

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

KAMILA PEREIRA LINS

PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE
DEFEITOS EM PLACAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS USANDO
SHEAROGRAFIA COM EXCITAÇÃO TÉRMICA

FLORIANÓPOLIS, 12 DE ABRIL DE 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

KAMILA PEREIRA LINS

PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE
DEFEITOS EM PLACAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS USANDO
SHEAROGRAFIA COM EXCITAÇÃO TÉRMICA

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa
Catarina para obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Armando
Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.
Eng.
Co-orientador: Eng. Daniel Pedro
Willemann, Dott. Ing.

FLORIANÓPOLIS, 12 DE ABRIL DE 2012

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

L759p Lins, Kamila Pereira

Procedimento para avaliação da profundidade de defeitos em placas de materiais compósitos usando shearografia com excitação térmica [dissertação] / Kamila Pereira Lins ; orientador, Armando Albertazzi Gonçalves Júnior. - Florianópolis, SC, 2012.

164 p.: il., graf., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia mecânica. 2. Materiais compostos - Defeitos. 3. Shearografia. I. Gonçalves Júnior, Armando Albertazzi. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU 621

KAMILA PEREIRA LINS

PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE
DEFEITOS EM PLACAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS USANDO
SHEAROGRAFIA COM EXCITAÇÃO TÉRMICA

Essa dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 12 de Abril de 2012.

Prof. Júlio César Passos, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Banca Examinadora:

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Orientador

Eng. Daniel Pedro Willemann, Dott. Ing.
Co-orientador

Analúcia Vieira Fantin, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr. Ing.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico esse trabalho à minha mãe
pelo seu esforço imensurável de
tornar esse sonho possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus e Pai por todas as coisas boas que vivi, pois sei que o bem apenas dele é que veio.

À UFSC pela oportunidade de realização deste trabalho.

À Petrobrás órgão fomentador que proporcionou a concretização deste trabalho.

Ao meu orientador Professor Armando Albertazzi Gonçalves Júnior uma pessoa inteligente e paciente que tive a sorte de conhecer. Não sei o que dizer. Obrigada por existir e por me ajudar tanto nesta jornada.

Ao meu co-orientador Daniel Pedro Willemann pelo apoio durante o trabalho.

Aos colegas de trabalho Fábio Silva, João Paulo e Miguel Demay pelas inúmeras vezes na qual fui acolhida nas minhas dúvidas.

Ao grande amigo Daniel Schlickmann pelo grande companheirismo em todos os momentos deste o primeiro dia deste caminhar.

À minha amiga Iara por me lembrar que cada dia oferece a possibilidade de novas conquistas, pelo apoio emocional nas horas difíceis.

Aos amigos Vladimir Lima, Lúnia Lima e Arthur Nunes pelo carinho, muitas pessoas nos inspiram boas coisas, mas poucas pessoas nos inspiram paz e vocês foram essas pessoas, de muita paz.

Ao João Ricardo uma pessoa de raros dons intelectuais, obrigada pelas sábias palavras de apoio trazendo sempre alegria nos momentos difíceis.

Aos Professores Antônio Salvador da Rocha, Jesualdo Pereira Farias e Sônia Maria Araújo Castelo Branco pela confiança depositada.

Ao grande “mestre” Luiz Soares Júnior a quem devo minha paixão pela metrologia.

À minha mãe pelo amor, carinho e dedicação e apoio incondicional em cada passo desde sonho e pelo apoio diante das dificuldades.

Às minhas tias Laura Amorim e Socorro Amorim pelo apoio financeiro dos meus estudos no momento importante da minha formação.

À minha madrinha Zefinha pelas sábias palavras de conforto em toda a jornada, principalmente na minha infância.

À minha tia Jandira com sua sabedoria e espiritualidade.

À Dona Ieda e minha tia Valdete pelo auxílio no início da minha formação acadêmica.

À minha amiga Pâmilla Ostermann agradeço imensamente pelo apoio em toda a jornada trazendo alegria no meu cotidiano, pela amizade e incentivo.

À minha grande amiga Jane Dewes, agradeço pelas conversas, pela atenção, pelos conselhos “infalíveis”, pelo elogio que só vem de quem ama. Obrigada pelos momentos perfeitos, por ser aquela que se faz inesquecível e mais importante a cada dia. Obrigada por me entender e justamente quando nem eu me entendo. Obrigada por me ajudar quando eu preciso e puxar minha orelha quando eu faço alguma burrada, obrigada por existir. Você me ensinou o sentido da palavra amizade.

Um especial agradecimento à Silvia Telles e Camilo Costa por ter tornado esse sonho possível no momento mais difícil desta caminhada.

À grande amiga Zuzilene Evangelista pelo apoio e palavras de conforto e sabedoria.

À Priscyla Tavares e Guilherme Isoppo pela amizade e pelos ótimos momentos vividos.

À minha amiga Lisie De Luca Maciel obrigada por tudo não é o bastante para te agradecer por ter sido tão especial, carinhosa, amiga e conselheira.

Ao meu grande amigo Henrique Rodrigues pelas horas de conselhos e pela enorme paciência.

Às minhas amigas Janny Reis e Luli Lobo pelo grande carinho.

Ao meu grande amigo Frederico Rodrigues que em todos os momentos sempre esteve comigo, me apoiando e nunca deixando me abalar, muito obrigada amigo.

Aos amigos Guadalupe, Alberto, Ducarmo, Dandara e Ana Paula pelas energias positivas enviadas com muito amor e carinho.

Aos meus amigos Federico Alonso, Luiz Bittencourt, Cláudia Dewes e Patrícia Scalabrin pela ótima companhia e momentos de descontração.

À todos os colegas e amigos do Labmetro, que direta ou indiretamente contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

*“Crê em ti mesmo,
age e verá os resultados.
Quando te esforças,
a vida também se
esforça para te ajudar.”*

Chico Xavier

*“Se achas bom ser
importante, um dia descobrirás
que é importante ser bom.”*

R. Schneider

*"Somos o que fazemos, mas somos,
principalmente, o que fazemos
para mudar o que somos."*

Eduardo Galeano

RESUMO

PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE DEFEITOS EM REVESTIMENTOS DE MATERIAIS COMPÓSITOS USANDO SHEAROGRAFIA COM EXCITAÇÃO TÉRMICA

Kamila Pereira Lins

Abril / 2012

Orientador: Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.

Co-orientador: Eng. Daniel Pedro Willemann, Dott. Ing.

Área de concentração: Metrologia e Instrumentação

Palavras chave: materiais compósitos, shearografia, quantificação de defeitos

As indústrias do petróleo e derivados, e químicas em geral têm mostrado interesse crescente na aplicação de revestimentos e componentes construídos de materiais compósitos, principalmente por sua imunidade à corrosão. Sua aplicação, feita em campo, muitas vezes em condições não ideais, pode apresentar alguns defeitos, que devem ser detectados e corrigidos. A shearografia é uma técnica óptica interferométrica capaz de detectar estes defeitos em materiais compósitos quando sobre estes é aplicado um carregamento, normalmente térmico. Apresenta bons resultados quantitativos. A quantificação das dimensões, profundidades e severidade de defeitos não é fácil. Depende de experiência e julgamento do inspetor. O presente trabalho contribui desenvolvendo e avaliando um caminho não subjetivo para extrair informações quantitativas dos defeitos. Foi desenvolvido um procedimento usando shearografia com excitação térmica e um software especialmente desenvolvido para quantificar as dimensões laterais e profundidades de defeitos presentes em materiais compósitos. Uma base de dados foi formada com defeitos de forma geométrica quadrada artificialmente produzidos e inseridos em diferentes profundidades de corpos de prova. Para avaliar os resultados, defeitos quadrados foram quantificados em um corpo de prova independente, levando a resultados promissores para defeitos próximos à superfície. As limitações, potencialidades e próximos passos do caminho desenvolvido são discutidos no trabalho.

ABSTRACT

PROCEDURE FOR EVALUATION OF THE DEPTH OF DEFECTS IN COMPOSITE MATERIALS COATING USING SHEAROGRAPHY WITH THERMAL EXCITATION

Kamila Pereira Lins

April / 2012

Advisor: Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.

Co-advisor: Eng. Daniel Pedro Willemann, Dott. Ing.

Area of Concentration: Metrology and Instrumentation

Keywords: Composite Materials, Shearography, Quantification of Defects.

The oil and gas and chemicals industries have shown increasing interest in applying coatings and components made of composite materials, mainly due to its immunity to corrosion. Its application on the field, often in non-ideal conditions, can present some defects, which must be detected and corrected. Shearography is an optical interferometric technique capable of detecting defects composite in response to an external loading, usually produced by heating. It provides quite good qualitative results. By the other hand, extracting quantitative features, like dimensions, depth and severity of defects, is not easy. It depends on experience and judgment of the inspector. The present work developed and evaluates a non-subjective procedure using shearography to extract quantitative information about the defects. The procedure involves thermal excitation, specially developed software and an algorithm to estimate dimension and depths of defects present in composite materials. As a first step, a database was formed with data extracted from square-shaped defects artificially produced and placed at different depths of a set of specimens. To evaluate the results, square defects were quantified in an independent specimen, leading to promising results for quantitative evaluation of defects near the surface. Limitations, potential and the next steps are also discussed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de fibras (MALLICK, 2007).....	38
Figura 2: Classificação dos materiais compósitos (DANIEL; ISHAI, 1994).	41
Figura 3: Estrutura básica de um laminado (REDDY, 2004).....	43
Figura 4: Boeing 777 com estruturas em compósito polimérico reforçado com fibra (MALLICK, 2007).	44
Figura 5: Compósito de matriz epóxi reforçado por fibra de carbono na suspensão e na caixa de engrenagens em carros de corrida de fórmula 1 (MALLICK, 2007).	45
Figura 6: Residuto® - Luva de material compósito, indicado para reparo de dutos por corrosão ou moessa (RUST ENGENHARIA, 2011).....	50
Figura 7: (a) Termograma em escala policromática; (b) Termograma em escala monocromática (VELOSO, 2008).	56
Figura 8: Modo esquemático de inspeção termográfica na forma ativa (TARPANI; ALMEIDA; <i>et al.</i> , 2009).	58
Figura 9: Sinais ultrassônicos característicos a inspeção em materiais compósitos: (a) sem defeito; (b) com delaminação (SANTOS; FARIAS; <i>et al.</i> , 2010).	60
Figura 10: (a) Esquema básico da TC de raios-X, consiste de uma fonte de raio-X, posição angular e um detector. (b) As imagens em 2D coletadas das projeções de intensidade de cada ângulo são sobrepostas e matematicamente processadas para gerar a imagem em 3D (PACHECO; GOYAL, 2010).	62
Figura 11: Formação do <i>speckle</i> objetivo (STEINCHEN; YANG, 2003).	64
Figura 12: Formação do <i>speckle</i> subjetivo (STEINCHEN; YANG, 2003).	65

Figura 13: Padrão de <i>speckle</i> típico (STEINCHEN; YANG, 2003).....	66
Figura 14: Ilustração de um Interferômetro de Michelson (STEINCHEN; YANG, 2003).....	67
Figura 15: Franjas de interferência fonte primária (FANTIN, 2009)....	69
Figura 16: Configuração holográfica de iluminação simples (ALBERTAZZI JR; FANTIN, 2009).	70
Figura 17: Configuração holográfica de iluminação dupla (ALBERTAZZI JR; FANTIN, 2009).	71
Figura 18: Configuração básica do funcionamento da shearografia (STEINCHEN; YANG, 2003) (WILLEMANN, 2009).	74
Figura 19: Ilustração esquemática do Interferômetro de Michelson aplicado a Shearografia (inclinação de espelho).	77
Figura 20: Dispositivo utilizado para realizar o deslocamento de fase na shearografia (STEINCHEN; YANG, 2003)	79
Figura 21: Montagem da bancada de ensaios.	85
Figura 22: Lâmpada halógena utilizada como fonte de calor no carregamento térmico.....	85
Figura 23: Diagrama com os parâmetros a serem combinados.....	87
Figura 24: Seleção da região de interesse.	90
Figura 25: (a) Janela “Calcula Parâmetros” com a região de interesse visível. (b) Aspecto da imagem após a remoção do salto de fase bem-sucedida.	91
Figura 26: Remoção do salto de fase usando diferentes pontos iniciais.	92
Figura 27: Sinal da derivada de uma linha de dados.....	93
Figura 28: Mesmo sinal após a integração usando a equação (32).	93

Figura 29: Etapas da integração na direção do eixo Y.	94
Figura 30: Visualização gráfica da qualidade da integração, do ajuste exponencial e do ajuste de derivada	97
Figura 31: Visualização gráfica da qualidade da integração, do ajuste exponencial e do ajuste de derivada de uma imagem de má qualidade.	98
Figura 32: Gráfico de comportamento do parâmetro altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições I e o Método 02, na direção horizontal.	103
Figura 33: Gráfico de comportamento do parâmetro altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições II e o Método 02, na direção horizontal.	104
Figura 34: Gráfico de comportamento do parâmetro altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições III e o Método 02, na direção horizontal.	105
Figura 35: Gráfico de comportamento do parâmetro volume em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições II e o Método 02, na direção horizontal.	107
Figura 36: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da Área dos quatro defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal.	111
Figura 37: Gráfico do comportamento do parâmetro Volume em função da Área dos quatro defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal.	112
Figura 38: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito dos quatro defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal.	113
Figura 39: Gráfico do comportamento do parâmetro Volume em função da dimensão lateral do defeito dos quatro defeitos com profundidade	

diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal. 114

Figura 40: Mapas da diferença de fase do corpo de prova utilizado para verificação do procedimento desenvolvido com deslocamento lateral nas direções horizontal (a) e vertical (b). 116

Figura 41: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da Área dos quatro defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção vertical. 117

Figura 42: Gráfico do comportamento do parâmetro Volume em função da Área dos quatro defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção vertical. 118

Figura 43: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito dos quatro defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção vertical. 119

Figura 44: Gráfico do comportamento do parâmetro Volume em função da dimensão lateral do defeito dos quatro defeitos com profundidades diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção vertical. 120

Figura 45: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da Área dos três últimos defeitos com profundidades diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal. 122

Figura 46: Gráfico do comportamento do parâmetro Volume em função da Área dos três últimos defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal. 123

Figura 47: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito dos três últimos defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal. 124

Figura 48: Gráfico do comportamento do parâmetro Volume em função da dimensão lateral do defeito dos três últimos defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal.	125
Figura 49: Variação do caminho óptico para dois pontos diferentes da superfície (ANGELIS; MEO; <i>et al.</i> , 2011), (STEINCHEN; YANG, 2003).	145
Figura 50: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições I e o Método 01, na direção horizontal.	150
Figura 51: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições II e o Método 01, na direção horizontal.	150
Figura 52: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições III e o Método 01, na direção horizontal.	151
Figura 53: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições I e o Método 02, na direção horizontal.	151
Figura 54: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições III e o Método 02, na direção horizontal.	152
Figura 55: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições I e o Método 03, na direção horizontal.	152
Figura 56: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições II e o Método 03, na direção horizontal.	153
Figura 57: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições III e o Método 03, na direção horizontal.	153

Figura 58: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições I e o Método 01, na direção vertical.	154
Figura 59: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições II e o Método 01, na direção vertical.....	154
Figura 60: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições III e o Método 01, na direção vertical.	155
Figura 61: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições I e o Método 02, na direção vertical.	155
Figura 62: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições III e o Método 02, na direção vertical.	156
Figura 63: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições I e o Método 03, na direção vertical.	156
Figura 64: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições II e o Método 03, na direção vertical.....	157
Figura 65: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições III e o Método 03, na direção vertical.	157
Figura 66: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da Área dos três últimos defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados, na direção horizontal.	160
Figura 67: Gráfico do comportamento do parâmetro Volume em função da Área dos três últimos defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados, na direção horizontal.	160

Figura 68: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral dos três últimos defeitos com profundidades diferentes e com a entrada de dados, na direção horizontal. 161

Figura 69: Gráfico do comportamento do parâmetro Volume em função da dimensão lateral dos três últimos defeitos com profundidades diferentes e com a entrada de dados, na direção horizontal. 161

Figura 70: Desenho esquemático do corpo de prova (SCHÖNTAG, 2009). 164

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação de defeitos em materiais compósitos (BALASKÓ; SVÁB; <i>et al.</i> , 2005), (MELO, 2009).....	52
Tabela 2: Técnicas TC: vantagens e desvantagens.....	63
Tabela 3: Dimensões dos defeitos quadrados produzidos artificialmente (SCHÖNTAG, 2009).	84
Tabela 4: Profundidades que as falhas foram dispostas (SCHÖNTAG, 2009).	84
Tabela 5: Combinação dos parâmetros de ensaios.	88
Tabela 6: Imagens de qualidade boa.	89
Tabela 7: Parâmetros extraídos do software “ <i>QuantificaDefeito</i> ”	101
Tabela 8: Valores utilizados para análise dos dados.	101
Tabela 9: Tabela com possíveis profundidades (mm) de defeitos para realização de uma melhor análise.....	129
Tabela 10: Relação de defeitos visuais (ASTM, 1994).	139
Tabela 11: Tabela com as combinações do Bloco de Medições e os Métodos de Quantificação.....	149

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABMACO	Associação Brasileira de Materiais Compósitos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CP's	Corpos de Prova
DPSS	<i>Diode-Pumped Solid-State Laser</i>
END	Ensaio não-destrutivo
EPS	Poliestireno
LABMETRO	Laboratório de Metrologia e Automatização
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
POSMEC	Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica
PRFV	Plástico Reforçado com Fibra de Vidro
PV	Poliuretano
PZT	Atuador Piezoelétrico
SPSI	<i>Speckle Pattern Shearing Interferometry</i>
SHIC	Shearografia Aplicada à Inspeção de Compósitos
TC	Tomografia Computadorizada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	33
1.1	MOTIVAÇÃO.....	33
1.2	OBJETIVOS.....	35
1.2.1	Objetivo geral.....	35
1.2.2	Objetivos específicos.....	35
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	35
2	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	37
2.1	CONCEITO.....	37
2.2	CARACTERÍSTICAS.....	38
2.3	PRINCIPAIS TIPOS	39
2.4	APLICAÇÃO INDUSTRIAL	43
2.5	COMPÓSITOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS	47
2.5.1	Reparo de dutos com Materiais Compósitos	48
2.5.1.1	Sistemas Comerciais de Reparo de Dutos.....	49
2.6	DEFEITOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS	50
3	ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS APLICADOS À MATERIAIS COMPÓSITOS	55
3.1	TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA	56
3.2	ULTRASSOM.....	59
3.3	TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA	61
3.4	MÉTODOS ÓPTICOS PARA DETECÇÃO DE FALHAS.	63
3.4.1	Formação do <i>Speckle</i>	63
3.4.2	Interferência.....	66
3.4.3	Holografia Eletrônica	69
3.4.3.1	Medição de deslocamento	69
3.4.4	Shearografia.....	72
3.4.4.1	Configuração óptica para shearografia.....	73
3.4.4.2	Interferência de dois padrões <i>speckles</i>	74

3.4.4.3	Deslocamento de fase na shearografia.....	79
3.4.4.4	Tipos de carregamento utilizados na shearografia em ensaios não destrutivos.....	80
4	BANCADA DE ENSAIOS.....	83
4.1	ESPECIFICAÇÕES.....	83
4.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	83
4.3	SELEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	83
4.4	PARÂMETROS DE ENSAIO.....	84
4.5	QUANTIFICAÇÃO DOS DEFEITOS.....	89
4.5.1	Seleção da Região de Interesse.....	89
4.5.2	Remoção do Salto de Fase.....	91
4.5.3	Integração Direcional.....	92
4.5.4	Ajuste da Função Exponencial.....	95
4.5.5	Ajuste da exponencial através da Derivada.....	96
4.5.6	Visualização de Resultados.....	96
4.5.7	Parâmetros Calculados.....	99
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	101
5.1	QUANTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS.....	101
5.2	PROCEDIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DO DEFEITO.....	108
5.3	EXEMPLO DE QUANTIFICAÇÃO.....	110
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	127
6.1	CONCLUSÕES.....	127
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	129
	REFERÊNCIAS.....	131
	APÊNDICE A.....	139
	APÊNDICE B.....	145
	APÊNDICE C.....	149
	APÊNDICE D.....	159

ANEXO A..... 163

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

As indústrias do petróleo e derivados, e químicas em geral têm mostrado interesse crescente na aplicação de revestimentos anti-corrosivos construídos a base de materiais compósitos. No Brasil, esse aumento ocorreu devido ao crescimento contínuo da produção de petróleo e a maior utilização do gás natural na matriz energética nacional. Portanto, há uma necessidade de esforços tecnológicos para estender a vida útil dessas instalações.

Material compósito é a junção de dois ou mais materiais combinados em grande escala para formar um terceiro material com características distintas. Quando bem concebidos, apresentam qualidades melhores que os seus componentes e muitas vezes propriedades que nenhum dos componentes possui isoladamente.

Segundo a Associação Brasileira de Materiais Compósitos – ABMACO, entre julho e setembro de 2011, o setor brasileiro faturou R\$ 713 milhões, alta de 1,4% em relação ao trimestre anterior. Analisando o mesmo período do ano de 2010, o valor é 9,8% maior.

Resinas reforçadas com fibras de vidro ou carbono estão entre os materiais compósitos mais utilizados para revestir o interior de tanques e o exterior de tubulações em geral. Na indústria do petróleo e gás são usados desde as etapas de perfuração dos poços de petróleo até o transporte de seus derivados ao consumo final.

A principal vantagem de um material compósito é a sua grande resistência mecânica e à corrosão, e sua baixa massa quando comparada a sua estrutura de material convencional, como por exemplo, aço ou alumínio. Revestimentos de materiais compósitos evitam a exposição direta do aço do tanque ou da tubulação a agentes corrosivos, aumentando assim sua vida útil. Nos últimos anos o uso de materiais compósitos na indústria do petróleo tem se intensificado no Brasil e novas potenciais aplicações têm surgido cada vez mais. Sua aplicação, feita em campo muitas vezes em condições não ideais, algumas vezes introduz defeitos. Não é rara a incidência de defeitos como bolhas de ar, falta de adesão, quantidade insuficiente de resina, delaminações e inclusões.

Esses defeitos têm diversas causas, por exemplo, no momento da fabricação, manuseio, aplicação, transporte, manutenção ou da montagem do material em uma determinada estrutura. Alguns defeitos

são facilmente perceptíveis e logo reparados. Outras vezes os defeitos encontram-se internamente no material analisado e são invisíveis a olho nu. Defeitos comprometem as propriedades mecânicas da estrutura fazendo com que os riscos de acidentes aumentem. É importante dispor de métodos para inspecionar e identificar esse tais defeitos.

As técnicas de detecção de regiões defeituosas mais usadas atualmente para materiais compósitos são a inspeção visual e a técnica da percussão. Esta última consiste em identificar regiões defeituosas a partir do som de “algo oco” em resposta a uma pequena percussão da região inspecionada. E esses defeitos não são vistos a olho nu, necessitando de análises mais cuidadosas. Sendo assim, este trabalho se insere dentro do contexto em que se buscam formas não-destrutivas, mais confiáveis, repetitivas e menos dependentes das habilidades do inspetor para identificar regiões com falhas.

Podem ser citadas como técnicas de ensaio não-destrutivas amplamente ligadas à indústria a termografia, ultrassom, tomografia computadorizada, radiografia (raios x) e as técnicas ópticas, holografia eletrônica e a shearografia, são exemplos de técnicas de ensaios não destrutivos aplicáveis para análise de defeitos em materiais compósitos.

A técnica óptica denominada shearografia tem sido intensamente usada com sucesso para detectar defeitos em materiais compósitos (HUNG, 1999), (MOSER, 2008), (HABIB, 2005), (SANTOS; VAZ; MONTEIRO, 2004) nas indústrias aeroespaciais (YANG; HUNG, 2004) e naval (ANGELIS; MEO; *et al.*, 2011). Até o presente, pouco tem sido aplicado nas indústrias do petróleo, petroquímica e química, que usam materiais compósitos em revestimentos em dutos e em tanques de armazenamento, cilindros de armazenamento de gás veicular, reforços estruturais.

A shearografia é uma técnica óptica interferométrica capaz de medir campos de pequenas deformações ocorridas nas superfícies dos materiais. Ao contrário das demais técnicas interferométricas, a shearografia é robusta o suficiente para ser operada fora do ambiente laboratorial. Apresenta aspectos positivos como grande sensibilidade às deformações possibilitando a inspeção não destrutiva, sem contato e propicia considerável velocidade na inspeção.

A forma de carregamento a ser usada depende da estrutura interna a ser analisada e do tipo de defeito presente no material. Os carregamentos podem ser térmico, vácuo e mecânico (carregamento estático ou quase estático) e vibracional (carregamento dinâmico). O defeito é identificado através da resposta do material ao carregamento (STEINCHEN; YANG, 2003).

Os defeitos provocam descontinuidades no campo de deformações na superfície do material que são percebidas pela shearografia na forma de anomalias nos mapas de franjas de interferência. Entretanto, a correlação entre o padrão visual decorrente com o tipo e gravidade do defeito não é trivial. Requer muita experiência do inspetor. Este trabalho contribui para tornar a identificação do defeito mais segura e menos dependente das habilidades do operador. A redução de fatores de risco em dutos e tanques contribuirá para a segurança de pessoas e com a proteção do meio-ambiente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é elevar a confiabilidade da inspeção de defeitos em materiais compósitos com shearografia e torná-la menos dependente da experiência e habilidade do inspetor.

1.2.2 Objetivos específicos

Desenvolver e validar um procedimento usando shearografia com excitação térmica para quantificar parâmetros de defeitos presentes em revestimentos de materiais compósitos. A ênfase será dada na quantificação das dimensões e profundidade dos defeitos a partir da análise das imagens resultantes da excitação térmica aplicada à superfície de forma normalizada.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre materiais compósitos, abordando suas características, conceito, principais tipos e aplicações. Também serão apresentados os principais tipos de defeitos em materiais compósitos, classificação e gravidade.

Uma revisão em relação aos ensaios não-destrutivos aplicados a materiais compósitos é apresentada no capítulo 3. Especial ênfase é dada na técnica shearografia, bem como seus princípios, equipamentos e formas de carregamento.

No capítulo 4 é apresentada a bancada de ensaios, suas especificações, equipamentos, seleção dos corpos de prova, parâmetros de ensaios e quantificação dos defeitos.

As análises dos resultados obtidos serão discutidos no capítulo 5, validação do procedimento utilizado e aspectos importantes também serão observados.

E por fim, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões obtidas com base na discussão dos resultados, sendo também apresentadas recomendações para trabalhos futuros.

2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Neste capítulo são apresentados os resultados de um levantamento bibliográfico feito sobre materiais compósitos, principais tipos e revestimentos utilizados na indústria de Petróleo e Gás, e por fim os principais defeitos serão discutidos.

2.1 CONCEITO

Não há uma definição consensual na literatura sobre a definição de material compósito. De uma forma geral pode ser tratado como a combinação de dois ou mais materiais em um nível macroscópico e não homogêneo que, através de um processo de cura, forma-se um terceiro material com propriedades diferentes dos materiais originais quando utilizados em separado, e que possuam interface reconhecível entre eles (KAW, 2006), (CAMPBELL, 2004), (REDDY, 2004).

De uma forma geral qualquer material que consiste de dois ou mais materiais com propriedades diferentes pode ser chamado de material compósito. Entretanto, a maioria dos materiais compósitos usados na engenharia consiste de elemento de reforço envolvido por uma matriz, constituída de resina colante, com o objetivo de obter características específicas e propriedades desejadas. É um material multifásico feito artificialmente. As fases devem ser quimicamente diferentes e devem estar separadas por uma interface distinta.

Esses materiais são largamente utilizados porque atingem combinações de propriedades que não são encontradas em materiais convencionais das classes de materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos isoladamente. Portanto, a necessidade de se obter esses materiais vem principalmente da exigência de materiais com combinações incomuns devido às tecnologias modernas.

Buscam-se materiais estruturais que possuam baixas densidades, sejam fortes, rígidos e apresentem resistência à abrasão e ao impacto, e que ao mesmo tempo não sejam facilmente corroídos. Isso é uma combinação de características extraordinárias (CALLISTER, 2002).

Muitos dos materiais compósitos foram criados com o intuito de melhorar as características mecânicas, como rigidez, tenacidade e resistência nas condições ambientais e a altas temperaturas.

2.2 CARACTERÍSTICAS

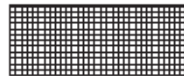
O material compósito é composto por uma matriz (fase contínua) e o reforço (fase dispersa ou descontínua), podendo englobar mais de um tipo de reforço e até mesmo mais de um tipo de matriz. O reforço ou fase dispersa são na sua maioria os fibrosos. Exemplos típicos de fibras são: vidro, aramida e carbono. A matriz pode ser polimérica, metálica ou cerâmica (CAMPBELL, 2004).

O principal papel das fibras é de transmitir resistência e rigidez, ou seja, propriedades mecânicas. As fibras podem ser contínuas e descontínuas. Na Figura 1 são mostrados os tipos de fibras.

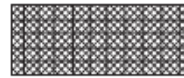
a) Fibras Contínuas Unidirecionais



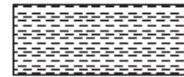
b) Fibras Contínuas Bidimensionais



c) Fibras Contínuas Multidimensionais



d) Fibras Descontínuas Unidirecionais



e) Fibras Descontínuas Aleatórias

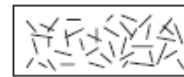


Figura 1: Tipos de fibras (MALLICK, 2007).

A matriz tem a função de manter as fibras unidas, atuar como um meio de transferência de carga entre elas e aumentar a tenacidade do compósito, relacionado a mecanismos de microdeformação ativados na interface (mecanismos de “*fiber debonding*” e “*fiber pull-out*”, descolamento e arrancamento da fibra) e protegê-las do ambiente externo (REDDY, 2004), (NETO, 2009). A fase contínua deve evitar que uma trinca de fratura frágil se propague de uma fibra para outra, que poderia resultar em falha catastrófica.

As forças adesivas da interface fibra/matriz, no caso de compósitos reforçados com fibra, devem ser fortes. Portanto a resistência da adesão é um importante fator na escolha da combinação de qual matriz será utilizada com determinada fibra e vice-versa.

Características típicas desses tipos de materiais são sua heterogeneidade e anisotropia (ortotropia em alguns casos) que dificultam as estimativas e previsões de comportamento mecânico (ALMEIDA, 2010).

Principais propriedades que podem ser melhoradas na formação de um material compósito são:

- a) Rigidez
- b) Resistência à corrosão
- c) Resistência ao desgaste
- d) Resistência à fadiga
- e) Resistência a altas temperaturas
- f) Peso
- g) Isolamento Térmico
- h) Condutividade Térmica
- i) Isolamento Acústico

Embora nem todas as propriedades possam ser melhoradas ao mesmo tempo, como o caso de isolamento térmico x condutividade térmica, o objetivo simplesmente é de se obter melhorias em apenas as características definidas em projeto. Por isso a sua utilização requer prática de projeto e processo adequado com base no entendimento de suas exclusivas características mecânicas, físicas e térmicas. As várias possibilidades de combinação dessas características têm ampliado o uso de compósitos em muitos campos da engenharia.

2.3 PRINCIPAIS TIPOS

De acordo com (JONES, 1999) os materiais compósitos industriais podem ser classificados como: fibrosos, particulados e laminados. E segundo (CALLISTER, 2002) existem ainda os materiais compósitos naturais como a madeira que é composta de fibras de celulose + lignina e o osso que é composto de proteína colagênica + substância mineral.

Na Figura 2 é mostrado um desenho esquemático dos compósitos fibrosos e particulados e a estrutura básica dos laminados pode ser vistas na Figura 3.

Os materiais compósitos fibrosos consistem na união de fibras longas em uma matriz, sendo utilizados como material de reforço. Inicialmente, observa-se que a resistência à tração unidirecional de uma fibra em particular é bem maior que a de sua matéria prima. Portanto, o

principal objetivo é o de alcançar alta rigidez e/ou resistência em relação ao seu peso.

