, mostra o resumo dos resultados obtidos no teste.

Quadro 87 – Estatística dos dados do CP1 para os 3 tempos de excitação testados.

	te(Y)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	10 segundos	0,73912	0,15113	0,38349	1	0,61651	84,99844
2	30 segundos	0,6956	0,23686	0,28379	1	0,71621	77,21151
3	60 segundos	0,6707	0,23328	0,3274	1	0,67261	71,09448

Da análise do quadro acima, concluiu-se que para reflexão convexa o tempo de 30 segundos é o que confere o maior contraste. Por outro lado, verifica-se que para tempos menores o nível de ruído aumenta significativamente (necessidade de filtragem), o que pode ser observado pelo gráfico da figura 53 (a), abaixo, para o tempo de 10 segundos. Isto pelo fato da menor quantidade de energia fornecida e desta forma maior perda devidas a difusibilidade lateral e percurso atmosférico, principalmente. Desta forma, decidiu-se filtrar (alisar) os sinais para verificar se ainda permanecia o resultado. Abaixo, são apresentados: o novo quadro estatístico e o novo gráfico, após filtragem.

O gráfico da figura 53 (b), mostra o resultado da filtragem e o quadro 88, a estatística dos dados.

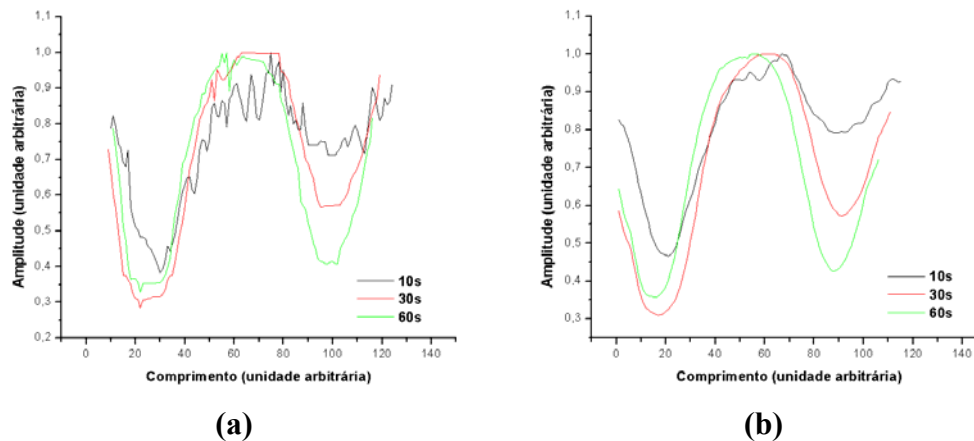


Figura 53 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 87 e 88.

Quadro 88 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para os 3 tempos de excitação testados.

	te(X)	Mean(Y)	sd(YEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	10 segundos	0,80034	0,15254	0,46608	1	0,53392	92,03923
2	30 segundos	0,69467	0,22806	0,30995	1	0,69006	77,10879
3	60 segundos	0,68184	0,22579	0,35856	1	0,64144	72,2748

Através da filtragem verificou-se que o tempo de 30 segundos passou a ser o de melhor resultado.

B) TRANSMISSÃO (Trans)

Agora avaliando os tempos de excitação para transmissão. O quadro abaixo traz o estado das variáveis.

Quadro 89 – Variáveis do teste.

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Soprador
Pos	Trans
d	600 mm
Vz	V2
Variável analisada	Estados possíveis
te	10, 30 e 60 segundos

O quadro estatístico, abaixo, mostra o resumo dos resultados obtidos no teste.

Quadro 90 – Estatística dos dados do CP1 para os 3 tempos de excitação testados.

	te(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	10 segundos	0,90354	0,04125	0,80152	1	0,19848	121,97799
2	30 segundos	0,78436	0,12825	0,54872	1	0,45128	104,32037
3	60 segundos	0,66783	0,1972	0,4	1	0,6	81,47521

O quadro 90 mostra, que para transmissão os melhores resultados são obtidos com tempos maiores devido a maior necessidade de energia para esta posição. O gráfico da figura abaixo mostra os perfis obtidos nos testes.

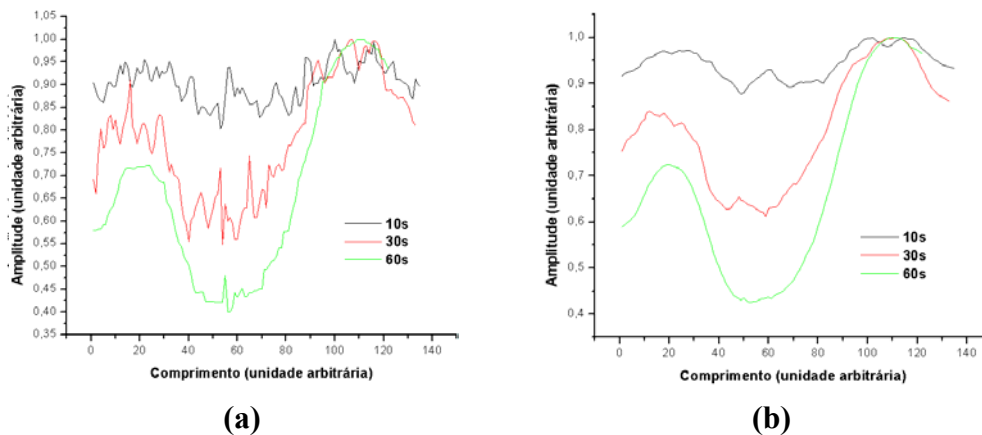


Figura 54 – Perfis (**line profile**) referentes aos quadros 90 e 91.

Como os resultados do gráfico da figura 54 (a), apresentam-se muito ruidosos, decidiu-se pela filtragem dos mesmos conforme apresentado na figura 54 (b). O quadro estatístico, abaixo, mostra o resultado dos dados filtrados.

Quadro 91 – Estatística dos dados do CP1 para os 3 tempos de excitação testados, com filtragem.

	te(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	10 segundos	0,94402	0,03415	0,87621	1	0,1238	127,44268
2	30 segundos	0,80242	0,12458	0,61103	1	0,38897	106,72164
3	60 segundos	0,67261	0,19542	0,42489	1	0,57511	82,05884

Os resultados do quadro 91 mostram que, mesmo após a filtragem, o melhor resultado permanece com o maior tempo de excitação para transmissão.

6.9.2.4. AVALIAÇÃO 4 – Estado da superfície (com ou sem pintura)

Visando homogeneizar as diferenças de emissividade da superfície do corpo-de-prova (CP) e minimizar a reflexão, o que pode provocar degradação da informação obtida, foi aplicado sobre a superfície do CP e testado o revestimento preto fosco. Neste novo teste, decidiu-se não avaliar-se a cor cinza, pela mesma não apresentar resultados satisfatórios. O quadro 92 resume o estado das variáveis para o teste.

A) REFLEXÃO CONVEXA

Quadro 92 – Variáveis do teste.

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Soprador
d	600 mm
te	30 s
Pos	Rconv
Vz	V2
Variável analisada	Estados possíveis
S	Com ou sem revestimento

O quadro estatístico, abaixo, mostra o resultado do teste com pintura.

Quadro 93 – Estatística dos dados do CP1 para os tipos de superfície testados.

	Superfície(X)	Mean(Y)	sd(y Er±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Sem pintura	0,6648	0,20276	0,30284	1	0,69716	75,122
2	Preto fosco	0,64932	0,22888	0,25079	1	0,74921	74,02201

Observa-se através do teste, que ocorre melhora no contraste da imagem, na região do defeito, quando da presença do revestimento com tinta preto fosco. A melhora é da ordem de 6,94% no contraste, mas analisando o gráfico da figura 55(a), verifica-se que o aumento do contraste tem origem no defeito maior (defeito 2) do CP1. Por outro lado o contraste do defeito menor (defeito 1), diminui 18%, o que torna o revestimento prejudicial, em primeira análise, à detecção de defeitos menores, considerando o defeito

1 como referência. Outra observação em relação ao perfil (sinal) apresentado no gráfico da figura acima, é que a superfície pintada apresenta menor nível de ruído.

Aplica-se então a filtragem com uso filtro média-móvel do Origin, para verificar se melhora a representatividade dos defeitos. Os resultados dos perfis filtrados são mostrados através do gráfico (b) da figura 55.

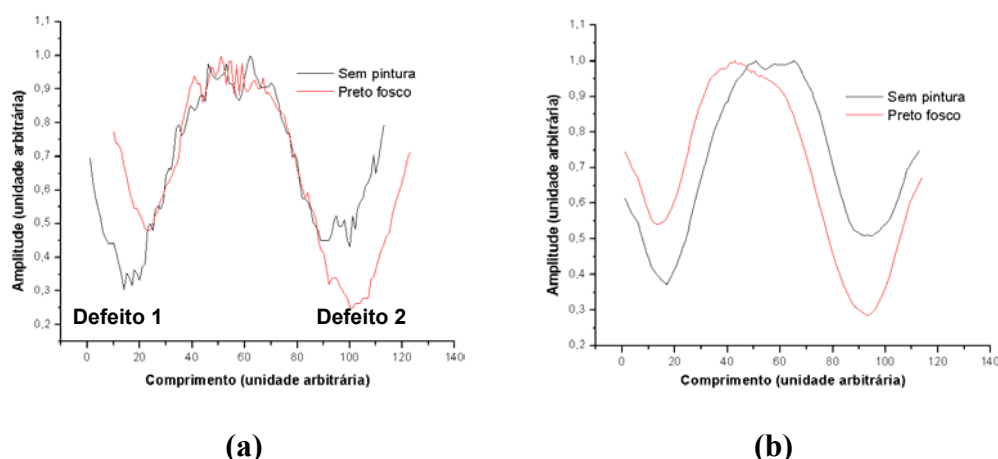


Figura 55 – Perfis (**line profile**) referentes aos quadros 93 e 94.

Examinado o gráfico (b) da figura 55, verifica-se que o defeito mais próximo da superfície (defeito 1, mais profundo) passou, com a pintura, a apresentar a menor amplitude, quando antes apresentava a maior. Este fato chama atenção para a seguinte observação: nas operações de quantificação de profundidade e tamanho plano, a calibração tem que ser efetuada considerando-se a superfície no estado em que serão testados.

Através do quadro estatístico dos dados filtrados, verifica-se que existe ganho de contraste com o uso de revestimento de baixa reflexão (preto fosco) para a posição reflexão convexa.

Quadro 94 – Estatística dos dados do CP1 para os tipos de superfície testados com filtragem.

	Superfície(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Sem pintura	0,70688	0,20624	0,37279	1	0,62721	79,87795
2	Preto fosco	0,67679	0,2298	0,28501	1	0,71499	77,15454

B) TRANSMISSÃO

O quadro 95 abaixo resume o estado das variáveis.

Quadro 95 – Variáveis do teste.

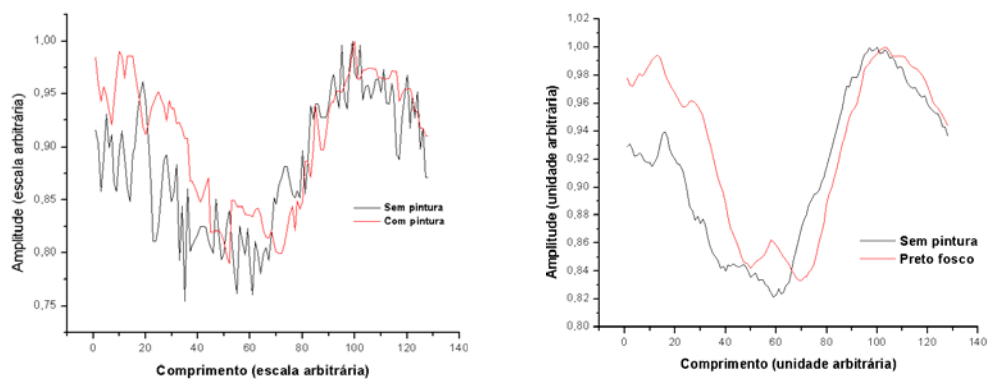
Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Soprador
d	600 mm
te	30 s
Pos	Trans
Vz	V2
Variável analisada	Estados possíveis
S	Com ou sem revestimento

O quadro estatístico 96 mostra os resultados do teste.

Quadro 96– Estatística dos dados do CP1 para os tipos de superfície testados.

	Superfície(X)	Mean(Y)	sd(y Er±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Sem pintura	0,88236	0,06136	0,75415	1	0,24585	112,9419
2	Preto fosco	0,90693	0,05982	0,78985	1	0,21015	116,08698

Através da análise do quadro acima, tomando-se como referência à coluna intervalo (**range**), verifica-se que houve diminuição do contraste com a presença da tinta preta. Observando-se o gráfico da figura 56(a), percebe-se que o sinal da posição transmissão, embora ainda ruidoso, melhora esta condição quando pintado, pois a película fez com que se reduzissem as reflexões e desta forma aumentou a emissão da superfície, melhorando o sinal. Para verificar se os resultados permanecem com a retirada do ruído, aplicou-se o filtro média-móvel. Através da figura 56 (b), visualiza-se o perfil resultante da filtragem e o quadro 97, mostra a estatística dos dados filtrados.



(a) (b)
Figura 56 – Perfis (**line profile**) referentes aos quadros 96 e 97.

Quadro 97 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para os tipos de superfície testados.

	Superfície(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Sem pintura	0,91179	0,05663	0,8213	1	0,1787	116,70918
2	Preto fosco	0,92937	0,05805	0,83305	1	0,16695	118,95973

Através do quadro 97, verifica-se que a presença de pintura piora o contraste para o caso da transmissão.

6.9.2.5. AVALIAÇÃO 5 – VAZÃO DO SOPRADOR (V_z).

Neste item será avaliada a influência da vazão nos ensaios. Como nos testes anteriores, esta avaliação utilizará o melhor cenário para cada posição (Rconv e Trans). As variáveis de cada posição serão mantidas com os mesmos valores, de forma a gerarem resultados comparáveis.

A) REFLEXÃO CONVEXA (Rconv)

O quadro, abaixo, mostra o estado das variáveis para o teste na posição Rconv.

Quadro 98 – Variáveis do teste.

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Soprador
d	600 mm
te	30 s
Pos	Rconv
S	Sem pintura
Variável analisada	Estados possíveis
Vz	V1 ou V2

O quadro estatístico, abaixo, mostra os resultados do teste comparativo de vazões do soprador para a posição reflexão convexa.

Quadro 99 – Estatística dos dados do CP1 para as vazões V1 e V2.

	Vazão(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	V2	0,69025	0,23785	0,28379	0,99999	0,7162	74,54703
2	V1	0,6648	0,20276	0,30284	1	0,69716	75,122

O quadro acima mostra que o teste com soprador com maior vazão teve um melhor resultado, para o caso de reflexão convexa, embora a diferença seja da ordem de 2,66%. Este resultado leva a concluir, em primeira mão, que para maiores temperaturas a reflexão tende a não ter ganhos significativos, da mesma forma do que ocorreu na avaliação com lâmpadas, onde os maiores tempos deram resultados piores. O gráfico da figura 57(a) mostra que os perfis (**line profile**), obtidos no teste. Aplicando-se filtro média móvel, os perfis passam a se apresentar conforme mostra o gráfico da figura 57(b). Com a filtragem, o melhor resultado confirmou-se ser o correspondente a maior potência, ou seja, as maiores energias geram perfis de melhor qualidade no caso do uso de fonte de excitação tipo soprador, conforme mostrado através do quadro 100.

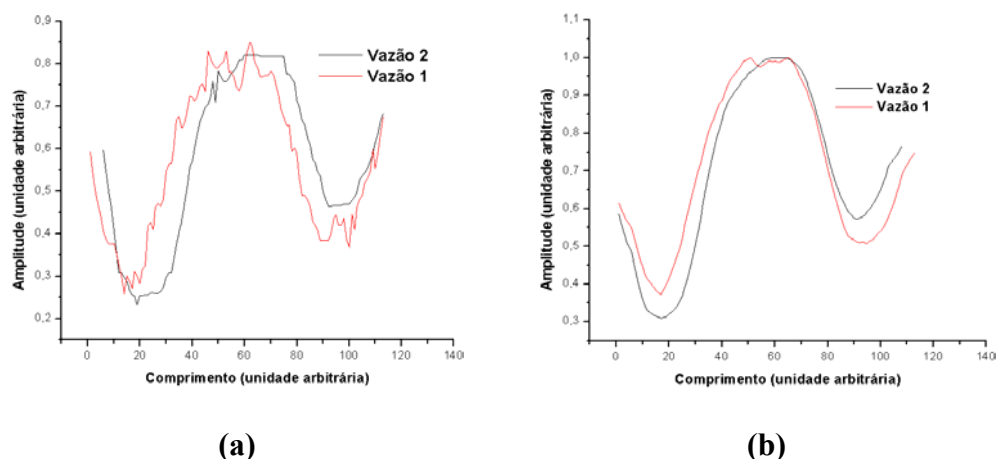


Figura 57 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 99 e 100.

