

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
"Prof. Jorge Sabato"

Caracterización de materiales mediante el método de Shearografía Digital ^(*)

por Ing. Maximiliano A. Escoda Avila

Directores

Dra. María Fernanda Ruiz Gale
Mg. Christian Rodrigo Romero R.

^(*) Tesís para optar título de *Magíster en Ciencia y Tecnología de Materiales*

República Argentina

2023

Caracterización de materiales mediante el método de Shearografía Digital

Ing. Maximiliano A. Escoda Avila

Directora: Dra. **María Fernanda Ruiz Gale**

Co-director: Mg. **Christian Rodrigo Romero R.**

Presentado a el Instituto de Tecnología "*Prof. Jorge Sabato*" como
requisito para la obtención del título de
MAGÍSTER EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES

San Martín - Bs. As. - Argentina

AÑO 2023

Caracterización de materiales mediante el método de Shearografía Digital

Ing. Maximiliano A. Escoda Avila

Aprobado en fecha 10 de agosto de 2023

Tribunal evaluador:

- Dr. Morel, Eneas.
- Dr. Perez Quintián, Fernando .
- Dra. Mingolla, Griselda.

Resumen con palabras claves

Ante la necesidad de mejorar la calidad de componentes estructurales críticos se observa un alto interés en el desarrollo y aplicación de varios métodos para la caracterización y evaluación de materiales durante la manufactura o servicio. Dentro de este marco aparece el método óptico de Shearografía Digital (DS) como método de ensayo de no contacto, para la localización y detección de defectos superficiales y subsuperficiales en tiempo real en áreas relativamente grandes con una sola medición. Sin embargo, la cuantificación y caracterización de los defectos es un tema abierto en la comunidad científico-tecnológica.

El presente trabajo analiza tres propuestas de dispositivos experimentales y su desempeño, no solo en la detección de defectos sino también en su cuantificación. Para esto se utiliza aquí la técnica de extracción de información denominada variación de fase espacial, o SPS por sus siglas en inglés, con los tres dispositivos.

El primero de los dispositivos es la configuración tradicional que utiliza un interferómetro de Michelson (IM) para realizar el desdoblamiento de una imagen. A éste se lo denomina shearógrafo básico o DS básico. Se consideran además dos alternativas para este sistema, ya que no aumentan demasiado la complejidad del sistema óptico. En la primera se incorpora una fuente de iluminación móvil de manera de generar un corrimiento de fase conocido sobre la muestra iluminada. A esta técnica se la llama Generación de Franjas Portadoras o brevemente GFP. La segunda variación analizada agrega una configuración de lentes conocida como sistema $4f$, la que le da el nombre al dispositivo.

También, se estudian diversos métodos de procesamiento de las imágenes adquiridas para facilitar la extracción de la información de interés.

Para las tres configuraciones analizadas, se realizan mediciones sobre diversas muestras de material disponible. Se comienza utilizando un dispositivo de prueba a fin de poner a punto la técnica y tener una referencia. Posteriormente, se ensayan materiales compuestos, tipo *sandwich*, los cuales presentan diversos defectos preexistentes conocidos: agujeros, delaminación, ausencia de adherencia, irregularidades geométricas, insertos metálicos. También se inspecciona un tubo bobinado de fibra de carbono y resina. Para revelar estos defectos se somete al material a variaciones de temperatura. En todos estos ensayos se busca determinar los alcances y limitaciones de los distintos dispositivos experimentales propuestos. La implementación y análisis de dichas variantes, permite determinar en una primera instancia cuál es la más viable para su uso en distintas condiciones de ensayo.

Por último, se hace una breve comparación entre los dispositivos de laboratorio y un equipo comercial, encontrando que el shearógrafo básico, aunque limitado en recursos en comparación con el comercial, tiene un buen desempeño en la detección y localización de defectos.

Palabras claves: Shearografía Digital, Variación de fase espacial, Speckle, Interferómetro de Michelson, Shear, Generación de franjas portadoras, 4f, Materiales compuestos.

Abstract with keywords

The need to improve the quality of critical structural components has led to a high interest in developing and applying various methods for material characterization and evaluation during manufacturing or service. To address this need, the optical method of Digital Shearography (DS) has emerged as a non-contact testing method capable of detecting the displacement gradient field on a component's surface. This technique provides good results for real-time detection of surface and subsurface defects in relatively large areas with a single measurement. However, the quantification and characterization of defects remain an open topic in the scientific-technological community.

This thesis analyzes three proposals for experimental devices and their performance, not only in defect detection but also in quantification. For this purpose, the information extraction technique called Spatial Phase Shifting, or SPS for short, is used with the three devices. The first device is the traditional configuration that uses a Michelson interferometer (IM) to perform image splitting, also known as the basic shearograph or DS basic. Two alternatives are also considered for this system, which do not greatly increase the complexity of the optical system. The first incorporates a mobile lighting source to generate a known phase shift on the illuminated sample, known as Carrier Fringe Generation or GFP for their initials in Spanish. The second variation adds a lens configuration known as a 4f system, giving the device its name.

Various image processing methods were studied to facilitate the extraction of the information of interest.

Measurements were made on various available material samples for the three analyzed configurations. A test device was initially used to fine-tune the technique and establish a reference. Subsequently, composite materials of sandwich-type were tested, which presented various pre-existing known defects such as cracks, holes, delamination, lack of adhesion, geometric irregularities, and metal inserts. A carbon fiber and resin wound tube was also inspected. To reveal these defects, the material was subjected to temperature variations. The implementation and analysis of these variants allowed for determining, initially, which one is the most viable for use in different test conditions.

Finally, a brief comparison is made between the laboratory devices and a commercial shearography device, specifying the device being compared. The basic shearograph, although limited in resources compared to the commercial device, has good performance in defect detection and localization.

Keywords: Digital Shearography, Spatial Phase Shifting, Speckle, Michelson Interfero-

meter, Shear, Carrier Fringe Generation, 4f, Composite Materials.

Índice

Resumen con palabras claves	II
Abstract with keywords	IV
Listado de publicaciones	XIII
1 Introducción	1
1.1 Motivo del proyecto	1
1.1.1 Industria aeroespacial en Argentina	2
1.2 Antecedentes	3
1.3 Motivación y objetivos	4
1.4 Organización de la tesis	5
2 Aspectos Teóricos	7
2.1 Mecánica de materiales	7
2.1.1 El tensor de deformación y tensiones	8
2.1.2 Materiales compuestos	10
2.2 Principios elementales de Shearografía Digital	12
2.2.1 Fenomeno de <i>Speckle</i> o Granularidad	12
2.2.2 Interferómetro de <i>Michelson</i> (IM)	15
2.2.3 Shearógrafo basado en un interferómetro de <i>Michelson</i> simple	17
2.2.4 Shearografía digital (DS) para deformaciones fuera de plano	20
2.2.5 Cambio de fase espacial (SPS)	24
3 Evaluación experimental de 2 configuraciones basadas en un Interferómetro de <i>Michelson</i> (IM)	29
3.1 Variantes del DS basado en un interferómetro de <i>Michelson</i>	29
3.1.1 Generación de Franjas Portadoras (GFP)	30
3.1.2 Extracción de la fase en GFP	33
3.1.3 Sistema $4f$	34
3.1.4 Descripción matemática del sistema $4f$	38
3.1.5 Análisis de parámetros de control	42
3.2 Descripción experimental y equipamiento	45
3.3 Adquisición y procesamiento digital de imágenes aplicados a SPS-DS	49
3.3.1 Programa de adquisición	49
3.4 Procesamiento digital	51

3.4.1	Filtrado Digital	56
3.4.2	Algoritmos de desenvolvimiento de fase	60
3.5	Resultados experimentales sobre el dispositivo de prueba	61
3.6	Discusión	75
4	Análisis y resultados sobre materiales compuestos en condiciones de laboratorio	78
4.1	Descripción de los materiales utilizados	78
4.2	Resultados	81
4.2.1	Shearógrafo DS básico (IM)	81
4.2.2	DS GFP	84
4.2.3	DS sistema $4f$ con apertura	86
4.2.4	DS Comercial	94
4.3	Discusión	98
5	Conclusiones	100
5.1	Resumen de principales logros	100
5.2	Trabajos futuros	101
6	Referencias	103
7	Apéndice I: Mecánica de los medios continuos	108
7.1	Tensores de deformaciones y tensiones	108
7.1.1	Tensor de deformaciones	108
7.1.2	Tensor de tensiones	110
7.2	Relaciones constitutivas	112
7.2.1	Ley de Hooke Generalizada	112
8	Apéndice II: Interferometría	115
8.1	Técnicas Portadoras de Fase	115
8.1.1	Portadora de fase temporal (TPS)	115
9	Apéndice III: Estadística y correlación de Speckle	120
9.1	Rugosidad ζ	121
9.2	Coefficiente de correlación μ	121
10	Apéndice IV: <i>Speckle</i>	123

Índice de Figuras

1.1	Esquema del satellite SAOCOM 1A, tomado de (Argentina, 05 Octubre 2022[c]).	
	3	
2.1	Esquema del panel tipo <i>sandwich</i> , y los principales métodos de END (Gay D., 2014)..	11
2.2	Efecto <i>Speckle</i> .	13
2.3	Esquema 3D del IM.	16
2.4	Vista de planta del IM, β ángulo del E_1 respecto de E_2 o <i>tilt</i> .	16
2.5	IM susceptible a deformaciones fuera de plano.	18
2.6	Mapa de franjas.	20
2.7	IM susceptible a deformaciones fuera de plano. Sistema de Shearografía elemental.	21
2.8	Comparación entre estado sin deformar y deformado.	21
2.9	Formación de f_0 en el sensor de una cámara.	26
2.10	Espectro de frecuencia espacial en el dominio de Fourier (1D) de un interferograma.	27
3.1	Esquema de DS haciendo uso de GFP, basado en un <i>Michelson</i> .	31
3.2	Esquema de DS haciendo uso de la configuración $4f$.	35
3.3	Esquema de DS haciendo uso de la configuración $4f$, basado en un IM.	36
3.4	Esquema (a) evaluación del FOV de un interferómetro de <i>Michelson</i> . Esquema (b) efecto del sistema $4f$ utilizado para calcular FOV.	36
3.5	Esquema de DS haciendo uso de la configuración $4f$ con una apertura, basado en un IM.	39
3.6	Esquema de DS haciendo uso de la configuración $4f$ con una apertura, basado en un <i>Michelson</i> .	39
3.7	Espectro después de realizar la transformada de <i>Fourier</i> en un sistema $4f$ con apertura.	40
3.8	Esquema teórico del espectro después de realizar la transformada de <i>Fourier</i> .	43
3.9	Dispositivo experimental DS - IM utilizado para la configuración básica y GFP.	46
3.10	Dispositivo experimental DS $4f$.	47
3.11	Dispositivo experimental DS $4f$ con apertura <i>slit</i> .	47
3.12	Esquema del dispositivo de prueba (S. Waldner y N. Goudemand, 2000).	48

3.13		48
3.14	Imagen del dispositivo de prueba 1, introducción del <i>shearing</i> $\Delta x = 20mm$ en un IM, introducido por la rotación del espejo E_1	49
3.15	Programa de adquisición para DS.	50
3.16	Ventanas para FT 1	53
3.17	Ventanas para FT 2	54
3.18	Ventanas para FT 3	55
3.19	Resultado de la primera etapa, obtención de la fase envuelta por medio de WFT.	56
3.20	Algoritmo de procesamiento del filtro seno/coseno con cálculo intermedio de fase, imagen adaptada de (S. Waldner y N. Goudemand, 2000)..	58
3.21	Resultado de la etapa de filtrado digital posterior, asociado a la figura 3.19. Obtención de la fase envuelta por medio de WFT con la aplicación de una combinación de filtros kernel y seno/coseno con re composición intermedia de la fase.	59
3.22	Resultado de la etapa de desenvolvimiento de fase por medio del algoritmo SPUD.	61
3.23	Ensayo con dispositivo de prueba 1, progresión de deformación para el DS IM	62
3.24	Resultados del procesamiento para DS IM básico	63
3.25	Ensayo con dispositivo de prueba 1, secuencia de ensayo con GFP.	65
3.26	Resultados del procesamiento para el GFP.	67
3.27	Resultados obtenidos de la configuración 4f del dispositivo de prueba 1 a una distancia objeto - cámara de 60cm, $\Delta x = 10mm$ y apertura circular.	69
3.28	Resultados obtenidos de la configuración 4f del dispositivo de prueba 1 a una distancia objeto - cámara de 60cm, $\Delta x = 10mm$ y apertura circular (cont.).	70
3.29	Tamaño de ventana de 150 px.	71
3.30	Tamaño de ventana de 100 px.	71
3.31	Tamaño de ventana de 80 px.	71
3.32	Tamaño de ventana de 60 px.	71
3.33	Filtros Kernel (a) 3 pasos, (b) 10 pasos y (c) 30 pasos.	72
3.34	Filtro Rectangular 20 pasos.	72
3.35	Sistema 4f con apertura tipo <i>slit</i>	73
3.36	Resultados sobre el dispositivo de prueba 1 con el shearografo LTI2100.	74
3.37	Resultados sobre el dispositivo de prueba 2 con el shearografo LTI2100.	75
4.1	Cupón panel HC-Alan, con insertos metálicos de diferentes diámetros.	79
4.2	Cupón panel HC-Honny, con defectos pasantes y no pasantes.	79

4.3	Cupón panel HC-Casa2, con inserto metálico.	80
4.4	Cupón tubo bobinado de fibra de carbono.	81
4.5	Ensayo de HC-Honney con máscara, orientación a 90 grados (respecto de la figura 4.2a), distancia 1 m entre objeto y cámara. <i>shearing</i> $\Delta x = 10mm$	82
4.6	Ensayo de HC-Honney, orientación a 90 grados (respecto de la figura 4.2a), distancia 1 m entre objeto y cámara. <i>shearing</i> $\Delta x = 10mm$	83
4.7	Ensayo de HC-Honney, orientación a 90 grados (respecto de la figura 4.2a), distancia 1 m entre objeto y cámara. <i>shearing</i> $\Delta x = 10mm$ (cont.).	84
4.8	Ensayo de HC-Honney con GFP, orientación a 90 grados (respecto de la figura 4.2a), distancia 1 m entre objeto y cámara, desplazamiento de fuente de iluminación 7mm y <i>shearing</i> $\Delta x = 10mm$	86
4.9	Ensayo con apertura circular cupón HC Alan 4.1a zona central, $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm. Procesamiento obtenido con filtro kernel de 3×3 + filtro Rectangular c 3 veces y d 30 veces.	87
4.10	Ensayo con apertura circular de HC-Casa, distancia 50 cm entre objeto y cámara, $\Delta x = 10mm$. Procesamiento con filtro kernel de 3×3 + filtro rectangular 30 veces.	88
4.11	Ensayo 1 cupón HC Honney 4.2a zona central, $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm.	88
4.12	Ensayo 2 con apertura circular cupón HC Honney 4.2a zona central, $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm.	89
4.13	Imagen original (a) y procesada por FT (b). Pasos de filtros kernel + rectangular 3 ((c)) y 30 (d) a la figura 4.12.	89
4.14	Ensayo 3 cupón HC Honney figura 4.2a zona central, $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm.	90
4.15	Ensayo 4 cupón HC Honney figura 4.2a zona central, $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm.	90
4.16	Ensayo de cupón tubo bobinado de fibra de carbono obtenido bajo excitación térmica. $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm. Zona central del tubo, orientación vertical.	91
4.17	Ensayo cupón HC Honney 4.2a zona central, $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm.	91
4.18	Ensayo de cupón HC alan, obtenido bajo excitación térmica. $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm. Zona central, orientación vertical.	92
4.19	Ensayo de cupón HC casa, obtenido bajo excitación térmica. $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm. Zona central.	93
4.20	Ensayo de cupón HC casa, obtenido bajo excitación térmica. $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm. Zona central (cont.).	94

4.21	Ensayo de muestra panel HC-Alan obtenido bajo excitación térmica. Parámetros: $\Delta x = 0,94cm$, $FOV = 27,1^\circ$, RAH, $ht = 10s$ y $tt = 10s$	95
4.22	Ensayo de cupón panel HC-Honney obtenido bajo excitación térmica (Pistola de calor).	96
4.23	Ensayo de cupón panel HC-Casa2 obtenido bajo excitación térmica.	97
4.24	Ensayo de tubo bobinado de fibra de carbono, resultados obtenido bajo excitación térmica.	98
7.1	Esquemas utilizados para describir el tensor de deformaciones. Tomado de (Reddy, J.N. y Reddy, J.N., 2013).	109
7.2	Esquemas utilizados para describir el tensor de tensiones. Tomado de (Reddy, J.N. y Reddy, J.N., 2013)..	111
8.1	Técnica de portadora temporal y técnica de portadora espacial.. . . .	115
8.2	Tabla resumen de diversas alternativas de algoritmos para cálculos de TPS, tomado de (Sirohi R. S., 2016).	116
8.3	Esquema de TPS 4+4, tomado y adaptado de (steinchen2003digital). . . .	117
8.4	Esquema de fase envuelta y desenvuelta, tomado de (gdeisat2011). . . .	118
9.1	Formación de Speckle sobre una superficie rugosa, tomada de (Sirohi R. S., 2016)	121
10.1	Figura de <i>speckle</i>	123
10.2	Formación de <i>speckle</i>	124

Índice de Tablas

7.1	Tabla resumen de constantes elásticas para diferentes tipos de redes (Roesler J. , Harders H., y Baeker, M., 2007).	114
-----	---	-----

Listado de publicaciones

Revistas

Congresos

- Escoda Avila M. A., Sosa H. E., Romero Rosero R. C., Ruiz Gale M. F., Septiembre 2022. *"Digital Shearing Speckle Pattern Interferometry (DSSPI): comparación de tres alternativas para la implementación del método de portadora de fase espacial o spacial phase shifting (SPS)"*. 107º Reunión Anual de Física Argentina (RAFA), Comisión Nacional de Energía Atómica - Centro Atómico Bariloche (CNEA-CAB), San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Escoda Avila M. A., Sosa H. E., Romero Rosero R. C., Ruiz Gale M. F., Septiembre 2022. *"Shearografía Digital como Ensayo No Destructivo para evaluar paneles tipo Honey Comb"*. 107º Reunión Anual de Física Argentina (RAFA), Comisión Nacional de Energía Atómica - Centro Atómico Bariloche (CNEA-CAB), San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Escoda Avila M. A., Romero Rosero R. C., Ruiz Gale M. F., Mayo 2022. *"Caracterización y Evaluación de Materiales por Medio de Shearografía Digital (DS)"*. 20º Congreso Internacional de Materiales, SAM/CONAMET 2022, Universidad Nacional de Mar del Plata - INTEMA, Mar del Plata, Argentina.
- Sosa H., Funes I., Romero Rosero C. R., Escoda Avila M. A., Ruiz Gale M. F., Abril 2023. *Evaluación de materiales aplicados a la industria aeroespacial con el método no destructivo de Shearografía*. XII Congreso Argentino de Tecnología Espacial Universidad de Mendoza.

Agradecimientos

He tenido el privilegio de contar con la dirección de *María Fernanda Ruiz Gale y Rodrigo Romero* dos excelentes profesionales y mejores personas aún. A ellos mi agradecimiento especial por su paciencia y tiempo dedicado a formarme durante este trabajo.

Quisiera agradecer también a:

mis padres *José, Salomé* y mi hermana *Adri* por todo el apoyo brindado durante este proyecto, al igual que a mis amigos cercanos los cuales fueron de gran apoyo.

Liz, Javier, Nelson, Monica, Adrian, Pablo, Cristina, Fer, Hugo e Isaac compañeros y excelentes personas que tuve la suerte de conocer y compartir durante el desarrollo de este proyecto.

no puedo dejar de nombrar a dos personas especiales que conocí y a las cuales les agradezco de manera especial: *Marce y Delia*, que me soportaron y sobre todo el cariño que me transmitieron.

a mis compañeros de la maestría *Liz, Martu, Rodri, José, Fede, Joaquín, David, Jonathan, Gabriel y Ali* con los que tuve la suerte de coincidir y compartir estos años, los grupos de estudio por Meet, Zoom u otra plataforma durante la pandemia. También no me quiero olvidar de los compañeros que tuve el agrado de conocer durante los cursos, a los cuales pude conocer y les agradezco poder haber compartido con ellos.

a el grupo de *America Resiste*, el equipo de futbol que me permitió conocer e integrarme durante el tiempo que pase en Capital. Un grupo compuesto de excelentes profesionales y aún mejores personas con los que compartí excelentes momentos.

a *Patricia Bozzano* por su guía y todo su apoyo durante todo el ciclo de esta maestría.

a la división IAMEND por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto.

a el Instituto de Tecnología J. Sabato, la comisión de energía atómica (CNEA) y a la Argentina por permitirme trabajar y perfeccionarme, espero poder en un futuro retribuir todo lo que recibí.

a la Universidad Nacional del Comahue, casa de estudios que me permitió formarme como profesional, al laboratorio LPM-GMF bajo la dirección del investigador Juan E. Perez Ipiña que me incentivo a iniciarme en temáticas de investigación.

a mis amigos de toda la vida *Maty, Robert, Rafa, Iso, Bachy, Seba* que siempre

estuvieron más allá de perderme muchas veces juntadas por tenes que estudiar.

a mis hermanos de la Iglesia por su apoyo desde la distancia.

Y a *Él Señor* por tanta misericordia, guardarme de muchos peligros y permitirme aprender todo el tiempo desarrollándome en está actividad.

Para mi madre *Salomé* por sus enseñanzas y su apoyo incondicional.

Lista de símbolos, acrónimos y abreviaturas

DS	Digital Shearography
SPS	Spacial Phase Shifting
TPS	Temporal Phase Shifting
END	Ensayos No Destructivos
HC	Honey Comb
E	Módulo de Young
ρ	Densidad
σ_{uts}	Tensión última a la tracción
$\vec{k}_0$	Vector iluminación incidente
$\vec{k}_1$	Vector iluminación reflejado
ε_{ij}	Tensor de deformación
σ_{ij}	Tensor de tensiones
ν	Coefficiente de Poisson
C_{ij}	Matriz de <i>compliance</i>
S_{ij}	Matriz de <i>rígidez</i>
f	Frecuencia
Δs	Tamaño promedio del grano de <i>speckle</i>
S/N	Relación señal - ruido
u_u	Onda de iluminación <i>untilded</i>
u_t	Onda de iluminación <i>tilded</i>
I	Intensidad de iluminación
IM	Interferómetro de Michelson
λ	Longitud de onda
ϕ	fase
$\Delta\phi$	cambio finito de la fase
Δx	<i>Shearing</i>
$\frac{\partial w}{\partial x}$	Gradiente de desplazamiento
ϕ_r	fase aleatoria o random
OM	Objetivo de Microscopio
$\Delta\phi_c$	Cambio de fase introducido por el OM

$\Delta\phi_d$	Cambio de fase introducido por una deformación
SSD	Spatial Synchronous Detection
GFP	Generación de Franjas Portadoras
α o	Campo de visión o <i>field of view</i>
FOV	
f_0	Frecuencia portadora
f_c	Frecuencia de corte
β	Ángulo de <i>tild</i>
Λ	Tamaño de pixel
η	Relación de calidad de <i>speckle</i>
FT	Transformada de Fourier
IFT	Transformada Inversa de Fourier

1. Introducción

El presente trabajo de tesis para optar al título maestría está enfocado en la evaluación del método de Shearografía Digital (DS) para su implementación en Ensayos No Destructivos (END). Este método evalúa diversos materiales de uso estructural en condiciones de servicio y/o manufactura de dichos componentes, con el fin de mejorar la calidad de estos, el control y/o monitoreo de defectos presentes en condiciones de operación. Existen diversos métodos no destructivos para la evaluación y caracterización de componentes críticos, entre los cuales se destacan: inspección visual, ultrasonido convencional y ultrasonido por arreglo de fases (*phase array*), corrientes inducidas, termografía infrarroja, radiografía, etc. Cada uno de estos métodos presentan ventajas y desventajas a la hora de su implementación en campo. El método DS está basado en principios ópticos de holografía e interferometría de *speckle* lo que la hace no invasiva (Y. Y. Hung y C. Y. Liang, 1979) (Sirohi R.S., 1999), desarrollado durante muchos años para poder aplicarla al campo de la metrología de no contacto en condiciones de industria, (Y. Y. Hung, 1996), (Y. Y. Hung, Y. S. Chen, S. P. Ng, L. Liu, Y. H. Huang, B. L. Luk, R. W.L. Ip, C. M.L. Wu y P. S. Chung, 2009), (Qihan Zhao, Xizuo Dan, Fangyuan Sun, Yonghong Wang, Sijin Wu y Lianxiang Yang, 2018). Dentro de sus principales ventajas están el hecho de poder realizar un monitoreo de grandes superficies en poco tiempo, poder detectar defectos superficiales y sub-superficiales, presentar mucha menor sensibilidad a vibraciones y rotaciones de cuerpo rígido.

1.1 Motivo del proyecto

Los materiales compuestos son de gran importancia en la industria aerocomercial, aeronáutica, petróleo, nuclear, aeroespacial, proveyendo una alta eficiencia y desempeño estructural. Estos se encuentran en continuo estudio, introduciendo nuevas oportunidades para el desarrollo o actualización de tecnologías y estructuras. A su vez estos nuevos materiales generan nuevas incertidumbres y desafíos.

Dentro de la industria aeroespacial y aerocomercial la mayoría de sus componentes estructurales principales se componen de diversos materiales compuestos: *sandwich*, me-

tálicos reforzados con fibras *glare* y *arall*, etc. Éstos presentan una mayor relación de rigidez relativa a su peso específico, al igual que resistencia a la tracción relativa a su peso específico ($E/\rho, \sigma_{uts}/\rho$), lo cual es preponderante debido a que se busca tener relaciones carga útil / peso final de la estructura lo más alta posible (Ashby M. F., 2016). Aunque no hay que descartar que existen otras propiedades que son relevantes a la hora de seleccionar las diversas alternativas de materiales a utilizar, como lo son, las propiedades térmicas, elásticas, ópticas, acústicas y químicas (Ashby M. F., 2016).

Seleccionando correctamente el o los materiales constructivos, consiguen mayores rentabilidades en la aeronáutica comercial (transporte de pasajeros, paquetería) y la industria aeroespacial (satelital). En los últimos años los materiales compuestos ganaron terreno en industrias como el petróleo, donde aparecen como sustitutos de materiales convencionales, reemplazando tuberías de acero por material compuesto de fibra de vidrio con resina polimérica termoestable (B. C.F. Oliveira, A. A. Seibert, D. Staub y A. Albertazzi, 2020). También se encuentran este tipo de materiales en la industria petroquímica bajo condiciones *onshore* y *offshore* para el transporte de varios tipos de fluidos, a baja y alta presión, incluyendo hidrocarburos (D. Staub Felipe, T. J. de Bortoli, A. V. Fantin, D. P. Willemann, M. Benedet, A. Lenzi y A. A. Gonçalves, 2022), (F. J. Macedo, M. E. Benedet, A. V. Fantin, D. P. Willemann, F. A. Alves da Silva y A. Albertazzi, 2018). Actualmente los materiales compuestos están comenzando a ser estudiados para su aplicación en la industria nuclear, para reemplazar diversos componentes.

1.1.1 Industria aeroespacial en Argentina

En los últimos años en la Argentina se inicio un Plan Espacial Nacional, el cual obtuvo carácter de estratégico para el desarrollo de tecnología para diseñar y construir satélites de observación de microondas y telecomunicaciones. Este proyecto fue desarrollado por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), La Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), VENG SA e INVAP (Argentina, 05 Octubre 2022[b]),(CONAE, 05 Octubre 2022),(Argentina, 05 Octubre 2022[a]),(Veng sa, 05 Octubre 2022),(Invap SE, 05 Octubre 2022).

Dentro de este marco aparece la potencialidad de desarrollar y utilizar la shearografía digital (DS) como método de END en las diversas etapas de fabricación. Dentro del Centro Atómico Constituyentes CNEA se desarrollaron los paneles solares, la estructura

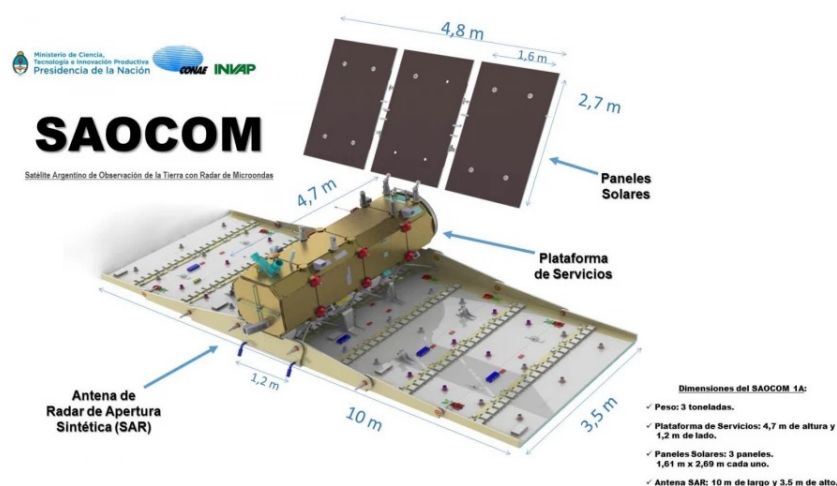


Figura 1.1. Esquema del satélite SAOCOM 1A, tomado de ([Argentina, 05 Octubre 2022\[c\]](#)).

de la antena radar y dispositivos de despliegue de la estructura de la antena del satélite SAOCOM 1A, como se observa en la figura 1.1. Por ello es de interés para la CNEA conocer el estado de los diversos componentes, ya sea en control de calidad, a la salida de la cadena de producción, o en planta para poder detectar posibles defectos durante operación.

En este marco se establece la presente tesis, donde el método de shearografía digital (DS) se presenta como una herramienta no destructiva para la detección y medición de diversos defectos superficiales y sub-superficiales. La misma se aplica desde hace tiempo para la detección de defectos bajo la norma ASTM 2581 ([ASTM E, 2007](#)), en constante revisión de acuerdo con los nuevos avances de las técnicas. También se encuentran diversos proveedores que venden equipos de uso comercial, los cuales debido a su elevado costo dificultan su adopción por la industria ([Dantec Dynamics, 05 Octubre 2022](#)), ([Laser Technology Inc., 05 Octubre 2022](#)). El presente trabajo indaga sobre medición de deformaciones fuera de plano (*out – of – plane*) usando 3 configuraciones diferentes, buscando evaluar la adecuada dependiendo del tipo de medición requerida. Por último se quiere dar un sustento a la posibilidad de construir un prototipo a futuro y patentarlo.

1.2 Antecedentes

Dentro del laboratorio de óptica aplicada de la división IAMEND del departamento ENDE de la CNEA en el Centro Atómico Constituyentes (CAC), se contaba con experiencia en correlación de *speckle* y en particular en shearografía digital, por medio de

la técnica de *Temporal Phase Shifting* (TPS) o portadora de fase temporal (TPS-DS) y *Spacial Phase Shifting* (SPS) o portadora de fase espacial (R. Romero y M. F. Ruiz Gale, 2016). Se habían analizado sus ventajas y desventajas, en la detección de defectos en diversos componentes estructurales críticos. Una de las mayores dificultades que presentaba la alternativa TPS, es el uso de un disco piezoeléctrico para realizar pequeños desplazamientos lo que dificulta su implementación en mediciones del tipo dinámicas (R. Romero y M. F. Ruiz Gale, 2015).

1.3 Motivación y objetivos

Con el propósito de analizar estructuras de forma dinámica, se plantea evaluar la técnica conocida como *Spacial Phase Shifting* o portadora de fase espacial (SPS-DS), con la cual se podría evaluar diversos materiales de forma dinámica y estática, además de reducir los tiempos tanto de adquisición, como de cálculos. Por otro lado, se contaría con una alternativa para la evaluación no destructiva de componentes estructurales, que en tiempo real se puede comparar con otras como la termografía infrarroja.

Como objetivos generales se pretende contribuir al desarrollo de conocimiento amplio y profundo de la metodología SPS-DS para su implementación en el campo de END. Los objetivos específicos que pretende esta tesis son:

- Desarrollo del método basado en SPS-DS, pudiendo establecer los alcances y limitaciones en deformaciones fuera de plano (*out – of – plane*). Para ello se abordarán diversas configuraciones experimentales, propuestas por varios autores, y se realizará un análisis de los resultados obtenidos con el fin de poder establecer una solución de compromiso óptima.
 - Establecer estrategias de procesamiento digital de imágenes en el espacio físico como en el espacio de frecuencias (dominio de *Fourier*) con el fin de evaluar tiempo de procesamiento – resultados, para su implementación en aplicaciones de SPS-DS en tiempo real.
 - Analizar la configuración experimental para identificar los parámetros de control determinantes.
-

-
- Realizar mediciones sobre un dispositivo de prueba, sometido a deformación mecánica.
 - Realizar mediciones sobre muestras de material compuesto conformado por dos superficies laminadas de fibra de carbono y por un elemento de aluminio tipo panel de abeja (*honey comb* – HC) disponibles en el laboratorio con diversos defectos preexistentes e insertos introducidos en el proceso de manufactura, bajo excitación térmica. De esta forma se puede contar con patrones de los defectos más probables en dichos materiales: delaminación, agujeros, falta de adhesión, irregularidad geométrica.
 - Avanzar en la evaluación de algunos componentes estructurales disponibles y compararlos con resultados obtenidos por el uso de un equipo comercial de DS con el fin de poder verificar y validar los resultados.

1.4 Organización de la tesis

El *capítulo 2* hace un breve resumen del marco teórico, tanto para materiales compuestos como materiales metálicos desde el punto de vista de elasticidad y mecánica de los medios continuos, estableciendo las relaciones entre gradientes de desplazamientos y deformaciones, así como las relaciones constitutivas y la clasificación desde dicho punto de vista. También se describirá sucintamente el marco teórico de SPS-DS, definiendo sus principales características y la relación que ésta tiene con los campos de deformaciones.

En el *capítulo 3* se realiza un análisis teórico – experimental de las configuraciones elegidas. Se hace un estudio de la elección de los algoritmos disponibles para el tratamiento digital de las imágenes con el fin de obtener el mejor resultado. Se realizará una revisión de diversos tipos de estrategias para abordar esta problemática con el fin de reconstruir la información obtenida de la técnica y poder llegar a recomponer las deformaciones. Además, se presenta el desarrollo de un programa tanto para adquirir como procesar las imágenes en tiempo real. Finalmente se desarrollan las opciones exploradas, analizando experimentalmente sus parámetros de control y selección. Se establecen sus ventajas, desventajas y una verificación con el shearografo comercial LTI2100.

En el *capítulo 4* se presentan los resultados obtenidos para las diversas configuraciones experimentales evaluadas en componentes con defectos, algunos de los cuales se pueden

ver a ojo desnudo. Se identifican cada uno de los mismos y se verifican los resultados obtenidos con un shearografo comercial modelo LTI2100.

En el *capítulo 5* se presentan las conclusiones principales de la presente tesis, y los trabajos que se podrían abordar a futuro.

2. Aspectos Teóricos

Este capítulo presentará en una primera parte una descripción de mecánica de materiales, así como de materiales compuestos y sus diferencias con materiales convencionales (metales) desde el punto de vista estructural. Luego se desarrollará una revisión teórica de los conceptos de *speckle*, interferometría, DS y SPS-DS, describiendo los elementos básicos necesarios como los fundamentos técnicos y la relación con otras técnicas interferométricas. Finalmente se establecerá la relación de lo observado por DS con mecánica de materiales, estableciendo el concepto de fase envuelta (*wrapped phase*) y desenvolvimiento de fase (*unwrapped phase*), para obtener componentes del tensor de deformaciones.

2.1 Mecánica de materiales

La mecánica de materiales está asociada al estudio de los campos de tensiones, deformaciones y desplazamientos. Ésta establece las relaciones fundamentales entre estos campos. Para llegar a ellas, se debe establecer el concepto *continuo de materia* si podemos ignorar la composición discreta de los cuerpos materiales y suponer que la sustancia de éstos se distribuye uniformemente en todo el volumen, ocupando completamente el espacio. De acuerdo con esto, afirmamos que la materia se puede dividir indefinidamente en porciones más pequeñas, cada una de las cuales conserva todas las propiedades físicas del cuerpo original. En consecuencia, podemos definir cantidades de campo tales como densidad y velocidad en cada punto de la región del espacio que ocupa el cuerpo.

El modelo continuo para cuerpos materiales es importante para los ingenieros por dos muy buenas razones. En la escala por la que se considera cuerpos de acero, aluminio, hormigón, etc., las dimensiones características son extremadamente grandes en comparación con las distancias moleculares, por lo que el modelo continuo proporciona una representación muy útil y fiable. Además, el conocimiento del comportamiento mecánico de los materiales se basa casi por completo en datos experimentales recopilados mediante pruebas en especímenes relativamente grandes (ensayos de tracción, compresión, flexión, torsión, corte, etc.).

El análisis del comportamiento cinemático y mecánico de materiales modelados en el

supuesto del continuo es lo que se conoce como *Mecánica del Continuo*. Hay dos principales temas en los que se dividen los tópicos de la mecánica del continuo. El *primero*, trata sobre la derivación de ecuaciones fundamentales que son válidas para todos los medios continuos. Estas ecuaciones se basan en leyes universales de la física, como la conservación de masa, los principios de energía y momento, etc. En el *segundo*, el foco de atención está en el desarrollo de las ecuaciones constitutivas que caracterizan el comportamiento de materiales idealizados; siendo el sólido perfectamente elástico y el fluido viscoso los más conocidos ejemplos de estas ecuaciones. Proporcionan los puntos de vista en torno a los cuales se desarrollan los estudios de elasticidad, plasticidad, viscoelasticidad y la mecánica de fluidos (Mase G.T. , Smelser R.E. y Mase G.E., 2010).

2.1.1 El tensor de deformación y tensiones

Una deformación de un continuo se refiere a desplazamientos relativos y cambios de geometría experimentados por dicho continuo, bajo la influencia de un sistema de fuerzas. Las componentes del tensor de deformaciones infinitesimal en coordenadas cartesianas en forma tensorial es

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial X_1} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial X_2} + \frac{\partial u_2}{\partial X_1} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial X_3} + \frac{\partial u_3}{\partial X_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial X_2} + \frac{\partial u_2}{\partial X_1} \right) & \frac{\partial u_2}{\partial X_2} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial X_3} + \frac{\partial u_3}{\partial X_2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial X_3} + \frac{\partial u_3}{\partial X_1} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial X_3} + \frac{\partial u_3}{\partial X_2} \right) & \frac{\partial u_3}{\partial X_3} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

donde ε_{11} , ε_{22} y ε_{33} son las componentes normales y ε_{12} , ε_{13} y ε_{23} son las componentes de corte. Las deformaciones de corte se pueden reescribir de tal forma que $\gamma_{12} = 2\varepsilon_{12}$, $\gamma_{13} = 2\varepsilon_{13}$ y $\gamma_{23} = 2\varepsilon_{23}$. Éstas son las deformaciones de corte ingenieriles (Mase G.T. , Smelser R.E. y Mase G.E., 2010), (Reddy, J.N. y Reddy, J.N., 2013). El desarrollo de cómo se llega a dichas ecuaciones se encuentra descrito con mayor detalle en el apéndice 7.1.1.

El tensor de tensiones σ es el tensor de tensiones de Cauchy donde la tensión queda definida como fuerza por unidad de área deformada. Se puede definir el tensor de tensiones

por sus componentes en coordenadas cartesianas:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{12} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

donde los subíndices ij indican las direcciones del sistema coordenado ortogonal, en el sistema cartesiano (x, y, z) o (x_1, x_2, x_3) . Aquí también se puede discriminar entre componentes de corte τ o σ con $i \neq j$ y las componentes normales con $i = j$. El desarrollo de cómo se llega a dichas ecuaciones se encuentra descrito con mayor detalle en el apéndice [7.1.2](#).

La relación físico matemática para un material lineal elástico, conocida como *Ley de Hooke generalizada*, son las que relacionan tensiones con deformaciones y viceversa. En esta ley se encuentran definidos los coeficientes C_{ij} , llamados coeficientes de rigidez elásticos, y es un tensor de cuarto orden con un total de 81 constantes. Ese número es reducido a 36 constantes, ya que el tensor de constantes de rigidez elásticas es simétrico y, ya que los tensores de tensiones y deformaciones también lo son. La notación ingenieril o de Voigt-Kelvin es una forma simplificada y muy utilizada para describir la relación intrínseca entre tensiones y deformaciones.