A orientação e concentração das fibras têm uma influência significativa sobre as propriedades dos compósitos reforçados por fibra. Como podem ser vistos na Figura 2, há dois tipos de alinhamento:

- a) Alinhamento paralelo ao eixo longitudinal das fibras
 - a. Propriedades anisotrópicas, ou seja, material apresenta diferentes propriedades em diferentes direções, que também é características de materiais com fibras alinhadas aleatoriamente
 - b. Resistência e reforço máximo na direção do alinhamento (longitudinal) e inexistente na direção perpendicular (transversal)
- b) Alinhamento aleatório
 - a. Utilizado quando a direção das tensões são multidirecionais

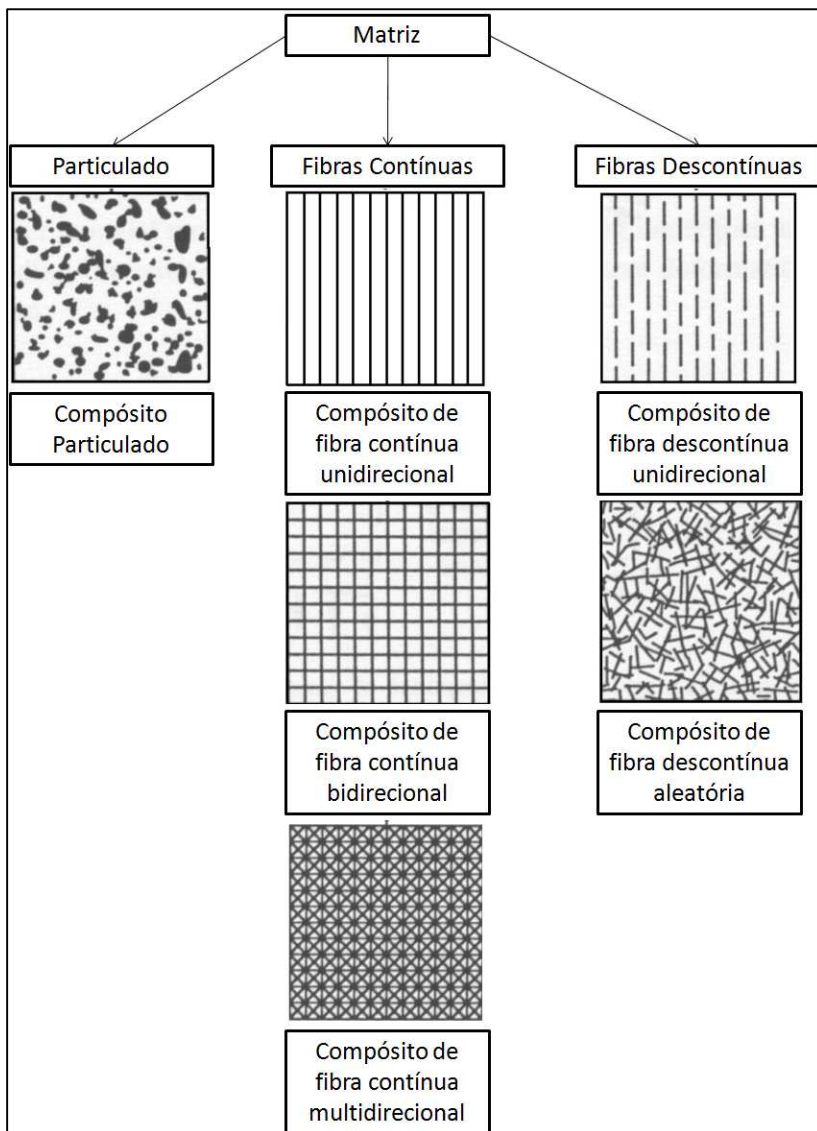


Figura 2: Classificação dos materiais compósitos (DANIEL; ISHAI, 1994).

Os compósitos particulados resultam da imersão de partículas de um ou mais materiais em uma matriz de composição. Materiais compósitos particulados, baseados em uma matriz de resina epóxi com incorporação de pó de granito ou pó de sílica, têm sido usados como

base de máquinas ferramentas e máquinas de medição por coordenadas. Estes compósitos vêm substituindo gradualmente o ferro fundido, sendo que suas maiores vantagens são o menor coeficiente de expansão térmica, o menor peso e as excelentes características e amortecimento de vibração.

Um compósito estrutural é composto normalmente tanto por materiais homogêneos como por materiais compósitos, cujas propriedades dependem não somente das propriedades dos materiais constituintes, mas também do projeto geométrico dos vários elementos estruturais. Os compósitos estruturais mais comuns são os compósitos laminados e os painéis em sanduíche.

Materiais laminados são finas lâminas sobrepostas e unidas uma às outras com resina segundo uma determinada orientação, como mostrado na Figura 3. A designação dos laminados é efetuada segundo a disposição das lâminas e a orientação da lâmina com relação ao eixo de referência. As lâminas reforçadas com fibras unidirecionais apresentam maior resistência e módulo de elasticidade na direção das fibras; já na direção transversal às fibras, acontece o oposto.

Além disso, os materiais compósitos laminados também podem possuir um recheio que normalmente é de baixa densidade e bastante espesso, em geral com características de aumentar a rigidez do produto final, sendo denominados de materiais compósitos sanduíche (CHIAVERINI, 1986). Esse recheio serve para duas funções (CALLISTER, 2002):

- a) Separar as faces e resistir a deformações perpendiculares ao plano da face
- b) Proporcionar certo grau de rigidez contra o cisalhamento ao longo dos planos que são perpendiculares às faces

São encontrados em uma ampla variedade de aplicações. Dentre elas estão telhados, pisos e paredes de prédios; e em aeronaves: nas asas, na fuselagem e nos revestimentos dos lemes.

De acordo com (CALLISTER, 2002), outro tipo de recheio popular é a estrutura em “colméia” (ou *honeycombs*), que consiste em finas folhas moldadas com o formato de células hexagonais que se intertravam, tendo seus eixos orientados perpendicularmente aos planos das faces.

Os laminados feitos de materiais compósitos reforçados com fibra também têm suas desvantagens. Devido à incompatibilidade das propriedades dos materiais entre as camadas é produzida uma tensão de cisalhamento entre as mesmas, especialmente nas bordas do laminado,

causando falhas chamadas de delaminações. Esses defeitos serão abordados posteriormente neste trabalho.

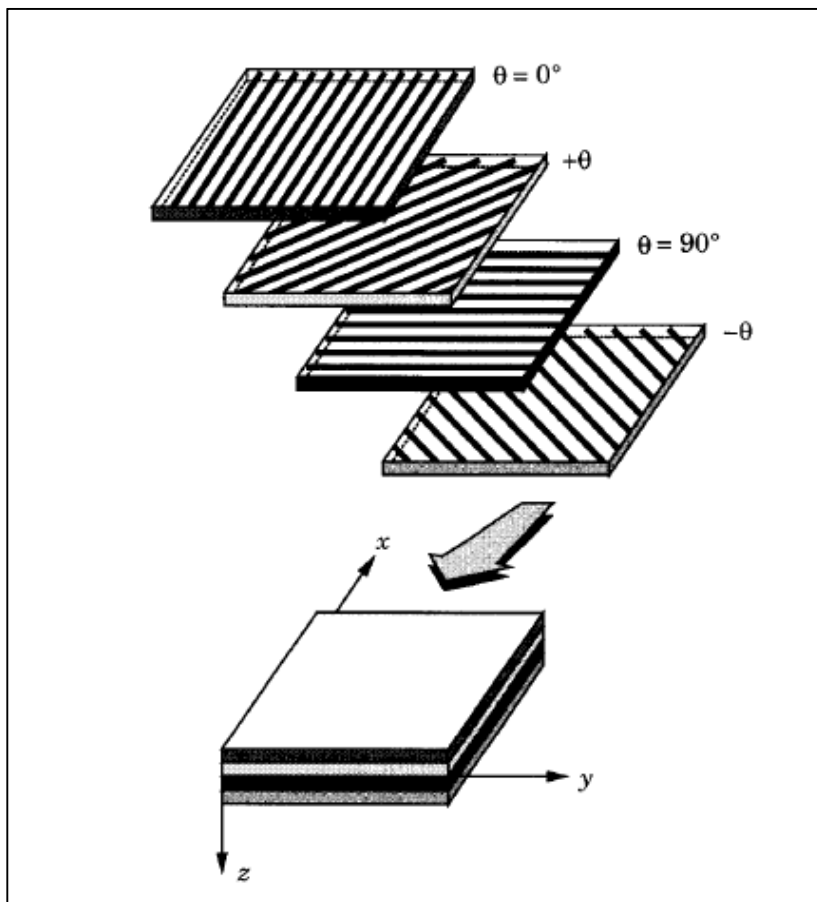


Figura 3: Estrutura básica de um laminado (REDDY, 2004).

2.4 APLICAÇÃO INDUSTRIAL

A utilização de materiais compósitos é extensa e está em constante expansão. As aplicações comerciais e industriais de compósitos poliméricos reforçados por fibra são tão variadas que é impossível enumerá-los. Um dos materiais compósitos mais amplamente utilizados é o de matriz polimérica reforçada com fibra de

vidro, pois apresenta a resistência da fibra de vidro associada à flexibilidade do polímero.

E dentre as resinas utilizadas como matrizes reforçadas com fibra de vidro são usadas: poliésteres, epóxi, vinil éster, fenólicas, acrílicas e algumas resinas termoplásticas, nylon, policarbonato, poliestireno, entre outras (ALBUQUERQUE, 2005). No entanto, as resinas termorrígidas são as mais utilizadas em aplicações estruturais. Dentre elas, as resinas poliéster, vinil éster e epóxi respondem por cerca de 90% dos sistemas poliméricos de resinas termorrígidas usados em compósitos estruturais.

Suas aplicações vão desde: o setor aeroespacial, setor automotivo, indústria naval, artigos esportivos, construção civil e indústria de petróleo e gás.

Compósitos reforçados por fibra são também usados em eletrônica, em placas de circuito impresso, indústria energética, em carcaças de transformadores e na indústria médica, como em placas para fixação de fraturas ósseas, implantes e próteses.

Em determinados setores como o aeroespacial e militar, o uso dos materiais já é bastante difundido devido à grande vantagem da diminuição de peso com a preservação da robustez da estrutura. Vários componentes dos setores mencionados são fabricados em compósito polimérico, como painéis sanduíche, fibra de vidro, fibra de carbono e fibra de aramida (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

A Figura 4 mostra partes de um Boeing 777 que se utilizam materiais compósitos, por exemplo, na cauda do avião onde tem duas pequenas asas, chamadas estabilizadores (o vertical com o leme, e o horizontal, com os profundos), que o piloto usa para controlar a direção do avião. Também são encontrados compósitos na fuselagem, *spoilers*, portas internas, etc.

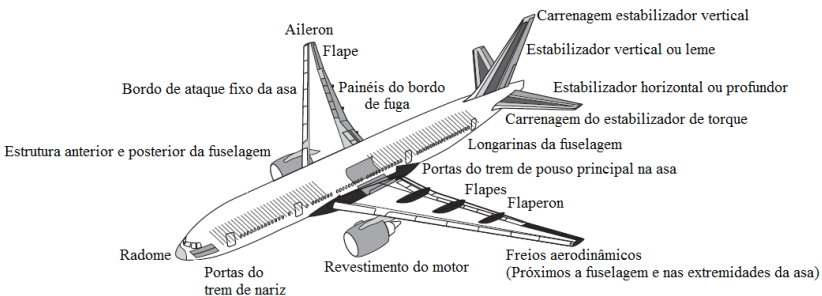


Figura 4: Boeing 777 com estruturas em compósito polimérico reforçado com fibra (MALLICK, 2007).

O uso de materiais compósitos na indústria automotiva também é bastante intensificado. São usados em componentes externos, como painéis, *capots* e portas. São elementos que requerem alta rigidez e tolerâncias apertadas. Uma das grandes vantagens, além da redução de volume é a facilidade de se confeccionar peças com superfícies complexas (MALLICK, 2007).

Hoje, o material compósito mais usado em carros de corrida de fórmula 1 em sua grande parte é o compósito de matriz epóxi reforçado por fibra de carbono, como mostrado na Figura 5, usado na caixa de engrenagens e na suspensão traseira.

Uma aplicação relevante desse tipo de compósito em carros de corrida de fórmula 1 é a célula de sobrevivência que protege o piloto de uma eventual colisão. O cone de nariz localizado na parte frontal da célula de sobrevivência também é feita de epóxi reforçado por fibra de carbono, essencial para a sobrevivência do piloto.



Figura 5: Compósito de matriz epóxi reforçado por fibra de carbono na suspensão e na caixa de engrenagens em carros de corrida de fórmula 1 (MALLICK, 2007).

Na indústria naval tem sido usado em diferentes tipos de barcos, como barcos a vela, barcos de pescaria, botes, botes salva-vidas e iates. A principal vantagem é a redução de peso, que se traduz numa velocidade e aceleração maior e numa economia de combustível, além da natural elevada resistência à corrosão.

Compósitos poliméricos reforçados por fibra são extensivamente usados em artigos esportivos como: raquetes de tênis, acessórios de atletismo como varas, tacos de beisebol, pás e remos, pranchas de surf, flechas e dardos, capacetes, aparelhos de ginástica, solado de calçados esportivos. As principais vantagens são redução de peso e flexibilidade no design (MALLICK, 2007).

Atualmente o quadro da bicicleta para corrida é feito na sua maior parte de material compósito de matriz epóxi reforçado por fibra de carbono. O objetivo principal para o uso de fibras de carbono é a redução do peso. Todavia, para reduzir o custo do material, as fibras de carbono são combinadas com fibras de vidro ou *kevlar 49*¹. Componentes auxiliares como: guidão, garfos, selim, entre outros também são constituídos de polímeros reforçados com fibra de carbono.

Outro exemplo de uso de materiais compósitos se encontra na construção civil em construção de pontes, passarelas e prédios, substituindo o aço por compósitos a base de resinas. A principal razão para seleção desses materiais compósitos à base de resina é a sua resistência à corrosão, que leva a uma maior vida útil e menores custos de manutenção e reparação. As pontes de concreto tendem a deteriorar depois de alguns anos por causa da corrosão de barras reforçadas por aços usados em construção civil. Outra vantagem para o uso de compósito polimérico reforçado por fibra em grandes estruturas de pontes é o seu peso leve, com isso é possível projetar ponte com extensões maiores.

Outra aplicação na construção civil são as casas feitas inteiramente de materiais compósitos, paredes formadas por painéis sanduiche de compósito (plástico reforçado com fibra de vidro – PRFV), poliestireno (EPS) com células fechadas e poliuretano (PV), acarretando em uma maior resistência ao fogo e ao impacto, melhorando também a sensação de conforto térmico e acústico dos moradores.

Outra área que também se beneficia das propriedades de resistência mecânica e menor peso é a indústria de petróleo e gás na construção de plataformas em alto mar e de equipamentos para a extração de petróleo. São bastante usados pela indústria de petróleo e gás na fabricação de tubulações: componentes e acessórios.

Uma aplicação mais recente desses materiais e que vem sendo bastante difundida é o reparo, como forma de manutenção da integridade de estruturas e componentes garantindo segurança e vida útil do sistema reparado. Esses compósitos serão estudados a seguir.

¹ *Kevlar 49* é o nome registrado pela Dupont para a fibra sintética de aramida.

2.5 COMPÓSITOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS

O uso de materiais compósitos na indústria de petróleo e gás tem se intensificado. São hoje utilizados na reabilitação de oleodutos, gasodutos, vasos de pressão, em adutoras, em plataformas e em equipamentos de extração de petróleo e na fabricação das tubulações industriais e saneamento. São também usados para a fabricação de componentes estruturais nas plataformas de petróleo como é o caso de *guard-rails* e pisos. No Brasil, esse aumento se deve ao aumento contínuo da produção de petróleo e a maior utilização do gás natural na matriz energética nacional. Tudo isso aponta para a necessidade de esforços tecnológicos para se tentar estender a vida útil destas instalações.

Os dutos são construídos de tubulações de aço carbono, com faixa de diâmetro comumente a partir de 150 até 1000 mm, que pode ter extensões de centenas ou milhares de quilômetros ininterruptos, para transportar petróleo e derivados. Estas tubulações são propensas a corrosão geralmente causada pela presença de água, causando perda de material nas tubulações (OKAMOTO JR; ADAMOWSKI; *et al.*, 1999). Dutos nos campos terrestres estão na sua maioria enterrados e, portanto, sujeitos aos componentes do solo e da umidade, um ambiente também propício para a corrosão. Sua manutenção é uma questão de grande preocupação para companhias de petróleo e gás.

A inspeção da corrosão em dutos metálicos é frequentemente realizada com *pigs instrumentados*² através da medição da espessura de suas paredes (BEPPLER, 2006). Quando detectada a corrosão pode ser contornada pela substituição de um trecho ou de todo o duto, ou ainda pela utilização de mantas poliméricas para revestimento externo do trecho corroído do duto. Ao contrário da primeira, esta última forma de reparo pode ser feita com a linha em operação.

O revestimento com mantas poliméricas é uma aplicação relativamente nova, utilizando-se de materiais compósitos para reparos em dutos de aço (dutos de perfuração, dutos de produção, dutos flexíveis, dutos de transporte, entre outros) que devem apresentar propriedades mecânicas suficientes para garantir a integridade do duto de aço durante a operação. O revestimento deve ser unido ao duto e ser

² Pig instrumentado é um sistema de inspeção de dutos dotado de sensores e outros dispositivos eletrônicos que permitem a adquirir informações sobre as variações de espessuras das paredes da tubulação.

livre de vazios, já que uma união imperfeita do revestimento pode causar defeitos.

2.5.1 Reparo de dutos com Materiais Compósitos

A utilização de materiais compósitos de matriz polimérica com reforço de fibras já vem sendo utilizado no Brasil como forma de reparo em dutos com defeitos, visando aumentar sua vida útil.

Esses defeitos são causados normalmente pela corrosão e/ou acidentes de campo, dessa forma é escolhido o método de reparo de acordo com o nível de insegurança que o defeito apresenta ao duto (FUJIYAMA; SOUSA; BASTIAN, 2003).

A tensão existente na parede do duto é função de seu diâmetro externo, da sua espessura e dos esforços envolvidos (tração, pressões interna e externa, torção e flexão). Se houver uma perda na espessura por corrosão haverá uma concentração local de tensões que poderá levar ao rompimento do duto se houver uma tensão maior que a tensão máxima que o material suporta.

Dessa forma, ao aumentar a espessura da parede do duto revestindo-o externamente, as tensões sobre as paredes do duto estarão se distribuindo, diminuindo localmente e, conseqüentemente, aumentando sua resistência.

O reparo de dutos com material compósito consiste em envolver externamente o trecho corroído do duto com a camada de material polimérico reforçado por fibras orientadas. Como o reparo é realizado em campo, normalmente se faz a laminação manual.

Após a preparação da superfície, que envolve limpeza física e química, coloca-se uma camada inicial de resina acima da região a ser reparada. Após, distribuir a manta de fibra aplica-se a resina novamente com o auxílio de rolos com cuidado de se retirar o ar entre as fibras e bolhas na resina. Repete-se o processo para o número de camadas desejadas. Depois, com aplicação de mantas térmicas, pode-se fazer um processo de pós-cura para melhorar as propriedades (NETO, 2009).

As fibras devem ficar na direção da tensão circunferencial, que é a maior tensão atuante no duto. Além disso, deve-se garantir que haja aderência perfeita da primeira manta à superfície externa do duto e das mantas entre si (MARCELINO; BASTIAN, 2003), (CASTELLARES, 2002).

Dentre as vantagens do uso de materiais compósitos em reparos de dutos de aço carbono estão:

- a) A boa resistência mecânica do reparo
- b) Facilidade de aplicação em campo
- c) Aplicação com o duto em operação ou parado
- d) Material do reparo de grande desempenho químico e mecânico garantindo alto desempenho e aumento da vida útil
- e) Diminuição dos custos de manutenção, sem a necessidade do uso do processo de soldagem e sem parada de produção
- f) Reparo durável, sem troca de duto, com eficiência e viabilidade econômica

2.5.1.1 Sistemas Comerciais de Reparo de Dutos

As empresas (RUST ENGENHARIA, 2011), (CLOCK SPRING®, 2011), (NRI®, 2008), (INTEG, 2006), (AMERON, 2011), fornecem materiais compósitos para revestimentos em dutos, com a função de reparo em dutos danificados.

O Grupo Rust & Resinar aparece como líder nacional no mercado de proteção contra corrosão ou *mossa*³. É um material compósito formado por sucessivas camadas de tecidos e mantas de fibra de vidro ou fibra de carbono impregnado com matriz polimérica epoxídrica, laminadas no local. A Figura 6 ilustra o Residuto® do Grupo Rust & Resinar aplicado em torno de um tubo.

³ Mossa é descrito como uma deformação permanente da seção circular do duto causada por agentes externos.



Figura 6: Residuto® - Luva de material compósito, indicado para reparo de dutos por corrosão ou moessa (RUST ENGENHARIA, 2011).

Segundo as empresas citadas acima existe um procedimento a ser seguido para a instalação do material compósito no duto, envolvendo as seguintes etapas:

- a) Limpeza e preparação da superfície, removendo o material oxidado e a sujeira que dificultam a adesão do revestimento
- b) Nivelamento da superfície, utilizando material epóxi ou equivalente, para que não haja tensões localizadas devido à irregularidade da superfície
- c) Aplicação de adesivo sobre a superfície
- d) Aplicação do revestimento de material compósito sobre a superfície com adesivo
- e) Cura do revestimento de material compósito

2.6 DEFEITOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS

Nessa seção são descritos os principais tipos de defeitos comumente encontrados em materiais compósitos. Normalmente estão relacionados com descontinuidades no material que podem levar a falhas nos componentes ou revestimentos. Os defeitos em compósitos podem ter origem nas etapas de fabricação ou montagem em campo. Podem também acontecer danos e degradação do material em serviço geralmente reduzindo a vida útil dos compósitos laminados.

A geometria da estrutura, localização, orientação e dimensões do defeito, natureza do campo de tensões aplicado e ambiente em que opera o componente, são, de uma maneira geral, os fatores que mais influenciam a integridade do material. Os defeitos geralmente são divididos em duas categorias:

- a) Externos – ranhuras nas bordas e impactos
- b) Internos – delaminações

Os defeitos externos são visualmente observados, tais como dimensões incorretas, acabamento grosseiro e deformações. No APÊNDICE A estão descrições dos defeitos visualmente observados e seus níveis de aceitação de acordo com (ASTM, 1994).

Nas publicações em geral (BUARQUE; D'ALMEIDA, 2006), (BALASKÓ; SVÁB; *et al.*, 2005), (CAWLEY; ADAMS, 1989), (SHIJU; JIAN; *et al.*, 2002), (AMBU; AYMERICH; *et al.*, 2005), (PANDURANGAN; BUCKNER, 2007), (MARANON; RUIZ; *et al.*, 2007), (RAMAN; BAYLES, 2005), (MELO, 2009) os defeitos internos de maior preocupação em compósitos são delaminações, inclusões, porosidade, vazios, excesso ou falta de resina, quebra e desalinhamentos das fibras e descolamentos, descritos na Tabela 1. Dentre os tipos de defeitos, o mais comum e importante é a delaminação (AMBU; AYMERICH; *et al.*, 2005), (MARANON; RUIZ; *et al.*, 2007), pois reduz significativamente a resistência à compressão e a rigidez do laminado, principalmente porque a região delaminada perde rigidez à flexão.

Tabela 1: Classificação de defeitos em materiais compósitos (BALASKÓ; SVÁB; *et al.*, 2005), (MELO, 2009).

Defeito	Descrição
Delaminação	Falta de aderência entre as camadas do compósito na forma de laminado, e causadas pela preparação imprópria da superfície ou por contaminação de materiais externos.
Inclusões	São materiais estranhos introduzidos entre os laminados.
Fissuração na matriz	Presença de fissuras na matriz do compósito.
Vazios e porosidade	São ar preso e bolhas de gás no interior do material. São causados por substâncias voláteis, fluxo impróprio de resina e distribuição de pressão inadequada. O vazio é agrupado na resina, enquanto que a porosidade são bolsões dentro do material sólido.
Área rica em resina	São localizadas da seguinte forma: preenchimento excessivo de resina ou falta de fibra. Esse defeito é causado por compactação inadequada ou por vazamento.
Área com deficiência em resina	São áreas observadas com insuficiência de resina, como em locais secos, ou locais com baixo brilho ou ainda onde as fibras estão expostas. Esse defeito também é causado por compactação inadequada ou por vazamento.
Fibras desalinhadas, rugosas e onduladas	É uma distorção das camadas do laminado resultando em alterações em relação à orientação desejada, ou resultando em fibras onduladas e rugosas. Este defeito é devido ao armazenamento inadequado.

Fibras quebradas	Ocorrência de fratura da fibra. São fibras descontínuas ou descoladas devido ao manuseio inapropriado ou armazenamento indevido.
Descolamento	Quando ocorre um descolamento da interface fibra-matriz. A falta de colagem é devido à contaminação da superfície, pressão excessiva ou desajuste.
Microflambagem	Deformação que ocorre nas fibras do material quando o mesmo está submetido a esforços de compressão, causando pequenos descolamentos.

Outro tipo de defeito encontrado nas referências é o “*kissing bonds*” possui pouco material aderente, mesmo que as partes do compósito estejam em contato. Não há uma separação visível entre as lâminas. Ele representa uma forma de descolamento com as faces encostadas de alguma forma (MARTY; DESAÏ; ANDERSSON).

Com base no que foi exposto nessa seção, é de grande importância a inspeção desses defeitos de uma forma preventiva, para que não ocorra acidentes em grandes proporções sem aviso prévio. Considerando que esses defeitos agredem as propriedades físicas do material compósito, vamos apresentar no próximo capítulo algumas formas não destrutivas de detecção desses defeitos.

3 ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS APLICADOS À MATERIAIS COMPÓSITOS

Os ensaios não-destrutivos (END) são técnicas de inspeção de materiais e equipamentos sem causar-lhes nenhum dano. Portanto são ferramentas de controle de qualidade de matérias-primas, produtos e equipamentos. Contribuem para sua integridade através da garantia da qualidade, redução de custos e aumento de confiabilidade das inspeções, segurança das pessoas e instalações, preservando também o meio ambiente e as obras de arte. É também fator de competitividade entre as empresas que os utilizam.

Os END's são executados nas etapas de fabricação, construção, montagem, manutenção e nas inspeções periódicas. Incluem métodos capazes de proporcionar informações a respeito dos defeitos ou descontinuidades de um determinado produto, das características tecnológicas de um material, ou ainda, da monitoração da degradação em serviço de componentes, equipamentos e estruturas, sem a alteração dos materiais. Para cada tipo de estrutura é utilizado um END adequado (NETO, 2009).

Somente uma parte dos ensaios não destrutivos, que foram desenvolvidos para materiais metálicos, principalmente aço, podem ser aplicados a materiais compósitos. Devem ser tomados cuidados especiais, já que esta classe de materiais apresenta maior dificuldade para revelar defeitos que materiais homogêneos como o aço ou outro metal. Existe geração de anomalias nas interfaces fibra/matriz que podem induzir a detecção de falsos positivos (NETO, 2009).

Os principais ensaios utilizados no caso de compósitos de matriz polimérica com reforço fibroso são o visual, vibratórios e a radiografia, ditos convencionais. São também usadas a emissão acústica, termografia ativa, tomografia computadorizada e métodos ópticos (NETO, 2009).

Quando aplicados em materiais compósitos, os ensaios não destrutivos usuais apresentam limitações devido às particularidades destes materiais (alta heterogeneidade; irregularidades nas superfícies; anisotropia e baixa condutividade térmica) e precisam ser ajustados (MELO, 2009).

Suas principais aplicações são nos setores aeronáutico, aeroespacial, naval, petróleo/petroquímico, químico, siderúrgico, eletromecânico, papel e celulose, entre outros.

Esse trabalho está voltado para a detecção de defeitos em materiais compósitos. A seguir serão apresentadas as principais técnicas utilizadas no diagnóstico desses defeitos.

3.1 TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A termografia infravermelha é uma técnica de ensaios não-destrutivos que se baseia no mapeamento térmico (originando desta forma os termogramas) de um componente para a localização de suas regiões danificadas ou defeituosas. Isto é possível porque a condutividade térmica, ou, inversamente, a resistividade térmica dos materiais, depende fortemente do seu grau de integridade (ALMEIDA, 2010), (TARPANI; ALMEIDA; *et al.*, 2009). Esta técnica permite obter registros das imagens térmicas através da detecção da radiação infravermelha emitida pelos objetos. É uma técnica de sensoramento remoto, que capturando essas imagens infravermelhas da superfície do corpo, é possível fazer as medições de temperaturas. Como END esta técnica monitora a temperatura da superfície do elemento inspecionado para identificar a região onde o fluxo de calor é modificado por anomalias subsuperficiais. Esse fluxo de calor é medido pela intensidade de energia radiante infravermelha e ele é reduzido quando há uma falha, causando assim uma variação localizada da temperatura local (NETO, 2009).

Um termograma exhibe as diferentes temperaturas locais no componente na forma de gradiente de coloração (escala policromática) ou de tonalidades de cinza (escala monocromática) (Figura 7), sendo o imageamento térmico realizado, em geral, por termovisores ou câmeras termográficas (TARPANI; ALMEIDA; *et al.*, 2009).

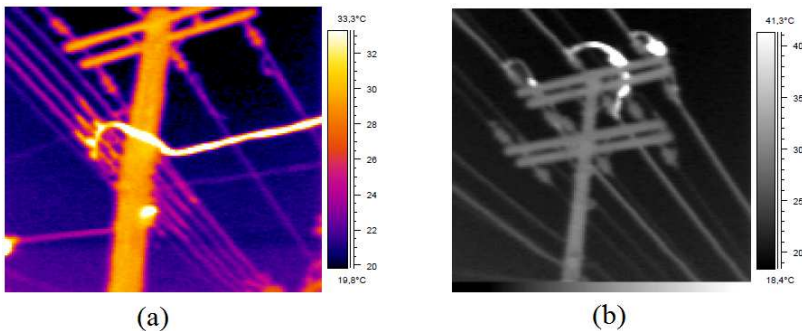


Figura 7: (a) Termograma em escala policromática; (b) Termograma em escala monocromática (VELOSO, 2008).

A termografia infravermelha é uma das técnicas de inspeção chamada pelos técnicos de manutenção preditiva. É uma forma de

monitoramento capaz de fornecer dados suficientes para uma análise de tendências.

Seu primeiro uso em grande escala e com grande aceitação foi na área de compósitos para a indústria aeroespacial, geralmente substituindo ultrassom ou a radiografia, tanto na fabricação como em serviço; na detecção de delaminações, porosidade, água aprisionada e descolamentos (NETO, 2009).

A termografia infravermelha pode ser dividida em dois tipos:

- a) Termografia passiva
- b) Termografia ativa

A termografia passiva é empregada nos casos em que o componente avaliado não requer qualquer estímulo térmico extra para sua inspeção, pois o mesmo naturalmente já emite radiação infravermelha em quantidade suficiente para que seja possível a detecção de eventuais defeitos ou danos nele contidos. Este efeito é explorado, por exemplo, na inspeção do processo e soldagem de polímeros e de seus compósitos.

Na termografia ativa o objeto de estudo é energeticamente estimulado (por exemplo, através de fontes térmicas simples como lâmpadas, flashes e ar quente, ou então, por meios mais elaborados, tais como ondas ultrassônicas, correntes parasitas, microondas e laser), de forma que um fluxo interno de calor seja gerado na parte inspecionada. A eventual presença de defeitos e/ou danos superficiais ou subsuperficiais causa uma perturbação deste fluxo, levando a um contraste térmico na superfície do componente, que é detectado por um termovisor ou uma câmera termográfica, acusando, desta forma, a existência da descontinuidade (TARPANI; ALMEIDA; *et al.*, 2009).

Durante a inspeção na forma ativa, a fonte de calor pode estar no mesmo lado ocupado pela câmera termográfica, relativamente ao objeto estudado, configurando-se assim o modo de reflexão ou, então, a fonte térmica pode estar do lado oposto ao da câmera, ficando o objeto de interesse entre a fonte e a câmera, estabelecendo-se desta feita o modo de transmissão (TARPANI; ALMEIDA; *et al.*, 2009). Os dois modos são ilustrados na Figura 8.

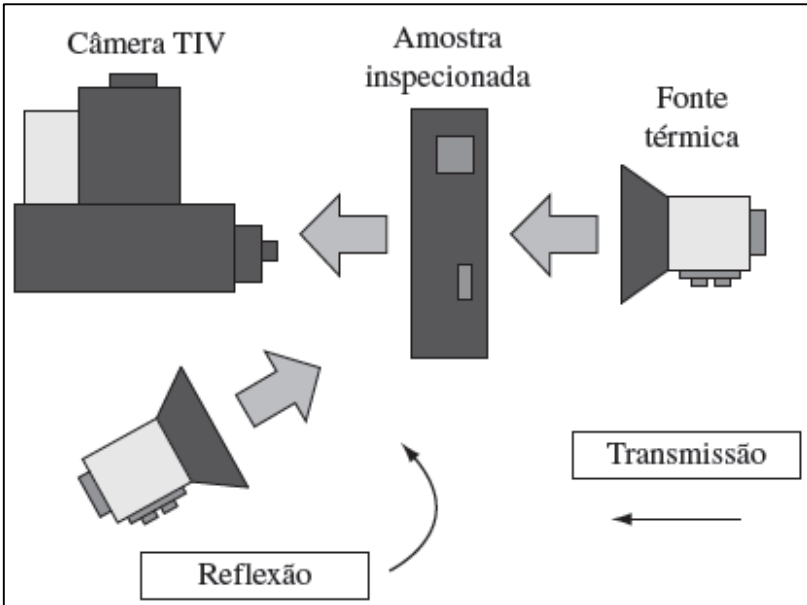


Figura 8: Modo esquemático de inspeção termográfica na forma ativa (TARPANI; ALMEIDA; *et al.*, 2009).

Para aplicações em tubulações de compósitos de matriz de resina epóxi com reforço de fibra de vidro, a termografia ativa pulsada é muito utilizada, devido à facilidade de aplicação (necessidade apenas de fonte de calor e câmera termográfica), possibilidade de inspeção de grande área em tempos não muito longos e sem necessidade de preparação da superfície. É sensível a certos tipos de defeitos, com dimensões e profundidades limitadas (NETO, 2009). A interpretação das imagens é subjetiva, e o processamento destas, para melhoria da detecção e dimensionamento das discontinuidades, ainda está em desenvolvimento (NETO, 2009).

Porém, como todo ensaio não destrutivo, a termografia tem suas vantagens e limitações, listadas abaixo (NETO, 2009):

- a) Vantagens
 - a. Teste rápido e sem contato (sem necessidade de acoplamentos)
 - b. Segurança (não há perigo de radiação nociva à saúde)
 - c. Interpretação e processamento relativamente simples de serem executadas

Imagens podem ser processadas para a extração de maiores informações, tornando a tarefa mais complexa.