Quadro 100 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para as vazões V1 e V2.

	Vazão(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	V2	0,68933	0,22953	0,30995	1	0,69005	74,44731
2	V1	0,70688	0,20624	0,37279	1	0,62721	79,87795

Através do quadro 100, observa-se que mesmo após a filtragem a maior vazão ainda apresenta o melhor resultado.

B) TRANSMISSÃO (Trans)

O quadro, abaixo, traz o estado das variáveis.

Quadro 101 – Variáveis do teste.

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Soprador
d	600 mm
te	30 s
Pos	Trans
S	Sem pintura
Variável analisada	Estados possíveis
Vz	V1 ou V2

O quadro estatístico, abaixo, mostra os resultados do teste comparativo de vazões do soprador para a posição reflexão convexa.

Quadro 102 – Estatística dos dados do CP1 para as vazões V1 e V2.

	Vazão(X)	Mean(Y)	sd(y Er±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	V2	0,7651	0,12895	0,53962	1	0,46038	97,93343
2	V1	0,88236	0,06136	0,75415	1	0,24585	112,9419

Através do quadro acima, verifica-se que para transmissão, a maior vazão (V2) apresenta melhores resultados, ou seja, conforme os testes anteriores, as maiores temperaturas que representam ondas térmicas de maior energia sempre são melhores para transmissão. Como em transmissão, a frente de onda térmica percorre toda a espessura do material, interagindo fortemente com o mesmo, as perdas no percurso são muito grandes, logo é necessário maior quantidade de energia. O gráfico da figura 58 (a), abaixo, mostra o perfil obtido no teste. Foi aplicado alisamento através de filtro média móvel o que resultou nos perfis apresentados através do gráfico da figura 58 (b). Da análise estatística dos dados filtrados foi gerado o quadro 103, conforme abaixo.

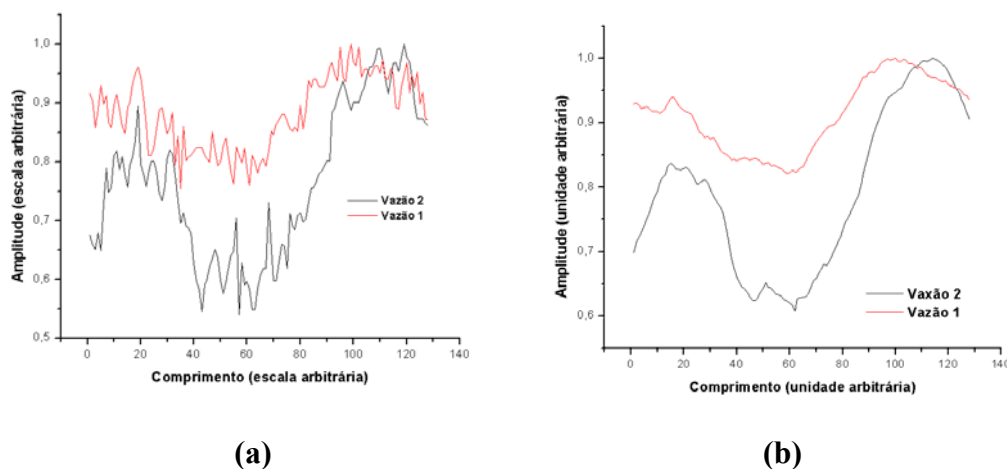


Figura 58 – Perfis (line profile) referentes aos quadros 102 e 103.

Quadro 103 – Estatística dos dados filtrados do CP1 para as vazões V1 e V2.

	Vazão(X)	Mean(Y)	sd(y Er±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	V2	0,79282	0,12689	0,60873	1	0,39127	101,48139
2	V1	0,91179	0,05663	0,8213	1	0,1787	116,70918

Através do quadro acima, mesmo após a filtragem, permanece a maior vazão (V2) como a de melhor resultado.

6.9.3. REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS

Esta etapa visa avaliar a constância dos resultados quando da repetição de cenários de testes idênticos. Foi selecionado o melhor cenário definido através das etapas anteriores, conforme o quadro 104.

O quadro abaixo resume os dados do ensaio

Quadro 104 – Variáveis do teste.

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Lâmpada
d	600 mm
te	10 s
Pos	Rconv
S	Sem pintura

Foi escolhida a posição Rconv com excitação com lâmpadas por ser o que apresentou o melhor resultado nos testes anteriores.

O quadro estatístico abaixo mostra o resultado dos dados filtrados.

Quadro 105 – Estatística dos dados de repetibilidade filtrados do CP1.

	Repetições(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	Min(Y)	Max(Y)	Range(Y)	Sum(Y)
1	Rep. 1	0,6786	0,2124	0,32032	1	0,67969	84,82458
2	Rep. 2	0,68696	0,20329	0,31141	1	0,68859	85,87001
3	Rep. 3	0,65972	0,17379	0,2878	1	0,71221	82,4656

6.10. AVALIAÇÃO DE DEFEITOS

Após ajuste dos parâmetros variáveis na parte anterior, teve início a fase de avaliação dos danos dos corpos-de-prova.

Embora o principal objetivo da dissertação fosse a detecção de defeitos, foram efetuadas operações básicas de dimensionamento, de caráter preliminar, sem maiores cuidados, a fim de mostrar-se a potencialidade da técnica termográfica para tal.

6.10.1. CORPO-DE-PROVA 1 (CP1)

De acordo com o quadro abaixo, são definidos os parâmetros que definem o melhor cenário para avaliação do CP1.

Quadro 106 – Variáveis do teste

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	1
Ex	Lâmpada
d	600 mm
te	10 s
Pos	Rconv
S	Com pintura

A avaliação seguiu todas as etapas dos testes anteriores, como por exemplo, conversão para tons de cinza e a seleção do melhor termograma.

Mesmo tendo ocorrido a visualização do defeito através do melhor termograma selecionado, aplicou-se a segmentação para evidenciar, de forma marcante, o defeito. A figura 59 mostra a seqüência, terminando com a indicação de dimensionamento do defeito (figura 59C).

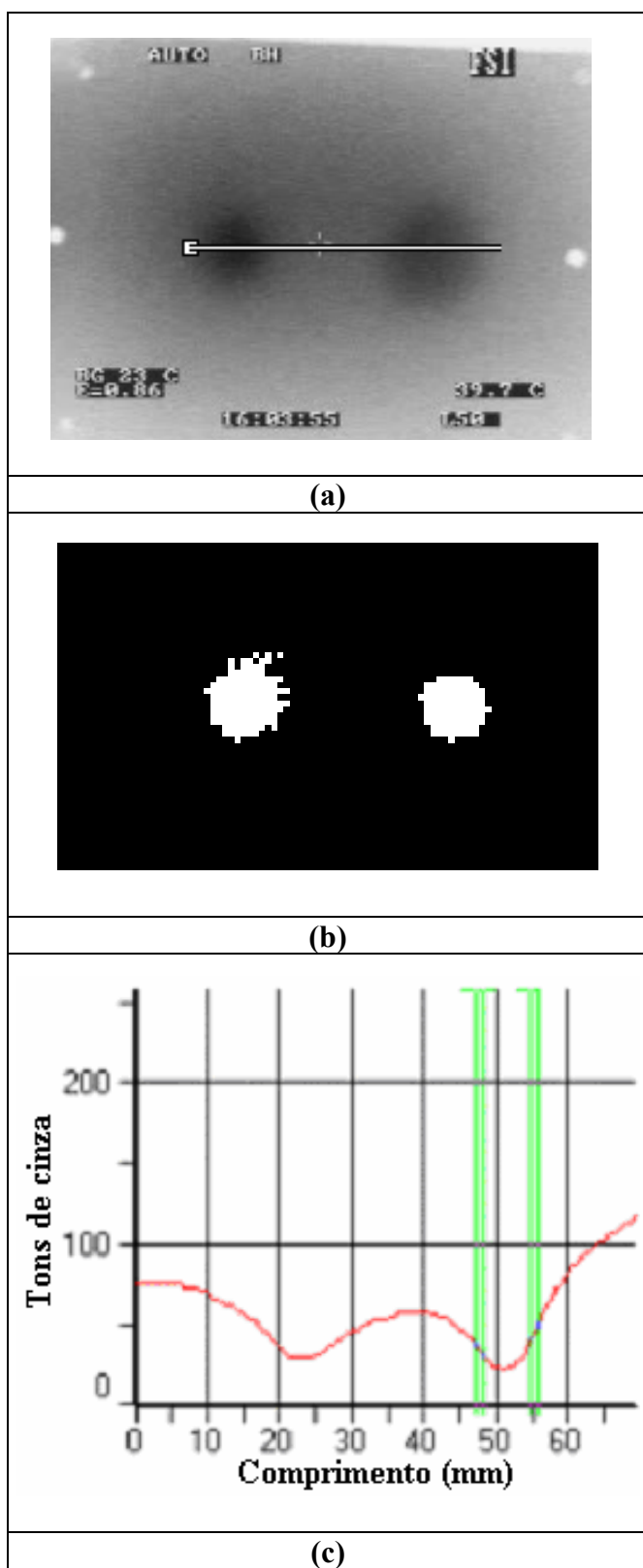


Figura 59 – Medição do corpo-de-prova 1

6.10.2. CORPO-DE-PROVA 2 (CP2)

Agora será iniciada a fase de avaliação do corpo-de-prova 2, conforme abaixo:

Quadro 107 – Variáveis do teste

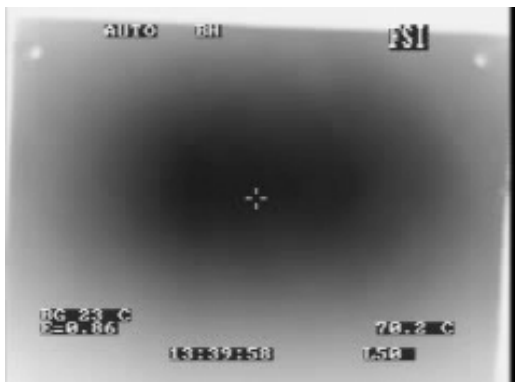
Variável Fixada	Estado (valor)
CP	2
Ex	Lâmpada
d	600 mm
te	10 s
Pos	Rconv
S	Com pintura

Como o corpo-de-prova 2 possui dois tipos de defeito presentes em sua junta, a avaliação será em duas etapas, a primeira para avaliação da delaminação e a segunda para avaliação de falta de cola.

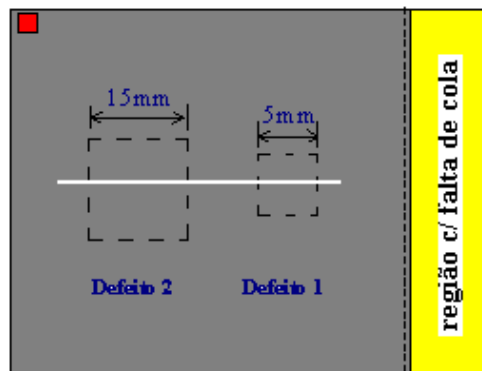
Abaixo segue a seqüência de tratamento aplicado ao corpo-de-prova 2, a fim de detectar-se a delaminação artificial.

6.10.2.1. ESTUDO DA DELAMINAÇÃO

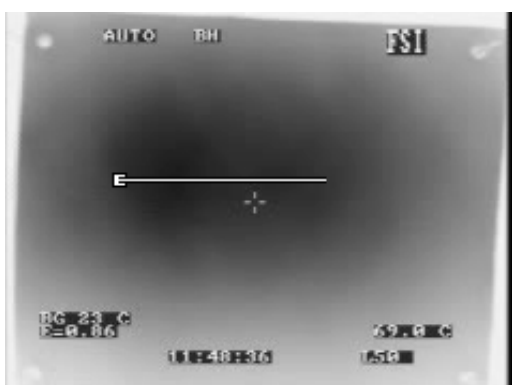
A primeira etapa foi selecionar o melhor fotograma, ou seja, aquele que apresentou o maior contraste para a delaminação. As figuras 60 (c) e (e) apresentam o melhor termograma e o perfil respectivamente. Após a aplicação de filtro passa-baixo, o perfil passou a apresentar o comportamento apresentado pelo gráfico da figura 60 (f). A figura 60 (a) representa a imagem do corpo de prova sem defeito e a figura 60(b) mostra o desenho esquemático do corpo-de-prova 2.



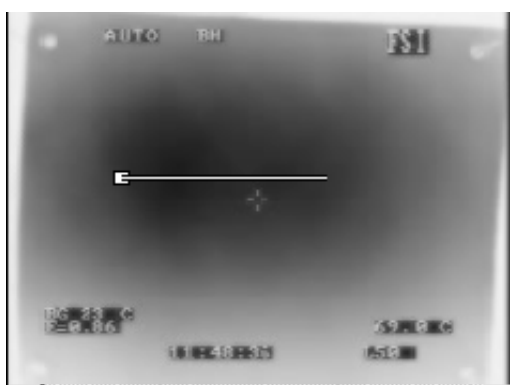
(a)



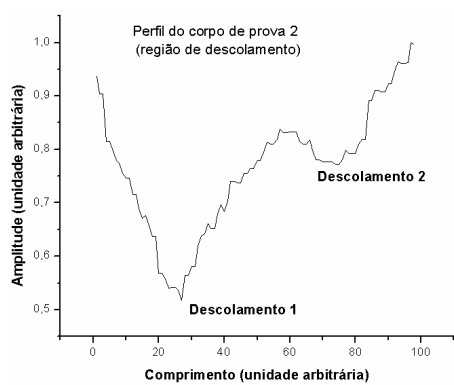
(b)



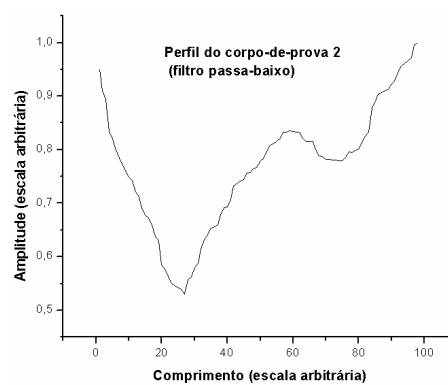
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 60 – Termogramas e perfis do CP2.

Através da figura 60 (c), verifica-se que é impossível afirmar-se visualmente que existe algum tipo de dano, pois todos os corpos-de-prova, inclusive os sem dano apresentam a maior temperatura (área mais escura) na região central, conforme mostrado 60(a). Sem a análise de perfil é impossível detectar-se o dano e inclusive fazer critérios de seleção de termograma.

Verifica-se que o melhor termograma mostra com clareza, via perfil, a área com a presença da delaminação, sendo a etapa de escolha do termograma, ao longo do resfriamento, de suma importância para o ensaio. A temperatura do termograma selecionado era de 69°C a 0,5 segundo do resfriamento, ou seja, ocorreu a detecção bem no início da curva de resfriamento, conforme mostra a figura 61.

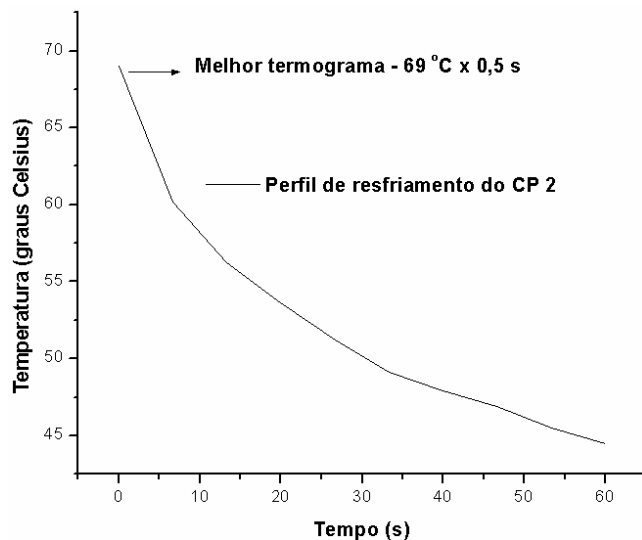


Figura 61 – Resfriamento do CP 2

Após a detecção parte-se para a melhoria de qualidade da imagem a fim de ressaltar a presença do dano. Com a utilização dos recursos do software Image Pro, aplicou-se a segmentação, sendo o resultado abaixo conforme a figura 62(a). Mostra-se na mesma figura o perfil da segmentação (62(b)).