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j \quad (2.3)$$

con i y j que van de 1 a 6, y note que $C_{ij} = C_{ji}$. Se asume que la relación tensión - deformación como la relación anteriormente expuesta puede considerarse inversible. Por lo tanto se puede definir una relación deformación - tensión dada por

$$\varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j \quad (2.4)$$

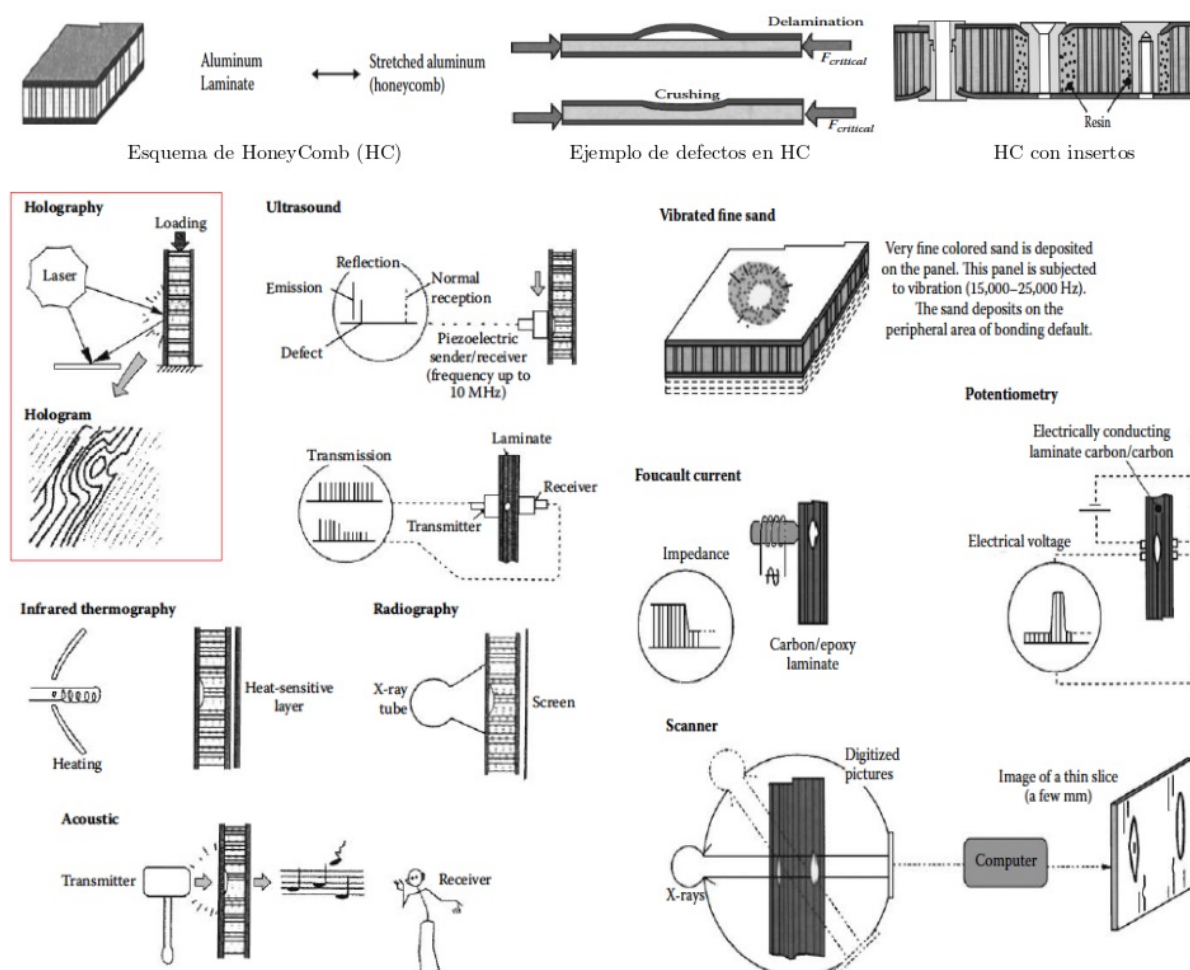
donde $S_{ij} = S_{ji}$ es la matriz de coeficientes de *compliance* del material, y $[S] = [C]^{-1}$. Los elementos de estos tensores de rigidez y *compliance* pueden ser determinados experimentalmente. En el caso de encontrarse con un material de comportamiento isotrópico las constantes elásticas se reducen a 2 constantes independientes (E y ν). Para profundizar sobre lo anterior se puede consultar en el apéndice [7.2.1](#).

2.1.2 Materiales compuestos

Debido a que diferentes materiales se unen para formar un material compuesto, hay una gran cantidad de combinaciones posibles. Los compuestos de matriz de metal, cerámica o polimérica se pueden reforzar con diferentes tipos de partículas o fibras. Los compuestos pueden ser clasificados ya sea por la geometría de las partículas de refuerzo (fibras, tejidos, etc.) o por el material de matriz utilizado.

En esta sección se muestra un tipo de material compuesto que son las estructuras tipo *sandwich*; en este tipo de estructuras las fases son arregladas en forma de capas. Esto puede ser útil en placas o carcasas cargadas en flexión, con el material exterior más rígido colocado lejos del eje neutral y el material menos rígido en el medio, principalmente para mantener constante la distancia entre las capas exteriores que soportan la carga. El material de relleno suele tener una densidad baja (por ejemplo, un polímero o una espuma), lo que hace que las estructuras tipo sándwich sean especialmente adecuadas para aplicaciones de peso ligero. Además, a menudo proporcionan un buen aislamiento térmico. Las estructuras sándwich se utilizan principalmente en la industria aeroespacial, en la ingeniería automotriz y en la construcción de embarcaciones, por ejemplo, en embarcaciones deportivas ligeras ([Roesler J. , Harders H., y Baeker, M., 2007](#)).

En la figura 2.1 se muestra un esquema de los paneles tipo *sandwich*, en particular el que está constituido en el centro con el conocido *Honey Comb* (HC) o panal de abeja el cual puede ser de aluminio y las superficies exteriores son de fibra de carbono unidas para conformar el *sandwich* con resina epoxi. Se puede observar en esa figura diversos tipos de defectos que pueden presentar estos paneles ya sea en servicio o durante la manufactura. El primero de estos defectos es la delaminación que se da por una mala adhesión entre la resina, el HC y la placa de fibra de carbono. El segundo defecto típico en estos paneles es el aplastamiento o *crushing* que se da cuando el conjunto HC, resina y placa de fibra de carbono en una zona localizada está aplastada. También se muestra a forma de ejemplo un panel con insertos los cuales son montados dentro, y sellada la interfaz por medio de resina. Finalmente se representan los principales métodos no destructivos que pueden ser aplicados a evaluar estos paneles, entre ellos tenemos el ultrasonido, corrientes de Foucault, escaneo mediante rayos X, radiografía, termografía infrarroja, emisión acústica y se remarca en color rojo el particular interés en técnicas de carácter óptico, ya que en



Diversas métodos NDT para evaluar paneles de HC en presencia de defectos.

Figura 2.1. Esquema del panel tipo *sandwich*, y los principales métodos de END (Gay D., 2014).

este marco aparece la shearografía que es un derivado de la holografía.

Cabe mencionar que los paneles tipo *sandwich* tienen un comportamiento lineal elástico de carácter principalmente ortotrópico, presentando en el espesor la mayor diferencia de modulo elástico E , coeficiente de *Poisson* ν , resistencia a la tracción σ_{uts} , deformación ε .

Si este tipo de material compuesto es excitado térmicamente, el material metálico interno presenta un coeficiente de expansión térmica diferente al de las placas externas. Una correcta adhesión impone una restricción que limita los desplazamientos entre los diferentes materiales. Cuando esa adhesión se rompe, ya sea, por ejemplo, por la introducción de insertos o por un pegado deficiente, la diferencia de dilatación entre los materiales introduce deformaciones del orden de los micrones o cientos de micrones. Estas deformaciones pueden ser detectadas con métodos interferométricos como shearografía y

se pueden inferir defectos superficiales y sub-superficiales ya que la presencia de estos defectos introduce irregularidades en superficie. Cabe mencionar que en particular estos defectos se pueden observar como deformaciones fuera de plano.

Para mayor información de los temas que se desarrollaron dentro de esta primera sección se pudo consultar las referencias citadas y profundizar en temas de mecánica del continuo y materiales compuestos, ya que lo expuesto aquí es lo necesario para entender lo que se abordara más adelante.

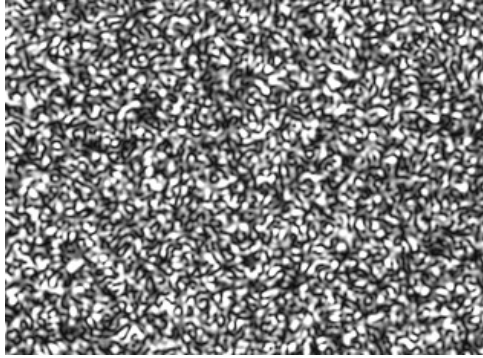
2.2 Principios elementales de Shearografía Digital

La shearografía digital es un método interferométrico que permite la medición de gradientes de deformación tanto fuera de plano como en el plano. Este método tuvo su primera publicación en el año 1973 ([J. A. Leendertz y J. N. Butters, 1973](#)) en el cual se midieron momentos de flexión. Actualmente tiene gran aceptación como método de ensayo no destructivo ([ASTM E, 2007](#)) por ser un método sin contacto y de campo completo que permite evaluar materiales convencionales y compuestos, determinar distribuciones de esfuerzos, medir esfuerzos residuales y realizar análisis de vibraciones en tiempo real.

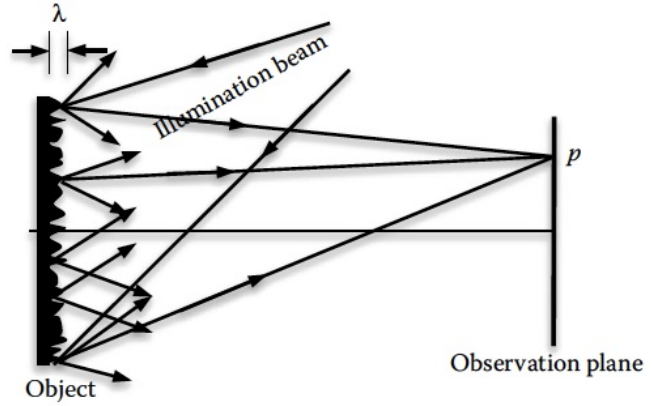
2.2.1 Fenomeno de *Speckle* o Granularidad

El origen de esta granularidad fue observado por los primeros investigadores en el tema láser entre las décadas '60 y '70 del siglo XX. La mayoría de las superficies son muy rugosas en la escala de las longitudes de onda ópticas. Bajo una iluminación coherente, la onda reflejada por la superficie es, de acuerdo con el principio de Huygens, la superposición de las ondas que provienen de los diferentes elementos microscópicos de la superficie. Las distancias recorridas por estas ondas pueden diferir en varias longitudes de onda, manteniéndose, sin embargo, la coherencia de la onda original. La interferencia de estas ondas da como resultado la figura granular que se conoce como *speckle* figura 2.2a ([E. N. Hogert, 2008](#)).

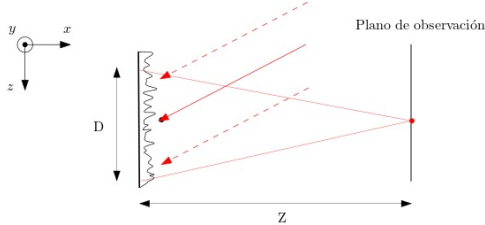
La distribución de *speckle* generada por un objeto rugoso ocupa todo el espacio que atraviesa la luz difundida y se puede observar interponiendo una pantalla (*speckle* objetivo figura 2.2c) o visualizando la imagen de la superficie generadora que se obtiene mediante un sistema óptico (*speckle* subjetivo figura 2.2d).



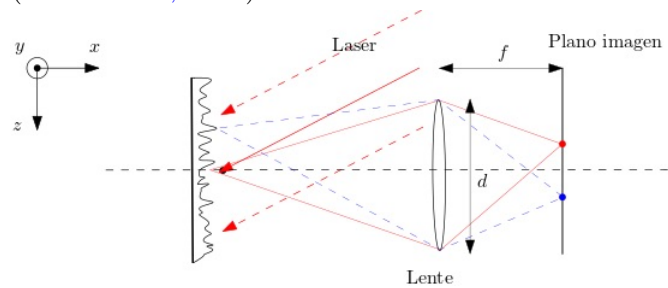
(a) *Speckle*, obtenido de una superficie ópticamente.



(b) Formación del *Speckle* sobre una superficie rugosa (Sirohi R. S., 2016).



(c) *Speckle* Objetivo.



(d) *Speckle* subjetivo.

Figura 2.2. Efecto *Speckle*

Al analizar un patrón de *speckle* se advierte que si el punto de observación se mueve, las distancias recorridas por las distintas componentes dispersadas cambia, obteniéndose un nuevo valor de la intensidad independiente del anterior. Por lo tanto, cuando un haz de luz coherente incide sobre una superficie ópticamente rugosa (o sea cuando su variación de alturas es del orden o mayor que la longitud de onda de la luz, figura 2.2b) la luz dispersada por la superficie presenta un aspecto particular, una distribución aleatoria de manchitas brillantes y oscuras, que se conoce como diagrama de *Speckle*. Cada irregularidad de la superficie se comporta como una fuente secundaria de luz, todas estas fuentes son coherentes entre sí. La interferencia de las múltiples ondas secundarias producen este diagrama de interferencia. La información contenida en el *speckle*, debidamente procesada, permite conocer muchas propiedades de la superficie iluminada, como por ejemplo su rugosidad, su longitud de correlación, deformaciones, desplazamientos, rotaciones, tensiones, vibraciones, etc.

Uno de los parámetros a tener en cuenta en cualquier experiencia que involucre un patrón de *speckle* es el tamaño de grano del *speckle* (Dainty J. C. Ed., Ennos A. E.,

1975). El tamaño del *speckle* láser, promedio estadístico de la distancia entre regiones adyacentes de brillo máximo y mínimo, siempre está relacionado con el ángulo de apertura que la radiación que lo origina subtiende en el plano que define el campo de *speckle*. Así, por ejemplo, el tamaño (diámetro) Δ_s del *speckle* objetivo formadas en un plano de observación a una distancia Z , al dispersar luz coherente desde una región circular de diámetro D (figura 2.2c), está dada aproximadamente por

$$\Delta_s \approx 1,22 \frac{\lambda Z}{D} \quad (2.5)$$

Donde λ es la longitud de onda del láser.

Si, por otro lado, el *speckle* está formado enfocando una lente sobre la pantalla (*speckle* subjetivo), el tamaño del *speckle* está relacionado a la apertura numérica N.A. de la lente:

$$\Delta_s \approx 0,6 \frac{\lambda}{N.A.} \quad (2.6)$$

En el caso de la figura 2.2d esta ecuación se puede expresar como:

$$\Delta_s \approx 1,2 \frac{\lambda f_{lente}}{d} \quad (2.7)$$

donde f_{lente} es el foco de la lente y d es el tamaño de la lente. Donde a es el diámetro de apertura de la lente de la cámara. Controlando este tamaño se puede variar el tamaño del grano de *speckle*. Por lo tanto si se reduce la apertura de lente, se observa granos de *speckle* más grandes (Hecht E., 2012), (Sirohi R. S., 2016), (Goodman J. W., 2020).

Cuando un haz láser ilumina un objeto que se está desplazando, rotando o deformándose, el patrón de *Speckle* se desplaza y/o cambia su estructura en el plano de observación. Diversos autores han analizado este fenómeno y se ha demostrado que si: 1) la superficie se desplaza en su plano una distancia determinada, los granos de *Speckles* objetivo se desplazan en la misma dirección y la misma distancia; 2) la superficie se desplaza en una dirección paralela a su normal una distancia los granos de *Speckles* sufren una homotecia. O sea, las manchas se desplazan radialmente y se decorrelacionan (Apéndice 9.2).

La obtención de la información de la granularidad se realiza comparando los patrones de *Speckles* obtenidos en dos instancias levemente diferentes. La sensibilidad de estas técnicas interferométricas, para desplazamientos fuera del plano está comprendida entre 0.3 a 30 μm . Otra característica interesante de estas técnicas, es que el medio de registro

debe resolver los granos de *Speckle* comprendidos entre 5-80 μm . Por lo tanto puede utilizarse una cámara digital como dispositivo de adquisición. Aunque existen varias técnicas interferométricas, en este trabajo nos concentramos en una de ellas, conocida como *Digital Shearing Speckle Pattern Interferometry (DSSPI)* o simplemente Shearografía Digital (DS).

Las propiedades estadísticas del *speckle* pueden ser consultadas en la bibliografía ([Goodman J. W., 2020](#)). Dentro de estas existen algunas de relevancia como lo son el contraste y la relación señal ruido (S/N) del patrón de *speckle*, definidos como

$$C = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} \quad (2.8)$$

$$S/N = 1/C = \frac{\langle I \rangle}{\sigma_I} \quad (2.9)$$

donde σ_I es el desvío estándar y $\langle I \rangle$ es la norma o media de la distribución de densidad de probabilidad de intensidad. El contraste es una medida de cuán fuertes son las fluctuaciones de intensidad en un patrón *speckle* en comparación con la intensidad promedio. La relación Señal - Ruido es el concepto recíproco, es decir, la fuerza de la intensidad media con respecto a la fuerza de las fluctuaciones de intensidad ([Goodman J. W., 2020](#)).

2.2.2 Interferómetro de *Michelson* (IM)

El interferómetro de Michelson es históricamente uno de los dispositivos más estudiados y se tiene vasto entendimiento de su funcionamiento. Consta de una superficie divisora de amplitud (BS) y dos espejos (E_1 y E_2) cada uno dispuesto de tal forma que estén a 90° uno respecto del otro, y a su vez cada uno de los espejos a 45 grados de la superficie divisora. En las figuras [2.3](#) y [2.4](#) se puede observar un montaje clásico en donde la superficie divisora es un plano diagonal en el interior de un cubo transparente. Este tipo de cubo divisor es el que utilizaremos en este trabajo dado que con él se realiza de manera mas confiable la alineación del sistema y no introduce diferencias de fase adicionales. Los espejos son montados sobre un movimiento cardánico que permite alinear la superficie del espejo para lograr la geometría antes descrita entre los espejos y la superficie divisora.

Se incide con un haz láser a lo que llamaremos la entrada del IM; este llega al plano

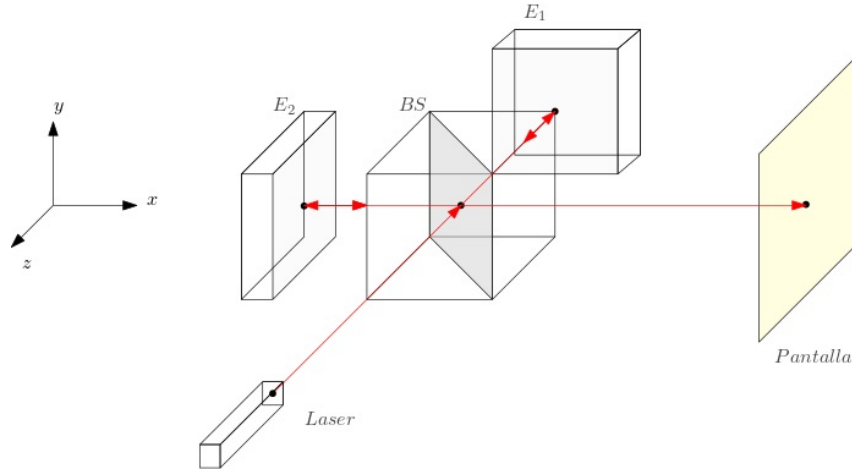


Figura 2.3. Esquema 3D del IM.

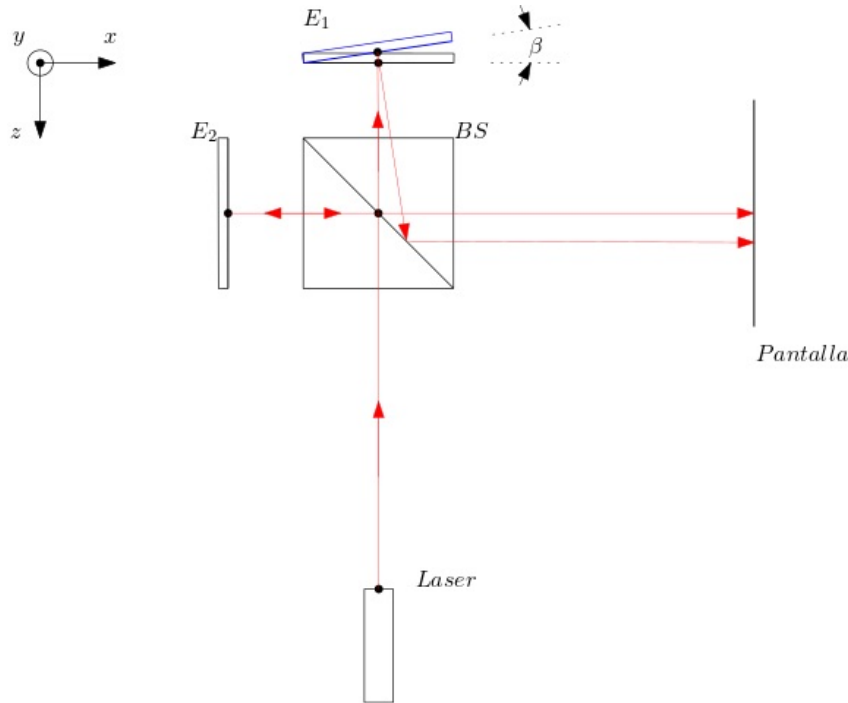


Figura 2.4. Vista de planta del IM, β ángulo del E_1 respecto de E_2 o *tilt*.

divisor de haz donde se divide en dos, uno se refleja y el otro pasa a través de dicha superficie. El haz que atraviesa el divisor llega al espejo E_1 donde se refleja hasta llegar nuevamente al divisor. En este punto el haz nuevamente se divide. Se pierde el que traspasa el divisor y se considera el que se refleja hasta incidir en la pantalla o detector. Por otro lado, el rayo proveniente del láser que se refleja en la superficie divisora llega al espejo E_2 . Se refleja y llega a la pantalla luego de atravesar la superficie divisora. Se dice que el IM está equilibrado o compensado cuando los dos espejos se encuentran a 90 grados y la distancia óptica recorrida por los dos haces al llegar a la pantalla es la misma.

De esta manera los haces llegan con la misma fase a la pantalla. Si se varía la distancia recorrida en uno de los brazos o ramas del IM en algunas longitudes de onda, se verá en la pantalla un sistema de anillos luminosos concéntricos, producto de la interferencia de los dos haces. Si en vez de variar los brazos del IM se rota muy poco uno de los espejos (por ejemplo E_1 de la figura 2.4) se verá un sistema de franjas de interferencia paralelas. A esta rotación de uno de los espejos se la suele llamar *tilt* (J. A. Leendertz y J. N. Butters, 1973), (Sirohi R.S., 1999).

2.2.3 Shearógrafo basado en un interferómetro de *Michelson* simple

El interferómetro de *Michelson* (IM) en un shearógrafo se utiliza como dispositivo de observación dando como resultado una doble imagen. Entonces, siguiendo el esquema de las figuras 2.3 y 2.4 se reemplaza el láser por la luz dispersada por una superficie y en vez de una pantalla se coloca una cámara digital conectada a una computadora. La figura 2.5 muestra esta configuración. Para iluminar a la superficie se utiliza una fuente de luz coherente que en este trabajo es un haz láser expandido con un objetivo de microscopio. Los espejos se encuentran equidistantes de A y los rayos inciden normales a ellos. El espejo E_1 presenta un pequeño ángulo β respecto de la normal $\vec{z}$, introduciendo una diferencia de camino óptico entre los dos haces divididos en el punto A, unos con recorrido OACAD y otro con un camino OABA'D'. Ambos rayos al llegar a la cámara forman la denominada doble imagen.

Si se considera que cada haz se puede representar de forma general como

$$u(\vec{r}, t) = |u(\vec{r}, t)| \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) = |u(\vec{r}, t)| e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (2.10)$$

y se llama u_u a la onda proveniente de E_2 y u_t (proveniente de E_1) la intensidad es igual a

$$I_1 = |u_u + u_t|^2 \quad (2.11)$$

En el detector se mide un valor promedio de $u^2(\vec{r}, t)$. En base de esto se puede determinar en términos de intensidad la interferencia de dos ondas sobre una pantalla como

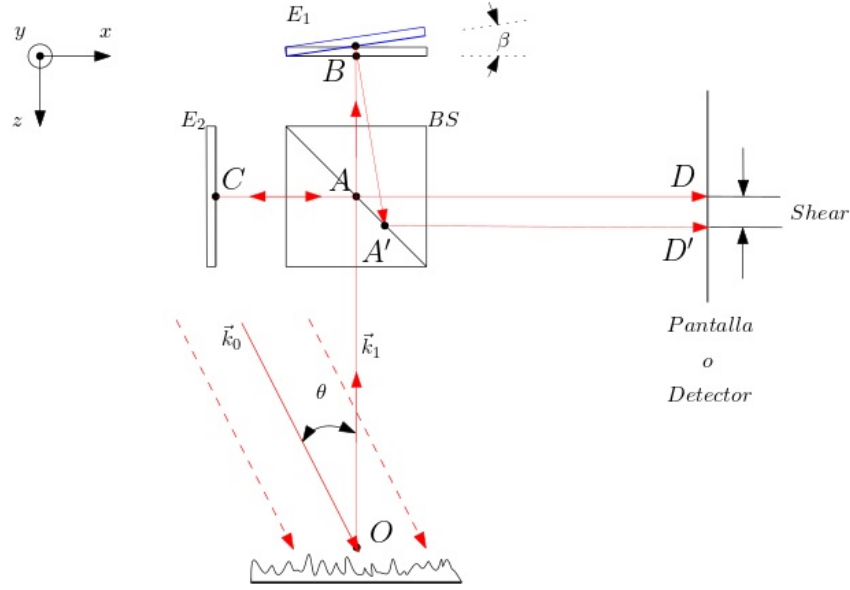


Figura 2.5. IM susceptible a deformaciones fuera de plano.

$$I_1(\phi) = I_u + I_t + 2\sqrt{I_u I_t} \cos(\phi) \quad (2.12)$$

Como se observa en esta ecuación la intensidad total conserva la información de la fase (ϕ) para dos ondas que interfieren, I_u e I_t . La fase en este caso representa la diferencia de camino óptico entre las dos ondas que llegan a la cámara y su valor esta dado por

$$\phi = \frac{2\pi(2d_1 - 2d_2)}{\lambda} = \frac{4\pi\delta}{\lambda} \quad (2.13)$$

Siendo d_1 y d_2 los brazos del *Michelson*, y λ la longitud de onda. Si estas distancias son iguales, es decir que el interferómetro posee sus brazos balanceados, la diferencia de fase es cero ($d_1 = d_2$). Tomando en cuenta el *shear* en la Ec. 2.12, la intensidad que llega al detector del objeto sin deformar es dada por

$$I_1(x, y) = I_u(x, y) + I_t(x - \Delta x, y) + 2\sqrt{I_u(x, y)I_t(x - \Delta x, y)} \cos[\phi_u(x, y) - \phi_t(x - \Delta x, y)] \quad (2.14)$$

La fase ϕ_u y ϕ_t son las distribuciones de fase de dos ondas que interfieren correspondientes a la onda que proviene del espejo sin y con inclinación. Asumiendo que el desplazamiento introducido Δx es pequeño en comparación con el tamaño promedio de un grano de *speckle*, se puede realizar la aproximación de diferencia finita de primer orden:

$$I_u(x, y) \approx I_t(x - \Delta x, y) \quad (2.15)$$

$$\phi_u((x, y) - \phi_t(x - \Delta x, y) \approx \frac{\partial \phi_u}{\partial x} \Delta x \quad (2.16)$$

Reemplazando en la Ec. 2.14 se tiene

$$I_1(x, y) \approx 2I_u(x, y) \left[1 + \cos \left(\frac{\partial \phi_u}{\partial x} \Delta x \right) \right] \quad (2.17)$$

Suponiendo que ahora el objeto sufre una deformación, la fase asociada cambia un $\Delta\phi(x, y)$, y la intensidad asociada a esta deformación que incide sobre el detector está dada por

$$\begin{aligned} I_2(x, y) &\approx 2I_u(x, y) [1 + \cos[\phi_u(x, y) - \Delta\phi(x, y) \\ &\quad - \phi_u(x - \Delta x, y) + \Delta\phi(x - \Delta x, y)]] \\ &\approx 2I_u(x, y) \left[1 + \cos \left(\frac{\partial \phi_u}{\partial x} \Delta x - \frac{\partial \Delta\phi}{\partial x} \Delta x \right) \right] \end{aligned} \quad (2.18)$$

Realizando la resta de los dos estados (sin deformar y deformado) y tomando el valor medio del módulo se tiene

$$|\overline{I_1(x, y) - I_2(x, y)}| = 2\bar{I}_u(x, y) \left| \sin \left(\frac{1}{2} \frac{\partial \Delta\phi}{\partial x} \Delta x \right) \right| \quad (2.19)$$

Donde I_u y ϕ_u son estadísticamente variables aleatorias independientes y que el $\frac{\partial \phi_u}{\partial x} \cdot \Delta x$ es distribuida uniformemente entre $(-\pi, \pi)$. La magnitud promedio de la diferencia de camino depende de la pendiente de $\Delta\phi$ en la dirección x. La diferencia de fase propiamente dicha es introducida por la rotación de uno de los espejos en la dirección x. La Ec. 2.19 es una función periódica con mínimos y máximos que se pueden encontrar cuando

$$\frac{\partial \Delta\phi}{\partial x} = \frac{2n\pi}{\Delta x} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial \Delta\phi}{\partial x} = \frac{(2n+1)\pi}{\Delta x} \quad (2.21)$$

Realizando la resta de los valores de intensidad de dos patrones de *speckle* Ec. 2.19, se obtiene como resultado un interferograma en el cual se observan franjas oscuras y claras que se conoce como mapa de franjas de fases o brevemente shearograma, y contiene

información de la deformación de la superficie, ver el interferograma correspondiente en la figura 2.6. Cada franja representa una zona en la que el gradiente de desplazamiento se mantiene constante.

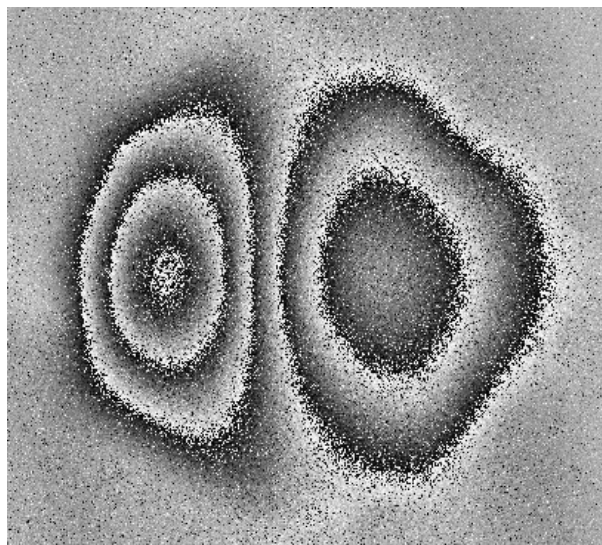


Figura 2.6. Mapa de franjas.

2.2.4 Shearografía digital (DS) para deformaciones fuera de plano

Bajo esta condición, el shearograma de una deformación simple fuera de plano (un valle o una cresta) se verá como la figura 2.7.

Primero se obtendrá la ecuación que se usa con mayor frecuencia para la interpretación de los resultados en shearografía. Posteriormente, se harán las simplificaciones necesarias para retener la componente fuera de plano. La diferencia de fase es proporcional a la diferencia de longitudes de camino óptico de dos ondas que interfieren en un punto de la imagen. En shearografía, éstos son los caminos de dos puntos del objeto que están separados por la traslación (*shear*) Δx , figura 2.8.

Se calculará la diferencia de fase entre el camino que recorre la luz pasando por un punto general P y el camino a través de su contraparte trasladada P_S para ambos estados, el de referencia y el deformado. La resta de esas diferencias de fase conducirán entonces a la diferencia de fase causada por la deformación del objeto.

Se consideran los caminos ópticos desde la fuente de luz hacia los dos puntos P y P_S , cuya imagen se forma sobre un punto en el plano imagen luego de pasar por el dispositivo de desdoblamiento y traslación de imagen. Esos dos caminos ópticos no tienen la misma

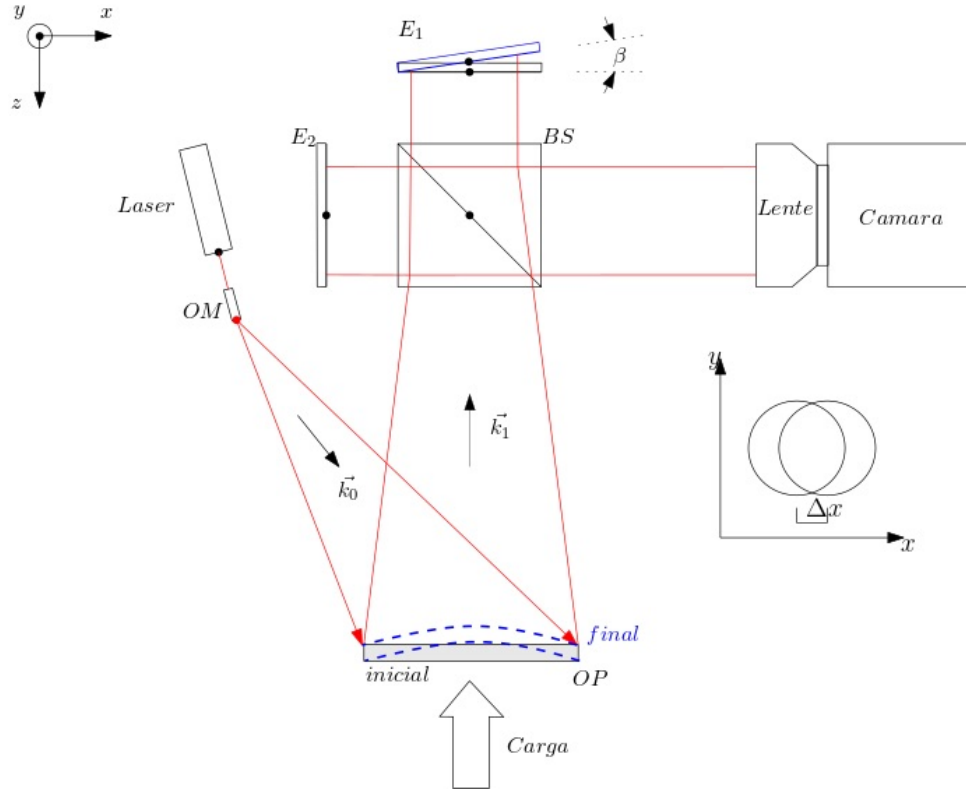


Figura 2.7. IM susceptible a deformaciones fuera de plano. Sistema de Shearografía elemental

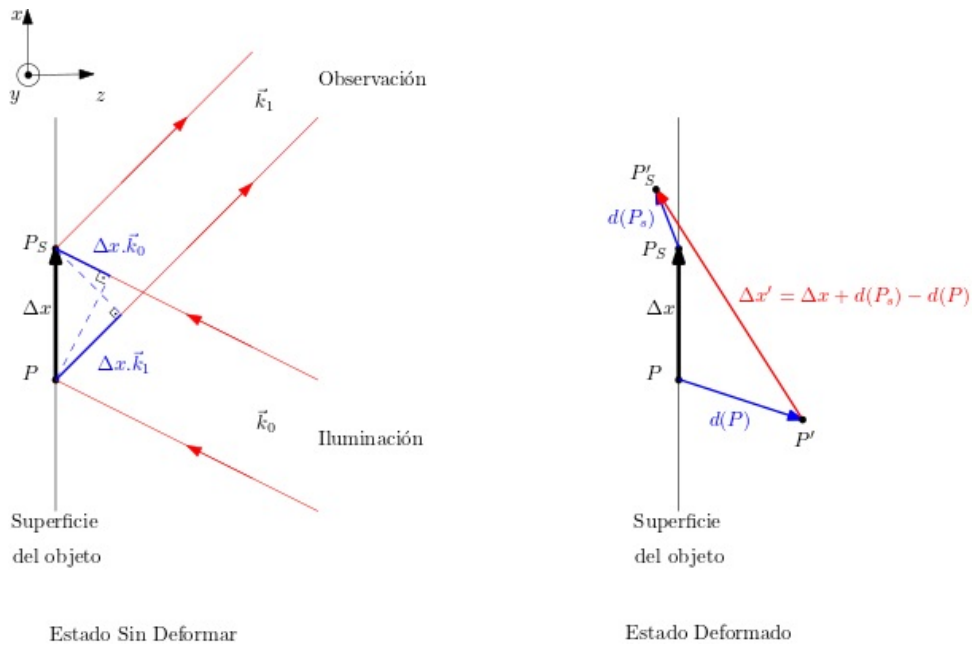


Figura 2.8. Comparación entre estado sin deformar y deformado.

longitud.

En el estado de referencia, la diferencia de fase de estas dos longitudes de camino

diferentes resulta ser:

$$\Delta\phi_{ref} = (\vec{\Delta x} \cdot \vec{k}_0 - \vec{\Delta x} \cdot \vec{k}_1) = \vec{\Delta x} \cdot (\vec{k}_0 - \vec{k}_1) \quad (2.22)$$

donde $\vec{k}_0$ y $\vec{k}_1$ son los vectores de onda, es decir vectores orientados en la dirección de iluminación y de observación respectivamente, ver figura 2.8 estado sin deformar. El módulo de estos vectores es

$$|\vec{k}_{0,1}| = (2\pi/\lambda) \cdot |\hat{n}_{0,1}| \quad (2.23)$$

donde $\hat{n}_0$ y $\hat{n}_1$ son los versores directores de modulo uno de iluminación y observación respectivamente. Cabe aclarar que $\vec{\Delta x}$, el vector de traslación, no está necesariamente orientado en la dirección x , éste también puede tener componente en la dirección y .

Al generar una deformación en el objeto, los puntos P y P_s se desplazarán hacia las posiciones P' y P'_s respectivamente, como se observa en la figura 2.8 estado deformado. A partir de estos desplazamientos podemos escribir los vectores desplazamiento $\vec{d}(P)$ y $\vec{d}(P_s)$. El vector entre estos puntos desplazados es

$$\vec{\Delta x'} = (\vec{\Delta x} + \vec{d}(\vec{P}_s) - \vec{d}(\vec{P})) \quad (2.24)$$

y la diferencia de fase en el estado deformado es, por analogía a la del estado de referencia, Ec. 2.22,

$$\Delta\phi_d = (\vec{\Delta x'} \cdot \vec{k}_0 - \vec{\Delta x'} \cdot \vec{k}_1) = \vec{\Delta x'} \cdot (\vec{k}_0 - \vec{k}_1) \quad (2.25)$$

$$\Delta\phi_d = [\vec{\Delta x} + \vec{d}(\vec{P}_s) - \vec{d}(\vec{P})] \cdot (\vec{k}_0 - \vec{k}_1) \quad (2.26)$$

La diferencia de fase que resulta de la deformación del objeto es calculada mediante la resta de la diferencia de fase del estado deformado y la diferencia de fase del estado de referencia

$$\Delta\phi = \Delta\phi_d - \Delta\phi_{ref} = [\vec{d}(\vec{P}_s) - \vec{d}(\vec{P})] \cdot (\vec{k}_0 - \vec{k}_1) \quad (2.27)$$

Se define el vector de susceptibilidad

$$\vec{k} = \vec{k}_0 - \vec{k}_1 = [k_x \ k_y \ k_z] \quad (2.28)$$

y la diferencia de desplazamiento

$$\vec{\Delta d} = [d(\vec{P}_s) - d(\vec{P})] \quad (2.29)$$

El término $\vec{\Delta d}$ se puede desarrollar mediante una serie de Taylor, considerando el corrimiento lateral o *shear* como el módulo $|\Delta x|$, lo cual resulta en

$$\vec{\Delta d} = \frac{\partial \vec{d}}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{d}}{\partial x^2} \cdot \Delta x^2 + \frac{1}{6} \cdot \frac{\partial^3 \vec{d}}{\partial x^3} \cdot \Delta x^3 + \dots \quad (2.30)$$

Despreciando los términos de orden superior en la serie de Taylor para obtener una relación lineal entre el gradiente de desplazamiento y el *shear*, se obtiene

$$\Delta \phi = \vec{k} \cdot \vec{\Delta d} = \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{d}}{\partial x} \cdot \Delta x = (k_x \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + k_y \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + k_z \cdot \frac{\partial w}{\partial x}) \cdot \Delta x \quad (2.31)$$

donde $\vec{d} = [u \ v \ w]$ es el vector desplazamiento en P .

Esta última ecuación muestra que la diferencia de fase medida con la shearografía depende de tres factores:

1. las tres componentes $\partial u/\partial x$, $\partial v/\partial x$ y $\partial w/\partial x$ que representan la derivada de la deformación del objeto a lo largo de la dirección del *shear* x .
2. las direcciones de observación e iluminación y la longitud de onda del láser, que determinan el vector de susceptibilidad $\hat{k}$.
3. la distancia de traslación o *shear*.