- b) Desvantagens
 - a. Dificuldade de obtenção de estímulo térmico rápido, intenso e uniforme sobre uma superfície grande
 - b. Efeito de perdas térmicas (conectivas e radiativas) induzindo contrastes falsos, afetando a confiabilidade da interpretação
 - c. Custo do equipamento
 - d. Capacidade de detecção apenas de descontinuidades que resultam em mudanças das propriedades térmicas (por exemplo, trincas e descolamentos são detectados somente se induzem alterações de resistência térmica na interface)

3.2 ULTRASSOM

A detecção ultrassônica de falhas é um ensaio não-destrutivo muito utilizado para detectar e caracterizar defeitos internos em materiais como: metais, plásticos e compósitos. Dentre as várias técnicas de ensaios não-destrutivos, o ultrassom permite a inspeção de uma grande variedade de materiais, sejam eles líquidos, sólidos, opacos, entre outros, com custo relativamente baixo e sem o emprego de radiações ionizantes (GUALBERTO; KITANO; ADAMOWSKI, 2010).

Nesse método, altas frequências ultrassônicas são induzidas nos materiais e refletidas em trincas, porosidades e outros tipos de descontinuidades internas no material, produzindo diferentes ecos (SANTOS; CIOFFI; VOORWALD, 2009).

No caso particular de inspeção de materiais compósitos por ultrassom, deve-se levar em conta características de múltiplas camadas na composição do material, anisotropia, elevada atenuação e existência de dispersão (GUALBERTO; KITANO; ADAMOWSKI, 2010). Esses fatores dificultam a análise dos sinais para a detecção de defeitos ou caracterização do material.

Tanto a atenuação quanto a dispersão dependem da frequência de operação. A atenuação é maior à medida que se aumenta a frequência, tornando mais difícil a detecção de defeitos distantes do transdutor (SANTOS; CIOFFI; VOORWALD, 2009).

Por outro lado, o uso de frequências mais baixas, apesar da menor atenuação, diminui a resolução na detecção de defeitos menores. A

dispersão causa uma distorção no sinal devido às diferentes velocidades de propagação com a frequência, dificultando a interpretação dos sinais de eco (SANTOS; CIOFFI; VOORWALD, 2009).

Para análise dos sinais ultrassônicos em materiais compósitos, as delaminações são caracterizadas por um pico anterior ao sinal do eco de fundo, em virtude da reflexão sobre a superfície de um defeito, uma vez que interfere na visualização do eco de fundo. A Figura 9 mostra um exemplo de visualização de sinal ultrassônico em material compósito sem defeito e com a existência de delaminação (SANTOS; FARIAS; *et al.*, 2010).

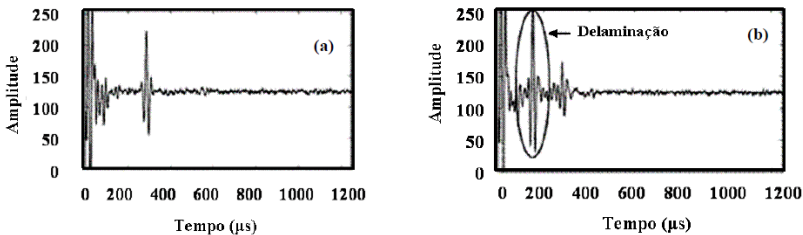


Figura 9: Sinais ultrassônicos característicos a inspeção em materiais compósitos: (a) sem defeito; (b) com delaminação (SANTOS; FARIAS; *et al.*, 2010).

Assim como uma onda sonora reflete ao incidir num anteparo qualquer, a onda ultrassônica ao percorrer um meio elástico, refletirá da mesma forma, esse efeito acontece também numa descontinuidade ou falha interna a este meio considerado. Através de aparelhos especiais, são detectadas as reflexões provenientes do interior da peça examinada, localizando e interpretando as descontinuidades (ANDREUCCI, 2002).

Um fator importante para a inspeção é a diferença de impedância acústica dos componentes, que determina a intensidade de energia refletida e transmitida para o meio em questão (SANTOS; FARIAS; *et al.*, 2010). O exame ultrassônico, assim como todo exame não destrutivo, visa diminuir o grau de incerteza na utilização desses materiais. Abaixo suas vantagens e desvantagens (ANDREUCCI, 2002).

a) Vantagens

- a. Para interpretação das indicações, dispensa processos intermediários, agilizando a inspeção
- b. Não requer planos especiais de segurança ou quaisquer acessórios para sua aplicação

- c. A localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas são fatores intrínsecos ao exame ultrassônico
- b) Desvantagens
 - a. Requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor
 - b. O registro do teste não é fácil obtenção
 - c. Faixas de espessuras muito finas constituem uma dificuldade para aplicações do método
 - d. O método realiza medições pontuais, dificultando assim a inspeção em áreas grandes por que a inspeção fica lenta

3.3 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

A tomografia computadorizada (TC) foi desenvolvida originalmente para produzir imagens de seções transversais de partes do corpo humano, mas ultimamente sua aplicação na área de END's tem se expandido (OLIVEIRA; PAIZANI; *et al.*, 2008), (MENDES, 2010).

Tem por finalidade reconstruir grandezas físicas do interior do material por meio de dados obtidos de múltiplas projeções do material analisado, obtidas de ângulos distintos (GODOI, 2010).

A utilização desta técnica é adequada para análises onde o interesse é a visualização dos aspectos internos de materiais e componentes de maneira rápida e não destrutiva. Por isso, a extensão de sua aplicação tem sido realizada por inúmeros trabalhos nas mais diversas áreas (MASCHIO, 1997).

É um método de diagnóstico e determinação do volume interno do material em análise, sem a necessidade de qualquer contato com o seu interior e com a vantagem de promover registros gráficos das imagens em 2D e 3D (MENDES, 2010), (GODOI, 2010).

A radiação-X usada em tomografia possui energia elevada e comprimento de onda sensivelmente menor que as ondas eletromagnéticas vistas como luz visível. Possui então maior penetração, sendo capaz de atravessar materiais pouco densos. A radiação pode ser originada de um gerador de raios-X ou de uma fonte radioativa.

A TC de raios-X é muito conveniente para ensaios não destrutivos, particularmente de materiais compósitos devido a sua baixa massa específica que favorece a obtenção de imagens de boa qualidade e ótima resolução e praticamente isenta de artefatos (anomalias na

imagens inerentes ao processo de reconstrução) que são comuns em imagens tomográficas de metais de alta densidade, os quais dificultam a sua interpretação (MASCHIO, 1997). Portanto a visualização interna dessas estruturas possibilita analisar a presença de defeitos que alteram suas propriedades físicas e mecânicas (MENDES, 2010).

Existem várias configurações possíveis, no entanto todas elas tem um princípio básico de funcionamento, usa-se uma fonte de raio-X para irradiar o objeto em diferentes ângulos de inclinação, em uma posição angular de ângulos igualmente espaçados, e um detector que coleta a imagem de raio-X em 2D de cada ângulo, (Figura 10). Todas as imagens em 2D são matematicamente consideradas e processadas em um algoritmo especializados para se obter a imagem em 3D do objeto (PACHECO; GOYAL, 2010).

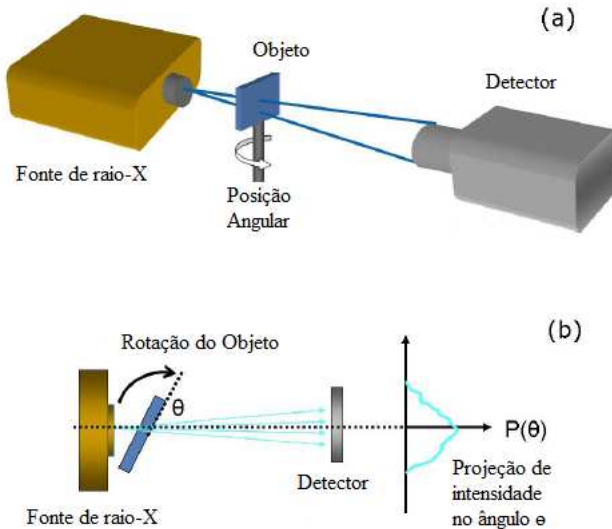


Figura 10: (a) Esquema básico da TC de raios-X, consiste de uma fonte de raio-X, posição angular e um detector. (b) As imagens em 2D coletadas das projeções de intensidade de cada ângulo são sobrepostas e matematicamente processadas para gerar a imagem em 3D (PACHECO; GOYAL, 2010).

Alguns tipos de TC para análise de materiais compósitos segundo (RANDOLF, FUCHS e UHLMANN, 2008) são: Robot CT, inline. Micro/Nano TC e helicoidal.

Tabela 2: Técnicas TC: vantagens e desvantagens

Técnica TC	Vantagens	Desvantagens
Robot	Mede estruturas volumosas	Cara e de difícil transporte, não mede estruturas heterogêneas
Inline	Medições com alta velocidade	Cara e de difícil transporte, não mede estruturas heterogêneas
Micro/Nano	Permite medições microscópicas	Cara e de difícil transporte
Helicoidal	Mede geometrias complexas	Cara e de difícil transporte, não mede estruturas heterogêneas

3.4 MÉTODOS ÓPTICOS PARA DETECÇÃO DE FALHAS

O método mais básico e antigo para avaliação de materiais é o exame visual. Consiste simplesmente em olhar para uma parte do objeto e ver se as imperfeições são visíveis. É simples, mas muito dependente das habilidades e experiências do inspetor. A utilização de sistemas de vídeos controlados por computador para reconhecer automaticamente e avaliar características de um componente tem sido desenvolvidas e vem se tornando ferramentas valiosas para realização destas inspeções.

Outras técnicas ópticas mais elaboradas podem ser usadas com sucesso para avaliação de falhas. Dentre elas, serão abordadas nesse trabalho basicamente duas delas aplicáveis à detecção de falhas em materiais compósitos: Holografia Eletrônica e a Shearografia. Essa última será abordada em mais detalhes. Ambas utilizam o efeito *speckle*, que será discutido no próximo item.

3.4.1 Formação do *Speckle*

Quando uma superfície rugosa é iluminada pela luz de um laser ela apresenta um aspecto granular. Estes grãos, mais ou menos brilhantes, são denominados de *speckle*. O *speckle* é, ao mesmo tempo, uma fonte de ruído, que degrada a qualidade da imagem, e também um portador de informações que torna viável a medição de deslocamentos e de deformações (STEINCHEN; YANG, 2003).

Para se obter um padrão de *speckle* bem definido é necessário iluminar uma superfície rugosa com um laser cujo comprimento de onda (λ) seja menor que a rugosidade da superfície. O laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) é uma fonte de luz que emite radiação eletromagnética, monocromática (possui frequência e comprimento de onda bem definidos), elevada coerência (possuem relações de fase bem definida), direcional (propaga-se como um feixe) e além de, na maioria das vezes, produz luz naturalmente colimada (propaga-se como feixes paralelos) (HEGHT, 2002).

O *speckle* resulta da interferência construtiva e destrutiva da luz coerente do laser refletida aleatoriamente por uma superfície rugosa (Figura 13). Há duas categorias de *speckle* (STEINCHEN; YANG, 2003):

- a) *Speckle* Objetivo que existe no espaço vizinho à superfície iluminada, independentemente da presença de qualquer sistema óptico (Figura 11)
- b) *Speckle* Subjetivo que forma-se e é observado através de um sistema óptico (Figura 12). Neste caso, o tamanho do “speckle” depende da abertura da íris do sistema óptico

Um observador que olha para a superfície do objeto percebe o efeito do *speckle* subjetivo por que o olho humano é um sistema óptico que possui íris similar e lente objetiva (STEINCHEN; YANG, 2003).

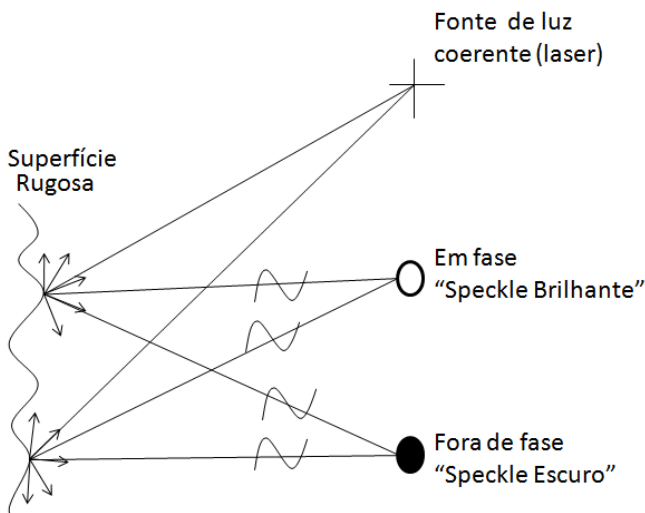


Figura 11: Formação do *speckle* objetivo (STEINCHEN; YANG, 2003).

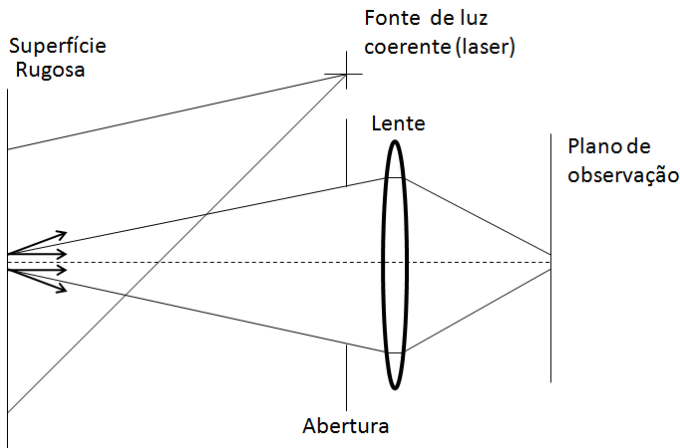


Figura 12: Formação do *speckle* subjetivo (STEINCHEN; YANG, 2003).

Ao contrário do que inicialmente possa imaginar-se, o tamanho dos grãos do *speckle* subjetivo não depende da rugosidade do objeto, mais sim da abertura da íris da lente objetiva utilizada para a captura da imagem e do comprimento de onda do laser (STEINCHEN; YANG, 2003). Naturalmente o *speckle* é um ruído “branco” com amplo espectro de frequências. Através da variação da abertura da íris varia-se a frequência espacial de corte, o que modifica diretamente o tamanho dos grãos observados.

A luz que forma cada *speckle* é coerente, de maneira que padrões de interferência estáveis podem ser observados. Cada *speckle* possui intensidade luminosa mensurável e também uma fase bem definida, que são geralmente diferentes dos *speckles* vizinhos (SUTÉRIO, 1998). Quando as ondas luminosas refletidas aleatoriamente por uma região da superfície rugosa interferem entre si e resultam em interferências predominantemente destrutivas, forma-se um *speckle* escuro, conforme (Figura 11). No conjunto, considerando todas as combinações dispostas aleatoriamente, forma-se o padrão característico *speckle* (Figura 13).

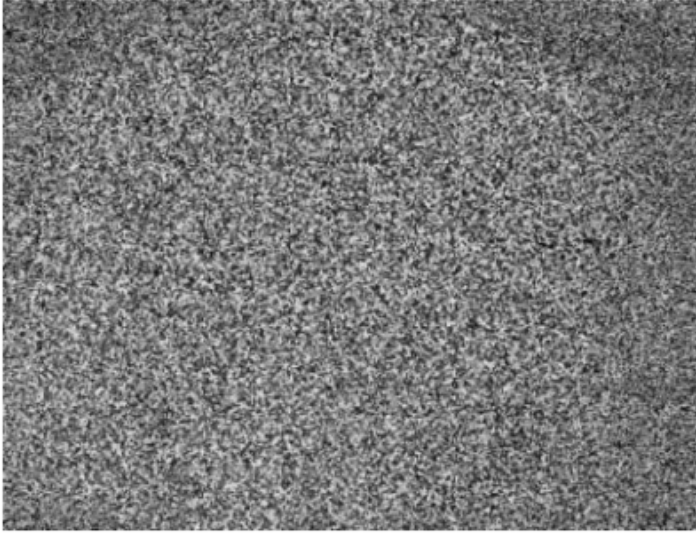


Figura 13: Padrão de *speckle* típico (STEINCHEN; YANG, 2003).

3.4.2 Interferência

A superposição de duas ou mais ondas de luz produz o efeito físico conhecido como interferência óptica. O efeito de interferência só é estável e visível se as ondas de luz são coerentes, o que significa que elas estão correlacionadas de tal forma que as diferenças de fase relativa entre as ondas são estáveis. Isso é possível de ser alcançado somente se as ondas de luz em que interferem vêm da mesma fonte de luz e as diferenças de caminho da luz não são maiores do que o comprimento de coerência da fonte de luz (ALBERTAZZI JR; VIOTTI, 2010).

Os fenômenos de interferência podem ser criados através de sistemas ópticos denominados interferômetros que usam a interferência para medir determinadas grandezas. Um dos mais comumente usados é o interferômetro de Michelson (Figura 14).

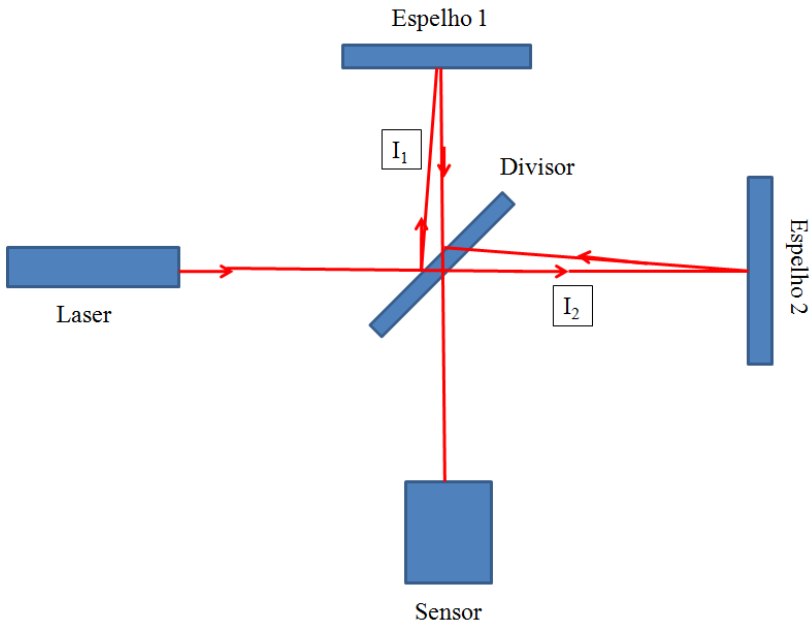


Figura 14: Ilustração de um Interferômetro de Michelson (STEINCHEN; YANG, 2003).

O resultado da interferência é uma soma vetorial de cada onda luminosa envolvida. A intensidade da onda resultante da interferência entre as duas ondas 1 e 2 é dada pela equação (1), (GASVIK, 2002).

$$I_{(x,y)} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos(\Delta\phi_{(x,y)}) \quad (1)$$

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \text{ é a diferença de fase} \quad (2)$$

$I_{(x,y)}$ é a intensidade resultante da interferência

I_1 é a intensidade do feixe de luz 1

I_2 é a intensidade do feixe de luz 2

$2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos(\Delta\phi_{(x,y)})$ é denominado de termo de interferência.

Desta maneira, a intensidade da onda luminosa resultante (I), depende das intensidades de cada onda (I_1 e I_2) e da diferença de fase entre elas ($\Delta\phi$).

Em muitas aplicações da metrologia óptica há interesse em medir a variação de fase entre duas ondas. Entretanto, os sensores existentes não permitem a medição direta da fase. Ela é medida indiretamente através da intensidade luminosa. A relação entre a variação da intensidade luminosa e a fase se dá segundo a equação (1) quando se mantém uma das ondas luminosas fixas e varia-se a fase da outra. Essa diferença de fase decorre da variação do caminho óptico percorrido pela onda. Com isso pode-se, por exemplo, medir deslocamentos através da variação de intensidade da onda luminosa resultante. Esse princípio é a base da interferometria.

Embora a diferença de fase possa variar infinitamente, o efeito visual sobre a figura de interferência é o mesmo para ângulos côngruos. Assim, em alguns casos é comum restringir a análise aos limites de $(\pi$ e $-\pi)$.

Durante a análise de interferência, se a diferença de fase for de 180° (π radianos) ou qualquer ângulo côngruo de 180° tem-se que, (GASVIK, 2002):

$$\Delta\phi = (2.n+1). \pi, \quad \text{para qualquer n inteiro}$$

Em que $\cos\Delta\phi_{(x,y)} = -1$ é a intensidade mínima.

Nesse caso as duas ondas não estão em fase, o que significa que elas interferem destrutivamente e nessas regiões se formam as franjas de interferência escuras.

Se a diferença de fase for 0 ou qualquer ângulo côngruo tem-se que:

$$\Delta\phi = 2.n. \pi \quad \text{para qualquer n inteiro}$$

Sendo que $\cos\Delta\phi_{(x,y)} = 1$ é a intensidade máxima.

As duas ondas estão em fase, o que significa que elas interferem construtivamente nessas regiões e se formam as franjas de interferência claras. A Figura 15 mostra algumas franjas de interferência. E como tido anteriormente, as franjas claras representam regiões de interferência construtiva e as faixas escuras representam as regiões de interferência destrutiva.

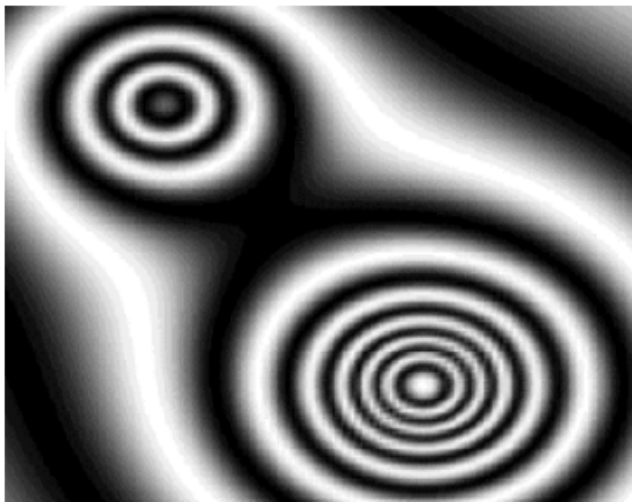


Figura 15: Franjas de interferência fonte primária (FANTIN, 2009).

3.4.3 Holografia Eletrônica

3.4.3.1 Medição de deslocamento

Existem dois tipos básicos de configurações que são usados para medição de deslocamento com a holografia eletrônica: iluminação simples (Figura 16) e iluminação dupla (Figura 17).

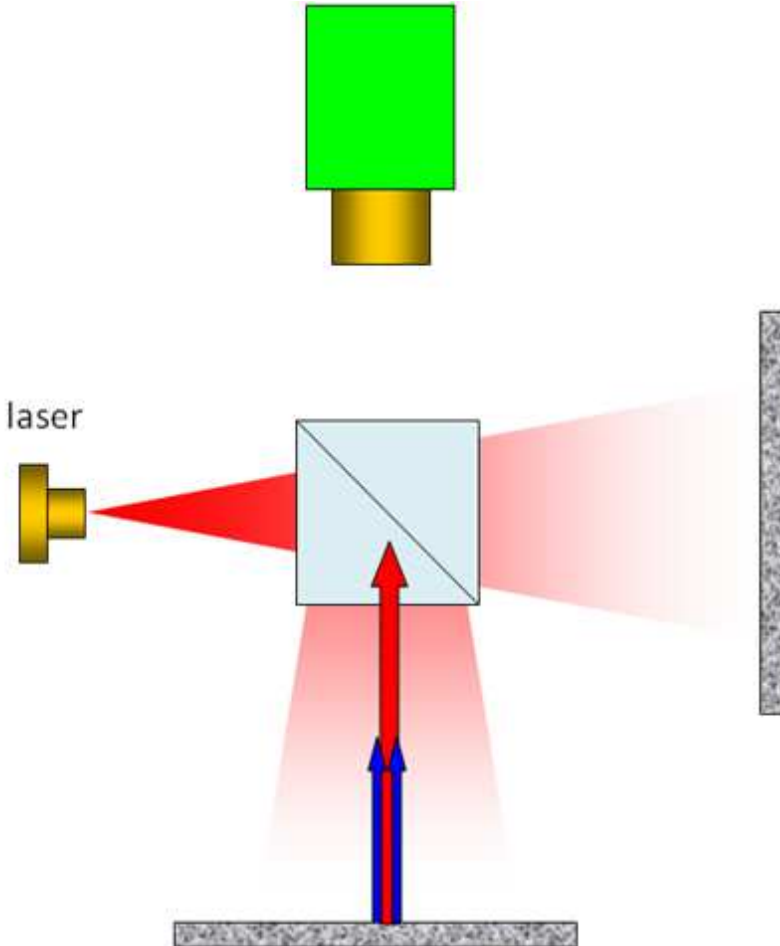


Figura 16: Configuração holográfica de iluminação simples (ALBERTAZZI JR; FANTIN, 2009).

A configuração holográfica de iluminação simples pode ser disposta de forma semelhante ao interferômetro de Michelson. Um espelho parcial é utilizado para dividir em duas partes a luz do laser, uma delas conduzida para a superfície a medir e outra para a superfície de referência que permanece fixa. As duas superfícies iluminadas geram as imagens dos padrões de *speckle* e são combinadas pelo espelho parcial e interferem no sensor da câmera (STEINCHEN; YANG, 2003). O padrão de *speckle* resultante da interferência se modifica à medida

que a superfície se desloca. Esta propriedade é a base para a medição de deslocamentos. Essa montagem é apropriada para a medição de deslocamentos normais, ou quase normais, à superfície iluminada.

O vetor p é denominado de vetor sensibilidade. Resulta da soma dos dois vetores unitários n_1 e n_2 , ambos fixados no ponto P sobre a superfície a ser medida. Esse vetor representa a direção do deslocamento na qual a configuração é sensível, isto é, apenas a componente do deslocamento na direção deste vetor dá origem às franjas. Esta configuração resulta predominantemente em sensibilidade “fora do plano” (SUTÉRIO, 1998).

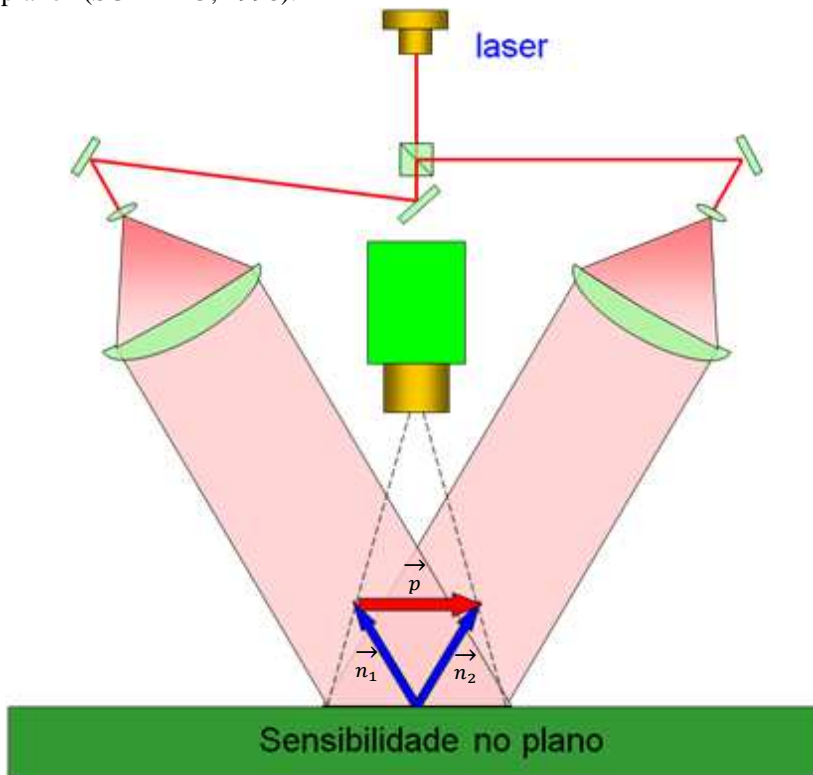


Figura 17: Configuração holográfica de iluminação dupla (ALBERTAZZI JR; FANTIN, 2009).

Na configuração holográfica de iluminação dupla representada na Figura 17, pode-se observar que o objeto é iluminado por dois feixes de luz coerente originários do mesmo laser. Na Figura 17, os dois feixes formam um mesmo ângulo ϕ com a normal à superfície do objeto. Neste caso

particular, o vetor sensibilidade é formado pela diferença entre os dois vetores unitários que apontam do ponto considerado sobre a superfície para cada uma das fontes de iluminação. Com isso é possível a medição de deslocamentos paralelos ao plano. O padrão de *speckle* é obtido de cada um dos feixes de luz que incide sobre a superfície do objeto. Um terceiro padrão é formado através da interferência entre os outros dois padrões de *speckle*. Esse terceiro padrão é visualizado pela câmera, e é diferente dos demais e se modifica à medida que a superfície se desloca. Esta propriedade é a base para a medição de deslocamentos (WILLEMANN, 2002).

Os padrões de *speckle* sofrem uma diferença devido à alteração do caminho óptico por causa da movimentação ou deformação do objeto. Com isso ocorrem alterações na intensidade luminosa captada pelo CCD. Esta configuração é mais apropriada para medir campos de deslocamentos “no plano”, isto é, tangentes à superfície iluminada.

A medição do campo de deslocamento na superfície livre de defeitos em resposta a um carregamento uniforme é geralmente suave e homogênea. Quando defeitos estão presentes, o campo de deformações deixa de ser homogêneo. Com a medição e análise do campo de deslocamentos é possível detectar a presença das falhas através das franjas geradas pela holografia eletrônica (WILLEMANN, 2002). A presença de defeitos é denunciada pelo aparecimento de anomalias nos mapas de franjas, isso decorre da presença de descontinuidades no campo de deslocamento.

Devido a sua altíssima sensibilidade o uso da holografia eletrônica fora do ambiente de laboratório é muito difícil, pois qualquer variação mínima na posição do objeto ou vibrações pode inviabilizar o processo de medição. Por ser uma técnica que mede campos de micro deslocamentos existem várias aplicações como: medição de tensões residuais, análise de vibração, medição de campos de tensões em objetos carregados, dentre outras.

3.4.4 Shearografia

É uma técnica óptica de medição internacionalmente conhecida como SPSI (*Speckle Pattern Shearing Interferometry*), mais comumente chamada de “*Shearography*”, derivado da palavra “*shear*” que significa “cisalhamento” em inglês. Em português o grupo de pesquisa do LABMETRO adotou o termo aporuguesado Shearografia.

A shearografia mede campos de pequenas deformações na superfície do objeto inspecionado. É uma técnica com certa similaridade com a holografia eletrônica por efetuar a medição a partir da interferência entre *speckles*. A shearografia usa uma configuração diferente com a qual mede a primeira derivada no campo de deslocamento na direção do deslocamento lateral ao qual essa imagem é submetida (horizontal, vertical, diagonal ou radial) (STEINCHEN; YANG, 2003).

Quando um objeto é submetido a um carregamento, podem surgir deformações e consequentemente o padrão de *speckle* é ligeiramente alterado (ANGELIS; MEO; *et al.*, 2011). Da mesma forma que a holografia eletrônica, a shearografia se baseia na diferença de dois padrões de *speckle*, recolhidos um antes e outro após a aplicação do carregamento que dá origem à deformação do material.

3.4.4.1 Configuração óptica para shearografia

O arranjo esquemático da Figura 18 representa uma forma de medir com shearografia. O objeto a ser analisado é iluminado pela luz expandida de um laser. A luz do laser é refletida difusamente a partir da superfície do objeto e a imagem da superfície do objeto é projetada e capturada pelo sensor de uma câmera conectada a um computador. Na Figura 18, o elemento óptico que gera o deslocamento lateral é um pequeno prisma em forma de cunha de ângulo (γ), que age apenas na metade superior do sistema óptico. Os raios que atravessam este prisma são angularmente desviados e formam no plano da imagem uma segunda imagem da superfície do objeto deslocada lateralmente para baixo. O ângulo do prisma determina a magnitude do deslocamento lateral.

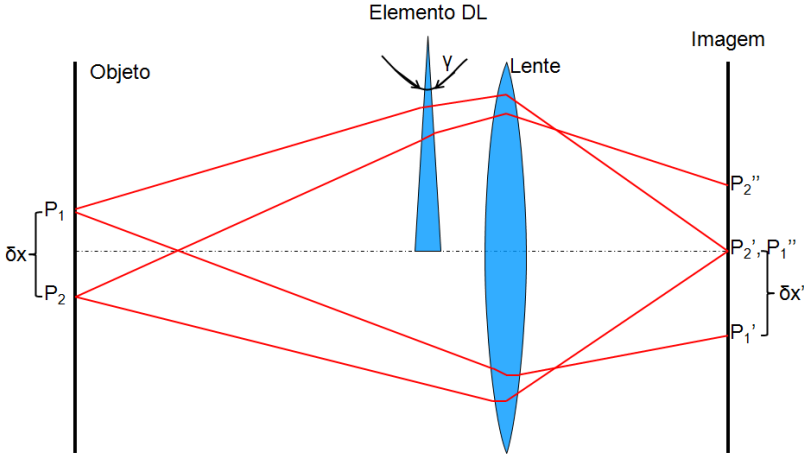


Figura 18: Configuração básica do funcionamento da shearografia (STEINCHEN; YANG, 2003).

3.4.4.2 Interferência de dois padrões *speckles*

Dados dois pontos, P_1 e P_2 , do objeto a ser analisado serão geradas imagens duplas de cada um deles produzindo dois pares de pontos correspondentes, um para cada imagem. Se eles estiverem afastados de uma distância apropriada δx suas imagens serão superpostas no plano da imagem. A intensidade da luz resultante depende da diferença de fase entre os pontos P_1 e P_2 , mostrado anteriormente na equação (2) (STEINCHEN; YANG, 2003). Na equação (3) é descrita a diferença de fase entre os raios que formam o ponto comum $P_2'(P_1'')$.

$$\phi(P_2') = \phi(P_1) - \phi(P_2) = \phi(x + \delta x, y) - \phi(x, y) \quad (3)$$

A equação (3) mostra que a fase da onda resultante depende da diferença entre as fases de dois pontos separados por uma diferença δx , mostrado na Figura 18. Através dessa equação é possível verificar que a shearografia é sensível apenas ao deslocamento relativo entre os dois pontos e não do deslocamento absoluto de cada um deles.