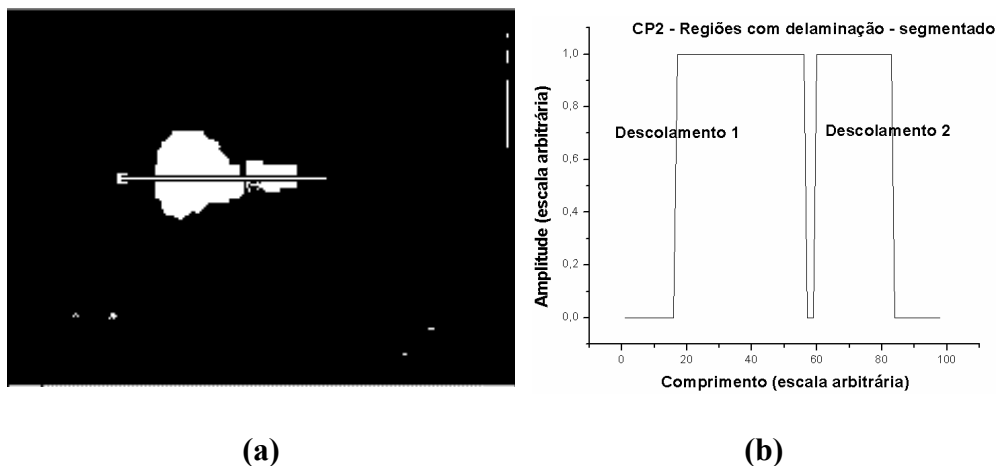


Figura 62 – Termograma segmentado e perfil da segmentação.

A importância da detecção do descolamento reside no fato de através desta poder definir se uma determinada tubulação pode ou não continuar operando. Com o uso da metodologia acima, nos casos de inspeção no campo devem ser reprovadas as juntas com a presença de delaminação em qualquer dimensão e também, de acordo com relatos de campo e procedimentos, com a vibração as delaminações tendem a evoluir, na maioria dos casos, para falha.

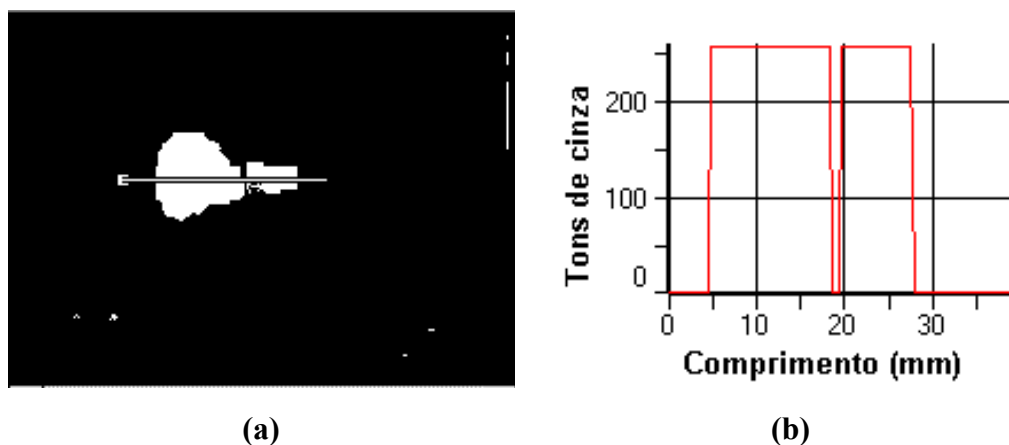
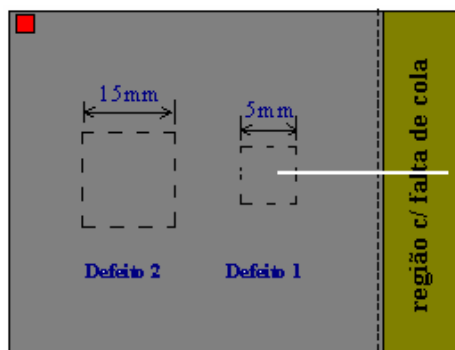


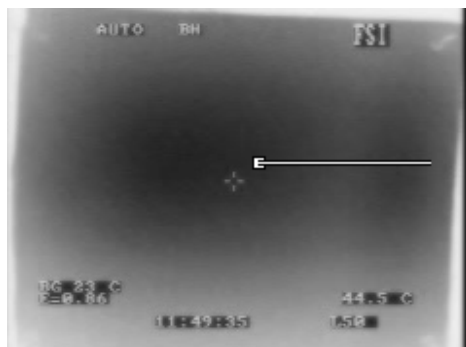
Figura 63 – Medida plana da imagem segmentada.

6.10.2.2. ESTUDO DA FALTA DE ADESIVO (VAZIO)

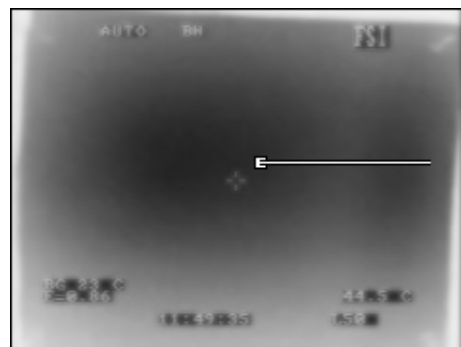
Como o CP2 continha a ocorrência de vazio, foi iniciado estudo para se tentar detectar este novo tipo de dano, conforme mostrado na figura 64 (a). A primeira etapa foi definir o melhor termograma Figura 64 (b). A partir deste aplicou-se o filtro passa-baixo (figura 64 c) e obteve-se o respectivo perfil (figura 64 d).



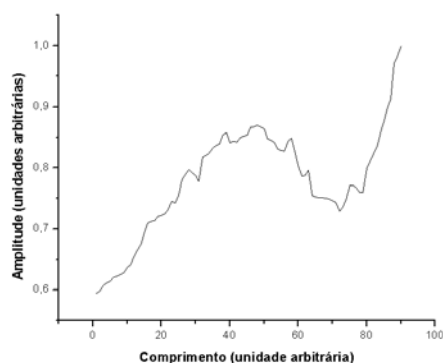
(a)



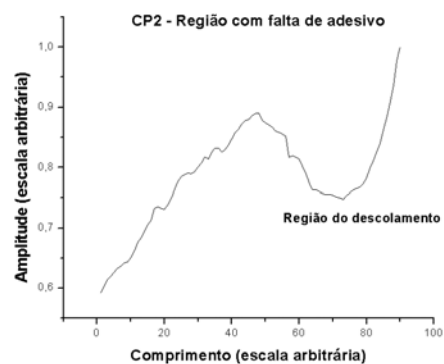
(b)



(c)



(d)



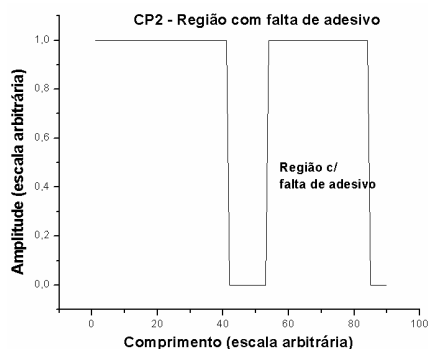
(e)

Figura 64 – Termogramas e perfis do CP2 (Falta de cola).

A imagem da figura 64 (b) é em seguida segmentada de forma a evidenciar claramente as fronteiras da região com falta de adesivo. A figura 65 (a) mostra o termograma segmentado resultante e a figura 65 (b) mostra o perfil resultante.



(a)



(b)

Figura 65 – Termograma segmentado e perfil da segmentação.

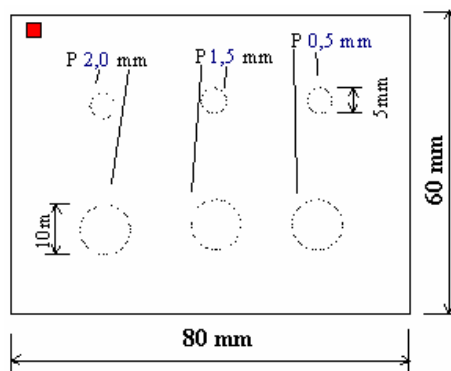
6.10.3. CORPO-DE-PROVA 3 (CP3)

Os testes com o corpo-de-prova 3 foram executados com as variáveis definidas no quadro abaixo.

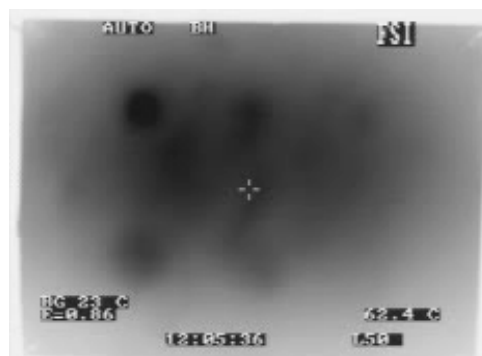
Quadro 108 – Variáveis do teste

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	3
Ex	Lâmpada
d	600 mm
te	10 s
Pos	Rconv
S	Com pintura

O corpo-de-prova 3 tem 6 defeitos com tamanhos e profundidades variadas conforme a figura 66 (a). Na mesma figura (66b), é mostrado o melhor termograma da sequência.



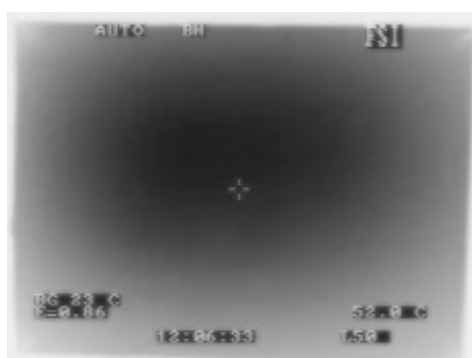
(a)



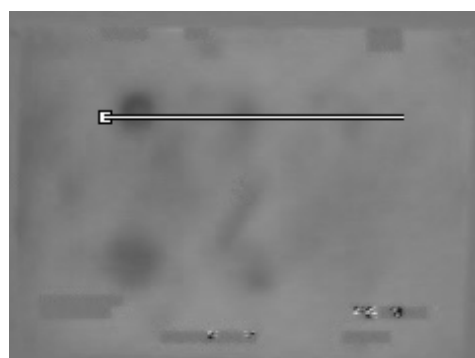
(b)

Figura 66 – Esquemático do CP3 e o melhor termograma.

O melhor termograma só mostra claramente 2 defeitos. Para melhorar a visualização e possibilitar a detecção e dimensionamento dos mesmos, primeiramente foi aplicado o filtro passa-baixo e em seguida, através do recurso de correção de fundo (**background correction**) do software Image Pro, subtraiu-se do termograma a 62,4 °C do último termograma obtido (figura 67a), obtendo-se o termograma 67(b). Observando a figura 67(a) em comparação com a 66(b), verifica-se que em volta do dano diminuíram os tons de cinza que suavizavam a fronteira do mesmo, fato pode ser comprovado com o perfil da figura 68.

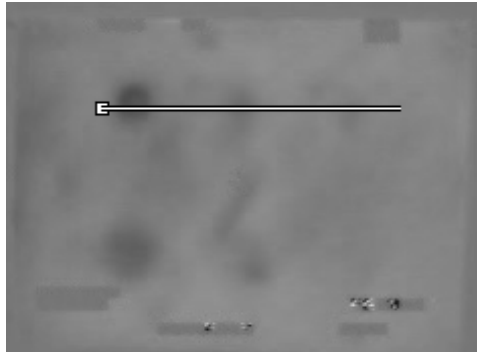


(a)

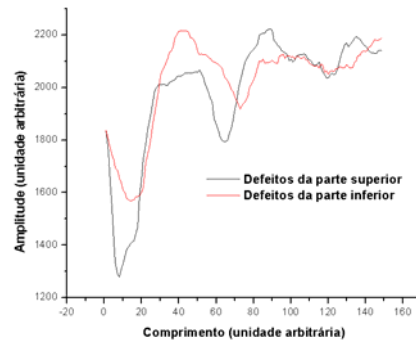


(b)

Figura 67 – Resultado de subtração de fundo.



(a)

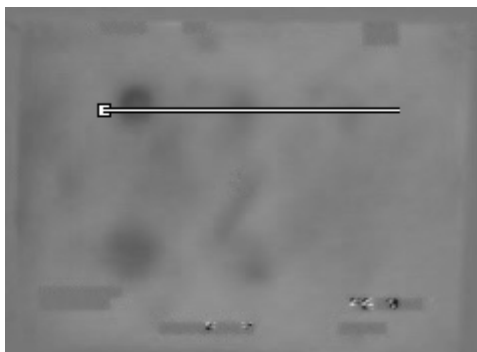


(b)

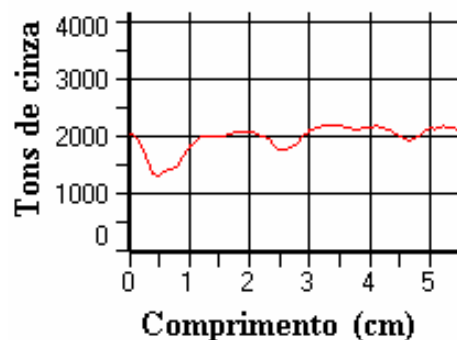
Figura 68 – Perfil dos defeitos da parte superior e inferior.

Através da figura 68(b), percebe-se que os três danos são detectados e isto só foi possível com a realização da subtração de fundo combinada com o levantamento de perfil. Os defeitos da parte inferior, de profundidade igual a 0,5 mm, não foram detectados. De uma maneira geral, observando-se somente através da imagem, só são visíveis os defeitos da parte superior com profundidades de 2 e 1,5 mm. Fato é que os defeitos de mesma profundidade e diâmetro maior não foram detectados, o que pode ser associado à sensibilidade do método a erros de posicionamento durante a execução do ensaio de modo que os defeitos da região inferior tenham ficado fora do plano de observação do termógrafo.

Após as operações de melhoria de contraste, inicia-se o dimensionamento plano, conforme mostram as figuras 69 e 70 abaixo.



(a)



(b)

Figura 69 – Perfil dos defeitos da parte superior do CP3.

Através da figura 69(b), verifica-se a possibilidade medida do diâmetro dos defeitos da parte superior sem a utilização de maiores recursos disponíveis no **Image Pro**, estas ficaram variando de 5,2 a 7 mm, desvio que poderia ser corrigido com a modificação do método de medida.

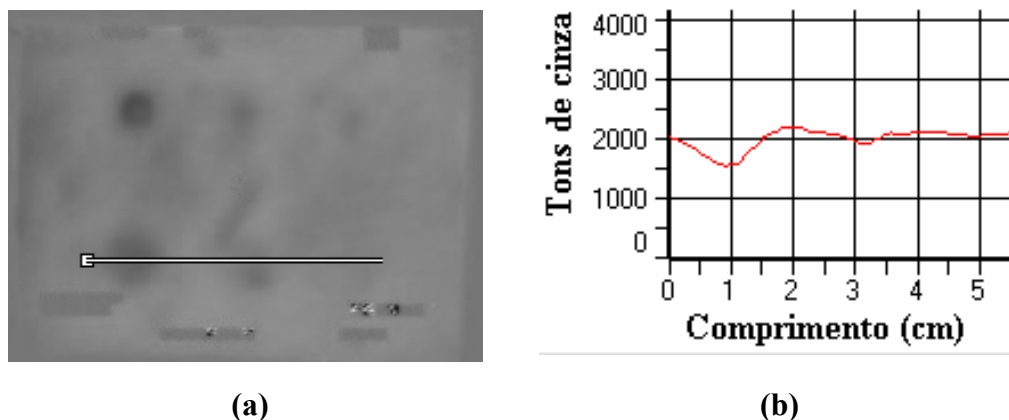


Figura 70 – Perfil dos defeitos da parte inferior do CP3.

Na parte inferior os defeitos também podem ser medidas no plano, conforme mostra a figura 70. O defeito mais a esquerda da imagem (menor profundidade) não foi detectado. O que ocorreu com os defeitos menores ocorreu de repetiu-se aqui, ou seja, houve amplificação dos danos.

6.10.4. CORPO-DE-PROVA 6 (CP6)

O corpo-de-prova 6 é o que possui uma delaminação real provocada por impacto. Esta delaminação foi primeiramente dimensionada por ultra-som e de acordo com as informações deste ensaio, conforme mostra a figura 31.

Os testes foram feitos conforme o quadro abaixo

Quadro 109 – Variáveis do teste

Variável Fixada	Estado (valor)
CP	6
Ex	Lâmpada
d	600 mm
te	10 s
Pos	Rconv
S	Com pintura

Para a detecção deste tipo de defeito foi selecionado o melhor termograma (70,2°C), e aplicado filtro passa-baixo. Como o CP6 foi testado anteriormente, nas mesmas condições, antes do impacto que provocou o defeito, selecionou-se o mesmo termograma do CP sem dano (figura 71 (a)), ou seja, a 70°C e efetuou-se a subtração de fundo conforme mostra a figura 71, abaixo.

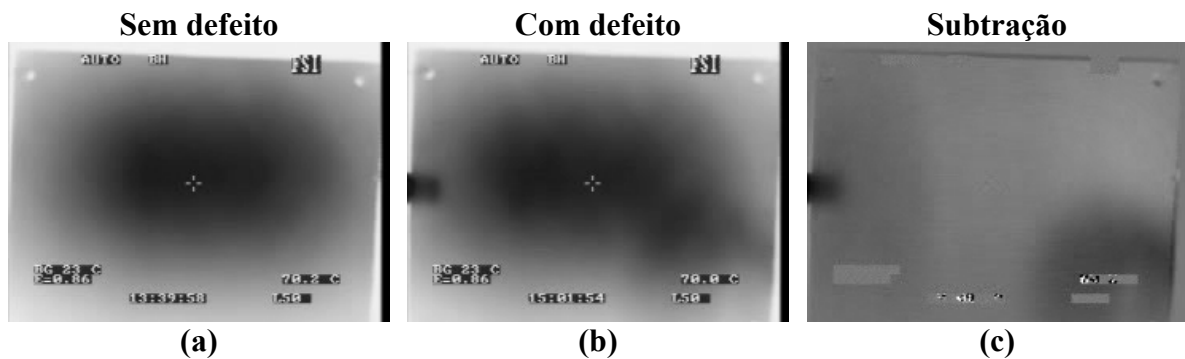


Figura 71 – Operação de subtração com o CP6.