Es por esto último que la sensibilidad de medición del método se puede ajustar variando la distancia de traslación. Siguiendo el esquema de la figura 2.5, el vector iluminación $\vec{k}$ y el ángulo θ se relacionan de la siguiente manera

$$\vec{k} = (2\pi/\lambda) \cdot [\sin(\theta), 0, 1 + \cos(\theta)] \quad (2.32)$$

Si θ es cercano a 0 (el haz incidente y reflejado es cercano a la normal a la superficie), la Ec. 2.31 se puede aproximar como

$$\Delta \phi = (2\pi/\lambda) \cdot [\sin(\theta) \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + 0 \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + (1 + \cos(\theta)) \cdot \frac{\partial w}{\partial x}] \cdot \Delta x \approx \frac{4\pi \Delta x}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.33)$$

Esta ecuación establece la condición para detectar deformaciones fuera de plano. La Ec. 2.33 puede ser relacionada con el tensor de deformaciones dado por la Ec. 2.1 donde si se reescribe dicho tensor y se utiliza (x, y, z) como sistema de ejes cartesianos y el vector desplazamiento como $\vec{d} = [u, v, w]$ nos queda

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_{yy} & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Como se observa en la Ec 2.34 (componente recuadrada) para un interferómetro sensible a deformaciones fuera de plano, solo podemos registrar una componente del gradiente de desplazamiento. En el caso de querer evaluar otras componentes del tensor de deformaciones se puede consultar los trabajos realizados por diversos investigadores (D. Francis, R. P. Tatam y R. M. Groves, 2010), (S. Waldner y R. P. Tatam, s.f.), (y S. Brem, s.f.) y (R. Kä, E. Hack y U. Sennhauser, 1999).

2.2.5 Cambio de fase espacial (SPS)

Dado que los patrones de franjas o interferogramas están modulados por el speckle, es difícil determinar los máximos y mínimos de intensidad dados por las Ecs. 2.20 y 2.21. Para obtener el mapa de fase de los interferogramas se ha considerado el método de Transformada de Fourier o Portadora de Fase Espacial, en combinación con un procesamiento de detección. Esta técnica fue introducida por Takeda, Ina y Kobayashi en 1982 (M. Takeda, H. Ina y S. Kobayashi, 1982) para su aplicación a interferometría y hace uso de FT para obtener la frecuencia portadora espacial f_0 , y posteriormente filtrarla.

Las ventajas y desventajas relativas de la técnica de portadora espacial en comparación con otras técnicas se pueden resumir de la siguiente manera:

Ventajas

1. Solo se necesita un interferograma.
2. No se necesitan dispositivos especiales para la generación de la frecuencia portadora.

Desventajas

1. La matriz de detectores debe tener una resolución espacial alta.
2. La distribución espacial de las sensibilidades del detector debe ser uniforme en toda la matriz.

Se puede notar que los requisitos de la matriz de detectores (sensor) son más estrictos en la técnica SPS frente a otras. Esto puede haber limitado la utilidad de la técnica en el momento en que no se disponía de una matriz de detectores de este tipo, pero el rápido desarrollo en la tecnología de fabricación de sensores de imagen de alta resolución parece estar cambiando la situación a favor de la técnica de portadora espacial.

El principal problema en el análisis de un patrón de franjas es cómo obtener la información de la fase, separándola de la información que principalmente es ruido. Frente a otras técnicas, la portadora espacial requiere un procesamiento de señal mas laborioso ya que todas las señales se mezclan en las mismas coordenadas espaciales ([M. Takeda, 1990](#)).

En la figura [2.9](#) se puede observar que cuando dos ondas que forman un pequeño ángulo entre ellas llegan al sensor de la cámara, generan un cambio de fase lineal de pixel a pixel. En el interferómetro de Michelson (IM) el cambio de fase es introducido mediante la inclinación de uno de los espejos como ya se explico anteriormente. Se llama portadora de fase f_0 a esta variación de intensidad regular. De acuerdo a Ec. [2.12](#), su intensidad variará según la función coseno.

Un patrón de franjas se lo puede escribir como

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos[2\pi f_0 x + \phi(x, y)] \quad (2.35)$$

donde $\phi(x, y)$ contiene la información deseada (fase), y $a(x, y)$ y $b(x, y)$ representan las variaciones de intensidad no deseadas que surgen de la reflexión o transmisión de luz no uniforme por un objeto. Si se toma la Ec. [2.12](#) estos términos no deseados serían $a(x, y) = I_u + I_t$ y $b(x, y) = \sqrt{I_u I_t}$ y en la mayoría de los casos estos términos varían suavemente comparado con la frecuencia portadora f_0 . Si este interferograma representado por Ec. [2.35](#) satisface el teorema del muestro de *Nyquist-Shannon* en la dirección en la que se introduce dicha portadora espacial (en particular en este caso, x), el mismo se

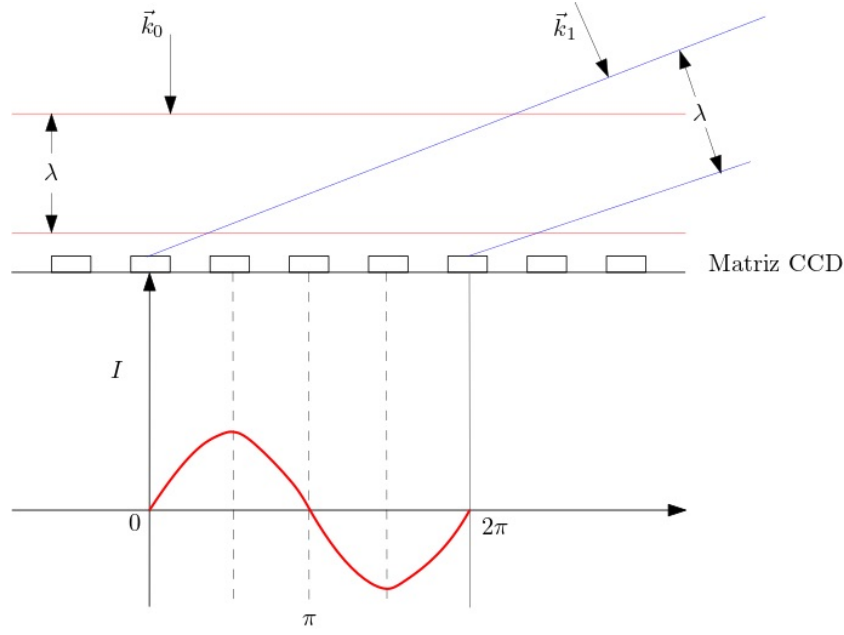


Figura 2.9. Formación de f_0 en el sensor de una cámara.

puede reescribir según

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \cdot \exp(2\pi i f_0 x) + c^*(x, y) \cdot \exp(-2\pi i f_0 x) \quad (2.36)$$

$$\text{con } c(x, y) = \frac{1}{2} \cdot b(x, y) \cdot \exp(i\phi(x, y))$$

donde $*$ denota el complejo conjugado. Si se hace una transformada de Fourier (FT) de la Ec. 2.36 con respecto a x , por medio del uso del algoritmo transformada rápida de Fourier (FFT), se obtiene

$$G(f_x, y) = A(f_x, y) + C(f_x - f_0, y) + C^*(f_x + f_0, y) \quad (2.37)$$

Como f_0 varía más rápidamente que los otros términos, el espectro de Fourier puede ser separado como se muestra en la figura 2.10.

En esta figura la zona central contiene los términos de orden cero, es decir la suma de las variaciones espaciales. Alrededor del término de orden cero se encuentra la distribución de fondo. La información de la fase se encuentra en los dos términos laterales, separados equidistantes del centro un valor f_0 , tal como se indica en la Ec. 2.37. Para obtener la fase se puede hacer uso de uno de los dos espectros portadores laterales. Si se elige $C(f_x - f_0, y)$ y se lo traslada un valor f_0 en el eje de las frecuencias hacia el origen, se obtiene $C(f_x, y)$. Esta operación se puede realizar aplicando el filtro $H(f_x - f_0, y)$ como se observa en la

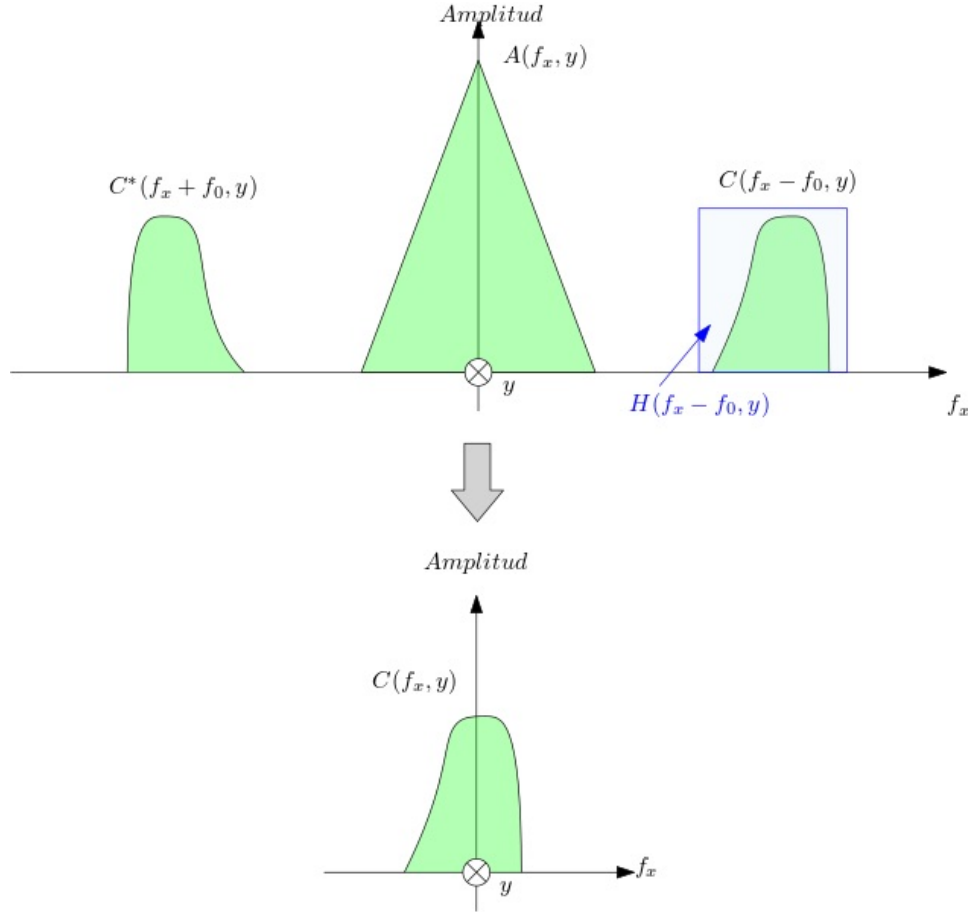


Figura 2.10. Espectro de frecuencia espacial en el dominio de Fourier (1D) de un interferograma.

figura 2.10. Es decir que con este procedimiento se logra remover la frecuencia portadora. Al aplicar la anti transformada de Fourier (IFT) a $C(f_x, y)$ con respecto a f_x , obtenemos $c(x, y)$, el cual estaba definido previamente por la Ec. 2.36. Existen dos alternativas para determinar la fase ϕ , la primera es calculando el logaritmo complejo tenemos:

$$\log[c(x, y)] = \log\left[\frac{1}{2} \cdot b(x, y)\right] + i\phi(x, y) \quad (2.38)$$

Con el procedimiento descrito se obtiene la fase en su parte imaginaria, separada de la no deseada variación de amplitud $b(x, y)$ en la parte real. La otra alternativa es por medio de la tangente inversa, realizando el cociente entre la parte real y la imaginaria, según la siguiente ecuación.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{\Re[c(x, y)]}{\Im[c(x, y)]}\right) \quad (2.39)$$

La fase que se obtiene se encuentra envuelta en un factor de 2π , ya que en la tangente inversa sus valores están entre $(-\pi, +\pi)$ y cada vez que la fase llega a uno de estos dos

valores ésta da saltos hacia el otro valor, generando lo que se conoce como fase envuelta (ve en el apéndice II la figura 8.4). Para desenvolver la fase se emplean algoritmos de desenvolvimiento. Una de las desventajas de esta técnica al aplicar el procedimiento a un patrón de franjas en dos dimensiones es que requiere que la frecuencia portadora se mantenga constante a través de toda la imagen, es decir, que las franjas se mantengan alineadas (D. Francis, R. P. Tatam y R. M. Groves, 2010). Desafortunadamente, para la aplicación de esta técnica, el método de shearografía proporciona franjas con curvaturas, lo cual produce distorsiones en la modulación de la fase y por lo tanto resulta un error en el procesamiento de los datos. Sin embargo, los resultados que se obtienen no dejan de ser interesantes para la evaluación de defectos en materiales. En los capítulos siguientes se abordara este problema y se exploran soluciones para implementar SPS a DS.

3. Evaluación experimental de 2 configuraciones basadas en un Interferómetro de *Michelson* (IM)

En este capítulo, se abordan diversas facetas relacionadas con la configuración y aplicación de técnicas de cambio de fase espacial (SPS). Se presentan tres configuraciones de shearógrafo basadas en un interferómetro de *Michelson*: la básica y dos variantes propuestas, todas ellas sensibles a deformaciones fuera de plano.

El enfoque se extiende hacia el análisis de las capacidades y limitaciones intrínsecas de cada configuración en el contexto del uso de SPS.

Los experimentos se llevan a cabo en un entorno de laboratorio utilizando un dispositivo de prueba específicamente diseñado para refinar la técnica SPS. Esto sugiere una fase de ajuste y optimización antes de la aplicación en escenarios del mundo real, fortaleciendo la confiabilidad y efectividad de la técnica.

Adicionalmente, el capítulo profundiza en el procesamiento digital de imágenes en dos dominios distintos: el dominio de frecuencias y el dominio espacial. En el primero, se exploran técnicas como la transformada de Fourier para analizar los patrones de interferencia capturados en las imágenes. En el segundo, se aborda el análisis de la distribución de fase en la imagen en su forma original.

La meta del procesamiento digital en estos dominios es la obtención de mapas de fase envuelta de alta calidad, ya que estos mapas proporcionan información detallada sobre desplazamientos o deformaciones en objetos o superficies estudiadas.

Finalmente, el capítulo concluye con una comparativa exhaustiva entre las configuraciones experimentales y un dispositivo comercial de referencia conocido como LTI. A través de esta comparación, se pueden destacar las fortalezas y debilidades relativas de las diferentes configuraciones y su desempeño en comparación con tecnologías establecidas.

3.1 Variantes del DS basado en un interferómetro de *Michelson*

En la bibliografía se pueden encontrar diversos interferómetros para implementar SPS. Por ej. el de Pedrini, Zhou y Tiziani ([G. Pedrini, Y. L. Zou y H. J. Tiziani, 1996](#)) que utiliza un interferómetro tipo Mach-Zehnder como base. Entre estos se eligió aquellas

con un IM como base, ya que comparando las ventajas y desventajas deja al shearógrafo IM como la opción más robusta. Entonces, partiendo de este interferómetro como base, muchos autores propusieron diversas variaciones al mismo. Una de ellas es la conocida como Temporal phase shifting (TPS) la cual se puede consultar en el apéndice 8.1.1.

En primer lugar se analizó la propuesta realizada por Kaufmann y col. (J. Takezaki y Y. Y. Hung, 1986), (A. Dá, G. H. Kaufmann y C. Pérez López, 1998), (R. A. Martínez-Celorio, A. Dá, G. H. Kaufmann y G. Mendiola, 2000) y (R. A. Martínez-Celorio, R. González-Peña, R. Cibrián, R. Salvador, M. F. Mínguez y L. Martí-López, 2010) que se llamará desde ahora *Generación de Franjas Portadoras* (GFP). En segundo lugar se estudió la propuesta realizada por Xie y otros autores (G. Pedrini, Y. L. Zou y H. J. Tiziani, 1996), (S. Wu, X. He y L. Yang, 2011), (X. Xie, L. Yang, N. Xu y X. Chen, 2013), (X. Xie, Y. Zheng, X. Li, B. Sia, P. Zhong, G. Yang y L. Yang, 2014), (X. Xie, J. Li, B. Zhang, L. Yan y L. Yang, 2015) y (X. Xie, X. Li, X. Chen y L. Yang, 2015) donde se introduce lo que se denomina un sistema 4f aumentando la complejidad del dispositivo experimental pero extendiendo el campo de inspección del SPS.

3.1.1 Generación de Franjas Portadoras (GFP)

En primer lugar estudiaremos la formación del patrón de interferencia en el dispositivo propuesto. Luego cómo se generan las franjas portadoras y calculan algunos parámetros; y finalmente el análisis del interferograma obtenido.

En la figura 3.1 se puede ver la configuración del shearógrafo utilizado en esta técnica. Es similar al de la figura 2.7 pero con la diferencia de que la fuente de iluminación se puede desplazar en la dirección de iluminación. Esto se realiza para obtener una diferencia de fase adicional lo que genera un sistema de franjas portadoras, las que dan origen al nombre de la técnica. Como ya se explicó en el capítulo 1.4, al sensor de la cámara llega una doble imagen cuya intensidad se la puede expresar como

$$I_1 = 2I_0(1 + \cos \phi_r) \quad (3.1)$$

Dicha ecuación es válida si el divisor de haz es 50/50 (refleja el 50 % de la intensidad y deja pasar el otro 50 %), donde ϕ_r es la fase aleatoria introducida por la iluminación dispersada sobre el objeto. Esta es la intensidad de referencia obtenida de la superficie

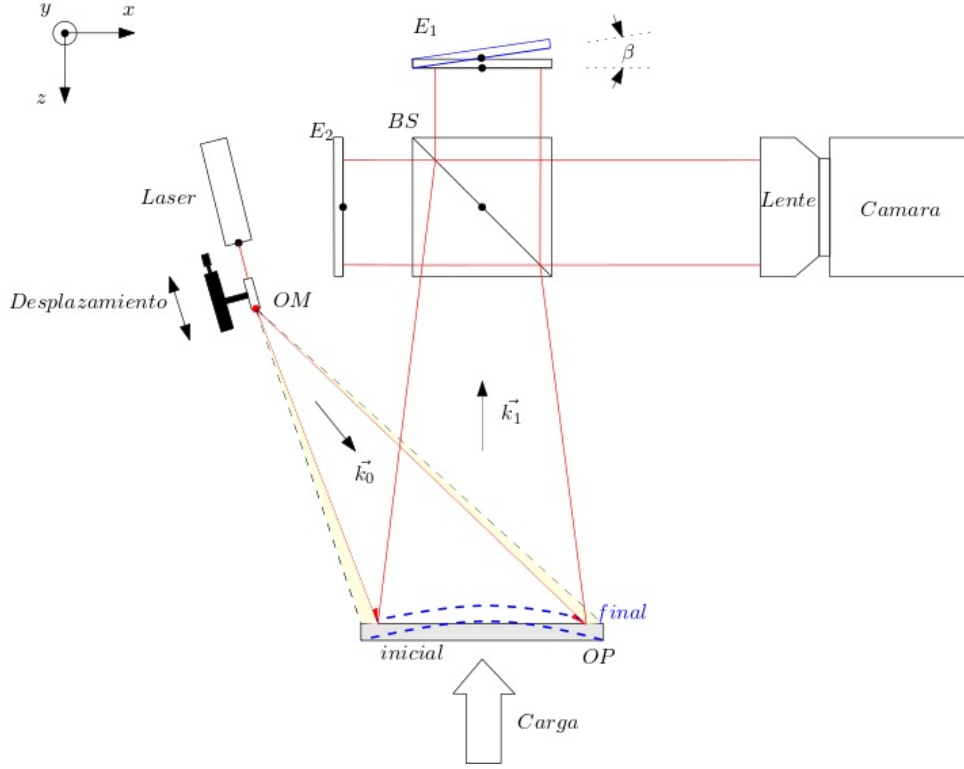


Figura 3.1. Esquema de DS haciendo uso de GFP, basado en un *Michelson*.

sin haber sufrido ninguna modificación. Luego se la somete a algún esfuerzo de manera que se produzca en la superficie una deformación fuera de plano. Se suma a esto un desplazamiento de la fuente de iluminación deslizando el Objetivo de Microscopio (OM). Ambas acciones introducirán una diferencia de fase adicional resultando la intensidad

$$I_2 = 2I_0[1 + \cos(\phi_r + \Delta\phi_c + \Delta\phi_d)] \quad (3.2)$$

donde $\Delta\phi_c$ es la fase introducida por las franjas portadoras y $\Delta\phi_d$ es la fase introducida debido al desplazamiento fuera de plano (A. Dá, G. H. Kaufmann y C. Pérez López, 1998). Como el espaciado de las franjas está determinado por los términos de fase de las Ecs. 3.1 y 3.2, se omitirán los efectos de la amplitud aleatoria introducidos por I_0 para simplificar los análisis subsecuentes. Obtenidas las dos intensidades se las correlaciona realizando una sustracción pixel a pixel. Se obtiene entonces

$$I_t = (I_1 - I_2)^2 = \left[4I_0 \sin\left(\phi_r + \frac{\Delta\phi_c + \Delta\phi_d}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\phi_c + \Delta\phi_d}{2}\right) \right]^2 \quad (3.3)$$

La diferencia de fase $\Delta\phi_d$ introducida por la deformación w está dada por la Ec. 2.33,

para condiciones de deformaciones fuera de plano. Por otro lado, para poder establecer $\Delta\phi_d$ en la Ec. 3.3 es necesario definir $\Delta\phi_c$. Para ello se plantea una función cuadrática para el cambio de fase de manera que la derivada sea lineal. Esto se logra trasladando OM en el dispositivo óptico de la figura 3.1 como se mostrará a continuación. Luego de pasar el haz laser por el OM empleado para la iluminación, se genera un frente de onda esférico. Si el ángulo sólido subtendido por la superficie es lo suficientemente pequeño, se puede utilizar una aproximación parabólica para este frente. Por lo tanto, el desplazamiento de la fuente de iluminación introduce un cambio en el camino óptico que puede ser expresado como (J. Takezaki y Y. Y. Hung, 1986)

$$\Delta W = \frac{x^2 + y^2}{2} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.4)$$

Donde R_1 y R_2 son el primer y segundo radio de curvatura, respectivamente, del frente de onda de iluminación antes y después del desplazamiento de OM. Si el factor de magnificación introducido por la geometría del pixel de la cámara es denotada por M y el ángulo entre la observación y la iluminación es cercano a cero, la Ec. 2.33 se la puede expresar como

$$\Delta\phi_c = \frac{\partial(\Delta W)}{\partial x} = M x \Delta x \frac{R_1 - R_2}{R_1 R_2} \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.5)$$

Cuando solamente se desplaza la fuente sin deformar la muestra, es decir $\Delta\phi_d = 0$, se pueden ver las franjas portadoras generadas y encontrar el espaciado x_0 de las mismas. De la ecuación 3.3 surge que los mínimos se encuentran cuando

$$\Delta\phi_c/2 = m\pi \quad (3.6)$$

Si ésta se reemplaza dentro de la Ec. 3.5 y se asume que R_1 y R_2 son mucho más grandes que $|R_1 - R_2|$, entonces $R_2 \approx R_1 \approx R$ y reemplazando $R_1 - R_2$ por d , que denota el desplazamiento de OM, se obtiene

$$x_0 \approx \frac{R^2 \lambda}{M d \Delta x} \quad (3.7)$$

3.1.2 Extracción de la fase en GFP

Para el análisis de los patrones de franjas se hace uso de la técnica *Spatial Synchronous Detection* (SSD). La misma tiene varios nombres los cuales pueden ser consultados en (A. Dá, G. H. Kaufmann y C. Pérez López, 1998). El procedimiento básico de esta técnica consta de introducir franjas portadoras para obtener la fase de la señal. Se puede describir este problema por medio de la Ec. 3.3 donde se la reescribe en términos de funciones exponenciales complejas

$$I_t = 8I_0^2 \sin^2 \left(\phi_r + \frac{\Delta\phi_c + \Delta\phi_d}{2} \right) \cdot \left\{ 1 - \frac{\exp[-i(\Delta\phi_c + \Delta\phi_d)] + \exp[i(\Delta\phi_c + \Delta\phi_d)]}{2} \right\} \quad (3.8)$$

Los dos últimos términos de fase simétrica incluyen el término de la fase portadora que podría interpretarse como el haz de referencia en el registro del shearograma. Multiplicando a Ec. 3.8 por $\exp(-i\Delta\phi_c)$ se tiene

$$\hat{I}_t = 4I_0^2 \sin^2 \left(\phi_r + \frac{\Delta\phi_c + \Delta\phi_d}{2} \right) \{ 2 \exp(-i \Delta\phi_c) - \exp[-i(2\Delta\phi_c + \Delta\phi_d)] - \exp(i \Delta\phi_d) \} \quad (3.9)$$

Donde el termino $\sin^2$ incluye la fase del ruido aleatorio ϕ_r . Los dos primeros términos entre llaves son los que contienen información de la frecuencia portadora, $\Delta\phi_c$ y $2\Delta\phi_c$, y el último término está centrado alrededor del origen de frecuencias. Los dos primeros términos pueden ser separados por medio de un filtro pasa bajo en el espacio o en el dominio de frecuencias dado que son funciones que varían rápidamente frente al tercer término. Esto es así si se cumple $\phi_c \gg \partial(\Delta\phi_d)/\partial x$. Para el caso de aplicar un *shear* en x, la generación de franjas introducidas al sistema son verticales y para poder aplicar SSD, los patrones de *speckle* deben ser filtrados primero por un filtro de Fourier de umbralizado (selectivo en intensidad) y luego por un filtro pasa bajo (selectivo en frecuencia). Por último cada una de estas N franjas verticales deber ser procesadas de forma aislada (A. Dá, G. H. Kaufmann y C. Pérez López, 1998). Para ello se definen los siguientes productos:

$$S_n(x) = \bar{I}_{12} \sin(2\pi x f_c) \quad (3.10)$$

$$C_n(x) = \bar{I}_{12} \cos(2\pi x f_c) \quad (3.11)$$

donde la intensidad $\bar{I}_{12}$ corresponde a la intensidad $\hat{I}_t$ luego de haber sido filtrada por el filtro selectivo en potencia y el filtro selectivo en frecuencias. El subíndice n es entero y su rango va desde 0 a N y denota la franja analizada, f_c es la frecuencia de las franjas portadoras sin deformar. Después de aplicar el filtro pasa bajo a las líneas o columnas del sherograma ya procesado, y eliminando el factor de corrimiento introducido por la frecuencia f_c las Ec. 3.10 y Ec. 3.11, se obtienen $\bar{S}_n$ y $\bar{C}_n$ respectivamente, y se puede obtener la fase envuelta de la señal mediante

$$\phi_n(x) = \arctan \left[\frac{\bar{S}_n(x)}{\bar{C}_n(x)} \right] \quad (3.12)$$

El método SSD es, por lo tanto, bastante simple de aplicar cuando solo se dispone de un único patrón de franjas y permite el cálculo del mapa de fase sin ambigüedad de signo.

3.1.3 Sistema 4f

En este apartado se describirá la segunda variante del dispositivo básico propuesta por Wu (S. Wu, X. He y L. Yang, 2011) y mejorada por Xie (X. Xie, L. Yang, N. Xu y X. Chen, 2013) donde introduce lo que se denomina un sistema 4f. Una de las desventajas de los shearógrafos IM es que tiene altos requerimientos de resolución espacial para las cámaras digitales (X. Xie, L. Yang, N. Xu y X. Chen, 2013) y que el campo de visión está limitado a unos pocos grados (S. Wu, X. He y L. Yang, 2011). Con el desarrollo tecnológico esto se pudo mejorar con cámaras de mayor resolución (píxeles más chicos), mejoras computacionales en los filtrados y la introducción de un sistema de lentes que amplían el campo de visión (S. Wu, X. He y L. Yang, 2011).

En la disposición óptica tradicional para un shearógrafo IM, la lente de formación de imágenes, L_{imagen} de la figura 2.7, se encuentra a la salida del interferómetro, justo antes de la cámara. Esto provoca que el ángulo de visión esté limitado por la estructura del IM. Como se muestra en la figura 3.2 se cambia la ubicación de esta lente y se la coloca a la entrada. Como esta lente formará la imagen muy lejos del sensor de la cámara, se inserta un sistema 4f para llevar la imagen formada por la lente L_{imagen} hasta el detector. El sistema 4f está compuesto de dos lentes idénticas, L_1 y L_2 , con los focos coincidentes, de

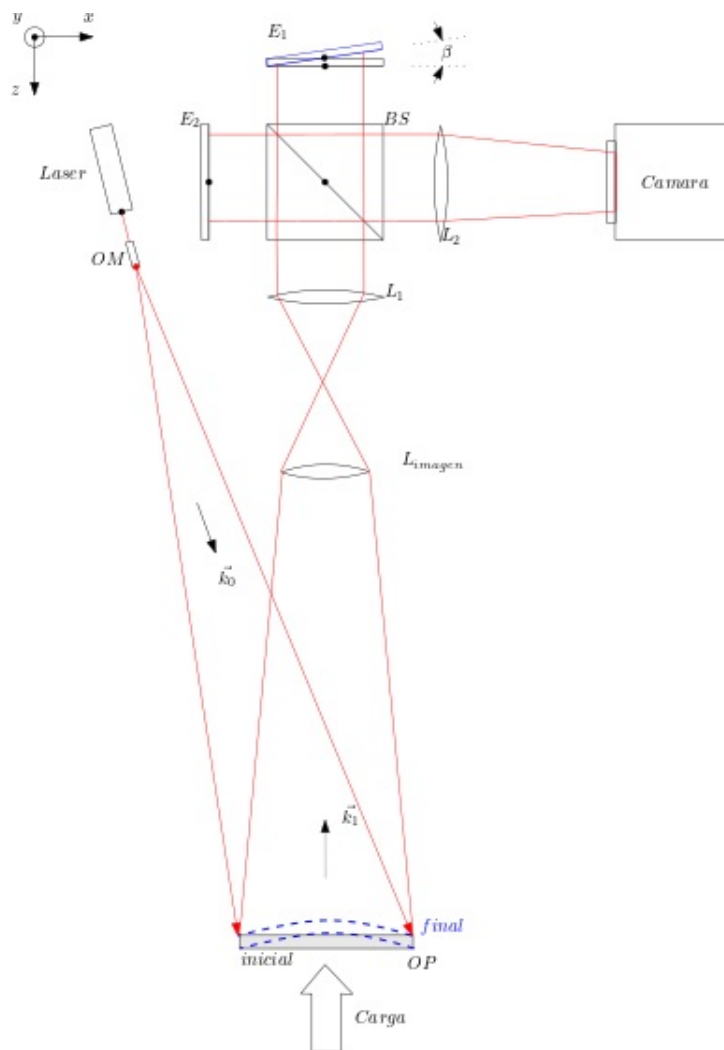


Figura 3.2. Esquema de DS haciendo uso de la configuración $4f$.

manera de trasladar la imagen formada sin variar su tamaño pero sí su orientación. Esto se logra dado que la imagen se ubica en el foco objeto de la primera lente y se vuelve a formar en el foco imagen de la segunda. Este sistema se esquematiza en la figura 3.3.

Siguiendo lo publicado por Feng (J. Feng, Y. Wang, X. Wang, S. Wu, L. Yang, 2015) el shearografo básico, presenta una limitación en su campo de visión o *field of view* (FOV), siendo el tamaño del cubo divisor de haz (BS) el elemento que restringe en mayor medida dicho campo. Es aquí donde aparece una importante ventaja del sistema $4f$ ya que mediante esta configuración es posible independizarse del tamaño del BS. Esto permite poder reducir el tamaño de la configuración óptica apreciablemente logrando un sistema DS encapsulado, donde los caminos ópticos se reducen notablemente y hace que el sistema sea mucho más estable en condiciones fuera de laboratorio.

En la figura 3.4(a), se esquematiza un shearografo basado en un IM básico, donde

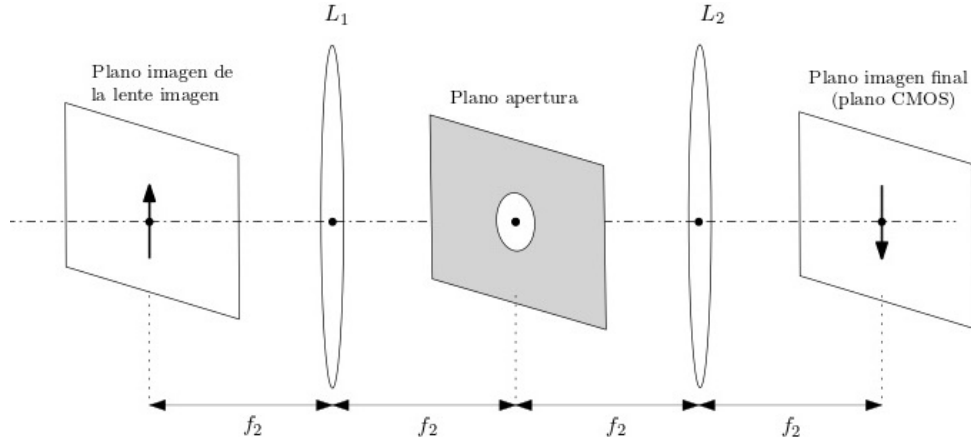


Figura 3.3. Esquema de DS haciendo uso de la configuración $4f$, basado en un IM.

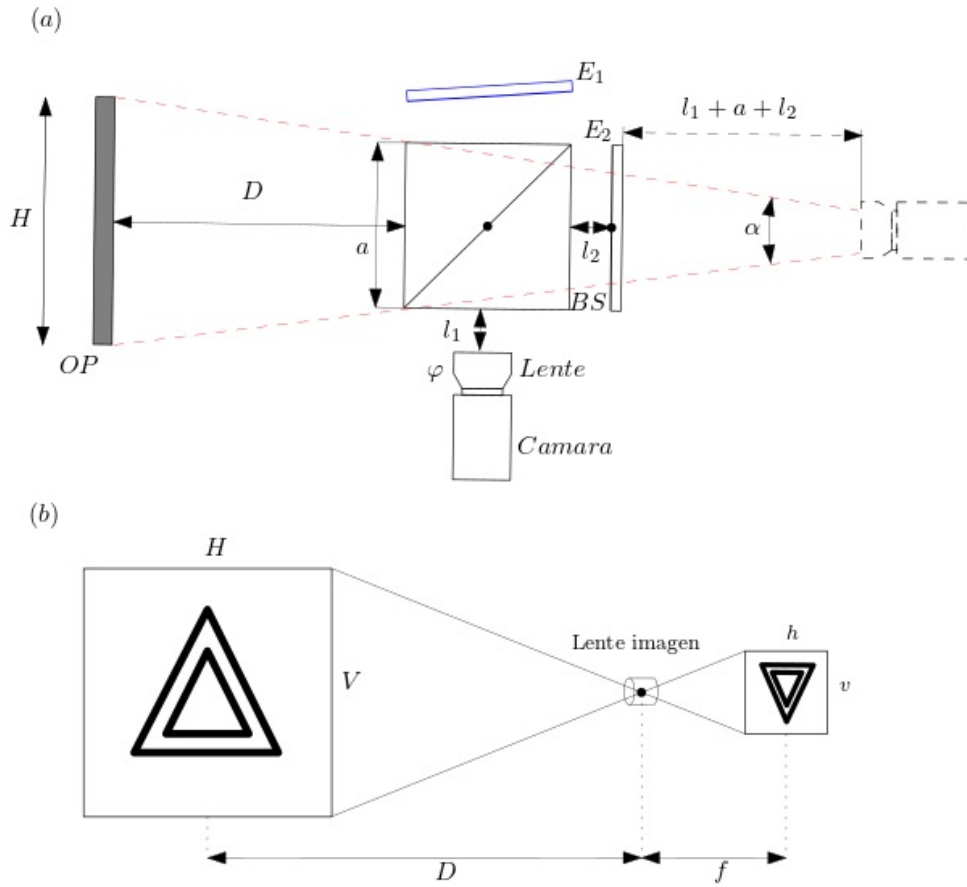


Figura 3.4. Esquema (a) evaluación del FOV de un interferómetro de *michelson*. Esquema (b) efecto del sistema $4f$ utilizado para calcular FOV.

se representa el ángulo α que determina el campo de visión (FOV) del sistema. En la misma se definen los siguientes parámetros: a es el tamaño del cubo divisor de haz, D es la distancia al objeto, H el ancho del objeto, l_1 es la distancia del cubo al conjunto lente - cámara, l_2 es la distancia del espejo E_2 al cubo y el termino φ es un factor que contempla restricciones introducidas por la lente de la cámara. De esta forma se puede

representar la formación de una imagen virtual (representada en forma punteada) donde se puede observar al ángulo asociado al FOV. Mediante un análisis geométrico se puede obtener una relación para calcular el campo de visión (S. Wu, X. He y L. Yang, 2011) (J. Feng, Y. Wang, X. Wang, S. Wu, L. Yang, 2015) dada por

$$\alpha = 2\arctan \left[\frac{a - \varphi}{2(2a + l_1 + 2l_2)} \right] \quad (3.13)$$

Si se desprecian los efectos de restricción que puedan introducir la lente y la cámara la Ec. 3.13 se reduce a

$$\alpha = 2\arctan \left[\frac{a}{2(2a + l_1 + 2l_2)} \right] \quad (3.14)$$

Realizando un análisis de FOV sobre el sistema $4f$, se llega a que éste depende solamente de la longitud focal de la lente imagen (f) y el tamaño del sensor de la cámara (h) (S. Wu, X. He y L. Yang, 2011) figura 3.4 (b). Esto queda expuesto en la siguiente ecuación

$$\alpha = 2\arctan \left[\frac{h}{2f} \right] \quad (3.15)$$

El sistema $4f$ también se puede considerar como una unidad en la cual se realiza una transformada de *Fourier* (FT) y transformada inversa de *Fourier* (IFT). Este fenómeno se explica con la figura 3.3. La imagen formada por la lente L_{imagen} se ubica en el plano focal objeto de L_1 . Ésta realiza la transformada de *Fourier* de la imagen ubicándola en el plano focal imagen de L_1 , que por construcción coincide con el plano focal objeto de L_2 . Esta segunda lente actúa realizando nuevamente una FT sobre la imagen lo cual es equivalente a realizarle una transformada inversa (A. Davila, J. M. Huntley, G. H. Kaufmann y D. Kerr, 2005), (S. Wu, X. He y L. Yang, 2011). Esta etapa descrita es conocida como sistema $4f$. Este sistema $4f$ se dispone en el IM de manera tal que el foco coincidente de las lentes, el que está entre las dos lentes, se ubique en la superficie de los espejos, haciendo que los espejos actúen como un filtro pasa bajo.

Otra cuestión a tener en cuenta es que el sistema devuelve una imagen invertida. Por otro lado, una de las desventajas es que el sistema $4f$ impacta en la intensidad, generando pérdidas en ella. Ambas cosas pueden ser corregidas por medio del procesamiento de las imágenes, y la calidad de la imagen puede ser mejorada mediante el empleo de lentes de *Fourier* de alta calidad (S. Wu, X. He y L. Yang, 2011).

La apertura que se encuentra colocada al frente de la lente imagen (figura 3.5) cumple la función de actuar como un filtro de Fourier. Este esquema actúa como un elemento que introduce al sistema una difracción del haz, de acuerdo al método de filtrado de campo completo o *whole-field filtering* (Sirohi R. S., 2016). Esta difracción origina halos circulares si la apertura es circular o rectangulares si la apertura es de tipo *slit*. En el espacio de frecuencias, se pueden observar estos halos, los cuales presentan órdenes. El orden cero es el que *no* contiene información de la fase y de la frecuencia portadora, y está asociado al primer término de la Ec. 2.36 o Ec. 2.37. El primer orden es el que contiene la información asociada tanto a la fase como a la frecuencia portadora f_0 . Es por ello que la elección del tamaño de la apertura es primordial para poder resolver el primer orden. Además hay que mencionar que cuando se introduce este sistema de filtrado aparecen en el espacio de frecuencias dentro del lóbulo de orden cero o central, franjas de *Young* de interferencia las cuales son introducidas al sistema por medio del *shear* (G. Pedrini, Y. L. Zou y H. J. Tiziani, 1996). En la figura 3.6 se representa el sistema $4f$ junto con la apertura cuya ubicación provoca una mayor pérdida de intensidad.