Na imagem não haverá nenhuma alteração no padrão de interferência caso os dois pontos sofram o mesmo deslocamento, pois a mudança de fase também será a mesma, e a diferença nula. Esta particularidade da shearografia é de grande importância, mostra a sua insensibilidade a movimentos de corpo rígido do objeto a ser analisado,

propiciando sua utilização em ambientes não isolados contra vibrações. Na prática essa propriedade implica em tolerância às condições mais moderadas de isolamento a perturbações externas para realização das medições, sendo a shearografia mais indicada à aplicação em campo do que a holografia eletrônica.

A intensidade resultante em um ponto da imagem que recebe luz de dois pontos da superfície medida é descrita pela equação (1). Esta mesma equação pode ser reescrita a seguir por (STEINCHEN; YANG, 2003):

$$I = 2a^2[1 + \gamma \cos \phi] \quad (4)$$

Em que:

a é a amplitude da luz que aqui se presume ser igual para os dois pontos vizinhos

ϕ é a diferença de fase entre os dois feixes que interferem

γ é a modulação do termo de interferência

Quando o objeto é carregado, ocorre uma mudança no caminho óptico que é devido à deformação na superfície do objeto, descrita no APÊNDICE B. Esta mudança no caminho óptico produz uma mudança na diferença de fase relativa entre os dois pontos de interferência. Assim, a intensidade resultante do padrão *speckle* é levemente alterada, é representada matematicamente na equação (5) (STEINCHEN; YANG, 2003):

$$I' = 2a^2[1 + \gamma \cos(\phi + \Delta)] \quad (5)$$

I' é a intensidade resultante depois da deformação

Δ é a variação da fase relativa devido ao deslocamento relativo de $P(x,y)$ a $P(x+\delta x,y)$

Quando a diferença (I_{total}) entre as imagens do estado não-deformado do objeto (estado de referência) e do estado após a aplicação do carregamento (estado deformado) é realizada, surgirá um padrão de franjas referente à deformação do objeto cuja intensidade em cada ponto é dada pela equação (6).

$$I_{total} = |I - I'| = \left| 4I_0 \left[\text{sen} \left(\phi + \frac{\Delta \phi}{2} \right) \text{sen} \frac{\Delta \phi}{2} \right] \right| \quad (6)$$

Temos que:

I_0 é a intensidade média

$$a^2 = I_0.$$

Como não há valores de intensidades negativos, essa diferença é mostrada em termos de módulo. As franjas correspondentes à deformação do objeto são visualizadas através da diferença entre as imagens, porém como I_0 e ϕ são valores desconhecidos, não se pode recuperar o valor do deslocamento de fase Δ .

Porém com a técnica de *deslocamento de fase* que será vista na seção 3.4.4.3 é possível obter o valor do deslocamento.

O que foi exposto acima é apropriado para deslocamentos muito menores que os grãos de *speckle* da imagem. Caso contrário, a qualidade da imagem das franjas degrada e passa-se a ver a diferença de fase entre os pontos do objeto, que é chamado de decorrelação, que, segundo a própria natureza do *speckle*, é completamente aleatório.

O arranjo óptico visto na Figura 19 é o mais usado na shearografia e apresenta, uma configuração parecida ao do interferômetro de Michelson como já visto na Figura 14.

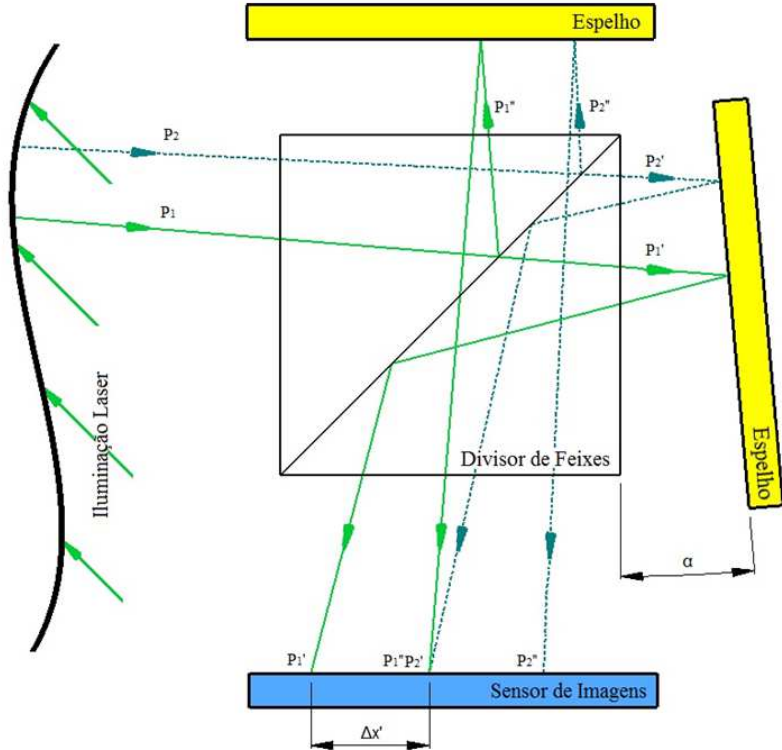


Figura 19: Ilustração esquemática do Interferômetro de Michelson aplicado a Shearografia (inclinação de espelho).

O arranjo é composto por dois espelhos dispostos perpendicularmente entre si e um divisor de feixes, uma fonte de luz coerente (laser) que irá iluminar o objeto a ser analisado, uma câmera que na Figura 19 está representado pelo sensor de imagens, digitalizando assim o padrão de *speckle*.

A luz laser refletida pela superfície do objeto é dividida em duas componentes por um divisor de feixe. Um segmento vai direto para o espelho da direita e o outro vai para o espelho superior, representado na Figura 19. Os feixes de laser refletidos nos espelhos se recombinam e surgem a partir do divisor de feixes. Quando aplicada uma inclinação de um ângulo pequeno no espelho da direita, há uma mudança na direção de propagação nos raios que formarão a imagem e esta se forma lateralmente deslocada. A direção do deslocamento depende se o

espelho foi girado em torno do eixo x ou y. Desda forma na imagem dupla resultante há uma interferência(STEINCHEN; YANG, 2003).

As vantagens de se ter um dispositivo de deslocamento lateral como o da Figura 19 é que a quantidade e a direção do deslocamento pode ser facilmente alterada. O deslocamento lateral pode ser realizado tanto no eixo x, quanto no eixo y sendo controlado pelo eixo de rotação do espelho inclinado. Além disso, o dispositivo de deslocamento lateral pode ser facilmente usado para executar a técnica de deslocamento de fase que será visto a seguir.

Quando a direção da iluminação é normal à superfície do objeto, o ângulo de iluminação θ torna-se zero. Neste caso, $\sin(\theta) = 0$ e $\cos(\theta) = 1$, (STEINCHEN; YANG, 2003), (TOH; SHANG; *et al.*, 1991) com isso as equações (34) e (35) presentes no APÊNCIDE B são reescritas:

Para um deslocamento lateral na direção x.

$$\Delta\phi_x = \frac{4\pi\delta_x}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (7)$$

Para um deslocamento lateral na direção y.

$$\Delta\phi_y = \frac{4\pi\delta_y}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial y} \quad (8)$$

3.4.4.3 Deslocamento de fase na shearografia

Nos diferentes estados de carregamento é possível determinar o valor das fases de cada pixel da imagem da superfície do objeto através de uma técnica de medição chamada de deslocamento de fase (*phase shifting*).

Para calcular os ângulos de fase do padrão de speckles é usado um determinado dispositivo auxiliar que aplique deslocamentos de fase relativos conhecidos. No caso, utiliza-se um espelho plano que é deslocado de maneira controlada na sua direção normal por meio de um atuador piezoelétrico (PZT). Com este deslocamento é realizada a variação do caminho óptico e a correspondente variação de fase constante em toda a imagem, como visto na Figura 20. Na sequência é mostrado como é possível conseguir informações quantitativas e visuais de melhor qualidade com a aplicação dessa técnica de deslocamento de fase.

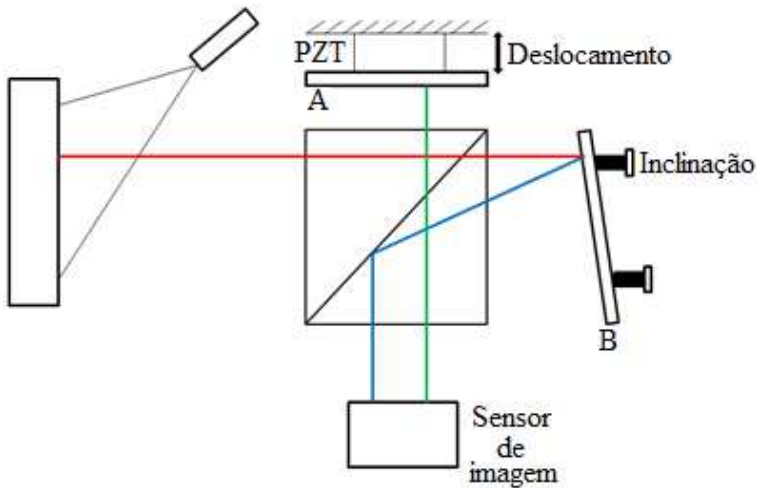


Figura 20: Dispositivo utilizado para realizar o deslocamento de fase na shearografia (STEINCHEN; YANG, 2003)

Quando o espelho A é deslocado de uma quantidade δL , o comprimento do caminho óptico é alterado para $2\delta L$. A alteração de fase é calculada por:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2\delta L \quad (9)$$

Para se determinar o valor da fase várias formulações podem ser usadas. Neste trabalho foi utilizada a formulação do método dos cinco passos desenvolvido por Hariharan (HARIHARAN; OREB; EIJU, 1987). É uma formulação robusta e de fácil implementação (STEINCHEN; YANG, 2003). São adquiridas cinco imagens defasadas em fase entre si de 90° , conforme mostrado nas equações abaixo.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= 2I_0[1 + \gamma \cos(\phi - 180^\circ)] \\
 I_2 &= 2I_0[1 + \gamma \cos(\phi - 90^\circ)] \\
 I_3 &= 2I_0[1 + \gamma \cos(\phi)] \\
 I_4 &= 2I_0[1 + \gamma \cos(\phi + 90^\circ)] \\
 I_5 &= 2I_0[1 + \gamma \cos(\phi + 180^\circ)]
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Sendo:

I_0 é o valor da intensidade média

γ é o termo de interferência

ϕ é o valor da fase a ser determinado

Após a resolução do sistema de equações, o valor da fase de cada ponto da imagem é determinado por:

$$\phi = \arctan \frac{2(I_2 - I_4)}{-I_1 + 2I_3 - I_5}
 \tag{11}$$

Um conjunto de valores de fase é obtido formando um mapa de fase. Esse mapa de fase apresenta composição aleatória, sem um padrão visual que o identifique. O mapa de diferença de fases é a imagem resultante da subtração entre os mapas da fase do estado normal e carregado. Apresenta um padrão semelhante ao das franjas de interferência.

3.4.4.4 Tipos de carregamento utilizados na shearografia em ensaios não destrutivos

Nessa seção serão discutidos os diferentes tipos de carregamento para detecção de defeitos em materiais compósitos realizados com a shearografia. Nos materiais compósitos como visto na seção 2.6 frequentemente aparecem falhas na estrutura. Várias técnicas ópticas podem ser usadas para detectar essas falhas nesses materiais.

Para evidenciar os defeitos é necessário aplicar um carregamento no material de maneira que a presença de defeitos aflore na superfície com uma alteração localizada no campo de deformações. Em resposta ao carregamento aplicado é possível inferir através das franjas de interferência a presença de falhas internas em estruturas de materiais compósitos.

O tipo de material, estrutura interna do material e o tipo de defeito a ser inspecionado devem ser considerados para a escolha do melhor tipo de carregamento e da intensidade do carregamento a ser aplicado. Existem duas principais categorias de carregamento:

- a) Carregamentos estáticos:
 - a. Carregamentos mecânicos (flexão, tração, compressão, torção, pressão interna)
 - b. Carregamento térmico
 - c. Carregamento por vácuo
- b) Carregamentos dinâmicos:
 - a. Carregamento por vibrações harmônicas
 - b. Carregamentos térmicos dinâmicos

A seguir serão apresentados os principais carregamentos utilizados na inspeção com shearografia.

O primeiro deles é o carregamento térmico, que é de aplicação simples (ALBERTAZZI JR; MENICONI; *et al.*, 2006). No carregamento térmico o material é normalmente submetido à radiação de uma fonte de calor uniforme através de uma lâmpada de potência, por exemplo, 150 W, ou por convecção pela ação direta de fluxo de ar quente semelhante ao de um secador de cabelo. Geralmente são necessários poucos segundos de aquecimento. O material compósito tende a expandir por dilatação térmica (ALBERTAZZI JR; MENICONI, *et al.*, 2006).

O campo de deformações provocado pela temperatura é relativamente uniforme na ausência de defeitos. Porém, quando estão presentes bolhas de ar, delaminações ou descolamentos entre as camadas do material, ou entre o material e o metal de base ao qual o revestimento de material compósito deve estar aderido, fazendo com que os campos de deformação apresentem descontinuidades, dando origem a anomalias nas franjas de interferência (STEINCHEN; YANG, 2003).

De acordo com o material, o decaimento da temperatura pode ser muito rápido, o que exige uma elevada resposta dinâmica do sistema de shearografia, caso contrário isso dificultaria a detecção de uma falha, devido ao baixo contraste das franjas. Tempos diferentes de aquecimento são exigidos para diferentes tipos de materiais.

Carregamentos mecânicos podem ser aplicados de diversas formas: tração, compressão, flexão, torção e pressão interna são as principais. Uma aplicação comumente usada para inspecionar revestimentos de materiais compósitos aplicados sobre metais é a força de tração no material de base que provoca um campo de deformações na superfície externa do material compósito. Outra forma de carregamento mecânico é a variação da pressão interna em dutos e vasos de pressão, que normalmente revela defeitos em função da concentração de tensões.

No carregamento por vácuo, para que deformações sejam vistas no material compósito forma-se uma campânula com parede transparente e aplica-se localmente vácuo onde se supõe a presença do defeito. Com isso, se o material tiver um defeito ele tende a expandir e um campo de deformações localizado se propaga até a superfície (ALBERTAZZI JR; MENICONI; *et al.*, 2006).

O carregamento vibracional pode ser realizado através da excitação acústica que pode ser feita por contato através de atuadores piezoelétricos ou sem contato usando alto falantes (ALBERTAZZI JR; MENICONI; *et al.*, 2006).

O comportamento da região do defeito é parecido com o de uma membrana, que quando excitada na sua frequência de ressonância vibra de forma mais intensa. Para encontrar a frequência de ressonância é necessário fazer uma varredura em toda a superfície medida com diferentes frequências, observando assim em tempo real o eventual aparecimento de não homogeneidades no campo de deformações medido pela shearografia (ALBERTAZZI JR; MENICONI; *et al.*, 2006).

É possível obter franjas associadas à amplitude de vibração através de um adequado processamento de imagens, denunciando visualmente a existência de defeitos.

4 BANCADA DE ENSAIOS

4.1 ESPECIFICAÇÕES

A bancada de ensaios utilizada foi o sistema de shearografia já existente no Laboratório de Metrologia e Automatização da Universidade Federal de Santa Catarina (LABMETRO) que faz parte do projeto Shearografia Aplicada à Inspeção de Compósitos – SHIC. A forma de carregamento aplicada nos ensaios foi excitação térmica.

O sistema é composto por um cabeçote de medição contendo o interferômetro, um sistema de iluminação com luz laser e o software de processamento de imagens.

4.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

O cabeçote de medição é composto basicamente por uma câmera de vídeo digital, dois espelhos planos e um divisor de feixes, com uma configuração similar ao da Figura 19.

O deslocamento de fase é realizado por um espelho que está acoplado a um elemento piezoelétrico comandado via software.

A unidade de laser utilizada na iluminação da superfície é composta por um laser de estado sólido tipo DPSS (*Diode-Pumped Solid-State Laser*), fabricante Laser Quantum, modelo Torus com um comprimento de onda de aproximadamente 532 nm e uma potência máxima de 400 mW.

Para a realização do carregamento térmico foi utilizada um refletor com lâmpada halógena de 150W como fonte de calor, visto na Figura 22.

4.3 SELEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

No trabalho de (SCHÖNTAG, 2009) foram produzidos corpos de prova (CP's) inteiramente constituídos de compósitos de matriz polimérica em resina epóxi e reforçado com fibra de vidro contendo defeitos artificialmente produzidos. Foi utilizado esse tipo de material compósito por ser mais barato e de fácil manipulação. Permitindo uma maior possibilidade de arranjos, formas e tamanhos no seu planejamento e execução.

Informações adicionais sobre o preparo e produtos utilizados para a fabricação dos corpos de prova podem ser encontrados em (SCHÖNTAG, 2009). Foram planejados e fabricados CP's com dimensões 148 mm x 210 mm que corresponde ao tamanho de uma folha de papel A5 (projeto no ANEXO A). Em cada corpo de prova há cinco defeitos quadrados, nas dimensões conforme Tabela 3.

Tabela 3: Dimensões dos defeitos quadrados produzidos artificialmente (SCHÖNTAG, 2009).

Dimensões (mm ²)
15x15
20x20
30x30
40x40

Foi possível colocar cinco defeitos de mesma dimensão em diferentes profundidades em cada corpo de prova. As profundidades em que as falhas foram colocadas encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4: Profundidades que as falhas foram dispostas (SCHÖNTAG, 2009).

Profundidades (mm)	Camadas
0,3	1 ^a camada
0,6	2 ^a camada
1,2	4 ^a camada
1,5	5 ^a camada
2,1	7 ^a camada

4.4 PARÂMETROS DE ENSAIO

O cabeçote de medição foi fixado a uma distância (d) de 450 mm do Corpo de Prova, como pode ser visto na Figura 21. Nesta distância foi possível obter uma imagem convenientemente ampliada da região de interesse do corpo de prova onde estavam os defeitos.

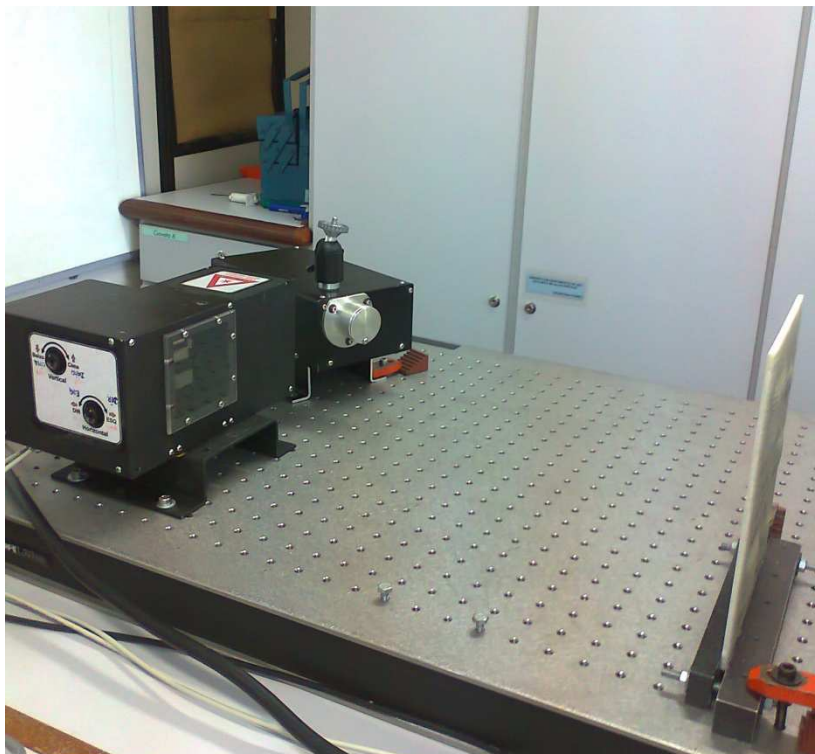


Figura 21: Montagem da bancada de ensaios.

As medições foram realizadas com deslocamentos laterais em duas direções: horizontal e vertical. Para cada direção foram usados três valores de deslocamento lateral: $DL1=7,5$ mm, $DL2=10,0$ mm e $DL3=12,0$ mm, com o intuito de escolher o que resultaria melhor qualidade de imagem do defeito.



Figura 22: Refletor com uma lâmpada halógena utilizada como fonte de calor no carregamento térmico.

Foi utilizado como forma de carregamento nos experimentos o térmico, através de um refletor com lâmpada halógena (Figura 22), onde foram aplicados em quatro tempos de aquecimento: $T_1=3s$, $T_2=6s$, $T_3=9s$ e $T_4=12s$. Duas distâncias entre a fonte de calor (Figura 22) e o corpo de prova foram usadas. São elas: $D_1=d/2=225$ mm e $D_2=d/3=150$ mm. A partir desses parâmetros escolhidos foram realizadas combinações em busca das melhores imagens, ou seja, imagens que revelem os defeitos com clareza.

Como visto anteriormente D_1 e D_2 são as distâncias entre a fonte de calor e o corpo de prova. Para cada uma dessas distâncias foram realizadas combinações com cada um dos três valores de deslocamento lateral e nas duas direções (X e Y) e para cada combinação foram utilizados quatro diferentes tempos de aplicação do carregamento térmico, totalizando setenta e duas combinações em cada direção do deslocamento lateral, finalizando num total de cento e quarenta e quatro ensaios. E, a partir dessas combinações, foram escolhidos os parâmetros com as imagens de melhor qualidade. As combinações podem ser vistas com maior clareza no diagrama da Figura 23 e na Tabela 5.

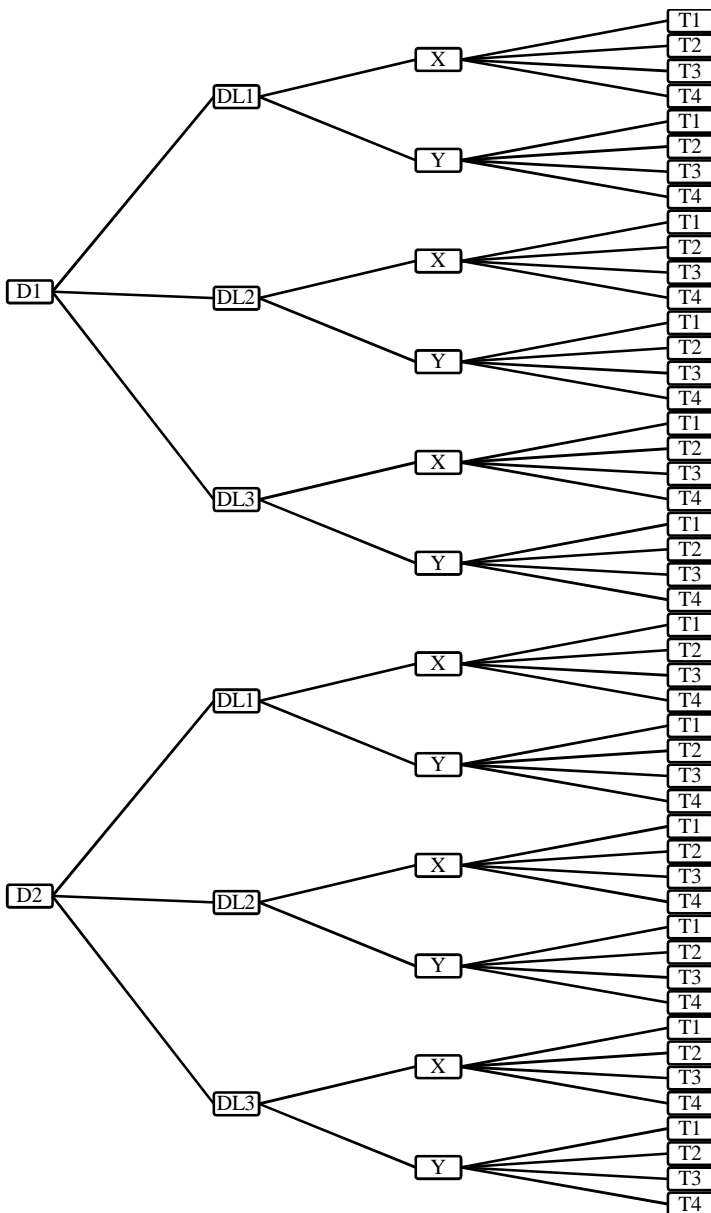


Figura 23: Diagrama com os parâmetros a serem combinados

Tabela 5: Combinação dos parâmetros de ensaios.

D1	DL1	X	T1
D1	DL1	X	T2
D1	DL1	X	T3
D1	DL1	X	T4

D2	DL1	X	T1
D2	DL1	X	T2
D2	DL1	X	T3
D2	DL1	X	T4

D1	DL1	Y	T1
D1	DL1	Y	T2
D1	DL1	Y	T3
D1	DL1	Y	T4

D2	DL1	Y	T1
D2	DL1	Y	T2
D2	DL1	Y	T3
D2	DL1	Y	T4

D1	DL2	X	T1
D1	DL2	X	T2
D1	DL2	X	T3
D1	DL2	X	T4

D2	DL2	X	T1
D2	DL2	X	T2
D2	DL2	X	T3
D2	DL2	X	T4

D1	DL2	Y	T1
D1	DL2	Y	T2
D1	DL2	Y	T3
D1	DL2	Y	T4

D2	DL2	Y	T1
D2	DL2	Y	T2
D2	DL2	Y	T3
D2	DL2	Y	T4

D1	DL3	X	T1
D1	DL3	X	T2
D1	DL3	X	T3
D1	DL3	X	T4

D2	DL3	X	T1
D2	DL3	X	T2
D2	DL3	X	T3
D2	DL3	X	T4

D1	DL3	Y	T1
D1	DL3	Y	T2
D1	DL3	Y	T3
D1	DL3	Y	T4

D2	DL3	Y	T1
D2	DL3	Y	T2
D2	DL3	Y	T3
D2	DL3	Y	T4

Na Tabela 6 estão as imagens que melhor puderam identificar os cinco defeitos de profundidades diferentes:

Tabela 6: Imagens de qualidade boa.

D (mm)	DL (mm)	Direção de DL	T (s)
225	10	X	6
150	10	X	6
225	10	X	9

D (mm)	DL (mm)	Direção de DL	T (s)
225	10	Y	6
150	10	Y	6
225	10	Y	9

Essas imagens serão analisadas e quantificadas a partir do software “*QuantificaDefeito*” que será descrito na seção 4.5. Cada linha dessa tabela chamaremos de Bloco de Medições I, II e III, para as linhas 1, 2 e 3, respectivamente.

4.5 QUANTIFICAÇÃO DOS DEFEITOS

Para extrair parâmetros quantitativos dos defeitos das imagens de shearografia foi desenvolvido no Laboratório de Metrologia e Automação, o software denominado “*QuantificaDefeito*”. O software calcula diversos parâmetros numéricos relacionados com as características físicas de áreas de interesse contendo defeitos. As imagens analisadas são sempre mapas de diferenças de fase obtidos na shearografia. A seguir são apresentadas funcionalidades e princípios de operação deste software.

4.5.1 Seleção da Região de Interesse

O programa analisa de cada vez uma região de interesse retangular definida pelo usuário. Ela deve ser um pouco maior que o defeito.

Para selecionar a região de interesse retangular que contém o defeito, o usuário arrasta as alças vermelhas com o botão esquerdo do mouse pressionado, de acordo com a Figura 24. Para deslocar a região de interesse sem modificar suas dimensões utiliza-se a alça central. Na parte superior do *form* do programa são mostradas as coordenadas (X e Y) do canto superior esquerdo e do canto inferior direito do retângulo utilizado para selecionar a região do defeito, bem como sua largura e

altura também são calculadas e mostradas. Uma observação importante é que o programa sempre força a largura da região de interesse seja um múltiplo de quatro. Esta restrição visa aumentar a eficiência do algoritmo de processamento de imagens e não será aqui discutida.

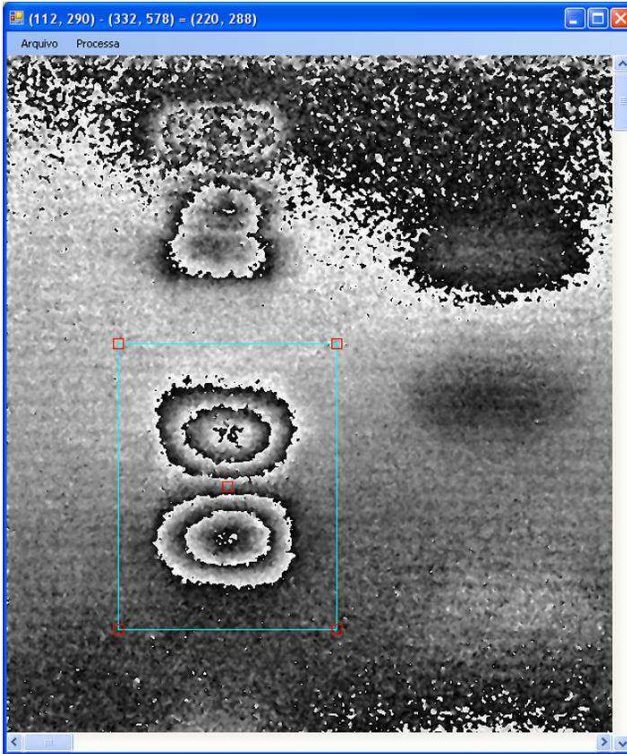


Figura 24: Seleção da região de interesse.

É importante que a região de interesse seja posicionada de forma simétrica em relação ao defeito para que os parâmetros sejam calculados de forma adequada. Como visto na Figura 24 a alça central deve ficar na região central do defeito. Caso necessário para reduzir a intensidade de ruídos, o mapa de fases pode ser filtrado com a opção “Filtra Fase 3x3” do menu “Processa”, que ativa um filtro passa-baixas na imagem de fase.

4.5.2 Remoção do Salto de Fase

Uma vez selecionada a região de interesse seu processamento deve ser ativado na opção “Quantifica” no menu “Processa” do programa principal. A janela “Calcula Parâmetros” é aberta mostrando a região de interesse selecionada como mostrado em (a) na Figura 25.

A remoção do salto de fase é a primeira etapa do processo, realizada no menu “Processa” através da opção “Remove Salto de Fase”. A Figura 25 (b) mostra o aspecto de uma imagem após a remoção do salto de fase de um defeito ter sido realizada com sucesso.

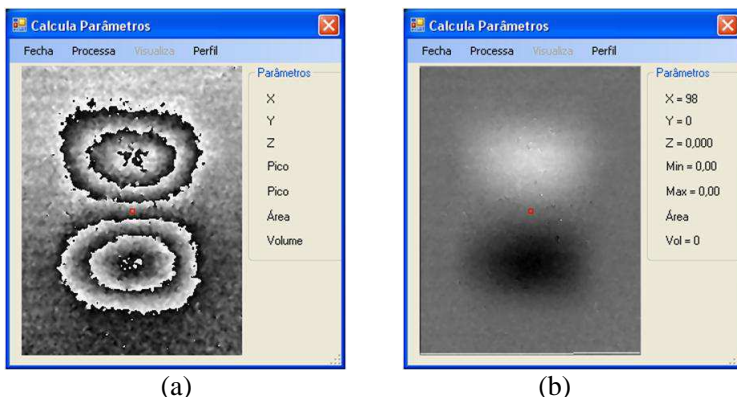


Figura 25: (a) Janela “Calcula Parâmetros” com a região de interesse visível. (b) Aspecto da imagem após a remoção do salto de fase bem-sucedida.

A remoção do salto de fase inicia pela região definida por um pequeno retângulo vermelho. Por default este retângulo está no centro da região de interesse. O algoritmo de remoção do salto de fase pode falhar caso a qualidade do mapa de fases não seja suficientemente boa. Escolhendo outro ponto inicial pode-se levar a um melhor resultado. Isso é feito clicando com o botão direito do mouse sobre outra parte da imagem para onde quer que o retângulo seja movido. Após, a opção “Remove Salto de Fase” deve ser ativada novamente para que a remoção do salto de fase se dê a partir desse novo ponto selecionado.

A Figura 26 mostra três resultados diferentes obtidos para a mesma região de interesse com três posições do ponto inicial. Note que apenas na última a operação foi bem sucedida.

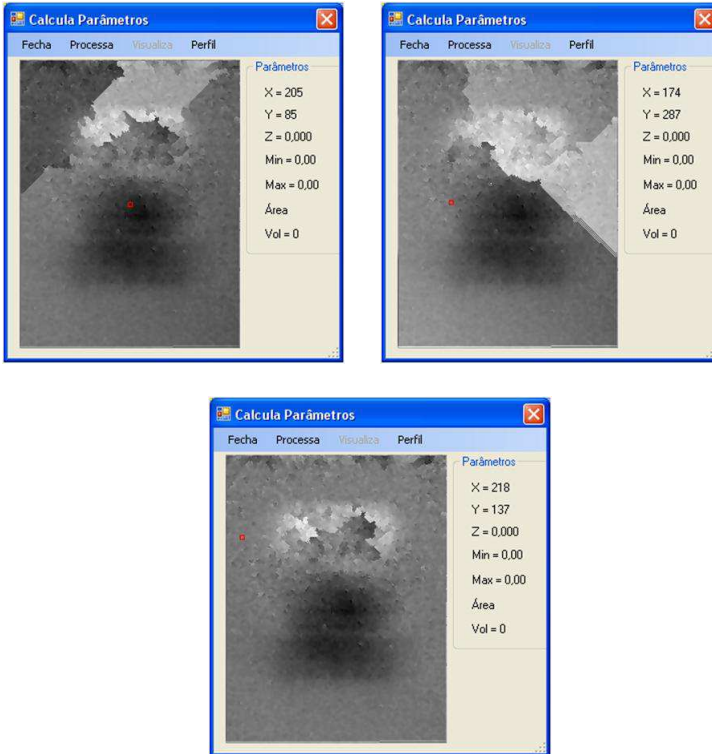


Figura 26: Remoção do salto de fase usando diferentes pontos iniciais.

