

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO  
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial



# **Desenvolvimento de Técnicas Interferométricas, Contínuas e Pulsadas, Aplicadas à Análise do Dano em Estruturas Compósitas**

Hernâni Miguel Reis Lopes

Dissertação submetida em cumprimento dos requisitos  
para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica

Dissertação realizada sob supervisão do  
Professor Doutor Mário Augusto Pires Vaz e  
Professor Doutor Rui Miranda Guedes,  
do Departamento de Engenharia Mecânica  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Julho de 2007



À minha mulher Cecília  
e filha Beatriz



## Agradecimentos

Na elaboração deste tema de dissertação, o autor quer agradecer primeiramente ao seu orientador e co-orientador, Professores Doutores Mário Pires Vaz e Rui Miranda Guedes, pelo seu inestimável apoio científico na procura de novas metodologias de investigação do dano em estruturas compósitas.

Tendo realizado os ensaios experimentais da tese de doutoramento no Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental - LOME, o autor agradece ao Dr. Jaime Monteiro, Eng.º Nuno Ramos, Prof. Doutor João Ribeiro e aos restantes elementos deste laboratório pelo apoio prestado.

Na investigação deste tema, o autor agradece ao Professor Doutor José Viriato Araújo dos Santos do Instituto Superior Técnico pelas suas sempre úteis informações e esclarecimentos.

Agradeço ao Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra (CEMUC) pela cedência do equipamento necessário à realização dos ensaios experimentais de vibrações.

Por último, o autor quer reconhecer o apoio de toda a sua família, em especial o da sua mulher, que sempre o ajudou a ultrapassar as mais diversas dificuldades.



## Resumo

Neste trabalho descrevem-se novas metodologias, desenvolvidas a partir de técnicas de medição por interferometria *Speckle*, para detectar, localizar e avaliar a severidade do dano em estruturas tipo viga e placa, construídas em diversos materiais. Neste sentido é proposto um novo parâmetro, designado por Índice de Sensibilidade ao Dano (ISD), com o objectivo de o caracterizar a partir dos esforços ou curvaturas.

Para a avaliação da resposta da estrutura sob qualquer tipo de solicitação, estática ou dinâmica, foram projectados e construídos dois sistemas interferométricos, utilizando iluminação coerente contínua e pulsada. Para o processamento dos sinais obtidos por estes sistemas, foi desenvolvido um programa de processamento de imagem. As ferramentas implementadas permitem lidar com padrões de ruído de *Speckle* e caracterizar o comportamento da estrutura, ao nível do deslocamento, da rotação e da curvatura.

Esta metodologia foi testada na caracterização do dano em estruturas sob diferentes condições de apoio e solicitação.

Em síntese, neste trabalho descreve-se uma ferramenta de utilização global com capacidade para avaliar a integridade de estruturas. As técnicas utilizadas permitem a medição sem contacto e com elevada resolução. A qualidade dos resultados obtidos prova que esta metodologia pode ser utilizada de forma generalizada na inspecção de estruturas em ambiente industrial.



## Résumé

Cette dissertation décrit des nouvelles méthodologies, développées sur des techniques de mesure par interférométrie *Speckle*, pour détecter, localiser et attester la sévérité du daine dans structures du type poutre et plaque de divers matériaux. À ce sujet, on propose un nouveau paramètre désigné par Indice de Sensibilité au Daine (ISD) avec l'objectif de caractériser le daine en partant des efforts structurels, vue courbures.

Pour l'évaluation de la réponse de la structure soumise à quelque type de sollicitation, soit statique ou dynamique, on a projeté et construit deux systèmes interférométriques en utilisant de l'illumination cohérente continue et pulsée. Pour l'analyse des signaux obtenus avec ces systèmes, on a développé un logiciel de traitement d'image. Les outils déployés réussirent à traiter des cadres de bruit *Speckle* et caractériser le comportement de la structure, au niveau du déplacement, de la rotation et de la courbure.

Cette méthodologie à été testée dans la caractérisation du dain en structures sur différentes conditions d'appuy et sollicitation.

En synthèse, on décrit dans ce travail un outil d'utilisation globale avec la capacité d'évaluer l'intégrité des structures. Les techniques utilisées permettent l'obtention d'une mesure générale, sans contact et d'élévée résolution. La qualité des résultats obtenus démontre que cette méthodologie peut être utilisée de façon généralisée dans l'inspection des structures en milieu industrielle.



## Abstract

This work describes a new methodology, based on *Speckle* interferometry techniques, to detect and characterize damages in different structures and materials. A new Damage Sensitivity Index (ISD) parameter, established from structural forces and curvatures, is proposed for the damage condition assessment.

Two interferometric systems were developed for the structural response measurement, static or dynamic, by using continue or pulse coherent illumination. An image processing software package was created for the Data analysis. The developed tools can deal with *Speckle* noise and characterize displacement, rotation and curvature fields of the structures.

This methodology was successfully tested in damage characterization in structures with different boundary and load conditions.

In summary, this work describes a general application tool to evaluate the structural integrity of components. The selected techniques allow global measurements, without contact and with high resolution. The quality of the obtained results proved that this methodology is well suited to evaluate structural condition and can be used to perform *in situ* structural inspection.



## Índice

Capítulo 1	Introdução às Técnicas de Caracterização Estrutural do Dano .....	29
1.1	Introdução .....	29
1.2	Estado da arte .....	30
1.2.1	Detecção do dano .....	31
1.2.2	Determinação da localização do dano .....	31
1.2.3	Quantificação da severidade do dano .....	35
1.3	Objectivos .....	39
1.4	Organização da dissertação .....	41
1.5	Bibliografia .....	42
Capítulo 2	Análise Estrutural do Dano .....	47
2.1	Introdução .....	47
2.2	Formulação geral em vigas .....	47
2.2.1	Modelo de dano .....	49
2.2.2	Resposta estática .....	49
2.2.3	Resposta vibratória .....	55
2.2.4	Resposta transiente .....	60
2.3	Discussão e conclusões .....	64
2.4	Bibliografia .....	65
Capítulo 3	Técnicas Interferométricas .....	67
3.1	Introdução .....	67
3.2	Interferência da luz .....	68
3.3	Interferometria Speckle .....	69
3.3.1	Intensidade e fase do Speckle .....	70
3.3.2	Dimensão do Speckle .....	72
3.3.3	Descorrelação do Speckle .....	73
3.4	Técnicas de medição .....	75
3.4.1	Holografia Digital .....	75
3.4.2	Metrologia Speckle .....	79
3.5	Discussão e conclusões .....	103
3.6	Bibliografia .....	104
Capítulo 4	Técnicas de Processamento de Imagem .....	107
4.1	Introdução .....	107
4.2	O Sistema de processamento de imagem .....	108

4.3	Tecnologias de aquisição de imagem .....	109
4.3.1	Métodos de transferência das cargas.....	110
4.4	Técnicas de filtragem dos mapas de fase.....	111
4.5	Métodos de unwrapping da fase .....	116
4.5.1	Métodos selectivos do caminho .....	116
4.5.2	Métodos de minimização da norma do erro.....	118
4.6	Técnicas de filtragem do campo de medida.....	121
4.7	Métodos de diferenciação espacial do campo de medida .....	123
4.8	Discussão e conclusões.....	130
4.9	Bibliografia .....	131
Capítulo 5	Caracterização do Dano Estrutural por Via Experimental.....	135
5.1	Introdução .....	135
5.2	Análise da viga.....	135
5.2.1	Introdução dos danos na viga.....	136
5.2.2	Resposta estática .....	137
5.2.3	Medição dos modos naturais de vibração .....	140
5.2.4	Resposta Modal.....	147
5.3	Análise da placa laminada compósita.....	150
5.3.1	Introdução dos danos na placa .....	151
5.3.2	Resposta estática .....	152
5.3.3	Resposta modal .....	156
5.3.4	Resposta transiente .....	163
5.4	Análise da placa sanduíche .....	166
5.5	Discussão e conclusões.....	168
5.6	Bibliografia .....	169
Capítulo 6	Conclusões .....	171
6.1	Conclusão.....	171
6.2	Proposta de trabalhos futuros.....	173
Anexo A	Análise do Índice de Sensibilidade ao Dano.....	177
Anexo B	Análise do Comportamento das Técnicas de Processamento de Imagem .....	183
Anexo C	Sistema <i>Shear</i> .....	191
Anexo D	Sistema <i>Shear</i> Pulsado.....	197
Anexo E	Programa de Processamento de Imagem .....	203
Anexo F	Resposta Modal da Placa Laminada Compósita .....	231

## Lista de Figuras

Fig. 1.1 – Aplicação do método de detecção da pequena diferença de dano [38].	33
Fig. 1.2 – Representação do índice de irregularidade estrutural na armadura em compósito de um casco de um veículo blindado militar [38].	34
Fig. 1.3 – Padrão de franjas de <i>Shear</i> obtidas de uma placa compósita com delaminações [57].	37
Fig. 2.1 – Representação da viga em consola submetida a uma força constante na extremidade livre.	50
Fig. 2.2 – Representação do deslocamento, rotação, momento-flector e esforço de corte da viga em consola.	50
Fig. 2.3 – Representação das diferentes componentes da resposta da viga em consola com dano a 0,195 m do encastramento.	51
Fig. 2.4 – Representação do ISD para a resposta da viga em consola.	52
Fig. 2.5 – Representação da distribuição ISD para sucessivas posições do dano na viga em consola.	53
Fig. 2.6 – Representação dos ISD da viga em consola para o 3º caso de dano e com adição de ruído.	54
Fig. 2.7 – Representação de três dos modos naturais de vibração para a viga com e sem dano no elemento 16.	57
Fig. 2.8 – Representação da magnitude da função acelerabilidade directa no ponto 16.	57
Fig. 2.9 – Representação do ISD da resposta da viga livre-livre para o 3º caso de dano.	58
Fig. 2.10 – Distribuição ISD do primeiro modo para sucessivas posições do dano.	59
Fig. 2.11 – Representação dos ISD relativo aos quatro primeiros modos e após adição de ruído.	60
Fig. 2.12 – Representação da propagação das ondas de flexão na viga sem dano e com dano na posição 0,195 m.	62
Fig. 2.13 – Representação do ISD da propagação das ondas de flexão na viga para o 3º caso de dano.	63
Fig. 2.14 – Distribuição ISD para sucessivas posições do dano ao longo da viga e no instante 120 $\mu s$ .	63
Fig. 2.15 – Representação do ISD após a adição de ruído e para o instante 120 $\mu s$ .	64
Fig. 2.16 – Representação no domínio do número de onda dos campos de resposta estática, com adição de ruído.	65
Fig. 3.1 – Franjas de interferência.	69
Fig. 3.2 - Forma espacial do <i>Speckle</i> .	69
Fig. 3.3 – Padrão de interferência produzido com o interferómetro <i>Mach-Zehnder</i> .	70
Fig. 3.4 – Geração do <i>Speckle</i> subjectivo através do sistema óptico.	71
Fig. 3.5 – Representação da intensidade e contraste das franjas em função do coeficiente de correlação.	74

Fig. 3.6 – Representação da montagem óptica para gravação digital do holograma de Fresnel. ....	75
Fig. 3.7 – Modelo geométrico da gravação digital do holograma. ....	76
Fig. 3.8 – Holograma digital de Fresnel (a) e reconstrução numérica da intensidade (b). ....	77
Fig. 3.9 – Reconstrução numérica da intensidade com supressão do termo de ordem zero. ....	78
Fig. 3.10 – Mapa de fase num disco para uma solicitação térmica. ....	79
Fig. 3.11 – Correlação de dois padrões de interferência. ....	80
Fig. 3.12 – Configuração do interferómetro de <i>Speckle</i> para medição estática do deslocamento fora-do-plano. ....	80
Fig. 3.13 – Diagrama para a determinação do mapa de fase a partir de 8 registos da intensidade holográfica, concretizada pela técnica de salto de fase com 4 imagens (técnica de modelação temporal de fase). ....	82
Fig. 3.14 – Intensidade e contraste das franjas para descorrelação de uma frente de onda por translação no plano. ....	83
Fig. 3.15 – Intensidade e contraste das franjas para descorrelação de uma frente de onda por rotação ( $x=0,1$ ). ....	83
Fig. 3.16 – Configuração do interferómetro de <i>Speckle</i> para medição dinâmica do deslocamento fora-do-plano. ....	84
Fig. 3.17 – Diagrama para a determinação do mapa de fase a partir de 2 registos holográficos, concretizada pelo método da transformada de Fourier (técnica de modelação espacial de fase). ..	86
Fig. 3.18 – Configuração do interferómetro <i>Shear</i> do tipo <i>Michelson</i> para medição do gradiente dos deslocamentos fora-do-plano. ....	87
Fig. 3.19 - Mapas de fase da rotação na horizontal e vertical de uma placa encastrada e carregada uniformemente na direcção transversal ao plano. ....	88
Fig. 3.20 - Intensidade e contraste das franjas para a descorrelação de duas frentes de onda por translação no plano. ....	89
Fig. 3.21 - Intensidade e contraste das franjas para descorrelação de duas frentes de onda por rotação ( $x=1$ ). ....	90
Fig. 3.22 – Configuração do interferómetro <i>Shear</i> do tipo <i>Mach-Zehnder</i> para medição dinâmica do gradiente dos deslocamentos fora-do-plano. ....	90
Fig. 3.23 – Mapas de fase da rotação na horizontal dos quatro primeiros modos naturais de uma placa compósita. ....	91
Fig. 3.24 – Diagrama da montagem experimental para medição da curvatura pela técnica do duplo interferómetro <i>Shear</i> do tipo <i>Michelson</i> . ....	92
Fig. 3.25 – Ajuste do desvio lateral das frentes de onda. ....	94
Fig. 3.26 – Mapas de fase com desvio lateral das frentes de onda. ....	94

Fig. 3.27 – Diagrama da montagem experimental para medição da curvatura pela técnica <i>Shear</i> com utilização de uma fibra bi-refringente. ....	95
Fig. 3.28 – Mapas de fase de um diafragma circular com deslocamento no centro para um desfasamento horizontal das 4 frentes de onda separadas por 7 mm e 15 mm, respectivamente [36]. ....	95
Fig. 3.29 – Diagrama da montagem experimental para medição da curvatura pela técnica <i>Shear</i> do tipo <i>Michelson</i> com translação da superfície. ....	96
Fig. 3.30 – Mapas de fase de uma placa circular encastrada na periferia e carregada no centro: (a) segunda derivada espacial $\partial^2 w / \partial x^2$ ; (b) a sobreposição da primeira derivada com a segunda derivada espacial $\partial w / \partial x + D_x \partial^2 w / 2 \partial x^2$ ; (c) derivada cruzada $\partial^2 w / \partial x \partial y$ ; (d) a sobreposição da primeira derivada com a derivada cruzada $\partial w / \partial y + D_x \partial w / 2 \partial x \partial y$ [37]. ....	97
Fig. 3.31 – Diagrama da montagem experimental para medição das derivadas até à terceira ordem pela técnica <i>Shear</i> do tipo <i>Michelson</i> com translação lateral do mapa de fase. ....	98
Fig. 3.32 – Mapas de fase da primeira, segunda e terceira derivadas espaciais de uma placa rectangular encastrada e submetida a uma pressão transversal uniforme, obtidos pelo método de múltiplos registos com translação lateral. ....	99
Fig. 3.33 – Mapas de fase da primeira, segunda e terceira derivadas espaciais de uma placa rectangular encastrada e submetida a uma pressão transversal uniforme, obtidos pelo método de múltiplos registos com alteração do desvio entre as frentes de onda e a partir da solução analítica. ....	100
Fig. 3.34 – Perfis da primeira, segunda e terceira derivadas espaciais ao longo da mediatriz horizontal da placa rectangular encastrada e solicitada por uma pressão transversal uniforme, dependência dos valores de <i>Shear</i> . ....	101
Fig. 3.35 – Ensaio da placa encastrada, submetida a uma pressão transversal uniforme de 180 N/m <sup>2</sup> . ....	101
Fig. 3.36 – Representação dos campos de deslocamentos e esforços internos numa placa obtidos por via experimental e a partir da solução analítica. ....	102
Fig. 3.37 – Representação dos momentos-flectores calculados por via da metodologia experimental e a partir da solução analítica. ....	103
Fig. 4.1 – Componentes do sistema de aquisição e de processamento digital das imagens interferométricas. ....	108
Fig. 4.2 – Tecnologia CCD de registo de imagem (Condensador MOS). ....	110
Fig. 4.3 – Métodos de transferência de carga num CCD. ....	110
Fig. 4.4 – Mapas de fase gerados com adição de diferentes níveis de ruído. ....	114
Fig. 4.5 – Representação do valor eficaz do erro associado das técnicas de filtragem do mapa de fase para diferentes razões sinal/ruído. ....	115

Fig. 4.6 – Representação dos resíduos em dois mapas de fase com descontinuidade nas franjas. ....	116
Fig. 4.7 – Representação dos erros de fase determinados a partir da aplicação dos métodos de <i>unwrapping</i> ao mapa de fase do lado esquerdo da Fig. 4.6. ....	120
Fig. 4.8 – Representação dos erros de fase determinados a partir da aplicação dos métodos de <i>unwrapping</i> ao mapa de fase do lado direito da Fig. 4.6. ....	120
Fig. 4.9 – Campos de medida com adição de diferentes níveis de ruído. ....	122
Fig. 4.10 – Representação do valor eficaz do erro associado às técnicas de filtragem do campo de medida para diferentes razões sinal/ruído. ....	122
Fig. 4.11 – Representação da função Gaussiana e das três primeiras derivadas espaciais para os pontos <i>Kernel</i> . ....	124
Fig. 4.12 – Representação da metodologia para o cálculo das derivadas espaciais de ordem elevada. ....	125
Fig. 4.13 – Imagem global da montagem experimental. ....	126
Fig. 4.14 – Representação esquemática do sistema de medição experimental. ....	126
Fig. 4.15 – Propagação das ondas de flexão para diferentes instantes após o impacto. ....	127
Fig. 4.16 – Mapas de fase e campo de deslocamentos da propagação das ondas de flexão numa placa para o instante $243\mu s$ após impacto. ....	127
Fig. 4.17 – Registo da evolução no tempo da força de impacto e do duplo disparo do LASER. ....	127
Fig. 4.18 – O campo do esforço de corte obtido através de três de diferenciação e método dos elementos finitos. ....	128
Fig. 4.19 – Representação dos campos de deslocamento, rotação e momentos-flectores obtidos por via experimental (lado esquerdo) e por via do método dos elementos finitos (lado direito). ....	129
Fig. 4.20 – Perfis da segunda e terceira derivadas espaciais obtidas através das metodologias experimental e numérica, e por via da solução analítica. ....	129
Fig. 4.21 – Perfis da segunda e terceira derivadas espaciais obtidas através das metodologias digital e numérica, e por via da solução analítica. ....	130
Fig. 4.22 – Representação no domínio do número de onda da primeira derivada espacial do campo de rotações medido ao longo da mediatriz da placa encastrada (capítulo 3). ....	131
Fig. 5.1 – Representação da viga em consola com dois danos estruturais. ....	136
Fig. 5.2 – Imagem da montagem experimental da viga em consola (encastrada -livre). ....	137
Fig. 5.3 – Imagem do sistema <i>Shear</i> (Anexo C). ....	137
Fig. 5.4 – Mapa de fase medido, mapa de fase filtrado e respectivo campo de rotações da viga em consola com carregamento na extremidade livre. ....	137
Fig. 5.5 – Representação dos perfis dos campos de deslocamentos, rotações, momento-flector e esforço de corte da viga em consola. ....	138

Fig. 5.6– Representação do ISD dos campos de deslocamentos, rotações, momento-flector e esforço de corte da viga em consola para o primeiro e segundo casos de dano. ....	139
Fig. 5.7– Representação do ISD dos campos de deslocamentos, rotações, momento-flector e esforço de corte da viga em consola para o terceiro e quarto casos de dano.....	139
Fig. 5.8– Representação do campo de momento-flector no domínio do número de onda para a resposta estática da viga nas condições sem dano (S/ dano) e com dano (C/ dano). ....	140
Fig. 5.9 – Imagem da montagem experimental para a medição das FRFs da viga livre-livre. ....	141
Fig. 5.10-Diagrama de estabilidade. ....	142
Fig. 5.11– Função de resposta em frequência e modos naturais de vibração da viga livre-livre. ....	142
Fig. 5.12 – Imagens da montagem para análise modal com ESPI a) sistema Ettemeyer-GmbH&Co <sup>®</sup> ; b) montagem da viga e sistema de excitação acústica.....	143
Fig. 5.13 – Esquema da montagem experimental e diagrama temporal de sincronismo. ....	144
Fig. 5.14 – Os mapas de fase relativos aos dois primeiros modos naturais da viga livre-livre.....	144
Fig. 5.15 – Os dois primeiros modos naturais da viga obtidos com o sistema ESPI Pulsado.....	144
Fig. 5.16 – Os campos de deslocamentos dos dois primeiros modos da viga livre-livre, obtidos pela análise modal experimental, sistema ESPI Pulsado e pelo método dos elementos finitos. ....	145
Fig. 5.17 – Imagem do sistema <i>Shear</i> Pulsado (Anexo D). ....	145
Fig. 5.18 – Os mapas de fase relativos ao campo de rotações dos dois primeiros modos naturais da viga livre-livre.....	146
Fig. 5.19 – O campo de rotações dos dois primeiros modos da viga livre-livre, obtidos por análise modal experimental, sistema <i>Shear</i> Pulsado e pelo método dos elementos finitos. ....	146
Fig. 5.20 – Representação da magnitude e fase da função acelerabilidade da viga (directa), experimental do tipo $H_1$ (EXP) e pelo método dos elementos finitos (MEF). ....	147
Fig. 5.21 – Representação dos campos de deslocamentos, rotações, momento-flector e esforço de corte obtidos a partir do campo de deslocamentos modal experimental e pelo MEF para a viga livre-livre.....	148
Fig. 5.22 – Representação dos campos de deslocamentos, rotações, momento-flector e esforço de corte obtidos a partir do campo de rotações modal experimental e pelo MEF para a viga a livre-livre. ....	148
Fig. 5.23 – Representação dos ISD dos campos momento-flector e esforço de corte obtidos a partir do campo de deslocamentos e rotações experimentais e pelo MEF para a viga livre-livre.....	149
Fig. 5.24– Representação do campo de rotações no domínio do número de onda para diferentes solicitações.....	150
Fig. 5.25– Representação da forma e dimensões da placa laminada compósita em estudo.....	150

Fig. 5.26 - Imagem a) montagem experimental do ensaio de impacto; b) posição dos dois impactos na placa.....	151
Fig. 5.27 – Modelos do comportamento da placa com delaminação para a solicitação térmica e depressão.....	152
Fig. 5.28 – Representação dos campos de deslocamentos e rotações, e das franjas de interferência de fase correspondentes à região da placa com delaminação. ....	153
Fig. 5.29 – Imagem da distribuição da temperatura na placa obtida para uma emissividade 0,93.....	153
Fig. 5.30 – Mapa de fase e respectivo campo de rotações da placa laminada compósita submetida a uma carga térmica.....	154
Fig. 5.31 – Campo de curvaturas segundo o eixo $x$ para a placa laminada compósita submetida a uma carga térmica.....	154
Fig. 5.32 – Imagem da placa laminada com a representação das regiões de delaminação.....	154
Fig. 5.33 – Imagem da montagem experimental da placa laminada compósita no interior da câmara hipobárica. ....	155
Fig. 5.34 – Mapa de fase e o respectivo campo de rotações da placa laminada compósita submetida a uma variação de pressão de -500Pa. ....	155
Fig. 5.35 – Campo de curvaturas segundo o eixo $x$ para a placa laminada compósita submetida a uma variação de pressão de -500Pa.....	156
Fig. 5.36 – Imagem da montagem experimental para a medição da FRF mobilidade da placa livre-livre. ....	156
Fig. 5.37 – Representação das magnitudes da função mobilidade do tipo $H_1$ medidas para as três situações de dano na placa.....	157
Fig. 5.38 – Representação dos campos de deslocamentos dos modos naturais da placa original. ....	158
Fig. 5.39 – Representação dos campos de deslocamentos dos modos naturais da placa após impacto 1. ....	159
Fig. 5.40 – Representação dos campos de deslocamentos dos modos naturais da placa após os impactos 1+2.....	159
Fig. 5.41 – Representação dos campos ISD das curvaturas $xy$ , obtidos entre a resposta da placa original e a resposta da placa após o impacto 1. ....	160
Fig. 5.42 – Representação dos campos ISD das curvaturas $xy$ , obtidos entre a resposta da placa original e a resposta da placa após os impactos 1+2.....	160
Fig. 5.43 – Imagem da placa laminada com representação da região de delaminação identificada a partir do campo de curvaturas, resultado obtido por diferenciação numérica do campo de deslocamentos modal.....	161

- Fig. 5.44 – Representação dos campos de rotações em  $x$  dos modos naturais da placa após os impactos 1+2. .... 161
- Fig. 5.45 – Representação dos campos de curvaturas em  $x$  dos modos naturais da placa após os impactos 1+2. .... 162
- Fig. 5.46 – Representação dos ISD das curvaturas  $xx$  obtidos entre a resposta modal da placa original, obtida por MEF, e a resposta modal da placa após os impactos 1+2. .... 163
- Fig. 5.47 – Imagem da placa laminada e representação da região de delaminação identificada a partir do campo de curvaturas, obtido por diferenciação numérica do campo de rotações modais. .... 163
- Fig. 5.48 – Imagens da montagem da placa com impactos 1+2, do excitador electromagnético LDS, da haste mais transdutor de força, dos dois geradores de sinal, do amplificador B&K 2525 e do osciloscópio Tektronix usados na medição da resposta transiente da placa livre-livre. .... 164
- Fig. 5.49 – Representação dos mapas de fase e dos campos de rotação em  $x$  da propagação das ondas de flexão na placa após os impactos 1+2. .... 164
- Fig. 5.50 – Representação dos campos de curvatura em  $x$  da propagação das ondas de flexão na placa após os impactos 1+2. .... 165
- Fig. 5.51 – Representação dos ISD das curvaturas campos, obtidos entre a resposta transiente da placa original e a resposta transiente da placa após os impactos 1+2. .... 165
- Fig. 5.52 – Imagem da placa com representação dos três descolamentos. .... 166
- Fig. 5.53 – Mapa de fase e respectivo campo de rotações obtido para a placa sanduíche, obtida após aquecimento da superfície. .... 166
- Fig. 5.54 – Campo de curvaturas segundo o eixo  $x$  para a placa sanduíche, obtida após aquecimento da superfície. .... 167
- Fig. 5.55 – Imagem da placa sanduíche com representação das regiões de descolamentos identificadas a azul, sendo representadas a vermelho as dimensões dos defeitos introduzidos na placa. .... 167
- Fig. 5.56 – Representação da razão sinal/ruído vs a amplitude máxima do deslocamento determinados a partir dos mapas de fase medidos com os sistemas ESPI Pulsado, *Shear* e *Shear Pulsado*. .... 168



## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Casos de dano.....	52
Tabela 2.2 – Valores das frequências naturais de vibração para a viga livre-livre.....	56
Tabela 3.1 – Distribuição do desvio lateral entre frentes de onda para determinação dos esforços na placa.....	101
Tabela 3.2 – Distribuição do desvio lateral entre frentes de onda para a determinação do momento-flector até à fronteira da placa.....	103
Tabela 4.1 – Tempo médio de processamento das técnicas de filtragem para mapas de fase de 256x256 (Pentium 4 a 1,7GHz).....	115
Tabela 4.2 – Tempo médio de processamento dos métodos de <i>unwrapping</i> para mapas de fase 256x256 (Pentium 4 a 1,7GHz).....	121
Tabela 5.1 – Casos de dano estrutural analisados na viga.....	136
Tabela 5.2 - Frequência e amortecimento da viga na condição livre-livre.....	142
Tabela 5.3 - A tabela MAC da viga na condição livre-livre.....	143
Tabela 5.4 – Frequências naturais de vibração da viga para a condição livre – livre no espaço.....	148
Tabela 5.5 – Características dos impactos realizados na placa laminada de fibra de carbono.....	151
Tabela 5.6 – Frequências naturais de vibração da placa livre-livre para diferentes situações de dano.....	157



## Nomenclatura

Símbolo	Significado
$a$	Largura da placa
$A$	Secção recta da viga
$A_0$	Amplitude da onda
$A_{i,j}$	Função acelerabilidade entre os pontos $i$ e $j$
$b$	Largura da secção transversal da viga Comprimento da placa
$c$	Coefficiente de correlação
$[c]$	Matriz de amortecimento global
$[c^e]$	Matriz de amortecimento do elemento finito
$d$	Distância do objecto à lente
$D$	Módulo de rigidez à flexão da placa
$D_1$	Diâmetro da pupila
$D_x$	Amplitude do deslocamento lateral do objecto Amplitude do deslocamento lateral das duas frentes de onda
$E$	Módulo de elasticidade ou módulo de Young
$E_d^e$	Módulo de Young da secção danificada
$E(r,t)$	Onda electromagnética
$f$	Distância focal da lente Frequência espacial
$F$	Amplitude da força aplicada
$\{F\}$	Vector das forças nodais
$G$	Módulo de elasticidade ao corte
$G(x)$	Função Gaussiana
$h$	Altura
$h(\xi,\eta)$	Campo de intensidade no plano do holograma
$H_n(x)$	Função de Hermite
$i$	Coordenada do píxel na direcção horizontal da imagem
$I$	Intensidade da luz
$I_z$	Momento de inércia da secção recta da viga

Símbolo	Significado
$j$	Constante complexa $\sqrt{-1}$
	Coordenada do píxel na direcção vertical da imagem
$k$	Direcção de propagação da onda electromagnética
$[k]$	Matriz de rigidez global
$[k^e]$	Matriz de rigidez do elemento finito
$\ell$	Comprimento da viga
$\ell^e$	Comprimento do elemento finito
$m$	Factor de amplificação óptico
$M$	Momento-flector
$M^e$	Momento-flector nodal na viga
$[m]$	Matriz de massa global
$[m^e]$	Matriz de massa do elemento finito
$N$	Número de <i>Speckle</i> por franja
$P_I$	Distribuição estatística da intensidade do padrão de <i>Speckle</i>
$P_\phi$	Distribuição estatística da fase do padrão de <i>Speckle</i>
$q$	Número de onda
$Q$	Esforço de Corte
$Q^e$	Esforço nodal na viga
$\{Q^e\}$	Vector dos esforços no elemento finito
$r$	Vector espacial da onda
$R$	Função de autocorrelação
$R_z$	Campo de rotações na viga
$S$	Campo das amplitudes da resposta estrutural
$t$	Tempo
$T$	Período
$v^e$	Deslocamento nodal
$V$	Contraste nas franjas
$V_e$	Velocidade média de propagação das ondas elásticas tracção/compressão
$\{v(t)\}$	Vector dos deslocamentos transversais e rotações na viga
$\{v^e(t)\}$	Vector dos deslocamentos e rotações no elemento finito
$w(x, y)$	Deslocamento transversal numa placa
$x$	Coordenada espacial

Símbolo	Significado
$y$	Coordenada espacial
$Y$	Campo de deslocamentos na viga
$\alpha$	Ângulo de fase
$\beta$	Parâmetro de calibração
$\delta$	Ângulo de rotação do espelho
$\delta_k^e$	Parâmetro de dano
$\Delta_{i,j}$	Diferença de fase
$\Delta t$	Intervalo de tempo
$\Delta x$	Passo na direcção x Translação da frente de onda na direcção horizontal
$\Delta y$	Translação da frente de onda na direcção vertical
$\Delta\phi(x, y)$	Mapa de fase da medição
$\Delta\xi$	Dimensão horizontal do píxel no CCD
$\Delta\eta$	Dimensão vertical do píxel no CCD
$\varepsilon^p$	Norma do erro
$\phi$	Ângulo de fase da frente de onda
$\Delta\phi(x, y)$	Mapa de fase
$\Delta\phi'(x, y)$	Mapa de fase filtrado
$\psi(x, y)$	Diferença de fase entre duas frentes de onda
$\Phi(x, y)$	Mapa de fase do holograma
$\lambda$	Comprimento de onda da luz
$\lambda_i$	Frequência natural de vibração de ordem $i$
$\gamma$	Ângulo de rotação da superfície
$\mu$	Coefficiente de amortecimento hysterético Média
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\theta$	Ângulo de rotação do espelho
$\theta^e$	Rotação nodal na viga
$\rho$	Massa específica
$\sigma$	Desvio padrão
$\upsilon(x, y)$	Ângulo de rotação da superfície

Símbolo	Significado
$\omega$	Frequência angular (rad/s)
$\psi(x, y)$	Mapa de fase da interferência de duas frentes de onda

### Operações

Símbolo	Significado
$\dot{()}$	$\frac{\partial ()}{\partial t}$
$\ddot{()}$	$\frac{\partial^2 ()}{\partial t^2}$
$\overset{\dots}{()}$	$\frac{\partial^3 ()}{\partial t^3}$
$\otimes$	Convolução de imagem

### Abreviaturas

B&K	Brüel&Kjær <sup>®</sup>
CCD	Charge-coupled device
CMOS	Complementary metal–oxide–semiconductor
COMAC	Co-ordenate Modal Assurance Criteria
CPU	Central Processing Unit
DSP	Digital Signal Processor
ESPI	Electronic Speckle Pattern Interferometry
FFT	Fast Fourier Transform
FFT <sup>-1</sup>	Inverse Fast Fourier Transform
FRF	Função de Resposta em Frequência
ISD	Índice de Sensibilidade ao Dano
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LCD	Liquid Crystal Display
LOME	Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental
MAC	Modal Assurance Criteria
MDF	Método das Diferenças Finitas Centrais
MEF	Método dos Elementos Finitos
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NA	Abertura numérica
NI	National Instruments <sup>®</sup>

# Capítulo 1

## Introdução às Técnicas de Caracterização Estrutural do Dano

---

### 1.1 Introdução

Em Engenharia existe um amplo interesse na monitorização estrutural, procurando a detecção precoce do dano. O risco de perda de vidas humanas, resultante de falhas estruturais imprevisíveis, como nos casos da queda de aviões, pontes ou edifícios, têm motivado a investigação da comunidade científica dos vários ramos da Engenharia. De igual forma, o superior desempenho exigido aos materiais tem estimulado o desenvolvimento e o aperfeiçoamento das técnicas experimentais com aplicação no controlo da integridade estrutural. Nos elementos estruturais basilares o controlo é, por norma, do tipo preditivo. Na manutenção preditiva, um ou mais parâmetros são monitorizados para aferir a integridade de parte ou de toda a estrutura. Neste caso, a monitorização ocorre de modo periódico ou contínuo em função da acessibilidade, viabilidade técnica e grau de tolerância ao dano. A identificação precoce do dano tem por finalidade a prevenção da falha estrutural e a programação da substituição do elemento danificado.

A necessidade de desenvolver métodos globais de detecção de dano tem sido essencialmente motivada por aplicações ao ramo aeronáutico e aeroespacial. Nestas aplicações, os elementos estruturais são altamente solicitados e trabalham próximo do limite da sua resistência mecânica, com elevadas exigências de segurança. A isto está normalmente associado o facto destas estruturas serem dimensionadas com elevadas relações resistência/peso. Nestas condições, exige-se uma baixa tolerância ao dano e, por conseguinte, é necessário um controlo mais apertado da integridade dos componentes através de inspeções periódicas com técnicas não destrutivas.

Com o advento dos materiais compósitos, mais leves e com resistência específica superior aos metais, os componentes aeronáuticos de menor responsabilidade foram progressivamente substituídos por estes novos materiais. Exemplos desta estratégia são os novos aviões comerciais da Airbus, A380 com 25 % do seu peso em compósitos, e o Boeing 787, em que 50% do peso total da estrutura é construída nestes materiais. Apesar da sua resistência/peso ser superior aos metais, os elementos em compósito são mais sensíveis ao dano e apresentam tipos de defeitos e/ou danos distintos dos metais. Os principais danos nos laminados em compósito são: descolamentos interlaminares, micro-fissuras e micro-encurvaduras além das inclusões. Estes danos internos resultam normalmente do processo de fabrico e/ou solicitações externas em serviço. A delaminação ou descolamento interlaminar é o caso de dano não visível e por isso mais grave, sendo também o mais comum em componentes aeronáuticos. Este tipo de dano surge essencialmente em estruturas laminadas, tipo placa ou casca de pequena curvatura, e provoca normalmente uma redução substancial do seu desempenho estrutural por diminuição da capacidade de carga.

Actualmente, as principais técnicas de inspeção podem ser classificadas em métodos globais e métodos localizados. As diversas técnicas globais disponíveis utilizam a acústica ou métodos por ultra-som, variações do campo magnético, inspeção por radiações, corrente eléctrica, medição da emissividade térmica e técnicas de inspeção visual, com e sem auxílio. Todas estas técnicas partem do princípio que o comportamento do material na vizinhança do dano é conhecido. Além disso, uma grande maioria destas técnicas destina-se exclusivamente à investigação do dano em estruturas metálicas. Por outro lado, a detecção de delaminações a partir da alteração das características

mecânicas e resposta, estática ou dinâmica, da estrutura tem sido amplamente referenciado na literatura como técnicas preferenciais. A sua análise inclui várias vertentes, nomeadamente: frequências modais, deslocamentos, rotações, curvaturas, formas modais e respectivas derivadas, coeficientes de flexibilidade, etc. Uma outra vertente da investigação associada a este tipo de dano é a utilização das estruturas inteligentes ou adaptativas, as quais já integram sensores/actuadores para localizar e estimar a severidade do dano, além de se adaptarem às cargas que lhe são aplicadas. Diversos trabalhos têm sido apresentados usando diferentes sensores para monitorização em contínuo da integridade estrutural. Este método possui um grande potencial para a detecção e localização de danos internos. Todavia, a localização do dano requer a utilização de uma elevada rede de sensores/actuadores e de equipamento sofisticado para poder analisar toda a informação gerada. Deste modo, é exigido um grau de complexidade elevado na implementação o que dificulta a sua utilização generalizada. Porém, este trabalho de dissertação focará apenas as técnicas não invasivas de inspecção global para a detecção de delaminações.

As técnicas interferométricas revelam elevado potencial na detecção do dano em estruturas laminadas compósitas. Estas técnicas de medição global e sem contacto são baseadas na interferência de luz LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – de ora em diante será utilizada o termo em minúsculas para designar esta radiação) para a medição estática e dinâmica do campo de deslocamentos e de rotações em superfícies difusas. Estas técnicas permitem medições com uma resolução que pode chegar a uma ordem de grandeza abaixo do comprimento de onda da luz. O *Shear (Shearography)* é uma técnica interferométrica actualmente usada para inspecção não destrutiva. Uma fonte térmica é normalmente usada para a excitação estrutural e, por alteração na forma resultante da expansão térmica do material, os descolamentos internos são localizados. Em alternativa, os métodos baseados nas características estáticas e dinâmicas são muito atractivos para inspecção não destrutiva, pela facilidade na medição experimental e pela robustez na análise do comportamento estrutural. A associação das técnicas interferométricas às metodologias globais de detecção vem potenciar novas linhas de desenvolvimento de procedimentos dedicados à investigação do dano, que necessitam ser exploradas.

## 1.2 Estado da arte

Na vasta literatura sobre a caracterização do dano em materiais compósitos são referenciadas diversas metodologias. Estas são normalmente criadas a partir de técnicas experimentais de medição dos parâmetros localizados e/ou globais da estrutura. Neste trabalho far-se-á apenas referência às metodologias globais, baseadas na resposta estrutural, que servirão de base ao desenvolvimento das técnicas interferométricas de medição experimental.

Segundo Rytter [1], os métodos de identificação podem ser classificados em quatro níveis de caracterização do dano:

- Nível 1: Determinação da presença do dano na estrutura;
- Nível 2: Determinação da localização geométrica do dano;
- Nível 3: Quantificação da severidade do dano;
- Nível 4: Previsão do tempo de vida remanescente da estrutura;

Os três primeiros níveis de caracterização do dano estão relacionados com metodologias apoiadas directamente em medições experimentais. De forma diferente, a caracterização mais completa do dano requer a utilização de ferramentas analíticas e numéricas para estimar o tempo de vida remanescente. Como tal, o quarto nível de caracterização do dano está fora dos objectivos a que se propõe esta dissertação e, por esta razão, não será aqui tratado.

As técnicas de monitorização da integridade estrutural baseadas na medição de parâmetros modais têm despertado interesse ao longo de vários anos. Todavia, a simplicidade das técnicas de interferometria holográfica para medição global e sem contacto, leva a que estas técnicas dominem o actual panorama da monitorização e da integridade de estruturas compósitas.

A seguir será apresentada uma breve descrição dos principais métodos divulgados na literatura para os três primeiros níveis de caracterização do dano, segundo o sistema de classificação apresentado anteriormente.

### *1.2.1 Detecção do dano*

O primeiro trabalho referenciado na literatura sobre a detecção do dano estrutural em materiais compósitos a partir das características dinâmicas foi apresentado por Adams [2]. Este autor desenvolveu um modelo teórico com a finalidade de localizar os danos a partir da análise da receptância. A metodologia proposta assenta no princípio da diminuição da rigidez dinâmica ou do aumento do amortecimento estrutural devido à presença do dano. A alteração da rigidez, quer local, quer global, conduz ao decréscimo das frequências naturais de vibração. Como tal, a distribuição não uniforme dos esforços internos em cada modo natural de vibração origina diferentes variações nas frequências. Estas, por sua vez, estão relacionadas com localização do dano na estrutura. Pelo contrário, verifica-se um aumento do amortecimento estrutural provocado pelo crescimento da dissipação de energia vibratória na região do dano [3]. A comparação das frequências ou correspondentes amortecimentos, antes e após a estrutura ser colocada ao serviço, permitirá que a sua integridade seja avaliada. A vantagem desta metodologia reside na facilidade da medição das características dinâmicas, frequência natural e amortecimento modal, que, por serem globais, não dependem do ponto de medição e podem ser obtidas por medições espacialmente discretas.

#### *1.2.1.1 Métodos baseados na alteração das frequências naturais e do amortecimento*

O princípio da variação das frequências naturais foi testado numa estrutura unidimensional com introdução de um único dano, através da remoção do equivalente a 1% da sua secção transversal [4]. A presença do dano estrutural foi detectada com sucesso pela diminuição das frequências naturais. Porém, a metodologia apresentada mostrou-se insuficiente para localizar e avaliar a severidade do dano e, também, evidenciou a necessidade de uma mais completa caracterização estrutural. De igual modo, os resultados experimentais obtidos numa ponte de uma auto-estrada comprovaram a eficácia na detecção da presença de dano pelo decréscimo nas frequências naturais de vibração [5]. A mesma metodologia foi aplicada à monitorização de estruturas localizadas em alto-mar [6, 7]. Posteriormente, a diminuição das frequências naturais e o aumento do amortecimento foram investigadas por Lai [8] para detecção de delaminações em estruturas compósitas. A partir dos resultados experimentais, este autor concluiu que, ao contrário das frequências naturais, as variações no amortecimento não são suficientes para detectar a presença de dano, devido à sua baixa sensibilidade e instabilidade da medição, e por esse motivo não deveria ser usado.

#### *1.2.1.2 Métodos baseados na alteração das funções de resposta em frequência*

A utilização das funções de resposta em frequência (FRF) foi considerada, por outros autores, a solução para pesquisar danos estruturais [9-14]. A medição experimental das FRF num modelo laboratorial de uma ponte possibilitou a identificação de um corte de 3 mm numa das barras ensaiadas [10]. A análise da alteração dos pólos da FRF por redes neuronais foi usada em estruturas reticuladas para investigar o risco de falha em cada barra [15].

### *1.2.2 Determinação da localização do dano*

Os métodos dedicados à localização do dano assentam no princípio da redução local da rigidez. Por via indirecta, estes podem ser identificados a partir da localização de perturbações nos deslocamentos, rotações e curvaturas/deformações. Por outro lado, as alterações na rigidez ou da flexibilidade estrutural, aferidas a partir da medição dos parâmetros modais, permite obter directamente a localização do dano.

### 1.2.2.1 *Métodos assentes nas formas naturais*

A extensão da metodologia proposta por Adams [2] a estruturas bidimensionais (tipo placa) foi apresentada por Cawley [16-18]. Em alternativa à análise modal experimental, este autor propôs a aplicação do método das sensibilidades [17] aos modos naturais de vibração para deduzir a localização dos danos em placas. O efeito produzido pelo dano nos modos é dependente do tamanho e do estado de tensão da região danificada. No caso das vibrações em flexão e para as estruturas analisadas, o autor observou que a distribuição aproximada da tensão num ponto é definida pela sua distância ao plano médio da placa, sendo zero no plano médio. Na aplicação do método das sensibilidades utilizou um modelo numérico de dano com a rigidez do elemento igual a zero e considerou desprezável a variação da massa dentro do elemento. A análise de sensibilidade serviu para localizar uma sequência de danos introduzidos numa placa laminada compósita [17]. O procedimento requereu um grande esforço computacional para conseguir uma boa concordância com as medições experimentais.

Nos laminados compósitos, as características dinâmicas da estrutura são fortemente dependentes da configuração do laminado [19]. Este autor verificou experimentalmente em vigas de grafite/epóxida (T299/823) montadas em consola, que dimensões de danos inferiores a 10% do comprimento total da viga não são detectados através dos parâmetros modais globais, frequência e amortecimento, e que outros parâmetros de monitorização local deverão também ser usados [19].

O efeito da localização do dano na forma fundamental de vibração de uma viga em consola foi investigado por Yuen [20]. O seu estudo teve por base um modelo em elementos finitos para demonstrar a sistemática alteração do primeiro modo natural provocada pela variação da localização do dano. O seu efeito na amplitude dos modos naturais de vibração foi também analisado por Chen [21]. Neste caso, as distribuições da energia cinética e potencial foram usadas como indicadores para localizar o dano.

A metodologia de identificação gráfica do dano a partir da alteração da rotação no primeiro modo natural de vibração foi investigada por Abdo [22]. Os resultados numéricos obtidos, para um modelo em elementos finitos de uma placa com diferentes condições de apoio, mostram que as rotações são mais sensíveis na localização do dano do que os deslocamentos associados aos modos. Na continuação das simulações numéricas, provou ainda que a alteração nas rotações dos modos poderia ser usada para a localização de danos, até ao limite de 5% na redução da rigidez local.

A análise de sensibilidades das FRF para a localização de danos em vigas foi apresentada e posteriormente foi aperfeiçoada por Lin [23, 24]. Resultados recentemente obtidos usando dados experimentais mostram o bom desempenho do método [25].

### 1.2.2.2 *Métodos assentes nas curvaturas/deformações das formas de vibração*

O método das curvaturas dos modos naturais de vibração foi introduzido por Pandey [26]. O método proposto utiliza a diferença do campo das curvaturas associadas aos modos naturais entre a viga intacta e a viga danificada para localizar o dano. As curvaturas são extraídas pela aplicação da técnica das diferenças finitas centrais de segunda ordem aos modos naturais de vibração. Ao contrário dos modos naturais de vibração prova-se que as alterações nas curvaturas dos modos são coincidentes com a região do dano e a sua magnitude é proporcional à severidade deste. Um modelo em elementos finitos foi usado para calcular os modos naturais de vibração em duas situações: viga em consola e viga simplesmente apoiada. O dano foi introduzido por decréscimo da rigidez à flexão no elemento e não foi considerada a variação de massa neste modelo. A análise dos resultados mostra que a alteração da curvatura localiza correctamente o dano mas não permite quantificar a sua severidade. Também foi demonstrado que os parâmetros COMAC (*Co-ordinate Modal Assurance Criteria*) [27] e MAC (*Modal Assurance Criteria*) [28], calculados a partir das amplitudes dos modos, são ineficazes na identificação do dano numa fase inicial, devido ao amaciamento da média das diferenças ao longo dos pontos e ao longo dos modos. De igual forma, as frequências e as alterações da curvatura dos modos naturais foram usados para estimar a localização de fendas profundas [29]. Conforme a teoria da elasticidade para vigas e placas finas em flexão, a deformação na superfície é proporcional à sua

curvatura [30]. Em consequência disso e como técnica alternativa, foi sugerido utilizar a distribuição da deformação dos modos naturais como parâmetro para identificar o dano. O campo de deformação é melhor indicador na localização do dano que o campo de deslocamentos associado aos modos de vibração [31-33]. Conclusão idêntica foi apresentada por Chang [34], que comparou a sensibilidade dos vários parâmetros modais na identificação o dano.

A formulação do modelo de índice de dano tem por base a informação das curvaturas dos modos. O índice de dano relaciona o campo das curvaturas antes e após a introdução do dano em cada um dos segmentos da estrutura [35]. O seu desvio relativamente à média da distribuição normal dos índices de dano é usado como indicador para identificar a região mais provável de dano.

A extensão do método das curvaturas a todas as frequências foi proposto por Sampaio [36]. A alteração das curvaturas da função de resposta em frequência (FRF) antes e após a introdução do dano é usada para identificar a sua localização. As simulações numéricas mostram que o método é mais eficaz para a banda de frequências até à primeira frequência natural ou anti-ressonância. A sua comparação com os métodos da diferença da amplitude das curvaturas e do índice de dano comprovaram o superior desempenho do seu método. O procedimento foi testado com base em dados experimentais de uma ponte em betão, onde foram criados quatro níveis de dano em quatro diferentes posições. Apesar da maior eficácia do método, só no caso mais severo de dano é que foi identificada a sua localização. Resultados similares foram obtidos com os restantes métodos.

Na continuação da metodologia das curvaturas, Ratcliffe [37] desenvolveu um procedimento que não requer o registo do estado anterior da estrutura. O cálculo da curvatura é obtido pela aplicação do operador Laplaciano aos modos naturais de vibração para identificar a localização do dano. A posição do dano é identificada a partir da descontinuidade no campo das curvaturas. Resultados extraídos a partir do método dos elementos finitos permitiram identificar o dano, no caso da redução local da espessura numa viga de superior a 10%. De modo a evidenciar a descontinuidade gráfica em danos inferiores a 10%, o autor apresentou uma versão modificada do Laplaciano, que chamou de método da detecção da pequena diferença de dano (*gapped smoothing damage detection method*). Ao perfil das curvaturas é-lhe agora subtraído um perfil filtrado das curvaturas, representativo da viga não danificada. Este perfil contínuo é interpolado em cada ponto a partir do ajuste, aos pontos da curvatura, de um polinómio do terceiro grau, Fig. 1.1.

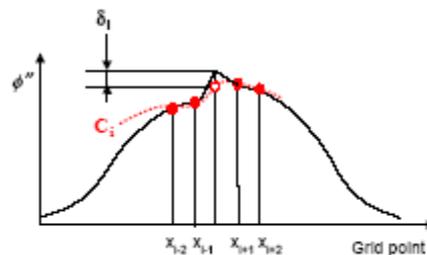


Fig. 1.1 – Aplicação do método de detecção da pequena diferença de dano [38].

Como consequência, o processo de identificação da variação local da curvatura é lento. A aplicação desta nova técnica aos modos gerados por via numérica tornou possível a identificação de danos até ao limite de 0,5% da espessura. Concluiu também que a eficácia na localização do dano é maior para o modo fundamental e que melhora com o aumento da resolução espacial dos dados. A demonstração experimental do procedimento foi realizada numa viga em aço com um dano localizado, criado por um corte ao longo da direcção da secção transversal e com a profundidade de metade da espessura. Para os dois primeiros modos naturais analisados foi identificada com sucesso a localização do dano. Contudo, a baixa precisão no resultado levou o autor a sugerir a extensometria eléctrica como técnica alternativa a utilizar para medição da curvatura. A medição directa da curvatura dos modos naturais de vibração em vigas provou ter um desempenho superior nos resultados [39].

O método de detecção da pequena diferença de dano foi aplicado aos modos naturais de vibração de uma viga compósita para localizar uma delaminação [40]. A elevada sensibilidade deste método foi também comprovada através da localização do dano numa viga em aço, equivalente a 0,8% de redução da espessura [41]. Na sequência da aplicação de técnicas híbridas para a extracção da curvatura filtrada

foi possível melhorar a sensibilidade do método [42]. Técnicas de análise global, combinando a informação modal e as funções analíticas dos modos, foram usadas para obter a variação da curvatura [42].

A generalização deste método a duas dimensões e a consequente aplicação a placas laminadas foi usado para determinar a localização de defeitos/delaminações [38]. Neste caso, o índice de irregularidade estrutural utilizado na localização do dano é decorrente do método da detecção da pequena diferença de dano. O procedimento permite ser aplicado a qualquer forma de vibração numa frequência fixa, mas é preferível o uso de um conjunto de formas de vibração associadas a banda de frequências. Neste último caso, os índices de irregularidade estrutural são analisados estatisticamente para de seguida servirem de referência à estimativa da localização do dano. As simulações num modelo de elementos finitos provaram a eficácia deste procedimento. Contudo, são apenas identificados os contornos dos danos, o que dificulta a sua interpretação gráfica. O índice da irregularidade estrutural foi usado em testes realizados em placas laminadas com dano. O algoritmo proposto foi capaz de localizar as delaminações criadas artificialmente nas placas durante o seu fabrico, pela introdução entre camadas de uma folha de Teflon. Como o método utiliza várias formas de vibração tem um desempenho superior em relação aos métodos baseados nas formas de ressonância, por anulação dos erros de medição. No entanto, os resultados experimentais mostram que há subavaliação da dimensão real do dano, como consequência da metodologia e do tratamento estatístico do índice de irregularidade estrutural, Fig. 1.2.

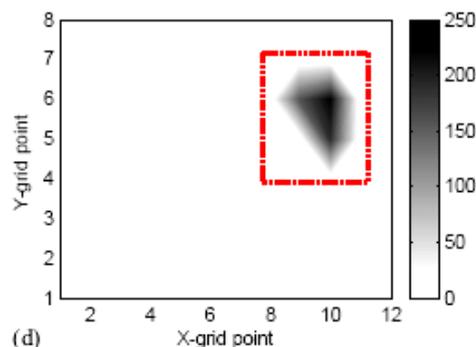


Fig. 1.2 – Representação do índice de irregularidade estrutural na armadura em compósito de um casco de um veículo blindado militar [38].

### 1.2.2.3 Métodos baseados na medição dinâmica da rigidez ou flexibilidade

Como variante do método das curvaturas e tendo por princípio a alteração da rigidez local devido ao dano, foi sugerida a utilização de metodologias baseadas na medição dinâmica da matriz de rigidez estrutural [43, 44]. A diferença nas matrizes de rigidez entre a situação inicial e danificada foi aplicada para detectar e localizar fendas em estruturas [43]. Na sequência, o método do erro da matriz de rigidez, definido pela diferença entre a matriz de rigidez analítica/numérica e a matriz de rigidez experimental, foi proposto para a detecção do dano em casos de grande variação da rigidez [44]. Para pequenas variações, o autor propôs a utilização de uma função ponderada com a inclusão da variação dos outros parâmetros modais. Para aumentar a eficácia deste método deverá ser usado um número elevado de modos naturais [43]. Porém na análise modal experimental só os modos de mais baixa frequência são medidos. Além disso, a matriz de rigidez analítica deverá ser representativa do modelo experimental. A combinação destas duas limitações vem afectar a precisão do método e condiciona a sua aplicação prática. Como alternativa, foi proposto o método das diferenças das flexibilidades [45, 46]. Este modelo normalizado da matriz de flexibilidade foi testado com sucesso na detecção de dano em plataformas submersas [47]. A vantagem em usar a matriz da flexibilidade ao invés da matriz da rigidez está na precisão da estimativa da matriz de flexibilidade a partir de um pequeno número de modos de mais baixa frequência [45]. A matriz de flexibilidade é definida como o inverso da matriz de rigidez. Assim, a redução da rigidez produzirá o aumento da flexibilidade na estrutura. Com efeito, a matriz de flexibilidade aproximada pode ser extraída a partir da análise modal experimental. A

diferença das matrizes de flexibilidade entre a estrutura intacta e a estrutura danificada é usado como parâmetro para detectar e localizar o dano estrutural. Resultados numéricos e experimentais obtidos em vigas de perfil em I demonstraram a eficiência desta metodologia [46]. Neste âmbito, o dano foi identificado a partir da análise de um máximo local, obtido pela diferença entre as matrizes de flexibilidade. Uma sequência de cinco casos graduais de dano, criados em duas posições distintas da viga, e a evolução gradual da sua severidade foram identificadas. Todavia, na situação de danos múltiplos só foi possível identificar a localização do mais dominante.

#### 1.2.2.4 Método baseado na transformada de Ôndulas (*Wavelets*)

Os métodos baseados nos modos naturais de vibração e suas derivadas demonstraram a sua eficácia em dados obtidos a partir de simulações numéricas. Contudo, o sucesso destas técnicas é afectado pelo ruído presente nos dados experimentais [48]. Uma área comparativamente recente da investigação do dano estrutural é o uso das transformadas de ôndulas (*Wavelets - na literatura anglo-saxónica*) e a similitude dos seus coeficientes com as derivadas do sinal. Os coeficientes das transformadas de ôndulas possuem as propriedades de evidenciar pequenas alterações ou descontinuidades no sinal, mas sem propagação do ruído, como no caso das técnicas de diferenciação conhecidas. A identificação de singularidades na distribuição dos coeficientes serve para indicar a localização de danos. O estudo da técnica mais apropriada para a localização de fendas em vigas tendo por base as transformadas de ôndulas foi apresentado por Rucka e Wilde [49]. A técnica proposta permite identificar a posição da fenda sem o conhecimento das características da estrutura ou uso de modelos matemáticos. A identificação de diferentes graus de dano foi investigada a partir da medição óptica do perfil da flexão estática em vigas. Os danos são localizados pela detecção de máximos locais nos coeficientes de ôndulas contínuas de cada perfil [49]. As ôndulas Gaussiana e Coiflet mostraram-se ser as mais eficazes na localização de fendas até ao limite 27% de redução da espessura na secção da viga, porém, a ôndula Gaussiana de momento quarto nulo apresentou valores para o coeficiente na posição da fenda superior em 50%.

O estudo teórico e numérico confrontando a diferenciação por transformadas de ôndulas com a de vários outros operadores diferenciais, para o cálculo da curvatura dos modos naturais de vibração e sequente localização dos danos em vigas foi apresentado por Messina [50]. Os operadores diferenciais integram filtros de alta frequência para reduzir o ruído indesejado. O estudo revelou que filtros fortes influenciam as baixas frequências e que esta aumenta com a ordem da diferenciação. Como resultado, o método de diferenciação de ordem um deverá ser usado para obter as derivadas de ordem superior. A transformada de Fourier com filtro, o ajuste por mínimos quadrados ponderado, o filtro de Lanczos e a transformada de ôndula Gaussiana foram as técnicas investigadas para calcular as curvaturas a partir da amplitude dos modos naturais contaminados por ruído Gaussiano. Nos casos apresentados observa-se que os resultados das curvaturas são similares entre as técnicas analisadas. Porém, o perfil da curvatura obtido pela transformada de ôndula Gaussiana é mais grosseiro na região não danificada. Esta situação resulta num maior número de perturbações na curvatura e com conseqüente aumento dificuldade na localização do dano.

#### 1.2.3 Quantificação da severidade do dano

A caracterização última do dano consiste na quantificação do decréscimo da rigidez e/ou estimativa da dimensão real do dano. O procedimento requer uma elevada precisão na avaliação da resposta estrutural. A quantificação do decréscimo de rigidez é estimada a partir da variação local da curvatura e/ou através de modelos matemáticos do dano. Já a área afectada pelo dano é avaliada pela análise dos contornos das perturbações locais.

##### 1.2.3.1 Método baseado nas sensibilidades dos parâmetros modais

O método das sensibilidades dos parâmetros modais foi usado para localizar e quantificar a

severidade do dano num sistema discreto com vários graus de liberdade [51]. A sensibilidade das frequências e respectivos campos de deslocamentos, rotações e curvaturas dos modos, foram comparadas no sentido de avaliar a eficácia na localização do dano. As simulações numéricas num modelo massa-mola com 10 graus de liberdade mostrou que a curvatura dos modos é mais sensível ao dano, embora a rotação seja melhor indicador da sua localização. Um procedimento definido em duas etapas foi proposto para localizar e quantificar a severidade do dano. A partir da alteração da curvatura dos modos naturais é localizado o dano e, em seguida, pela análise de um número limitado de frequências é quantificada a sua severidade. A metodologia foi investigada por via experimental através da análise de diferentes cenários de dano num modelo periódico com três graus de liberdade de um edifício. Os resultados obtidos para a detecção de diferentes danos de média severidade (13.12%-26.74%) foram considerados satisfatórios. Zhu concluiu que a precisão na quantificação da severidade do dano aumenta com o número de frequências naturais utilizadas no cálculo. Os desvios observados nos resultados são apontados para eventuais erros na medição experimental.

### 1.2.3.2 Método baseado na medição da curvatura das formas naturais de vibração

A eficácia dos métodos baseados nas curvaturas das formas naturais de vibração é determinada pela qualidade imposta nas medições. Normalmente a curvatura é obtida por técnicas de diferenciação numérica da amplitude dos modos de vibração experimentais. Por sua vez, o ruído experimental propaga-se através do processo de diferenciação e tem repercussão na qualidade final dos resultados. Em alternativa, a medição directa da curvatura tem a vantagem de evitar a diferenciação numérica dos dados com consequente melhoria na eficácia dos métodos.

O método para a localização e quantificação do dano numa viga sanduíche através da medição da curvatura das formas modais recorrendo a transdutores piezoelétricos foi apresentado por Lestari [52]. O procedimento tem por princípio a utilização da diferença de curvaturas entre a estrutura inicial e danificada, medidas directamente por 31 sensores piezoelétricos (na forma de filme polimérico – *polyvinylidene fluoride*) colados e igualmente espaçados na superfície da estrutura. A análise consistiu na medição das frequências naturais e curvaturas dos modos naturais de vibração de uma viga em consola com danos locais provocados artificialmente: primeiro - remoção do núcleo (para simular o descolamento entre o núcleo e as peles) e; segundo - esmagamento do núcleo na interface inferior núcleo/pele (para simular o esmagamento do núcleo). O factor de dano, diferença entre curvaturas, e o índice de dano, somatório das diferenças entre curvaturas, permitiram identificar de forma aproximada a localização do dano. Os resultados mostram também que o esmagamento produz maior redução da rigidez que o descolamento entre núcleo e a pele. A estimativa da variação local de rigidez foi obtida a partir da diferença de curvatura das primeiras seis formas naturais de vibração. A redução de rigidez na delaminação varia entre 30%-60% e no esmagamento entre 40%-90%. A disparidade de alguns valores é justificada por erros directos da medição da curvatura.

### 1.2.3.3 Métodos baseados na medição global do deslocamento ou rotação por técnicas interferométricas

As técnicas de interferometria óptica têm sido largamente investigadas nas últimas quatro décadas, provaram ser ferramentas robustas e muito eficazes na inspecção não destrutiva de estruturas [53-60]. As suas vantagens são indiscutíveis em relação às técnicas clássicas para a inspecção de materiais compósitos [53]. As técnicas ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) e *Shear* (*Shearography*) são dois exemplos de interferómetros ópticos actualmente utilizados para a inspecção não destrutiva de estruturas compósitas. Estas são técnicas de campo que permitem medir a informação sobre uma superfície e localizar facilmente as perturbações da sua resposta estrutural. A técnica ESPI mede o valor absoluto dos deslocamentos da superfície, incluindo os de corpo rígido. O princípio da técnica *Shear* foi pela primeira vez demonstrado por Leendertz e Butters [61] através da construção do interferómetro *Michelson* para medir a rotação numa superfície. O *Shear* só é sensível ao gradiente dos deslocamentos fora-do-plano pelo que o gradiente dos deslocamentos medido pode assumir-se como uma boa aproximação ao campo de rotações da superfície [62]. Pela sua

especificidade e insensibilidade aos movimentos de corpo rígido, esta técnica é frequentemente usada na localização de delaminações em estruturas compósitas. A análise comparativa da qualidade das medições entre as técnicas ESPI e *Shear* para a identificação de danos internos foi investigada por diversos autores [55, 59]. As franjas devidas ao movimento de corpo rígido, medidas por ESPI, dificultam a interpretação e podem ocultar a presença do dano. Por conseguinte, o *Shear* é mais eficaz na identificação do dano. Em geral, a delaminação manifesta-se na forma de dois lobos justapostos de franjas concêntricas, representativas da perturbação local do dano, Fig. 1.3.

Ao contrário do ESPI, o *Shear* mede a rotação da superfície e elimina a necessidade do cálculo numérico da derivada. Outra grande vantagem reside na simplificação da montagem óptica que, por não necessitar de feixe de referência, pode trabalhar com LASER de menor comprimento de coerência. Pode ainda referir-se que a forma mais compacta deste interferómetro garante a maior estabilidade nas medições, facilitando o isolamento das perturbações exteriores [59]. Além da localização de descolamentos em estruturas compósitas, várias outras aplicações podem ser encontradas na literatura nomeadamente: medição da rotação, medição de vibrações, medição de tensões residuais etc.[60, 62-67]

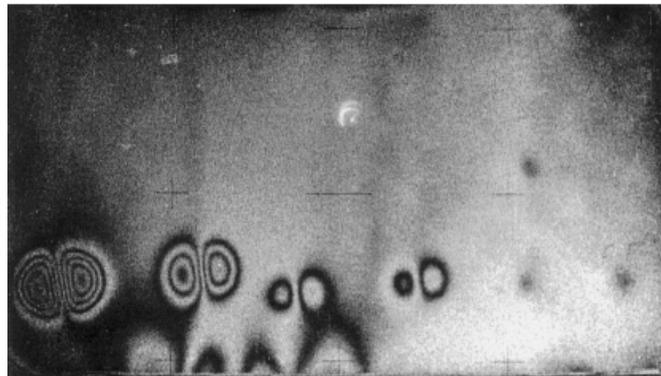


Fig. 1.3 – Padrão de franjas de *Shear* obtidas de uma placa compósita com delaminações [57].

A detecção de danos por *Shear* é baseada na comparação de dois estados de deformação do objecto. Neste processo, diferentes meios de excitação são usados dependendo do tipo de defeito e do material utilizado. A eficácia destas técnicas depende de vários factores, designadamente: características do material, natureza do defeito e método de excitação dos deslocamentos fora-do-plano. Na grande maioria dos casos as fontes de excitação térmica, depressão ou impacto são as mais eficazes na revelação de descolamentos interlaminares [55, 59, 60, 68]. Porém, a escolha do melhor método é normalmente definida por um processo heurístico, em que a experiência anteriormente adquirida influencia a selecção.

A análise das franjas obtidas pelas técnicas de ESPI serviu de base à investigação do dano em placas laminadas finas [68]. Os danos foram induzidos por impacto através da queda livre de esferas metálicas com diferentes massas. A excitação térmica com lâmpada de infravermelhos foi aplicada para criar o deslocamento fora-do-plano da placa. A localização e dimensão do dano foram estimadas a partir da análise das franjas de intensidade concêntricas recorrendo às técnicas de processamento de imagem. A observação das franjas revelou que a técnica ESPI é menos sensível ao dano em relação às técnicas holográficas, utilizando meios de gravação com maior resolução que o vídeo. Ambas as técnicas ópticas identificam perfeitamente a presença do dano. Todavia, a localização e a avaliação quantitativa quando confrontadas com os resultados por ultra-sons (*C-scan*) mostram-se inadequadas para profundidades do dano superiores a 0,7 mm relativamente à face de medição. A introdução de técnicas de cálculo de fase permitiu aumentar a resolução espacial das técnicas ópticas e, por conseguinte, melhorar a sensibilidade na detecção do dano. O mapa de fase e as correspondentes franjas de intensidade medidas com a técnica ESPI foram usados para localizar e quantificar delaminações em placas em fibra de vidro reforçadas com poliéster [69]. Os danos criados por impacto foram também analisados por *C-scan* e por seccionamento da matriz. Ambos os métodos foram utilizados como referência para a análise das restantes técnicas. Os resultados mostram uma boa

correlação entre as técnicas ópticas e as técnicas de referência. No entanto, a área identificada a partir do mapa de fase está mais próxima dos valores de referência.

A propagação das ondas elásticas de flexão em placas e tubos foi analisada por interferometria holográfica por diversos autores [70-76]. Um LASER de duplo impulso foi usado para medir o deslocamento em placas isotrópicas [70, 73], placas anisotrópicas [71-73, 75, 76] e tubos anisotrópicos [73, 74]. A interferometria holográfica e a propagação de ondas transientes de flexão foram também usadas para investigar áreas de descolamentos na interface de placas cerâmica-metal [77]. A qualidade da ligação entre os dois materiais influencia a propagação das ondas transientes de flexão. As ondas são produzidas por um impactor piezoelétrico montado próximo da superfície da placa. Modelos distintos de dano foram introduzidos em três placas, simulando descontinuidades na interface e fendas na placa cerâmica. Um LASER de YAG com dupla cavidade foi usado para gerar dois impulsos com intervalos ajustáveis entre 1  $\mu$ s e 80  $\mu$ s. Os dois registos interferométricos foram gravados numa placa holográfica por alteração do ângulo de incidência dos dois feixes. Os interferogramas são posteriormente reconstruídos e o mapa de fase calculado através da técnica de salto de fase. Os danos são identificados por visualização de anomalias no mapa de fase das ondas de flexão, na forma de grandes amplitudes e diminuição do comprimento de onda. Porém, a complexidade de franjas observadas no mapa de fase não permite a interpretação da área danificada.

Os painéis sanduíche retirados da asa de um modelo de avião foram usados para investigar o dano criado por impacto de baixa velocidade [78]. Os painéis com pele em fibra de carbono e núcleo em ninho de abelha sofreram diferentes impactos de energia entre 10J e 40J. As técnicas *Shear* e *C-scan* foram usadas para inspeccionar os painéis e com a finalidade de confrontar visualmente os resultados. A técnica *Shear* permitiu identificar muito bem o dano e quantificar a sua real dimensão. Pelo contrário, a técnica *C-scan*, devido ao seu princípio de funcionamento, demonstrou ser menos adequada a este tipo de estruturas. Além de mais morosa, apresenta dificuldades em lidar com as múltiplas descontinuidades no material da ruptura/indentações nas peles e distorções do núcleo ninho de abelha provocada pelo impacto.

A aplicação das técnicas ESPI e *Shear* à detecção descolamentos na interface de revestimentos finos foi investigado por Gomes [59]. A excitação térmica foi usada para revelar a posição e dimensão do dano. A partir da observação dos mapas de fase concluiu-se que os resultados entre as duas técnicas eram equivalentes. Contudo, o contraste nas franjas mostra-se superior no *Shear* devido à menor diferença entre o comprimento dos braços do interferómetro, com a vantagem adicional da utilização de LASER com menor comprimento de coerência. A revisão da técnica *Shear* e as suas várias aplicações a materiais compósitos foi apresentada por Hung [57]. A medição das tensões residuais, deformações e localização de danos são algumas das aplicações da técnica *Shear*. A simplicidade da montagem óptica e insensibilidade a perturbações externas são as duas principais vantagens referidas sobre esta técnica.

A versão modificada do interferómetro *Mach-Zehnder* foi desenvolvida por Pedrini [67] para a medição da rotação dos modos de vibração em placas. As duas imagens criadas no interferómetro são desfasadas e rodadas entre si antes de serem combinadas de forma a poder posteriormente calcular a fase do movimento. A partir da fase é extraído o mapa contínuo do campo de rotação da forma de vibração. Um LASER de Rubi pulsado foi usado para gravar em dois instantes diferentes os mapas de interferência correspondentes à amplitude de rotação de uma placa circular em vibração. A mesma técnica foi posteriormente usada na localização de danos numa placa sanduíche com núcleo em Nomex e peles em fibra de vidro [60]. Os dois danos foram introduzidos artificialmente pela remoção da pele e núcleo do lado de trás da placa, tinham a dimensão de 2,5 cm e 1 cm de diâmetro. A força transiente para excitação das formas de vibração foi criada por impacto de um martelo de accionamento electromagnético. A sequência da forma de vibração da placa para diferentes instantes de tempo após o impacto foi registada e posteriormente usada para localizar os danos. A identificação visual da concentração das franjas de intensidade serviu para localizar o dano mais pequeno. Os danos de menor dimensão produzem franjas mais concentradas e em maior número em relação às demais franjas, facilitando a sua identificação visual. Porém, a dificuldade na interpretação das franjas deve-se ao facto de estas se confundirem, normalmente, com as franjas de vibração da placa. Estas e outras

dificuldades levaram a que outros autores desenvolvessem procedimentos alternativos para a inspeção não destrutiva de danos. O desfasamento de fase a alta velocidade foi considerado como forma de reduzir os erros de fase e melhorar a qualidade dos dados [79]. O procedimento baseia-se na aplicação das técnicas temporais de fase e remoção das descontinuidades (*unwrapping* – designação utilizada na literatura anglo-saxónica que será mantida por não existir ainda um termo equivalente em Português) da fase a uma sequência de interferogramas de ESPI gravados numa câmara de alta velocidade. O salto da fase de  $\pi/2$  entre gravações é criado pelo controlo do nível de tensão na célula de *Pockel*, montado no braço do feixe de referência. Os perfis de fase são determinados através da técnica de *unwrapping* do mapa de fase, obtido a partir de quatro interferogramas desfasados entre si de  $\pi/2$ . Seguindo este procedimento foi identificada uma delaminação numa placa em fibra de carbono. A comparação com as técnicas espaciais de *unwrapping* da fase confirmou a maior robustez do procedimento a perturbações exteriores.

A combinação das técnicas de ultra-sons com as técnicas interferométricas pulsadas para investigação do dano em placas foi desenvolvida por Cernadas [80]. As ondas elásticas ultra-sónicas (*Lamb waves*) conseguem penetrar em profundidade no material para manifestar à superfície a presença dos danos. Estes são visualmente detectados através da utilização de técnicas ópticas de elevada resolução. A medição por holografia em tempo real já tinha sido usada para identificar pequenos cortes e furos em placas [81]. Na medição por ESPI da propagação das ondas de flexão, os deslocamentos são parados no tempo através de uma iluminação LASER pulsada [82]. Porém, a elevada velocidade e a pequena amplitude das ondas elásticas ultra-sónicas exige um bom isolamento das perturbações exteriores. A utilização da técnica ESPI com LASER de duplo impulso foi sugerida para solucionar os problemas de estabilidade na medição [80]. Um transdutor piezoeléctrico acoplado à superfície da placa é usado para gerar as ondas acústicas à superfície, ondas de *Rayleigh* que se propagam ao longo da superfície. Estas ondas poderão também ser geradas de forma remota através de fortes impulsos LASER. No entanto, a excitação das destas ondas na gama de sensibilidade da técnica ESPI obriga à aplicação de elevada energia sobre a superfície e, para evitar a sua danificação, à protecção da mesma. Também, como alternativa, o regime termoelástico permite criar ondas de *Rayleigh*, mas a sua amplitude é pequena e a selecção da energia adequada para cada impulso é de difícil acerto.

Neste trabalho, dois tipos de dano foram introduzidos numa placa de alumínio. Estes são gerados artificialmente através de um furo cego e com um corte transversal na placa. A sequência de duas imagens consecutivas, com o intervalo de  $1,5 \mu\text{s}$ , foi usada para medir o campo de deslocamentos fora-do-plano provocado pela propagação de uma cadeia de ondas de *Rayleigh* na placa, introduzidas através de 4 impulsos. Através da análise visual das perturbações nas franjas correspondentes ao deslocamento fora-do-plano identificaram-se os danos. Na sequência deste trabalho, foi posteriormente acrescentado o cálculo da fase à medição do deslocamento [83]. Esta nova metodologia permitiu medir a quantidade complexa da amplitude do campo de deslocamentos gerado pela propagação das ondas de *Rayleigh*. A partir das componentes real e imaginária do campo de deslocamentos foram identificados os danos, mesmo nas situações de má qualidade das franjas.

### 1.3 Objectivos

O objectivo principal deste trabalho consiste no desenvolvimento de novas metodologias a partir de técnicas experimentais de interferometria holográfica para detectar, localizar e avaliar a severidade do dano em estruturas laminadas compósitas tipo placa. Deste modo, pretende-se criar uma ferramenta de utilização geral que permita de forma expedita avaliar a integridade de estruturas e componentes. A opção pelos materiais compósitos justifica-se pelas suas propriedades intrínsecas, susceptíveis a danos internos, e pela sua crescente utilização, principalmente em estruturas de veículos. Nestas aplicações a selecção de estruturas ligeiras e com elevado desempenho reforça a necessidade de monitorizar regularmente a sua integridade. Apesar do extenso trabalho de investigação desenvolvido nesta área, não existe ainda disponível, uma ferramenta com estas características.

Para concretizar este objectivo foi realizada uma síntese de vários trabalhos publicados nesta área reflectindo acerca das diferentes metodologias usadas e o conhecimento da fenomenologia

associada a cada técnica de detecção do dano estrutural em vigas e placas. Em particular, dar-se-á ênfase nas metodologias de medição por técnicas interferométricas. As cascas não serão incluídas neste trabalho devido à dificuldade adicional introduzida pelo efeito da sua geometria sobre as propriedades estruturais. Todavia, esta metodologia poderá vir a ser utilizada neste tipo de estruturas quando estiverem disponíveis ferramentas de caracterização da forma, que possam ser utilizadas em conjunto com as técnicas interferométricas.

Na sequência do trabalho de síntese, constata-se não existir ainda um consenso quanto à definição de um parâmetro capaz de caracterizar a severidade de um dado dano. Assim sendo, é proposto neste trabalho um parâmetro, designado por Índice de Sensibilidade ao Dano (ISD), com o objectivo de identificar e quantificar a debilidade de uma estrutura, a partir das descontinuidades e/ou perturbações no seu comportamento. Neste contexto apresentar-se-á uma análise da sensibilidade das diferentes componentes da resposta estática e dinâmica em componentes tipo viga e placa. Para isso, foi necessário desenvolver técnicas numéricas para, a partir de dados obtidos por via experimental, deslocamentos e rotações, obter os campos dos esforços na superfície.

Para avaliação da metodologia proposta neste trabalho, foram analisados diferentes casos de dano introduzidos numa viga de alumínio. Uma simulação foi implementada através de um modelo numérico, onde as descontinuidades na rigidez da estrutura modelam as várias situações de dano. Esta análise foi realizada com o recurso à solução clássica do método dos elementos finitos. Os campos de deslocamento, rotação e esforços internos são obtidos para diferentes condições de apoio e para o regime estático, vibratório estacionário e transiente. Estas soluções numéricas serviram de base ao estudo da influência da localização e severidade do dano.

Com base na metodologia estabelecida foram construídos sistemas de medição do campo de rotações utilizando técnicas globais e sem contacto. As técnicas de interferometria holográfica ou de *Speckle* foram seleccionadas, por além de cumprirem com os requisitos necessários à medição do campo de rotações, permitirem uma elevada resolução. Para concretizar este objectivo, foram projectados e construídos dois sistemas de medição baseados em iluminação contínua e pulsada para medir fenómenos estáticos e dinâmicos, respectivamente. A opção da construção destes dois sistemas de medição da rotação decorre da sua menor exigência em termos de qualidade do LASER e da necessidade de reduzir em uma ordem a derivada espacial. Refira-se que as derivadas até à terceira ordem do campo de deslocamentos são necessárias para a determinação dos esforços internos. A partir do sistema construído para a medição estática, baseado na iluminação contínua, foram desenvolvidas pelo autor duas novas metodologias para a determinação por via experimental da segunda e terceira derivadas espaciais do campo de deslocamentos.

A partir das medições com técnicas interferométricas fica disponível uma elevada quantidade de informação que caracteriza o comportamento da superfície visível da estrutura. Esta informação é gravada no formato de imagem para posteriormente ser processada. O processamento das imagens adquiridas permite caracterizar com elevado rigor o comportamento da estrutura quando submetida aos diversos tipos de carregamento. Este é realizado com recurso a técnicas específicas de processamento de imagem, onde a informação referente à radiação iluminante e à geometria da montagem permite aceder ao campo contínuo da variável em estudo. Para isso é necessário dispor de algoritmos de filtragem, *unwrapping* (termo anglo-saxónico que designa o processo de eliminação de descontinuidade no mapa de fase e para o qual não existe ainda tradução estabelecida em Português), cálculo de fase e diferenciação espacial. Neste sentido, foi desenvolvido um programa na plataforma MATLAB<sup>®</sup> que engloba diferentes métodos para realizar as tarefas anteriormente referidas. A implementação de diferentes soluções para cada tarefa justifica-se pela necessidade de em cada caso poder seleccionar a sequência mais indicada ao problema em estudo.

Deve ainda referir-se que a presença do ruído decorrente da utilização da iluminação coerente acrescenta algumas dificuldades ao processo de medida. Sendo o ruído predominantemente de alta frequência, a aplicação de filtros convencionais do tipo passa-baixo poderia facilmente atenuá-lo. No entanto, dois factores contribuem para a necessidade de utilizar algoritmos de filtragem mais elaborados. Primeiro, esta metodologia exige a detecção de perturbações localizadas caracterizadas por termo de alta frequência, segundo, o processo de derivação espacial conduz à propagação e

amplificação dos termos alta ordem. Deste modo, é necessário dispor de ferramentas capazes de simultaneamente remover o ruído sem eliminar as componentes de alta ordem do sinal. Este problema é fortemente agravado pelo facto de neste caso ser necessário calcular as derivadas de terceira ordem. Neste trabalho propõe-se uma estratégia que visa realizar em simultâneo a filtragem e derivação dos registos, minimizando a propagação do ruído. O carácter inovador desta estratégia levou à procura de soluções noutras áreas de investigação. Os algoritmos implementados conduziram a resultados de elevada qualidade e são inovadores nesta aplicação.

A validação da metodologia estabelecida foi realizada a partir da análise do comportamento para a resposta estática, modal e transiente em vigas de alumínio. Os campos de deslocamentos e rotações são medidos por sistemas interferométricos, sendo os esforços internos obtidos por aplicação da diferenciação numérica a estes campos. A mesma metodologia foi utilizada numa placa laminada compósita com o objectivo de identificar duas delaminações introduzidas por impactos de baixa velocidade. Desta forma, foi avaliado o desempenho desta metodologia no estudo de estruturas não isotrópicas. Por fim, foi avaliada uma estrutura aeronáutica em sanduíche contendo defeitos intencionalmente introduzidos durante o processo de fabrico. Com este ensaio procurou-se demonstrar a possibilidade de vir a aplicar esta metodologia na inspecção não destrutiva de componentes aeronáuticos.

#### 1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos cujo conteúdo se sintetiza em seguida:

- Capítulo 1- No presente capítulo apresenta-se uma introdução às técnicas de detecção e caracterização estrutural do dano numa perspectiva global acompanhada de uma síntese bibliográfica. Os objectivos da dissertação são definidos e uma descrição sumária de cada capítulo é apresentada.
- Capítulo 2- Análise estrutural do dano por via do método dos elementos finitos. Neste capítulo é efectuado um estudo aprofundado sobre a influência do dano na resposta transversal em vigas. Com base na formulação clássica de elementos finitos de vigas apresenta-se a resposta estática, vibratória estacionária e transiente. Na sequência, procede-se à análise da sensibilidade dos vários parâmetros estruturais. Em particular, são analisados os deslocamentos, rotações e esforços internos da viga. Neste âmbito, é igualmente investigado a influência do ruído experimental na determinação do dano.
- Capítulo 3- Introdução às técnicas de interferometria holográfica e *Speckle* para a medição experimental. É apresentado um estudo sobre as diferentes configurações ópticas para medição do deslocamento e rotação fora-do-plano em superfícies e discutidas as vantagens e desvantagens destas técnicas. A implementação das técnicas *Shearography*, por vezes designada por *Shear*, para medição estática e dinâmica do campo de rotações é apresentada. Na continuação são também analisados os métodos derivados da técnica implementada na tentativa da determinação experimental da segunda e terceira derivadas do campo de deslocamento. A avaliação é realizada através da medição experimental de uma placa encastrada nos bordos e submetida a uma pressão constante.
- Capítulo 4- Implementação e estudo das técnicas de processamento de imagem para, a partir dos mapas de interferência, obter o campo de resposta estrutural e suas derivadas. A determinação dos campos da resposta estrutural engloba as etapas de cálculo de fase, filtragem de fase, *unwrapping* e filtragem do campo contínuo. Neste âmbito, será avaliado o desempenho de vários algoritmos aplicados a cada etapa do processamento dos mapas, com o objectivo de identificar o mais eficaz na eliminação do ruído experimental. Na sequência, é proposta uma metodologia de diferenciação numérica, combinando técnicas de amaciamento e diferenciação, para a determinação das derivadas espaciais até à terceira

ordem do campo de deslocamentos. Neste contexto, serão aplicadas diferentes técnicas de cálculo das derivadas espaciais. A avaliação da robustez de cada procedimento é concretizada através da análise das derivadas obtidas a partir do campo gerado, contaminado por diferentes níveis de ruído.

Capítulo 5- Análise estrutural do dano por via experimental. Neste capítulo são analisadas diferentes metodologias para a localização e quantificação da severidade de múltiplos danos estruturais por via experimental e apresentam-se os resultados obtidos para vigas de alumínio, placa laminada compósita e placa sanduíche de alumínio. Os resultados experimentais, constituídos pela medição estática e dinâmica do campo de deslocamentos ou das rotações para a viga e placa laminada compósita, são analisados e discutidos. No seguimento são determinadas as curvaturas a partir da derivada espacial do campo medido correspondente. Para a determinação do dano estrutural são apresentados dois procedimentos. Um é baseado no registo anterior e posterior do campo de deslocamentos ou de rotações e o outro no registo posterior do campo de rotações. Com base nas perturbações e/ou descontinuidades no campo das curvaturas ou na diferença das curvaturas antes e após a introdução do dano, estes são determinados. Um estudo comparativo das diferentes técnicas usadas nos dois procedimentos é apresentado, sendo seleccionada a melhor metodologia. Esta é avaliada a partir da identificação de descolamentos numa placa sanduíche de alumínio. A análise comparativa das diferentes metodologias e a discussão dos resultados encerram este capítulo.

Capítulo 6- No âmbito deste trabalho foram desenvolvidas técnicas de aplicação geral que podem ser usadas na detecção de defeitos e caracterização do comportamento de estruturas do tipo viga ou placa. As técnicas de interferometria de *Speckle* são usadas para a medição sem contacto da resposta estrutural. Estas são técnicas de campo que não necessitam de preparação da superfície e possuem uma elevada resolução. Dado o grande potencial de aplicação destas técnicas vislumbram-se novas áreas de investigação.

## 1.5 Bibliografia

1. Rytter, A., *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures*, Doctoral Thesis, Aalborg University -Denmark.1993.
2. Adams, R.D., D. Walton, J.E. Flitcroft, and D. Short, *Vibration testing as a non-destructive test too for composite materials*. Composite Reliability 1975. ASTM STP(580): p. 159-175.
3. Peroni, I., A. Paolozzi, and Bramamte. *Effect of debonding damage on modal damping of sandwich panel*. in *Proceedings of 9th International Modal Analysis Conference*. p. 1617-1622,1991.
4. Adams, R.D., P. Cawley, C.J. Pye, and D. Short, *A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures*. Mechanical Engineering Science, 1978. 20(2): p. 93-100.
5. Biswas, M., A.K. Pandey, and M.M. Samman, *Diagnostic experimental spectral/modal analysis of a highway bridge*. The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 1990. 40(1): p. 22-31.
6. Loland, O. and C.J. Dodds. *Experiences in developing and operating integrity monitoring system in North sea*. in *Proceedings of the 7th Annual Offshore Technology Conference*. p. 313-319,1976.
7. Vandiver, J.K. *Detection of structural failure on fixed platforms by measurements of dynamic response*. in *Proceedings of the 6th Annual Offshore Technology Conference*. p. 243-252,1975.
8. Lai, J.Y. and K.F. Young, *Dynamic of graphite/epoxy composite under delamination fracture and environmental effects*. Journal of Composite Structures, 1995. 30: p. 25-32.

9. Tsai, W.H. and J.C.S. Yang, *Nondestructive evaluation of composite structures using system identification technique*. Journal of Engineering Materials and Technology, 1988. 110: p. 134–139.
10. Mannan, M.A. and M. Richarson. *Detection and location of structural cracks using FRF measurements*. in *Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference*. p. 652–657,1990.
11. Samman, M.M., M. Biswas, and A.K. Pandey, *Employing pattern recognition for detecting cracks in a bridge model*. The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 1991. 6(1): p. 35-44.
12. Biswas, M., M.M. Samman, A.K. Pandey, and S.A. Bluni, *Modified chain code computer vision techniques for interrogation of vibration signatures for structural fault detection*. Journal of Sound and Vibration, 1994. 175: p. 89-104.
13. Samman, M.M. and M. Biswas, *Vibration testing for nondestructive evaluation of bridges. I: theory*. Journal of Structural Engineering, 1994. 120: p. 269-289.
14. Samman, M.M. and M. Biswas, *Vibration testing for nondestructive evaluation of bridges. II: results*. Journal of Structural Engineering, 1994. 120: p. 290-306.
15. Manning, R.A., *Structural damage detection using active members and neural networks*. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 1994. 32(Technical Notes): p. 1331-3.
16. Cawley, P. and R.D. Adams, *A vibration technique for non-destructive testing of fibre composite structures*. Journal of Composite Materials, 1979. 12: p. 161-175.
17. Cawley, P. and R.D. Adams, *The Location of Defects in Structures From Measurements of Natural Frequencies*. Journal Strain Analysis, 1979. 14(2): p. 49-57.
18. Cawley, P. and R.D. Adams. *Defect location in structures made from advance composite materials*. in *Proceedings of Third International Conference on Composite Materials*. p. 973-983,1980.
19. Saravanos, D.A. and D.A. Hopkins, *Effects of delaminations on the damped dynamic characteristic of composite laminates: analysis and experiments*. Journal of Sound and Vibration, 1996. 195(5): p. 977-993.
20. Yuen, M.M.F., *A numerical study of eigen parameters of a damaged cantilever*. Journal of Sound and Vibration, 1985. 103: p. 301-310.
21. Chen, J.C., *On-orbit damage assessment for large space structures*. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 1988. 26: p. 1119-1126.
22. Abdo, M.A.B. and M. Hori, *A numerical study of structural damage detection using changes in the rotation of mode shape*. Journal of Sound and Vibration, 2002. 251(2): p. 227-239.
23. Lin, C.S., *Location of modeling errors using modal test data*. AIAA Journal, 1990. 28(9): p. 1650–1654.
24. Lin, R.M. and D.J. Ewins, *Analytical model improvement using frequency response functions*. Mechanical Systems and Signal Processing, 1994. 8(4): p. 437-458.
25. Maia, N.M.M., J.V. Araújo dos Santos, R.P.C. Sampaio, and C.M.M. Soares. *Damage Identification Using Curvatures and Sensitivities of Frequency-Response-Functions*. in *The Third European Workshop On Structural Health Monitoring*. p. 547-554,2006. Granada, Spain.
26. Pandey, A.K., M. Biswas, and M.M. Samman, *Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes*. Journal of Sound and Vibration, 1991. 145(2): p. 321-332.
27. Lienvén, N.A.J. and D. Ewins. *Spatial correlation of modal shapes, the Co-ordinate Modal Assurance Criterion (COMAC)*. in *Proceedings of the 6th International Modal Analysis Conference*. p. 690-695,1988.
28. Wolff, T. and M. Richarson. *Fault detection in structures from changes in their modal parameters*. in *Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference*. p. 87-94,1989.

29. Dimarogonas, A.D., *Vibration of cracked structures-a state of the art review*. Engineering Fracture Mechanics, 1996. 5: p. 831–857.
30. Timoshenko, S. and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of plates and shells*. 2d ed. Engineering societies monographs. 1959, New York,: McGraw-Hill. 580 p.
31. Yao, G.C., K.C. Chang, and G.C. Lee, *Damage diagnosis of steel frames using vibrational signature analysis*. Journal of Engineering Mechanics, 1992. 118: p. 1949-61.
32. Chen, Y. and A.S.J. Swamidias. *Dynamic characteristics and modal parameters of a plate with a small growing surface cracks*. in *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference*. p. 1155-1161,1994.
33. Yan, L.H., T.P. Leung, and K.Z. Xue, *Theoretical and experimental study of modal strain energy*. Journal of Sound and Vibration, 1996. 191: p. 251-260.
34. Chang, K.C., S. Z., and G.C. Lee. *Modal analysis technique for bridge damage detection*. in *American Society of Civil Engineers Proceedings*. p. 1083-1088,1993.
35. Stubbs, N., J.T. Kim, and C.R. F. *Field verification of a non destructive damage localization and severity estimation algorithm*. in *Proceedings 13th International Modal Analysis Conference*,1995. Nashville, U.S.A.
36. Sampaio, R.P.C., N.M.M. Maia, and J.M.M. Silva, *Damage detection using the frequency-response-function curvature method*. Journal of Sound and Vibration, 1999. 226(5): p. 1029-1042.
37. Ratcliffe, C.P., *Damage detection using a modified laplacian operator on mode shape data*. Journal of Sound and Vibration, 1997. 204(3): p. 505-517.
38. Yoon, M.K., et al., *Local damage detection using the two-dimensional gapped smoothing method*. Journal of Sound and Vibration, 2005. 279: p. 119-139.
39. Change, J., G.R. Tomlinson, and K. Worden. *A simply approach to the numerical and experimental modelling of the dynamics of a cracked beam*. in *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference*. p. 778-795,1994.
40. Ratcliffe, C.P. and W.J. Bagaria, *Vibration technique for locating delamination in a composite beam*. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal 1998. 36(6): p. 1074–1077.
41. Ratcliffe, C.P., *A frequency and curvature based experimental method for locating damage in structures*. Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the Asme, 2000. 122(3): p. 324-329.
42. Yoon, M.K., et al. *Local damage detection using a global fitting method on mode shape data*. in *A Conference on Structural Dynamics*. p. 231-237,2001.
43. Gysin, H.P. *Critical application of the error matrix method for localisation of finite element modeling inaccuracies*. in *Proceedings of the 3th International Modal Analysis Conference*. p. 1339-1351,1986.
44. Park, Y.S., H.S. Park, and S.S. Lee, *Weighted-error-matrix application to detect stiffness damage by dynamic-characteristic measurement*. Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 1988. 3(3): p. 101-107.
45. Pandey, A.K. and M. Biswas, *Damage detection in structures using changes in flexibility*. Journal of Sound and Vibration, 1994. 169: p. 3-17.
46. Pandey, A.K. and M. Biswas, *Experimental-Verification of Flexibility Difference Method for Locating Damage in Structures*. Journal of Sound and Vibration, 1995. 184(2): p. 311-328.
47. Rubin, S. and R.N. Coppolino. *Flexibility monitoring of offshore jacket platforms*. in *Proceedings of the 15th Annual Offshore Technology Conference*. p. 201-208,1983.
48. Gentile, A. and A. Messina, *On the continuous wavelet transforms applied to discrete vibrational data for detecting open cracks in damaged beams*. International Journal of Solid and Structures, 2003. 40: p. 295-315.
49. Rucka, M. and K. Wilde, *Crack identification using wavelets on experimental static deflection profiles*. Engineering Structures, 2006. 28(2): p. 279-288.
50. Messina, A., *Detecting damage in beams through digital differentiator filters and continuous wavelet transforms*. Journal of Sound and Vibration, 2004. 272: p. 385–412.

51. Zhu, H.P. and Y.L. Xu, *Damage detection of mono-coupled periodic structures based on sensitivity analysis of modal parameters*. Journal of Sound and Vibration, 2005. 285: p. 365–390.
52. Lestari, W. and P. Qiao, *Damage detection of fiber-reinforced polymer honeycomb sandwich beams*. Composite Structures, 2005. 67: p. 365–373.
53. Lee, S.M., *International Encyclopaedia of Composites*. Vol. 4. 1991: VCH Publishers.
54. Sirohi, R.S., *Speckle Metrology*. 1993: Marcel Dekker.
55. Hung, Y.Y., *Digital shearography versus TV-holography for non-destructive evaluation*. Optics and Lasers in Engineering, 1997. 26(4-5): p. 421-436.
56. Hung, Y.M.Y. and S. Dahuan, *Technique for rapid inspection of hermetic seals of microelectronic packages using shearography*. Optical Engineering, 1998. 37(5): p. 1406-1409.
57. Hung, Y.Y., *Applications of digital shearography for testing of composite structures*. Composites Part B-Engineering, 1999. 30(7): p. 765-773.
58. Sirohi, R.S., C.J. Tay, H.M. Shang, and W.P. Boo, *Nondestructive assessment of thinning of plates using digital shearography*. Optical Engineering, 1999. 38(9): p. 1582-1585.
59. Gomes, J.F.S., J.M. Monteiro, and M.A.P. Vaz, *NDI of interfaces in coating systems using digital interferometry*. Mechanics of Materials, 2000. 32(12): p. 837-843.
60. Santos, F., M. Vaz, and J. Monteiro, *A new set-up for pulsed digital shearography applied to defect detection in composite structures*. Optics and Lasers in Engineering, 2004. 42(2): p. 131-140.
61. Leendertz, J. and J.N. Butters, *An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments*. J. Phys. E., 1973. 6: p. 1107-1110.
62. Kreis, T., *Handbook of holographic interferometry : optical and digital methods*. 2005, Weinheim: Wiley-VCH. xii, 542 p.
63. Hung, Y.Y. and J.D. Hovanessian, *Surface Slopes Measurement by a Multisource Shearing Interferometry*. Journal of the Optical Society of America, 1978. 68(10): p. 1391-1391.
64. Lükberg, O. and G. Slettemoen, *Basic electronic speckle pattern interferometry*. Applied Optics and Optical Engineering. 1997, New York: Academic Press.
65. Hung, M.Y.Y., K.W. Long, and J.Q. Wang, *Measurement of residual stress by phase shift shearography*. Optics and Lasers in Engineering, 1997. 27(1): p. 61-73.
66. Devesa, L., et al., *Detection of impact defects in laminated composites by holographic interferometry*. Advanced Materials Forum I, 2002. 230-2: p. 279-282.
67. Pedrini, G., Y.-L. Zou, and H.J. Tiziani, *Quantitative evaluation of digital shearing interferogram using the spatial carrier method*. Pure Appl. Opt., 1996. 5: p. 313–321.
68. Ambu, R., F. Aymerich, F. Ginesu, and F. Priolo, *Assessment of NDT interferometric techniques for impact damage detection in composite laminates*. Composites Science and Technology, 2006. 66: p. 199-205.
69. Richardson, M.O., et al., *ESPI non-destructive testing of GRP composite materials containing impact damage*. Composites Part A, 1998. 29A: p. 721-729.
70. Aprahamian, R., D.A. Evensen, J.S. Mixson, and J.L. Jacoby, *Holographic Study of Propagating Transverse Waves in Plates*. Experimental Mechanics, 1971. 11(5): p. 357-362.
71. Fallstrom, K.E., H. Gustavsson, N.E. Molin, and A. Wahlin, *Transient Bending Waves in Plates Studied by Hologram Interferometry*. Experimental Mechanics, 1989. 29(4): p. 378-387.
72. Fallstrom, K.E., L.E. Lindgren, N.E. Molin, and A. Wahlin, *Transient Bending Waves in Anisotropic Plates Studied by Hologram Interferometry* Experimental Mechanics, 1989. 29(4): p. 409-413.
73. Olofsson, K., *Pulsed Holographic Interferometry for the Study of Bending Wave Propagation in Paper and in Tubes*, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology - Sweden. 1994.
74. Olofsson, K., K.E. Fallstrom, and P. Palagyi, *Laser generated and recorded transient bending waves in composite tubes*. Experimental Mechanics, 1996. 36(3): p. 224-231.

75. Fallstrom, K.E., K. Olofsson, H.O. Saldner, and S. Schedin, *Dynamic material parameters in an anisotropic plate estimated by phase-stepped holographic interferometry*. Optics and Lasers in Engineering, 1996. 24(5-6): p. 429-454.
76. Fallstrom, K.E. and O. Lindblom, *Transient bending wave propagation in anisotropic plates*. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the Asme, 1998. 65(4): p. 930-938.
77. Conrad, M. and M. Sayir, *Composite Ceramic-metal Plates Tested with Flexural Waves and Holography*. Experimental Mechanics, 2001. 41(4): p. 412-420.
78. Ruzek, R., R. Lohonka, and J. Jironc, *Ultrasonic C-Scan and shearography NDI techniques evaluation of impact defects identification*. NDT&E International, 2006. 39(2): p. 132-142.
79. Davila, A., P.D. Ruiz, G.H. Kaufmann, and J.M. Huntley, *Measurement of sub-surface delaminations in carbon fibre composites using high-speed phase-shifted speckle interferometry and temporal phase unwrapping*. Optics and Lasers in Engineering, 2003. 40: p. 447-458.
80. Cernadas, D., et al., *Non-destructive testing with surface acoustic waves using double-pulse TV holography*. Measurement Science and Technology, 2002. 13: p. 438-444.
81. Schroeder, F.D. and H.A. Crostack. *Real-time holography of ultrasonic surface waves in Proc. SPIE* p. 290-5, 1996
82. Mast, T.D. and G.A. Gordon, *Quantitative flaw reconstruction from ultrasonic surface wavefields measured by electronic speckle pattern interferometry* IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 2001. 48: p. 432-44.
83. Cristina, T., et al., *Measurement of the complex amplitude of transient surface acoustic waves using double-pulsed TV holography and a two-stage spatial Fourier transform method*. Measurement Science and Technology, 2003. 14: p. 2127-2134.

# Capítulo 2

## Análise Estrutural do Dano

---

### 2.1 Introdução

A caracterização do dano estrutural por via experimental é algo complexo e de difícil implementação. Por estes motivos são várias as abordagens ao problema e as metodologias desenvolvidas. Porém, os métodos baseados na análise gráfica das perturbações na resposta estrutural são de entre os mais eficazes os mais utilizados. A facilidade na utilização da técnica e o baixo grau de pós-processamento dos dados são as principais vantagens. Todavia, o parâmetro estrutural mais eficaz para ser usado nesta caracterização ainda não está completamente estabelecido. As análises apresentadas por diversos autores apontam para a utilização das derivadas espaciais do campo de deslocamentos, embora as conclusões sobre a escolha do melhor parâmetro é por vezes ambígua e difusa. Para melhor compreender a influência do dano e por ser um assunto fundamental ao estabelecimento de uma metodologia experimental, é apresentado neste capítulo um estudo envolvendo as diferentes componentes da resposta estrutural. Por motivos de simplificação e para clarificação dos conceitos só será aqui analisado o caso da flexão transversal de vigas isotrópicas tendo por base os resultados obtidos com o método dos elementos finitos. No entanto, as conclusões daqui retidas poderão ser extrapoladas para outros casos.

Neste estudo são abordadas duas configurações particulares da viga, em consola e livre-livre, semelhantes às que vão ser analisadas por via experimental. Neste âmbito é apresentada a análise da resposta estática para a viga encastrada-livre e da resposta dinâmica para a viga livre-livre. Este estudo concentra-se fundamentalmente na interpretação do campo de deslocamentos, rotações assim como dos esforços internos, momento-flector e forças de corte, para diferentes condições de dano. O capítulo culmina com o estudo da influência do ruído experimental na metodologia de determinação do dano.

Para automatização do procedimento de cálculo desenvolvido e analisar a sensibilidade ao dano das diferentes componentes da resposta em vigas, foi implementado em MATLAB 7<sup>®</sup> uma aplicação desenvolvida de acordo com a formulação clássica do método dos elementos finitos.

### 2.2 Formulação geral em vigas

A formulação clássica do método dos elementos finitos foi adoptada para a determinação do comportamento estrutural de vigas danificadas. Os danos são simulados pela introdução de descontinuidade nas propriedades da estrutura. A formulação usada tem por base a teoria clássica de Euler-Bernoulli para vigas finas. O modelo numérico de elementos finitos assenta na distribuição espacial de massa, rigidez e amortecimento. O movimento global dos graus de liberdade do sistema é descrito pelo vector  $\{v(t)\}$  e as forças globais externas pelo  $\{f(t)\}$ , sendo  $t$  o tempo. A partir da formulação global do modelo são estabelecidas as equações diferenciais do movimento, que podem escrever-se na forma matricial [1, 2]:

$$[m]\{\ddot{v}(t)\} + [c]\{\dot{v}(t)\} + [k]\{v(t)\} = \{f(t)\} \quad (2.1)$$

onde  $[m]$  é a matriz de massa generalizada,  $[k]$  a matriz de rigidez generalizada e  $[c]$  a matriz de

amortecimento generalizada, obtidas a partir da assemblagem das matrizes elementares de massa  $[m^e]$ , de rigidez  $[k^e]$  e de amortecimento  $[c^e]$ . Os vectores  $\{v(t)\}$ ,  $\{\dot{v}\}$  e  $\{\ddot{v}(t)\}$  representam, respectivamente, os deslocamentos, velocidades e acelerações nodais generalizadas e constituem a resposta do sistema.

A partir dos vectores da resposta do sistema, obtêm-se os vectores do movimento nodal dos elementos e determinam-se os esforços internos  $\{Q^e(t)\}$  em cada elemento finito, definidos pela seguinte expressão:

$$\{Q^e(t)\} = [m^e] \{\ddot{v}^e(t)\} + [c^e] \{\dot{v}^e(t)\} + [k^e] \{v^e(t)\} \quad (2.2)$$

Os graus de liberdade ou deslocamentos nodais do elemento, deslocamento  $v_i^e(t)$  e rotação  $\theta_i^e(t)$ , são agrupados no vector de deslocamentos generalizados  $\{v^e(t)\}$ ,

$$\{v^e(t)\} = \{v_1^e(t) \quad \theta_1^e(t) \quad v_2^e(t) \quad \theta_2^e(t)\}^T \quad (2.3)$$

onde os índices 1 e 2 designam o primeiro e o segundo nó do elemento finito, respectivamente. Os esforços nodais correspondentes, momento-flector  $M_i^e(t)$  e esforço de corte  $Q_i^e(t)$ , são agrupados no vector  $\{Q^e(t)\}$ , designado por vector de forças generalizadas,

$$\{Q^e(t)\} = \{Q_1^e(t) \quad M_1^e(t) \quad Q_2^e(t) \quad M_2^e(t)\}^T \quad (2.4)$$

Para uma viga de secção recta uniforme e adoptando as funções cúbicas de Hermite para interpolação, as matrizes de massa e de rigidez para o elemento finito de viga de Euler-Bernoulli tomam a forma [1-3]:

$$[m^e] = \frac{\rho A \ell^e}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22\ell^e & 54 & -13\ell^e \\ 22\ell^e & 4\ell^{e2} & 13\ell^e & -3\ell^{e2} \\ 54 & 13\ell^e & 156 & -22\ell^e \\ -13\ell^e & -3\ell^{e2} & -22\ell^e & 4\ell^{e2} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$[k^e] = \frac{EI}{\ell^{e3}} \begin{bmatrix} 12 & 6\ell^e & -12 & 6\ell^e \\ 6\ell^e & 4\ell^{e2} & -6\ell^e & 2\ell^{e2} \\ -12 & -6\ell^e & 12 & -6\ell^e \\ 6\ell^e & 2\ell^{e2} & -6\ell^e & 4\ell^{e2} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

onde  $\ell^e$  é o comprimento do elemento,  $\rho$  a massa específica do material,  $A$  a secção transversal da viga,  $E$  é o módulo de Young e  $I$  é o momento de 2ª ordem da secção transversal.

A matriz de amortecimento elementar  $[c^e]$  é definida de acordo com modelos de dissipação de energia. A sua função principal é atenuar a amplitude do movimento em sistemas oscilatórios dinâmicos.

### 2.2.1 Modelo de dano

O dano estrutural é materializado por descontinuidades nas propriedades físicas do material. As quais se manifestam pelo aumento local da amplitude da resposta. Assim, a modelação numérica do dano é concretizada por uma equivalente diminuição nas propriedades mecânicas. Neste trabalho adopta-se o modelo da redução da rigidez no elemento, por ser este o mais realista de dano [4].

A matriz de rigidez do elemento danificado pode ser obtida a partir da matriz de rigidez elementar, através:

$$[k_d^e] = (1 - \delta_k^e) [k^e] \quad (2.7)$$

onde  $\delta_k^e$  é designado por parâmetro de dano do elemento  $e$  e pode tomar valores entre 0 e 1, sendo que 0 representa a ausência de dano e 1 para o dano máximo (rigidez nula no elemento).

Neste modelo é admitido que o parâmetro dano afecta de modo igual todas as componentes da matriz de rigidez. Assim, para uma viga de secção rectangular uniforme, o parâmetro de dano  $\delta_k^e$  passa a relacionar o módulo de Young da secção danificada  $E_d^e$  com a secção não danificada  $E^e$  [4],

$$E_d^e = (1 - \delta_k^e) E^e \quad (2.8)$$

A contribuição do factor dano para a resposta global é efectuada de modo indirecto, através assemblagem da matriz de rigidez dos diferentes elementos da estrutura, expressão 2.6. Este modelo simplificado de dano permite simular danos na secção transversal de uma viga de material isotrópico. Já a simulação em materiais compósitos, devido à sua heterogeneidade, requerer a utilização de modelos mais complexos de dano [5]. Porém, este tema não será aqui desenvolvido, pois vai além do âmbito da análise a que se propõe este trabalho.

### 2.2.2 Resposta estática

Para uma solicitação independente do tempo do tipo  $\{f(t)\} = \{F\}$  em que o vector  $\{F\}$  representa as amplitudes das forças aplicadas, a equação matricial do movimento passa a escrever-se [1]:

$$[k]\{v\} = \{F\} \quad (2.9)$$

onde o vector  $\{v\}$  representa os deslocamentos nodais generalizados.

As forças nodais calculadas ao nível de cada elemento finito, o momento-flector e esforço de corte, são determinados a partir da expressão seguinte [1]:

$$\{Q^e\} = [k^e]\{v^e\} \quad (2.10)$$

Para o desenvolvimento de metodologias de identificação do dano na resposta em vigas e automatização do procedimento, todo cálculo foi implementado em ambiente MATLAB 7<sup>®</sup>, incluindo o cálculo pelo o método dos elementos finitos. Com base no modelo estático da resposta, vai a seguir proceder-se à análise da influência do dano na resposta de uma viga na condição de encastrada-livre, modelo adoptado na análise experimental.