Através da figura 71 verifica-se que em uma primeira análise do termograma com defeito, não é possível se afirmar que existe dano, pois a mesma região do corpo sem dano tem aparência semelhante, logo é impossível a análise simplesmente visual. Após a operação de subtração evidencia-se a região do dano com clareza, sendo esta localizada no canto inferior direito da imagem. Com a segmentação, maximiza-se o contraste, conforme figura 72.



Figura 72 – Segmentação do termograma resultante da subtração.

Abaixo, a figura 73, mostra a diferença de tons de cinza (contraste) entre a região sem dano e a com dano, com o tempo. Verifica-se que o maior contraste ocorre logo no início do resfriamento, ou seja, em temperaturas mais altas. Com o passar do tempo as tonalidades da região sem e com dano passam a se igualar, ou seja, deixa de existir o contraste.

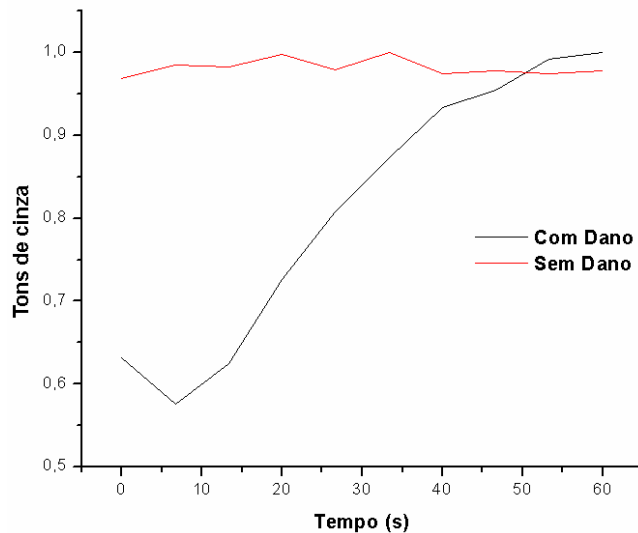


Figura 73 – Contraste ao longo do tempo do CP6.

7. DISCUSSÃO

7.1. RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS

7.1.1. LÂMPADA

A) POSIÇÃO/ EXCITAÇÃO COM LÂMPADA

Através dos testes, avaliando a variável posição para todos tempos de excitação com lâmpadas halógenas, verifica-se que para tempos menores, a posição reflexão convexa é a que apresenta o melhor resultado. Quando ocorre o aumento do tempo de aquecimento, passamos a ter a posição transmissão como o melhor método, sob o critério de maior diferença ou contraste. Com a ampliação do critério, através da filtragem se confirmaram os menores tempos para a posição Rconv e o maior para a transmissão.

Após a filtragem a redução do intervalo (range) para a Rconv foi 4,99% e para a Trans foi de 7,69%, o que mostra que a operação retirou mais componentes do sinal de transmissão, sendo este o mais ruidoso.

Na posição transmissão a frente de onda térmica percorre um espaço maior até alcançar o dano, em função disto, foram avaliados os seguintes aspectos:

- Em função de maior espessura a ser percorrida é necessário maior quantidade de energia, ou seja, maior tempo de aquecimento (temperaturas maiores). A equação [8], abaixo mostra a relação de quantidade de energia com temperatura:

$$W = \varepsilon BT^4 \quad [8]$$

- Como a frente de onda percorre uma distância maior dentro do material, a interação com a estrutura (matriz/reforço) também é maior, o que provoca um efeito de espalhamento [27] da frente de onda e perda acentuada de energia e conseqüentemente, aumento de ruído presente na informação;
- A melhor imagem do defeito aparece em tempo, superior ao das outras posições, o que pode ser verificado e corroborado pela equação [13]. Isto em função da distância do dano em relação à superfície de excitação, que é maior na transmissão, ou seja, quando inicia-se a filmagem infravermelha, a frente de onda ainda está percorrendo a espessura (difusão). Isto pode ser observado, também, através da evolução da temperatura, que no caso da transmissão se eleva com o tempo, pois a frente de onda térmica ainda está em movimento da face posterior para a anterior. Nas posições Rconv e Rconc, no início da filmagem infravermelha ocorre a maior temperatura que diminui com o tempo.

$$t \cong \frac{z^2}{\alpha} \quad [13]$$

- O mecanismo de detecção se baseia na redução de velocidade de difusão da onda térmica, em função da presença da descontinuidade, ou seja, a área com a presença de dano tem temperatura menor que a vizinhança, pois a frente de onda chega mais cedo e com menor atenuação em áreas que estão acima de espessuras sem dano, pode-se concluir que para defeitos próximos a superfície de observação a melhor técnica é a reflexão e para danos mais afastados da superfície de observação e mais próximos da superfície oposta, a transmissão é a melhor posição, pois neste momento o efeito de espalhamento causado pela presença da descontinuidade colabora para a detecção do mesmo. Os resultados obtidos em reflexão côncava (Rconc), mostram de forma clara a influência do afastamento do dano da superfície de observação, ou seja, ocorre a diminuição de qualidade de sinal para reflexão quando o dano se afasta da superfície.
- A posição transmissão pode ser usada para defeitos localizados afastados da superfície de excitação, mas sob pena de perda de qualidade de imagem e a necessidade de altas temperaturas (maiores tempos de aquecimento).
- Pode-se concluir que as posições têm aplicação específica para cada caso, mas se levar em consideração acessibilidade e os tempos necessários para detecção, a reflexão passa a ser o método mais adequado.

B) DISTÂNCIA COM EXCITAÇÃO ATRAVÉS DE LÂMPADA

Os resultados obtidos levam as seguintes conclusões:

- Com uma distância menor, os efeitos de perda durante o percurso atmosférico da onda térmica (radiação) são menores;
- A menor distância inclui, um menor número de objetos na imagem, reduzindo a vizinhança (enquadramento) e possíveis ruídos gerados por esta;
- Embora a diferença entre o menor e o maior intervalo (**range**) seja pequena, nota-se através do aumento da distância, que ocorre uma inversão das amplitudes entre os defeitos 1 e 2, o que pode estar sendo ocasionado devido a ampliação dos erros de alinhamento entre o corpo-de-prova e o termógrafo.

C) TEMPO DE EXCITAÇÃO COM LÂMPADA

Com relação aos tempos de excitação, pode-se dizer que através dos diversos testes elaborados, ocorre um aperfeiçoamento da definição de variáveis para cada cenário criado, ou seja, para corpo-de-prova 1, com excitação através de lâmpadas, deve-se utilizar tempos de excitação de 10 segundos para a posição reflexão convexa, quando os defeitos ocorrem próximos à superfície observada. No caso de se desconhecer por completo a possível localização de ocorrência de dano ao longo da espessura, sugere-se utilizar as posições transmissão (quando possível) e reflexão convexa e seus respectivos tempos ótimos de excitação, de modo a aumentar a possibilidade de detecção.

Para tempos menores de excitação para a posição transmissão, além de ocorrerem maiores níveis de ruído, também diminui a magnitude do contraste entre regiões com e sem dano (resolução da imagem).

D) ESTADO SUPERFÍCIE / EXCITAÇÃO COM LÂMPADA

Pode-se concluir que a aplicação de tinta de baixa reflexão, preta fosca, traz melhoria para a reflexão convexa.

Fica provado que superfícies com alto grau de reflexão prejudicam o exame por termografia, o que pôde ser mostrado pela aplicação do revestimento cinza médio brilho, que provocou a inversão de amplitude, ou seja, o defeito 1 passou a ter menor amplitude, quando tinha a maior.

Para transmissão, qualquer revestimento, é uma barreira para frente de onda, ou seja, prejudica o teste nesta posição. Só é viável revestimento para melhoramento das diferenças de emissividade de superfície para a posição reflexão convexa.

7.1.2. SOPRADOR

A) POSIÇÃO/ EXCITAÇÃO COM SOPRADOR

Para todos os tempos de excitação, testados com soprador, o melhor resultado sempre foi apresentado pela posição reflexão convexa, fato revelado após as operações de filtragem. Este resultado é diferente quando a fonte muda para lâmpadas, onde para os maiores tempos, a posição transmissão é a de melhor resultado.

Analisando os valores de contraste para cada tempo de excitação por posição pode-se concluir o seguinte, sobre os melhores resultados:

- Reflexão convexa: 30 segundos;
- Reflexão côncava: 60 segundos;
- Transmissão: 60 segundos.

Os resultados mostram que os maiores tempos de excitação são melhores para a posição transmissão, pois nesta sempre é necessário maior energia. A reflexão convexa também apresentou melhor resultado em 60s, o que mostra a sensibilidade do método a distância do defeito à superfície, isto quando comparado os resultados de contraste das posições Rconc e Rconv.

B) DISTÂNCIA/ EXCITAÇÃO COM SOPRADOR

Para maiores distâncias a qualidade do sinal proveniente do corpo-de-prova, cai, prejudicando o teste. As distâncias testadas foram de pequena magnitude, o que leva a concluir para maiores distâncias a queda de qualidade deva ser um problema, devendo esta variável ser considerada na calibração do sistema. A sensibilidade da transmissão é maior para a variável distância, quando comparada com reflexão.

C) TEMPO DE EXCITAÇÃO COM SOPRADOR

A reflexão convexa tem melhor desempenho em termos de contraste com tempos menores, no caso, 30 segundos. Já para transmissão, os tempos maiores de excitação têm melhor desempenho em função de esta posição requerer maior nível de energia.

D) ESTADO SUPERFÍCIE/ EXCITAÇÃO COM SOPRADOR

Da mesma forma do que foi observado na excitação com lâmpadas, para o modo reflexão ocorre ganho de contraste com a aplicação de pintura. Para a posição transmissão ocorre de modo contrário, ou seja, o contraste diminui e o ruído do sinal. Para transmissão, a pintura passa a ser mais uma barreira para a frente de onda térmica, provocando perdas.

E) VAZÃO DO SOPRADOR

Para a posição reflexão convexa o aumento de potência trouxe ganho em contraste.

Para a posição transmissão, o aumento de vazão, gerou um sinal com menor nível de ruído e maior contraste para os defeitos, o que pode ser observado através da figura 58(a) e os resultados da coluna intervalo (**range**), onde diferença entre o maior e menor valor é de 54,32%.

7.2. REPETIBILIDADE

Verifica-se, através do quadro 105 que a diferença entre intervalos (range) maior e menor é de 4,56%. Esta é a referência a ser considerada na avaliação com termografia nos métodos estudados. Diferenças desta ordem não devem ser consideradas, por serem o erro intrínseco do processo de avaliação.

7.3. DISCUSSÃO FINAL DOS TESTES PARA DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS COM CP1

O corpo-de-prova 1 (CP1), foi avaliado quanto a todas as variáveis apresentadas e os resultados definem um grupo de referências importantes para os próximos testes. Os quadros 110 e 111, abaixo, resumem os resultados para reflexão e transmissão, onde os dois defeitos (1 e 2) sempre foram detectados.

Quadro 110 – Resumo da avaliação do corpo-de-prova 1 com reflexão.

Variável	Excitador	
	Lâmpada Halógena	Soprador Térmico
Distância (d)	600 mm	600 mm
Tempo de excitação (te)	10 s	30 s
Posição (Pos)	Rconv	Rconv
Superfície (S)	Pintada	Pintada
Vazão (V)	-	V2 (480 l/min)

Quadro 111 – Resumo da avaliação do corpo-de-prova 1 com transmissão.

Variável	Excitador	
	Lâmpada Halógena	Soprador Térmico
Distância (d)	600 mm	600 mm
Tempo de excitação (te)	15 s	60 s
Posição (Pos)	Trans	Trans
Superfície (S)	Sem pintura	Sem pintura
Vazão (V)	-	V2 (480 l/min)

Com relação a detecção dos defeitos do CP1, para excitação com lâmpadas, na posição reflexão convexa, sempre o defeito 1 foi detectado antes do defeito 2, isto porque o defeito 1 estando localizado mais próximo a superfície sob exame, conforme a equação [13] abaixo, deve ser detectado em tempo (t) menor.

$$t \cong \frac{z^2}{\alpha} \quad [13]$$

As temperaturas de detecção para reflexão para o defeito 1, que apresentaram maior contraste variaram de 42°C, para o menor tempo de aquecimento (temperatura máxima de 50°C) a 60°C para o maior tempo de aquecimento (temperatura máxima de 80,2°C).

Para transmissão com lâmpadas, o defeito 1 sempre foi o primeiro a ser detectado, e as temperaturas de maior contraste variaram de 31,9°C para o menor tempo de aquecimento (temperatura mínima de 31,9°C) a 39,5°C (para temperatura mínima de 39,5°C). Para reflexão o perfil de temperaturas é decrescente e os defeitos são detectados em momento próximo ao início do resfriamento. Já para transmissão o perfil de temperaturas é crescente e os defeitos são detectados em momento próximo ou igual ao início do aquecimento.

Os fatos acima se repetiram para o soprador térmico, ou seja, sempre o defeito 1 foi detectado em momento anterior ao 2.

Embora tenha se estudado as posições reflexão (convexa e côncava) e transmissão, a posição reflexão convexa se mostrou a mais adequada por apresentar os menores tempos de excitação, o que reflete em menor tempo de ensaio e melhor qualidade de sinal. A posição transmissão apresenta uma série de desvantagens tais como; necessidade de maior tempo de excitação, maiores níveis de ruído e a não possibilidade de avaliação de profundidade de defeito [27], devido o percurso da frente de onda ser o mesmo para todas áreas, com e sem defeito. Outro fato importante é que

em situações reais dificilmente se terá acesso à superfície oposta para avaliação de juntas em dutos. Desta forma a posição reflexão convexa, torna-se a de maior potencial de aplicação.

Outro ponto importante a ressaltar a melhora dos sinais com o uso do filtro médio móvel do programa Origin para alisamento dos sinais.

Todos os testes a partir de agora serão feitos tendo como valor de variáveis os resultados dos quadros 110 e 111. Os resultados obtidos com o CP 1 funcionaram como uma calibração do método.

7.4. AVALIAÇÃO DE DEFEITOS

7.4.1. CP1

Todos os defeitos foram detectados, provando a eficiência da metodologia de escolha de melhor cenário. Foram utilizadas ferramentas básicas de medida do **Image Pro**, a fim de mostrar a potencialidade quantitativa do método.

7.4.2. CP2

Através dos resultados apresentados, mostra-se que com as variáveis definidas é possível detectar-se delaminação e falta de adesivo, desde de que não haja contato entre as superfícies sem cola. Outro fato é que a região mostrada como sem adesivo é muito menor que realmente contida no corpo-de-prova. A única parte detectada é a correspondente ao topo da superfície convexa, possivelmente por esta área (superfície) se encontrar mais próxima do termógrafo. O efeito de curvatura do CP se fez presente neste momento.

A finalidade precípua do método foi atendida, ou seja, ocorreu a detecção do dano.

7.4.3. CP3

A maioria dos defeitos foram detectados, com exceção do defeito de maior diâmetro e menor profundidade. Fato incoerente, pois, o defeito de menor diâmetro e mesma profundidade, foi detectado. Isto pode estar associado a posicionamento do corpo-de-prova no momento do teste. Pode-se concluir que defeitos com profundidades

de 0,5 mm e diâmetros de 5 mm são detectados somente se houver a aplicação dos recursos aqui descritos (filtragem e subtração de fundo).

7.4.4. CP6

Os teste com o CP 6 mostram que a detecção de delaminação tem a necessidade de análise cuidadosa com a utilização de recursos de tratamento de imagem. Logo não é possível, na inspeção de áreas com a expectativa de ocorrência de delaminação, definir resultados durante a visualização da sequência de termogramas, o que em alguns casos é possível, como no estudo dos danos do CP1

7.4.5. GERAL

Dentre as fontes de excitação utilizadas, os melhores resultados foram os associados à lâmpadas halógenas, pois além de melhor qualidade na uniformidade de aquecimento, obtém-se resultados equivalentes à outras fontes em tempos menores, o que não desabilita o soprador térmico, mas o coloca em posição inferior.

O soprador térmico tem uma grande desvantagem em relação a lâmpadas, pois é necessário na aplicação do mesmo, executar movimentos para distribuição do fluxo de calor, gerando, por diversas vezes, em distribuição diferenciada sobre a superfície em exame, falsas indicações.