Além de remover o salto de fase, o programa também remove uma eventual inclinação média presente no mapa da diferença de fase. Para solucionar esse problema, é ajustada pelo método dos mínimos quadrados a equação de um plano considerando apenas os pontos existentes na borda da região de interesse. Após calculada, a equação deste plano é subtraída ponto a ponto do mapa da diferença de fases. Como resultado final, a imagem do mapa da diferença de fase com o salto removido estará nivelada, isto é, terá suas bordas paralelas a um plano horizontal. Este nivelamento é necessário para a extração de alguns parâmetros da região do defeito, como será discutido adiante.

4.5.3 Integração Direcional

A derivada na direção do deslocamento lateral da componente fora-do-plano do campo de deslocamentos está relacionada com os

mapas da diferença de fase de shearografia. Para extrair alguns parâmetros relacionáveis com as características do defeito é, primeiramente, realizada uma integração numérica na direção do deslocamento lateral. O programa suporta apenas integrações nas direções horizontal (X) ou vertical (Y). A integração numérica ao longo de uma linha de dados é realizada através do valor da soma acumulada realizada ao longo desta linha, visto na equação (12).

$$F_j = \sum_{i=0}^j D_i \quad (12)$$

Assim, se (D_i) é o valor da derivada do i -ésimo ponto, (F_j) será o valor integrado do j -ésimo ponto, a menos de uma constante multiplicativa. Para que esta operação dê um bom resultado é necessário que o mapa de fase removido tenha sido previamente nivelado, isto é, não contenha uma inclinação média significativa.

A Figura 27 mostra um exemplo do sinal da derivada (D_i) ao longo de uma linha de dados e na Figura 28 a integração desse mesmo sinal (F_j) .

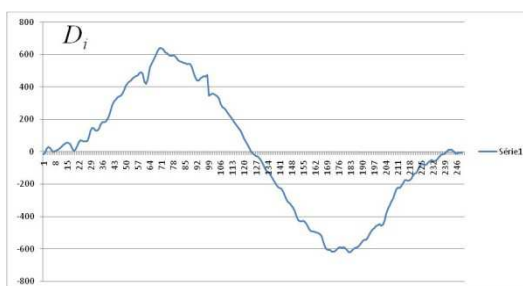


Figura 27: Sinal da derivada de uma linha de dados.

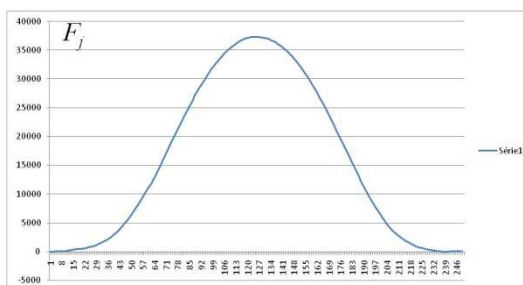


Figura 28: Mesmo sinal após a integração usando a equação (12).

No caso bidimensional, a integração na direção do eixo X é realizada ao longo de linhas e a integração ao longo do eixo Y é realizada a partir das colunas. É aplicado um filtro passa-baixas no sinal da derivada antes da integração ser iniciada.

A Figura 29 mostra a sequência de imagens envolvida na integração ao longo do eixo Y.

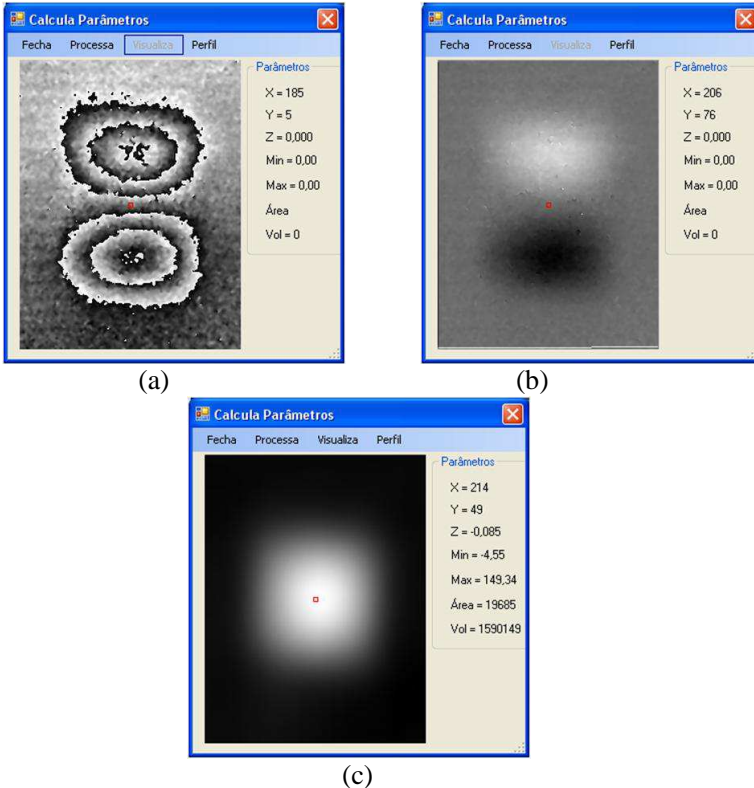


Figura 29: Etapas da integração na direção do eixo Y.

Na Figura 29 (a) é o mapa da diferença de fases, em (b) é o mesmo mapa após a remoção do salto de fase e o seu nivelamento com a horizontal. A integração na direção Y é realizada após a remoção do salto de fase acionando a opção “Integra em Y” no menu “Processa” desta janela. O aspecto da imagem após a integração é visto na Figura 29 (c). As linhas de dados da Figura 27 e da Figura 28 foram extraídas da coluna central da Figura 29 (b) e (c) respectivamente. Alguns

parâmetros são calculados a partir do sinal integrado que serão descritos na seção 4.5.4.

4.5.4 Ajuste da Função Exponencial

Embora a imagem integrada já permita a determinação de parâmetros quantitativos relacionados com o defeito, um outro caminho foi implementando. Consiste em ajustar aos dados a uma função exponencial usando o método dos mínimos absolutos ao sinal integrado. O método dos mínimos absolutos age encontrando os parâmetros da função a ser ajustada que minimizam o erro formado pela soma dos valores absolutos dos resíduos. Embora seja de mais difícil implementação matemática, este método foi aqui preferido por que é menos sensível a ruídos e erros localizados do que o método dos mínimos quadrados.

A equação exponencial possui três parâmetros a serem determinados: K_0 , K_x e K_y , relacionados com o sinal $F(x,y)$ pela equação (13). O parâmetro K_0 está relacionado com a intensidade do defeito e com o valor de pico da função integrada. É maior para defeitos com mais franjas. Os parâmetros K_x e K_y estão relacionados com a largura do defeito.

$$F(x, y) = K_0 e^{-(K_x \cdot x^2 + K_y \cdot y^2)} \quad (13)$$

Através da equação (14) com a minimização multidimensional da função erro absoluto, é possível determinar os valores de K_0 , K_x e K_y . Para esse ajuste é utilizado o algoritmo Simplex (PRESS, TEUKOLSKY, *et al.*, 1992). Nessa equação n é o número total de pontos validos na região de interesse.

$$EA = \sum_{j=1}^n \left| F_j - K_0 e^{-(K_x \cdot x_j^2 + K_y \cdot y_j^2)} \right| \quad (14)$$

Para realizar o ajuste exponencial é necessário remover o salto de fase e realizar a integração em X ou em Y de acordo com a direção do deslocamento lateral. Em seguida, a opção “Ajusta Exponencial” deve ser selecionada no menu “Processa” da janela “Calcula Parâmetros”.

4.5.5 Ajuste da exponencial através da Derivada

O terceiro e último caminho para calcular os parâmetros é feito após a remoção do salto de fase e seu nivelamento sem que seja realizada a integração. A idéia é que os dados sejam ajustados à equação da derivada da função exponencial.

Ao ser derivada em relação à variável x a equação (13) torna-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} F(x, y) = -2K_x K_0 x e^{-(K_x \cdot x^2 + K_y \cdot y^2)} \quad (15)$$

Os dados não integrados, e relativos ao deslocamento lateral horizontal, correspondem à própria derivada da função exponencial em relação ao eixo x . Eles são ajustados pelo método dos mínimos absolutos à equação (15). Como resultado, os mesmos parâmetros K_0 , K_x e K_y , são determinados. A equação da derivada da função exponencial em relação ao eixo y é usada para as imagens cujo deslocamento lateral é na direção do eixo y .

Teoricamente os caminhos apresentados nesta seção e na anterior deveriam levar aos mesmos valores dos coeficientes. Entretanto, a presença de ruídos afasta os valores calculados. Os dois caminhos foram utilizados neste trabalho para que se verifique qual apresenta melhor desempenho.

4.5.6 Visualização de Resultados

Como nem sempre a qualidade das imagens avaliadas é boa, algumas vezes a integração ou o ajuste da função exponencial não é bem sucedido. O software possui uma opção para avaliar visualmente a qualidade da operação realizada dando ao usuário uma oportunidade de decidir se confia nos parâmetros determinados. Esta funcionalidade é ativada no menu “Visualiza” nas opções, “Derivada em X” ou em “Derivada em Y”. Por meio dela são calculadas e mostradas as franjas equivalentes com o salto de fases e pode ser verificada de forma visual a qualidade da integração, ou do ajuste exponencial. A princípio, quanto mais as franjas calculadas se aproximarem da imagem original, melhor é a qualidade do ajuste efetuado. Pode ser usada em dois momentos: após a integração ou após o ajuste da função exponencial pelos dois caminhos descritos nas duas seções anteriores. Alguns exemplos são vistos na Figura 30.

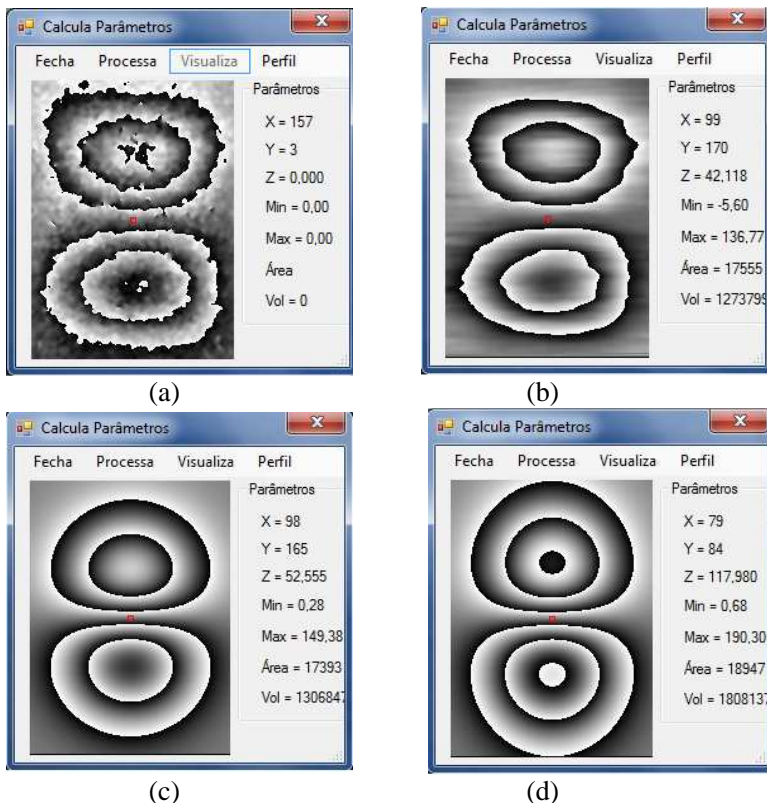


Figura 30: Visualização gráfica da qualidade da integração, do ajuste exponencial e do ajuste de derivada

Se realizada após a integração como observado na Figura 30 (b), ao selecionar a opção “Visualiza” e depois a “Derivada em X” ou em “Derivada em Y” (de acordo com a direção do deslocamento lateral) é possível visualizar franjas no mapa de diferenças de fase calculadas a partir da derivação do sinal integrado. Estas franjas devem se assemelhar com as franjas originais visíveis através da opção “Franja” dentro do menu “Visualiza”.

A Figura 30 (a) mostra as franjas do mapa de diferenças de fase original. Já em (b) mostra as franjas na derivada em Y calculada a partir da função integrada. Uma boa semelhança entre elas, como é o caso deste exemplo, é um sinal de que o processo de integração funcionou muito bem. Em (c) na Figura 30 mostra as franjas da derivada em y calculadas após o ajuste da função exponencial. Quando a opção

“Derivada em X” ou “Derivada em Y” é realizada após o ajuste da função exponencial, as franjas são geradas a partir do cálculo das derivadas. Finalmente em (d) são mostradas as franjas diretamente resultantes do método de ajuste a partir da derivada da função exponencial. Note que, embora as franjas desta figura tenham sido obtidas de uma mesma imagem original, os diferentes caminhos adotados para o cálculo levam a resultados próximos, mas não coincidentes.

A Figura 31 mostra um exemplo onde tanto a integração quanto o ajuste exponencial e o ajuste da derivada não levaram a um resultado satisfatório.

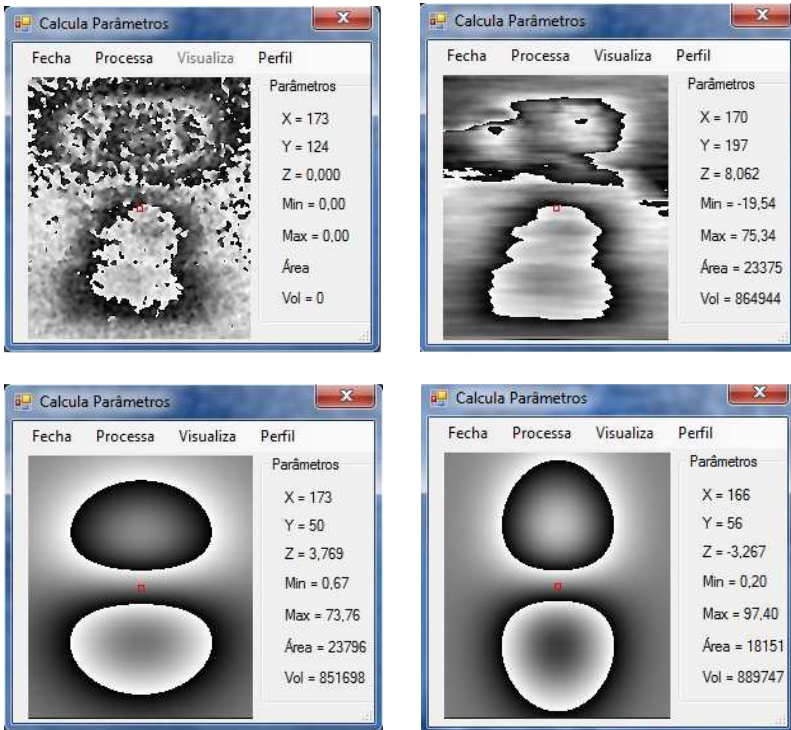


Figura 31: Visualização gráfica da qualidade da integração, do ajuste exponencial e do ajuste de derivada de uma imagem de má qualidade.

4.5.7 Parâmetros Calculados

São calculados quatro parâmetros após a realização da integração ou do ajuste exponencial. São eles: valor mínimo, valor máximo, área e volume. Os valores Mínimo e Máximo são intuitivos. Correspondem respectivamente aos valores mínimo e máximo do sinal integrado. Suas unidades não possuem uma associação clara com as quantidades físicas, pois dependem da sensibilidade do interferômetro, do seu fator de ampliação lateral e da quantidade de deslocamento lateral aplicado. Entretanto, a escala permanece inalterada se estas propriedades permanecerem constantes. Deste modo, os valores numéricos podem ser usados para comparações se a mesma ampliação lateral, o mesmo deslocamento lateral, a mesma direção de iluminação e o mesmo laser forem utilizados.

Para se determinar a área e o volume assume-se que a forma da superfície integrada se assemelha a uma gaussiana, como é o caso do corte mostrado na Figura 28. A superfície numericamente integrada, ou, alternativamente, à qual foi ajustada a função exponencial, pode ser pensada como a superfície que envolve um “bolsão de ar” (bolha). O Volume corresponde ao deste “bolsão de ar”, isto é, o volume contido entre a superfície da “bolha” e o plano horizontal de referência. É numericamente calculado pelo somatório dos valores da função integrada para todos os pixels contidos na região de interesse. Caso o plano de referência seja diferente de zero, deve-se subtrair o plano de referência. Valores negativos do volume podem aparecer em função da direção do deslocamento lateral. Este é o caso se a parte mais pronunciada da “bolha” é a mais baixa que a superfície horizontal de referência. Nesse caso, para fins de comparação, apenas os valores absolutos do volume devem ser considerados.

A Área corresponde à porção da região de interesse onde os valores da função integrada, ou ajustada pela exponencial, superam certo limiar, determinado em função do valor de pico. É calculada contando o número de pixels dentro da região de interesse cujo valor obedece à condição: $|F(x, y)| > |Limiar|$. O valor do Limiar é uma fração do valor do pico (Máximo se a “bolha” é para cima ou Mínimo se a “bolha” é para baixo). Esta fração é 14,65% do valor de pico. Foi escolhida porque em uma função gaussiana os valores que superam esta fração somam 95% da área total da função gaussiana.

Os valores de Mínimo, Máximo, Área e Volume para a função integrada são calculados logo após que a integração é realizada. Similarmente, são também calculados quando o ajuste da função

exponencial é realizado, seja por ajuste direto da exponencial, ou seja, pelo ajuste da derivada da função exponencial.

É possível notar nas partes (b), (c) e (d) da Figura 30 os valores correspondentes dos quatro parâmetros. Note que esses valores, tanto na integração como para o ajuste da função exponencial geralmente não coincidem, porém tem valores próximos. Além de serem atualizados na tela, os valores calculados são salvos no Clipboard nesta mesma ordem: Mínimo, Máximo, Área e Volume, facilitando o registro de resultados.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No capítulo anterior foi apresentada a forma na qual é realizada a quantificação dos parâmetros relacionados com os defeitos. Este capítulo explora a utilização desses parâmetros (Tabela 7), adquiridos através do software “*QuantificaDefeito*”, para estimar o tamanho e a profundidade dos defeitos. A altura mostrada na Tabela 7 é a subtração entre o valor mínimo e o valor máximo do sinal integrado e, portanto tem a mesma unidade. Para isso, foi desenvolvido um procedimento que será apresentado neste capítulo. Para reunir dados suficientes para aplicar o procedimento, uma longa série de ensaios foi realizada com corpos de prova com defeitos artificialmente produzidos com dimensões e profundidades conhecidas. Para cada caso os respectivos parâmetros foram obtidos pelo programa, ordenados e analisados. Foram utilizados corpos de prova contendo defeitos artificiais com as profundidades e os tamanhos de defeitos apresentados na Tabela 8.

Tabela 7: Parâmetros extraídos do software “*QuantificaDefeito*”.

Área	Volume	Altura
------	--------	--------

Foram realizadas medições em três condições de carregamento térmico distintas, e com deslocamentos laterais nas duas direções, de acordo com as configurações apresentadas na Tabela 6. Para cada linha desta tabela foi atribuída a denominação Bloco de Medições I, II e III, respectivamente para as linhas 1, 2 e 3.

Tabela 8: Valores utilizados para análise dos dados.

Profundidades (mm)	Dimensão lateral (mm)		
0,6	20x20	30x30	40x40
1,2			
1,5			
2,1			

5.1 QUANTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS

Foram descritos no capítulo anterior três métodos para a quantificação dos parâmetros relacionados com os defeitos:

- a) Integração direcional

- b) Integração direcional seguida de ajuste da função exponencial
- c) Ajuste da função exponencial a partir da sua derivada

Após testes envolvendo quantificações repetitivas dos defeitos, foi constatado que, para as dimensões e profundidades de defeitos descritas na Tabela 8, o algoritmo que apresentou melhor consistência e repetitividade foi o método da integração direcional seguida de um ajuste da função exponencial, descrito na seção 4.5.4 que aqui, por brevidade, será referido como Método 02. Resultados para os outros métodos podem ser vistos no APÊNDICE C. Eles não serão aqui discutidos.

Os ensaios envolveram medições com deslocamentos laterais nas duas direções (horizontal e vertical). Como anteriormente, foram adquiridas três imagens de cada corpo de prova e, em cada imagem, foram realizadas três quantificações independentes dos parâmetros de cada defeito, variando ligeiramente a localização da região de interesse retangular. Como parte dos resultados a Figura 32 apresenta um gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral, para cada profundidade usando o Bloco de Medições I, na Figura 33 o Bloco de Medições II, e na Figura 34 o Bloco de Medições III, todos na direção horizontal.

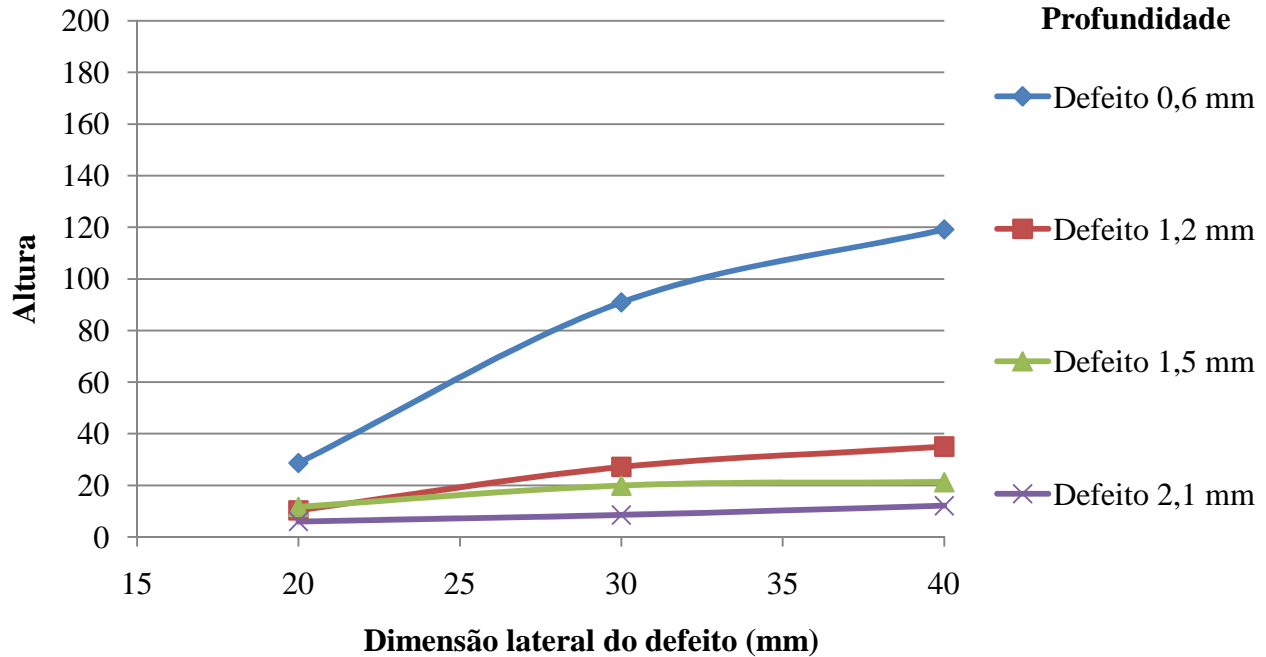


Figura 32: Gráfico de comportamento do parâmetro altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições I e o Método 02, na direção horizontal.

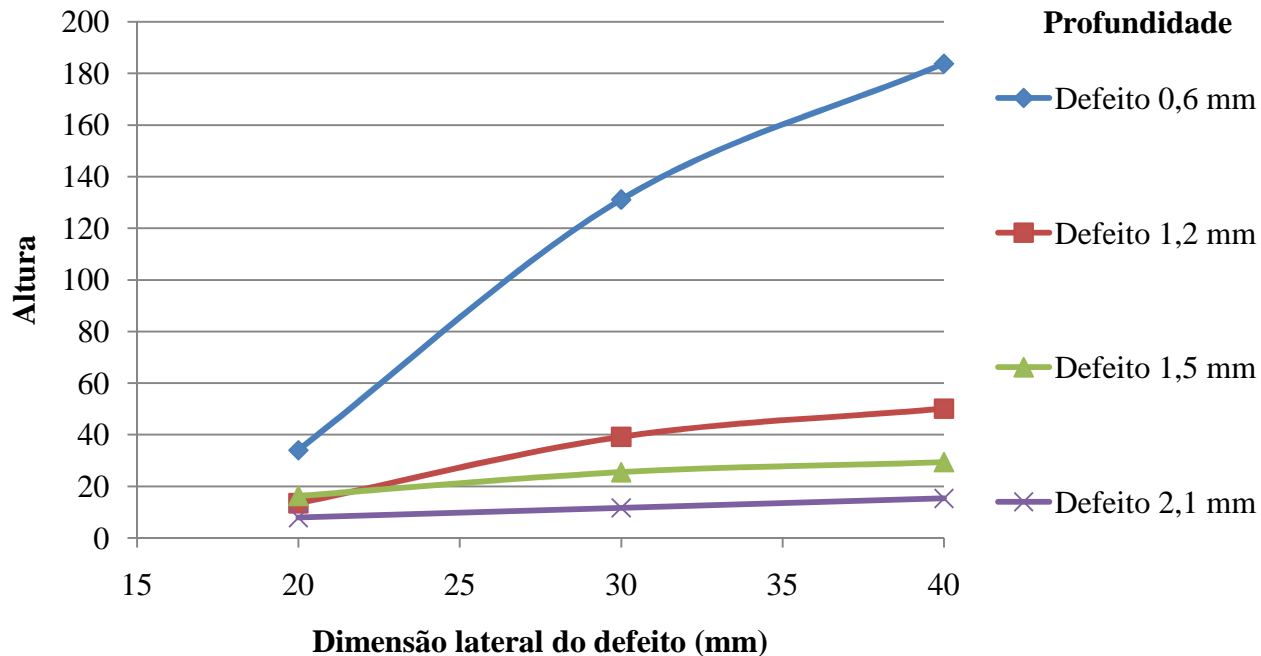


Figura 33: Gráfico de comportamento do parâmetro altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições II e o Método 02, na direção horizontal.

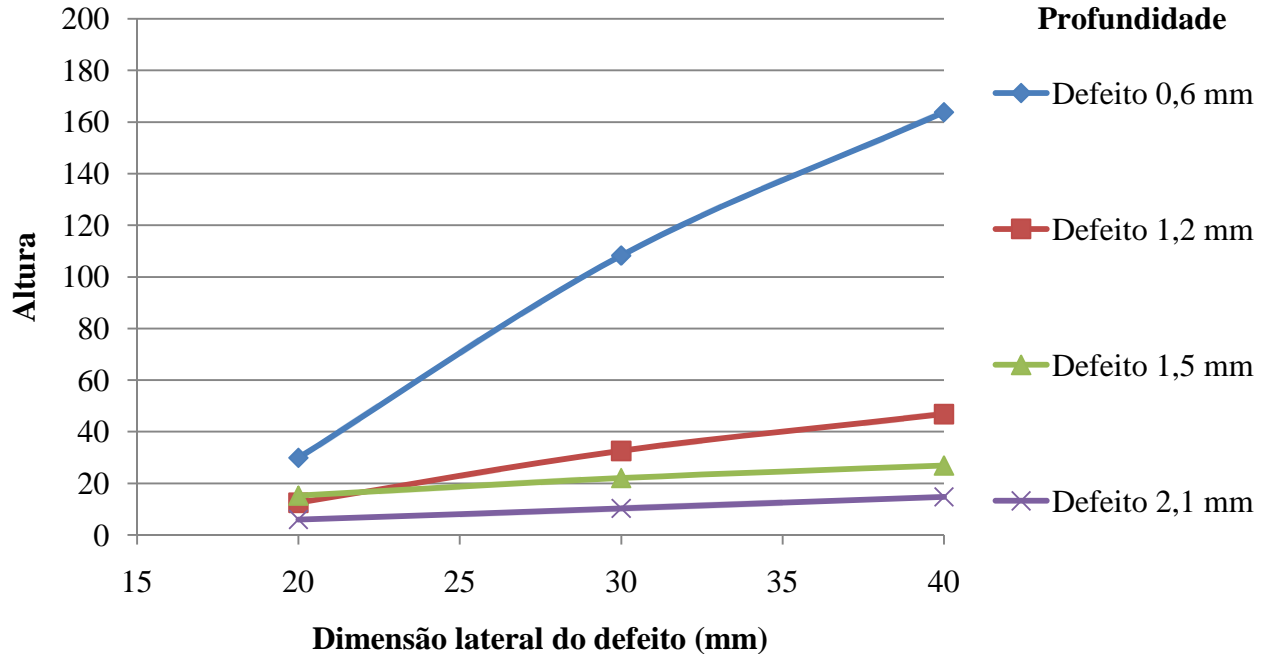


Figura 34: Gráfico de comportamento do parâmetro altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições III e o Método 02, na direção horizontal.

A análise comparativa destes três gráficos revela que o parâmetro altura varia consideravelmente em função da dimensão lateral do defeito quando sua profundidade é de 0,6 mm. Para defeitos com profundidades de 1,2 mm ou mais, as variações da altura com a dimensão lateral e a profundidade do defeito já não são expressivas, tornando mais difícil a utilização da altura para determinar a profundidade do defeito, especialmente naqueles em que as dimensões são inferiores a 30 mm. Comparativamente, os valores do Bloco de Medições II apresentam valores mais elevados, devido às condições do carregamento térmico produzirem maiores quantidades de franjas nas imagens. As condições de medição utilizadas no Bloco de Medições II foram então adotadas neste trabalho. Por esta razão, os resultados e análises que se seguem neste capítulo envolvem apenas medições do Bloco de Medições II. Na Figura 35 é apresentado um gráfico de comportamento do parâmetro volume em função da dimensão lateral do defeito e para cada profundidade, sempre usando o Bloco de Medições II, com deslocamento lateral na direção horizontal.

O gráfico da Figura 35 onde é traçado o parâmetro volume tem um comportamento com boa semelhança com o parâmetro altura, descrito na Figura 34.

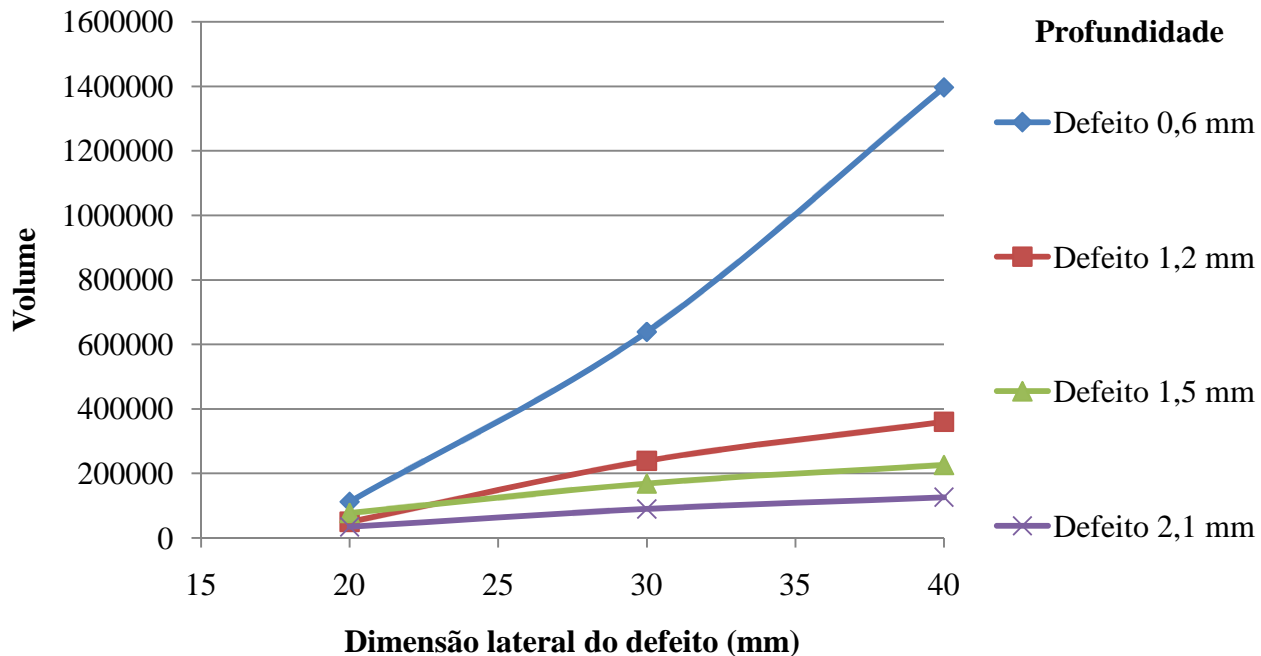


Figura 35: Gráfico de comportamento do parâmetro volume em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições II e o Método 02, na direção horizontal.

5.2 PROCEDIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DO DEFEITO

Busca-se um caminho de fácil aplicação que permita determinar, de forma indireta, a profundidade e tamanho de um defeito desconhecido. Como os defeitos simulados foram sempre de forma quadrada, o caminho aqui desenvolvido somente se aplica para defeitos com esta forma. Para isso, o corpo de prova é submetido a um carregamento térmico predeterminado e as franjas de shearografia resultantes são processadas e os parâmetros Altura, Volume e Área da região do defeito são determinados. A determinação destes três parâmetros não pressupõe o conhecimento prévio da dimensão lateral e profundidade do defeito. Eles são o ponto de partida para o procedimento desenvolvido neste trabalho.