3.1.4 Descripción matemática del sistema $4f$

Al sensor de la cámara digital llegan dos frentes de onda, uno de referencia proveniente del espejo E_2 y otro que proviene de E_1 (figura 3.5). Si se establece un *shear* en la dirección x , los frentes de onda se pueden escribir como

$$\begin{aligned} u_u(x, y) &= |u_u(x, y)| \exp[i\phi(x, y)] \\ u_t(x, y) &= |u_u(x + \Delta x, y)| \exp[i\phi(x + \Delta x, y) + 2\pi i f_0 x] \end{aligned} \quad (3.16)$$

donde u_u y u_t son los dos frentes de onda reflejados por el espejo de referencia y el espejo inclinado (*tilt*), respectivamente. El valor de f_0 representa la componente de la frecuencia espacial introducida por el ángulo de inclinación del espejo que genera la doble imagen, y se puede expresar como

$$f_0 = \sin\beta/\lambda \quad (3.17)$$

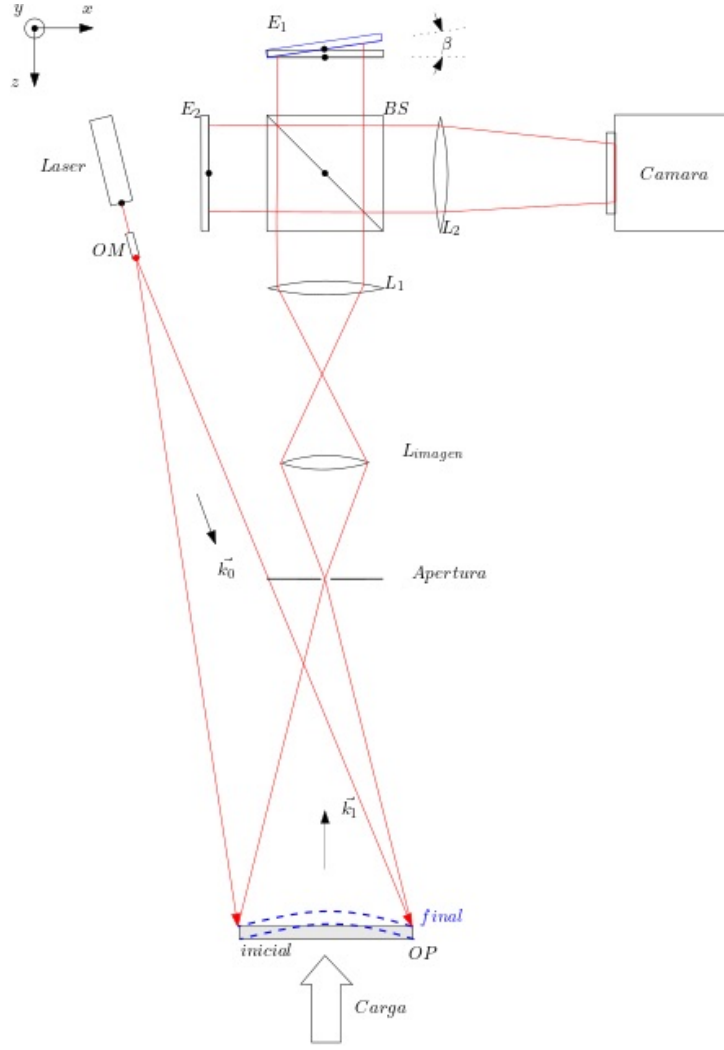


Figura 3.5. Esquema de DS haciendo uso de la configuración $4f$ con una apertura, basado en un IM.

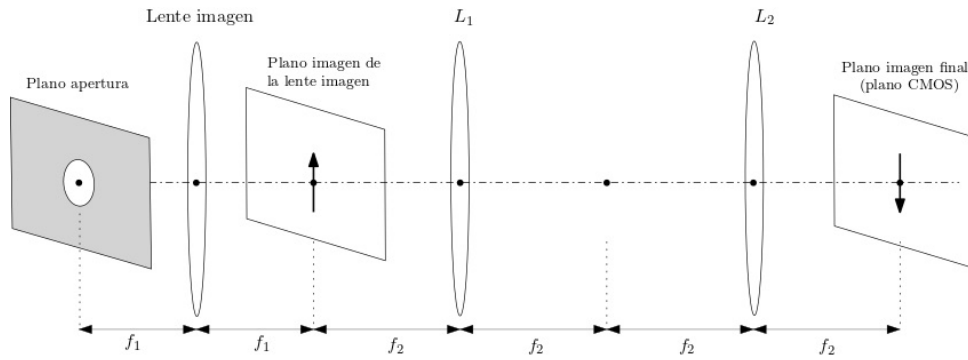


Figura 3.6. Esquema de DS haciendo uso de la configuración $4f$ con una apertura, basado en un *Michelson*.

λ es la longitud de onda del laser y β es el ángulo de *tilt* o *shearing* entre los dos espejos E_1 y E_2 (figura 3.5). La intensidad registrada por la cámara puede ser expresada como

$$I = (u_u + u_t)(u_u^* + u_t^*) = u_u u_u^* + u_t u_t^* + u_u u_t^* + u_t u_u^* \quad (3.18)$$

El $*$ denota el complejo conjugado de u_i . Si se sustituye la Ec. 3.16 en la Ec. 3.18 se obtiene

$$\begin{aligned}
 I = & |u_u(x, y)|^2 + |u_t(x + \Delta x, y)|^2 + |u_u(x, y)| \cdot |u_t(x + \Delta x, y)| \\
 & \times \exp\{i[\phi(x, y) - \phi(x + \Delta x, y) - 2\pi i f_0 x]\} + |u_u(x, y)| \cdot |u_t(x + \Delta x, y)| \\
 & \times \exp\{-i[\phi(x, y) - \phi(x + \Delta x, y) - 2\pi i f_0 x]\}
 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Cabe notar que los dos últimos términos de la Ec. 3.19 son los que contienen información concerniente a la diferencia de fase ($\Delta\phi$). Al aplicar la FT a la imagen se pasa del dominio espacial al dominio de frecuencias de Fourier. Realizando la FT a la Ec. 3.19 y utilizando la propiedad que la transformada del producto de dos funciones es la convolución entre las transformadas de las funciones, se tiene

$$\begin{aligned}
 FT\{I\} = & U_u(f_x, f_y) \otimes U_u^*(f_x, f_y) + U_t(f_x + f_0, f_y) \otimes U_t^*(f_x + f_0, f_y) \\
 & + U_u(f_x, f_y) \otimes U_t^*(f_x + f_0, f_y) + U_t(f_x + f_0, f_y) \otimes U_u^*(f_x, f_y)
 \end{aligned} \quad (3.20)$$

donde $U_u(f_x, f_y) = FT(u_u)$, $U_t(f_x + f_0, f_y) = FT(u_t)$.

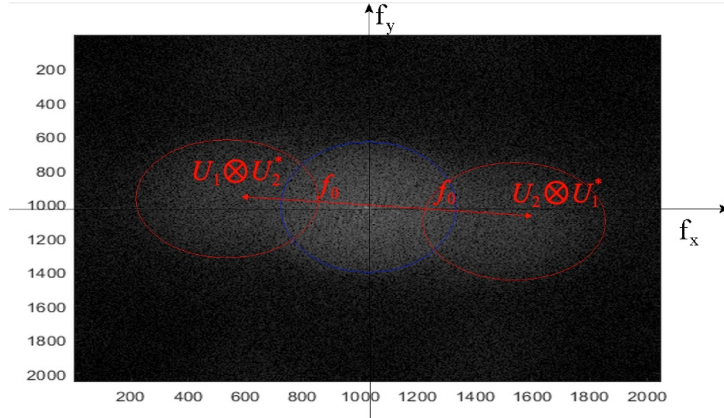


Figura 3.7. Espectro después de realizar la transformada de *Fourier* en un sistema $4f$ con apertura.

Los cuatro términos de la Ec. 3.20 son fácilmente identificables. Del espectro de Fourier estos cuatro términos son separados en tres partes. Los términos $U_u \otimes U_u^* + U_t \otimes U_t^*$ son principalmente términos de baja frecuencia del fondo de iluminación y están localizados en el centro del dominio de frecuencias. El término $U_t \otimes U_u^*$ localizado en $(f_0, 0)$ y el término $U_u \otimes U_t^*$ localizado en $(-f_0, 0)$, son los que contiene información de la fase (ver figura 3.7). Luego, se aplica adecuadamente una transformada inversa de Fourier con ventana, a la que se llama por sus siglas en ingles WIFT. El área que se quiere conservar

es la que contiene la información de la fase y puede ser circular o rectangular dependiendo de la apertura elegida. En la figura 3.7 se muestra el espectro de la intensidad cuando se utiliza una abertura circular. Se pueden distinguir dos lóbulos centrados en $\pm(f_0, 0)$. Una vez aislada la información asociada a la fase, se la calcula usando la Ec 2.39, la cual presenta un desplazamiento asociado a f_0 , esto es

$$[\phi + 2\pi x f_0] = \arctan \frac{\Im[u_t u_u^*]}{\Re[u_t u_u^*]} \quad (3.21)$$

donde ϕ responde a la diferencia de fase entre los dos haces de las dos imágenes de referencia.

Una vez deformada la superficie, ubicada en la parte inferior de la figura 3.2, realizando los mismos pasos hasta llegar a la Ec. 3.21, se puede obtener la distribución de fase, correspondiente a esta superficie. Entonces la diferencia de fase debida a la deformación puede ser calculada por

$$\Delta\phi = \phi - \phi' \quad (3.22)$$

A continuación se muestra un pseudocódigo que realiza los cálculos de lo anteriormente descrito, aunque faltan algunos parámetros que se desarrollan en el apartado siguiente.

Algoritmo 1: PROCESAMIENTO FT PARA DS EN SISTEMA 4F

Entrada: I_{ref} , I_{def}
Salida: $\Delta\phi$

```

1 inicio
2   Adquiero imagen de referencia  $I_{ref}$ 
3   Adquiero imagen deformada  $I_{def}$ 
4   Realizo la FFT a cada imagen
5    $FT\{I_{ref}\}$ 
6    $FT\{I_{def}\}$ 
7   si  $f_0 > 2f_c$  entonces
8     Aplico WIFT centrada en  $(f_0, 0)$ 
9      $\phi_{ref} + 2\pi x f_0$ 
10     $\phi'_{def} + 2\pi x f_0$ 
11  sinó
12    | Salida: Corregir la configuración del sistema óptico
13  fin
14   $\Delta\phi = \phi_{ref} - \phi'_{def}$ 
15   $\Delta\phi \leftarrow$  re envuelvo en módulo  $2\pi$  aplicado a  $\Delta\phi$ 
16 fin
17 devolver  $\Delta\phi$ 

```

3.1.5 Análisis de parámetros de control

La técnica de SPS tiene una relación Señal/Ruido (S/N) bastante menor comparada con otros métodos (X. Xie, L. Yang, N. Xu y X. Chen, 2013). Las dos principales razones que causan este resultado son: 1) SPS requiere que el tamaño del *speckle* sea grande, esto reduce la resolución espacial, 2) solo una pequeña parte del espectro en el dominio de frecuencias es utilizado para obtener la fase. Una buena alternativa para mejorar los problemas anteriormente planteados es usar sistemas ópticos optimizados para que la relación S/N sea lo más alta posible.

Como se mencionó previamente, el tamaño de la apertura puede ser ajustado para que se pueda tener el tamaño de grano de *speckle* deseado. Al mismo tiempo, el tamaño de la apertura debe ser tal que evite el solapamiento o *aliasing* en el dominio de las frecuencias al realizar la FT. Para controlar esto, se utiliza la frecuencia de corte espacial f_c que es una forma de cuantificar el objeto más pequeño que puede resolver un sistema óptico. Debido a la difracción en el plano de la imagen, todos los sistemas ópticos actúan como filtros pasa bajo con una capacidad limitada para resolver los detalles. En el presente dispositivo, la apertura, colocada antes de la lente formadora de la imagen, funciona como un filtro de frecuencia. La relación entre la frecuencia espacial de corte f_c y el tamaño de la apertura D esta dado por

$$f_c = D/(2\lambda f) \quad (3.23)$$

donde como ya se indicó λ es la longitud de onda y f es la distancia focal de la lente de la imagen.

La Figura 3.8 muestra un espectro ideal después de FT. En ella se puede ver las dos zonas laterales centradas en $\pm f_0$ que contienen la información deseada de la fase del shearograma. Para que estas últimas estén totalmente separadas de la zona central, la frecuencia portadora f_0 debe ser al menos el doble de la frecuencia de corte, o sea

$$f_0 \geq 2f_c \quad (3.24)$$

Combinando esta ecuación con 3.23 y 3.17 se tiene

$$\frac{\sin\beta}{\lambda} \leq 2\frac{D}{2\lambda f} \quad (3.25)$$

Despejando se obtiene una cota inferior para el ángulo de inclinación

$$\arcsin\left(\frac{D}{f}\right) \leq \beta \quad (3.26)$$

Sin embargo, este ángulo no puede ser demasiado grande debido a la limitación de la frecuencia espacial máxima de la cámara, que alcanza su máximo cuando $f_0 = 2f_c$. Siguiendo nuevamente la figura 3.8, se tiene $3f_c \leq f_{max}$, por lo tanto

$$f_0 = \frac{\sin\beta}{\lambda} \leq \frac{2f_{max}}{3} = \frac{1}{3\Lambda} \quad (3.27)$$

Por lo tanto

$$\beta \leq \arcsin\left(\frac{\lambda}{3\Lambda}\right) \quad (3.28)$$

Uniando los resultados de las Ec. 3.26 y Ec. 3.28 se obtiene el intervalo de validez del ángulo de *tilt*

$$\beta \in \left[\arcsin\left(\frac{D}{f}\right), \arcsin\left(\frac{\lambda}{3\Lambda}\right) \right] \quad (3.29)$$

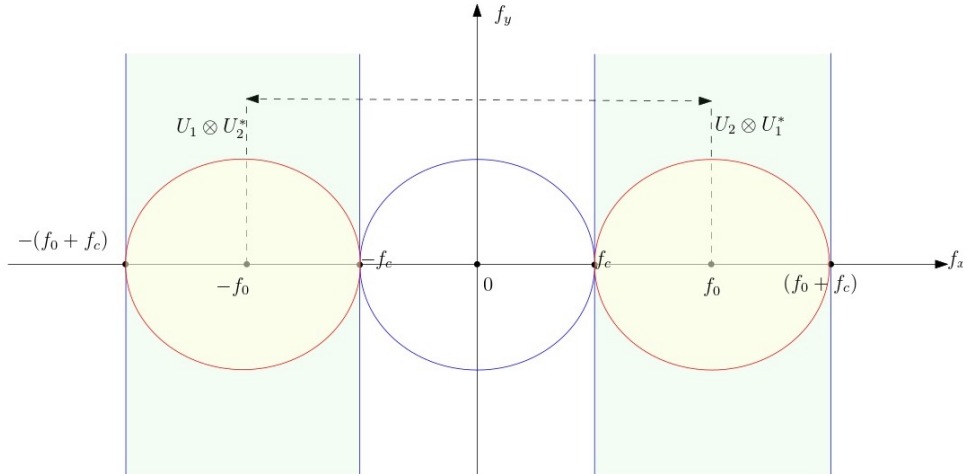


Figura 3.8. Esquema teórico del espectro después de realizar la transformada de *Fourier*.

En esta ecuación se ve que el límite inferior del ángulo de shear esta controlado por el tamaño de la apertura, mientras que en el límite superior se ve la limitación dada por

la resolución espacial de la cámara. El tamaño de apertura es elegido tan grande como sea posible para obtener una alta relación S/N, lo que conlleva a que sea posible usar un área mayor de espectro. El tamaño de apertura es limitado por dos factores, (1) por el tamaño del grano de *speckle* grande y (2) el requisito de no presentar solapamiento en frecuencias (*aliasing*). Puede redefinirse la Ec. 3.29 de tal manera de obtener una relación de control de rango, dada por

$$D \leq f \sin \beta \leq \frac{\lambda f}{3\Lambda} \quad (3.30)$$

Resumiendo, tanto el ángulo de *shearing* β como el tamaño de la apertura D tienen su propio rango de ajuste para cumplir ambos requerimientos, el de no *aliasing* y el del tamaño del *speckle*. Hay una interdependencia entre esos parámetros. En la práctica, primero se decide el ángulo de *shearing* de acuerdo a la sensibilidad. Definido esto, de acuerdo a la Ec. 3.30 se selecciona el mayor de los D de manera de obtener la mayor relación S/R.

El tamaño del grano de *speckle* es un requerimiento necesario para poder resolver la frecuencia portadora f_0 como se menciona en el párrafo anterior. La máxima resolución espacial del sensor de la cámara que puede ser registrada se determina en función del tamaño del pixel (Λ). La máxima frecuencia espacial es $f_{max} = 1/(2\Lambda)$ de acuerdo al teorema del muestreo de Niquist - Shannon. Observando nuevamente la figura 3.8, para separar el espectro se tiene que $f_c = f_{max}/3$ entonces combinando se tiene que el valor de $f_c = 1/(6\Lambda)$, de esto se deduce que el tamaño mínimo del grano de *speckle* debe ser de al menos de seis pixeles (6Λ).

Ademas, existe una relación lineal entre el tamaño de apertura (D), el tamaño del grano de *speckle* (Δs) y la longitud focal de la lente imagen (f) dada por

$$\Delta s = \lambda f / D \quad (3.31)$$

Si se analizan los parámetros de esta ecuación, se ve que el tamaño de grano *speckle* tiene una relación inversamente proporcional con el tamaño de apertura, lo que indica que a medida que el tamaño de la apertura se reduce, aumenta el tamaño del grano. Mediante esta relación se puede buscar una configuración del dispositivo con D y f tales que

$$\eta = \frac{\Delta s}{\Lambda} = \frac{\lambda f / D}{\Lambda} = \frac{\lambda f}{\Lambda \cdot D} \geq 6 \quad (3.32)$$

En esta ecuación se puede ver que la calidad del *speckle* η , queda determinada por los parámetros físicos de los dispositivos utilizados: resolución espacial del sensor de la cámara (tamaño de pixel - Λ), dimensión de la apertura (D), longitud focal de la lente imagen (f) y longitud de onda de laser de iluminación (λ). Con respecto a la forma de la apertura, ésta puede ser circular, quedando definida con solo un parámetro, el diámetro D . Otro tipo de apertura es la rectangular o *slit*, definida por dos dimensiones características, las cuales llamaremos D_x y D_y . En este caso se tienen dos valores de calidad. Según la elección del tipo de apertura será la forma del espectro. Por ello, el tamaño de la apertura es seleccionado y ajustado para cumplir el requerimiento del tamaño del grano de *speckle*.

3.2 Descripción experimental y equipamiento

Una de las grandes ventajas del SPS como técnica de extracción de la fase es que no requiere de equipamiento adicional como los necesarios para producir los desplazamientos de fase conocidos usados en *Temporal Phase Shifting*. El equipo básico es una cámara digital (CMOS o CCD), y una computadora que puede ser portátil como la utilizada en este trabajo. Las cámaras utilizadas fueron de la marca Teledyne Lumenera del tipo CMOS, la primera modelo LM085M monocromática con un tamaño de pixel de $6\mu m \times 6\mu m$ y una resolución de 752×480 pixeles de conexión *usb* 2.0. El segundo modelo Lt225C color (RGB) con un tamaño de pixel de $5,5\mu m \times 5,5\mu m$ y una resolución de 2048×2048 pixeles de conexión *usb* 3.0. La computadora portátil utilizada fue una HP Elitebook 840 G3 con un microprocesador *i5* y 8Gb de memoria ram. Para el interferómetro de *Michelson* se contó con un cubo divisor de haz 50/50 de $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$, un juego de espejos de alta calidad de $2,54\text{cm}$ de diámetro, montados sobre una mesa anti vibratoria mediante accesorios. El elemento de iluminación fue un láser He-Ne de $\lambda = 632\text{nm}$ con una potencia de 35mW y un puntero láser (diodo led) de $\lambda = 532\text{nm}$ con una potencia de 100mW , en conjunto con un objetivo de microscopio como expensor del haz.

Para la configuración básica de DS y la opción GFP se hace uso de una lente zoom de distancia focal de 25mm con apertura variable para formar la imagen y de un trasladador para lograr el desplazamiento de la fuente de iluminación moviendo el OM (objetivo de microscopio), figura 3.9.

En el caso del sistema $4f$ se usó un juego de lentes de igual distancia focal de 60mm , una lente formadora de imagen de 50mm de longitud focal y un juego de aperturas,

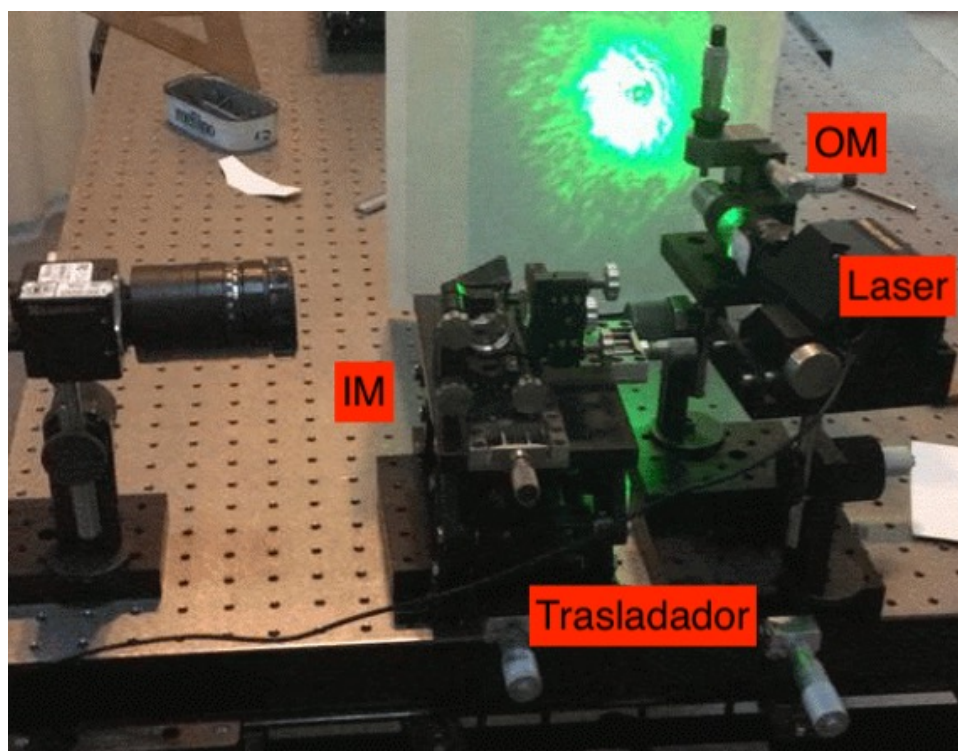


Figura 3.9. Dispositivo experimental DS - IM utilizado para la configuración básica y GFP.

una circular de un diámetro de $0,6mm$ y otra tipo *slit* de $0,6mm$ por $20mm$. Además se contó con accesorios ópticos como trasladadores, bases magnéticas, soportes para lentes y espejos, etc. El dispositivo se puede ver en la figuras 3.10 y 3.11.

Las pruebas se realizaron en primer lugar sobre un dispositivo de prueba que consta de una placa de aluminio arriostrada mediante una brida y un tornillo micrométrico en la parte posterior de manera que la punta genere la deformación fuera del plano en el centro, ver figura 3.12. Esta placa debe poseer cierta rugosidad de manera que se forme el patrón de *speckle*, ver figura 3.13a. En caso de ser demasiado reflectora se puede generar una rugosidad por despulido o se lo pinta con un aerosol de polvo, ver figura 3.13b. En la figura 3.14 se ilustra la forma en la que se establece el valor de Δx o *shearing* al generar la doble imagen por la rotación del espejo E_1 .

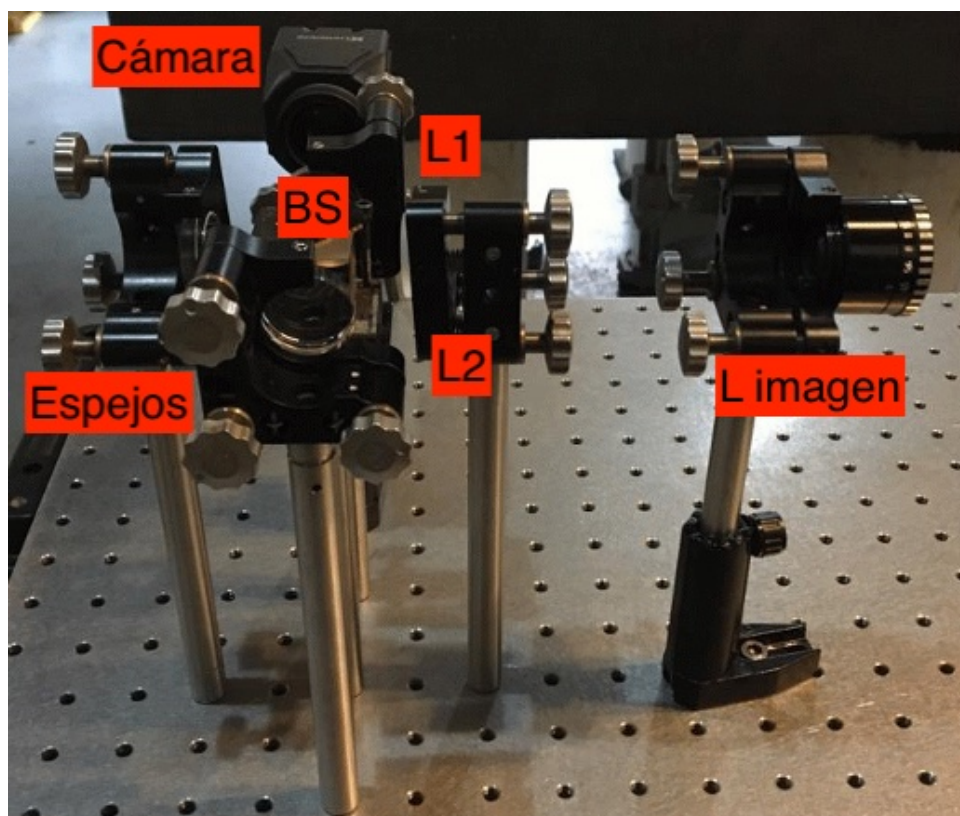


Figura 3.10. Dispositivo experimental DS 4f.

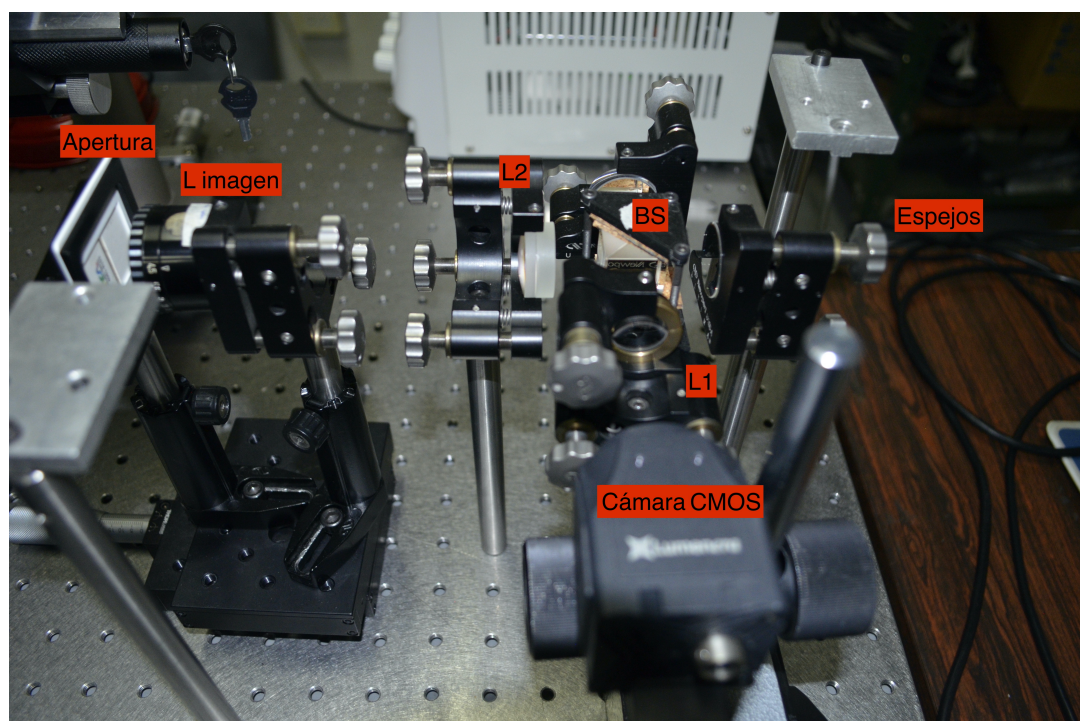


Figura 3.11. Dispositivo experimental DS 4f con apertura *slit*.

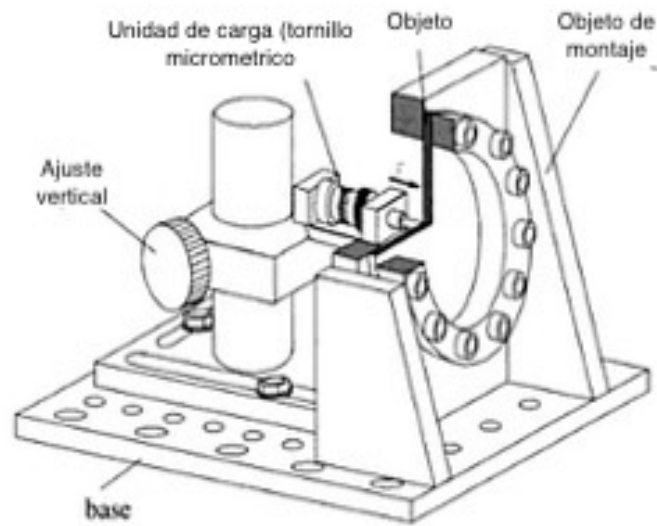
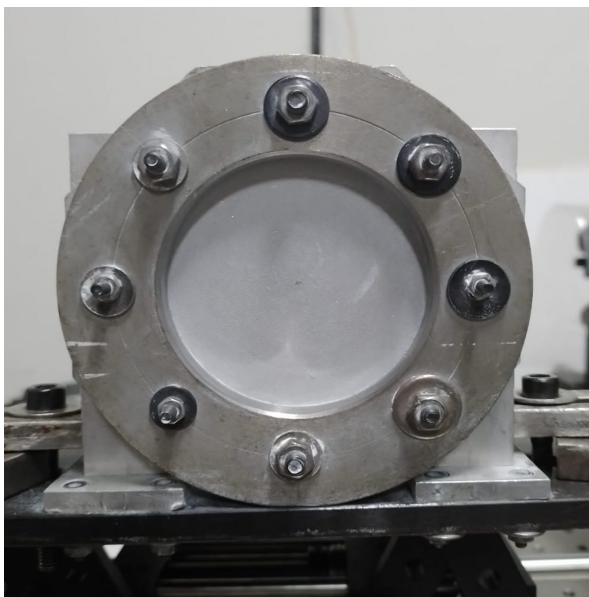


Figura 3.12. Esquema del dispositivo de prueba (S. Waldner y N. Goudemand, 2000).



(a) Dispositivo de prueba 1



(b) Dispositivo de prueba 2

Figura 3.13.

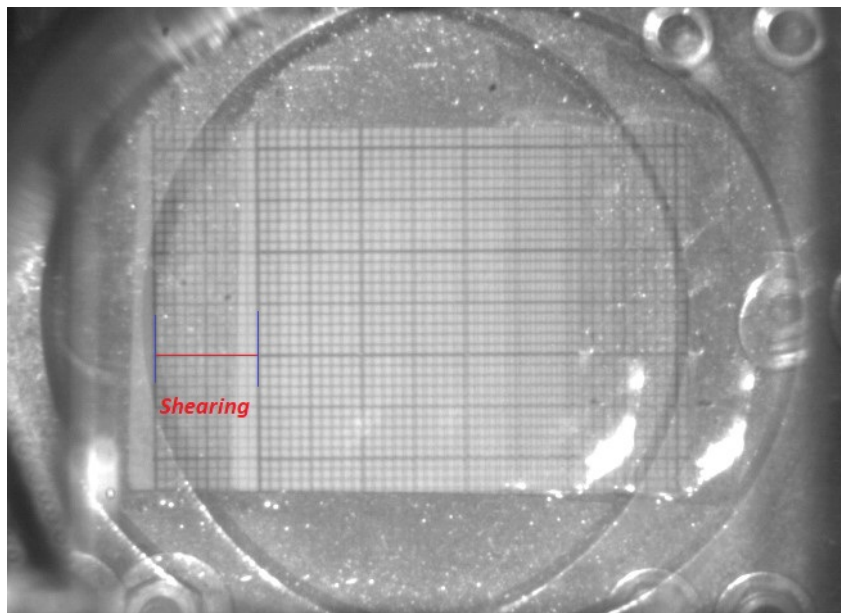


Figura 3.14. Imagen del dispositivo de prueba 1, introducción del *shearing* $\Delta x = 20mm$ en un IM, introducido por la rotación del espejo E_1 .

3.3 Adquisición y procesamiento digital de imágenes aplicados a SPS-DS

3.3.1 Programa de adquisición

Para la adquisición de las imágenes se abordaron dos alternativas principales que hacían uso de herramientas provistas por el fabricante de las cámaras digitales. La primera se realizó mediante programación orientada a objetos y utilizando funcionalidades propias de la cámara. La opción abordada fue un camino ya disponible, de la cual se contaba con una versión previa en Matlab®. Pero presentaba algunos problemas para utilizar una de las cámaras por lo que se decidió actualizar el código junto con la interfaz de usuario para poder utilizar ambas cámaras. Para corregir el conflicto se utilizó controladores genéricos de conexión usb junto a protocolos bien conocidos para la adquisición ([MathWorks, 05 Octubre 2022](#)). Además se pudo agregar diversos comandos extras como ser el control de exposición o la conexión para diversas marcas de dispositivos. La figura 3.15 muestra la interfaz gráfica del programa de adquisición realizada en el entorno Matlab.

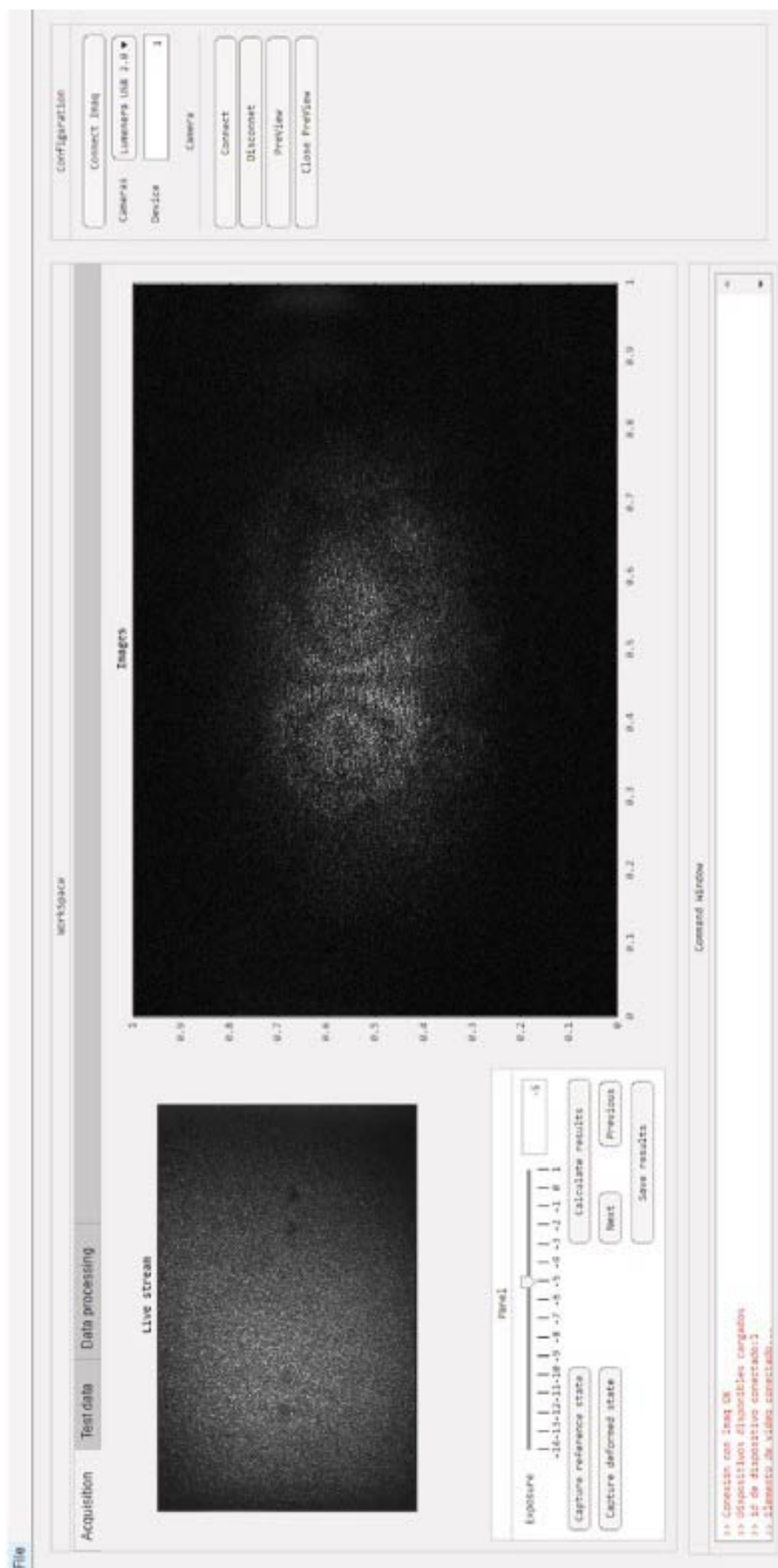


Figura 3.15. Programa de adquisición para DS.

3.4 Procesamiento digital

Para el procesamiento digital de los interferogramas se hizo uso de la propuesta de Takeda, Ino y Kobayashi ([M. Takeda, H. Ina y S. Kobayashi, 1982](#)) descrita en la sección [2.2.5](#) mediante el algoritmo *Fast Fourier Transform*(FFT). En esta alternativa se utilizó un filtro tipo ventana rectangular y uno de tipo Gaussiano tanto de bordes rígidos como no. Estas transformadas de Fourier con ventana (WFT) presentan diferencias en los resultados obtenidos dependiendo del tipo de ventana seleccionada, debido a la introducción de productos de funciones en el espacio de frecuencias ([Q. Kemao, 2004](#)), ([Q. Kemao, 2007](#)), ([Q. Kemao, 2013](#)) y al regresar al espacio real mediante una transformada inversa se introduce una operación de convolución. Sean I y H funciones cualquiera que posean FT, donde

$$FT\{I(x, y)\} * FT\{H(x, y)\} = i(f_x, f_y) * h(f_x, f_y) = g(f_x, f_y) \quad (3.33)$$

por medio del teorema de convolución la función $G = IFT\{g\}$ es igual a

$$IFT\{g(f_x, f_y)\} = G(x, y) = I(x, y) \otimes H(x, y) \quad (3.34)$$

Estas operaciones se realizaran de forma secuencial tanto para el filtrado por ventana como con otros filtros digitales destinados a mejorar los resultados. En una primera etapa se hace uso de una ventana o filtro para aislar la información de la fase en el espacio de frecuencias centrado en la frecuencia portadora. Las dos ventanas utilizadas son: (1) una tipo puerta o caja (*gate*) y (2) otra tipo Gaussiana. El modo de uso de estas ventanas es mediante la expresión de la Ec. [3.33](#), donde i es la FT de la intensidad y h es una ventana en el dominio de las frecuencias.

La ventana tipo caja presenta una simplicidad matemática y fácil implementación frente a la tipo Gaussiana. La función caja y su transformada se puede expresar como

$$\begin{aligned} h(f_x, f_y) &= rect(f_x) \cdot rect(f_y) \rightarrow FT\{H(x, y)\} = H(x, y) = \\ &= \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \frac{\sin(\pi y)}{\pi y} = sinc(x) \cdot sinc(y) \end{aligned} \quad (3.35)$$

Esta operación introduce al sistema un ruido extra propio de la función, generando

tanto distorsión como ambigüedad en la fase. Según la ecuación 3.34 la antitransformada de el espectro de la intensidad multiplicada por este tipo de función introduce a la intensidad I una función *sinc* que puede distorsionar mucho el mapa de fase buscado.

En el caso de la ventana Gaussiana, ésta presenta la particularidad de que su transformada de *Fourier* es también una función Gaussiana así como en la operación inversa con la ventaja de que, eligiendo adecuadamente sus parámetros, se tiene bordes suaves tendientes a cero. A continuación se muestra una función Gaussiana o distribución normal, donde sus parámetros σ y μ representan el ancho de la ventana y el punto donde se centra dicha función.

$$g(f_x, f_y) = g_x(f_x) \cdot g_y(f_y) = \frac{1}{\sigma_{f_x} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(f_x - \mu_{f_x})^2}{2\sigma_{f_x}^2}} \frac{1}{\sigma_{f_y} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(f_y - \mu_{f_y})^2}{2\sigma_{f_y}^2}} \quad (3.36)$$

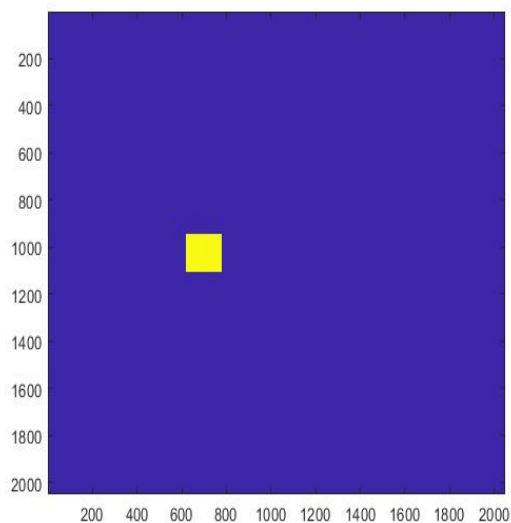
La FT de una función Gaussiana resulta también una Gaussiana:

$$G(x, y) = FT\{g(f_x, f_y)\} = FT\{g_x(f_x)\} \cdot FT\{g_y(f_y)\} \quad (3.37)$$

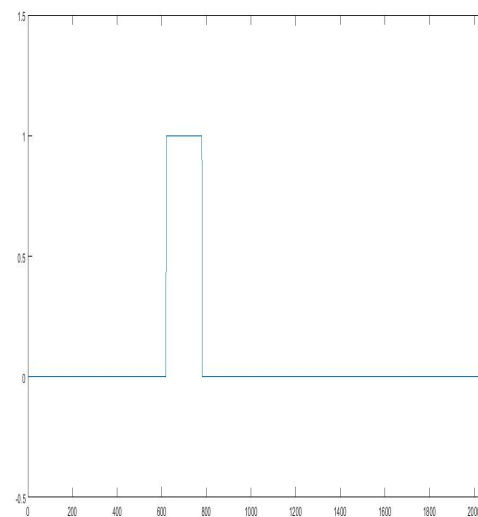
$$G(x, y) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}} \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}} \quad (3.38)$$

donde μ_{f_x} y μ_{f_y} es el valor de frecuencia donde se centra la función, y σ_{f_x} y σ_{f_y} el radio o ancho de dicha ventana. Ambas funciones gaussianas, Ecs. 3.36 y 3.38, tienen su norma igual a uno.