A curvatura do corpo-de-prova foi outro fato relevante nos testes, isto revelado pelos resultados de danos localizados fora da linha central (tomado o maior comprimento como referência) que tiveram sua detecção bastante prejudicada. A solução em inspeção é a rotação do termógrafo em torno da junta tubular sob exame, isto associado ao recurso zoom, o que possibilitaria a divisão da junta em vários planos de inspeção ao longo da junta tubular.

Para os ensaios na posição reflexão e transmissão, os defeitos mais próximos foram detectados em tempo menor quando comparados aos mais profundos, e tempos menores significam menores temperaturas. Para a reflexão, a detecção ocorreu próximo às maiores temperaturas e, para transmissão, a detecção ocorreu próximo às menores temperaturas. Vale informar que o perfil de temperaturas para a posição reflexão é decrescente, e para transmissão o perfil é crescente, isto em função do fluxo térmico se dar a partir da parede oposta.

Para alguns tipos de descontinuidade os resultados são mostrados em tempo real, isto é, durante a aquisição dos termogramas já pode ocorrer a detecção e qualificação do defeito, como os vazios, por exemplo, simulados através do corpo-de-prova 1.

Na avaliação da posição transmissão, verificou-se que o nível de ruído é muito elevado e que é necessário, de maneira geral, maior aporte térmico. O modo transmissão de excitação é mais indicado quando os danos estão mais próximos da parede oposta.

A aplicação de pintura não reflexiva é, de fato, uma boa maneira de melhorar a qualidade dos dados termográficos quando utilizando a posição de teste reflexão, pois, no caso da transmissão, a presença de mais um revestimento piora os resultados.

O tempo de excitação de 60 segundos parece ser o máximo que se pode aplicar nesta geometria de inspeção (espessuras de 4, 6 e 8 mm), pois tempos de excitação maiores, provocam um resfriamento mais demorado prejudicando a detecção de danos. Aquecimentos de longa duração levam o corpo sob exame ao equilíbrio e a uma diminuição da velocidade de resfriamento, o que depõe contra o princípio de transiência, necessário ao ensaio. Durante a dissertação foram executados testes em forno, sob o argumento de melhorar a distribuição de calor sobre a superfície do corpo sob exame, que não deram bons resultados. Maiores potências em tempos menores têm melhores resultados (SOPRADOR x LÂMPADA).

8. CONCLUSÃO

Na inspeção de quatro corpos-de-prova que simulavam juntas coladas de dutos em materiais compósitos, utilizando-se a técnica de termografia ativa pulsada com excitação através de lâmpadas halógenas e soprador térmico, foi possível a detecção da maioria dos defeitos simulados com confiabilidade, a partir da digitalização e processamento de imagem com o uso do programa Image Pro.

- Dentre as variáveis estudadas, a distância foi uma das que suscitou atenção, pois menores valores foram os que apresentaram melhores resultados, o que pode ser um complicador na área industrial; este problema pode ser resolvido, por exemplo, com o uso de lentes do tipo zoom equipando os termógrafos;
- A digitalização de imagens e o uso do processamento foram fundamentais para otimizar os resultados da técnica termográfica, como, por exemplo, a

seleção do melhor termograma, aplicação de FFT, filtros de média e passa-baixo, subtração de fundo e segmentação;

- Só foi possível a detecção de delaminação e falta de adesivo, devido aos recursos de processamento de imagem, tais como, geração de perfil de imagem (**line profile**) e subtração de fundo;
- Os testes com uso do forno como excitador não apresentaram bons resultados. Observou-se que para pulsos de aquecimento muito longos, o contraste ideal ocorre durante o aquecimento, prejudicando a detecção de danos.
- Finalmente, pode-se afirmar que a termografia ativa transiente (termografia pulsada), é um método de ensaio adequado para detecção de danos em juntas coladas, principalmente vazios, delaminação e falta de adesão (quando não ocorra contato entre as superfícies).

9. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

- Uso de termografia modulada com análise de fase, para análise de profundidade de defeito;
- Avaliação de outras espessuras a fim de ampliar a verificação dos limites da técnica;
- Criar corpos-de-prova em tamanho real a fim de quantificar a influência dos efeitos de borda;
- Aumentar o número de variáveis e seus valores com consequente tratamento estatístico;
- Avaliar reparos em dutos metálicos com materiais compósitos;
- Aplicação de redes neurais para interpretação de imagens;
- Uso de ferramentas adequadas do **Image Pro** para dimensionamento de danos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- 1- THE COMPOSITE INSTITUTE OF THE SOCIETY OF THE PLASTIC INDUSTRY INCORPORATION. **Fiberglass Pipe Handbook**. Second edition. USA, 1992. p. 7 – 8.
- 2- BAR-COHEN, Y. et al. Ultrasonic Nondestructive Evaluation Method of the Detection and Identification of Defects in Filament Wound Glass Fiber-Reinforced Plastic Tubes. USA: Materials Evaluation. July 1979, p. 51-55.
- 3- B, Melve, 1995, "Acoustic Emission of GRP Tanks and Pipes". Experiences from Field Testing. presented at the common project seminar Ifremer/Marinetech/Sintef on Composites in Offshore Industry, Paper 19, Paris, Oct.
- 4- THOMAS. R. L ; FAVRO. R.. L; KUO. P. K. Thermal Wave Imaging of Adhesive Bonds and Composites. disponível < <http://www.thermal.physics.Wayne.edu/CASR-thermal-ISU.htm>>. Acesso em: 22 fev. 2003, 22:00:00
- 5- FERNAND, Ellyin. et al. 2000, "Fiber Reinforced Composites in Pipeline Applications Design Issues and Current Research." International Pipeline Conference, vol. 1 ASME, U.S.A .
- 6- CARVALHO. A ., Especificação, Instalação e Manutenção de Equipamentos de Fiberglass para Ambientes Agressivos. 1ª edição. São Paulo, ASPLAR, 1992.
- 7- LEE, Jonathan. A; MYKKANEN, Donald. L., Metal and Polymer Matrix Composites..U.S.A, Noyes Data Corp, 1987.
- 8- CHAMIS C.C. Simplified Composite Micromechanics Equations for Mechanical, Thermal, and Moisture-Related Properties, Engineer's Guide to Composite Materials. ASM International, U.S.A., 1987.
- 9- KARPEN, W; D, Wu ; G, Busse. A Theoretical Model for the Measurement of Fiber Orientation with Thermal Waves. Research in Nondestructive Evaluation. U.S.A Springer, 1999.

- 10-DONALD, J. Hagemaiier. Adhesive – Bonded Joints, Douglas Aircraft Company, Macdownell Douglas Corporation USA. 2002.
- 11-VERATTI, Atílio Bruno, Análise Termográfica de Perda Térmica, Sistemas Infravermelhos, AGA S.A.. U.S.A 1984.
- 12-ASNT .Thermal and Infrared Nondestructive Testing. Handbook, vol. 9, USA: 1995.
- 13-HOCKINGS, C. Infrared Equipment Terminology. ASNT Publications: Back to Basics.USA Sept.1997.
- 14- D. Wu; G. Busse, NDT of Materials Using Lock-in Thermography,.vol. 2, Germany: University Stuttgart, 1997.
- 15-FAVRO, L. D.; HAN, X.; THOMAS, R. L.,” Quantitative Thermal-Wave Measurement of Defects in Composite Aircraft Structures”, Proc. 44th International SAMPE, Symposium and Exhibition, Long Beach, CA, May 23-27, 1999
- 16-Y.A Plotnikov; W.P. Winfree. Temporal Treatment of a Thermal Response for Defect Depth Estimation, American Institute of Physics.USA 2000.
- 17-REBELLO, J.M.A..et al. “Avaliação de Técnicas de Ultra-som e Termografia na Inspeção de Tubos e Juntas Tubulares de Material Compósito”, Relatório Final CENPES/PETROBRAS. Dec. Rio de janeiro 1999.
- 18-HARDY Grover; BOLEN James, Methods of Nondestructive Evaluation , Thermal Inspection, USA Wright-Patterson Air Force Base,1989.
- 19-A. Dillenz.et al.” Lock-in thermography for deph resolved defect characterization,” University of Stuttgart, 15th WCNDT, Roma 2000.
- 20-A. Rosencwaig; G. Busse. High resolution photoacoustic thermal wave microscopy, Appl. Phys Lett. 36, USA 1980.

- 21-MALDAGUE, Xavier.P; S. Marinetti, Pulse Phase Infrared Thermography, J. Appl. Phys.,1966,
- 22-GALMICHE François, et al. Pulsed Phased Thermography with the Wavelet Transform, Electrical and Computing Engineering Department, Université Laval, Quebec City, G1K7P4, Canada,2000.
- 23-FAVRO, L. D.,et al. Thermosonic Imaging for NDE, Department of Physics and Institute for Manufacturing Research Wayne State University, Detroit, MI 48202, U.S.A.2000.
- 24-G. Sun; XUN, Wang; Z.J. Feng; Department of Physics and Institute for Manufacturing Research Wayne State University. Imaging and Quantitative Measurement of Corrosion in Painted Automotive and Aircraft Structures, American Institute of Physics U.S.A.2000.
- 25-RUSS, John C.The Image Processing Handbook, 2nd Edition. „U.S.A.: CRC PRESS IMC, 1995.
- 26-AMERON INTERNATIONAL,Bondstrand Series 2000M Fiberglass Pipe and Fittings. U.S.A: 1999.
- 27-MALDAGUE Xavier.P; MOORE P. O., Nondestructive Testing Handbook”, American Society for Non Destructive Testing, 3th Edition. U.S.A.: American society
- 28- HOLST Gerald C., Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems, 2nd Edition.The, U.S.A., International Society for Optical Engineering. 1998.
- 29-GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E., Digital Image Processing, 1st Edition, Addison-Wesley Publishing Company, U.S.A 1992
- 30- CASTLEMAN, K.R., Digital Image Processing, Prentice-Hall, New Jersey, 1996.
- 31-SAVARY, G.,Introdução à Análise de Imagens em Ciência dos Materiais 3º Edição, PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ-Brasil 1995.

ANEXO 1 – TABELAS

Tabela A.1 – Valores de **line profile** do corpo-de-prova na posição Rconv (primeira parte)

	Term1[Y]	Term100[Y]	Term200[Y]	Term300[Y]	Term400[Y]	Term500[Y]	Term600[Y]	Term700[Y]	Term800[Y]	Term900[Y]
1	0,34466	0,54144	0,57318	0,50469	0,53581	0,55633	0,53792	0,55909	0,56262	0,57934
2	0,34466	0,52293	0,56665	0,50469	0,54201	0,5498	0,52541	0,55909	0,5091	0,5494
3	0,34294	0,49727	0,55891	0,46451	0,51142	0,55429	0,52502	0,53108	0,51505	0,53817
4	0,34294	0,4838	0,54586	0,47653	0,51142	0,55429	0,52502	0,5188	0,53289	0,55015
5	0,3296	0,47918	0,50061	0,454	0,49826	0,45551	0,50586	0,47544	0,521	0,54341
6	0,3296	0,47286	0,49409	0,43597	0,48587	0,4498	0,50586	0,47544	0,51505	0,51347
7	0,321	0,46403	0,47452	0,4172	0,45606	0,43796	0,47615	0,49041	0,5039	0,51123
8	0,321	0,44384	0,45495	0,41119	0,43128	0,43796	0,45113	0,49041	0,49201	0,48129
9	0,30852	0,42406	0,42845	0,40894	0,39412	0,44245	0,44683	0,48465	0,47529	0,47642
10	0,30164	0,39714	0,40889	0,39091	0,35695	0,41633	0,4093	0,46623	0,46934	0,47642
11	0,3012	0,37989	0,38443	0,37702	0,33333	0,37633	0,36317	0,43285	0,46377	0,43076
12	0,29432	0,37316	0,3779	0,365	0,31475	0,3502	0,35692	0,41443	0,45782	0,43076
13	0,28012	0,30164	0,33184	0,3297	0,32985	0,35673	0,40383	0,42748	0,46414	0,47829
14	0,28012	0,29491	0,32532	0,33571	0,30507	0,32408	0,3663	0,40292	0,45894	0,47231
15	0,27969	0,28734	0,30656	0,29854	0,29384	0,28653	0,32486	0,38488	0,4359	0,46519
16	0,27969	0,28061	0,287	0,29253	0,29384	0,26041	0,3061	0,3726	0,42549	0,46519
17	0,27926	0,27976	0,2715	0,28014	0,27526	0,25796	0,31001	0,35802	0,41434	0,45696
18	0,27926	0,27976	0,26498	0,24409	0,25668	0,27102	0,31626	0,35802	0,4084	0,44012
19	0,28184	0,28944	0,26743	0,2546	0,26171	0,27184	0,3104	0,34804	0,40097	0,41579
20	0,28184	0,29617	0,26743	0,23057	0,2741	0,25878	0,29789	0,3419	0,40097	0,38585
21	0,25043	0,23685	0,21647	0,22043	0,24623	0,28041	0,26114	0,36224	0,41063	0,38548
22	0,25043	0,22339	0,21647	0,22043	0,22145	0,26735	0,26114	0,33154	0,39279	0,39072
23	0,24871	0,22171	0,21647	0,22418	0,22493	0,24694	0,26818	0,29317	0,42252	0,40157
24	0,24871	0,2419	0,22299	0,22418	0,23113	0,26	0,28069	0,29317	0,41063	0,41205
25	0,24742	0,24064	0,22829	0,2163	0,22958	0,28367	0,29515	0,33615	0,41286	0,42103
26	0,24742	0,23391	0,24134	0,22231	0,22338	0,30327	0,30141	0,37913	0,42475	0,41579
27	0,24742	0,23349	0,26091	0,2392	0,235	0,29184	0,29984	0,39256	0,40691	0,40232
28	0,24742	0,24695	0,27395	0,24521	0,25358	0,27878	0,29984	0,39256	0,4188	0,39034
29	0,2543	0,27051	0,31186	0,25685	0,27333	0,27592	0,33581	0,4363	0,43144	0,40382

Tabela A.2 – Valores de **line profile** do corpo-de-prova na posição Rconv (segunda parte)

	Term1[Y]	Term100[Y]	Term200[Y]	Term300[Y]	Term400[Y]	Term500[Y]	Term600[Y]	Term700[Y]	Term800[Y]	Term900[Y]
30	0,26119	0,27724	0,31186	0,26286	0,29191	0,3151	0,34206	0,45472	0,44928	0,43975
31	0,2642	0,29491	0,32328	0,28577	0,28842	0,32367	0,36278	0,44282	0,45596	0,49476
32	0,28485	0,32857	0,33632	0,3098	0,3132	0,33673	0,3878	0,42441	0,46191	0,51722
33	0,29045	0,3618	0,36201	0,33834	0,34262	0,37429	0,40461	0,43246	0,45299	0,51909
34	0,29733	0,38199	0,39462	0,36838	0,33024	0,38082	0,42338	0,41404	0,45299	0,50112
35	0,30164	0,40682	0,415	0,39054	0,31436	0,37796	0,43041	0,40177	0,47046	0,49177
36	0,30852	0,41355	0,42805	0,40781	0,34533	0,40408	0,43667	0,42632	0,4764	0,49177
37	0,37005	0,45225	0,46148	0,42508	0,43902	0,49429	0,45348	0,50767	0,4935	0,52395
38	0,37005	0,46571	0,46148	0,4371	0,45761	0,48245	0,4828	0,51381	0,46971	0,50599
39	0,36747	0,48801	0,48145	0,4555	0,48509	0,47469	0,51446	0,51381	0,53252	0,50599
40	0,37435	0,50778	0,52059	0,47353	0,49748	0,49429	0,53088	0,51995	0,54441	0,51796
41	0,38038	0,50905	0,52956	0,47803	0,51374	0,52612	0,52932	0,52724	0,53623	0,51834
42	0,38038	0,50905	0,50999	0,48404	0,51994	0,55224	0,51798	0,53338	0,55407	0,49439
43	0,38898	0,5162	0,51325	0,49531	0,52652	0,56449	0,5043	0,53415	0,54627	0,49551
44	0,38898	0,52293	0,55238	0,50131	0,53271	0,55796	0,49805	0,54029	0,53437	0,51347
45	0,3679	0,52756	0,55891	0,51258	0,55556	0,54122	0,54535	0,51151	0,5392	0,57672
46	0,3679	0,52756	0,56543	0,51859	0,58653	0,56082	0,54535	0,51151	0,55704	0,56475
47	0,37349	0,53513	0,54423	0,52009	0,58846	0,56735	0,54339	0,51995	0,57339	0,56063
48	0,37349	0,5284	0,54423	0,52009	0,56369	0,56735	0,54965	0,53837	0,57339	0,55464
49	0,3821	0,51493	0,57318	0,52234	0,53813	0,59347	0,56685	0,56178	0,57414	0,54641
50	0,3821	0,51493	0,57318	0,52835	0,55672	0,61878	0,56685	0,56792	0,56224	0,54042
51	0,39028	0,5305	0,56095	0,55088	0,56601	0,60531	0,56685	0,56447	0,56373	0,54042
52	0,39028	0,53723	0,58704	0,5629	0,56601	0,56612	0,56685	0,56447	0,56373	0,54042
53	0,38855	0,53008	0,55402	0,52047	0,5753	0,56816	0,55903	0,5614	0,54589	0,53892
54	0,40232	0,51662	0,54097	0,52647	0,55672	0,60082	0,58405	0,5307	0,61724	0,55689
55	0,34079	0,55827	0,5532	0,59256	0,57995	0,56449	0,5387	0,53876	0,58937	0,60254
56	0,41652	0,55827	0,58581	0,59256	0,68525	0,64286	0,52619	0,60015	0,56559	0,58458
57	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabela A.3 – Valores de **line profile** do corpo-de-prova na posição Rconv (terceira parte)