Para que estes parâmetros possam ser naturalmente usados para identificar a profundidade e a dimensão lateral de um determinado defeito os valores dos parâmetros, obtidos de ensaios com defeitos conhecidos, foram combinados e usados para traçar dois gráficos: Altura x Área, mostrado na Figura 36 e Volume x Área visto na Figura 37. Note que linhas diferentes correspondem a diferentes profundidades de defeitos. Os gráficos apresentados nesta figura correspondem ao deslocamento lateral da direção horizontal. Gráficos similares foram obtidos para o deslocamento lateral na direção do outro eixo que serão vistos a seguir.

O procedimento para quantificação da profundidade e dimensão lateral do defeito compreende os oito passos descritos a seguir:

1. Ensaie com carregamento térmico o elemento que possui defeito desconhecido com shearografia nas condições prescritas na segunda linha da Tabela 6 (que corresponde ao Bloco de Medições II)
2. Através do software “*QuantificaDefeito*” determine os parâmetros Altura, Volume e Área
3. Forme um par coordenado com os parâmetros Altura e Área e no gráfico da Figura 36 e determine por interpolação a profundidade correspondente ao defeito
4. Forme outro par coordenado com os parâmetros Volume e Área e no gráfico da Figura 37 e determine por interpolação a profundidade correspondente ao defeito

5. Adote a profundidade do defeito como o valor médio obtido nos passos 3 e 4. A diferença entre as profundidades é uma medida relacionada com a componente aleatória da incerteza da determinação da Profundidade do Defeito
6. Utilize agora o gráfico que relaciona a dimensão do defeito com o parâmetro Altura (Figura 38). Encontre, ou interpole, a posição da linha correspondente à profundidade média. A interseção desta linha com o valor do parâmetro Altura definirá um ponto, que permite a determinação da dimensão do defeito no eixo horizontal
7. Utilize agora o gráfico que relaciona a dimensão lateral do defeito com o parâmetro Volume (Figura 39). Encontre, ou interpole, a posição da linha correspondente à profundidade média. A interseção desta linha com o valor do parâmetro Volume definirá um ponto, que permite a determinação da dimensão lateral do defeito no eixo horizontal
8. Adote a dimensão do defeito como o valor médio obtido nos passos 6 e 7. A diferença entre as dimensões é uma medida relacionada com a componente aleatória da incerteza da determinação da dimensão lateral do defeito

Este procedimento pode ser aplicado nas imagens com deslocamento lateral na direção do eixo X ou do eixo Y. Em alguns ensaios, por circunstâncias diversas, a qualidade das imagens para o deslocamento lateral em uma direção é melhor do que em outra. Nestes casos, é sempre melhor utilizar as imagens e gráficos correspondentes à melhor condição.

Se ambas as imagens apresentam qualidades equivalentes, a utilização simultânea das duas famílias de imagens, uma em cada direção de deslocamento lateral, certamente será a melhor opção. Os valores médios para a Profundidade e dimensão lateral do defeito devem ser adotados. A dispersão encontrada entre os parâmetros determinados estará relacionada com as respectivas componentes aleatórias.

5.3 EXEMPLO DE QUANTIFICAÇÃO

Para verificar se o procedimento desenvolvido leva a valores razoáveis, foi realizado um ensaio em um corpo de prova com defeitos artificiais. Embora tenha natureza similar aos corpos de prova usados para construir os gráficos Altura x Área e Volume x Área, o corpo de prova utilizado nestes testes não está entre os que foram utilizados para construir estes gráficos. Isto é, ele é independente.

O ensaio com a shearografia foi realizado nas condições prescritas pelos Blocos de Medições I, II e III. Porém, aqui só serão apresentados do Bloco de Medições II. Em todos os casos foi utilizado o Método 02 para quantificação dos parâmetros Altura, Volume e Área do defeito.

Os resultados da aplicação dos passos 3 e 4 do procedimento desenvolvido neste corpo de prova podem ser vistos na Figura 36 e na Figura 37 respectivamente. Um ponto circular está representado nestas figuras, rotulado de “*Dados de Entrada*”. Note que este ponto situa sobre a curva do defeito com profundidade de 0,6 mm nos gráficos, levando a crer que esta é a profundidade do defeito.

Uma vez estimada a profundidade do defeito, passa-se para os passos 6 e 7 para que possa determinar a dimensão lateral do defeito. A aplicação destes passos pode ser vista nos gráficos: (Altura x Dimensão lateral do defeito) da Figura 38 e (Volume x Dimensão lateral do defeito) da Figura 39. Dos dois gráficos estima-se o tamanho do defeito como tendo cerca de 28 mm, que é um valor relativamente próximo da dimensão lateral de 30 mm.

Desta forma, a aplicação do procedimento desenvolvido no escopo deste trabalho leva à estimativa do defeito como estando à cerca de 0,6 mm de profundidade e com dimensões laterais de aproximadamente 28 mm.

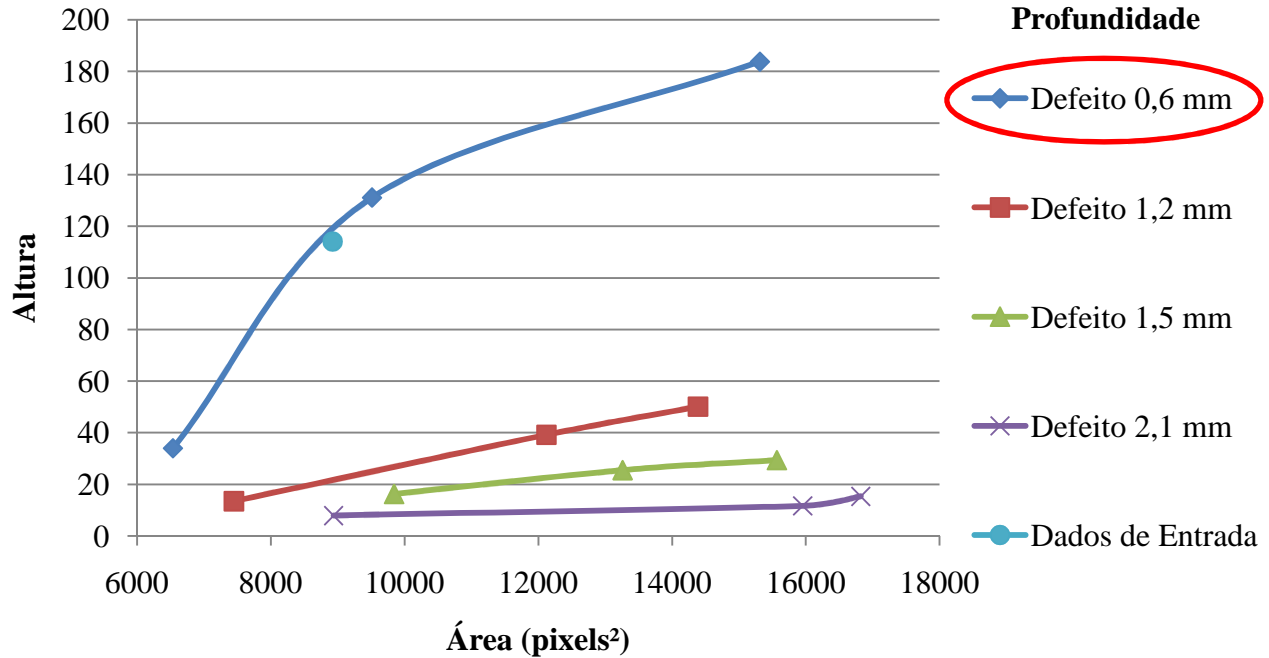


Figura 36: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da Área dos quatro defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal.

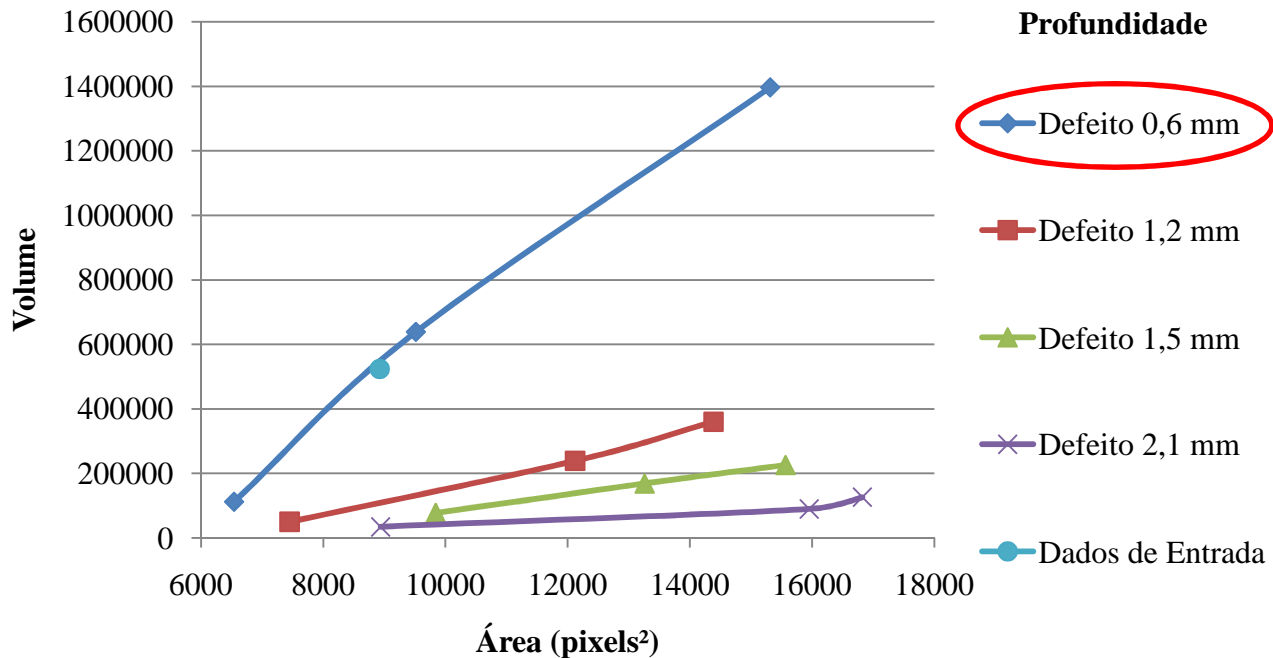


Figura 37: Gráfico do comportamento do parâmetro Volume em função da Área dos quatro defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal.

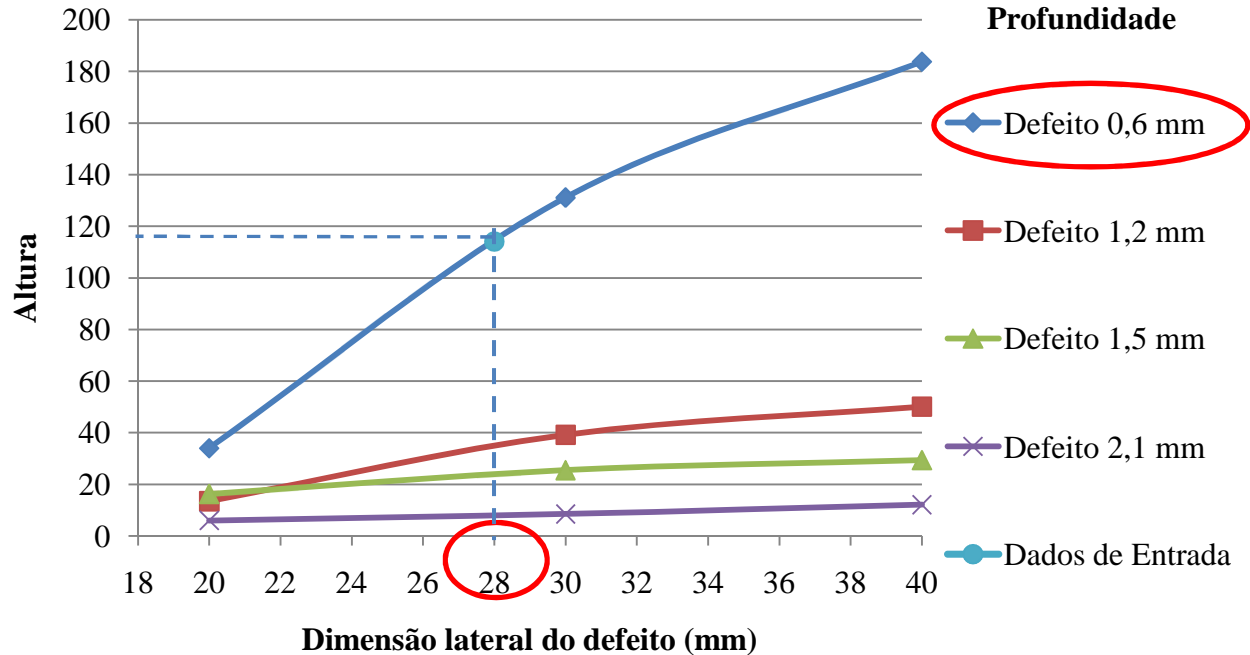


Figura 38: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito dos quatro defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal.

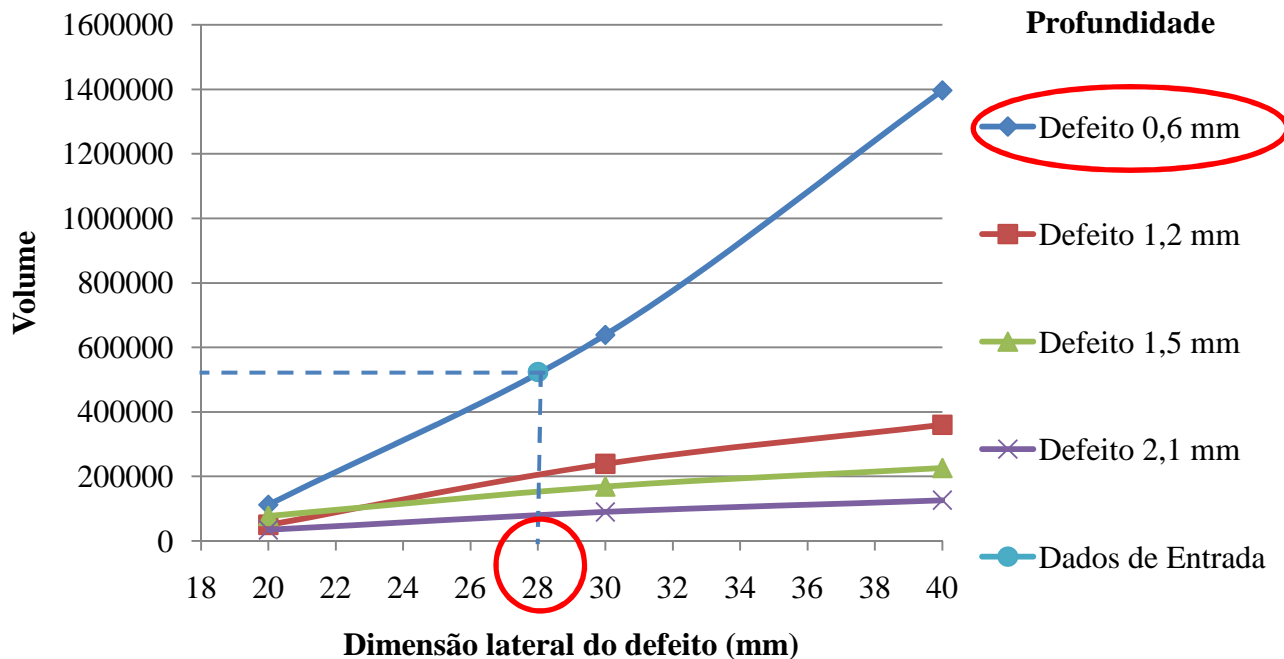


Figura 39: Gráfico do comportamento do parâmetro Volume em função da dimensão lateral do defeito dos quatro defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal.

O mesmo defeito, no mesmo corpo de prova, foi também avaliado com deslocamento lateral vertical, sendo mantidas as demais condições do Bloco de Medições II. Seguindo o procedimento apresentado na seção 5.2 foram obtidos gráficos para o deslocamento lateral na direção vertical, da Altura (Figura 41) e do Volume (Figura 42), onde são representados os respectivos pares ordenados para o presente ensaio. Nestes casos, a profundidade do defeito é um pouco maior que 0,6 mm. A falta de dados oriundos de defeitos com profundidades entre (0,6 e 1,2) mm não permitem que seja feita uma interpolação confiável para melhor estimar a profundidade do defeito. Se for adotada a profundidade do defeito e estimar a dimensão lateral do defeito. Com base na Figura 43 e na Figura 44, estima-se que a dimensão do defeito é de aproximadamente 26 mm nos dois gráficos. Se fosse considerada que a profundidade do defeito é um pouco abaixo de 0,6 mm, a dimensão lateral do defeito, estimada a partir dessas últimas figuras, se aproximaria mais de 28 mm.

Portanto, tanto para o deslocamento lateral na direção horizontal quanto na direção vertical, a profundidade do defeito se aproximou de 0,6 mm, que é o valor de referência. Porém a dimensão lateral do defeito foi diferente em cada direção, do deslocamento lateral, variando entre (26 e 28) mm, sendo que o valor de referência é de 30 mm.

A Figura 40 mostra os mapas da diferença de fase do corpo de prova utilizados para verificação do procedimento desenvolvido. As franjas da parte (a) correspondem à direção do deslocamento lateral na horizontal e em (b) ao deslocamento lateral na vertical. Visualmente nota-se que a o deslocamento lateral na direção horizontal tem uma qualidade de imagem superior ao deslocamento lateral realizado na direção vertical. Portanto, seguindo o procedimento proposto, seriam adotados os resultados obtidos com as imagens de melhor qualidade que, neste caso, seria do deslocamento lateral na direção horizontal.

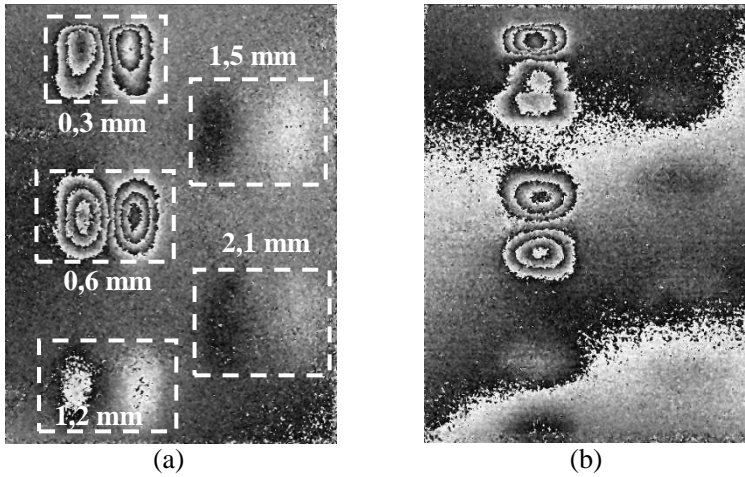


Figura 40: Mapas da diferença de fase do corpo de prova utilizado para verificação do procedimento desenvolvido com deslocamento lateral nas direções horizontal (a) e vertical (b).

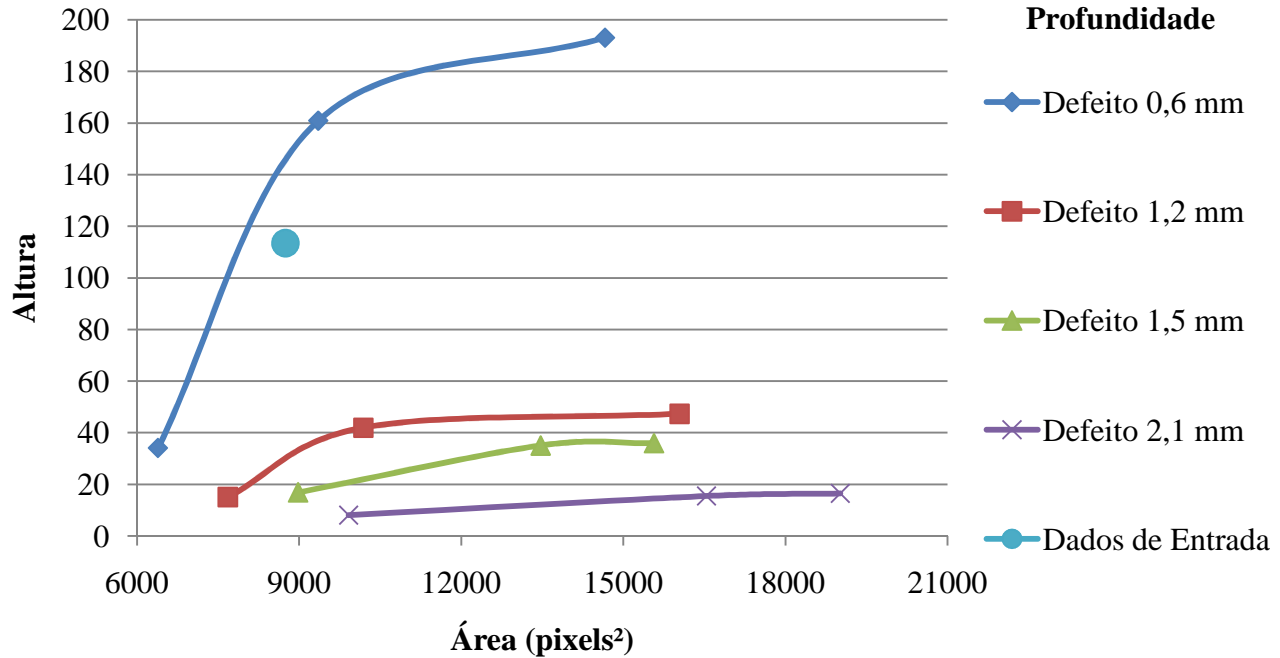


Figura 41: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da Área dos quatro defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção vertical.

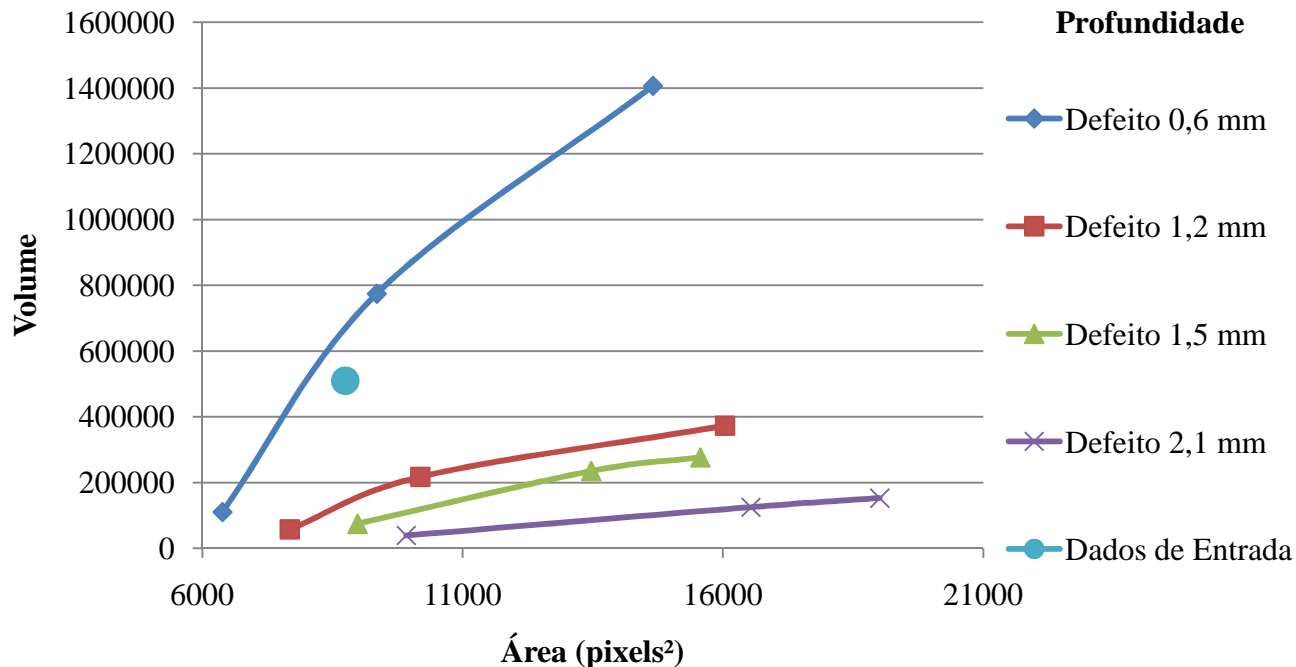


Figura 42: Gráfico do comportamento do parâmetro Volume em função da Área dos quatro defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção vertical.

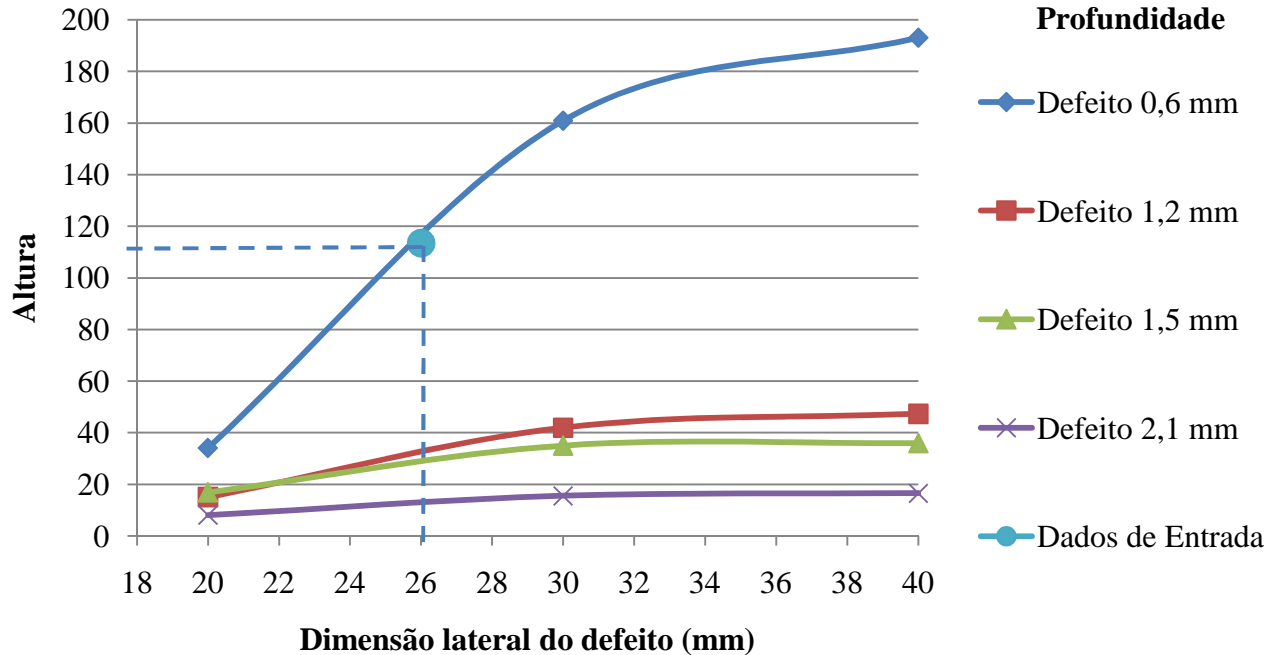


Figura 43: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito dos quatro defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção vertical.

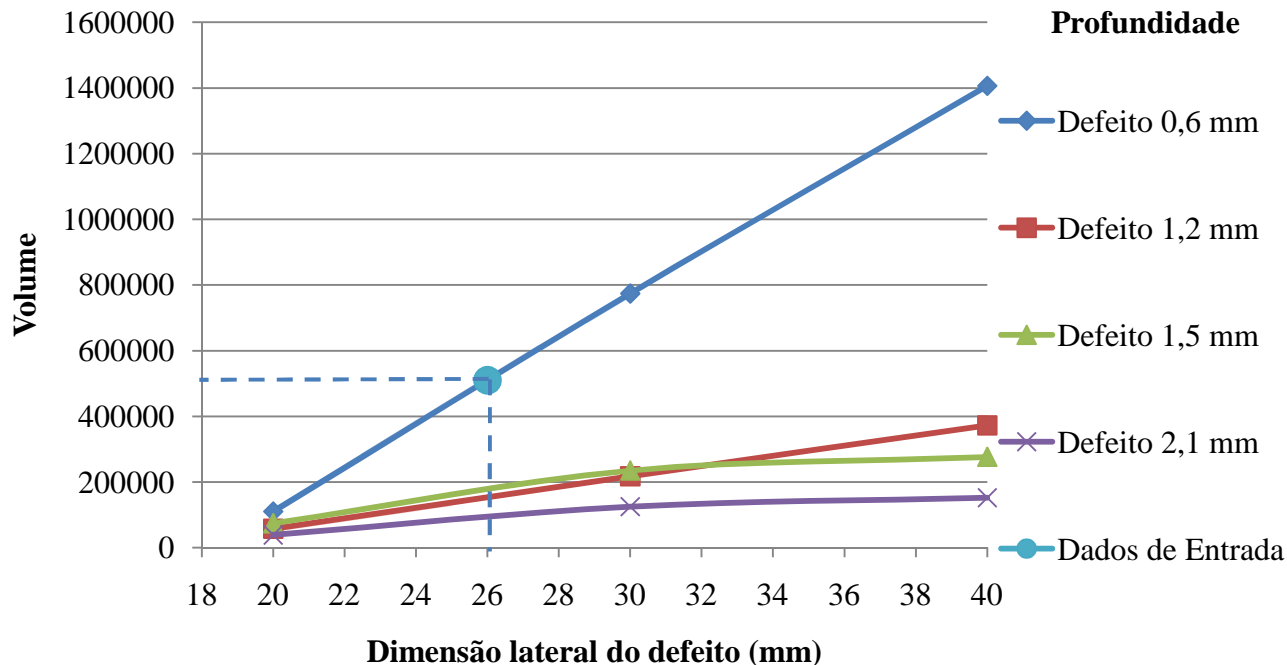


Figura 44: Gráfico do comportamento do parâmetro Volume em função da dimensão lateral do defeito dos quatro defeitos com profundidades diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção vertical.

Os gráficos que serão apresentados na sequência tiveram suas escalas modificadas para realçar os defeitos localizados em profundidades a partir de 1,2 mm. Um outro defeito existente no mesmo corpo de prova foi também analisado utilizando o procedimento da seção 5.2. A partir dos gráficos da Figura 45 e Figura 46, estima-se que o defeito está em uma profundidade de 1,2 mm. Com essa informação, os passos 6 e 7, que são apresentados nos gráficos da Figura 47 e Figura 48, levam à estimativa da dimensão lateral do defeito como sendo aproximadamente 22 mm nos dois gráficos, se afastando do valor nominal desde defeito que é de 30 mm.

Este resultado, e um outro resultado para defeito situado a 1,5 mm de profundidade, apresentado no APÊNCICE D leva a acreditar que, com o banco de dados disponíveis, o procedimento desenvolvido no escopo deste trabalho não apresenta bons resultados para o defeitos com profundidade superiores a 1,2 mm.

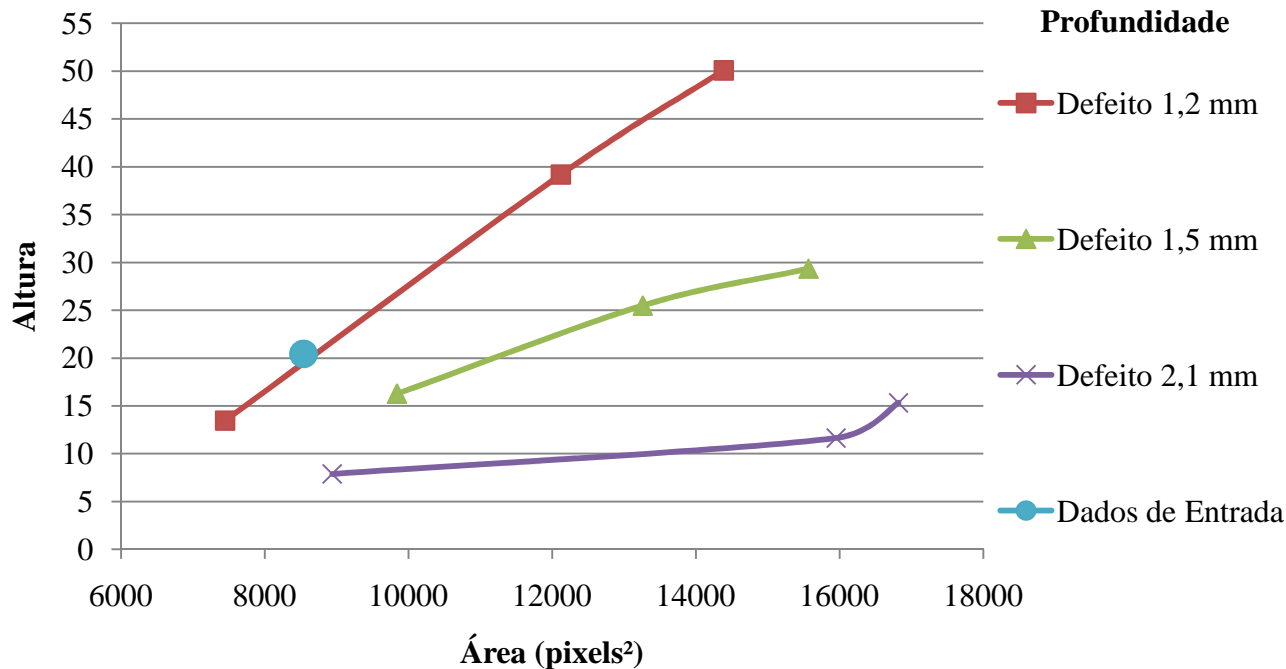


Figura 45: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da Área dos três últimos defeitos com profundidades diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal.