### 2.2.2.1 Viga na condição encastrada-livre

Na Fig. 2.1 estão representadas a viga de alumínio na condição encastrada-livre utilizada na análise e as respectivas características geométricas e propriedades do material.

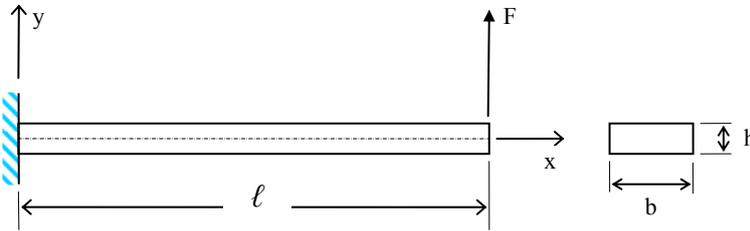


Fig. 2.1 – Representação da viga em consola submetida a uma força constante na extremidade livre.

As características geométricas, elásticas e de carregamento aplicado são as seguintes:

$$\begin{aligned} \ell &= 0,26 \text{ m} & b &= 4,5 \times 10^{-2} \text{ m} & h &= 6 \times 10^{-3} \text{ m} \\ E &= 7 \times 10^{10} \text{ Pa} & F &= 0,4 \text{ N} & I_z &= \frac{b \times h^3}{12} = 8,1 \times 10^{-10} \text{ m}^4 \end{aligned}$$

Para a determinação da resposta estática da viga utilizou-se o método de elementos finitos com a viga discretizada em 20 elementos iguais. Na Fig. 2.2 estão representados os campos de deslocamento, rotação e esforços internos, momento-flector e esforço de corte, obtidos através da solução analítica (Analítico) e pelo método dos elementos finitos (MEF) para a viga em estudo.

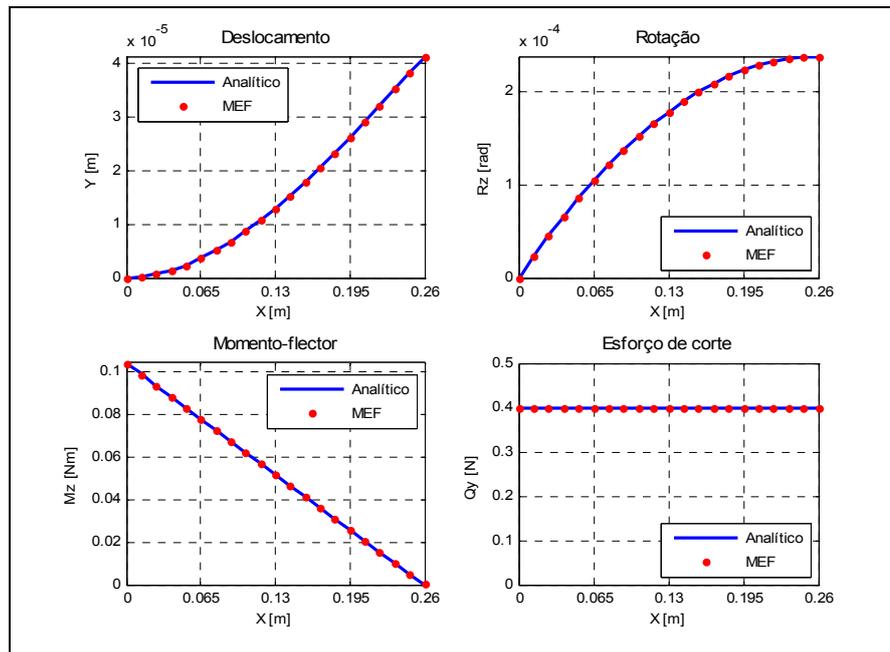


Fig. 2.2 – Representação do deslocamento, rotação, momento-flector e esforço de corte da viga em consola.

Pela análise comparativa da representação dos deslocamentos, rotações e esforços internos na viga, verifica-se que os resultados entre os dois modelos são coincidentes, podendo considerar-se assim válida a implementação pelo método dos elementos finitos.

A partir da incorporação do modelo de dano no método dos elementos finitos e tendo por base a viga em estudo será analisada a sensibilidade dos diferentes componentes da resposta estrutural, com o objectivo final de estabelecer uma metodologia eficaz para a identificação do dano. Neste sentido, apresentar-se-á a seguir um estudo da influência da localização e severidade do dano no campo de deslocamentos, rotações, momento-flector e esforço de corte da viga.

2.2.2.2 Análise da sensibilidade das componentes na resposta ao dano

A introdução do dano no método dos elementos finitos é efectuada através da redução do módulo de Young nos diferentes elementos da viga, expressão 2.8. A presença de descontinuidades nas propriedades do material resulta no aparecimento de perturbações localizados na resposta da viga, que coincidem com a posição do dano [4]. A análise gráfica destas anomalias é usada para identificar a posição e a severidade dos danos na estrutura. A título de exemplo determina-se a resposta da viga em consola para um dano no elemento 16 ( $x = 0,195\text{m}$ ) de valor  $\delta_k^{16} = 0,5$ , equivalente a uma redução em 50% do módulo de Young neste elemento.

Na Fig. 2.3 estão representados os campos de deslocamentos, rotações, momento-flector e esforço de corte, para a viga com e sem dano.

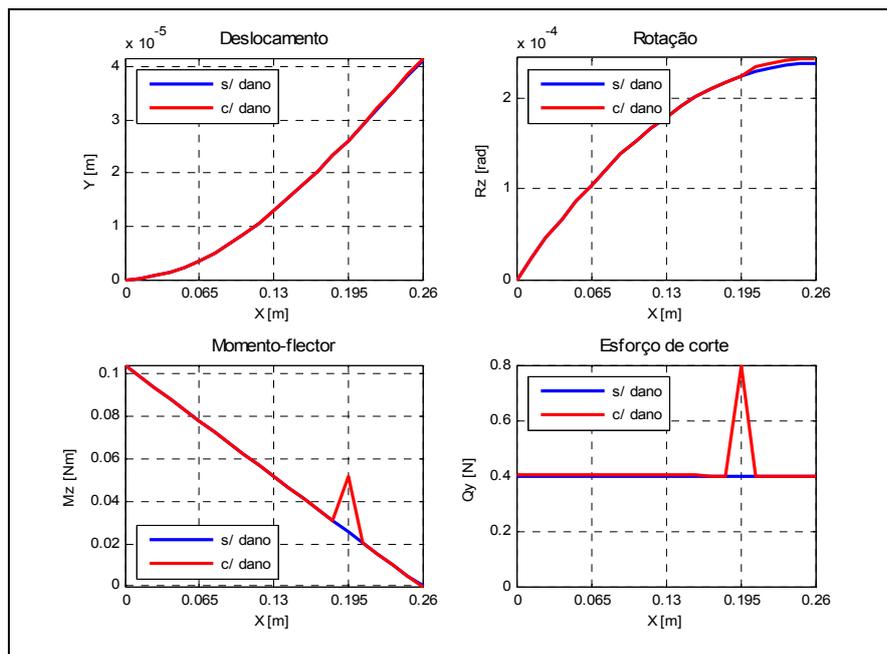


Fig. 2.3 – Representação das diferentes componentes da resposta da viga em consola com dano a 0,195 m do encastramento.

A análise das diferentes componentes da resposta na viga, Fig. 2.3, revela que o dano não produz alterações assinaláveis no deslocamento, embora podendo ser localizado pela diferença no andamento na rotação ou a partir de descontinuidades no momento-flector ou esforço de corte. Na verdade, observa-se que a influência do dano é mais evidente no momento-flector e esforço de corte, com maior relevo para este último. Refira-se que a rotação e esforços internos na viga, momento-flector e esforço de corte, estão relacionados com a primeira, segunda e terceira derivadas espaciais do campo de deslocamentos, respectivamente. Por outro lado, as descontinuidades são representadas por termos de ordem mais elevada na frequência espacial ou no domínio do número de onda, sendo amplificados pelo processo de cálculo das derivadas espaciais. Este facto explica a maior sensibilidade do esforço de corte a alterações na rigidez da viga.

De forma a permitir a comparação directa da influência da localização e severidade do dano entre as diferentes componentes da resposta da viga, é aqui introduzido um novo parâmetro, que será designado por índice de sensibilidade ao dano (ISD):

$$ISD(i) = \left| \frac{S_i^d - S_i}{\max(S) - \min\{0, S\}} \right| \quad \text{para } 0 \leq ISD < \infty \quad (2.11)$$

onde  $S_i$  designa a amplitude da resposta da viga sem dano,  $S_i^d$  a amplitude da resposta para viga com

dano e  $i$  o nó.

O parâmetro ISD representa a diferença da amplitude normalizada entre a estrutura sem e com dano. O parâmetro pode tomar valores desde 0 a  $\infty$ , em que zero representa ausência de dano no elemento e  $\infty$  corresponde ao factor de dano máximo ( $\delta_k^e = 1$ ).

A partir do indicador ISD e tendo por base o modelo de viga apresentado será desenvolvido um estudo sobre a influência do dano nas componentes da resposta. Neste âmbito serão analisados os quatro casos de dano apresentados na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 – Casos de dano**

	Caso 1	Caso 2	Caso 3		Caso 4	
Elemento	5	16	5	16	5	16
$\delta_k^e$	0,05	0,1	0,1	0,2	0,15	0,25

Na Fig. 2.4 estão representados os índices de sensibilidade ao dano das componentes da resposta da viga para os quatro casos de dano em análise.

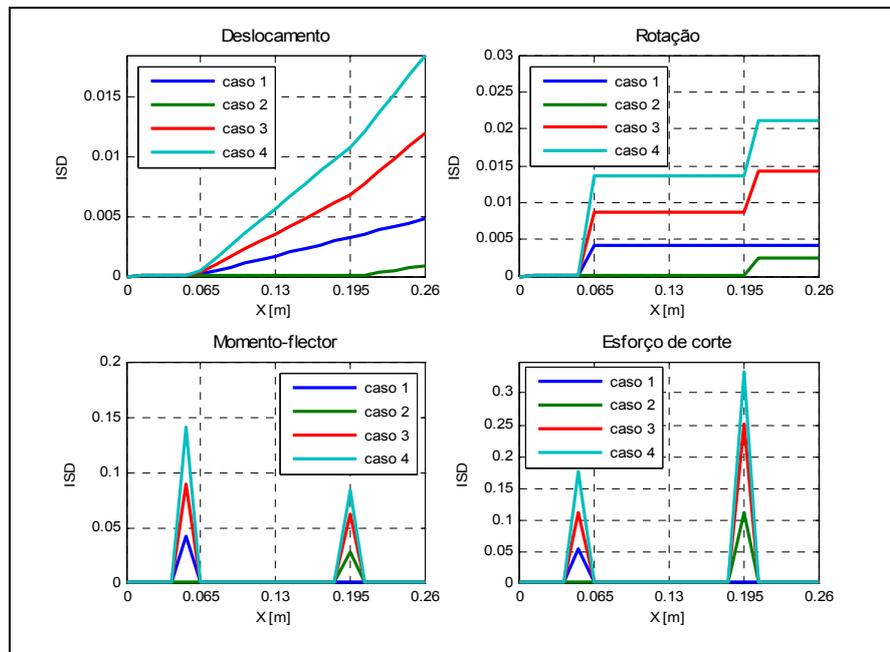


Fig. 2.4 – Representação do ISD para a resposta da viga em consola.

A observação da Fig. 2.4 revela que para a região do dano, a viga apresenta uma inflexão no ISD dos deslocamentos e uma descontinuidade para ISD da rotação. Para as componentes do ISD do momento-flector e do esforço de corte, os danos surgem representados por máximos locais. A análise comparativa dos valores do ISD das componentes da resposta na viga confirma que a sensibilidade ao dano cresce com a ordem da derivada espacial, sendo o valor máximo para o esforço de corte. Observando individualmente os valores do ISD do esforço de corte constata-se que estes são proporcionais à severidade do dano. Esta condição deve-se unicamente a uma distribuição uniforme no esforço de corte e é resultado da aplicação de uma força pontual na extremidade livre da viga, Fig. 2.2. No que concerne ao valor do ISD do deslocamento, rotação e momento flector, o efeito é maior para o dano mais próximo do bordo encastrado, onde o momento-flector é máximo, Fig. 2.2. Este aspecto indicia, desde já, que a sensibilidade ao dano é maior na região do momento-flector máximo. No âmbito desta análise e de forma a investigar a região de máxima influência do dano, determinam-se a seguir os ISD das componentes da resposta, percorrendo sucessivamente os diferentes elementos da viga.

O parâmetro ISD do deslocamento, rotação, momento-flector e esforço de corte da viga, para as diferentes posições do dano com  $\delta_k^e = 0,2$ , estão representados na Fig. 2.5. Nesta representação, observa-se que o ISD do deslocamento, rotação e momento-flector são máximas junto ao bordo encastrado e que o ISD do esforço de corte é constante ao longo da viga.

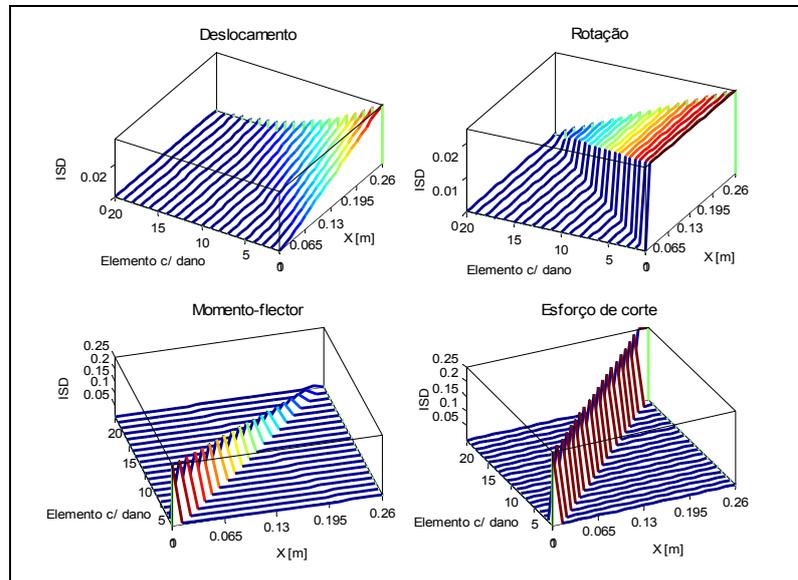


Fig. 2.5 – Representação da distribuição ISD para sucessivas posições do dano na viga em consola.

A partir da distribuição do ISD, Fig. 2.5, verifica-se que o valor da amplitude máxima do momento-flector, junto ao bordo, é igual ao do esforço de corte na região do dano. Daqui pode concluir-se que a sensibilidade do parâmetro ISD para o momento-flector é equivalente ao esforço de corte para esta região. Este aspecto assume uma importância relevante na determinação por via experimental dos esforços internos e do dano. As metodologias de cálculo do momento-flector e esforço de corte a partir de campos obtidos por via experimental serão desenvolvidas nos capítulos seguintes.

Na continuação desta análise examina-se a seguir a influência do ruído de medição na determinação do dano a partir do ISD dos diferentes campos da resposta estática da viga.

### 2.2.2.3 Interferência do ruído experimental

Os campos de deslocamentos obtidos por via experimental estão, naturalmente, afectados por ruído da medição. Neste âmbito, os campos das rotações e esforços internos são, normalmente, obtidos de forma indirecta, a partir da medição do campo de deslocamentos e cálculo da primeira, segunda e terceira das suas derivadas espaciais [6]. Neste caso, a diferenciação numérica é laboriosa e favorável a grandes erros. Em consequência disso, o ruído experimental pode afectar de forma predominante o cálculo dos esforços internos e a determinação do dano estrutural. A sua influência sobre o ISD das componentes da resposta da viga será a seguir analisada.

O ruído experimental é adicionado artificialmente ao campo de deslocamentos numérico. A partir deste, são determinados os campos de rotações, momento-flector e esforços de corte, recorrendo ao método das diferenças finitas centrais [4, 7]. O campo de rotações é representado pela primeira derivada dos deslocamentos em ordem a  $x$ , podendo ser obtida através da seguinte aproximação:

$$\frac{\partial v(x_i)}{\partial x} \approx \frac{v(x_{i+1}) - v(x_{i-1}))}{2\Delta x} \quad i=1, \dots, N \quad (2.12)$$

onde  $\Delta x = x_{i+1} - x_i$  representa o passo e  $N$  o número de pontos de discretização do domínio.

O momento-flector está relacionado com a curvatura e é representado pela segunda derivada do deslocamento em ordem à variável  $x$ . A partir do método das diferenças finitas centrais, a segunda derivada dos deslocamentos escreve-se:

$$\frac{d^2v(x_i)}{dx^2} \approx \frac{v(x_{i+1}) - 2v(x_i) + v(x_{i-1}))}{\Delta x^2} \quad i=1, \dots, N \quad (2.13)$$

Para o esforço de corte é necessário a terceira derivada do campo de deslocamento em ordem às abcissas, variável  $x$ . A terceira derivada calculada pelo método das diferenças finitas centrais é definida:

$$\frac{\partial^3v(x_i)}{\partial x^3} \approx \frac{v(x_{i+2}) - 2v(x_{i+1}) + 2v(x_{i-1}) - v(x_{i-2}))}{2\Delta x^3} \quad i=1, \dots, N \quad (2.14)$$

O parâmetro ISD das componentes da resposta é extraído do campo de deslocamentos e das respectivas derivadas espaciais, correspondentes à rotação e esforços internos da viga. Tomando para estudo o terceiro caso de dano, Tabela 2.1, determina-se agora o ISD dos campos da reposta estática, que são obtidos por diferenciação espacial do campo de deslocamentos numérico com adição de ruído Gaussiano de média zero e desvio padrão de 0,001% relativamente à amplitude. Neste caso, para uma maior precisão no cálculo das derivadas espaciais pelo método das diferenças finitas centrais, o domínio da viga foi discretizado em 100 elementos finitos, mantendo a mesma região com dano. Na Fig. 2.6 estão representados os ISD das componentes da resposta obtidos pelo método dos elementos finitos (MEF) e método das diferenças finitas centrais a partir do campo de deslocamentos do terceiro caso de dano após a adição de ruído (MDF).

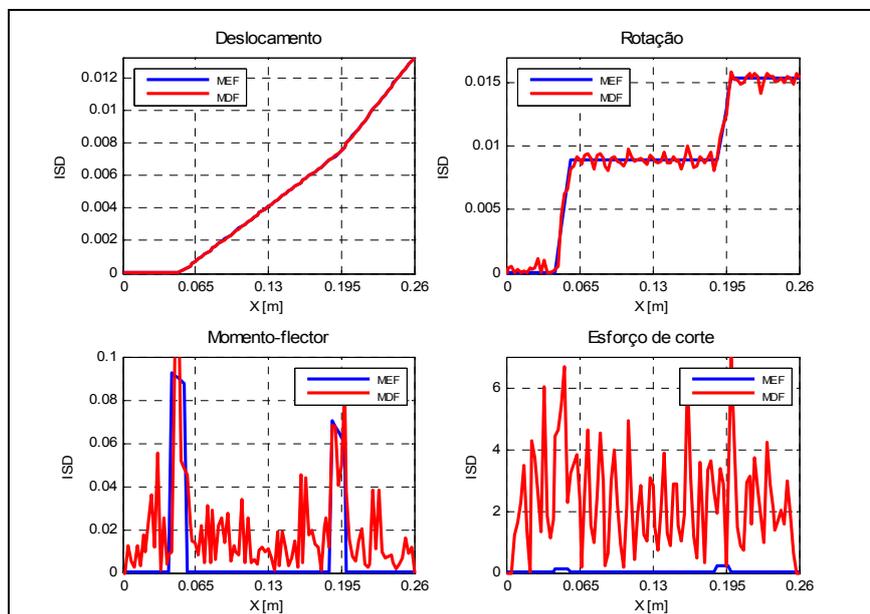


Fig. 2.6— Representação dos ISD da viga em consola para o 3º caso de dano e com adição de ruído.

Pela comparação do ISD entre MEF e MDF, Fig. 2.6, observa-se que o ruído se propaga com as sucessivas derivadas espaciais do campo de deslocamentos. As diferenças introduzidas no campo de deslocamento com adição de ruído são imperceptíveis. Todavia, a amplificação do ruído é observado para a rotação, momento-flector e esforço de corte, tornando-se preponderante relativamente ao sinal. O processo de diferenciação traduz-se por um maior peso dos termos ordem mais elevada do número de onda, correspondentes ao ruído, que se sobrepõem aos termos de mais baixa ordem do sinal [8]. A aplicação de filtros do tipo passa-baixo permitem eliminar algumas das componentes de alta ordem do ruído, mas como as discontinuidades devidas ao dano são também representadas por componentes de

alta ordem, estes são eliminados pelo processo de filtragem. No capítulo 4 será apresentado um estudo mais alargado sobre as técnicas de filtragem e os métodos de diferenciação mais adequados ao cálculo do momento-flector e esforço de corte.

Para efectuar uma análise comparativa do ISD entre tipos de regime da viga, procede-se em seguida ao estudo da resposta vibratória em regime livre.

### 2.2.3 Resposta vibratória

Para uma solicitação do tipo harmónico  $\{f(t)\} = \{\tilde{F}\}e^{j\omega t}$ , em que o vector  $\{\tilde{F}\}$  representa a amplitude complexa da força nodal e  $\omega$  a frequência de excitação, e considerando o modelo de amortecimento interno do tipo hysterético, a equação matricial do movimento em regime estacionário harmónico toma a seguinte forma [2, 8]:

$$[-\omega^2[m] + (1 + j\omega\mu)[k]] \{\tilde{v}\} = \{\tilde{F}\} \quad (2.15)$$

em que  $\mu$  é o coeficiente de amortecimento hysterético, o símbolo  $\sim$  designa quantidade complexa e  $j = \sqrt{-1}$ .

A solução particular da equação matricial do movimento 2.15 para a resposta estacionária em regime livre,  $\{\tilde{F}\} = 0$ , é determinada pela resolução de um problema de valores e vectores próprios [2]:

$$[(k_i + j\omega\mu[k_i]) - \lambda_i^2[m]]\{\tilde{\phi}_i\} = 0 \quad i=1, \dots, N \quad (2.16)$$

em que os valores próprios estão relacionados com frequências naturais, são obtidos na forma:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_{N-1}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \lambda_N^2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

os respectivos vectores próprios complexos, correspondentes às formas naturais de vibração, são:

$$\tilde{\psi} = [\tilde{\phi}_1 \ \tilde{\phi}_2 \ \dots \ \tilde{\phi}_N] = \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_{1,1} & \tilde{\phi}_{1,2} & \dots & \tilde{\phi}_{1,N-1} & \tilde{\phi}_{1,N} \\ \tilde{\phi}_{2,1} & \tilde{\phi}_{2,2} & \dots & \tilde{\phi}_{2,N-1} & \tilde{\phi}_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \tilde{\phi}_{N-1,1} & \tilde{\phi}_{N-1,2} & \dots & \tilde{\phi}_{N-1,N-1} & \tilde{\phi}_{N-1,N} \\ \tilde{\phi}_{N,1} & \tilde{\phi}_{N,2} & \dots & \tilde{\phi}_{N,N-1} & \tilde{\phi}_{N,N} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

onde N representa o número de graus de liberdade do sistema.

O vector das amplitudes complexas dos deslocamentos nodais  $\{\tilde{v}_i^e\}$  é extraído das formas naturais de vibração normalizadas à massa modal, para em cada elemento finito determinar o momento-flector e esforço de corte globais equivalentes, de acordo com a equação:

$$\{Q^e\} = (-\omega^2[m^e] + [k^e]) \{\tilde{v}_i^e\} \quad i=1, \dots, N \quad (2.19)$$

A função de resposta em frequência da aceleração pode ser obtida a partir da equação de movimento 2.15. A função acelerabilidade  $A_{i,j}(\omega)$  estabelece a relação entre o espectro da força de excitação  $\tilde{F}_i(\omega)$  no grau de liberdade  $i$  e o espectro da resposta em aceleração  $\tilde{A}_j(\omega)$  no grau de liberdade  $j$ , podendo definir-se:

$$\tilde{A}_{i,j}(\omega) = \frac{-\omega^2 \tilde{A}_j(\omega)}{\tilde{F}_i(\omega)} \quad (2.20)$$

em que o símbolo  $\sim$  serve para designar quantidade complexa.

De seguida vai proceder-se ao estudo do ISD com base na vibração transversal de vigas em regime livre, para as mesmas condições de ensaio realizadas na análise por via experimental.

### 2.2.3.1 Resposta modal para a viga na condição livre-livre

O estudo sobre os ISD das componentes da resposta da vibração transversal de vigas em regime livre é análogo ao anterior.

Para a análise vibratória da viga, consideram-se as mesmas características geometrias e propriedades elásticas do material, e cujas características de massa e de amortecimento interno estão descritas a seguir.

As propriedades de massa e amortecimento são as seguintes:

$$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3 \quad A = b \times h = 27 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \quad \mu = 0,005 (\text{valor experimental}) [8]$$

A partir do método dos elementos finitos são obtidas as frequências naturais, a amplitude dos modos naturais, rotações e respectivos esforços internos para a viga livre-livre. Neste caso particular, como apresenta modos de corpo rígido, para a determinação da solução numérica do problema é necessário proceder-se à translação da matriz de rigidez de modo a torna-la definida positiva [1], passando a ser descrita por:

$$[\bar{k}] = [k] + \beta [m] \quad (2.21)$$

em que a  $\beta$  é atribuído o valor da mesma ordem de grandeza do primeiro valor próprio não nulo [9].

### 2.2.3.2 Análise da sensibilidade das componentes da resposta modal

Com base no método dos elementos finitos e no modelo de dano definido pela expressão 2.8, apresenta-se a seguir as frequências naturais e os campos de deslocamento, rotação e esforços internos, momento-flector e esforço de corte, para a viga em estudo.

Na Tabela 2.2 estão apresentados os valores das quatro primeiras frequências naturais não nulas para a viga sem dano e com um dano no elemento 16 de valor  $\delta_k^e = 0,5$ .

Tabela 2.2 – Valores das frequências naturais de vibração para a viga livre-livre.

Freq. (Hz)	S/ dano	C/ dano	Variação
1ª	464,54	458,13	- 1,37 %
2ª	1280,56	1226,21	- 4,24 %
3ª	2510,53	2397,01	- 4,52 %
4ª	4150,50	4069,10	- 1,95 %

A partir dos valores das frequências, Tabela 2.2, conclui-se que a introdução do dano provoca uma diminuição global nas frequências naturais da viga. Todavia, esta variação é distinta entre as frequências naturais, pois está de alguma forma relacionada com a localização do dano relativamente à amplitude da componente modal da viga. Para uma identificação das alterações produzidas na resposta modal, representam-se na Fig. 2.7 os correspondentes modos naturais de vibração e os respectivos campos de rotação e esforços internos, simultaneamente para a viga sem dano (s/d) e com dano (c/d).

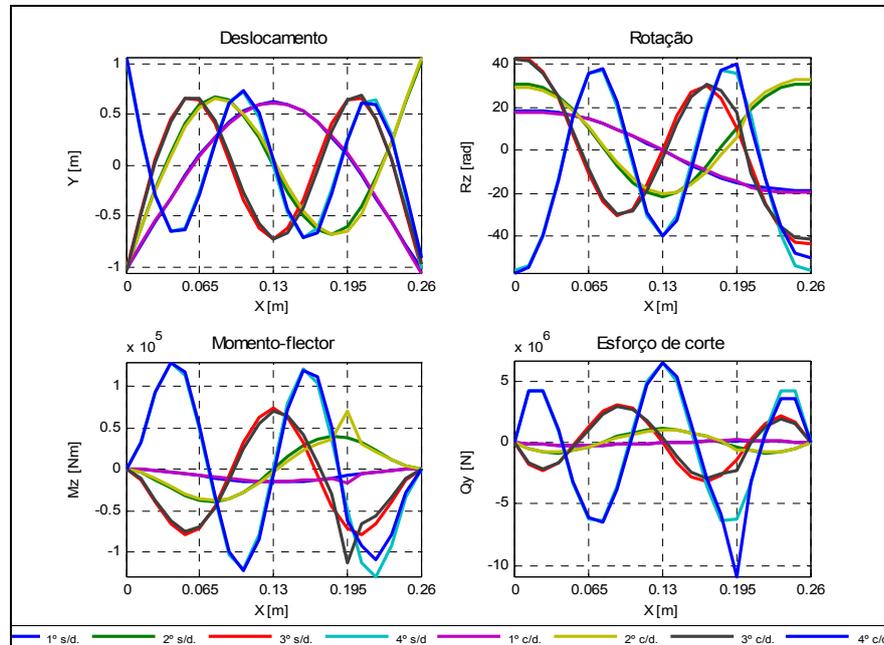


Fig. 2.7 – Representação de três dos modos naturais de vibração para a viga com e sem dano no elemento 16.

Nesta representação observa-se que, conforme o esperado, as alterações na forma das componentes da resposta vibratória da viga, provocada pelo dano, são maiores para o momento-flector e esforço de corte. Todavia, os desvios não se restringem à região do dano ( $x=0,195$ ), como no caso da resposta estática, mas estendem-se a todo o domínio da viga. Para cada um dos modos, confirma-se que os desvios observados no momento-flector são proporcionais às variações nas frequências correspondentes, conforme foi demonstrado por Cawley, et al. [10].

As magnitudes das funções de resposta em frequência do tipo acelerabilidade obtida para a posição do dano e na banda de 0 Hz a 4200 Hz estão representadas na Fig. 2.8.

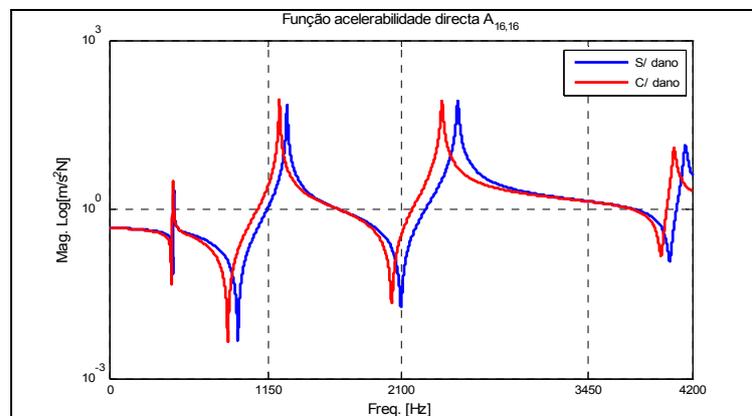


Fig. 2.8 – Representação da magnitude da função acelerabilidade directa no ponto 16.

Para a banda de frequências em análise observa-se que a presença do dano provoca a uma translação na função acelerabilidade no sentido decrescente das frequências, Tabela 2.2, e um aumento da amplitude nas ressonâncias, como resultado do aumento da flexibilidade global.

Para uma comparação directa da influência do dano entre as componentes da resposta modal e entre os dois tipos resposta da viga estudados, apresenta-se a seguir o ISD dos modos naturais de vibração da viga a partir dos quatro casos de dano definidos na Tabela 2.1. O ISD das componentes da resposta vibratório em regime livre das quatro primeiras formas naturais e para o terceiro caso de dano na viga estão representados na Fig. 2.9, os restantes casos são apresentados no Anexo A.

Globalmente observam-se alterações nas componentes da resposta para o domínio da viga, com preponderância para a região do dano. Como resultado dessa dispersão, a partir do ISD dos deslocamentos não é possível identificar a posição dos danos. Já em relação à rotação, momento-flector e esforço de corte, a posição do dano é mais evidente e revelada pela presença de descontinuidades e/ou de máximos locais no perfil do ISD de cada uma destas componentes. Como já referido, verifica-se que, também para a vibração livre-livre, os valores dos ISD das componentes da resposta modal na região do dano aumenta para os esforços internos. Da análise comparativa entre os diferentes modos, envolvendo o momento-flector e o esforço de corte, constata-se que, em geral, estes valores têm uma forte correlação com a amplitude do esforço na região do dano.

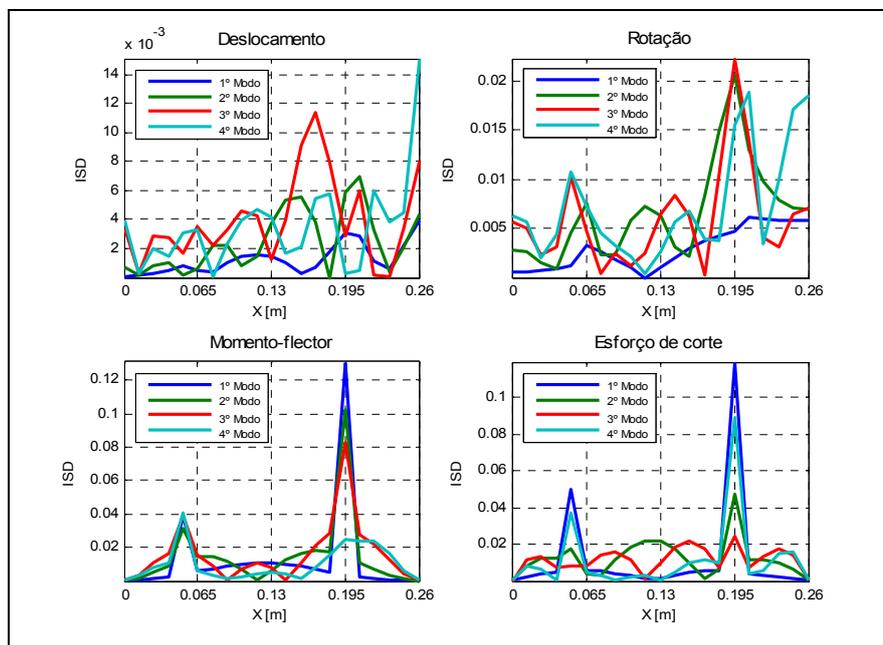


Fig. 2.9 – Representação do ISD da resposta da viga livre-livre para o 3º caso de dano.

As componentes da resposta modal apresentam uma distribuição espacial em amplitude variável ao longo da viga e que, por definição, são vectorialmente ortogonais entre os modos de vibração. Ainda, a análise de casos singulares de dano e a ortogonalidade vectorial observada entre as sucessivas derivadas, Fig. 2.7, não permitem definir a região de máxima do ISD. No sentido de compreender a variação da sensibilidade, será a seguir apresentado uma análise do ISD das componentes da resposta modal para um dano  $\delta_k^e = 0.2$ , percorrendo sucessivamente os 20 elementos em que é discretizada viga. Na Fig. 2.10 estão representadas o mapa do campo do ISD dos deslocamentos, rotação e respectivos esforços internos para o primeiro modo natural da viga. A distribuição do ISD para o segundo, terceiro e quarto modos são apresentados no anexo A.

Na consequência das alterações globais verificadas na resposta vibratória, observa-se agora uma dispersão nos valores do ISD ao longo da viga, que são mais evidentes para o deslocamento e rotação, Fig. 2.10. Refira-se que para estas duas distribuições, o valor máximos do ISD em cada perfil pode não coincidir com a região do dano, à excepção das regiões de momento-flector máximo para a rotação. Quanto à representação dos ISD do momento-flector e esforço de corte, verifica-se que os seus máximos ocorrem na posição do dano e que seguem uma distribuição em amplitude semelhante à observada para os respectivos esforços internos. No caso do primeiro modo natural de vibração, os valores máximos do ISD do momento-flector são superiores aos do esforço de corte, embora inferiores aos da resposta estática para a viga em consola. A partir da comparação dos valores máximos do ISD

do momento-flector e o esforço de corte entre os modos de vibração, constata-se que, por norma, estes decrescem com a ordem do modo. Este aspecto está relacionado com o aumento da dispersão do ISD do momento-flector e esforço de corte, Fig. 2.7. Daqui pode concluir-se que na localização do dano é mais eficaz utilizar-se as componentes da resposta dos primeiros modos naturais de vibração. Conclusão idêntica foi apresentada por Ratcliffe [11], onde refere ser suficiente a medição do primeiro modo numa viga em consola para identificar a posição do dano e que os modos de ordem superior servem apenas de confirmação.

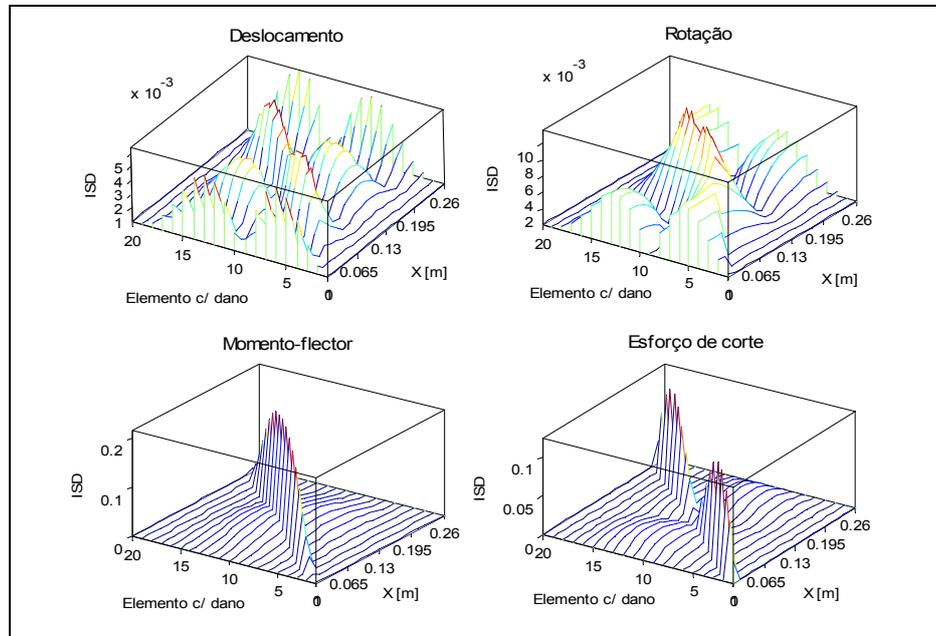


Fig. 2.10 – Distribuição ISD do primeiro modo para sucessivas posições do dano.

Em síntese, a presença do dano provoca uma diminuição nas frequências naturais de vibração na mesma proporção do desvio causado na distribuição do momento-flector do modo correspondente. Nas componentes da resposta modal, observam-se perturbações e/ou descontinuidades localizadas que crescem com a ordem da derivada espacial da amplitude modal, sendo, em geral, maiores segunda e terceira derivadas, momento-flector e esforço de corte, respectivamente. Os valores dos ISD do momento-flector e esforço de corte, para a região do dano, seguem uma distribuição em amplitude equivalente à dos esforços internos em cada modo. Verifica-se que, tendencialmente, os valores dos ISD nas regiões vizinhas ao dano crescem com a ordem modal. Desta forma, no processo de localização do dano deverá utilizar-se apenas as primeiras formas modais e de preferência as que apresentem um valor para o momento-flector ou esforço de corte máximo na região do dano.

### 2.2.3.3 Interferência do ruído experimental

A incorporação do ruído experimental na resposta numérica serve unicamente de análise da sua influência sobre as diferentes componentes da resposta vibratória na viga. Como já referido, a presença do ruído é um elemento perturbador na identificação do dano estrutural. Para uma comparação directa de resultados, considera-se que a adição do ruído experimental à amplitude modal numérica tem as mesmas características que as definidas para o caso da viga em consola. Por via da técnica das diferenças finitas centrais e com base na solução numérica com adição de ruído são agora determinados os respectivos campos de rotação e esforços internos para os modos da viga. Os ISD das quatro primeiras formas modais, determinadas a partir da expressão 2.11, e para o terceiro caso de dano na viga, Tabela 2.1, estão representados na Fig. 2.11.

A representação dos ISD do momento-flector e esforço de corte permitem identificar a localização dos danos, através de descontinuidades e/ou de máximos locais correspondentes às posições dos elementos danificados. Porém, a distribuição do ISD do esforço de corte não permite

identificar de forma clara a posição do dano de menor severidade. A adição do ruído ao campo de deslocamento numérico conduz, como é sabido, ao aparecimento de perturbações na distribuição do ISD, Fig. 2.6. A maior dispersão observada na distribuição ISD do esforço de corte deve-se à combinação das perturbações provocadas pelos danos estruturais e pela adição de ruído ao campo de deslocamentos numérico, os quais são amplificadas pelo método aproximado de cálculo das derivadas espaciais. Por esta razão, existe uma maior dispersão no ISD e a consequente dificuldade na identificação gráfica da posição dos danos de mais baixa severidade.

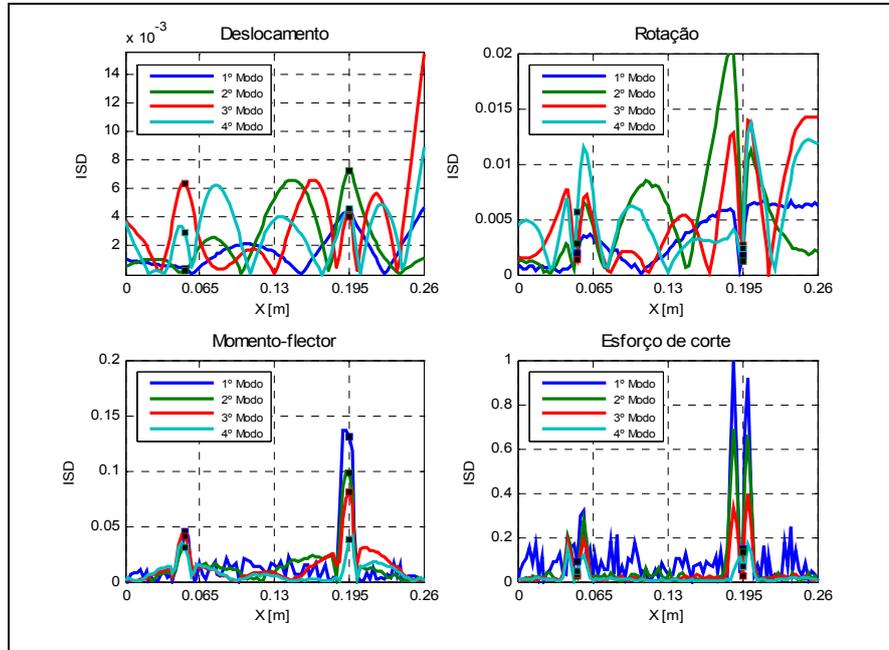


Fig. 2.11 – Representação dos ISD relativo aos quatro primeiros modos e após adição de ruído.

As alterações na forma de propagação de ondas de flexão são usadas como meio alternativo para detectar a presença de danos estruturais [12]. A resposta transiente da estrutura na forma de propagação de ondas de elevada frequência é gerada, normalmente, por impacto. No âmbito desta análise e no sentido de averiguar qual o melhor meio de detecção por via experimental do dano estrutural, será a seguir apresentado um estudo da resposta transiente em vigas.

#### 2.2.4 Resposta transiente

A resolução de problemas dependentes do tempo consiste na conversão das equações diferenciais de movimento, expressão 2.1, em equações algébricas, através de técnicas de aproximação temporal. As equações de segunda ordem ou hiperbólicas são aqui adoptadas como aproximações entre pequenos intervalos de tempo à solução do problema. O método *Newmark* é usado para integração numérica no tempo destas equações. A função e primeira derivada entre intervalos consecutivos  $\Delta t$  podem ser aproximada pelas expressões [3]:

$$\begin{aligned} \{v\}_{t+1} &= \{v\}_t + \Delta t \{\dot{v}\}_t + \frac{1}{2}(\Delta t)^2 \{\ddot{v}\}_{t+\gamma} \\ \{\dot{v}\}_{t+1} &= \{\dot{v}\}_t + \{\ddot{v}\}_{t+\alpha} \Delta t \end{aligned} \quad (2.22)$$

onde,

$$\{\ddot{v}\}_{t+\beta} = (1-\beta)\{\ddot{v}\}_t + \beta\{\ddot{v}\}_{t+1} \quad (2.23)$$

em que  $t$  representa o instante de tempo,  $t+1$  o instante de tempo subsequente e,  $\alpha$  e  $\gamma = 2\beta$  são os parâmetros a ser determinados a partir do critério de estabilidade com base no intervalo de tempo  $\Delta t$  definido para a análise [3]:

$$\Delta t \leq \Delta t_{crit} = \sqrt{\frac{1}{2} \omega_{max}^2 (\alpha - \gamma)} \quad \text{com } \gamma < \alpha \text{ e } \alpha \geq \frac{1}{2} \quad (2.24)$$

em que  $\omega_{max}$  representa a frequência máxima do sistema.

Após substituir as expressões 2.22 e 2.23 no sistema de equações diferenciais de movimento definidas na expressão 2.1, obtêm-se um sistema de equações algébricas [3]. A resolução deste sistema de equações parte do conhecimento das condições iniciais do problema. O deslocamento e velocidade são dados conhecidos, já a aceleração no instante  $t=0$  é determinada a partir do deslocamento e velocidade iniciais de acordo com a expressão seguinte:

$$\{\ddot{v}\}_0 = [M]^{-1} (\{F\}_0 - [K]\{v\}_0 - [C]\{\dot{v}\}_0) \quad (2.25)$$

A partir da resposta do sistema, em deslocamento, velocidade e aceleração, e para o instante de tempo  $t$ , determinam-se os respectivos esforços internos ao nível de cada elemento finito,

$$\{Q^e\}_t = [M^e]\{\ddot{v}\}_t + [C^e]\{\dot{v}\}_t + [K^e]\{v\}_t \quad (2.26)$$

O ISD do deslocamento, rotação e esforços internos da propagação de ondas de flexão será apresentado a seguir, baseado no modelo de viga definido anteriormente para a situação livre-livre.

#### 2.2.4.1 *Solicitação transiente*

O impacto de uma pequena massa contra uma estrutura é o mecanismo de via experimental mais fácil e eficaz de criar um fenómeno transiente numa estrutura. Nesta situação, a resposta é determinada pela relação entre a massa do impactor e a massa da estrutura. Para valores pequenos da razão entre as massas (impactor/estrutura), os tempos de impacto podem ser muito curtos, da mesma ordem de grandeza da propagação da onda elástica de tracção/compressão ao longo da espessura, produzindo-se, assim, ondas de expansão ao longo da estrutura. Com tempos de impacto mais longos, razão entre massas superior, obtêm-se a propagação de ondas de flexão desde a região de impacto até ao bordo da estrutura. Neste caso, após o impacto e desde que ocorra a reflexão das ondas no bordo, dá-se uma mudança no comportamento da estrutura, passando a ser governada pela combinação das diferentes formas modais. Valores da razão entre massas substancialmente superiores, grandes tempos de contacto, são geradas ondas de flexão e de corte, e a resposta é equivalente a um carregamento “quase estático” [13, 14].

As características físicas da propagação das ondas de flexão, independentes da condição fronteira da estrutura, permitem a determinação directa de variações nas propriedades do material, através da identificação de perturbações na sua forma. Por este motivo, é objectivo analisar a propagação de ondas de flexão em estruturas, geradas a partir de uma força de impacto, cujo tempo de aplicação  $T$  deverá ser superior ao tempo de propagação da onda de tracção/compressão ao longo da espessura,

$$T \geq \frac{2 * h}{V_c} \quad (2.27)$$

em que  $h$  designa a espessura da viga e  $V_c$  a velocidade média de propagação das ondas elásticas de tracção/compressão.

Refira-se que a velocidade média da propagação das ondas elásticas de tracção/compressão no alumínio é da ordem de 5000 m/s e as ondas de flexão de 3000 m/s [15]. Na geração de ondas de flexão, a força de contacto  $F(t)$  produzida durante o impacto pode assumir-se como tendo a forma aproximada de uma função meio-seno [16, 17]:

$$F(t) = F \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{T} t\right) \quad (2.28)$$

onde F representa a amplitude da força.

#### 2.2.4.2 Análise da sensibilidade das componentes da resposta a uma solicitação transiente

Considere-se uma força concentrada aplicada na direcção transversal à secção recta e localizada no centro geométrico da viga, com  $T = 100 \mu\text{s} \geq 2,4 \mu\text{s}$  e amplitude 400 N. Na Fig. 2.12 estão representados os respectivos campos de deslocamento, rotação, momento-flector e esforço de corte em três diferentes instantes de tempo e nas situações da viga sem dano (s/d) e com dano no elemento 16 de valor  $\delta_k^e = 0,5$  (c/d).

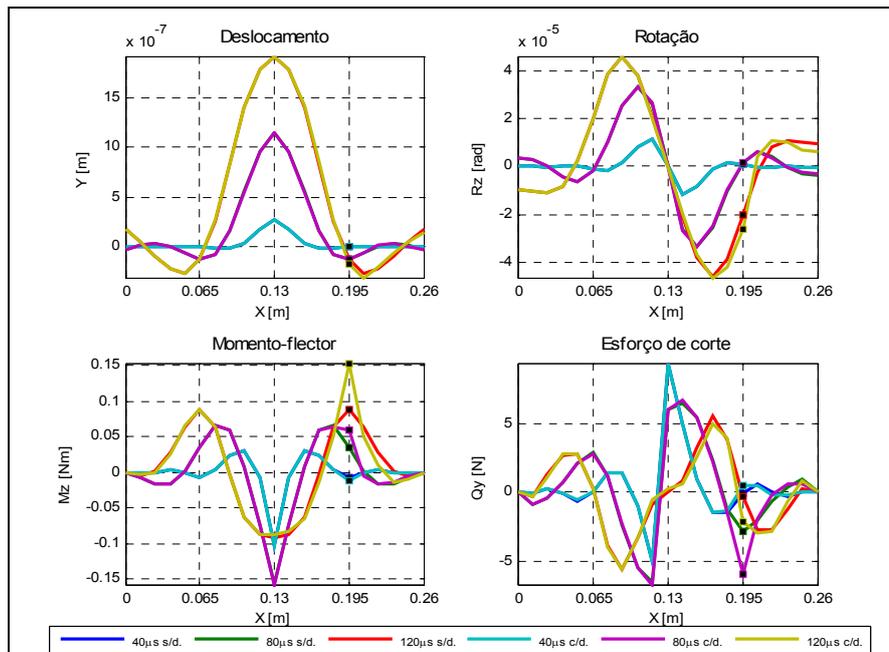


Fig. 2.12 – Representação da propagação das ondas de flexão na viga sem dano e com dano na posição 0,195 m.

A análise directa das alterações produzidas no campo do momento-flector e esforço de corte da viga e para um mesmo instante de tempo, Fig. 2.12, permite desde já identificar a localização do dano. Com efeito, estes desvios assumem maior preponderância para as regiões onde esforço local é máximo.

Para uma análise comparativa da resposta envolvendo os estudos anteriores e de forma a poder evidenciar as perturbações provocadas pelo dano no campo de deslocamento, rotação e esforços internos na viga, são apresentados na Fig. 2.13 os ISD para o terceiro caso de dano da Tabela 2.1.

A representação do ISD, Fig. 2.13, mostra a posição dos dois danos, através da localização de dois máximos. Mais uma vez se confirma que a presença do dano produz variações no ISD com maior evidência para o momento-flector e esforço de corte, ao contrário do deslocamento e rotação. Nestes, apesar de se verificarem valores máximos nas regiões do dano, a sua identificação é dificultada pela presença de perturbações na distribuição dos respectivos índices. Entre os diferentes registos,

observa-se que para a região do dano os valores ISD do deslocamento, rotação e momento-flector no instante  $120 \mu s$  são superiores, em resultado do aumento da amplitude do respectivo campo. Resultados similares são observados para os restantes casos de dano da Tabela 2.1, conforme se podem observar no anexo A.

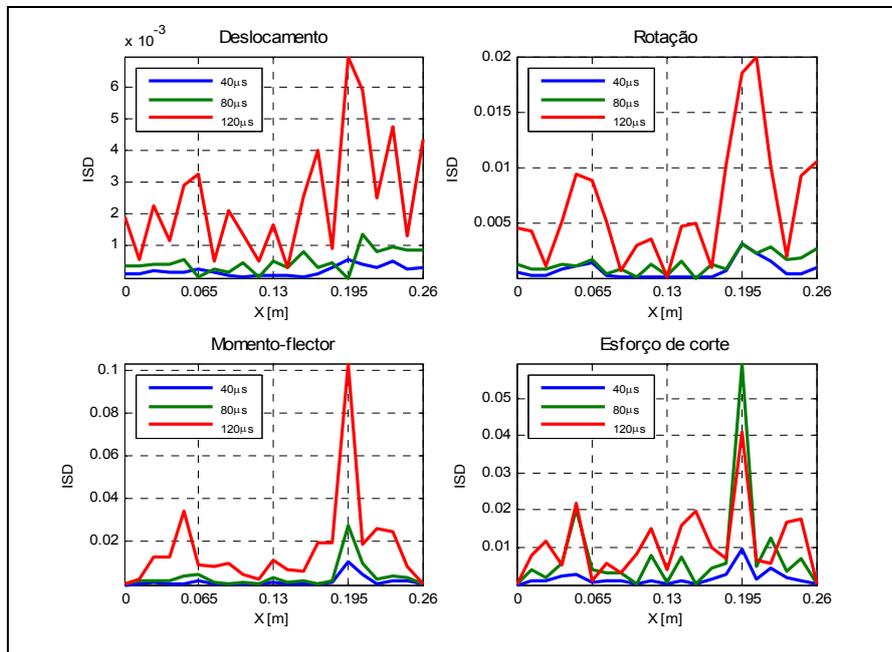


Fig. 2.13 – Representação do ISD da propagação das ondas de flexão na viga para o 3º caso de dano.

A distribuição do ISD do deslocamento, rotação, momento-flector e esforço de corte para diferentes posições do dano ao longo da viga, Fig. 2.14, revela que estes assumem um andamento próximo do campo associado, sendo máximos nas regiões de maior amplitude da resposta.

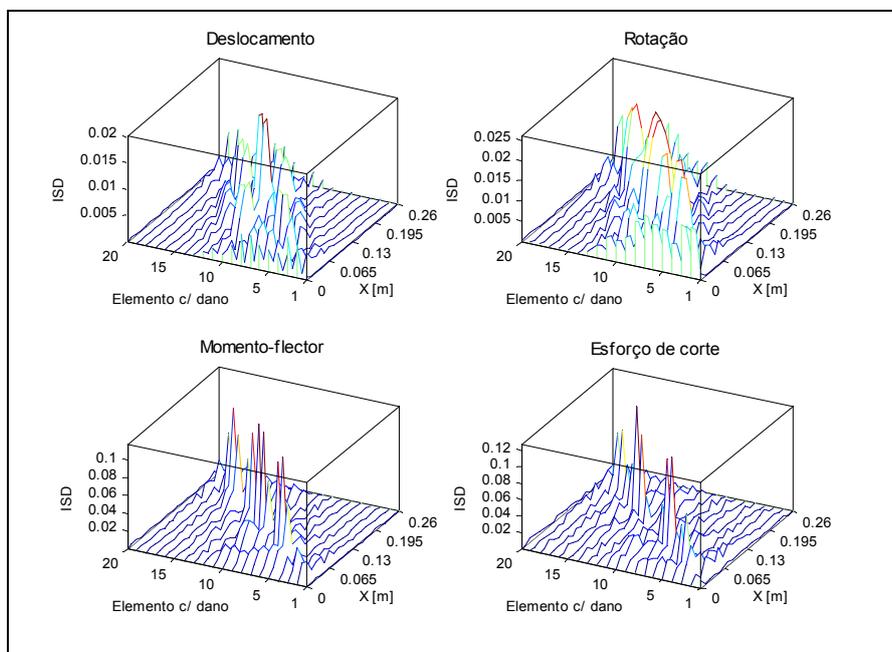


Fig. 2.14 – Distribuição ISD para sucessivas posições do dano ao longo da viga e no instante  $120 \mu s$ .

À semelhança dos estudos anteriores, far-se-á a seguir uma análise da influência da dicção do ruído na localização do dano estrutural em vigas, a partir da análise ISD das componentes da resposta transiente.

### 2.2.4.3 Interferência do ruído experimental

A propriedade aleatória do ruído experimental, quando procedente de diferentes fontes, está na origem da introdução de perturbações nos sinais experimentais, as quais são amplificadas por técnicas comuns de diferenciação numérica. Neste processo, as componentes do número de onda do ruído de alta ordem tornam-se preponderantes em relação às demais componentes do sinal, provocando distorção na informação. Com efeito, o ruído é inevitável numa qualquer medição experimental e, no âmbito do desenvolvimento de uma metodologia por via experimental para a localização do dano, interessa pois estudar a sua influência. No sentido de averiguar a influência do ruído na localização do dano estrutural, por via da identificação de descontinuidades e/ou de máximos no ISD, foram determinadas as componentes da resposta transiente, a partir da aplicação sucessiva do método das diferenças finitas centrais (MDF) ao campo de deslocamentos numérico (MEF) após adição do ruído experimental ( $t = 120 \mu s$ ), Fig. 2.15.

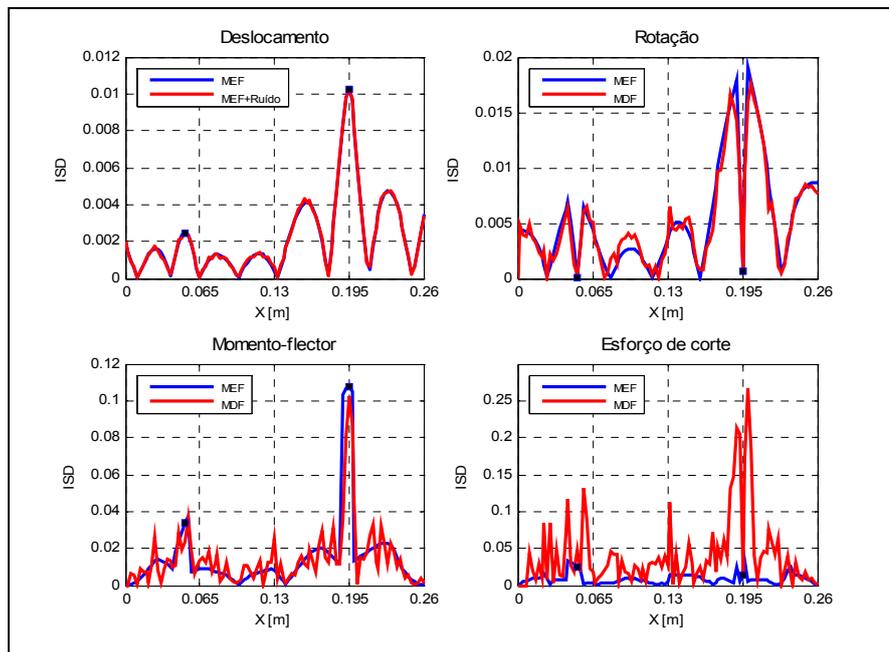


Fig. 2.15 – Representação do ISD após a adição de ruído e para o instante  $120 \mu s$ .

A interferência do ruído experimental na localização dos dois danos na viga, terceiro caso de dano da Tabela 2.1, é evidenciada na representação dos esforços internos, em virtude do processo de diferenciação espacial. Nestes, a identificação do dano de menor severidade ( $\delta_5^e = 0,1$ ), a partir da localização do segundo valor máximo no ISD, apresenta-se difícil devido à presença de fortes componentes do ruído de alta ordem.

## 2.3 Discussão e conclusões

Nos casos analisados observa-se que os esforços internos são o meio mais eficaz de localização do dano estrutural, através da identificação de máximos e/ou descontinuidades na distribuição do respectivo ISD. No que diz respeito ao ISD do momento-flector, verifica-se que a sensibilidade deste parâmetro é influenciada pela amplitude da curvatura na região do dano, correspondente à segunda derivada espacial do campo de deslocamento, e também pela ordem da forma modal, no caso particular da resposta modal. Quanto ao ISD do esforço de corte, apresenta-se, normalmente, com valores da sensibilidade superiores ao do momento-flector, como resultado desta ser definida pela derivada da curvatura ou terceira derivada espacial do deslocamento. Quanto à resposta estática, os ISD dos esforços internos nas regiões do dano são globalmente superiores e os esforços de corte na viga directamente proporcionais à severidade do dano, por apresentarem uma distribuição constante ao

longo da viga. No sentido de vir a desenvolver uma metodologia para a localização experimental do dano, foram analisados os ISD após adição de ruído ao campo de deslocamentos. A aplicação do método das diferenças finitas centrais ao cálculo das derivadas espaciais até à terceira ordem conduz à amplificação das componentes do ruído de alta ordem. Este facto assume um papel relevante na localização do dano nos casos do momento-flector e esforço de corte, segunda e terceira derivadas espaciais respectivamente. Na Fig. 2.16 estão representados no domínio do número de onda para os campos da resposta estática da viga em consola, Fig. 2.6.

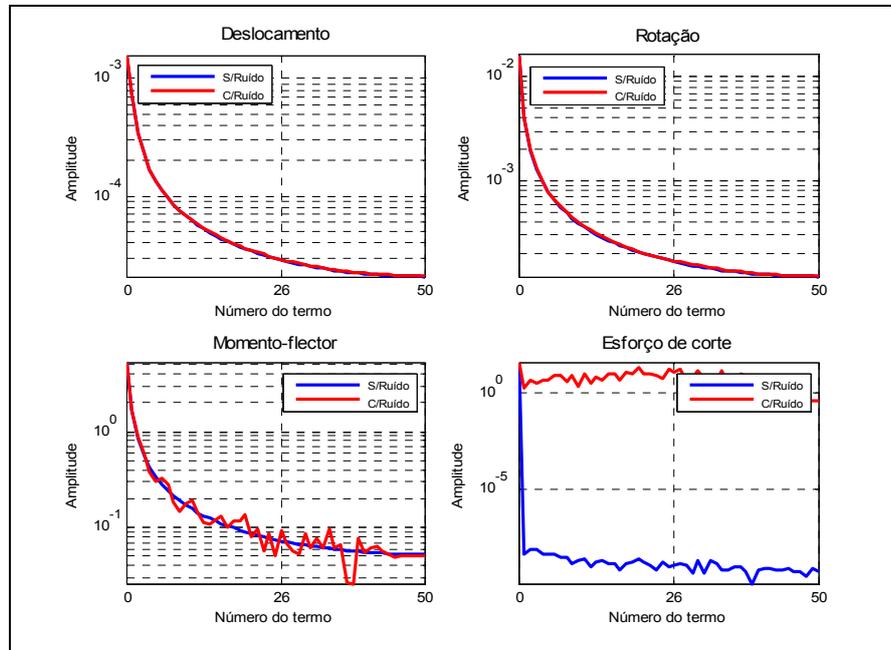


Fig. 2.16 – Representação no domínio do número de onda dos campos de resposta estática, com adição de ruído.

Tal como revela a representação no domínio do número de onda dos campos da Fig. 2.16, o processo de cálculo das derivadas pelo MDF conduz à propagação do ruído. Na verdade, as sucessivas espaciais traduzem-se por uma contribuição maior das componentes de ordem mais elevada. No caso da medição do campo de deslocamentos, o cálculo das suas derivadas espaciais até à terceira ordem por métodos numéricos é necessária para a determinação dos esforços internos na viga. Assim, as componentes de mais alta ordem, características do ruído experimental, são amplificadas e vão perturbar a determinação dos danos estruturais. As componentes de alta ordem do ruído poderão ser atenuadas através da aplicação de filtros do tipo passa-baixo. Porém, o processo também conduz a eliminação de componentes do sinal necessárias para a representação das derivadas de ordem elevada. A escolha do tipo e severidade do filtro é baseado num processo iterativo e heurístico, procurando um equilíbrio entre as componentes do ruído a eliminar e as componentes do sinal a preservar [8]. Por ser este um tema de grande importância para o estabelecimento de uma metodologia experimental com vista à identificação estrutura do dano, será, por isso, desenvolvido com maior detalhe nos próximos capítulos.

## 2.4 Bibliografia

1. Zienkiewicz, O.C., *The Finite Element Method in Engineering Science*. 1971: McGraw-Hill, New York.
2. Bathe, K.-J., *Finite Element Procedure*. 1996: Prentice Hall.
3. Reddy, J.N., *An introduction to the Finite Element Method*. 2nd Edition ed. 1993: McGraw-Hill.
4. Pandey, A.K., M. Biswas, and M.M. Samman, *Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes*. *Journal of Sound and Vibration*, 1991. 145(2): p. 321-332.

5. Talreja, R., *Damage Mechanics of Composite Materials*. Amsterdam ed. Composite Materials Series. Vol. 9. 1994: Elsevier.
6. Timoshenko, S. and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of plates and shells*. 2d ed. Engineering societies monographs. 1959, New York,; McGraw-Hill. 580 p.
7. Sazonov, E. and P. Klinkhachorn, *Optimal spatial sampling interval for damage detection by curvature or strain energy mode shapes*. Journal of Sound and Vibration, 2005. 285(4-5): p. 783-801.
8. Lopes, H.M.R., *Estudo do Fluxo de Energia Vibratória em Vigas e Placas*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.2002.
9. Araújo, A.L., *Método Numérico/Experimental para a Caracterização Mecânica de Materiais Compósitos*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.1995.
10. Cawley, P. and R.D. Adams, *The Location of Defects in Structures From Measurements of Natural Frequencies*. Journal Strain Analysis, 1979. 14(2): p. 49-57.
11. Ratcliffe, C.P., *Damage detection using a modified laplacian operator on mode shape data*. Journal of Sound and Vibration, 1997. 204(3): p. 505-517.
12. Conrad, M. and M. Sayir, *Composite Ceramic-metal Plates Tested with Flexural Waves and Holography*. Experimental Mechanics, 2001. 41(4): p. 412-420.
13. Olsson, R. *Theory for small mass impact on sandwich panels*. in *Proc. EUROMECH 360*. p. 231-238,1997. Saint-Étienne.
14. Olsson, R., *Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates*. Composites: Part A, 2000. 31(8): p. 879-887.
15. Graff, K.F., *Wave Motion in Elastic Solids*. 1991: Dover Publications, Inc.
16. Olofsson, K., *Pulsed Holographic Interferometry for the Study of Bending Wave Propagation in Paper and in Tubes*, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology - Sweden.1994.
17. Lopes, H.M.R., R.M. Guedes, and M.A. Vaz, *An Improved Mixed Numerical-Experimental Method for Stress Field Calculation*. Optics & Laser Technology, 2007. 39(5): p. 1066-1073.

# Capítulo 3

## Técnicas Interferométricas

---

### 3.1 Introdução

As técnicas interferométricas utilizam a sobreposição de duas ou mais frentes de onda para criar a interferência. Quando uma, ou ambas, contêm informação sobre uma superfície difusa é possível caracterizar as alterações da superfície, correlacionando entre si frentes de onda registadas em instantes distintos. Um registo holográfico, ou holograma, é obtido quando a frente de onda proveniente do objecto é sobreposta numa frente de onda coerente, utilizada como referência. Desta forma é possível converter as diferenças de fase em variações de amplitude e, assim, gravar toda a informação contida na frente de onda. A correlação entre hologramas permite medir grandezas que alterem a geometria ou a textura das superfícies. São várias as técnicas experimentais que utilizam o princípio da interferência na medição das grandezas físicas, dentre as mais importantes podem citar-se, o *Moiré* interferométrico e a interferometria holográfica. Nas técnicas de *Moiré* interferométrico é previamente gravada uma grelha sobre a superfície, esta é depois usada como referência na caracterização do deslocamento no plano. Neste caso, a região da medição está limitada pela área de gravação da grelha, sendo a sua resolução definida pelo espaçamento entre as linhas, designado por passo da grelha. Devido ao difícil processo de gravação das grelhas com frequências adequadas (1200 linhas/mm, por exemplo), a medição é, normalmente, circunscrita a pequenas áreas. Ao invés a interferometria holográfica, utiliza a interferência mútua das frentes de onda como forma de medir os deslocamentos em superfícies rugosas e difusas. Ao contrário das técnicas de *Moiré* interferométrico, pode ser usada em grandes regiões e é sensível aos deslocamentos tanto no plano como fora deste, sendo a sensibilidade definida pela configuração geométrica do interferómetro.

Os registos holográficos gravam a intensidade e a fase de luz proveniente de objectos, através da sua interferência com uma frente de onda coerente, utilizada como referência. Por interferometria holográfica, designa-se uma técnica de medição que recorre à interferência entre frentes de onda, onde, pelo menos, uma delas é obtida de um holograma. É uma técnica óptica de medição de elevada resolução que utiliza a interferência entre registos holográficos para caracterizar grandezas que alteram as frentes de onda. No âmbito da Mecânica Experimental, estas técnicas são usadas na medição global e sem contacto de deslocamentos em superfícies sob solicitação. Nas três últimas décadas, com a chegada dos computadores e, com eles, do aumento do poder de cálculo numérico, que juntamente com o aparecimento de matrizes de sensores CCD (*Charge-coupled device*) e CMOS (*Complementary metal-oxide-semiconductor*) integrados em câmaras, com elevadas resoluções e reduzidas dimensões, possibilitou um enorme desenvolvimento destas técnicas. Com a utilização do registo electrónico de imagem e a necessidade de resolver o *Speckle*, dada a menor resolução deste, estas técnicas são por vezes designadas como de interferometria *Speckle*. O registo da intensidade das frentes de onda em câmaras de vídeo, em substituição das antigas placas holográficas, e o aparecimento de técnicas numéricas para o cálculo preciso da fase, transformaram a interferometria de *Speckle* numa ferramenta de grande utilidade no estudo do comportamento de estruturas. A versatilidade destas técnicas permite, através de diferentes configurações do sistema óptico, registar o comportamento destas tanto em solicitações estáticas como dinâmicas.

Neste capítulo faz-se uma apresentação do princípio geral de funcionamento das técnicas de interferometria *Speckle*, com destaque para as técnicas de medição fora-do-plano. Destas, é estudada a influência da configuração geométrica da montagem experimental e respectivas técnicas para a extracção da fase, referindo também as vantagens e desvantagens de algumas delas. Como em Engenharia é frequentemente necessário obter as derivadas dos deslocamentos, no seguimento desta apresentação, são apontados dois métodos para a obtenção, por via experimental, das respectivas derivadas espaciais do campo de deslocamento até à terceira ordem.

### 3.2 Interferência da luz

Sendo a luz é encarada como uma onda electromagnética, caracterizada pela variação no tempo dos campos eléctrico e magnético, sendo a propagação da frente de onda é descrita pelas equações de *Maxwell*. A distribuição espacial e temporal de uma frente de onda harmónica plana na direcção da propagação  $k$  são representados pela seguinte expressão [1]:

$$E(r, t) = A_0 e^{j(kr - \omega t + \phi)} \quad (3.1)$$

onde  $j = \sqrt{-1}$ ,  $A_0$  a amplitude da onda,  $r$  o vector espacial da onda,  $t$  o tempo,  $\omega$  a frequência angular e  $\phi$  o ângulo de fase da onda.

O fenómeno da interferência ocorre quando duas ou mais frentes de onda de luz coerente são sobrepostas. As frentes de onda de luz consideram-se coerentes quando têm a capacidade de interferir entre si, esta condição reflecte-se sobre dois aspectos: coerência temporal e coerência espacial [1]. Com efeito, considerem-se duas frentes de ondas planas e coerentes  $E_1(r, t)$  e  $E_2(r, t)$  emitidas da mesma fonte, com a mesma amplitude  $A_0$ , mas percorrendo caminhos distintos, respectivamente  $\vec{S}$  e  $\vec{T}$ . Quando se encontram, a frente de onda resultante terá uma amplitude que dependerá da diferença de fase entre as duas ondas. Neste caso, a onda resultante da interferência pode ser definida pela expressão [1]:

$$(E_1 + E_2)(r, t) = 2A_0 e^{j\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)r - \omega t + \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right)} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)r + \frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) \quad (3.2)$$

em que  $\theta$  o ângulo entre os vectores  $\vec{S}$  e  $\vec{T}$ , e  $\lambda$  o comprimento de onda.

A intensidade da luz observada pelo olho humano ou por um sensor fotoeléctrico define-se como fluxo de energia incidente por unidade de área e de tempo. Para uma onda estacionária pode escrever-se:

$$I(r) = \langle E(r, t)E^*(r, t) \rangle = \lim_{T_m \rightarrow \infty} \frac{1}{T_m} \int_{-T_m/2}^{T_m/2} E(r, t')E^*(r, t') dt' \quad (3.3)$$

em que \* designa o complexo conjugado. No que se refere à medição experimental, o tempo de medição  $T_m$  será sempre muito superior ao período da onda,  $T_m \gg 2\pi/\omega$ , pelo que omitindo as constantes de proporcionalidade se chega à relação  $I = |A_0|^2$ .

A partir da definição intensidade da luz incidente e considerando a onda resultante da interferência entre duas frentes de onda, expressão 3.2, a intensidade de luz da interferência escreve-se:

$$I(r) = (E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^* = 4A_0^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)r + \frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) \quad (3.4)$$

A intensidade mínima da interferência ocorre quando se verifica  $\cos^2(2\pi / \lambda \cdot \text{sen}(\theta / 2) \cdot r + (\phi_1 - \phi_2) / 2) = 0$ , o que equivale a resolver o seguinte problema:

$$2\pi / \lambda \cdot \text{sen}(\theta / 2) \cdot r + (\phi_2 - \phi_1) / 2 = (2n + 1)\pi / 2 \quad n \in \mathbb{Z} \quad (3.5)$$

As soluções particulares deste problema correspondem à condição de oposição de fase entre as duas ondas,  $\phi_1 - \phi_2 = \pi$ , este facto é conhecido por interferência destrutiva. Quanto à intensidade máxima é determinada a partir da relação:

$$2\pi / \lambda \cdot \text{sen}(\theta / 2) \cdot r + (\phi_2 - \phi_1) / 2 = n\pi \quad n \in \mathbb{Z} \quad (3.6)$$

Neste caso, as soluções deste problema traduzem-se pela condição das duas ondas se encontrarem em fase,  $\phi_1 - \phi_2 = 0$ , sendo esta denominada de interferência construtiva. Ao conjunto de pontos é chamado de padrão de interferência e às franjas produzidas, franjas de interferência.

Na Fig. 3.1 e a título ilustrativo, representa-se a interferência no plano de duas ondas coerentes propagando-se com diferentes orientações. As franjas de interferência (a linhas claras) são resultado da interferência construtiva de duas ondas com o mesmo comprimento de onda  $\lambda$  e fase  $\phi$ , sendo o espaçamento entre linhas definido pela expressão 3.6.

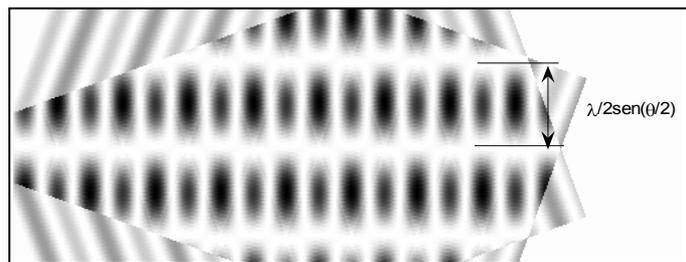


Fig. 3.1 – Franjas de interferência.

### 3.3 Interferometria Speckle

O padrão de *Speckle* ou campo de *Speckle* é criado pela interferência de múltiplas frentes de onda esféricas provenientes da reflexão de pontos de uma superfície rugosa e difusa, quando iluminada por uma luz coerente. A diferença do caminho percorrido pelas frentes de onda difundidas pelas micro-superfícies conduz a fenómenos de interferência e conseqüentemente à geração de um padrão do tipo granitado (*Speckle*), quando na presença de uma rugosidade com variações iguais ou superiores ao comprimento de onda da luz [2]. O *Speckle* apresenta espacialmente a forma de um elipsóide [3], cuja relação comprimento/diâmetro (L/D) varia em função da distância à superfície reflectora, Fig. 3.2, onde a fase no *Speckle* varia linearmente [1].

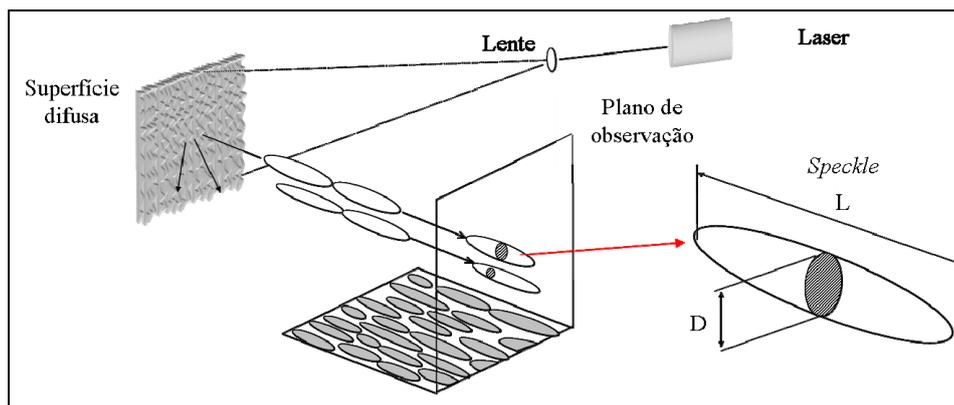


Fig. 3.2 - Forma espacial do *Speckle*.

Na interferometria holográfica, o *Speckle* é um elemento normalmente perturbador que limita a resolução e precisão das medições. Todavia, na interferometria *Speckle* a informação da fase do *Speckle* é usado para a metrologia das grandezas físicas. Apesar da complexidade e da sua característica aleatória, é fundamental conhecer o seu comportamento.

De acordo com o sistema de observação, o *Speckle* pode ser classificado em objectivo ou subjectivo [4]. No *Speckle* objectivo ou difractado, a sua dimensão é dependente do plano de observação e da forma como a superfície é iluminada, não sendo utilizado qualquer sistema de formação de imagem. Contrariamente ao modelo de observação anterior, o *Speckle* subjectivo é formado por um sistema de imagem e é por isso também dependente do limite de difracção do sistema de formação de imagem. Neste caso, um sistema de formação de imagem constituído por lentes e abertura é utilizado para formar a imagem no plano de observação. O controlo da abertura óptica do sistema de imagem permite ajustar a dimensão do *Speckle* e, através deste, o seu diâmetro ao tamanho de cada sensor fotoeléctrico utilizado na sua detecção.

A distribuição aleatória observada no padrão *Speckle* é fortemente dependente das propriedades ópticas do sistema de observação e mostra grandes variações entre pontos adjacentes, resultando num padrão com o aspecto granitado, Fig. 3.3.

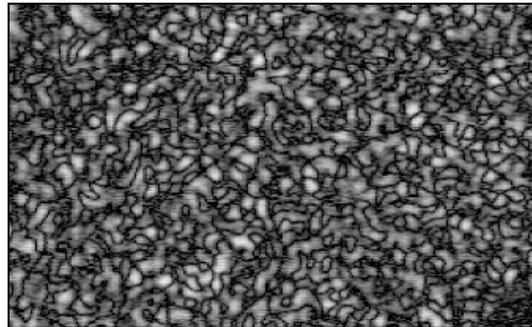


Fig. 3.3 – Padrão de interferência produzido com o interferómetro *Mach-Zehnder*.

### 3.3.1 Intensidade e fase do *Speckle*

O avanço tecnológico das últimas décadas transformou a interferometria TV numa ferramenta experimental por excelência para o estudo do comportamento de estruturas sob solicitação. O conceito de TV é aqui entendido no sentido da gravação digital em vídeo da intensidade de luz do *Speckle* por uma câmara e a posterior reconstrução numérica da sua fase num computador. O princípio da interferometria holográfica já é conhecido há longo tempo [3], mas foi com a chegada de sensores CCD e CMOS mais potentes, bem como, o rápido processamento e gravação de grandes quantidades de informação que se desenvolveu a interferometria *Speckle*. A interferência *Speckle* com registo digital veio superar muitas das dificuldades encontradas na interferometria holográfica dita convencional, e trouxe algumas vantagens na aplicação à Mecânica Experimental:

- Menor tempo de gravação (não é necessário revelar os hologramas);
- Visualização dos resultados em tempo real (elevadas taxas de aquisição de imagem);
- Possibilidade de fazer medições quantitativas (técnicas de processamento de imagem);
- Maior imunidade a perturbações externas (vibrações);
- Tornou possível a construção de sistemas mais simples e compactos e de fácil aplicação em ambientes industriais.

Considere-se uma superfície difusa com uma rugosidade igual ou superior ao comprimento da

onda da luz coerente incidente Fig. 3.4:

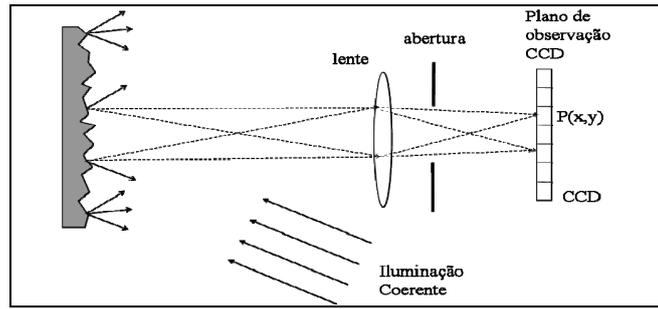


Fig. 3.4 – Geração do *Speckle* subjectivo através do sistema óptico.

De acordo com o princípio de *Huygens*, cada ponto da superfície rugosa quando iluminada pela luz coerente pode ser tratada com uma fonte esférica de uma onda secundária, cujo campo eléctrico é descrito por:

$$E_n(r_n) = \frac{A_n}{r_n} e^{j(kr_n + \phi_n)} \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3.7)$$

onde  $n$  é o ponto emissor,  $k$  a direcção de propagação da onda e  $N$  é o número total de pontos da superfície. A partir do plano de observação, a luz incidente num ponto  $P(x,y)$  da matriz de sensores CCD será dada pela contribuição da intensidade de todas as fontes emissoras:

$$E(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n / r_n e^{j(kr_n + \phi_n)} \quad (3.8)$$

onde  $r_n$  é aqui considerada a distância do ponto da superfície ao ponto de observação  $P(x,y)$ . O efeito da contribuição de diferentes fontes pode ser assumido como análogo a um problema aleatório do tipo estatístico a duas dimensões. Assim, a aplicação do teorema limite central da teoria probabilística ao campo eléctrico permite escrever:

$$E_n(r_n) = 1/\sqrt{N} |A_n| e^{j\phi_n} \quad (3.9)$$

onde  $|A_n|/\sqrt{N}$  é a amplitude e  $\phi_n$  é a fase de cada onda, grandezas que são estatisticamente independentes entre ondas diferentes. Estes pressupostos são fisicamente justificados pela distribuição aleatória das áreas elementares da superfície. Assim, a intensidade e a fase do padrão de *Speckle* podem ser considerados como estatisticamente independentes, onde a fase do padrão de *Speckle*  $P_\phi(\phi)$  segue uma distribuição normal do tipo:

$$P_\phi(\phi) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & \text{se } -\pi \leq \phi < \pi \\ 0 & \text{se } \phi \geq \pi \text{ ou } \phi < -\pi \end{cases} \quad (3.10)$$

Por outro lado, a densidade de probabilidade da intensidade do padrão de *Speckle*  $P_I(I)$  obedece a uma distribuição estatística exponencial negativa definida por:

$$P_I(I) = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\frac{I}{2\sigma^2}} & \text{se } I > 0 \\ 0 & \text{se } I \leq 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

onde  $\sigma^2$  é a variância. Considerando que o valor médio da intensidade  $I$  é igual a  $2\sigma^2$  e recorrendo

ao cálculo da variância da intensidade  $\sigma_I^2$ , verifica-se que o desvio padrão  $\sigma_I$  é igual à intensidade média, em que o contraste  $V$  é definido por:

$$V = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} \quad (3.12)$$

Desta relação pode concluir-se que o contraste de um padrão *Speckle* completamente polarizado é 1.

### 3.3.2 Dimensão do *Speckle*

A observação de um padrão de *Speckle* é determinada pelas características dos sistemas óptico e registo de imagem. Em cada caso, a dimensão média do *Speckle* deverá ser ajustado à resolução do sistema de registo para que possa ser observado. Nos sistemas de gravação digitais, a dimensão e o número de píxeis no CCD determinam a resolução das técnicas de medição.

A dimensão média aproximada do *Speckle* pode ser obtida a partir da função de autocorrelação  $R(x_1, y_1; x_2, y_2)$  da intensidade no plano de observação [5]:

$$R(x_1, y_1; x_2, y_2) = \langle I(x_1, y_1) I(x_2, y_2) \rangle \quad (3.13)$$

Tomando o princípio de Huygens – Fresnel [6] e considerando a distribuição espacial do *Speckle* dada pelo limite de difracção do sistema de imagem, a função de autocorrelação do *Speckle* subjectivo no plano da imagem passa a poder escrever-se da seguinte forma [1]:

$$R(r) = \langle I \rangle^2 \left\{ 1 + \left| \frac{2J_1\left(\frac{\pi D_1 r}{\lambda z}\right)}{\frac{\pi D_1 r}{\lambda z}} \right|^2 \right\} \quad (3.14)$$

onde  $D_1$  designa o diâmetro da pupila circular de entrada na lente,  $J_1$  é a função de Bessel de primeira espécie de ordem 1,  $z$  é a distância do plano da imagem ao plano da pupila da lente e  $r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ , onde  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são a dimensão do *Speckle* no plano de imagem segundo  $x$  e  $y$ , respectivamente.

O tamanho médio do *Speckle*  $d_s$  pode ser determinado a partir do primeiro mínimo da função  $J_1(\pi D_1 r / \lambda z)$  e que toma a forma [1]:

$$d_s = 1,22 \frac{\lambda z}{D_1} \quad (3.15)$$

É evidente que a dimensão do *Speckle* no plano de imagem depende da abertura numérica do sistema óptico  $NA$ . Para aberturas da lente pequenas, a abertura numérica do sistema óptico pode ser aproximada pela razão  $D_1 / 2f$ . Tomando  $z$  como a distância focal  $f$  na expressão 3.15, a dimensão média do *Speckle* em função da abertura numérica vem na forma:

$$d_s = 0,61 \frac{\lambda}{NA} \quad (3.16)$$

Esta expressão permite determinar, em relação à dimensão do píxel no CCD, as características ideais do sistema óptico. A máxima frequência espacial  $f_{\max}$  para um padrão de *Speckle* é dada pela abertura da lente e pela distância da lente ao plano de observação [7]:

$$\frac{1}{f_{\max}} = \frac{1}{2} \frac{\lambda z}{D_1} \quad (3.17)$$

### 3.3.3 Descorrelação do *Speckle*

Na interferometria holográfica as alterações do padrão criado a partir da interferência de diferentes frentes de onda coerentes são usadas no método de medição. Da interferência destrutiva e construtiva resultam padrões de *Speckle* contendo informação de fase. A sua fase, apesar de independente, pode ser relacionada entre grãos vizinhos para distâncias inferiores ao comprimento de coerência da luz. A característica aleatória da intensidade e fase observadas num padrão podem ser descrita por funções estatísticas tal como foi apresentado, expressões 3.10 e 3.11. Esta propriedade dá origem à interferência do *Speckle* correlativo e não correlativo. A interferência não correlativa introduz uma componente aleatória na fase que se manifesta pela destruição do contraste das franjas no plano de observação. Também a rotação em torno do eixo do plano e/ou a translação no plano de observação resultam na descorrelação do *Speckle* que decorre gradualmente até a um limite da descorrelação total. Acrescentando a esta característica, há a sobreposição do campo de *Speckle* não correlativo ao *Speckle* correlativo, efeito observado nas técnicas de salto de fase (*phase-shifting*) [2]. A perda de contraste nas franjas é uma consequência da descorrelação gradual do *Speckle*.

Na metrologia por interferometria *Speckle*, o espaçamento entre franjas é, normalmente, muito superior à dimensão do *Speckle*. Atendendo a este pressuposto, prova-se que há uma relação inversa entre a sua frequência e o seu contraste [8], e que pode ser definida de acordo com a seguinte expressão:

$$|Z| = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{j\omega \frac{\pi}{N}} d\omega \quad (3.18)$$

em que  $N$  é o número de grãos de *Speckle* por franja.

Actualmente, um sistema de formação de imagem consiste numa matriz de sensores CCD que são usados para registar digitalmente a intensidade correspondente à fase do *Speckle*. Neste caso, a abertura do sistema óptico deverá ser ajustada para que o tamanho do *Speckle* coincida com a dimensão de cada sensor  $\Delta\xi$  e assim garantir que o *Speckle* é totalmente resolvido. A descorrelação parcial por translação do *Speckle* no plano de imagem observa-se entre duas medições quando ocorre um movimento de translação e/ou rotação do objecto. Este efeito é agravado pelo factor de amplificação do sistema óptico de observação, restringindo o objecto a pequenos movimentos [1]. A translação do *Speckle* no plano de imagem  $\Delta x$  pode ser estabelecida a partir das características do sistema óptico de observação:

$$\Delta x = \frac{1}{m} \frac{f}{D_1} \lambda \quad (3.19)$$

em que  $m$  é o factor de amplificação,  $D_1$  é o diâmetro da abertura,  $f$  é a distância focal e  $\lambda$  o comprimento de onda da luz. Para grandes factores de ampliação do sistema óptico, a sensibilidade à descorrelação por translação no plano do objecto é maior.

Na interferência de duas frentes de onda, a descorrelação numa estrutura solicitada pode surgir numa ou nas duas frentes, dependendo da sua origem. A descorrelação de duas frentes de onda criadas a partir da reflexão no objecto, interferência com sensibilidade no plano (ESPI no plano) e o gradiente com sensibilidade fora-do-plano (*Shear*), as intensidades máxima e mínima e o contraste nas franjas

são [9]:

$$\langle (I_2 - I_1)^2 \rangle_{Max} = 2 \langle I \rangle^2 \left[ 1 - \frac{(1-x)^2}{(1+x)^2} |c|^2 \right] ; \langle (I_2 - I_1)^2 \rangle_{Min} = 2 \langle I \rangle^2 (1 - |c|^2) \quad (3.20)$$

$$V = \frac{2x|c|^2}{(1 - |c|^2)(1+x)^2 + 2x|c|^2} \quad (3.21)$$

onde  $c$  designa o coeficiente de correlação e  $x$  a razão da intensidade entre as duas frentes de onda. No caso da descorrelação de uma frente de onda com origem no objecto, interferência com sensibilidade fora-do-plano (ESPI fora-do-plano), as expressões para a intensidade máxima e mínima e para o contraste nas franjas são as seguintes [9]:

$$\langle (I_2 - I_1)^2 \rangle_{Max} = 2 \langle I \rangle^2 \left[ 1 - \frac{(1 - |c|x)^2}{(1+x)^2} \right] ; \langle (I_2 - I_1)^2 \rangle_{Min} = 2 \langle I \rangle^2 \left[ 1 - \frac{(1 + |c|x)^2}{(1+x)^2} \right] \quad (3.22)$$

$$V = \frac{2|c|}{x(1 - |c|^2) + 2} \quad (3.23)$$

Na Fig. 3.5 está representado a evolução da intensidade normalizada, máxima e mínima, e o contraste nas franjas para diferentes razões de intensidade das duas frentes de onda e envolvendo os dois casos de descorrelação.

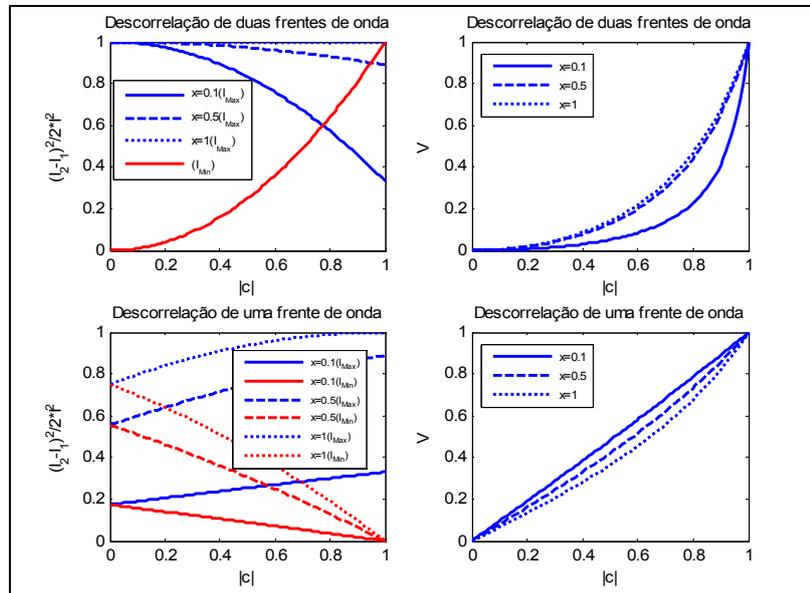


Fig. 3.5 – Representação da intensidade e contraste das franjas em função do coeficiente de correlação.

Na representação da descorrelação de duas frentes de onda ou descorrelação dupla, Fig. 3.5, observa-se que a intensidade máxima e o contraste aumentam com a razão entre as intensidades, sendo a visibilidade máxima para igual intensidade das frentes de onda,  $x = 1$ . Já no caso da descorrelação de uma frente de onda ou descorrelação singular, a melhoria do contraste ocorre à custa da diminuição da intensidade nas franjas, tornando-as mais dependentes do ruído da frente de onda proveniente do objecto. As diferenças entre a descorrelação dupla e a descorrelação singular estão no menor contraste da primeira, sendo que a intensidade máxima tende a aumentar no caso da dupla e a diminuir no caso da singular com o aumento da descorrelação.

### 3.4 Técnicas de medição

Nas técnicas interferométricas de medição utiliza-se a correlação de dois ou mais registos holográficos para criar um padrão de interferência que se designa de interferograma. O padrão de interferência pode ser criado através de uma das seguintes formas: tempo real, média temporal (*time-average*) e dupla exposição.

Em seguida é apresentada uma breve descrição de cada uma destas técnicas:

- A interferometria em tempo real consiste na gravação de um holograma correspondente ao estado de referência do objecto. Os hologramas seguintes são correlacionados com o holograma de referência para criar o padrão de interferência. Se o objecto se deslocar em relação ao estado de referência são observadas franjas de interferência. O processamento dos padrões de interferência à taxa de aquisição do vídeo permite acompanhar a evolução do deslocamento no tempo durante o processo de solicitação do objecto;
- O método da média temporal (*time-average*) baseia-se no registo de hologramas de objectos em vibração harmónica estacionária, durante vários ciclos da vibração. Neste caso, o tempo de exposição do holograma é muito longo comparado com o período da vibração. As franjas de interferência observadas são contornos de igual amplitude dos modos de vibração, cuja intensidade das franjas é modulada por uma função de Bessel  $J_0$ , isto é, o contraste decresce com o aumento da ordem das franjas.
- Por fim, a dupla exposição compreende a gravação em instantes consecutivos de dois hologramas para registar o comportamento dinâmico do objecto. Uma portadora espacial é introduzida nas franjas primárias de cada holograma para posterior determinação do mapa de fase, uma vez que não podem utilizar-se técnicas de modulação temporal. A reconstrução numérica da fase dos hologramas é realizada simultaneamente através da remoção da portadora espacial. O mapa de fase de interferência é determinado por sobreposição da fase dos dois hologramas. As isocurvas definidas no mapa de fase representam pontos de igual amplitude do movimento do objecto.

#### 3.4.1 Holografia Digital

A gravação digital do holograma numa matriz de sensores CCD ou CMOS e a reconstrução numérica da frente de onda num computador consiste numa técnica que é designada de holografia digital. O holograma é o padrão de interferência microscópica gerada pela sobreposição de um feixe objecto com um feixe de referência. A frequência espacial do padrão de interferência é definida pelo ângulo entre as duas frentes de onda, expressão 3.4. A reconstrução numérica da frente de onda evita a utilização de um modelador da luz espacial para a reconstrução óptica da frente de onda gravada, simplificando a montagem óptica. A configuração geométrica da montagem óptica típica para a gravação digital do holograma e reconstrução numérica da frente de onda está representado na Fig. 3.6.

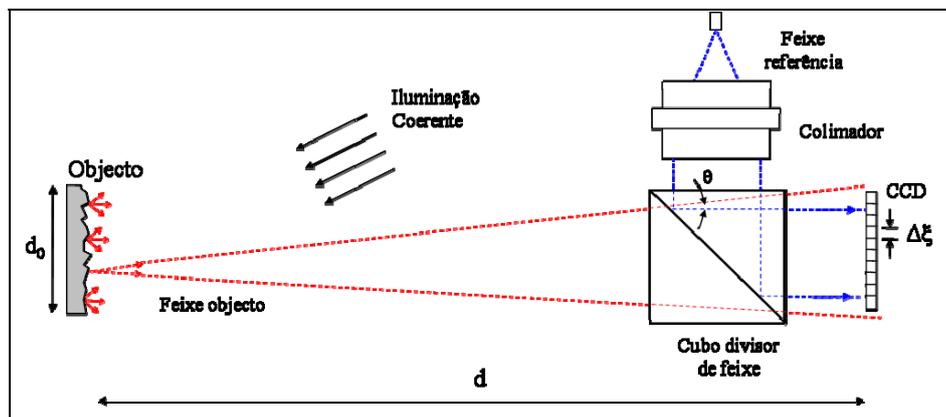


Fig. 3.6 – Representação da montagem óptica para gravação digital do holograma de Fresnel.

Para resolver as micro-interferências holográficas numa matriz CCD, os feixes de referência e

objecto devem incidir de forma quase colinear no plano de imagem. A partir da aplicação do teorema de Nyquist à frequência espacial de gravação do holograma  $f$  é estabelecido o ângulo limite máximo  $\theta_{\max}$  entre o feixe de referência e o feixe objecto:

$$f < \frac{2}{\lambda} \text{sen}\left(\frac{\theta_{\max}}{2}\right) \quad (3.24)$$

No caso do registo do holográfico se realizar numa matriz CCD de uma câmara de vídeo JAI<sup>®</sup> modelo CV-M2, cuja dimensão do píxel  $\Delta\xi = \Delta\eta = 7,4\mu\text{m}$ , e assumindo que é usado um LASER com o comprimento de onda  $\lambda = 532\text{ nm}$ , o ângulo máximo admissível para gravação do holograma será  $\theta_{\max} = 2,06^\circ$ .

Quando um objecto é simetricamente colocado em relação ao eixo óptico e é utilizado um feixe objecto perpendicular ao CCD da câmara, a distância mínima requerida entre o objecto e o CCD  $d$ , que ainda permita a visualização completa do objecto com a largura máxima  $d_0$ , é determinada através da expressão:

$$d > d_0 \frac{\Delta\xi}{\lambda} \quad (3.25)$$

Num caso concreto de um objecto colocado à distância de 0,8 m do CCD e considerando o modelo de câmara referida anteriormente, o campo de visualização máximo com a resolução de todos os píxeis do CCD é de  $d_0 = 6,8\text{ cm}$ . Para objectos maior dimensão é necessário aumentar a distância entre o objecto e o CCD. No entanto, a alteração do índice refractivo do ar durante a gravação e a necessidade de um bom isolamento vibratório torna difícil a sua execução prática. Nestes casos é possível reduzir drasticamente a distância através da utilização de lentes [10, 11].

### 3.4.1.1 Reconstrução numérica

O procedimento de reconstrução numérica do holograma é baseado na aproximação discreta do integral de Fresnel da difracção, definido para distâncias razoáveis entre o objecto e a matriz do CCD. Na Fig. 3.7 está representado um modelo geométrico simplificado discretizado por planos paralelos para descrever a reconstrução numérica do holograma.

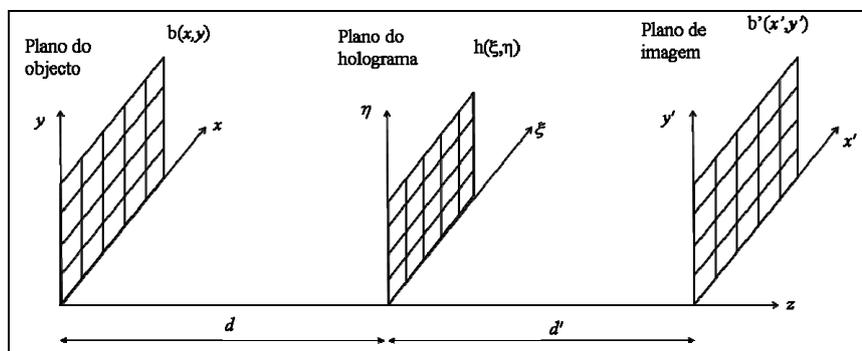


Fig. 3.7 – Modelo geométrico da gravação digital do holograma.

O plano do holograma, gravado digitalmente no CCD, está à distância  $d$  do plano do objecto. A partir do plano do holograma, distância  $d'$ , apresenta-se o plano de imagem ou plano de observação, onde a imagem real é reconstruída  $b'(x',y')$ . A sobreposição do feixe objecto com o feixe de referência produz um campo de intensidade  $h(\xi,\eta)$  que é capturado pelo CCD. Com base neste modelo

simplificado e na transformada discreta de Fresnel, foi desenvolvido um método prático de cálculo finito para a reconstrução da frente de onda complexa, quando o feixe de referência está na perpendicular ao plano de observação [1]:

$$b'(n\Delta x', n\Delta y') = e^{j\pi d \left( \frac{n}{N^2 \Delta \xi} + \frac{m^2}{M^2 \Delta \eta} \right)} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} h(k\Delta \xi, l\Delta \eta) e^{\frac{j\pi}{d\lambda} (k^2 \Delta \xi^2 + l^2 \Delta \eta^2)} e^{-2j\pi \left( \frac{kn}{N} + \frac{lm}{M} \right)} \quad (3.26)$$

onde  $n=1, \dots, N$ ,  $m=1, \dots, M$  e  $N, M$  é o número de píxeis da matriz CCD. A distribuição da intensidade e fase da frente de onda complexa são calculadas a partir das expressões seguintes:

$$I(n\Delta x', m\Delta y') = |b'(n\Delta x', m\Delta y')|^2 \quad (3.27)$$

$$\phi(n\Delta x', m\Delta y') = \arctg \frac{\text{Im}\{b'(n\Delta x', m\Delta y')\}}{\text{Re}\{b'(n\Delta x', m\Delta y')\}} \quad (3.28)$$

A expressão 3.26 pode ainda ser reescrita tendo como base a formulação da transformada de Fourier,  $e^{2j\pi(kn/N + lm/M)}$ . Esta alteração permite a acelerar o cálculo da reconstrução numérica através do uso de algoritmos da transformada rápida de Fourier (FFT) [1]:

$$b'(n\Delta \delta, m\Delta \varepsilon) = e^{j\pi d \lambda (n^2 \Delta \delta^2 + m^2 \varepsilon^2)} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} h(k\Delta \xi, l\Delta \eta) e^{\frac{j\pi}{d\lambda} (k^2 \Delta \xi^2 + l^2 \Delta \eta^2)} e^{-2j\pi (k\Delta \xi n\Delta \delta + l\Delta \eta m\Delta \varepsilon)} \quad (3.29)$$

Um exemplo está representado na Fig. 3.8, onde foi usado uma câmara JAI<sup>®</sup> modelo CV-M2 para gravação digital do holograma. As características principais da matriz do CCD da câmara são:  $N=1608$  e  $M=1216$ ;  $\Delta \xi = \Delta \eta = 7,4 \mu m$ . A montagem óptica representado na Fig. 3.6 foi materializada sobre numa mesa óptica com suportes anti-vibrátil para garantir o isolamento de perturbações externas. Um disco metálico com o diâmetro de  $d_0 = 0,015m$  foi colocado à distância de  $d = 0,8m$  do CCD e um LASER de emissão contínua com o comprimento de onda de  $\lambda = 532nm$  foi usado para registar o holograma. O algoritmo de reconstrução numérica da frente de onda, expressão 3.29, foi implementado sobre a plataforma MATLAB 7<sup>®</sup>, consultar Anexo E. Todo o procedimento foi automatizado e o processo de cálculo acelerado através do uso de rotinas da transformada rápida de Fourier FFT.

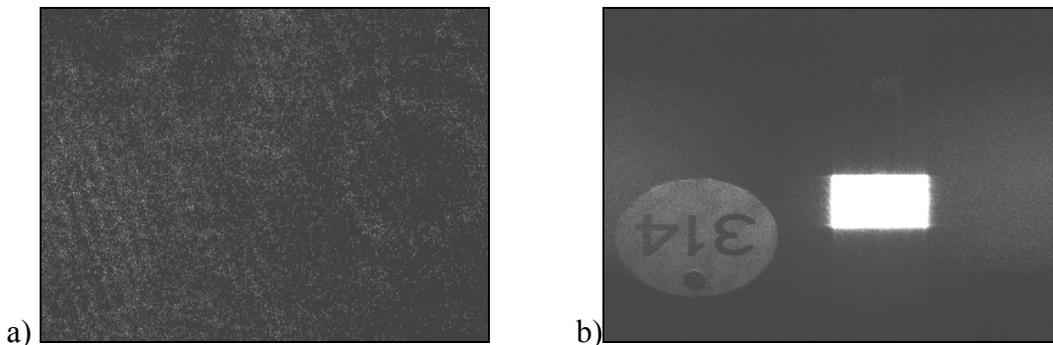


Fig. 3.8 – Holograma digital de Fresnel (a) e reconstrução numérica da intensidade (b).

A partir da transformada aproximada de Fresnel  $b'(n\Delta x', m\Delta y')$ , obtém-se a reconstrução numérica do mapa de intensidade, no qual é possível observar-se a imagem do disco e um elemento brilhante com o formato do CCD, Fig. 3.8 b), representativo do termo de ordem zero ou componente contínuo da difracção do feixe de referência no CCD. A reconstrução óptica da frente de onda do holograma quando iluminado por uma feixe de referência produz simultaneamente uma imagem real e

uma imagem virtual. A imagem real corresponde a uma frente de onda convergente, enquanto que a imagem virtual pertence a um frente de onda divergente que surge a partir da posição onde se encontrava colocado o objecto durante a gravação. A reconstrução da imagem virtual pode também ser efectuada por via numérica substituindo na expressão 3.29 a distância  $d = -d$ .

#### 3.4.1.2 Supressão do termo de ordem zero

O termo de ordem zero ou componente contínua da imagem, Fig. 3.8 b), não tem qualquer utilidade prática, a sua forte amplitude transforma-o num elemento perturbador para a gama dinâmica de representação da imagem e restringe a área de visualização do objecto. Os procedimentos para eliminação do termo contínuo estão divididos em métodos numéricos puros que apenas empregam técnicas numéricas, e métodos híbridos, baseados em procedimentos numéricos e técnicas experimentais de salto de fase (*phase-shifting*). As técnicas experimentais de salto de fase serão tratadas mais tarde neste capítulo. Um método numérico muito eficaz na eliminação do termo de ordem zero da transformada de Fresnel baseia-se na subtração do termo médio da intensidade em cada holograma. Este procedimento pode ser interpretado como equivalente à aplicação de um filtro passa-alto, onde só o termo de ordem zero é eliminado. Uma forma expedita de implementar este filtro consiste no cálculo do valor médio por convolução de imagem na vizinhança  $3 \times 3$  do píxel e subtração ao holograma original:

$$h'(k,l) = h(k,l) - h(k,l) \otimes M \quad (3.30)$$

onde a janela da média vem dada por:

$$M = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Na Fig. 3.9 está representado a reconstrução numérica da intensidade após aplicação do método numérico para a supressão do termo de ordem zero da transformada discreta de Fresnel.



Fig. 3.9 – Reconstrução numérica da intensidade com supressão do termo de ordem zero.

A eliminação eficaz da componente contínua e a reconstrução numérica da intensidade permitem a visualização do objecto sobre um fundo completamente escuro, conseguindo-se um aumento da intensidade e melhoria do contraste do disco em relação à imagem da Fig. 3.8 b).

#### 3.4.1.3 Padrão de interferência

Um padrão de interferência foi provocado através da aplicação de uma carga térmica ao disco, produzindo a deformação do mesmo. O registo holográfico dos dois diferentes estados com reconstrução numérica da respectiva fase e correlação entre as duas fases de interferência permite

observar o padrão de interferência de fase. Esta fase  $[-\pi \pi]$  é codificada num mapa de pseudo-cor, Fig. 3.10, onde cada cor corresponde a pontos de igual deslocamento na direcção perpendicular ao plano de observação.



Fig. 3.10 – Mapa de fase num disco para uma solicitação térmica.

### 3.4.2 Metrologia Speckle

O *Speckle* é criado pela interferência das ondas difractadas por uma superfície rugosa e opaca, quando iluminada por uma luz coerente. Sob o ponto de vista da metrologia óptica, o *Speckle* pode ser visto como o elemento fundamental de transporte da informação, a qual é usada por técnicas específicas de medição. Os métodos de metrologia *Speckle* têm a sua origem na interferometria holográfica, compartilhando, por isso, de algumas configurações ópticas e princípios de funcionamento. Na metrologia *Speckle* dois padrões são comparados, em que cada um é gerado pela sobreposição coerente de duas frentes de onda. Na análise da deformação, os dois registos correspondem ao estado anterior e após a solicitação do objecto.

#### 3.4.2.1 Técnica ESPI

A técnica mais conhecida da interferometria *Speckle* é designada pelo acrónimo ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) e foi desenvolvida de forma independente por diferentes grupos [12, 13], com o objectivo de eliminar o tempo consumido pela revelação das placas holográficas. A introdução de um sistema para o registo digital holográfico em combinação com a utilização de sistemas electro-ópticos resultou que diferentes autores lhe atribuíssem outras designações, como: *electronic holography*, *TV holography*, *electro-optic holography* e *digital holography*.

Para adaptar as micro-interferências entre o feixe objecto e o feixe de referência à resolução das câmaras é usado um sistema de formação de imagem, constituído por uma abertura e uma lente. O sistema óptico permite focar as frentes de ondas colineares do objecto e de referência e ajustar a dimensão do *Speckle*. Apesar da perda evidente de resolução em relação às placas holográficas, com valores típicos de 300 linhas por milímetro, o uso de câmaras de vídeo tem a vantagem de não passar pelo processo moroso da revelação do holograma e a possibilidade de registar à taxa de aquisição do vídeo a evolução no tempo do padrão de interferência.