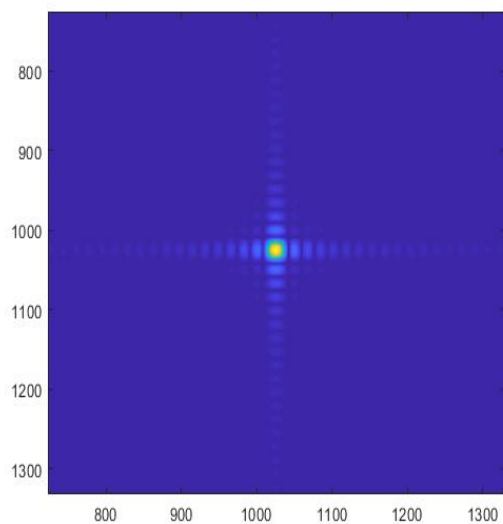
En las figuras 3.16, 3.17 y 3.18 se puede observar la forma de cada ventana, así como su IFT de la cual se puede visualizar que la ventana tipo caja incorpora al sistema ruido extra (franja). Esta es una de las principales razones por las que se adoptó una ventana Gaussiana. También se muestra una variante de la ventana tipo Gaussiana, en la que se incorpora un corte en los datos que toma en su colas laterales a la que llamamos borde rígido. Una interesante ventaja es que permite decidir cuánta información decidimos tomar para el filtrado por ventana.



(a) Ventana tipo *gate* 2D.

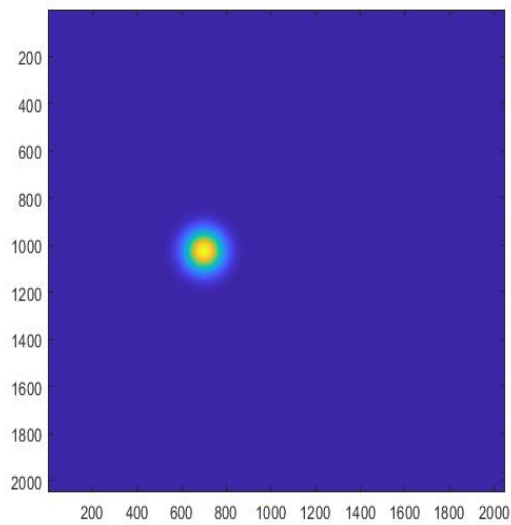


(b) Ventana tipo *gate* 1D, corte en 1024 px.

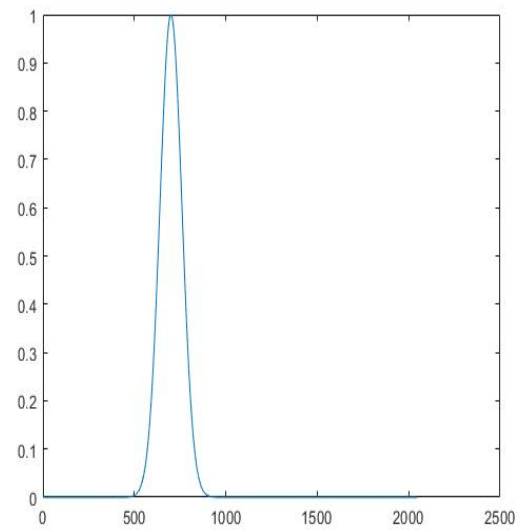


(c) FT de una ventana tipo *gate*.

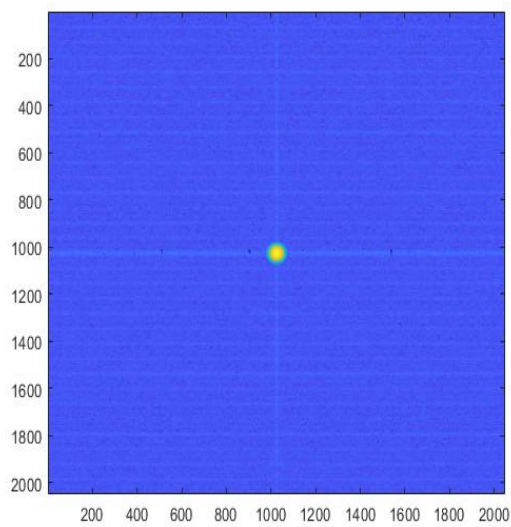
Figura 3.16. Ventanas para FT 1



(a) Ventana tipo *Gaussina* 2D.

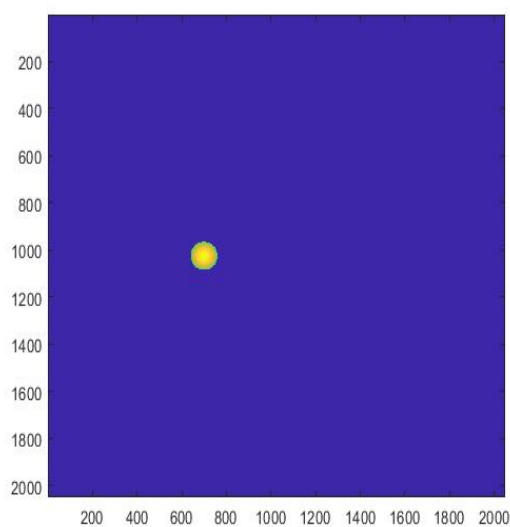


(b) Ventana tipo *Gaussina* 1D, corte a 1024 px.

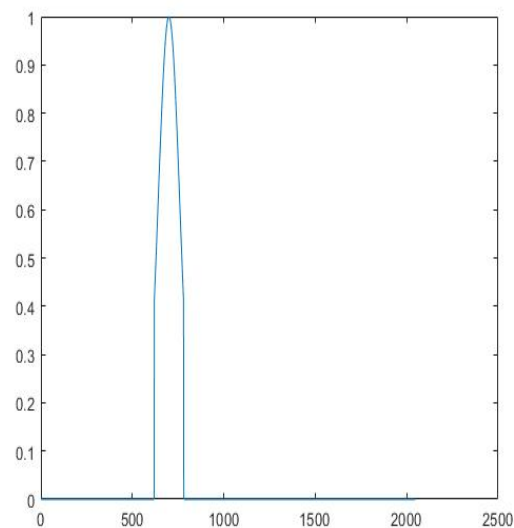


(c) TF de una ventana tipo *Gaussina*.

Figura 3.17. Ventanas para FT 2



(a) Ventana tipo *Gaussina* 2D con borde rígido.



(b) Ventana tipo *Gaussina* 1D con borde rígido, corte a 1024 px.

Figura 3.18. Ventanas para FT 3

En la figura 3.19 se observa el resultado de aplicar el filtrado para extraer la información de la fase por medio de la técnica de WFT, mediante una ventana tipo Gaussiana mediante el procedimiento anteriormente desarrollado.

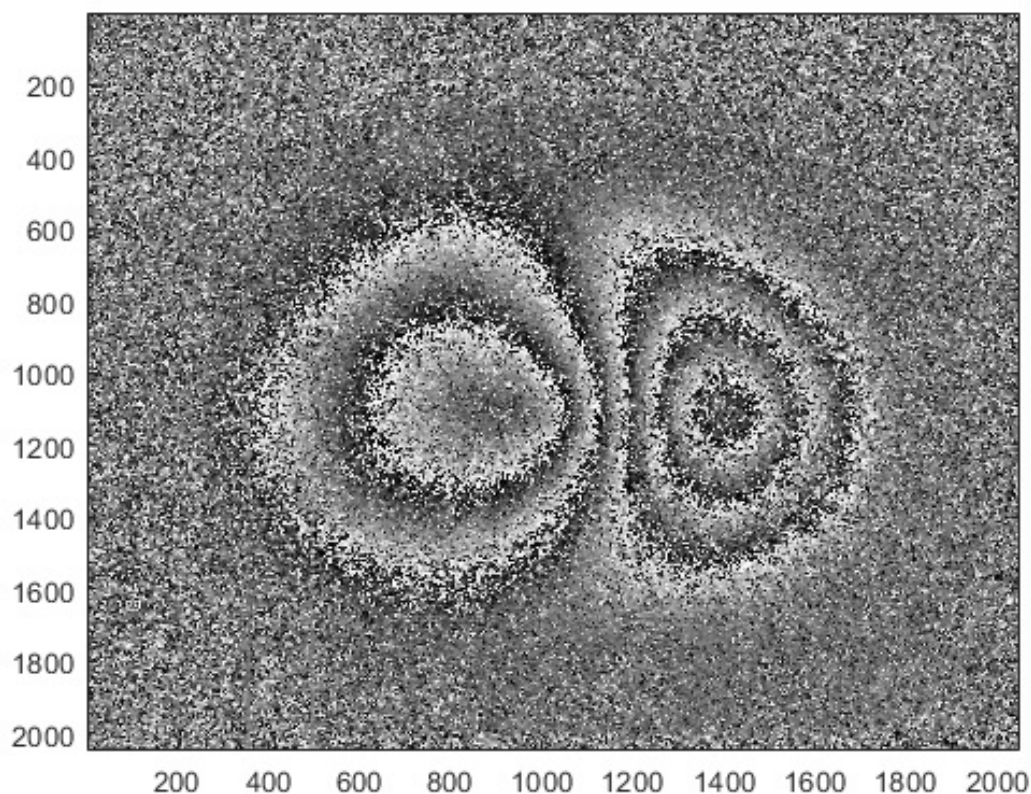


Figura 3.19. Resultado de la primera etapa, obtención de la fase envuelta por medio de WFT.

3.4.1 Filtrado Digital

Como es bien conocido, las técnicas de correlación de *speckle* presentan significativos niveles de ruido asociados a las altas frecuencias. Cuando se las procesa en el dominio espacial, es generalmente para reducir el ruido de alta frecuencia utilizando un filtro pasa bajo. Esto se logra por medio de una convolución bidimensional de la imagen con un filtro *kernel* (matriz) pasa bajo que puede tener desde un tamaño del *kernel* de 2x2 hasta 7x7. El valor que retorna de un pixel resulta de un promedio de valores de una vecindad del tamaño de la matriz elegida centrada en el pixel y como resultado se obtiene un suavizado o difuminado de la imagen. La forma general de dicho filtro se puede expresar

de la siguiente manera

$$K_{low-pass} = \frac{1}{n \cdot m} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{(n \times m)} \quad (3.39)$$

donde el término $\alpha = 1/n \cdot m$ representa un factor de escala espacial. Además en la Ec. 3.39 se observa que la matriz pesa a cada pixel alrededor del pixel central de igual forma y que a valores de α cada vez más pequeños implica que la cantidad de información utilizada para el filtrado de un pixel aumenta.

Mediante la aplicación del filtro pasa bajo convencional se logra reducir el ruido del mapa de fase envuelta, pero las discontinuidades dentro de este son difuminadas. Este problema se resuelve con otro tipo de filtro que realiza el cálculo del seno y coseno de la fase envuelta del patrón de franjas ($\Delta\phi$), que conduce a patrones de franjas continuos en $\sin\Delta\phi$ y $\cos\Delta\phi$. El filtrado ponderado Seno - Coseno consta en realizar un promedio individual de cada uno de estos patrones mediante un filtro ponderado de valores circundantes $n \times n$ para cada pixel, donde n es la cantidad de información que se quiere tomar. De esta etapa se obtienen nuevos mapas de franjas seno / coseno y se recalcula la fase envuelta mediante el arcotangente (función *atan2* de Matlab). Dicho proceso se repite de dos a tres veces. En la figura 3.20 se esquematiza este proceso.

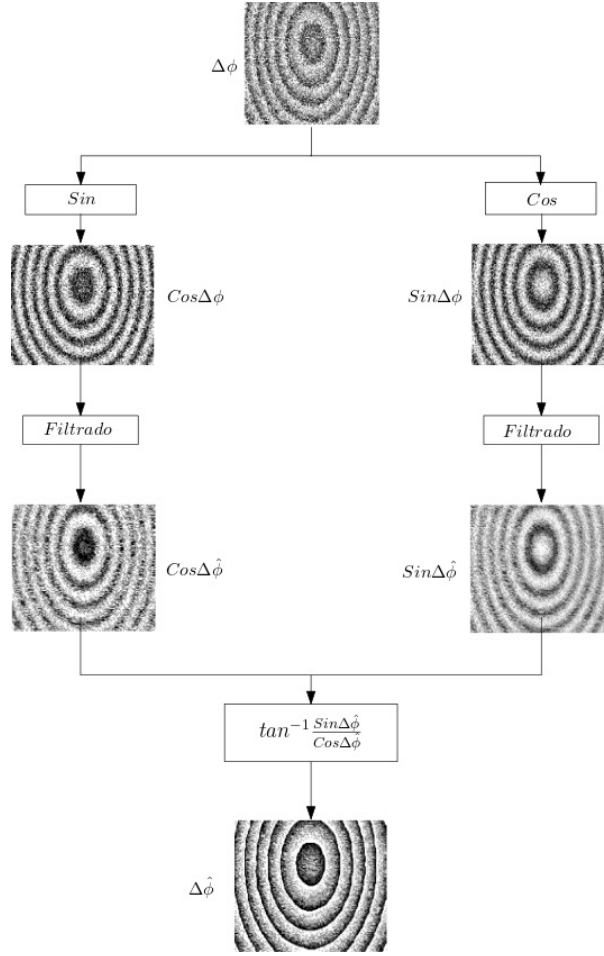


Figura 3.20. Algoritmo de procesamiento del filtro seno/coseno con cálculo intermedio de fase, imagen adaptada de (S. Waldner y N. Goudemand, 2000).

Otro filtro de interés es el filtro parcialmente recursivo desarrollado por Pfister. Aquí, los datos filtrados y sin filtrar se restauran en la misma matriz de imagen. El kernel de filtro que se mueve de píxel a píxel da más peso a los píxeles vecinos que ya han sido filtrados que a los no filtrados, la cual es una variación del *kernel*. La forma de dicho filtro es la siguiente

$$h = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 4 & 3 & 2 \\ 3 & 4 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

También se pueden contemplar filtros anisotrópicos en los cuales $n \neq m$, con lo que la matriz de filtrado *kernel* no es cuadrada sino que presenta una dirección preferencial. Este tipo de filtros son de sumo interés en situaciones donde el patrón de *speckle* presenta una

deformación apreciable en una dirección, como es el caso donde se utiliza una apertura rectangular o *slit*. Xie, Li, Zhang, Yan y Yang (X. Xie, J. Li, B. Zhang, L. Yan y L. Yang, 2015) analizaron la optimización de este tipo de filtros anisotrópicos aplicándolo en el sistema 4f. Dado el alto grado de direccionalidad introducido al sistema por la elección de una apertura tipo *slit* se recomienda el uso de un filtro de suavizado direccional que compense dicha deformación del *speckle*.

Los diversos filtros anteriormente descritos y utilizados para mejorar los resultados obtenidos en los diferentes shearogramas, son bien conocidos y se implementan en condiciones convencionales. La adopción de dichos filtros en este trabajo consta por el hecho de tener un costo computacional bastante bajo, lo que permite optimizar las mediciones en tiempo real. En la figura 3.21 se observa el resultado luego de aplicar los diversos filtros al mapa de fase envuelta resultado del procesamiento previo mediante FT.

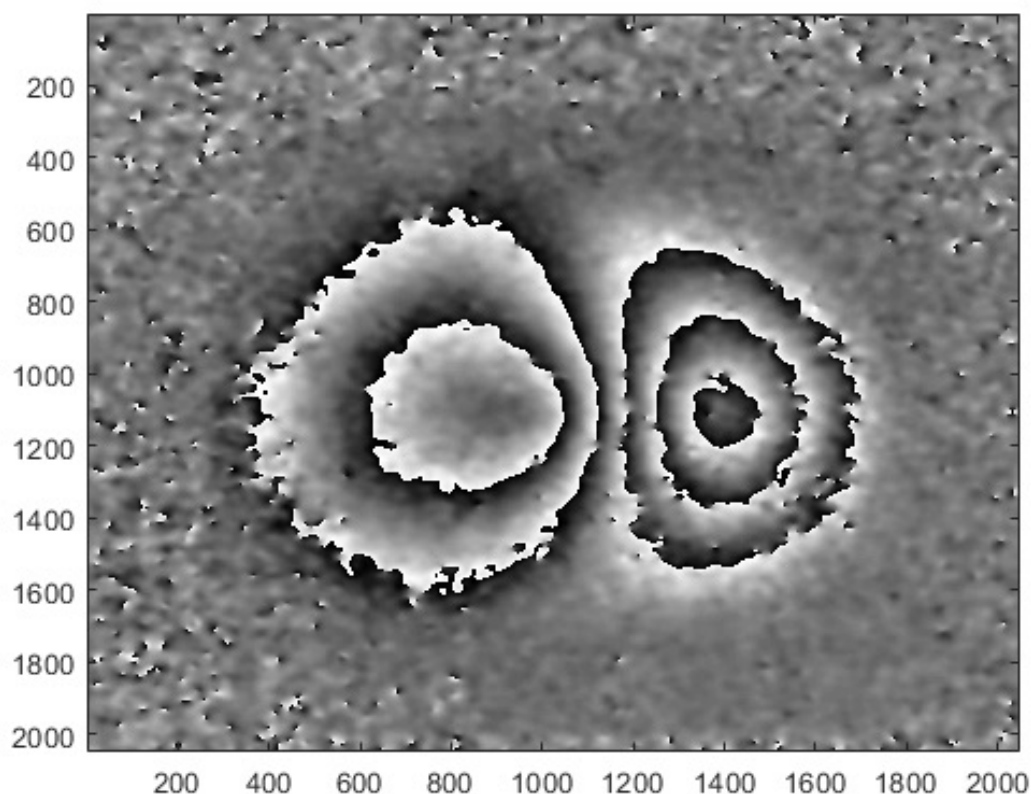


Figura 3.21. Resultado de la etapa de filtrado digital posterior, asociado a la figura 3.19. Obtención de la fase envuelta por medio de WFT con la aplicación de una combinación de filtros kernel y seno/coseno con re composición intermedia de la fase.

3.4.2 Algoritmos de desenvolvimiento de fase

En la etapa de desenvolvimiento de fase (ϕ) se reconstruyen los datos del gradiente de desplazamientos que se encuentran dentro de la denominada fase envuelta cuyo dominio se encuentra en un intervalo de $[-\pi, \pi]$. Aquí se utilizó la propuesta de Pineda, Bacca, Meza, Romero, Arguello y Marrugo ([J. Pineda, J. Bacca, J. Meza, L. A. Romero, H. Arguello y A. G. Marrugo, 2020](#)), método conocido como SPUD, que consta de la realización simultánea del desenvolvimiento y eliminación de ruido. En este enfoque han trabajado varios investigadores ([J. L. Marroquin y M. Rivera, 1995](#)), ([J. L. Marroquin, J. E. Figueroa y M. Servin, 1997](#)) y ([L. Guerriero, G. Nico, G. Pasquariello y S. Stramaglia, 1998](#)) pero la mayor desventaja que presentan los resultados de los autores anteriores es que, al ser de carácter iterativa, lo cual implica tiempos de procesamiento bastante altos ([G. H. Kaufmann, 2011](#)).

El algoritmo SPUD mencionado usa mínimos cuadrados para el cálculo de diferencias de fase, usando una transformada discreta de cosenos (DCT) para obtener una solución cerrada combinada con una operación de umbral estricto. Con una complejidad computacional del orden $O(N \cdot \log N)$, siendo mucho más rápido en la restauración de la fase que los métodos iterativos. En la figura [3.22](#) se observa el resultado de realizar el desenvolvimiento de fase mediante el algoritmo SPUD para el mapa de fase envuelta mostrado en la figura [3.21](#).

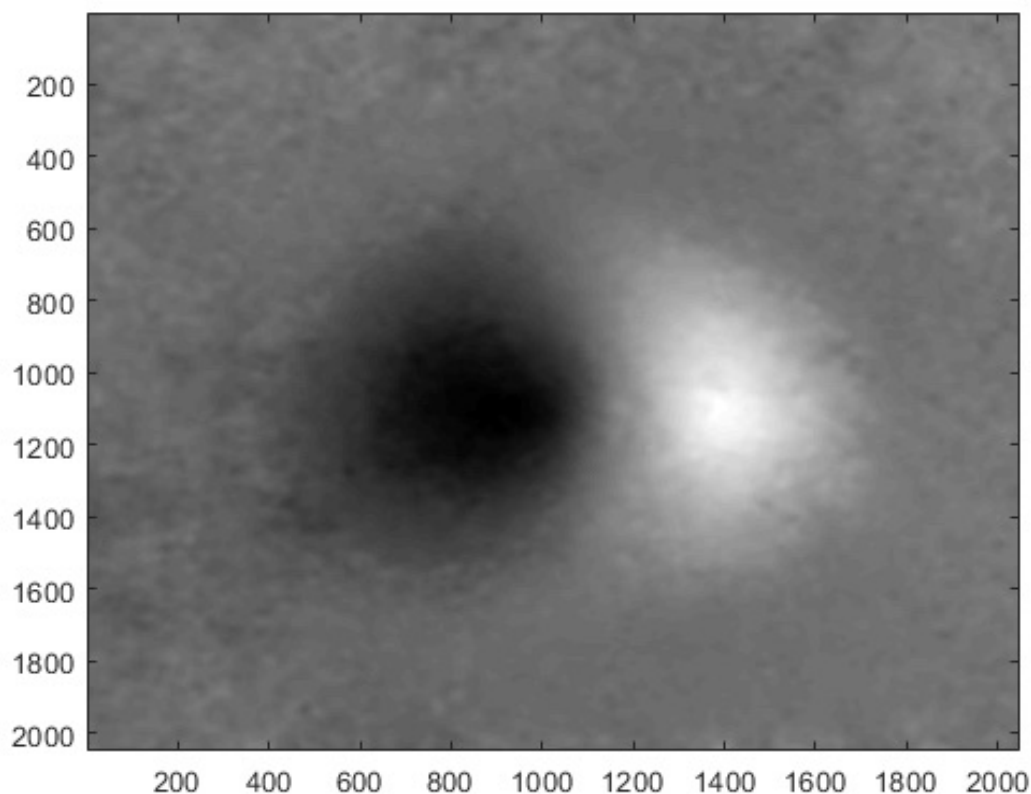


Figura 3.22. Resultado de la etapa de desenvolvimiento de fase por medio del algoritmo SPUD.

3.5 Resultados experimentales sobre el dispositivo de prueba

A continuación se exponen los resultados de las mediciones realizadas sobre los dispositivos de prueba en las diversas configuraciones evaluadas para SPS y sus resultados de procesamiento digital.

La figura 3.23 presenta una secuencia de interferogramas que van desde una deformación menor (3.23a) a una mayor (3.23d) para el Shearografo básico (IM) con un *shearing* $\Delta x = 10mm$, usando un láser de longitud de onda $\lambda = 532nm$ y una cámara CMOS LM085M.

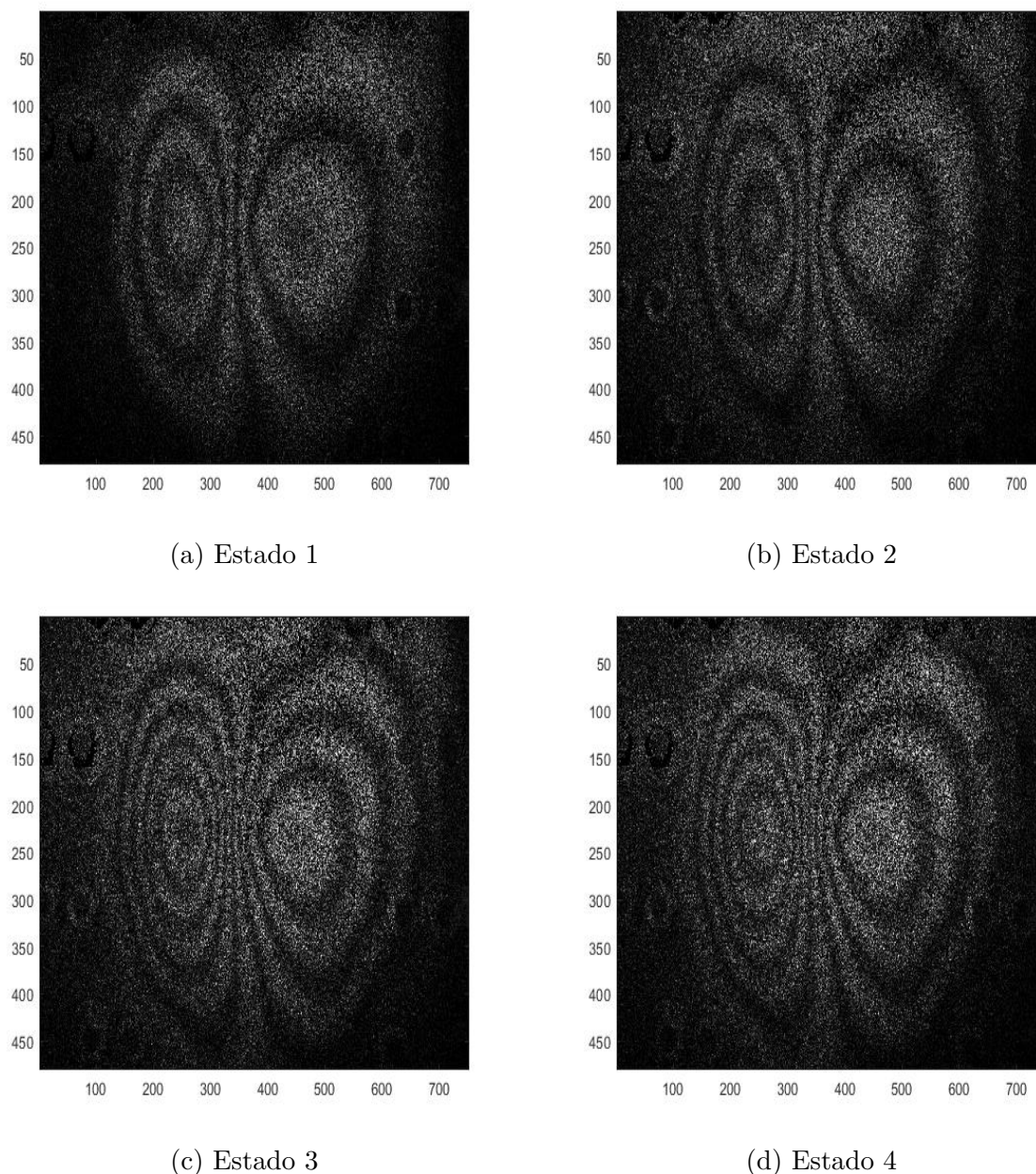
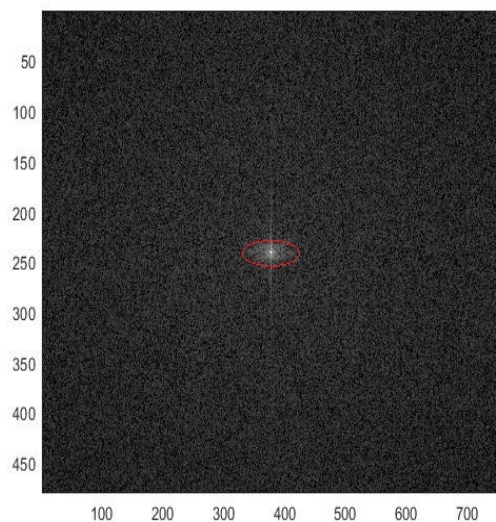


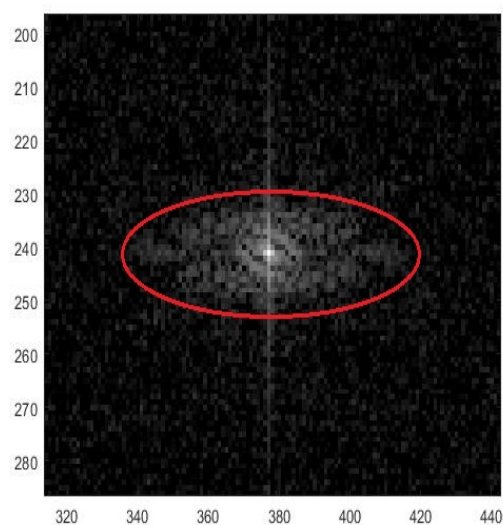
Figura 3.23. Ensayo con dispositivo de prueba 1, progresión de deformación para el DS IM

En la figura 3.24 se muestran los resultados de los pasos del procesamiento asociado a la figura 3.23b; se realiza una FFT de esta imagen obteniendo el espectro en el dominio de las frecuencias mostrado en la figura 3.24a. Puede verse que en el centro de la figura se encuentra la región de interés, cuya magnificación se muestra en la figura 3.24b. Esta figura se corresponde con la Ec. 2.37 con el centro representando a las frecuencias del fondo y dos lóbulos a los costados centrados en la frecuencia portadora ($\pm f_0$). Para hacer más visible los picos de la portadora, se gráfica la línea central del espectro dando como resultado la figura 3.24c. En ella se puede ver los picos laterales eligiendo el que está a la

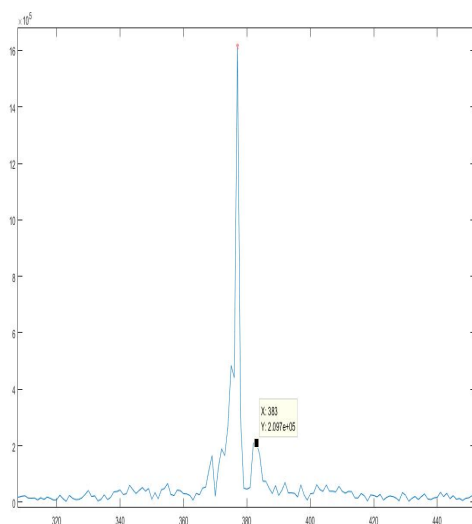
derecha del centro para centrar el filtro ventana, que en este caso fue del tipo rectangular. Luego se antitransforma el espectro filtrado y se calcula la fase utilizando la Ec. 2.39 lo que da como resultado lo que se denomina el mapa de fase envuelta, figura 3.24d; éste además ya es resultado del filtrado digital mediante el *kernel* 3x3 más el filtro seno/coseno dentro del misma etapa de procesamiento. Puede verse que el resultado del mapa de fase envuelta no es representativo del interferograma de partida.



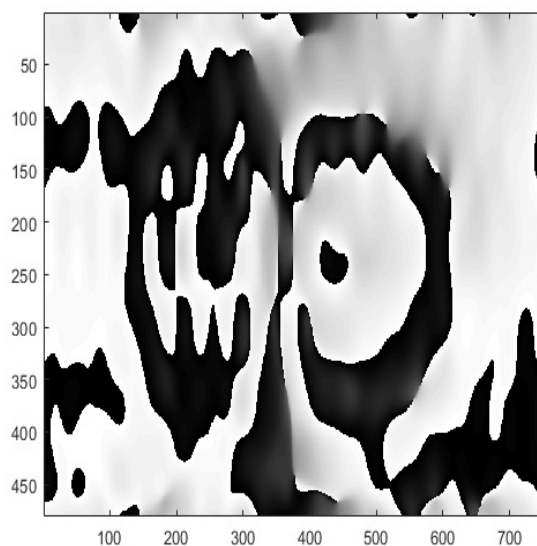
(a) Espectro de Fourier 2D para la figura 3.23b luego de realizar la FT.



(b) Zoom sobre la zona central.



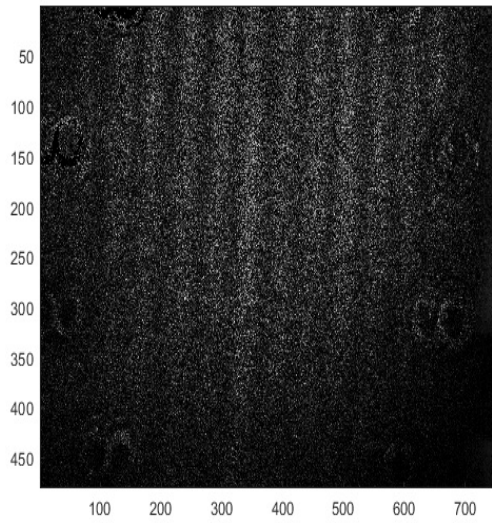
(c) Corte a través horizontal en 1024 px.



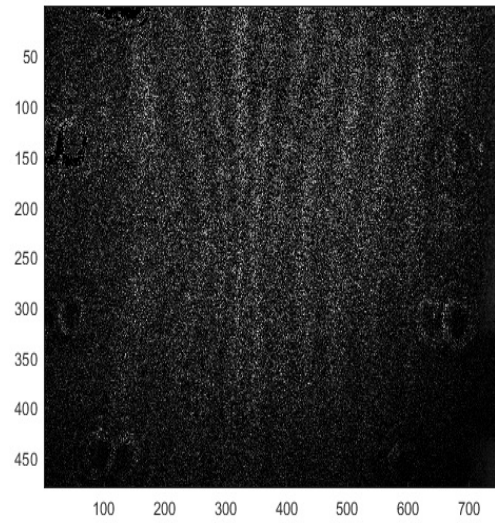
(d) Resultado del procesamiento filtrando la información de la fase.

Figura 3.24. Resultados del procesamiento para DS IM básico .

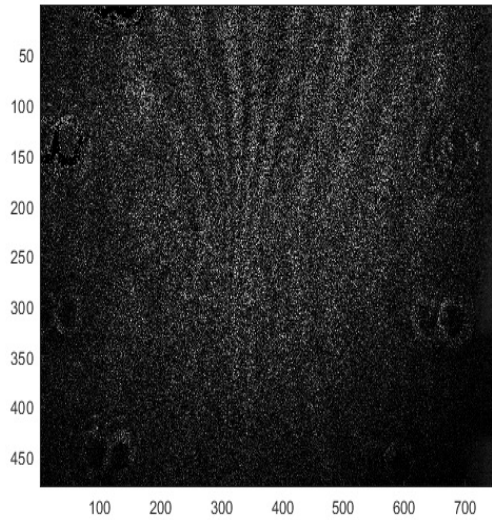
A continuación se muestran resultados con el uso de GFP para idénticas condiciones a las del DS IM. La figura 3.25 presenta una secuencia de interferogramas comenzando con 3.25a que corresponde al desplazamiento de la fuente de iluminación, donde aún no se introdujo ninguna deformación al sistema. Luego se continua con la figura 3.25b donde se muestra una secuencia de deformación menor (3.25b) a una mayor (3.25c) para el Shearografo GFP con un *shearing* $\Delta x = 10mm$, usando un láser de longitud de onda $\lambda = 532nm$ y una cámara CMOS LM085M. La fuente de iluminación se desplazó 7mm, la distancia objeto - cámara era de 1m, y la magnificación de la lente zoom era $M=0.9$. Se puede ver en esta figura que se obtiene un interferograma diferente al del IM básico. En éstas las líneas verticales correspondientes a franjas portadoras, se curvan en presencia de la deformación fuera del plano.



(a) GFP imagen sin deformar.



(b) GFP imagen deformado 1.

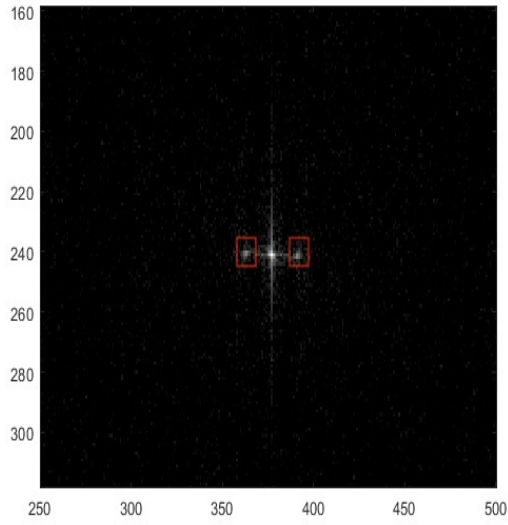


(c) GFP imagen deformado 2.

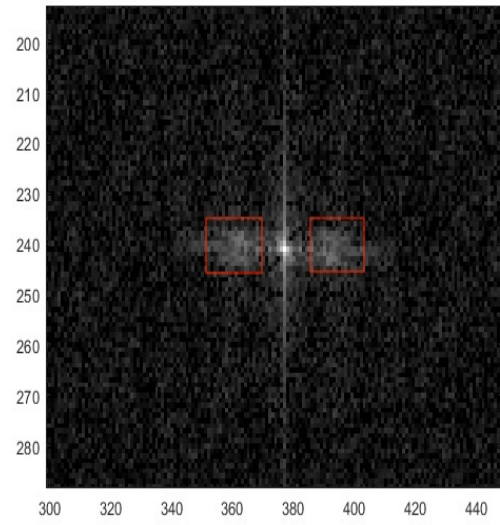
Figura 3.25. Ensayo con dispositivo de prueba 1, secuencia de ensayo con GFP.

En la figura 3.26 se muestran los resultados de los pasos del procesamiento asociado a las figuras 3.25a y 3.25b, se realiza una FFT a cada imagen obteniendo el espectro en el dominio de las frecuencias mostrado en la figura 3.26a y 3.26b. Puede verse que en el centro de la figura se encuentra la región de interés, cuya magnificación se muestra en la figura 3.26b correspondiente al interferograma de la figura 3.25b. Esta figura se corresponde con la Ec. 2.37 con el centro representando a las frecuencias del fondo y dos lóbulos a los costados centrados en la frecuencia portadora ($\pm f_0$). En estas imágenes se observa bien definida la zona asociada a la frecuencia portadora, que corresponde a los lóbulos

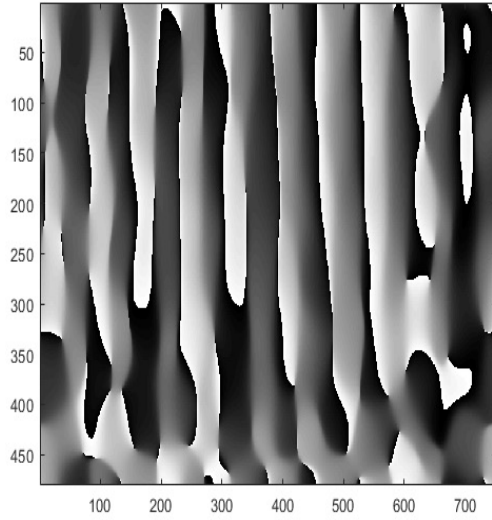
laterales y eligiendo el que está a la derecha del centro para centrar el filtro ventana, que en este caso fue del tipo rectangular. Luego se antitransforma el espectro filtrado y se calcula la fase utilizando la Ec. 2.39 lo que da como resultado lo que se denomina el mapa de fase envuelta, figura 3.26b, este además ya es resultado del filtrado digital mediante el *kernel* 3x3 más el filtro seno/coseno dentro del misma etapa de procesamiento. Puede verse que el resultado del mapa de fase envuelta en el caso del estado sin deformar es bastante aceptable, pero no sucede lo mismo cuando el sistema de franjas verticales es deformado por la aplicación de una carga externa. Finalmente este no es representativo del interferograma de partida. Cabe mencionar que para recuperar la información de la fase que corresponde a la deformación fuera de plano a estos mapas de fases envueltas deben ser post procesados aumentando la complejidad y a medida que la deformación mecánica es aumentada se pierde la capacidad de identificar de forma eficiente los lóbulos laterales.



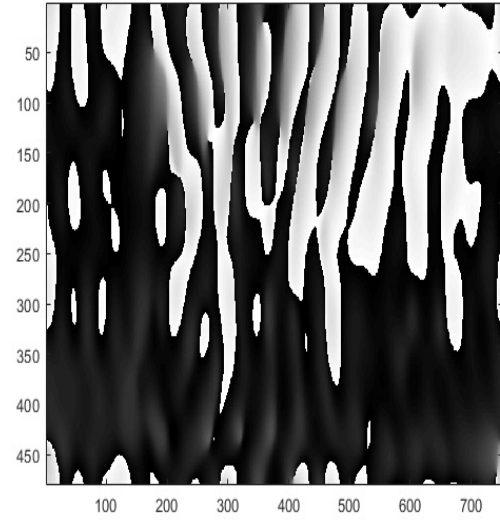
(a) FT 2D asociada a la figura 3.25a.