	Term1[Y]	Term100[Y]	Term200[Y]	Term300[Y]	Term400[Y]	Term500[Y]	Term600[Y]	Term700[Y]	Term800[Y]	Term900[Y]
58	0,47074	0,51199	0,55891	0,50282	0,4758	0,51388	0,50547	0,5165	0,4987	0,49925
59	0,3963	0,57762	0,56502	0,52309	0,57182	0,63265	0,58092	0,66309	0,52137	0,54379
60	0,38253	0,48338	0,55198	0,55314	0,61518	0,56082	0,58092	0,55257	0,5511	0,60966
61	0,40146	0,52419	0,61802	0,56891	0,56794	0,59388	0,58561	0,58173	0,58343	0,57897
62	0,39458	0,53092	0,63106	0,55088	0,57414	0,61347	0,61063	0,56946	0,56559	0,59693
63	0,38081	0,5305	0,63229	0,56478	0,57646	0,59796	0,60438	0,53684	0,56373	0,59319
64	0,34639	0,52377	0,61924	0,57078	0,57027	0,61102	0,5731	0,53684	0,58751	0,56924
65	0,32057	0,52125	0,60416	0,5445	0,55788	0,5849	0,57897	0,56332	0,59941	0,57784
66	0,32057	0,52798	0,57155	0,53849	0,55788	0,61102	0,61024	0,58173	0,58751	0,59581
67	0,3494	0,52545	0,55238	0,56327	0,56949	0,58531	0,62314	0,5802	0,55704	0,60479
68	0,38382	0,52545	0,52629	0,56928	0,57569	0,57224	0,60438	0,56792	0,54515	0,59281
69	0,38769	0,51956	0,57236	0,52685	0,56756	0,5849	0,54378	0,55027	0,5392	0,56662
70	0,38769	0,53302	0,56584	0,53887	0,57375	0,5849	0,54378	0,55027	0,57488	0,58458
71	0,39458	0,53976	0,5638	0,54487	0,57375	0,58367	0,54769	0,55794	0,59346	0,58608
72	0,39458	0,55995	0,58337	0,55689	0,58614	0,5902	0,54769	0,57022	0,57562	0,59207
73	0,40534	0,56668	0,59519	0,56102	0,57414	0,59265	0,55043	0,59363	0,56299	0,59281
74	0,4191	0,55995	0,60823	0,56102	0,58033	0,59265	0,56294	0,59363	0,56299	0,58084
75	0,41652	0,55995	0,60823	0,56403	0,56562	0,59265	0,56059	0,58365	0,55741	0,55614
76	0,41652	0,54649	0,60171	0,56403	0,56562	0,59265	0,56685	0,57751	0,53958	0,55015
77	0,43158	0,54649	0,58989	0,54638	0,5451	0,56816	0,53675	0,56408	0,56001	0,55015
78	0,43158	0,54649	0,58989	0,54037	0,53891	0,56163	0,53675	0,57022	0,56001	0,55614
79	0,429	0,54607	0,57236	0,5246	0,51955	0,55184	0,52658	0,55142	0,54441	0,55501
80	0,429	0,53934	0,55932	0,51859	0,50097	0,53878	0,52033	0,51458	0,52062	0,53705
81	0,43244	0,53008	0,54464	0,52197	0,48742	0,52041	0,49531	0,49309	0,53846	0,51198
82	0,43244	0,52335	0,52507	0,50995	0,47503	0,50735	0,48905	0,48695	0,56224	0,49401
83	0,43244	0,52503	0,51325	0,48329	0,47503	0,49388	0,49023	0,47928	0,5589	0,47904
84	0,43244	0,52503	0,50673	0,46526	0,46883	0,49388	0,48475	0,46853	0,53512	0,46707
85	0,42857	0,49138	0,47411	0,46189	0,44406	0,44816	0,42885	0,47774	0,50836	0,48466

Tabela A.4 – Valores de **line profile** do corpo-de-prova na posição Rconv (quarta parte)

	Term1[Y]	Term100[Y]	Term200[Y]	Term300[Y]	Term400[Y]	Term500[Y]	Term600[Y]	Term700[Y]	Term800[Y]	Term900[Y]
86	0,42857	0,48549	0,46759	0,44386	0,43786	0,45469	0,42885	0,47199	0,50836	0,47867
87	0,42298	0,4817	0,46107	0,42771	0,43128	0,45265	0,42846	0,46124	0,50316	0,47081
88	0,42298	0,47539	0,45455	0,4217	0,42509	0,44612	0,42846	0,44474	0,49275	0,47081
89	0,41609	0,46487	0,4468	0,42433	0,41657	0,41837	0,42103	0,4317	0,47306	0,47043
90	0,40232	0,4716	0,4468	0,42433	0,39799	0,39878	0,40852	0,4152	0,46191	0,47043
91	0,40404	0,47581	0,45291	0,41307	0,3945	0,38367	0,40461	0,39064	0,46191	0,4637
92	0,40404	0,48254	0,45291	0,39504	0,3945	0,38367	0,40461	0,3845	0,46786	0,45771
93	0,41997	0,48927	0,468	0,37514	0,34495	0,36531	0,39093	0,41865	0,42772	0,38136
94	0,42685	0,48927	0,45658	0,37514	0,34495	0,35878	0,37842	0,39409	0,47454	0,4113
95	0,42427	0,48128	0,44313	0,36801	0,34533	0,34	0,37803	0,41136	0,46042	0,45434
96	0,43115	0,47455	0,42356	0,36801	0,34533	0,35306	0,35927	0,42249	0,45522	0,47118
97	0,43115	0,47244	0,41459	0,36801	0,3434	0,36653	0,32095	0,42786	0,42884	0,47118
98	0,43804	0,46571	0,42764	0,362	0,3434	0,37959	0,32095	0,4386	0,41806	0,45434
99	0,43804	0,46571	0,44517	0,362	0,34262	0,38163	0,34206	0,44781	0,4411	0,43039
100	0,44492	0,46571	0,45821	0,362	0,34262	0,38163	0,3233	0,42325	0,41992	0,4244
101	0,43761	0,52335	0,44313	0,33421	0,34108	0,36286	0,35496	0,38028	0,39279	0,41841
102	0,44449	0,52335	0,44313	0,36425	0,34727	0,35633	0,34246	0,38642	0,42549	0,43638
103	0,44449	0,5326	0,45291	0,38866	0,3585	0,35796	0,37842	0,39064	0,43069	0,45921
104	0,45138	0,53934	0,45862	0,41269	0,36469	0,37755	0,36591	0,3845	0,41992	0,45921
105	0,46343	0,53807	0,47289	0,41044	0,35463	0,37878	0,36708	0,38642	0,41509	0,43787
106	0,46343	0,5448	0,49164	0,39241	0,36082	0,37878	0,38585	0,38642	0,43292	0,4259
107	0,47461	0,55827	0,50183	0,38716	0,39024	0,38367	0,35457	0,40215	0,43924	0,43039
108	0,47461	0,55827	0,50836	0,38716	0,40263	0,40327	0,36083	0,42057	0,4333	0,43638
109	0,47849	0,51578	0,50102	0,40969	0,40728	0,40939	0,44644	0,49002	0,41955	0,51198
110	0,48537	0,51578	0,50102	0,4217	0,42431	0,40939	0,44019	0,49002	0,43144	0,51759
111	0,48537	0,52419	0,5108	0,4371	0,42935	0,41429	0,42729	0,49002	0,45448	0,51198
112	0,49914	0,53092	0,52385	0,44236	0,42935	0,42735	0,43354	0,49002	0,47826	0,49401
113	0,50861	0,54396	0,54709	0,45775	0,43244	0,4498	0,44722	0,51074	0,50873	0,5
114	0,52238	0,56416	0,56013	0,47465	0,44483	0,47592	0,45973	0,51688	0,53846	0,53593

Tabela A.5 – Valores de **line profile** do corpo-de-prova na posição Rconv (última parte)

	Term1[Y]	Term100[Y]	Term200[Y]	Term300[Y]	Term400[Y]	Term500[Y]	Term600[Y]	Term700[Y]	Term800[Y]	Term900[Y]
115	0,52754	0,5772	0,56706	0,50244	0,47	0,50041	0,47185	0,52609	0,55667	0,55539
116	0,53356	0,59066	0,57358	0,51934	0,48161	0,51184	0,47185	0,53223	0,57451	0,55539
117	0,55551	0,61969	0,54994	0,50357	0,49942	0,49918	0,57975	0,48887	0,5511	0,54903
118	0,56928	0,62642	0,56298	0,53962	0,51181	0,51878	0,57349	0,51343	0,58082	0,59094
119	0,5654	0,63231	0,59274	0,54713	0,5242	0,54571	0,56685	0,53761	0,57414	0,58009
120	0,57917	0,65923	0,63188	0,59519	0,55517	0,5849	0,57936	0,57444	0,58008	0,58009
121	0,59294	0,67354	0,65838	0,62674	0,58653	0,61347	0,60672	0,59593	0,61576	0,59094
122	0,59983	0,687	0,69751	0,62674	0,62369	0,63959	0,63174	0,60821	0,63359	0,60891
123	0,60585	0,7093	0,72442	0,64363	0,65467	0,65061	0,64816	0,61051	0,64177	0,66467
124	0,61962	0,71603	0,73746	0,63162	0,66705	0,65714	0,65442	0,60437	0,6715	0,66467
125	0,62866	0,7135	0,72687	0,69959	0,66009	0,74612	0,69859	0,64467	0,66815	0,63548
126	0,62866	0,7337	0,74643	0,69959	0,69725	0,73959	0,7111	0,65081	0,6741	0,66542
127	0,63855	0,75599	0,77293	0,71048	0,74061	0,74327	0,72009	0,66884	0,68562	0,69424
128	0,64544	0,76946	0,79902	0,72249	0,76539	0,7498	0,72635	0,69954	0,69156	0,70621

Tabela B.1 – Valores de **line profile** do corpo-de-prova na posição Rconc (primeira parte)

	Term1[Y]	Term100[Y]	Term200[Y]	Term300[Y]	Term400[Y]	Term500[Y]	Term600[Y]	Term700[Y]	Term800[Y]	Term900[Y]
1	0,59781	0,50919	0,51491	0,53757	0,55229	0,57093	0,57249	0,55251	0,55948	0,60439
2	0,5902	0,49582	0,50829	0,5316	0,54019	0,57093	0,57249	0,54641	0,55948	0,54298
3	0,57639	0,46992	0,45816	0,48249	0,5108	0,5423	0,53362	0,54423	0,5069	0,57982
4	0,56973	0,46408	0,45816	0,47652	0,49784	0,52842	0,53362	0,53159	0,4931	0,55175
5	0,5564	0,4599	0,45029	0,47438	0,48617	0,50412	0,54323	0,50893	0,47328	0,51667
6	0,5426	0,45322	0,44449	0,4684	0,47926	0,49024	0,531	0,4902	0,47328	0,4886
7	0,53927	0,43901	0,44615	0,46328	0,48574	0,47505	0,50175	0,47146	0,48017	0,44912
8	0,52404	0,43233	0,43455	0,44962	0,48574	0,46811	0,47686	0,45054	0,48017	0,44211
9	0,5169	0,42774	0,42751	0,44108	0,47191	0,47158	0,42882	0,44575	0,45	0,43904
10	0,5169	0,42774	0,42751	0,44108	0,45117	0,47158	0,40786	0,44575	0,42241	0,43904
11	0,4712	0,40769	0,38898	0,4415	0,37597	0,44469	0,44367	0,43094	0,40431	0,43772
12	0,47882	0,41437	0,38898	0,42101	0,38289	0,44469	0,42271	0,40305	0,38362	0,40263
13	0,47834	0,41729	0,38028	0,39667	0,39239	0,43037	0,38428	0,37865	0,35862	0,38114
14	0,48596	0,41729	0,37365	0,38301	0,39239	0,39566	0,35633	0,35076	0,35172	0,38816
15	0,49262	0,41604	0,37448	0,3813	0,39196	0,38004	0,34498	0,34597	0,35819	0,39254
16	0,49262	0,40936	0,36785	0,3813	0,37813	0,35922	0,35895	0,35294	0,35819	0,38553
17	0,50214	0,39348	0,36288	0,37959	0,36863	0,34534	0,38384	0,38126	0,34957	0,39693
18	0,50214	0,3868	0,36288	0,37959	0,3548	0,33839	0,39083	0,39521	0,34267	0,43904
19	0,51023	0,3868	0,38857	0,35226	0,37165	0,32278	0,39432	0,3342	0,29957	0,39605
20	0,51023	0,3868	0,37531	0,36593	0,39931	0,30889	0,33144	0,35512	0,30647	0,36096
21	0,49881	0,3797	0,36288	0,36593	0,39758	0,30846	0,32751	0,34815	0,30733	0,37456
22	0,48358	0,3797	0,343	0,35226	0,36992	0,30846	0,28559	0,36209	0,32112	0,3886
23	0,47739	0,37594	0,33181	0,34543	0,33578	0,30369	0,28559	0,34815	0,30733	0,35614
24	0,46216	0,37594	0,33181	0,34543	0,3427	0,30369	0,30655	0,30632	0,30043	0,33509
25	0,4455	0,37218	0,33679	0,34799	0,34831	0,30325	0,24279	0,32549	0,28836	0,33333
26	0,4455	0,37218	0,34341	0,34799	0,3414	0,29631	0,24279	0,2976	0,28147	0,31228
27	0,43218	0,35965	0,32891	0,27242	0,35523	0,32234	0,26594	0,28366	0,30991	0,26754
28	0,42456	0,34628	0,32891	0,27925	0,34831	0,28764	0,26594	0,2976	0,30302	0,31667
29	0,42504	0,33751	0,32104	0,29505	0,33449	0,25423	0,26594	0,32418	0,30129	0,35263

Tabela B.2 – Valores de **line profile** do corpo-de-prova na posição Rconc (segunda parte)

	Term1[Y]	Term100[Y]	Term200[Y]	Term300[Y]	Term400[Y]	Term500[Y]	Term600[Y]	Term700[Y]	Term800[Y]	Term900[Y]
30	0,41742	0,32414	0,32104	0,30188	0,32757	0,24035	0,26594	0,33115	0,30129	0,33158
31	0,4098	0,31704	0,32104	0,30572	0,33665	0,25033	0,27948	0,33246	0,30216	0,33114
32	0,39457	0,31036	0,31442	0,31939	0,32973	0,27809	0,28646	0,30458	0,29526	0,33816
33	0,38363	0,29114	0,3169	0,30658	0,32239	0,29284	0,28559	0,28279	0,27198	0,31798
34	0,38363	0,28446	0,3169	0,30658	0,30164	0,29284	0,29258	0,26187	0,2444	0,28991
35	0,35697	0,31704	0,30779	0,27626	0,30812	0,22863	0,28821	0,32418	0,24784	0,32851
36	0,35697	0,31704	0,30779	0,28992	0,30121	0,24252	0,28821	0,32418	0,25474	0,30746
37	0,35364	0,31036	0,30903	0,30615	0,29689	0,27766	0,28472	0,3268	0,28147	0,29123
38	0,35364	0,31036	0,30903	0,30615	0,28997	0,29848	0,30568	0,31285	0,29526	0,28421
39	0,35459	0,31287	0,31483	0,29889	0,28306	0,30412	0,33275	0,31111	0,32155	0,29342
40	0,35459	0,31287	0,31483	0,29889	0,27615	0,30412	0,35371	0,31111	0,32845	0,32851
41	0,35602	0,31955	0,31649	0,29932	0,25886	0,29935	0,35546	0,31068	0,33879	0,35877
42	0,35602	0,31955	0,31649	0,30615	0,25194	0,29935	0,35546	0,32462	0,33879	0,38684
43	0,35745	0,33166	0,30903	0,25918	0,30078	0,30325	0,32664	0,33377	0,33103	0,37675
44	0,35745	0,32498	0,30903	0,30017	0,30769	0,30325	0,30568	0,33377	0,33103	0,3557
45	0,36268	0,32498	0,31027	0,32536	0,32195	0,30456	0,31528	0,34728	0,34569	0,38377
46	0,3703	0,3183	0,31027	0,32536	0,32887	0,32538	0,35022	0,35425	0,37328	0,41184
47	0,37744	0,3137	0,30779	0,31853	0,33751	0,33926	0,3952	0,35643	0,37026	0,41272
48	0,38505	0,3137	0,30779	0,32536	0,33751	0,33926	0,40917	0,35643	0,33578	0,37763
49	0,38553	0,30033	0,31027	0,34073	0,328	0,33449	0,3952	0,34641	0,3319	0,34912
50	0,39315	0,30033	0,31027	0,34073	0,328	0,31367	0,36026	0,33943	0,33879	0,35614
51	0,46454	0,32665	0,3111	0,28565	0,35782	0,3449	0,35502	0,35381	0,39957	0,40263
52	0,46454	0,32665	0,3111	0,29932	0,35091	0,3449	0,33406	0,42353	0,39267	0,4307
53	0,46264	0,33793	0,3169	0,32664	0,33708	0,34577	0,36245	0,4305	0,38578	0,40965
54	0,46264	0,33793	0,32353	0,34031	0,32325	0,35271	0,34847	0,42353	0,38578	0,40965
55	0,46406	0,33835	0,32063	0,34073	0,32498	0,35445	0,34847	0,42397	0,37759	0,43772
56	0,46406	0,33835	0,32726	0,32707	0,33881	0,35445	0,38341	0,38214	0,38448	0,4307
57	0,46121	0,32247	0,33389	0,30444	0,34831	0,35315	0,36157	0,34815	0,39052	0,42632
58	0,46121	0,32247	0,33389	0,29761	0,36906	0,36009	0,38952	0,38301	0,39741	0,44035