A origem das frentes de onda da interferência e do ângulo formado entre elas determinam o tipo de comportamento do interferómetro. De acordo com o vector sensibilidade, os interferómetros podem ser ordenados em dois grupos:

- Interferómetro com sensibilidade no plano; e
- Interferómetro com sensibilidade fora-do-plano.

No primeiro, um padrão de interferência é criado pela dupla iluminação do objecto com o objectivo de medir os deslocamentos no plano. Este interferómetro não será aqui tratado por ser um

tema marginal ao objectivo principal desta dissertação. A descrição do funcionamento deste tipo de interferómetros pode ser encontrada na literatura [5, 14, 15].

Quanto ao segundo tipo de interferómetros, o padrão de interferência é formado pela combinação de duas ondas, uma de origem independente (feixe de referência) e a segunda proveniente da superfície do objecto (feixe objecto). Na presença de deformações na superfície, a frente de onda independente serve de referência para a frente de onda alterada pelo objecto, permitindo obter diferentes padrões de interferência associados à deformação do objecto Fig. 3.11. A correlação entre dois padrões de interferência permite medir os deslocamentos fora-do-plano.

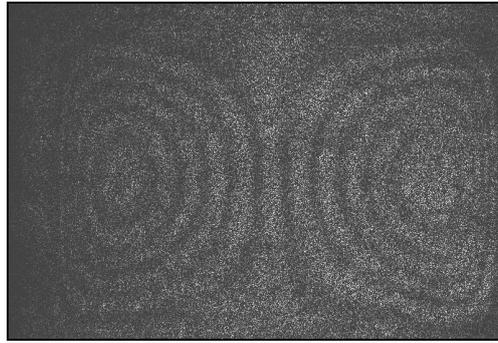


Fig. 3.11 – Correlação de dois padrões de interferência.

#### 3.4.2.1.1 Medição estática

O modelo de interferómetro de *Speckle* para medição do deslocamento estático fora-do-plano tem por base a configuração do interferómetro de *Michelson*. Na Fig. 3.12 está representado uma das configurações usada na medição do deslocamento em superfícies sob solicitações estática ou com baixa velocidade.

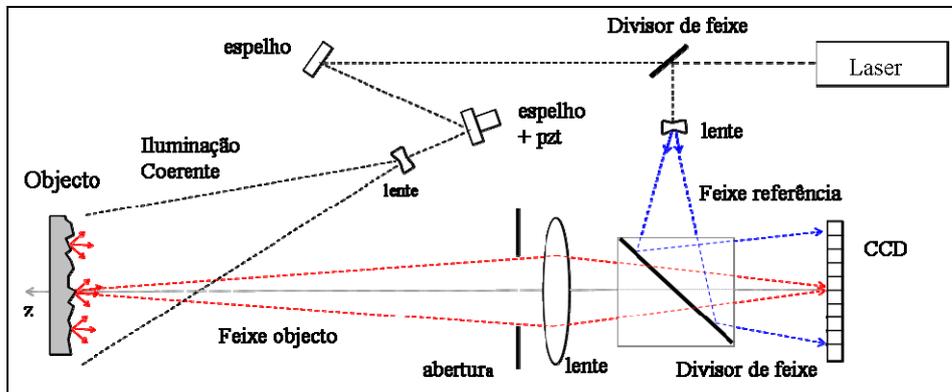


Fig. 3.12 – Configuração do interferómetro de *Speckle* para medição estática do deslocamento fora-do-plano.

O feixe de referência e o feixe objecto podem ser interpretados no plano de observação  $(x, y)$  como:

$$E^{Obj}(x, y) = A^{Obj}(x, y)e^{j\phi^{Obj}(x, y)} \quad (3.32)$$

$$E^{Ref}(x, y) = A^{Ref}(x, y)e^{j\phi^{Ref}(x, y)} \quad (3.33)$$

onde  $A^{Obj}$ ,  $A^{Ref}$  e  $\phi^{Obj}$ ,  $\phi^{Ref}$  são amplitude e a fase, respectivamente, do feixe objecto e do feixe referência. O padrão de intensidade resultante da interferência das duas frentes de onda e registado no plano de imagem pela câmara pode ser definido por:

$$I(x, y) = I^{Obj}(x, y) + I^{Ref}(x, y) + \sqrt{I^{Obj}(x, y)I^{Ref}(x, y)} \cos \psi(x, y) \quad (3.34)$$

sendo que  $\psi(x, y) = \phi^{Obj}(x, y) - \phi^{Ref}(x, y)$  representa a diferença entre a fase das duas frentes de onda.

Assumindo que durante a deformação da superfície só sucede alteração da fase  $\Delta\phi(x, y)$ . A diferença de intensidade criada pela deformação da superfície entre um estado inicial  $A$  e um estado final  $B$  será dado por [1]:

$$(I_A - I_B)(x, y) = 4\sqrt{I^{Obj}(x, y)I^{Ref}(x, y)} \left[ \sin\left[\psi(x, y) + \frac{\Delta\phi(x, y)}{2}\right] \sin\frac{\Delta\phi(x, y)}{2} \right] \quad (3.35)$$

Na expressão 3.35, o radicando representa a iluminação de fundo e o produto entre senos corresponde à variação estocástica do *Speckle* de pixel para pixel modulada por metade da diferença de fase criada pela deformação da superfície. Na subtração em tempo real são visualizadas as franjas de interferência, de cor escura, correspondentes à deformação na superfície do objecto. Não havendo informação entre as franjas só é possível obter de modo aproximado o deslocamento da superfície. Para uma melhor caracterização do deslocamento é necessário conhecer a evolução da fase do padrão de interferência.

#### 3.4.2.1.1.1 *Quantificação da fase da interferência (técnicas de modulação temporal)*

Em medições estáticas ou quase estáticas, a fase da interferência é determinada recorrendo às técnicas de modulação temporal de fase, designadas de salto de fase (*phase step* ou *phase shifting*). Estas técnicas usam como princípio a correlação entre a intensidade e a variação discreta da fase imposta entre o feixe objecto e o feixe de referência em cada registo. As equações que expressam a distribuição da intensidade gravada  $I_n(x, y)$  em função do salto de fase, para um estado inicial  $A$  e final  $B$  da deformação, são definidas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} I_{A,n}(x, y) &= I_A^{Obj}(x, y) + I^{Ref}(x, y) + 2\sqrt{I_A^{Obj}(x, y)I^{Ref}(x, y)} \cos[\psi_A(x, y) + \phi R_n] \\ I_{B,n}(x, y) &= I_B^{Obj}(x, y) + I^{Ref}(x, y) + 2\sqrt{I_B^{Obj}(x, y)I^{Ref}(x, y)} \cos[\psi_B(x, y) + \Delta\phi(x, y) + \phi R_n] \end{aligned} \quad (3.36)$$

onde  $\Delta\phi(x, y)$  é a fase da interferência e  $\phi R_n$  é a evolução discreta da fase. O salto de fase pode ser criado no feixe de referência ou no feixe objecto por translação, em fracções do comprimento de onda da luz, de um espelho acoplado a um actuador piezoeléctrico, Fig. 3.12.

O cálculo da fase da interferência envolve a resolução de um sistema não linear de equações com o mínimo de três incógnitas, se for considerado que o salto de fase é conhecido e igual a  $\phi R_n$ . Tal implica, que para cada posição da superfície pelo menos três padrões de intensidade com diferentes saltos de fase têm de ser gravados. Devido às limitações na taxa de aquisição do vídeo e ao tempo de translação do espelho, a gravação das intensidades com diferentes fases poderá prolongar-se no tempo. Neste caso, para garantir a estabilidade na medição e prevenir a influência de eventuais perturbações exteriores, o período entre registos deverá ser reduzido ao mínimo possível. Esta condição temporal, imposta pelo procedimento de determinação da fase, restringe a aplicação da técnica temporal de modelação de fase a fenómenos estáticos ou fenómenos com baixa velocidade. No entanto, através da utilização de um sistema complexo de três câmaras perfeitamente alinhadas entre si, é possível realizar medições de fenómenos dinâmicos [16].

Sob o ponto de vista teórico, qualquer valor arbitrário de salto de fase e número de imagens superior a 2 pode ser usado na determinação da fase do interferograma. Na verdade, a estabilidade na medição reduz a sua aplicabilidade aos métodos de 3, 4 ou 5 imagens usando diferentes saltos de fase [1]. Dentre estes, o mais comum é o método das quatro imagens desfasadas entre si de  $\pi/2$ . Esta escolha deve-se ao bom compromisso entre o número de imagens gravadas e a sensibilidade ao erro produzido pelos desvios na imposição do salto de fase.

Neste caso, a fase do holograma para o estado inicial  $\Phi_A(x, y) = \psi_A(x, y)$  e final  $\Phi_B(x, y) = \psi_B(x, y) + \Delta\phi(x, y)$  é da forma:

$$\Phi_i(x, y) = \arctg \frac{I_{i,4}(x, y) - I_{i,2}(x, y)}{I_{i,1}(x, y) - I_{i,3}(x, y)} \quad i = A, B \quad (3.37)$$

A fase do padrão de interferência  $\Delta\phi(x, y)$  é calculada pela diferença entre as fases holográficas criadas de acordo com a expressão seguinte:

$$\Delta\phi(x, y) = \arctg \frac{\text{sen}(\Phi_B(x, y)) - \text{sen}(\Phi_A(x, y))}{\text{cos}(\Phi_B(x, y)) - \text{cos}(\Phi_A(x, y))} \quad (3.38)$$

O interferómetro representado na Fig. 3.12 foi implementado sobre uma mesa óptica com suspensão anti-vibratória para medir o campo de deslocamentos de uma placa encastrada em todos os bordos e sujeita a uma carga uniforme na direcção transversal ao plano. Na Fig. 3.16 estão representados os 8 padrões de intensidade registados e o respectivo mapa de fase obtido através da técnica das quatro imagens para um salto de fase  $\pi/2$ .

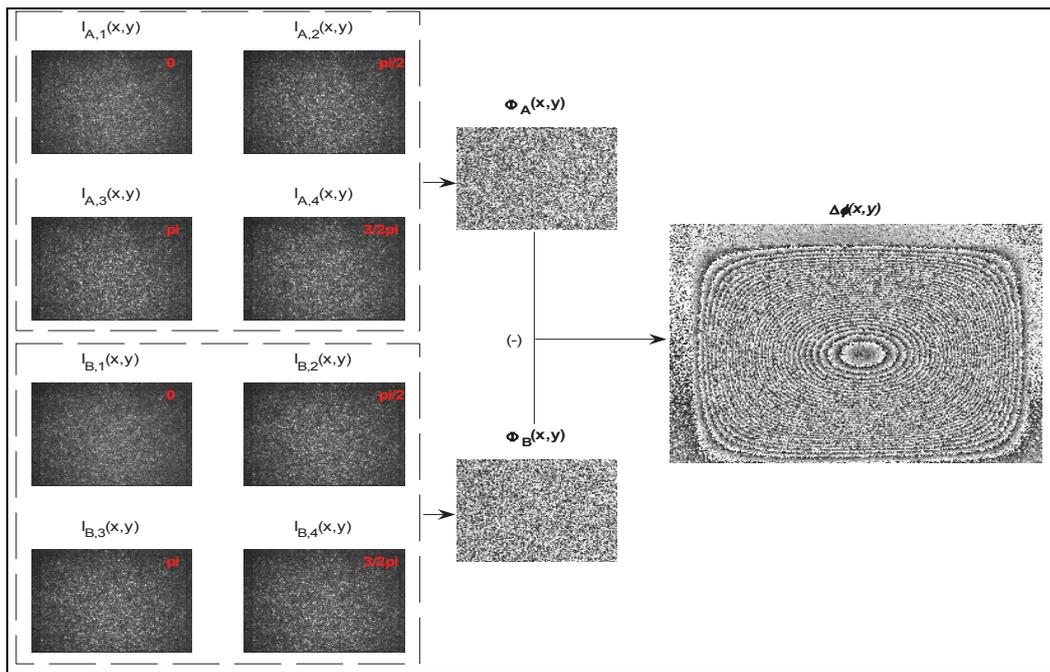


Fig. 3.13 – Diagrama para a determinação do mapa de fase a partir de 8 registos da intensidade holográfica, concretizada pela técnica de salto de fase com 4 imagens (técnica de modelação temporal de fase).

A fase do interferograma é codificada numa gradação de tons de cinzento entre franjas, Fig. 3.13, em que cada nível de cor corresponde a pontos da superfície de igual fase/deslocamento fora-do-plano.

#### 3.4.2.1.1.2 Cálculo da sensibilidade à descorrelação

A deterioração da qualidade das franjas no interferograma é observada durante o processo de deformação da superfície e é causada pela descorrelação parcial do *Speckle*. Os movimentos de rotação e translação da superfície traduzem-se pela translação do *Speckle* no plano de observação, resultando numa descorrelação progressiva da interferência entre as duas frentes de onda até ao limite da descorrelação total. Desta descorrelação observa-se uma diminuição no contraste das franjas no padrão de interferência.

Na técnica ESPI, a descorrelação ocorre devido à rotação e translação da frente de onda objecto, a qual pode ser determinada a partir da configuração geométrica do interferómetro. Na situação única de translação no plano, o coeficiente de correlação é definido a partir de um índice do movimento da superfície  $d / d_{\max}$ , de acordo com a expressão seguinte [9]:

$$c = 2 \frac{J_1(1,22\pi d/d_{\max})}{1,22\pi d/d_{\max}} \tag{3.39}$$

sendo  $d_{\max}$  o diâmetro do *Speckle*, cuja dimensão deverá ser igual ao do píxel para que o padrão de *Speckle* fique perfeitamente resolvido. Na Fig. 3.14 está representado a intensidade normalizada, máxima e mínima, e o contraste nas franjas de interferência definidos a partir do índice  $d / d_{\max}$  e para  $x = 0,1$ .

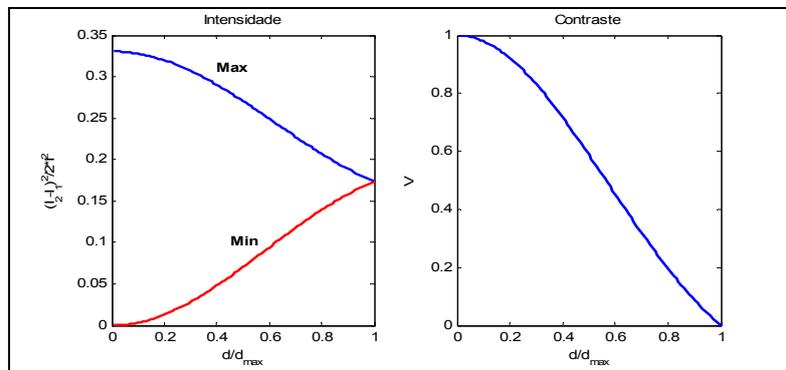


Fig. 3.14 – Intensidade e contraste das franjas para descorrelação de uma frente de onda por translação no plano.

Para o movimento de rotação da superfície, o coeficiente de correlação  $c$  pode ser calculado em função do ângulo da rotação  $\gamma$ , definido entre a normal à superfície e o eixo óptico [9]:

$$c = 2 / \pi [ E^{Obj} - \cos(E^{Obj}) \text{sen}(E^{Obj}) ] \tag{3.40}$$

com;

$$\cos(E^{Obj}) = \gamma / \gamma_{\max} \tag{3.41}$$

sendo que  $\gamma_{\max} = 2D_1 / \ell$ , onde  $D_1$  é o diâmetro da pupila e  $\ell$  a distância do objecto à pupila. Combinando as expressões 3.40 e 3.41 e substituindo o coeficiente de correlação nas expressões 3.22 e 3.23, determinam-se a intensidade máxima e mínima normalizadas e o contraste do padrão de franjas em função do razão angular  $\gamma / \gamma_{\max}$ , Fig. 3.15.

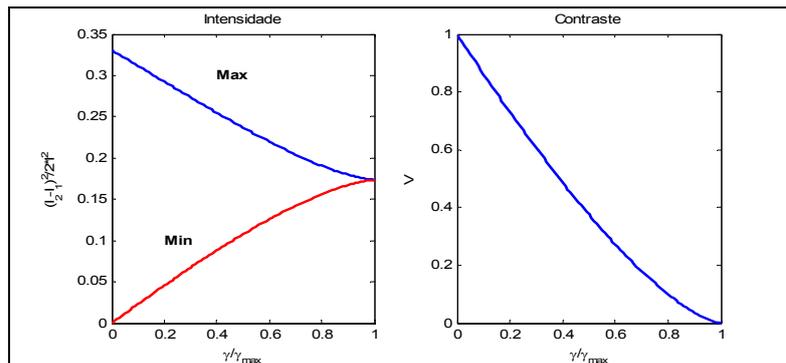


Fig. 3.15 – Intensidade e contraste das franjas para descorrelação de uma frente de onda por rotação ( $x=0,1$ ).

A principal diferença entre a descorrelação por translação no plano e a descorrelação por rotação está no contraste, sendo a sensibilidade da descorrelação maior na rotação que na translação. Os resultados experimentais indicam que o limite do contraste para observação da franjas deve ser de 0,5 [9], o qual é atingido para  $d/d_{\max} = 0,46$  e  $\gamma/\gamma_{\max} = 0,29$ . Todavia, quando é aplicada a técnica temporal de modelação de fase, este valor pode decrescer até três vezes, em resultado da sobreposição do ruído dos diferentes registos holográficos [17].

### 3.4.2.1.2 Medição dinâmica

A medição do deslocamento em fenómenos rápidos, como impactos e vibrações, é concretizada através da iluminação pulsada com gravação em duplo impulso [18-21]. Na impossibilidade de aplicar a técnica temporal de salto de fase, uma portadora espacial é introduzida no interferograma primário criado por uma pequena rotação entre o feixe de referência e o feixe objecto, com o objectivo de posteriormente extrair o mapa de fase do interferograma. Na Fig. 3.16 está representada a configuração padrão de um interferómetro *Speckle* para medição dinâmica do deslocamento fora-do-plano.

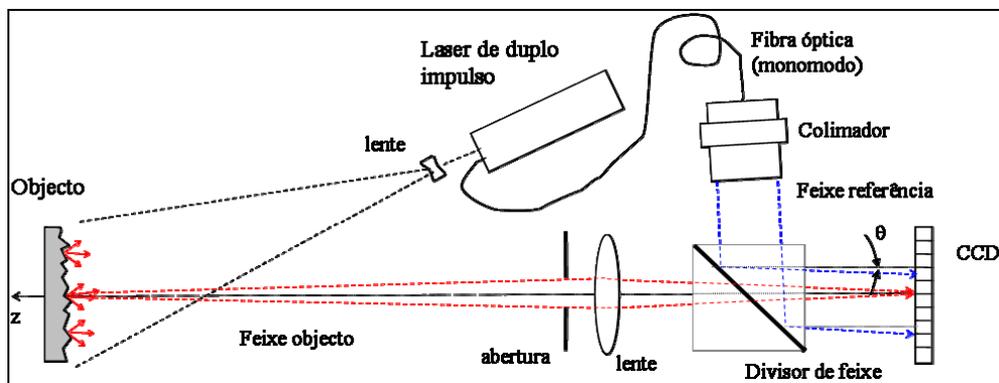


Fig. 3.16 – Configuração do interferómetro de *Speckle* para medição dinâmica do deslocamento fora-do-plano.

Nesta configuração do interferómetro de *Michelson*, um LASER gera um par de impulsos de elevada energia (1 Joule) separados no tempo desde  $1\mu s$  a  $800\mu s$ . O curto tempo entre impulsos torna a técnica imune a vibrações externas de baixa frequência. Cada impulso tem a duração típica de  $20ns$ , permitindo registar nesse instante o movimento como que parado no tempo. Uma câmara rápida está sincronizada com o LASER para registar os dois impulsos. Todo o sistema é comandado a partir de um sinal externo de sincronismo, criado a partir de parâmetros pré-estabelecidos do fenómeno em estudo, consultar Anexo E.

#### 3.4.2.1.2.1 Quantificação da fase da interferência (técnicas de modulação espacial)

A fase do interferograma primário é determinada através da remoção da portadora espacial e concretizada por via de duas metodologias, a saber:

- Método de modulação espacial de fase;
- Método espacial da transformada de Fourier.

No método de modulação espacial de fase, a rotação  $\theta$  é previamente ajustada de forma a criar uma variação discreta de fase  $\alpha = \pi/2$  entre píxeis adjacentes. A abertura tem uma dimensão pequena para garantir que cada grão de *Speckle* englobe pelo menos 4 píxeis na direcção pretendida para a modulação [22]. O facto do método necessitar de usar *Speckle* de grande dimensão, implica que a resolução espacial e precisão da medição sejam menores. Contudo, estas podem sempre ser melhoradas através do uso de câmaras com mais píxeis de dimensão menor. Se um ângulo  $\theta$  for aplicado segundo um dos eixos cartesianos, Fig. 3.16, a portadora espacial nesse eixo será dada por

$f_0 = \text{sen}(\theta)/\lambda$ . Para este caso, a fase do interferograma primário nos instantes  $A$  e  $B$  pode ser calculada com base no método do salto de fase de 3 imagens:

$$\Phi_i(x, y) = \arctg\left(\frac{I_i(x - \Delta x, y) - I_i(x + \Delta x, y)}{I_i(x - \Delta x, y) + I_i(x + \Delta x, y) - 2I_i(x, y)} \text{tg} \frac{\alpha}{2}\right) \quad i = A, B \quad (3.42)$$

onde  $\Delta x$  é o passo do píxel na direcção  $x$  e  $\alpha = 2\pi\Delta x f_0$ .

Na verdade, a portadora não se mantém constante ao longo dos três píxeis e nem entre os dois registos holográficos, o que torna este método pouco preciso. Em alternativa, o método espacial da transformada de Fourier, apesar de mais dispendioso em tempo de cálculo, mostra ser mais eficaz na determinação da fase [23, 24]. A partir da distribuição da intensidade de interferência, expressão 3.34, e após incluir a portadora espacial de frequência  $f_0$  segundo o eixo  $x$ , obtém-se:

$$I(x, y) = I^{Obj}(x, y) + I^{Ref}(x, y) + 2\sqrt{I^{Obj}(x, y)I^{Ref}(x, y)} \cos[\psi(x, y) + 2\pi f_0 x] \quad (3.43)$$

A decomposição do co-seno permite escrever a função intensidade numa forma mais concisa, isto é [1]:

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y)e^{j(2\pi f_0 x)} + c^*(x, y)e^{-j(2\pi f_0 x)} \quad (3.44)$$

com;

$$a(x, y) = I^{Obj}(x, y) + I^{Ref}(x, y) \quad (3.45)$$

$$c(x, y) = \sqrt{I^{Obj}(x, y)I^{Ref}(x, y)} e^{j\psi(x, y)}$$

em que o símbolo  $*$  representa o complexo conjugado da função.

O isolamento da fase da interferência holográfica  $\psi(x, y)$  da fase da portadora ou de referência  $2\pi f_0 x$ , segundo ou terceiro termos na expressão 3.44, é realizado de forma mais eficaz no domínio do número de onda, recorrendo à transformada discreta de Fourier a duas dimensões (FFT). A fase  $\psi(x, y)$  está modelada numa banda espectral  $f_s$  em torno da portadora espacial  $f_0$ . A largura desta banda é controlada através do ajuste da abertura do sistema óptico, a sua dimensão obriga que a portadora espacial seja  $f_0 > 4f_s$ , para garantir a separação das componentes de mais baixa ordem, representado pelo primeiro termo da expressão 3.44. No limite, a frequência espacial máxima de gravação será  $f_{\max} = 1/2\Delta x$ , de acordo com teorema de Nyquist. Isto significa que a frequência espacial da fase está limitada a  $f_s = f_{\max}/6\Delta x$ , em que o tamanho do grão de *Speckle* deverá ser pelo menos de 6 píxeis. A desmodulação da fase da interferência é realizada isolando a informação espectral em torno da portadora espacial, fixando uma máscara de filtragem, e posterior translação para a origem dos eixos e cálculo da transformada inversa de Fourier (FFT<sup>-1</sup>). Esta operação é equivalente à remoção da portadora espacial do holograma. A introdução do cálculo da transformada de Fourier na expressão 3.44 permite explicitar a intensidade da interferência no domínio do número de onda:

$$I(u, v) = A(u, v) + C(u, v) + C^*(u, v) \quad (3.46)$$

em que  $u$  e  $v$  representam a ordem do número de onda na direcção horizontal e vertical, respectivamente.

Após a translação para a origem da informação espectral de fase e cálculo da transformada inversa de

Fourier, obtém-se [23]:

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) e^{j\psi(x, y)} \quad (3.47)$$

onde  $b(x, y) = \sqrt{I^{Obj}(x, y) I^{Ref}(x, y)}$  representa a intensidade de fundo. A fase da interferência primária dos dois registos holográficos  $A$  e  $B$  pode agora ser calculada através:

$$\Phi_i(x, y) = \arctg \frac{\Im(c_i(x, y))}{\Re(c_i(x, y))} \quad i = A, B \quad (3.48)$$

em que o símbolo  $\Im$  designa a componente imaginária, enquanto que  $\Re$  denomina a componente real. A partir da correlação entre a fase da interferência holográfica  $\Phi_A(x, y)$  no instante inicial e a fase da interferência holográfica  $\Phi_B(x, y)$  no instante final é determinado o mapa de fase do interferograma ou interferência secundária, de acordo com a expressão 3.38.

Um sistema comercial [25] existente no LOME (Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental), semelhante à configuração representada na Fig. 3.16, foi usado para registar a propagação de ondas de flexão numa placa de alumínio. Um excitador electromagnético (*Shaker*), comandado por um sistema de sincronismo, aplica uma força impulsiva na direcção transversal ao plano da placa. O sinal de sincronismo é ajustado de forma a poder registar o primeiro holograma antes do impacto, inexistência de deformação na placa, e o segundo holograma após o impacto, placa deformada [21].

Para a placa fixa em todo o bordo exterior, foram obtidos os dois registos holográficos da propagação das ondas de flexão ao longo da placa. O mapa de fase do interferograma secundário é determinado a partir dos dois registos e seguindo o método da transformada de Fourier, conforme se apresenta no diagrama da Fig. 3.17.

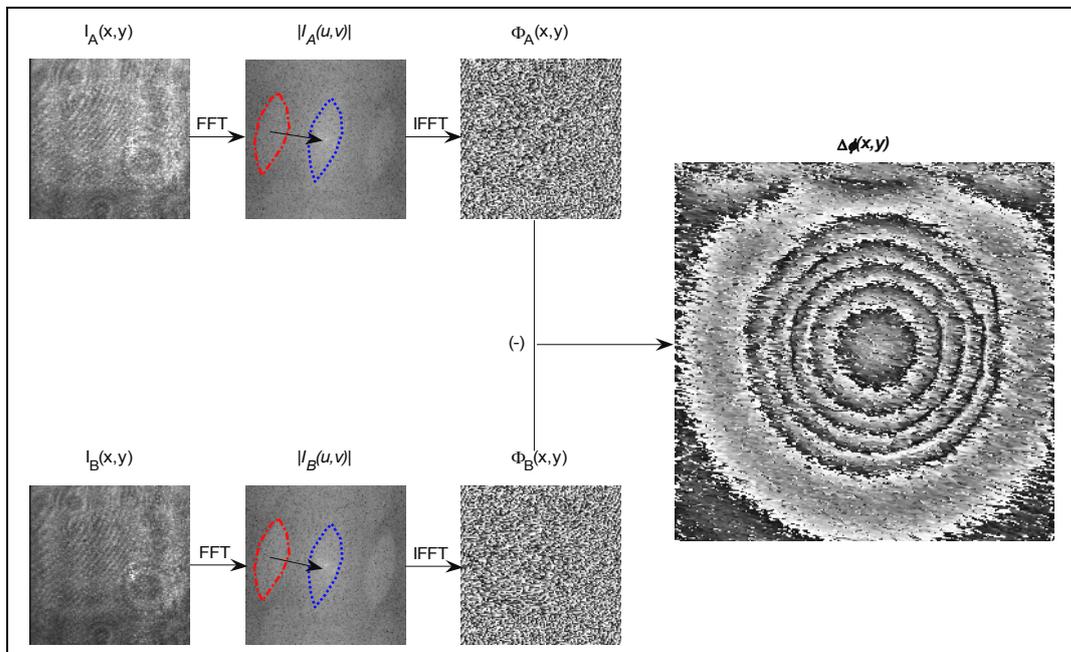


Fig. 3.17 – Diagrama para a determinação do mapa de fase a partir de 2 registos holográficos, concretizada pelo método da transformada de Fourier (técnica de modelação espacial de fase).

A codificação do mapa descontínuo da fase numa escala de pseudo-cor, permite interpretar o deslocamento da estrutura registado entre os dois instantes. Nesta representação a fase é normalizada de forma a utilizar todos os níveis de cinzentos disponíveis. As discontinuidades resultam das assíntotas da função tangente utilizada no cálculo de fase e podem ser posteriormente removidas.

### 3.4.2.2 Técnica Shear (Shearography Speckle)

Nas técnicas ESPI de medição fora-do-plano, a frente de onda objecto e a frente de onda de referência percorrem caminhos diferentes antes de interferirem. A frente de onda da referência vem directamente do LASER e por isso fornece informação limpa de *Speckle*, isto é, frente de onda especular. Pelo contrário, a frente de onda objecto é criada pela reflexão na superfície e para além da deformação é sensível a correntes de convecção do ar e a vibrações externas. Na montagem deste tipo de interferómetros é normal existir uma grande diferença entre os caminhos percorridos pelas duas frentes de onda, o que obriga à utilização de LASERS com grandes comprimentos de coerência e, por isso, mais dispendiosos. Em fenómenos estáticos é necessário garantir um bom isolamento do meio exterior, através da medição em ambientes fechados e sobre mesas com apoios anti-vibráteis.

A configuração do interferómetro *Shear* veio permitir suprimir algumas destas dificuldades. A técnica foi inicialmente desenvolvida por dois grupos independentes [26, 27] e mede o gradiente do deslocamento numa direcção predeterminada, motivo pelo qual é praticamente insensível aos movimentos de corpo rígido. O interferómetro tem o mesmo princípio da interferometria de *Speckle*, à excepção que agora as duas frentes de onda, referência e objecto, vêm ambas do objecto e são desviadas lateralmente (*Shear*) para criar um padrão de interferência. O desvio lateral das frentes de onda pode ser criado por uma das seguintes formas: um vidro com o formato de cunha colocado na frente de metade da lente, duas placas de vidro rodadas, um prisma de *Wollaston* ou um interferómetro de *Michelson* com um espelho ligeiramente rodado. Esta última opção é a preferida, por ser a única que permite ajustar facilmente o desvio lateral entre as frentes de onda e aplicar a técnica de salto de fase essencial ao cálculo do mapa de fase em medições estáticas.

#### 3.4.2.2.1 Medição estática

O sistema *Shear* permite a medição directa do gradiente dos deslocamentos. Nas medições de fenómenos estáticos ou quase-estáticos é usado o interferómetro *Shear* do tipo *Michelson* e a técnica de modulação temporal de fase através da translação de um dos espelhos por actuação de um actuador piezoeléctrico, para a determinação quantitativa da fase do interferograma, Fig. 3.18. Com efeito, a frente de onda objecto é dividida pelo divisor de feixe em duas frentes de onda e, por uma ligeira rotação  $\delta$  de um dos espelhos, estas são espacialmente desviadas para criar o fenómeno de interferência.

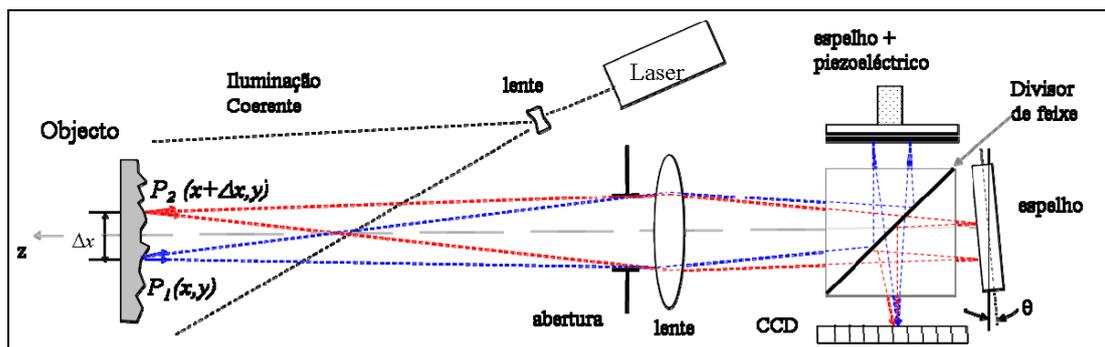


Fig. 3.18 – Configuração do interferómetro *Shear* do tipo *Michelson* para medição do gradiente dos deslocamentos fora-do-plano.

Os dois pontos da superfície  $P_1(x, y)$  e  $P_2(x + \Delta x, y)$  separados lateralmente por  $\Delta x$ , devido à rotação do espelho  $\theta$ , são observados sobrepostos no plano de imagem. No que se refere às frentes de onda, estas são descritas por:

$$E_1(x, y) = A_0(x, y)e^{j\phi(x, y)}; \quad E_2(x, y) = A_0(x, y)e^{j\phi(x + \Delta x, y)} \quad (3.49)$$

onde  $A_0$  é a amplitude,  $\phi(x, y)$  a fase da onda directa e  $\phi(x + \Delta x, y)$  a fase da onda desviada de  $\Delta x$  na direcção do eixo  $x$ .

As intensidades produzidas pelas interferências iniciais  $A$ , antes da deformação, e final  $B$ , após a deformação  $\Delta\phi(x, y)$ , são as seguintes:

$$\begin{aligned} I_A(x, y) &= |E_1(x, y) + E_2(x, y)|^2 = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)} \cos(\psi(x, y)) \\ I_B(x, y) &= |E_1(x, y) + E_2(x, y)|^2 = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)} \\ &\quad \cos(\psi(x, y) + \Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x + \Delta x, y)) \end{aligned} \quad (3.50)$$

A subtração pontual das intensidades relativas aos dois estados de deformação do objecto, permite escrever:

$$\begin{aligned} (I_A - I_B)(x, y) &= 4\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)} \\ &\quad \text{sen} \left[ \psi(x, y) + \frac{\Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x + \Delta x, y)}{2} \right] \text{sen} \frac{\Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x + \Delta x, y)}{2} \end{aligned} \quad (3.51)$$

O termo definido pela raiz quadrada representa a intensidade de fundo, o primeiro seno corresponde à variação estocástica do ruído de *Speckle* modelada pela deformação do objecto, segundo seno da expressão. Neste caso, o vector deslocamento fora-do-plano  $w(x, y)$  e o argumento do segundo seno podem ser relacionados por [1]:

$$\Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x + \Delta x, y) \approx \frac{4\pi\Delta x}{\lambda} \frac{\partial w(x, y)}{\partial x} \quad (3.52)$$

Esta expressão mostra que o padrão de interferência é uma aproximação da primeira derivada espacial do campo de deslocamentos na direcção  $x$  do desvio lateral entre as frentes de onda. Desde logo, o interferómetro é pouco sensível a movimentos de corpo rígido com  $d(x, y) = \text{Const.}$  e a algumas perturbações que actuem de igual forma nas duas frentes de onda, como é o caso de vibrações externas.

O interferómetro *Shear* do tipo *Michelson*, representado na Fig. 3.18, foi construído sobre uma mesa anti-vibrátil para medir, nas duas direcções ortogonais, o mapa de fase associado à rotação de uma placa em aço encastrada em todos os bordos e sujeita a uma carga uniforme na direcção transversal ao plano. Um LASER da Coherent® modelo VERDI com o comprimento de onda de  $\lambda = 532\text{nm}$  foi usado nesta medição. Na Fig. 3.19 estão representados os dois mapas de fase obtidos através da técnica de modulação temporal de fase de quatro imagens para a derivada espacial na direcção horizontal e vertical da placa, respectivamente.

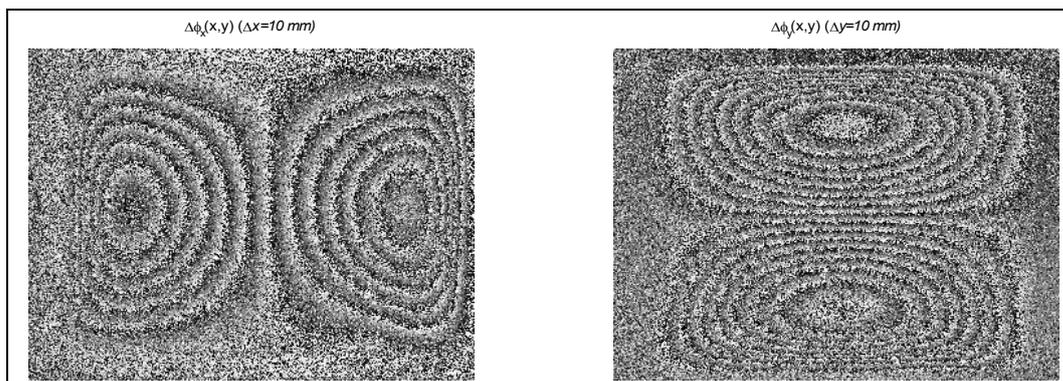


Fig. 3.19 - Mapas de fase da rotação na horizontal e vertical de uma placa encastrada e carregada uniformemente na direcção transversal ao plano.

O mapa de fase da derivada espacial do campo de deslocamentos da placa, Fig. 3.13, é agora representado por dois lobos de franjas concêntricas, podendo ser interpretadas como linhas de nível do campo de rotações, Fig. 3.19.

3.4.2.2.1.1 Cálculo da sensibilidade à descorrelação

Conforme já referido, o interferómetro *Shear* é sensível ao gradiente do deslocamento fora-do-plano, expressão 3.52. Com efeito, uma translação no plano ou rotação uniforme do objecto produzirá a descorrelação do *Speckle* e a respectiva translação no mapa de fase, sem haver uma distribuição de franjas ao longo da superfície. A descorrelação por translação no plano tem como limite máximo o tamanho da resolução do elemento de formação da imagem  $d_{max}$  e cujo coeficiente de correlação já foi apresentado, expressão 3.39. Após substituição do coeficiente de correlação nas expressões 3.20 e 3.21, obtém-se a intensidade máxima e mínima normalizadas e o contraste da correlação das franjas em função da razão  $d / d_{max}$ . A sua evolução se pode observar na Fig. 3.20, para igual intensidade das duas frentes de onda ( $x = 1$ ).

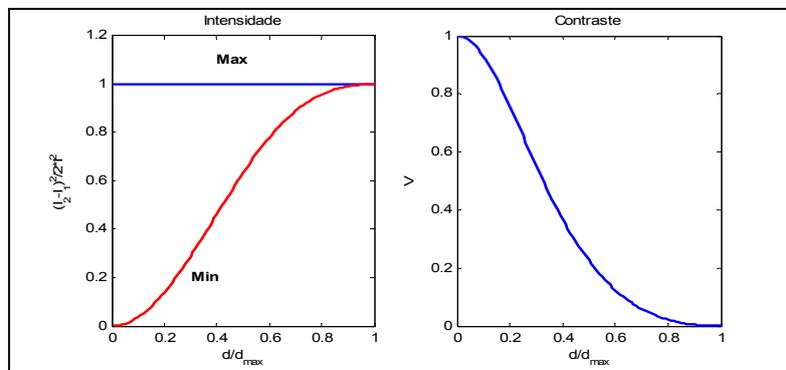


Fig. 3.20 - Intensidade e contraste das franjas para a descorrelação de duas frentes de onda por translação no plano.

Na rotação não uniforme são observadas franjas de interferência em número e ordem que varia com o ângulo de rotação do espelho  $\delta$ . Por seu lado, a ordem da franja está directamente relacionada com a amplitude da rotação e esta, por sua vez, com descorrelação do *Speckle*. Assim, a ordem da franja pode ser definida a partir da expressão 3.52 e tem a forma:

$$N = \frac{2\nu(x, y)\Delta x}{\lambda\sqrt{1+(H)^2}} \tag{3.53}$$

onde  $H(x, y)$  é um parâmetro independente, definido pela razão entre o ângulo de rotação da superfície  $\nu(x, y)$  e o ângulo do espelho [9]. A ordem da franja pode variar desde zero, ausência de descorrelação, até ao limite máximo  $N_{max} = D_1\Delta x / \lambda\ell\sqrt{1+H^2}$ , designado por descorrelação total do *Speckle*. De modo que a descorrelação do *Speckle* produzida pela rotação da superfície pode ser definida pelo índice da franja  $N / N_{max}$  e, através deste, determinar-se a intensidade máxima e mínima normalizadas e o contraste das franjas da interferometria de *Shear*, expressões 3.20 e 3.21, Fig. 3.21.

Pela comparação directa entre a evolução dos dois contrastes, Fig. 3.20 e Fig. 3.21, observa-se que, uma vez mais, a sensibilidade da descorrelação por rotação é maior em relação à descorrelação por translação no plano. Efectivamente, o limite de observação das franjas ( $V = 0,5$ ) é atingido para  $d / d_{max} = 0,32$  e  $N / N_{max} = 0,18$ . Acrescentando a aplicação da técnica de salto de fase conduz a um decréscimo destes valores por um factor máximo de três, conforme já referido. Por fim, comparando as duas técnicas verifica-se que o interferómetro *Shear* é mais sensível à descorrelação e o que apresenta

maior valor da intensidade máxima.

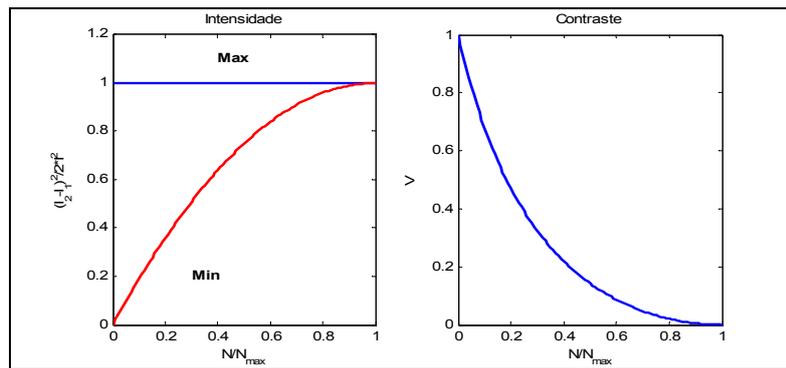


Fig. 3.21 - Intensidade e contraste das franjas para decorrelação de duas frentes de onda por rotação ( $\alpha=1$ ).

3.4.2.2.2 Medição dinâmica

Na interferometria *Shear* para medição dinâmica do gradiente dos deslocamentos fora-do-plano, o cálculo de fase é realizado através da introdução de uma portadora espacial nas franjas primárias. À semelhança da interferometria ESPI, a portadora espacial é criada por uma ligeira rotação de um dos espelhos. A introdução desta portadora leva a que agora o interferómetro tenha uma configuração do tipo *Mach-Zehnder* [24, 28]. Na Fig. 3.22 está representada a montagem para a medição dinâmica do gradiente dos deslocamentos fora-do-plano. No interferómetro *Mach-Zehnder* a frente de onda proveniente do objecto é dividida pelo primeiro divisor de feixe (DF1) em dois caminhos ópticos, designados de braços do interferómetro, reflectidas no espelho 1 e espelho 2 e recombinadas no segundo divisor de feixe (DF2). No primeiro caminho óptico é aplicado o desvio da frente de onda no plano da imagem através da translação do espelho 1, no segundo caminho óptico é ajustada a portadora espacial por rotação do espelho 2. Este espelho tem ainda a possibilidade de realizar pequenas translações no plano, de forma compensar as eventuais diferenças entre os dois caminhos ópticos, provocada pela translação do espelho 1, consultar Anexo D.

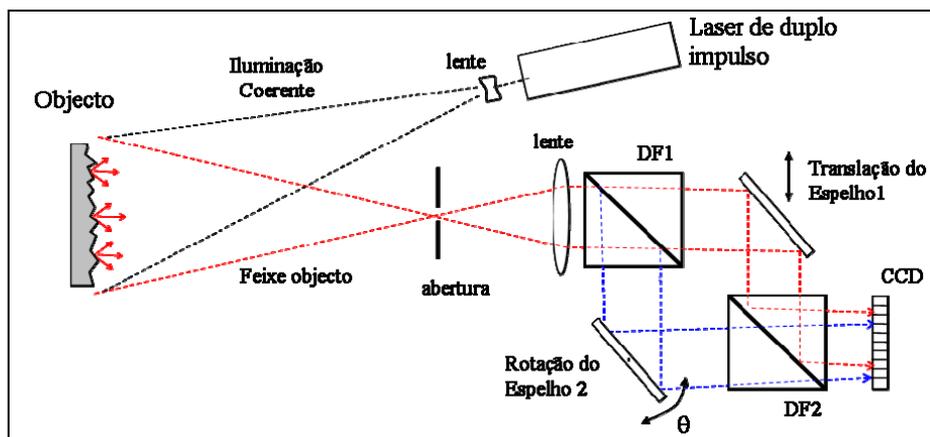


Fig. 3.22 – Configuração do interferómetro *Shear* do tipo *Mach-Zehnder* para medição dinâmica do gradiente dos deslocamentos fora-do-plano.

A fase da interferência primária é calculada a partir da desmodulação da portadora espacial em cada registo através do método espacial da transformada de Fourier, expressão 3.48. Por sua vez, a fase da interferência secundário ou o mapa de fase é obtido por correlação entre as fases primárias de dois diferentes registos, expressão 3.38.

A partir do interferómetro *Shear* do tipo *Mach-Zehnder* e usando um LASER de duplo impulso, apresentado anteriormente, foram realizadas medições do gradiente dos deslocamentos dos primeiros modos naturais de vibração numa placa compósita, na condição de apoio próxima de livre-livre. A placa foi suspensa na vertical por elásticos de elevada flexibilidade e foi excitada às suas frequências

naturais por meio de um altifalante, montado na parte oposta à face de medição. O movimento harmónico da placa foi sincronizado com os dois disparos do LASER para registar os interferogramas na zona de máxima variação do gradiente de deslocamento. Para a resposta estacionária da placa foi registado para cada modo natural um par de interferogramas primários, dos quais se extraiu a fase primária. Pela correlação das duas fases primárias obteve-se o respectivo mapa de fase do gradiente de deslocamento na direcção predeterminada pelo desvio entre as frentes, *shear*. Apresentam-se na Fig. 3.23, os mapas de fase dos quatro primeiros modos naturais da placa para um gradiente na direcção horizontal  $\Delta x$ .

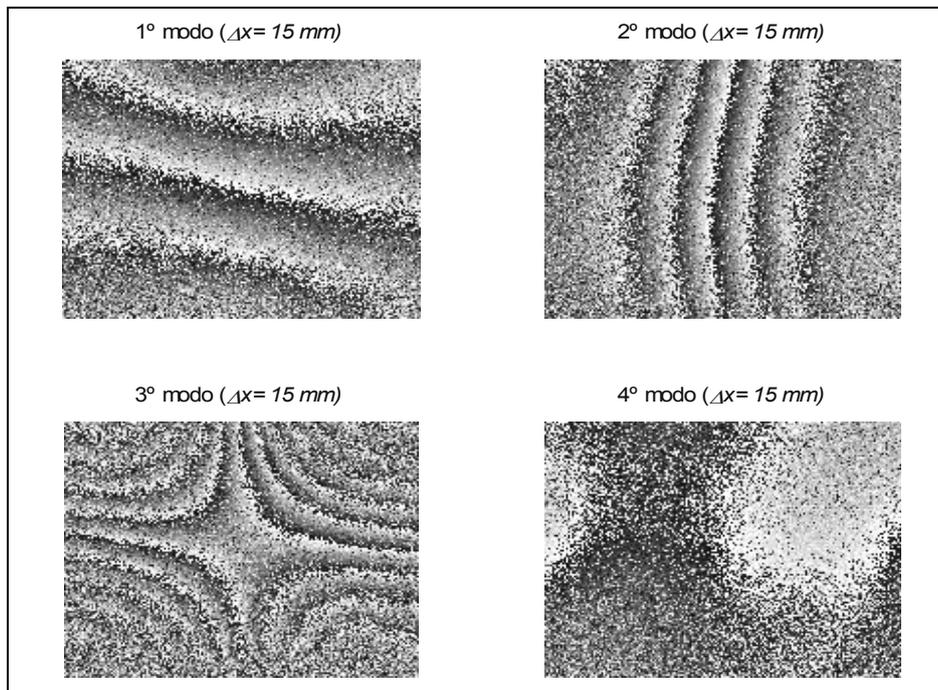


Fig. 3.23 – Mapas de fase da rotação na horizontal dos quatro primeiros modos naturais de uma placa compósita.

A partir dos mapas de fase, Fig. 3.23, e em particular no terceiro modo de vibração, observa-se uma redução no contraste das franjas de ordem mais elevada como resultado da descorrelação do *Speckle* por rotação da superfície. Com efeito, o ruído torna-se preponderante em relação à fase e tem de ser eliminado por técnicas específicas de filtragem, antes das franjas de fase serem processadas. Este e outros assuntos relativos ao pós-processamento dos mapas de fase serão tratados com o devido detalhe no capítulo 4 desta dissertação.

### 3.4.2.3 Variantes das técnicas *Shear* para medição da curvatura

Na flexão de vigas e placas finas as segundas e terceiras derivadas espaciais do campo de deslocamento são necessárias para determinar os esforços internos, momento-flector e esforço de corte [29]. Também, ao nível da inspeção não destrutiva, a curvatura ou segunda derivada espacial do campo de deslocamentos e a derivada espacial da curvatura ou terceira derivada se revelam mais sensíveis à presença do dano, conforme foi apresentado no capítulo 2. No que se refere aos sistemas para medição directa da curvatura podem ser classificados em interferómetros de abertura múltipla e em variantes das técnicas *Shear*. Os primeiros baseiam-se na visualização do objecto através de vidros, em forma de cunha, montados de modo estratégico em diferentes aberturas de um plano, colocado à frente do sistema de formação de imagem [30-34]. As principais limitações destas técnicas estão no desvio lateral fixo das frentes de onda, definido pelo ângulo de inclinação dos vidros, e na baixa eficiência do sistema óptico que obriga a utilizar LASERS mais potentes para medições em objectos de grande dimensão. Por seu lado, as variantes das técnicas *Shear* têm como base a configuração do interferómetro de *Shear* ao qual é acrescentado um outro sistema para criar três ou quatro frentes de onda independentes e, por interferência das diferentes frentes, medir directamente a segunda derivada

espacial do campo de deslocamentos. Estes métodos têm a vantagem de permitirem o fácil ajuste do desvio lateral das frentes de onda, através da rotação dos espelhos, a medição da curvatura em tempo real e a determinação quantitativa da fase por técnicas de modulação temporal de fase.

Apresentam-se de seguida os principais sistemas desenvolvidos a partir da configuração do interferómetro *Shear* para, através da interferência de três ou quatro frentes, medir directamente a curvatura do deslocamento fora-do-plano.

### 3.4.2.3.1 Duplo interferómetro *Shear*

No sistema proposto por *Murukeshan et al.* [35], são usados dois interferómetros *Shear* do tipo *Michelson* alinhados de forma a produzir quatro imagens desfasadas lateralmente no plano de observação. Na Fig. 3.24 está representada a configuração do duplo interferómetro proposto. Nesta, a inclinação dos espelhos 1 e 4 é ajustada para criar o desvio lateral das frentes de onda e a técnica de modulação temporal de fase é aplicada através da translação de um dos dois restantes espelhos, para a determinação dos mapas de fase.

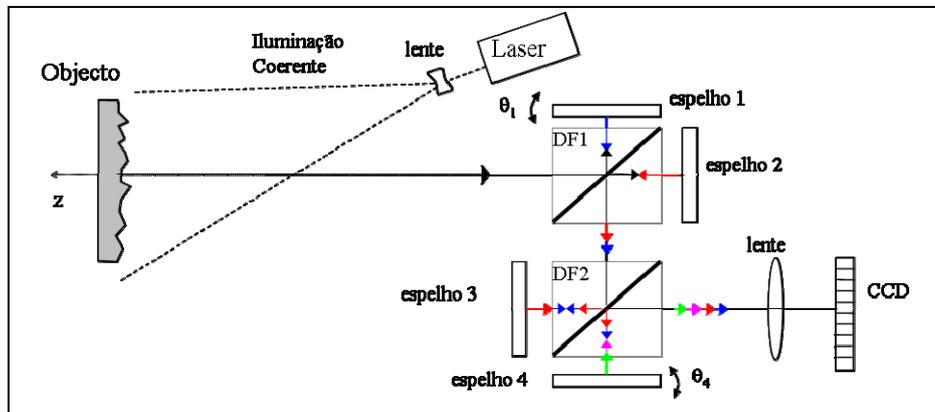


Fig. 3.24 – Diagrama da montagem experimental para medição da curvatura pela técnica do duplo interferómetro *Shear* do tipo *Michelson*.

A partir do duplo interferómetro *Shear*, Fig. 3.24, é realizada a medição da curvatura do deslocamento fora-do-plano pela interferência de três ou de quatro frentes de onda desviadas lateralmente no plano de imagem. A interferência de três frentes de onda é criada fazendo coincidir duas das quatro frentes, formando uma frente comum com o dobro da amplitude das restantes. Assim, as três frentes de onda desviadas lateralmente do valor de  $\Delta x$  na direcção do eixo  $x$  são descritas pelas funções:

$$\begin{aligned} E_1(x, y) &= 2A_0(x, y)e^{j\phi_1(x, y)} \\ E_2(x, y) &= A_0(x, y)e^{j\phi_2(x-\Delta x, y)} \\ E_3(x, y) &= A_0(x, y)e^{j\phi_3(x+\Delta x, y)} \end{aligned} \quad (3.54)$$

em que  $A_0$  designa a amplitude e  $\phi$  a fase. Para este caso, a intensidade no plano de observação produzida pela interferência das três frentes é determinada pela expressão:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |E_1(x, y) + E_2(x, y) + E_3(x, y)|^2 = \\ &= 2I_0(x, y) \left[ 3 + 2\cos(\psi_{21}(x, y)) + 2\cos(\psi_{31}(x, y)) + \cos(\psi_{32}(x, y)) \right] \end{aligned} \quad (3.55)$$

sendo a fase  $\psi_{ij} = \phi_i - \phi_j$  e a intensidade da frente de onda  $I_0 = |A_0|^2$ .

De acordo com a expressão 3.55, a intensidade da interferência do *Speckle* das três frentes de onda produzida para um estado inicial da estrutura  $A$ , condição de referência, e um estado final  $B$ , deformação do objecto com variação da fase  $\Delta\phi(x, y)$ , vêm definidas por:

$$\begin{aligned} I_A(x, y) &= 4I_0(x, y) \left[ 3/2 + \cos(\psi_{21}(x, y)) + \cos(\psi_{31}(x, y)) + 1/2 \cos(\psi_{32}(x, y)) \right] \\ I_B(x, y) &= 4I_0(x, y) \left[ 3/2 + \cos(\psi_{21}(x, y) + \Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x - \Delta x, y)) + \right. \\ &\quad \left. \cos(\psi_{31}(x, y) + \Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x + \Delta x, y)) + 1/2 \cos(\psi_{32}(x, y) + \Delta\phi(x + \Delta x, y) - \Delta\phi(x - \Delta x, y)) \right] \end{aligned} \quad (3.56)$$

Admitindo que entre os dois estados só a fase pode ser alterada mas a amplitude permanece constante ao longo da superfície, a diferença pontual entre as intensidades conduz à seguinte solução:

$$\begin{aligned} (I_A - I_B)(x, y) &= \\ 8I_0(x, y) &\left[ \operatorname{sen}\left(\psi_{21}(x, y) + \frac{\Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x - \Delta x, y)}{2}\right) \operatorname{sen}\frac{\Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x - \Delta x, y)}{2} + \right. \\ \operatorname{sen}\left(\psi_{31}(x, y) + \frac{\Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x + \Delta x, y)}{2}\right) &\operatorname{sen}\frac{\Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x + \Delta x, y)}{2} + \\ \operatorname{sen}\left(\frac{\psi_{21}(x, y)}{2} + \frac{\Delta\phi(x + \Delta x, y) - \Delta\phi(x - \Delta x, y)}{4}\right) &\operatorname{sen}\frac{\Delta\phi(x + \Delta x, y) - \Delta\phi(x - \Delta x, y)}{4} \left. \right] \end{aligned} \quad (3.57)$$

onde, o primeiro termo desta expressão representa a intensidade de fundo e o primeiro seno de cada parcela o ruído estocástico do *Speckle* modelado pelo seno que resulta da deformação. De novo, os argumentos destes senos estão relacionados com campo de deslocamento fora-do-plano  $w(x, y)$  e são para este caso definidos pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x - \Delta x, y)}{2} + \frac{\Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x + \Delta x, y)}{2} + \frac{\Delta\phi(x + \Delta x, y) - \Delta\phi(x - \Delta x, y)}{4} \\ \approx \frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{\partial w(x, y)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial^2 w(x, y)}{2\partial x^2} \Delta x^2 \right) \end{aligned} \quad (3.58)$$

Na expressão 3.58, as duas parcelas correspondem, respectivamente, à primeira e segunda derivadas espaciais dos deslocamentos na direcção do eixo  $x$ . Observa-se que a sensibilidade do método é superior para a primeira derivada e isto traduz-se num maior número franjas em relação à segunda derivada espacial, tornando difícil a visualização das franjas de curvatura. A mesma conclusão é retirada da interferência de quatro frentes de onda desviadas lateralmente de  $\Delta x$ , seguindo um procedimento análogo ao anterior. Esta fraca qualidade na visualização das franjas da curvatura levou ao desenvolvimento de ferramentas numéricas do tipo filtro passa-baixo, como meio de eliminar as franjas da primeira derivada e, assim, aumentar o contraste das franjas de curvatura. Contudo, apesar de algumas melhorias na visibilidade das franjas, os resultados apresentados revelam-se pouco satisfatórios [35].

Um sistema equivalente ao interferómetro de duplo *Shear*, Fig. 3.24, foi implementado sobre uma mesa anti-vibrátil para medir a curvatura de uma placa encastrada em todos os bordos e submetida a uma carga transversal uniforme. A partir da visualização em tempo real de uma escala colocada junto à placa, a inclinação dos dois espelhos foi ajustado para criar as três e quatro imagens desviadas lateralmente na direcção horizontal da placa, correspondendo a igual número de frentes de onda na interferência, Fig. 3.25.

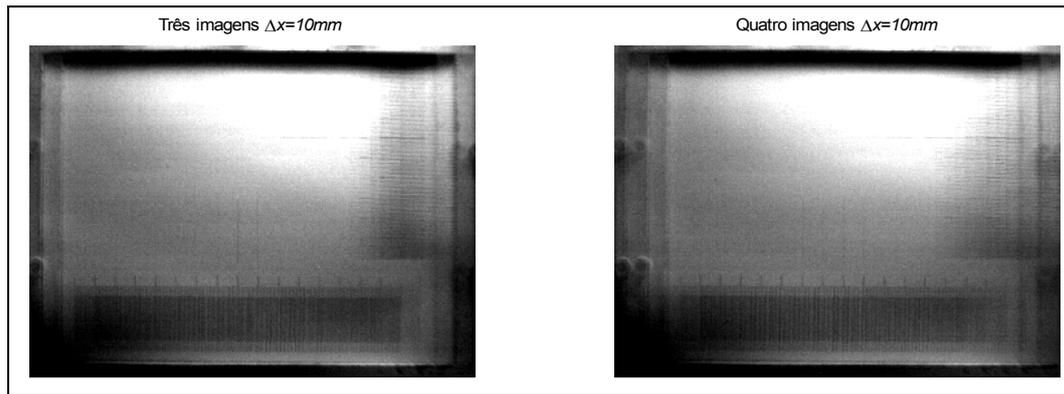


Fig. 3.25 – Ajuste do desvio lateral das frentes de onda.

A intensidade da interferência das três ou quatro frentes de onda foi registrado por uma câmara de vídeo com elevada resolução, JAI<sup>®</sup> modelo CV-M2. Os respectivos mapas de fase foram calculados através da técnica de modulação temporal de fase para quatro registros com salto de fase  $\pi/2$ , criado por translação do espelho 1, Fig. 3.24.

Na Fig. 3.26 estão representados os respectivos mapas de fase relativos à deformação da placa e obtidos pelos métodos da interferência de três e quatro frentes de onda, respectivamente. Como esperado, nestes mapas predominam as franjas associadas à primeira derivada espacial do deslocamento fora-do-plano, comparar com a Fig. 3.19. Contudo, uma observação mais atenta revela que ocorre um batimento na fase, produzido pela sobreposição de dois mapas de franjas de fase que se encontram desfasados no espaço, sendo este fenómeno mais evidente na interferência das quatro frentes de onda. Quanto ao contraste das franjas de fase, verifica-se uma diminuição na visibilidade para a interferência de quatro frentes de onda em resultado de um aumento da sensibilidade na des correlação por rotação do *Speckle*.

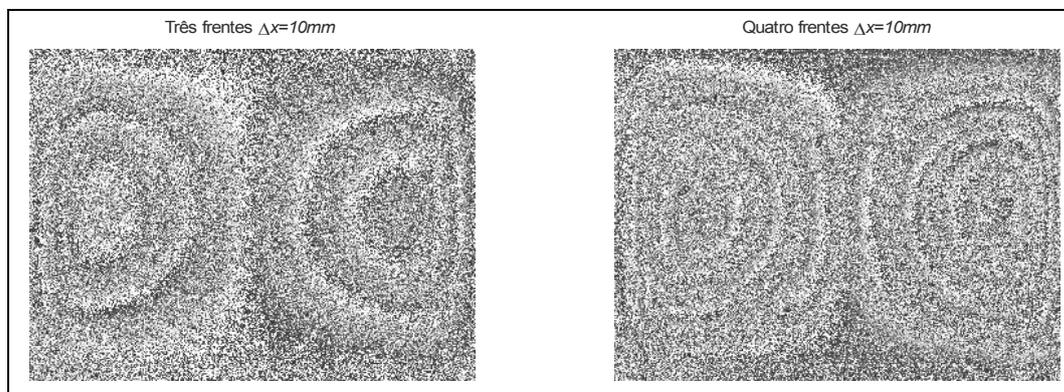


Fig. 3.26 – Mapas de fase com desvio lateral das frentes de onda.

#### 3.4.2.3.2 Técnica *Shear* com salto de fase polarizado

Uma versão diferente e modificada da configuração anterior foi proposta para medir a curvatura a partir da técnica de salto de fase [36]. Uma fibra de elevada birefringência em conjunto com a técnica *Shear* são usadas para criar quatro frentes de onda desviadas lateralmente no plano de imagem e, por correlação das diferentes frentes, obter as franjas correspondentes à curvatura. A fibra óptica (Newport<sup>®</sup> FSPV) apresenta para cada modo de polarização dois eixos de propagação bem definidos. Uma placa polarizadora de meia onda é colocada à entrada do feixe laser na fibra óptica para garantir que igual intensidade se propaga pelos eixos rápido e lento do modo. As duas frentes de luz polarizada, usadas na iluminação do objecto, são reflectidas e observadas através de um sistema de formação de imagem seguido por um prisma de *Wollaston* e um polarizador. O prisma serve para transformar as duas frentes ortogonalmente polarizadas em quatro ondas desfasadas lateralmente e o polarizador, alinhado a  $45^\circ$  do eixo principal do prisma, permite criar interferência das diferentes frentes de onda

geradas. Deste modo, as franjas de interferência são produzidas na área da sobreposição das imagens de *Speckle* no plano do CCD. A relação entre as franjas produzidas pela interferência das quatro frentes e o deslocamento fora-do-plano pode ser determinada tomando a expressão 3.58, onde o primeiro e segundo termos representam a primeira e segunda derivadas espaciais do deslocamento, respectivamente. Sendo que a primeira corresponde ao movimento de rotação e a segunda à variação da curvatura da superfície. O diagrama da configuração experimental desenvolvida com base na fibra birefringente em conjunto com o elemento de *Shear*, prisma de *Wollaston*, está representado Fig. 3.27. O desfasamento lateral entre as frentes de onda é controlado pelo ajuste da distância do prisma de *Wollaston* ao CCD. A fibra está enrolada num cilindro de material piezoeléctrico para introduzir a técnica de modelação temporal de fase. O salto de fase é, neste caso, criado através do aumento do comprimento da fibra por expansão do cilindro, o qual é ajustado através nível da tensão aplicado ao material piezoeléctrico.

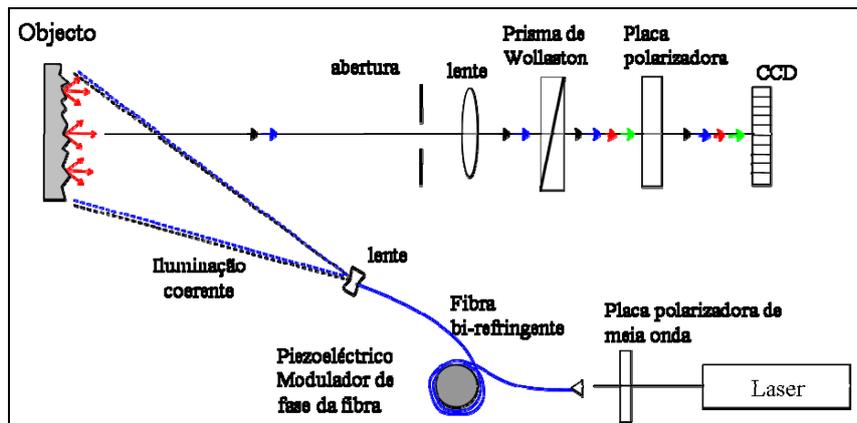


Fig. 3.27 – Diagrama da montagem experimental para medição da curvatura pela técnica *Shear* com utilização de uma fibra bi-refringente.

A partir da configuração da montagem experimental, Fig. 3.27, foram obtidos os mapas de fase de um diafragma circular com 40mm de diâmetro encastrado na periferia e submetido a um deslocamento central de  $10\mu\text{m}$ . Nos mapas apresentados, Fig. 3.28, é difícil identificar as franjas correspondentes à curvatura, porém, as franjas da rotação que surgem bem identificadas e em elevado número.

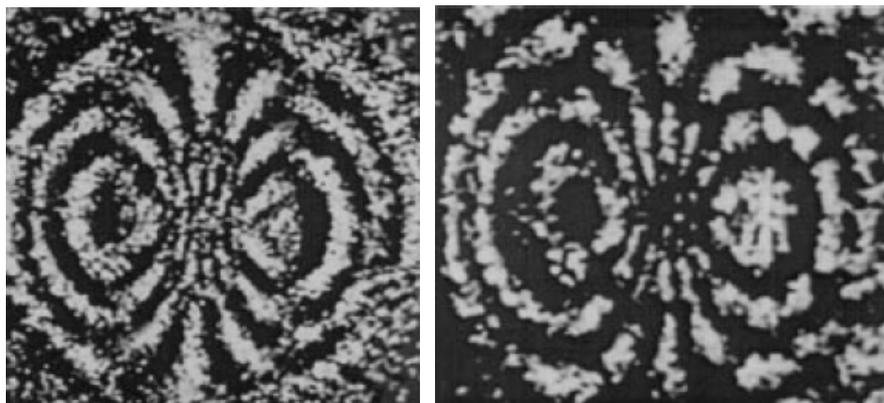


Fig. 3.28 – Mapas de fase de um diafragma circular com deslocamento no centro para um desfasamento horizontal das 4 frentes de onda separadas por 7 mm e 15 mm, respectivamente [36].

O baixo contraste observado nas franjas de curvatura poderá ser explicado pela presença de um elevado número de franjas de rotação, expressão 3.58, restringindo a observação das primeiras a um número contável de franjas de Moiré.

### 3.4.2.3.3 Técnica Shear com translação do objecto

O método para a determinação directa da curvatura, desenvolvido a partir do interferómetro *Shear* do tipo *Michelson* com salto temporal de fase e incorporando a translação do objecto entre registos, foi apresentado por Chau et Zhou [37]. A técnica temporal de salto de fase é usada para refinar a resolução e melhorar o contraste das franjas de fase da curvatura. Um total de oito registos são realizados, quatro antes e quatro após a translação lateral da superfície, com saltos constantes da fase de  $\pi/2$ . Na primeira parte, os dois primeiros registos são efectuados com a superfície na posição de referência. Entre o segundo e terceiro é aplicado o carregamento exterior e após o quarto registo é realizada a translação lateral do objecto. Este procedimento deve ser preciso de modo a não introduzir na superfície movimentos fora-do-plano. Na segunda parte, os registos cinco e seis são obtidos com a carga ainda aplicada. Só após a remoção da solicitação exterior são realizados os dois registos finais. Na Fig. 3.29 está representado o modelo da montagem experimental usada na medição directa da curvatura.

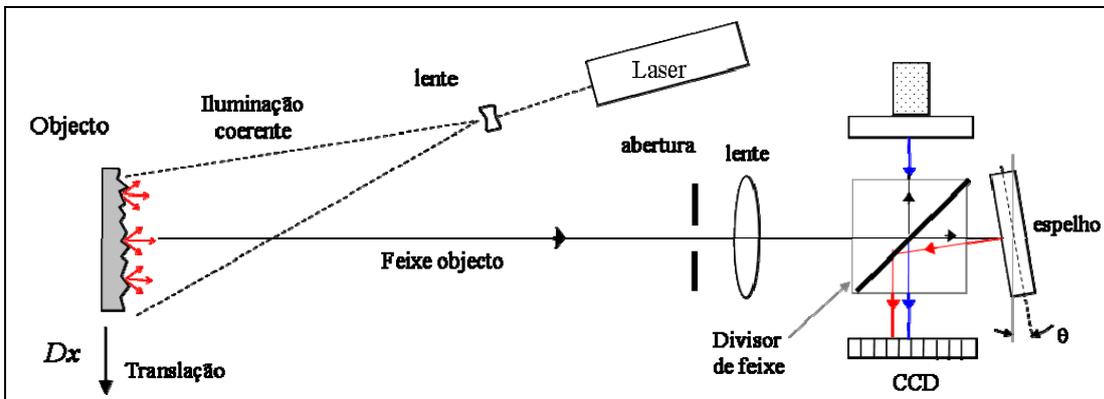


Fig. 3.29 – Diagrama da montagem experimental para medição da curvatura pela técnica *Shear* do tipo *Michelson* com translação da superfície.

A partir dos oito registos digitais e para a translação do objecto no eixo  $x$ ,  $Dx$ , com desvio lateral das frentes de onda no mesmo eixo,  $\Delta x$ , extraem-se o mapa de fase da segunda derivada e o mapa de fase da primeira e segunda derivadas do deslocamento fora-do-plano  $w(x, y)$ , respectivamente [37]:

$$\frac{4\pi\Delta x Dx}{\lambda} \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2} = -\frac{1}{4} \left[ \operatorname{arctg} \frac{2 \sum_{ij} (I_4 - I_1)(I_3 - I_2)}{\sum_{ij} [(I_4 - I_1)^2 - (I_3 - I_2)^2]} + \operatorname{arctg} \frac{2 \sum_{ij} (I_8 - I_5)(I_7 - I_6)}{\sum_{ij} [(I_8 - I_5)^2 - (I_7 - I_6)^2]} \right] \quad (3.59)$$

$$\frac{4\pi\Delta x}{\lambda} \left[ \frac{\partial w(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial^2 w(x, y)}{2\partial x^2} Dx \right] = \frac{1}{4} \operatorname{arctg} \frac{2 \sum_{ij} (I_4 - I_1)(I_3 - I_2)}{\sum_{ij} (I_4 - I_1)^2 - (I_3 - I_2)^2} - \frac{1}{4} \operatorname{arctg} \frac{2 \sum_{ij} (I_8 - I_5)(I_7 - I_6)}{\sum_{ij} (I_8 - I_5)^2 - (I_7 - I_6)^2} \quad (3.60)$$

onde  $i, j$  são as coordenadas dos píxeis da janela de cálculo.

Uma placa circular de alumínio com 100 mm de diâmetro, encastrada na periferia e carregada no centro foi usada na demonstração do método [37]. Para um desvio lateral das frentes de onda no eixo  $x$  e  $y$ ,  $\Delta x = 6\text{mm}$  e  $\Delta y = 6\text{mm}$ , e translação lateral da placa  $Dx = 3\text{mm}$  foram obtidos os respectivos

mapas de fase. Na Fig. 3.30 estão representados os mapas de fase da segunda derivada em  $x$ , a derivada cruzada e, respectivamente, a combinação da primeira com a segunda derivada espacial, utilizando uma janela de cálculo 9x9 píxeis.

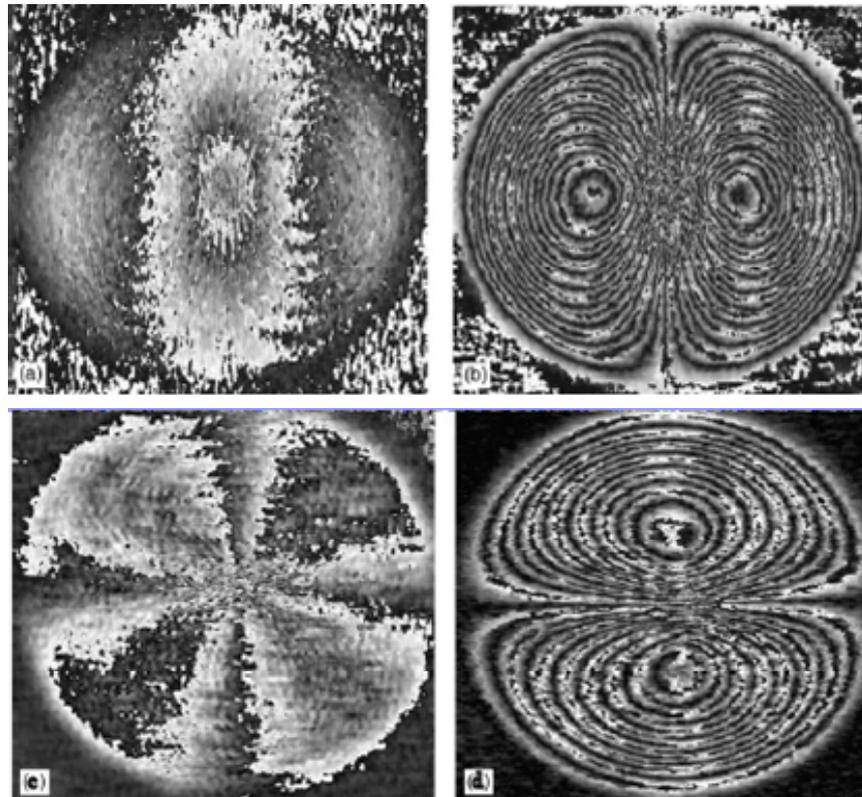


Fig. 3.30 – Mapas de fase de uma placa circular encastrada na periferia e carregada no centro: (a) segunda derivada espacial  $\partial^2 w / \partial x^2$ ; (b) a sobreposição da primeira derivada com a segunda derivada espacial  $\partial w / \partial x + D_x \partial^2 w / 2 \partial x^2$ ; (c) derivada cruzada  $\partial^2 w / \partial x \partial y$ ; (d) a sobreposição da primeira derivada com a derivada cruzada  $\partial w / \partial y + D_x \partial w / 2 \partial x \partial y$  [37].

Para os mapas de fase apresentados [37], observa-se uma razoável concordância entre os resultados obtidos por via experimental e os previstos pelo modelo teórico. Refira-se que o cálculo dos mapas de fase é realizado tomando a média dos valores de uma matriz de píxeis, expressões 3.59 e 3.60, obtendo-se, por essa razão, um baixo contraste das franjas em regiões de fortes gradientes. Deve notar-se que a translação lateral do objecto aumenta a sensibilidade do método à decorrelação do *Speckle*, limitando, deste modo, a gama de medição do método a pequenas deformações da superfície e a objectos de reduzida dimensão. Ainda, a translação precisa da superfície com o carregamento exige a utilização de mecanismos de alguma complexidade e o recurso a métodos laboriosos, tornando o processo de medição pouco funcional e moroso.

#### 3.4.2.3.4 Técnica Shear com múltiplos registos

Os métodos de medição da curvatura mencionados anteriormente caracterizam-se, em geral, por apresentarem um elevado grau de complexidade. Nestes casos, a medição directa da curvatura envolve a interferência de três ou quatro frentes de onda. Porém, as franjas da curvatura ou segunda derivada espacial dos deslocamentos não surgem, como desejado, de forma isolada, mas sobrepostas às da primeira derivada espacial dos deslocamentos fora-do-plano. Devido à diferença na densidade de franjas da primeira para a segunda derivada e à maior sensibilidade à decorrelação do *Speckle*, causado pela interferência de várias frentes, verifica-se que as franjas das derivadas de segunda ordem são de difícil visualização. A separação das duas derivadas por recurso a métodos numéricos, do tipo filtro passa-baixo, constitui uma forma eficiente de aumentar o contraste das franjas da curvatura. Todavia, os resultados experimentais evidenciam que essa melhoria é pouco significativa.

Como forma de chegar directamente aos esforços internos momento-flector e esforço de corte são apresentados, em seguida, dois métodos desenvolvidos a partir da técnica *Shear* para a determinação directa das derivadas espaciais, até à terceira ordem, do campo de deslocamento fora-do-plano. A medição pela técnica *Shear*, interferência de duas frentes de onda, permite, ao contrário dos métodos anteriores, reduzir a sensibilidade à des correlação do *Speckle* e obter isoladamente os mapas de fase da segunda e terceira derivadas espaciais. Estas derivadas são calculadas pelo método das diferenças finitas e têm por base diferentes registos do mapa de fase, primeira derivada dos deslocamentos, criados por translação lateral do registo ou por alteração do desvio lateral entre as frentes de onda.

3.4.2.3.4.1 Múltiplos registos com translação lateral

Neste método, a segunda e terceira derivadas são obtidas, respectivamente, pela combinação de dois e três registos da primeira derivada espacial desfasados lateralmente. Para o efeito, no interferómetro *Shear* do tipo *Michelson* foram acrescentados dois espelhos para criar o desfasamento lateral. Na Fig. 3.31 está representado o diagrama do sistema implementado, sendo o desfasamento lateral produzido pela rotação dos espelhos 3 e 4. A técnica de modulação temporal é usada na determinação do mapa de fase e é concretizada pela translação do espelho 2.

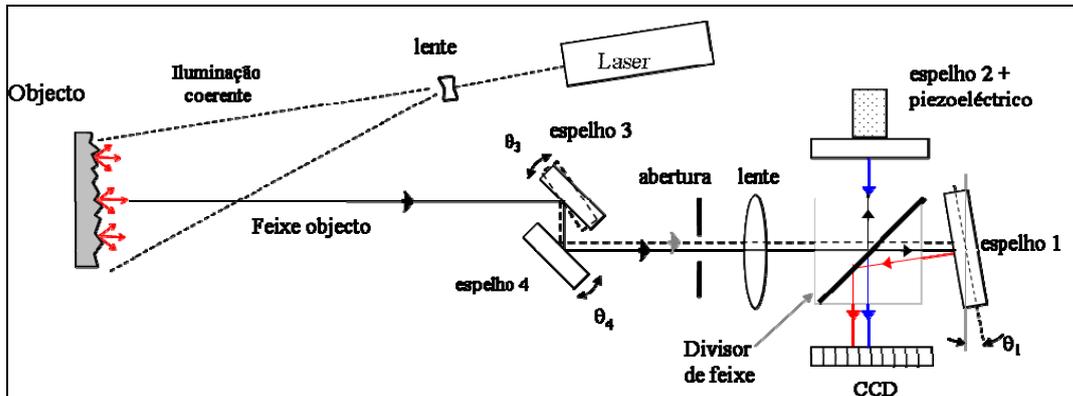


Fig. 3.31 – Diagrama da montagem experimental para medição das derivadas até à terceira ordem pela técnica *Shear* do tipo *Michelson* com translação lateral do mapa de fase.

A rotação do espelho 1 permite ajustar o desvio lateral  $\Delta x$  entre as duas frentes de onda, criadas no divisor de feixe. Quanto aos ângulos  $\theta_3$  e  $\theta_4$ , servem para controlar a posição lateral do padrão de *Speckle* proveniente do objecto no plano de imagem, gerando o deslocamento lateral  $Dx$  das duas frentes de onda. Por definição do método das diferenças finitas, a segunda e terceira derivadas espaciais podem ser aproximadas pela combinação de dois e três registos da primeira derivada deslocados no espaço, respectivamente. O procedimento de medição da segunda e terceira derivadas divide-se em duas fases. Na primeira, antes da solicitação, são realizados três grupos de registos de quatro gravações deslocados na direcção da derivada espacial, com salto de fase constante entre gravação de  $\pi/2$ . Na segunda fase, após aplicada a solicitação exterior, é repetido o procedimento da primeira fase. A correlação entre pares de registos permite construir três mapas de fase da primeira derivada deslocados no espaço. Como resultado da combinação dos mapas de fase transladados no eixo  $x$ , obtém-se para este eixo e de forma aproximada a segunda derivada espacial  $\partial^2 w(x, y) / \partial x^2$  e a terceira derivada  $\partial^3 w(x, y) / \partial x^3$ , respectivamente:

$$\frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2} \approx \frac{\partial w_{+Dx}(x, y) / \partial x - \partial w_0(x, y) / \partial x}{Dx} \tag{3.61}$$

$$\frac{\partial^3 w(x, y)}{\partial x^3} \approx \frac{-\partial w_{+2Dx}(x, y) / \partial x + 2\partial w_{+Dx}(x, y) / \partial x - \partial w_0(x, y) / \partial x}{Dx^2} \tag{3.62}$$

com;

$$\frac{\partial w(x, y)_f}{\partial x} \approx \frac{\lambda}{4\pi\Delta x} \Delta\phi_f(x, y) \quad \text{com} \quad f = 0, +Dx \text{ e } +2Dx \quad (3.63)$$

onde  $\Delta\phi_f(x, y)$ , representa mapa de fase nas sucessivas posições  $f$ , transladadas da quantidade  $Dx$ .

O interferómetro representado na Fig. 3.31 foi construído sobre uma mesa anti-vibrátil para medição dos mapas de fase correspondente à primeira, segunda e terceira derivadas espaciais de uma placa rectangular em aço encastrada e sujeita a uma carga uniforme na direcção transversal. Os ângulos de rotação dos espelhos 1, 3 e 4 foram ajustados, a partir da observação uma escala colocada junto à placa, de forma a produzir um desvio entre as frentes de  $\Delta x = 20\text{mm}$  e uma translação entre conjunto de quatro registos de *Speckle* de  $Dx = 10\text{mm}$ . A técnica de modulação temporal de fase foi aplicada ao conjunto de quatro registos a partir da translação do espelho 2, com salto constante de fase  $\pi/2$ . Um LASER, com o comprimento de onda de  $\lambda = 532\text{nm}$ , e uma câmara de vídeo com a resolução de 2 milhões de píxeis foram usados na medição. Os mapas de fase correspondentes à primeira, segunda e terceira derivadas espaciais, obtidos por via experimental e por via teórica [38], estão representados na Fig. 3.32. Para uma comparação directa dos mapas e de forma a melhorar o contraste das franjas, os mapas experimentais foram filtrados através da aplicação de técnicas de processamento de imagem. Estas técnicas serão tratadas com o devido detalhe no capítulo 4.

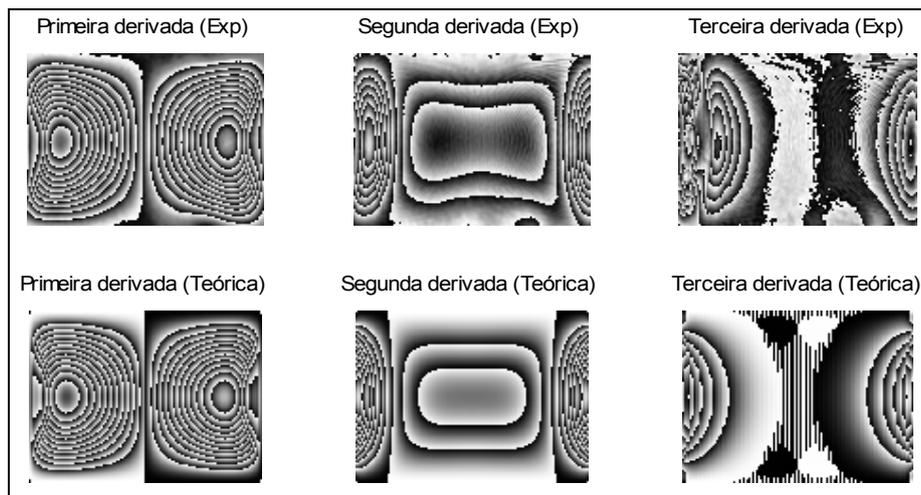


Fig. 3.32 – Mapas de fase da primeira, segunda e terceira derivadas espaciais de uma placa rectangular encastrada e submetida a uma pressão transversal uniforme, obtidos pelo método de múltiplos registos com translação lateral.

Pela análise comparativa entre os pares dos mapas, Fig. 3.32, verifica-se existir globalmente uma boa concordância. As diferenças observadas na fronteira lateral da placa devem-se à inexistência de informação para além do bordo, a qual é necessária para o cálculo das derivadas espaciais pelo método apresentado e usando a técnica *Shear*. O efeito é mais pronunciado nas derivadas de ordem mais alta, terceira derivada, em resultado da propagação do desvio.

#### 3.4.2.3.4.2 Múltiplos registos com alteração do desvio entre as frentes de onda

Em alternativa ao método anterior é agora proposto o método de múltiplos registos com alteração do desvio lateral das duas frentes de onda. Neste caso, a determinação dos mapas de fases, correspondentes à segunda e terceira derivadas espaciais, realiza-se com a obtenção de quatro diferentes mapas de fase, criados por alteração do desvio lateral entre as duas frentes. O interferómetro *Shear* do tipo de *Michelson* e a técnica de modulação temporal de fase são usados na medição. Para cada mapa de fase são realizados quatro gravações antes e após a aplicação da solicitação exterior,

com salto de fase entre hologramas de  $\pi/2$ . O desvio lateral das frentes de onda é criado pela inclinação do espelho 1, Fig. 3.31, e é controlado de forma precisa por dois parafusos micrométricos.

De acordo com o método das diferenças finitas centrais, a segunda e terceira derivadas na direcção do eixo  $x$  são de modo aproximado expressas em função da primeira derivada espacial:

$$\frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2} \approx \frac{\partial w_{+2\Delta x}(x, y)/\partial x + \partial w_{-2\Delta x}(x, y)/\partial x}{2\Delta x} \quad (3.64)$$

$$\frac{\partial^3 w(x, y)}{\partial x^3} \approx \frac{2 \left[ \partial w_{+2\Delta x}(x, y)/\partial x + \partial w_{-\Delta x}(x, y)/\partial x \right] - \left[ \partial w_{+\Delta x}(x, y)/\partial x + \partial w_{-2\Delta x}(x, y)/\partial x \right]}{3\Delta x} \quad (3.65)$$

onde a primeira derivada no eixo  $x$  é definida por;

$$\frac{\partial w(x, y)_f}{\partial x} \approx \frac{\lambda}{4\pi f} \Delta\phi_f(x, y) \quad \text{com} \quad f = -2\Delta x, -\Delta x, +\Delta x \text{ e } +2\Delta x \quad (3.66)$$

sendo que  $\Delta\phi_f(x, y)$  representa o mapa de fase e  $f$  o valor do desvio para o eixo  $x$  entre as frentes de onda no plano de formação de imagem, em múltiplos de  $\Delta x$ .

A validação do método foi realizada retomando o estudo da placa encastrada com pressão uniforme na direcção transversal e seguindo um procedimento de medição equivalente ao apresentado para o método anterior. Na Fig. 3.33 mostram-se os mapas de fase, após filtragem, da primeira, segunda e terceiras derivadas espaciais obtidas por via experimental e calculada a partir da solução analítica [38].

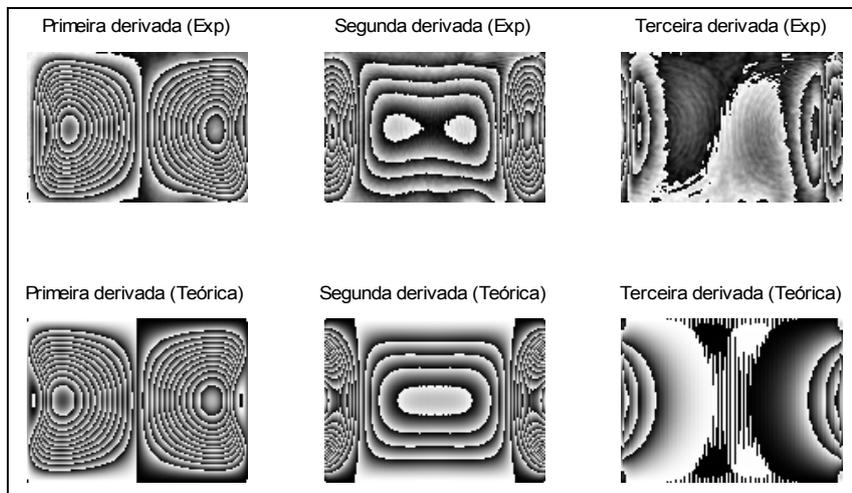


Fig. 3.33 – Mapas de fase da primeira, segunda e terceira derivadas espaciais de uma placa rectangular encastrada e submetida a uma pressão transversal uniforme, obtidos pelo método de múltiplos registos com alteração do desvio entre as frentes de onda e a partir da solução analítica.

A observação da Fig. 3.33 revela que, à excepção dos bordos laterais da placa, existe uma boa concordância entre os pares de derivadas representadas. À semelhança do método anterior, os desvios observados na fronteira da placa são mais acentuados na terceira derivada, verificando-se um aumento da região afectada.

Na Fig. 3.34 estão representados os perfis da primeira, segunda e terceira derivadas ao longo da mediatriz horizontal da placa, para valores crescentes do desvio lateral entre as frentes de onda.

Tomando como referência o perfil da solução analítica, observa-se nos perfis obtidos por via experimental, Fig. 3.34, o aumento do amaciamento para valores crescentes do desvio, mais evidentes na segunda e terceira derivadas. Por outro lado, assiste-se à propagação da região afectada pelo chamado efeito de bordo. Este manifesta-se pelo aparecimento de perturbações junto ao bordo da placa, sendo esta região ampliada pela ordem da derivada e pelo aumento do desvio lateral entre as

frentes de onda.

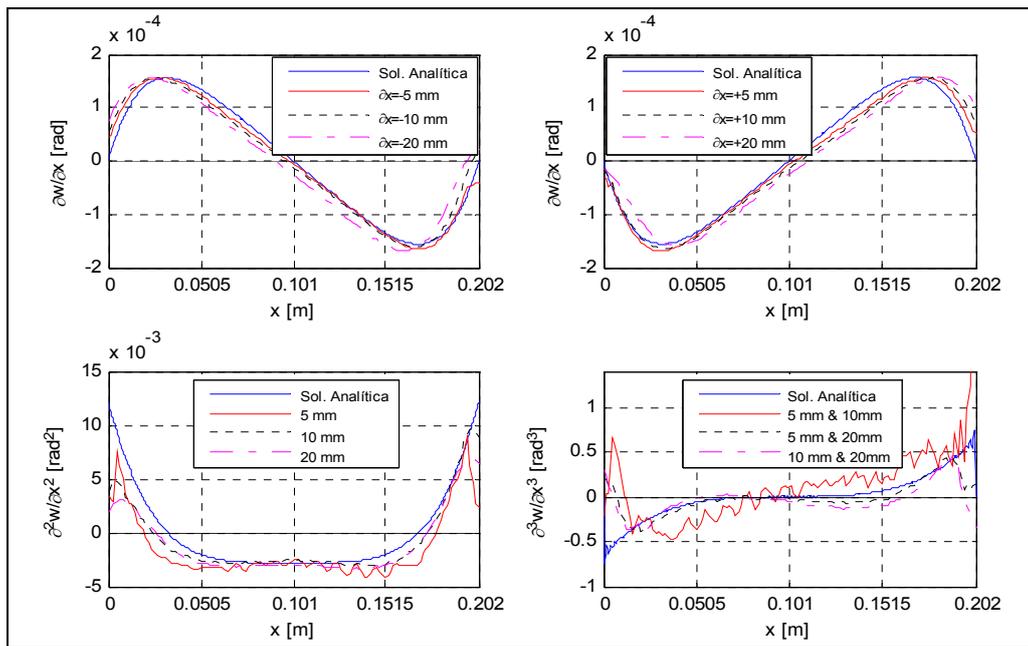


Fig. 3.34 – Perfis da primeira, segunda e terceira derivadas espaciais ao longo da mediatriz horizontal da placa rectangular encastrada e solicitada por uma pressão transversal uniforme, dependência dos valores de *Shear*.

Após estabelecida a metodologia para a medição das derivadas espaciais, procedeu-se à determinação do campo de deslocamentos e esforços internos na placa. A placa de Aço com  $202 \times 152 \times 1 \text{ mm}^3$  está encastrada em todos os bordos e submetida a uma pressão transversal uniforme de  $180 \text{ N/m}^2$ , Fig. 3.35. O ensaio é realizado sobre uma mesa anti-vibrátil e os múltiplos registos da primeira derivada espacial com alteração do desvio entre as frentes de onda são obtidos com interferómetro *Shear* do tipo *Michelson* (anexo C).

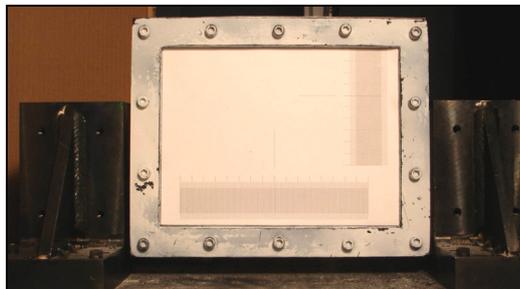


Fig. 3.35 – Ensaio da placa encastrada, submetida a uma pressão transversal uniforme de  $180 \text{ N/m}^2$ .

Segundo a teoria Kirchhoff para flexão de placas finas [29], os esforços momento-flector e os esforços de corte podem ser obtidos recorrendo às derivadas, até à terceira ordem, do campo de deslocamentos. De acordo com a metodologia proposta, este processo envolve o registo de 11 mapas de fase com diferentes desvios laterais, seguindo a distribuição apresentada na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Distribuição do desvio lateral entre frentes de onda para determinação dos esforços na placa**

Esforços	Momento-flector		Momento torsor $M_{xy}$	Esforço de corte	
	$M_{xx}$	$M_{yy}$		$Q_{xx}$	$Q_{yy}$
Desvio lateral ( $\Delta x; \Delta y$ ) mm	(-10;0); (10;0); (0;-10); (0;10)	(-10;0); (10;0); (0;-10); (0;10)	(0;10); (10;10)	(0;-20); (0;-10); (0;10); (0;20); (0;10); (10;10); (10;-10);	(-20;0); (-10;0); (10;0); (20;0); (10;0); (10;10); (-10;10)

Os respectivos campos contínuos são obtidos por aplicação da técnica de *unwrapping* aos mapas medidos (capítulo 4). Por seu lado, o campo de deslocamentos pode ser obtido por integração numérica da primeira derivada espacial, respeitando as condições de fronteira. Os campos de deslocamentos e esforços internos na placa, obtidos por via da metodologia proposta e a partir da solução analítica [38], estão representados na Fig. 3.36. Nestes foram deliberadamente omitidas as regiões afectadas pelo efeito de bordo de modo a facilitar a comparação entre os pares de campos.

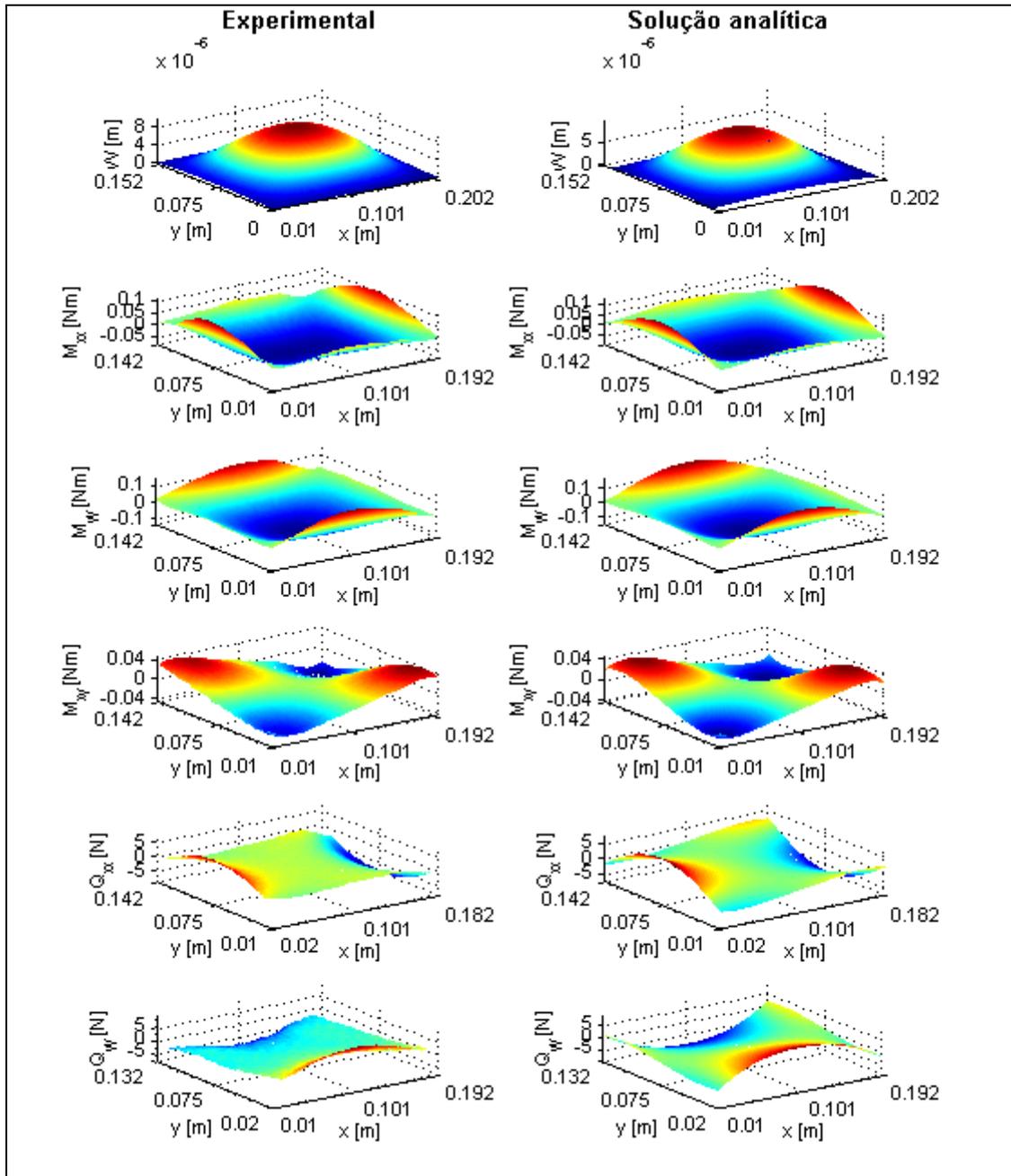


Fig. 3.36 – Representação dos campos de deslocamentos e esforços internos numa placa obtidos por via experimental e a partir da solução analítica.

Analisando os campos representados, Fig. 3.36, verifica-se existir uma muito boa concordância entre os obtidos por via experimental, através da metodologia proposta, e os calculados com base na formulação analítica. Em resultado da aproximação considerada para o cálculo das sucessivas derivadas por via experimental observam-se pequenos desvios nos campos do esforço de corte. O efeito de bordo manifesta-se pelo aparecimento de perturbações no campo de medida. No entanto, este pode ser eliminado pela combinação dos métodos das diferenças finitas à frente e atrás. A título de

exemplo apresenta-se a seguir a determinação do momento-flector na placa. O processo envolve a realização de 8 registos obtidos com os desvios laterais entre as frentes de onda que são apresentados na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Distribuição do desvio lateral entre frentes de onda para a determinação do momento-flector até à fronteira da placa**

Esforços	Momento-flector	
	$M_{xx}$	$M_{yy}$
Desvio lateral ( $\Delta x; \Delta y$ ) mm	(-20;0); (-10;0); (10;0); (20;0); (0;-20); (0;-10); (0;10); (0;20)	(-20;0); (-10;0); (10;0); (20;0); (0;-20); (0;-10); (0;10); (0;20)

Para todo o domínio da placa estão agora representados na Fig. 3.37, os momentos-flectores obtidos por via experimental, recorrendo aos métodos das diferenças finitas à frente e atrás, e a partir da solução analítica.

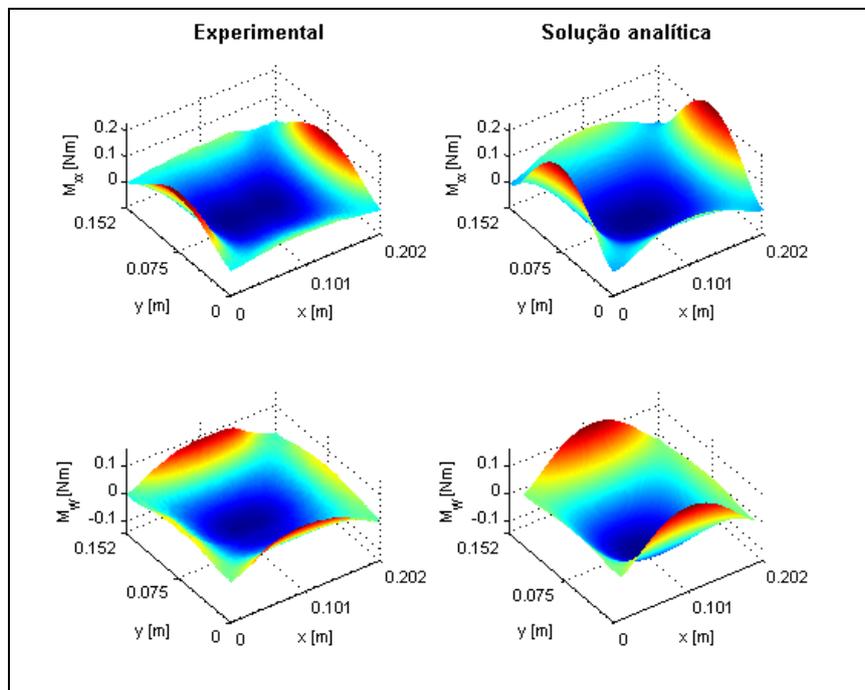


Fig. 3.37 – Representação dos momentos-flectores calculados por via da metodologia experimental e a partir da solução analítica.

Comparando os mapas dos momentos-flectores obtidos por via da metodologia experimental e através da solução analítica, constata-se que, globalmente, possuem o mesmo comportamento. No entanto, nas regiões de forte gradiente junto ao bordo da placa, verifica-se que os campos obtidos por via experimental apresentam valores inferiores. Este efeito é resultado do amaciamento produzido pela aplicação do método das diferenças finitas com um passo de 10 mm.

### 3.5 Discussão e conclusões

Em resumo, as diversas técnicas de interferometria *Speckle* apresentadas permitem a medição global e sem contacto do campo de deslocamentos fora-do-plano e das suas derivadas espaciais até à terceira ordem. A decorrelação parcial ou total do *Speckle* está na origem da perda de contraste nas franjas e afecta a gama de medição das técnicas. A sensibilidade à decorrelação é maior nas técnicas baseadas na interferência de frentes de onda provenientes do objecto e aumenta com o número de

frentes de onda utilizado. Na flexão de vigas e placas finas os esforços internos, momento-flector e esforço de corte, que envolvem as derivadas espaciais até à terceira ordem, são parâmetros mais sensíveis à identificação do dano estrutural. Os campos de deslocamentos e dos esforços internos podem ser determinados por via experimental a partir dos dois métodos propostos, recorrendo ao interferómetro de *Shear* do tipo *Michelson*. Ambos os métodos permitem a determinação isolada das derivadas espaciais e dos esforços internos. O chamado efeito de bordo afecta as regiões próximas da fronteira, restringindo a área válida de medição. O seu efeito cresce com o desvio lateral entre as frentes e com a ordem da derivada espacial. A extensão até ao bordo do campo de medição é realizada por recurso aos métodos das diferenças finitas à frente e atrás. Porém, o cálculo aproximado das derivadas espaciais por este método pode conduzir ao amaciamento do campo, principalmente, nas regiões de forte gradiente, o qual aumenta com o desvio lateral entre as frentes de onda.

### 3.6 Bibliografia

1. Kreis, T., *Handbook of holographic interferometry : optical and digital methods*. 2005, Weinheim: Wiley-VCH. xii, 542 p.
2. Rastogi, P.K., *Holographic Interferometry - Principles and Methods*. Optical Sciences. 1994: Springer-Verlag.
3. Froehly, C., *Speckle Phenomena and Some of its Applications*. Optical methods in mechanics of solids. 1980: Alphen aan den Rijn, Netherlands, ed. A. Lagarde, Sijthoff & Noordhoff.
4. Chousal, J.A.G., ed. *Processamento de Imagem na Interpretação de Franjas Interferométricas em Análise Experimental de Tensões, Tese de Mestrado*. 1991, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
5. Dainty, J.C., *Laser speckle and related phenomena*. 1984: Springer-Verlag.
6. Goodman, J.W., *Statistical properties of laser speckle patterns*, ed. L.S.a.R. Phenomena. Vol. 9. 1975: Springer-Verlag. 9-75.
7. Gasvik, K.J., *Optical Metrology*. 1987: John Wiley and Sons.
8. Jones, R. and C. Wykes, *Holographic and speckle interferometry : a discussion of the theory, practice, and application of the techniques*. 2nd ed. Cambridge studies in modern optics ; 6. 1989, Cambridge [England] ; New York: Cambridge University Press. x, 353 p.
9. Owner-Petersen, M., *Decorrelation and fringe visibility: on the limiting behavior of various electronic speckle-pattern correlation interferometers*. J. Opt. Soc. A., 1991. 8(7): p. 1082-1089.
10. Schnars, U., T. Kreis, and W. Jüptner, *Digital recording and numerical reconstruction of holograms: Reduction of the spatial frequency spectrum*. Opt. Eng., 1995. 35(4): p. 977-982.
11. Schnars, U., T. Kreis, and W. Jüptner. *CCD- recording and numerical reconstruction of holograms and holographic interferograms*. . in *Interferometry VII: techniques and Analysis*. p. 57-63, 1995.
12. Butters JN, L.J., *Speckle pattern and holographic techniques in engineering metrology*. Opt Laser Technol, 1971. 3: p. 26-30
13. Macovski, A., D. Ramsey, and L.F. Shaefer, *Time lapse interferometry and contouring using television systems*. Appl Opt, 1971. 10: p. 2722-2727.
14. Sirohi, R.S., *Speckle Metrology*. 1993: Marcel Dekker.
15. Kreis, T., *Digital Holographic Interference-Phase Measurement Using the Fourier-Transform Method*. Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision, 1986. 3(6): p. 847-855.
16. Pedrini, G., P.H. Fröning, H. Fessler, and H.J. Tiziani, *Transient Vibration Measurements using multi-pulse digital holography*. Journal Optics & Laser Technology, 1997. 28(8): p. 505-511.
17. Kreath, K. *Phase shifting Speckle Interferometry*. in *International Conference on Speckle*. p. 337-346, 1985: Soc. Photo-Opt Instrum. Eng.
18. Olofsson, K., K.E. Fallstrom, and P. Palagyi, *Laser generated and recorded transient bending waves in composite tubes*. Experimental Mechanics, 1996. 36(3): p. 224-231.

19. Fallstrom, K.E. and O. Lindblom, *Transient bending wave propagation in anisotropic plates*. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the Asme, 1998. 65(4): p. 930-938.
20. Araújo, A.L., et al., *Parameter estimation in active plate structures* Computers & Structures 2006. 84(22-23): p. 1471-1479.
21. Lopes, H.M.R., R.M. Guedes, and M.A. Vaz, *An Improved Mixed Numerical-Experimental Method for Stress Field Calculation*. Optics & Laser Technology, 2007. 39(5): p. 1066-1073.
22. Pedrini, G., B. Pfister, and H. Tiziani, *Double Pulse-Electronic Speckle Interferometry*. Journal of Modern Optics, 1993. 40(1): p. 89-96.
23. Takeda, M., H. Ina, and S. Kobayashi, *Fourier-Transform Method of Fringe-Pattern Analysis for Computer-Based Topography and Interferometry*. Journal of the Optical Society of America, 1982. 72(1): p. 156-160.
24. Pedrini, G., Y.-L. Zou, and H.J. Tiziani, *Quantitative evaluation of digital shearing interferogram using the spatial carrier method*. Pure Appl. Opt., 1996. 5: p. 313-321.
25. Ettemeyer.GmbH&Co., *ESPI Pulse*. 1999.
26. Leendertz, J. and J. Butters, *An image-shearing speckle pattern interferometer for measuring the bending moments*. Phys. E: Sci Instrum., 1973. 6: p. 1107-1110.
27. Hung, M.Y.Y. and C.E. Taylor. *Speckle shearing interferometric camera- A tool for measurement of derivatives of surface displacements*. in *Proc. SPIE*. p. 169-175,1974.
28. Santos, F., M. Vaz, and J. Monteiro, *A new set-up for pulsed digital shearography applied to defect detection in composite structures*. Optics and Lasers in Engineering, 2004. 42(2): p. 131-140.
29. Timoshenko, S. and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of plates and shells*. 2d ed. Engineering societies monographs. 1959, New York,: McGraw-Hill. 580 p.
30. Sharma, D.K., R.S. Sirohi, and M.P. Kothiyal, *Simultaneous Measurement of Slope and Curvature with a 3-Aperture Speckle Shearing Interferometer*. Applied Optics, 1984. 23(10): p. 1542-1546.
31. Sharma, D.K., R.S. Sirohi, and M.P. Kothiyal, *Multiaperture Speckle Shearing Arrangements for Stress-Analysis*. Optics Communications, 1984. 49(5): p. 313-317.
32. Tay, C.J., S.L. Toh, H.M. Shang, and Q.Y. Lin, *Multiple-Image Shearography - a Direct Method to Determine Curvatures*. Applied Optics, 1995. 34(13): p. 2202-2206.
33. Wang, K.F., A.K. Tieu, and E.B. Li, *Measurement of pure curvature fringe distribution by using a double whole-field filtering technique*. Optics and Laser Technology, 1999. 31(4): p. 289-294.
34. Tay, C.J. and Y. Fu, *Determination of curvature and twist by digital shearography and wavelet transforms*. Optics Letters, 2005. 30(21): p. 2873-2875.
35. Murukeshan, V.M., et al., *Double shearography for engineering metrology: optical and digital approach*. Optics and Laser Technology, 2001. 33(5): p. 325-328.
36. Murukeshan, V.M., O.L. Seng, and A. Asundi, *Polarization phase shifting shearography for optical metrological applications*. Optics and Laser Technology, 1998. 30(8): p. 527-531.
37. Chau, F.S. and J. Zhou, *Direct measurement of curvature and twist of plates using digital shearography*. Optics and Lasers in Engineering, 2003. 39(4): p. 431-440.
38. Ugural, A.C., *Stresses in plates and shells*. 1981, New York: McGraw-Hill. xv, 317 p.