(b) FT 2D asociada a la figura 3.25b.



(c) Fase envuelta asociada a la figura 3.26a.



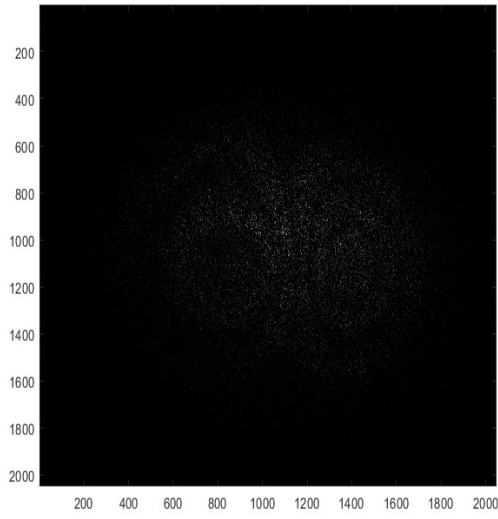
(d) Fase envuelta asociada a la figura 3.26b.

Figura 3.26. Resultados del procesamiento para el GFP.

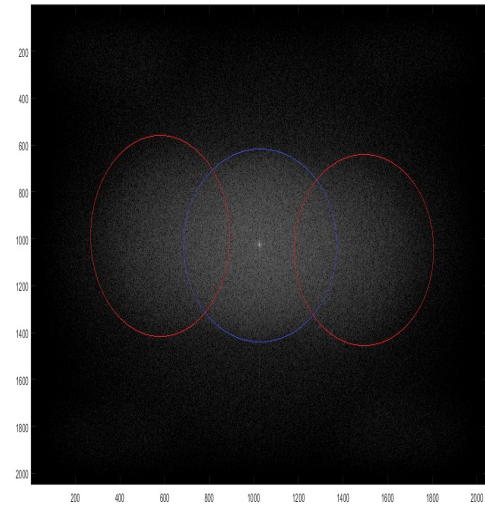
Como se observa en las imágenes anteriores, los resultados del ensayo de prueba para DS GFP, y el procesamiento para poder obtener la fase envuelta para ese estadio de deformación no es trivial y resulta en un costo bastante alto. Así también se observa un comportamiento similar al caso del DS IM cuando las franjas se deforman en gran medida, generando un espectro de Fourier difuso de donde no se puede aislar e identificar correctamente la ubicación de f_0 .

A continuación se muestran los resultados del sistema $4f$ con apertura, tanto con la apertura circular como la apertura tipo ranura. La figura 3.27 presenta una secuencia de

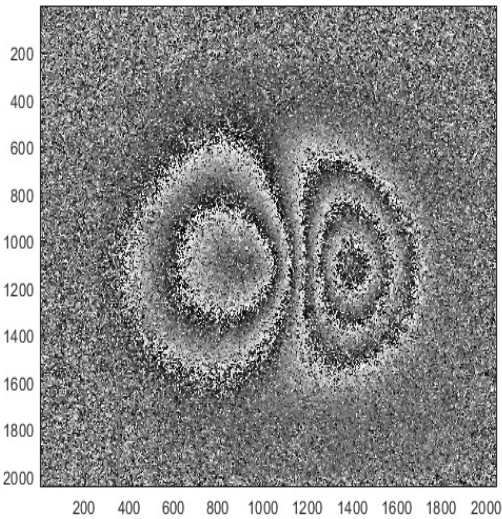
procesamiento para un interferograma (3.27a) correspondiente a un estado de deformación para el Shearografo $4f$ con apertura circular, con un *shearing* $\Delta x = 10mm$, usando un láser de longitud de onda $\lambda = 532nm$, la apertura es de 0.8 mm de diámetro y una cámara CMOS Lt225C. Se transforma esta imagen mediante el algoritmo FFT y se obtiene el espectro de frecuencias donde se puede apreciar los lóbulos laterales bien definidos, figura 3.27b. Para localizar la frecuencia portadora f_0 y la frecuencia de corte f_c se utilizaron las Ec. 3.17 y Ec. 3.23 con lo que se pudo determinar dónde centrar la ventana y establecer el radio de la misma. Tomando el lóbulo de la derecha del lóbulo central y utilizando una ventana tipo Gaussiana (Ec. 3.38) se obtiene como resultado el mapa de fase envuelta (3.27c) según la Ec. 3.21. Posteriormente, utilizando un filtrado sobre este mapa de fase envuelta, del tipo *kernel* de 7x7, combinado con el filtro seno/coseno, se obtiene el mapa de fase envuelta filtrado (3.27d). Posteriormente a este último resultado se procede a realizar el desenvolvimiento de la fase mediante el algoritmo SPUD. En la figura 3.28a se observa el resultado y en la figura 3.28b se representa un corte a través de la línea media (1024px) del eje de ordenadas.



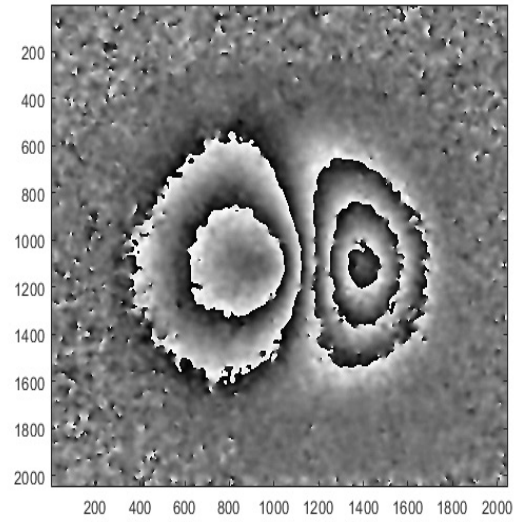
(a) Interferograma.



(b) Transformada de Fourier asociada a la figura 3.27a.



(c) Fase envuelta asociada a la figura 3.27a.



(d) Fase envuelta asociada a la figura 3.27a después del filtrado kernel 7x7.

Figura 3.27. Resultados obtenidos de la configuración 4f del dispositivo de prueba 1 a una distancia objeto - cámara de 60cm, $\Delta x = 10mm$ y apertura circular.

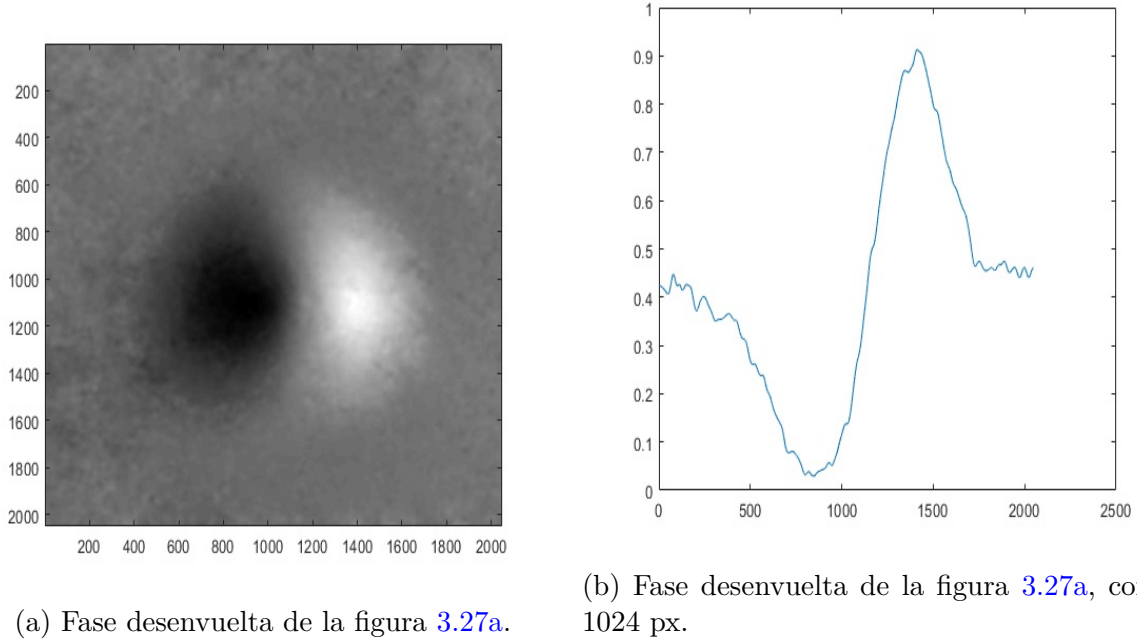


Figura 3.28. Resultados obtenidos de la configuración 4f del dispositivo de prueba 1 a una distancia objeto - cámara de 60cm, $\Delta x = 10mm$ y apertura circular (cont.).

A continuación, se muestra el efecto de diferentes tamaños de ventana o del lóbulo que contiene la frecuencia portadora, figuras 3.29 a la 3.32. A la izquierda se muestra la fase envuelta de la imagen de referencia, la del centro es el mapa de fase del estado deformado, ambas obtenidas con la Ec. 3.21. La imagen de la derecha es la diferencia de dichas imágenes dando como resultado el mapa de fase envuelta correspondiente a la de la figura 3.29 a la figura 3.32 se puede apreciar el efecto de variar el tamaño de la ventana, pudiendo de esta forma establecer la mejor opción.

En la figura 3.33 se observa el efecto de los filtros de forma sucesiva de 3, 10 y 30 pasos, con el fin de establecer el número de pasos óptimo. En la figura 3.34 se muestra el efecto de aplicar un filtro rectangular (Ec. 3.40) 20 veces sobre la última imagen de la figura 3.33, mostrando el efecto de suavizado en el resultado final.

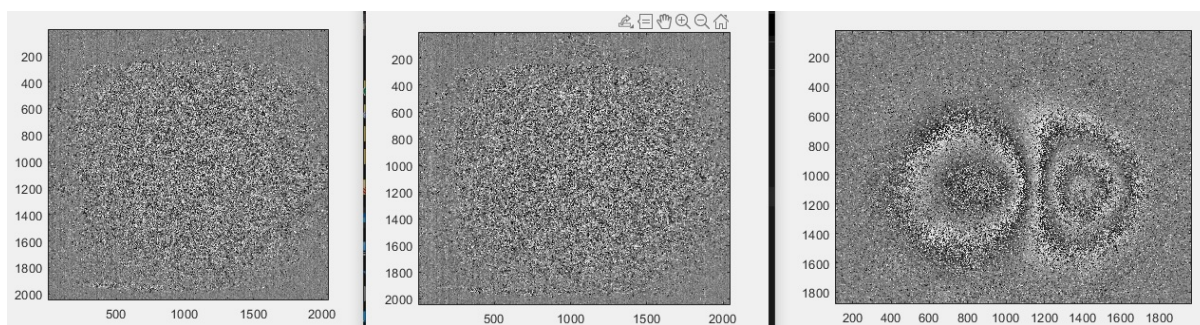


Figura 3.29. Tamaño de ventana de 150 px.

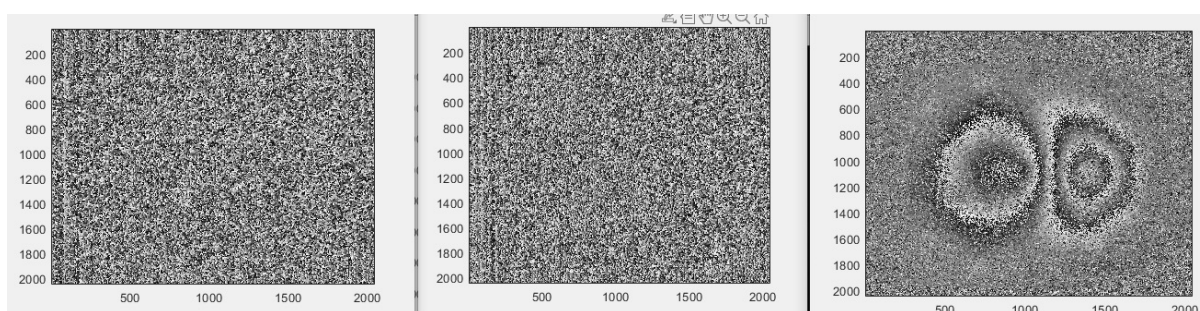


Figura 3.30. Tamaño de ventana de 100 px.

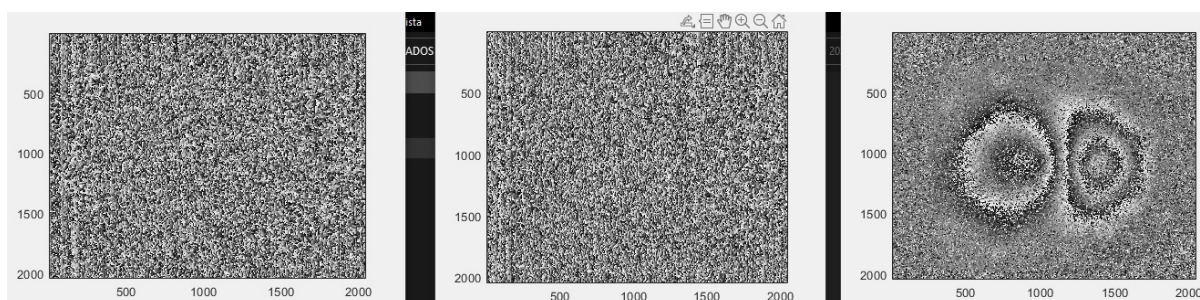


Figura 3.31. Tamaño de ventana de 80 px.



Figura 3.32. Tamaño de ventana de 60 px.

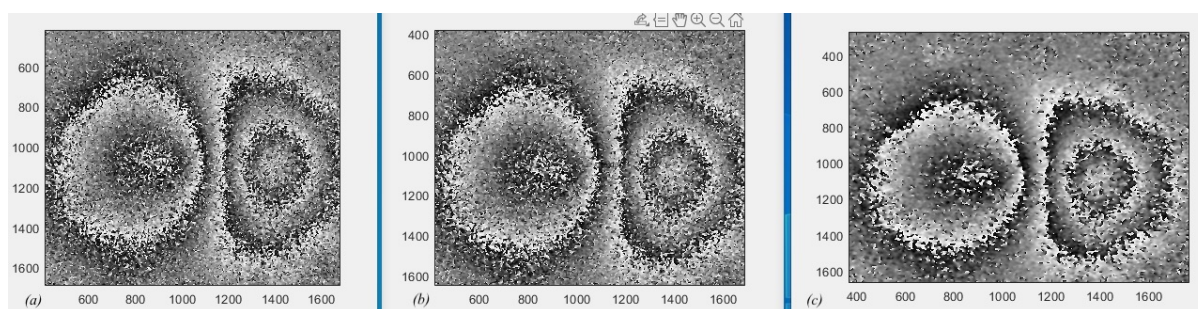


Figura 3.33. Filtros Kernel (a) 3 pasos, (b) 10 pasos y (c) 30 pasos.

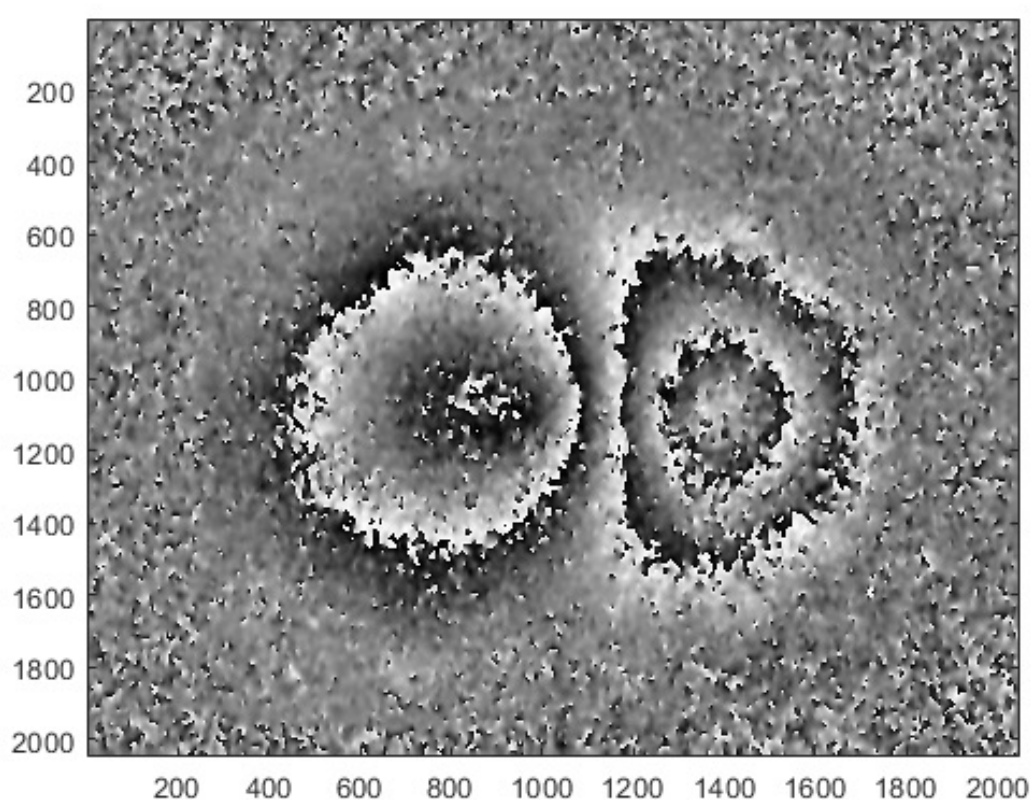
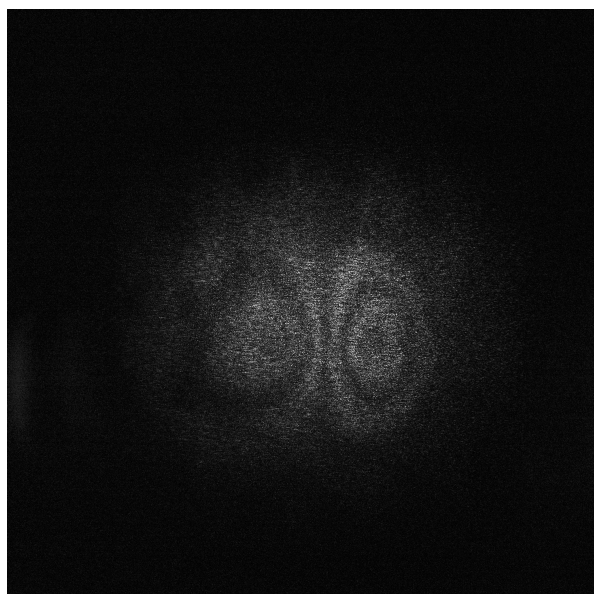


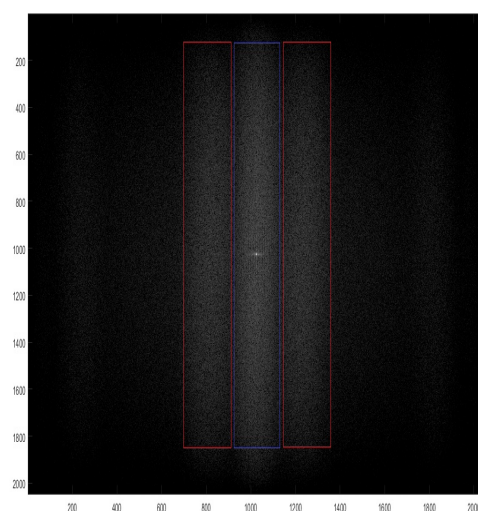
Figura 3.34. Filtro Rectangular 20 pasos.

En la siguientes figuras se muestra el sistema $4f$ con apertura tipo *slit* para un ensayo con el dispositivo de prueba 1 en las mismas condiciones que en el sistema $4f$ con apertura circular presentado anteriormente. En la figura 3.35a se puede observar el interferograma obtenido en la figura 3.35b el espectro de frecuencias donde en este caso los lóbulos son rectangulares, observándose bien definidos. Al aplicar la transformada de Fourier con ventana, el filtrado da como resultado el mapa de fase envuelta de la figura 3.35c y

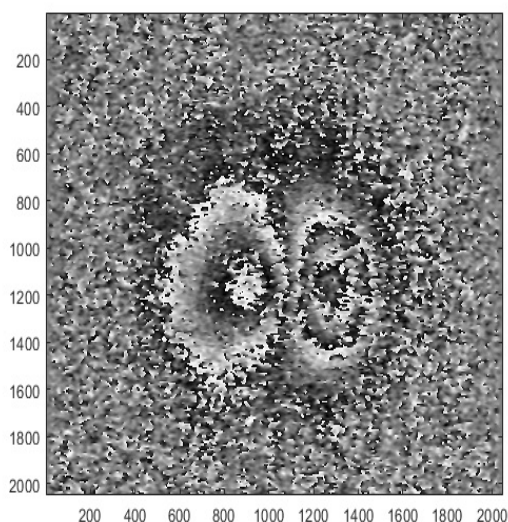
aplicando un filtro direccional o anisotrópico de 7×15 se obtiene el mapa de fase envuelta de la figura 3.35d.



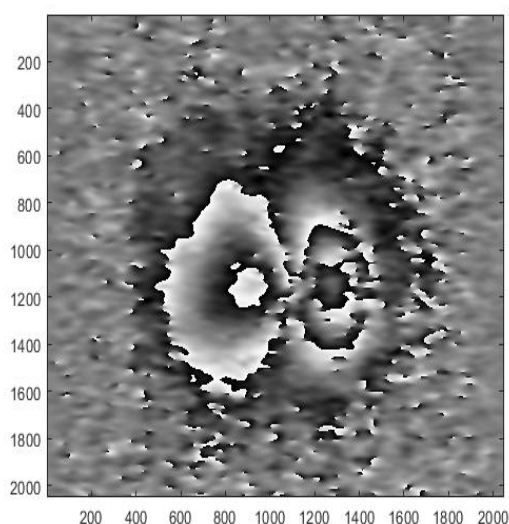
(a) Imagen interferograma.



(b) FT 2D.



(c) Fase envuelta sin ningún filtro extra.

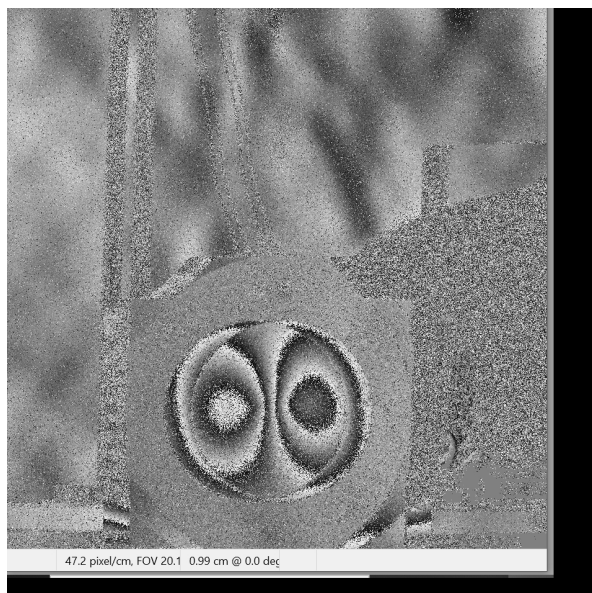


(d) Fase envuelta procesada con filtro kernel anisotrópico 7×15 .

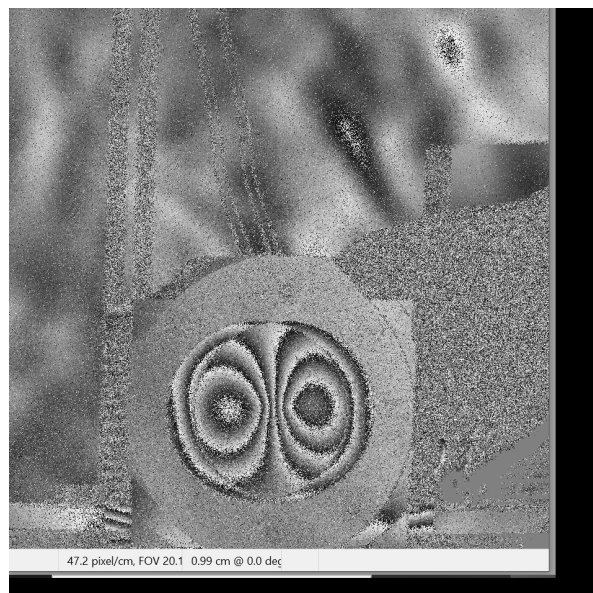
Figura 3.35. Sistema $4f$ con apertura tipo *slit*.

Por último se muestran a continuación resultados tomados sobre los dispositivos de prueba con el shearógrafo comercial LTI2100. Las características del mismo, son diodo láser led (de alta calidad) de 1 watt de potencia y longitud de onda 532 nm, cámara cmos de 5 MP 12 bits, técnica utilizada cambio de fase temporal (TPS). En la figura 3.36 y figura 3.37 se ilustra una secuencia de deformación de una menor a una mayor deformación

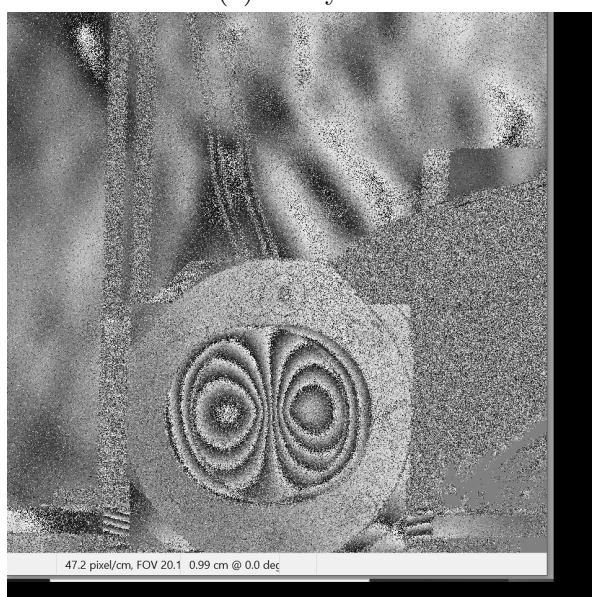
a una distancia de 1m, en las cuales se encuentra indicado el FOV o campo de visión del shearografo, la distancia en centímetros y la cantidad de pixeles por centímetros que presenta cada imagen.



(a) Ensayo 1.

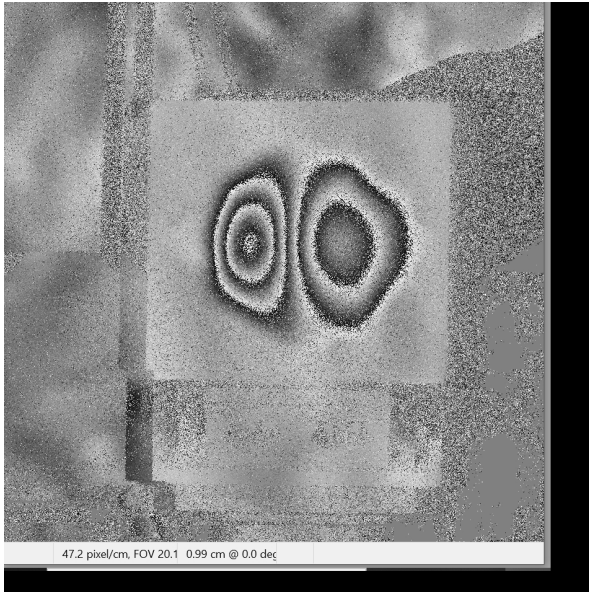


(b) Ensayo 2.



(c) Ensayo 3.

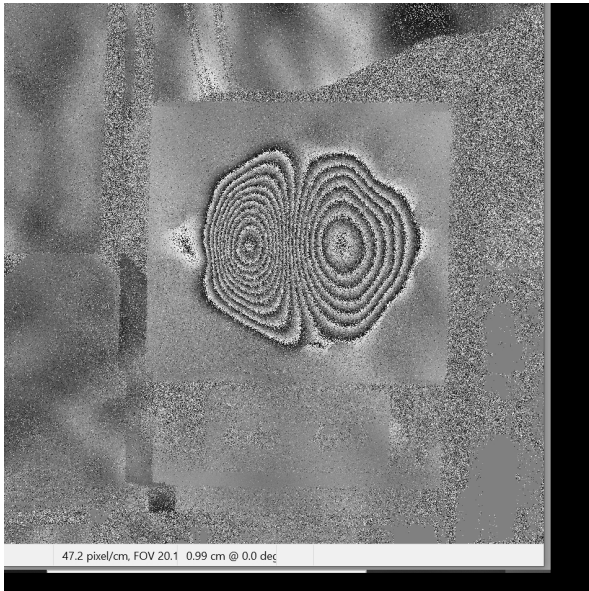
Figura 3.36. Resultados sobre el dispositivo de prueba 1 con el shearografo LTI2100.



(a) Ensayo 1.



(b) Ensayo 2.



(c) Ensayo 3.

Figura 3.37. Resultados sobre el dispositivo de prueba 2 con el shearografo LTI2100.

3.6 Discusión

Del análisis realizado en las diversas configuraciones analizadas como opción para el uso de la técnica de SPS, se pudo observar que:

- De las tres opciones analizadas, el sistema $4f$ con apertura, es el que presenta mejores características para la técnica SPS debido a que durante el procesamiento de los espectros (dominio de frecuencias) resulta menos ambiguo al filtrar la información de la fase centrada en la frecuencia portadora espacial f_0 . Además las ecuaciones

teóricas utilizadas para localizar f_0 y f_c presentan un buen acuerdo entre el calculo teórico y el experimento.

- El montaje del sistema $4f$ con apertura, resulta de una mayor complejidad experimental. Esto es debido al hecho que la combinación apertura más lente formadora de imagen debe ser tal de permitir discriminar los lóbulos laterales que contiene la información de la fase del lóbulo central que contiene información del ruido. Además, una alineación incorrecta entre la apertura y la lente imagen no permitirá la separación de los halos de difracción secundarios, y con ello se tendrá una condición de *aliasing* severa.
 - En términos de sensibilidad, se observa que los *shear* utilizados en las configuraciones DS IM y GFP, dependen básicamente del rango de deformaciones que se quiere detectar. Por el contrario, el sistema $4f$ con apertura presenta un rango bien definido y delimitado por el conjunto cámara, lente imagen y apertura. Otro factor referido a la sensibilidad en la configuración $4f$ con apertura, es el rango dinámico de adquisición de las imágenes, el cual debe ser alto.
 - En términos de costo computacional en el procesamiento de las imágenes, el sistema GFP es el que mayor demanda tiene ya que hace uso de algoritmos iterativos para recuperar la fase envuelta debido a que se debe eliminar de la fase el término asociado a la portadora ($\Delta\phi_c$). En el caso del IM como dispositivo elemental el procesamiento es complejo ya que el solo hecho de intentar aislar la información de la fase por FT es bastante complejo, ya que el espectro de frecuencias no presenta una definición clara de la ubicación de f_0 y por ello se dificulta extraer la información de la fase.
 - La calidad del *speckle* obtenido en el DS IM y GFP es muy baja con lo que la resolución espacial es insuficiente para resolver la portadora. En el sistema $4f$ con apertura se observa que se puede controlar los parámetros para lograr una resolución espacial adecuada.
 - La variante con una apertura tipo *slit* se observa que el *speckle* se deforma, generando una anisotropía en el grano, la cual debe ser compensada por el procesamiento digital por medio del uso de un filtro direccional. El procesado realizado para ambos
-

tipos de apertura, circular y rectangular, logra resultados equivalentes entre ellas. El filtro tiene dimensiones de 7×15 con buenos resultados durante la etapa de des-envolvimiento de fase, eliminando discontinuidades que pueden aparecer durante esta etapa del procesamiento.

- El algoritmo de des-envolvimiento de fase examinado, presentó buenos resultados en los casos que pudo ser aplicado, con un costo computacional aceptable en imágenes de alta resolución ($2048 \times 2048 px.$).
 - Algo no menos importante es el puntero láser usado como fuente de iluminación, evidenciando que la técnica SPS-DS tiene requerimientos de coherencia mucho menores que otras técnicas. Otro aspecto a considerar es el bajo costo económico del mismo.
 - Se pudo comprobar que la potencia de la fuente de iluminación, debe ser tenida en cuenta si se desea usar el sistema $4f$ con apertura. La potencia del puntero láser con el que se contó para este dispositivo era algo insuficiente, por lo que si la superficie no es muy reflectante se obtendrán imágenes oscuras. Para compensar esto se utilizaron grandes tiempos exposición de la cámara lo que implica eventuales decorrelaciones del *speckle*.
 - Los filtros de ventana en el dominio de las frecuencias para el post-procesamiento, presentaron buenos desempeños sin demasiado costo. Se pudo verificar que la mejor opción de filtro para extraer la información de fase fue la Gaussiana.
 - Los filtros digitales utilizados para eliminar discontinuidades surgidos en la etapa de ventaneado en el dominio de frecuencias, dan buenos resultados y se suelen combinar el filtrado *kernel* más el filtrado seno/coseno con cálculo intermedio de la fase, con iteraciones que van desde $i = 3$ a 30 . Todo esta etapa se realiza sobre el mapa de fase envuelta.
-

4. Análisis y resultados sobre materiales compuestos en condiciones de laboratorio

En este capítulo se describe primeramente las muestras de material compuesto utilizadas, las cuales presentaban diversos tipos de defectos. En las secciones siguientes se exponen los resultados de los experimentos realizados con cada dispositivo sobre dichas muestras, y se comparan con las mediciones obtenidas con un shearografo comercial LTI. Todos estos experimentos se realizaron en condiciones de laboratorio. Finalmente se discuten los resultados obtenidos.

4.1 Descripción de los materiales utilizados

Las muestras utilizadas de material compuestos tipo *sandwich* fabricados dentro de CNEA, para su uso como componente estructural de la antena del satélite SAOCOM 1A. Las placas exteriores son de fibra de carbono con resina epoxi, el centro del panel es un *Honney Comb* (HC) de aluminio y se adhiere a las placas de fibra de carbono por medio de resina epoxi. Estos paneles pueden presentar diversos defectos, los cuales fueron presentados en la sección 2.1.2 y expuestos en la figura 2.1. En algunos casos se le suelen incorporar a estos paneles insertos metálicos adheridos al *sandwich* mediante resina. Por lo expuesto anteriormente se utilizan estos paneles con diversos tipos de defectos para poder determinar el alcance de la técnica y su confiabilidad para detectarlos.

En la figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se observan las dos caras de las muestras de paneles ensayados, los cuales se le hizo un blanqueado con polvo blanco (4.1a, 4.2a, 4.3a) con el fin de aumentar la reflectancia en la cara a medir; en éstos se pueden observar insertos metálicos de diversos tamaños (4.1b, 4.3b). En la figura 4.2 se observa un panel con diferentes defectos que van desde agujeros pasantes, agujeros no pasantes y de diversos tamaños.

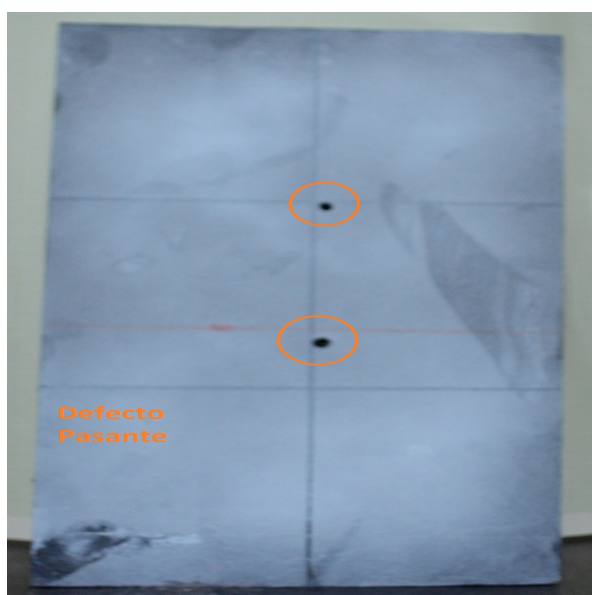


(a) Frente



(b) Reverso

Figura 4.1. Cupón panel HC-Alan, con insertos metálicos de diferentes diámetros.



(a) Frente



(b) Reverso

Figura 4.2. Cupón panel HC-Honny, con defectos pasantes y no pasantes.



(a) Frente

(b) Reverso

Figura 4.3. Cupón panel HC-Casa2, con inserto metálico.

Otro material evaluado fue un tubo bobinado de fibra de carbono con resina (figura 4.4); al igual que en los casos de los paneles anteriores se le aplicó un polvo blanco. En este caso no se conocía si presentaba algún defecto de manufactura. Todos estos ensayos fueron finalmente contrastados con un shearógrafo comercial LTI2100 a fin conocer la confiabilidad de las mediciones.



Figura 4.4. Cupón tubo bobinado de fibra de carbono.

4.2 Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de las configuraciones examinadas, sobre los diversos materiales disponibles dentro del laboratorio de óptica y láser. Se analizan las ventajas y desventajas de los dispositivos experimentales considerados.

4.2.1 Shearógrafo DS básico (IM)

En este apartado se muestran los resultados con el shearografo básico (IM) para el panel HC-Honney mostrado en la figura 4.2a. Se probaron dos alternativas, el dispositivo básico y el mismo pero con una máscara a la entrada del interferometro con el fin de eliminar ruido introducido por la iluminación del ambiente. El dispositivo experimental es el mismo que se utilizó en la sección 3.5 para la configuración de DS básico con un *shearing* $\Delta x = 10mm$, usando un diodo láser de longitud de onda $\lambda = 532nm$ y una cámara CMOS LM085M. La superficie de inspección en estos ensayos es de aproximadamente 25 cm x

25 cm. Las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 muestran dichos ensayos sobre el panel. Las figuras 4.5a y 4.5b muestran el interferograma y el espectro de frecuencia correspondiente obtenidos con el DS básico con máscara. Las figuras 4.6a, 4.7a y 4.7c muestran una secuencia de menor a mayor deformación del mismo panel ensayado con el DS básico sin máscara. Las figuras 4.6b, 4.7b y 4.7d son los correspondientes espectros de frecuencia bidimensionales. En las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se puede apreciar que el dispositivo es capaz de indicar la presencia de defectos, sin embargo se puede ver la reducción del campo de visión por la presencia de la máscara. Además se observa en los espectros de frecuencias que los lóbulos que contienen la frecuencia portadora no están bien definidos. Esto no permite aplicar procedimientos de filtrado y desenvolvimiento de fase con el fin de poder, en etapas posteriores, estimar tamaños de defectos.

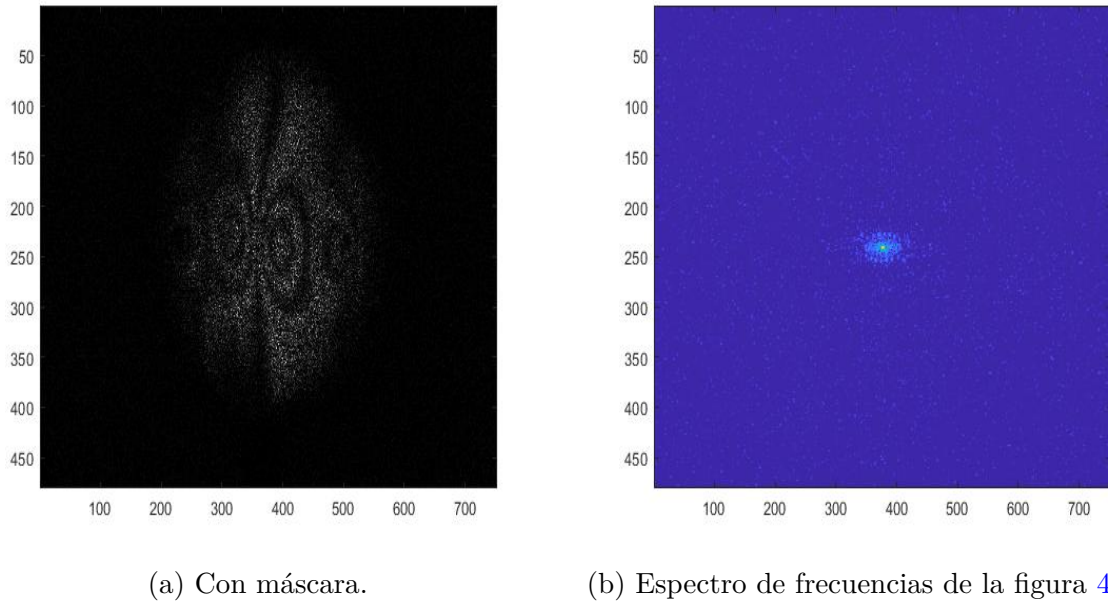
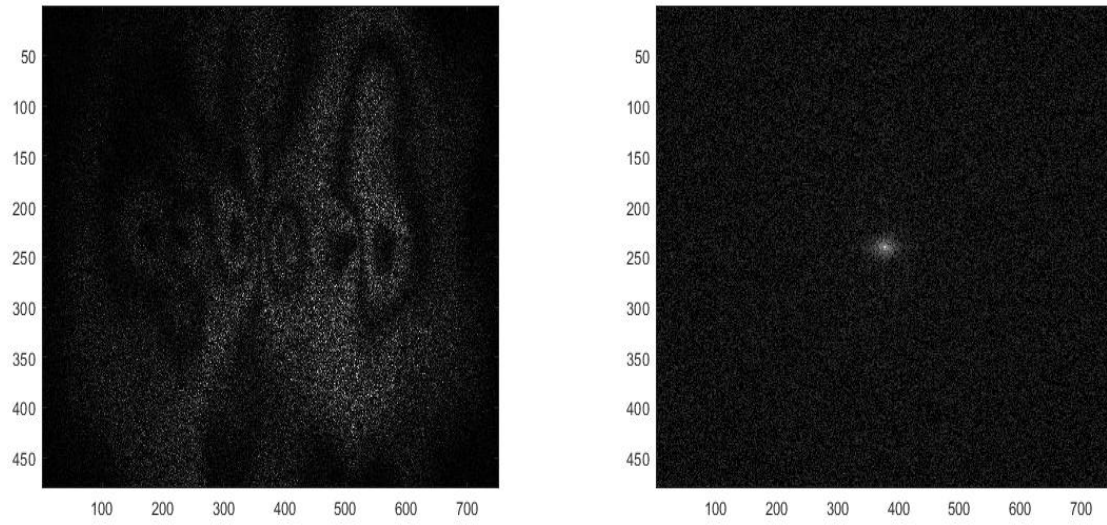


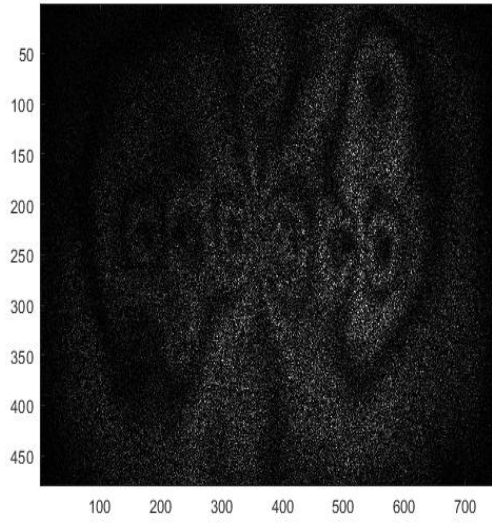
Figura 4.5. Ensayo de HC-Honney con máscara, orientación a 90 grados (respecto de la figura 4.2a), distancia 1 m entre objeto y cámara. *shearing* $\Delta x = 10mm$.