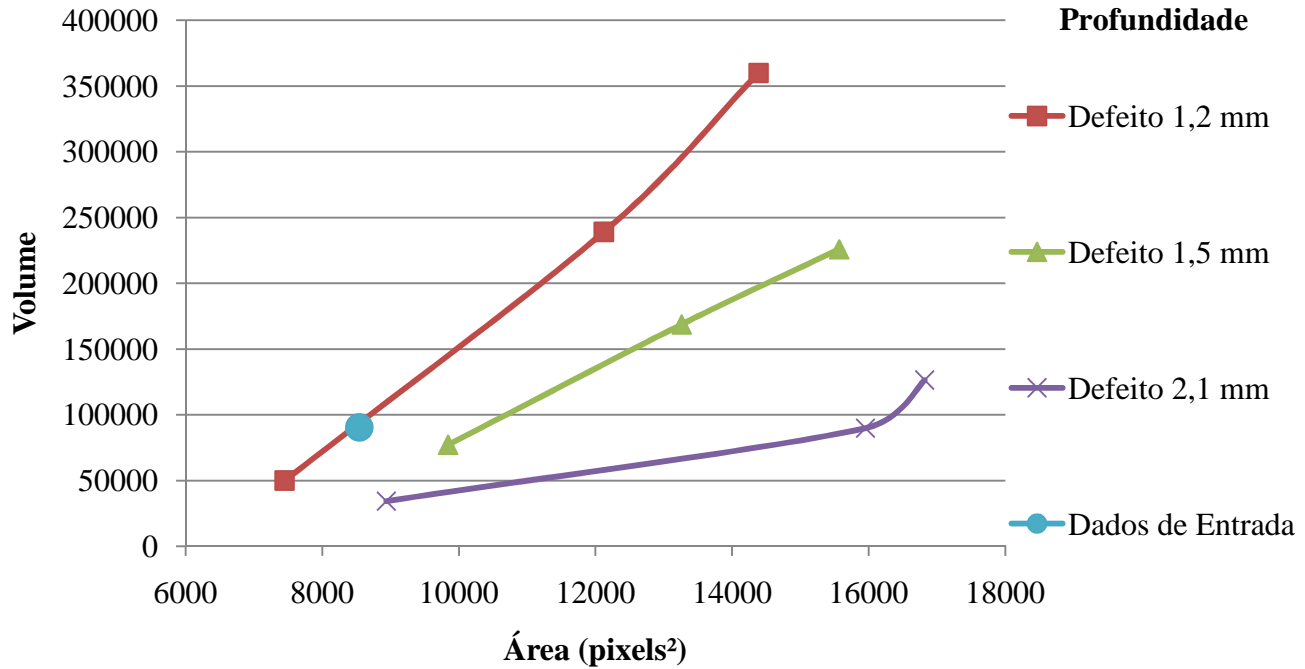


Figura 46: Gráfico do comportamento do parâmetro Volume em função da Área dos três últimos defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal.

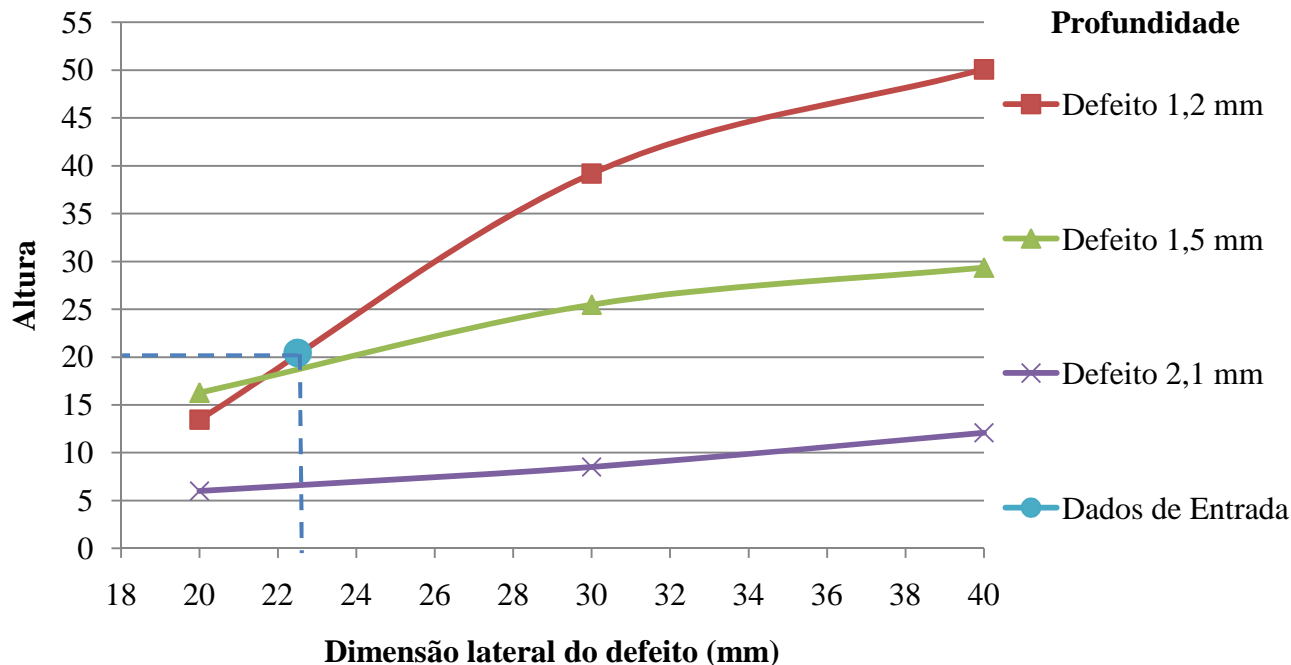


Figura 47: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito dos três últimos defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal.

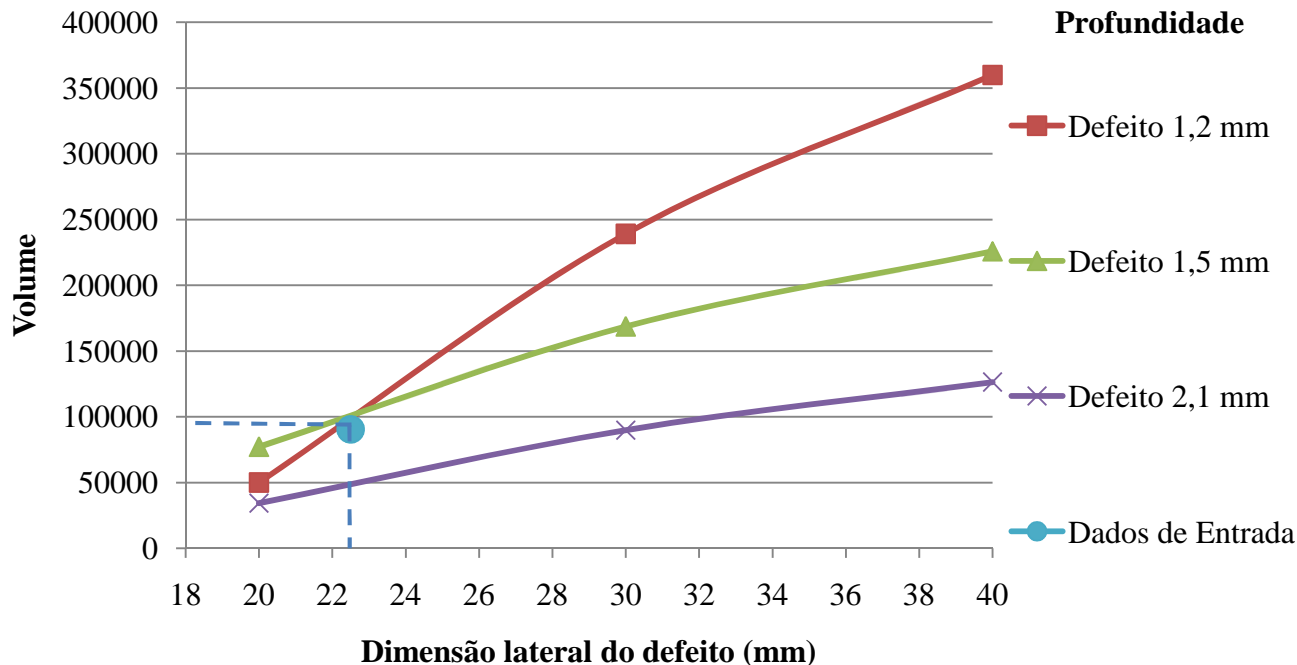


Figura 48: Gráfico do comportamento do parâmetro Volume em função da dimensão lateral do defeito dos três últimos defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados para a validação do método utilizado, na direção horizontal.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo apresenta as conclusões gerais do trabalho e algumas recomendações para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

A principal motivação deste trabalho foi buscar e avaliar um caminho para tomar a inspeção de defeitos em materiais compósitos com shearografia menos dependente da experiência e habilidade do inspetor. Mais especificamente, buscou-se uma forma quantitativa de determinar a dimensão lateral e profundidades de defeitos localizados entre as camadas do material compósito.

Para isso, foi otimizado e padronizado um procedimento de ensaios usando shearografia com excitação térmica para evidenciar a presença de defeitos em placas de materiais compósitos. Para formar uma base de dados que permitisse a quantificação de parâmetros dos defeitos foi utilizado um conjunto já existente de corpos de prova com defeitos artificiais de forma quadrada, com dimensões e profundidades variadas e conhecidas. Quatro parâmetros quantitativos relacionados com cada defeitos foram extraídos das imagens de shearografia através de um software especialmente desenvolvido.

Os parâmetros da base de dados deram origem a quatro gráficos:

- a) Área x Altura
- b) Área x Volume
- c) Altura x Dimensão lateral
- d) Volume x Dimensão lateral

Um algoritmo que usa estes quatro gráficos para determinar as dimensões e profundidade de defeitos quadrados foi desenvolvido e avaliado.

Os resultados obtidos permitem determinar dimensão lateral e profundidades de defeitos em um corpo de prova independente dos usados para formar a base de dados. Algumas limitações foram observadas.

Do conjunto do trabalho foi possível chegar a algumas conclusões:

- a) O caminho desenvolvido se mostrou de fácil aplicação sem pressupor conhecimentos ou julgamentos especializados do inspetor. Embora não tenha sido o foco

deste trabalho, é possível tornar a aplicação do algoritmo automática

- b) As conclusões a seguir são válidas apenas para defeitos de forma quadrada e artificialmente produzidos da maneira descrita deste trabalho. A aplicabilidade do caminho desenvolvido em outras formas e tipos de defeitos deve ser objeto de futura investigação
- c) Com o carregamento térmico padronizado e adotado neste trabalho, os parâmetros Altura e Volume apresentam variações adequadas em função da dimensão lateral do defeito para a profundidade de 0,6 mm. Para defeitos com profundidades de 1,2 mm ou maiores, as variações destes mesmos parâmetros são insuficientes, limitando o desempenho do algoritmo nestas profundidades. Este efeito é ainda mais intenso nos defeitos com dimensão lateral inferior a 30 mm
- d) O conjunto de corpos de prova existentes não foi adequado para compor uma base de dados completa, que permitisse determinar com mais segurança a profundidade de defeitos até 1,2 mm de profundidade. Um número maior de profundidades intermediárias deveria estar disponível, como por exemplo, com incrementos de 0,2 mm
- e) Dentre os algoritmos usados para extrair parâmetros quantitativos os defeitos obteve-se melhor resposta usando a integração direcional seguida de um ajuste da função exponencial (Método 02). Os melhores resultados foram obtidos com deslocamento lateral na direção horizontal
- f) Com os poucos casos avaliados não foi possível notar uma diferença significativa no comportamento do algoritmo para deslocamentos laterais na horizontal ou vertical. A principal diferença de desempenho do algoritmo é mais influenciada pela qualidade das imagens. A disposição lateral do sistema de aquecimento na configuração padronizada adotada parece ser o fator que mais influenciou a qualidade das imagens obtidas.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Limitações de ordens diversas impediram que o tema desenvolvido neste trabalho fosse esgotado. Há muito mais o que ser feito. Após a realização deste trabalho, através dos resultados obtidos foram levantadas algumas sugestões para trabalhos futuros como:

1. Reestruturar o conjunto de corpos de prova para abranger maior quantidade de profundidade de defeitos, como por exemplo, a sugestão apresentada na Tabela 9:

Tabela 9: Tabela com possíveis profundidades (mm) de defeitos para realização de uma melhor análise.

0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

2. Avaliar a resposta do procedimento a outras formas geométricas de defeitos
3. Avaliar a resposta do procedimento a outros tipos de defeitos que mais se aproximem de defeitos naturais encontrados em materiais compósitos
4. Desenvolver e avaliar procedimentos de carregamento térmico mais intenso que apresentem respostas mais intensas para defeitos mais profundos
5. Avaliar a aplicabilidade do procedimento desenvolvido em revestimentos de materiais compósitos
6. Automatizar a formação do banco de imagens de shearografia e automatizar o procedimento de busca com o qual seja possível identificar os tipos, extensão e severidade desses defeitos.

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI JR, A. G. et al. Detecção de falhas de adesão entre mantas poliméricas e dutos usando interferometria de deslocamento lateral. **XXIV - Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção**, São Paulo, Jul 2006.

ALBERTAZZI JR, A. G.; FANTIN, A. L. **Metrologia Speckle - Slide de Aula - 3º Trimestre**. Labmetro/UFSC. Florianópolis. 2009.

ALBERTAZZI JR, A. G.; VIOTTI, M. R. **Nota de aula: Holography and Speckle Methods**. Florianópolis: UFSC, 2010.

ALBUQUERQUE, R. J. **Desenvolvimento de Material Compósito para Reforço de Dutos de Aço**. Tese. (Doutorado em Ciência em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005.

ALMEIDA, E. G. R. D. **Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados compósitos sólidos de matriz polimérica reforçada com fibras de carbono**. Dissertação. (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). São Carlos: IFSC/USP, 2010.

AMBU, R. et al. Assessment of NDT interferometric techniques for impact damage detection in composite laminates. **Composites Science and Technology**, Cagliari, v. 66, p. 199-205, jun 2005.

AMERON. **Site da Ameron B.V.**, 2011. Disponível em: <<http://www.ameron-fpg.com/?t>>. Acesso em: 27 set 2011.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por Ultra-Som**. ABENDE. São Paulo. 2002.

ANGELIS, G. D. et al. A new technique to detect defect size and depth in composite structure using digital shearography and unconstrained optimization. **NDT & E International**, Pomezia, v. 45, p. 91-96, Jul 2011.

ASTM. **Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts¹**: D 2563-94. 2002. ed. United States: ASTM International, 1994.

BALASKÓ, M. et al. Classification of defects in honeycomb composite structure of helicopter rotor blades. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, Budapest, v. 542, p. 45-51, feb 2005.

BEPPLER, R. V. **Deteção por Métodos Ópticos de Falha de Adesão de Revestimentos de Materiais Compostos usados na Indústria do Petróleo**. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial). Florianópolis: UFSC, 2006.

BUARQUE, E. N.; D'ALMEIDA, J. R. M. The effect of cylindrical defects on the tensile strength of class fiber/vinil-ester matrix reinforced composite pipes. **Composite Structures**, Rio de Janeiro, v. 79, p. 270-279, mar 2006.

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

CAMPBELL, F. C. **Manufactured Processes for Advanced Composites**. New York: Elsevier, 2004.

CASTELLARES, L. G. Reparo de Dutos Danificados Utilizando Materiais Compósitos. **6ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos**, Agosto 2002.

CAWLEY, P.; ADAMS, R. D. Defect types and non-destructive testing techniques for composites and bonded joints. **Materials Science and Technology**, Bristol, v. 5, p. 413, may 1989.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. 2ª. ed. São Paulo: McGraw-Hill LTDA, v. III, 1986.

CLOCK SPRING®. **Site da Clock Spring Company LP®**, 2011. Disponível em: <<http://www.clockspring.com/>>. Acesso em: 16 Setembro 2011.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. New York Oxford: Oxford University Press, 1994.

FANTIN, A. **Imagem de Interferência - Slides de Aula**. UFSC. Florianópolis. 2009.

FUJIYAMA, R. T.; SOUSA, A. N.; BASTIAN, F. L. Uso de materiais compósitos em reparos de dutos de aço. **2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás**, 15 a 18 Junho 2003.

GASVIK, K. J. **Optical Metrology**. Third. ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2002.

GODOI, W. C. Radiografia e Tomografia Industriais: Estudos em amostras de concreto. **CONTER**, Curitiba, 2010. Disponível em: <http://www.conter.gov.br/?pagina=trabalhos_cientificos>. Acesso em: 08 dez 2011.

GUALBERTO, T.; KITANO, C.; ADAMOWSKI, J. C. **Inspeção de Materiais Compostos Utilizando Ultrassom e Decomposição**. IX INDUSCON / 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. São Paulo: EPUSP. 2010.

HABIB, K. Thermally induced deformations measured by shearography. **Optics & Laser Technology**, Safat, v. 37, p. 509-512, Aug 2005.

HARIHARAN, P.; OREB, B. F.; EIJU, T. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm. **APPLIED OPTICS**, Sydney, v. 26, n°13, p. 2504-2506, Jul 1987.

HEGHT, E. **Óptica**. 2.^a. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian , 2002.

HUNG, Y. Y. Applications of digital shearography for testing composite structures. **Composites Part B: engineering**, Rochester, v. 30, p. 765-773, 1999.

INTEG. **Site da INTEG Pipeline Services**, 2006. Disponível em: <<http://www.integpipelineservices.com/homepage.aspx?elid=232>>. Acesso em: 26 Setembro 2011.

JONES, R. M. **Mechanics of Composite Materials**. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999.

KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials**. Boca Raton London New York: CRC Taylor & Francis Group, 2006.

MALLICK, P. K. **Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufactures, and Design**. Boca Raton London New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.

MARANON, A. et al. Identification of subsurface delaminations in composite laminates. **Composites Science and Tecnology**, Loughborough, v. 67, p. 2817-2826, feb 2007.

MARCELINO, R. D. C. O.; BASTIAN, F. L. Estudo da Adesividade de Material Compósito em Substrato de Aço para Dutos. **2º Congresso Brasileiro da P&D em Petróleo & Gás**, 15 a 18 Junho 2003.

MARTY, P. N.; DESAI, N.; ANDERSSON, J. NDT of kissing bond in aeronautical structures, CSM Materialteknik AB, Linköping, Sweden.

MASCHIO, C. **Tomografia computadorizada de raios-x como técnica de ensaios não destrutivos de materiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Campinas: UNICAMP, 1997.

MELO, A. G. B. D. **Inspeção em juntas coladas de tubos feitos por compósitos por termografia ativa pulsada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Porto Alegre: UFRGS, 2009.

MENDES, R. **A tomografia computadorizada de raios x como método não destrutivo de análise volumétrica de concreto: Estudo de caso em testemunho de concreto da usina hidroelétrica Mourão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Curitiba: UFPR, 2010.

MOSER, E. **Detection Capabilities of State-of-the-Art Shearography Systems**. 17th World Conference on Nondestructive Testing. Shanghai: [s.n.]. 2008. p. 25-28.

NETO, C. J. **Termografia aplicada a detecção e dimensionamento de descontinuidades em tubulações de material compósito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Porto Alegre: UFRGS, 2009.

NRI®. **Site da Neptune Research Inc®**, 2008. Disponível em: <<http://www.neptuneresearch.com/>>. Acesso em: 13 Setembro 2011.

OKAMOTO JR, J. et al. Autonomous System for Oil Pipelines Inspection. **Mechatronics**, São Paulo, p. 731-743, 1999.

OLIVEIRA, J. M. D. et al. Caracterização de materiais usando dados de tomografia computadorizada por transmissão de raios gama. **Ciências Exatas e da Terra, Agrária e Engenharia**, Sorocaba, v. 14 n° 1, p. 7-15, abr 2008.

PACHECO, M.; GOYAL, D. X-ray computed tomography for non-destructive failure analysis in microelectronic. **Reliability Physics Symposium (IRPS), 2010 IEEE International**, Anaheim, CA, 17 jun 2010. 252-258.

PANDURANGAN, P.; BUCKNER, G. D. Defect identification in GRID-LOCK® joints. **NDT & E International**, Raleigh, v. 40, p. 347-356, jan 2007.

PRESS, W. H. et al. **Numerical Recipes in C**. Second. ed. Massachusetts: Cambridge University Press, 1992.

RAMAN, R. K. S.; BAYLES, R. Detection of decohesion/failure of paint/coating using electronic speckle pattern interferometry. **Engineering Failure Analysis**, Melbourne; Washington, v. 13, p. 1051-1056, sep 2005.

RANDOLF, H.; FUCHS, T.; UHLMANN, N. X-rays based methods for non-destructive testing and material characterization. **Nuclear Instruments e methods in physics research, section A**, Mach, 2008.

REDDY, J. N. **Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells**. Boca Raton London New York: CRC Press LLC, 2004.

REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. **Compósitos Estruturais: Tecnologia e Prática**. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2011.

RUST ENGENHARIA. **Site do Grupo Rust & Resinar®**, 2011. Disponível em: <<http://www.rust.com.br/>>. Acesso em: 14 Junho 2011.

RUST®. **Site do Grupo Rust & Resinar®**, 2011. Disponível em: <<http://www.rust.com.br/index.asp>>. Acesso em: 14 Junho 2011.

SANTOS, F.; VAZ, M.; MONTEIRO, J. A new set-up pulsed digital shearography applied to defect detection in composite structures. **Optics and Lasers in Engineering**, Porto, v. 42, p. 131-140, Jul 2004.

SANTOS, G. H.; CIOFFI, M. O. H.; VOORWALD, H. J. C. **Inspeção por ultra-som dos compósitos plain-weave de carbono/RMT6 e plain weave de carbono/SC-79**. XXI Congresso de Iniciação Científica da UNESP. Guaratinguetá: FAPESP. 2009. p. 8568-8571.

SANTOS, Y. et al. **Deteção de defeitos em chapas cladeadas por ensaio não destrutivo ultrassônico**. V CONNEPI 2010. Macéio: IFAL. 2010.

SCHÖNTAG, J. M. **Caracterização da profundidade de defeitos em materiais compósitos utilizando shearografia com carregamento vibracional**. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial). Florianópolis: UFSC, 2009.

SHIJIU, J. et al. **The study of detection technology and instrument of buried pipeline-coating defaults**. 4th World Congress on Intelligent Control and Automation. Shanghai: [s.n.]. 2002. p. 10-14.

STEINCHEN, W.; YANG, L. **Digital Shearography Teory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry**. Bellingham, Washington: SPIE, 2003.

SUTÉRIO, R. **Caracterização de Constantes Elásticas de Materiais Isotrópicos por Holografia Óptica Eletrônica combinada ao Método de Ressonância Mecânica**. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial). Florianópolis: UFSC, 1998.

TARPANI, J. R. et al. **Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados de matriz polimérica reforçados por fibra de carbono. Polímeros. Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 19, n° 4, p. 318-328, 2009.

TOH, S. L. et al. Flaw detection in composites using time-average shearography. **Optics & Laser Technology**, Singapore, v. 23, n° 1, p. 25-30, Jun 1991.

VELOSO, A. L. "**Termografia Infravermelha**". Departamento de Engenharia Elétrica, seminários: UFPR, 2008.

WILLEMANN, D. **Shearografia - Slide de Aula - 3º Trimestre**. Labmetro/UFSC. Florianópolis. 2009.

WILLEMANN, D. P. **Desenvolvimento de uma Roseta Óptica para Medição de Tensões e Deformações utilizando Holografia Eletrônica**. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial). Florianópolis.: UFSC, 2002.

WILLEMANN, D. P.; ALBERTAZZI JR, A. G.; MENICONI, L. C. D. M. Um sistema prático para identificação e localização de defeitos em revestimentos de materiais compósitos utilizando shearografia. **9ª Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos**, Salvador, Jun 2007.

YANG, L. X.; HUNG, Y. Y. **Digital Shearography For Nondestructive Evaluation and Application in Automotive and Aerospace Industries**. 16th WCNDT 2004 - World Conference on NDT. Montreal: NDT net. 2004.

YING, H. **Using x-ray computed tomography to quatify damage of hot-mix asphalt in the dynamic complex modulus and flow number tests**. Thesis (Master of Science in Civil Engineering). Los Angeles: Louisiana State University, 2010.

APÊNDICE A
DEFEITOS VISUAIS

Tabela 10: Relação de defeitos visuais (ASTM, 1994).

DEFEITO	DEFINIÇÃO	NÍVEL VISUAL DE ACEITAÇÃO		
		NÍVEL I	NÍVEL II	NÍVEL III
<i>Chip</i> (Rachadura)	Uma pequena ruptura na borda ou na superfície.	Nenhum	Dimensão máxima da ruptura de 3,0 mm.	Dimensão máxima da ruptura de 6,5 mm.
<i>Crack</i> (Rachadura)	Uma separação real do laminado, visível na superfície oposta, e estende-se através da espessura.	Nenhum	Nenhum	Nenhum
<i>Crack, superfície</i> (Rachadura)	Rachadura existente apenas na superfície do laminado.	Nenhum	Comprimento máximo de 3,0 mm.	Comprimento máximo de 6,5 mm.
<i>Crazing</i> (Fissura)	Rachaduras finas na superfície ou sobre a superfície do laminado.	Nenhum	Dimensão máxima da fissura de 13 mm.	Dimensão máxima da fissura de 25 mm.
Delaminação, Borda	Separação das camadas do material na borda do laminado.	Nenhum	Dimensão máxima de 3,0 mm.	Dimensão máxima de 6,5 mm.

Delaminação, Interna	Separação das camadas do material laminado.	Nenhum	Nenhum	Nenhum
<i>Dry-spot</i> (Local seco)	Área da superfície incompleta, onde o reforço não foi bem molhado com resina.	Nenhum	Diâmetro máximo de 9,5 mm.	Diâmetro máximo de 14 mm.
Inclusão externa (Metálica)	São inclusões de partículas metálicas no laminado que são externas a sua composição.	Nenhum	Nenhum. Se for elétrico use dimensão máxima de 0,8 mm, 1/0,09 m ² . Se for mecânico use dimensão máxima de 0,08 mm, 1/0,09 m ² .	Nenhum. Se for elétrico use dimensão máxima de 1,5 mm, 1/0,09 m ² . Se for mecânico use dimensão máxima de 1,5 mm, 1/0,09 m ² .
Inclusão externa (Não metálica)	São inclusões de partículas não metálicas no laminado que aparece a sua composição.			
Fratura	Ruptura da superfície do laminado sem uma completa penetração.	Nenhuma	Dimensão máxima de 21 mm.	Dimensão máxima de 29 mm.
Bolha de ar (Vazios)	Aprisionamento de ar de dentro e entre as camadas do reforço, geralmente tem um formato esférico.	Nenhum	Diâmetro máximo de 3,0 mm. Altura da superfície não pode estar fora da tolerância descrita no projeto.	Diâmetro máximo de 3,0 mm. Altura da superfície não pode estar fora

				da tolerância descrita no projeto.
<i>Burned</i>	Decomposição térmica através de algumas descolorações, distorções ou destruição da superfície do laminado.	Nenhum	Nenhum	Nenhum
<i>Fish-eye</i> (Olho de peixe)	Pequena massa globular que não é completamente homogênea ao redor do material e é praticamente evidente em um material transparente ou translúcido.	Nenhum	Diâmetro máximo de 9,5 mm.	Diâmetro máximo de 13 mm.
Falta de material	Ocorre normalmente na borda do laminado, onde o reforço não foi bem molhado de resina.	Nenhum	Diâmetro máximo de 6,5 mm.	Diâmetro máximo de 9,5 mm.
<i>Orange-pell</i> (Casca de laranja)	Superfície irregular que se assemelha a uma casca de laranja.	Nenhum	Diâmetro máximo de 14 mm.	Diâmetro máximo de 29 mm.
<i>Pimple</i>	Elevação cônica, afiada e pequena, sobre a superfície do laminado.	Nenhum	Nenhum	Diâmetro máximo de 3,0 mm.
<i>Pit</i> (Cratera) (Pinhole)	Pequena cratera na superfície do laminado, com largura de aproximadamente na mesma ordem de grandeza da sua profundidade.	Nenhum	Diâmetro máximo de 0,4 mm. Profundidade menor que 1% da espessura	Diâmetro máximo de 0,8 mm. Profundidade

			da parede.	menor que 20% da espessura da parede.
Porosidade (Pinhole)	Presença visível de várias crateras (Pinholes).	Nenhum	Máximo de 25 crateras pequenas na área porosa de tamanho listado acima.	Máximo de 50 crateras pequenas na área porosa de tamanho listado acima.
Pre-gel	Uma camada extra não intencional de resina curada sobre uma parte da superfície do laminado.	Nenhum	Dimensão máxima de 6,5 mm. Altura da superfície não pode estar acima da tolerância descrita no projeto.	Dimensão máxima de 13 mm. Altura da superfície não pode estar acima da tolerância descrita no projeto.
<i>Resin- pocket</i>	Uma acumulação aparente de excesso de resina em uma pequena área localizada dentro do laminado.	Nenhum	Diâmetro máximo de 3,0 mm.	Diâmetro máximo de 6,5 mm.
<i>Resin-rich</i>	Material com pouco reforço nas bordas do laminado moldado.	Nenhum	Máximo de 0,4 mm a partir da borda.	Máximo de 0,8 mm a partir da

				borda.
<i>Shrink-mark</i> (<i>Sink</i>)	Desnívelamento na superfície do laminado moldado onde tem retração a partir do molde.	Nenhum	Diâmetro máximo de 9,5 mm. Profundidade não pode ser maior que 25% da espessura da parede.	Diâmetro máximo de 14 mm. Profundidade não pode ser maior que 25% da espessura da parede.
<i>Wash</i>	Área onde o reforço do plástico moldado moveu-se inadvertidamente durante a finalização do molde resultando em uma área abundante em resina.	Nenhum	Diâmetro máximo de 30 mm.	Diâmetro máximo de 6,5 mm.
<i>Wormhole</i>	Aprisionamento de ar alongado que está dentro ou próximo da superfície do laminado e pode estar coberto por uma película fina de resina curada.	Nenhum	Diâmetro máximo de 3,0 mm.	Diâmetro máximo de 6,5 mm.
<i>Wrinkles</i> (Rugosidade)	Uma imperfeição no laminado que tem a aparência de uma onda moldada em uma ou mais camadas do tecido ou outro material impróprio.	Nenhum	Comprimento máximo do lado da superfície e do lado oposto é de 13 mm. A profundidade menor que 10% da	Comprimento máximo do lado da superfície e do lado oposto é de 25 mm.

			espessura da parede.	A profundidade menor que 15% da espessura da parede.
Arranhadura	Uma marca rasa, ranhuras, entalhes sendo causado por manuseio e armazenamento impróprio.	Nenhum	Comprimento máximo de 25 mm. Profundidade máxima de 0,125 mm.	Comprimento máximo de 25 mm. Profundidade máxima de 0,255 mm.
<i>Shot</i>	Preenchimento incompleto fora das condições ideais.	Nenhum	Nenhum	Nenhum

APÊNDICE B

Variação do caminho óptico devido à deformação do objeto

A Figura 49 mostra a variação do caminho óptico devido ao deslocamento relativo dos pontos P_1 e P_2 após a deformação do objeto.

A fonte de luz coerente (laser) é representada por $S (X_s, Y_s, Z_s)$ e o ponto de sobreposição no sensor de imagem da câmera é indicada por $C (X_c, Y_c, Z_c)$. Após a aplicação do carregamento, os pontos $P_1 (x, y, z)$ e $P_2 (x+\delta x, y+\delta y, z+\delta z)$ sofrem deslocamentos representados por (u, v, w) e $(u+\delta u, v+\delta v, w+\delta w)$ (STEINCHEN; YANG, 2003).

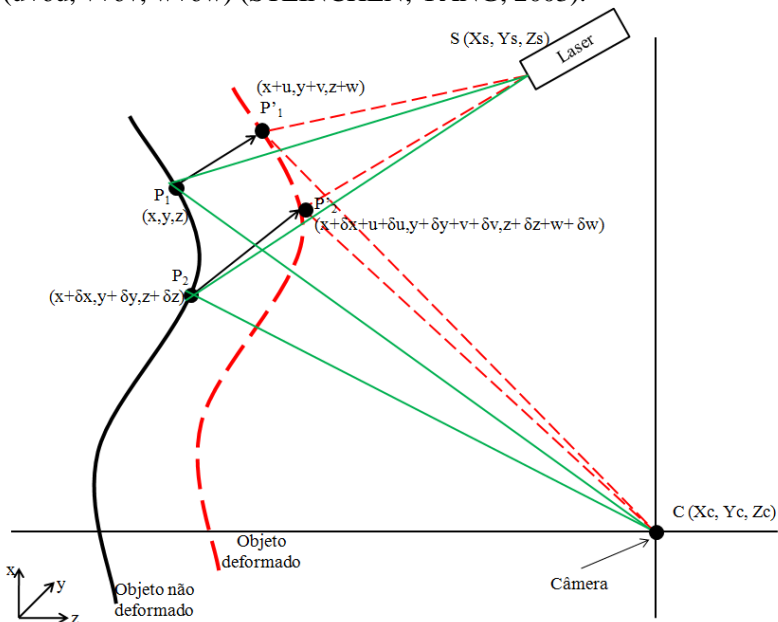


Figura 49: Variação do caminho óptico para dois pontos diferentes da superfície (ANGELIS; MEO; *et al.*, 2011), (STEINCHEN; YANG, 2003).

As equações (16), (17), (18), (19), (20), (21) e (22) mostram as deformações sofridas pela superfície do objeto em função das derivadas das componentes do campo e deslocamentos (STEINCHEN; YANG, 2003).