# Capítulo 4

## Técnicas de Processamento de Imagem

---

### 4.1 Introdução

O processamento digital de imagens é uma área em franco crescimento nas últimas décadas, de tal forma que é hoje aplicada com sucesso nos mais diversos campos. A evolução tecnológica dos computadores com, aumento do seu poder de cálculo, assim como o aparecimento de câmaras CCD e CMOS com maior resolução e capazes de taxas de transferência mais elevadas e com reduções significativas dos custos económicos associados, são factores que contribuíram fortemente para o desenvolvimento e diversificação das técnicas de processamento digital de imagem.

As técnicas ópticas em conjunto com as ferramentas de processamento digital de imagem têm encontrado um interesse cada vez maior na investigação laboratorial e mesmo em aplicações industriais. Os métodos ópticos de interferometria holográfica, interferometria de *Speckle*, *Moiré* geométrico, projecção de campos de luz estruturada e correlação de imagem apresentam hoje uma vasta gama de aplicações que passa pela análise estrutural, ao controlo de produção controlo de produção, levantamento de forma e inspecção não destrutiva de componentes. Relativamente aos métodos ópticos de interferometria, a substituição da placa holográfica pelo registo digital, veio impulsionar o desenvolvimento de novas técnicas de processamento de imagem dedicadas ao tratamento quantitativo de mapas de interferência de *Speckle*.

As técnicas de processamento digital de imagem estão divididas nos domínios de aplicação qualitativo e quantitativo. A componente quantitativa trata da metrologia das grandezas físicas, através da caracterização da intensidade de luz associada à medição. Este domínio, apesar dos mais recentes desenvolvimentos, continua a ser negligenciado relativamente à componente qualitativa. Por seu lado, as técnicas dedicadas à melhoria qualitativa da imagem são amplamente referidas na literatura, como exemplos refira-se a melhoria e o restauro das imagens, o reconhecimento de padrões e a classificação de formas. Para as técnicas ópticas de interferometria *Speckle* tem particular interesse a análise metrológica de quantidades físicas, recorrendo a técnicas específicas de processamento de imagem. Porém, este é um tema muito complexo e vasto, que experimentou um grande desenvolvimento nas últimas duas décadas. Neste capítulo será dado ênfase a algumas das mais importantes e técnicas de processamento de imagem dedicadas à análise de padrões de interferometria *Speckle*, como são, por exemplo as técnicas de filtragem de fase e de padrões de intensidade, métodos de *unwrapping* da fase e metodologias para cálculo das derivadas espaciais. Este conjunto de técnicas são ferramentas fundamentais para o pós-processamento dos mapas de interferência e transversais à maioria dos métodos ópticos, razões que justificaram a criação de um programa de processamento de imagem dedicado. A partir da plataforma MATLAB 7<sup>®</sup> foi desenvolvido um programa incorporando as técnicas de modulação temporal e espacial de fase e as técnicas de processamento de imagem que serão abordadas neste capítulo. No anexo E é apresentado uma descrição completa do funcionamento deste programa, envolvendo cada uma das etapas do processamento dos interferogramas.

Este capítulo inicia-se com a descrição dos componentes fundamentais do sistema de processamento de imagem e das tecnologias de aquisição de imagem. Segue-se um estudo das principais técnicas de processamento de imagem aplicadas à filtragem dos mapas de fase, eliminação de descontinuidade – *unwrapping* da fase, filtragem de campos de medida e cálculo das derivadas

espaciais. Este estudo contempla, igualmente, a análise da robustez da metodologia numérica para o cálculo dos esforços internos numa placa a partir do campo de deslocamentos medido por técnicas interferométricas pulsadas. No final deste capítulo faz-se a comparação das derivadas espaciais obtidas através da metodologia de diferenciação numérica com as obtidas pelas metodologias experimentais.

#### 4.2 O Sistema de processamento de imagem

O processamento digital de imagem tem como principais aplicações melhorar, analisar, segmentar e mesmo reconhecer parte de uma ou de várias imagens, abrangendo uma vasta área de aplicações científicas. Na medicina é aplicado, entre outras, à radiologia, à ecografia, à ressonância magnética nuclear, à tomografia axial computadorizada e a exames complementares de diagnóstico. Nas telecomunicações digitais é utilizado para assegurar a alta velocidade de transmissão, a qualidade na recepção e a transmissão sincronizada de som e imagem que hoje nos permite comunicar através de um simples telemóvel. Na indústria é aplicado no controlo, inspecção e automatização de processos de fabrico. Na investigação, desenvolvimento de novos sistemas para o seguimento de objectos, detecção de formas e, fundamentalmente, na metrologia, área de interesse desta dissertação.

O processamento digital de imagem é baseado em sistemas que podem assumir as mais variadas configurações, dependendo da aplicação pretendida. No entanto, estes são constituídos sobretudo pelos seguintes componentes principais [1]:

- Elementos de aquisição de imagens (CCD, CMOS etc.);
- Elementos de processamento dos dados adquiridos, placas dedicadas de processamento de imagem (CPU e/ou DSP);
- Elementos de controlo e sincronização (placas de geração analógica e digital de sinal)
- Linguagem de programação para executar as tarefas (c, c++, Visual Basic, LabView, MATLAB, etc.), e
- Elementos que permitam a visualização da imagem (monitor, televisão, etc.)

Actualmente, os sistemas mais comuns de processamento de imagens obtidas por técnicas interferométricas são constituídos por uma câmara CCD, uma placa de geração de sinal e uma placa dedicada para a aquisição e processamento de imagem que são facilmente integradas num computador comum. Esta é uma solução de baixo custo e de grande simplicidade, mas suficientemente eficaz para a maioria das aplicações de aquisição e processamento de imagens. Os componentes principais do sistema de processamento de imagem criado para este trabalho de dissertação estão representados na Fig. 4.1.

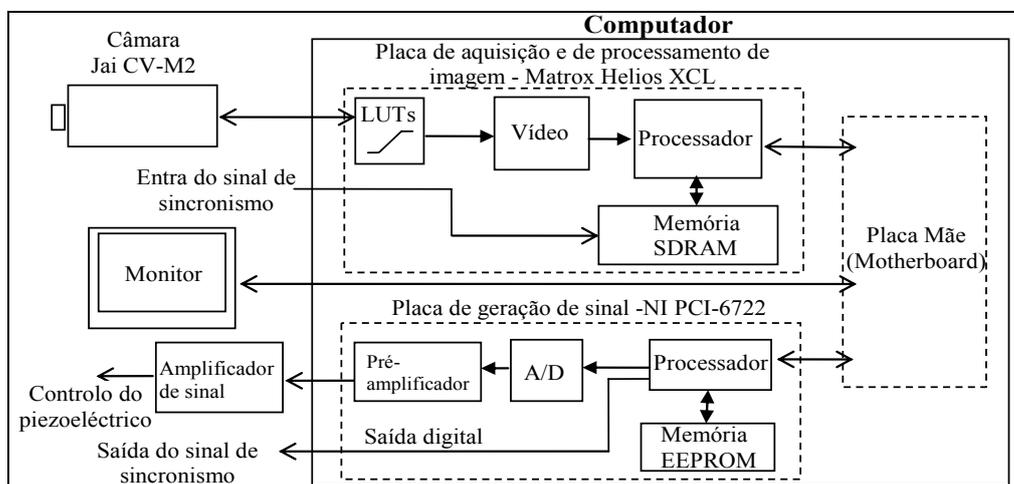


Fig. 4.1 – Componentes do sistema de aquisição e de processamento digital das imagens interferométricas.

A imagem é registada pelo CCD da câmara JAI<sup>®</sup> CV-M2 e transmitida em formato digital à placa de imagem Matrox<sup>®</sup> Hélios XCL. Os valores da imagem são ajustados mediante tabelas de conversão pré-definidas LUT (Look Up Tables) antes de serem armazenados na memória da placa e ficarem automaticamente disponível para o computador. Neste caso a câmara utilizada possui dois modos distintos de aquisição: modo contínuo e modo de dupla exposição. No modo de aquisição contínuo são transmitidas 17 imagens por segundo no formato de 1608x1208 píxeis e codificadas em 10 bits. No modo rápido (PIV mode), a aquisição é comandada a partir de um sinal de sincronismo externo por via da placa de imagem, sendo efectuados dois registos rápidos com o intervalo mínimo de 1,5  $\mu$ s. O processamento das imagens pode ser feito na própria placa de aquisição ou no computador. Como, neste caso, o modelo da placa de imagem não é suportada pelo software MATLAB 7<sup>®</sup>, o processamento das imagens é realizado com suporte no microprocessador do computador. A técnica de modulação temporal de fase é introduzida pela translação do espelho através da aplicação de um nível de tensão ao transdutor piezoeléctrico de suporte, gerado através da placa de sinal NI<sup>®</sup> PCI-6722. O movimento do espelho é definido em função de uma calibração preliminar (consultar Anexo C) e sincronizado com a frequência de gravação de imagem de modo a permitir o registo rápido dos mapas de interferência, contribuindo desse modo para a estabilidade da medição.

### 4.3 Tecnologias de aquisição de imagem

Os sistemas de imagem baseados em CCD e CMOS vieram revolucionar o modo de registo e armazenamento das imagens. A tecnologia baseada em matrizes de detectores, impulsionada pelas novas técnicas de fabrico dos semicondutores, permitiram substituir os sistemas de registo em filme fotográfico. Actualmente, esta mudança de tecnologia está também patente nos sistemas de visualização de imagem. Os convencionais televisores e monitores de raios catódicos, considerados uma tecnologia do século passado, estão, progressivamente, a ser substituídos por ecrãs de plasma e de cristais líquidos (LCD), produzidos a partir semicondutores, mais leves e com melhor qualidade imagem que os seus predecessores. Ao nível dos sistemas de aquisição de imagem, elemento fundamental de um sistema de processamento de imagem, observa-se o aparecimento de novos sensores cada vez mais pequenos, mais rápidos, com maior definição e resolução, graças à evolução tecnológica no seu fabrico. A produção massiva de sistemas de aquisição de imagem baseada na tecnologia matricial de sensores permite hoje dispor se sistemas de baixo custo com resoluções que podem facilmente ultrapassar as duas dezenas de milhões de pontos de medição.

Várias são as razões que levam à substituição dos sistemas analógicos de registo pelos sistemas discretos, designados por digitais. Ao nível do registo contínuo de imagem (vídeo), o principal argumento a favor destes sistemas está na comodidade de registo e visualização em tempo real das imagens. Pelo contrário, o registo fotográfico convencional necessita de um processo moroso de revelação para as imagens serem visualizadas. Apesar da inferior resolução de imagem proporcionado pelo sistema digital, este apresenta uma relação entre a qualidade e o ganho suficiente boa para a maioria das aplicações metrológicas.

Nos sistemas de registo digital, a imagem é discretizada num conjunto de pontos formados a partir de sensores dispostos matricialmente num transdutor electro-óptico CCD ou CMOS. A tecnologia CCD é desenvolvida a partir da alteração das propriedades eléctricas de uma placa semicondutora de silício, formando um conjunto de condensadores de metal óxido de silício (MOS). Trata-se de um substrato de silício intrínseco (do tipo P - dopado positivamente) com uma camada isoladora de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) colocado numa das faces, Fig. 4.2. Uma fina camada de metal, designada de eléctrodo (porta), é depositada sobre a camada isoladora. Pela aplicação de uma diferença de potencial positiva entre a porta e o substrato, obtém-se o afastamento das lacunas (cargas positivas) da camada isoladora e a conseqüente migração das cargas minoritárias (cargas negativas - electrões) para junto da camada de dióxido de silício. Na condição de incidência de luz, a energia dos fotões é transferida para o substrato, produzindo-se pares de lacunas/electrões livres. Na presença de uma diferença de potencial eléctrico, os electrões livres migram para a região sob o dióxido de silício, realizando-se um correspondente aumento do número de lacunas junto ao pólo negativo. O fenómeno

aumenta com o nível de energia de luz absorvida, sendo a carga eléctrica maior sob camada isoladora. O processo termina quando é atingida a saturação ou é retirada a diferença de potencial.

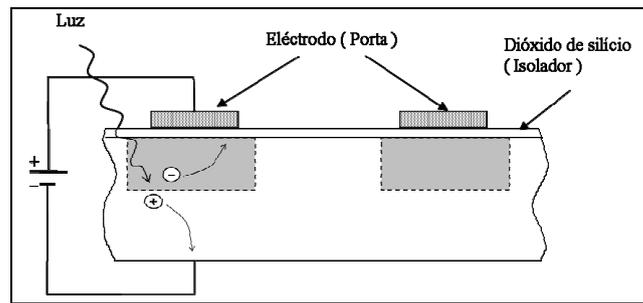


Fig. 4.2 – Tecnologia CCD de registro de imagem (Condensador MOS).

Nos sensores do tipo CMOS, tecnologicamente mais avançados que os CCD, o circuito é criado a partir da junção de um transistor MOSFET canal N e um transistor MOSFET canal P [2]. A principal vantagem da tecnologia CMOS é o baixíssimo consumo de energia, embora não sejam capazes de operar a frequências tão elevadas quanto as utilizadas com a tecnologia MOS. Esta eficiência energética deve-se ao modo de funcionamento do transistor MOSFET, onde o consumo de energia é fixado aos períodos de transição entre estados (0 e 1). Os sensores CMOS partilham da mesma tecnologia que a maioria dos equipamentos electrónicos, pelo que a produção massiva destes componentes os torna, numa economia de escala, consideravelmente menos dispendiosos. Contudo, este tipo de sensores apresenta menor sensibilidade à luz que os sensores CCD e produzem significativamente mais ruído. Para a holografia digital, a principal vantagem da utilização de sensores CCD está no seu curto tempo de aquisição das imagens, fundamental para o estudo de fenómenos rápidos.

#### 4.3.1 Métodos de transferência das cargas

A transferência das cargas eléctricas da matriz de sensores CCD pode ser realizada através dos métodos transferência de linha, transferência interlinha e transferência de quadro [3], Fig. 4.3. No método de transferência de linha, os registos estão ligados em série e a transferência das cargas efectua-se linha após linha. O tempo de atraso entre a leitura e o registo das linhas dá origem ao fenómeno de arrastamento na imagem. A solução mais eficaz de evitar o efeito de arrasto é usar o método da transferência interlinha. Neste caso, as cargas são previamente transferidas para um registo vertical protegido da luz antes de serem lidas, podendo, de imediato, adquirir uma nova imagem. Contudo, a presença de registos paralelos para transferência das cargas limita o espaço da matriz de sensores activos.

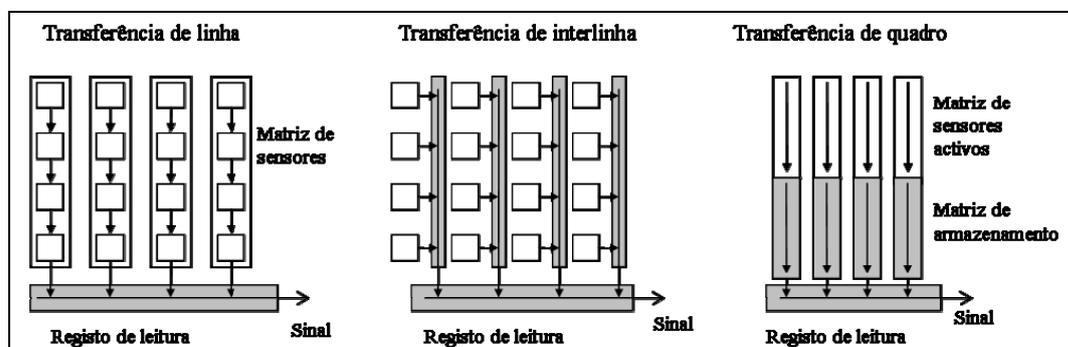


Fig. 4.3 – Métodos de transferência de carga num CCD.

A transferência de quadro, terceiro método de transferência de cargas Fig. 4.3, é usado em aplicações onde se pretenda registar duas imagens num curto intervalo de tempo. Após aquisição da primeira imagem as cargas são rapidamente transferidas para uma matriz adjacente com a mesma dimensão da matriz de sensores activos. Em seguida inicia-se o registo da segunda imagem com a

mesma duração de leitura da primeira. Na interferometria holográfica este último método é essencialmente aplicado no registo de fenómenos rápidos e que exijam a utilização de LASER pulsado. No caso concreto da câmara utilizada neste trabalho de dissertação, no modo de aquisição contínuo é usado o método transferência de interlinha, sendo o período de leitura da linha de  $47,9 \mu\text{s}$  [4]. Em relação ao modo de dupla exposição, método de transferência de quadro, o tempo de exposição da primeira imagem é de  $4,68 \mu\text{s}$  e o tempo de transferência da imagem, correspondente ao atraso para o início da aquisição da segunda imagem, é pouco superior a  $1,5 \mu\text{s}$  [4]. No anexo E está representado o diagrama temporal do registo de duas imagens para o modo rápido de aquisição da câmara JAI (PIV mode).

#### 4.4 Técnicas de filtragem dos mapas de fase

Os mapas de fase obtidos a partir das técnicas de interferometria *Speckle*, através das técnicas de modelação temporal de fase, com saltos fixos de fase, e técnica de modelação espacial de fase, pela transformada de Fourier de um único padrão contendo franjas portadoras, estão normalmente contaminados por ruído de medição de alta frequência. A decorrelação parcial ou total do *Speckle* é a principal fonte deste ruído, sendo a sua origem descrita no capítulo 3. A este sucede-se, em importância, o ruído electrónico nos sensores CCD e CMOS, de natureza quântica, que se manifesta na forma de flutuações aleatórias na tensão ou na corrente. O ruído térmico, ruído de transição e a geração-recombinação de ruído, enquadram-se numa categoria de fontes menos influentes. No fim desta escala está o ruído gerado pelo choque dos fotões nos sensores ópticos, ruído do fotão.

No que diz respeito às técnicas de filtragem do ruído, estas podem dividir-se em técnicas espaciais e técnicas temporais. As últimas são particularmente eficazes em fenómenos que apresentem distribuições temporais do ruído com média zero. A sua influência pode ser diminuída através do cálculo da média de uma sequência de registos espaçados no tempo. Vindo a relação sinal/ruído aumentada na proporção de  $\sqrt{n}$ , onde  $n$  é o número de registos usados no cálculo da média aritmética. Na interferometria *Speckle*, distribuição espacial do ruído, as técnicas espaciais são sobretudo úteis na redução do ruído de *Speckle* nos mapas de fase, através da eliminação dos termos de elevada ordem da frequência espacial ou domínio do número de onda.

As técnicas de filtragem de fase constituem a primeira e principal barreira na redução do ruído indesejável dos mapas. A aplicação destas técnicas tem como principal objectivo melhorar a relação sinal/ruído sem, no entanto, destruir a informação de fase, fundamental para a correcta determinação do campo contínuo da medição. Neste contexto apresenta-se a análise do comportamento de nove técnicas de filtragem com filtros do tipo passa-baixo, tendo por base um mapa de fase conhecido ao qual se adicionou diferentes níveis de ruído. Com o resultado desta análise pretende-se identificar as técnicas mais eficazes na remoção do ruído de fase. Para este estudo seleccionaram-se as seguintes técnicas de filtragem, geralmente utilizadas na remoção de ruído em imagens [3, 5-15]:

- Média;
- Gaussiano;
- Mediana;
- Wiener;
- Curvas spline-cúbicas (*Spline*);
- Transformada rápida de Fourier (FFT);
- *Windowed Fourier Transform* (WFT);
- *Short Time Fourier Transform* (STFT); e
- Transformadas de Ondulas (Wavelets);

As técnicas Média e Gaussiano, mais usuais na filtragem, são implementadas recorrendo à técnica de convolução de imagem. Por definição, o mapa de fase  $\Delta\phi(x, y)$  apresenta descontinuidades na fase devidas à forma como é calculada a fase. Para aplicar a técnica convencional de filtragem sem eliminar as transições de fase é necessário, em primeiro lugar, convertê-lo num campo contínuo através da passagem do mapa para o domínio complexo  $\Delta\tilde{\phi}(x, y) = e^{j\Delta\phi(x, y)}$ , sendo  $j = \sqrt{-1}$ . A técnica de convolução de imagem para a filtragem do ruído de fase é realizada através:

$$\Delta\tilde{\phi}'(x, y) = \tilde{\phi}(x, y) \otimes h(m, n) \quad (4.1)$$

sendo  $h(m, n)$  o tipo de filtro escolhido, onde  $m$  e  $n$  representam as dimensões horizontal e vertical da janela de filtragem. Após aplicação da técnica, o mapa de fase é reconstruído no domínio espacial recorrendo à expressão:

$$\Delta\phi'(x, y) = \arctg(\Delta\tilde{\phi}'(x, y)) \quad (4.2)$$

Na técnica de filtragem de mediana, os números complexos não seguem uma ordem natural, motivo que não permite a sua implementação através do procedimento anterior. Em alternativa é utilizado uma aproximação a este filtro, sendo a filtragem realizada de acordo com seguinte equação:

$$\Delta\phi'(x, y) = \arctg\left(\frac{\text{Mediana}\{\text{sen}(\Delta\phi(x, y))\}}{\text{Mediana}\{\text{cos}(\Delta\phi(x, y))\}}\right) \quad (4.3)$$

O filtro de Wiener pertence ao grupo dos filtros adaptativos, os quais seleccionam parte da informação de fase na vizinhança do píxel para reduzir o ruído. Esta selecção é realizada com base na estimativa dos coeficientes de correlação do mapa. Para a técnica de filtragem de Wiener, são estimados os coeficientes média  $\mu$  e da variância  $\sigma^2$ , obtidos a partir da informação de fase na vizinhança de cada píxel  $a(x, y)$ . Assim, a estimativa do novo valor do píxel  $b(x, y)$  é definida pela expressão [8]:

$$b(x, y) = \mu + \frac{\sigma^2 - \nu^2}{\sigma^2} [a(x, y) - \mu] \quad (4.4)$$

onde  $\nu^2$  representa a média das variâncias locais. No entanto, a aplicação da técnica de filtragem de Wiener e à semelhança da técnica da mediana é concretizado através da seguinte expressão:

$$\Delta\phi'(x, y) = \arctg\left(\frac{\text{Wiener}\{\text{sen}(\Delta\phi(x, y))\}}{\text{Wiener}\{\text{cos}(\Delta\phi(x, y))\}}\right) \quad (4.5)$$

Na técnica das curvas spline-cúbicas, o ruído é atenuado pelo amaciamento dos mapas de fase, através do ajuste de funções B-Spline de grau três a uma sequência de valores no domínio complexo. Os seus coeficientes são determinados com aproximação da função B-Spline a uma sequência de pontos equidistante do mapa [16].

Assim, a filtragem dos mapas de fase é realizada com base no algoritmo de amaciamento, definido no programa MATLAB 7<sup>®</sup>, e invocando a seguinte expressão:

$$\Delta\phi'(x, y) = \operatorname{arctg} \left( \frac{\operatorname{Spline}\{\sin(\Delta\phi(x, y))\}}{\operatorname{Spline}\{\cos(\Delta\phi(x, y))\}} \right) \quad (4.6)$$

A filtragem dos mapas de fase no domínio do número de onda assenta nas técnicas da Transformada rápida de Fourier, *Windowed Fourier Transform* e *Short Time Fourier Transform*. Na primeira, a influência do ruído é minimizada pela utilização de filtros do tipo passa-baixo, aplicados no domínio do número de onda, sendo concretizado através da construção de uma janela centrada no termo de ordem zero. A selecção da frequência de corte, dimensão da janela, é determinante para a sua eficácia na remoção dos termos importante do ruído e em particular o de mais alta frequência. Quanto às técnicas, *Windowed Fourier Transform* e *Short Time Fourier Transform*, o espectro é calculado em pequenas áreas recorrendo à transformada de Fourier. As duas principais vantagens deste procedimento estão na eliminação local das componentes sem afectar as regiões vizinhas e na simplicidade da análise destas componentes locais em relação ao espectro global. As componentes do número de onda, obtidas a partir da transformada de Fourier, são processadas definindo um limiar mínimo para a sua amplitude e atribuindo o valor zero para as restantes componentes. Com esta metodologia pretende-se eliminar as componentes do ruído que sendo de baixa amplitude se distribuem uniformemente ao longo do espectro. O filtro *Windowed Fourier Transform* difere do *Transform* e *Short Time Fourier Transform* na medida em que, no primeiro, a janela do filtro é centrada em todos os pontos do mapa de fase, enquanto no segundo, a janela é definida dividindo o mapa por regiões.

A representação do mapa de fase no domínio do número de onda é realizada através da sua transformada de Fourier discreta bidimensional:

$$\Delta\tilde{\phi}(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=1}^{M-1} \Delta\tilde{\phi}(x, y) e^{j2\pi(ux/N + vy/M)} \quad (4.7)$$

onde  $u$  e  $v$  representam, respectivamente, o número de onda na direcção  $x$  e  $y$  para um mapa de fase de dimensão  $N \times M$ . As componentes mais significativas da fase são isoladas através da aplicação, no domínio do número de onda, de um filtro ao espectro da fase, sendo o correspondente mapa de fase no domínio espacial obtido através da sua transformada de Fourier inversa:

$$\Delta\tilde{\phi}'(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=1}^{M-1} \bar{h}(u, v) \times \Delta\tilde{\phi}(u, v) e^{j2\pi(ux/N + vy/M)} \quad (4.8)$$

onde  $\bar{h}(u, v)$  é a função que define a dimensão da janela de filtragem. Na primeira técnica de filtragem, esta função adquire o valor de 1 para frequências inferiores à frequência de corte e zero para as restantes. A segunda e terceira técnica, para o conjunto de frequências seleccionadas cuja amplitude seja superior ao valor definido como limiar é atribuído o valor 1 ao filtro, os restantes termos tomam o valor zero. Por fim, o mapa de fase definido no domínio espacial é determinado substituindo na expressão 4.2 o mapa de fase no domínio complexo após filtragem.

A análise por transformada de Fourier constitui um retrocesso na representação de sinais, na medida em que há uma perda da informação espacial com a passagem para o domínio do número de onda. Todavia, as técnicas *Windowed Fourier Transform* e *Transform* e *Short Time Fourier Transform* apresentam um compromisso entre a informação no domínio espacial e a informação no domínio do número de onda. O espectro é obtido para um determinado tamanho da janela, sendo a mesma para todas as frequências. No entanto, alguns sinais requerem uma abordagem mais flexível, onde a janela

deve variar de tamanho para representar de modo mais verdadeiro a distribuição espacial e a frequência do sinal. A análise por transformadas de Ôndulas (*Wavelets*) constitui a abordagem mais indicada nestas situações. Nesta transformada, as janelas variam de tamanho e de região, permitindo dispor simultaneamente de maior precisão nas baixas e nas altas frequências quando são usadas janelas de grande e pequena dimensão, respectivamente.

A técnica de filtragem por transformada de Ôndulas aqui implementado tem como base o algoritmo do programa MATLAB 7<sup>®</sup>. A filtragem é realizada a partir da decomposição do mapa de fase em 15 níveis, tendo como base a função *Symlet 6* [17]. As componentes de baixa amplitude, associadas ao ruído de *Speckle*, são removidas pela aplicação de um filtro global definido a partir de um limiar mínimo  $h$ . O mapa de fase filtrado é determinado pela transformada inversa de Ôndulas das componentes do sinal após filtragem e é calculado de acordo com a expressão:

$$\Delta\phi'(x,y) = \arctg\left(\frac{\text{Transf. Ôndulas}^{-1}\left\{\text{Transf. Ôndulas}\left[\text{sen}(\Delta\phi(x,y))\right]\times h\right\}}{\text{Transf. Ôndulas}^{-1}\left\{\text{Transf. Ôndulas}\left[\text{cos}(\Delta\phi(x,y))\right]\times h\right\}}\right) \quad (4.9)$$

O estudo comparativo da eficácia destas técnicas de filtragem é realizada a partir da técnica de modelação temporal de fase e tomando para simulação o padrão de franjas definido pela seguinte expressão [18]:

$$\varphi(x,y) = \begin{cases} 0,002 \times \rho^2 & \rho^2 = x^2 + y^2 \leq 127^2 \\ 0,002 \times 127^2 & \rho^2 = x^2 + y^2 > 127^2 \end{cases} \quad (4.10)$$

onde  $x$  e  $y$  são as coordenadas da imagem de dimensão  $256 \times 256$ . Dando sequência à obtenção dos mapas de fase pela técnica de modelação temporal de fase, são gerados os quatro padrões de franjas desfasados do valor  $\pi/2$ ,  $\Phi_i(x,y)$ , a partir da seguinte função:

$$\Phi_i(x,y) = 1 + \cos[\varphi(x,y) + (i-1)\pi/2] + R(x,y) \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (4.11)$$

onde  $R(x,y)$  designa o ruído do tipo Gaussiano adicionado ao padrão de franjas. Os mapas de fase  $\Delta\phi(x,y)$  são determinados pela aplicação da técnica convencional de salto de fase aos quatro padrões de franjas simulados. Na Fig. 4.4 representam-se os quatro mapas de fase obtidos para a adição de diferentes níveis de ruído e que servirão de base ao estudo do comportamento das técnicas de filtragem apresentadas.

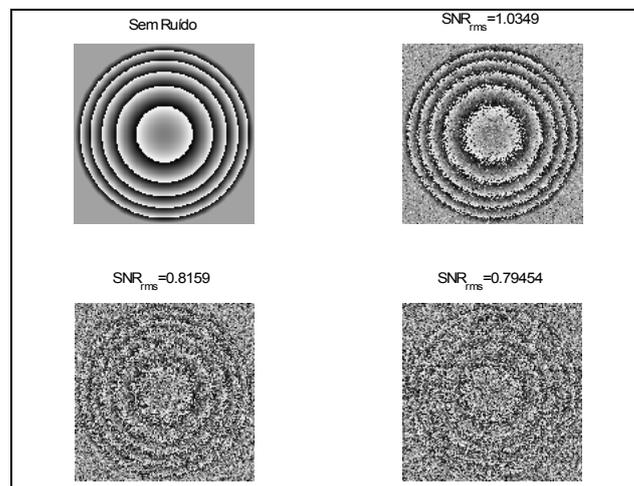


Fig. 4.4 – Mapas de fase gerados com adição de diferentes níveis de ruído.

Comparando os mapas de fase, Fig. 4.4, verifica-se, como era esperado, ocorrer uma degradação no contraste das franjas com a redução do valor eficaz da razão sinal/ruído (SNR<sub>rms</sub>) [7]. A análise a seguir apresentada tem como finalidade avaliar simultaneamente a eficácia e a robustez das técnicas de filtragem.

Para o estudo comparativo do comportamento destas técnicas é necessário, em primeiro lugar, encontrar os parâmetros óptimos que conduzam à minimização do valor eficaz do erro [7], definido entre o mapa de fase filtrado e o mapa de fase sem ruído. Este estudo prévio da evolução do erro, definido a partir dos diferentes parâmetros associados a cada técnica de filtragem, foi realizado com base nos quatro mapas de fase representados na Fig. 4.4, e encontra-se descrito no Anexo B. Os correspondentes valores mínimos obtidos a partir das nove técnicas de filtragem e para os quatro mapas de fase estão representados na Fig. 4.5.

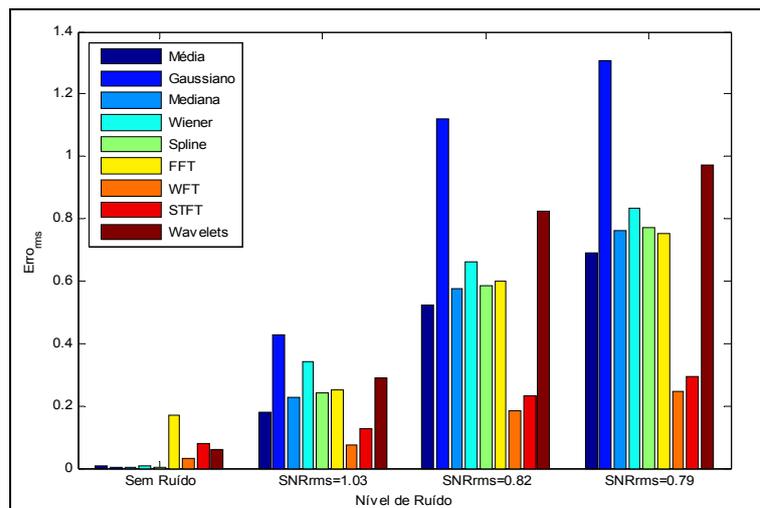


Fig. 4.5 – Representação do valor eficaz do erro associado das técnicas de filtragem do mapa de fase para diferentes razões sinal/ruído.

Analisando a distribuição do valor eficaz do erro, verifica-se que, globalmente, este aumenta com adição do nível de ruído aos mapas. À exceção da condição sem ruído, observa-se que as técnicas WFT e STFT são os que apresentam menores valores eficazes do erro e, por isso, se considera possuírem um melhor desempenho na remoção do ruído dos mapas de fase. A diferença de valores observada entre estas duas técnicas fica a dever-se à maior precisão na definição da amplitude das componentes do sinal por parte da WFT, em resultado da sua análise espectral ser centrada em pontos sucessivos. No entanto, esta melhoria no desempenho é conseguida através de um maior esforço de cálculo, conforme se pode constatar a partir análise do tempo médio de processamento das técnicas de filtragem, Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Tempo médio de processamento das técnicas de filtragem para mapas de fase de 256x256 (Pentium 4 a 1,7GHz)

Técnicas de filtragem	Tempo médio de processamento
Média	1,30 segundos
Gaussiano	1,50 segundos
Mediana	9,20 segundos
Wiener	37,00 segundos
<i>Spline</i>	6,50 segundos
FFT	1,90 segundos
WFT	19,30 segundos
STFT	2,80 segundos
<i>Wavelets</i>	3,70 segundos

A filtragem permite reduzir consideravelmente o ruído nos mapas de fase, tornando o processo de eliminação das descontinuidades *unwrapping* da fase mais simples. Porém na presença de elevado nível de ruído nos mapas, estes algoritmos não permitem remover completamente este ruído, conforme anteriormente demonstrado, Fig. 4.5. Nestas situações, as perturbações nos mapas terão de ser resolvidas por métodos de *unwrapping* robustos.

Na continuação do pós-processamento dos mapas de fase e depois de analisadas as técnicas de filtragem de fase, segue-se o estudo do comportamento dos métodos de *unwrapping* da fase.

#### 4.5 Métodos de *unwrapping* da fase

Os mapas de fase apresentam distribuições descontínuas da fase, definidas pela modelação espacial da amplitude do campo de medição. Para a reconstrução do campo contínuo, correspondente ao campo de medida, é necessário remover correctamente estas descontinuidades através da aplicação dos métodos de *unwrapping*. Apesar das melhorias dos mapas de fase introduzidas pelo pré-processamento, continuam a persistir ambiguidades na fase decorrentes da persistência de ruído. A elevada densidade e/ou baixo contraste das franjas tornam o objectivo da remoção correcta das descontinuidades difícil de ser alcançado.

Os métodos de *unwrapping* estão divididos em duas categorias, a saber: métodos selectivos do caminho (*path-following methods*) e métodos da minimização da norma do erro (*minimum-norm methods*) [9]. Os principais métodos de *unwrapping* serão introduzidos a seguir, reflectindo estas duas metodologias. Na continuação, será analisado o comportamento dos métodos na remoção das descontinuidades em mapas de fase simulados, aos quais foram propositadamente introduzidas inconsistências na fase. A partir dos resultados obtidos neste estudo pretende-se identificar os métodos mais robustos na remoção destas descontinuidades.

##### 4.5.1 Métodos selectivos do caminho

Conforme anteriormente referido, o mapa de fase é obtido através dos métodos de modelação temporal e espacial de fase e apresentam descontinuidades que tomam valores entre  $-\pi$  a  $\pi$ . A reconstrução do campo contínuo é realizada a partir da remoção destas descontinuidades, adicionando ou subtraindo múltiplos de  $2\pi$  a cada descontinuidade. Este procedimento, designado de integração da fase é aplicado quando a diferença de fase entre píxeis consecutivos e ao longo de uma linha é superior a  $\pi$  ou  $-\pi$ , sendo então adicionado ou subtraído  $2\pi$  aos restantes píxeis da linha. O processo termina com repetição do mesmo procedimento ao longo das colunas. No entanto, na presença de inconsistências ou ambiguidades no mapa fase, surgem falhas na metodologia de identificação das transições. De facto, nestas condições, a solução do campo contínuo não é singular e depende, por isso, do caminho de integração escolhido [9]. As inconsistências de fase manifestam-se sob a forma de interrupções nos contornos das franjas de fase e/ou descontinuidades no mapa e traduzem-se em pontos chamados de resíduos ou pólos.

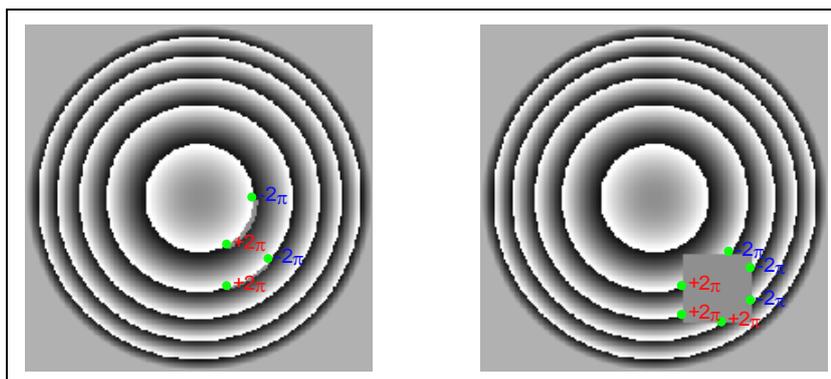


Fig. 4.6 – Representação dos resíduos em dois mapas de fase com descontinuidade nas franjas.

Os resíduos ou pólos são identificados pelo valor da soma da diferença da fase entre quatro píxeis vizinhos e podem tomar valores de  $2\pi$  ou  $-2\pi$  [9]. Na Fig. 4.6 representam-se os valores dos resíduos calculados para a presença de descontinuidades nas transições e nos mapas de fase. Estas reflectem duas das causas mais comuns do aparecimento de inconsistências nos mapas na fase. Com base nos dois mapas de fase apresentar-se-á em seguida uma análise do comportamento dos métodos de *unwrapping*.

A representação dos resíduos, Fig. 4.6, releva claramente a posição das descontinuidades nas franjas de fase. A partir dos contornos das franjas verifica-se que estas podem ser completadas ligando por linhas de restrição (*branch cut*) os pólos de diferente polaridade, este processo é designado de equilíbrio de potencial [9]. A correcta colocação das linhas de restrição no mapa de fase garante que a solução para o campo de fase contínuo é única, desde que a fase seja integrada ao longo de um qualquer caminho que não cruze as linhas de restrição. Porém, a posição destas ligações não é sempre tão evidente como visualmente se apresenta. Para garantir o sucesso do método na definição das linhas de restrição, dever-se-á usar critérios mais robustos. Para o efeito, é necessário recorrer a informação adicional sobre a qualidade da distribuição da fase. A partir da análise dos métodos de *unwrapping* a fase baseados no caminho óptimo de integração [9], identificaram-se quatro diferentes metodologias que em seguida se apresentam por ordem crescente de complexidade:

- Goldstein;
- Quality-Guided;
- Mask Cut; e
- Flynn;

O método de *Goldstein* [19] utiliza na definição das ligações critérios menos restritivos em relação ao processo de equilíbrio de potencial, enunciado anteriormente. O procedimento de colocação das linhas de restrição inicia-se com a localização dos pólos no mapa de fase e prossegue com a pesquisa de outros pólos nas regiões vizinhas. Quando é encontrado um novo pólo, mesmo de igual polaridade, é estabelecida uma nova linha de restrição, sendo então adicionado a polaridade (1 ou -1) à carga acumulada. Na presença de pólos já ligados, a linha de restrição é na mesma criada, no entanto, a sua carga não é adicionada. O processo de pesquisa global só termina quando todas as cargas acumuladas atingirem o equilíbrio de potencial. Por fim, o campo contínuo de fase é determinado pelo processo de integração da fase ao longo do mapa, que envolve o contorno das linhas de restrição.

O método de *Quality-Guided* utiliza a informação sobre a distribuição da qualidade da fase para definir o caminho de integração. Verifica-se que os píxeis apresentam, em geral, valores inferiores na qualidade da fase para as regiões de maior concentração de inconsistências. Este facto indicia, desde logo, que o processo de integração da fase deverá iniciar-se pelos píxeis de maior qualidade e terminar nos de pior qualidade. Embora isto seja verdade, esta abordagem constitui um risco, pois, o caminho de integração da fase é simplesmente guiado pela boa qualidade do mapa sem contornar as linhas de restrição. Surpreendentemente esta metodologia permite obter bons resultados.

A qualidade do mapa é determinada a partir da definição de um patamar para o valor das derivadas parciais de segunda ordem do mapa de fase [20, 21]. No entanto, este pode também ser definido com base num qualquer critério adaptativo [22].

A partir da combinação dos conceitos distribuição da qualidade da fase e colocação das linhas de restrição, é definido um método híbrido. O método *Mask Cut* [23, 24], junta as vantagens dos dois métodos anteriores, apoiando-se na informação adicional da qualidade da fase para colocar as linhas de restrição de modo a garantir que erros não são introduzidos durante o processo de integração da fase, quando são contornadas as linhas de restrição.

As linhas das franjas de fase, definidas pela fronteira entre píxeis brancos e pretos no mapa de fase, representam a transição da fase entre  $-\pi$  e  $\pi$  e dividem o mapa por regiões. Esta abordagem

entende a metodologia de *unwrapping* como um processo de minimização das descontinuidades ao longo destas linhas, através da adição ou subtração de  $2\pi$  em cada região. Porém, o sucesso deste método depende integralmente da técnica usada na localização das linhas que definem as transições de fase. Por seu lado, as técnicas de processamento de imagem para a detecção de contornos quando aplicadas ao mapa de fase permitem a identificação das linhas [25]. No entanto, na presença de ruído e descontinuidade nas franjas de fase, a aplicação destas técnicas conduzem, normalmente, a resultados pouco satisfatórios. Como alternativa esta abordagem, é proposto por Flynn [26] o método da descontinuidade mínima, capaz de resolver as inconsistências de fase, principal dificuldade na determinação do campo contínuo. A diferença de comportamento do método de Flynn é explicada principalmente pelo facto das linhas das descontinuidades de fase não corresponderem, obrigatoriamente, às linhas de transição de fase, passando estas a ser definidas de modo aproximado. Após identificadas as linhas, estas são ligadas entre si de modo a criar regiões independentes para, através da adição de múltiplos de  $2\pi$  a estas regiões, remover as descontinuidades de fase. O processo iterativo de identificação das regiões termina quando é atingida a solução correspondente às descontinuidades mínimas entre as transições de fase.

#### 4.5.2 Métodos de minimização da norma do erro

Nos métodos selectivos do caminho, o campo contínuo de fase é determinado a partir da integração desta grandeza ao longo de um caminho definido por linhas de restrição. As linhas de restrição funcionam como barreiras à presença de inconsistências no mapa fase, tornando a solução única e independente do trajecto de integração. Por seu lado, os métodos de minimização da norma do erro apresentam uma abordagem completamente diferente. A solução é determinada a partir da minimização da função objectivo, designado por norma do erro, que é definida pela diferença entre as derivadas locais do campo contínuo de fase e as derivadas do mapa de fase medido. Considerando a solução do campo contínuo de fase  $\phi_{i,j}$  e da diferença de fase do mapa de fase medido  $\Delta_{i,j}$  pode definir-se a função norma do erro  $\varepsilon^P$  [9]:

$$\varepsilon^P = \sum_{i=0}^{M-2} \sum_j^{N-1} \left| \phi_{i+1,j} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^x \right|^P + \sum_{i=0}^{M-1} \sum_j^{N-2} \left| \phi_{i,j+1} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^y \right|^P \quad \text{para } i=0,1,\dots,M \text{ e } j=0,1,\dots,N \quad (4.12)$$

onde o valor do expoente  $P$  depende do problema em análise,  $i, j$  são as coordenadas dos píxeis e  $M \times N$  representam, respectivamente, a dimensão em número de píxeis na horizontal e vertical da imagem.

A função objectivo pode ser formulada em termos dos parâmetros da distribuição pesada ou não da norma do erro [9]. A partir destes parâmetros e considerando os diversos valores do expoente da norma do erro são definidos a seguir três métodos para a resolução do problema de minimização:

- FFT/DCT;
- PCG; e
- *Multigrid*;

A resolução dos problemas de *unwrapping* por mínimos quadrados ( $P=2$ ), adoptando a formulação não pesada da norma do erro, reduz-se à determinação da solução de um sistema de equações discretas de Poisson [27]. O método da transformada rápida de Fourier (FFT) ou transformada discreta dos co-senos (DCT) permite a resolução simples e eficiente das equações lineares deduzidas a partir destas equações. O método DCT é aqui tomado como uma extensão do método FFT para a resolução rápida de problemas de dimensão com imagens cujas dimensões são diferentes da potência de dois. A periodicidade das funções é garantida no método da FFT através de um processo adequado de simetriação do mapa de fase e no método DCT por imposição de condições

de fronteira ao mapa sem extensão da informação, o que torna este segundo método mais eficiente [9]. O método determinístico de *unwrapping*, baseado na combinação da transformada directa e inversa de Fourier e com extensão da imagem pelo processo de simetrização, foi recentemente proposto por Volkov et al. [28]. O problema de minimização é resolvido no domínio do número de onda, recorrendo para o efeito, às propriedades da transformada de Fourier para a diferenciação e integração do mapa de fase  $\Delta\phi(x, y)$ . De acordo as derivadas estabelecidas pela aplicação das condições de fronteira de Neumann às equações de Poisson, constata-se que a solução matemática do campo de fase contínuo, obtida por este método, é única. Esta condição está limitada pela banda de frequências da amostragem e pode ser determinado pela seguinte expressão [28]:

$$\Phi(x, y) = \Re \left\{ \frac{1}{2\pi j} \text{FFT}^{-1} \left[ \frac{\text{FFT}(\partial_x e^{j\Delta\phi(x,y)}) q_x + \text{FFT}(\partial_y e^{j\Delta\phi(x,y)}) q_y}{q^2} \right] \right\} \text{ com } q^2 = q_x^2 + q_y^2 \neq 0 \quad (4.13)$$

sendo a solução aproximada do gradiente do mapa de fase definido por:

$$\nabla e^{j\Delta\phi(x,y)} = \begin{Bmatrix} \partial_x e^{j\Delta\phi(x,y)} \\ \partial_y e^{j\Delta\phi(x,y)} \end{Bmatrix} = \Re \left[ \frac{\nabla e^{j\Delta\phi(x,y)}}{j e^{j\Delta\phi(x,y)}} \right] - \nabla \Delta\phi(x, y) \quad (4.14)$$

onde FFT e  $\text{FFT}^{-1}$  representam, respectivamente, a transformada directa e inversa de Fourier, o símbolo  $\Re$  designa a componente real da função complexa,  $q_x$  e  $q_y$  correspondem à projecção horizontal e vertical do número de onda e  $j = \sqrt{-1}$ . A partir do modelo teórico do comportamento do método determinístico observa-se que este é capaz de resolver a fase até ao limite de franjas de fase espaçadas de dois píxeis, e mostra-se independente do caminho de integração e rapidez de cálculo. A rapidez do cálculo é consequência da utilização da transformada rápida de Fourier [28].

O método de mínimos quadrados pesado da norma do erro (P=2) acrescenta, em relação ao método anterior, os pesos derivados dos métodos de *Quality-Guided* e *Mask Cut* para melhorar a integração da fase e, assim, isolar as regiões com baixo sinal/ruído. Deste modo, as inconsistências de fase são contornadas durante o processo de determinação do campo contínuo. Na presença de regiões de elevado ruído, estas podem ser tratadas de forma isolada das restantes, ficando, neste caso, a solução do campo contínuo dispensado de garantir continuidade de fase ao longo destas fronteiras. O método interactivo do gradiente conjugado pré-condicionado (PCG) é usado na determinação eficiente da solução deste problema [9]. Assim, através da técnica PCG a resolução das equações de lineares é realizada na forma de um problema de minimização, sendo a convergência mais rápida que as técnicas de minimização mais simples como a técnica *Steepest Descent* [29]. A introdução do pré-condicionamento no método do gradiente conjugado tem como finalidade facilitar a determinação da solução do sistema de equações lineares. Esta é concretizada resolvendo o problema aproximado pelo método dos mínimos quadrados não pesada da norma do erro e actualizando a solução a cada iteração. A partir da solução do problema pré-condicionado é estimada a solução exacta do problema de minimização da função objectivo de mínimos quadrados pesada da norma do erro. Esta abordagem tem como principal vantagem a facilidade da incorporação numa estrutura robusta do gradiente conjugado dos métodos da FFT e DCT para a resolução iterativa do problema de minimização da função.

Os métodos iterativos *Multigrid* são aplicados para a rápida resolução de sistemas de equações de derivadas parciais lineares (P=2) e não lineares (P≠2) de grande escala. Estes métodos incorporam o processo de relaxamento *Gauss-Seidel* para aumentar a taxa de convergência do problema a cada iteração. Contudo, a extensão deste método a problemas de minimização por mínimos quadrados pesada da norma do erro (P=2), exige a correcção das derivadas parciais nas fronteiras do mapa após a

operação de relaxamento, de modo a preservar as condições de fronteira necessárias à convergência. A principal dificuldade deste procedimento está na correcta definição dos pesos de restrição no mapa de fase relaxado. No entanto, como este método não necessita de utilizar as transformadas FFT e DCT e não possui restrições na dimensão do mapa e é capaz de resolver num espaço de tempo que pode chegar a ser 25 vezes mais inferior relativamente ao do método PCG [9].

A avaliação do comportamento dos métodos de *unwrapping* a fase é realizada com base nos dois mapas de fase representados na Fig. 4.6, simulando a presença de dois modelos de inconsistências de fase mais comuns. Através deste estudo, pretende-se seleccionar o método mais robusto na correcta remoção das descontinuidades de fase. Para melhor concretizar este objectivo, foram implementados na plataforma MATLAB 7<sup>®</sup> os oito métodos de *unwrapping* anteriormente referidos. Afim de determinar os métodos mais eficazes é realizada a análise comparativa das diferenças entre os mapas contínuos obtidos por aplicação destes métodos e os mapas contínuos simulados. Na Fig. 4.7 e Fig. 4.8 estão representados, na forma de mapas de falsa cor, os erros de fase determinadas para os oito métodos de *unwrapping* implementados e abordando os dois modelos de mapas apresentados. Os correspondentes mapas contínuos podem ser consultados no anexo B.

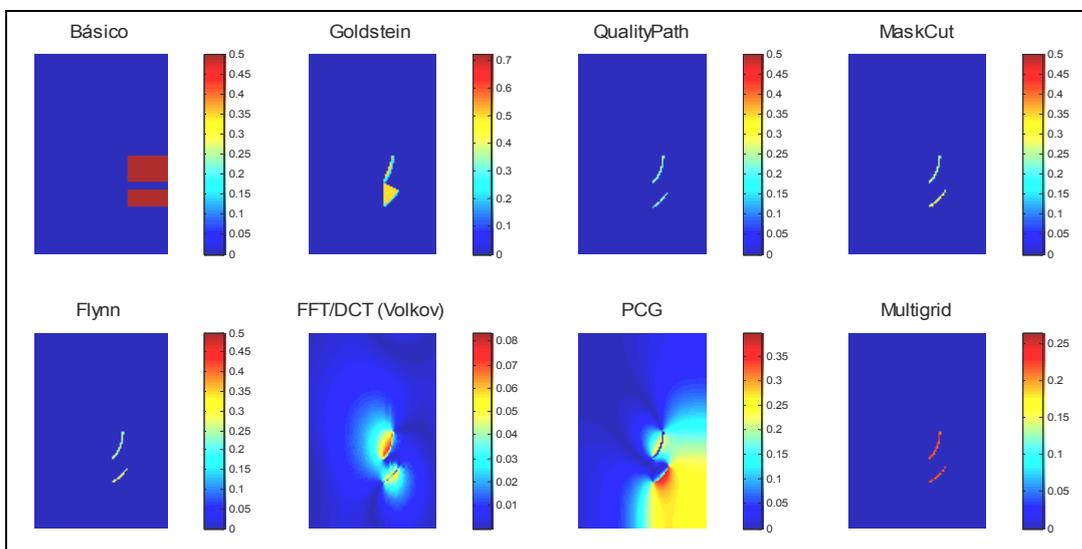


Fig. 4.7 – Representação dos erros de fase determinados a partir da aplicação dos métodos de *unwrapping* ao mapa de fase do lado esquerdo da Fig. 4.6.

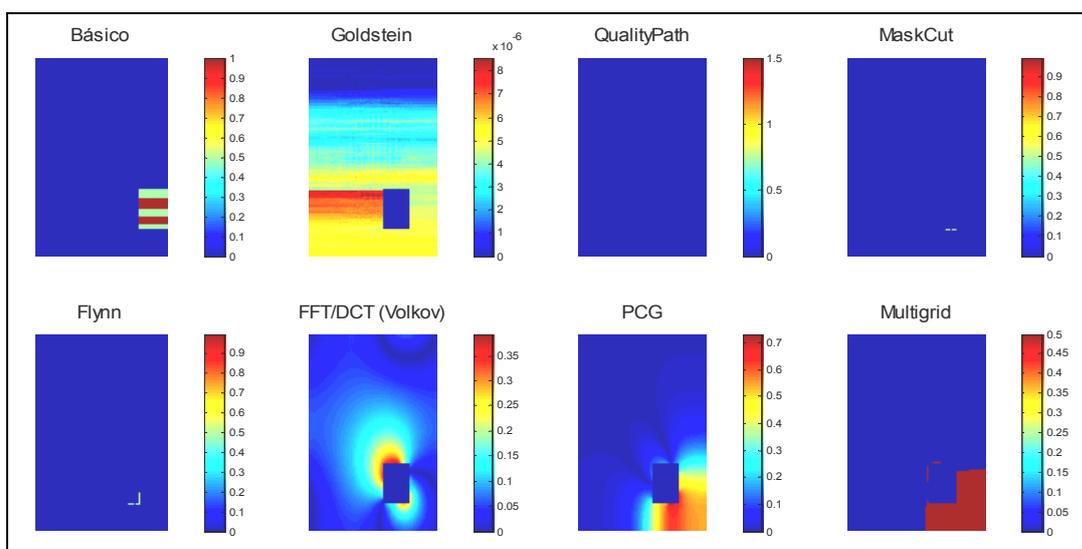


Fig. 4.8 – Representação dos erros de fase determinados a partir da aplicação dos métodos de *unwrapping* ao mapa de fase do lado direito da Fig. 4.6.

Comparando os mapas do erro de fase representados, Fig. 4.7 e Fig. 4.8, verifica-se que, globalmente, os métodos selectivos do caminho limitam as inconsistências na fase às regiões próximas

da colocação das linhas de restrição, enquanto que nos métodos de minimização da norma do erro, por serem métodos globais, propagam estes erros às regiões vizinhas. Este efeito é mais evidente quanto maior for a região afectada pela presença de inconsistências de fase, Fig. 4.8. Estas apresentam uma distribuição ao longo do mapa, o qual normalmente varia entre registos. O seu carácter aleatório não permite a utilização de um método único na remoção das descontinuidades. O estudo apresentado aqui refere-se apenas à presença localizada de inconsistências no mapa de fase. Apesar destes constrangimentos, a partir da análise dos mapas de erro de fase representados na Fig. 4.7 e Fig. 4.8, é ainda possível afirmar que os métodos da minimização da norma do erro são mais eficazes na presença de inconsistências de fase distribuídas ao longo do mapa e, por outro lado, os métodos selectivos do caminho têm melhor desempenho para as descontinuidades localizadas no mapa. Havendo dificuldade no enquadramento dos mapas de fase numa destas duas categorias, deverá começar-se pelos métodos com menor tempo de processamento até se obter um resultado coerente com a distribuição das franjas. O tempo médio de processamento dos métodos de *unwrapping* estão apresentados por ordem crescente na Tabela 4.2. A partir da análise destes tempos, verifica-se que o método Básico é o mais rápido, enquanto que o método de *Flynn* apresenta um tempo de execução máximo, o qual é justificado pela sua maior complexidade.

**Tabela 4.2 – Tempo médio de processamento dos métodos de *unwrapping* para mapas de fase 256x256 (Pentium 4 a 1,7GHz)**

Método de <i>unwrapping</i>	Tempo médio de processamento
Básico	0,05 segundos
Goldstein	0,30 segundos
Mask Cut	0,29 segundos
PCG	0,30 segundos
Quality-Guided	0,40 segundos
FFT/DCT (Volkov)	0,55 segundos
Multigrid	1,9 segundos
Flynn	17,6 segundos

Os métodos de *unwrapping* permitem contornar as inconsistências de fase através da colocação de linhas de restrição ou pela minimização das transições de fase. Como resultado destas duas metodologias, obtêm-se campos contínuos que apresentam perturbações locais nas regiões afectadas pelas inconsistências de fase. Estas descontinuidades localizadas no campo contínuo são representadas por termos de ordem mais elevada no domínio do número de onda, podendo ser atenuadas através da aplicação de filtros do tipo passa-baixo. Por seu lado, a identificação do dano estrutural obriga à determinação das derivadas espacial do campo de deslocamentos até à terceira ordem. As sucessivas derivadas espaciais traduzem-se pelo aumento da amplitude das componentes de ordem mais elevada do sinal, propagando e amplificando as perturbações introduzidas pelos métodos de *unwrapping* [30]. Portanto, é essencial que estas perturbações sejam atenuadas através da aplicação destes filtros antes de se proceder à diferenciação do campo de medida.

À semelhança dos estudos anteriores procede-se em seguida, à análise do desempenho de nove filtros, do tipo passa-baixo, aplicados a campos de medida com adição ruído de alta frequência.

#### 4.6 Técnicas de filtragem do campo de medida

O estudo das técnicas de filtragem aplicado aos campos de medida surge na sequência do pós-processamento dos mapas de fase para a determinação das derivadas espaciais até à terceira ordem do campo de deslocamentos. Para a selecção do filtro mais adequado na remoção destas perturbações, são retomadas as nove técnicas de filtragem descritas na secção 4.4, analisando o seu desempenho com

base num campo de medida conhecido, ao qual são acrescentados diferentes níveis de ruído.

A eficácia da aplicação de filtros do tipo passa-baixo nas regiões limites do campo de medida é, em geral, perturbada pela presença de discontinuidades, as quais se traduzem por termos de elevada ordem no domínio do número de onda [31]. O problema é resolvido com a extensão da informação para além do bordo, através da criação do espelho ou a replicação do campo de medida na fronteira do seu domínio. Este método é escolhido de modo a garantir no bordo a continuidade no campo de deslocamentos e das suas derivadas espaciais até terceira ordem. A partir do campo contínuo, definido pelo mapa de fase representado na Fig. 4.4, e após a adição de diferentes níveis de ruído do tipo Gaussiano, são obtidos os quatro campos de medida representados Fig. 4.9.

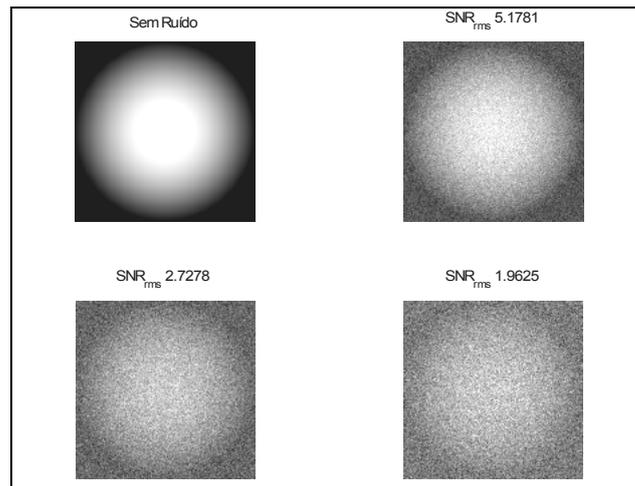


Fig. 4.9 – Campos de medida com adição de diferentes níveis de ruído.

O comportamento das técnicas de filtragem é determinado pela combinação dos vários parâmetros que estão associados a cada filtro. Assim, para simplificação da análise comparativa entre estas técnicas e de modo análogo aos estudos anteriores, são previamente estabelecidos os parâmetros dos filtros que conduzem à minimização do valor eficaz do erro. O desempenho das técnicas de filtragem, adoptando para análise os quatro campos de medida representados na Fig. 4.9, podem ser consultados no anexo B.

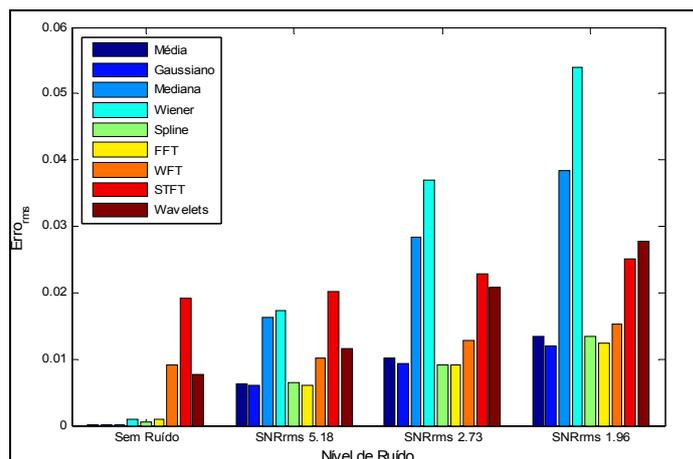


Fig. 4.10 – Representação do valor eficaz do erro associado às técnicas de filtragem do campo de medida para diferentes razões sinal/ruído.

Na Fig. 4.10 estão representados os mínimos valores eficazes do erro extraídos do comportamento das técnicas de filtragem (anexo B). A análise comparativa destes valores permite verificar que globalmente há um agravamento do erro com o nível de ruído e que as técnicas Média, Gaussiano, *Spline* e FFT, por apresentarem menores valores do erro, são considerados mais eficazes na remoção do ruído nos campos de medida. Na prática, são habitualmente usados as técnicas de filtragem Média ou Gaussiano devido ao seu menor tempo de processamento (Tabela 4.1) e à

facilidade no ajuste dos seus parâmetros.

#### 4.7 Métodos de diferenciação espacial do campo de medida

Conforme já referido, a identificação do dano estrutura pode envolver a obtenção das derivadas espaciais até à terceira ordem do campo de deslocamentos. Por via experimental são directamente acessíveis os campos de deslocamento e da primeira derivada espacial, já os campos da segunda e da terceira derivadas, grandezas mais eficazes na detecção do dano estrutural, são determinados por via indirecta através de metodologias de derivação que recorrem ao método das diferenças finitas. Estas metodologias requerem a medição de vários campos da primeira derivada desfasados no espaço (capítulo 3). A translação espacial destes campos é criada a partir do deslocamento do objecto ou pela rotação de espelhos. Porém, a recombinação do ruído experimental por aplicação do método das diferenças finitas, a elevada precisão requerida no posicionamento destes componentes e o número elevado de registos, tornam este procedimento moroso e susceptível a propagação de erros. Para contornar as dificuldades inerentes à medição experimental, serão em seguida propostas várias metodologias para a determinação por via numérica das derivadas espaciais do campo de deslocamentos até à terceira ordem. Este estudo é desenvolvido com base num único registo deste campo de deslocamentos. Com esta análise será definido o método mais robusto à propagação do ruído experimental ao longo do cálculo das três primeiras derivadas espaciais.

As sucessivas derivadas do campo de deslocamentos, que se traduzem por um maior contribuição dos termos de ordem mais elevada no domínio do número de onda, propagam e amplificam o ruído de alta frequência [32]. A aplicação de filtros do tipo passa-baixo ao campo de deslocamentos permite remover o ruído de alta frequência e melhorar a razão sinal/ruído. Vários algoritmos são propostos para a filtragem e amaciamento deste campo (secção 4.6). Porém, os termos de ordem superior do sinal, indispensáveis para a correcta representação das derivadas de ordem mais elevada, poderão também ser eliminados neste processo [33].

No que se refere às técnicas para o cálculo numérico das derivadas espaciais do campo de medida, o método das diferenças finitas corrente é frequentemente referido como um dos mais simples e mais eficaz. Todavia, este método revela-se muito sensível à presença de ruído, sobretudo nas componentes de alta frequência espacial, as quais se tornam preponderantes com o processo de cálculo das sucessivas derivadas espaciais [32]. A metodologia que assenta na aplicação de filtros passa-baixo ao campo de deslocamentos e o cálculo das derivadas espaciais pelo método das diferenças finitas permite alcançar bons resultados para a primeira derivada espacial. Refira-se que as componentes do sinal e do ruído são indissociáveis e os termos de alta ordem do sinal são muito importantes para a correcta representação das derivadas espaciais. Assim, a selecção do filtro passa-baixo deve resultar de um equilíbrio entre os termos do campo de deslocamentos a desprezar e as componentes do ruído a eliminar. Este é normalmente concretizado através um procedimento interactivo e heurístico [33]. No entanto, esta metodologia revela-se falível quando se pretendem determinar a segunda e terceira derivadas espaciais. Na tentativa de superar as dificuldades inerentes ao cálculo destas derivadas são a seguir propostas três técnicas definidas com base nas propriedades do integral e que possuem simultaneamente as características de diferenciação e filtragem do campo. Estas técnicas são deduzidas das três técnicas de filtragem mais eficazes na remoção do ruído no campo de medida, nomeadamente: métodos Gaussiano, *Spline* e FFT. Por definição, as características da filtragem obtidas com estas técnicas permanecem válidas para as suas derivadas [32, 34, 35]. No estudo das técnicas para o cálculo das derivadas espaciais excluiu-se a técnica do declive por regressão linear, por esta não admitir derivadas de ordem superior a um.

A técnica de filtragem Gaussiano é realizado com base na função Gaussiana a uma dimensão  $G(x)$ , a qual é determinada por:

$$G(x) = 1/\sqrt{2\pi} \exp(-x^2/2) \quad (4.15)$$

onde a coordenada  $x$  representa a abcissa da função. A partir da função Gaussiana são deduzidas as respectivas derivadas espaciais a uma dimensão, sendo a derivada de ordem  $n$  dada pela seguinte expressão [36]:

$$\frac{\partial^n}{\partial x^n} G(x) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right)^n H_n\left(\frac{x}{\sqrt{2\pi}}\right) G(x) \quad (4.16)$$

onde  $H_n(x)$  é a função de Hermite;

$$\begin{aligned} H_0(x) &= 1; & H_1(x) &= 2x \\ H_{n+1}(x) &= 2xH_n(x) - 2(n-1)H_{n-1}(x) \end{aligned} \quad (4.17)$$

A sua aplicação ao campo de medida obriga que as derivadas da função Gaussiana sejam definidas para o domínio discreto, onde a coordenada  $x$  passa a representar os pontos *Kernel* a uma dimensão. A vantagem de utilizar a derivada da função Gaussiana discreta está na separação das variáveis espaciais, permitindo calcular individualmente a derivada bidimensional. Na Fig. 4.11 estão representados para os pontos *Kernel* a uma dimensão a função Gaussiana e as primeiras três derivadas da função Gaussiana.

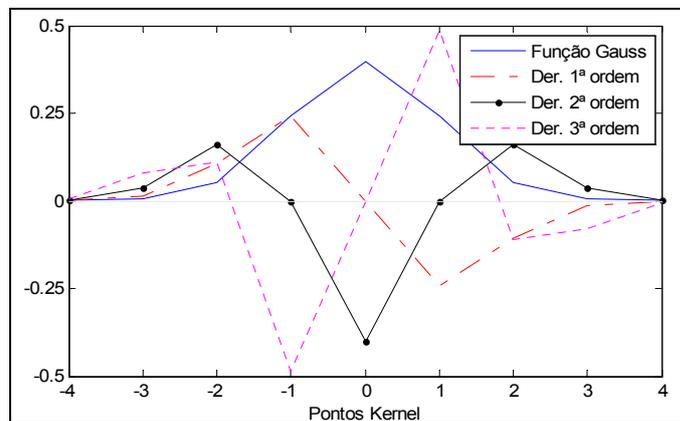


Fig. 4.11 – Representação da função Gaussiana e das três primeiras derivadas espaciais para os pontos *Kernel*.

As derivadas pela técnica de filtragem *Spline* são definidas com base nos coeficientes de funções *B-Spline* de grau três por aproximação destas funções a uma sequência de pontos do campo de medida. A função a uma dimensão para uma distribuição regular de pontos  $x_i$ , escreve-se [16]:

$$S(x_i) = \sum_{j=1}^m B_{j,3}(x_i) a_j \quad \text{para } i=1, \dots, m \quad (4.18)$$

onde os coeficientes  $B_{j,3}$  são definidos a partir da função recursiva de Boor [16],  $m$  representa o número da sequência de pontos e  $a_j$  os coeficientes da função até três termos não nulos. Os

coeficientes da função são determinados pelo método dos mínimos quadrados da função B-Spline ao campo de medida:

$$\sum_{j=1}^m |S(x_j) - f(x_j)|^2 \tag{4.19}$$

onde  $f(x_i)$  corresponde à ordenada da sequência de pontos do campo de medida de abcissa  $x_i$ .

A partir destes coeficientes são definidas as derivadas da função B-Spline de ordem  $n$  (até à quarta ordem), conforme a seguinte expressão:

$$\frac{\partial^n S}{\partial x^n}(x_i) = \sum_{j=1}^m B_{j,3}(x_i) a_{j+n} \quad \text{com} \quad a_{j+n} = 0 \quad \text{para} \quad j+n > m; \quad n = 1, 2, 3, 4 \tag{4.20}$$

Por fim, o cálculo da derivada espacial do campo de medida e a filtragem do ruído podem ser obtidos recorrendo à transformada de Fourier directa FFT e inversa  $FFT^{-1}$ . O processo é realizado no domínio do número de onda, onde as componentes de alta frequência, correspondentes ao ruído de experimental, são suprimidas e as restantes componentes multiplicadas por um vector do número de onda. A derivada espacial de ordem  $n$  e  $m$  do campo de medida  $f(x, y)$  respectivamente para as direcções  $x$  e  $y$  são definidas por [35]:

$$\frac{\partial^{n+m} f(x, y)}{\partial x^n \partial y^m} = FFT^{-1} \left[ (-ju)^n (-jv)^m \times FFT(f(x, y)) \times \bar{h}(u, v) \right] \tag{4.21}$$

onde a função  $\bar{h}(u, v)$  representa o filtro,  $u$  e  $v$  o vector número de onda, respectivamente para as direcções  $x$  e  $y$  do campo, e  $j = \sqrt{-1}$ .

Conforme anteriormente referido, as componentes da informação de ordem superior são fundamentais para uma correcta representação, principalmente, da segunda e terceira derivadas espaciais. Estas estão directamente associadas à identificação do dano estrutural através da localização de descontinuidades nos campos do momento-flector e esforço de corte (capítulo 2). Por seu lado, as descontinuidades nas funções são também representadas por termos de ordem superior. Assim, para garantir que as componentes da informação necessária à representação destas descontinuidades não são eliminadas no processo de filtragem do campo de medida, é proposta a seguinte metodologia numérica. Ao contrário da aplicação de um filtro único ao campo de medida é aqui proposta uma filtragem progressiva da informação ao longo do processo de cálculo das sucessivas derivadas espaciais. Esta abordagem é realizada de modo a preservar as componentes de ordem superior e simultaneamente eliminar o ruído experimental de alta frequência.

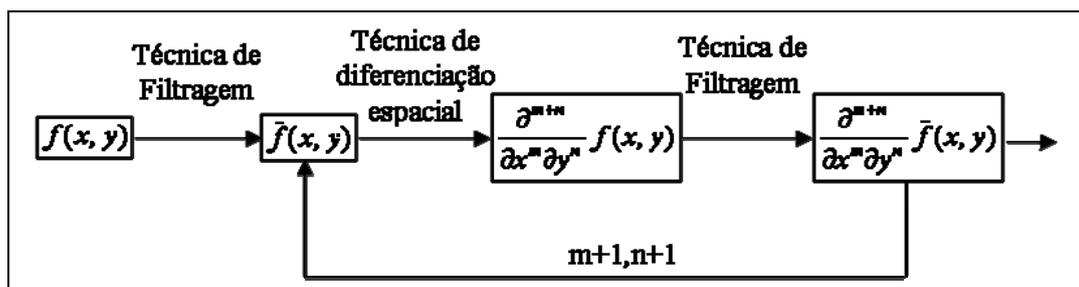


Fig. 4.12 – Representação da metodologia para o cálculo das derivadas espaciais de ordem elevada.

A escolha dos parâmetros do filtro e da técnica para o cálculo da derivada espacial conduz a um processo iterativo e heurístico. No entanto, prova-se que, a partir de dados experimentais, estes

necessitam de pequenos ajustes e em poucas iterações se chega à solução óptima (anexo B).

O desempenho das três técnicas de diferenciação espacial, seguindo a metodologia aqui proposta, será em seguida analisado através da obtenção do esforço de corte para o eixo  $y$  a partir do campo de deslocamentos, o qual envolve o cálculo das derivadas espaciais do campo de deslocamentos até à terceira ordem. Este campo é obtido por técnica interferométricas pulsadas, as quais estão mais susceptíveis ao ruído. Deste modo, pretende-se abordar as situações mais desfavoráveis ao cálculo das derivadas espaciais e nas quais não é viável a aplicação das técnicas experimentais de múltiplos registos apresentadas no capítulo 3. O ensaio experimental é realizada numa placa de alumínio encastrada nos dois bordos laterais e sujeita a uma força de impacto no lado posterior à face de medição [31]. Esta está pintada de branco de forma a uniformizar a reflexão da luz pela superfície. Um LASER de Rubi LUMONICS® é usado para gerar um par de impulsos separados no tempo entre  $1\mu s$  a  $800\mu s$ . A imagem global do ensaio experimental está representada na Fig. 4.13.

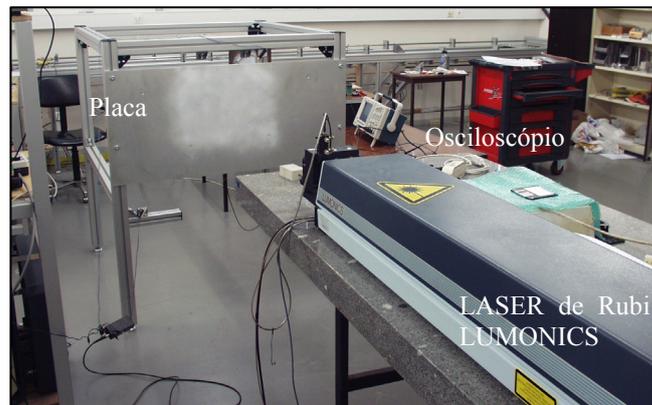


Fig. 4.13 – Imagem global da montagem experimental.

O tempo entre o disparo do LASER e o impacto é sincronizado de modo a que este ocorra no intervalo entre os dois disparos. Um pêndulo de massa reduzida é usado para gerar o impacto. O sinal de disparo é gerado a partir da interrupção pelo impactor de um feixe LASER de He-Ne, Fig. 4.14. O sinal dos dois disparos LASER é adquirido por um fotodetector de resposta rápida, montado na frente da placa.

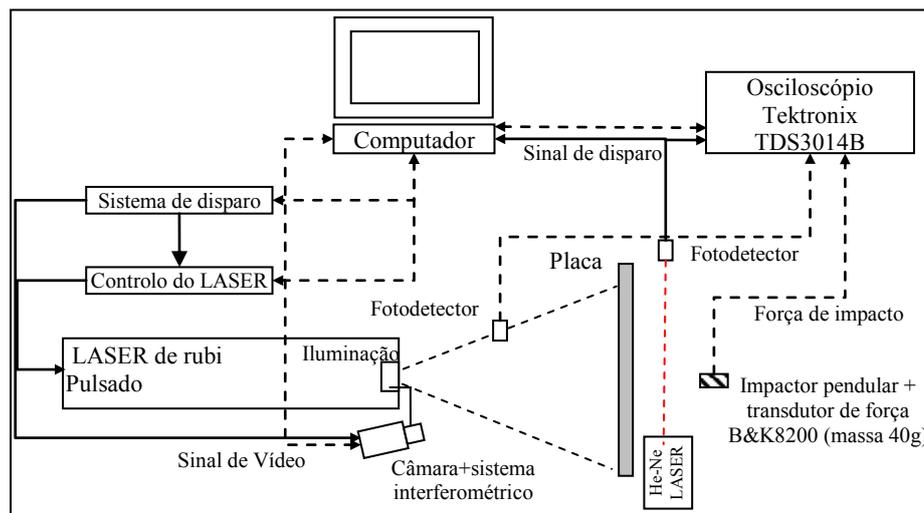


Fig. 4.14 – Representação esquemática do sistema de medição experimental.

A evolução no tempo da força de impacto e dos dois disparos são registados no osciloscópio para futura simulação numérica da resposta da placa. Os valores obtidos servem de referência à comparação dos resultados obtidos pelas três técnicas de diferenciação espacial. Os dois disparos do LASER são registados por uma câmara CCD através de um interferómetro de *Michelson* para medição dinâmica (capítulo 3). O mapa de fase da interferência é determinado a partir dos dois registos holográficos por desmodulação da portadora introduzida nas franjas primárias em cada registo. Para diferentes instantes

de tempo foram registados os mapas de fase da propagação das ondas de flexão na placa, Fig. 4.15.

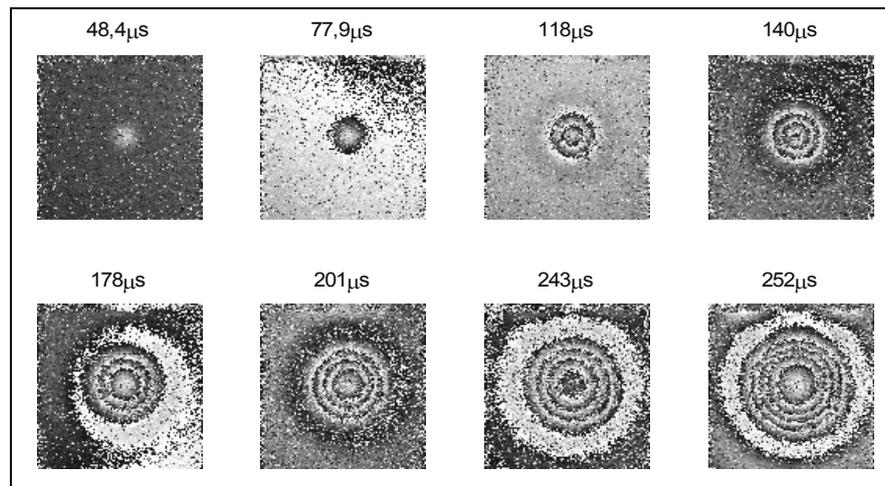


Fig. 4.15 – Propagação das ondas de flexão para diferentes instantes após o impacto.

Observando os mapas de fase verifica-se que franjas são circulares e concêntricas devido às propriedades isotrópicas do alumínio. A partir do instante  $221\mu s$  têm início a reflexão das ondas de flexão no bordo superior da placa, registando-se alteração da forma circular na franja externa. Para análise dos métodos de diferenciação espacial seleccionou-se o mapa de fase correspondente ao instante  $243\mu s$  após o impacto. Na Fig. 4.16 estão representados o mapa de fase medido, o mapa de fase filtrado e o respectivo campo de deslocamentos.

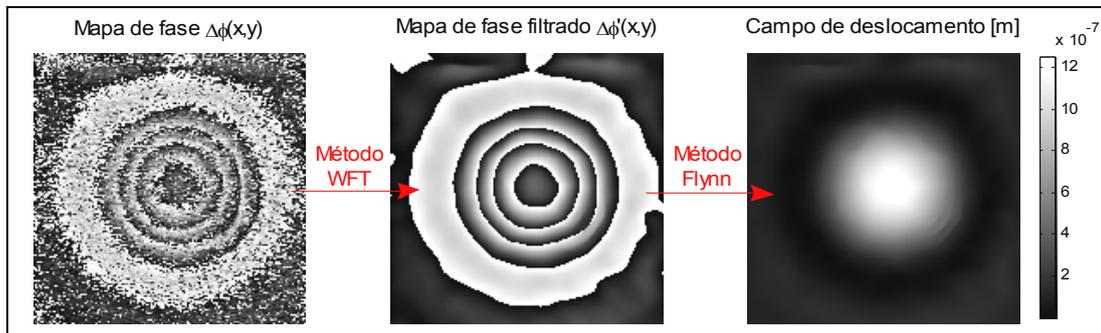


Fig. 4.16 – Mapas de fase e campo de deslocamentos da propagação das ondas de flexão numa placa para o instante  $243\mu s$  após impacto.

A simulação numérica do esforço de corte na placa foi realizada no programa de elementos finitos Ansys®, sendo utilizado uma malha de elementos de casca (Shell93). A força de impacto e o instante de medição foram obtidos a partir do registo experimental dos sinais do transdutor de força e do duplo disparo do LASER, Fig. 4.17.

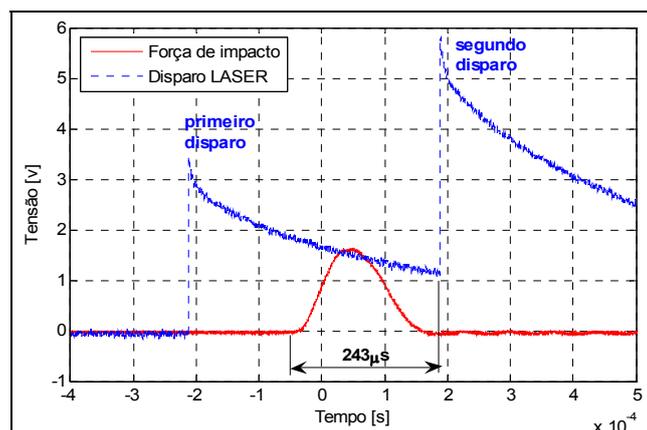


Fig. 4.17 – Registo da evolução no tempo da força de impacto e do duplo disparo do LASER.

A determinação por via experimental dos esforços de corte na placa requer o cálculo da derivada espacial do campo de deslocamentos até à terceira ordem de acordo com a teoria de Kirchhoff para flexão de placas finas [37]. O esforço de corte representa o caso mais exigente no cálculo das derivadas espaciais. O esforço de corte relativo ao eixo  $y$  vem dado por [38]:

$$Q_{yy}(x, y) = -D \left( \frac{\partial^3 w(x, y)}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 w(x, y)}{\partial x \partial y^2} \right) \quad (4.22)$$

onde  $w(x, y)$  representa o campo de deslocamentos fora-do-plano e  $D$  o módulo de rigidez à flexão da placa, definido por:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (4.23)$$

sendo  $E$  o módulo de Young,  $h$  a espessura da placa e  $\nu$  o coeficiente de Poisson. Para o campo de deslocamentos em análise determinaram-se os esforços de corte através da metodologia de diferenciação proposta. Nesta, foram utilizadas as três técnicas de diferenciação, sendo a técnica de filtragem Média comum a todas as análises. Os seus parâmetros foram determinados por aproximação dos campos obtidos à solução numérica. Na Fig. 4.18 estão representados o campo dos esforços de corte obtidos através das três técnicas de diferenciação e pelo método dos elementos finitos.

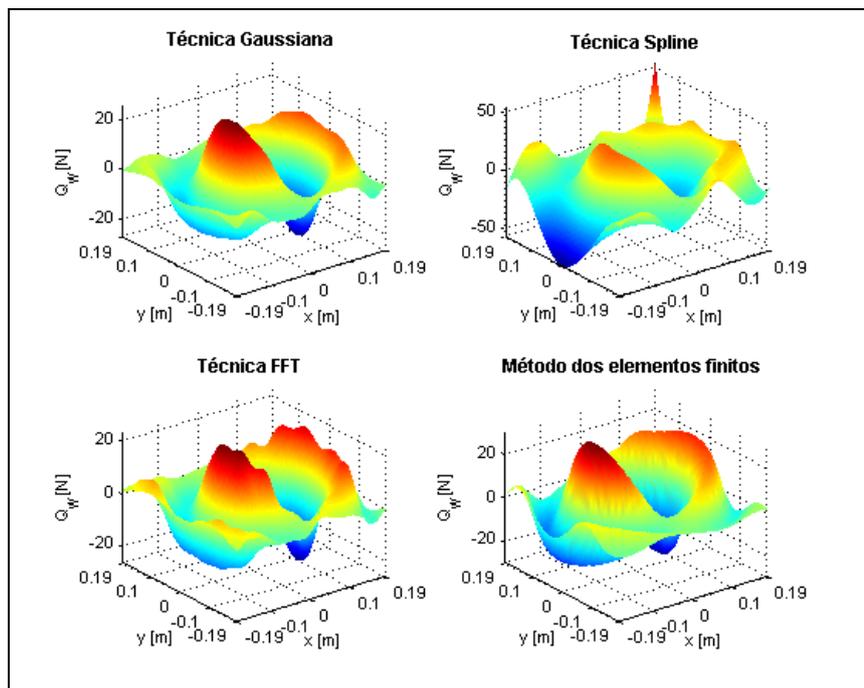


Fig. 4.18 – O campo do esforço de corte obtido através de três de diferenciação e método dos elementos finitos.

A análise destes resultados revela que a distribuição do esforço de corte obtida pelas técnicas Gaussiana e FFT são as que apresentam globalmente um comportamento mais próximo do campo calculado pelo método dos elementos finitos. Todavia, o andamento mais suave observado no esforço de corte obtido pela técnica Gaussiana e a menor diferença entre os dois mapas (anexo B), permitem afirmar ser esta a técnica mais eficaz na diferenciação espacial. De outro modo, observando individualmente os mapas de falsa cor correspondentes aos campos de deslocamentos, rotação e momentos-flectores, representados Fig. 4.19, conclui-se que cada um deles apresenta uma boa concordância com a solução obtida pelo método dos elementos finitos. Todavia, em consequência do

início da reflexão das ondas no bordo superior da placa, são identificadas pequenas diferenças nesta região. Com efeito, as técnicas Média e Gaussiana requerem a extensão da informação para além do bordo. Este processo é de difícil execução, pois é necessário garantir a continuidade do campo de deslocamentos e das suas derivadas espaciais até à terceira ordem. O problema pode ser resolvido para funções periódicas e funções de derivadas nulas no bordo através de simetria e replicação da informação, respectivamente. Todavia, estas condições de fronteira não são verificadas para o campo de deslocamentos no bordo superior da placa, razão que justifica as diferenças nas derivadas observadas, principalmente, nos campos que envolvem as derivadas na direcção do eixo  $y$ . De igual forma se verifica que este se propaga às regiões vizinhas, aumentando este efeito com a ordem da derivada.

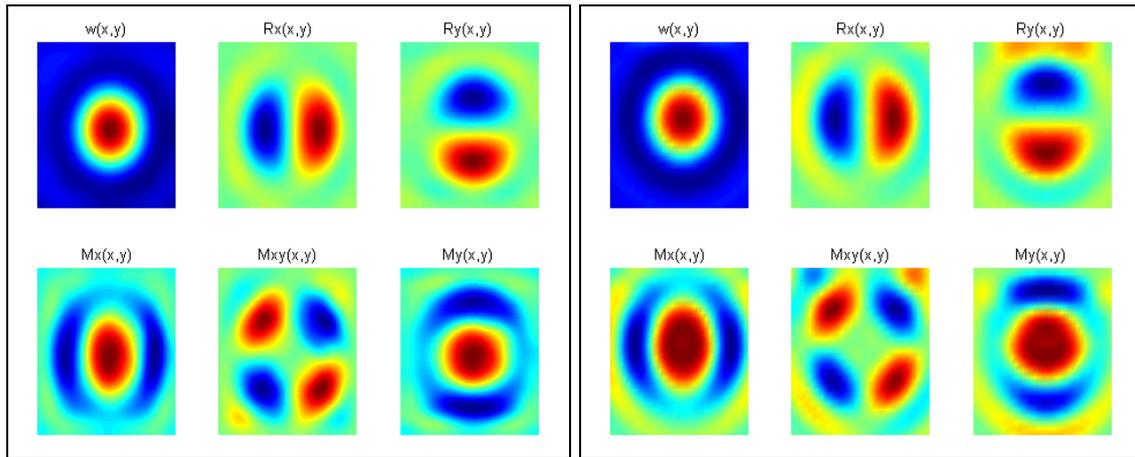


Fig. 4.19 – Representação dos campos de deslocamento, rotação e momentos-flectores obtidos por via experimental (lado esquerdo) e por via do método dos elementos finitos (lado direito).

Para um estudo comparativo da metodologia experimental de múltiplos registos com a metodologia numérica definida com base na técnica de diferenciação Gaussiana, é retomada a análise das derivadas espaciais da placa de Aço, encastrada nos bordos e submetida na direcção transversal a uma pressão uniforme de  $180 \text{ N/m}^2$ , ver capítulo 3. Este estudo tem por objectivo seleccionar a técnica mais eficaz na determinação das sucessivas derivadas ao longo da mediatriz horizontal da placa. Neste caso a comparação é realizada com a solução analítica. A partir do perfil campo de rotações medido são determinadas as segundas e terceiras derivadas espaciais por via da metodologia numérica assente na técnica de filtragem Média e técnica de diferenciação Gaussiana. Na Fig. 4.20 estão representadas as derivadas espaciais determinadas pelas duas técnicas em análise e pela solução analítica.

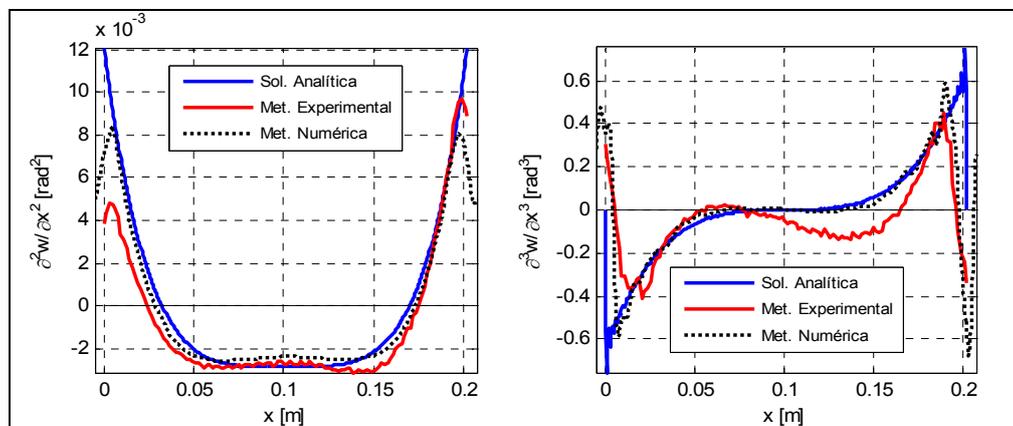


Fig. 4.20 – Perfis da segunda e terceira derivadas espaciais obtidas através das metodologias experimental e numérica, e por via da solução analítica.

Tomando para referência o perfil da solução analítica, verifica-se que as derivadas obtidas pela metodologia numérica apresentam um melhor comportamento em relação às obtidas pela metodologia

experimental. Refira-se que o método numérico tem por base um único campo da primeira derivada espacial, enquanto que o experimental utiliza vários registos deste campo. Para clarificar a diferença de comportamento observado, Fig. 4.20, à semelhança de Murukeshan et al. [39], procedeu-se à determinação da segunda e terceira derivadas através da aplicação da metodologia experimental aos sucessivos campos obtidos por translação digital de imagem de um único campo da primeira derivada espacial. As segundas e terceiras derivadas espaciais, seguindo a metodologia experimental com translação digital de imagem (Met. Digital), metodologia numérica (Met. Numérica) e solução analítica (Sol. Analítica) estão representadas na Fig. 4.21.

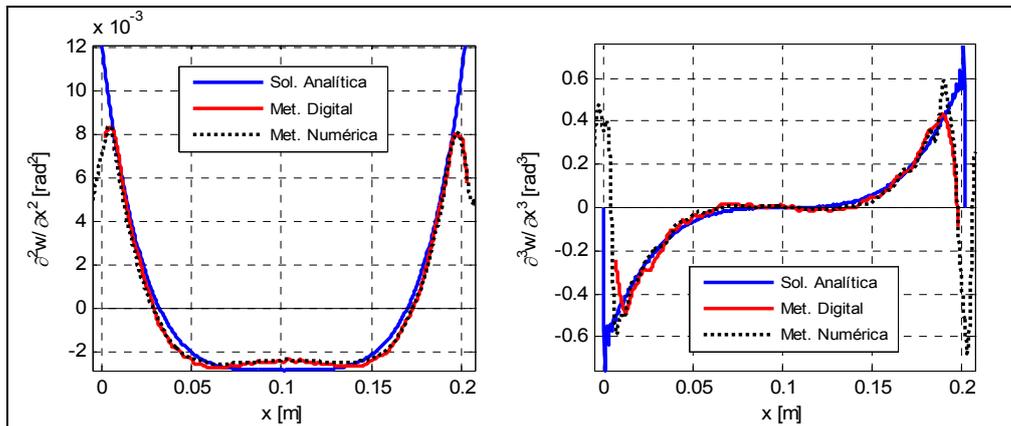


Fig. 4.21 – Perfis da segunda e terceira derivadas espaciais obtidas através das metodologias digital e numérica, e por via da solução analítica.

A análise das segundas e terceiras derivadas obtidas por via numérica e digital, permite verificar que ambas apresentam um comportamento muito semelhante e próximo da solução analítica. Este resultado evidencia, desde já, que a pior qualidade dos resultados obtidos pelo método experimental está relacionado com a propagação de erros devidos às imprecisões no desvio lateral entre as frentes de onda e à recominação de ruído dos mapas de fase.

#### 4.8 Discussão e conclusões

As técnicas de processamento de imagem dedicadas à filtragem são eficazes na redução do ruído experimental e contribuem de forma efectiva para uma melhoria da qualidade dos resultados experimentais. Ao nível dos mapas de fase, as técnicas WFT e STFT apresentam um desempenho superior, enquanto que para o campo de medida são as técnicas Média, Gaussiana, *Spline* e FFT. As técnicas de *unwrapping* permitem a determinação do campo de medição através da correcta remoção das descontinuidades no mapa de fase. Porém, este processo torna-se complexo na presença das inconsistências da fase. Para a resolução deste problema são propostas várias técnicas seguindo duas metodologias: métodos selectivos do caminho e métodos da minimização da norma do erro. Os primeiros mostram-se particularmente eficazes na resolução de inconsistências de fase concentradas numa pequena região, enquanto que os segundos métodos possuem um melhor desempenho na resolução de inconsistências distribuídas de forma aleatória ao longo do mapa. No entanto, o enquadramento dos mapas de fase numa destas duas categorias nem sempre é fácil. Nestes casos, o procedimento mais indicado é avaliar o desempenho individual destas técnicas, começando pelas de menor tempo de processamento.

A metodologia numérica para a determinação dos esforços internos a partir do campo de deslocamentos, gerado pela propagação das ondas de flexão numa placa, demonstrou ser muito eficaz. A técnica de filtragem Média e a técnica de diferenciação Gaussiana são combinadas para obter as derivadas espaciais até à terceira ordem e evitar propagar o ruído experimental de alta frequência. Da análise comparativa entre os perfis da segunda e terceira derivadas, obtidos pelas metodologias experimentais e numérica, permitiram seleccionar a metodologia numérica como sendo a mais eficaz na diferenciação espacial. Os resultados obtidos para a metodologia digital mostram que o inferior

desempenho da metodologia experimental é causado por eventuais desalinhamentos do desvio lateral das frentes de onda entre registos e pela combinação do ruído experimental dos mapas de fase.

As sucessivas derivadas espaciais traduzem-se pelo aumento da contribuição dos termos de alta ordem do sinal e pela amplificação do ruído experimental de alta frequência. A metodologia numérica apresentada utiliza a técnica de filtragem para atenuar este ruído ao longo do processo de diferenciação. Porém, neste processo são também eliminados termos de alta ordem do sinal essenciais para a representação das derivadas de ordem superior. Refira-se que a localização dos danos estruturais é realizada a partir da identificação de descontinuidades na distribuição do momento-flector e esforço de corte, os quais são determinados através da curvatura e derivada da curvatura, respectivamente, segunda e terceira derivadas espaciais do campo de deslocamentos. Estas descontinuidades também são representadas por termos de alta ordem no domínio do número de onda. Deste modo, a metodologia de diferenciação numérica deverá resultar do compromisso entre as componentes do sinal a preservar e as componentes do ruído que se pretende eliminar. Esta complexidade conduz a um processo iterativo e heurístico em que por vezes se torna difícil a selecção da melhor metodologia. A partir da representação no domínio do número de onda do perfil da segunda derivada espacial, Fig. 4.22, obtidas para o ensaio da placa encastrada (capítulo 3), por aplicação da metodologia de diferenciação numérica ao campo de rotações medido, e por via da solução analítica, é possível observar-se a atenuação dos termos de mais alta ordem.

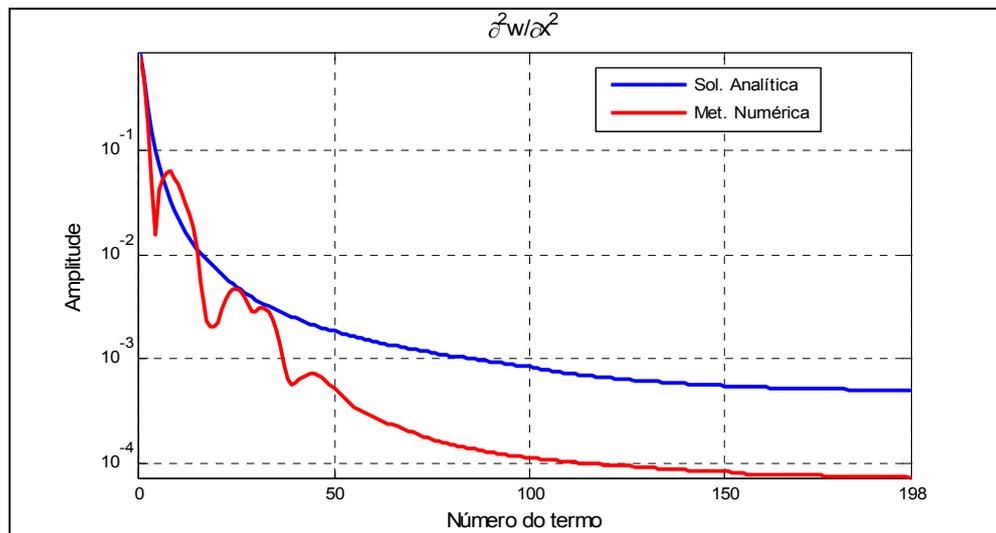


Fig. 4.22 – Representação no domínio do número de onda da primeira derivada espacial do campo de rotações medido ao longo da mediatriz da placa encastrada (capítulo 3).

#### 4.9 Bibliografia

1. Chousal, J.A.G., *Técnicas de Processamento de Imagens Obtidas por Métodos Ópticos em Análise Experimental de Tensões*, Tese de Doutoramento. 1999: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
2. Rizzoni, G., *Principles and Applications of Electrical Engineering*. 2nd ed. 1999: McGraw-Hill.
3. Kreis, T., *Handbook of holographic interferometry : optical and digital methods*. 2005, Weinheim: Wiley-VCH. xii, 542 p.
4. Inc, J.P., *CV-M2 Operational Manual*, U. JAI Pulnix Inc, Editor. 2005.
5. Gabor, D., *Theory of Communication*. IEE (London), 1946. 93(III): p. 429-457.
6. Reinsch, C., *Citation Classic - Smoothing by Spline Functions*. Current Contents/Engineering Technology & Applied Sciences, 1982(24): p. 20-20.
7. Gonzalez, R.C. and P.A. Wintz, *Digital image processing*. 2nd ed. 1987, Reading, Mass.: Addison-Wesley. xviii, 503 p.
8. Lim, J.S., *Two-Dimensional Signal and Image Processing*. 1990: Prentice Hall.

9. Ghiglia, D.C. and M.D. Pritt, *Two-dimensional phase unwrapping : theory, algorithms, and software*. 1998, New York: Wiley. xiv, 493 p.
10. Aebischer, H.A. and S. Waldner, *A simple and effective method for filtering speckle-interferometric phase fringe patterns*. Optics Communications, 1999. 162(4-6): p. 205-210.
11. Asundi, A. and W. Jun, *Strain contouring using Gabor filters: principle and algorithm*. Optical Engineering, 2002. 41(6): p. 1400-1405.
12. Jun, W. and A. Asundi, *Strain contouring with Gabor filters: filter bank design*. Applied Optics, 2002. 41(34): p. 7229-7236.
13. Kemao, Q., *Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis*. Applied Optics, 2004. 43(13): p. 2695-2702.
14. Kemao, Q., *Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: addendum*. Applied Optics, 2004. 43(17): p. 3472-3473.
15. Kemao, Q., Seah Hock Soon, Anand Assundi, *A Simple phase unwrapping approach based on filtering by windowed Fourier transform*. Optics & Laser Technology, 2005. 37: p. 458-462.
16. Boor, C.d., *A Practical Guide to Splines*. 1978: Springer-Verlag.
17. Daubechies, I., *Ten lectures on wavelets*, ed. SIAM. 1992.
18. Servin, M. and F.J. Cuevas, *A novel technique for spatial phase-shifting interferometry*. J. Mod. Opt., 1995. 42: p. 1853-1862.
19. Goldstein, R.M., R.H.A. Zebker, and C.L. Werner, *Satellite radar interferometry: two dimensional phase unwrapping*. Radio Science, 1988. 23(4): p. 713-720.
20. Bone, D.J., *Fourier Fringe analysis: the two-dimensional phase unwrapping problem*. Appl Opt, 1991. 30(25): p. 3627-3632.
21. Xu, Y. and C. Ai. *Simple and effective phase unwrapping technique*. in *Interferometry IV: Techniques and Analysis*. p. 254-263,1993. Bellingham: SPIE.
22. Quiroga, J.A., A. González-Cano, and E. Bernabeu, *Phase-unwrapping algorithm based on an adaptive criterion*. Appl Opt, 1995. 34(14): p. 2560-2563.
23. Prati, C., M. Giani, and N. Leuratti. *SAR interferometry: A 2-D phase unwrapping technique based on phase and absolute values information*. in *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. p. 2043-2046,1990: IEEE.
24. Flynn, T.J. *Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map*. in *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. p. 2057-2059,1996: IEEE.
25. Lin, Q., J.F. Vesecky, and H. Zebker, *New approaches in interferometric SAR data processing*. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1992. 30(3): p. 560-567.
26. Flynn, T.J., *Two-dimentional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity*. Journal of the Optical Society of America A, 1997. 14(10): p. 2692-2701.
27. Song, S.M., S. Napel, N.J. Pelc, and G.H. Glover, *Phase Unwrapping of MR Images Using Poisson Equation*. IEEE Trans Imag Process., 1995. 4: p. 667-676.
28. Volkov, V.V. and Y.M. Zhu, *Deterministic phase unwrapping in the presence of noise*. Optics Letters, 2003. 28(22): p. 2156-2158.
29. Gollub, G.H. and C.F.V. Loan, *Iterative methods for linear systems*. 2nd ed. Matrix Computations. 1990: Johns Hopkins University Press.
30. Lopes, H.M.R., *Estudo do Fluxo de Energia Vibratória em Vigas e Placas*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.2001.
31. Lopes, H.M.R., R.M. Guedes, and M.A. Vaz, *An Improved Mixed Numerical-Experimental Method for Stress Field Calculation*. Optics & Laser Technology, 2007. 39(5): p. 1066-1073.
32. Blom, J., B.M.T.H. Romeny, A. Bel, and J.J. Koenderink, *Spatial Derivatives and The Propagation of Noise in Gaussian Scale Space*. Visual Communication and Image Representation, 1993. 4(1): p. 1-13.
33. Lopes, H.M.R., *Estudo do Fluxo de Energia Vibratória em Vigas e Placas*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.2002.
34. Unser, M., A. Aldroubi, and M. Eden, *B-Spline Signal-Processing .I. Theory*. Ieee Transactions on Signal Processing, 1993. 41(2): p. 821-833.

35. Arfken, G.B., *Mathematical methods for physicists*. 5th Edition ed. 2000: Academic Press.
36. Boomgaard, R.V.d. and A. Smeulders, *The morphological structure of images, the differential equations of morphological scale-space*. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 1994. 16(11): p. 1101-1113.
37. Timoshenko, S. and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of plates and shells*. 2d ed. Engineering societies monographs. 1959, New York,: McGraw-Hill. 580 p.
38. Ugural, A.C., *Stresses in plates and shells*. 1981, New York: McGraw-Hill. xv, 317 p.
39. Murukeshan, V.M., O.L. Seng, and A. Asundi, *Polarization phase shifting shearography for optical metrological applications*. Optics and Laser Technology, 1998. 30(8): p. 527-531.



# Capítulo 5

## Caracterização do Dano Estrutural por Via Experimental

---

### 5.1 Introdução

Na sequência da metodologia de diferenciação numérica estabelecida no capítulo anterior, apresenta-se agora a sua aplicação à determinação dos esforços internos momento-flector e esforço de corte, a partir de dados experimentais. Recorrendo à determinação do Índice de Sensibilidade ao Dano (ISD) destes esforços, pretende-se avaliar a eficácia das diferentes técnicas experimentais na localização e quantificação da severidade do dano em estruturas, tipo viga e placas de materiais como alumínio, um laminada compósita e uma estrutura em sanduíche.

O estudo do dano estrutural por via experimental inicia-se com a análise das respostas estática e modal de uma viga em alumínio, respectivamente, para as situações de apoio encastrada-livre e livre-livre e envolvendo diferentes casos de dano. Os danos são introduzidos pela inclusão de pequenos entalhes criados segundo a perpendicular à direcção longitudinal da viga, sendo a severidade controlada pela sua dimensão. O campo de deslocamentos fora-do-plano da resposta modal é medido com um sistema de ESPI Pulsado. Já o campo de rotações, definido pelo gradiente espacial do campo de deslocamentos, é medido na resposta estática com o sistema de *Shear* e na resposta modal com o sistema de *Shear* Pulsado. As derivadas espaciais da segunda e terceira ordem do campo de deslocamentos, relacionadas com o momento-flector e esforço de corte na viga [1], são determinadas por aplicação da metodologia de diferenciação numérica, estabelecida no capítulo anterior. A localização dos danos é realizada a partir dos valores máximos e/ou perturbações nos Índices de Sensibilidade ao Dano (ISDs) dos campos momento-flector e esforço de corte. Por comparação com os resultados numéricos apresentados no capítulo 2, é validada esta metodologia e identificada a forma mais eficaz na detecção do dano estrutural. Este estudo prossegue com a análise estrutural de dois danos num laminado compósito fabricado em resina epóxida e fibra de carbono. Os danos/delaminações são introduzidos por dois impactos de baixa velocidade. A partir do campo das curvaturas da resposta estática e do ISD do campo das curvaturas da resposta modal e transiente são investigados os danos na placa. O campo de rotações da resposta estática é medido com o sistema *Shear*, para solicitações uniformes como térmica e por depressão. Os sistemas ESPI e *Shear* Pulsados são utilizados, respectivamente, para a medição dos campos de deslocamentos e rotações das respostas modal e transiente da placa, criados pela excitação acústica e por impacto, respectivamente. O campo correspondente à curvatura é obtido por aplicação da metodologia de diferenciação numérica a estes dois campos. A análise comparativa do desempenho do conjunto sistema de medição e tipo de solicitação na detecção estrutural do dano é apresentado. Estabelecido a metodologia mais eficaz, procede-se então à identificação de múltiplos descolamentos num painel sanduíche de alumínio, semelhantes aos utilizados em estruturas de aeronáutica.

### 5.2 Análise da viga

Os ensaios experimentais têm por base o modelo de viga definido para o estudo numérico, apresentado no capítulo 2. O estudo engloba a medição dos campos de deslocamentos e de rotações para a resposta estática e modal da viga. Na resposta estática é medido o campo de rotações com o

sistema *Shear*, para a resposta modal são medidos os campos de deslocamento e rotações com os sistemas ESPI e *Shear* Pulsados, respectivamente. Por integração numérica do campo de rotações é obtido o campo de deslocamentos, assim como, a segunda e terceira derivada espacial do campo de rotações, correspondentes à curvatura e derivada da curvatura da viga, são determinadas por aplicação da metodologia de diferenciação numérica. Já a partir do campo de deslocamentos medido são determinados a rotação, curvatura e derivada da curvatura na viga pela aplicação da metodologia de diferenciação numérica. Com base a segunda derivada do campo de deslocamento ou curvatura e a terceira derivada do campo dos deslocamentos ou derivada da curvatura e recorrendo à teoria de Euler-Bernoulli para vigas finas [1], são determinados os esforços internos, momento-flector e esforço de corte. Por fim, a determinação estrutural do dano é realizada a partir da análise do ISD dos campos de deslocamento, rotação, momento-flector e esforço de corte.