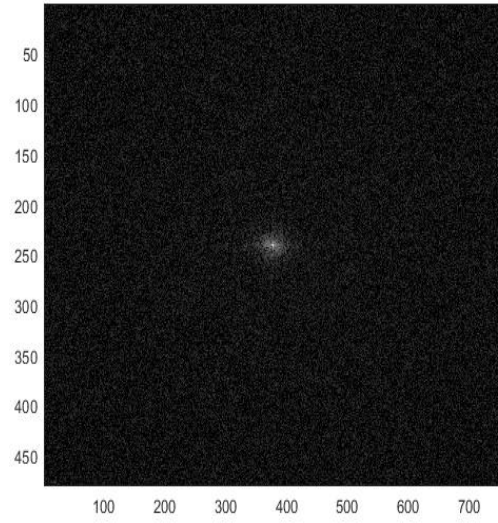
(a) Sin máscara.

(b) Espectro de frecuencias de la figura 4.6a.

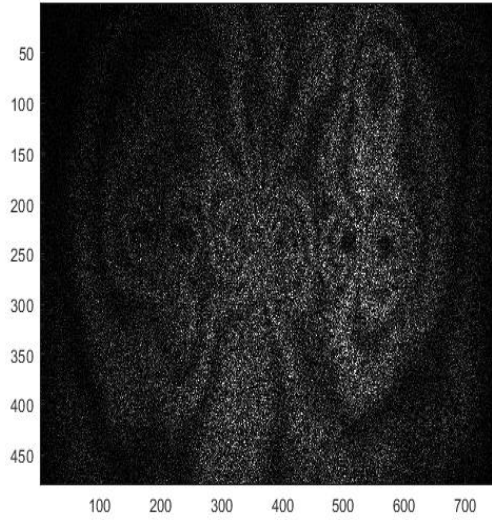
Figura 4.6. Ensayo de HC-Honney, orientación a 90 grados (respecto de la figura 4.2a), distancia 1 m entre objeto y cámara. *shearing* $\Delta x = 10mm$.



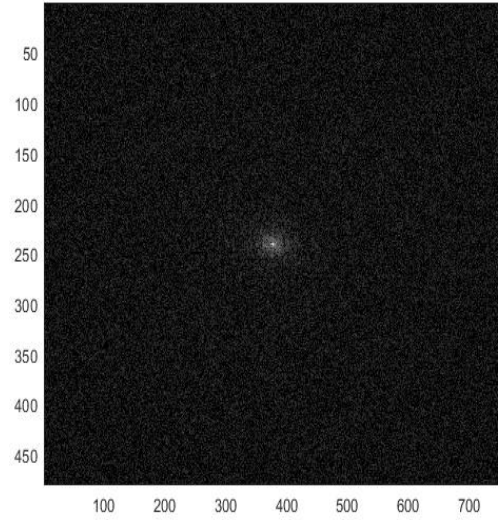
(a) Sin máscara.



(b) Espectro de frecuencias de la figura 4.7a.



(c) Sin máscara.



(d) Espectro de frecuencias de la figura 4.7c.

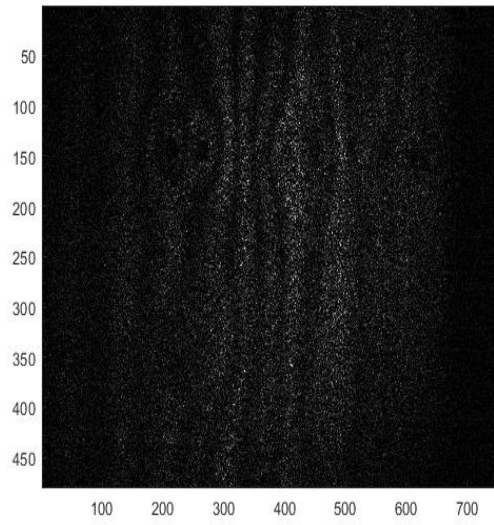
Figura 4.7. Ensayo de HC-Honney, orientación a 90 grados (respecto de la figura 4.2a), distancia 1 m entre objeto y cámara. *shearing* $\Delta x = 10mm$ (cont.).

4.2.2 DS GFP

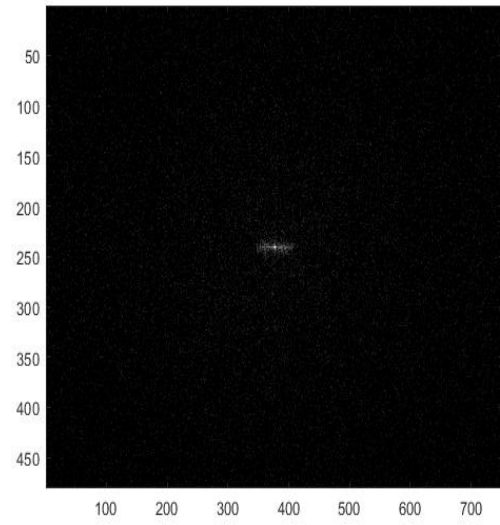
Se presentan los resultados obtenidos con el sistema de shearografía basado en GFP para el panel HC-Honney mostrado en la figura 4.2a. El dispositivo experimental es el mismo que se utilizó en la sección 3.5 para la configuración de DS GFP con un *shearing* $\Delta x = 10mm$, usando un diodo laser de longitud de onda $\lambda = 532nm$, una cámara CMOS LM085M y un desplazamiento de fuente de iluminación de 7mm. La superficie de

inspección en estos ensayos es de aproximadamente 25 cm x 25 cm.

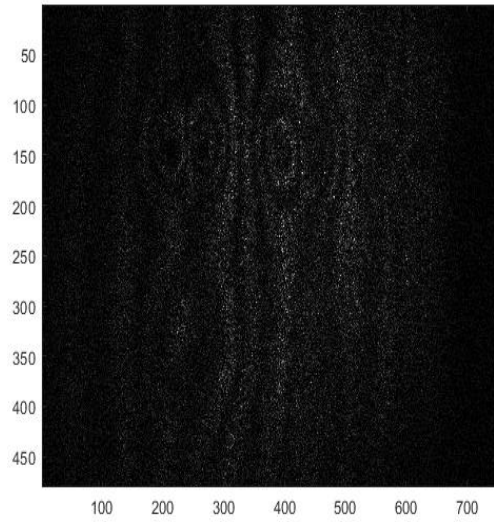
La figura 4.8 muestra dichos ensayos sobre el panel; las figuras 4.8a y 4.8c muestra una secuencia de deformación para GFP producidas por aplicación de calor en la parte posterior. En éstas se puede ver que el dispositivo es capaz de indicar la presencia de defectos; en este caso las líneas de interferencia presentan menor curvatura y se puede apreciar cómo se deforman en presencia de defectos. Además se observa en los espectros de frecuencias que los lóbulos que contienen la frecuencia portadora no están bien definidos. Esto no permite aplicar procedimientos de filtrado y desdoblamiento de fase con el fin de poder, en etapas posteriores, estimar tamaños de defectos.



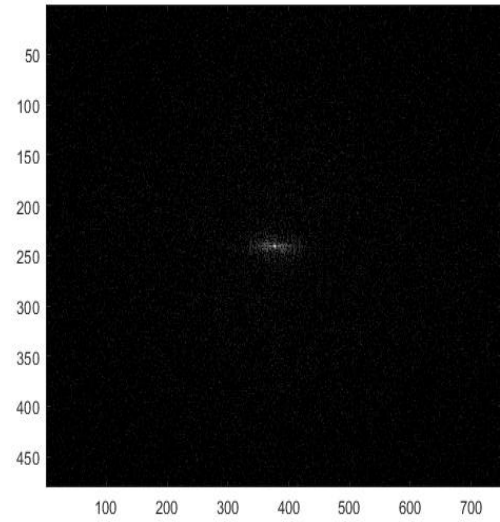
(a) Estado 1



(b) FT 2D de la figura 4.8a.



(c) Estado 2



(d) FT 2D de la figura 4.8c.

Figura 4.8. Ensayo de HC-Honney con GFP, orientación a 90 grados (respecto de la figura 4.2a), distancia 1 m entre objeto y cámara, desplazamiento de fuente de iluminación 7mm y *shearing* $\Delta x = 10\text{mm}$.

4.2.3 DS sistema $4f$ con apertura

Se muestran los resultados obtenidos de shearografía basado en el sistema $4f$ con apertura, para los paneles HC-Honney de la figura 4.2a, HC alan de la figura 4.1a, HC-casa de la figura 4.3a y el tubo bobinado de fibra de carbono y resina de la figura 4.4. Se probaron dos alternativas en donde se incorporaron una abertura circular y otra de tipo ranura. El dispositivo experimental es el mismo que se utilizó en la sección 3.5

para la configuración de DS $4f$ con un *shearing* $\Delta x = 10mm$, usando un diodo laser de longitud de onda $\lambda = 532nm$, una cámara CMOS LT225C y una apertura circular de $0,8mm$ de diámetro en el primero de los casos y una apertura tipo *slit* de $0,8mm$ por $20mm$. Dada la presencia de las aperturas se tuvo que reducir la distancia desde el dispositivo experimental al objeto debido a la pérdida de intensidad. Por ello la superficie de inspección en estos ensayos es de aproximadamente $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$.

De la figura 4.9 a la figura 4.16 se muestran los resultados para la condición de apertura circular en los diversos materiales disponibles; aunque es apreciable la pérdida de intensidad en las mediciones, el procesamiento digital es más efectivo y sencillo.

En el caso del panel HC-alan, figura 4.9, se puede observar que son revelados los insertos que se encuentran ubicados en la parte posterior y se puede inferir que estos presentan diferencias que pueden ser atribuidas a sus tamaños. También se observa en éste el efecto de los sucesivos filtros.

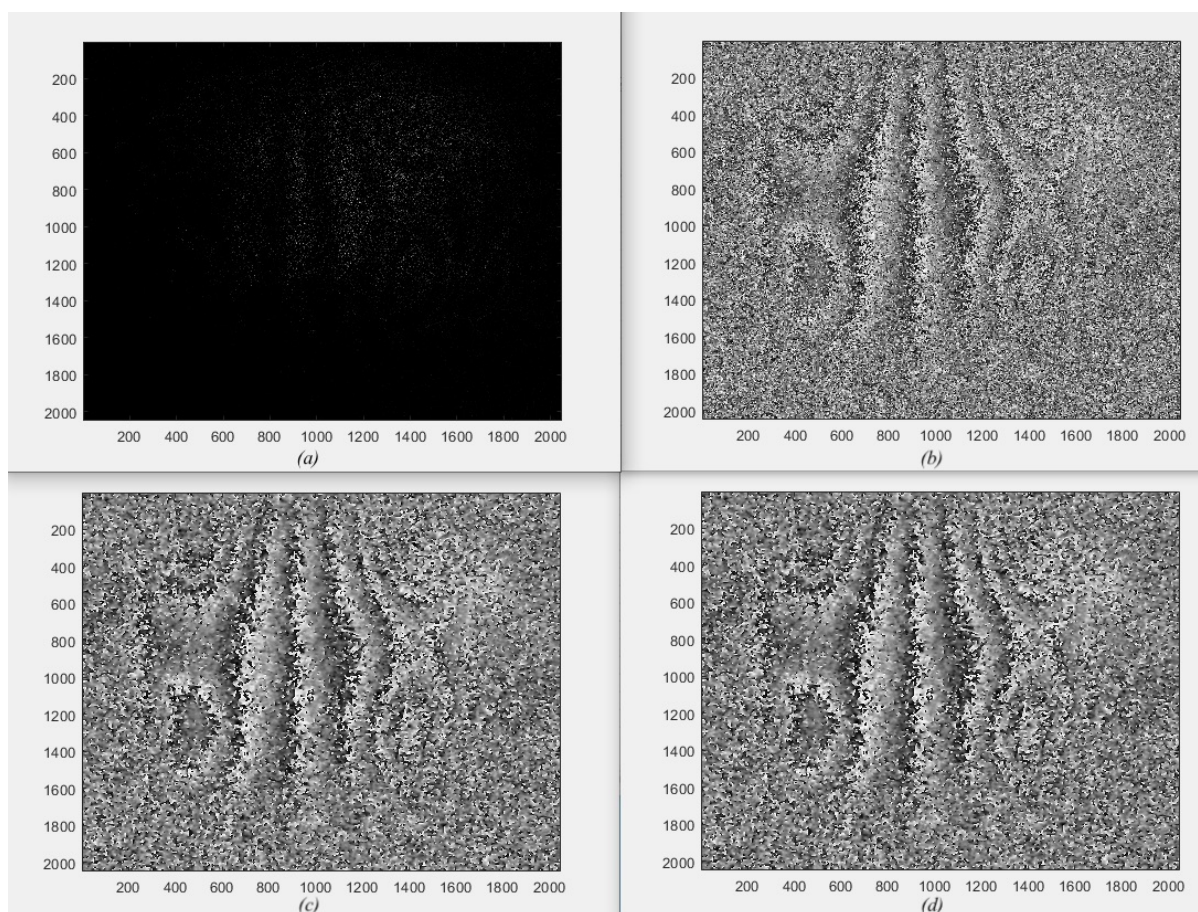


Figura 4.9. Ensayo con apertura circular cupón HC Alan 4.1a zona central, $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm. Procesamiento obtenido con filtro kernel de 3×3 + filtro Rectangular c 3 veces y d 30 veces.

En el caso del ensayo sobre la muestra HC-casa, figura 4.10, se observan mejores resultados, indicando la presencia del inserto.

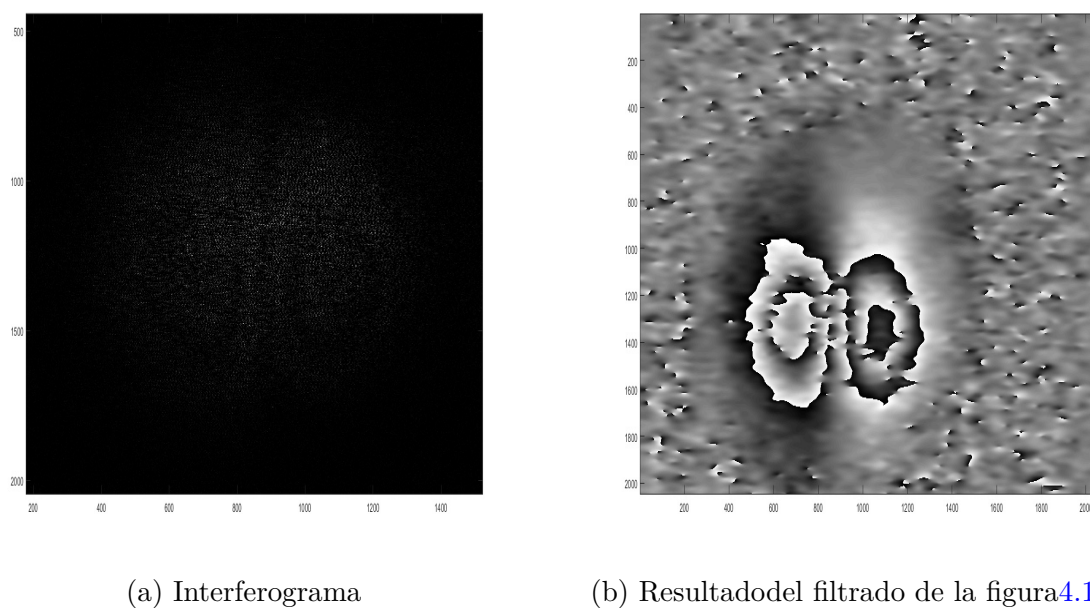


Figura 4.10. Ensayo con apertura circular de HC-Casa, distancia 50 cm entre objeto y cámara, $\Delta x = 10mm$. Procesamiento con filtro kernel de 3 x 3 + filtro rectangular 30 veces.

Para el caso del panel HC-Honney, figura 4.11, se realizaron diversos ensayos con diferentes niveles de deformación, observando que se puede indicar la presencia de los defectos presentes en el material (figuras 4.11 a la 4.15). En ellas se observan diversos niveles de deformación y se probaron los filtros disponibles para mejorar los resultados, figuras 4.11 a la 4.15.

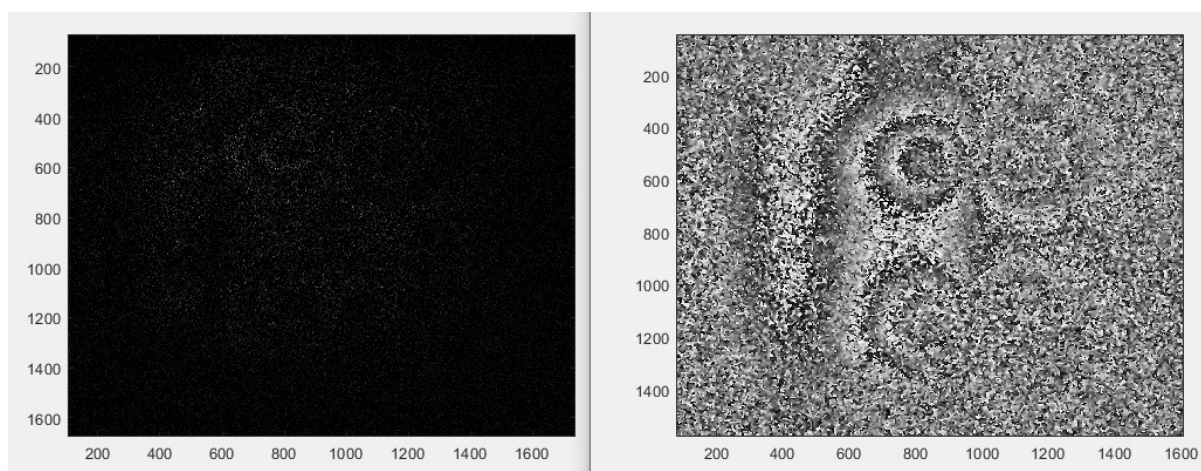


Figura 4.11. Ensayo 1 cupón HC Honney 4.2a zona central, $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm.

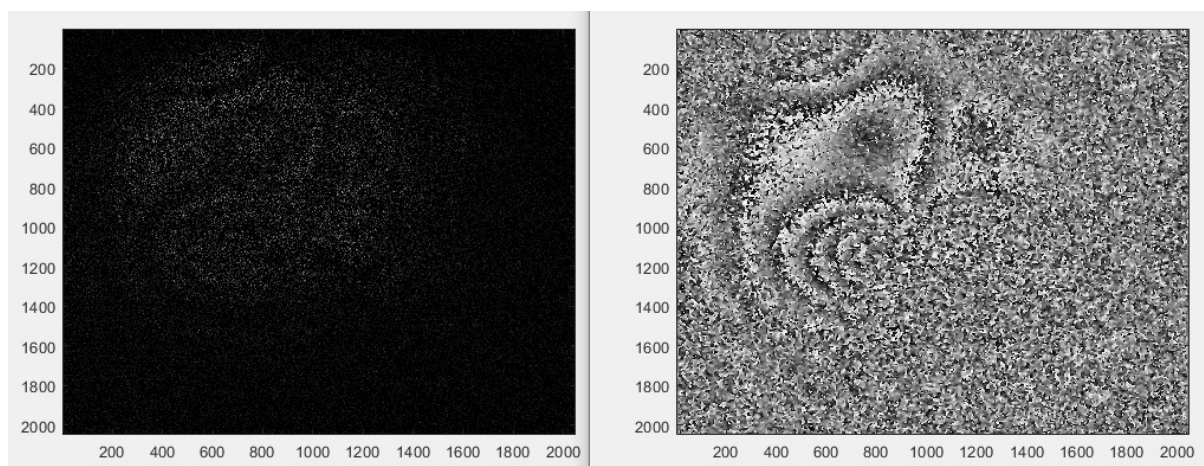


Figura 4.12. Ensayo 2 con apertura circular cupón HC Honney 4.2a zona central, $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm.

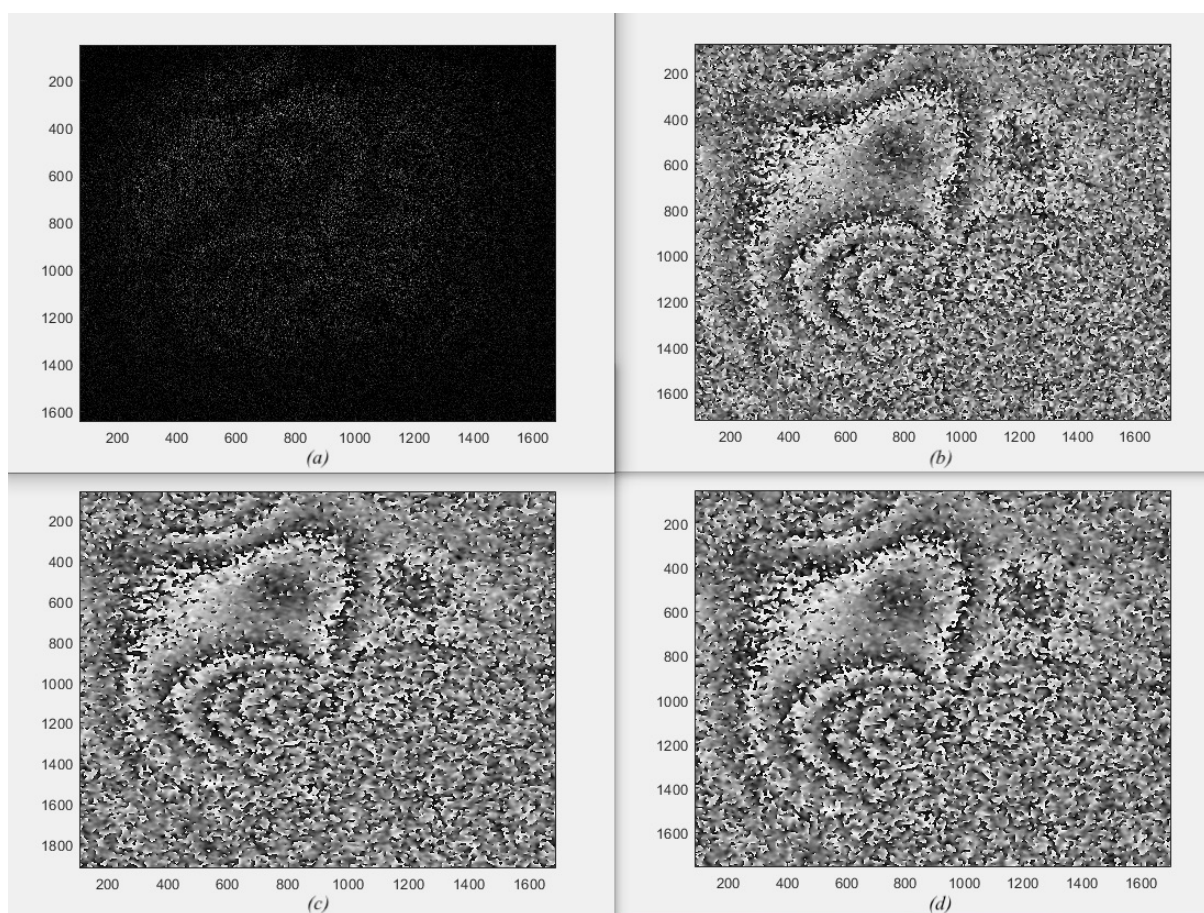


Figura 4.13. Imagen original (a) y procesada por FT (b). Pasos de filtros kernel + rectangular 3 ((c)) y 30 (d) a la figura 4.12.

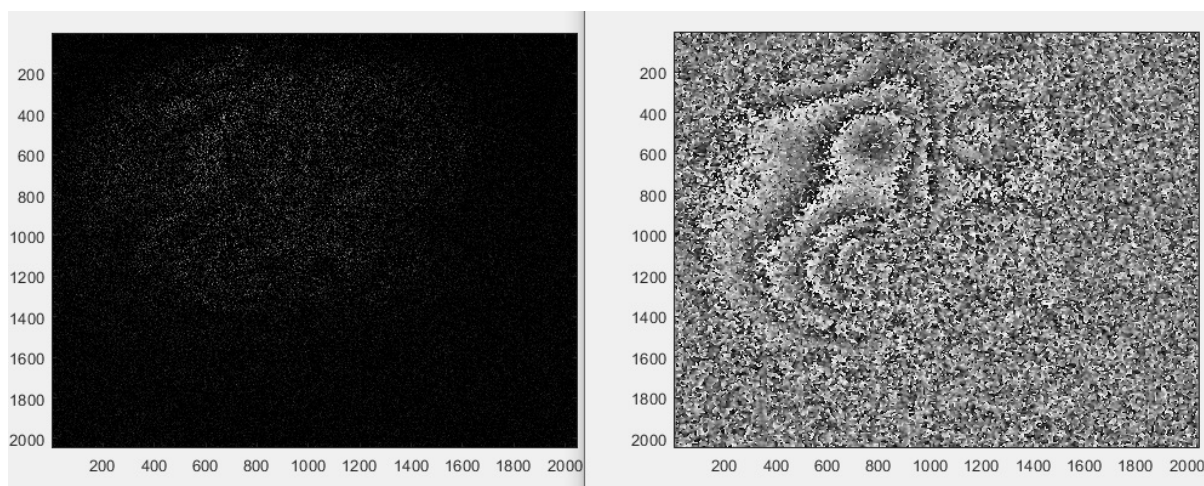


Figura 4.14. Ensayo 3 cupón HC Honney figura 4.2a zona central, $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm.

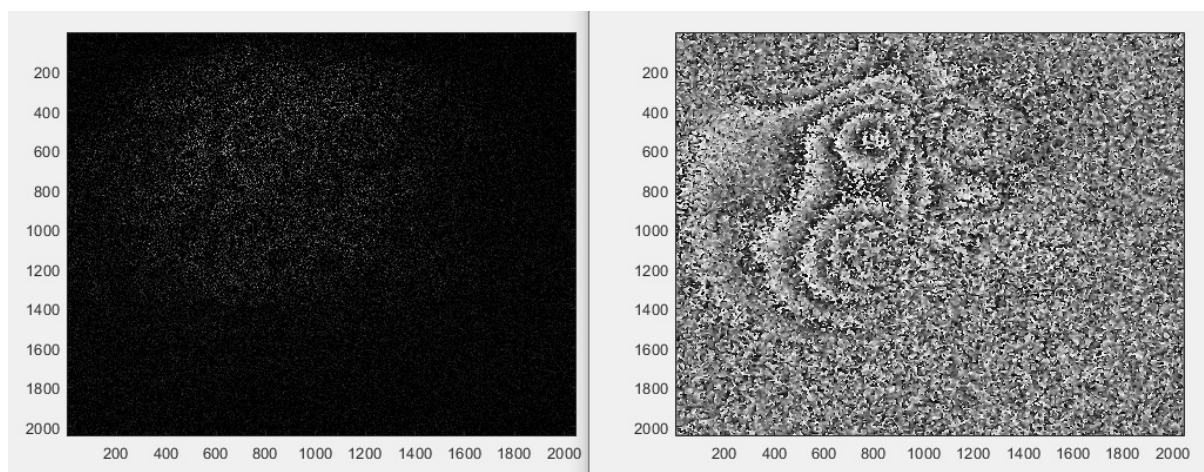


Figura 4.15. Ensayo 4 cupón HC Honney figura 4.2a zona central, $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm.

En la figura 4.16 se observan dos ensayos sobre el tubo de fibra de carbono donde no se pudieron detectar defectos.

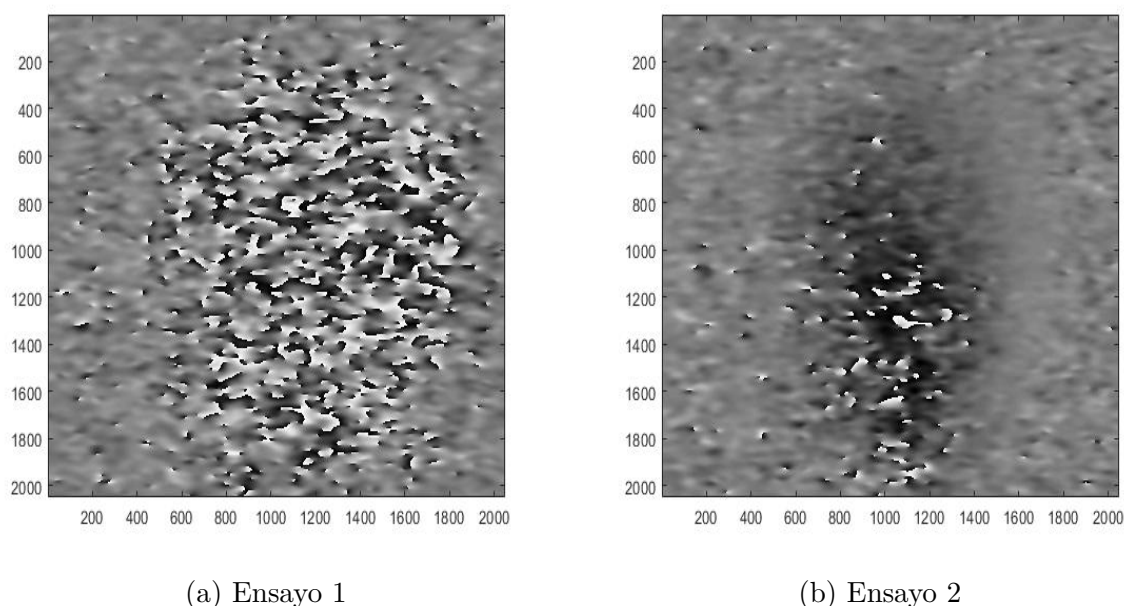


Figura 4.16. Ensayo de cupón tubo bobinado de fibra de carbono obtenido bajo excitación térmica. $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm. Zona central del tubo, orientación vertical.

Desde la figura 4.17 a la figura 4.20 se muestran los resultados para la condición de apertura tipo *slit* en los paneles HC-Honney, HC-alan y HC-casa. Aunque es apreciable una mejora en intensidad que llega al detector de la cámara, aún es escasa. El procesamiento digital permanece efectivo y sencillo, pero es apreciable el efecto de direccionalidad introducido por la apertura. Es notorio que con esta apertura el efecto de solapamiento es menor.

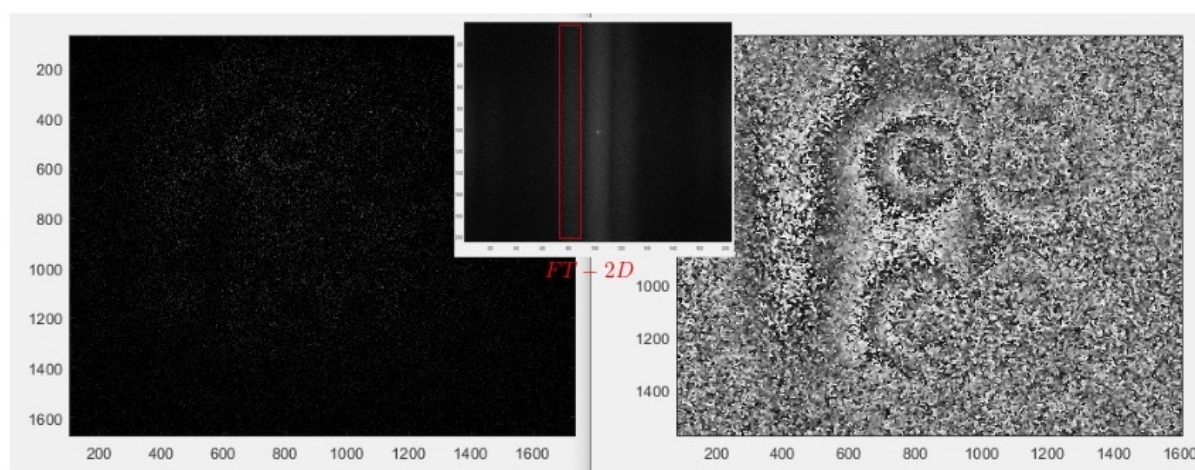
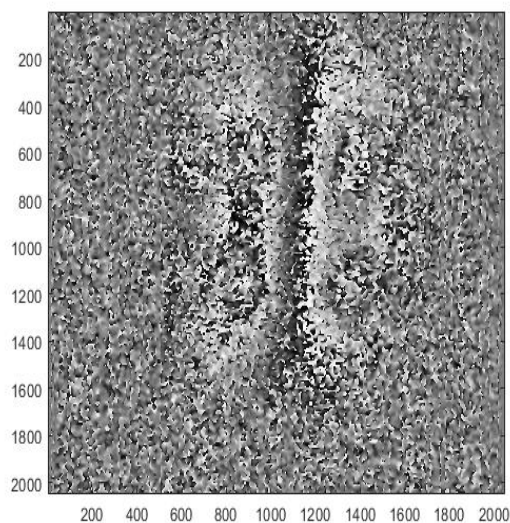
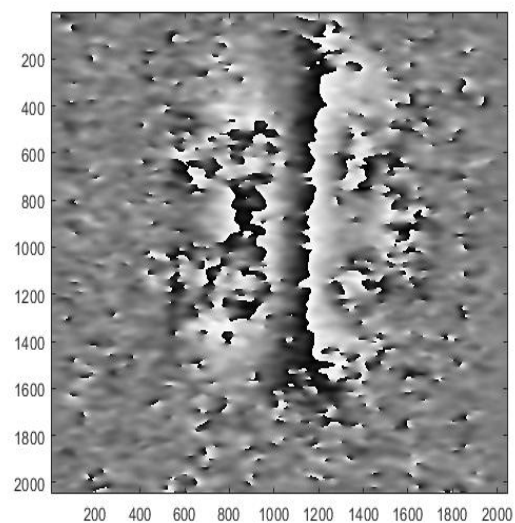


Figura 4.17. Ensayo cupón HC Honney 4.2a zona central, $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm.

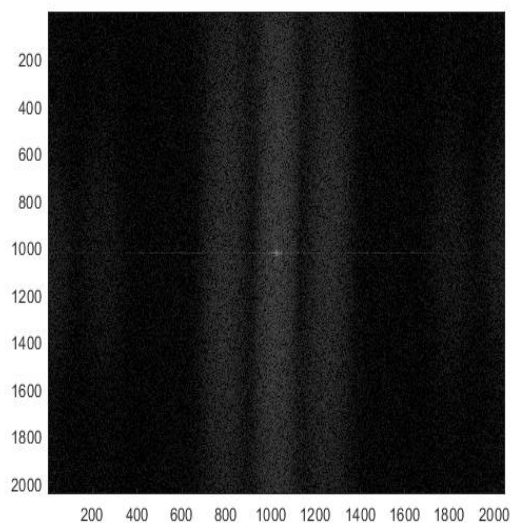


(a) Ensayo 1

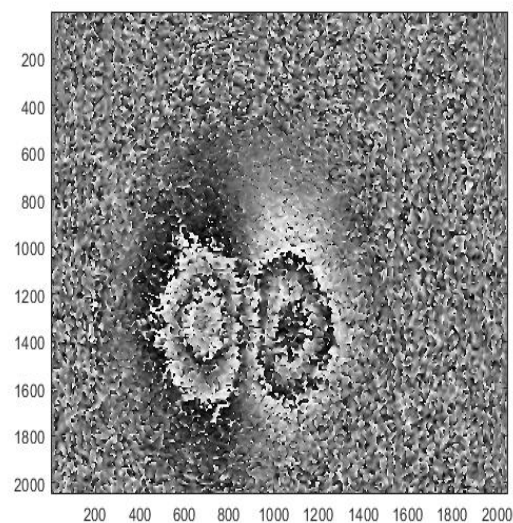


(b) Filtrada con filtro anisotrópico 7x15.

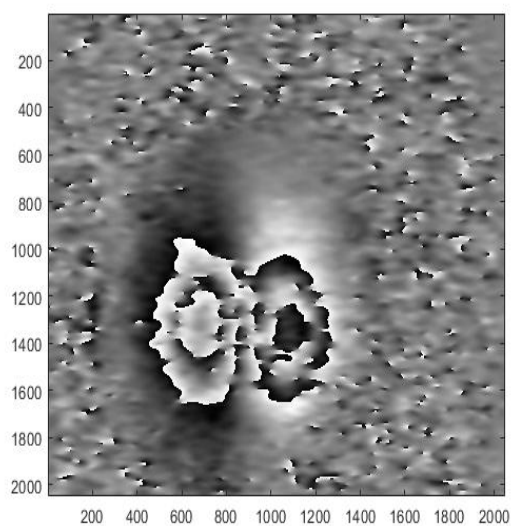
Figura 4.18. Ensayo de cupón HC alan, obtenido bajo excitación térmica. $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm. Zona central, orientación vertical.



(a) FT 2D

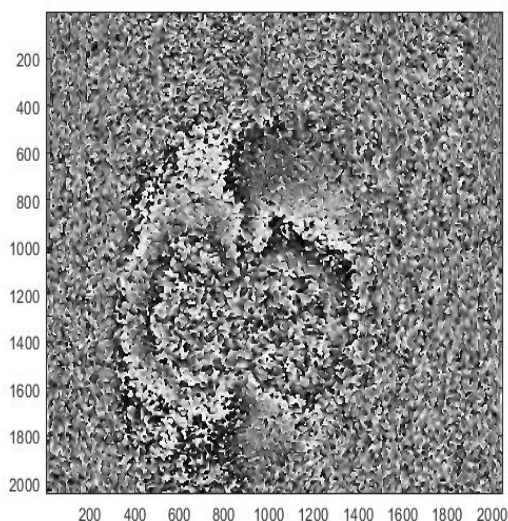


(b) Ensayo 1.

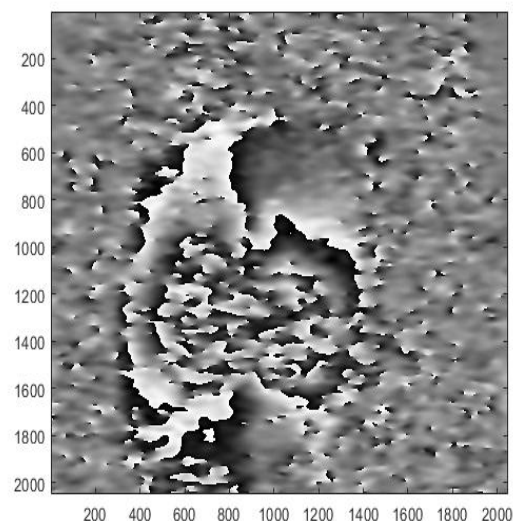


(c) Filtrada con filtro anisotrópico 7x15

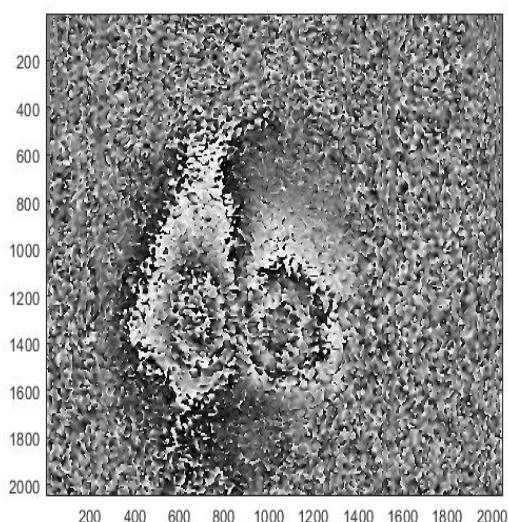
Figura 4.19. Ensayo de cupón HC casa, obtenido bajo excitación térmica. $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm. Zona central.