Tabela B.3 – Valores de **line profile** do corpo-de-prova na posição Rconc (terceira parte)

	Term1[Y]	Term100[Y]	Term200[Y]	Term300[Y]	Term400[Y]	Term500[Y]	Term600[Y]	Term700[Y]	Term800[Y]	Term900[Y]
59	0,42504	0,33835	0,31773	0,33049	0,32887	0,38178	0,40961	0,43747	0,4181	0,40351
60	0,42504	0,33835	0,3111	0,31682	0,32887	0,37484	0,38865	0,40959	0,39741	0,44561
61	0,43408	0,33835	0,2908	0,31725	0,3777	0,33059	0,38384	0,38301	0,42112	0,43158
62	0,43408	0,34503	0,28418	0,34458	0,37079	0,33059	0,4048	0,37603	0,42112	0,40351
63	0,44169	0,36926	0,28169	0,35141	0,35566	0,37701	0,4131	0,38867	0,38491	0,4443
64	0,44931	0,36257	0,29495	0,32408	0,38332	0,38395	0,39913	0,40261	0,4194	0,47237
65	0,44931	0,3254	0,31069	0,30572	0,38029	0,35054	0,38821	0,41002	0,43319	0,42325
66	0,46454	0,29198	0,31069	0,31939	0,40795	0,35054	0,38821	0,41002	0,37802	0,40921
67	0,46835	0,31997	0,27755	0,34757	0,37035	0,29675	0,42227	0,38911	0,39009	0,35526
68	0,52927	0,32665	0,31732	0,37489	0,37035	0,35228	0,4083	0,39608	0,3694	0,43947
69	0,48453	0,31287	0,27879	0,31597	0,32109	0,40824	0,37336	0,39564	0,3569	0,39781
70	0,60638	0,4198	0,37158	0,42528	0,48704	0,42213	0,48515	0,45839	0,44655	0,475
71	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
72	0,54593	0,46491	0,46313	0,4415	0,49525	0,50542	0,45895	0,55556	0,52974	0,55307
73	0,55117	0,26734	0,24399	0,29163	0,33708	0,42299	0,35328	0,40828	0,37586	0,34912
74	0,41409	0,34085	0,31027	0,36678	0,37857	0,44382	0,40917	0,45011	0,42414	0,41228
75	0,33889	0,2807	0,30903	0,29249	0,38202	0,38178	0,40742	0,38867	0,37457	0,40526
76	0,35412	0,31412	0,28915	0,31981	0,34745	0,38872	0,40742	0,40261	0,37457	0,39123
77	0,3565	0,34085	0,29702	0,33476	0,33405	0,37874	0,40568	0,42353	0,38491	0,38596
78	0,34127	0,34085	0,33016	0,32109	0,34788	0,35098	0,3917	0,40959	0,39871	0,37895
79	0,32556	0,31871	0,33679	0,29163	0,35134	0,33102	0,38428	0,39303	0,39698	0,39211
80	0,31033	0,29866	0,32353	0,29163	0,33751	0,3449	0,39127	0,39303	0,39009	0,40614
81	0,31128	0,29282	0,32229	0,32622	0,35004	0,38655	0,40524	0,42092	0,37888	0,41184
82	0,31128	0,29282	0,33554	0,35354	0,38462	0,40738	0,43319	0,43486	0,37888	0,42588
83	0,38743	0,32456	0,31069	0,3702	0,36992	0,38048	0,37686	0,50022	0,39612	0,40482
84	0,38743	0,33124	0,31069	0,35653	0,36992	0,38048	0,37686	0,45142	0,39612	0,39079
85	0,40885	0,32916	0,30986	0,35312	0,37338	0,38785	0,37729	0,43704	0,40302	0,38421
86	0,42408	0,33584	0,30986	0,34629	0,37338	0,38785	0,38428	0,45795	0,40302	0,39123
87	0,44503	0,34586	0,314	0,34031	0,35869	0,38221	0,38122	0,44575	0,39828	0,39693

Tabela B.4 – Valores de **line profile** do corpo-de-prova na posição Rconc (quarta parte)

	Term1[Y]	Term100[Y]	Term200[Y]	Term300[Y]	Term400[Y]	Term500[Y]	Term600[Y]	Term700[Y]	Term800[Y]	Term900[Y]
88	0,46787	0,34586	0,32063	0,33348	0,35869	0,37527	0,38122	0,39695	0,38448	0,38991
89	0,48501	0,35589	0,32726	0,32664	0,35048	0,37484	0,38297	0,38257	0,37112	0,37675
90	0,49262	0,35589	0,32726	0,31981	0,34356	0,36095	0,38297	0,40349	0,35733	0,3557
91	0,52499	0,37761	0,3285	0,32109	0,38678	0,39393	0,36026	0,34771	0,39009	0,40746
92	0,52499	0,37761	0,3285	0,32109	0,38678	0,3731	0,36026	0,35468	0,39009	0,41447
93	0,51594	0,37761	0,32353	0,32792	0,37943	0,34794	0,36376	0,35643	0,39397	0,41447
94	0,50071	0,37761	0,32353	0,33476	0,35869	0,341	0,36376	0,35643	0,38707	0,41447
95	0,50071	0,37761	0,33016	0,32494	0,34529	0,34403	0,35633	0,34902	0,37845	0,41184
96	0,4931	0,37761	0,33016	0,3181	0,33838	0,35098	0,35633	0,33508	0,37845	0,42588
97	0,48548	0,37886	0,33513	0,30487	0,33449	0,35315	0,35502	0,3281	0,37931	0,42588
98	0,48548	0,37886	0,33513	0,30487	0,34831	0,3462	0,35502	0,30719	0,37241	0,42588
99	0,47549	0,37803	0,32477	0,34885	0,35825	0,3718	0,37424	0,35512	0,3306	0,39737
100	0,47549	0,37803	0,33803	0,34885	0,35825	0,35792	0,36026	0,35512	0,3444	0,37632
101	0,46787	0,38095	0,34383	0,34842	0,37208	0,34881	0,35459	0,36122	0,35172	0,36579
102	0,46026	0,38095	0,35708	0,35525	0,37208	0,35575	0,3476	0,38214	0,35172	0,37982
103	0,46264	0,37845	0,35501	0,36892	0,35955	0,37223	0,34629	0,38257	0,35819	0,37719
104	0,44741	0,37176	0,35501	0,37575	0,35264	0,37223	0,35328	0,38954	0,37198	0,36316
105	0,43979	0,37218	0,36951	0,37319	0,35696	0,35141	0,36201	0,38736	0,38319	0,38114
106	0,43979	0,37218	0,38277	0,37319	0,37079	0,33753	0,37598	0,38736	0,39698	0,40219
107	0,44503	0,3868	0,37655	0,34927	0,33924	0,35835	0,36288	0,38126	0,39526	0,39123
108	0,46026	0,3868	0,37655	0,34244	0,35998	0,35835	0,39083	0,38824	0,42974	0,39825
109	0,47025	0,39098	0,3778	0,33689	0,38721	0,37397	0,41048	0,39303	0,45517	0,40482
110	0,47787	0,40434	0,3778	0,35056	0,40795	0,37397	0,42445	0,4	0,44138	0,41184
111	0,49119	0,40476	0,38194	0,38087	0,41962	0,37354	0,40349	0,42135	0,43448	0,4123
112	0,49881	0,41145	0,38194	0,3877	0,40579	0,38742	0,38952	0,42832	0,44828	0,45526
113	0,51642	0,41145	0,38857	0,38685	0,39888	0,40651	0,38079	0,43442	0,46681	0,48991
114	0,52404	0,41145	0,38857	0,38002	0,38505	0,44121	0,38079	0,44139	0,47371	0,50395
115	0,53974	0,43943	0,41466	0,43339	0,44728	0,44382	0,45153	0,49847	0,49914	0,48377
116	0,53974	0,43943	0,42129	0,42656	0,44036	0,45076	0,45153	0,4915	0,50603	0,48377

Tabela B.5 – Valores de **line profile** do corpo-de-prova na posição Rconc (última parte)

	Term1[Y]	Term100[Y]	Term200[Y]	Term300[Y]	Term400[Y]	Term500[Y]	Term600[Y]	Term700[Y]	Term800[Y]	Term900[Y]
117	0,53974	0,45113	0,43579	0,43083	0,43302	0,47158	0,45895	0,5342	0,52845	0,49693
118	0,53974	0,45781	0,42916	0,44449	0,43302	0,49241	0,47293	0,51329	0,52845	0,51798
119	0,53927	0,45781	0,41881	0,4667	0,43691	0,49544	0,49607	0,55425	0,53017	0,55439
120	0,53927	0,46408	0,41881	0,48036	0,46456	0,49544	0,51616	0,53333	0,53621	0,5614
121	0,53832	0,46992	0,42792	0,48506	0,48315	0,49761	0,5393	0,55686	0,54267	0,55877
122	0,53832	0,46992	0,4478	0,47822	0,49006	0,49761	0,55197	0,54292	0,55474	0,55175
123	0,52308	0,46992	0,46147	0,4842	0,49568	0,51497	0,53581	0,54466	0,54871	0,64254
124	0,51547	0,46992	0,46147	0,49787	0,52334	0,51497	0,54978	0,55861	0,5556	0,64254
125	0,47977	0,47076	0,46727	0,5222	0,55013	0,53275	0,56288	0,58301	0,57759	0,63684
126	0,46454	0,47744	0,48053	0,53587	0,55704	0,54664	0,57686	0,58301	0,59828	0,62982
127	0,46073	0,48622	0,4884	0,55038	0,55661	0,58221	0,57773	0,58519	0,6194	0,61579
128	0,46073	0,50376	0,50829	0,54355	0,57044	0,60174	0,58472	0,59913	0,63319	0,62982

Tabela C.1 – Valores de **line profile** do corpo-de-prova na posição Trans (primeira parte)

	Term1[Y]	Term100[Y]	Term200[Y]	Term300[Y]	Term400[Y]	Term500[Y]	Term600[Y]	Term700[Y]	Term800[Y]	Term900[Y]
1	0,87203	0,8501	0,86466	0,82826	0,82766	0,8658	0,8715	0,83121	0,83199	0,83704
2	0,86559	0,89687	0,84397	0,82149	0,85489	0,8658	0,8439	0,85226	0,83199	0,80915
3	0,8668	0,89144	0,84353	0,81937	0,85362	0,85191	0,8301	0,84174	0,83333	0,81046
4	0,86036	0,838	0,85043	0,84645	0,81957	0,82499	0,8301	0,81368	0,83333	0,80349
5	0,86439	0,88476	0,87112	0,87563	0,79021	0,84308	0,84217	0,80842	0,8517	0,8061
6	0,85795	0,88476	0,89181	0,90271	0,79021	0,8902	0,84907	0,82946	0,85887	0,81307
7	0,84064	0,85929	0,93405	0,87775	0,82553	0,84518	0,83096	0,81456	0,85797	0,79172
8	0,84064	0,85929	0,87888	0,87775	0,85277	0,82499	0,86546	0,8356	0,85081	0,80566
9	0,83944	0,86722	0,91422	0,86802	0,86	0,81447	0,86417	0,84305	0,84364	0,80392
10	0,833	0,86722	0,87974	0,86125	0,85319	0,85486	0,76757	0,85007	0,8293	0,79695
11	0,82736	0,8714	0,8625	0,86421	0,8583	0,90072	0,84476	0,85007	0,82796	0,80174
12	0,82736	0,88476	0,8625	0,87098	0,87191	0,8536	0,84476	0,84305	0,82796	0,82963
13	0,82334	0,89019	0,80388	0,87563	0,87277	0,809	0,81285	0,83735	0,82751	0,8366
14	0,82334	0,89019	0,85216	0,87563	0,85915	0,84266	0,84735	0,83735	0,82751	0,80174
15	0,84024	0,87265	0,89526	0,82699	0,87957	0,82962	0,8495	0,84437	0,85797	0,85969
16	0,84024	0,87265	0,90216	0,83376	0,85234	0,82289	0,8495	0,8584	0,86514	0,83878
17	0,84064	0,8739	0,92112	0,85068	0,83362	0,8313	0,91074	0,84393	0,87903	0,82397
18	0,84064	0,86722	0,92112	0,85745	0,86085	0,85822	0,87624	0,83691	0,87903	0,78911
19	0,84105	0,86597	0,91509	0,86337	0,85915	0,87169	0,84433	0,8562	0,87097	0,77473
20	0,84105	0,85929	0,8875	0,87014	0,82511	0,87169	0,86503	0,84919	0,8638	0,7817
21	0,84024	0,85887	0,86293	0,87775	0,81191	0,85949	0,84217	0,84174	0,86425	0,7817
22	0,84024	0,85887	0,84224	0,87775	0,81872	0,83256	0,89047	0,86278	0,86425	0,79564
23	0,85433	0,83549	0,83017	0,87352	0,82085	0,82583	0,88486	0,88032	0,86156	0,83268
24	0,85433	0,83549	0,83707	0,86675	0,82766	0,82583	0,83657	0,86629	0,86156	0,81176
25	0,84024	0,82088	0,85302	0,85871	0,85574	0,83046	0,87365	0,85007	0,87321	0,82048
26	0,84024	0,82088	0,8806	0,85195	0,86936	0,84392	0,85295	0,85708	0,87321	0,82048
27	0,83219	0,83674	0,89138	0,84814	0,88128	0,85654	0,88616	0,88119	0,86022	0,78736
28	0,82575	0,8501	0,89138	0,84814	0,88809	0,87674	0,87926	0,88821	0,83154	0,79434
29	0,82696	0,85637	0,87672	0,85575	0,90298	0,89903	0,7555	0,879	0,84364	0,82919

Tabela C.2 – Valores de **line profile** do corpo-de-prova na posição Trans (segunda parte)

	Term1[Y]	Term100[Y]	Term200[Y]	Term300[Y]	Term400[Y]	Term500[Y]	Term600[Y]	Term700[Y]	Term800[Y]	Term900[Y]
30	0,82696	0,86305	0,84914	0,86252	0,90298	0,91249	0,79	0,85796	0,87231	0,82919
31	0,87928	0,81628	0,89138	0,83333	0,85319	0,84687	0,83915	0,83954	0,87634	0,8305
32	0,87928	0,81628	0,88448	0,86041	0,83957	0,90072	0,80466	0,83954	0,86201	0,80261
33	0,88048	0,82338	0,87759	0,81768	0,82383	0,84518	0,79172	0,86059	0,82885	0,78344
34	0,88048	0,82338	0,86379	0,83122	0,82383	0,86538	0,80552	0,81149	0,80735	0,75556
35	0,87887	0,82338	0,83879	0,83164	0,83404	0,86958	0,82665	0,83253	0,7836	0,73943
36	0,87887	0,83674	0,8181	0,81134	0,84085	0,84939	0,82665	0,76238	0,7836	0,73246
37	0,88129	0,838	0,81853	0,84391	0,82681	0,89188	0,77749	0,79351	0,7836	0,74205
38	0,88129	0,838	0,81853	0,81684	0,82	0,81111	0,73609	0,77948	0,7836	0,74205
39	0,85956	0,81169	0,84914	0,75338	0,77234	0,79638	0,77318	0,7431	0,76478	0,69891
40	0,866	0,81837	0,82845	0,76692	0,77915	0,78292	0,77318	0,75011	0,75762	0,7268
41	0,88571	0,83758	0,86422	0,78511	0,77702	0,78124	0,76973	0,76458	0,76792	0,74205
42	0,89497	0,85094	0,85043	0,78511	0,7566	0,78124	0,76973	0,78562	0,74642	0,74902
43	0,88129	0,85136	0,81379	0,77919	0,77191	0,78418	0,78137	0,79527	0,7845	0,73856
44	0,84266	0,85136	0,7931	0,78596	0,77191	0,77745	0,78827	0,78825	0,79884	0,72462
45	0,8165	0,85511	0,81853	0,80838	0,73021	0,77198	0,768	0,77729	0,79435	0,70458
46	0,78431	0,84843	0,78405	0,82868	0,77106	0,76525	0,72661	0,76326	0,74418	0,6976
47	0,83219	0,84635	0,82241	0,77792	0,77872	0,74716	0,74515	0,74923	0,7621	0,69237
48	0,83219	0,84635	0,83621	0,81176	0,78553	0,74716	0,73825	0,74222	0,75493	0,69935
49	0,82857	0,80459	0,82974	0,80711	0,76766	0,75642	0,73264	0,74616	0,72446	0,6841
50	0,82857	0,79791	0,78836	0,77327	0,73362	0,76315	0,72574	0,73915	0,70296	0,72593
51	0,82616	0,83674	0,77586	0,76481	0,72681	0,7602	0,72704	0,73915	0,71102	0,74336
52	0,82616	0,85678	0,79655	0,78511	0,76085	0,76693	0,74084	0,73915	0,72536	0,73638
53	0,81972	0,85177	0,81422	0,78892	0,77702	0,76693	0,75334	0,73959	0,74418	0,74118
54	0,81972	0,86973	0,81422	0,76184	0,7634	0,76693	0,77404	0,7466	0,72984	0,69935
55	0,86519	0,87975	0,77586	0,77792	0,75489	0,78544	0,72833	0,68654	0,75672	0,78475
56	0,78793	0,85887	0,85172	0,79822	0,72766	0,75179	0,73523	0,75669	0,75672	0,70806
57	0,83823	0,762	0,82759	0,70897	0,73745	0,77871	0,72574	0,76414	0,75538	0,64357
58	0,83823	0,78873	0,82069	0,80372	0,7783	0,72486	0,78784	0,76414	0,7267	0,66449