### 5.2.1 Introdução dos danos na viga

Os danos são introduzidos na viga através da criação de pequenos entalhes na direcção transversal à superfície, sendo usadas pequenas limas para o desbaste de material. A sua localização é estabelecida para as duas posições de máxima sensibilidade ao dano do campo de momento-flector, relativas ao primeiro e segundo modos naturais de vibração da viga livre-livre, capítulo 2. No sentido de se estudar a influência geométrica do dano, são analisados diferentes casos, Fig. 5.1.

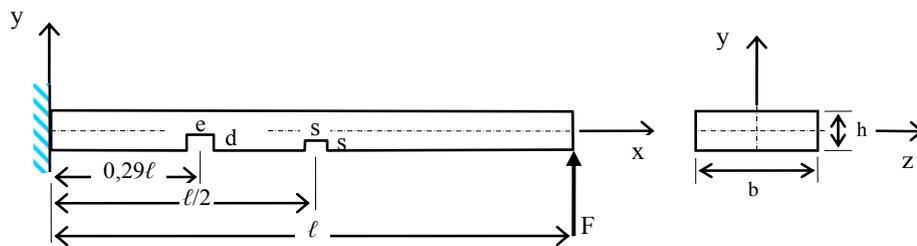


Fig. 5.1– Representação da viga em consola com dois danos estruturais.

As características geométricas da viga e dos danos são as seguintes:

$$\begin{aligned} \ell &= 0,26\text{m} & h &= 6 \times 10^{-3}\text{m} & b &= 0,045\text{m} \\ d &= 0,4 \times 10^{-3}\text{m}; 0,65 \times 10^{-3}\text{m} & e &= 4 \times 10^{-3}\text{m} & s &= 0,4 \times 10^{-3}\text{m}; 0,75 \times 10^{-3}\text{m} \end{aligned}$$

Neste estudo são analisados quatro casos de dano, cujas dimensões e parâmetros de dano se apresentam na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1 – Casos de dano estrutural analisados na viga.**

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
$d (\delta_k)$	0,4 mm (0,175)	0,65 mm (0,25)	0,65 mm (0,25)	0,65 mm (0,25)
$s (\delta_k)$	0 mm	0 mm	0,4 mm (0,175)	0,75 mm (0,29)

Sendo  $\delta_k$  o parâmetro de dano que relaciona o decréscimo de rigidez local entre a secção danificada e não danificada, podendo ser determinada pela seguinte expressão:

$$\delta_k = \frac{EI^d}{EI} = \frac{I^d}{I} = 1 - \frac{3}{h}(d;s) + \frac{6(d;s)^2}{h^2} - \frac{4(d;s)^3}{h^3} \quad (5.1)$$

sendo  $E$  o módulo de Young e  $I$  a rigidez à flexão da secção resistente para a posição do dano.

### 5.2.2 Resposta estática

A montagem experimental da viga em consola (encastrada-livre) foi realizada sobre uma mesa óptica da Newport®, apoiada sobre um maciço de betão, situação que confere à montagem um elevado isolamento às vibrações externas. O apoio de encastramento foi materializado por um suporte em aço, com elevada rigidez, fixo à mesa por 12 parafusos M6, que restringem os movimentos de translação e rotação da viga. O carregamento é aplicado na extremidade livre da viga por um posicionador Micro-Control® , Fig. 5.2. Para a força aplicada  $F = 0,6N$  obteve-se um deslocamento máximo na extremidade livre da viga de  $57\mu m$ .

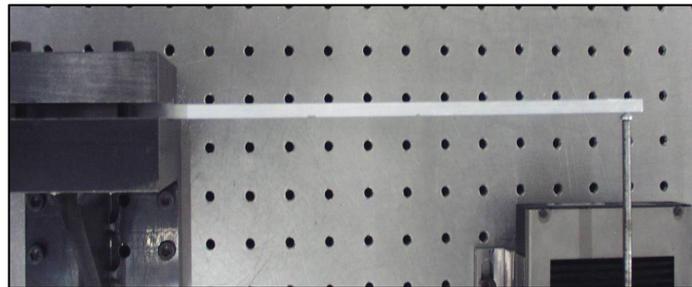


Fig. 5.2 – Imagem da montagem experimental da viga em consola (encastrada -livre).

O campo de rotação da resposta estática da viga é medido pelo sistema *Shear*, Fig. 5.3, sendo usada a técnica de modulação temporal de fase. Neste ensaio, é usado um desvio horizontal entre as duas frentes de onda de  $-13,5mm$ . Um LASER de emissão contínua da Coherent®, modelo Verdi com comprimento de onda de  $532nm$ , é utilizado para iluminar a superfície de medição. Esta por sua vez, é pintada de branco para aumentar e uniformizar o índice de irradiação da luz LASER.



Fig. 5.3 – Imagem do sistema *Shear* (Anexo C).

O campo de rotações na direcção longitudinal da viga é determinado pela aplicação das técnicas de filtragem de fase e métodos de *unwrapping* aos mapas de fase medidos seguindo o procedimento descrito no capítulo anterior. Como exemplo, apresenta-se na Fig. 5.4, o mapa de fase medido, o mapa de fase filtrado e o respectivo campo contínuo de rotações.

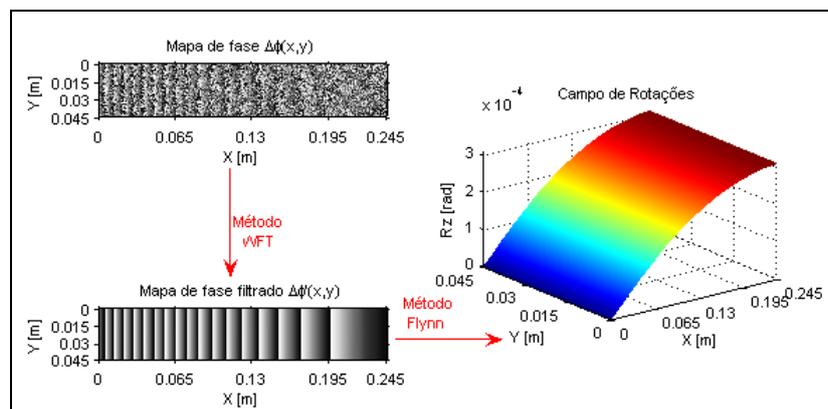


Fig. 5.4– Mapa de fase medido, mapa de fase filtrado e respectivo campo de rotações da viga em consola com carregamento na extremidade livre.

Os campos de deslocamentos e esforços internos na viga, momento-flector e esforço de corte, são determinados, respectivamente, por integração numérica e pela aplicação da metodologia de diferenciação numérica ao campo de rotações. O perfil do campo de deslocamentos ao longo da mediatriz e segundo a direcção longitudinal da viga é obtido por integração numérica do campo de rotações. Este pode ser determinado recorrendo à seguinte expressão:

$$Y(i) = \sum_{i=1}^n Rz(i)\Delta x + C \quad (5.2)$$

onde  $C$  é a constante a determinar a partir das condições de fronteira do problema (que neste caso vale zero),  $Rz$  o perfil do campo de rotações,  $i$  a coordenada do campo,  $n$  o número de pontos em que o domínio está discretizado e  $\Delta x$  designa o passo entre coordenadas. Os campos de momento-flector e esforço de corte são determinados, respectivamente, a partir da segunda e terceira derivadas espaciais, seguindo a teoria de Euler-Bernoulli para vigas finas [1]. Na Fig. 5.5 são comparados os perfis dos campos de deslocamentos, rotações, momento-flector e esforço de corte obtidos por via experimental, com integração numérica e diferenciação espacial do perfil do campo de rotações ao longo da mediatriz longitudinal da viga (Experimental), e os calculados pelo método dos elementos finitos (MEF).

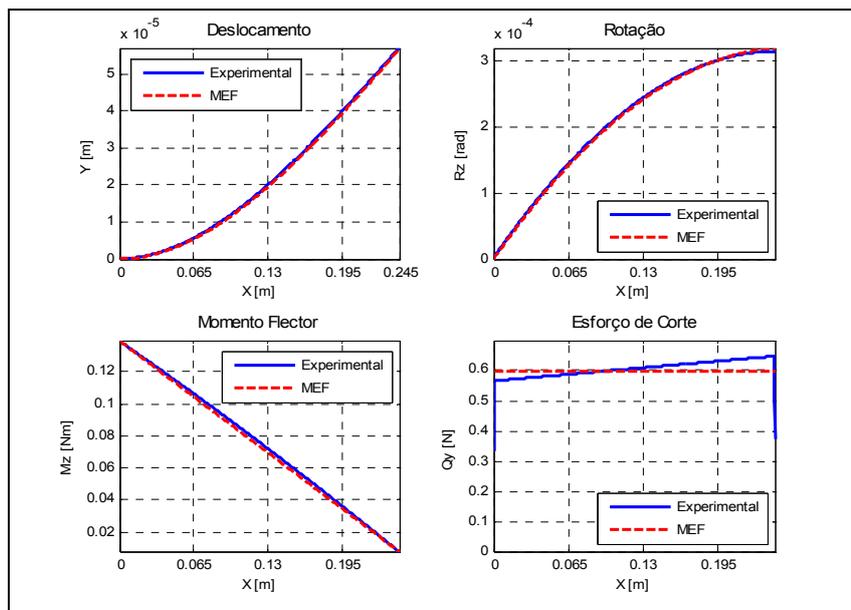


Fig. 5.5– Representação dos perfis dos campos de deslocamentos, rotações, momento-flector e esforço de corte da viga em consola.

Junto ao apoio, Fig. 5.5, os valores nulos do deslocamento e da rotação validam a eficiência do encastramento. A análise dos perfis mostra uma boa concordância entre os resultados experimentais e os obtidos pelo MEF. Já no que respeita ao esforço de corte, se verifica um desvio no perfil experimental, o qual resulta da aplicação da metodologia de diferenciação numérica ao perfil de rotações. Com efeito, o esforço de corte é determinado a partir da segunda derivada espacial deste perfil. No sentido de eliminar o ruído de medição de alta frequência são aplicados filtros do tipo passa-baixo ao campo de rotações. Estes conduzem à supressão de termos de ordem mais elevada do sinal, os quais são fundamentais para a correcta representação das derivadas de ordem superior.

Para o primeiro e segundo casos de dano da Tabela 5.1, são representados na Fig. 5.6 os respectivos ISD dos campos de deslocamentos, rotações, momento-flector e esforço de corte, obtidos por via experimental (Exp.) e por via do método dos elementos finitos (MEF). Da análise comparativa, verifica-se que os campos de deslocamentos, rotação e esforço de corte apresentam globalmente um comportamento distintos dos resultados MEF, ao contrário do campo momento-flector que, à excepção

da região junto ao encastramento, apresenta uma boa concordância. De igual modo se observa que o seu valor máximo é coincidente com a posição do dano, permitindo, deste modo, a sua localização. Todavia, a sua amplitude é inferior ao MEF e apresenta andamento mais suave. Este aspecto é provocado pela eliminação dos termos de alta ordem devido à aplicação ao sinal de filtros passa-baixo. Como consequência, obtém-se uma inflexão no perfil experimental do esforço de corte para a posição do dano, conforme se pode observa na Fig. 5.6. Neste caso, a propagação das perturbações no esforço de corte junto ao bordo encastrado atinge a região do dano e dificultam a sua detecção. Por outro lado, a atenuação para a região do dano da amplitude no perfil do ISD do momento-flector impede a quantificação da sua severidade. No entanto, relacionando a amplitude entre os casos 1 e 2 nesta secção obtém-se uma razão de 1,39, a qual corresponde, apenas, a um erro de 2,7% relativamente ao quociente teórico, definido pela razão do decréscimo de rigidez local  $0,25/0,175 = 1,429$ .

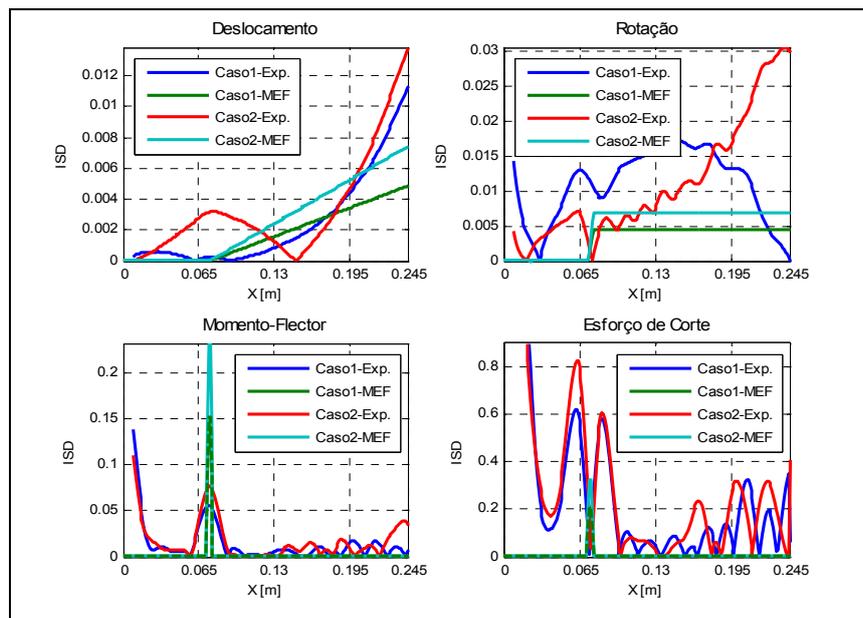


Fig. 5.6– Representação do ISD dos campos de deslocamentos, rotações, momento-flector e esforço de corte da viga em consola para o primeiro e segundo casos de dano.

Os correspondentes perfis do ISD para o terceiro e quarto casos de dano estão representados na Fig. 5.7.

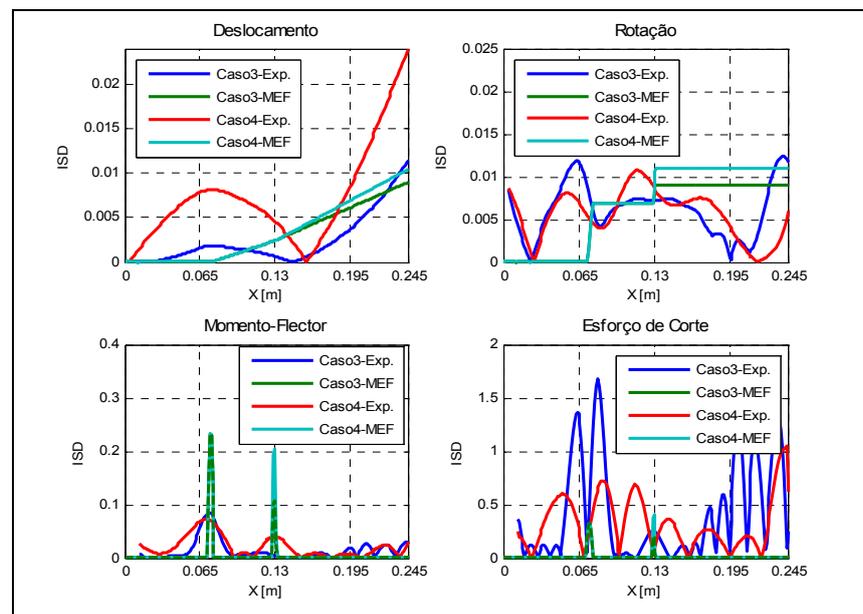


Fig. 5.7– Representação do ISD dos campos de deslocamentos, rotações, momento-flector e esforço de corte da viga em consola para o terceiro e quarto casos de dano.

À semelhança dos dois casos anteriores, a posição dos danos é revelada pela presença de máximos locais na distribuição ISD do momento-flector para os resultados experimentais. A análise individual dos ISD do momento-flector revela diferentes comportamentos entre os resultados obtidos por via experimental e pelo MEF. No terceiro caso de dano, a ausência de um máximo local no centro da viga não permite identificar o dano, com  $\delta_k = 0,175$ , ao contrário do quarto caso, cujos dois danos são identificados tomando os dois valores máximos. Contudo, relacionando a amplitude destes dois máximos, verifica-se que não seguem a mesma razão de proporcionalidade no decréscimo de rigidez local. Este resultado deve-se à diferença de dimensão longitudinal nos danos, traduzindo-se por uma acentuada atenuação da amplitude no dano de menor dimensão. As descontinuidades no perfil são representadas por termos de elevada ordem no domínio do número de onda. Sendo a sua presença confundida com o ruído de alta frequência e a sua amplitude atenuada pela aplicação de filtros do tipo passa-baixo, os quais estão associados à metodologia de diferenciação numérica aplicada no cálculo das sucessivas derivadas espaciais, Fig. 5.8.

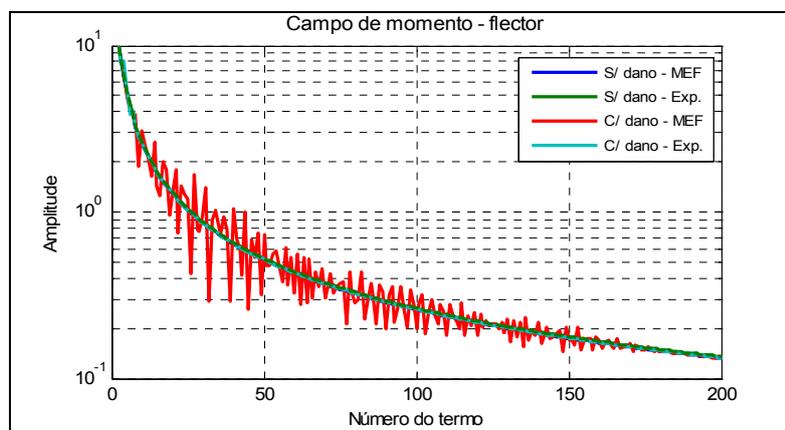


Fig. 5.8– Representação do campo de momento-flector no domínio do número de onda para a resposta estática da viga nas condições sem dano (S/ dano) e com dano (C/ dano).

Apresenta-se, em seguida, a análise ISD dos campos da resposta modal na viga. As frequências naturais são determinadas a partir da análise modal experimental, sendo os respectivos modos naturais de vibração obtidos pelos sistemas ESPI e *Shear Pulsados*. Estes têm como principal vantagem recorrerem a técnicas de medição de campo sem contacto, ao contrário do sistema de análise modal experimental, com excitação por martelo e medição da resposta com acelerómetro, por exemplo. A validação dos modos naturais de vibração faz-se por comparação com os obtidos pela análise modal experimental e método dos elementos finitos. A análise modal experimental é condicionada pela influência da massa do acelerómetro na resposta do sistema. No sentido de minimizar o seu efeito é usada uma viga em Aço Inoxidável de maiores dimensões e, por isso, com maior massa.

### 5.2.3 Medição dos modos naturais de vibração

Os sistemas ESPI e *Shear Pulsados* permitem medir, respectivamente, os campos de deslocamentos e de rotações em estruturas animadas de movimento. O sistema ESPI Pulsado trabalha directamente sobre o movimento absoluto da frente de onda proveniente do objecto. Este é, por isso, sensível a deslocamentos de corpo rígido que se sobrepõem aos modos naturais de vibração de estruturas livres no espaço. Dada a elevada resolução desta técnica, a medição dos modos naturais da viga livre-livre é de difícil obtenção. O autor conseguiu ultrapassar esta dificuldade através do registo por interferometria *Speckle* com LASER de duplo impulso.

Os sistemas ESPI e *Shear Pulsados* foram usados para medir os campos de deslocamento e de rotações da resposta harmónica estacionária às duas primeiras frequências naturais de vibração da viga livre-livre. A sua validação é efectuada por comparação com os modos obtidos pela técnica clássica de análise modal experimental. Esta envolve a medição de uma sequência de Funções de Resposta em Frequência (FRFs), sendo a força de excitação dada pelo martelo de impacto e a resposta da viga

medida por um acelerómetro montado numa das extremidades da viga. A colocação do acelerómetro conduz à adição de massa ao sistema, dependendo da razão entre massas e da sua localização relativamente à amplitude modal, esta pode alterar de modo significativo o comportamento dinâmico da estrutura. Procurando minimizar este efeito, optou-se por usar nesta análise uma viga em Aço Inoxidável, apresentando uma razão entre a massa do acelerómetro e da viga inferior a 0,1%.

### 5.2.3.1.1 *Análise modal experimental*

A análise modal experimental serve-se da medição das FRFs para construir um modelo matemático representativo do comportamento vibratório da estrutura. Este modelo matemático ou modelo modal é definido pelo conjunto de parâmetros modais: frequência natural, amortecimento e respectivo modo natural de vibração. O modelo modal deve ser representativo, tanto quanto possível, do comportamento vibratório da estrutura.

A estimativa dos parâmetros modais só poderá ser tão precisa quanto a medição das funções de resposta em frequência. Por esta razão, é importante que a aquisição das FRFs se faça com elevada qualidade. A selecção do tipo de excitação, a localização dos transdutores, o tipo de transdutores, a montagem, os cabos de ligação, a calibração, e a redução ou eliminação de erros causados por *Aliasing*, *Leakage*, não linearidades e incoerência das fontes de ruído são factores importantes para garantir a aquisição de FRFs de elevada qualidade [2-6].

Uma viga em Aço Inoxidável com 0,45 m de comprimento, 0,071m de largura e 0,010 m de espessura foi analisada livre no espaço. Na prática, a viga foi suspensa por elásticos conferindo-lhe um grau de flexibilidade elevado bastante próxima da condição livre-livre, Fig. 5.9. Na medição das FRFs, a excitação, do tipo transiente, foi aplicada através do martelo de impacto Brüel&Kjær® (B&K) modelo 8202 e a resposta, do tipo exponencial negativa, é medida por um acelerómetro B&K modelo 4393 com 2,4gr de massa. A viga foi discretizada em 31 pontos de medição ao longo da mediatriz e segundo a sua direcção longitudinal. A excitação foi aplicada a cada um dos pontos de medição e a resposta, foi sempre medida na extremidade da viga. A montagem foi realizada sobre uma mesa com suspensão anti-vibratória, de marca Newport®, de forma a isolar a estrutura de eventuais perturbações exteriores. Os sinais medidos depois de devidamente amplificados e condicionados no amplificador de medição B&K modelo 2525 foram analisados por um analisador dinâmico de sinal Oros® modelo OR35. A análise foi realizada para a banda de frequências de 0Hz a 1kHz, com uma resolução de 156,25 mHz. Após a realização de três médias, o grau de confiança das 31 FRFs do tipo  $H_1$  foi garantido pela análise da função de coerência correspondente. A montagem usada na medição das FRFs pode ser observada na Fig. 5.9.



Fig. 5.9 – Imagem da montagem experimental para a medição das FRFs da viga livre-livre.

A estimativa das frequências naturais de vibração, do amortecimento e dos vectores participação modal foi realizado através da técnica poli-referência no domínio do tempo. Os respectivos modos

naturais foram obtidos por ajuste pelo o método dos mínimos quadrados através da técnica multi-referência no domínio da frequência. Esta análise foi efectuada no programa comercial NVSolutions® usando as 31 FRFs medidas. Na Fig. 5.10 estão representados o diagrama de estabilidade, função *Mode Indication Function* (MIF) e FRF com a identificação dos respectivos pólos.

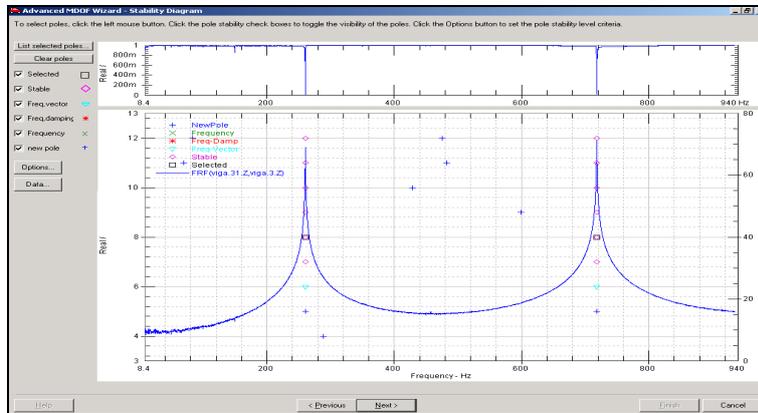


Fig. 5.10-Diagrama de estabilidade.

Para a banda de frequências em análise foram identificadas duas frequências ou pólos e calculadas as respectivas formas ou modos naturais de vibração. Na Tabela 5.2 apresentam-se as duas primeiras frequências naturais da viga e os correspondentes coeficientes de amortecimento identificados na banda de frequências de 0Hz a 1kHz.

Tabela 5.2 - Frequência e amortecimento da viga na condição livre-livre.

	Frequência	Amortecimento
Modo 1	260,95 Hz	0,084%
Modo 2	718,72 Hz	0,038%

A análise destes resultados revela que o coeficiente de amortecimento modal é, como esperado, superior para a primeira frequência natural.

A partir dos parâmetros modais identificados é construído o modelo modal. Este deverá seguir o comportamento vibratório do modelo real. A validação do modelo identificado far-se-á por comparação das FRFs sintetizadas com as FRFs medidas e pelo critério *Modal Assurance Criteria* (MAC) [7]. Na Fig. 5.11 representam-se as FRFs medida e sintetizada, assim como, os dois modos naturais de vibração calculados.

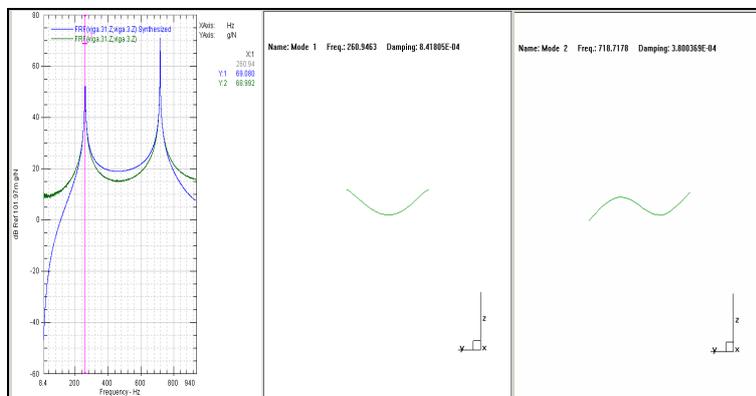


Fig. 5.11– Função de resposta em frequência e modos naturais de vibração da viga livre-livre.

Por comparação entre as funções de resposta em frequência, conclui-se que existe uma boa concordância na vizinhança das frequências naturais de vibração, Fig. 5.11.

O MAC interpreta o grau de independência modal ou ortogonalidade modal. Idealmente a matriz do MAC deverá tomar valores de 100% na diagonal e 0% fora da diagonal. Na Tabela 5.3 apresenta-se

o MAC calculado a partir do modelo identificado. Na diagonal apresenta valores de 100% e fora valores próximos de 0%. Deste modo, prova-se que há independência modal.

**Tabela 5.3 - A tabela MAC da viga na condição livre-livre.**

	Modo 1	Modo 2
Modo 1	100 %	0,2557 %
Modo 2	0,2557 %	100 %

A interpretação dos resultados obtidos leva à concluir que é válido o procedimento de identificação modal e a considerar consistentes os parâmetros modais identificados. Assim, os parâmetros identificados através da interpretação da informação obtida a partir da vibração da estrutura podem ser usados para construir o modelo matemático, sendo este representativo do comportamento vibratório da estrutura.

A partir das frequências naturais identificados fez-se em seguida a medição dos modos naturais de vibração da viga com os sistemas ESPI e *Shear* Pulsados.

### 5.2.3.2 Sistema ESPI Pulsado

O padrão de intensidade correspondente à diferença de fase do caminho óptico percorrido por duas frentes de onda é gravado na forma digital pela câmara CCD, ver capítulo 3. Através do registo da diferença de fase entre dois instantes, diferentes estados do objecto podem ser comparados. A introdução da modulação espacial de fase na geração dos registos veio permitir o cálculo directo distribuição do mapa de fase [8].

O ESPI ou holografia TV de duplo impulso utiliza a interferometria holográfica para comparar dois estados diferentes do objecto entre intervalos de tempo muito curtos. O sistema comercial ESPI Pulsado [9] foi usado para medir o campo de deslocamentos dos modos naturais de vibração da viga na condição livre-livre, Fig. 5.12 a. Este sistema utiliza um LASER de rubi LUMONICS® para gerar um par de impulsos com comprimento de onda de  $690\text{nm}$ , separados no tempo de  $400\mu\text{s}$ . Os hologramas da dupla exposição são gravados por uma câmara CCD ( $512 \times 512$  píxeis) e posteriormente processados pelas técnicas de imagem estudadas no capítulo 4.

A viga suspensa por elásticos foi excitada acusticamente por um altifalante montado junto à face posterior desta. A face anterior foi pintada de branco para garantir a uniformidade da intensidade de irradiação da superfície de medição, Fig. 5.12 b.

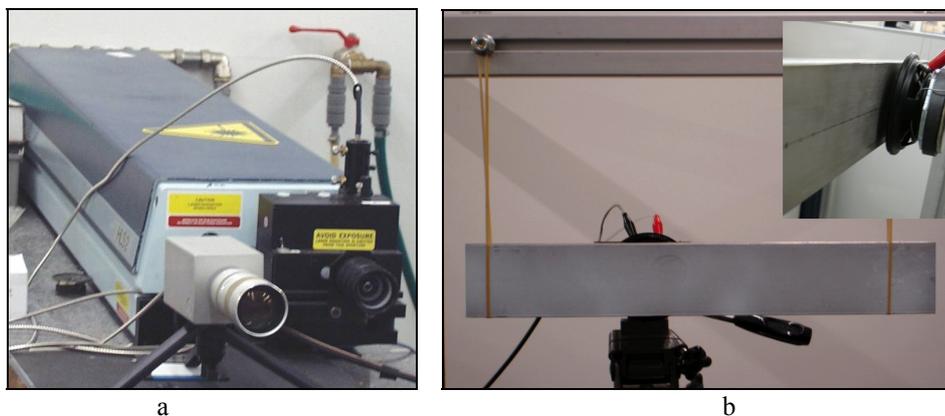


Fig. 5.12 – Imagens da montagem para análise modal com ESPI a) sistema Ettemeyer-GmbH&Co®; b) montagem da viga e sistema de excitação acústica.

Tratando-se de uma viga suspensa por elásticos com excitação acústica sem contacto, a resposta apresenta o modo natural de vibração e movimentos de corpo rígido. O modo natural é isolado do movimento de corpo rígido da viga, de pequena amplitude e frequência inferior ( $<1\text{s}$ ), utilizando registos com intervalo muito curto (neste caso de  $400\mu\text{s}$ ).

Um gerador de sinal Tektronix modelo AFG320 é usado para através de um altifalante excitar a viga às frequências naturais de vibração. A cada frequência, a amplitude do sinal foi ajustado de forma a enquadrar a amplitude da vibração com a gama de medição do sistema. O mesmo sinal é usado para sincronizar o disparo do LASER e o movimento harmónico da viga. Na Fig. 5.13 está esquematicamente representado o esquema básico da montagem experimental, o sistema de sincronismo e o diagrama temporal do sinal utilizado para a medição [10].

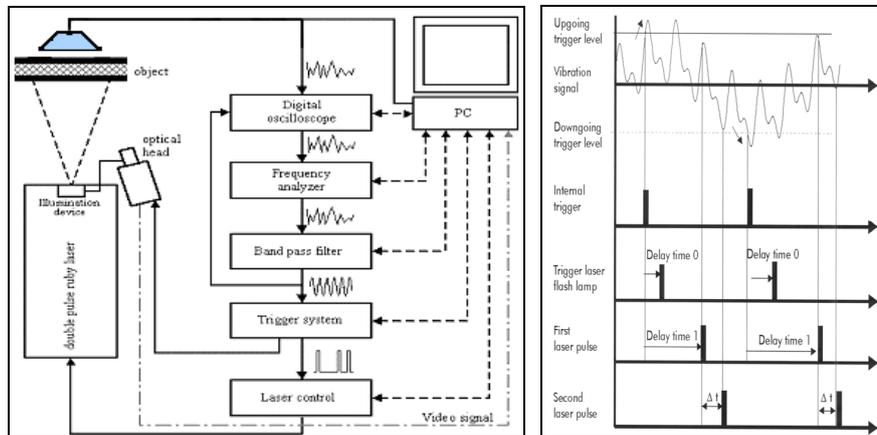


Fig. 5.13 – Esquema da montagem experimental e diagrama temporal de sincronismo.

Com base na montagem experimental anterior foram determinados os interferogramas para cada frequência natural de vibração da viga. O mapa da fase primária, correspondente a cada registo holográfico, é obtido por desmodulação da portadora espacial introduzida em cada um deles. O mapa de fase correspondente ao movimento da superfície é obtido por subtração do par de registos. Na Fig. 5.14 estão representados os mapas de fase dos dois primeiros modos naturais da viga livre-livre.

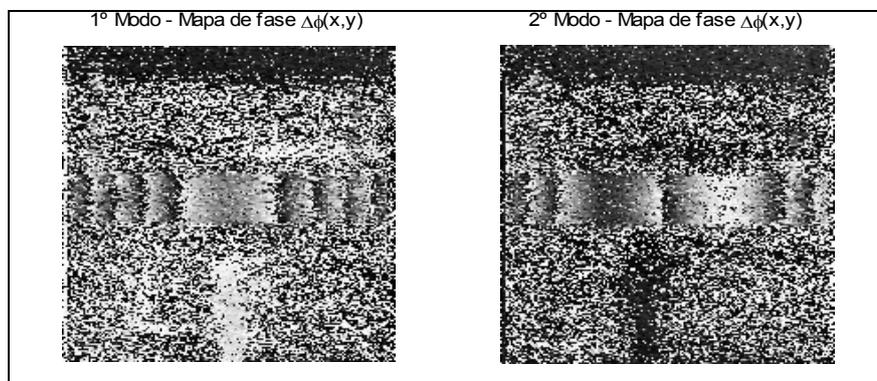


Fig. 5.14 – Os mapas de fase relativos aos dois primeiros modos naturais da viga livre-livre.

Os modos naturais de vibração são determinados pelo pós-processamento dos mapas de fase, recorrendo às técnicas de filtragem de fase e *unwrapping*. Adoptando o procedimento descrito na Fig. 5.4, obtêm-se os modos normalizados que estão representados na Fig. 5.15.

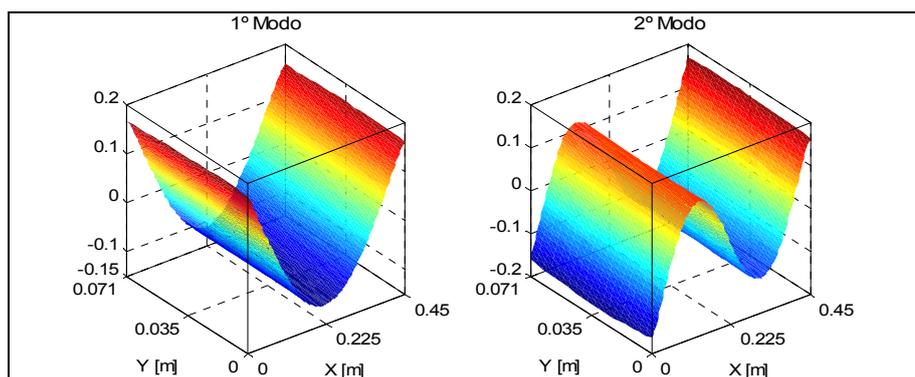


Fig. 5.15 – Os dois primeiros modos naturais da viga obtidos com o sistema ESPI Pulsado.

A validação da medição do sistema ESPI Pulsado é realizado pela comparação entre a amplitude do deslocamento medido ao longo da mediatriz longitudinal da viga (ESPI), os modos naturais de vibração obtidos a partir da análise modal experimental (MODAL) e os calculados pelo método dos elementos finitos (MEF). Na Fig. 5.16 podem observar-se os perfis dos dois primeiros modos naturais de vibração da viga livre-livre, após normalização a vectores modais unitários.

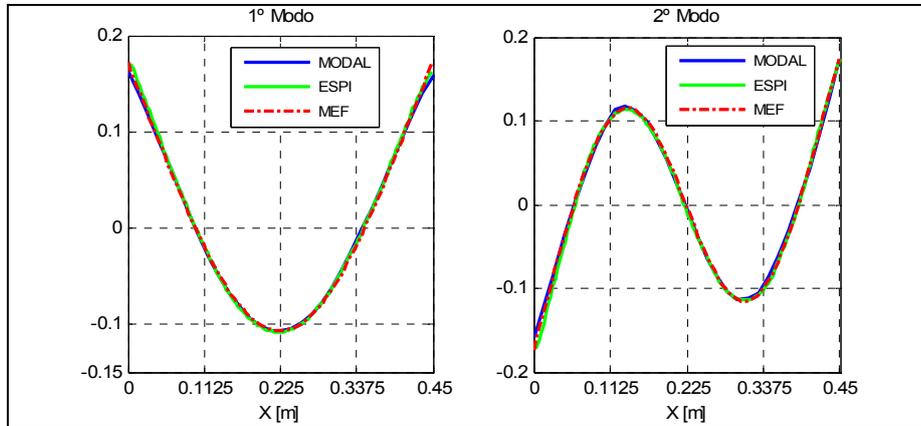


Fig. 5.16 – Os campos de deslocamentos dos dois primeiros modos da viga livre-livre, obtidos pela análise modal experimental, sistema ESPI Pulsado e pelo método dos elementos finitos.

A análise comparativa dos modos naturais, Fig. 5.16, permite verificar que, globalmente, o ESPI e o MEF apresentam um comportamento idêntico e próximo da análise modal experimental. Este resultado permite, desde já, validar as medições dos modos realizadas com o sistema ESPI Pulsado. Quanto ao comportamento dos modos naturais obtidos pela análise modal experimental observam-se, junto ao bordo da viga, pequenos desvios em relação ao comportamento do MEF. Estes têm como possível origem a adição de massa proveniente da montagem do acelerómetro na extremidade da viga.

### 5.2.3.3 Sistema Shear Pulsado

O sistema *Shear Pulsado* utiliza o interferómetro do tipo *Mach-Zehnder* e uma fonte de luz LASER pulsada para medir, entre dois instantes consecutivos, o gradiente do campo de deslocamentos produzido pelo movimento de uma superfície difusa. Um LASER de rubi LUMONICS® de duplo impulso é usado para obter dois registos separados por 400 $\mu$ s. À semelhança da técnica ESPI, a introdução duma portadora espacial nas franjas primárias na geração do holograma permite determinar a distribuição da fase em cada registo [8]. A partir de dois registos é criado o interferograma do campo de rotações [11, 12]. Os interferogramas são pós-processados através das rotinas dedicadas de processamento de imagem que foram descritas no capítulo 4. Na Fig. 5.17 está representado o sistema *Shear Pulsado* construído para a medição do campo de rotações fora-do-plano.



Fig. 5.17 – Imagem do sistema *Shear Pulsado* (Anexo D).

Os campos de rotações das formas naturais de vibração foram medidos através deste sistema, para as mesmas condições definidas no ensaio anterior. O sinal de sincronismo entre a excitação e o disparo do LASER foi ajustado de forma a enquadrar a amplitude do campo de rotação com a nova gama de medição. A insensibilidade do sistema a deslocamentos uniformes da estrutura garante o isolamento de movimentos de corpo rígido. Na Fig. 5.18 estão representados os mapas de fase correspondentes ao campo de rotações dos dois primeiros modos naturais de vibração da viga livre-livre.

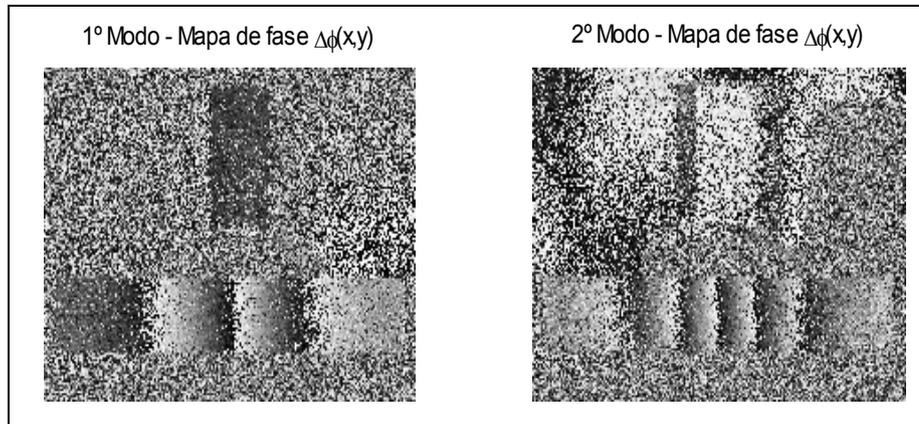


Fig. 5.18 – Os mapas de fase relativos ao campo de rotações dos dois primeiros modos naturais da viga livre-livre.

Após aplicação das técnicas de processamento aos mapas de fase representados na Fig. 5.18, obtém-se para as duas formas naturais de vibração os campos contínuos de rotações. À semelhança do estudo anterior, a validação dos campos medidos pelo sistema *Shear Pulsado* far-se-á por comparação com os campos de rotações obtidos por diferenciação espacial dos modos naturais, identificados através da técnica da análise modal experimental, e método dos elementos finitos. Os campos de rotações dos dois primeiros modos naturais da viga livre-livre, obtidos a partir da análise modal experimental (MODAL), sistema *Shear Pulsado* (Shear) e pelo método dos elementos finitos (MEF), podem observar-se na Fig. 5.19.

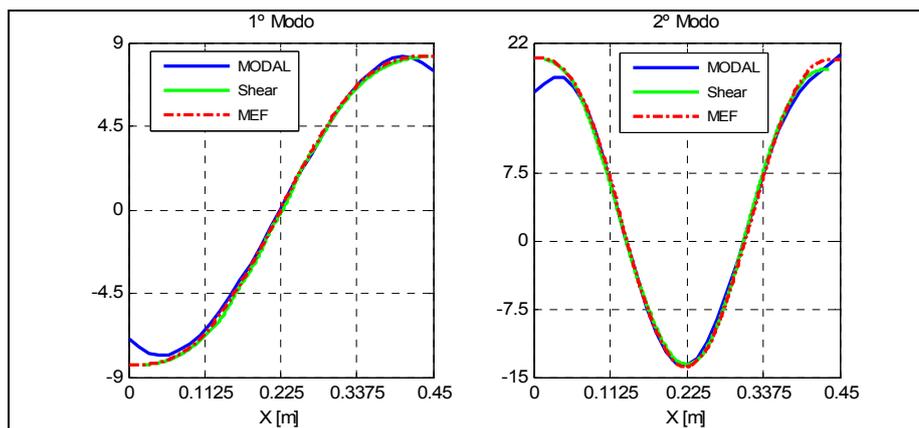


Fig. 5.19 – O campo de rotações dos dois primeiros modos da viga livre-livre, obtidos por análise modal experimental, sistema *Shear Pulsado* e pelo método dos elementos finitos.

A análise comparativa dos perfis dos campos de rotações mostra que, globalmente, existe uma razoável concordância entre os três resultados. À semelhança dos resultados anteriores, há a distinguir pequenos desvios junto ao bordo da viga nos perfis obtidos para a análise modal experimental, os quais poderão resultar da adição da massa do acelerómetro na extremidade da viga. Refira-se que a medição com o sistema *Shear Pulsado*, por ser uma técnica interferométrica de medição sem contacto, apresenta um comportamento mais próximo do previsto pelo MEF. Deste modo, é evidente o melhor desempenho do sistema *Shear Pulsado* relativamente à análise modal na medição do campo de rotações, considerando válidas as medições realizadas com este sistema.

### 5.2.4 Resposta Modal

O procedimento de identificação estrutural do dano é similar ao estudo apresentado para a resposta estática da viga encastrada-livre. Com efeito, a análise dos ISD assenta no comportamento dos modos naturais para o modelo de viga apresentado na Fig. 5.1, para a condição livre-livre e envolvendo o quarto caso de dano da Tabela 5.1. A medição do campo de deslocamentos e de rotações dos modos naturais de vibração é realizado pelos sistemas ESPI e *Shear* Pulsados, respectivamente. Por aplicação da metodologia de diferenciação numérica aos campos medidos, são determinadas a primeira derivada ou rotação, segunda derivada ou curvatura, e terceira derivada da viga ou derivada da curvatura. Estes dois últimos são relacionados com os esforços internos na viga, momento-flector e esforço de corte, através da teoria de Euler-Bernoulli para vigas [1].

A identificação por via experimental das frequências naturais de vibração da viga foi realizada a partir da medição na extremidade da viga da função acelerabilidade directa do tipo  $H_1$ . A excitação, do tipo transiente, foi aplicada com um martelo de impacto B&K 8202 e a resposta, do tipo exponencial negativa, é medida pelo acelerómetro B&K 4393. Os dois sinais no tempo são devidamente condicionados no amplificador B&K 2525 e posteriormente analisados no analisador dinâmico de sinal Oros<sup>®</sup> OR35. Na Fig. 5.20 comparam-se a amplitude e fase das funções acelerabilidade obtidas por via experimental (Exp) e as calculadas pelo método dos elementos finitos (MEF), para a situações antes e após a introdução do dano na viga. A análise da magnitude das funções acelerabilidade revela a presença de duas frequências naturais para a banda de frequências entre 0Hz e 1,6kHz. Esta, também, evidencia o facto das frequências naturais diminuírem com a introdução dos danos na viga. Comparando as funções acelerabilidade obtidas pelos dois métodos, verifica-se que, globalmente, existe uma boa concordância. Todavia, observam-se pequenos desvios nas regiões vizinhas das anti-ressonâncias, possivelmente provocados pela adição da massa do acelerómetro durante o procedimento de medição experimental das funções acelerabilidade.

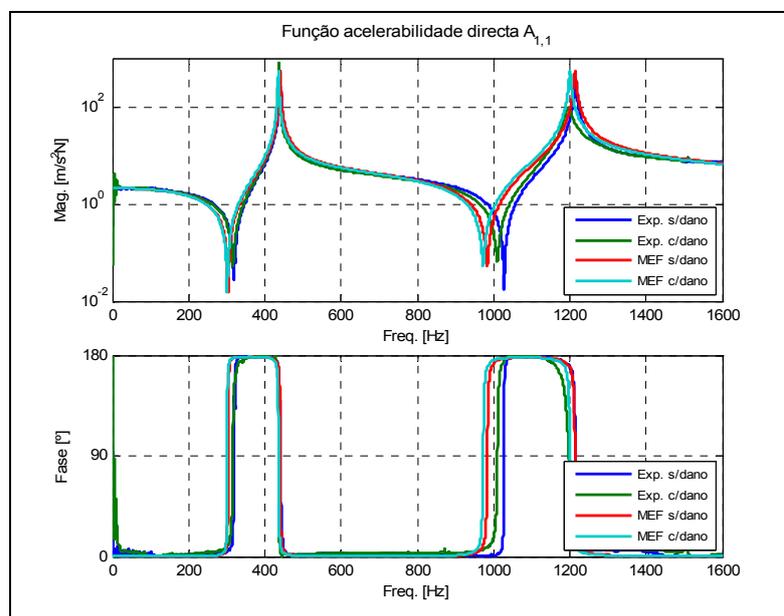


Fig. 5.20 – Representação da magnitude e fase da função acelerabilidade da viga (directa), experimental do tipo  $H_1$  (EXP) e pelo método dos elementos finitos (MEF).

Na Tabela 5.4 são apresentadas as frequências identificadas a partir dos máximos das funções acelerabilidade e a variação das frequências devido à introdução do dano.

A análise dos resultados apresentados na Tabela 5.4, revela que a variação da frequência natural é maior para o segundo modo de vibração. Esta maior sensibilidade está directamente relacionada com o facto da amplitude máxima do momento-flector coincidir com a posição do dano de máxima severidade, ao contrário da primeira forma modal que apresenta a amplitude máxima para o dano de menor severidade (capítulo 2).

**Tabela 5.4 – Frequências naturais de vibração da viga para a condição livre – livre no espaço.**

	Experimental			MEF		
	S/dano	C/dano	Variação	S/dano	C/dano	Variação
1ª Freq.	440 Hz	435,8 Hz	-0,80%	440,3 Hz	436,5 Hz	-1,00%
2ª Freq.	1215	1197 Hz	-1,48%	1214 Hz	1201 Hz	-1,10%

Os campos de deslocamento, rotação, momento-flector e esforço de corte relativos às duas formas modais da viga livre-livre são determinados por aplicação da metodologia de diferenciação numérica aos campos de deslocamentos e rotações medidos (Exp.) e através do método dos elementos finitos (MEF), cujos resultados estão representados na Fig. 5.21 e Fig. 5.22.

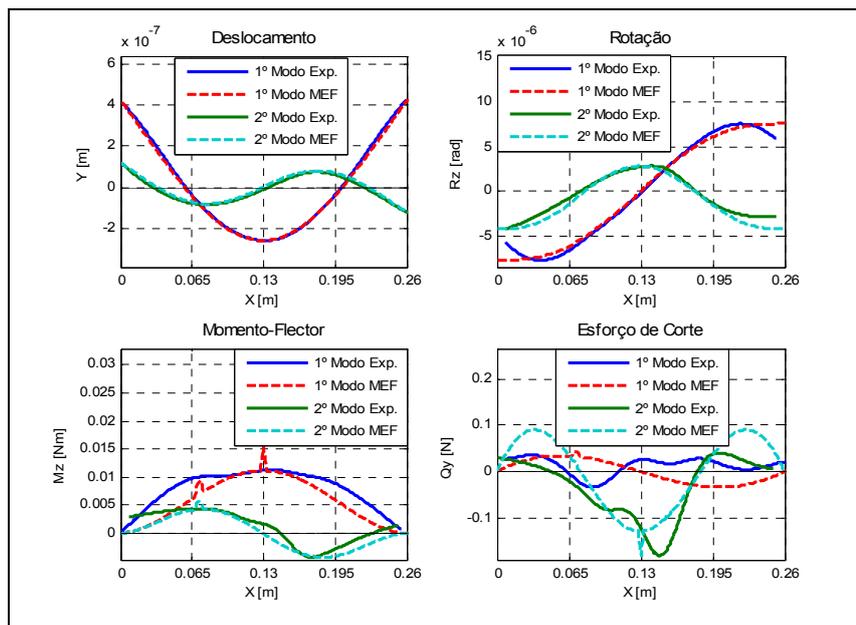


Fig. 5.21 – Representação dos campos de deslocamentos, rotações, momento-flector e esforço de corte obtidos a partir do campo de deslocamentos modal experimental e pelo MEF para a viga livre-livre.

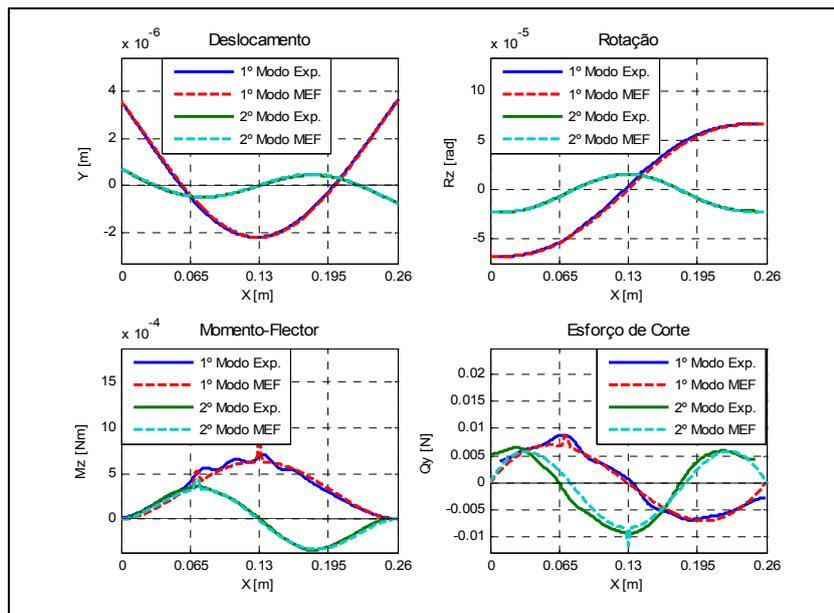


Fig. 5.22 – Representação dos campos de deslocamentos, rotações, momento-flector e esforço de corte obtidos a partir do campo de rotações modal experimental e pelo MEF para a viga a livre-livre.

Comparando o comportamento dos campos experimentais obtidos pelas duas técnicas de medição, verifica-se que os resultados decorrentes da medição do campo de rotação estão mais

próximos dos obtidos pelo MEF. Pelo contrário, os resultados da medição do campo de deslocamentos apresentam desvios significativos para o campo de rotações calculadas. Este comportamento agrava-se para os esforços internos da viga, momento-flector e esforço de corte pois, a determinação destes esforços requer a diferenciação numérica do campo de deslocamentos medido até à terceira ordem, enquanto que a medição do campo de rotações reduz de uma ordem a diferenciação numérica. Assim, é de esperar um maior o efeito da propagação do ruído através na diferenciação numérica do campo de deslocamentos. Refira-se que a alteração produzida pelo dano no comportamento das componentes da resposta modal da viga são superiores para o momento-flector e esforço de corte. Estas componentes revelam a localização do dano pela presença de descontinuidades e/ou perturbações no seu comportamento, Fig. 5.22. Porém, devido à sobreposição destas perturbações às componentes da resposta modal, a posição do dano nem sempre é evidente, principalmente, quando na presença de pequenas perturbações no sinal. A aplicação da função ISD às componentes da resposta modal, momento-flector e esforço de corte, permite isolar as perturbações do sinal e, assim, aumentar a sensibilidade na detecção estrutural do dano. As funções ISD dos campos momento-flector e esforço de corte são determinada com base nos campos de deslocamentos e rotações medidos antes e após o dano utilizando os sistemas ESPI e *Shear* Pulsados. Para um estudo comparativo dos sistemas, são apresentados na Fig. 5.23 os ISD dos campos momento-flector e esforço de corte determinados a partir do deslocamento modal experimental (Exp. ESPI), rotação modal experimental (Exp. Shear) e pelo método dos elementos finitos (MEF).

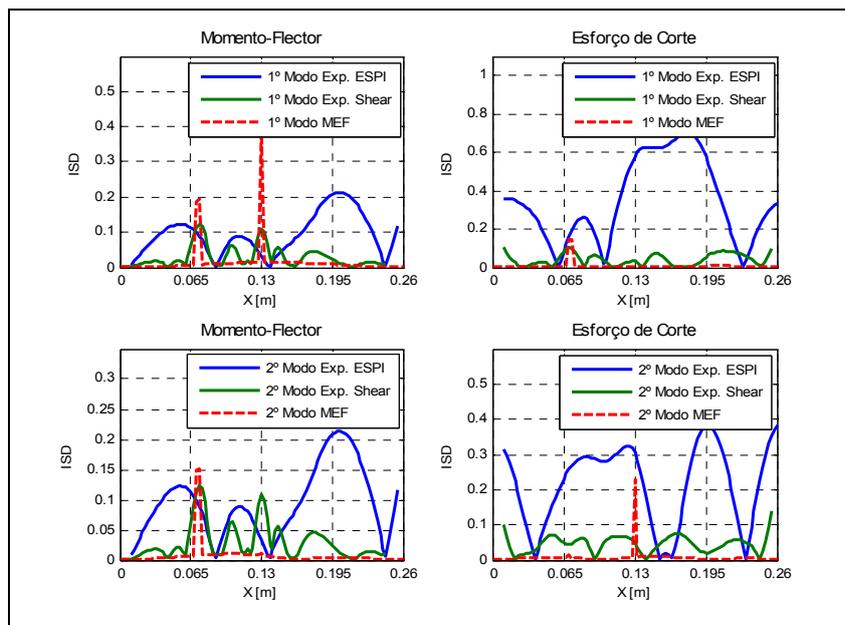


Fig. 5.23 – Representação dos ISD dos campos momento-flector e esforço de corte obtidos a partir do campo de deslocamentos e rotações experimentais e pelo MEF para a viga livre-livre.

Como já esperado, a distribuição dos ISD, Fig. 5.23, revela uma melhoria significativa dos resultados obtidos a partir das medições do campo de rotações (Exp. Shear) experimental em relação aos obtidos a partir das medições do campo de deslocamentos (Exp. ESPI). Com efeito, observando individualmente a distribuição do ISD do campo momento-flector, verifica-se que este apresenta um andamento mais próximo do MEF e que toma para a posição dos danos os valores máximos absolutos, embora apresente menor amplitude. No que se refere à distribuição do ISD do campo dos esforços do primeiro modo, é observado o mesmo tipo de comportamento, contudo, a posição do máximo absoluto para a secção do dano é menos evidente. Pelo contrário, nos resultados obtidos a partir do campo de deslocamentos medido experimentalmente são patentes as discrepâncias em relação ao MEF, as quais não permitem detectar os danos. Ao nível das perturbações no ISD associadas aos danos, verifica-se que estas estão directamente relacionadas com a distribuição dos esforços ao longo da viga.

Conforme anteriormente referido, para a determinação dos esforços é necessário diferenciar o campo de deslocamentos até à terceira ordem. A metodologia de diferenciação numérica envolve a

aplicação simultânea de uma técnica de diferenciação do sinal e de uma técnica de filtragem do ruído de alta frequência. As componentes de alta frequência do sinal, necessárias à representação das descontinuidades, são normalmente confundidas com o ruído de medição e eliminadas no processo de filtragem. Este aspecto assume particular relevância no cálculo das derivadas de ordem mais elevada. Aplicação da metodologia de diferenciação numérica ao campo de rotações medida experimentalmente permite reduzir o cálculo diferencial em uma ordem, sendo que a determinação do momento-flector envolve unicamente uma derivação espacial de ordem 1. Por outro lado, as formas naturais de vibração de ordem superior apresentam configurações espaciais mais complexas, as quais são representadas no domínio do número de onda por termos de ordem mais elevada, Fig. 5.24. De igual forma, as perturbações no sinal, devidas à presença do dano, são representadas por termos de ordem elevada. Nestas condições, sendo as duas componentes indissociáveis, torna-se difícil identificar os danos na viga. Todos estes factores contribuem para que seja o ISD do momento-flector da primeira forma modal o melhor parâmetro na localização do dano, conforme foi demonstrado no capítulo 2. Contudo, a qualidade destes resultados ficam aquém dos obtidos para o ensaio estático da viga encastrada-livre, os quais permitem revelar a localização e quantificar a severidade dos danos. Refira-se que o campo de rotações é representado no domínio do número de onda, essencialmente, por termos de baixa ordem, ao contrário da primeira forma natural de vibração, Fig. 5.24. Aliás, analisando o campo de rotações obtido para uma solicitação transiente (capítulo 2), observa-se que a contribuição é maior para os termos de ordem superior, Fig. 5.24. Estas, à semelhança das formas naturais de vibração de ordem mais elevada, a partir dos ISD do momento-flector não permitem revelar a localização dos danos. Deste modo, a análise experimental da resposta a uma solicitação transiente afigura-se como mera confirmação destes resultados, não sendo, por isso, aqui apresentada.

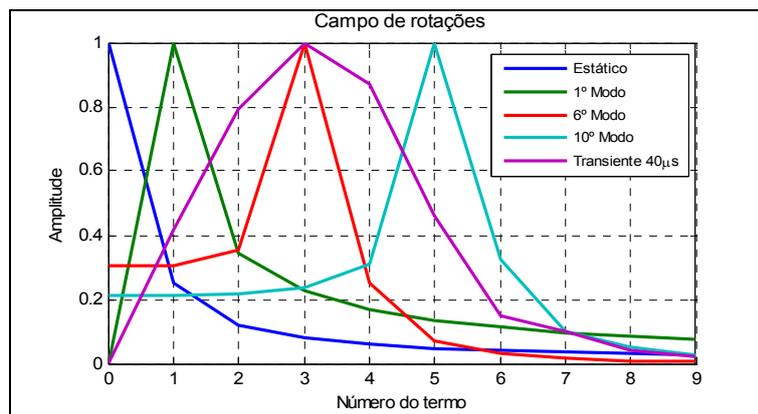


Fig. 5.24– Representação do campo de rotações no domínio do número de onda para diferentes solicitações.

### 5.3 Análise da placa laminada compósita

Na sequência do estudo realizado anteriormente, procede-se, agora, à análise experimental de dois danos internos numa placa laminada compósita de resina de epóxico e fibra de carbono, cuja geometria e dimensões estão representadas na Fig. 5.25.

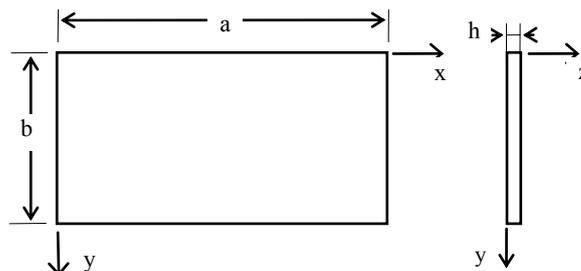


Fig. 5.25– Representação da forma e dimensões da placa laminada compósita em estudo.

As propriedades geométricas, elásticas e orientação das camadas para a placa são as seguintes:

$$a = 0,2765 \text{ m} \quad b = 0,198 \text{ m} \quad h = 0,001825 \text{ m} \quad \rho = 1690 \text{ kg/m}^3$$

Orientação das camadas:  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$

$$\text{Propriedades elásticas para cada camada: } E_1 = 126,103 \times 10^9 \text{ Pa} \quad E_2 = 15,0 \times 10^9 \text{ Pa} \quad E_3 = 15,746 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$v_{12} = 0,217 \quad v_{23} = 0,208 \quad v_{13} = 0,208 \quad G_{12} = 5,678 \times 10^9 \text{ Pa} \quad G_{23} = 5,547 \times 10^9 \text{ Pa} \quad G_{13} = 3,603 \times 10^9 \text{ Pa}$$

Neste caso, pela simplicidade de implementação, a identificação do dano assenta na análise do ISD do campo das curvaturas, o qual está directamente relacionado com o campo do momento-flector para placas finas [1]. O estudo envolve a medição experimental da resposta estática, modal e transiente da placa para diferentes condições de carregamentos. O sistema *Shear* é utilizado para a medição do campo de rotações da placa da resposta estática. Quanto aos campos de deslocamentos e rotações para a resposta modal e transiente são medidos pelos sistemas ESPI e *Shear* Pulsados, respectivamente. Os ISDs do campo das curvaturas são determinados por aplicação da metodologia de diferenciação numérica ao campo de rotações e deslocamentos, respectivamente uma e duas vezes.

### 5.3.1 Introdução dos danos na placa

A absorção de energia devido a cargas de impacto em estruturas laminadas resulta no desenvolvimento de um conjunto diverso de danos estruturais, como rupturas da fibra, matriz e inter-fibra e delaminações. Este último é descrito como consistindo numa fenda interlaminar separando as camadas. O dano interlaminar resulta da propagação de pequenas fendas na direcção transversal e junto à região do carregamento, quando é excedido um limite da energia de deformação. A posição e extensão da delaminação dependem de múltiplos factores, como magnitude e duração das tensões geradas, sequência de empilhamento, defeitos pré-existentes e da tensão limite última do material [13].

As delaminações são aqui produzidas por dois impactos na placa de baixa velocidade através da queda livre de uma esfera em Aço com uma massa de 0,988 kg. A energia de impacto é determinada a partir da altura da queda da esfera. A localização e a energia dos dois impactos são apresentadas na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5 – Características dos impactos realizados na placa laminada de fibra de carbono.**

	Localização (x ; y) mm	Energia do impacto
Impacto 1	(74 ; 51)	13,50 Joule
Impacto 2	(215 ; 160)	26,16 Joule

A placa é fixa ao longo das duas extremidades de menor dimensão e contra uma estrutura de suporte, Fig. 5.26 a. A esfera é guiada por um tubo de acrílico furado ao longo de todo o seu comprimento, para reduzir a resistência do ar à passagem da esfera.

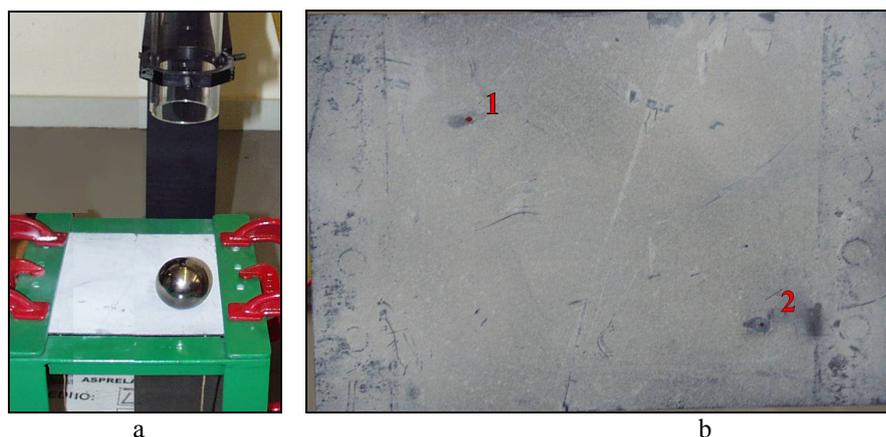


Fig. 5.26 - Imagem a) montagem experimental do ensaio de impacto; b) posição dos dois impactos na placa.

A superfície superior da placa é pintada de branco para registar a posição dos impactos e a estrutura de suporte é ligeiramente inclinada em relação à perpendicular ao eixo do tubo, para projectar a esfera para fora e, assim, evitar um duplo impacto na placa. Na Fig. 5.26 b é apresentada a localização dos dois impactos realizados, não sendo visíveis quais quer danos na superfície da placa.

A delaminação é caracterizada por uma descontinuidade do material entre camadas, estando associadas alterações das propriedades mecânicas e físicas da estrutura, sobretudo da rigidez e da condutibilidade térmica. Estes danos podem, por isso, ser revelados por descontinuidades e/ou perturbações na resposta da estrutura. Em seguida apresentar-se-á a identificação estrutural dos dois danos através da análise do campo das curvaturas, para a resposta estática, e do ISD do campo das curvaturas, para a resposta modal e transiente da placa.

### 5.3.2 Resposta estática

Na resposta estática, a identificação estrutural do dano assenta na análise das descontinuidades e/ou perturbações do campo das curvaturas, determinado por aplicação da metodologia de diferenciação numérica ao campo de rotações experimental. O sistema *Shear* com a técnica de modulação temporal de fase, Fig. 5.3, é usado para medir o campo de rotações produzido solicitações uniformes do tipo térmica e depressão aplicadas na superfície da placa. O objectivo da utilização deste tipo de solicitações é justificado pelo facto de se prescindir do registo da resposta da estrutura anterior ao dano. Para uma solicitação uniforme e na ausência de danos, a resposta na placa apresenta uma distribuição quase nula para o campo de rotações, algo que não acontece na presença da delaminação. Esta descontinuidade de material ao longo da espessura manifesta-se por uma variação na amplitude do campo de rotações nessa região [14], a qual resulta da expansão térmica e/ou da diminuição da rigidez à flexão da placa. Nestas condições, verifica-se que o campo das curvaturas é proporcional à distribuição do respectivo ISD. Os modelos da resposta em deslocamento da placa para a região com delaminação, produzido pelo aquecimento da superfície ou aplicação de depressão nas superfícies, podem ser observados na Fig. 5.27.

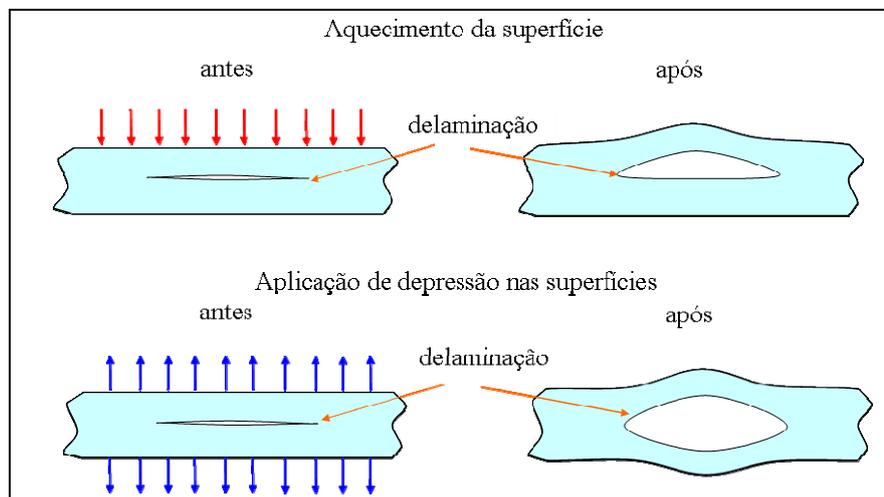


Fig. 5.27 – Modelos do comportamento da placa com delaminação para a solicitação térmica e depressão.

No primeiro modelo, a delaminação é revelada por um aumento local do deslocamento na superfície aquecida, o qual está relacionado com a diminuição da condutibilidade térmica ao longo da espessura provocado pela descontinuidade de material. Quanto ao segundo modelo, o aumento do deslocamento nas duas superfícies correspondentes à área da delaminação, ocorre devido à diferença de pressão entre o ar aprisionado na interface (pressão atmosférica) e a menor pressão externa aplicada nas superfícies. O campo de rotações correspondente à primeira derivada do campo de deslocamentos na resposta estática é medido pelo sistema *Shear* com modulação temporal de fase. As delaminações são reveladas por dois lobos simétricos justapostos e orientadas segundo a direcção do desvio lateral das frentes de onda  $\Delta x$ . Estes correspondem a dois padrões contíguos de franjas concêntricas no mapa

de interferência de fase, Fig. 5.28.

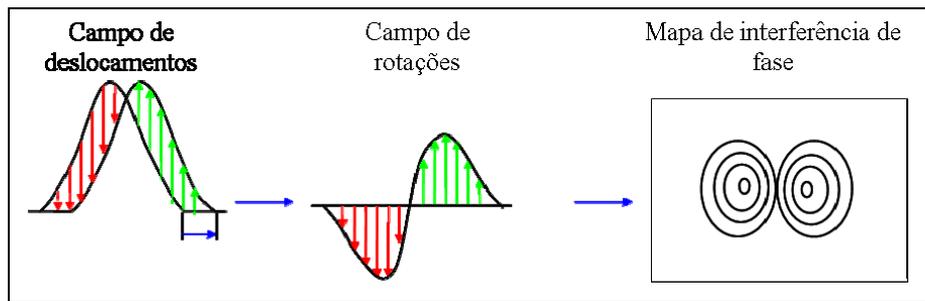


Fig. 5.28 – Representação dos campos de deslocamentos e rotações, e das franjas de interferência de fase correspondentes à região da placa com delaminação.

### 5.3.2.1 Solicitação térmica

Neste ensaio a placa é fixa numa das extremidades a um suporte de elevada rigidez e montada sobre uma mesa óptica da Newport<sup>®</sup> de modo a conferir maior estabilidade à montagem e à medição experimental. O campo de rotações obtido pelo registo anterior e posterior à solicitação térmica é medido pelo sistema *Shear* com a técnica de modulação temporal de fase, Fig. 5.3. A solicitação térmica é aplicada numa das faces da placa através do aquecimento da superfície durante 5 segundos com uma lâmpada de 100 W e a distribuição de temperatura registada por um câmara termográfica Flir Systems<sup>®</sup>, modelo InfraCAM. A distribuição de temperaturas codificada numa escala de cores pode ser observada na Fig. 5.29. A sua análise revela uma distribuição uniforme na superfície, sendo o valor médio da temperatura de 25°C.

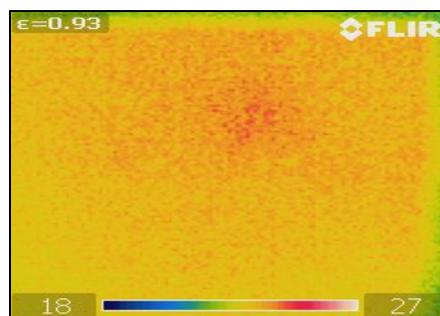


Fig. 5.29 – Imagem da distribuição da temperatura na placa obtida para uma emissividade 0,93.

No procedimento experimental de medição do campo de rotações, as quatro primeiras imagens desfasadas de  $\pi/2$  são adquiridas com a placa na posição inicial, sendo as restantes quatro registadas após o aquecimento da superfície e estabilizada a posição final. Neste processo, a evolução das franjas correspondentes ao campo de rotações é acompanhada pela visualização em tempo real do mapa de interferência, obtido pela subtração entre a imagem capturada em cada instante (imagem da deformada) e a primeira imagem gravada (imagem de referência). O conjunto das oito imagens é processado através das técnicas de cálculo de fase, filtragem de fase e *unwrapping*, sendo determinado o campo de rotações. O mapa de fase depois de filtrado e o correspondente campo de rotações obtido para uma solicitação térmica com desvio na horizontal das frentes de onda  $\Delta x = 10\text{mm}$  podem ser observados na Fig. 5.30.

A análise dos padrões de franjas concêntricas no mapa de fase da Fig. 5.30 revela a presença de duas delaminações, coincidentes com a localização dos dois impactos. O correspondente campo de rotações apresenta, para a posição das delaminações, dois lobos justapostos em oposição de fase. O campo da curvatura, correspondente à segunda derivada espacial do campo dos deslocamentos, permite evidenciar a região das delaminações. Neste caso, as delaminações surgem representadas por três lobos vizinhos, sendo que os dois extremos estão em fase entre si e em oposição de fase com o do meio.

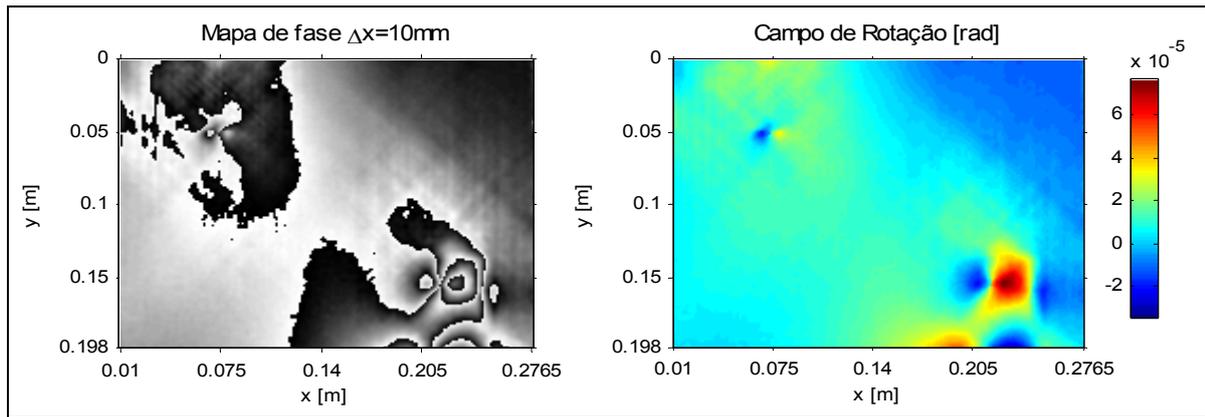


Fig. 5.30 – Mapa de fase e respectivo campo de rotações da placa laminada composta submetida a uma carga térmica.

O campo de curvaturas segundo o eixo  $x$  é obtido por aplicação da metodologia de diferenciação numérica ao campo de rotações experimental e pode ser observado na Fig. 5.31. Neste, surgem perfeitamente definidos a localização da delaminação, ao contrário do campo de rotações. Pois as perturbações no sinal associadas às delaminações são amplificadas com a ordem da derivada espacial.

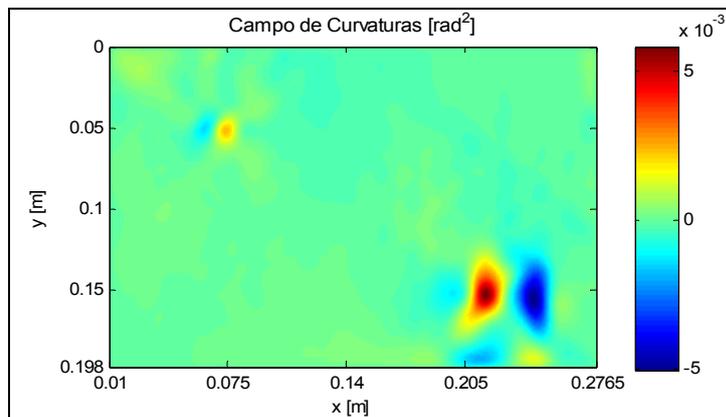


Fig. 5.31 – Campo de curvaturas segundo o eixo  $x$  para a placa laminada composta submetida a uma carga térmica.

As duas regiões de delaminação são obtidas a partir dos contornos da magnitude das curvaturas, recorrendo a técnicas dedicadas de processamento de imagem. A partir destas são identificadas a posição do centróide (Pos), a dimensão horizontal e vertical (Dx; Dy), e a área (A), Fig. 5.32.

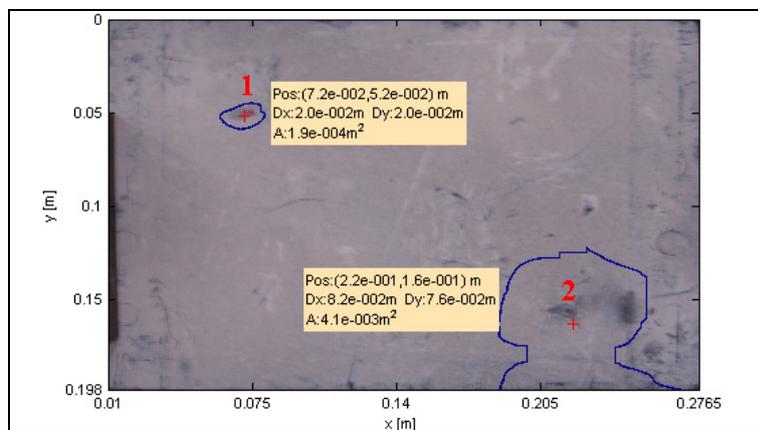


Fig. 5.32 – Imagem da placa laminada com a representação das regiões de delaminação.

As regiões de delaminação representadas na Fig. 5.32, revelam estar em conformidade com a localização e a energia dos dois impactos. Comparando a localização dos centróides determinados para estas regiões, verifica-se apresentarem valores próximos das dos dois impactos. O impacto 2, de maior

energia, manifesta-se na forma de uma extensa delaminação que atinge o bordo da placa, correspondendo ao dano de maior severidade.

### 5.3.2.2 Solicitação por depressão

Para o ensaio da placa submetida a uma pressão inferior à pressão atmosférica foi construída uma câmara estanque, sendo a pressão controlada por um cilindro pneumático. O conjunto, placa mais o suporte de fixação, são montados no interior da câmara e a depressão é aplicada por extracção do ar através do deslocamento do êmbolo do cilindro, Fig. 5.33.



Fig. 5.33 – Imagem da montagem experimental da placa laminada compósita no interior da câmara hipobárica.

O procedimento experimental de medição do campo de rotações através do sistema *Shear* é análogo ao do ensaio anterior. O mapa de fase depois de filtrado e o respectivo campo de rotações obtidos para uma variação de pressão na câmara de  $-500\text{Pa}$  podem ser observados na Fig. 5.34.

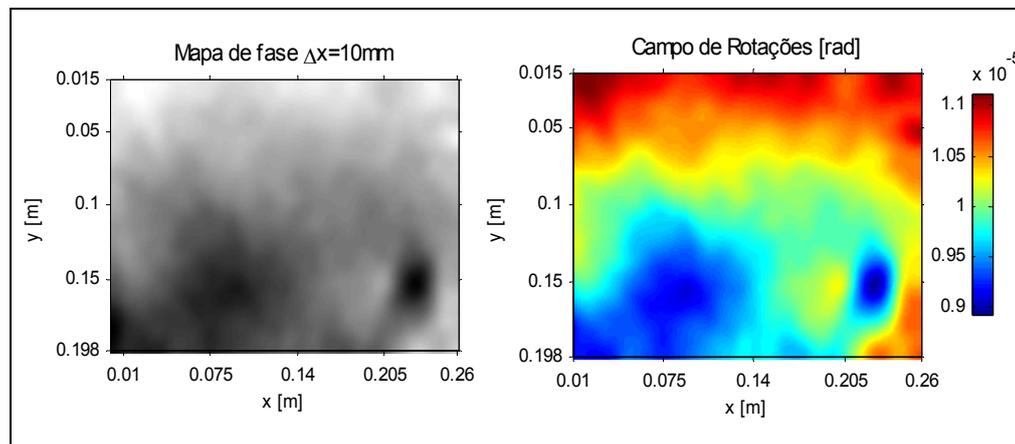


Fig. 5.34 – Mapa de fase e o respectivo campo de rotações da placa laminada compósita submetida a uma variação de pressão de  $-500\text{Pa}$ .

Ao contrário do ensaio anterior, neste caso a ausência de franjas no mapa de fase e/ou de lobos no campo de rotações impedem a identificação directa das delaminações. Porém, as perturbações associadas às delaminações são evidenciadas pelo campo das curvaturas. Para a direcção do eixo do  $x$ , este é obtido por aplicação da metodologia de diferenciação numérica de ordem um ao campo de rotações e pode ser observado na Fig. 5.35. A distribuição de amplitudes neste campo revela a presença de uma delaminação coincidente com a localização do impacto 2 de maior energia, o mesmo não se verifica para a delaminação do impacto 1. Este resultado está provavelmente relacionado com a fuga do ar aprisionado no interior da delaminação pelas micro-porosidades existentes na placa, a maioria das quais causados pelo esmagamento da matriz através dos impactos.

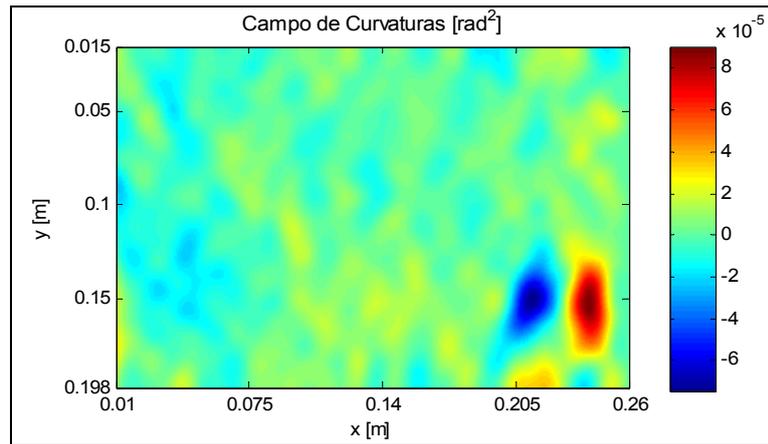


Fig. 5.35 – Campo de curvaturas segundo o eixo  $x$  para a placa laminada composta submetida a uma variação de pressão de -500Pa.

Da análise comparativa entre a representação dos campos das curvaturas obtidos para os dois ensaios, pode concluir-se que a solicitação térmica é a mais eficaz na detecção das delaminações em placas laminadas compostas. O modelo de comportamento da placa para solicitação por depressão está condicionado pelo volume de ar aprisionado na região interlaminar, o qual restringe a sua detecção a uma dimensão mínima.

### 5.3.3 Resposta modal

Os ensaios realizados na placa para a condição livre-livre consistiram na medição das frequências e respectivos modos naturais de vibração para a placa original e placa após o impacto 1 e os impactos 1 + 2. A placa é suspensa por elásticos de elevada flexibilidade, conferindo ao sistema uma condição próxima da livre-livre, Fig. 5.36. As frequências naturais de vibração são obtidas através da medição da FRF do tipo mobilidade (espectro da velocidade/ espectro da força), sendo a excitação, transiente, aplicada por um martelo de impacto de reduzidas dimensões PCB modelo 084A17 e a resposta em velocidade, medida sem contacto, através do vibrómetro LASER da Polytec® modelo OFV-3001. Uma fita reflectora é colada na superfície da placa para aumentar a reflectividade do feixe LASER e, assim, melhorar a qualidade do sinal. Os dois sinais são amplificados e condicionados no amplificador B&K 2525 e depois analisados em frequência no sistema Oros® - OR35.

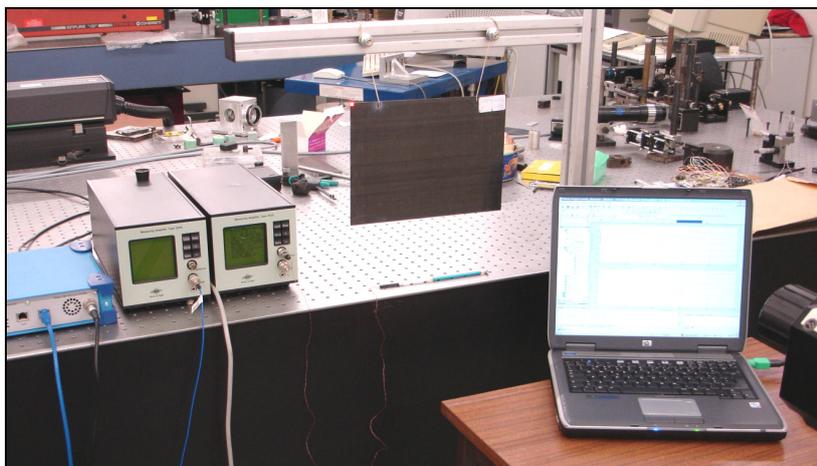


Fig. 5.36 – Imagem da montagem experimental para a medição da FRF mobilidade da placa livre-livre.

Para os três casos, a função mobilidade do tipo  $H_1$  é medida no canto superior direito da placa, definido em relação à face usada para medição dos modos naturais de vibração. Na Fig. 5.37 estão representadas as magnitudes das três FRF mobilidade medidas para uma resolução em frequência de 156,25 mHz na banda entre 0Hz e 1kHz.

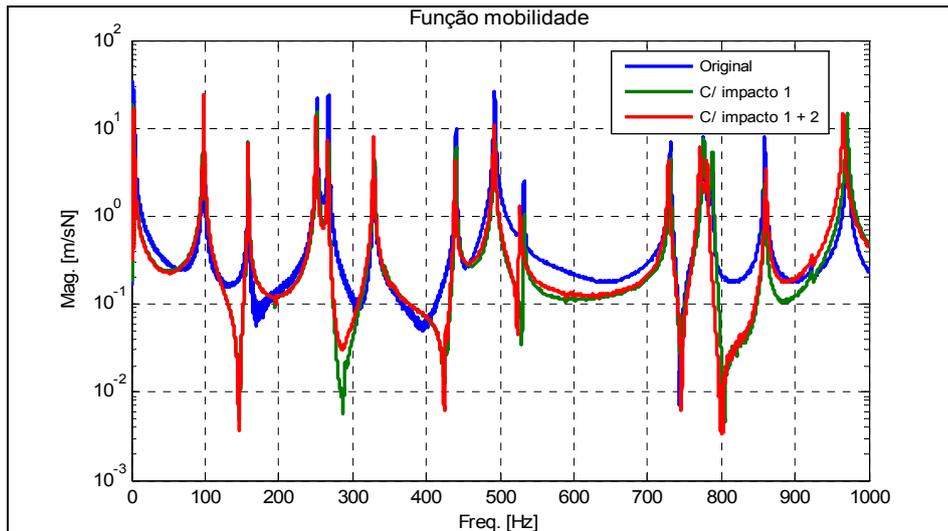


Fig. 5.37 – Representação das magnitudes da função mobilidade do tipo  $H_1$  medidas para as três situações de dano na placa.

A análise das funções mobilidade para a placa livre-livre, Fig. 5.37, revela a presença de treze frequências naturais de vibração nesta banda de frequências. A distribuição destas funções permite verificar que os danos produzem diminuição nas frequências naturais de vibração, principalmente, nas de ordem mais elevada. A partir do máximo das amplitudes da função mobilidade são identificadas as frequências naturais de vibração. Na Tabela 5.6 são apresentadas as frequências identificadas para as três situações em estudo e a variação de frequência produzida pelos danos de impacto.

**Tabela 5.6 – Frequências naturais de vibração da placa livre-livre para diferentes situações de dano.**

Ordem da frequência	Original	C/ impacto 1		C/ impactos 1 + 2	
		Freq. [Hz]	Variação	Freq. [Hz]	Variação
1 <sup>a</sup>	97,7	97,8	0,16 %	98,1	0,33 %
2 <sup>a</sup>	158,6	158,6	0 %	158,3	-0,19 %
3 <sup>a</sup>	251,6	251,6	0 %	250,3	-0,52 %
4 <sup>a</sup>	267,3	267,2	-0,04 %	266,7	-0,19 %
5 <sup>a</sup>	329,1	328,9	0,06 %	328,4	-0,15 %
6 <sup>a</sup>	440,2	440,2	0 %	438,8	-0,32 %
7 <sup>a</sup>	492,7	492,5	-0,04 %	492,0	-0,10 %
8 <sup>a</sup>	532,5	532,8	0,06 %	526,8	-1,13 %
9 <sup>a</sup>	730,9	730,9	0 %	728,3	-0,36 %
10 <sup>a</sup>	776,1	776,1	0 %	771,1	-0,64 %
11 <sup>a</sup>	787,8	788,0	0,03 %	780,8	-0,91 %
12 <sup>a</sup>	858,9	858,8	-0,01 %	858,8	0 %
13 <sup>a</sup>	970,6	970,5	-0,01 %	965,5	-0,52 %

A análise dos valores da tabela permite verificar que após impacto 1 a placa apresenta variações irrelevantes relativamente à situação original, a qual resulta da resolução em frequência de 156,25 mHz. Pelo contrário, os impactos 1+2 produzem, em geral, uma redução significativa nas frequências naturais da placa, sendo o valor máximo de 1,13 % para a 8<sup>a</sup> frequência. Em particular neste caso verifica-se um aumento da primeira frequência natural. Resultados semelhantes têm sido apresentados na literatura [15, 16]. Este aumento é possivelmente devido a alterações locais da estrutura, como ruptura das fibras, fissuração da matriz e delaminação, produzidas pelos impactos na placa.

Os campos de deslocamentos e rotações dos modos naturais de vibração da placa livre-livre são medidos pelos sistemas ESPI e *Shear* Pulsados. A partir destes são determinados os campos das curvaturas por aplicação da metodologia de diferenciação numérica, respectivamente, duas e uma vez. Para a análise das delaminações na placa é usado  $ISD(i,j)$  do campo das curvaturas definido entre a placa original  $S_{i,j}$  e a placa após os impactos  $S_{i,j}^d$ , sendo  $i, j$  as coordenadas do campo (capítulo 2).

### 5.3.3.1 Análise do dano a partir da medição do campo de deslocamentos modais

A placa é suspensa por elásticos e excitada acusticamente às frequências naturais por um altifalante montado junto à sua face posterior. O campo de deslocamentos associado aos modos naturais de vibração é medido pelo sistema ESPI Pulsado, sendo ajustada a amplitude da vibração à gama de medição do sistema e sincronizado o duplo disparo do LASER com o movimento da placa. A validação dos modos naturais de vibração em placas laminadas compósitas obtidos com este sistema foi apresentada em trabalhos anteriormente publicados [16, 17]. Os campos de deslocamentos dos doze primeiros modos naturais, para a placa original e placa após o impacto 1 e após os impactos 1+2, estão representados nas figuras seguintes, sendo os correspondentes mapas de fase apresentados no anexo F.

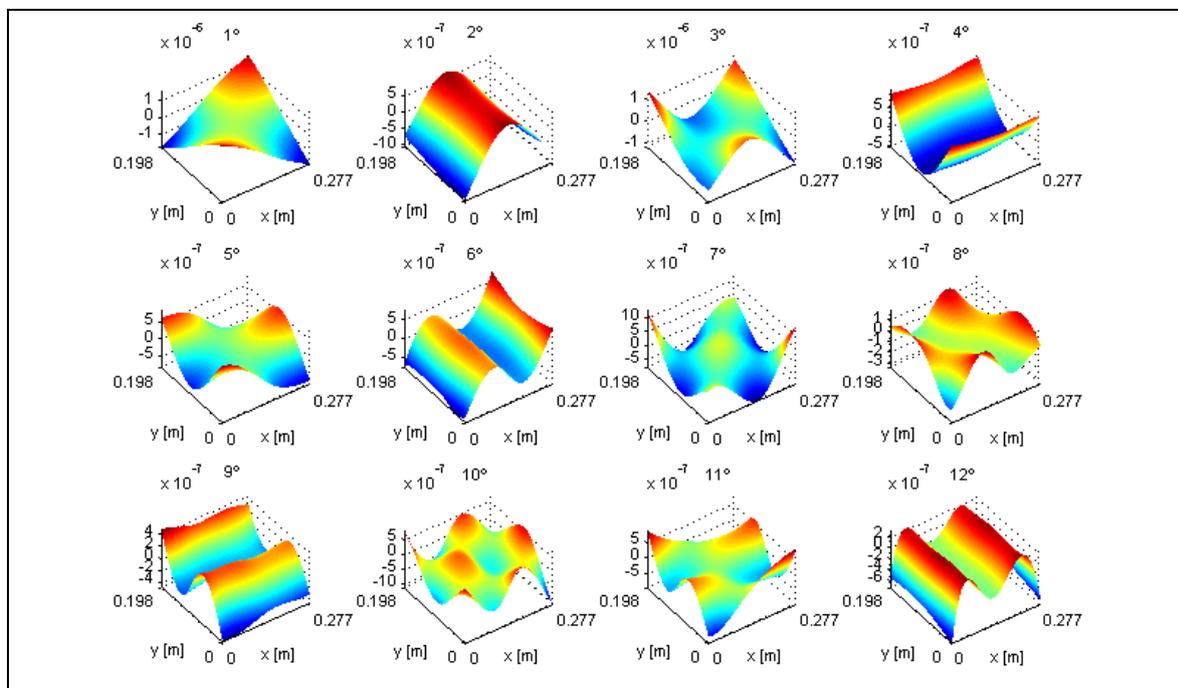


Fig. 5.38 – Representação dos campos de deslocamentos dos modos naturais da placa original.

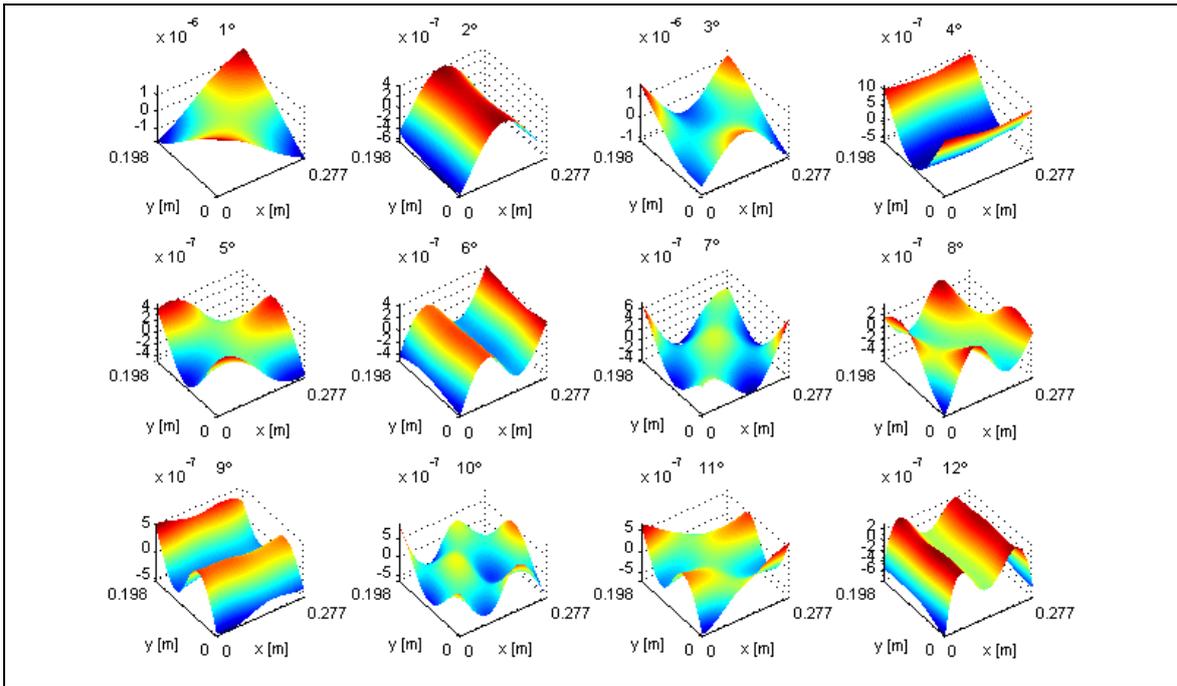


Fig. 5.39 – Representação dos campos de deslocamentos dos modos naturais da placa após impacto 1.

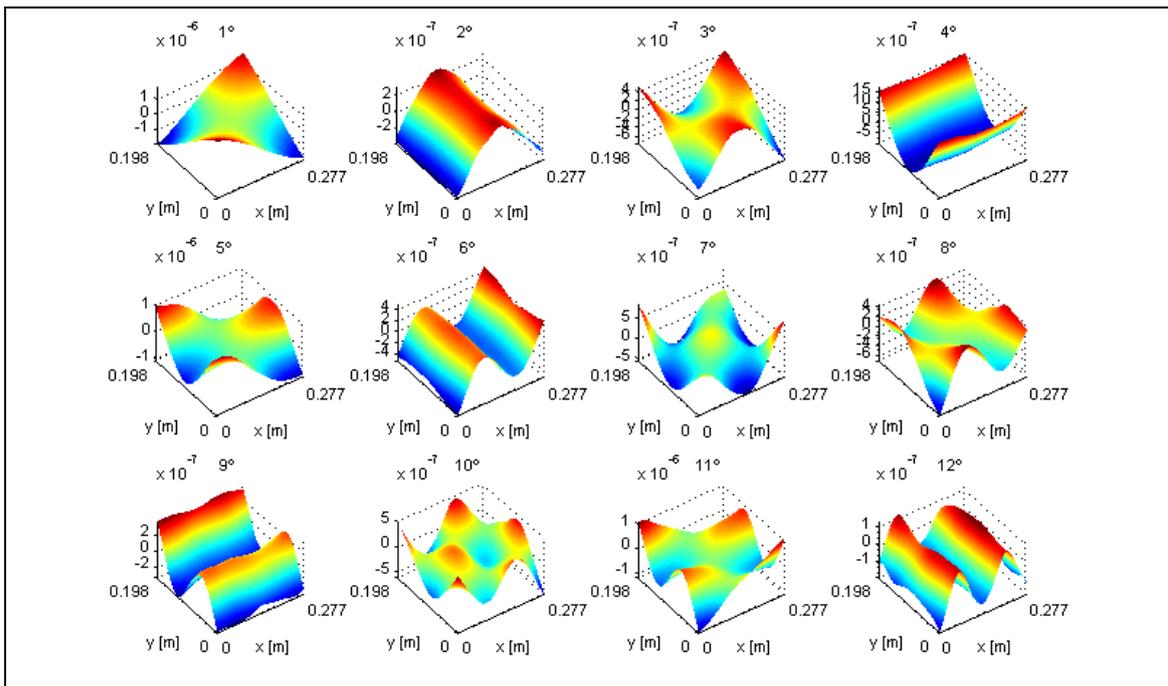


Fig. 5.40 – Representação dos campos de deslocamentos dos modos naturais da placa após os impactos 1+2.

Comparando as formas modais obtidas para os três casos de dano na placa, verifica-se que, globalmente, existe uma boa concordância, não sendo observadas alterações relevantes na configuração geométrica. A partir destes são determinados os campos de rotações e de curvaturas, por aplicação da metodologia de diferenciação numérica, os quais se apresentam no anexo F. Nos campos das rotações observam-se pequenos desvios na configuração entre os diferentes casos, os quais são superiores para a placa após os impactos 1+2. Contudo, verifica-se que estes são mais significativos fora das região dos impactos, daqui pode concluir-se que resultam da propagação e amplificação do ruído de medição em consequência do cálculo da primeira derivada espacial do campo de deslocamentos modal. Este efeito acentua-se para os campos de curvaturas, com o cálculo da segunda derivada espacial.

A análise estrutural dos danos produzidos pelos impactos na placa é realizada com base nos campos ISD das curvaturas, obtidos, no primeiro caso, entre a resposta da placa original e da placa

após o impacto 1 e, no segundo caso, entre a resposta da placa original e da placa após os impactos 1+2. Os ISDs das curvaturas  $xy$  para estes dois casos podem ser observados, respectivamente, na Fig. 5.41 e Fig. 5.42, onde também se indica a localização dos dois impactos. Os restantes campos do ISD das curvaturas são apresentados no anexo F.

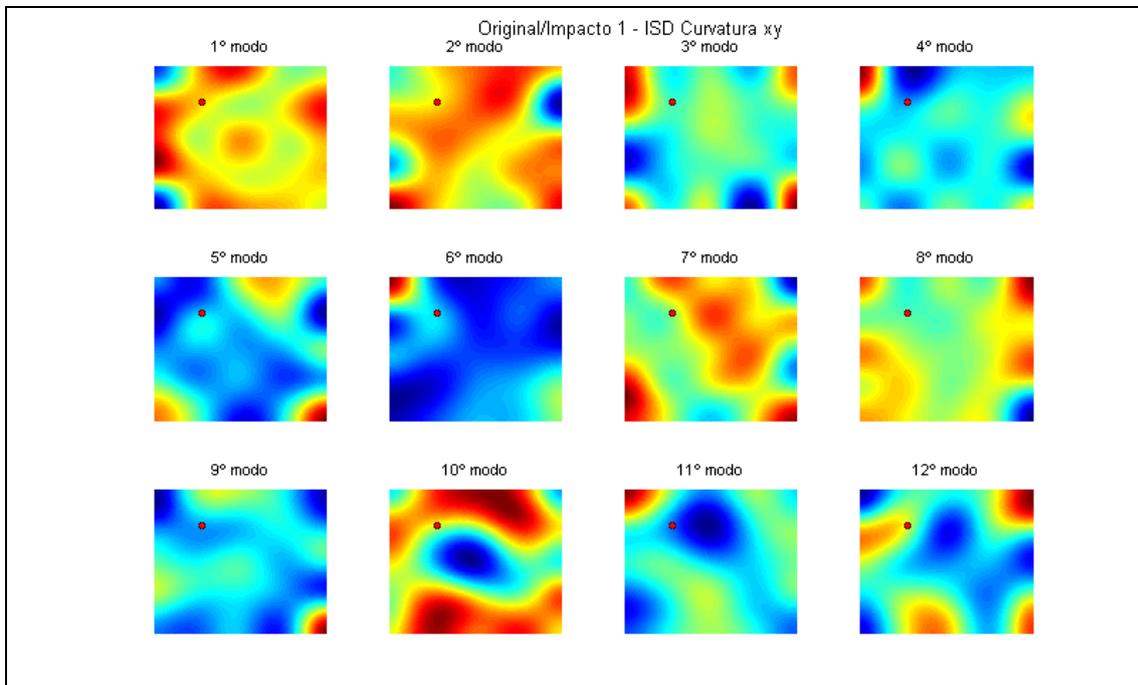


Fig. 5.41 – Representação dos campos ISD das curvaturas  $xy$ , obtidos entre a resposta da placa original e a resposta da placa após o impacto 1.

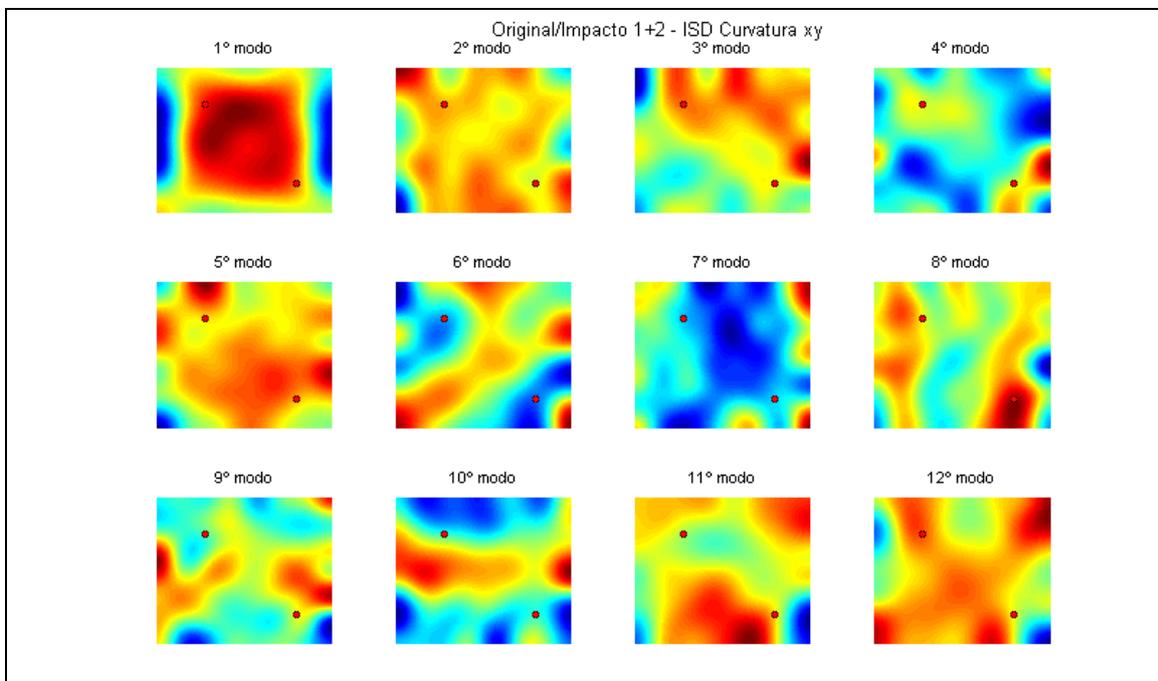


Fig. 5.42 – Representação dos campos ISD das curvaturas  $xy$ , obtidos entre a resposta da placa original e a resposta da placa após os impactos 1+2.

No primeiro caso, a distribuição dos ISDs das curvaturas não correspondem à localização do impacto 1. Pelo contrário, no segundo caso, a distribuição do ISD da curvatura  $xy$  do 8º modo é concordante com o impacto 2, Fig. 5.42, o qual permite identificar a região da delaminação. Neste caso, realça-se também o facto do 8º modo da placa com impactos 1+2 apresentar a maior variação da frequência natural relativamente à placa original, Tabela 5.6.

A partir da magnitude do campo ISD das curvaturas  $xy$  do 8º modo natural de vibração é determinada a região da delaminação, que se representa sobreposta à imagem da placa na Fig. 5.43. A região de delaminação identificada engloba a localização do impacto 2 e é concordante com a área representada na Fig. 5.32.

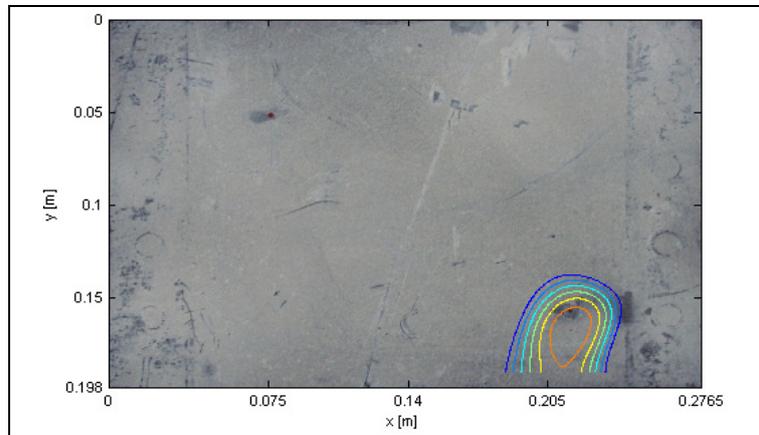


Fig. 5.43 – Imagem da placa laminada com representação da região de delaminação identificada a partir do campo de curvaturas, resultado obtido por diferenciação numérica do campo de deslocamentos modal.

### 5.3.3.2 Análise do dano a partir da medição do campo de rotações modais

O procedimento experimental para medição dos campos de rotações modais é análogo ao ensaio anterior. Neste caso, os campos de rotação segundo  $x$  são medidos com o sistema *Shear Pulsado*, utilizando a técnica de modulação espacial da fase. Na Fig. 5.44 estão representados o campo de rotações associado aos doze primeiros modos naturais da placa após sofrer os impactos 1+2. Os correspondentes mapas de fase estão representados no anexo F. A análise comparativa entre estes campos e os obtidos no ensaio anterior para a placa original (ver anexo F), revela que, à exceção do quarto modo, ambos apresentam uma configuração idêntica.

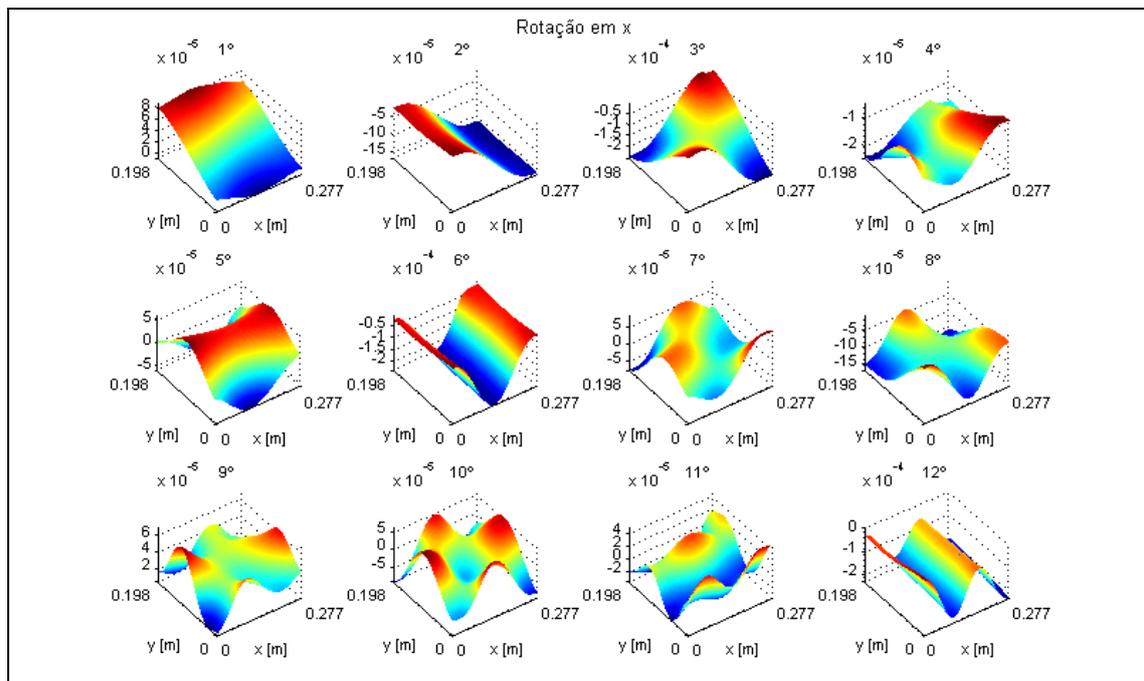


Fig. 5.44 – Representação dos campos de rotações em  $x$  dos modos naturais da placa após os impactos 1+2.