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\delta u}{\delta x} \quad (16)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\delta v}{\delta y} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\delta w}{\delta z} \quad (18)$$

$$\varepsilon_{xy} = 2 \left(\frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \right) \quad (19)$$

$$\varepsilon_{yz} = 2 \left(\frac{\delta w}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta z} \right) \quad (20)$$

$$\varepsilon_{xz} = 2 \left(\frac{\delta w}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta z} \right) \quad (21)$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\delta u}{\delta x} \quad (22)$$

A mudança no caminho óptico para o ponto P_1 (δL_1), com raio de luz partindo do laser da posição S (X_s, Y_s, Z_s) para câmera C (X_c, Y_c, Z_c) é descrita na equação (23) (STEINCHEN; YANG, 2003).

$$\delta L_1 = (SP'_1 + P'_1C) - (SP_1 + P_1C) \quad (23)$$

A equação (24) representa a variação de caminho óptico no P_2 (δL_2):

$$\delta L_2 = (SP'_2 + P'_2C) - (SP_2 + P_2C) \quad (24)$$

A mudança da fase ($\Delta\phi$) está relacionada com a mudança de percurso entre os dois pontos, e pode ser expressa pela equação (25) (STEINCHEN; YANG, 2003):

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\delta L_1 - \delta L_2) \quad (25)$$

Sendo que:

λ é o comprimento de onda do laser.

Assumindo que o tamanho do objeto é muito menor que as distâncias do laser para o objeto (R_s) e da câmera para o objeto (R_c), obtém-se as seguintes relações aproximadas (STEINCHEN; YANG, 2003). Obtida nas equações (26) e (27).

$$SP'_1 \approx SP_1 \approx SO = R_s \quad (26)$$

$$P_1C \approx P'_1C \approx OC = R_c \quad (27)$$

Em que:

O é o ponto de referência ao objeto.

A variação da fase relativa é dada pela equação (28):

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\delta L_1 - \delta L_2) = A\delta u + B\delta v + C\delta w \quad (28)$$

Em que:

A, B e C são chamados de coeficiente de sensibilidade na direção X, Y e Z, respectivamente dados pelas equações (29), (30) e (31) (STEINCHEN; YANG, 2003):

$$A = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{X_s - x}{R_s} + \frac{X_c - x}{R_c} \right) \quad (29)$$

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{Y_s - y}{R_s} + \frac{Y_c - y}{R_c} \right) \quad (30)$$

$$C = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{Z_s - z}{R_s} + \frac{Z_c - z}{R_c} \right) \quad (31)$$

Em que:

As coordenadas cartesianas referentes ao ponto P_l , R_s , R_c são x , y e z , respectivamente e são constantes e dependem do arranjo óptico da shearografia, nas quais essas distâncias foram calculadas nas equações

(26) e (27), respectivamente. Estas quantidades serão reescritas da seguinte forma nas equações (32) e (33):

$$R_s = \sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2} \quad (32)$$

$$R_c = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2} \quad (33)$$

A variação de fase decorrente da respectiva variação do caminho óptico para um deslocamento lateral na direção x é dada pela equação (34), sendo reescrita a partir das equações (24) e (32)

$$\Delta\phi_x = \left(A \frac{\delta u}{\delta x} + B \frac{\delta v}{\delta x} + C \frac{\delta w}{\delta x} \right) \delta x \quad (34)$$

Analogamente na direção y , temos que a equação (35) é dada a partir das equações (27) e (33).

$$\Delta\phi_y = \left(A \frac{\delta u}{\delta y} + B \frac{\delta v}{\delta y} + C \frac{\delta w}{\delta y} \right) \delta y \quad (35)$$

APÊNDICE C

**GRÁFICOS DO PARÂMETRO ALTURA UTILIZANDO OS
MÉTODOS 01 E 03 E OS BLOCOS DE MEDIÇÕES I E III, NA
DIREÇÃO VERTICAL E HORIZONTAL.**

A Tabela 11 indica as combinações realizadas para de cada bloco de medição com o método utilizado, O conjunto abaixo indicado por uma elipse é exatamente o conjunto escolhido no procedimento utilizado, discutido capítulo 5. Na sequência são apresentados os gráficos dessas combinações.

Tabela 11: Tabela com as combinações do Bloco de Medições e os Métodos de Quantificação.

BM 01	M 01	BM 01	M 02	BM 01	M 03
BM 02	M 01	BM 02	M 02	BM 02	M 03
BM 03	M 01	BM 03	M 02	BM 03	M 03

BM = BLOCO DE MEDIÇÃO

M = MÉTODO DE QUANTIFICAÇÃO

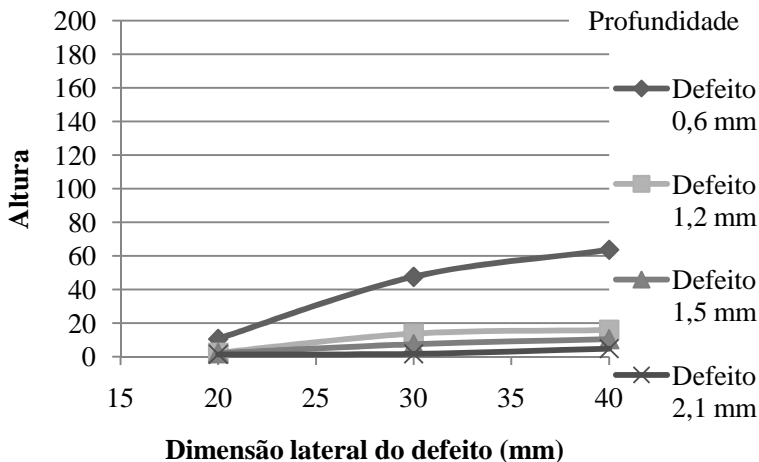


Figura 50: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições I e o Método 01, na direção horizontal.

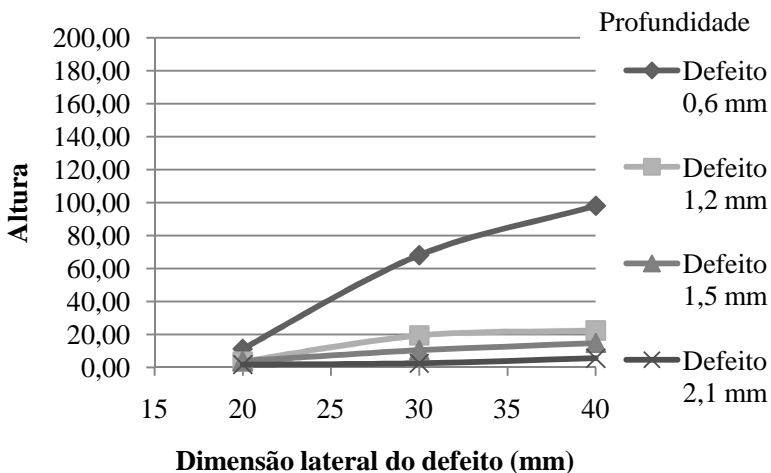


Figura 51: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições II e o Método 01, na direção horizontal.

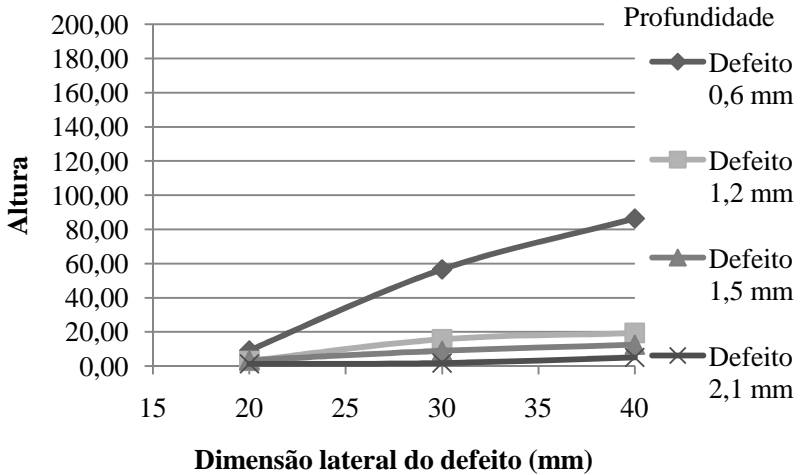


Figura 52: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições III e o Método 01, na direção horizontal.

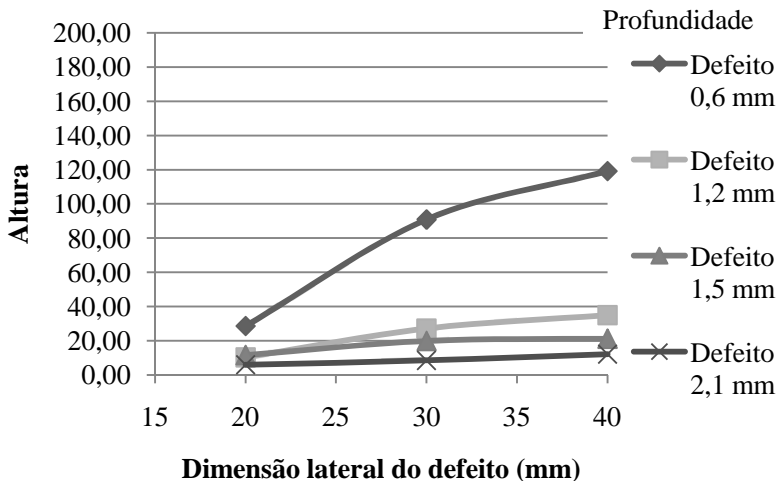


Figura 53: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições I e o Método 02, na direção horizontal.

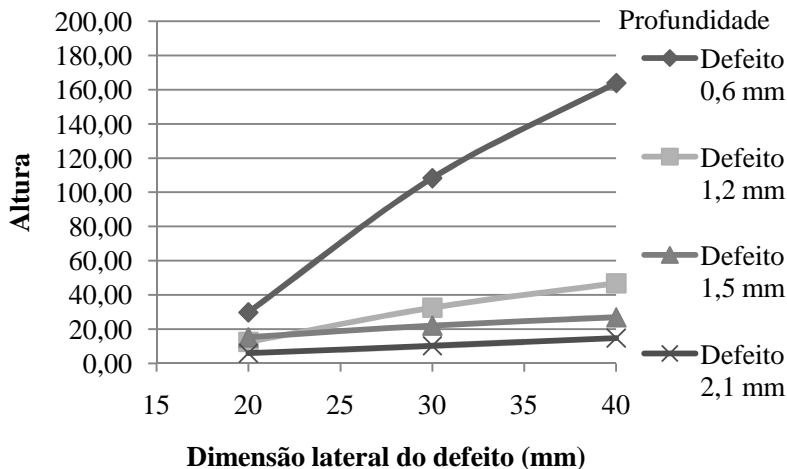


Figura 54: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições III e o Método 02, na direção horizontal.

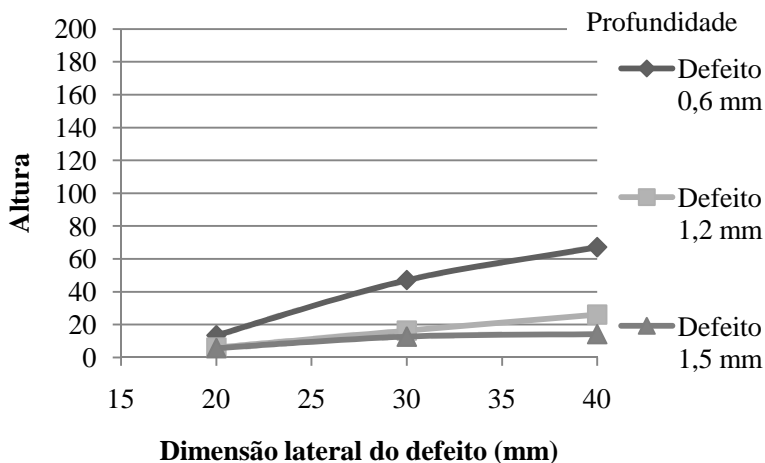


Figura 55: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições I e o Método 03, na direção horizontal.

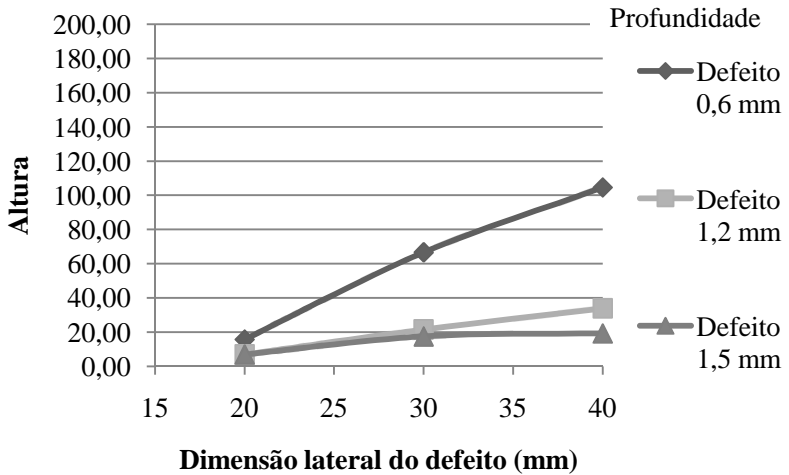


Figura 56: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições II e o Método 03, na direção horizontal.

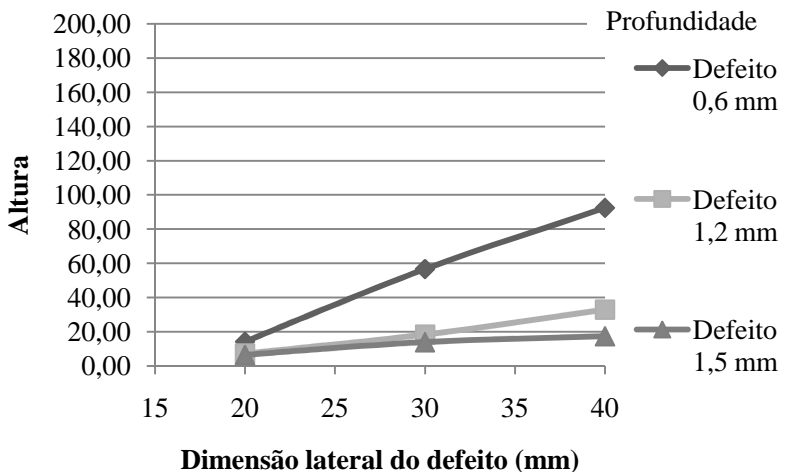


Figura 57: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições III e o Método 03, na direção horizontal.

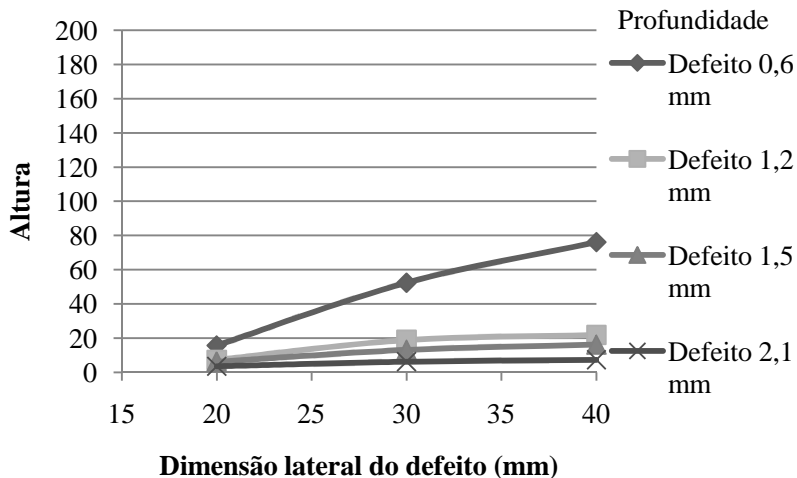


Figura 58: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições I e o Método 01, na direção vertical.

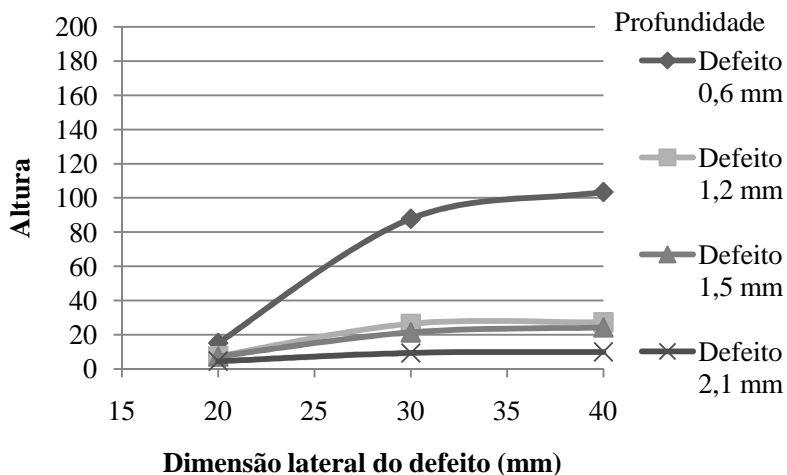


Figura 59: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições II e o Método 01, na direção vertical.

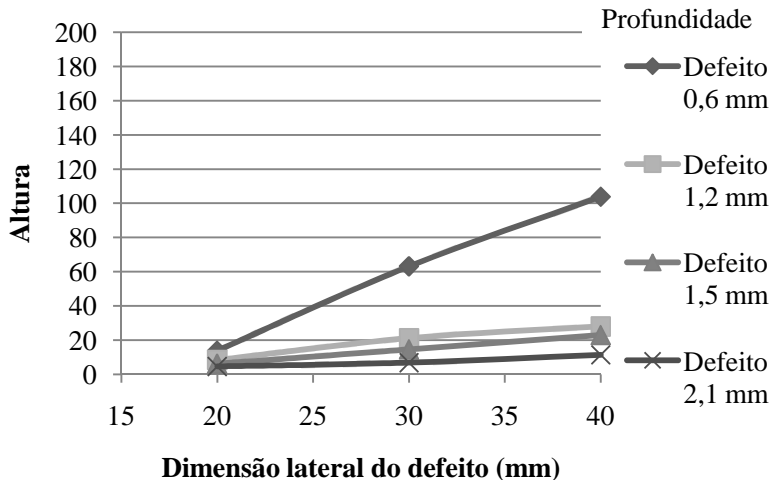


Figura 60: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições III e o Método 01, na direção vertical.

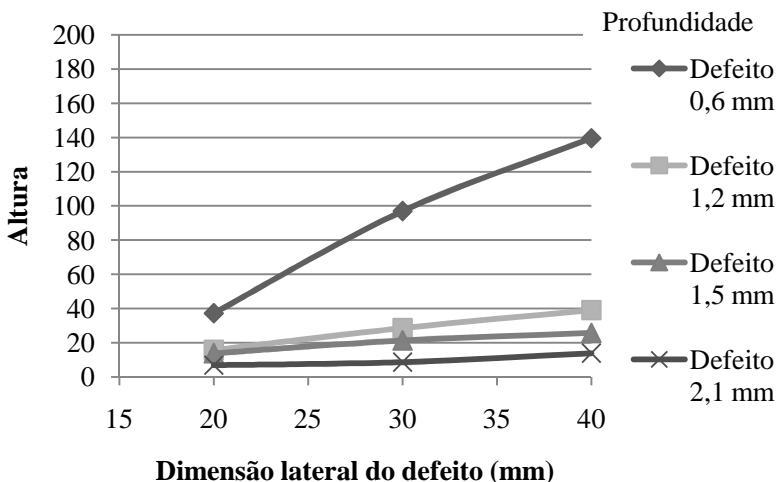


Figura 61: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições I e o Método 02, na direção vertical.

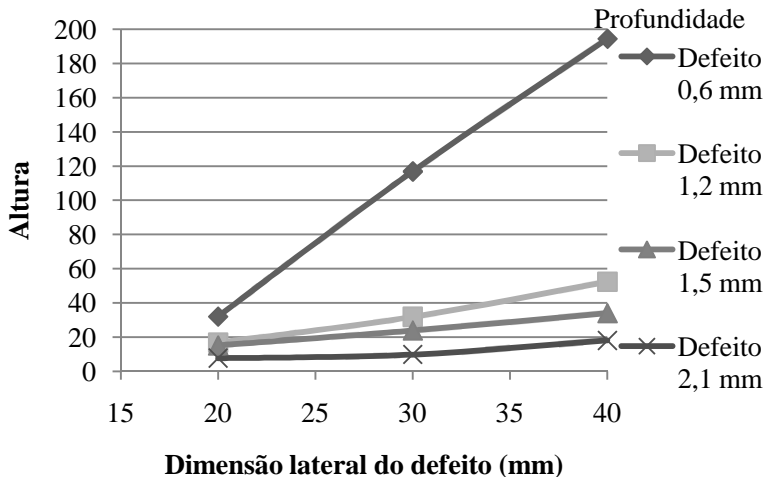


Figura 62: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições III e o Método 02, na direção vertical.

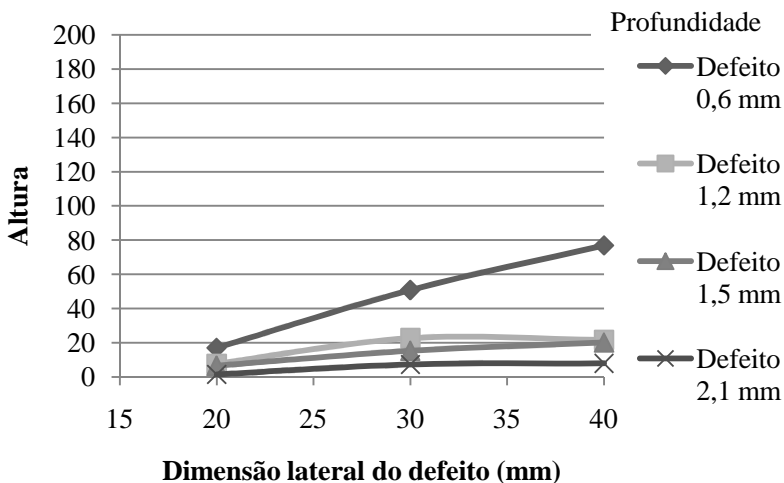


Figura 63: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições I e o Método 03, na direção vertical.

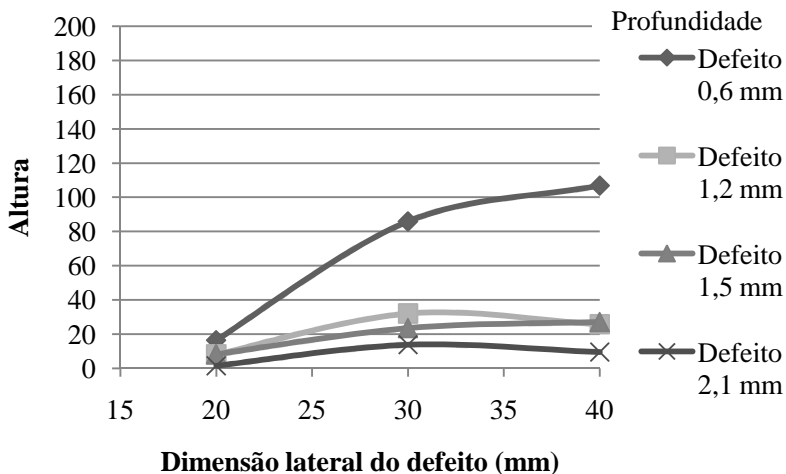


Figura 64: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições II e o Método 03, na direção vertical.

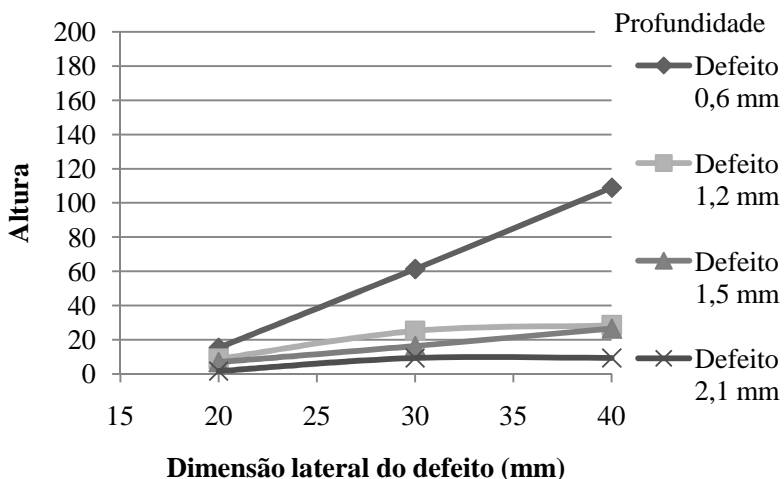


Figura 65: Gráfico de comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral do defeito para as quatro profundidades usando o Bloco de Medições III e o Método 03, na direção vertical.

APÊNDICE D

Gráficos dos três últimos defeitos com profundidades diferentes e com a entrada de dados do defeito de profundidade de 1,5 mm, na direção horizontal. Para esse defeito o procedimento proposto não foi bem sucedido, como se pode observar nos gráficos das Figuras 66, 67, 68 e 69.

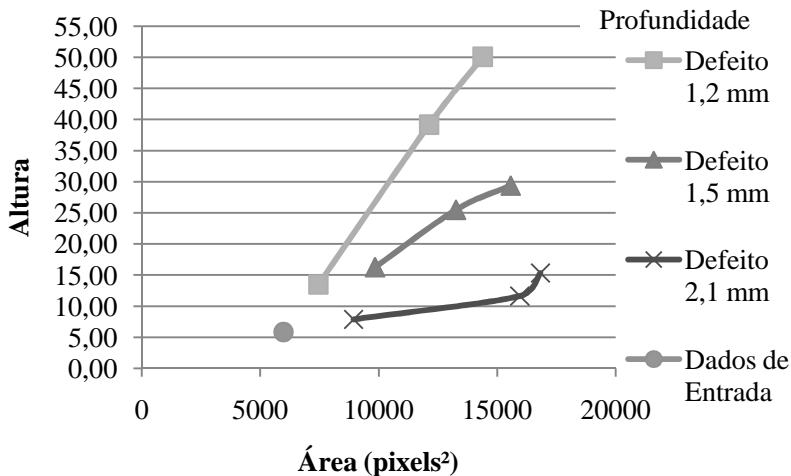


Figura 66: Gráfico do comportamento do parâmetro **Altura** em função da **Área** dos três últimos defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados, na direção horizontal.

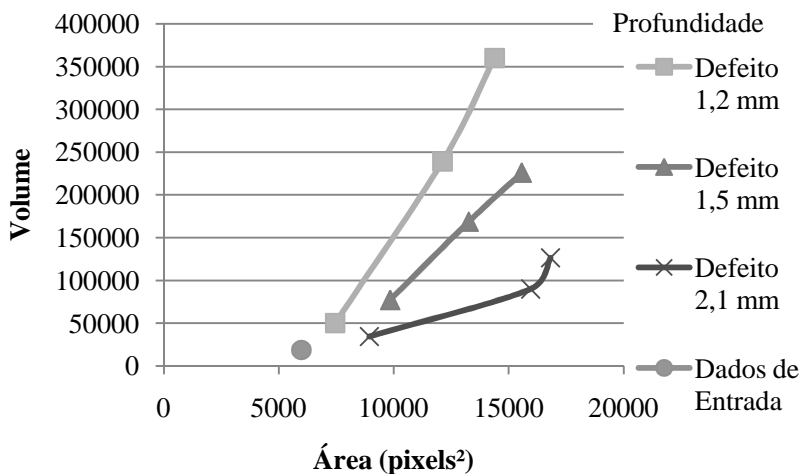


Figura 67: Gráfico do comportamento do parâmetro **Volume** em função da **Área** dos três últimos defeitos com profundidade diferentes e com a entrada de dados, na direção horizontal.

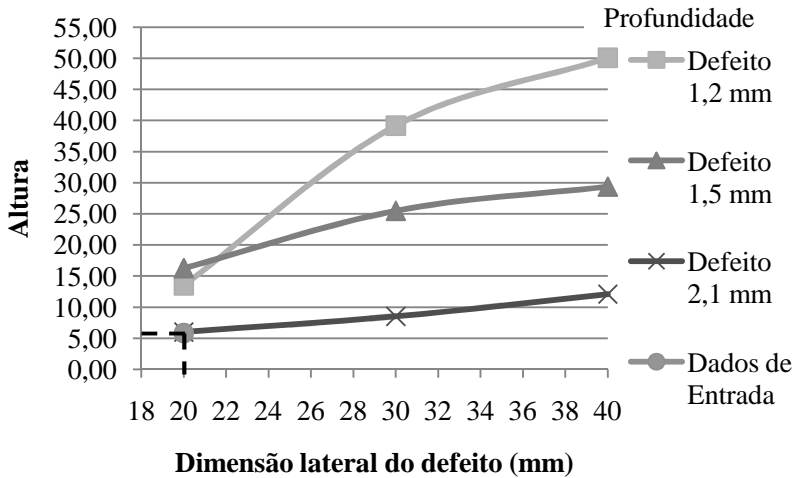


Figura 68: Gráfico do comportamento do parâmetro Altura em função da dimensão lateral dos três últimos defeitos com profundidades diferentes e com a entrada de dados, na direção horizontal.

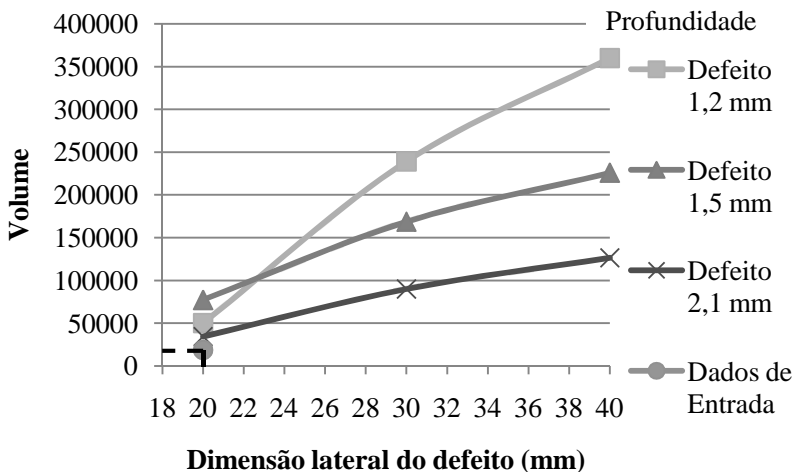


Figura 69: Gráfico do comportamento do parâmetro Volume em função da dimensão lateral dos três últimos defeitos com profundidades diferentes e com a entrada de dados, na direção horizontal.

ANEXO A

DESENHO ESQUEMÁTICO DO CORPO DE PROVA

Na Figura 70 é representado o desenho esquemático do corpo de prova contendo defeitos quadrados com 30 mm de dimensão lateral. Nele constam os cinco defeitos de profundidades diferentes utilizados na fase de avaliação deste trabalho. Os demais desenhos dos corpos de provas podem ser vistos em (SCHÖNTAG, 2009).

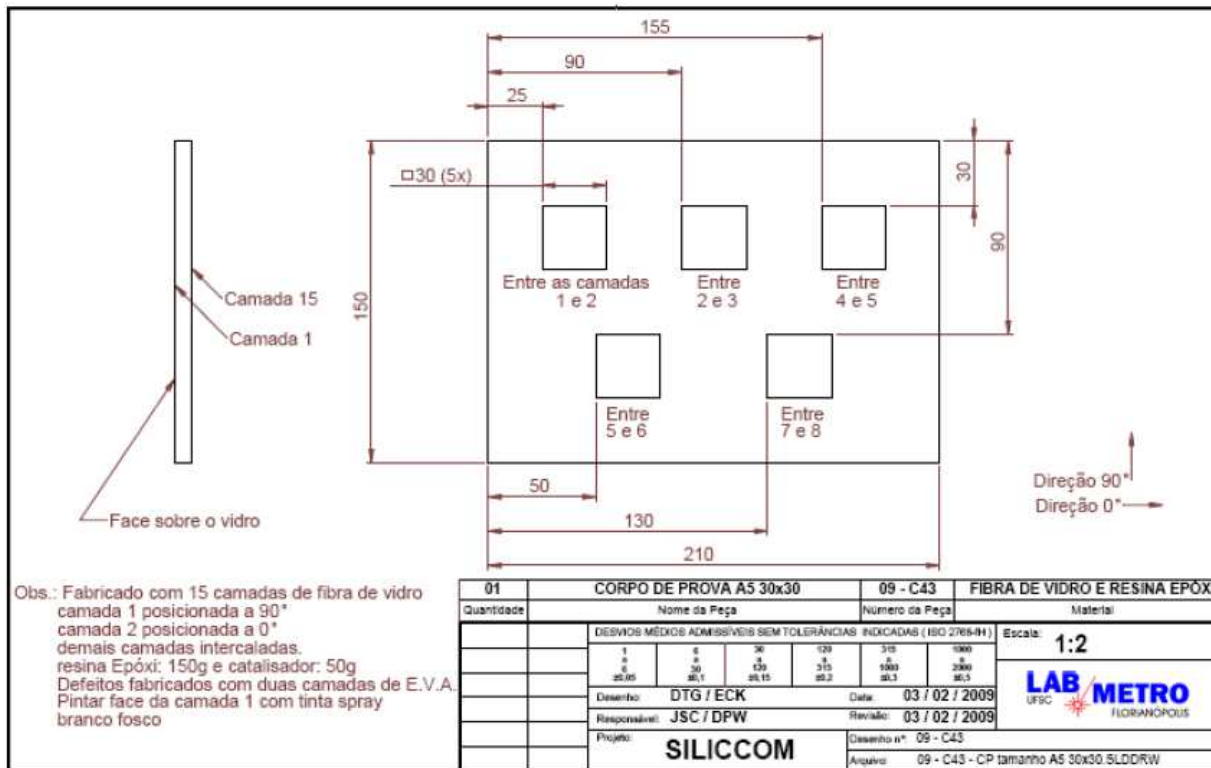


Figura 70: Desenho esquemático do corpo de prova (SCHÖNTAG, 2009).