Tabela C.3 – Valores de **line profile** do corpo-de-prova na posição Trans (terceira parte)

	Term1[Y]	Term100[Y]	Term200[Y]	Term300[Y]	Term400[Y]	Term500[Y]	Term600[Y]	Term700[Y]	Term800[Y]	Term900[Y]
59	0,9505	0,84301	0,93017	0,80541	0,79234	0,83046	0,84519	0,81412	0,79391	0,74553
60	0,79155	0,79624	0,77328	0,75804	0,74468	0,72276	0,7348	0,73696	0,65771	0,69673
61	0,86197	0,88392	0,8431	0,75296	0,82809	0,81489	0,74429	0,74923	0,76927	0,74728
62	0,88773	0,84384	0,86379	0,75296	0,81447	0,76104	0,69599	0,74923	0,73342	0,74728
63	0,8338	0,91315	0,77328	0,78892	0,74213	0,80438	0,75248	0,76765	0,71595	0,70414
64	0,85312	0,89311	0,82845	0,78215	0,75574	0,80438	0,77318	0,78869	0,68011	0,739
65	0,86318	0,85595	0,88534	0,78807	0,77149	0,79386	0,76455	0,78387	0,71595	0,73769
66	0,87606	0,83507	0,89224	0,80838	0,7783	0,77366	0,78525	0,75581	0,70161	0,7098
67	0,87203	0,82547	0,84095	0,81895	0,77617	0,76483	0,77361	0,7431	0,72267	0,70458
68	0,85272	0,82547	0,81336	0,81895	0,77617	0,76483	0,82191	0,7431	0,78002	0,72549
69	0,82857	0,81712	0,80302	0,79949	0,77872	0,77787	0,78611	0,73214	0,76523	0,73115
70	0,80926	0,83716	0,82371	0,77919	0,78553	0,7846	0,78611	0,70408	0,77957	0,72418
71	0,81891	0,9048	0,83793	0,76777	0,7817	0,78544	0,76887	0,78036	0,76971	0,74815
72	0,81891	0,88894	0,83103	0,77453	0,78851	0,79891	0,73437	0,78036	0,77688	0,74118
73	0,82414	0,86973	0,82328	0,78765	0,80809	0,80564	0,76757	0,76502	0,78002	0,72288
74	0,83058	0,86973	0,81638	0,80118	0,80809	0,81237	0,78827	0,758	0,78002	0,70893
75	0,85272	0,88351	0,81379	0,8033	0,81362	0,81321	0,75636	0,74879	0,76434	0,72767
76	0,85915	0,88351	0,82069	0,78976	0,81362	0,80648	0,77016	0,74879	0,75	0,73464
77	0,86358	0,85804	0,82284	0,78257	0,80383	0,7968	0,7749	0,75975	0,75717	0,75338
78	0,86358	0,82463	0,82974	0,7758	0,80383	0,78334	0,72661	0,75975	0,77151	0,76035
79	0,88819	0,84551	0,84612	0,79907	0,88043	0,80774	0,75291	0,75888	0,87903	0,7817
80	0,89819	0,87223	0,87371	0,81937	0,87362	0,79428	0,76671	0,76589	0,81452	0,76078
81	0,88853	0,90689	0,87069	0,8511	0,86638	0,80227	0,77965	0,79044	0,84767	0,75556
82	0,88853	0,91148	0,87069	0,85787	0,85277	0,81573	0,80034	0,80447	0,819	0,75556
83	0,88813	0,89353	0,84483	0,86125	0,85277	0,81658	0,81889	0,81719	0,8293	0,7634
84	0,88813	0,86681	0,83103	0,86125	0,85277	0,80984	0,82579	0,83121	0,86514	0,79129
85	0,88934	0,86013	0,85302	0,86591	0,86255	0,82331	0,82277	0,82858	0,82437	0,79608
86	0,88934	0,86013	0,86681	0,87944	0,86936	0,86369	0,81587	0,81456	0,86022	0,80305
87	0,89658	0,8643	0,85086	0,86168	0,87489	0,82583	0,88659	0,89434	0,87052	0,83922

Tabela C.4 – Valores de **line profile** do corpo-de-prova na posição Trans (quarta parte)

	Term1[Y]	Term100[Y]	Term200[Y]	Term300[Y]	Term400[Y]	Term500[Y]	Term600[Y]	Term700[Y]	Term800[Y]	Term900[Y]
88	0,89658	0,87098	0,87845	0,86168	0,88851	0,84602	0,87969	0,88032	0,87769	0,82527
89	0,90302	0,88476	0,89397	0,86421	0,90043	0,88052	0,87796	0,88645	0,90323	0,83834
90	0,90302	0,89144	0,91466	0,87098	0,88681	0,91418	0,91246	0,90048	0,91756	0,83137
91	0,90946	0,88935	0,90043	0,86971	0,91021	0,92385	0,94351	0,9075	0,91084	0,78911
92	0,9159	0,88935	0,89353	0,86971	0,93064	0,92385	0,94351	0,94257	0,91084	0,81002
93	0,91751	0,88559	0,89569	0,8731	0,93702	0,91965	0,91332	0,9794	0,9095	0,85403
94	0,91751	0,87223	0,89569	0,87986	0,9234	0,91292	0,87193	0,98466	0,90233	0,861
95	0,91348	0,91023	0,9306	0,91878	0,9634	0,9167	0,93747	0,96186	1	0,85447
96	0,91348	0,90355	0,9306	0,90525	0,93277	0,9167	0,91677	0,94783	0,98566	0,8963
97	0,92072	0,91106	0,92845	0,88325	0,91574	0,91838	0,93532	0,91144	0,97043	0,93115
98	0,92072	0,93111	0,93534	0,87648	0,92936	0,91838	0,92152	0,89741	0,95609	0,93813
99	0,92435	0,94614	0,93707	0,89679	0,95234	0,91838	0,92066	0,90662	0,94803	0,92898
100	0,92435	0,95282	0,93707	0,91709	0,95234	0,91838	0,94135	0,94169	0,94803	0,90806
101	0,93521	0,9524	0,93491	0,92301	0,96213	0,90787	0,92022	0,95616	0,95341	0,92505
102	0,93521	0,93904	0,93491	0,92301	0,97617	0,90114	0,93402	0,94213	0,96057	0,93203
103	0,88692	0,90647	0,93879	0,95008	0,99447	0,92007	0,96895	0,99211	0,96685	0,94989
104	0,90624	0,93987	0,93879	0,94332	0,99915	0,9268	0,97585	0,99912	0,97401	0,92898
105	0,9336	0,95282	0,94828	0,94374	0,98255	0,94741	0,96248	1	0,98118	0,89237
106	0,95131	0,97787	0,96207	0,9302	0,96426	0,95414	0,94179	0,96493	0,98835	0,87843
107	0,95131	0,96827	0,9681	0,92809	0,9566	0,94867	0,9724	0,95747	0,98656	0,89368
108	0,9336	0,95491	0,975	0,92132	0,9566	0,92848	1	0,96449	0,97222	0,92854
109	0,90785	0,95574	0,98534	0,92132	0,92979	0,91376	1	0,96624	0,96057	0,98083
110	0,88209	0,94906	0,99224	0,92132	0,88894	0,90029	0,9862	0,9452	0,95341	1
111	0,95936	0,94071	0,97155	0,98308	0,96894	0,9979	1	0,98071	0,92563	0,97168
112	0,95936	0,96743	0,95086	0,96404	0,97574	0,9979	0,9931	0,98772	0,96147	0,94379
113	0,95694	0,96409	0,95172	0,97208	0,98043	1	0,9806	0,98772	0,96953	0,94946
114	0,95694	0,97077	0,95172	0,99069	0,98043	0,99327	0,9806	0,98772	0,9552	0,92854
115	0,95694	0,99081	0,9931	0,99915	0,9783	0,98696	0,96981	0,98159	0,96505	0,92331
116	0,95694	0,98622	0,9931	0,98012	0,9783	0,9735	0,96981	0,96054	0,98656	0,93725

Tabela C.5 – Valores de **line profile** do corpo-de-prova na posição Trans (última parte).

	Term1[Y]	Term100[Y]	Term200[Y]	Term300[Y]	Term400[Y]	Term500[Y]	Term600[Y]	Term700[Y]	Term800[Y]	Term900[Y]
117	0,95895	0,95699	1	0,98604	0,97574	0,96298	0,95213	0,94476	0,97581	0,92157
118	0,95895	0,96367	0,98621	1	0,97574	0,96298	0,93834	0,93775	0,9543	0,94248
119	0,90543	0,94071	0,97241	0,92513	0,93277	0,94994	0,93057	0,98816	0,94892	0,93377
120	0,91831	0,94071	0,96552	0,9319	0,92596	0,9634	0,91677	0,99518	0,93459	0,93377
121	0,94447	0,94071	0,95345	0,94416	0,91745	0,94068	0,92842	0,99474	0,93324	0,93943
122	0,95734	0,95407	0,93966	0,95093	0,91064	0,95414	0,93532	0,98772	0,94758	0,94641
123	0,95855	0,96618	0,9375	0,95093	0,91957	0,94741	0,92842	0,98203	0,96237	0,94118
124	0,95211	0,97954	0,9375	0,94416	0,93319	0,92722	0,94912	0,96098	0,96953	0,91329
125	0,94487	0,96868	0,94267	0,9319	0,95489	0,95414	0,97628	0,94827	0,96998	0,93769
126	0,93199	0,96868	0,94957	0,92513	0,96851	0,94741	0,96938	0,94125	0,96998	0,96863
127	1	0,99332	0,9444	0,99408	1	0,95625	0,97628	0,9829	0,97177	0,90501
128	0,99557	1	0,98578	0,98942	0,97957	0,94279	0,96248	0,98992	0,93593	0,90501

Tabela D – Tabela com os dados dos 3 modos de posição.

Tabela D - Tabela com os dados dos 5 modos de poeira.																
	Rconv[Y]	Rconc[Y]	Trans[Y]		Rconv[Y]	Rconc[Y]	Trans[Y]		Rconv[Y]	Rconc[Y]	Trans[Y]		Rconv[Y]	Rconc[Y]	Trans[Y]	
1	0,50469	—	0,83704	30	0,26286	0,24035	0,82919	59	0,52309	0,38178	0,65674	88	0,4217	0,37527	0,82527	
2	0,50469	—	0,80915	31	0,28577	0,25033	0,8305	60	0,55314	0,37484	0,66673	89	0,42433	0,37484	0,83834	
3	0,46451	—	0,81046	32	0,3098	0,27809	0,80261	61	0,56891	0,33059	0,74728	90	0,42433	0,36095	0,83137	
4	0,47653	—	0,80349	33	0,33834	0,29284	0,78344	62	0,55088	0,33059	0,74728	91	0,41307	0,39393	0,78911	
5	0,454	—	0,8061	34	0,36838	0,29284	0,75556	63	0,56478	0,37701	0,70414	92	0,39504	0,3731	0,81002	
6	0,43597	—	0,81307	35	0,39054	0,22863	0,73943	64	0,57078	0,38395	0,739	93	0,37514	0,34794	0,85403	
7	0,4172	—	0,79172	36	0,40781	0,24252	0,73246	65	0,5445	0,35054	0,73769	94	0,37514	0,341	0,861	
8	0,41119	—	0,80566	37	0,42508	0,27766	0,74205	66	0,53849	0,35054	0,7098	95	0,36801	0,34403	0,85447	
9	0,40894	0,47158	0,80392	38	0,4371	0,29848	0,74205	67	0,56327	0,29675	0,70458	96	0,36801	0,35098	0,8963	
10	0,39091	0,47158	0,79695	39	0,4555	0,30412	0,69891	68	0,56928	0,35228	0,72549	97	0,36801	0,35315	0,93115	
11	0,37702	0,44469	0,80174	40	0,47353	0,30412	0,7268	69	0,52685	0,40824	0,73115	98	0,362	0,3462	0,93813	
12	0,365	0,44469	0,82963	41	0,47803	0,29935	0,74205	70	0,53887	0,42213	0,72418	99	0,362	0,3718	0,92898	
13	0,3297	0,43037	0,8366	42	0,48404	0,29935	0,74902	71	0,54487	0,4421	0,74815	100	0,362	0,35792	0,90806	
14	0,33571	0,39566	0,80174	43	0,49531	0,30325	0,73856	72	0,55689	0,50542	0,74118	101	0,33421	0,34881	0,92505	
15	0,29854	0,38004	0,85969	44	0,50131	0,30325	0,72462	73	0,56102	0,42299	0,72288	102	0,36425	0,35575	0,93203	
16	0,29253	0,35922	0,83878	45	0,51258	0,30456	0,70458	74	0,56102	0,44382	0,70893	103	0,38866	0,37223	0,94989	
17	0,28014	0,34534	0,82397	46	0,51859	0,32538	0,6976	75	0,56403	0,38178	0,72767	104	0,41269	0,37223	0,92898	
18	0,24409	0,33839	0,78911	47	0,52009	0,33926	0,69237	76	0,56403	0,38872	0,73464	105	0,41044	0,35141	0,89237	
19	0,2546	0,32278	0,77473	48	0,52009	0,33926	0,69935	77	0,54638	0,37874	0,75338	106	0,39241	0,33753	0,87843	
20	0,23057	0,30889	0,7817	49	0,52234	0,33449	0,6841	78	0,54037	0,35098	0,76035	107	0,38716	0,35835	0,89368	
21	0,22043	0,30846	0,7817	50	0,52835	0,31367	0,72593	79	0,5246	0,33102	0,7817	108	0,38716	0,35835	0,92854	
22	0,22043	0,30846	0,79564	51	0,55088	0,3449	0,74336	80	0,51859	0,3449	0,76078	109	0,40969	0,37397	0,98083	
23	0,22418	0,30369	0,83268	52	0,5629	0,3449	0,73638	81	0,52197	0,38655	0,75556	110	0,4217	0,37397	0,9449	
24	0,22418	0,30369	0,81176	53	0,52047	0,34577	0,74118	82	0,50995	0,40738	0,75556	111	0,4371	0,37354	0,97168	
25	0,2163	0,30325	0,82048	54	0,52647	0,35271	0,69935	83	0,48329	0,38048	0,7634	112	0,44236	0,38742	0,94379	
26	0,22231	0,29631	0,82048	55	0,5305	0,35445	0,78475	84	0,46526	0,38048	0,79129	113	0,45775	0,40651	0,94946	
27	0,2392	0,32234	0,78736	56	0,5205	0,35445	0,6436	85	0,46189	0,38785	0,79608	114	0,47465	0,44121	0,92854	
28	0,24521	0,28764	0,79434	57	0,5205	0,35315	0,64357	86	0,44386	0,38785	0,80305	115	0,50244	0,44382	0,92331	
29	0,25685	0,25423	0,82919	58	0,50282	0,36009	0,64449	87	0,42771	0,38221	0,83922	116	0,51934	0,45076	0,93725	
													Rconv[Y]	Rconc[Y]	Trans[Y]	
													117	0,50357	0,47158	0,92157
													118	—	—	0,94248
													119	—	—	0,93377
													120	—	—	0,93377
													121	—	—	0,93943
													122	—	—	0,94641
													123	—	—	0,94118
													124	—	—	0,91329
													125	—	—	0,93769
													126	—	—	0,96863
													127	—	—	0,90501
													128	—	—	0,90501