As pequenas discontinuidades e/ou perturbações no campo de rotações, associadas às delaminações na placa, acentuam-se para o campo de curvaturas. O campo de curvaturas em  $x$ , correspondente à primeira derivada espacial do campo de rotações em  $x$ , é obtido por aplicação da

metodologia de diferenciação numérica aos campos medidos, podendo ser observados na Fig. 5.45. Neste caso e ao contrário dos ensaios anteriores, a distribuição do campo de curvaturas apresenta, para a localização do impacto 2, perturbações na configuração relativamente aos campos obtido para a placa original do ensaio anterior, denunciando deste modo a presença de uma delaminação nesta região. Este resultado aponta igualmente para o facto da determinação da curvatura a partir da medição do campo das rotações se manifestar mais sensível ao dano em relação à medição do campo de deslocamentos. Conforme anteriormente referido, a medição do campo de rotações permite reduzir em uma ordem o cálculo da derivada espacial por via numérica. A metodologia de diferenciação numérica exige aplicação a cada ordem da derivada de filtros tipo passa-baixo com o objectivo de eliminar o ruído experimental de alta frequência. Este conduz a eliminação simultânea de termos do sinal de alta ordem, os quais são relevantes para a representação das perturbações na curvatura associadas ao dano.

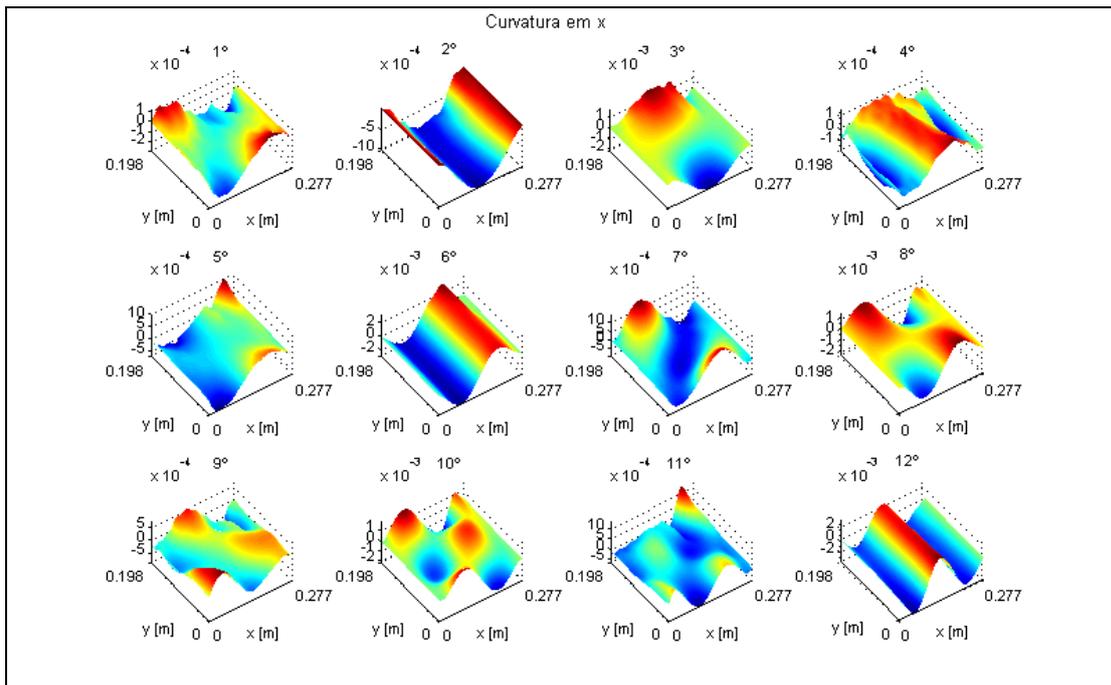


Fig. 5.45 – Representação dos campos de curvaturas em  $x$  dos modos naturais da placa após os impactos 1+2.

Neste caso, dada a evidência das perturbações representadas na Fig. 5.45, os campos dos ISD das curvaturas são calculados entre a resposta da placa após os impactos e a resposta da placa original, obtida pelo método dos elementos finitos no programa comercial Ansys<sup>®</sup>. Deste modo, pretende-se demonstrar a eficácia desta metodologia mesmo na ausência do registo experimental da resposta da estrutura anterior ao dano.

A simulação numérica em Ansys<sup>®</sup> foi realizada com base no modelo da placa apresentado na Fig. 5.25, sendo o seu domínio igualmente discretizado em elementos Shell93. O campo de curvaturas segundo  $x$  é determinado por diferenciação numérica do campo de rotações em  $x$  obtido na simulação para a placa livre-livre. A partir destes são determinados os campos ISD das curvaturas em  $x$  que estão representados na Fig. 5.46. A sua análise revela para diferentes modos naturais a presença de uma região delaminada que abrange o impacto 2.

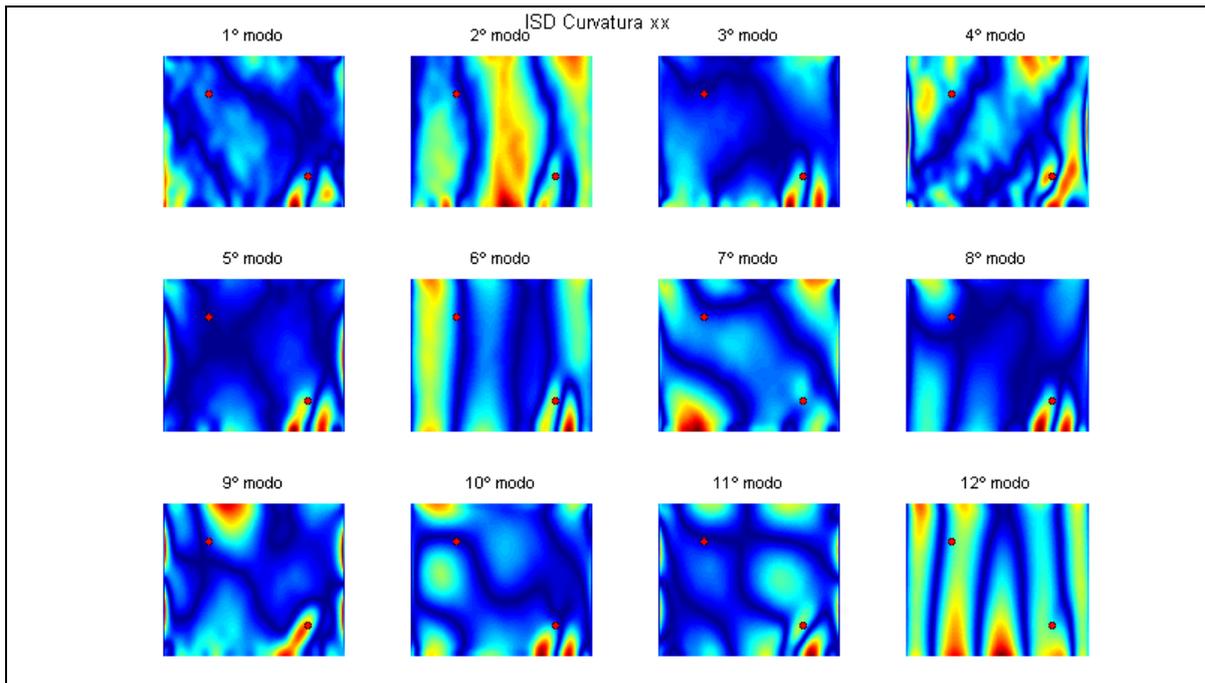


Fig. 5.46 – Representação dos ISD das curvaturas xx obtidos entre a resposta modal da placa original, obtida por MEF, e a resposta modal da placa após os impactos 1+2.

À semelhança dos estudos anteriores, apresenta-se na Fig. 5.47 a imagem da placa e a região de delaminação identificada a partir da magnitude do ISD do 8º modo representado na Fig. 5.46. Esta é definida pelo contorno que circunscreve as duas amplitudes máximas justapostas da Fig. 5.47, apresentando uma disposição próxima das outras duas regiões representadas na Fig. 5.32 e Fig. 5.43.

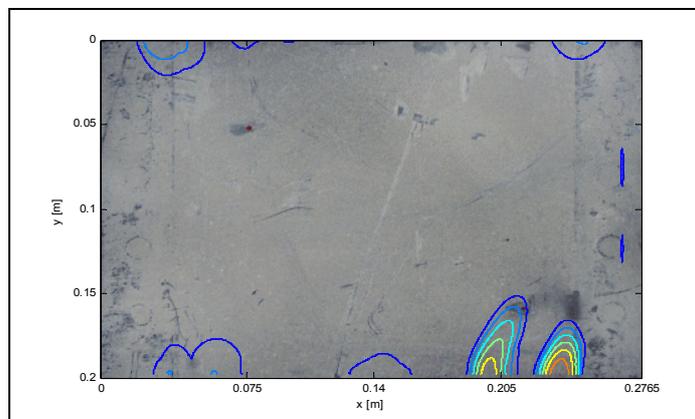


Fig. 5.47 – Imagem da placa laminada e representação da região de delaminação identificada a partir do campo de curvaturas, obtido por diferenciação numérica do campo de rotações modais.

### 5.3.4 Resposta transiente

O campo de rotações da resposta transiente da placa livre-livre foi medida pelo sistema *Shear Pulsado*, utilizando um LASER de rubi LUMONICS® de duplo impulso. A montagem da placa livre-livre é concretizada pela sua suspensão numa estrutura de suporte por elásticos de elevada flexibilidade, conferindo à estrutura uma situação próxima da condição livre no espaço. A resposta transiente é gerada pelo impacto no centro da placa de um transdutor de força, PCB® 219B, ligado por intermédio de uma haste flexível ao excitador electromagnético LDS® modelo V101. Este é colocado junto à face posterior da placa e montado num pórtico independente, por forma a isolar a estrutura de suporte de eventuais perturbações produzidas pelo movimento do êmbolo do excitador. Dois geradores de sinal ligados em tandem são usados para sincronizar o impacto e o disparo duplo do LASER, Fig. 5.48, o primeiro controla o tempo de atraso e o segundo gera um sinal semi-seno para o excitador

electromagnético através do amplificador LDS<sup>®</sup> PA25, produzindo o impacto na placa. O facto da placa se movimentar livremente no espaço cria alterações no tempo de sincronismo entre ensaios, pois, a alteração da distância entre o transdutor de força e a superfície da placa condiciona o tempo de avanço da geração do sinal semi-seno. Esta dificuldade adicional foi ultrapassada pelo autor através da geração de um sinal semi-seno de elevada frequência (6 kHz). Os sinais no tempo da força de impacto depois de condicionado no amplificador B&K 2525 e do duplo disparo do LASER registado por um fotodetector rápido são guardados no osciloscópio digital Tektronix<sup>®</sup> TDS3014B para posterior análise, Fig. 5.48.

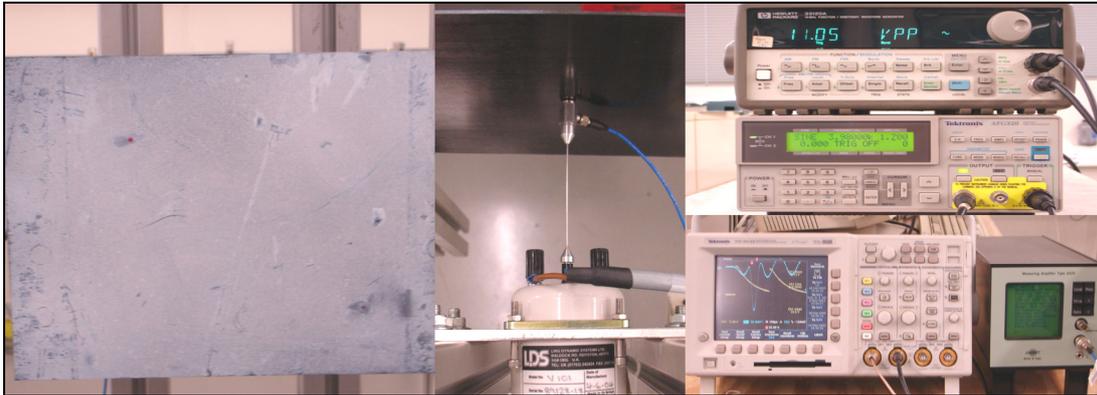


Fig. 5.48 – Imagens da montagem da placa com impactos 1+2, do excitador electromagnético LDS, da haste mais transdutor de força, dos dois geradores de sinal, do amplificador B&K 2525 e do osciloscópio Tektronix usados na medição da resposta transiente da placa livre-livre.

Na Fig. 5.49 estão representados, para os diferentes instantes do tempo medidos entre o início da força de impacto e o segundo disparo do LASER, os mapas de fase medidos pelo sistema *Shear Pulsado*, o mapa de fase após filtragem da fase e os correspondentes campos de rotações segundo o eixo  $x$  da propagação das ondas de flexão para a placa após os impactos 1+2.

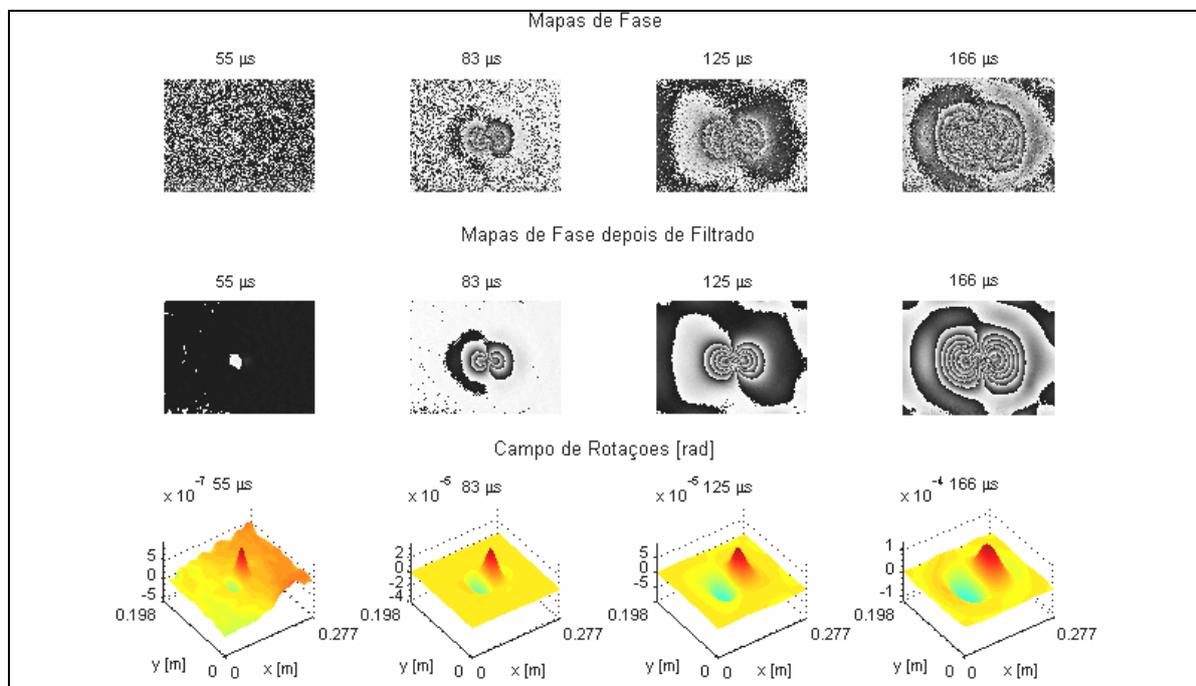


Fig. 5.49 – Representação dos mapas de fase e dos campos de rotação em  $x$  da propagação das ondas de flexão na placa após os impactos 1+2.

As franjas apresentadas na Fig. 5.49 revelam uma distribuição aproximadamente circular e concêntrica devido às propriedades quase isotrópicas do empilhamento do laminado. A análise preliminar da configuração espacial das franjas de fase e a amplitude do campo de rotações não

permitem detectar a presença das delaminações.

Por aplicação da metodologia de diferenciação numérica aos campo de rotações medido são determinadas as segundas derivadas espaciais do campo de deslocamentos, correspondentes às curvaturas em  $x$  da propagação das ondas de flexão na placa, as quais podem ser observadas para os diferentes instantes de tempo na Fig. 5.50. Estas são representadas por três lobos justapostos, em oposição de fase, que se propagam desde o centro até ao bordo da placa, instante  $166\mu s$ . As delaminações não se manifestam na distribuição das curvaturas para os instantes de tempo analisados, que apresentam simetria radial em relação ao ponto de impacto.

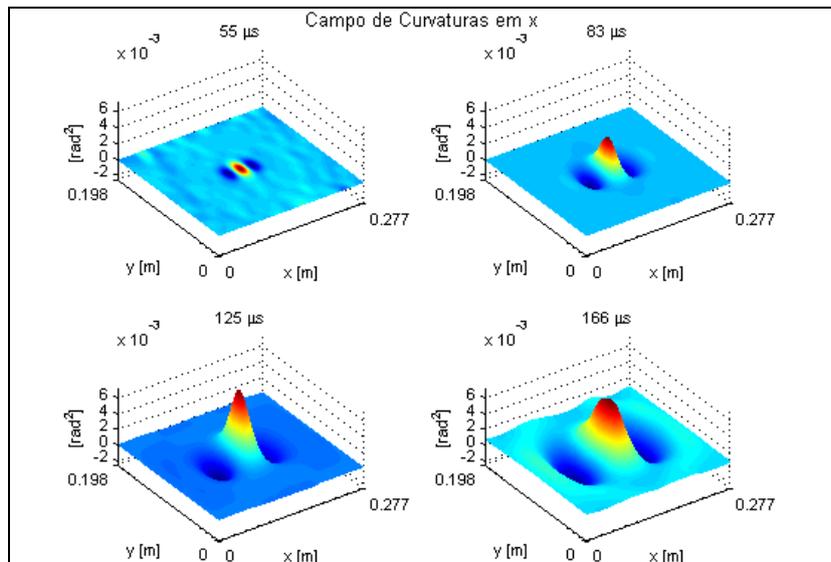


Fig. 5.50 – Representação dos campos de curvatura em  $x$  da propagação das ondas de flexão na placa após os impactos 1+2.

À semelhança do ensaio anterior, o ISD do campo de curvaturas, Fig. 5.51, é calculado entre a resposta transiente da placa após os impactos 1+2 e a resposta transiente da placa original obtida pelo MEF, sendo usada nesta simulação a história da força do impacto registada no osciloscópio. Em consequência dos campo das curvaturas em  $x$ , os campo do ISD não manifestam perturbações e/ou descontinuidades correspondentes às regiões dos impactos na placa, Fig. 5.51.

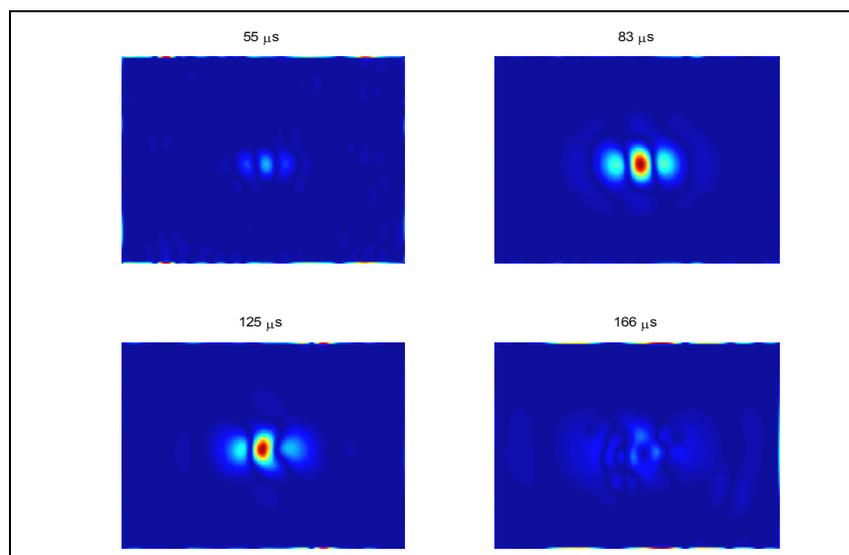


Fig. 5.51 – Representação dos ISD das curvaturas campos, obtidos entre a resposta transiente da placa original e a resposta transiente da placa após os impactos 1+2.

Os resultados obtidos para a placa laminada compósita confirmam o campo de curvaturas obtido por aplicação da metodologia numérica ao campo de rotações da resposta estática, anteriormente

evidenciado na análise da viga de alumínio, e estabelecem a solicitação térmica como a metodologia mais eficaz na detecção estrutural do dano neste tipo de estruturas. De seguida, apresenta-se a aplicação desta metodologia à análise de múltiplos descolamentos numa placa sanduíche utilizada na construção aeronáutica.

#### 5.4 Análise da placa sanduíche

Na placa sanduíche em alumínio foram criados três descolamentos durante o processo de fabrico pela remoção de três áreas na camada de cola colocada entre uma das peles e o núcleo em ninho abelha, cujas dimensões e localização se representam na Fig. 5.52.

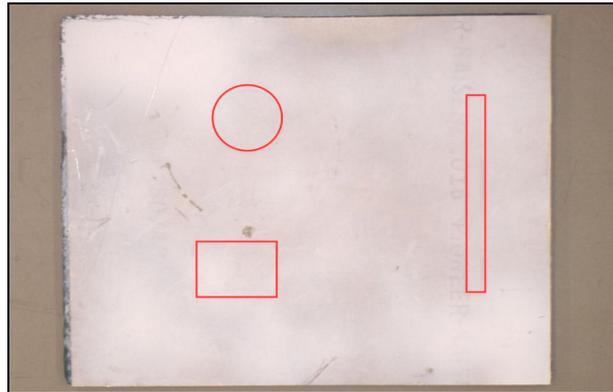


Fig. 5.52 – Imagem da placa com representação dos três descolamentos.

A placa é fixa numa das extremidades num maciço em Aço e montada sobre uma mesa anti-vibratória da Newport<sup>®</sup>. O sistema *Shear* e a técnica de modulação temporal de fase de 4 imagens desfasadas entre si de  $\pi/2$ , são usados na medição do campo de rotações produzido pelo aquecimento da placa. A superfície avaliada foi pintada de branco para aumentar e uniformizar a reflectividade da iluminação LASER de comprimento de onda  $\lambda = 532\text{nm}$ . O procedimento experimental de medição do campo de rotações consiste na gravação das primeiras quatro imagens, com a placa na posição inicial, aquecimento da superfície durante 10 segundos por uma lâmpada de 100 W e gravação das restantes quatro imagens depois de estabilizada a posição final. O comportamento da placa após o aquecimento é acompanhado através da visualização em tempo real das franjas correspondentes à rotação da superfície. Estas são obtidas por subtração entre a imagem previamente gravada para a posição inicial e a imagem adquirida à taxa máxima da câmara (17 imagens/segundo). O mapa de fase filtrado e o respectivo campo de rotações, obtido pela técnica *unwrapping*, estão representados na Fig. 5.53. A sua análise permite desde já identificar três perturbações representativas das regiões dos descolamentos introduzidos na placa sanduíche.

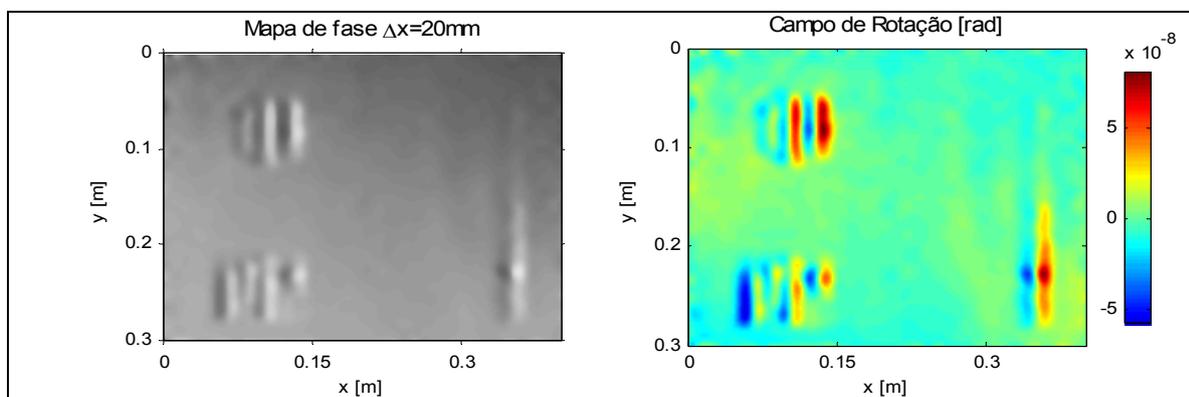


Fig. 5.53 – Mapa de fase e respectivo campo de rotações obtido para a placa sanduíche, obtida após aquecimento da superfície.

O campo de curvaturas em  $x$ , obtido por diferenciação espacial do campo de rotações medido,

permite evidenciar as perturbações apresentadas no campo de rotações e que estão associadas aos descolamentos, Fig. 5.54. Da observação das perturbações na Fig. 5.54, verifica-se existirem três regiões isoladas de configuração geométrica distinta.

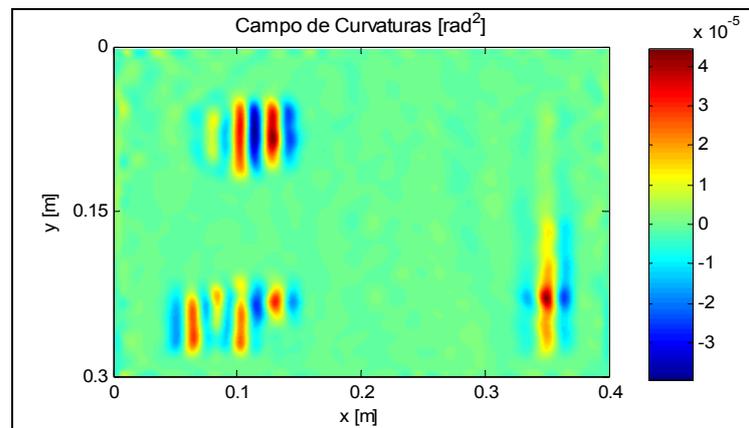


Fig. 5.54 – Campo de curvaturas segundo o eixo  $x$  para a placa sanduíche, obtida após aquecimento da superfície.

As dimensões destas regiões são identificadas tomando o contorno das magnitudes do campo de curvaturas. Através de técnicas desenvolvidas de processamento de imagem e depois de compensado o efeito do desfasamento entre as frentes de onda, associada ao sistema de medição *Shear*, são identificadas as regiões dos descolamentos, as quais agora se sobrepõem à imagem da placa na Fig. 5.55

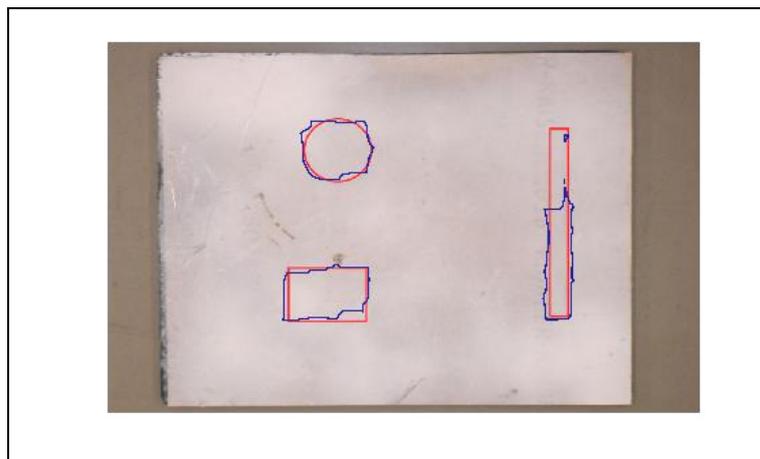


Fig. 5.55 – Imagem da placa sanduíche com representação das regiões de descolamentos identificadas a azul, sendo representadas a vermelho as dimensões dos defeitos introduzidos na placa.

As regiões identificadas na placa a partir do campo de curvaturas, Fig. 5.55, revelam globalmente uma boa concordância com os descolamentos introduzidos na placa. Contudo, verifica-se que, para o descolamento de menor dimensão horizontal, a área identificada é inferior à inicialmente criada. Este facto poderá ser explicado por uma eventual dispersão da camada de cola durante o seu processo de cura em Autoclave.

A elevada qualidade dos resultados obtidos com esta metodologia é justificada pela utilização do sistema *Shear* para a medição de campo, sem contacto e de elevada resolução do gradiente dos deslocamentos. O facto desta técnica se basear unicamente na alteração do comportamento estrutural medido à superfície, torna-a imune às descontinuidades internas da estrutura, que neste caso se traduz pela utilização do ninho de abelha. Pelo contrário, a técnica *C-Scan*, que utiliza como meio a propagação de ondas internas no material, mostra-se menos adequada à detecção de danos neste tipo de estruturas.

### 5.5 Discussão e conclusões

A medição do campo de rotações pelo sistema *Shear* e posterior aplicação da metodologia de diferenciação numérica, permitiu determinar com sucesso os campos dos esforços internos, momento-flector e esforço de corte da resposta estática da viga em consola na ausência de danos estruturais. A determinação estrutural do dano a partir da análise das perturbações e/ou descontinuidades do ISD dos campos de resposta estática nesta viga demonstrou produzir melhores resultados para o campo momento-flector. O campo de rotações apresenta-se, naturalmente, afectado pelo ruído de alta frequência, o qual se torna preponderante durante o cálculo das derivadas espaciais. A aplicação de filtros do tipo passa-baixo às sucessivas derivadas permite atenuar este efeito. Contudo, neste processo são também eliminados termos de ordem mais elevada do sinal, os quais são fundamentais para representar no campo do esforço de corte as perturbações e/ou descontinuidades associadas ao dano.

Com a medição do campo modal de deslocamentos modal pelo sistema ESPI Pulsado e do campo modal de rotações pelo sistema *Shear* Pulsado, provou-se que a redução de uma ordem da derivada espacial conduz a uma melhoria significativa na representação da curvatura e à consequente determinação estrutural do dano. Os resultados experimentais obtidos para os dois primeiros modos permitem validar a análise numérica pelo MEF, sendo através desta identificado o ISD do campo momento-flector do primeiro modo natural de vibração como o melhor indicador para localizar o dano. Porém, a qualidade destes resultados ficam aquém dos obtidos para a resposta estática, onde, para além do dano foi possível quantificar o aumento relativo da sua severidade entre os casos 1 e 2. Esta diferença de resultados está associado ao facto de no domínio do número de onda o campo de rotações da resposta estática apresentar uma distribuição centrada nos termos de mais baixa ordem, ao contrário da primeira forma natural de vibração que apresenta uma maior dispersão dos termos. Como, a diferenciação espacial amplifica os termos de ordem superior, esta conduz a que as componentes do campo de curvatura se confundam com as perturbações associadas ao dano, tornando assim difícil a sua identificação. Além disso, há a acrescentar o maior nível de ruído produzido pela descorrelação do *Speckle* nas técnicas de interferometria pulsadas. Na Fig. 5.56 pode observar-se a representação da razão sinal/ruído *versus* amplitude do deslocamento máximo, calculados entre os mapas de fase medidos e os mapas de fase após filtragem [18], para os sistemas ESPI Pulsado, *Shear* e *Shear* Pulsado.

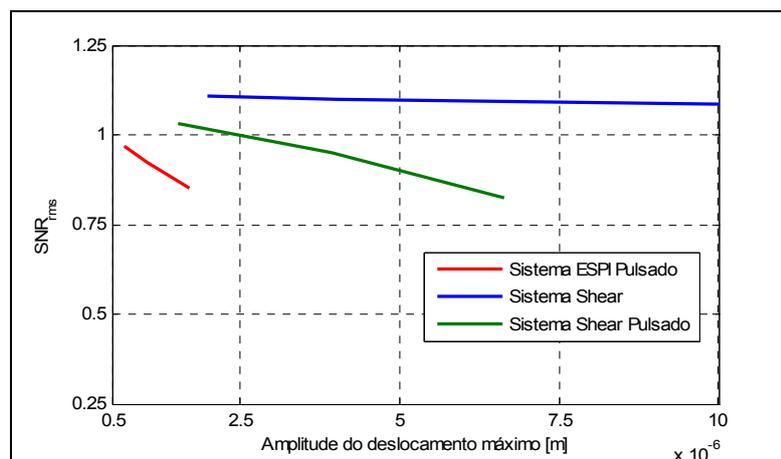


Fig. 5.56 – Representação da razão sinal/ruído vs a amplitude máxima do deslocamento determinados a partir dos mapas de fase medidos com os sistemas ESPI Pulsado, *Shear* e *Shear* Pulsado.

A análise da Fig. 5.56 revela que o sistema *Shear* apresenta a melhor relação sinal/ruído devido ao facto de este usar a técnica de modulação temporal de fase, ao contrário dos sistemas Pulsados, que dada a natureza do fenómeno dinâmico, estão limitados à técnica de modulação espacial de fase, esta é mais sensível à descorrelação do *Speckle* e, por isso, apresentando maior ruído. O superior

desempenho do sistema *Shear* Pulsado relativamente ao sistema ESPI Pulsado pode ser atribuída à melhor definição e resolução do CCD da câmara, sendo que no primeiro é usado uma câmara JAI® CV-M2 com 1608x1208 píxel codificado numa escala de 10 *bits*, enquanto que no segundo, sistema comercial-Ettemeyer.GmbH&Co., a gravação é feita com uma câmara Pulnix® com 512x512 píxel codificados numa escala de 8 *bits*.

As delaminações introduzidas por impacto na placa laminada compósita são analisadas a partir da sua resposta estática, modal e transiente. Para a resposta estática são analisadas as delaminações somente a partir dos campos de curvaturas da placa após os impactos. Foram realizados dois ensaios: no primeiro ensaio a placa é submetida a um carregamento uniforme por aquecimento da superfície, enquanto que no segundo é solicitada por depressão colocando a placa numa câmara estanque. Os campos de curvaturas são determinados por aplicação da metodologia numérica ao campo de rotações, medido com o sistema *Shear*. As regiões de delaminação são estabelecidas a partir da análise do campo de curvaturas obtidas para a solicitação por aquecimento da superfície, o qual demonstrou produzir melhores resultados em relação à solicitação por depressão. A realização da análise modal experimental da placa original, placa após o impacto 1 e placa após os impactos 1+2, envolveu a medição do campo de deslocamentos pelo sistema ESPI Pulsado e do campo de rotações pelo sistema *Shear* Pulsado. Os campos de curvaturas correspondem à primeira derivada do campo de rotações ou segunda derivada do campo de deslocamentos, são determinados por aplicação da metodologia de diferenciação numérica aos campos medidos. A análise comparativa dos campos ISD das curvaturas, permitiram confirmar a maior eficácia da medição do campo de rotações. Aliás, a determinação da ISD das curvaturas da placa após os impactos 1+2 e a placa original, calculada pelo MEF, comprovou a robustez do método. Os ISD das curvaturas da resposta transiente na placa provaram ser ineficazes na análise estrutural do dano. Os resultados obtidos para a placa laminada evidenciam o melhor desempenho da medição do campo de rotações da resposta estática com aplicação da solicitação térmica. Esta metodologia foi testada na análise estrutural de três descolamento introduzidos numa placa sanduíche de alumínio. A presença dos descolamentos manifesta-se na forma de perturbações no campo de rotações que se acentuam para o campo das curvaturas. A partir destes resultados foram identificados as regiões dos descolamentos, cuja localização e dimensões se revelam próximas dos defeitos introduzidos na placa.

Em síntese, a partir dos resultados obtidos, pode concluir-se que o campo das curvaturas, determinado por aplicação da metodologia de diferenciação numérica ao campo de rotações experimental, é o melhor indicador para a caracterização do dano estrutural. Estes mostram também que, para placas laminadas compósitas e sanduíche, a análise do campo de rotações da resposta estática produzido pelo aquecimento uniforme da superfície da placa permite localizar o dano e determinar a sua dimensão.

## 5.6 Bibliografia

1. Timoshenko, S. and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of plates and shells*. 2d ed. Engineering societies monographs. 1959, New York,: McGraw-Hill. 580 p.
2. Bendat, J.S., Pierols, A.G., *Random data: analysis and Measurement Procedures*. 1971, New York: John Wiley and Sons, Inc. 407 pp.
3. Bendat, J.S., Pierols, A.G., *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*. 1980, New York: John Wiley and Sons, Inc. 302 pp.
4. A.S. Chu, E.E.E.a.R.M.W., *Shock and Vibration Handbook, "Chapter 12: Vibration Transducers"*. Fouth Edition ed, ed. C.M.H. Harris. 1995: McGraw-Hill.
5. Harris, C.M., *Shock and Vibration Handbook, "Chapter 15: Measurement Techniques"*. Fouth Edition ed, ed. C.M. Harris. 1995: Mcgraw-Hill.
6. Randall., R.B., *Shock and Vibration Handbook, "Chapter 14: Spectrum Analyzers and their use"*, C.M. Harris, Editor. 1995, McGraw-Hill.
7. Ewins, D., *Modal Testing: Theory and Practice*. 1984: John Wiley and Sons, Inc. 269 pp.

8. Takeda, M., H. Ina, and S. Kobayashi, *Fourier-Transform Method of Fringe-Pattern Analysis for Computer-Based Topography and Interferometry*. Journal of the Optical Society of America, 1982. 72(1): p. 156-160.
9. Ettemeyer.GmbH&Co., *ESPI Pulse*. 1999.
10. Ettemeyer, *Ruby Laser Manual*. Version 1.0 ed. 1999: Ettemeyer GmbH & Co.
11. Pedrini, G., Y.-L. Zou, and H.J. Tiziani, *Quantitative evaluation of digital shearing interferogram using the spatial carrier method*. Pure Appl. Opt., 1996. 5: p. 313-321.
12. Santos, F., M. Vaz, and J. Monteiro, *A new set-up for pulsed digital shearography applied to defect detection in composite structures*. Optics and Lasers in Engineering, 2004. 42(2): p. 131-140.
13. Icardia, U. and G. Zardo, *C0 plate element for delamination damage analysis, based on a zig-zag model and strain energy updating*. International Journal of Impact Engineering, 2005. 31: p. 579-606.
14. Hung, Y.Y., *Applications of digital shearography for testing of composite structures*. Composites Part B-Engineering, 1999. 30(7): p. 765-773.
15. Hamey, C.S., W. Lestari, P.Z. Qiao, and G.B. Song, *Experimental damage identification of carbon/epoxy composite beams using curvature mode shapes*. Structural Health Monitoring, 2004. 3(4): p. 333-353.
16. Santos, J.V.A.d., et al., *Damage localization in laminated composite plates using mode shapes measured by pulsed TV holography*. Composite Structures, 2006. 76: p. 272-281.
17. Araújo, A.L., et al., *Parameter estimation in active plate structures* Computers & Structures 2006. 84(22-23): p. 1471-1479.
18. Gonzalez, R.C. and P.A. Wintz, *Digital image processing*. 2nd ed. 1987, Reading, Mass.: Addison-Wesley. xviii, 503 p.

# Capítulo 6

## Conclusões

---

### 6.1 Conclusão

A crescente divulgação do uso de materiais compósitos em aplicações estruturais justifica plenamente os esforços investidos no desenvolvimento de novas técnicas e de metodologias que permitam controlar a sua integridade estrutural. Diversos autores publicaram trabalhos sobre este tema, procurando um método global de fácil utilização para realizar esta tarefa. Embora deva destacar-se a qualidade de alguns dos trabalhos publicados, a inspeção não destrutiva de componentes compósitos é um assunto em aberto. O laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME) do INEGI tem ao longo da última década procurado, com a utilização de técnicas interferométricas, desenvolver ferramentas que possam ser utilizadas em inspeção não destrutiva (IND) de materiais compósitos, quer em ambiente laboratorial, quer em ambiente industrial. Estas técnicas globais de medição sem contacto e de elevada resolução mostram-se bem adaptadas para esta aplicação. Neste contexto, foi proposto o presente trabalho, com o objectivo de desenvolver uma ferramenta que englobasse a experiência do grupo e tirasse partido dos mais recentes desenvolvimentos, em termos de óptica, electrónica e técnicas de processamento de imagem.

Na persecução dos objectivos traçados foi realizada uma exaustiva pesquisa bibliográfica, procurando o que de mais recente tem sido publicado nesta área. Das várias abordagens conhecidas, destacam-se aquelas que recorrem à análise da resposta estrutural dos componentes a um solicitação conhecida para identificar a suas debilidades. As técnicas ópticas distinguem-se nesta função pela facilidade com que permitem aceder ao campo de deslocamentos, quer em regime estático, quer em regime dinâmico. Nestes campos é, por vezes, possível identificar danos estruturais através de perturbações localizadas. Contudo, a elevada resolução acarreta também uma grande sensibilidade a perturbações externas. Como utilizam iluminação LASER, os resultados obtidos com estas técnicas possuem sempre ruído de alta frequência, vulgarmente designado por *Speckle*.

Neste contexto, procedeu-se à selecção de uma técnica de interferometria de *Speckle* que melhor satisfizesse os objectivos deste trabalho. As técnicas de *Shear* baseadas na utilização de interferómetros de braços comuns, permitem ultrapassar algumas das limitações. Como nesta técnica a luz percorre o mesmo caminho ao longo da maior parte do seu percurso, são menos sensíveis a perturbações externas. A combinação de ambos os braços do interferómetro pode ser ajustado de forma a medir directamente o gradiente do deslocamento. Esta característica é muito apreciada sempre que se procura identificar deslocamentos localizados. Todavia, esta técnica recorre a um interferómetro com referência de *Speckle*, o que torna mais ruidosos os resultados obtidos.

Da análise dos trabalhos mais relevantes publicados sobre a identificação do dano com técnicas globais, pode concluir-se que existe uma maior sensibilidade a perturbações estruturais sempre que, em vez dos deslocamentos superficiais, se recorre à medição dos esforços. No entanto, ao contrário dos deslocamentos, estes não são medidos directamente e implicam processos de cálculo ruidosos como é a diferenciação.

Porém, no estabelecimento de uma metodologia apropriada para este efeito, surgiu a necessidade de identificar o parâmetro que melhor caracteriza o dano estrutural. Dado não existir ainda um consenso sobre o melhor parâmetro para este fim, foi proposto neste trabalho o índice de sensibilidade

ao dano (ISD). Tratando-se de uma proposta inovadora, houve a necessidade de a testar recorrendo a métodos convencionais. Para isso foi desenvolvida, em código MATLAB<sup>®</sup>, uma ferramenta numérica que utiliza o método dos elementos finitos para simular o ISD. Para simplificação desta análise, o estudo foi realizado com base na resposta estática, modal e transiente de vigas para diferentes condições de apoio e simulando diferentes situações de dano. Neste contexto, foi também avaliada a influência do ruído procurando obter o limite mínimo da razão sinal/ruído que permite a detecção do dano. Nesta análise foi também considerado o ruído resultante da diferenciação numérica aplicada ao campo de deslocamento com adição de ruído.

Escolhida a técnica experimental e metodologia de detecção do dano, foram projectados e construídos dois sistemas interferométricos para caracterização do campo de rotações em situações estáticas e dinâmicas. Procurou-se nesta etapa construir sistemas compactos e capazes de produzir resultados cuja relação sinal/ruído cumprisse os objectivos do projecto. Embora fossem baseados em montagens conhecidas, as soluções alcançadas revelaram-se com a qualidade necessário para alcançar as metas estabelecidas. Deve ainda referir-se que foi necessário estabelecer também um conjunto de procedimentos essenciais ao correcto ajuste das montagens. A partir do sistema de medição estática, e dada a elevada qualidade do sinal, foram também desenvolvidas duas metodologias para medição das derivadas espaciais bidimensionais até à terceira ordem, incluindo as derivadas cruzadas.

A metodologia aqui proposta, baseada no ISD, é extremamente exigente em termos de gama dinâmica de sinal, pois, a partir de cálculos numéricos sobre imagens deverá identificar pequenas perturbações no comportamento de estruturas. As imagens obtidas, sinal da medição, estão expostas a várias fontes de ruído, tais como: ruído de *Speckle*, electrónico e no cálculo numérico. Para além destes, há ainda a considerar a perda de contraste resultante de uma deficiente afinação das montagens. Para obstar a todas estas dificuldades, além da afinação dos sistemas construídos, foi também desenvolvido um conjunto de ferramentas de processamento de imagem dedicadas. Estas ferramentas permitem filtrar, calcular o mapa contínuo de fase e diferenciá-lo, tendo em atenção os objectivos da detecção de dano, isto é, limitando o efeito do ruído. Como se pretendia que o sistema fosse de utilização geral, foram desenvolvidos programas de visualização dos resultados que permitissem caracterizar o efeito do dano. O autor realizou um estudo intensivo sobre o desempenho de cada uma das ferramentas de processamento de sinal, com vista a garantir a qualidade dos resultados. Tratando-se de tarefas auxiliares e com elevado volume de cálculo são apresentadas em anexo. Com o objectivo do estabelecimento de uma metodologia para a determinação do dano por via experimental foram desenvolvidas e comparadas duas técnicas de diferenciação, sendo uma experimental e outra híbrida. Na primeira estão envolvidos diversos registos do mapa de fase que são derivados pela técnica das diferenças finitas, na outra é usado apenas um mapa de fase, que é diferenciado pela técnica desenvolvida neste trabalho. Os resultados obtidos demonstraram que a técnica híbrida, pelo facto de envolver apenas um registo, é menos sensível ao ruído. Por este motivo foi esta a técnica eleita para a determinação do dano.

Depois de devidamente validada, esta metodologia foi utilizada para caracterizar danos em estruturas tipo viga e placa, construídas em diversos tipos de materiais estruturais, isto é, materiais isotrópicos, laminados compósitos e estruturas sanduíche. Esta selecção teve em consideração as soluções construtivas mais comuns no projecto estrutural. O sistema foi utilizado com diferentes tipos de carregamento no sentido de avaliar o efeito das solicitações e das condições de fronteira na detecção de dano. Estes ensaios envolveram as condições de fronteira encastrada-livre e livre-livre e os carregamentos térmico, por depressão, harmónico e transitório. Para os registos dinâmicos foi utilizado um LASER pulsado para o qual foi necessário desenvolver um sistema de sincronismo. A avaliação dos resultados permitiu identificar danos propositadamente criados por entalhes, impactos e defeitos de fabrico. Durante esta etapa do trabalho foram estabelecidas algumas colaborações com elementos do grupo numérico do Instituto Superior Técnico (IST), no sentido de validar as soluções numéricas por eles propostas. Os resultados não só permitiram ajustar o modelo numérico como revelaram a capacidade do sistema desenvolvido na caracterização do dano.

A partir dos resultados obtidos pode concluir-se que os objectivos traçados foram completamente atingidos. Os sistemas construídos e as metodologias de avaliação do dano não só incluem a

experiência do LOME neste tipo de aplicações, como permitem alargar a capacidade de detecção e quantificar a severidade do dano.

## **6.2 Proposta de trabalhos futuros**

A ferramenta desenvolvida com sucesso neste trabalho permite a medição global, sem contacto e de elevada resolução, de parâmetros de caracterização do comportamento estrutural, deslocamentos, rotações e curvaturas (podendo chegar ao cálculo de esforços), e é de aplicação geral. Embora tenha sido utilizada na caracterização do dano, é possível estender o campo de aplicação desta metodologia a outras áreas de investigação como são, por exemplo: a caracterização das propriedades mecânicas de materiais e a validação de modelos numéricos. Todavia, esta metodologia apresenta ainda uma limitação importante ao excluir as estruturas cuja geometria interfere na determinação das suas propriedades mecânicas como as estruturas tipo casca e as tubagens. Neste caso o sistema deverá integrar ferramentas de caracterização global da forma que possam ser operadas sem contacto. Investigação nesta área tem sido desenvolvida no LOME e recentemente ficou disponível um conjunto de algoritmos para esta aplicação.

Deve ainda referir-se que os sistemas construídos foram projectados de forma modular, tendo em vista os seus melhoramentos futuros. Os equipamentos de registo de imagem, actualmente numa acelerada fase de progresso, podem facilmente ser substituídos. Desta forma, prevê-se que estes sistemas possam em breve ser melhorados com a integração de câmaras vídeo de maior resolução e menor tamanho de píxel. Assim, poderá ser utilizada a técnica de holografia digital, actualmente limitada a objectos de pequena dimensão, para substituir os actuais técnicas de *Speckle*. A holografia digital é bastante mais eficiente na utilização da luz e permite o cálculo de fase com um só registo. No entanto, é limitada pela resolução espacial dos sensores. Deve referir-se que a resolução espacial típica das emulsões fotográficas é ainda cerca de 5 a 6 vezes maior que a do registo digital.



# **ANEXOS**



# Anexo A

## Análise do Índice de Sensibilidade ao Dano

### A.1 Introdução

O índice de sensibilidade ao dano ISD foi introduzido no capítulo 2 no sentido de analisar a influência da localização e da severidade do dano na resposta estática, modal e transiente da viga. As representações do ISD que se seguem correspondem aos casos de dano da resposta modal e transiente da viga.

### A.2 Distribuição ISD da resposta modal

A análise da distribuição do ISD dos campos do momento-flector e esforço de corte, correspondentes às quatro primeiras formas naturais da viga e representadas nas Fig. A.1, Fig. A.2 e Fig. A.3 permitem revelar a região do dano. Estas apresentam uma amplitude superior para o esforço de corte.

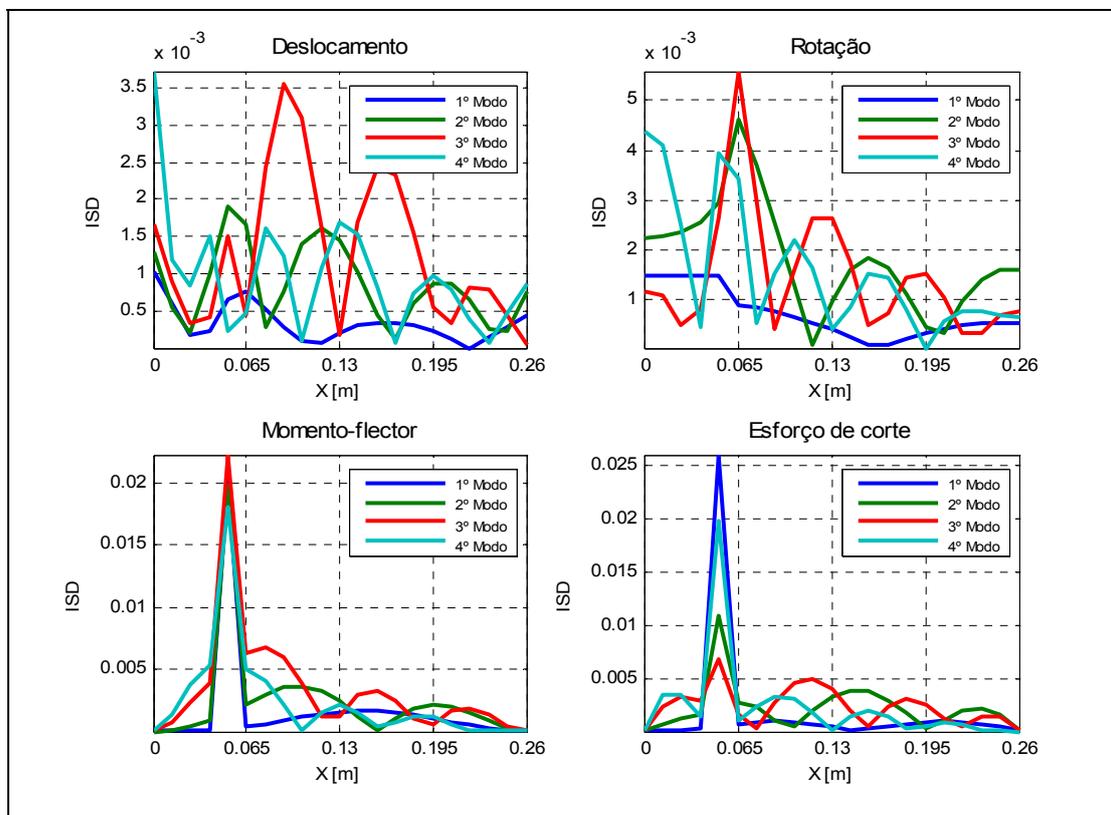


Fig. A.1 – Representação do ISD da resposta modal da viga para o 1º caso de dano.

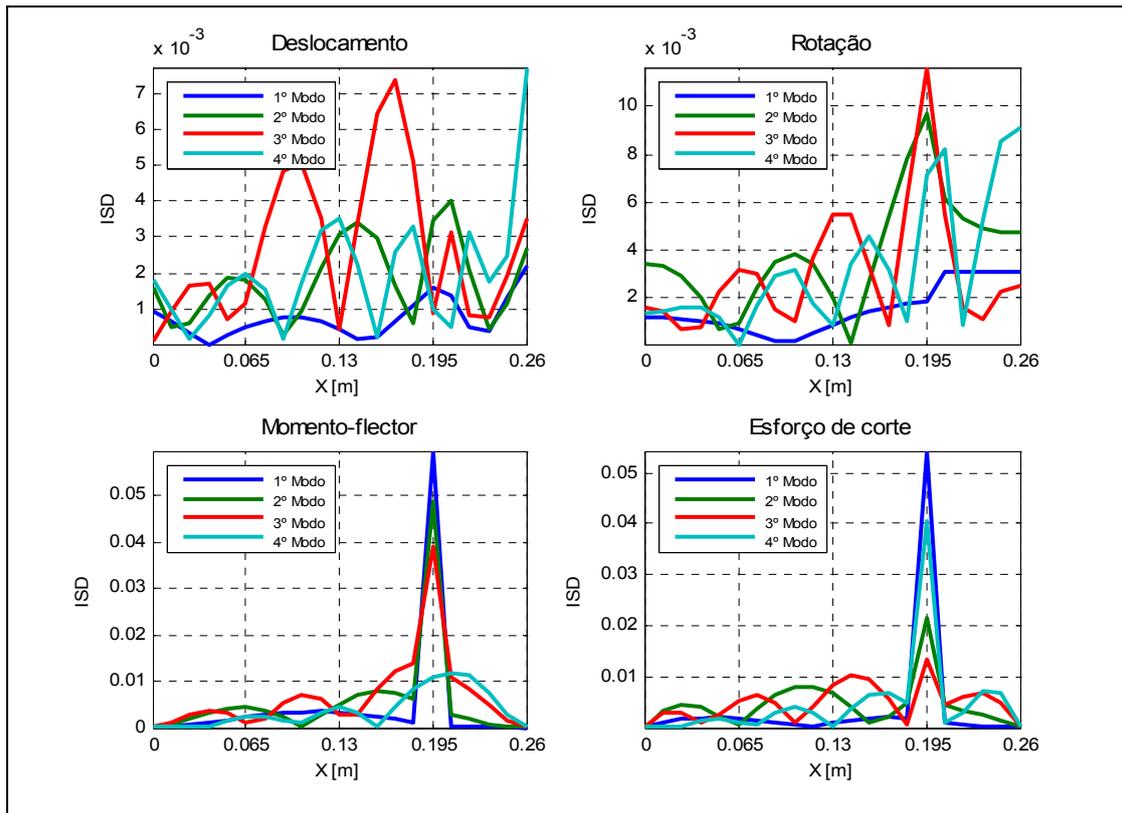


Fig. A.2 – Representação do ISD da resposta modal da viga para o 2º caso de dano.

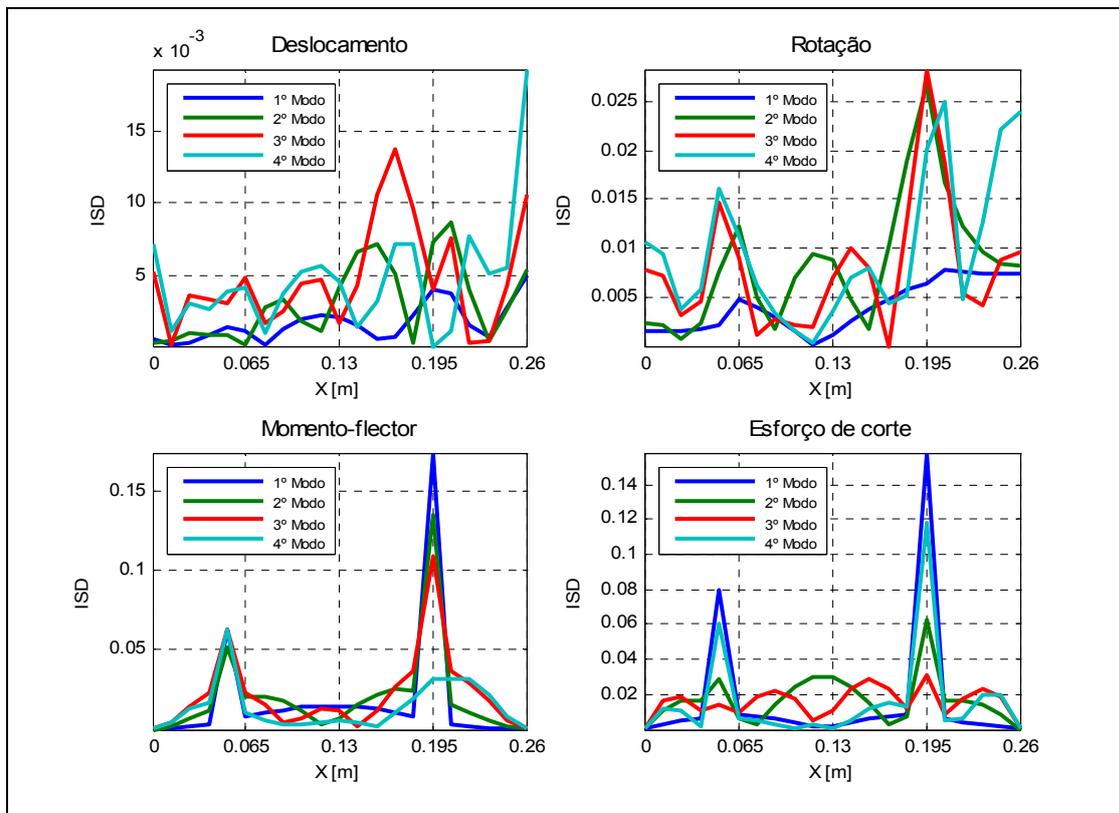


Fig. A.3 – Representação do ISD da resposta modal da viga para o 4º caso de dano.

Nas Fig. A.4, Fig. A.5 e Fig. A.6 estão representados os ISD da resposta modal para as sucessivas posições do dano ao longo da viga. Nestas, observa-se que na região do dano os ISD adoptam uma distribuição em magnitude proporcional ao esforço interno. De igual modo, se verifica um aumento na dispersão do ISD da resposta com a ordem do modo natural, o qual impede a localização da região do dano a partir da análise dos máximos e/ou descontinuidade.

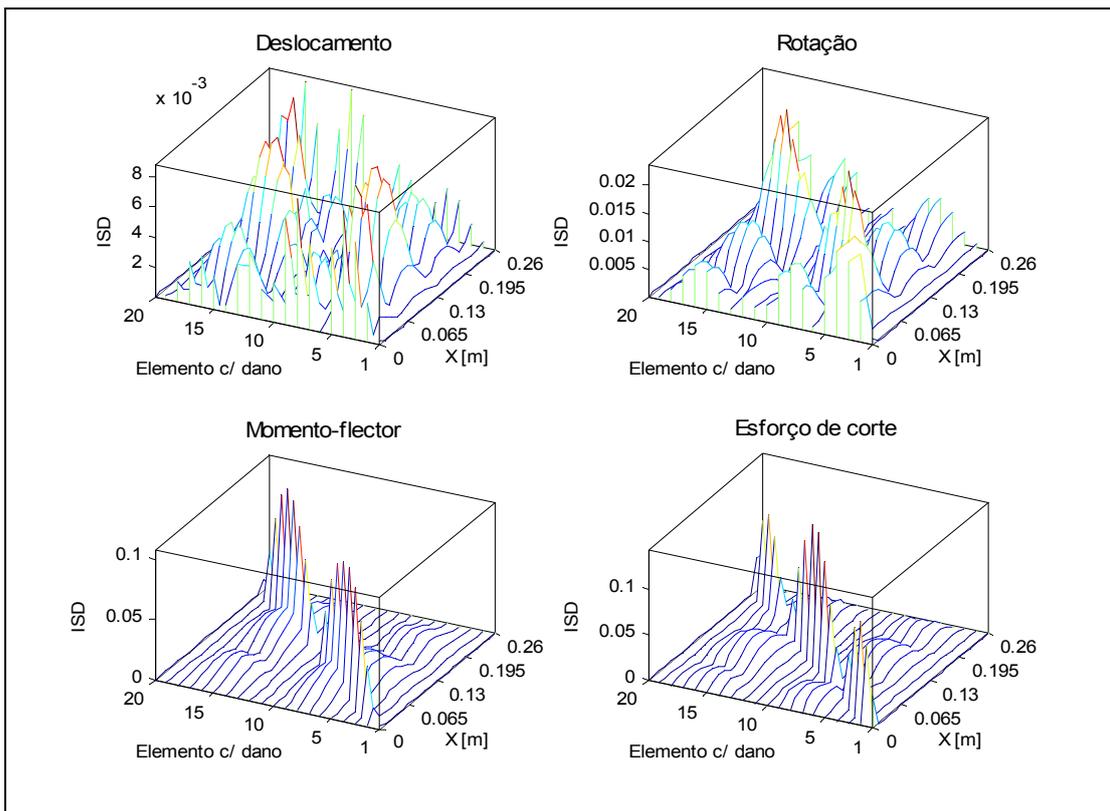


Fig. A.4 – Representação do ISD do 2º modo natural para as sucessivas posições do dano ao longo da viga.

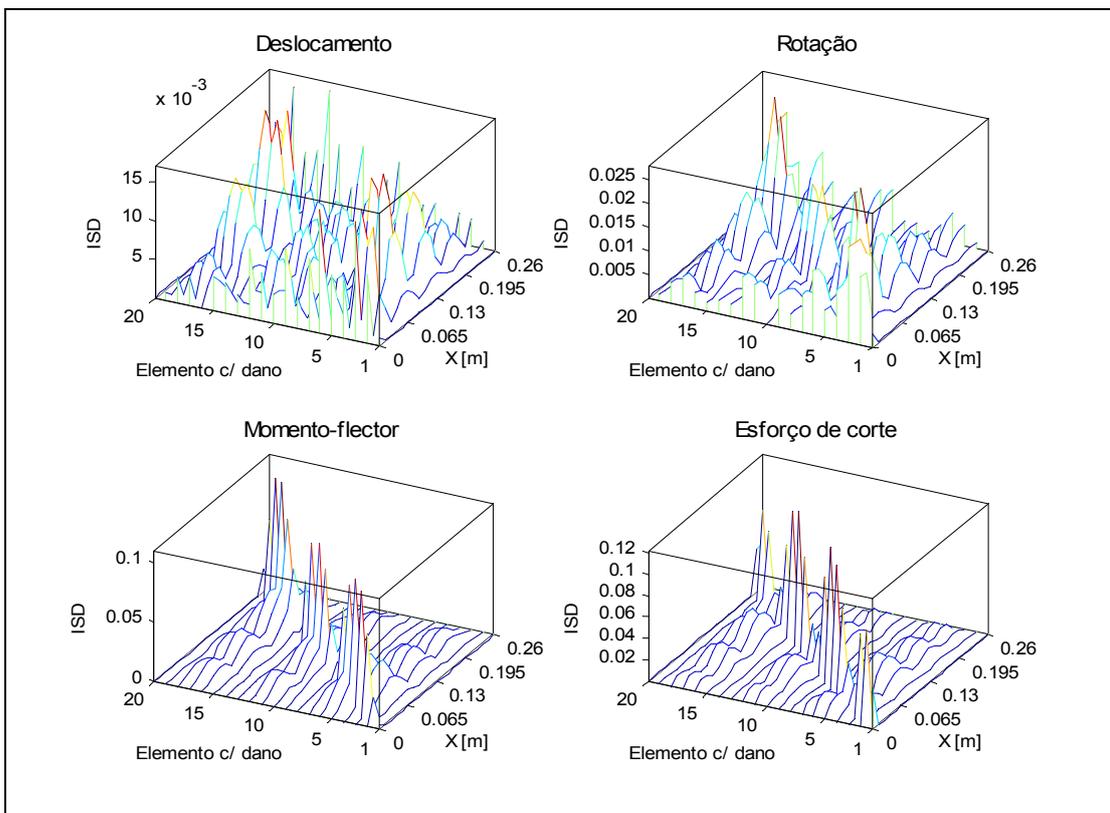


Fig. A.5 – Representação do ISD do 3º modo para as sucessivas posições do dano ao longo da viga.

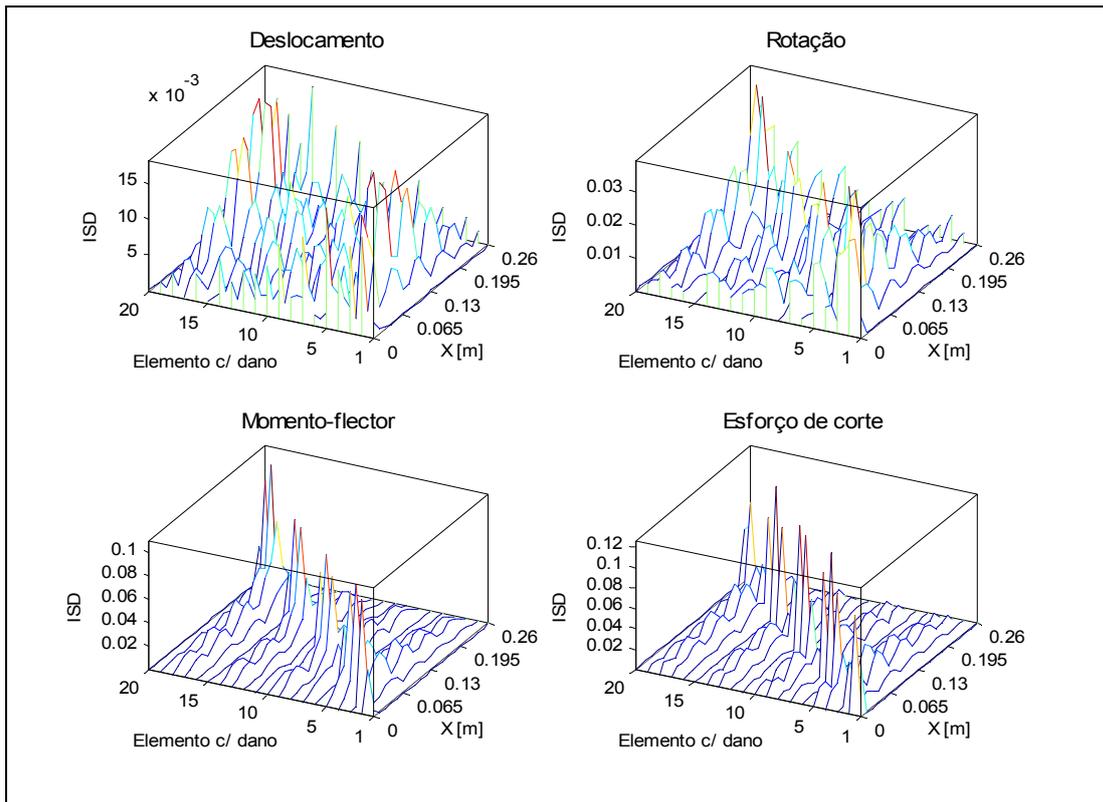


Fig. A.6 – Representação do ISD do 4º modo natural para as sucessivas posições do dano ao longo da viga.

### A.3 Distribuição ISD da resposta transiente

Os ISD da resposta transiente na viga, relativos ao primeiro, segundo e quarto casos de dano estão representados nas Fig. A.7, Fig. A.8 e Fig. A.9, respectivamente.

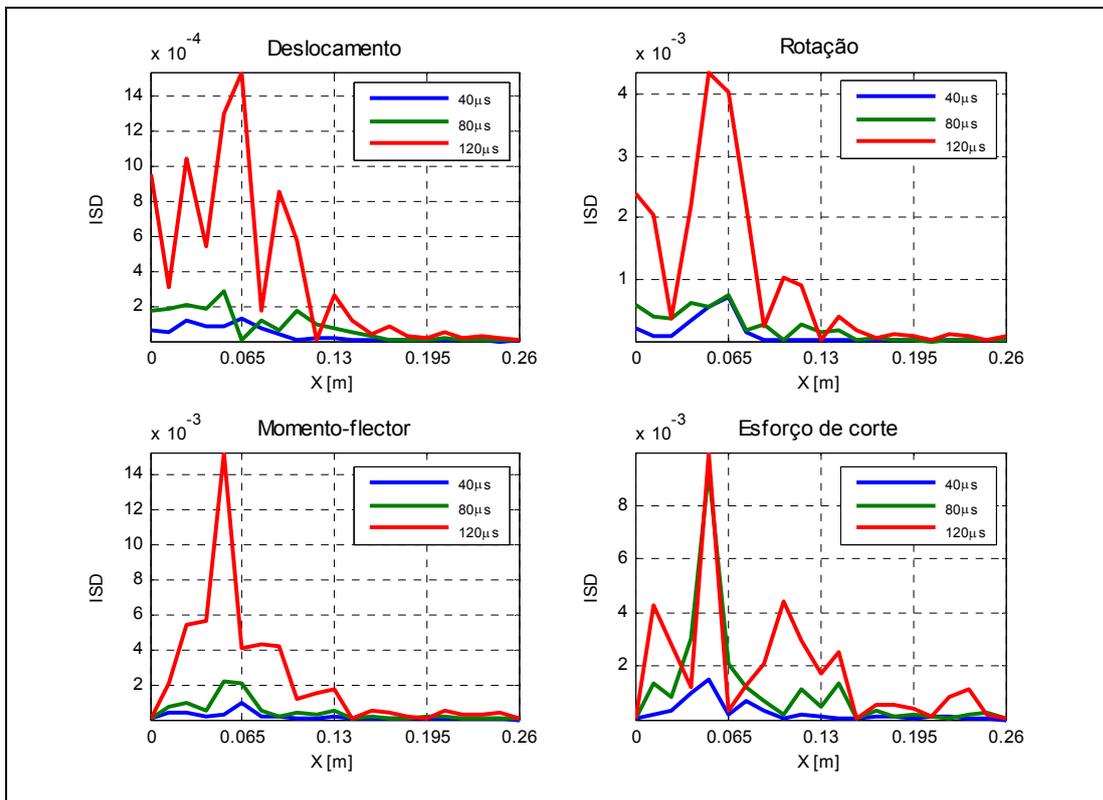


Fig. A.7 – Representação do ISD da resposta transiente para o 1º caso de dano.

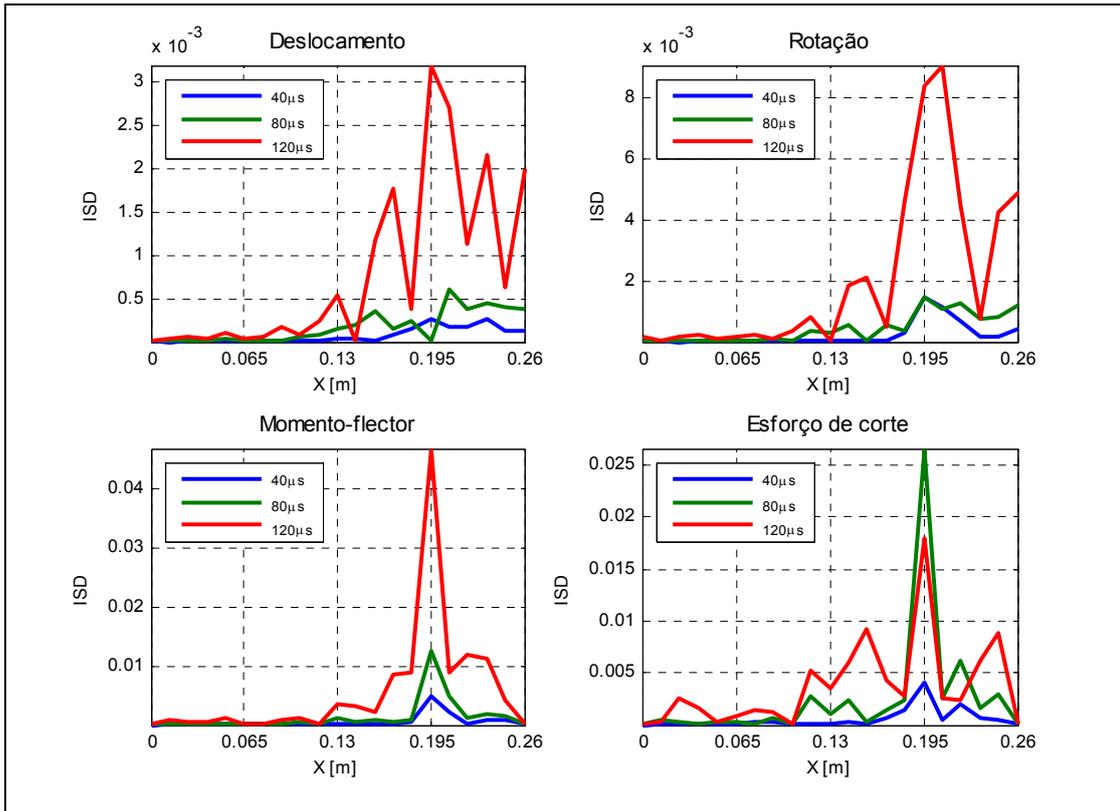


Fig. A.8 – Representação do ISD da resposta transiente para o 2º caso de dano.

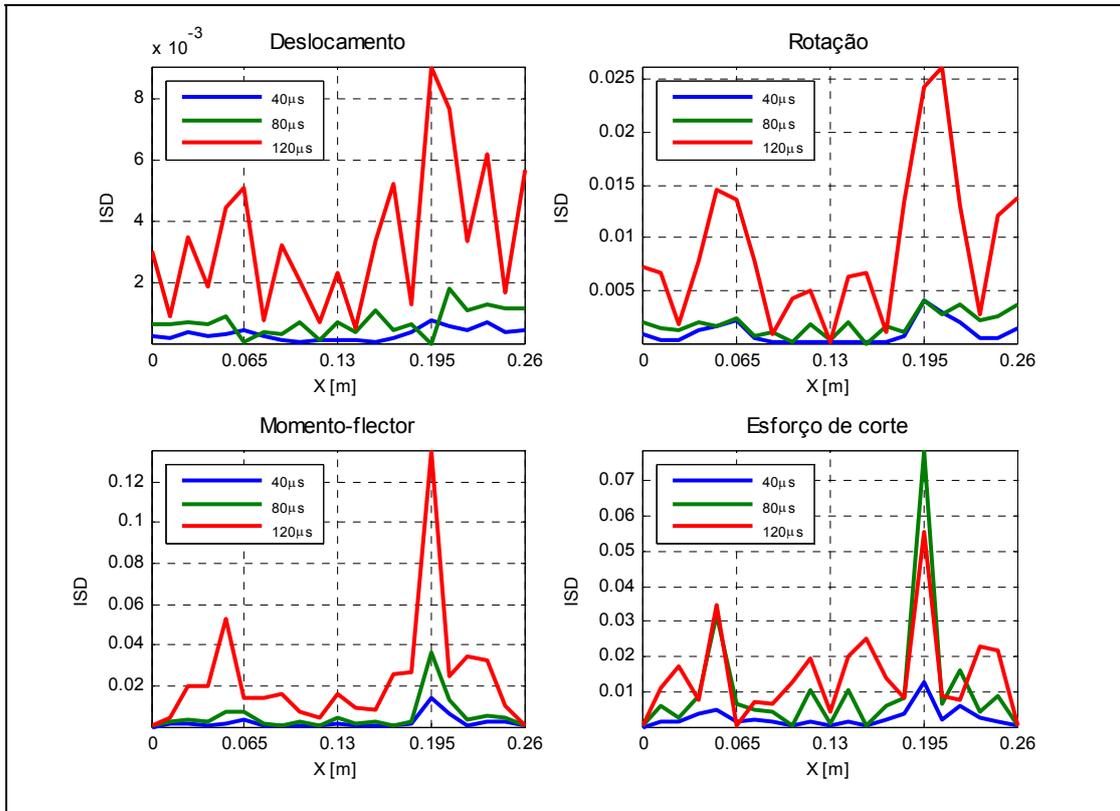


Fig. A.9 – Representação do ISD da resposta transiente para o 4º caso de dano.

A observação do ISD dos campos da resposta transiente para a região do dano revela que, em geral, a sua amplitude é superior para o instante  $120\mu\text{s}$ . Isto verifica-se sempre que a amplitude do campo apresenta valores superiores na região do dano.

Nas Fig. A.10 e Fig. A.11 estão representados os campos do ISD da resposta transiente para os instantes de  $80\ \mu\text{s}$  e  $120\ \mu\text{s}$ , considerando as sucessivas posições do dano ao longo da viga. À semelhança dos casos anteriores, verifica-se que a magnitude do ISD acompanha a amplitude do campo correspondente, sendo máximo para os campos momento-flector e esforço de corte.

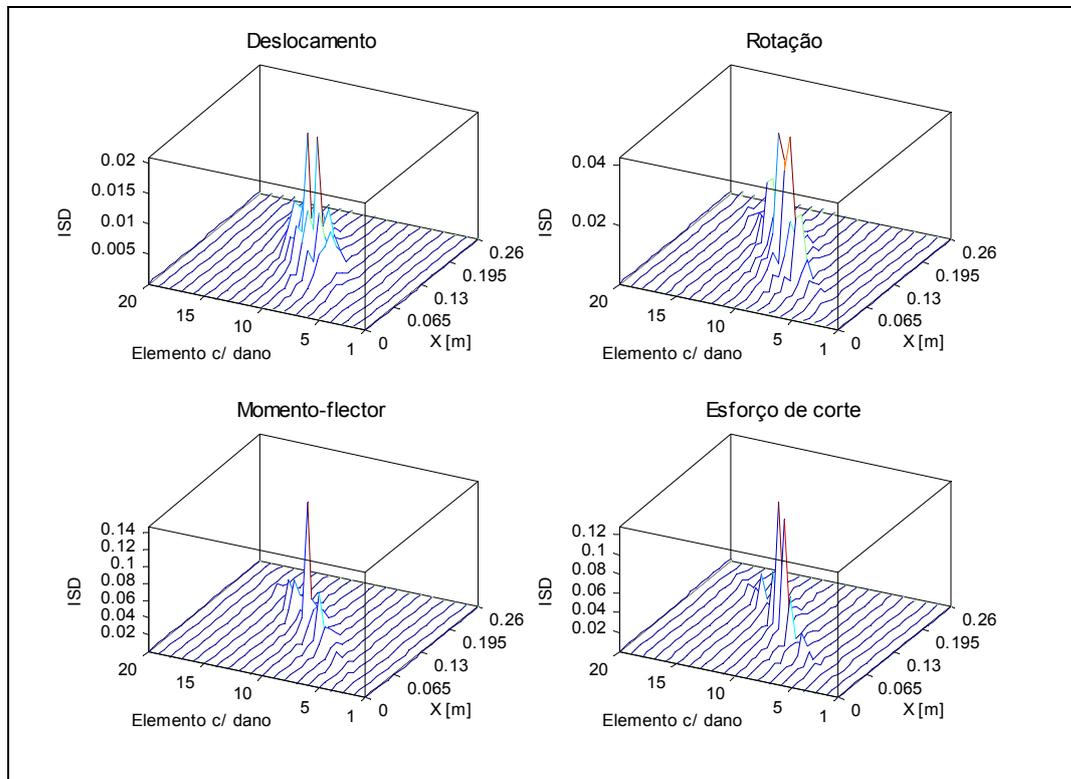


Fig. A.10 – Representação do ISD da resposta transiente no instante  $80\ \mu\text{s}$ , para as sucessivas posições do dano ao longo da viga.

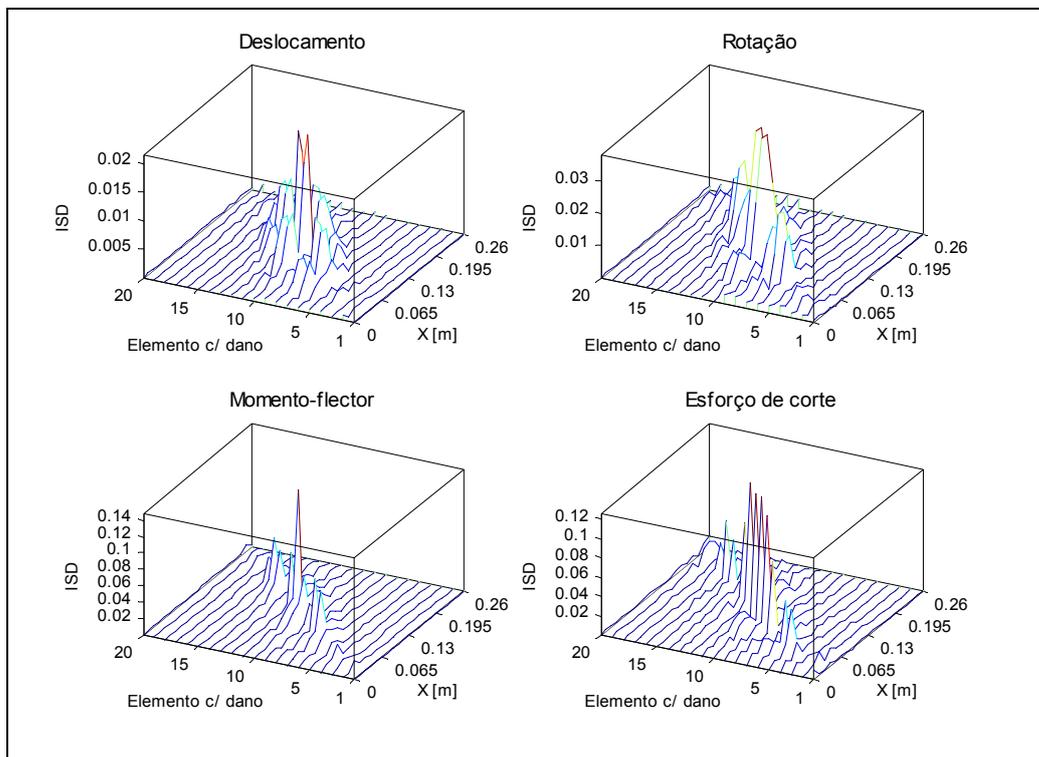


Fig. A.11 – Representação do ISD da resposta transiente no instante  $120\ \mu\text{s}$ , para as sucessivas posições do dano ao longo da viga.

# Anexo B

## Análise do Comportamento das Técnicas de Processamento de Imagem

---

### B.1 Introdução

A detecção estrutural do dano é baseada na análise das derivadas espaciais até à terceira ordem do campo de deslocamentos ou segunda derivada espacial do campo de rotações. Estes são obtidos a partir dos mapas de fase medidos por sistemas interferométricos (capítulo 3). Os mapas de fase estão, naturalmente, contaminados por ruído de medição de alta frequência, o qual se torna predominante através do cálculo das derivadas espaciais. As técnicas de processamento possuem um papel fundamental na filtragem deste ruído e na atenuação do ruído durante o processo de cálculo das sucessivas derivadas espaciais. Pela sua importância, torna-se necessário proceder ao estudo do comportamento destas técnicas no tratamento de mapas de fase com ruído e na obtenção das derivadas espaciais até à terceira ordem do campo de deslocamentos. Com este estudo pretende-se identificar a metodologia mais robusta à propagação do ruído. Para melhor concretizar este objectivo e em complemento ao estudo do capítulo 4, é apresentada a seguir uma análise de diferentes técnicas, envolvendo cada etapa do processamento destes mapas, designadamente: técnicas de filtragem de fase, técnicas de *unwrapping*, técnicas de filtragem do campo de medida e técnicas de diferenciação espacial do campo de medida.

### B.2 Técnicas de filtragem dos mapas de fase

Como complemento à análise das técnicas de filtragem de fase do capítulo 4, apresenta-se na Fig. B.1 e seguintes, o valor eficaz do erro destas técnicas em função dos parâmetros de cada filtro. Este são obtidos tomando como referência os quatro mapas de fase apresentados no capítulo 4, sendo o erro definido entre o mapa de fase filtrado e o mapa de fase sem ruído.

A partir da representação do valor eficaz do erro para a técnica de filtragem de fase Média, Fig. B.1, observa-se que, em geral, este aumenta com o nível de ruído, sendo o seu valor mínimo alcançado para a dimensão da janela do filtro 3x3. Verifica-se, igualmente, que o número de vezes que deverá ser aplicado este filtro para obter o mínimo valor eficaz do erro é proporcional ao nível de ruído no mapa. O mesmo modelo de comportamento é registado no filtro de Gaussiano, Fig. B.2. No entanto, dada a sua distribuição espacial, com desvio padrão igual a um, mostra-se menos eficaz na remoção do ruído. Quanto ao filtro de Mediana, este apresenta uma maior dispersão dos valores do erro em relação aos dois filtros anteriores, alcançando o mínimo valor eficaz do erro para a dimensão da janela 7x7. Comparando os filtros de *Wiener*, *Spline*, FFT e Wavelets, Fig. B.4, verifica-se que, dada a natureza destes filtros, a evolução do valor eficaz do erro é globalmente similar e acompanha a relação sinal/ruído. Contudo, o filtro FFT revela uma tendência linearmente decrescente do erro com o valor limiar. Na Fig. B.5 representa-se o valor eficaz do erro para o filtro de WFT, tendo como parâmetros o valor limiar da amplitude e da dimensão da janela de análise do filtro, sendo a janela em píxeis definida por  $6 \times \text{Sigma} + 1$ . A sua evolução mostra que é independente do valor escolhido para a dimensão da janela, mas sensível ao valor limiar da amplitude, principalmente na presença de elevados níveis do ruído no mapa de fase. No que diz respeito ao filtro de STFT, os resultados são similares aos apresentados para filtro de WFT, dado que os dois filtros partilham o mesmo princípio.

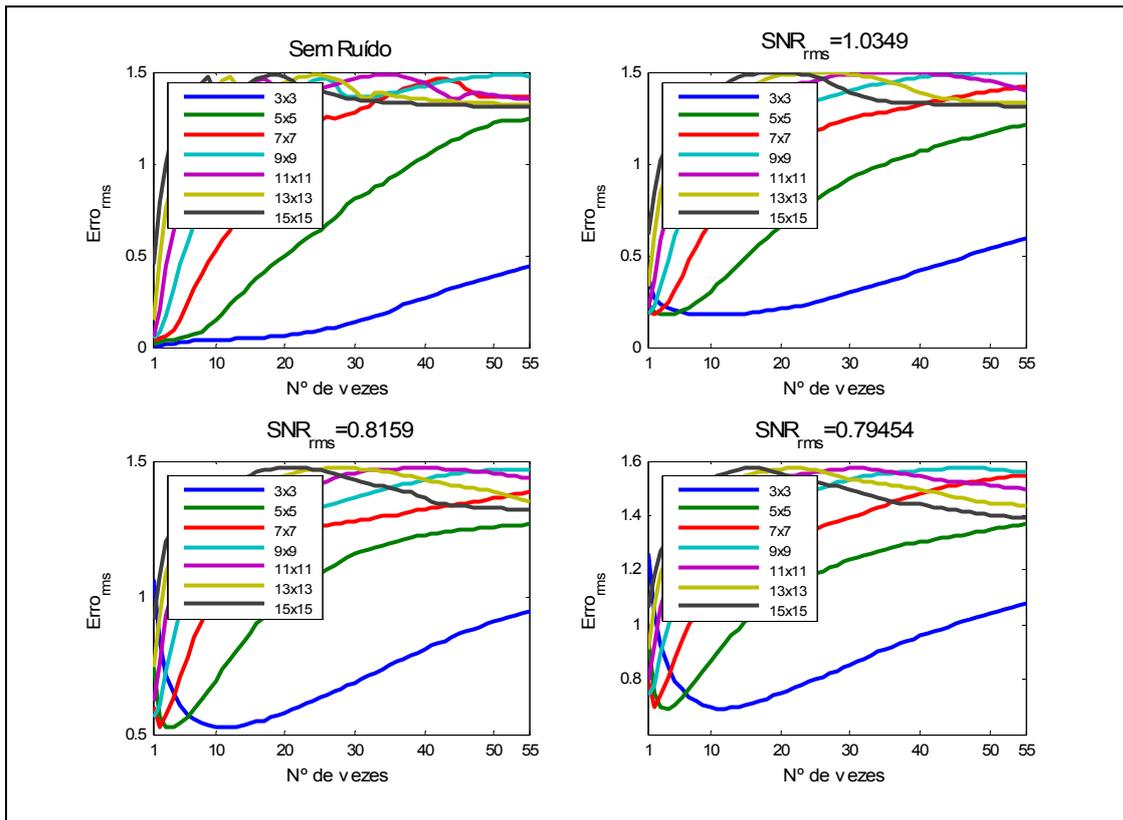


Fig. B.1 – Comportamento do filtro de Média para mapas de fase com ruído.

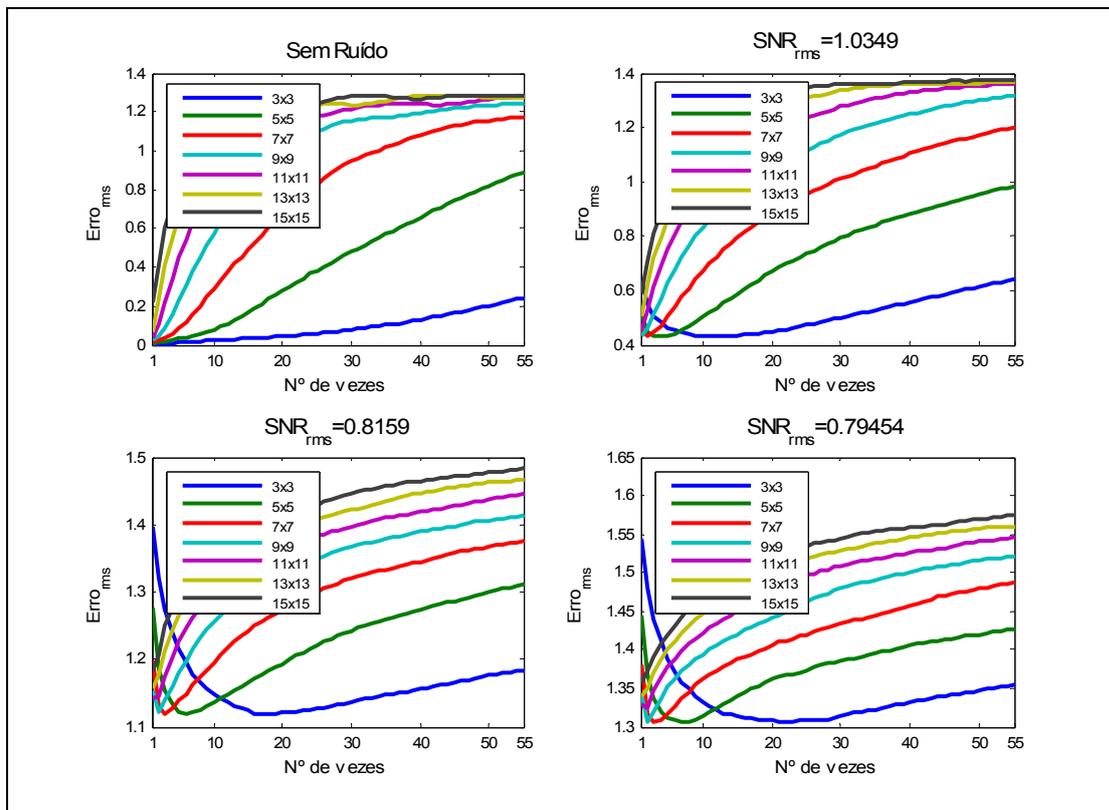


Fig. B.2 – Comportamento do filtro de Gaussiano ( $\sigma = 1$ ) para mapas de fase com ruído.

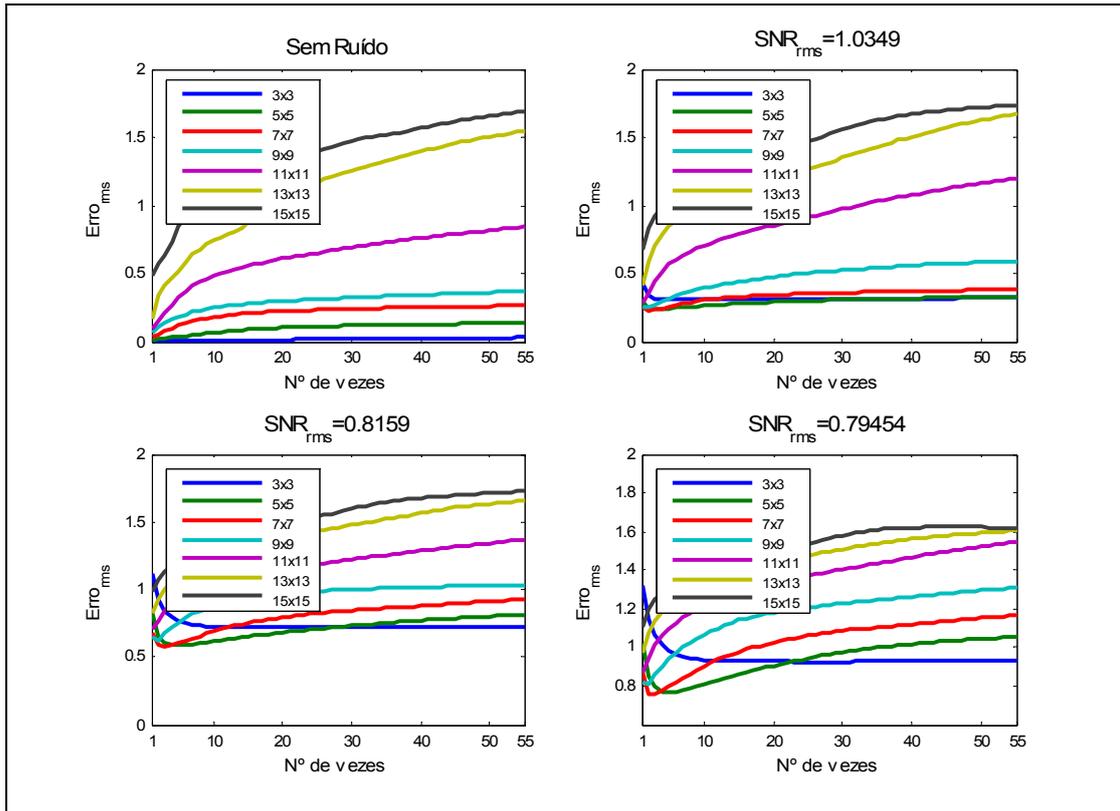


Fig. B.3 – Comportamento do filtro Mediana para mapas de fase com ruído.

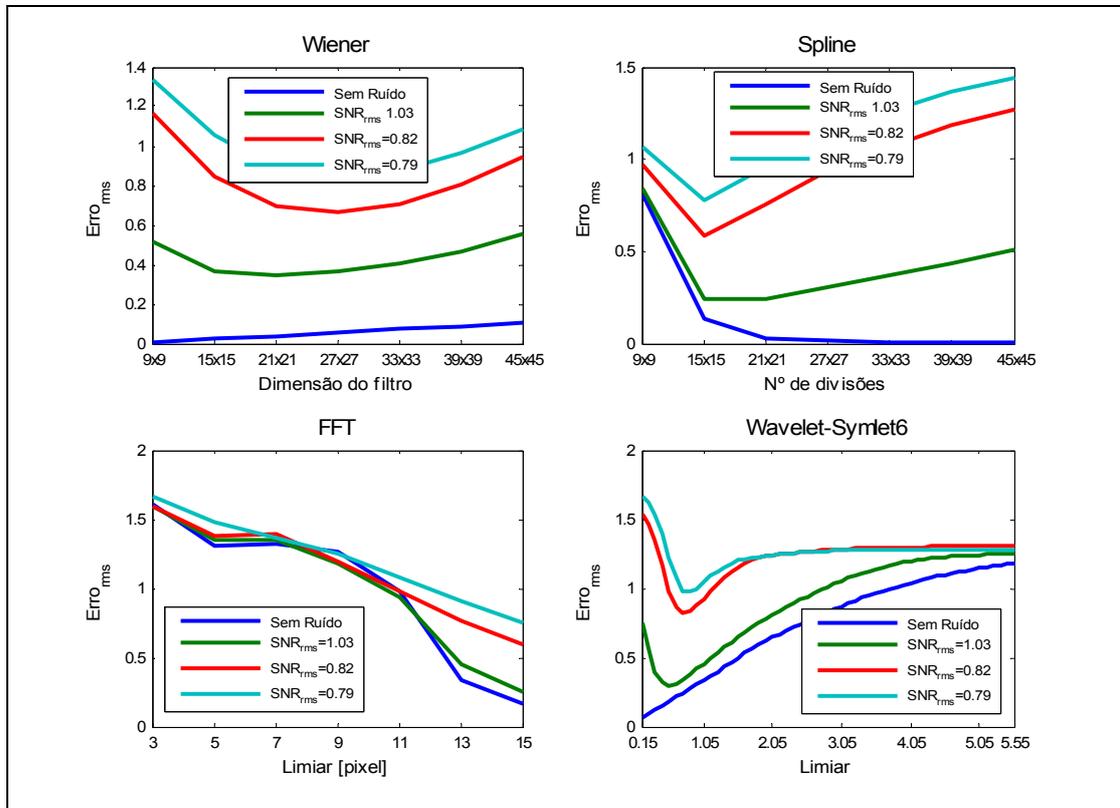


Fig. B.4 – Comportamento dos filtros de Wiener, Spline, FFT e Wavelets para mapas de fase com ruído.

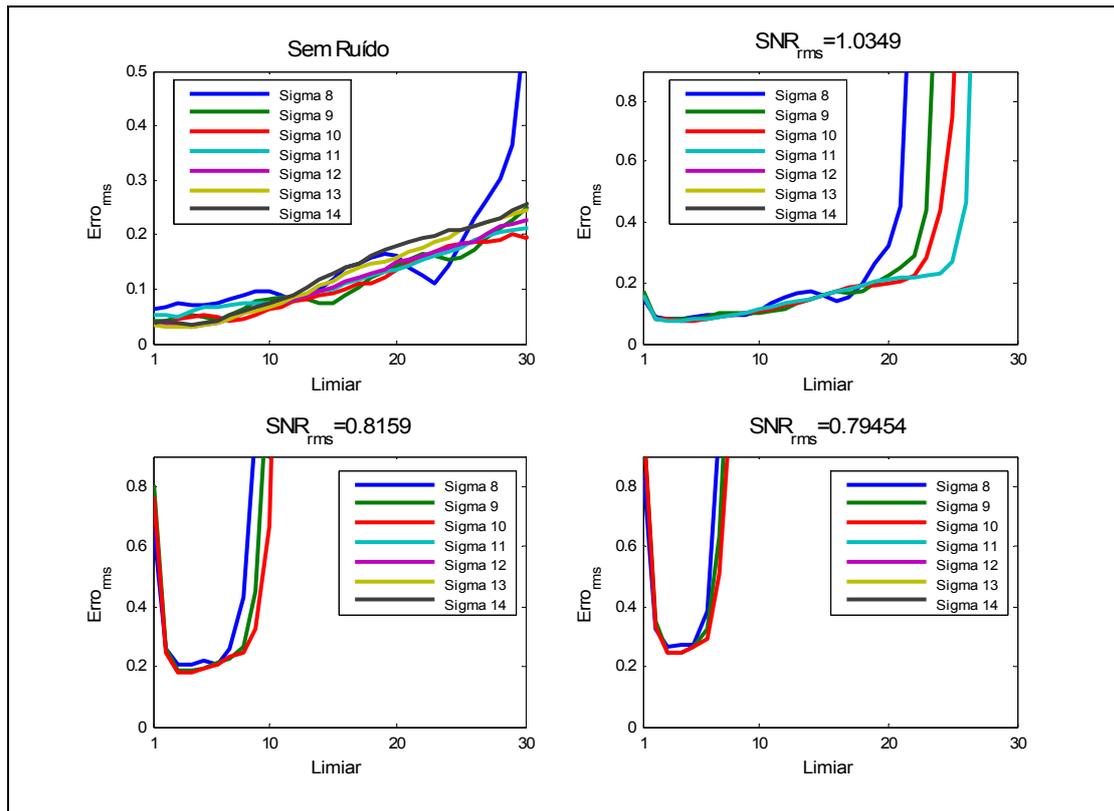
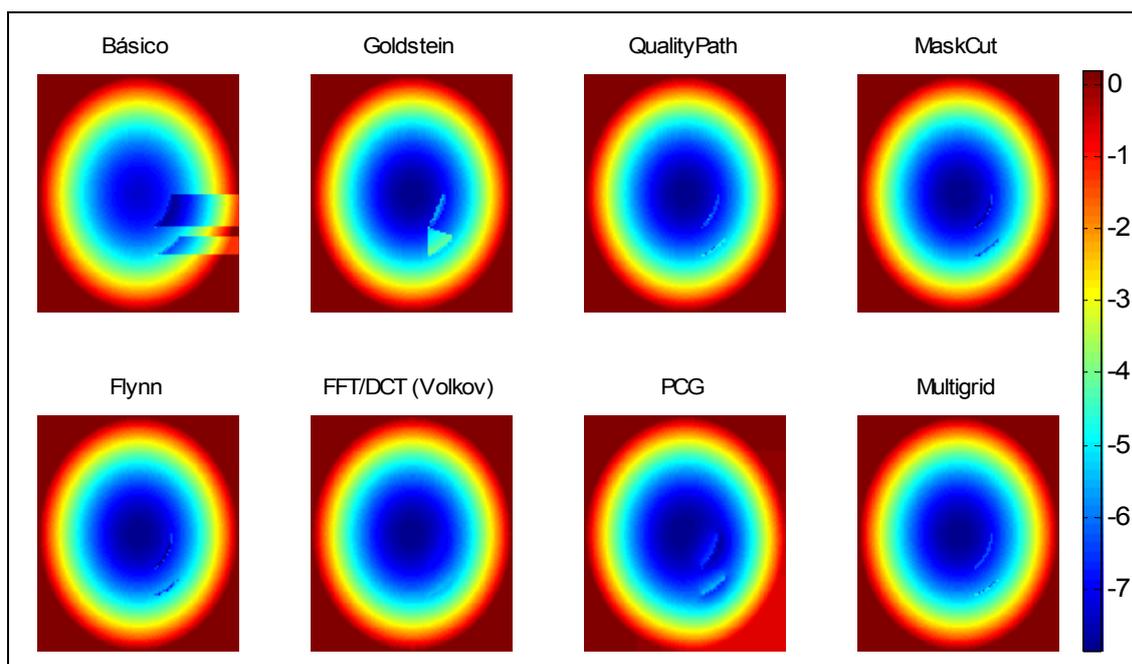


Fig. B.5 – Comportamento do filtro de WFT para mapas de fase com ruído.

### B.3 Métodos de *unwrapping*

Os mapas de fase apresentam descontinuidades que têm de ser removidas por métodos de *unwrapping* da fase, para se obter uma distribuição contínua e equivalente ao campo de medida. A partir dos dois mapas gerados, obtiveram-se os respectivos mapas contínuos através dos métodos de implementados (capítulo 4). Na Fig. B.6 e Fig. B.7 estão representados os respectivos mapas, sendo a amplitude surge codificada numa escala de cor.

Fig. B.6 – Mapas contínuos de fase obtidos por diferentes métodos de *unwrapping* da fase aplicados ao mapa de fase com descontinuidades na transição da fase (Capítulo 4).

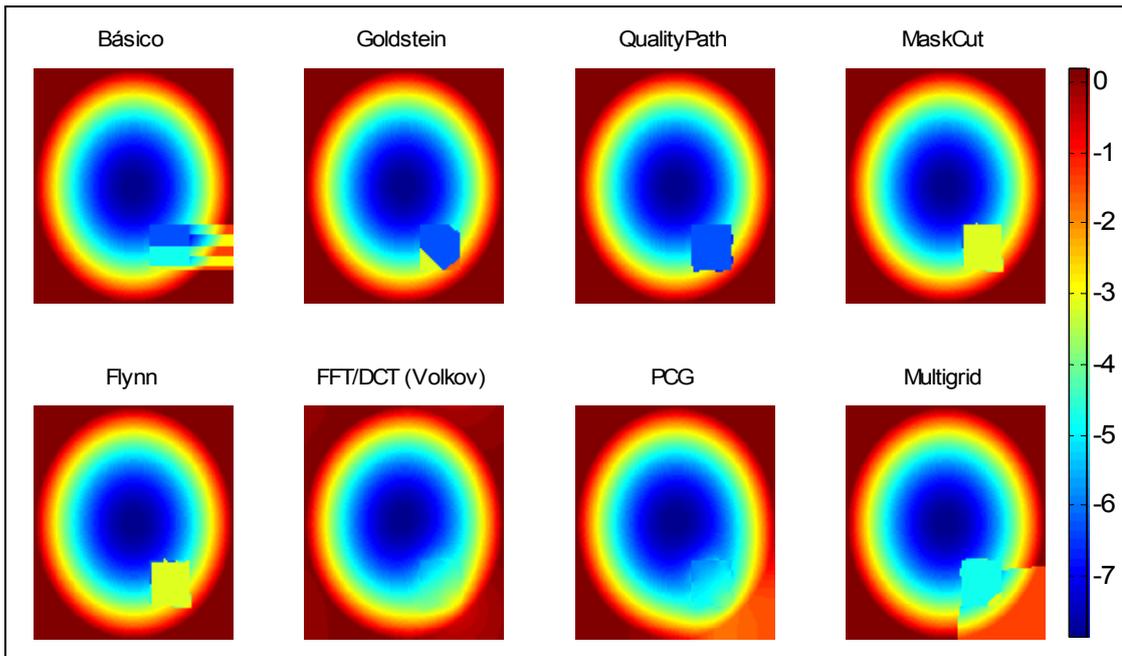


Fig. B.7 – Mapas contínuos de fase obtidos por diferentes métodos de *unwrapping* aplicados a um mapa de fase com descontinuidades no campo (Capítulo 4).

#### B.4 Técnicas de filtragem do campo de medida

A presença de inconsistências nos mapas de fase conduz, geralmente, ao aparecimento nos campos de medida de perturbações locais, que correspondem a sinais de alta frequência, as quais têm de ser removidas por filtro do tipo passa-baixo. Retomando os filtros aplicados na remoção do ruído nos mapas de fase, apresenta-se, em seguida, a análise do seu comportamento na remoção do ruído em campos de medida. Os filtros de Média, Gaussiano e Mediana representados na Fig. B.8, Fig. B.9 e Fig. B.10 mostram um comportamento em tudo similar.

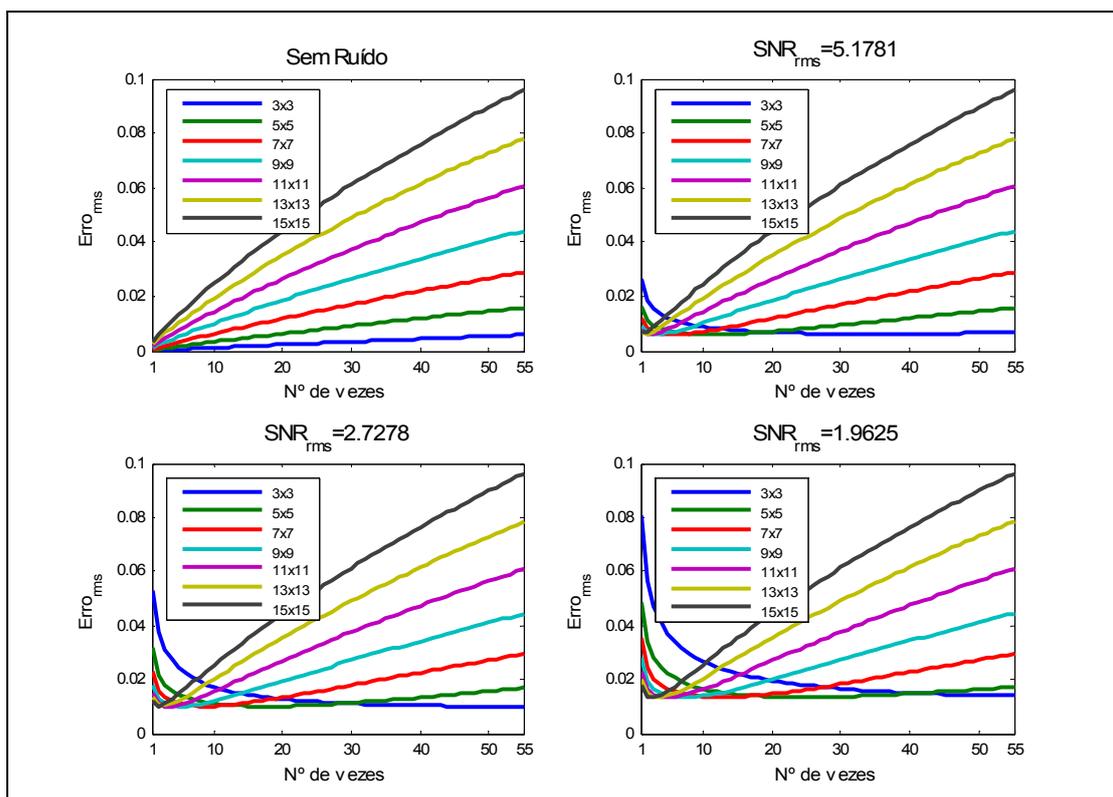


Fig. B.8 – Comportamento do filtro de Média em campos de medida com diferentes níveis de ruído.

A análise do valor eficaz do erro revela que o seu mínimo é alcançado primeiramente para a dimensão da janela 15x15, sendo esta a janela mais adequada na remoção do ruído.

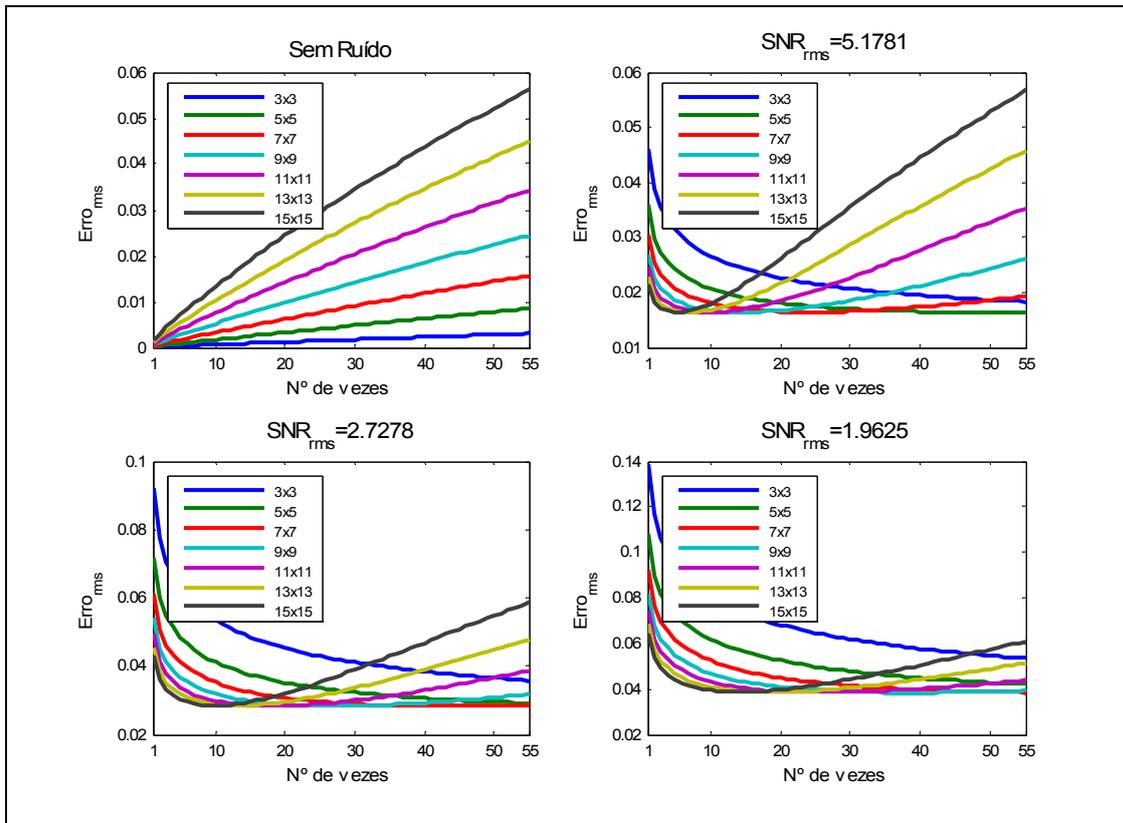


Fig. B.9 – Comportamento do filtro de Gaussiano ( $\sigma = 1$ ) em campos de medida com diferentes níveis de ruído.

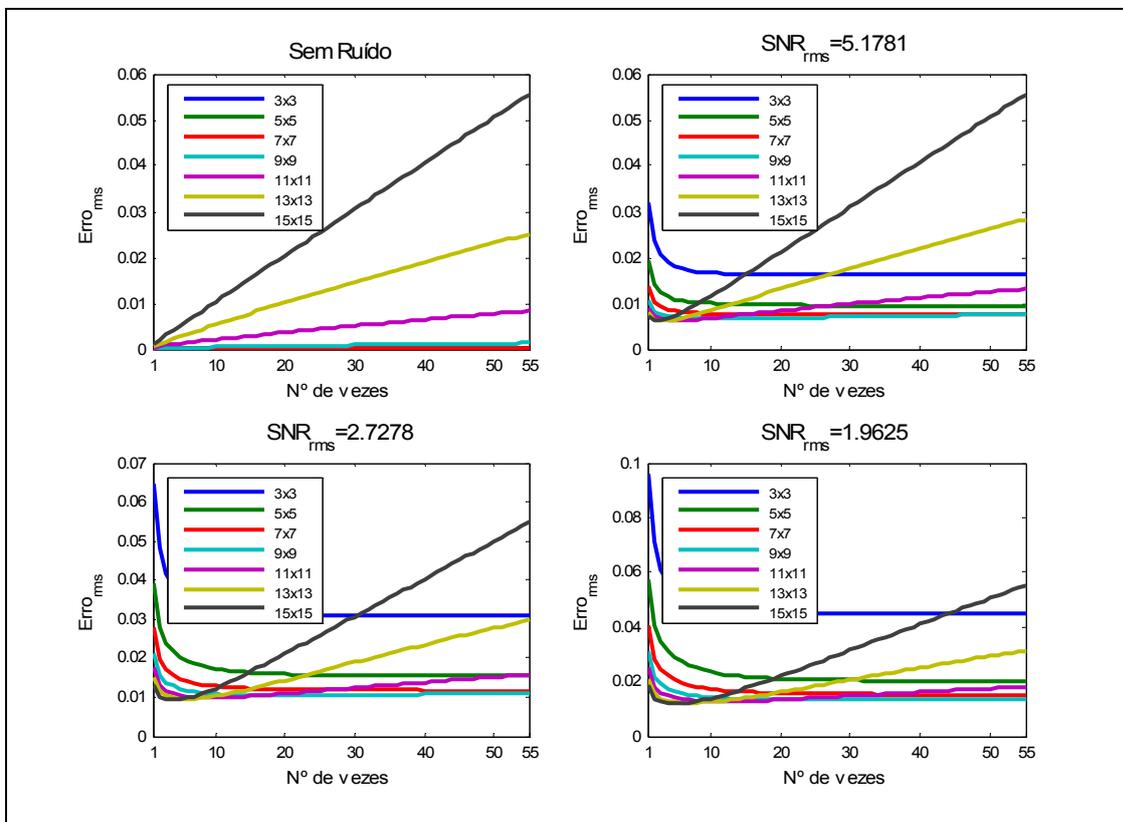


Fig. B.10 – Comportamento do filtro de Mediana em campos de medida com diferentes níveis de ruído.

Para os filtros de *Wiener*, *Spline*, *FFT* e *Wavelets* demonstra-se que o mínimo valor eficaz do

erro segue a distribuição do nível do ruído no campo de medida. A sua análise revela que o filtro FFT é o mais eficaz na remoção do ruído. Os filtros de WFT e STFT são equivalentes, diferindo apenas na forma como é definida a janela de análise. Como estes filtros apresentam para os quatro campos de medida baixa variabilidade no valor eficaz do erro, Fig. B.12, pode afirmar-se que ambos possuem grande insensibilidade à presença do ruído.

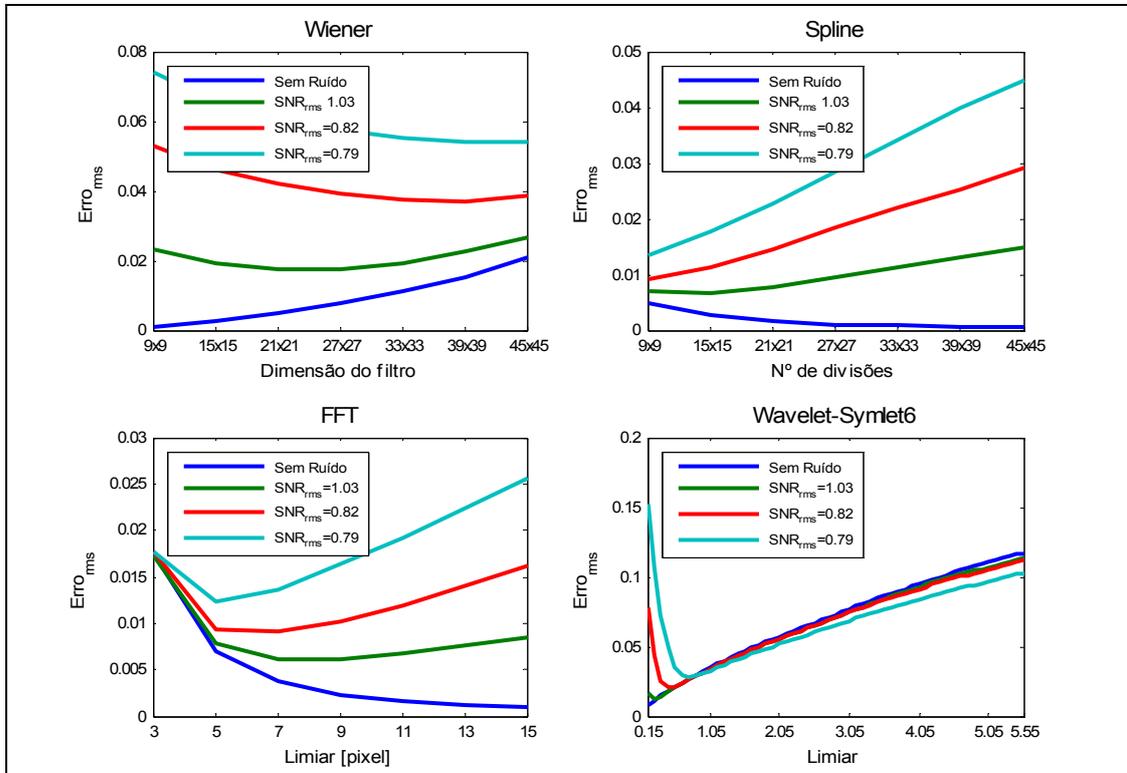


Fig. B.11 – Comportamento dos filtros de *Wiener*, *Spline*, *FFT* e *Wavelets* em campos de medida com adição de diferentes níveis de ruído.

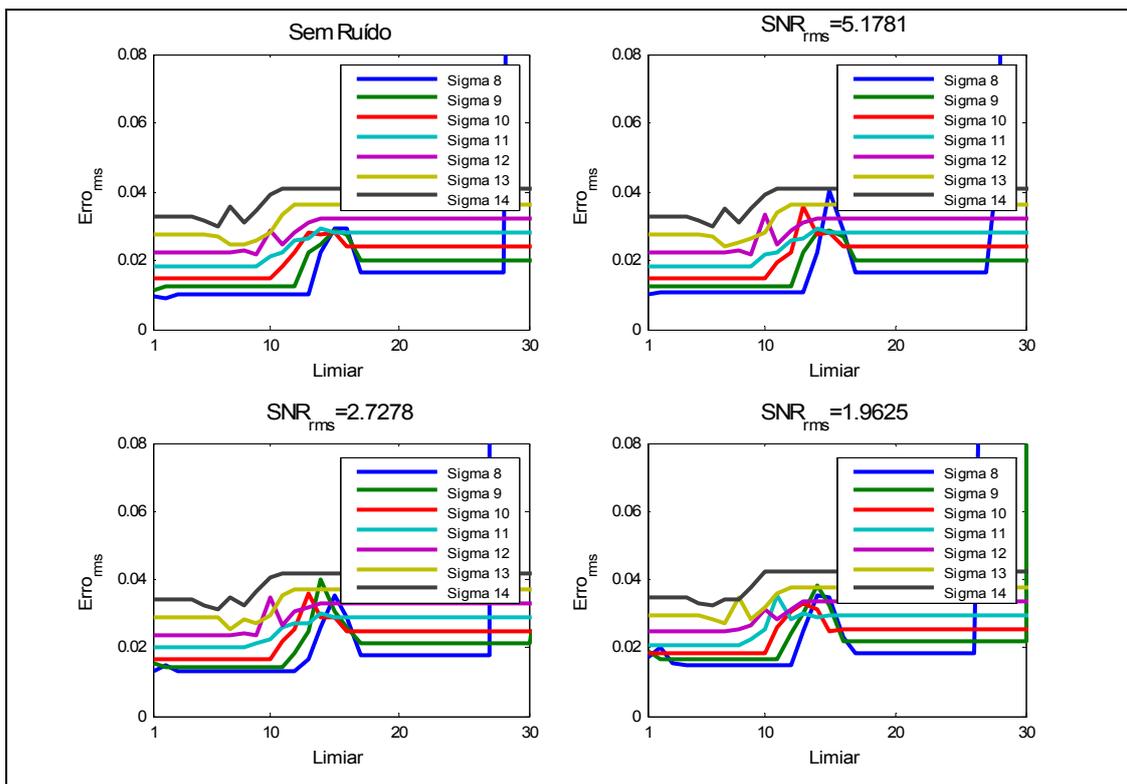


Fig. B.12 – Comportamento do filtro de WFT em campos de medida com adição de diferentes níveis de ruído.

### B.5 Metodologias de diferenciação espacial do campo de medida

A determinação dos esforços de corte segundo a teoria de Kirchhoff para placas finas obriga à diferenciação espacial do campo de deslocamentos até à terceira ordem. Uma metodologia de diferenciação numérica foi desenvolvida para o cálculo destas derivadas a partir da medição do campo de deslocamentos. Esta envolve a combinação de técnicas de filtragem do ruído e métodos de diferenciação espacial. A avaliação do desempenho dos métodos diferenciação Gaussiano, FFT e *Spline*, pela determinação os esforços de corte segundo o eixo  $x$  é feita a partir da diferenciação do campo de deslocamentos experimental. O valor eficaz do erro associado ao campo de esforço de corte segundo  $x$ , determinado entre os diferentes métodos de diferenciação espacial testados e a solução pelo método dos elementos finitos, estão representados na Fig. B.13. A sua análise revela que a metodologia de diferenciação baseada no método Gaussiano é o que apresenta menor valor eficaz do erro, sendo este considerado o método mais robusto ao ruído.

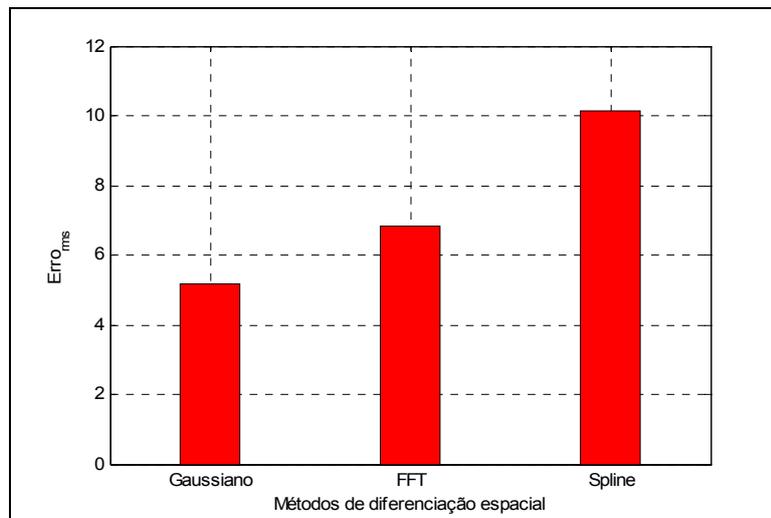


Fig. B.13 – Valor eficaz do erro relativo ao campo esforço de corte, determinado por aplicação de diferentes métodos diferenciação ao campo de deslocamentos medido.

# Anexo C

## Sistema *Shear*

---

### C.1 Introdução

O sistema *Shear* aqui desenvolvido serve para medir o campo de rotações de uma superfície com movimento ortogonal ao plano de medição. A configuração deste transdutor óptico é baseada no interferómetro de *Milchelson* e utiliza a técnica de modulação temporal de fase (TPM) para extracção do mapa de fase. O salto de fase (*phase-shifting*) é criado por intermédio da translação de um dos espelhos do interferómetro, actuado por um piezoeléctrico. O piezoeléctrico é aqui controlado por um placa da National Instruments<sup>®</sup> PCI-6722 via amplificador Burleigh<sup>®</sup> PZ-70. Uma câmara de elevada resolução JAI<sup>®</sup> modelo CV-M2 e uma placa de aquisição de imagem Matrox<sup>®</sup> modelo Hélios XCL são usados para aquisição das imagens. Um programa desenvolvido no ambiente MATLAB 7<sup>®</sup> é usado para controlar a posição do espelho, adquirir as imagens desfasadas e calcular o mapa de fase relativo à rotação da superfície (consultar anexo E).

### C.2 Desenvolvimento

A montagem do sistema *Shear* foi primeiramente realizada sobre uma mesa anti-vibrátil, sendo usado na medição um LASER contínuo com  $\lambda$  de 532 nm. A configuração do sistema foi ajustada de forma a otimizar a razão sinal/ruído. A partir da posição dos vários componentes ópticos desta montagem experimental, Fig. C.1, foi criado um modelo em SolidWorks<sup>®</sup>. A precisão no posicionamento dos vários componentes e a funcionalidade dos mesmos são parâmetros considerados importantes no desenvolvimento deste sistema. O alinhamento do eixo óptico e o equilíbrio entre os caminhos ópticos do interferómetro são factores essenciais para obter uma boa qualidade nas medições. Especial atenção foi dedicada aos componentes móveis do sistema, como espelho + piezoeléctrico. No final, uma solução compacta e robusta foi conseguida através da construção do interferómetro de *Milchelson* num monobloco, aqui designado de cubo.

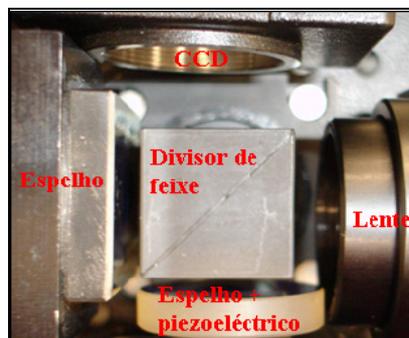


Fig. C.1 – Interferómetro usado no desenvolvimento do sistema *Shear*.

### C.3 Construção e montagem do sistema

A necessidade de uma precisão elevada na montagem e no posicionamento dos componentes

ópticos do sistema *Shear* levou a que este fosse todo construído em duralumínio. Apesar das boas características mecânicas deste material, as propriedades emissivas são indesejáveis neste tipo de interferômetro óptico. As reflexões internas podem resultar na destruição do contraste da imagem, traduzindo-se na baixa qualidade da medição. Razão que levou ao revestimento do interior do interferômetro a preto opaco.

Os componentes mecânicos desenvolvidos a partir do modelo em SolidWorks® estão representados na Fig. C.2.

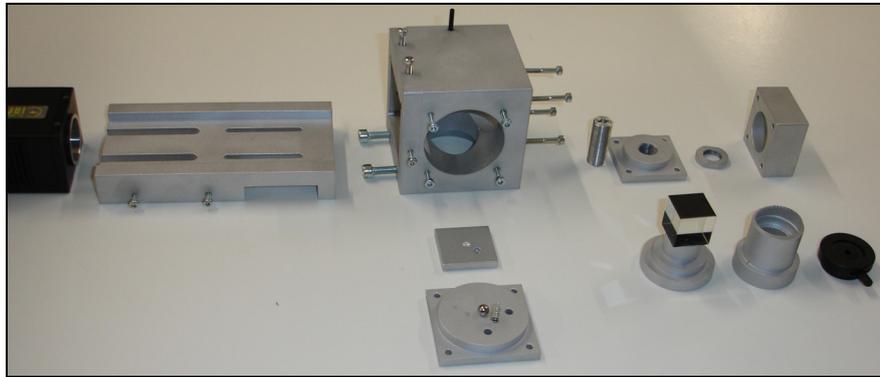


Fig. C.2 – Imagem dos vários componentes mecânicos desenvolvido para o sistema *Shear*.

A montagem, o alinhamento e o posicionamento dos vários componentes são garantidos pela precisão imposta no fabrico dos mesmos, tolerância fina no geral com H6 para furos e g5 para veios. Já o alinhamento óptico do divisor de feixe (*Beamsplitter*), lente, íris e CCD é assegurado por encaixes ligeiramente deslizantes. O paralelismo entre os espelhos e as superfícies do divisor de feixe é conseguido através da perfeita colagem dos espelhos. No final, os eventuais desalinhamentos e desequilíbrios nos braços do interferômetro podem ainda ser corrigidos por rotação do divisor de feixe, translação do piezoeléctrico, translação da lente e/ou translação do CCD.

#### C.4 Calibração do sistema óptico

A qualidade das medições do sistema *Shear* está fortemente dependente das características dos componentes ópticos utilizados e da sua disposição. Quanto às suas características, houve especial cuidado na escolha de componentes ópticos com baixa rugosidade, tipicamente  $\lambda/10$  com  $\lambda = 632nm$ . No caso da sua montagem, a optimização do seu posicionamento é conseguida através de pequenos ajustes dos componentes, seguindo um processo iterativo. Este procedimento, aqui designado de calibração do sistema óptico, pôde ser mais facilmente concretizado partindo da visualização de um padrão conhecido. Uma sequência algarismos disposta numa escala crescente de definição é utilizada para um mais fácil acerto e focagem da imagem, Fig. C.3.

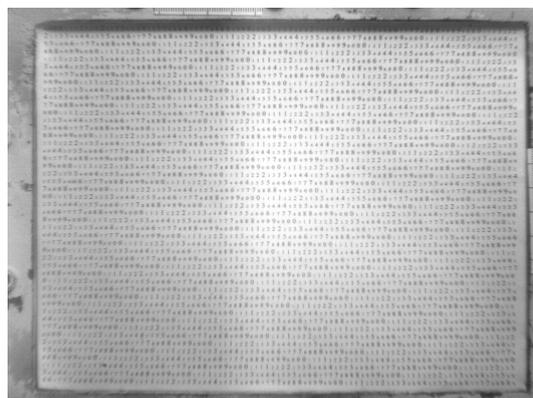


Fig. C.3 – Processo de calibração óptica.

Na primeira fase do procedimento de calibração é retirado o espelho do piezo, de forma a só

existir um caminho óptico entre o padrão e a câmara. O eixo óptico e a focagem são então ajustados através rotação do divisor de feixes, translação da lente e/ou da câmara, Fig. C.4 (lado esquerdo). Depois de acertadas as posições dos componentes procede-se à focagem do segundo caminho óptico (espelho do piezoeléctrico), sendo neste caso retirado o espelho do *Shear*, Fig. C.4 (lado direito). O procedimento é repetido até que ambas as imagens surjam perfeitamente focadas. Por equilíbrio na focagem obtém-se a paridade entre os caminhos ópticos do interferómetro de *Milchelson* e a consequente optimização óptica do sistema.

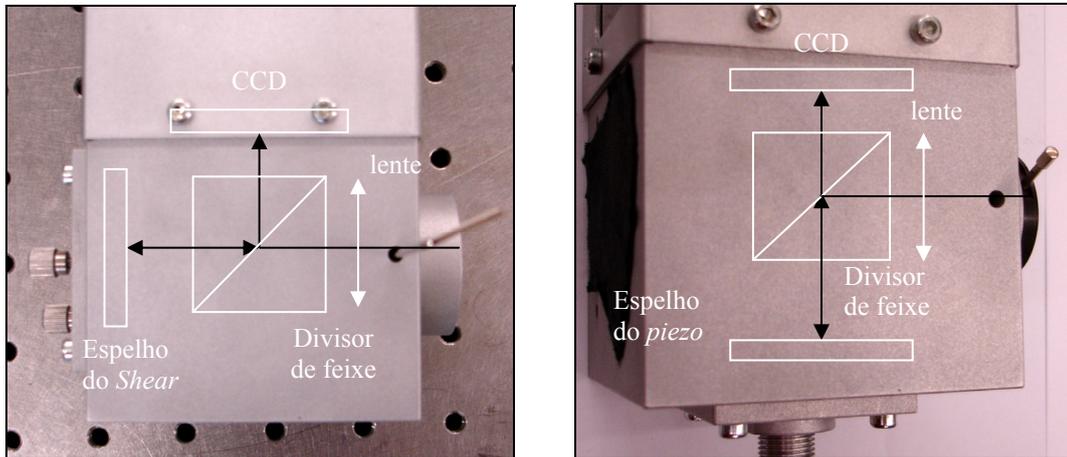


Fig. C.4 – Calibração do sistema óptico.

Finalmente, com todos os componentes ópticos montados procede-se à correcção das distorções ópticas entre as imagens formadas pelos dois caminhos ópticos, sendo utilizado a grelha representada na figura seguinte:

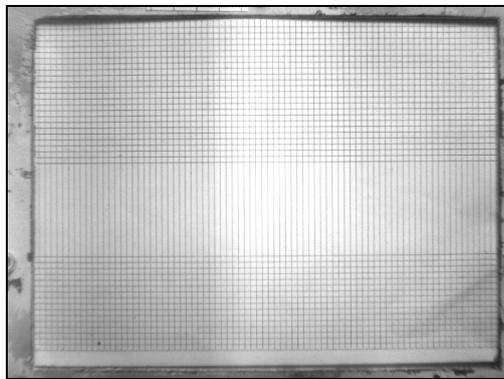


Fig. C.5 – Processo de correcção da distorção entre imagens.

### C.5 Calibração da fase

Como já referido, a técnica de modulação temporal de fase é utilizada para a determinação do mapa de fase. A técnica baseia-se na gravação temporal de uma sequência de imagens interferométricas desfasadas entre si de uma quantidade fixa (salto) e no posterior cálculo da fase. O salto de fase é criado por translação de um dos espelhos do interferómetro de *Milchelson*, neste caso o Espelho do Piezo, Fig. C.4. Este movimento resulta da expansão ou compressão de um material piezoeléctrico, actuado por um sinal eléctrico e gerado por uma placa da National Instruments<sup>®</sup> PCI-6722 por via amplificador Burleigh<sup>®</sup> PZ-70. A amplitude e o sentido do movimento são controlados pela placa da NI e através do ajuste do ganho no amplificador. Importa referir que o comportamento do piezoeléctrico é condicionado pelas características piezoeléctricas do material e tipo sinal eléctrico aplicado, entre vários outros factores. Nas mesmas condições, a relação entre a variação da fase e o sinal gerado poderá ser obtido de forma aproximada a partir das constantes piezoeléctricas fornecidas pelo fabricante. No entanto, uma calibração mais precisa poderá ser efectuada de forma expedita a

partir da observação da translação das franjas obtidas numa medição. Este método estabelece uma relação linear entre a amplitude do sinal eléctrico aplicado e a fase do movimento do espelho, que no caso particular da transição de uma franja corresponde ao salto de fase  $\pi$ . As franjas resultam da subtracção de dois mapas de intensidade de luz coerente. Por sua vez, cada mapa representa a interferência de dois padrões de *Speckle*, que no caso do sistema *Shear* são criados por translação de uma das imagens através da rotação do espelho *Shear*. A rotação é controlada por dois parafusos micrométricos que actuam sobre o suporte do espelho, sendo a amplitude ajustada por observação de uma escala milimétrica sobreposta ao plano de medição, Fig. C.6.

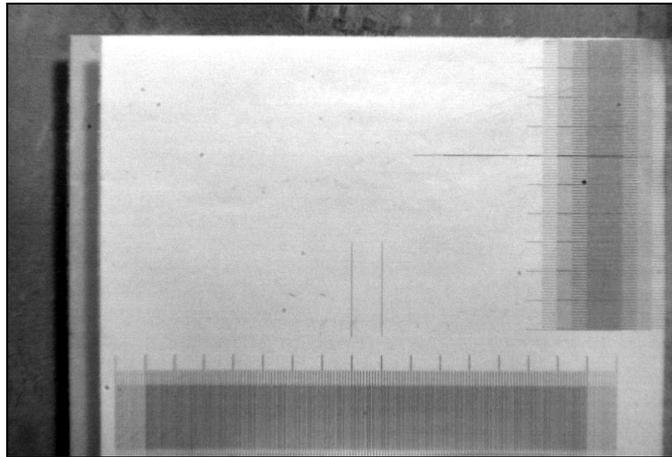


Fig. C.6 – Processo de ajuste da translação da imagem (translação horizontal de 10mm).

Na calibração da fase de medição foi utilizado uma placa encastrada iluminada por uma luz LASER com  $\lambda$  de 532 nm. Através do carregamento uniforme da placa obtêm-se as franjas de interferência correspondente ao campo de rotação sofrido pela placa e que se representam na Fig. C.7.

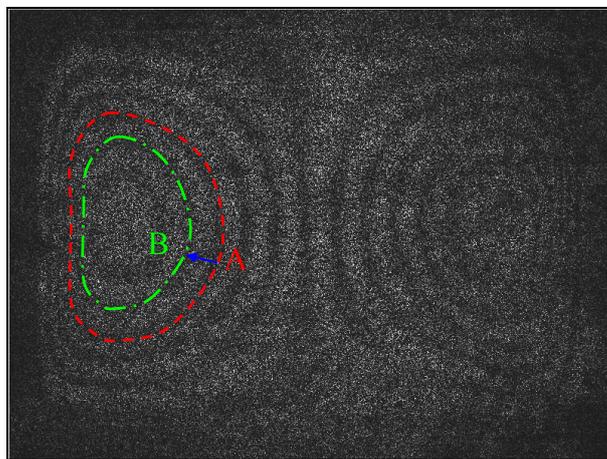


Fig. C.7 – Franjas de interferência da medição.

A amplitude do sinal em tensão foi ajustada desde zero até ao valor correspondente ao salto da franja A para a posição B, ver Fig. C.7. A recta de calibração é obtida, tomando o valor da tensão como o correspondente ao salto de  $\pi$  na fase.

### C.6 Solução final do sistema Shear

O modelo final do sistema *Shear* reúne num mesmo bloco o interferómetro óptico e a câmara de imagem, Fig. C.8. A elevada rigidez e as reduzidas dimensões da estrutura garantem a estabilidade do alinhamento óptico dos diferentes componentes, a facilidade no transporte e o manuseamento do sistema. Na face inferior da estrutura está previsto a colocação de um acessório para fixar o sistema num tripé, o qual permitirá orientar o sistema livremente no espaço. Ao nível da protecção, foi incluído

uma cobertura para a câmara, com aberturas laterais para dissipação do calor, e uma tampa para proteger o suporte do piezo e o terminal de alimentação. A câmara está fixa por dois parafusos M3 montados na face inferior do suporte da câmara através de dois rasgos, os quais permitem o acerto longitudinal da sua posição. Para evitar a influência da rigidez dos cabos na fixação da câmara foi acrescentado um travão colocado junto à face posterior da câmara.

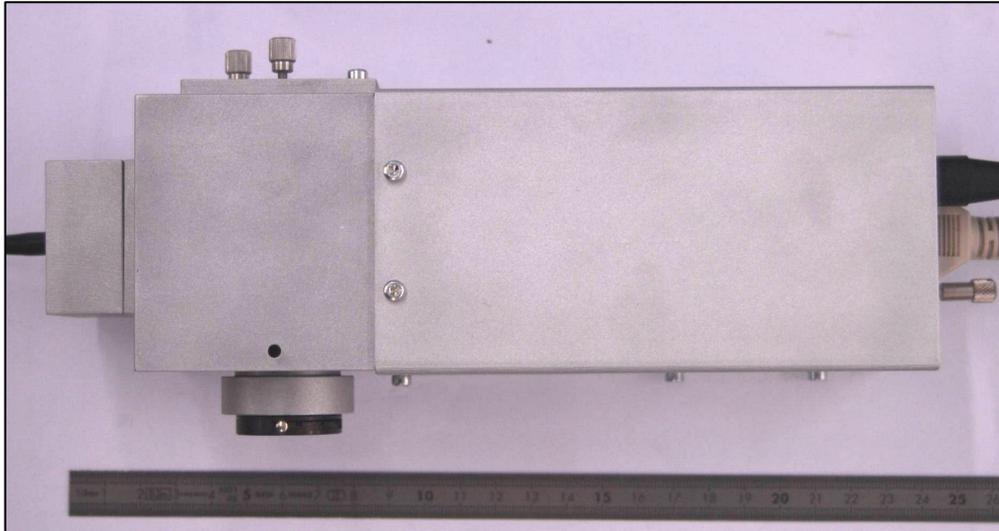
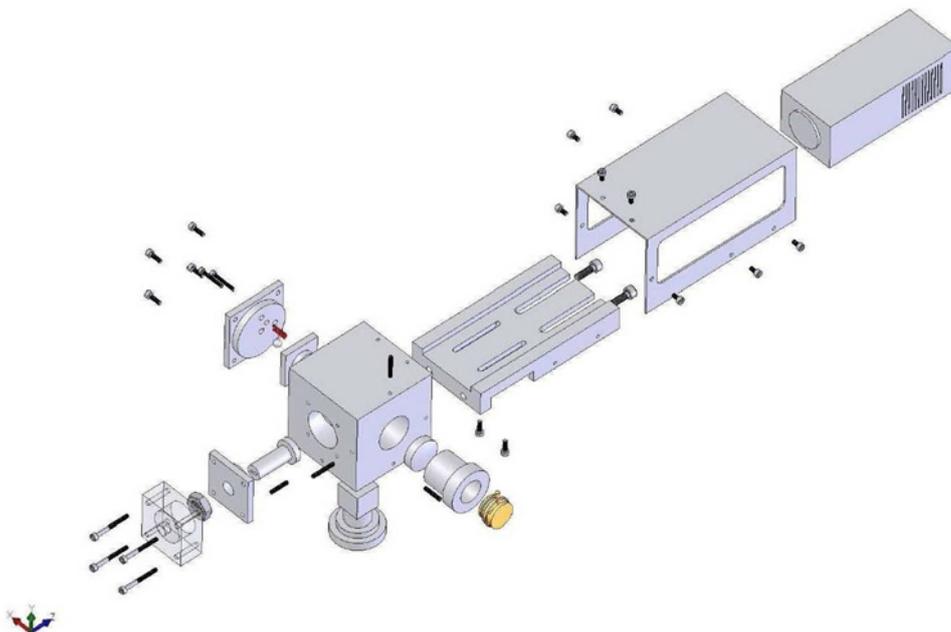
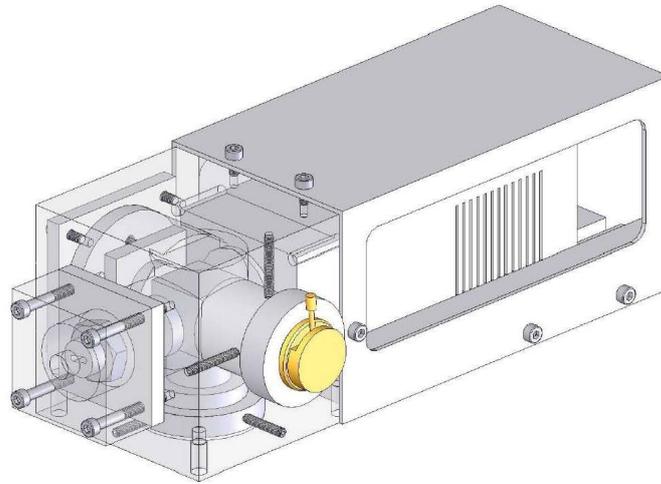


Fig. C.8 – Protótipo do sistema *Shear*.

O sistema permite realizar medições em vários tipos de superfícies de diferentes dimensões. A área observada vai depender da focagem do sistema *Shear*, o qual é realizado através da translação do sistema lente mais íris. Neste caso, uma aproximação linear pode ser adoptada entre a área observada e a sua distância. A partir da média das medições realizadas sobre um plano colocado a diferentes distâncias foi determinada a razão de 0,18 entre a dimensão horizontal e a distância. A razão entre a vertical e a distância é obtida através da relação 3/4 do CCD da câmara, o qual corresponde ao valor de 0,135.

### C.7 Vista explodida do sistema *Shear*



**C.8 Desenho do conjunto do sistema Shear**

# Anexo D

## Sistema *Shear* Pulsado

---

### D.1 Introdução

O sistema *Shear* Pulsado é um transdutor óptico desenvolvido para medir o campo de rotação de uma superfície animada de movimento dinâmico do tipo harmónico ou transitório. Este transdutor é baseado no interferómetro óptico de *Mach-Zehnder* e utiliza uma fonte de luz LASER pulsada para registar entre dois instantes consecutivos a rotação sofrida pela superfície. A aquisição rápida dos dois hologramas é realizado pelo sistema câmara JAI<sup>®</sup> modelo CV-M2 mais placa de aquisição de imagem Matrox<sup>®</sup> modelo Hélios XCL, sincronizados através do sinal de disparo do LASER de Rubi LUMONICS de duplo impulso. A técnica de modulação espacial de fase é usada para permitir o posterior cálculo da fase. A fase do movimento é extraída a partir da remoção da portadora espacial dos dois registos holográficos, recorrendo ao método da transformada discreta de Fourier-FFT (consultar anexo E).

### D.2 Desenvolvimento

Na base do desenvolvimento do sistema de *Shear* Pulsado está a construção do interferómetro óptico *Mach-Zehnder*, Fig. D.1. O interferómetro foi inicialmente montado sobre uma mesa anti-vibrátil, sendo usada uma fonte contínua de luz LASER com  $\lambda$  de 532 nm. A configuração óptima do interferómetro é encontrada entre a disposição dos componentes e as características dos elementos ópticos disponíveis. A partir desta configuração foi projectado o sistema de suporte e de posicionamento mecânico, utilizando para o efeito o programa de desenho SolidWorks<sup>®</sup>. Este interferómetro utiliza dois divisores de feixes (*Beamsplitter*) para separar e recombinar a informação de fase proveniente do objecto. Os dois caminhos ópticos, braços do interferómetro, podem ser ajustados por translação e/ou rotação do espelho em cada braço e de forma a controlar o valor do desfasamento (*Shear*) e a portadora espacial. Com efeito, o desfasamento é produzido pela translação do espelho num dos braços do interferómetro, espelho 1 na Fig. D.1, e a portadora espacial é introduzida alterando o ângulo do feixe através da rotação de um segundo espelho, espelho 2 na Fig. D.1.

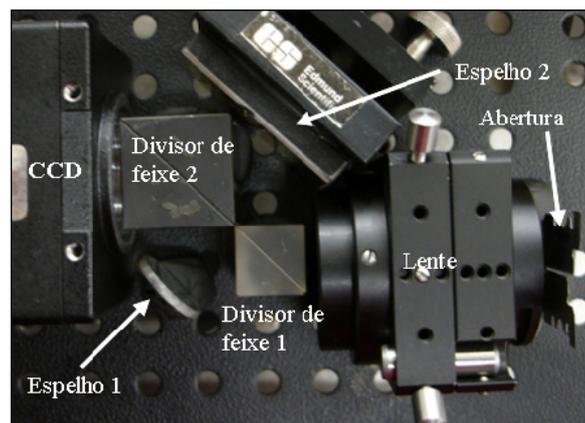


Fig. D.1 – Montagem do interferómetro óptico.

### D.3 Construção e montagem do sistema

A estrutura do protótipo é fabricada em duralumínio. A posição relativa dos vários componentes é garantida por tolerância fina e pela montagem num só bloco, sendo o seu alinhamento assegurado por pequenos ressaltos e por encaixes ligeiramente deslizantes, Fig. D.2. Os componentes metálicos são pintados de preto opaco para eliminar as reflexões internas.

Fig. D.2 – Componentes do sistema *Shear* Pulsado.

A fixação dos espelhos e divisores de feixe é feito por colagem. O sistema de translação do primeiro espelho utiliza um conjunto de mola mais parafuso micrométrico para controlar com precisão o valor do desfasamento (*Shear*). Já o sistema de rotação do segundo espelho, utilizado na modulação da portadora espacial, funciona através da rotação de um plano apoiado sobre uma esfera e preso por uma mola. A rotação nas duas direcções ortogonais deste plano é controlada de forma precisa pela actuação de dois parafusos micrométricos. O sistema de abertura do sistema óptico é criada pelo movimento lateral de duas lâminas, comandadas por um só parafuso micrométrico, Fig. D.3. O afastamento das lâminas é provocado por uma cunha deslizante que actua na parte suporte de cada lâmina, sendo o fecho provocado pela actuação de duas molas à compressão. Os suportes das lâminas deslizam dentro de uma caixa e são guiados por pinos de modo a garantir o seu paralelismo durante o movimento, Fig. D.3. A estrutura que serve de suporte ao sistema de abertura foi construída em Nylon para reduzir o atrito entre as partes móveis e garantir a precisão na montagem do conjunto. As lâminas, com 0.05mm de espessura, trabalham de forma a permitirem o fecho total do sistema óptico. Deste modo, o parafuso micrométrico controla a posição das lâminas desde completamente fechado até ao afastamento com 8 mm, tendo uma relação de  $\frac{1}{2}$  do avanço do parafuso.

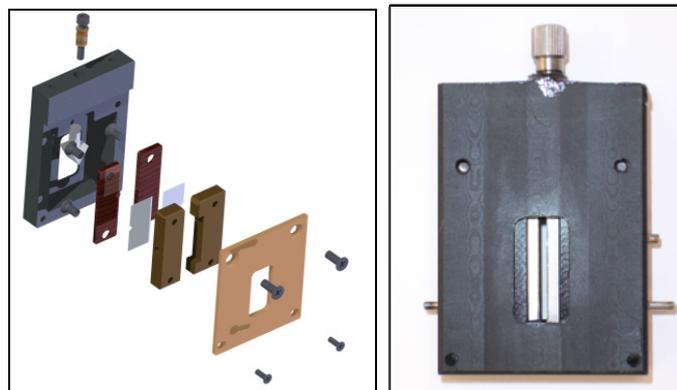


Fig. D.3 – Sistema da abertura óptica.

A abertura está alinhada com o eixo óptico do interferómetro e permite a entrada de luz ao longo de

uma ranhura vertical. A lente, montada sobre um suporte, é colocada entre a abertura e o primeiro divisor de feixe, sendo a sua posição ajustada através da translação do suporte ao longo de dois rasgos, os quais também servem de fixação Fig. D.4. A câmara é fixa por dois parafusos montados do lado inferior do bloco e que lhe permitem ajustar a sua posição na direcção longitudinal. Um arco de reforço é montado sobre a base do sistema para simultaneamente aumentar a rigidez da montagem da tampa, evitar a entrada de luz do exterior e servir de guia à câmara, Fig. D.2. O suporte deslizante do sistema de translação do espelho 1 é montado numa guia e travada por uma chapa que está fixa por dois parafusos. O suporte do sistema de rotação do espelho 2 é colocado num encaixe construído no bloco e montado em oposição ao outro espelho por um parafuso.

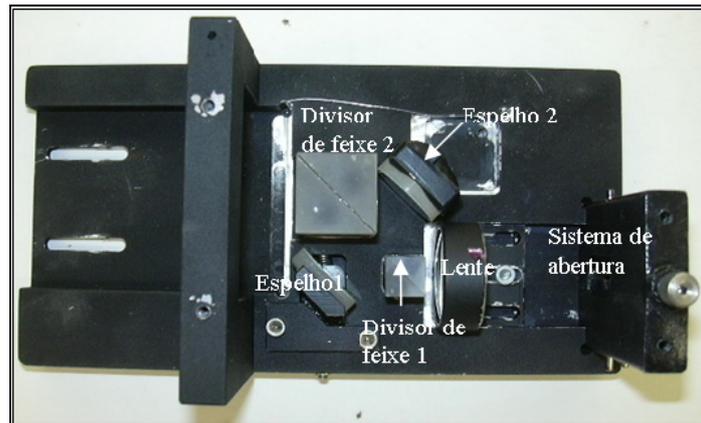


Fig. D.4 – Disposição dos componentes do sistema *Shear Pulsado*.

A tampa envolve todo o sistema e serve para proteger o interferómetro da entrada de luz. Na zona lateral possui duas aberturas para ventilação da câmara e está fixa à base por 12 parafusos.

#### D.4 Ajuste do sistema óptico

O ajuste das posições da lente e câmara é efectuado por focagem de um padrão conhecido, colocado à mesma distância de medição do objecto (consultar anexo C). O acerto da translação e rotação dos espelhos do interferómetro é conseguida através da observação de um padrão milimétrico. O controlo do desfasamento (*Shear*) é realizado por actuação do parafuso micrométrico e observação do padrão colocado junto à superfície do objecto (consultar anexo C). A portadora espacial é introduzida por rotação do espelho 2, em que o ângulo de inclinação define a frequência da portadora e a abertura das lentes a banda de frequências. O ângulo de inclinação é ajustado em função da distorção do padrão observado pela câmara, Fig. D.5.

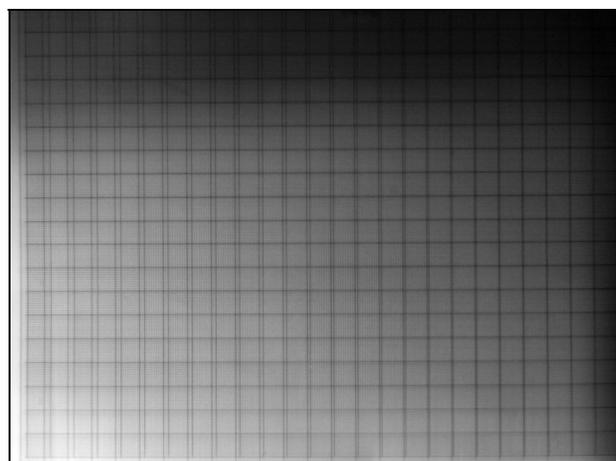


Fig. D.5 – Ajuste da portadora.

A distorção horizontal na grelha da Fig. D.5 produz uma portadora horizontal com uma

distribuição do sinal definida pela abertura óptica do sistema. Este pode ser observado no domínio do número de onda recorrendo à transformada de Fourier. Na Fig. D.6 está representado o logaritmo da magnitude do espectro obtido a partir do registo holográfico. A fase do objecto é obtida por desmodulação da portadora espacial no domínio do número de onda, recorrendo ao método espacial de fase (consultar anexo E).

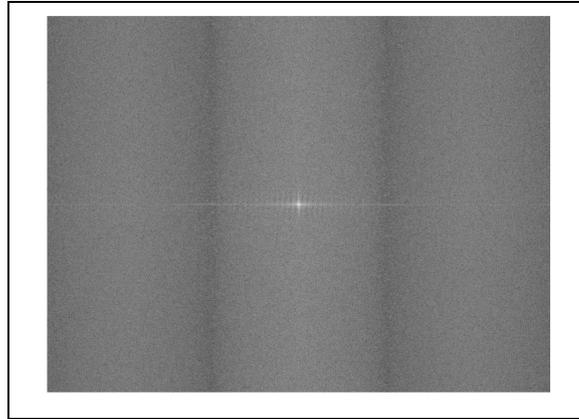


Fig. D.6 – Representação do espectro de um registo holográfico.

### ***D.5 Solução final do sistema Shear Pulsado***

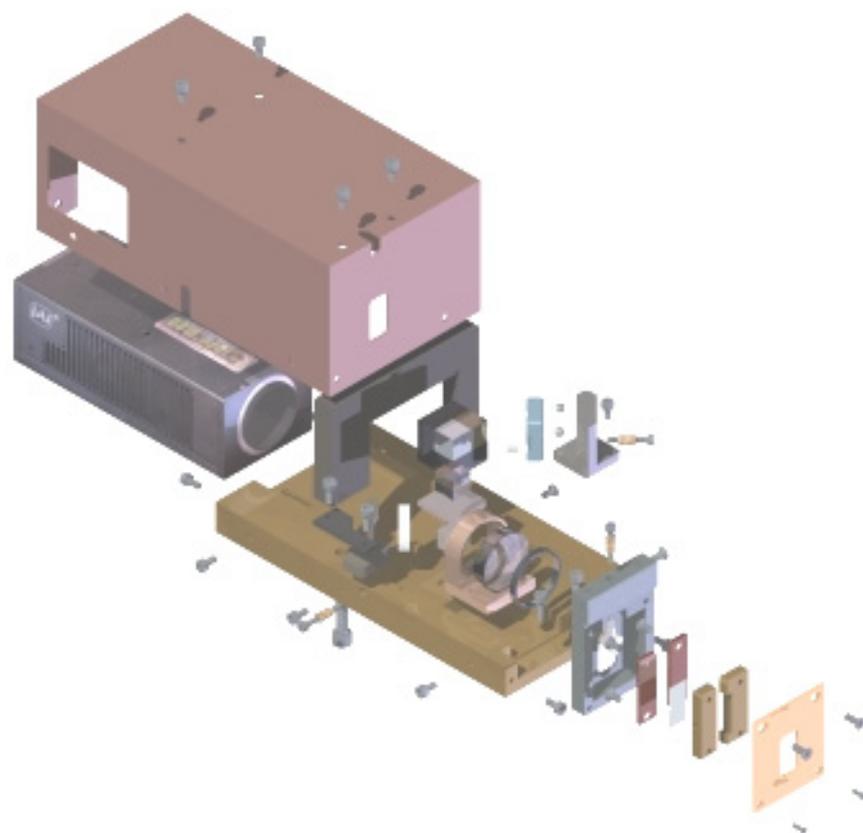
O sistema final caracteriza-se por ser compacto e robusto, permitindo o seu manuseamento e transporte. A abertura do sistema óptico mostra-se muito precisa e as lâminas mantêm sempre o paralelismo, Fig. D.6. A translação do primeiro espelho é controlada pelo parafuso micrométrico e a posição estabilizada por uma mola à compressão. A rotação do segundo espelho é ajustada por dois parafusos e estabilizada pelo conjunto esfera mais mola. As duas aberturas na tampa permitem o acesso à regulação do sistema de abertura das lâminas e ao sistema de ajuste do desfasamento, Fig. D.7. No lado inferior da base está previsto a montagem de um acessório para fixar o sistema a um tripé, dando maior liberdade à orientação e posicionamento do sistema relativamente à superfície de medição.



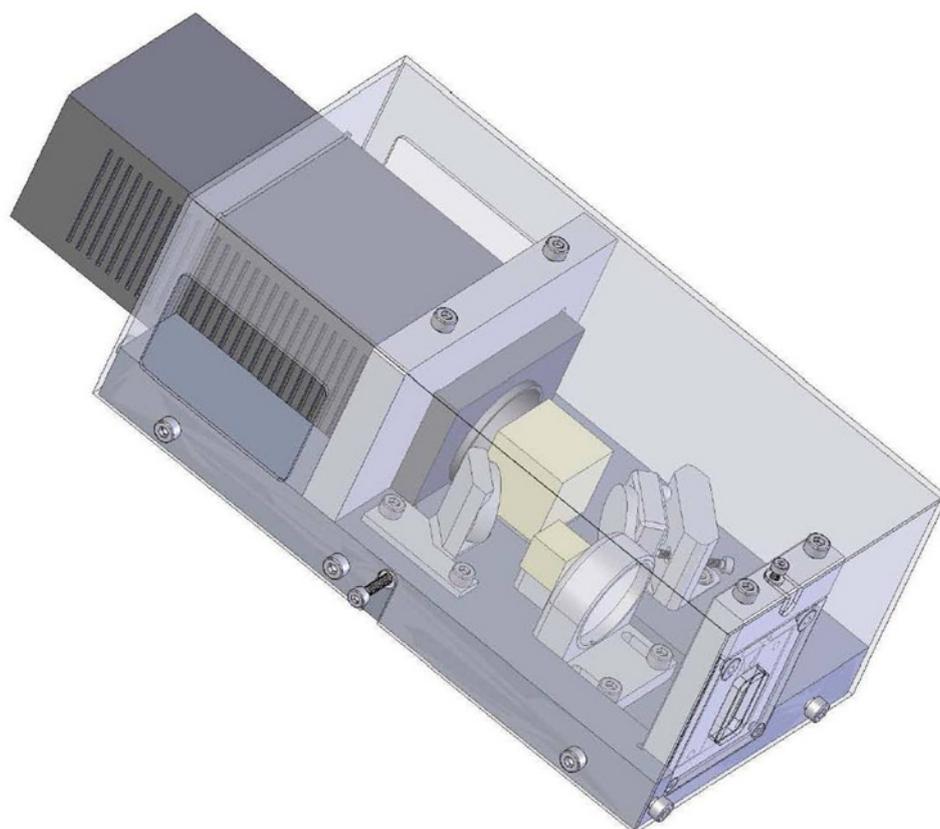
Fig. D.7 – Protótipo do Sistema *Shear Pulsado*.

O campo de visualização do sistema aumenta com a distância ao objecto e varia com a distância focal da lente. A área de medida pode ser determinada através da focagem de um plano colocado a diferentes distâncias da abertura do sistema. Neste caso, foi determinada a razão de 0,17 para a largura e 0,125 para a altura em relação à distância ao objecto.

**D.6 Vista explodida do sistema Shear Pulsado**



**D.7 Desenho do conjunto do sistema Shear Pulsado**





# Anexo E

## Programa de Processamento de Imagem

---

### E.1 Introdução

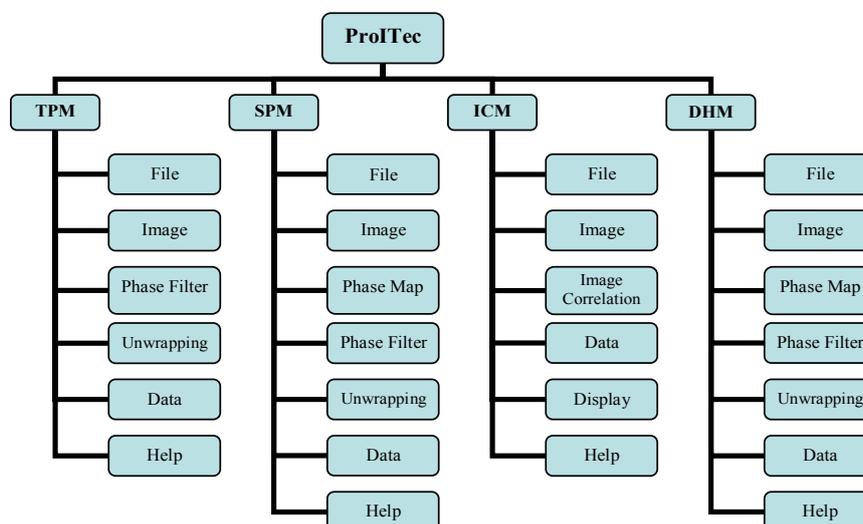
O programa de processamento de imagem foi desenvolvido para processar metrologicamente as imagens obtidas por diferentes técnicas ópticas de medição. Este engloba: as técnicas de interferometria *Speckle*, técnicas de *Moiré* geométrico e interferométrico, perfilometria por transformada de Fourier e técnicas de correlação digital de imagem. De forma abrangente, o programa permite o rápido tratamento dos dados e o controlo sobre todos os seus parâmetros, alcançando uma boa qualidade dos resultados.

A estrutura do programa segue uma filosofia orientada em função da metodologia de cálculo utilizada. Cada método encerra um conjunto de funções dedicadas à análise e tratamento dos dados extraídos a partir de diferentes técnicas ópticas de medição. Algumas das funções são transversais às metodologias de cálculo, sendo, por isso, organizadas numa estrutura independente da mesma. Esta solução permite melhorar e otimizar o tempo de cálculo, de forma a dar maior flexibilidade à sua utilização e facilitar futuras actualizações do programa.

### E.2 Apresentação

O programa está dividido nas 4 seguintes técnicas de medição: modulação temporal de fase, modulação espacial de fase, correlação digital de imagem e holografia digital por transformada de Fourier, designadas respectivamente pelas siglas: TPM, SPM, ICM e DHM. Estes módulos foram desenvolvidos na plataforma MATLAB 7<sup>®</sup>, possuindo uma acessível interface e um fácil manuseamento e seguindo uma ordem lógica de operações.

O programa baptizado de **ProITec** (Técnicas de Processamento de Imagem) está estruturado de acordo com o seguinte organograma:



Na estrutura deste programa foram incluídas as seguintes funcionalidades:

**Captura de Imagem:**

- Através da câmara;
- Mapas de fase já existentes;
- Imagens de referência e respectivas imagens da deformada; e
- Só imagens da deformada.

**Processamento:**

- Definição dos formatos;
- Definição de uma área activa e de uma máscara (caso se pretenda);
- Remoção da portadora;
- Filtros de fase;
- Unwrapping;
- Apresentação dos resultados em 2D e/ou 3D; e
- Armazenamento de dados em vários formatos.

**Operações Matemáticas:**

- Filtros do campo de medida (*Smoothing*);
- Compensação do movimento de corpo rígido;
- Perfil;
- Definição de níveis;
- Inversão dos dados;
- Valor médio;
- Informação da amplitude em cada píxel;
- Derivadas horizontais e verticais; e
- Animação em vídeo

### E.3 Descrição do programa ProITec

A plataforma do programa foi desenvolvida para correr no ambiente Windows<sup>®</sup>, permitindo uma interface acessível para o utilizador. Os menus são activados na sequência do avanço no tratamento dos dados. Pretende-se deste modo orientar o utilizador para o correcto processamento da informação no final de cada etapa.

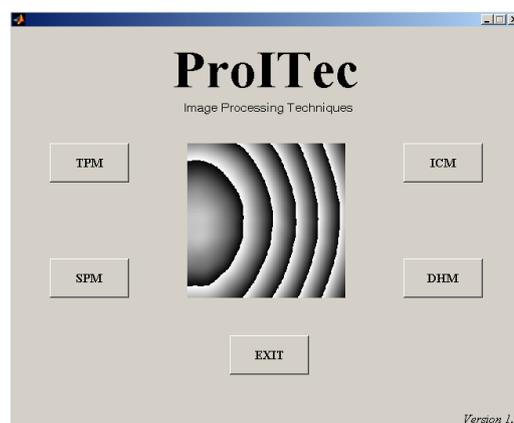


Fig. E.1 – Janela de interface do programa ProITec.

A gestão dos ficheiros, bem como o carregamento e armazenamento de dados são análogos à metodologia seguida no Windows<sup>®</sup>. Algumas das funções mais importantes podem ser operadas através de teclas de atalho, facilitando assim, o rápido avanço no tratamento da informação. Aproveitando as potencialidades da ferramenta desenvolvida em MATLAB<sup>®</sup> e, partindo de um tronco comum, o programa *ProITec* apresenta uma primeira janela de interface, Fig. E.1. Esta janela de

entrada permite o acesso a cada uma das diferentes metodologias de processamento de imagem. A objectividade na escolha da metodologia é facilitada pela associação do nome à técnica experimental utilizada.

As medições por interferometria *Speckle* estão divididas em técnicas temporais de modulação de fase ou técnicas de saldo de fase (TPM), técnicas de modulação espacial de fase ou técnicas da portadora espacial (SPM) e holografia digital por transformada de Fourier (DHM). Em seguida far-se-á uma breve descrição das principais componentes do processamento e gestão da informação associado a cada um destes métodos.

#### E.4 TPM (Temporal Phase Measurements)

Após seleccionar a técnica TPM surge em interface gráfica o método temporal de fase. Este método utiliza uma sequência de hologramas gravados no tempo para extrair a fase da deformação do objecto. A fase poderá ser calculada através das técnicas de 3, 4 ou 5 registos holográficos e do método de Carré, no caso de 4 hologramas desfasados entre si de  $60^\circ$ .

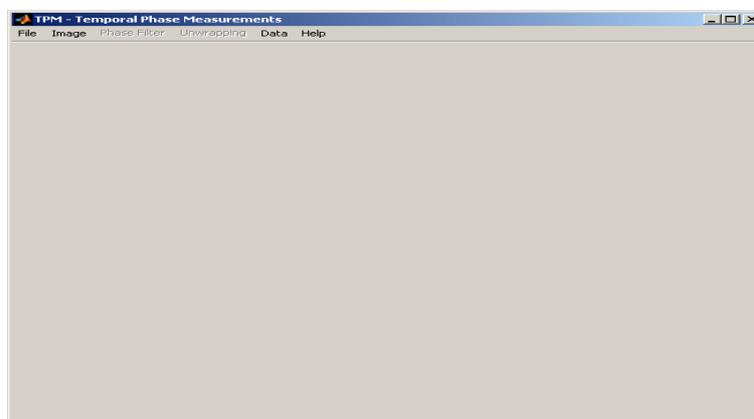


Fig. E.2 – Janela do método de desfasamento de fase (TPM)

A janela está dividida na barra de menus e área de trabalho. Nesta poderão ser visualizados as imagens referentes aos dados processados. No final de cada etapa de processamento a área de trabalho é actualizada e alguns dos menus são activados.

##### E.4.1 File

O menu File permite a gestão dos parâmetros globais associados a cada um dos métodos de processamento, a pré-visualização e a impressão do conteúdo da área de trabalho.

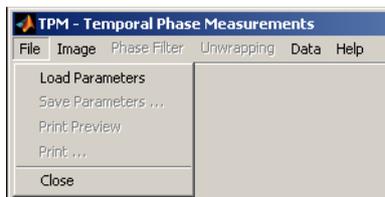


Fig. E.3– Janela do menu File.

Os parâmetros de configuração poderão ser carregados ou gravados através dos menus *Load Parameters* e *Save Parameters*, respectivamente. Estes permitem ao utilizador ter um maior controlo e flexibilidade sobre a gestão dos parâmetros do programa, de forma a poder associa-los a cada aplicação.

### E.4.1.1 Load Parameters

As configurações previamente guardadas poderão ser carregadas através da função *Load Parameters*. Apenas ficheiros gravados com a extensão \*.cfg serão reconhecidos pelo programa. Após o carregamento, os parâmetros do programa serão substituídos pelos novos e estes passarão a ser tomados como parâmetros por defeito. Neste processo, os parâmetros anteriores serão completamente apagados, por isso, recomenda-se que previamente se crie uma cópia de segurança através da função *Save Parameters*.

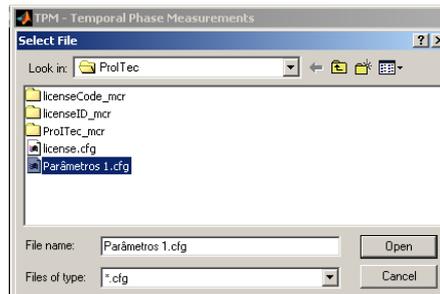


Fig. E.4 – Janela Load Parameters

**NOTA:** Ao iniciar pela primeira vez o programa são carregados os parâmetros por defeito.

### E.4.1.2 Save Parameters

Condicionado pelas características ímpares de cada aplicação, o tratamento da informação recolhida carece quase sempre de um ajuste dos parâmetros de configuração. Daqui resulta a necessidade de se possuir uma base de configurações pré-definidas de acordo com cada aplicação. Através da função *Save Parameter*, os parâmetros de configuração podem ser guardados e mais tarde utilizados. Esta função só está activa após actualizar a configuração.

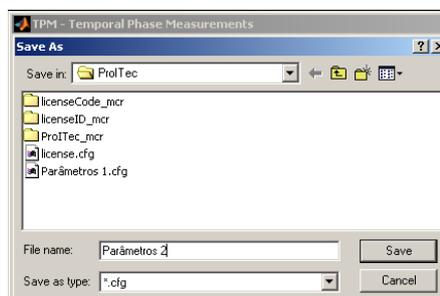


Fig. E.5 – Janela Save Parameters.

### E.4.1.3 Print e Print Preview

A impressão das imagens e dos resultados apresentados na área de trabalho poderá ser configurada e executada através, respectivamente, das funções *Print* e *Print Preview*, Fig. E.6.

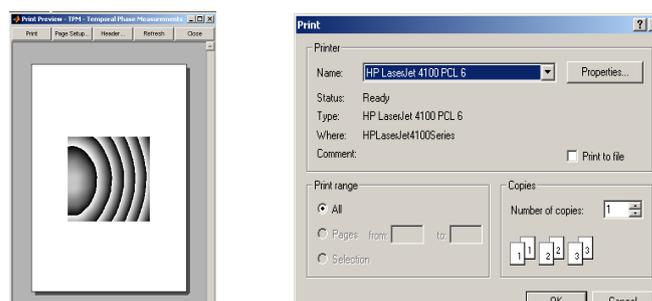


Fig. E.6 – Janelas de Print Preview e Print.

#### E.4.1.4 Close

A função *Close* provoca a interrupção súbita da execução e o encerramento do programa. Neste processo, as últimas configurações são guardadas em memória para serem utilizadas da próxima vez que se iniciar o programa. A operação só será executada após confirmação do utilizador, evitando o fecho inadvertido do programa.



Fig. E.7 – Janela de Close.

#### E.4.2 Image

O menu *Image* permite o acesso ao carregamento de mapas de fase, ao carregamento da sequência de imagens de referência e respectivas imagens da deformada. As tarefas de guardar a(s) imagem(ns) em diferentes formatos e, definir, carregar e/ou guardar as máscaras das imagens poderão também ser executadas nesta função.

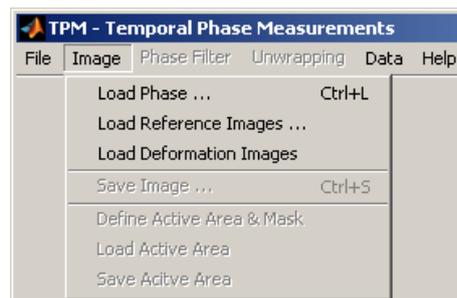


Fig. E.8 – Janela do menu Image.

##### E.4.2.1 Load Phase Map

O carregamento de mapas de fase é realizado através da função *Load Phase Map*, sendo admitidos os seguintes formatos de imagem: tif; jpg; gif; bmp; png; hdf; pex; xwd; cur; rãs; pbm; pgm e ppm. A amplitude da informação do mapa de fase depois de carregada a imagem é ajustado para a gama de  $[-\pi \ \pi]$ .

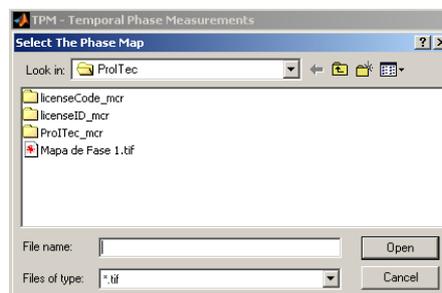


Fig. E.9 – Janela de Load Phase Map.

**NOTA:** Esta função poderá também ser activada através das teclas de atalho **Ctrl+L**.

Após o carregamento do mapa de fase são activadas as funções associadas ao filtro de fase (*Phase Filter*) e Unwrapping. A fase é representada por uma escala de 256 tonalidades de cinzentos, correspondendo o preto ao valor mínimo e o branco ao valor máximo da fase, Fig. E.10.

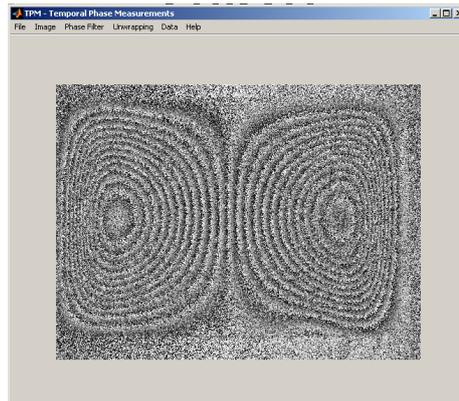


Fig. E.10 – Janela após carregamento do mapa de fase.

#### E.4.2.2 Load Reference Images

A técnica de modulação temporal de fase permite o cálculo dos mapas de fase a partir de uma das cinco técnicas de fase. As técnicas estão definidas em função do número de imagens ou hologramas utilizados, correspondendo a diferentes valores do salto de fase. Normalmente, a determinação da fase do movimento utiliza um conjunto de imagens de referência e de imagens de deformada. No primeiro caso, estas podem ser carregadas através da função *Load Reference Images*. A escolha da técnica é automática no caso do carregamento de 3 e 5 imagens. Já no caso do carregamento de 4 imagens o utilizador poderá escolher entre o método das 4 imagens e o método de Carré. Na Fig. E.11 pode observa-se o exemplo do carregamento de quatro imagens de referência e a selecção do método de cálculo do mapa de fase.

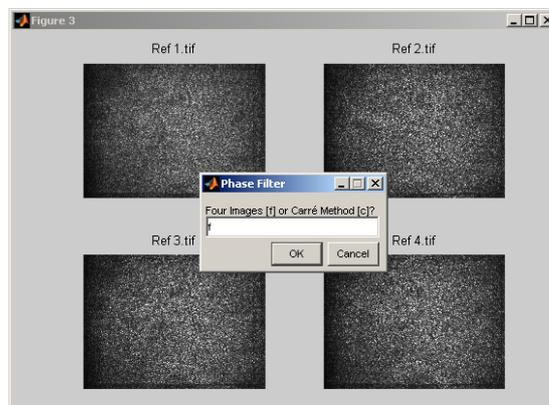


Fig. E.11 – Representação das imagens de referência.

Procedendo de igual forma para as imagens da deformada, é obtido o mapa de fase. O mapa da fase da interferência correspondente ao campo de medição resulta da interferência do mapa de fase da referência com o mapa de fase da deformada, representado na Fig. E.12.

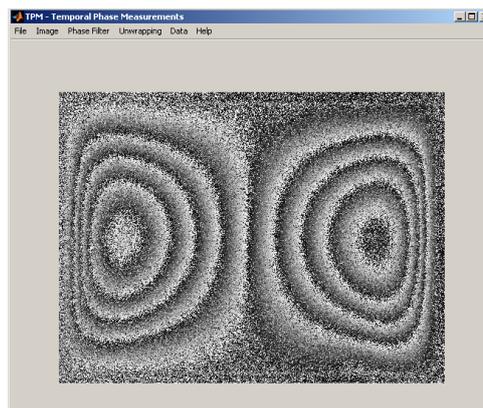


Fig. E.12 – Mapa de fase obtido pela técnica de  $\pi/4$  salto de fase (TPM).

### E.4.2.3 Load Deformation Images

A técnica TPM é extensível a aplicações aonde só são necessárias as imagens da deformada para o cálculo do mapa de fase. No caso, o carregamento das imagens é efectuado através da função *Load Deformation Images*. A selecção da técnica de cálculo de fase processa-se de forma idêntica ao caso anterior. Como exemplo, apresenta-se na Fig. E.13 o carregamento de 4 imagens e a selecção do método de cálculo.

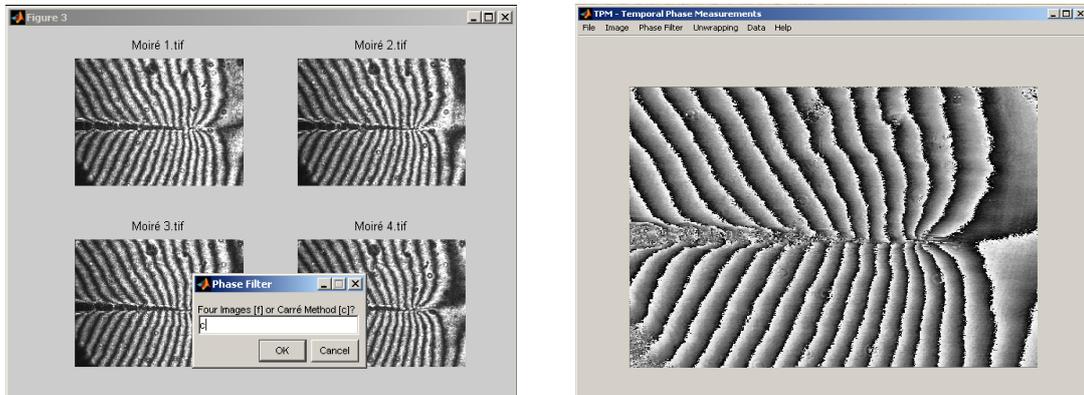


Fig. E.13 – As quatro imagens obtidas por Moiré interferométrico e o correspondente mapa de fase.

### E.4.2.4 Save Image

A informação representada na área activa de trabalho poderá ser guardada em formato de imagem para posterior análise e/ou utilização noutras aplicações. A função *Save image* codifica a informação numa escala de cinzentos de 8 bits e que poderá ser guardada na forma gráfica com a extensão tif ou jpg. **NOTA:** Esta função pode também ser activada através das teclas **Ctrl+S**.

### E.4.2.5 Define Active Area & Mask

Normalmente, para geometrias mais complexas é importante definir sub-regiões de estudo. A selecção destas regiões na imagem permite delimitar o estudo a áreas de menor ruído e reduzir o tempo de processamento da informação, contribuindo desta forma, para uma melhoria da qualidade final dos resultados (capítulo 4). Os contornos e as dimensões da região são definidos através da ferramenta *Define Active Area & Mask*. A partir desta, surge também a opção de seleccionar uma sub-região de interesse, sendo o contorno definido por linhas a ligarem os pontos seleccionados na imagem, Fig. E.14.

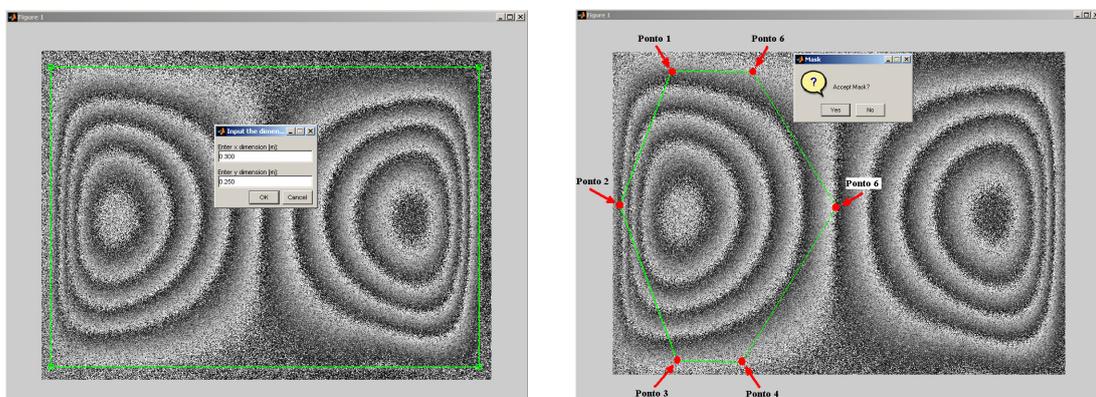


Fig. E.14 – Selecção da área activa e definição das dimensões da imagem.

A definição dos contornos e dimensões da imagem podem realizar-se de forma sistemática usando máscaras predefinidas. De forma automática, os parâmetros e as máscaras poderão ser activados através da função *Load Active Area*.

#### E.4.2.6 Load Active Area

Os parâmetros da imagem são introduzidos a partir de ficheiros com o formato msk (máscara). O processo envolve a verificação da conformidade entre as características da imagem e os parâmetros carregados e, por este motivo, é efectuado de forma interactiva com supervisão do utilizador.

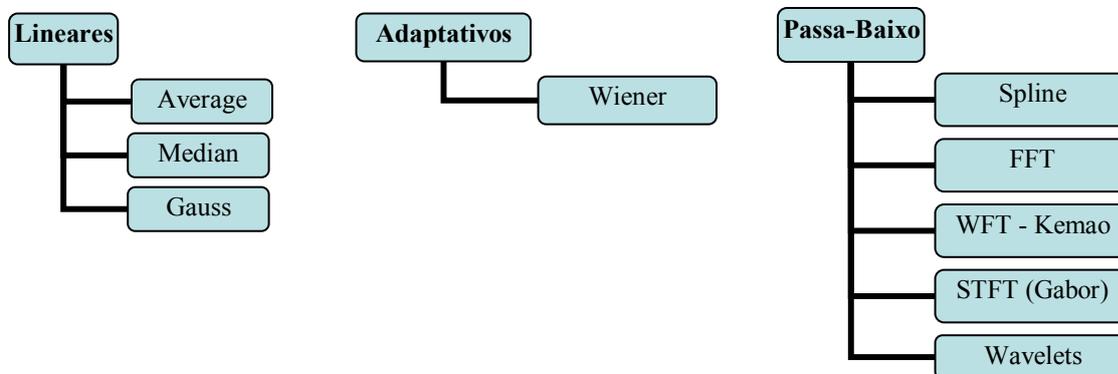
#### E.4.2.7 Save Active Area

A optimização dos resultados a partir de dados experimentais é potenciada pela flexibilidade no controlo e gestão dos parâmetros de configuração. No presente caso, as configurações e as máscaras são ajustados para melhor servirem o objectivo da análise, podendo ser guardados através do submenu *Save Active Area*. Os parâmetros são gravados em formato \*.msk, permitindo a sua reutilização em futuras aplicações.

#### E.4.3 Phase Filter

As medições experimentais estão intrinsecamente contaminadas por ruído experimental da mais variada natureza e origem. O ruído é um elemento perturbador em qualquer medição experimental com directa repercussão no grau de precisão dos resultados.

Uma elevada razão sinal/ruído permite melhorar a qualidade final dos resultados. Através de técnicas dedicadas de filtragem é possível melhorar esta relação. No entanto, a eficácia destas técnicas depende fortemente da natureza estatística do ruído, o qual varia em função da técnica experimental e tipo de medição usadas. Neste programa são disponibilizados 9 diferentes filtros de fase, descritos no capítulo 4, e que estão agrupados por filtros lineares, adaptativos e passa-baixo, e ordenados conforme se mostra no organograma seguinte:



Os parâmetros de controlo dos filtros de fase podem ser ajustados através do submenu *Settings*, pertencente ao menu *Data*. Na Fig. E.15 apresenta-se o resultado da aplicação do filtro de fase (WFT-Kema) ao mapa de fase da Fig. E.14.

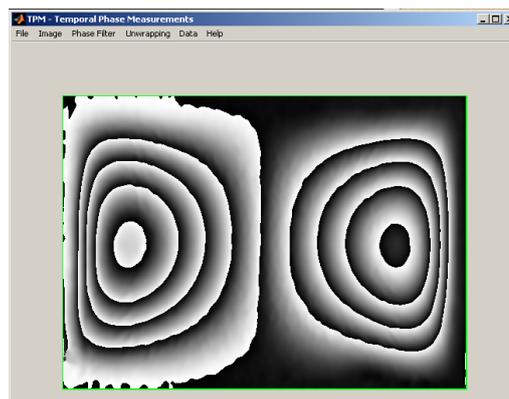
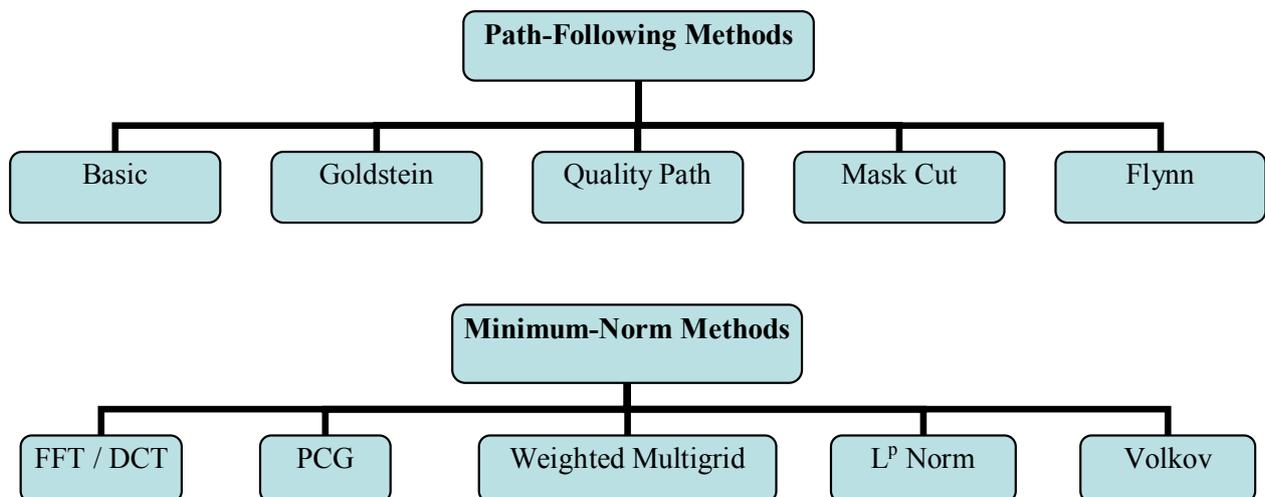


Fig. E.15 – Aplicação do filtro de fase (WFT-Kema).

#### E.4.4 Unwrapping

As curvas do mapa de fase representam pontos de igual amplitude da grandeza física medida. A partir do mapa descontínuo de fase e através da técnica de *unwrapping* é determinado o mapa contínuo de amplitudes ou campo de medida. A técnica, na sua forma mais básica, usa o gradiente de fase como parâmetro de controlo para eliminar as descontinuidades de fase. Porém, a presença de inconsistências na fase, provocadas por ruído na medição e/ou como resultado da aplicação dos filtros de fase, conduzem a erros no mapa das amplitudes. Na tentativa de superar esta dificuldade foram desenvolvidas várias técnicas seguindo duas diferentes metodologias e que se designam por: métodos selectivos do caminho (*Path-Following Methods*) e métodos de minimização da norma do erro (*Minimum-Norm Methods*). No programa são disponibilizadas 10 diferentes técnicas de *unwrapping* da fase (capítulo 4), ordenadas de acordo com a metodologia e dispostas conforme o organograma seguinte:



Tomando como exemplo o mapa de fase filtrado e utilizando a técnica de *unwrapping Goldstein* é obtido o campo de medida deslocamentos representado na Fig. E.16. Nesta etapa, a amplitude é também representada por um mapas de cores a três dimensões.

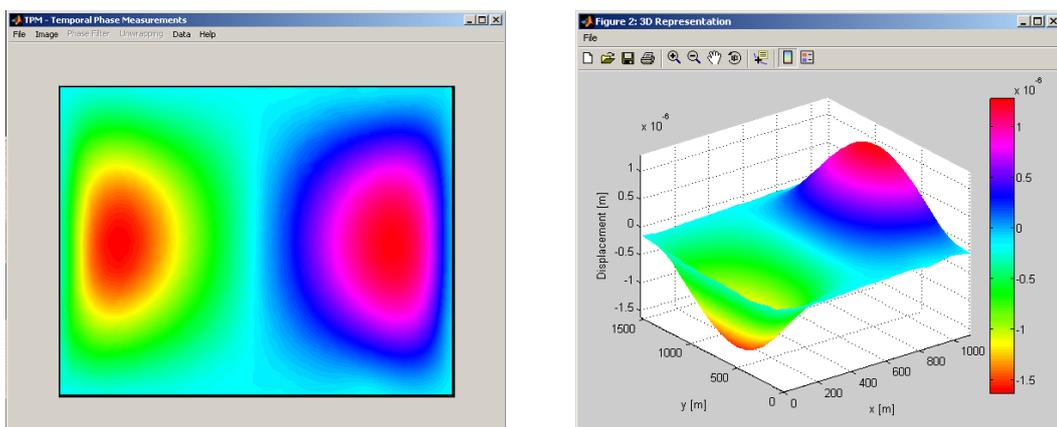


Fig. E.16 – Representação do mapa de amplitudes após aplicação da técnica de *unwrapping*.

A nova janela, representação tridimensional, exhibe um conjunto de ferramentas para análise estatística, visualização e gestão dos dados. As funcionalidades do menu *File* e barra de tarefas, comuns a todas as janelas, serão descritos mais à frente neste anexo.

### E.4.5 Data

A manipulação, análise e processamento dos dados de amplitude poderá ser realizada através das ferramentas existentes no menu *Data*. A filtragem, correcção do movimento de corpo rígido e o cálculo das derivadas espaciais são algumas das operações matemáticas disponíveis. A sistematização destas operações de processamento poderá ser realizada através de um módulo avançado de cálculo, aqui designado de *Macro*. Esta importante ferramenta de cálculo permite definir uma sequência de operações de acordo com as necessidades do utilizador e de modo automatizado.

#### E.4.5.1 Load Data

Os dados formatados com dupla precisão (64 *bits*) podem ser carregados a partir de ficheiros no formato \*.sdt. Esta função tem o acesso directo à informação anteriormente guardada, sem perda de precisão nos dados.

#### E.4.5.2 Save Data

O processo de gravação da informação em imagem envolve a discretização dos dados e tem como resultado a perda de informação e adição de ruído. A função *Save Data* foi criada para preservar a qualidade da informação guardando-a na máxima resolução disponível, 64 bits.

#### E.4.5.3 Smoothing

Normalmente, o processo de *unwrapping* da fase produz mapas de amplitude ruidosos em consequência da presença de inconsistências localizadas na informação de fase. O ruído local de alta frequência pode ser eliminado através de filtros do tipo passa-baixo. A opção *Smoothing* tem a finalidade de “amaciar” a evolução dos campos obtidos, aumentando a razão sinal/ruído. A configuração da função de amaciamento pode ser controlada através do ajuste dos parâmetros definidos no menu *Settings*. Na Fig. E.17 demonstra-se a eficácia da aplicação desta ferramenta na eliminação do ruído localizado.

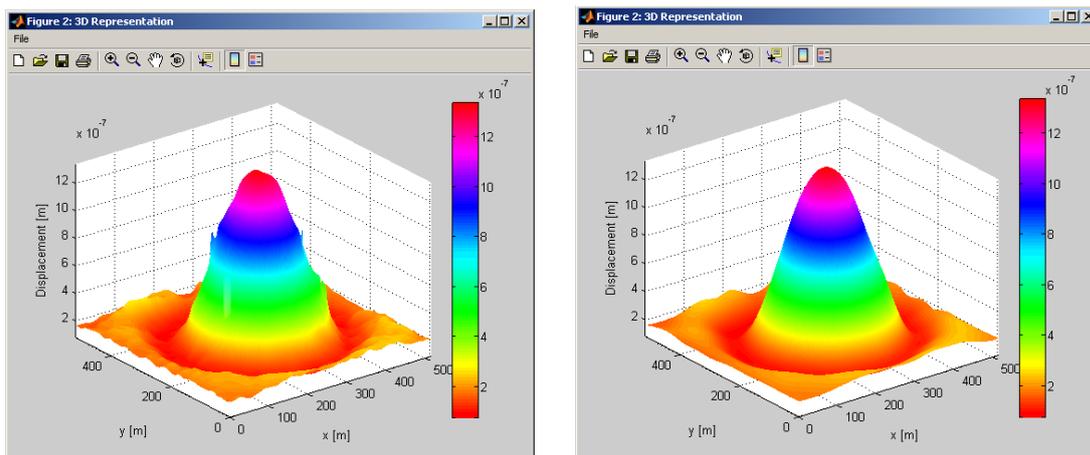


Fig. E.17 – Eliminação do ruído através da ferramenta de amaciamento (antes - à esquerda; após - à direita).

**Nota:** A função pode ser directamente activada utilizando as teclas **Ctrl+M**.

#### E.4.5.4 Compensate Tilt

O efeito indesejado e conhecido por movimento de corpo rígido é originado por pequenos desvios na medição experimental. A sua correcção pode ser efectuada por subtracção de um plano, obtido por ajuste de uma função bilinear ao campo de medição. Esta funcionalidade permite corrigir *a posteriori* os movimentos globais de translação e rotação sem perda da informação de amplitude do

campo de medida, conforme se demonstra pela Fig. E.18.

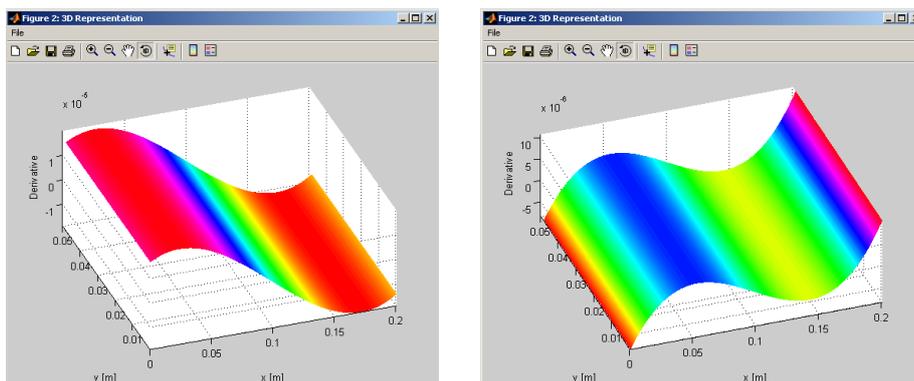


Fig. E.18 – Correção do movimento de corpo rígido (antes - à esquerda; após - à direita).

#### E.4.5.5 Profile Polyline

A ferramenta *Profile Polyline* permite traçar um perfil ao longo de uma linha definida pelo utilizador. A linha do perfil é desenhada a partir da selecção de pontos no plano da imagem. O processo termina com a representação do mapa de perfis, Fig. E.19 apresenta-se no lado direito.

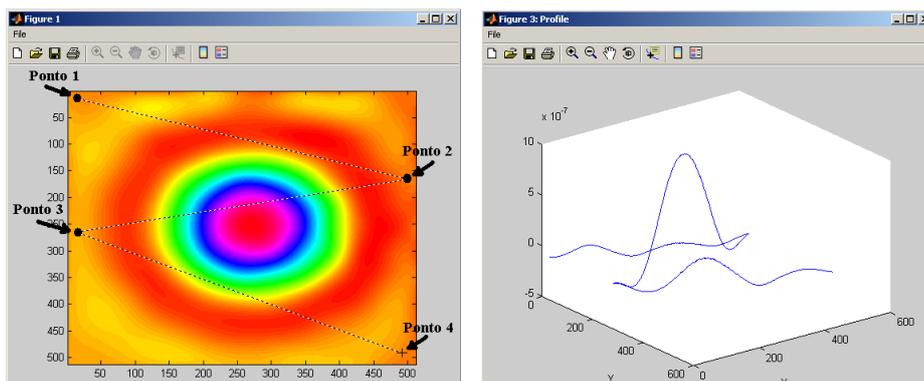


Fig. E.19 – Traçar o perfil ao longo de uma linha.

#### E.4.5.6 Define Level

O método de análise e cálculo do campo de medida conduz a uma representação relativa da grandeza física medida. A determinação dos valores absolutos no campo de medida terá de ser realizado pelo utilizador, recorrendo à ferramenta *Define Level*. A função permite transladar em amplitude o mapa através da atribuição de um novo valor a um ponto seleccionado, Fig. E.20. O valor actual do ponto seleccionado é representado numa janela para que o utilizador possa fazer a correcção desejada.

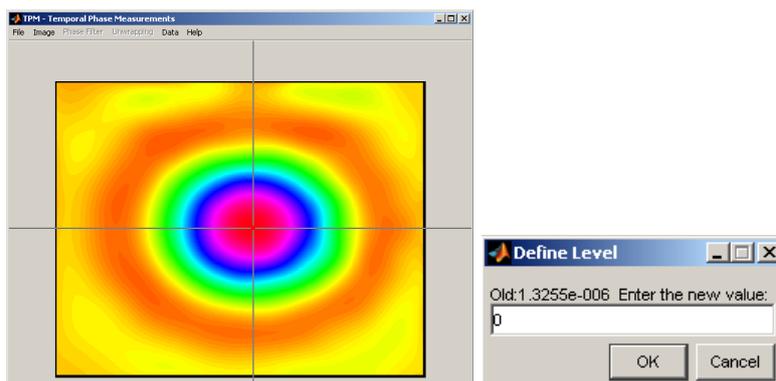


Fig. E.20 – Definição do valor absoluto.

### E.4.5.7 *Invert Data*

A inversão do mapa de amplitudes é obtida através da ferramenta *Invert Data*. Esta opção deve ser utilizada em complemento com a ferramenta *Define Level*, permitindo maior flexibilidade na configuração e no ajuste do valor absoluto das amplitudes do campo de medida. Tomando como exemplo o mapa da Fig. E.17 e, aplicando a opção *Invert Data* obtém-se, o mapa invertido da Fig. E.21.

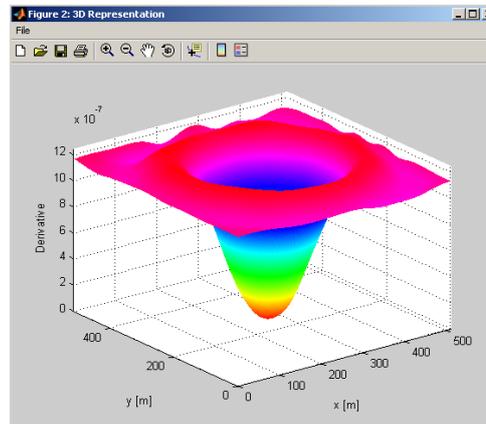


Fig. E.21 – Representação invertida do mapa de amplitudes.

### E.4.6 Mean Level & STD Level

Os parâmetros de média e desvio padrão são fornecidos por esta função. A informação estatística do campo de medida é analisada numa região definida pelo utilizador e o seu valor é representado janela informativa.

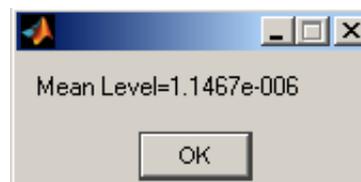


Fig. E.22 – Valor médio das amplitudes numa sub-região do mapa.

#### E.4.6.1 *Info Pixel*

A visualização do mapa de amplitudes em cada ponto da imagem é efectuada através da função *Info Pixel*. Ao mover um apontador sobre o mapa de medição é possível observar em detalhe o valor da amplitude para cada ponto da imagem (tabela inferior ao mapa), Fig. E.23.

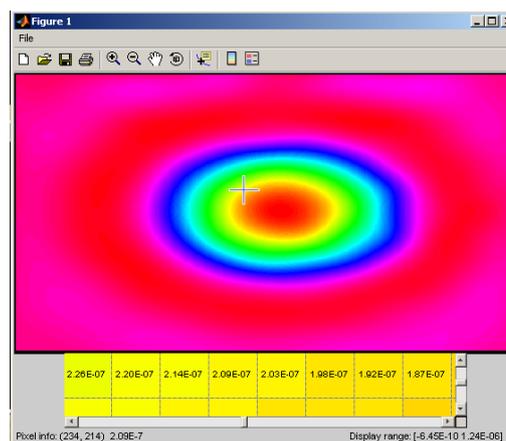


Fig. E.23 – A informação detalhada da amplitude em cada píxel da imagem.

### E.4.6.2 Horizontal and Vertical Differentiation

Estas duas ferramentas fornecem individualmente e de modo consecutivo as derivadas espaciais de primeira ordem do campo de medida nas direcções horizontal e vertical da imagem respectivamente. No cálculo é usado a metodologia de diferenciação numérica desenvolvida no capítulo 4. A partir do exemplo apresentado na Fig. E.17 e, aplicando por convulsão de imagem a primeira derivada função Gaussiana obtêm-se, respectivamente, os mapas das derivadas para as direcções horizontal e vertical, Fig. E.24.

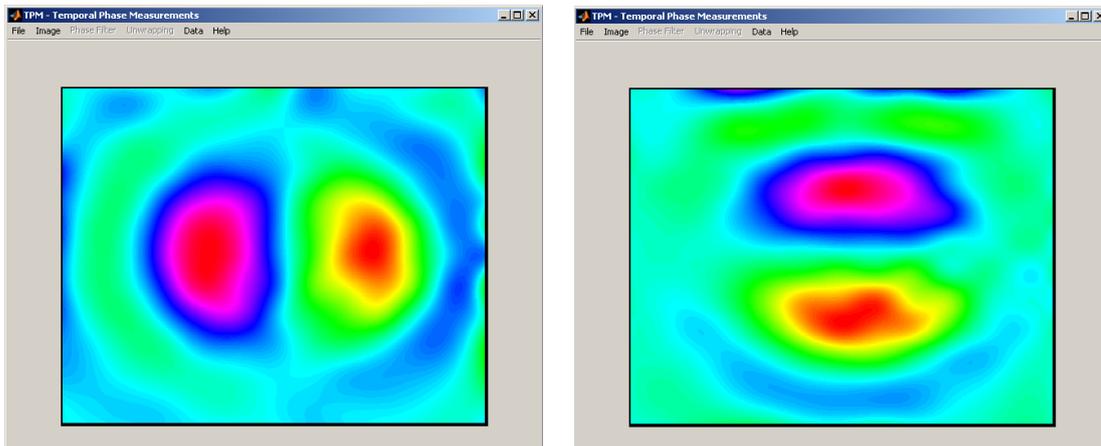


Fig. E.24 – Mapa da derivada horizontal (imagem à esquerda) e vertical (imagem à direita).

**NOTA:** Nesta operação, o campo de medida é eliminado e substituído pela sua derivada. Pretendendo-se calcular, em separado, as derivadas nas duas direcções da imagem deverá ser guardado o campo de medida para futura utilização.

### E.4.6.3 Macro

A necessidade de tratamento rápido e eficaz dos dados experimentais levou ao desenvolvimento da ferramenta Macro. Esta permite construir uma sequência de operações matemáticas definidas à medida das necessidades e servindo os objectivos de cada aplicação. O melhoramento e optimização dos resultados conduzem, normalmente, a um processo iterativo e heurístico que se resume ao ajuste dos parâmetros e à definição de uma sequência de operações configuradas em função do propósito de cada análise. Felizmente, para aplicações semelhantes poucos são os ajustes necessários a realizar, podendo a mesma sequência de operações ser utilizada. A sistematização deste cálculo através de parâmetros optimizados poderá ser efectuada através da ferramenta Macro, sem a necessidade da intervenção do utilizador. A ferramenta integra todas as funções deste programa e permite acesso directo à configuração dos seus parâmetros. A construção da sequência de operações matemáticas é executada a partir da janela apresentada na Fig. E.25.

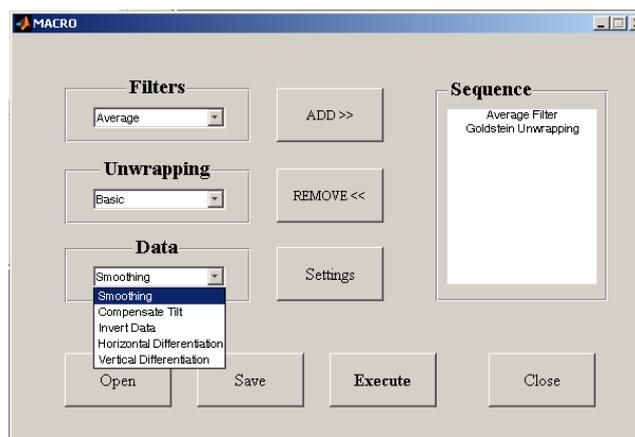


Fig. E.25 – Definição de uma sequência de operações.

#### E.4.6.4 Graphics

Como complemento à representação gráfica surgem a *2D Representation*, a *3D Representation* e a *Mode Shape*. Estas três novas ferramentas permitem o acesso algumas das funcionalidades até aqui inexistentes. A representação bidimensional e tridimensional (*2D Representation* e *3D Representation*) disponibilizam um conjunto de novas ferramentas para análise estatística, visualização e gestão dos dados, além de outras funções definidas no menu *file*. A representação *Mode Shape* fornece a visualização de mapas de amplitude animados de movimento harmónico síncrono e permite a sua reprodução em vídeo.

#### E.4.6.5 Settings

Os parâmetros das funções implementadas são consultados e ajustados através opção *Settings*. Para uma melhor gestão, estão organizados e agrupadas por filtros de fase, amaciamento e diferenciação, e painel. No grupo filtros (*Phase Filter Setup*) é possível alterar os parâmetros de cada filtro, sendo as diferentes janelas activadas em função do filtro de fase seleccionado. No grupo amaciamento e diferenciação (*Smoothing and Differentiation Setup*) os parâmetros das funções são ajustados de modo a permitir o resultado pretendido. Por fim, no grupo painel (*Panel*) algumas das configurações gráficas podem ser personalizadas.

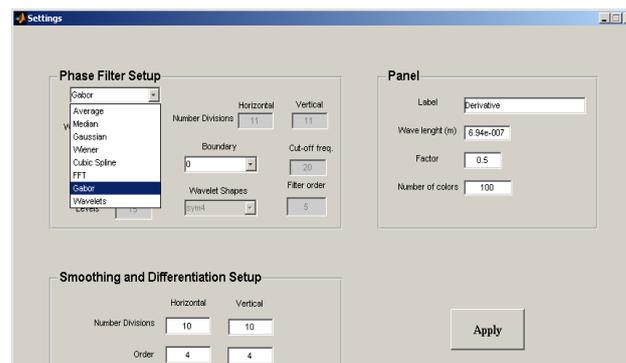


Fig. E.26 – Configuração dos parâmetros do programa.

**NOTA:** Só depois da actualização dos parâmetros do programa é activada a função *Save Parameters*.

#### E.4.7 Barra de Ferramentas

A representação bidimensional e tridimensional fornece um conjunto de opções para controlo, impressão e gravação das imagens. As funções são acedidas através do menu *File* ou através de ícones representados na barra de menus presentes em cada janela.

##### E.4.7.1 File

O menu *File* permite criar, abrir, gravar e exportar imagens em vários formatos. Também é possível personalizar e imprimir o gráfico representado na área activa de trabalho, Fig. E.27.

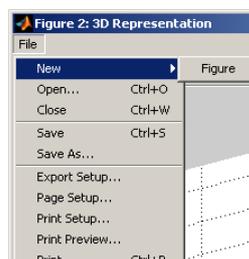


Fig. E.27 – As funções do menu *File*.

### E.4.7.2 Ícones

As tarefas de controlo e visualização gráfica podem ser directamente acedidas através de botões com símbolos, cuja funcionalidade se descreve a seguir:

-  Cria uma nova figura.
-  Permite abrir uma figura já existente.
-  Guarda a imagem em diferentes formato.
-  Imprime o gráfico.
-  Aumenta o gráfico.
-  Diminui o gráfico.
-  Permite a translação do gráfico na janela em questão.
-  Permite rodar o gráfico.
-  Faculta as coordenadas e a amplitude de um ponto escolhido pelo utilizador.
-  Insere a barra de cores da escala de amplitudes do gráfico.
-  Insere a legenda do gráfico.

### E.4.7.3 Help

Neste menu é consultado o manual do programa através da opção *ProITec Help*. Os vídeos contendo exemplos ilustrativos de análises podem ser visualizados na opção *Demos*. As informações relativas à versão e licença do programa são fornecidas na opção *About ProITec*, Fig. E.28.



Fig. E.28 - Funções no menu *Help*.

## E.5 SPM (Spatial Phase Measurements)

A técnica de modulação espacial de fase (SPM) utiliza a maioria das funcionalidades já apresentadas. Porém, esta distingue-se da técnica TPM na razão que utiliza uma portadora espacial nas franjas primárias para posterior extracção da fase do movimento. Esta particularidade permite efectuar medições em fenómenos rápidos do tipo harmónico e transitório. No entanto, o processo de extracção da fase é mais complexo e necessita da intervenção do utilizador para a desmodulação da fase. Esta exige um conjunto de novas ferramentas que aqui foram incluídas através da introdução do menu *Phase Map* na estrutura do programa. Em seguida far-se-á uma breve descrição deste menu e das funções associadas à extracção da fase pela técnica de modulação espacial de fase.

### E.5.1 Phase Map

A opção *Phase Map* foi adicionada à estrutura do programa para permitir o cálculo do mapa de fase a partir de imagens holográficas com portadora espacial, Fig. E.29. Nela se inclui o método da desmodulação da portadora espacial através da transformada de Fourier (*FFT method*) e método automático de cálculo de fase a partir do deslocamento digital de imagem (*Digital Shift (3)*).



Fig. E.29 – Funções para o cálculo do mapa de fase pela técnica medição espacial de fase (SPM).

### E.5.2 Define FFT Mask

O mapa das franjas secundárias do holograma é obtido através da remoção da portadora gravada nas franjas primárias. A partir do mapa da magnitude espectral, obtido pelo método da transformada de Fourier, é construído uma máscara em torno das suas componentes de frequência mais importantes, Fig. E.30. Esta informação de fase é transportada para a origem das frequências para, através da transformada inversa de Fourier, obter as franjas secundárias.



Fig. E.30 – Definição da máscara (SPM).

Nesta representação, a barra de menus apresenta um conjunto de funcionalidades. Na qual, o menu *File* permite carregar máscaras (*Load*), guardar máscaras (*Save*), pré-visualizar a impressão da imagem (*Print Preview*) e imprimir a imagem (*Print*). No menu *Mask* é ajustado a gama de intensidades da imagem (*Adjust Intensity*) e seleccionado o tipo de máscara a utilizar, linha no caso do contorno definido por vários pontos (*Polyline*) ou rectângulo na escolha de dois pontos da imagem (*Rectangle*), Fig. E.31.

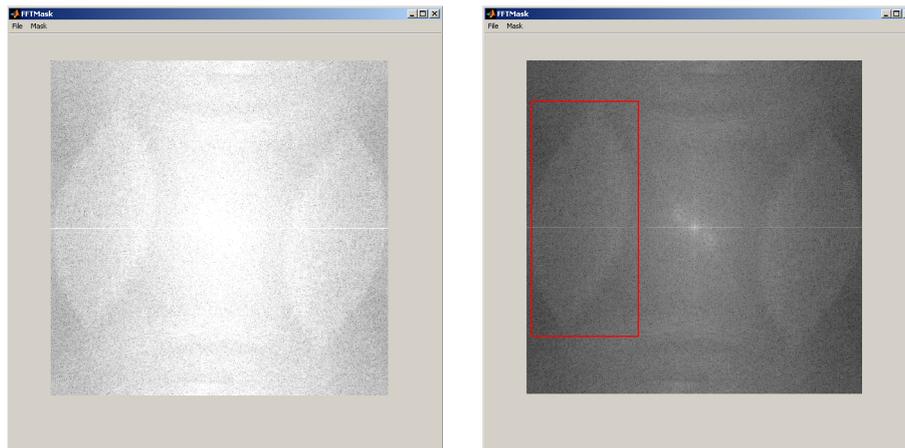


Fig. E.31 – Ajuste da intensidade da magnitude espectral (lado esq.) e uso da máscara retangular (lado dir.).

### E.5.3 Evaluate Phase

Após a definição da máscara e removida a portadora espacial das imagens de referência e de deformada, obtêm-se por interferência das franjas secundárias o mapa de fase da medição, Fig. E.32 (*FFT Method*). Como alternativa, o mapa de fase pode ser calculado de forma automática recorrendo ao deslocamento digital das imagens (*Digital Shift (3)*). Este método usa como princípio a distribuição da portadora por três píxeis da imagem, com salto de fase de  $120^\circ$  entre píxeis consecutivos. A partir da translação digital de um píxel da imagem são obtidos os três registos holográficos necessários à determinação das franjas secundárias. Por interferências das franjas secundárias entre dois estados do objecto obtém-se o mapa de fase. Esta técnica baseia-se numa aproximação grosseira da distribuição do salto de fase, sendo os mapas de fase de inferior qualidade em relação ao método da transformada de Fourier.

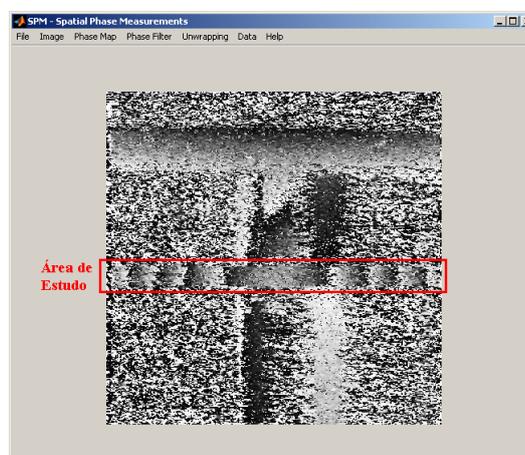


Fig. E.32 – Mapa de fase obtido pelo método da transformada de Fourier (SPM).

## E.6 DHM (*Digital Holography Measurements*)

A técnica de medição holografia digital por transformada de Fourier (DHM) foi desenvolvida a partir da plataforma construída para as duas técnicas descritas anteriormente. A metodologia de processamento dos dados segue a mesma estrutura apresentada para a técnica TPM. À excepção do método de obtenção do mapa de fase que, por ser dependente da técnica de medição, é calculado de forma diferente dos anteriores.

À semelhança da técnica SPM, faz-se a seguir uma breve descrição das principais funções associadas ao cálculo do mapa de fase usando a técnica DHM.

### E.6.1 Phase Map

A metodologia usada no cálculo da fase do movimento é condicionada pela montagem experimental e técnica de medição. Nos dois métodos anteriores foi apresentado a metodologia de cálculo usando as técnicas de modulação temporal da fase a partir do salto fixo de fase e as técnicas de modulação espacial de fase com introdução da portadora espacial nas franjas primárias. Estas técnicas exigem montagens ópticas algo complexas e uma calibração prévia do sistema de salto de fase. Em alternativa a estas duas apresenta-se agora a técnica de holografia digital, caracterizada por usar montagem óptica mais simples e com um só registo para cada estado de carregamento. Assim, a partir da relação entre a distância da câmara ao objecto e o espaçamento entre pontos da matriz do sensor da câmara é determinado o mapa de fase do movimento. Neste processo, o tempo cálculo foi optimizado recorrendo à transformada rápida de Fourier (FFT). A ferramenta de cálculo da fase *Phase Map* divide-se em ajuste dos parâmetros de cálculo do mapa de fase (*Adjust Parameters*) e cálculo do mapa de fase do movimento (*Evaluate Phase Map*), Fig. E.33.



Fig. E.33 – Funções para o cálculo do mapa de fase pela técnica de holografia digital.

#### E.6.1.1 Adjust Parameters

A dimensão de cada píxel do sensor da câmara e a sua distância ao objecto podem ser definidos através desta ferramenta, Fig. E.34. A distância é ajustada por intermédio da focagem de um padrão colocado sobre a superfície de medição.

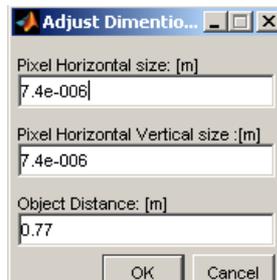


Fig. E.34 – Definição dos parâmetros de cálculo do mapa de fase por holografia digital.

Partindo dos parâmetros definidos anteriormente e por recurso à transformada de Fourier obtém-se para o domínio da frequência a representação da imagem do objecto, Fig. E.35.



Fig. E.35 – Ajuste da distância por focagem do objecto.

### E.6.1.2 Evaluate Phase Map

Conhecidos os parâmetros de configuração e pela função *Evaluate Phase Map* é obtido o mapa de fase do movimento sofrido pelo objecto entre as medições. O processo de cálculo é acelerado pela utilização de um método otimizado de cálculo. O elevado contraste no mapa de fase é sinónimo do acerto dos parâmetros definidos pelo método da focagem.



Fig. E.36 – Mapa de fase obtido por holografia digital.

## E.7 ICM (Image Correlation Measurements)

A técnica de correlação de digital imagem tem suscitado um grande interesse nos últimos anos, motivado pelo acréscimo das capacidades de medição proporcionadas pelo aparecimento de novos algoritmos e do baixo custo das câmaras digitais de elevada resolução. A técnica distingue-se pela simplicidade, versatilidade e precisão, rivalizando com algumas técnicas metrológicas de medição no plano de média/elevada resolução. A técnica de correlação digital de imagem (*Image Correlation Measurements*) usa por princípio a identificação de padrões singulares de intensidade entre imagens. Esta metodologia de processamento de imagem difere das técnicas anteriores, razão que levou ao desenvolvimento de uma estrutura independente. As principais alterações ao modelo de estrutura das técnicas anteriores são apresentadas a seguir.

### E.7.1 Image Correlation

A estrutura da correlação digital de imagem está orientada segundo a metodologia de cálculo definida para esta técnica. Uma sucessão de imagens pode ser analisada numa sequência metrológica de deslocamentos e deformações no plano. A integração das medições pontuais em campos contínuos de medida é conseguida através da opção amaciamento (*Smoothing*). A estimativa matemática da razão entre duas deformações ortogonais no plano pode ser obtida através da função coeficiente de *Poisson* (*Poisson Ratio*). O processo de cálculo está otimizado através da limitação da dimensão máxima de pesquisa entre padrões consecutivos e adoptando o seu cálculo à forma vectorial. O método da correlação normalizada entre padrões de imagens é usado de forma a eliminar o efeito da variação da intensidade entre imagens  $C(u, v)$ :

$$C(u, v) = \frac{\int_{\Delta A^*} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}] [f^*(x - u, y - v) - \bar{f}^*_{u,v}] dA}{\int_{\Delta A} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}]^2 dA \int_{\Delta A^*} [f^*(x - u, y - v) - \bar{f}^*_{u,v}]^2 dA} \quad (E.1)$$

O cálculo da correlação normalizada entre imagens (*Evaluate*) é desenvolvido a partir dos parâmetros de configuração definidos no menu *Settings* do programa *ProITec*.

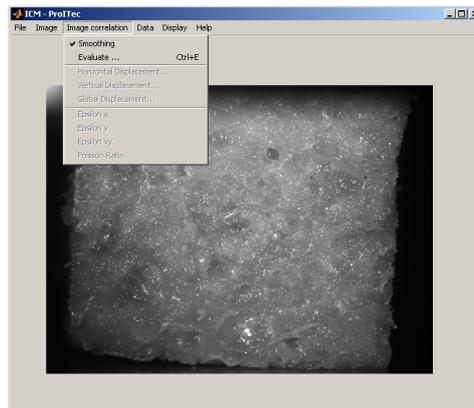


Fig. E.37 – Função correlação de imagem.

### E.7.2 Smoothing

Ao realizar o cálculo da correlação digital entre as diferentes imagens (*Evaluate*), o amaciamento é automaticamente executado sempre que esta opção está activa. Os resultados da correlação são ajustados por mínimos quadrados a funções do tipo B-Spline, sendo obtida uma distribuição contínua do campo de deslocamentos e deformações.

### E.7.3 Evaluate

O cálculo da correlação digital de imagem é realizado através desta função. A qualidade da medição e/ou a área de pesquisa pode originar a descorrelação de parte dos padrões de intensidade, provocando desvios nos resultados além do valor esperado. Nesses casos e no final, é apresentado um mapa com indicação dos padrões onde este limite foi excedido, Fig. E.38. Através do cálculo por correlação digital de imagem são encontradas as componentes horizontal, vertical e global do deslocamento e, as deformações horizontal, vertical e distorção no plano.

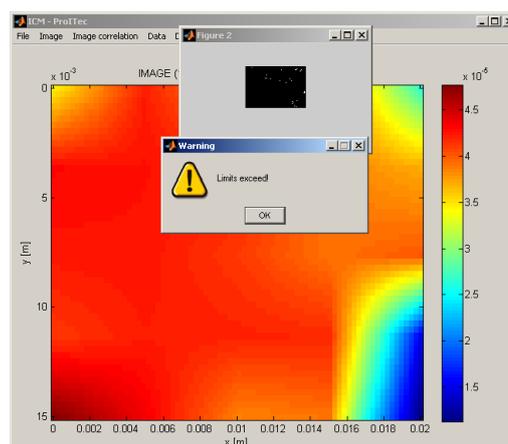


Fig. E.38 – Aviso do valor esperado excedido.

**Nota:** A função poderá ser activada através das teclas de atalho **Ctrl+E**.

### E.7.4 Horizontal Displacements

O mapa do deslocamento horizontal pode ser visualizado na função *Horizontal Displacements*. Um mapa de cores representando o campo de deslocamento entre par de imagens é apresentado. A evolução do campo de deslocamentos entre sucessivas imagens pode ser seguido usando funções de

avanço e recuo definidas no menu *Display* e/ou através das respectivas teclas de atalho.

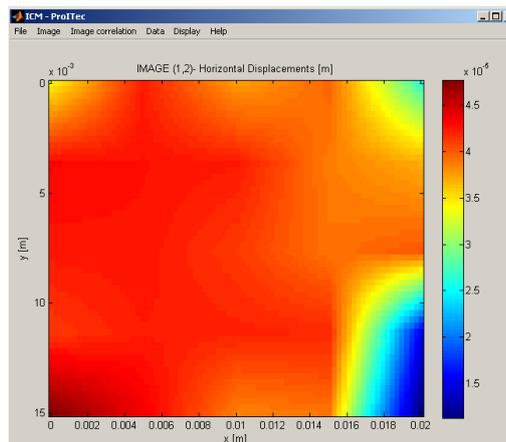


Fig. E.39 – Componente horizontal dos deslocamentos.

### E.7.5 Vertical Displacements

A componente vertical dos deslocamentos é visualizada através de *Vertical Displacements*. A escala de valores segue a mesma orientação e sentido definidos para os eixos da imagem e cujo valor está definido na escala de cores situada à direita do mapa.

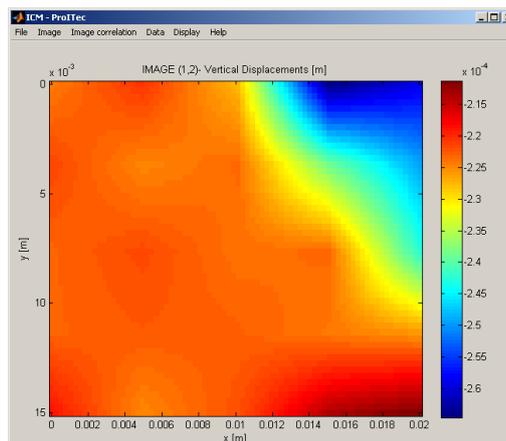


Fig. E.40 – Componente vertical dos deslocamentos.

### E.7.6 Global Displacement

A norma euclidiana das componentes do deslocamento é visualizada num mapa de cores através da função *Global Displacements*. Esta representa em valor absoluto a média do deslocamento sofrido pelos pontos correspondentes a cada padrão analisado.

### E.7.7 Epsilon x

O campo das deformações no plano é directamente obtido a partir das derivadas espaciais de primeira ordem das componentes do deslocamento nas duas direcções ortogonais da imagem. A função *Epsilon x* fornece as deformações para a direcção horizontal e que é resultado da derivada horizontal da componente horizontal do campo de deslocamento da imagem.

### E.7.8 Epsilon y

O mapa da deformação na vertical da imagem (*Epsilon y*) é, por definição, a derivada vertical da

componente na direcção vertical do deslocamento da imagem.

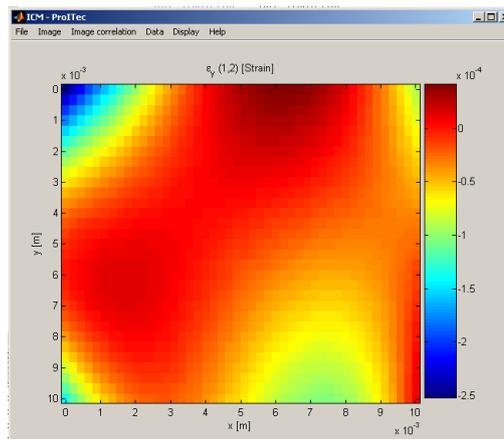


Fig. E.41 – Mapa da deformação vertical.

### E.7.9 Epsilon xy

A quantidade de distorção no plano resulta, por definição, da soma da derivada horizontal da componente vertical do deslocamento e derivada vertical da componente horizontal do deslocamento e pode ser obtida através da função *Epsilon xy*.

### E.7.10 Poisson Ratio

A estimativa da distribuição do coeficiente de Poisson (*Poisson Ratio*) é determinada através do cálculo numérico da razão entre a deformação vertical (*Epsilon y*) e a deformação horizontal (*Epsilon x*), Fig. E.42.

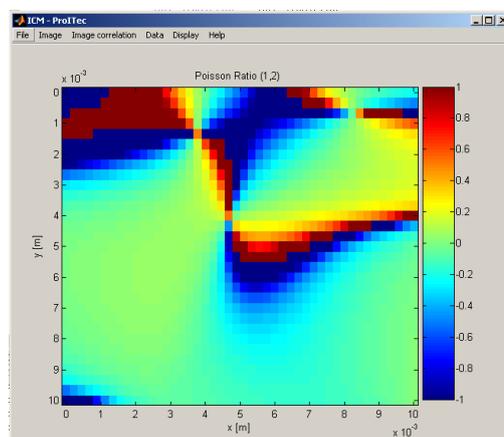


Fig. E.42 – Mapa do coeficiente de Poisson.

## E.8 Optimização do cálculo

A medição por técnicas ópticas com gravação em vídeo produz uma grande quantidade de informação. O conjunto de dados resulta de medidas pontuais agrupadas matricialmente e que são facilmente geridos no formato de imagem. Esta é posteriormente tratada através de algoritmos dedicados ao processamento de imagem. A eficácia e o tempo de computação são produto da forma como os algoritmos estão implementados e dos recursos afectos ao cálculo computacional. Normalmente, algoritmos mais eficazes exigem maior tempo de computação. Nalguns casos o tempo poderá exceder a dezena de minutos e mesmo prolongar-se no tempo com o repetir de processos (consultar anexo B e F). Assim, a optimização do cálculo é necessária e pode ser conseguida através da implementação de algoritmos mais eficientes e/ou da maximização dos recursos computacionais. Neste

último caso, a estrutura de cálculo foi desenvolvida em separado do programa principal para permitir libertar o máximo de recursos. Ao nível dos algoritmos, as ferramentas fornecidas pelo MATLAB<sup>®</sup> são generalistas e estão até certo ponto optimizadas, mas quando usadas ciclicamente tornam-se pouco eficientes. O desenvolvimento de ferramentas dedicadas a partir de algoritmos optimizados de cálculo permite melhorar a eficiência destas rotinas. A função transformada discreta de Fourier (FFTW) faz parte de um conjunto de rotinas optimizadas do MATLAB 7<sup>®</sup>. A transformada discreta de Fourier é habitualmente usada no processamento de imagem, contudo, o seu desempenho varia com a classe e dimensão da imagem. O redimensionamento acertado da imagem e a conversão dos dados para precisão simples permite reduzir o tempo de cálculo até 90%, Fig. E.43.

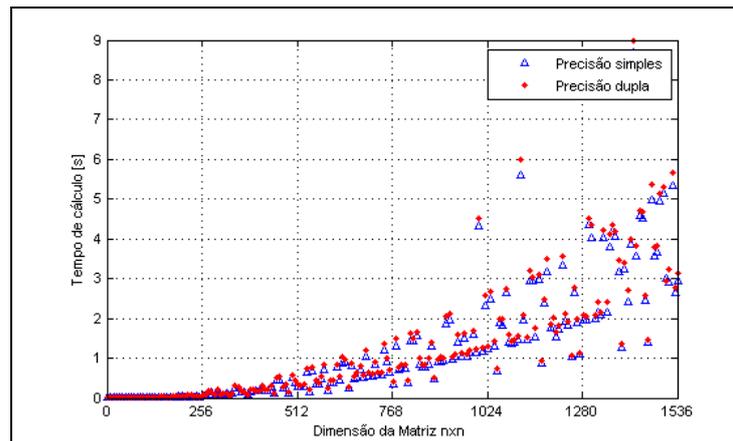


Fig. E.43 – Tempo de cálculo da transformada de Fourier de imagens com diferentes dimensões.

O processamento de imagem recorre de forma intensiva a algoritmos de convolução matricial. A ferramenta de convolução de imagem disponibilizada por este programa utiliza a formulação clássica de multiplicação matricial. Como alternativa a este método, o cálculo pode ser realizado através do produto matricial dos espectros no domínio do número de onda entre as duas matrizes. O algoritmo implementado utiliza a livreria optimizada de cálculo da transformada discreta Fourier (FFTW). Na Fig. E.44 apresenta-se o resultado do tempo de cálculo da convolução matricial pelas duas técnicas, resultado obtido a partir da média de 10 medições.

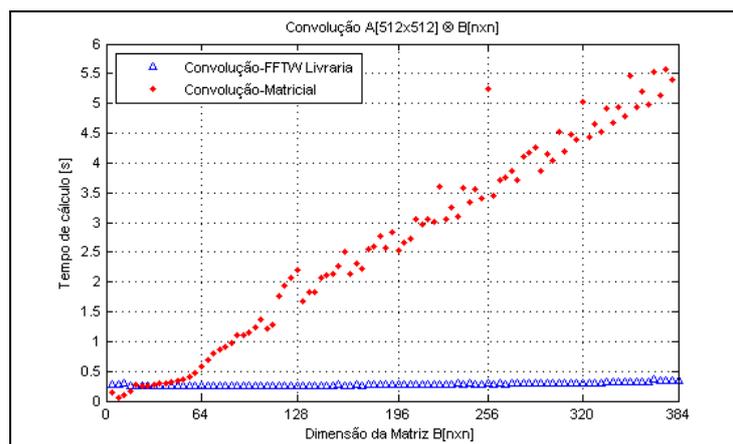


Fig. E.44 – Tempo de cálculo da convolução matricial utilizando dois métodos.

Como se pode constatar neste gráfico, o tempo de cálculo do algoritmo FFTW é quase sempre inferior relativamente ao método clássico. Neste, o tempo aumenta linearmente com a dimensão da matriz, ao contrário do algoritmo FFTW que se mantém praticamente inalterado, chegando a haver uma razão de 1 para 16 para a dimensão 384x384 da matriz.

O desempenho do sistema do processamento depende do tipo de formatação utilizada para os dados. A sua formatação em precisão simples (32 bits) permite libertar o espaço na memória e reduzir significativamente o tempo de cálculo, sem perda de qualidade nos resultados finais. O recurso à

indexação vectorial dos dados permite também utilizar algumas das rotinas já implementadas e, assim, otimizar o seu tempo de cálculo. Um outro aspecto muito importante é a representação gráfica tridimensional que normalmente sobrecarrega o sistema operativo, limitando os recursos do computador para o cálculo. A supressão de parte da informação gráfica durante a representação permite atenuar este problema sem que o utilizador tenha a percepção desta perda.

### E.9 Image Control

O módulo de controlo de imagem (*Image Control*) foi desenvolvido para adquirir, controlar e gravar imagens obtidas por um sistema formado pela câmara JAI® modelo CV-M2, placa de aquisição de imagem Matrox® modelo Helios XCL e placa de geração de sinal da National Instruments® (NI) modelo PCI-6722. O programa aqui apresentado é próprio deste sistema e independente do programa *ProITec*. O módulo de controlo de imagem desenvolvido na plataforma MATLAB® serve para capturar imagens no modo contínuo e modo de dupla exposição. Neste último caso, as duas imagens são capturadas a partir de um sinal disparo, ajustado de acordo com o fenómeno em estudo.



Fig. E.45 – Programa de controlo de imagem.

#### E.9.1 Mode

A aquisição de imagem a partir de diferentes técnicas ópticas metrológicas é conseguida por ajuste da configuração do sistema de controlo de imagem. O funcionamento da câmara mais a placa de aquisição de imagem pode ser alterado para adquirir em modo contínuo ou modo de dupla exposição. A configuração destes dois modos de funcionamento é efectuada através do programa de comunicações fornecido pelo fabricante JAI® e que pode ser acedido a partir do programa, Fig. E.46.

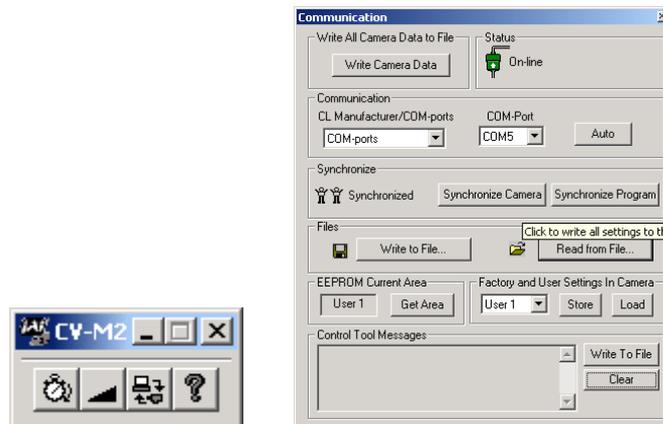


Fig. E.46 – Configuração da câmara JAI®.

O modo de aquisição da placa de imagem e da câmara estão ligados. A sua configuração é realizada através do módulo de controlo de imagem recorrendo a modelos desenvolvidos e validados no programa Matrox® Intellicam, Fig. E.47.

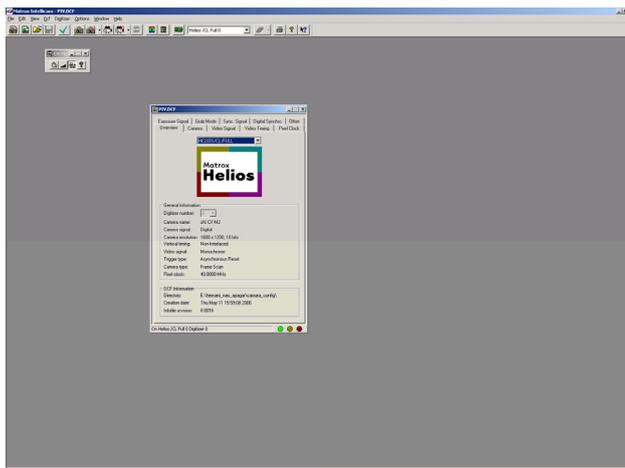


Fig. E.47 – Configuração da placa Matrox®.

### E.9.1.1 Continues

A aquisição contínua de imagem é comum à maioria das técnicas de medição. Neste modo, as capacidades da câmara são exploradas até ao limite: 17 imagens/segundo para a máxima resolução da câmara de 2 milhões de píxeis (1608x1208), Fig. E.48. O controlo sobre a medição obriga ao sincronismo entre a captação da imagem pela câmara e a respectiva aquisição pela placa. A câmara e a placa de imagem operam autonomamente, permitindo capturar e visualizar as imagens em tempo real. Esta solução liberta o processador do computador para as tarefas mais exigentes de cálculo.

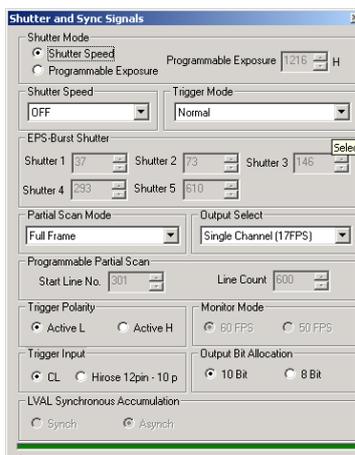


Fig. E.48 – Configuração da câmara em modo contínuo.

### E.9.1.2 Double Acquisition

O modo de funcionamento dupla aquisição (*Double Acquisition*) do sistema de controlo de imagem tem grande interesse no estudo de fenómenos rápidos. A aquisição rápida de duas imagens sincronizadas com o disparo de dois impulsos de luz LASER permite a medição de fenómenos com os movimentos harmónico ou transiente (capítulos 3 e 5). A aquisição é definida a partir de um limiar do sinal eléctrico externo (Ext. Trig1), Fig. E.49. A necessidade da aquisição e armazenamento rápido das duas imagens fixa a câmara mais placa de aquisição ao modo de funcionamento assíncrono de aquisição, Fig. E.50.

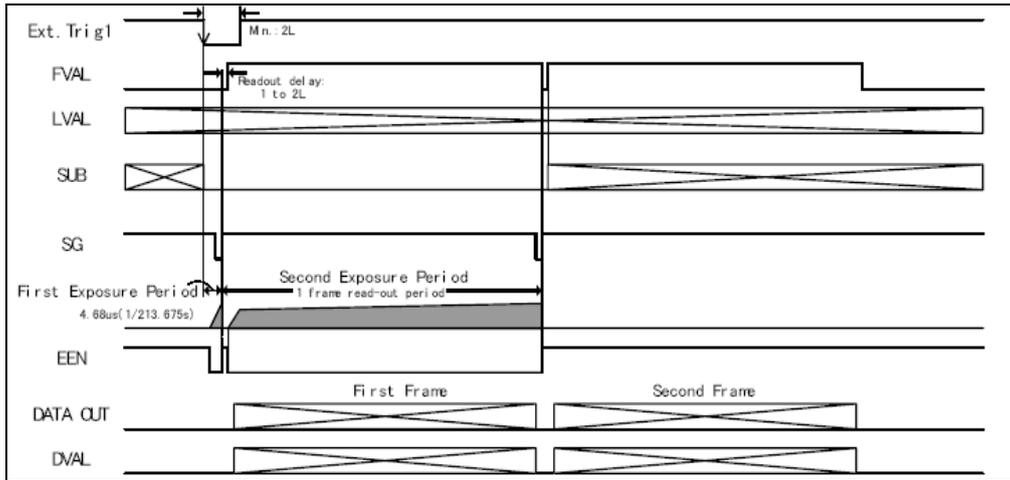


Fig. E.49 – Aquisição de imagens em modo de dupla exposição (manual da câmara).

Neste modo de funcionamento, a câmara está configurada para capturar duas imagens separadas por  $1,5 \mu\text{s}$ . O tempo de atraso entre o fenómeno e a aquisição das imagens é gerido através do modelo PIV (*Particle Image Velocimetry*), desenvolvido no programa Matrox<sup>®</sup> Intellicam, Fig. E.47. Os tempos de aquisição da câmara e placa aquisição de imagem são ajustados para garantir a captura dos dois disparos do LASER. A configuração do sinal de sincronismo e dimensão da imagem são realizadas através da janela representada na Fig. E.50.

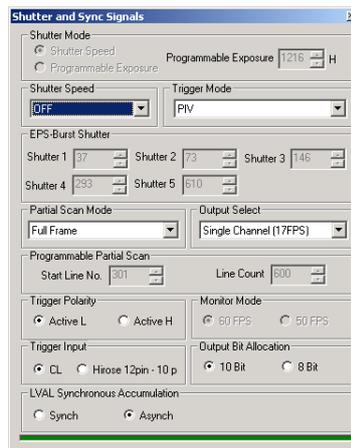


Fig. E.50 – Configuração da câmara em modo dupla exposição.

## E.9.2 Image Aquisition

O modo de captura das imagens está ajustado às técnicas apresentadas no programa *ProITec*. A saber, aquisição de imagem simples, aquisição com subtração de imagem em tempo real, aquisição de imagens de referência e de deformada, calibração e aquisição em dupla exposição.

### E.9.2.1 Single Image

A aquisição de uma imagem ou a média de uma série contínua de imagens pode ser realizada através desta função. Para o modo de aquisição em contínuo, o limite é de 17 imagens por segundo com uma resolução máxima de 1208x1608 píxeis, Fig. E.48.

### E.9.2.2 Image Subtract

A ferramenta subtração contínua de imagens serve para analisar em tempo real a evolução das franjas de interferência de fase entre as imagens adquiridas e a imagem de referência previamente

gravada. A sua visualização facilita a percepção do comportamento do fenómeno.

### E.9.2.3 Reference

O interesse da captura da imagem de referência (*Reference*) deve-se à necessidade de medir, entre dois estados, o efeito produzido de solicitação exteriores. No sentido de analisar esse comportamento pela técnica TPM, desenvolveu-se um módulo para adquirir a média de uma sucessão contínua de imagens separadas por diferentes saltos de fase. Neste processo, a aquisição é sincronizada com o salto de fase produzido pelo deslocamento do espelho e comandado pelo sinal eléctrico gerado na placa NI.

### E.9.2.4 Deformation

Tal como nas imagens de referência, as imagens da deformada são obtidas numa sequência contínua entre saltos de fase, em que o valor do salto é comandado pela amplitude da tensão definida durante o processo de calibração (anexo C).

### E.9.2.5 Calibration

O sistema controlo de imagem permite gerar um sinal eléctrico via placa NI. A amplitude, a forma e a frequência deste sinal podem ser ajustados em função das necessidades da aplicação. No caso particular da calibração da fase (*Calibration*), uma tensão pulsada é sincronizada com aquisição contínua de imagem para obter o efeito visual de salto das franjas. A amplitude do sinal é ajustada de forma a se verificar um salto de uma franja, correspondendo a uma variação na fase de  $\pi$  (anexo C), Fig. E.51.

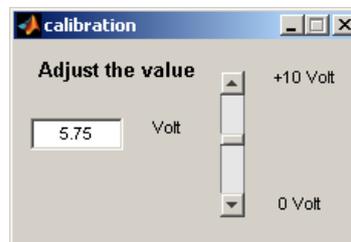


Fig. E.51 – Ferramenta para calibração da fase.

### E.9.2.6 Double Pulse

A captura de duas imagens em modo rápida, a partir de um sinal externo, é efectuada através desta opção. A função é activada mediante a selecção do modo de dupla exposição e configuração da câmara mais placa de imagem. O processo de aquisição é rápido e exige um perfeito sincronismo entre os elementos do sistema de imagem, o LASER e o fenómeno físico. O sincronismo entre os vários elementos é acertado mediante a medição dos tempos num osciloscópio. As medições realizadas demonstraram ser muito precisas e permitiram fazer ajustes com um grau de precisão de  $1\mu s$ .



# Anexo F

## Resposta Modal da Placa Laminada Compósita

### F.1 Mapas de fase correspondentes aos campos de deslocamentos das formas modais

Os mapas de fase correspondentes aos campos de deslocamentos dos modos naturais de vibração, para a placa original e placas após os impactos 1 e 1+2, estão representados nas figuras seguintes.

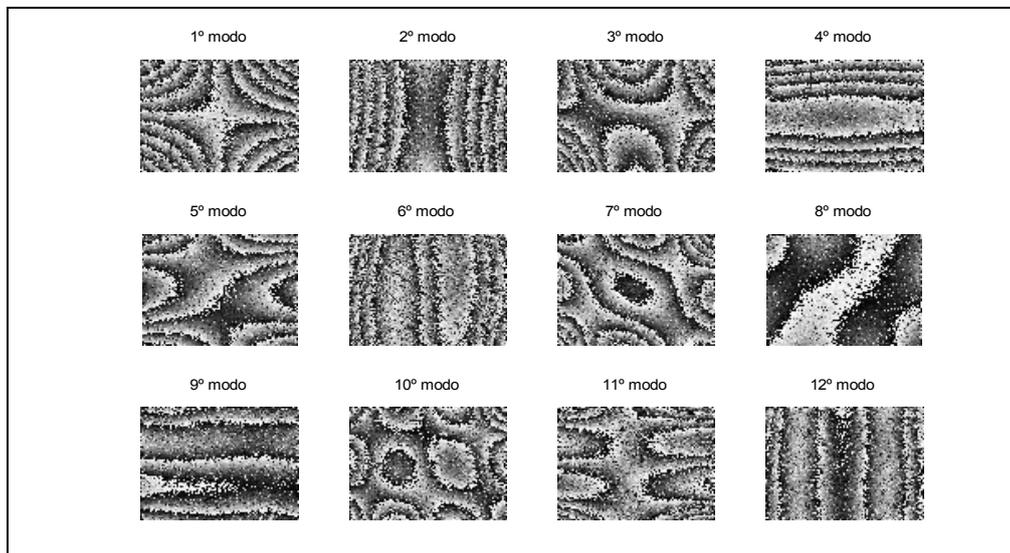


Fig. F.1 – Representação dos mapas de fase correspondentes aos campos de deslocamentos dos modos naturais da placa original.

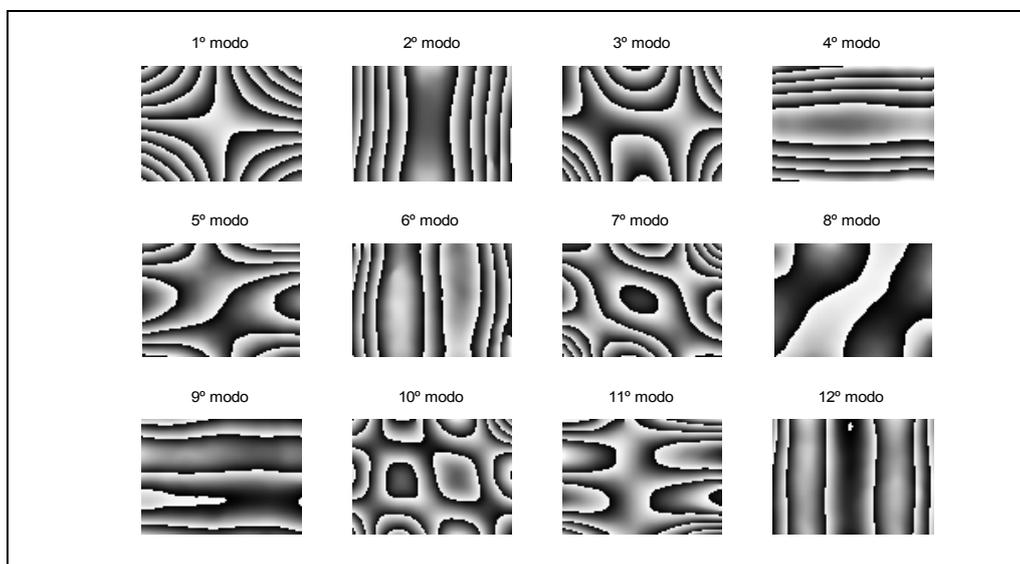


Fig. F.2 – Representação dos mapas de fase correspondentes aos campos de deslocamentos para os modos naturais da placa original e depois da aplicação dos filtros de fase.

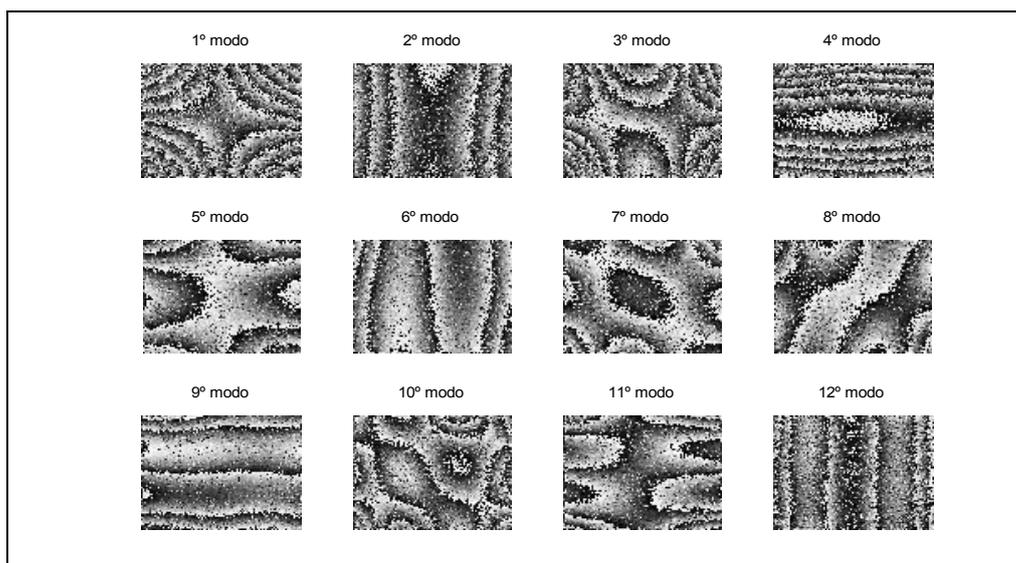


Fig. F.3 – Representação dos mapas de fase correspondentes aos campos de deslocamentos para os modos naturais da placa após o impacto 1.

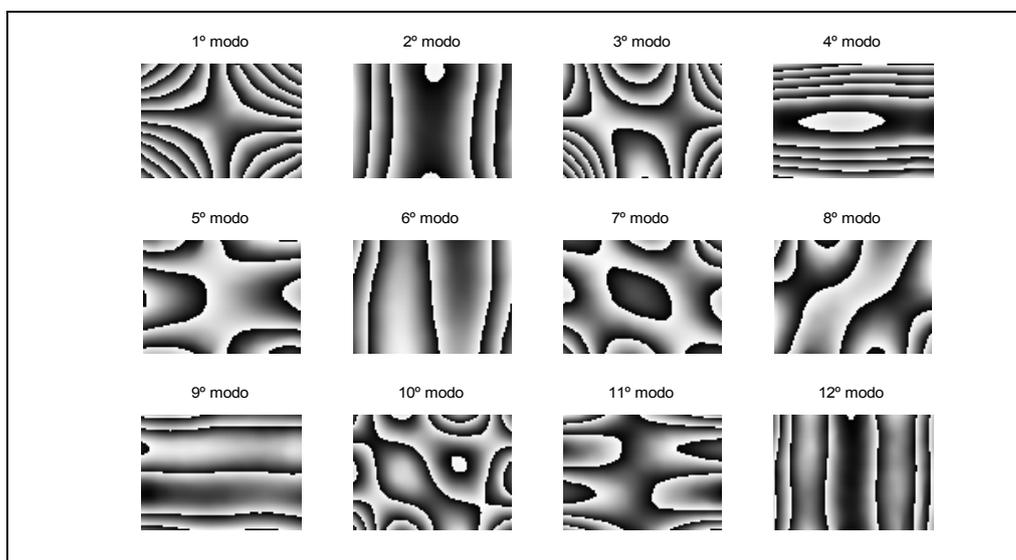


Fig. F.4 – Representação dos mapas de fase correspondentes aos campos de deslocamentos dos modos naturais da placa após o impacto 1, depois da aplicação dos filtros de fase.

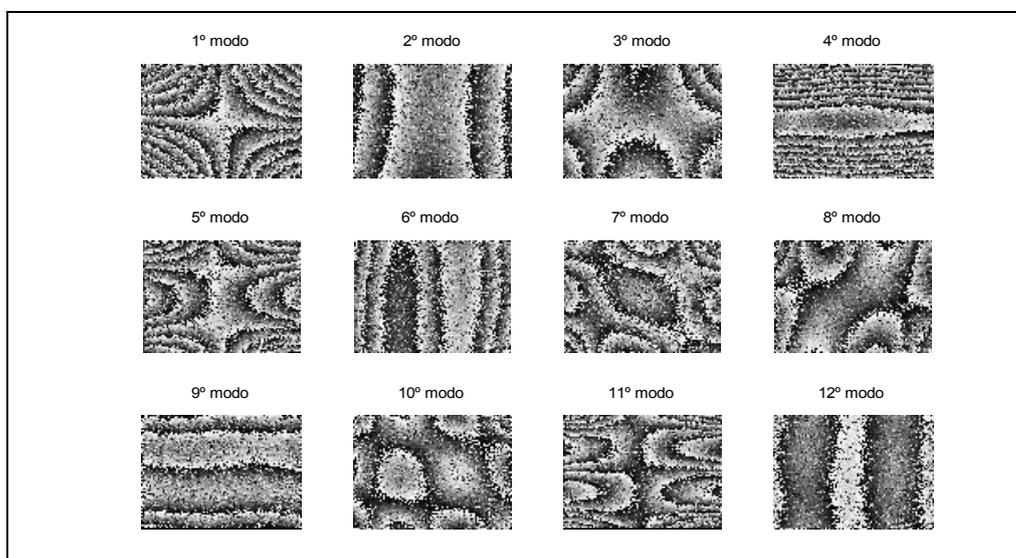


Fig. F.5 – Representação dos mapas de fase correspondentes ao campo de deslocamentos dos modos naturais da placa após os impactos 1+2.

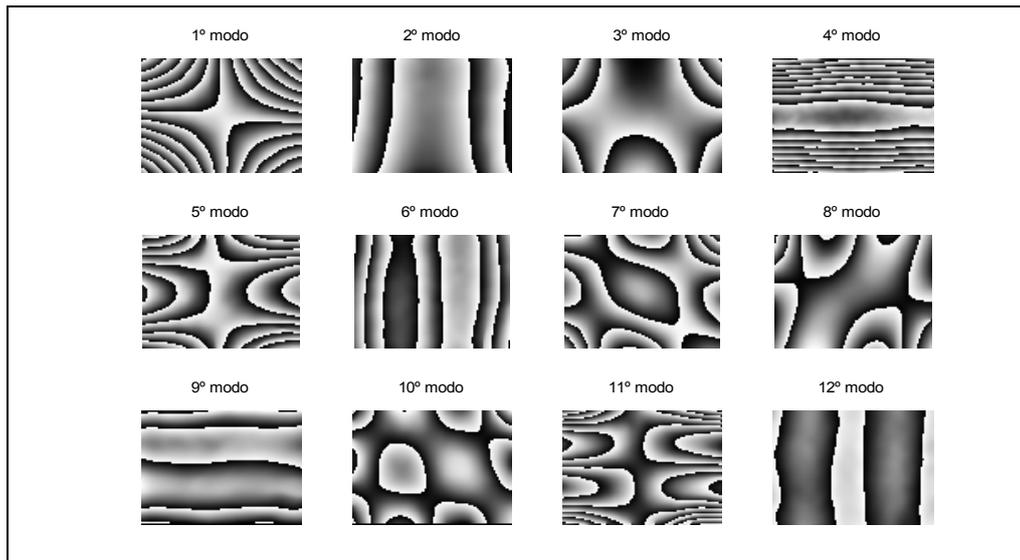


Fig. F.6 – Representação dos mapas de fase correspondentes aos campos de deslocamentos dos modos naturais da placa após os impactos 1+2, depois da aplicação dos filtros de fase.

**F.2 Campos de rotações e de curvaturas obtidas por diferenciação espacial dos campos de deslocamentos das formas modais**

Os campos de rotações e de curvaturas são determinados por aplicação da metodologia de diferenciação numérica ao campo de deslocamentos modal experimental, respectivamente, um e duas vezes. Para as três condições da placa são apresentadas nas figuras seguintes, o campo de rotações em  $x$  e  $y$  e os campos de curvaturas em  $x$ ,  $y$  e  $xy$ .

Rotação em  $x$

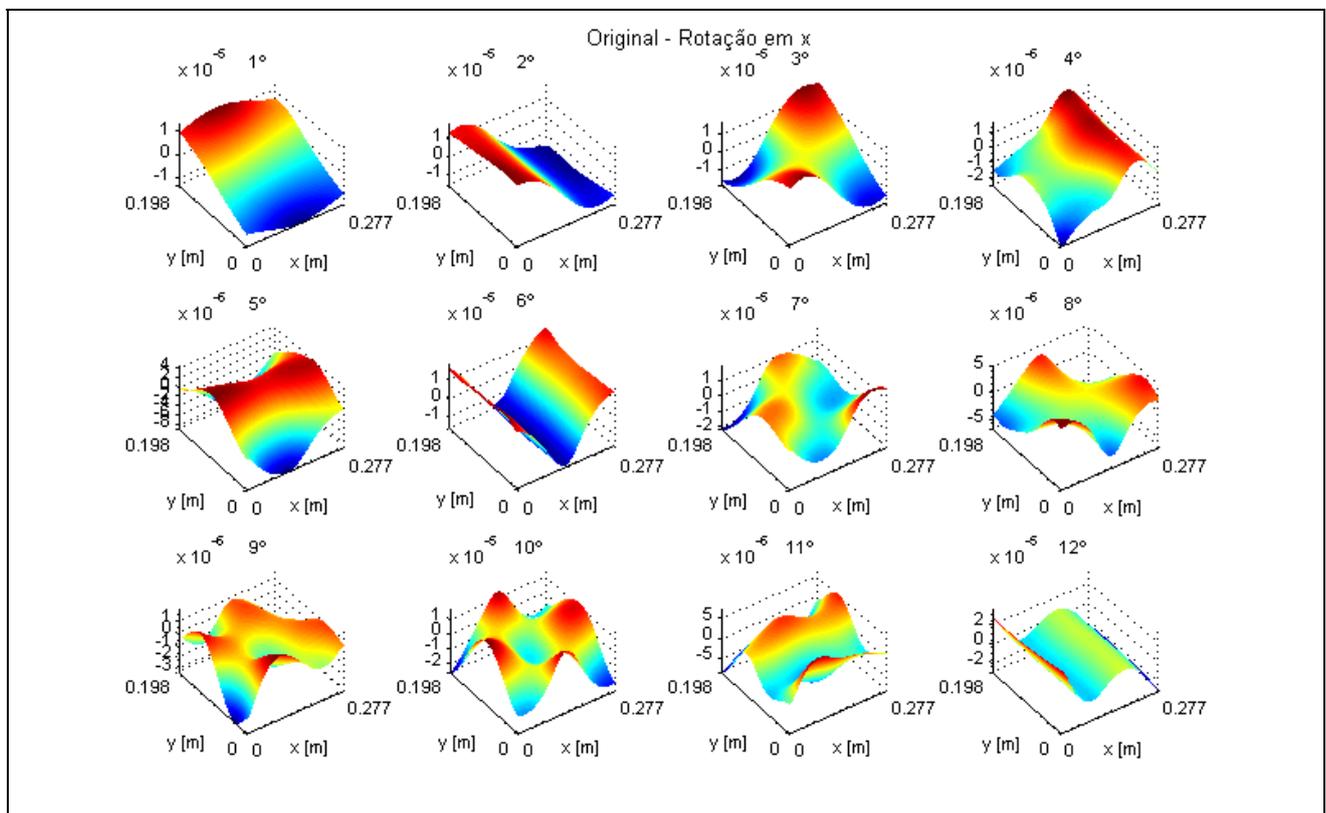


Fig. F.7 – Representação dos campos de rotações em  $x$ , correspondentes aos modos naturais da placa original.

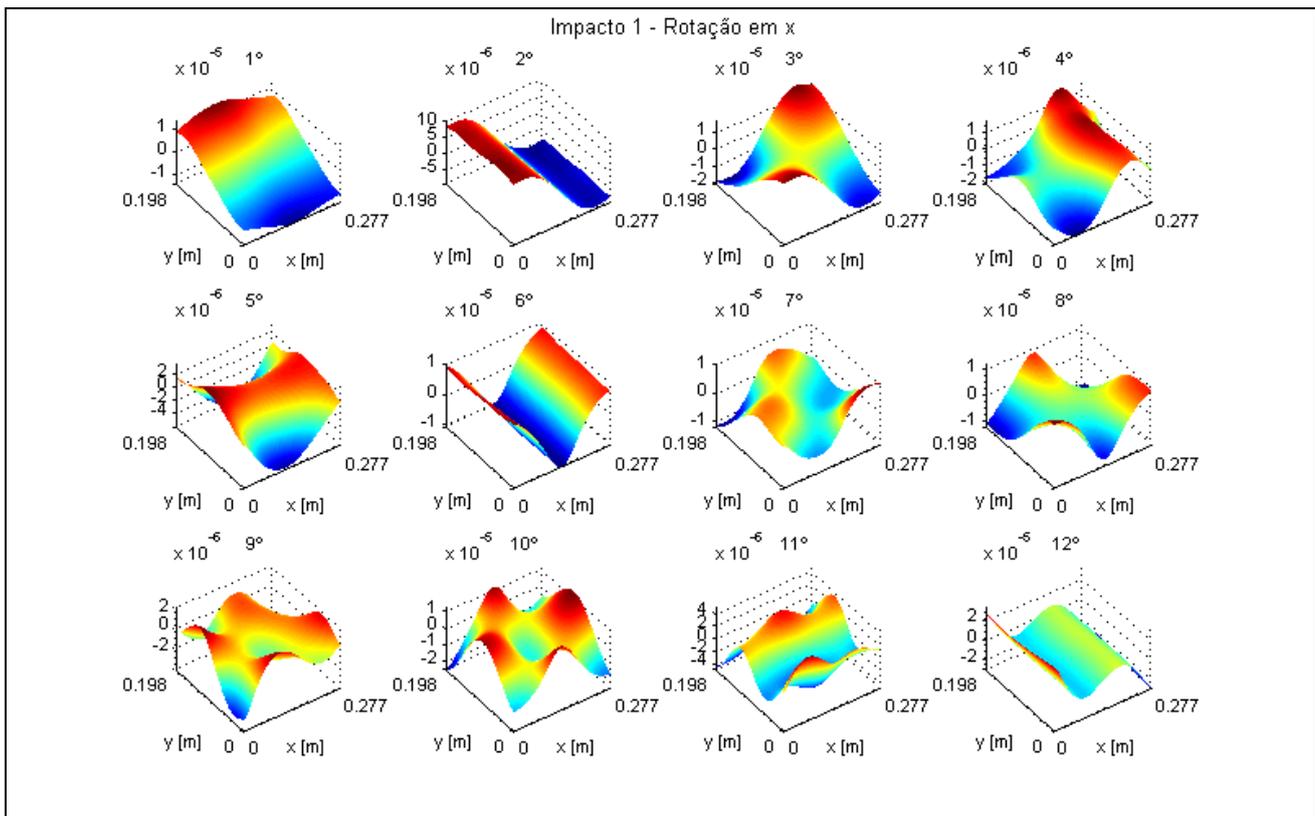


Fig. F.8 – Representação dos campos de rotações em x, correspondentes aos modos naturais da placa após o impacto 1.

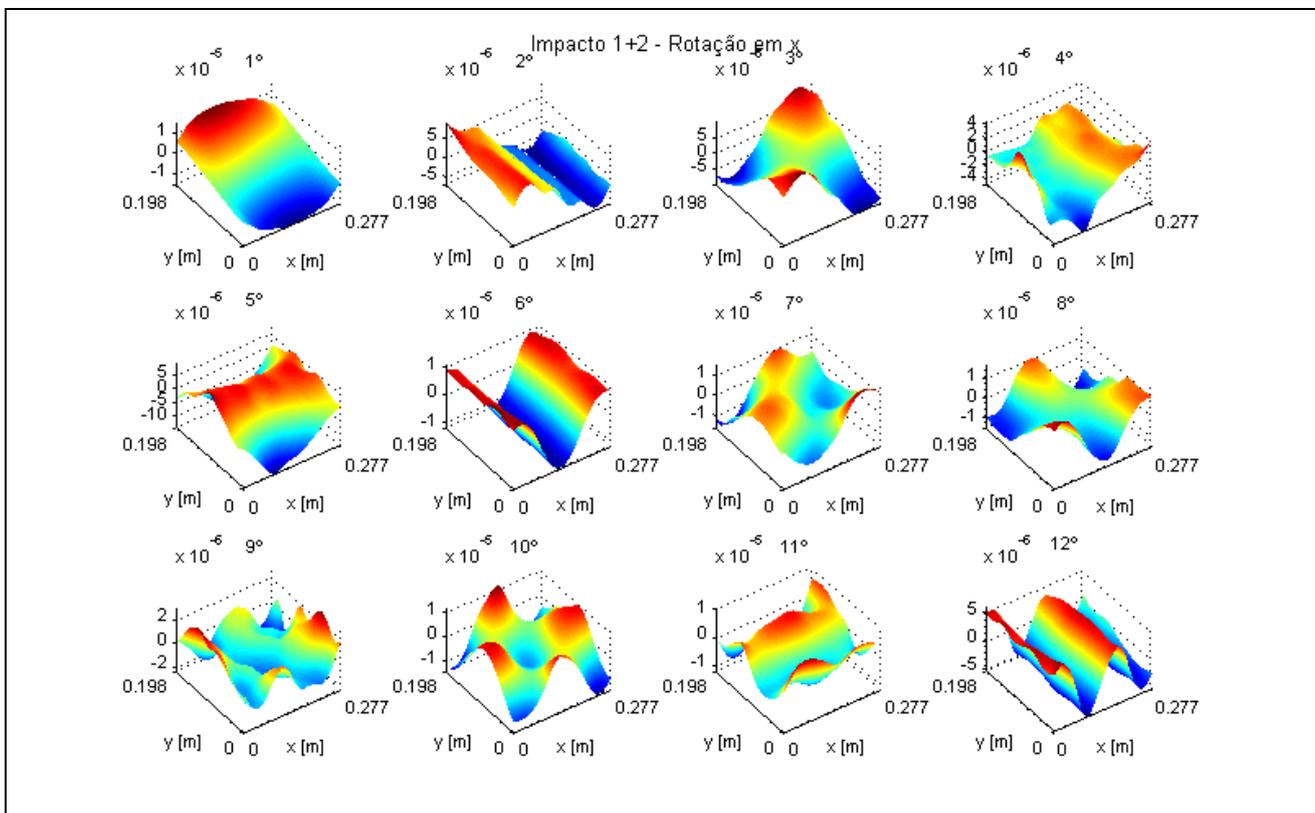


Fig. F.9 – Representação dos campos de rotações em x, correspondentes aos modos naturais da placa após os impactos 1+2.

Rotação em y

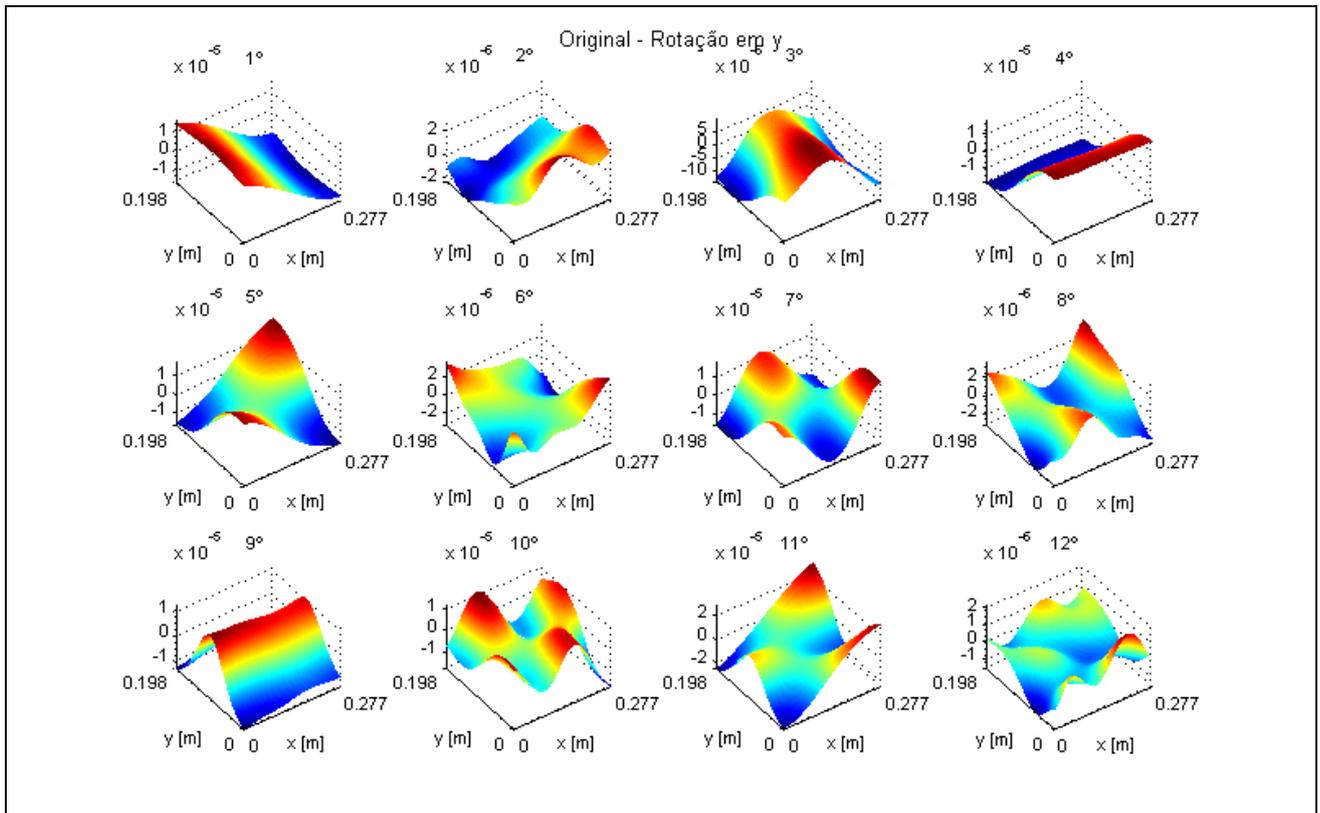


Fig. F.10 – Representação dos campos de rotações em y, correspondentes aos modos naturais da placa original.

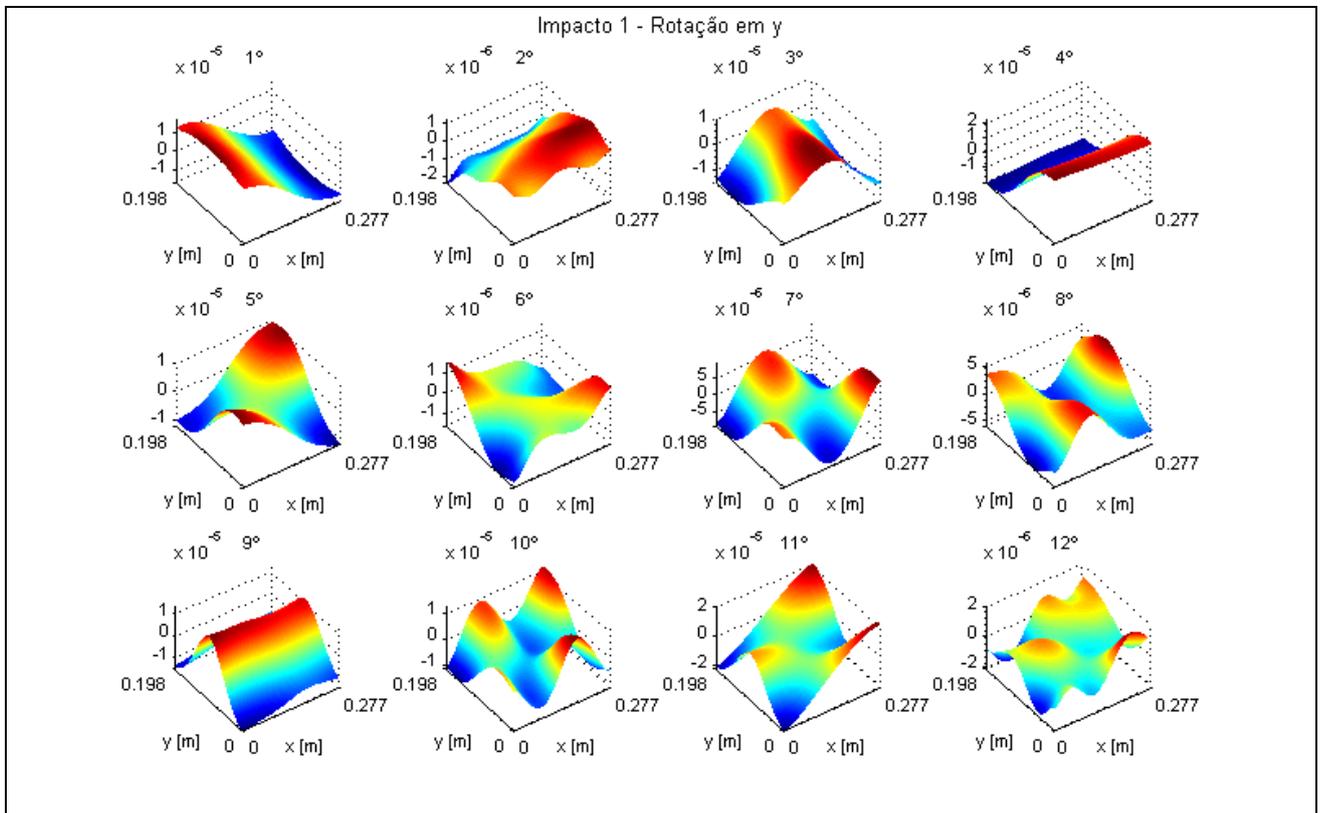
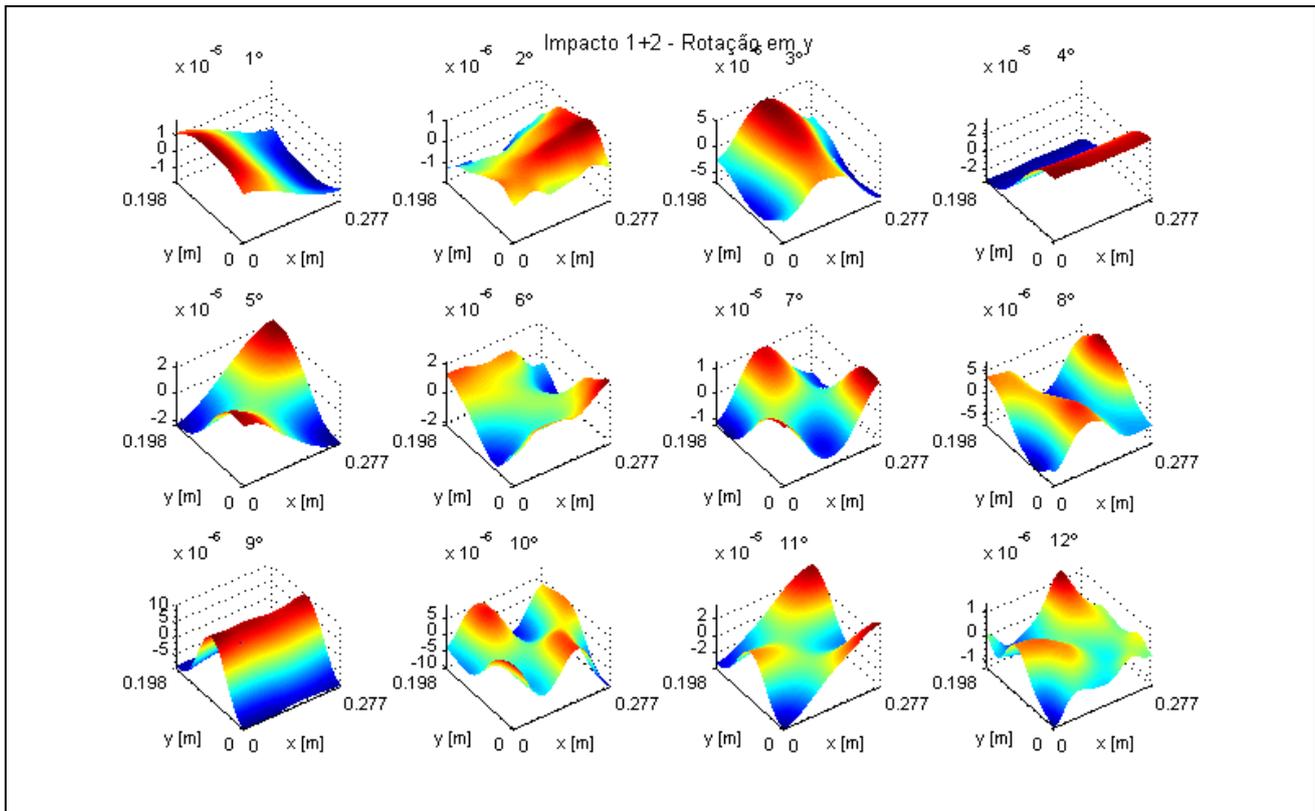
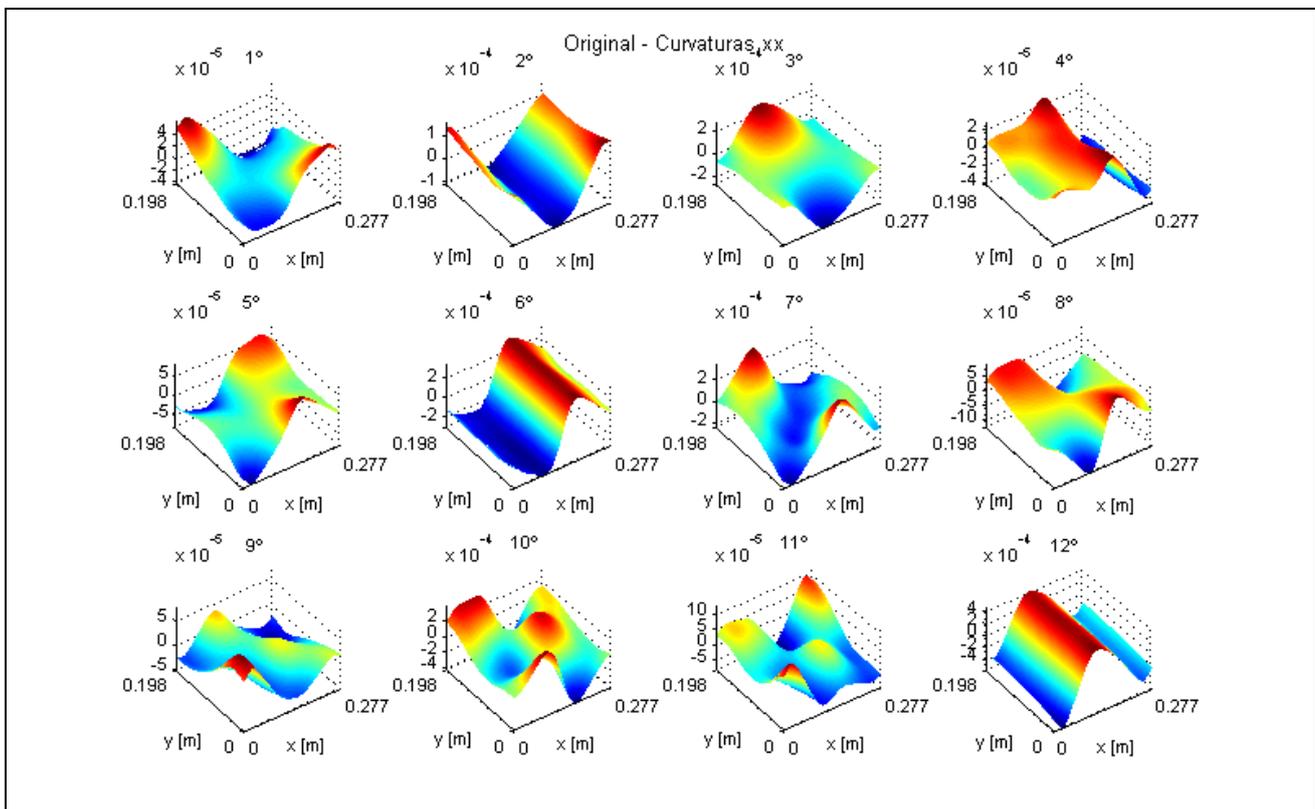


Fig. F.11 – Representação dos campos de rotações em y, correspondentes aos modos naturais da placa após o impacto 1.



### Curvatura $xx$



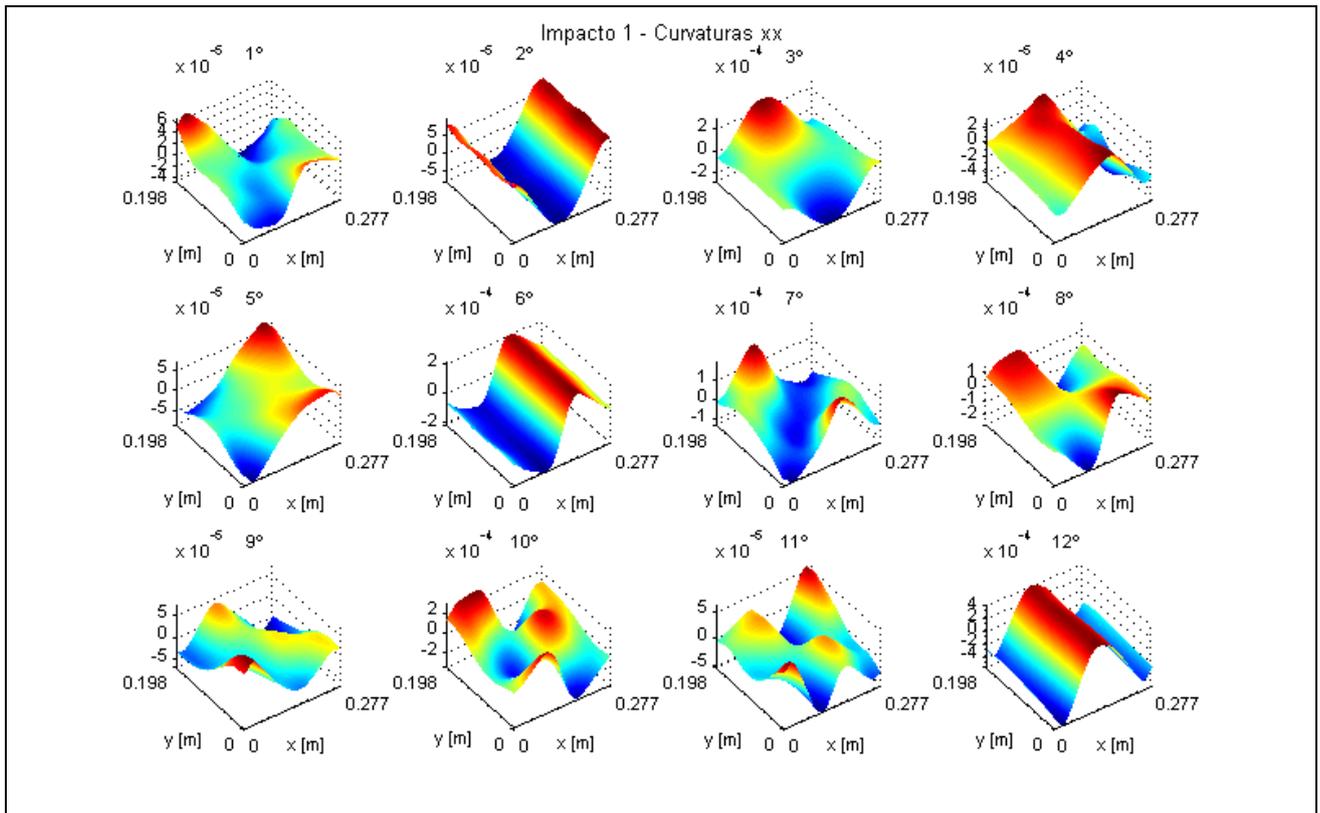


Fig. F.14 – Representação dos campos de curvaturas em xx, correspondentes aos modos naturais da placa após o impacto 1.

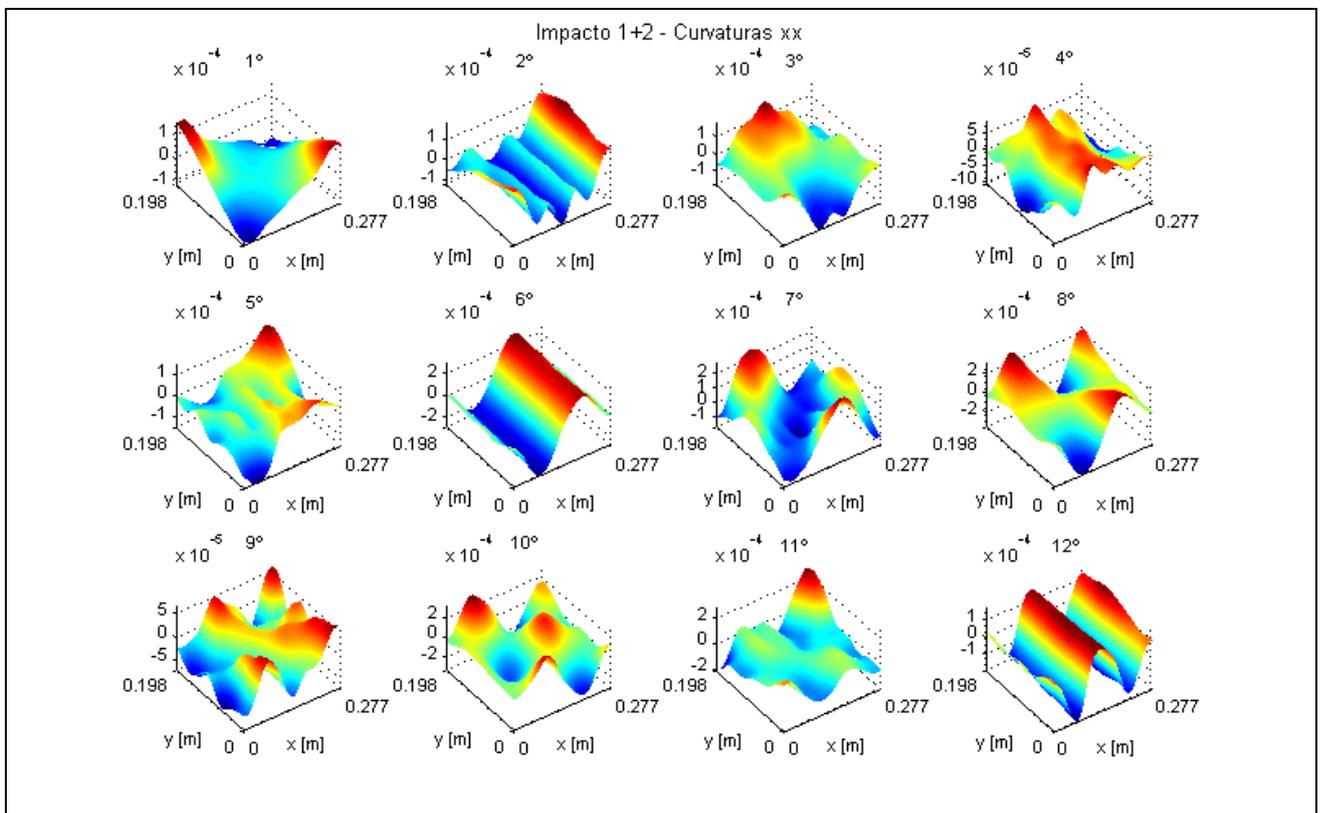


Fig. F.15 – Representação dos campos de curvaturas em xx, correspondentes aos modos naturais da placa após os impactos 1+2.

## Curvatura yy

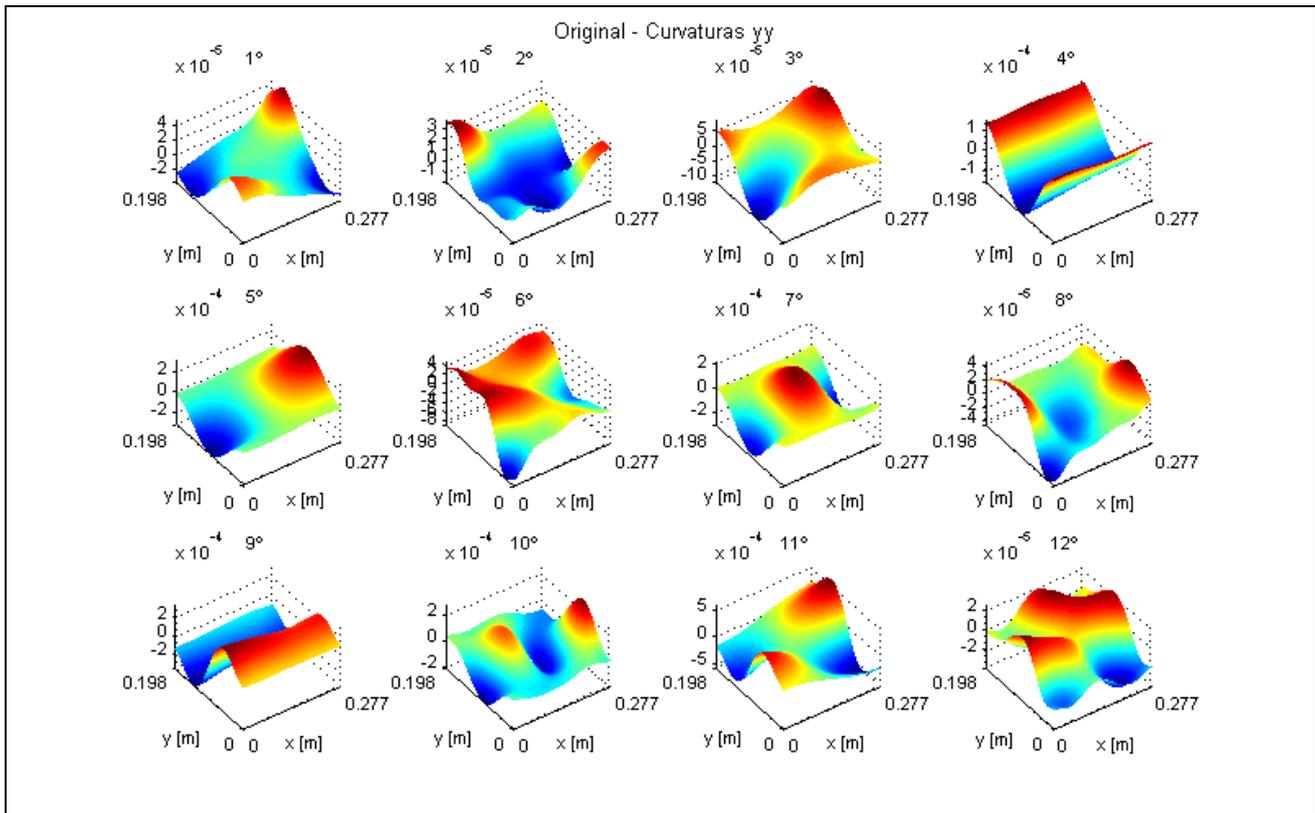


Fig. F.16 – Representação dos campos de curvaturas em yy, correspondentes aos modos naturais da placa original.

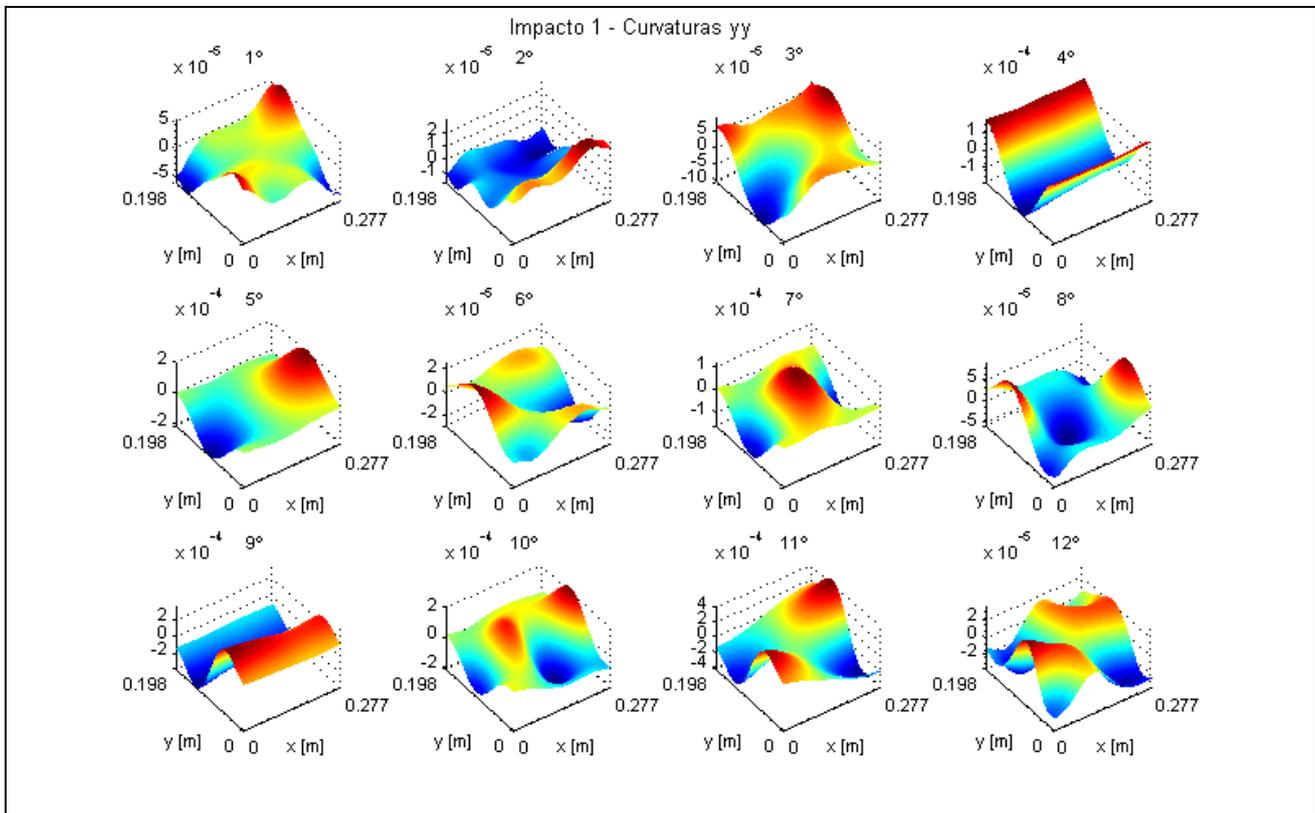


Fig. F.17 – Representação dos campos de curvaturas em yy, correspondentes aos modos naturais da placa após o impacto 1.

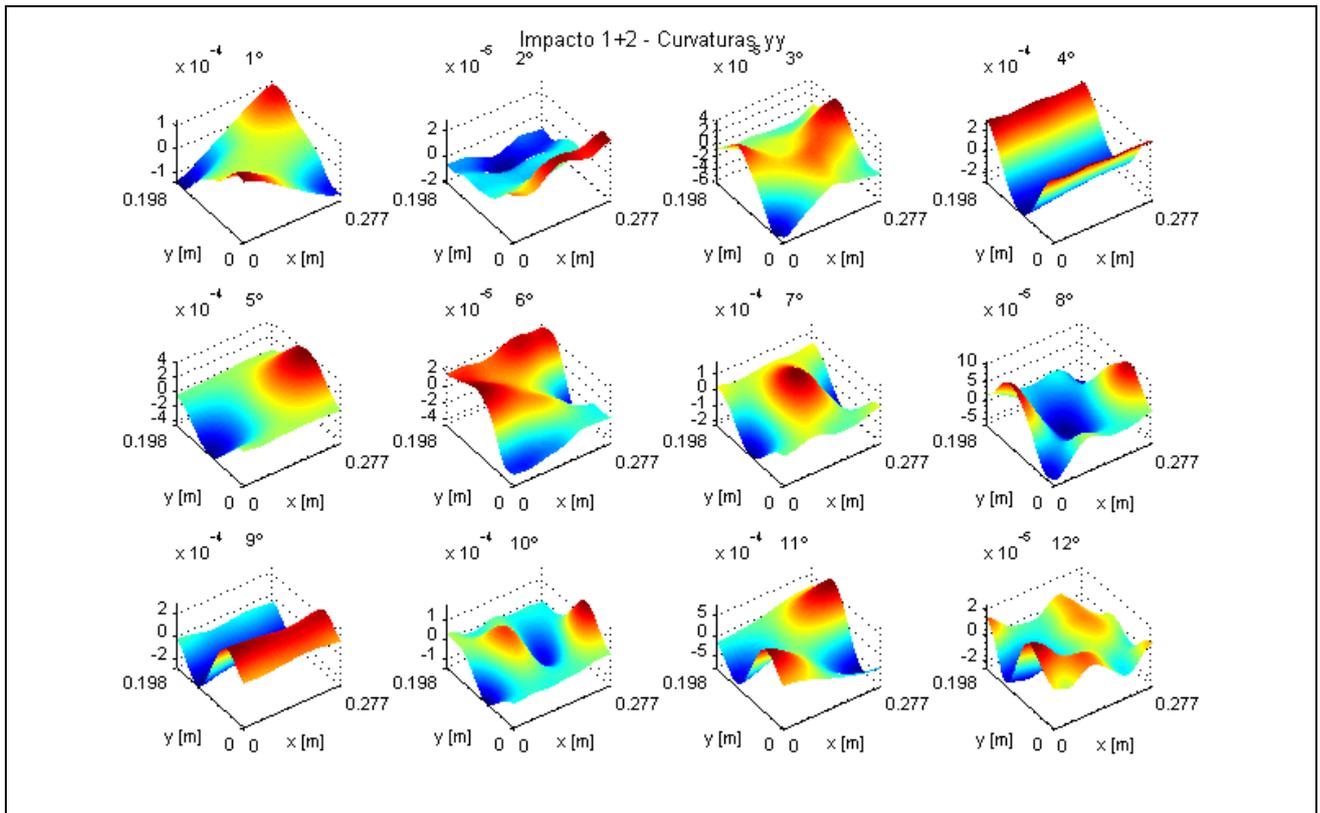


Fig. F.18 – Representação dos campos de curvaturas em xx, correspondentes aos modos naturais da placa após os impactos 1+2.

Curvatura xy

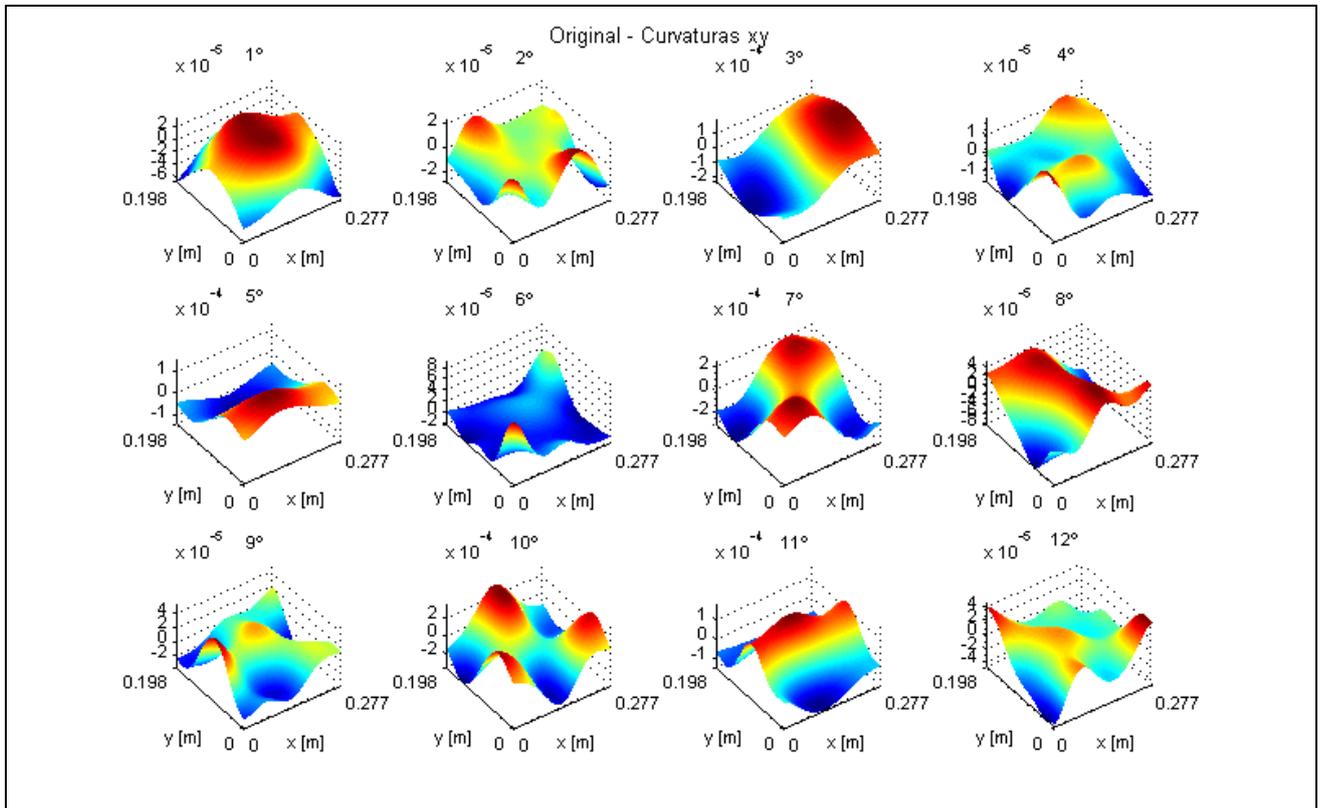


Fig. F.19 – Representação dos campos de curvaturas em xy, correspondentes aos modos naturais da placa original.

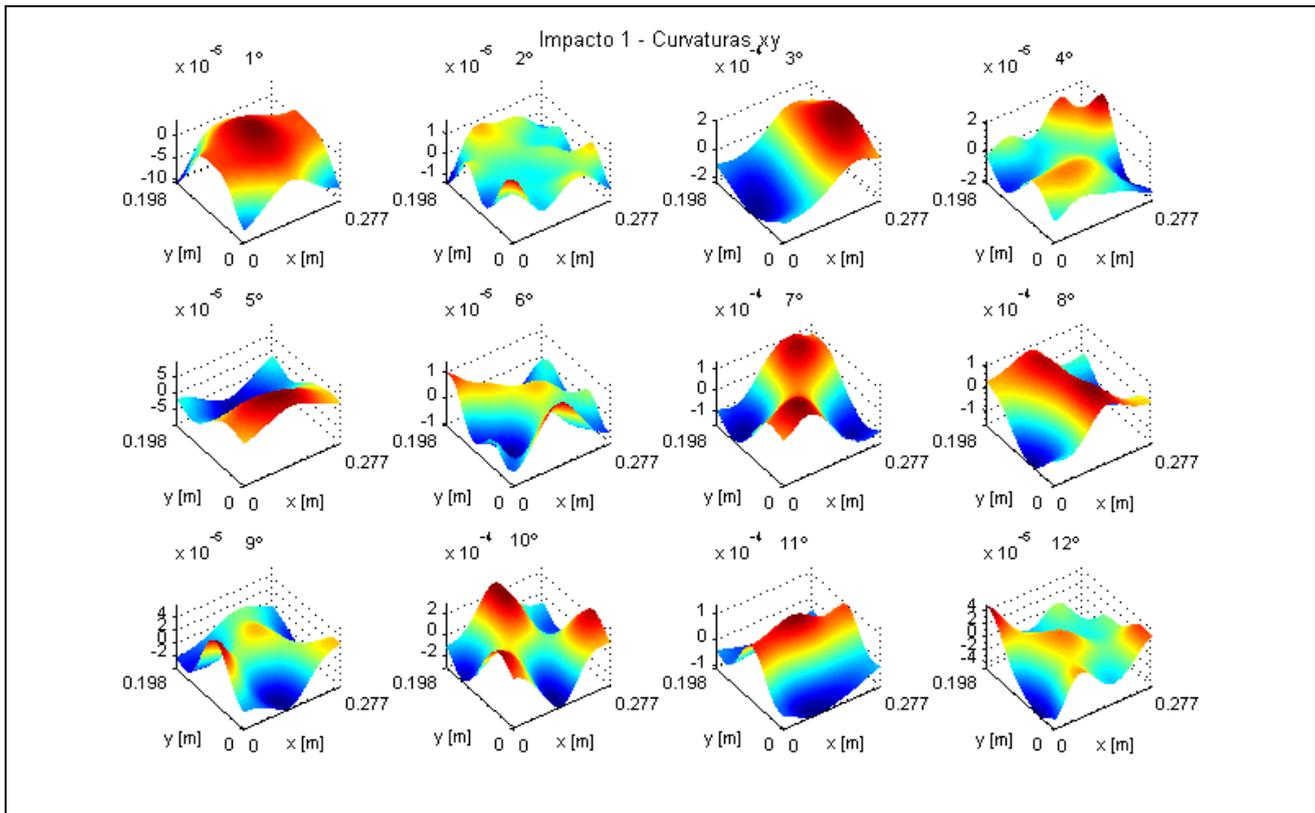


Fig. F.20 – Representação dos campos de curvaturas em xy, correspondentes aos modos naturais da placa após o impacto 1.

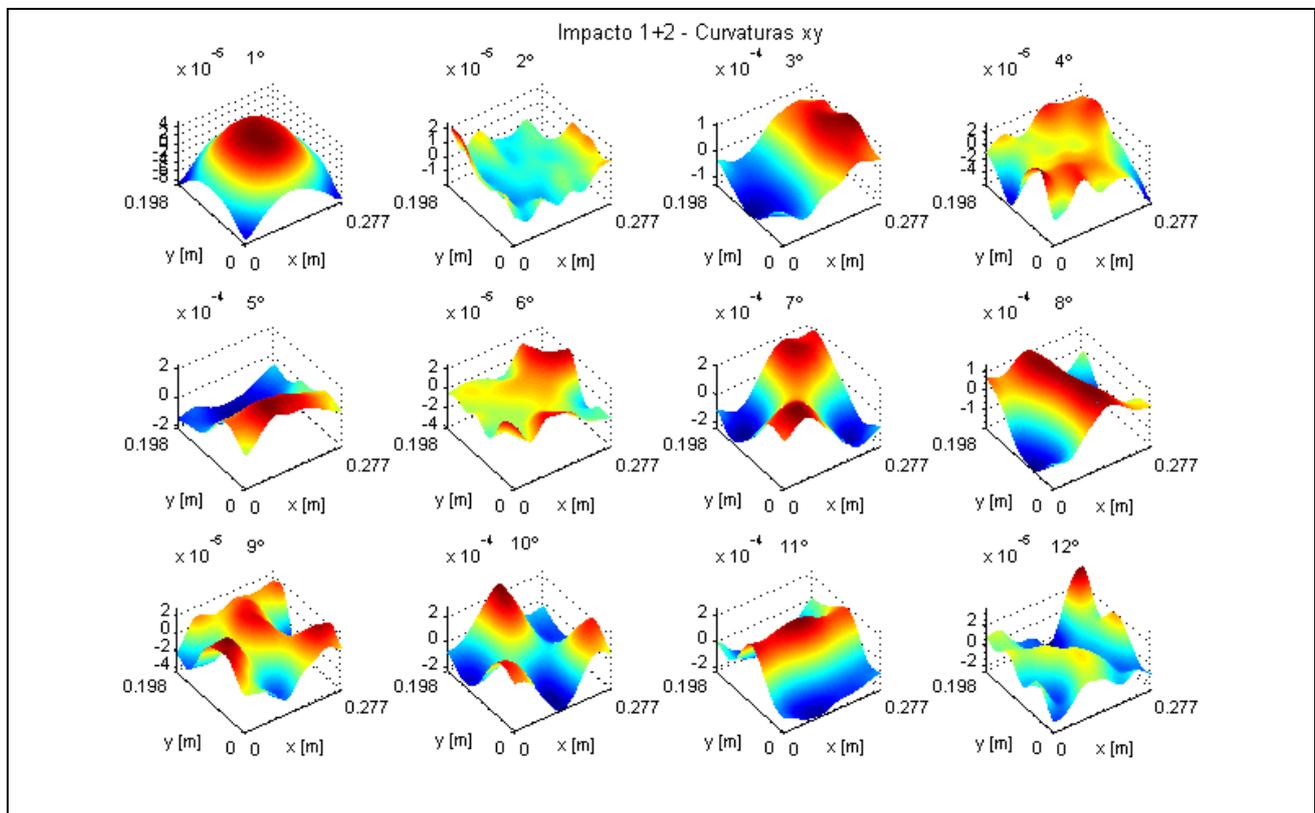


Fig. F.21 – Representação dos campos de curvaturas em xy, correspondentes aos modos naturais da placa após os impactos 1+2.

### F.3 Os ISD dos campos das curvaturas

Os ISD dos campos das curvaturas em  $x$  e  $y$ , determinados entre a resposta da placa original e as placas após os impactos 1 e 1+2, podem ser observados nas figuras seguintes.

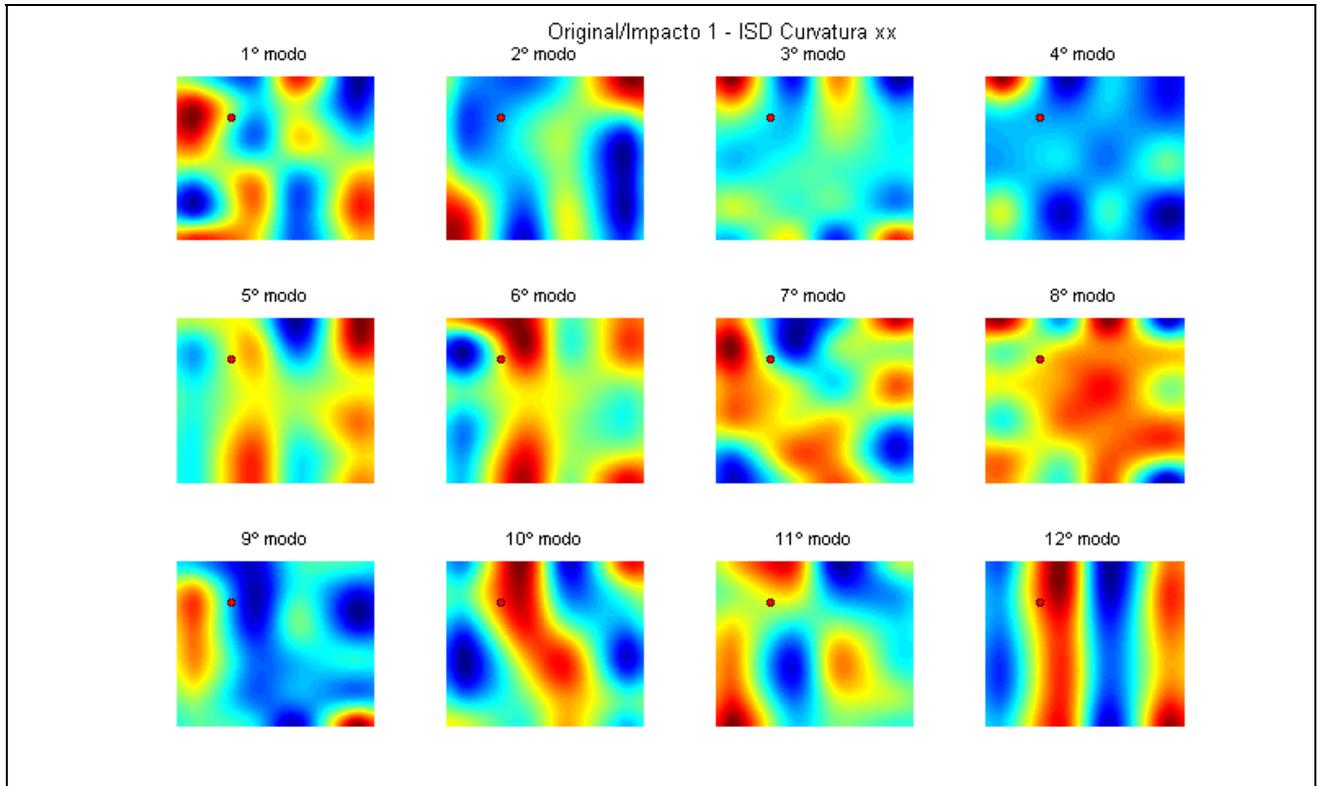


Fig. F.22 – Representação dos campos ISD das curvaturas  $xx$ , obtidos entre a resposta modal da placa original e a resposta modal da placa após o impacto 1.

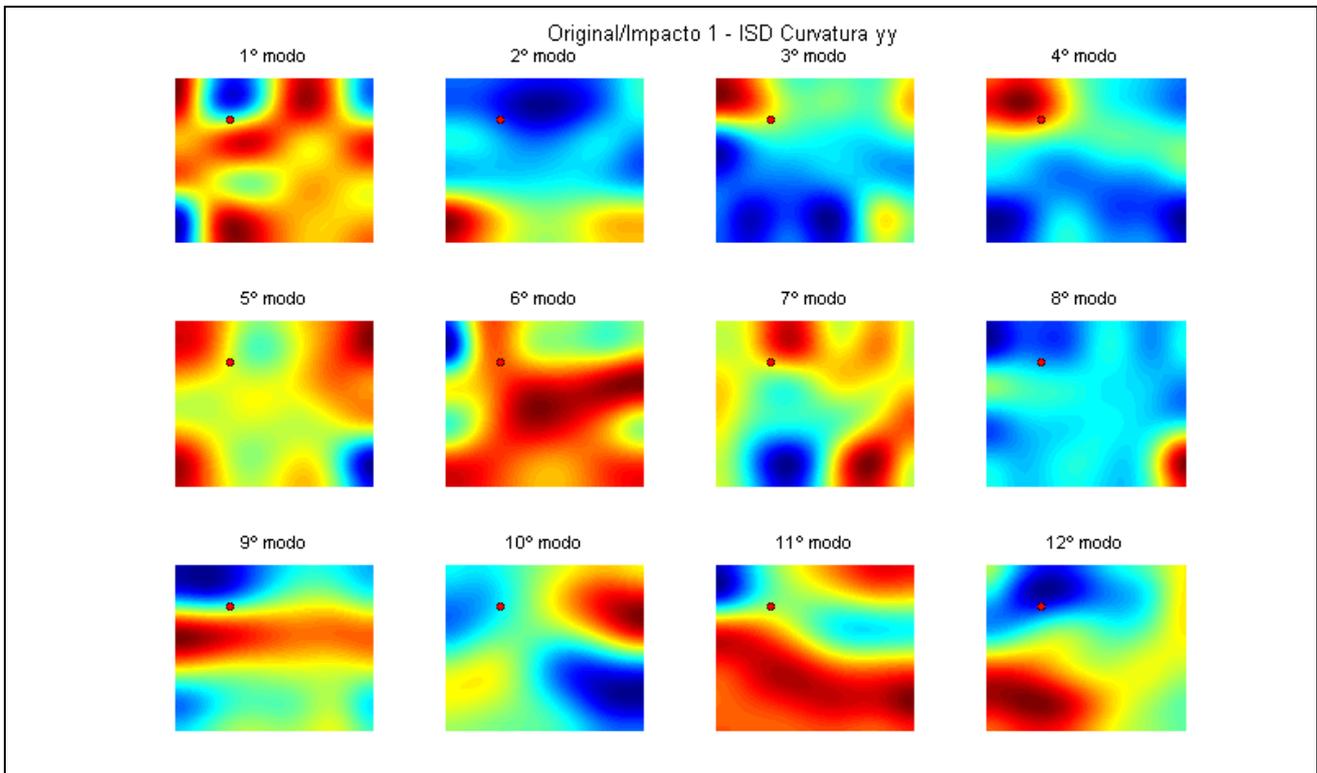


Fig. F.23 – Representação dos campos ISD das curvaturas  $yy$ , obtidos entre a resposta modal da placa original e a resposta modal da placa após o impacto 1.

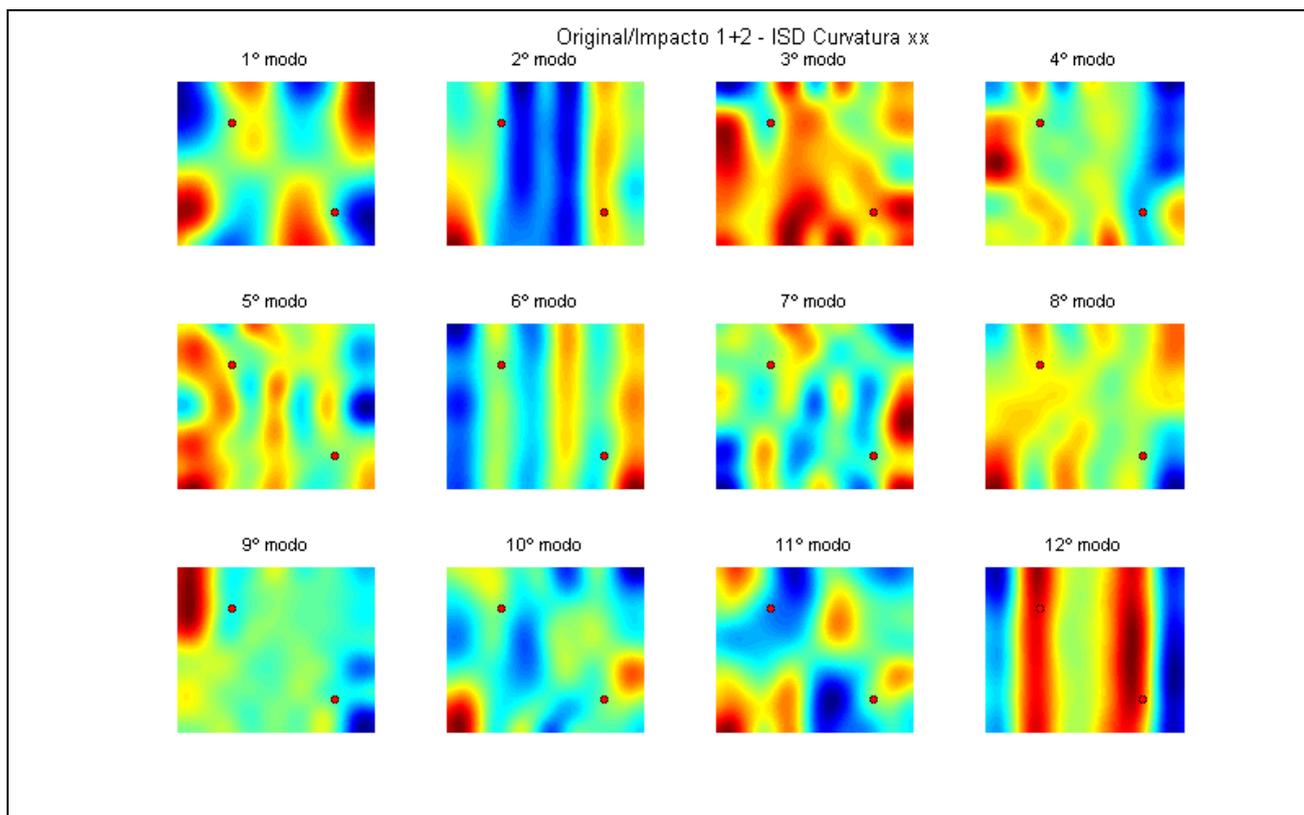


Fig. F.24 – Representação dos campos ISD das curvaturas xx, obtidos entre a resposta modal da placa original e a resposta modal da placa após os impactos 1+2.

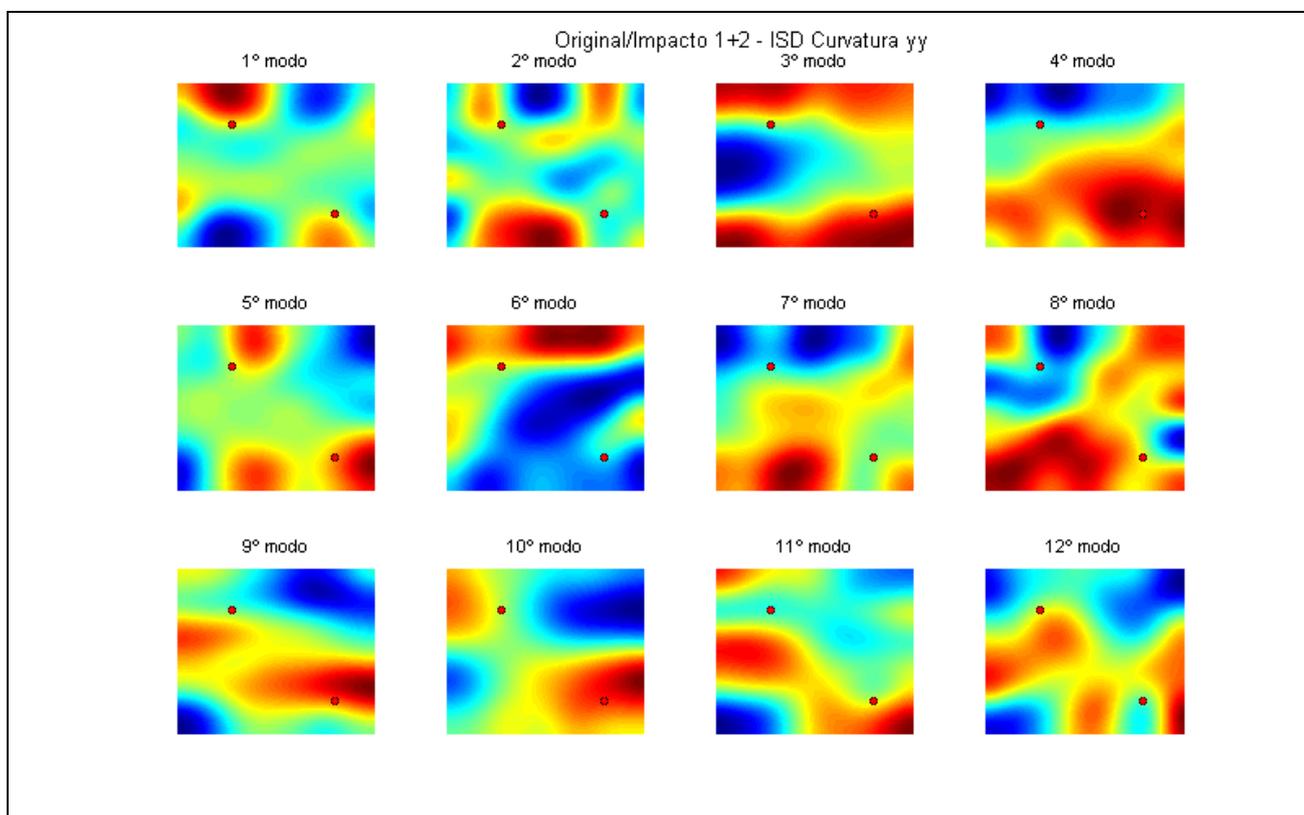


Fig. F.25 – Representação dos campos ISD das curvaturas yy, obtidos entre a resposta modal da placa original e a resposta modal da placa após os impactos 1+2.

**F.4 Mapas de fase correspondentes aos campos de rotações em x das formas modais**

Os mapas de fase correspondentes aos campos de rotações dos modos naturais de vibração para a placa após os impactos 1 e 1+2, que foram medidos com o sistema *Shear Pulsado*, estão representados na Fig. F.26 e Fig. F.27.

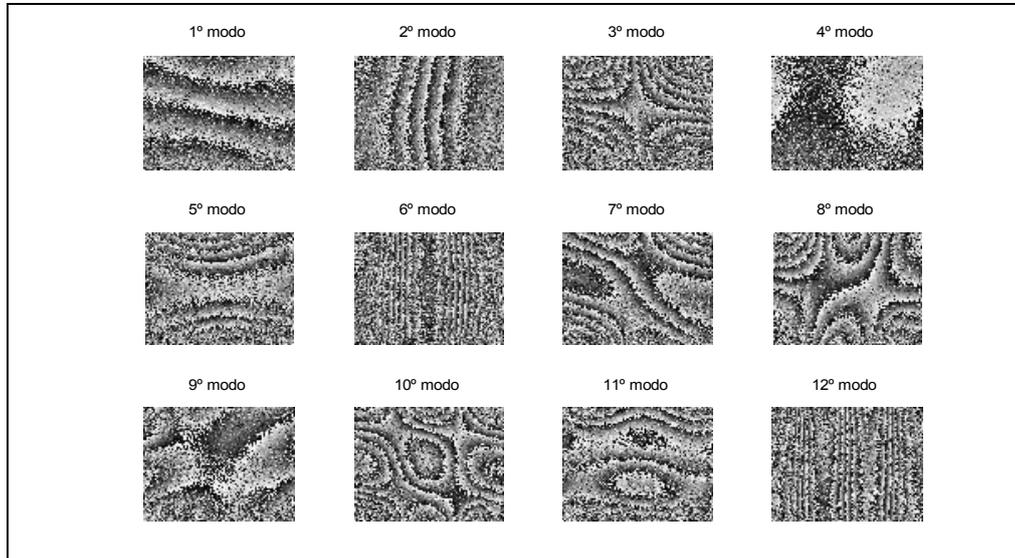


Fig. F.26 – Representação dos mapas de fase, correspondentes aos campos de rotações dos modos naturais da placa após os impactos 1+2.

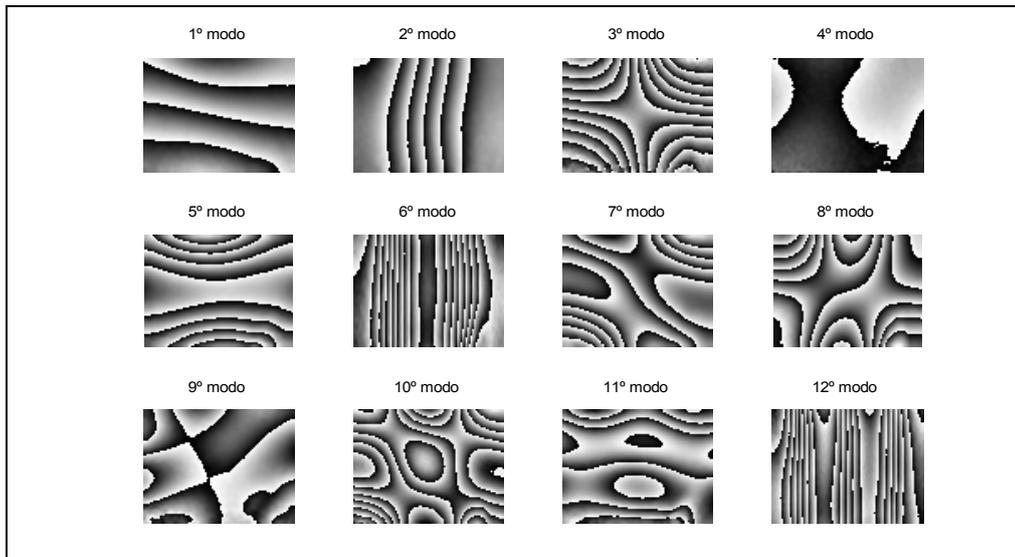


Fig. F.27 – Representação dos mapas de fase, correspondentes aos campos de rotações dos modos naturais da placa após os impactos 1+2 e depois da aplicação dos filtros de fase.