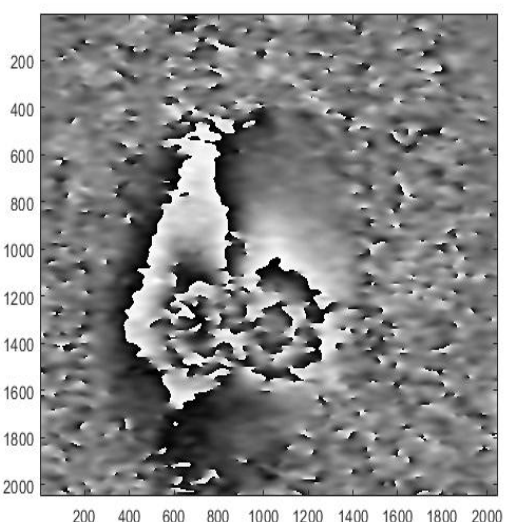
(a) Ensayo 2.



(b) Filtrada con filtro anisotrópico 7x15



(c) Ensayo 3.



(d) Filtrada con filtro anisotrópico 7x15

Figura 4.20. Ensayo de cupón HC casa, obtenido bajo excitación térmica. $\Delta x = 10mm$, distancia objeto - cámara 50 cm. Zona central (cont.).

4.2.4 DS Comercial

En este apartado se muestran los resultados obtenidos con el shearógrafo comercial LTI2100, para los cupones examinados. Las características del mismo, son diodo láser led (de alta calidad) de 1 watt de potencia y longitud de onda 532 nm, cámara cmos de 5 MP 12 bits, técnica utilizada cambio de fase temporal (TPS). El objetivo fue comparar las mediciones realizadas entre los distitos dispositivos montados en el laboratorio y un

instrumento comercial certificado. Datos del ensayo, ht = heat time (tiempo que permanecen encendidas las lámparas), tt = test time (tiempo de visualización). En todos los ensayos la distancia cámara objeto era de un metro (1m). En la figura 4.21 se muestra el mapa de fase para la muestra HC-Alan. En la figura 4.22 se muestra los resultados sobre la muestra HC-Honney enfocado sobre la zona central superior de donde se observa la detección del defecto sub superficial (agujero no pasante), con diferentes estados de deformación (de más a menos). Y en la figura 4.23 se muestran resultados para la muestra HC-Casa2 con diferentes estados de deformación, detectando la presencia del inserto metálico ubicado en la parte posterior, y en la figura 4.23d se muestra el desenvolvimiento de fase asociado a la figura 4.23c.

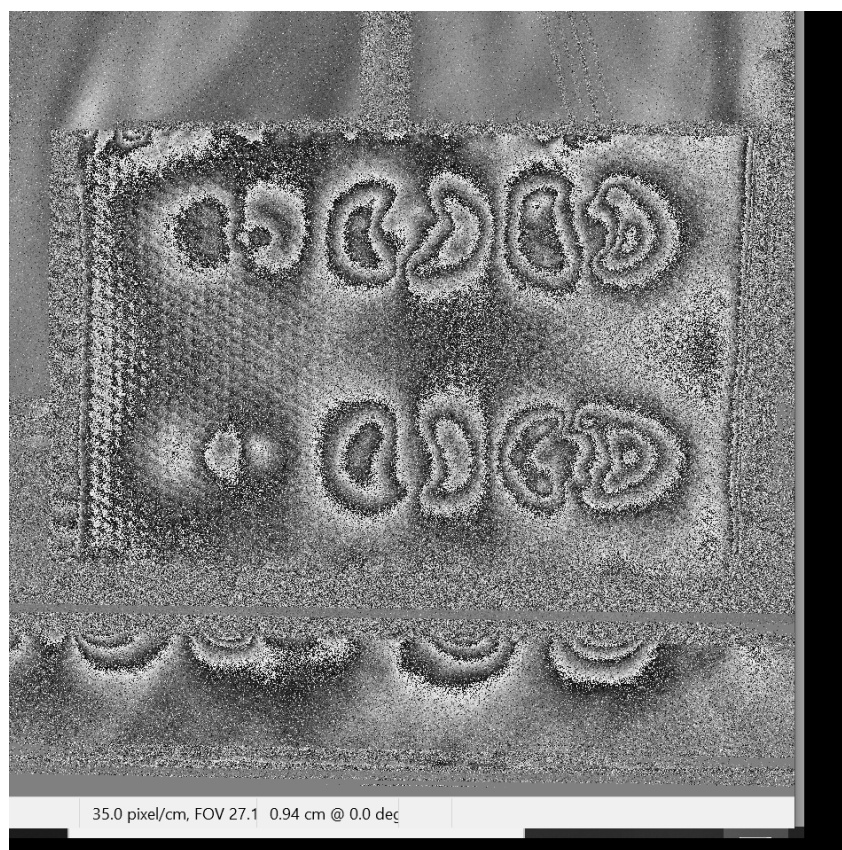
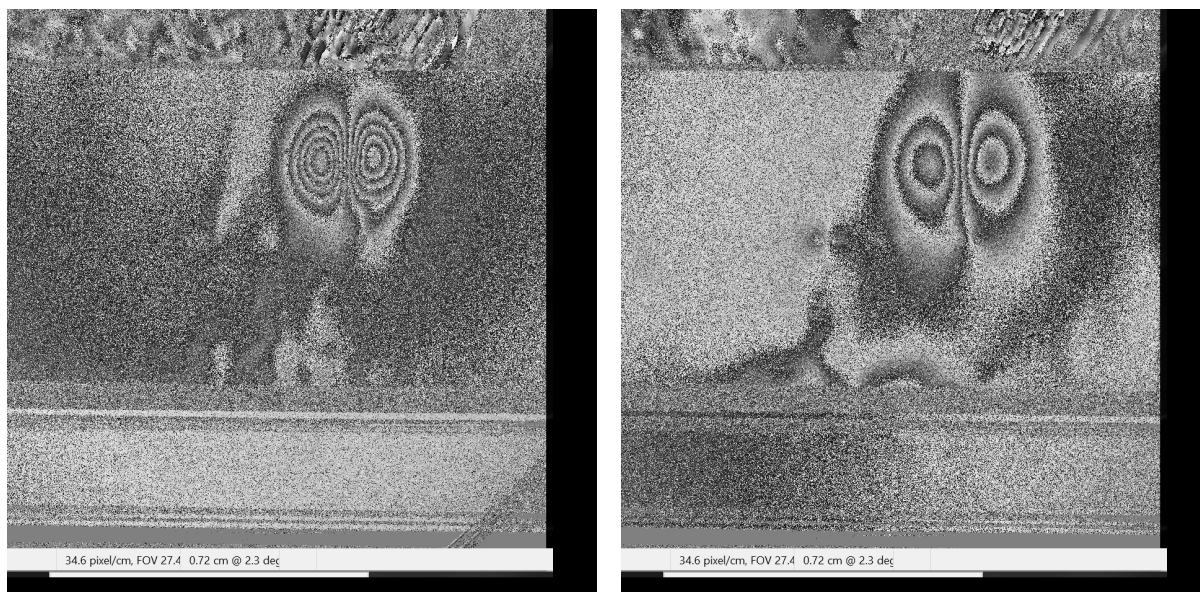
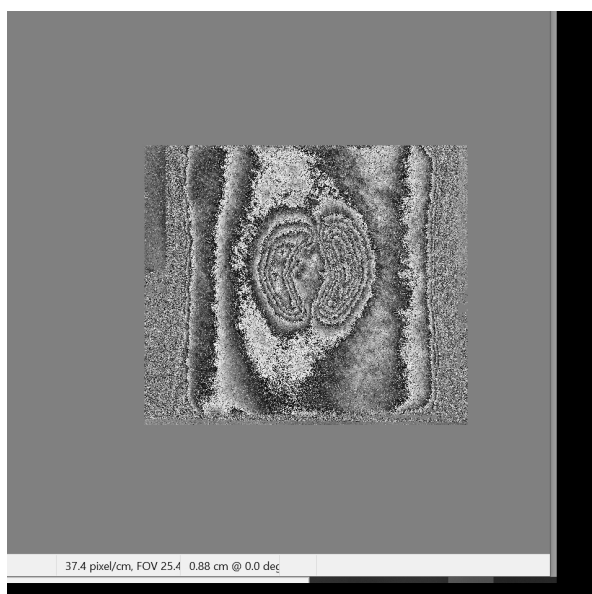


Figura 4.21. Ensayo de muestra panel HC-Alan obtenido bajo excitación térmica. Parametros: $\Delta x = 0,94\text{cm}$, $FOV = 27,1^\circ$, RAH, $ht = 10\text{s}$ y $tt = 10\text{s}$

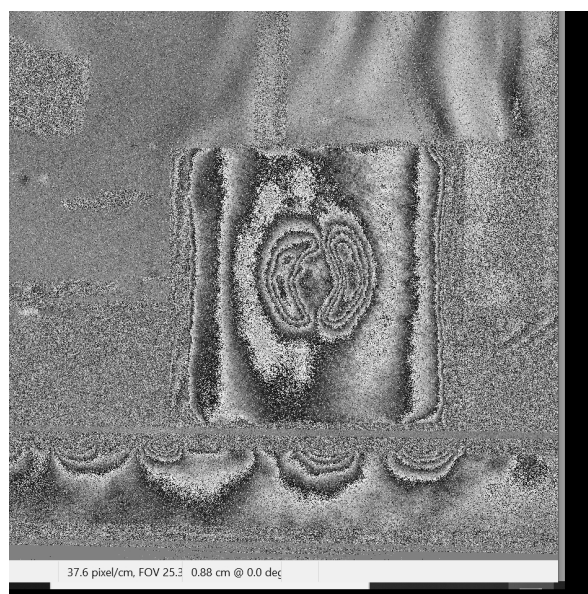


(a) Parametros: $\Delta x = 0,72cm$, $FOV = 27,4^\circ$ (b) Parametros: $\Delta x = 0,72cm$, $FOV = 27,4^\circ$

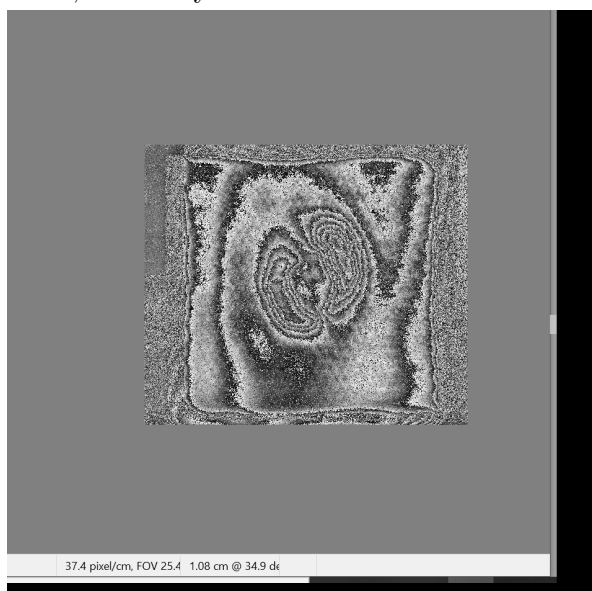
Figura 4.22. Ensayo de cupón panel HC-Honney obtenido bajo excitación térmica (Pistola de calor).



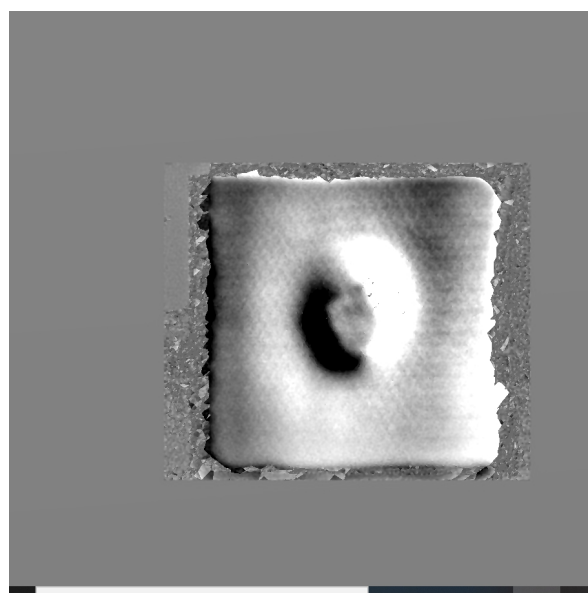
(a) Parametros: $\Delta x = 0,88\text{cm}$, $FOV = 25,4^\circ$, RAH, $ht = 5s$ y $tt = 10s$



(b) Parametros: $\Delta x = 0,88\text{cm}$, $FOV = 25,3^\circ$, RAH, $ht = 8s$ y $tt = 12s$



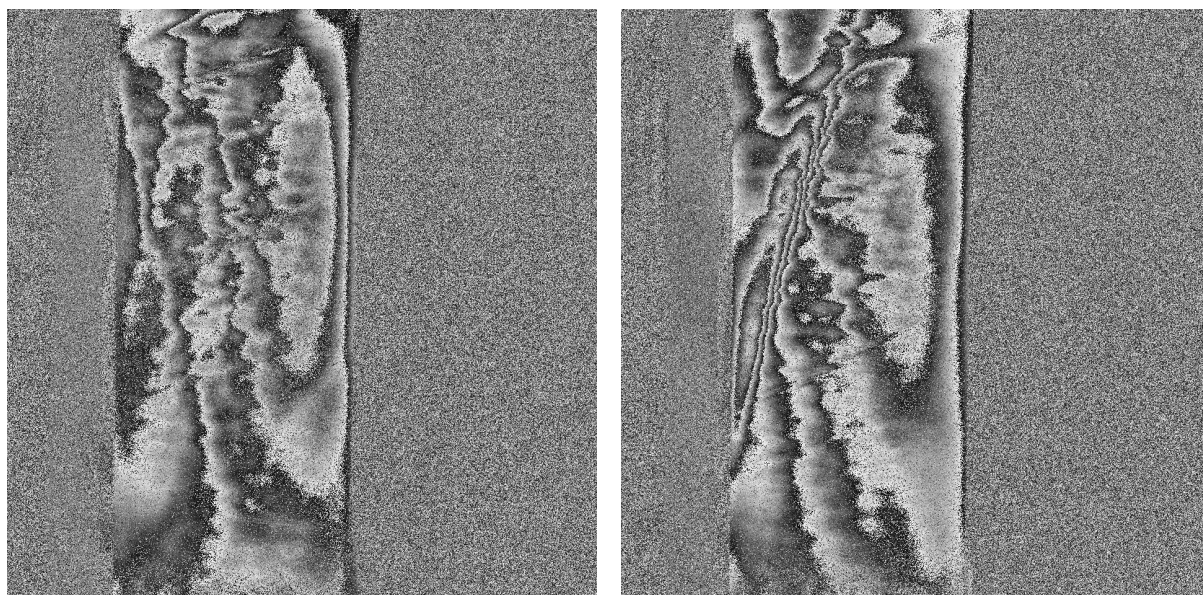
(c) Parametros: $\Delta x = 1,08\text{cm}$, $FOV = 25,4^\circ$, RBH, $ht = 5s$ y $tt = 10s$



(d) Desenvolvimiento de fase de la figura 4.23c

Figura 4.23. Ensayo de cupón panel HC-Casa2 obtenido bajo excitación térmica.

En la figura 4.24 se muestran los resultados para un tubo bobinado de fibra de carbono a una distancia entre cámara y objeto de 118.5 cm.



(a) Parametros: $\Delta x = 1\text{cm}$, RAH, $ht = 10\text{s}$, $rt = 2\text{s}$ y $tt = 10\text{s}$ (b) Parametros: $\Delta x = 1\text{cm}$, RAH, $ht = 10\text{s}$, $rt = 2\text{s}$ y $tt = 10\text{s}$

Figura 4.24. Ensayo de tubo bobinado de fibra de carbono, resultados obtenidos bajo excitación térmica.

4.3 Discusión

De los resultados obtenidos sobre las muestras de material compuesto, se observó que las diversas configuraciones presentaron:

- La configuración DS básica (IM) como shearógrafo permite en todos los casos observar los patrones de interferencia y detectar la presencia de defectos de manera clara y eficiente. En cuanto a la posibilidad de usarlo para la técnica de SPS para cuantificar el defecto no es una opción muy efectiva ya que existe demasiado ruido.
- El shearógrafo GFP permite detectar defectos superficiales y sub superficiales, aunque no tan claramente como el DS básico.
- En torno al uso de GFP, cuando se analizó el panel HC-alan que contenía insertos metálicos, se pudo divisar que el patrón de formado permitía observar que las franjas presentaban una deformación diferente en el caso de insertos de mayor dimensión que en el caso de menores.
- La detección de defectos en el interferograma obtenido con el sistema 4f con apertura resultó deficiente. Se considera que es por la escasa intensidad que llega a la cámara debido a los componentes ópticos adicionales. A pesar de esta contrariedad, esta

técnica tiene los mejores resultados al utilizar el SPS para obtener el mapa de fase para luego poder dimensionar el defecto. Se cree que con una fuente de iluminación más potente se puede mejorar no solo los interferogramas sino también los mapas de fase con reducción de ruido. También ésto permitiría alejar la muestra a ensayar logrando inspeccionar un área mayor (mayor FOV).

- Se puede apreciar que el sistema $4f$ con apertura es muy dependiente de la resolución espacial de la cámara, lo que permite mejorar los resultados si el tamaño de pixel es reducido.
- La técnica SPS presentó su mejor versión en los sistemas con apertura.

5. Conclusiones

En este capítulo final, se resumen los principales logros que se obtuvieron en este trabajo. Luego, se analizan las ventajas y desventajas de cada dispositivo experimental y finalmente en comparación con el dispositivo DS comercial.

5.1 Resumen de principales logros

- Se montaron tres tipos de shearógrafos de laboratorio, el DS básico, el llamado GFP y el básico con sistema $4f$. Se analizaron la capacidad de detectar defectos y la posibilidad de cuantificarlos mediante un pos procesamiento.
- Se logró explorar diferentes alternativas para implementar SPS como técnica para el método de DS, dentro de las cuales se pudo concluir que el sistema $4f$ con apertura, como la mejor alternativa para ser utilizada con la técnica SPS. Una notable mejora, es el aumento del área que contiene información de la fase relativo al caso del sistema convencional.
- El dispositivo GFP obtiene interferogramas con franjas bien definidas, sin embargo cuando se desea realizar la técnica SPS para obtener la fase, se obtiene un mapa de fase con mucho ruido. Se observó que a medida que se deforman las franjas, se genera un espectro de Fourier cada vez más difuso, lo que hace difícil aislar e identificar correctamente la ubicación de la frecuencia portadora. Esto hace que la cuantificación del defecto sea muy laboriosa, dado que se deben utilizar muchos tipos de filtros y tiempo de procesado.
- El procesamiento digital en términos de SPS mediante una ventana tipo *Gaussiana* dio buenos resultados en términos de bajos tiempos y complejidad reducida para procesar la transformada de Fourier de ventana. El uso de filtros logró optimizar la cantidad de pasos y la elección de cada uno según el tipo de apertura. El filtro anisotrópico en el caso de apertura rectangular da buenos resultados y compensa la deformación en una dirección del *speckle*.

-
- La propuesta de hacer uso de una apertura rectangular a expensas de deformar el grano de *speckle* permite en idénticas condiciones de la apertura circular tener mayor intensidad o contraste en la imagen capturada por la cámara.
 - Las variantes IM y GFP presentan buenos resultados en términos de detectar defectos, pero no son una buena opción para la técnica de SPS.
 - Otra conclusión no menos relevante es que como se trabajó con un diodo láser de una potencia de 100mW, la técnica SPS no requiere una alta coherencia y filtrado del haz para poder ser utilizada en DS.
 - Por último se presentaron comparaciones con un shearógrafo comercial. En primer lugar hay que notar la diferencia de recursos entre éste y los dispositivos de laboratorio. En esta comparación se puede destacar la capacidad de detección que tiene el DS básico notando que la iluminación se realiza con un diodo láser. Esto significa que se tiene un ancho de banda mayor al utilizado en el equipo comercial, además de que la potencia es un orden menor.
 - Por último, el DS básico es un dispositivo sencillo y de relativamente bajo costo como para construir un prototipo.

5.2 Trabajos futuros

- Examinar el sistema $4f$ con lentes de mejor calidad (L_1 y L_2) y una lente formadora de imagen con foco variable, lo que permitiría buscar diversas alternativas de distancia focal - tamaño de apertura.
 - Realizar una adquisición basada en video a diversas frecuencias de adquisición y evaluar los resultados en términos de decorrelación del *speckle*, para mediciones prologadas y dinámicas.
 - Realizar mayores comparaciones con el equipo comercial disponible LTI2100 a fin de realizar una optimización en las mediciones.
 - Queda por continuar analizando las dos variaciones de shearógrafos presentadas, mejorando en primer lugar, la potencia de iluminación. También contribuirían para la configuración $4f$ una optimización de la utilización de componentes ópticos, como
-

lentes y aberturas, de mejor calidad, así como también una cámara digital con menor tamaño de pixel.

6. Referencias

- A. Dá, G. H. Kaufmann y C. Pérez López. (1998). Transient deformation analysis by a carrier method of pulsed electronic speckle-shearing pattern interferometry.
- A. Davila, J. M. Huntley, G. H. Kaufmann y D. Kerr. (2005). High-speed dynamic speckle interferometry: phase errors due to intensity, velocity, and speckle decorrelation.
- Argentina. (05 Octubre 2022[a]). *La CNEA en el proyecto SAOCOM*. <https://www.argentina.gob.ar/cnea/destacados/la-cnea-en-el-proyecto-saocom>
- Argentina. (05 Octubre 2022[b]). *Proyecto SAOCOM 1A*. <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/noche-espacial/satelite-saocom-1a>
- Argentina. (05 Octubre 2022[c]). *Saocom 1A*. <https://www.infoespacial.com/texto-diario/mostrar/3567305/argentina-tiene-saocom-1a-orbita>
- Ashby M. F. (2016). *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier Science.
- ASTM E. (2007). 2581-07: Standard Practice for Shearography of Polymer Matrix Composites. *Sandwich Core Materials and Filament-Wound Pressure Vessels in Aerospace Applications ASTM International*, 1-11.
- B. C.F. Oliveira, A. A. Seibert, D. Staub y A. Albertazzi. (2020). Square-pulse shearography inspections of metallic parts repaired with a glass fiber reinforced polymer using pressure, radiation, vibration, and induction loading methods. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 187, 104-187. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104187>
- CONAE. (05 Octubre 2022). *CONAE*. <https://catalogos.conae.gov.ar/catalogo/catalogoSat.html>
- D. Francis, R. P. Tatam y R. M. Groves. (2010). Shearography technology and applications: A review. *Measurement Science and Technology*, 21. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/10/102001>
- D. Staub Felipe, T. J. de Bortoli, A. V. Fantin, D. P. Willemann, M. Benedet, A. Lenzi y A. A. Gonçalves. (2022). Two procedures for out-of-plane displacement calculation in simultaneous shearography images. *Optics and Lasers in Engineering*, 149, 106-828. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2021.106828>

-
- Dainty J. C. Ed., Ennos A. E. (1975). *Laser speckle and related phenomena*. Springer-Verlag, Berlin-Heideberg-New York.
- Dantec Dynamics. (05 Octubre 2022). *Dantec Dynamics Laser Shearography NDT*. <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/laser-shearography-ndt/>
- E. N. Hogert. (2008). *El Speckle*. CNEA.
- F. J. Macedo, M. E. Benedet, A. V. Fantin, D. P. Willemann, F. A. Alves da Silva y A. Albertazzi. (2018). Inspection of defects of composite materials in inner cylindrical surfaces using endoscopic shearography. *Optics and Lasers in Engineering*, 104, 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.06.005>
- G. H. Kaufmann. (2011). *Advances in Speckle Metrology and Related Techniques* (G. H. Kaufmann, Ed.). Wiley-VCH Verlag Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527633852>
- G. Pedrini, Y. L. Zou y H. J. Tiziani. (1996). Quantitative evaluation of digital shearing interferogram using the spatial carrier method. *Pure and Applied Optics (Print edition) (United Kingdom)*, 5, 313-321. <https://doi.org/10.1088/0963-9659/5/3/008>
- Gay D. (2014). *Composite Materials: Design and Applications, Third Edition*. Taylor & Francis.
- Goodman J. W. (2020). *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*. SPIE Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1117/3.2548484>
- Hecht E. (2012). *Optics*. Pearson.
- Invap SE. (05 Octubre 2022). *Invap en la mision SAOCOM*. <http://saocom.invap.com.ar>
- J. A. Leendertz y J. N. Butters. (1973). An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 6(11), 1107-1110. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/6/11/019>
- J. Feng, Y. Wang, X. Wang, S. Wu, L. Yang. (2015). Desing of digital shearography with wide angle of view based on 4f system. *Journal of Applied Optics*, 36(2), 188-193., 188-193.
- J. L. Marroquin, J. E. Figueroa y M. Servin. (1997). Robust quadrature filters. *Journal of the Optical Society of America A*, 14, 779. <https://doi.org/10.1364/josaa.14.000779>
-

-
- J. L. Marroquin y M. Rivera. (1995). Quadratic regularization functionals for phase unwrapping. *J. Opt. Soc. Am. A*, 12(11), 2393-2400. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.12.002393>
- J. Pineda, J. Bacca, J. Meza, L. A. Romero, H. Arguello y A. G. Marrugo. (2020). SPUD: simultaneous phase unwrapping and denoising algorithm for phase imaging. *Applied Optics*, 59, D81. <https://doi.org/10.1364/ao.383600>
- J. Takezaki y Y. Y. Hung. (1986). Direct Measurement of Flexural Strains in Plates by Shearography. <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- Jones, R. y Wykes, C. (1989). *Holographic and Speckle Interferometry* (2.^a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511622465>
- L. Guerriero, G. Nico, G. Pasquariello y S. Stramaglia. (1998). New regularization scheme for phase unwrapping. *Appl. Opt.*, 37(14), 3053-3058. <https://doi.org/10.1364/AO.37.003053>
- Laser Technology Inc. (05 Octubre 2022). *Laser Technology Shearography NDT*. <https://www.laserndt.com>
- M. Takeda. (1990). Spatial-carrier fringe-pattern analysis and its applications to precision interferometry and profilometry: An overview. *Industrial Metrology*, 1, 79-99. [https://doi.org/10.1016/0921-5956\(90\)80019-R](https://doi.org/10.1016/0921-5956(90)80019-R)
- M. Takeda, H. Ina y S. Kobayashi. (1982). Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, 72.
- Mase G.T. , Smelser R.E. y Mase G.E. (2010). *Continuum Mechanics for Engineers, Third Edition*. Taylor & Francis.
- MathWorks. (05 Octubre 2022). *Image Acquisition Toolbox*. <https://es.mathworks.com/products/image-acquisition.html#triggering-and-acquisition>
- Q. Kemao. (2004). Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis.
- Q. Kemao. (2007). Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: Principles, applications and implementations. *Optics and Lasers in Engineering*, 45, 304-317. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.10.012>
- Q. Kemao. (2013). *Windowed Fringe Pattern Analysis*. SPIE Press.
- Qihan Zhao, Xizuo Dan, Fangyuan Sun, Yonghong Wang, Sijin Wu y Lianxiang Yang. (2018). Digital shearography for NDT: Phase measurement technique and re-
-

-
- cent developments. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8. <https://doi.org/10.3390/app8122662>
- R. A. Martínez-Celorio, A. Dá, G. H. Kaufmann y G. Mendiola. (2000). Extension of the displacement measurement range for electronic speckle-shearing pattern interferometry using carrier fringes and a temporal-phase-unwrapping method Subject terms: shearing interferometry; spatial synchronous detection; temporal-phase unwrapping; speckle phenomena; optical metrology. <http://spiedl.org/terms>
- R. A. Martínez-Celorio, R. González-Peña, R. Cibrián, R. Salvador, M. F. Mínguez y L. Martí-López. (2010). Young's modulus measurement of the radius bone using a shearing interferometer with carrier fringes. *Optics and Lasers in Engineering*, 48, 727-731. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2010.03.001>
- R. Kä, E. Hack y U. Sennhauser. (1999). Multiwavelength shearography for quantitative measurements of two-dimensional strain distributions.
- R. Romero y M. F. Ruiz Gale. (2015). *Calibración de piezoeléctrico utilizando un interferómetro de Michelson*. CNEA.
- R. Romero y M. F. Ruiz Gale. (2016). *Método de Shearografía digital para evaluación de materiales. Técnicas: Portadora de fase y Phase shifting*. CNEA.
- Reddy, J.N. y Reddy, J.N. (2013). *An Introduction to Continuum Mechanics*. Cambridge University Press.
- Roesler J. , Harders H., y Baeker, M. (2007). *Mechanical Behaviour of Engineering Materials: Metals, Ceramics, Polymers, and Composites*. Springer Berlin Heidelberg.
- S. Waldner y N. Goudemand. (2000). *Quantitative Strain Analysis With Image Shearing Speckle Pattern Interferometry*. Swiss Federal Institute of technology Zurich.
- S. Waldner y R. P. Tatam. (s.f.). Time-Division-Multiplexed 3D Shearography. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/>
- S. Wu, X. He y L. Yang. (2011). Enlarging the angle of view in Michelsoninterferometer-based shearography by embedding a 4f system. *Applied Optics*, 50, 3789-3794. <https://doi.org/10.1364/AO.50.003789>
- Sirohi R. S. (2016). *Introduction to Optical Metrology*. CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315215228>
- Sirohi R.S. (1999). *Speckle Metrology*. CRC Press.
- Veng sa. (05 Octubre 2022). *SAOCOM®*. <https://saocom.veng.com.ar>
-

-
- X. Xie, J. Li, B. Zhang, L. Yan y L. Yang. (2015). Improvement of phase map quality for Michelson interferometer based spatial phase-shift digital shearography. *Asian Journal of Physics*, 24, 1-11.
- X. Xie, L. Yang, N. Xu y X. Chen. (2013). Michelson interferometer based spatial phase shift shearography. *Applied Optics*, 52, 4063-4071. <https://doi.org/10.1364/AO.52.004063>
- X. Xie, X. Li, X. Chen y L. Yang. (2015). Review of recent developments of spatial phase-shift digital shearography. *International Conference on Experimental Mechanics 2014*, 9302, 93020E. <https://doi.org/10.1117/12.2075536>
- X. Xie, Y. Zheng, X. Li, B. Sia, P. Zhong, G. Yang y L. Yang. (2014). Spatial Phase-Shift Digital Shearography for Out-of-Plane Deformation Measurement. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 7, 402-405. <https://doi.org/10.4271/2014-01-0824>
- Y. Y. Hung. (1996). Shearography for Non-destructive Evaluation of Composite Structures. *Optics and Lasers in Engineering*, 24, 161-182.
- Y. Y. Hung y C. Y. Liang. (1979). Image-shearing camera for direct measurement of surface strains. *Applied Optics*, 18, 10-46. <https://doi.org/10.1364/ao.18.001046>
- Y. Y. Hung, Y. S. Chen, S. P. Ng, L. Liu, Y. H. Huang, B. L. Luk, R. W.L. Ip, C. M.L. Wu yP. S. Chung. (2009). Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 64, 73-112. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2008.11.001>
- y S. Brem, S. W. (s.f.). Compact Shearography System for the Measurement of 3D Deformation. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/>
-

7. Apéndice I: Mecánica de los medios continuos

7.1 Tensores de deformaciones y tensiones

7.1.1 Tensor de deformaciones

Para un cuerpo Γ bajo la influencia de un sistema de fuerzas se define al desplazamiento de la partícula (figura 7.1(a)) $\vec{u}$ como

$$\vec{u} = \vec{x} - \vec{X} \quad (7.1)$$

dónde $\vec{X}$ es la posición inicial de la partícula y $\vec{x}$ es la posición final, dicha representación puede expresarse ya sea por una descripción *Lagrangiana* o *Euleriana*, aquí se desarrolla la descripción *Lagrangiana*. Un cuerpo rígido es aquel en el que la distancia entre dos partículas materiales permanece igual, mientras que un cuerpo deformable es aquel en el que las partículas materiales pueden moverse entre sí bajo la acción de estímulos externos. Un movimiento de cuerpo rígido es aquel en el que todas las partículas materiales del cuerpo experimentan el mismo desplazamiento. Entonces, la deformación de un continuo solo puede determinarse considerando el cambio de distancia entre dos puntos arbitrarios pero infinitesimalmente cercanos del continuo, P y Q para el estado de referencia y $\bar{P}$ y $\bar{Q}$ para el estado deformado, figura 7.1(c) y (d). Los cambios geométricos que experimenta un medio continuo se pueden medir de varias maneras. Aquí, discutimos una medida general de deformación de un medio continuo, independiente tanto de la traslación como de la rotación. El cambio en las longitudes al cuadrado que ocurre cuando un cuerpo se deforma desde un estado de referencia ($d\vec{S}$) a la configuración actual ($d\vec{s}$) se puede expresar en relación con la longitud original como

$$\begin{aligned} (d\vec{S})^2 &= d\vec{X} \cdot d\vec{X} \\ (d\vec{s})^2 &= d\vec{x} \cdot d\vec{x} \\ (d\vec{s})^2 - (d\vec{S})^2 &= 2d\vec{X} \cdot E_{IJ} \cdot d\vec{X} \end{aligned} \quad (7.2)$$

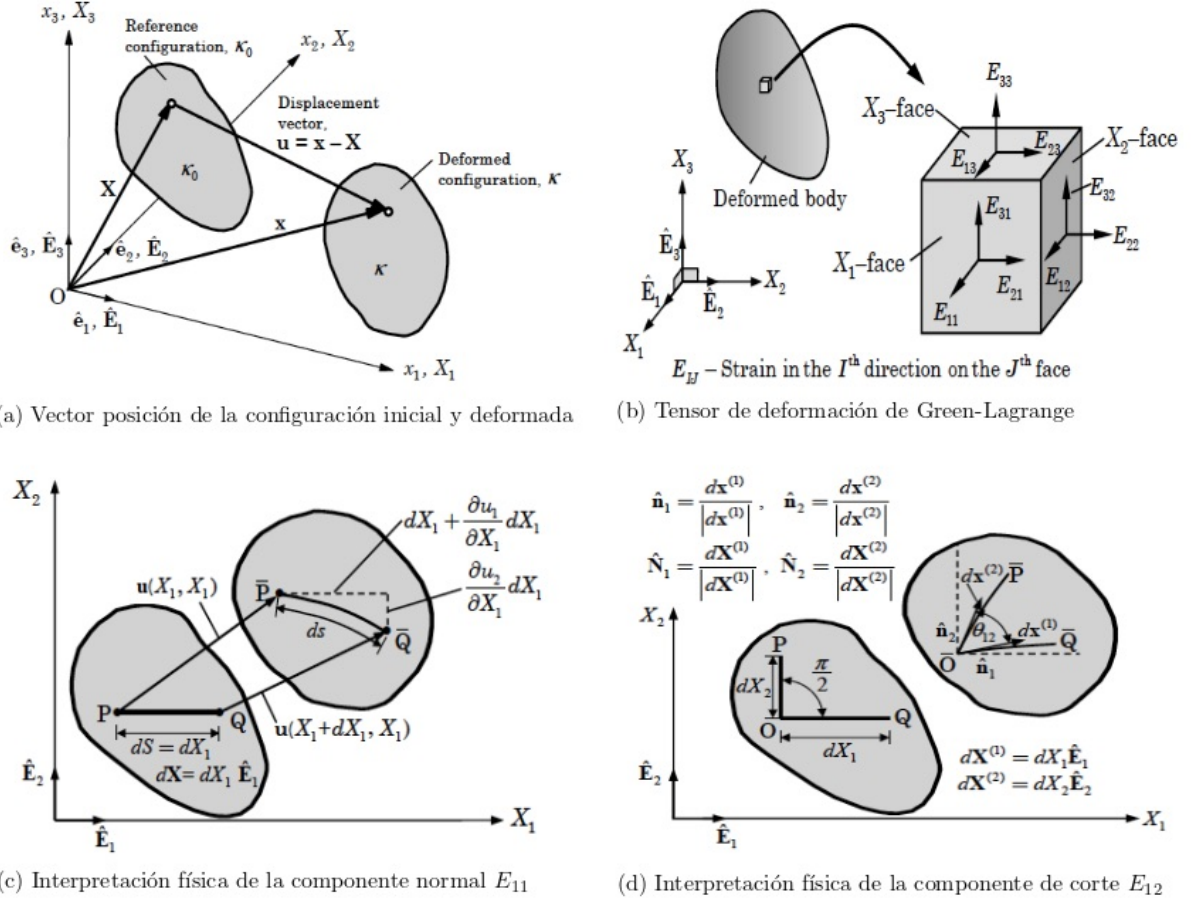


Figura 7.1. Esquemas utilizados para describir el tensor de deformaciones. Tomado de (Reddy, J.N. y Reddy, J.N., 2013).

donde E_{IJ} es llamado el *tensor de deformación (Lagrangiano) de Green-St. Venant*, *tensor de deformación de Green-Lagrange* o simplemente *tensor de deformación de Green*. Este tensor es de orden 2 y simétrico. Si se considera un sistema de coordenadas cartesianas rectangulares (X_1, X_2, X_3) se puede expresar al tensor de deformación como

$$E_{IJ} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_I}{\partial X_J} + \frac{\partial u_J}{\partial X_I} + \frac{\partial u_K}{\partial X_I} \frac{\partial u_K}{\partial X_J} \right) \quad (7.3)$$

donde está expresado de forma implícita la suma en el índice repetido (K) del último termino. Claramente, el último término en las Ec. 7.3 no es lineal en los gradientes de desplazamiento. En la figura 7.1(b) se observa un cubo elemental con la representación cartesiana del tensor de deformación. En las figura 7.1(c) y figura 7.1(d) se observan las interpretaciones físicas de las componentes normales y de corte del tensor, donde las E_{IJ} para $I = J$ están asociados a los cambios de volumen dentro del sólido y las E_{IJ} para $I \neq J$ están asociados a rotaciones o distorsiones angulares de los puntos dentro del con-

tinuo. Si los valores numéricos de todas las componentes de desplazamiento y los tensores gradientes de desplazamiento son muy pequeños, podemos despreciar los términos cuadráticos y los productos de estas cantidades en comparación con los gradientes mismos. Con ésto los términos del tensor *Green-Lagrange* no lineales son despreciados, obteniendo un tensor de deformaciones linealizado ε llamado tensor de deformaciones infinitesimal. Esto es

$$E \approx \varepsilon = \frac{1}{2}[\nabla_0 u + (\nabla_0 u)^T]$$

$$\varepsilon_{IJ} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_I}{\partial X_J} + \frac{\partial u_J}{\partial X_I}\right) \quad (7.4)$$

Esta ecuación muestra las componentes del tensor de deformaciones infinitesimal en coordenadas cartesianas, si se expresa en forma tensorial se tiene

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial X_1} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_1}{\partial X_2} + \frac{\partial u_2}{\partial X_1}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_1}{\partial X_3} + \frac{\partial u_3}{\partial X_1}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_1}{\partial X_2} + \frac{\partial u_2}{\partial X_1}\right) & \frac{\partial u_2}{\partial X_2} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_2}{\partial X_3} + \frac{\partial u_3}{\partial X_2}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_1}{\partial X_3} + \frac{\partial u_3}{\partial X_1}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_2}{\partial X_3} + \frac{\partial u_3}{\partial X_2}\right) & \frac{\partial u_3}{\partial X_3} \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \varepsilon_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

donde ε_{11} , ε_{22} y ε_{33} son las componentes normales y ε_{12} , ε_{13} y ε_{23} son las componentes de corte. Las deformaciones de corte $\gamma_{12} = 2\varepsilon_{12}$, $\gamma_{13} = 2\varepsilon_{13}$ y $\gamma_{23} = 2\varepsilon_{23}$ son las deformaciones de corte ingenieriles (Mase G.T. , Smelser R.E. y Mase G.E., 2010), (Reddy, J.N. y Reddy, J.N., 2013).

7.1.2 Tensor de tensiones

Por último nos queda desarrollar el concepto de tensión y tensor de tensiones de Cauchy's, aunque en este caso la descripción será breve, ya que como se verá en las secciones siguientes lo que es de alto interés para este trabajo es el campo gradiente de desplazamientos y su relación con el tensor de deformaciones infinitesimal Ec. 7.5 y Ec. 7.6. En la figura 7.2(a) se observa un cuerpo sólido continuo (κ) sobre el cual actúan una cantidad de fuerzas externas de diversas naturaleza. Si tomamos un punto material dentro del cuerpo y cortamos dicho solido por un plano imaginario observamos

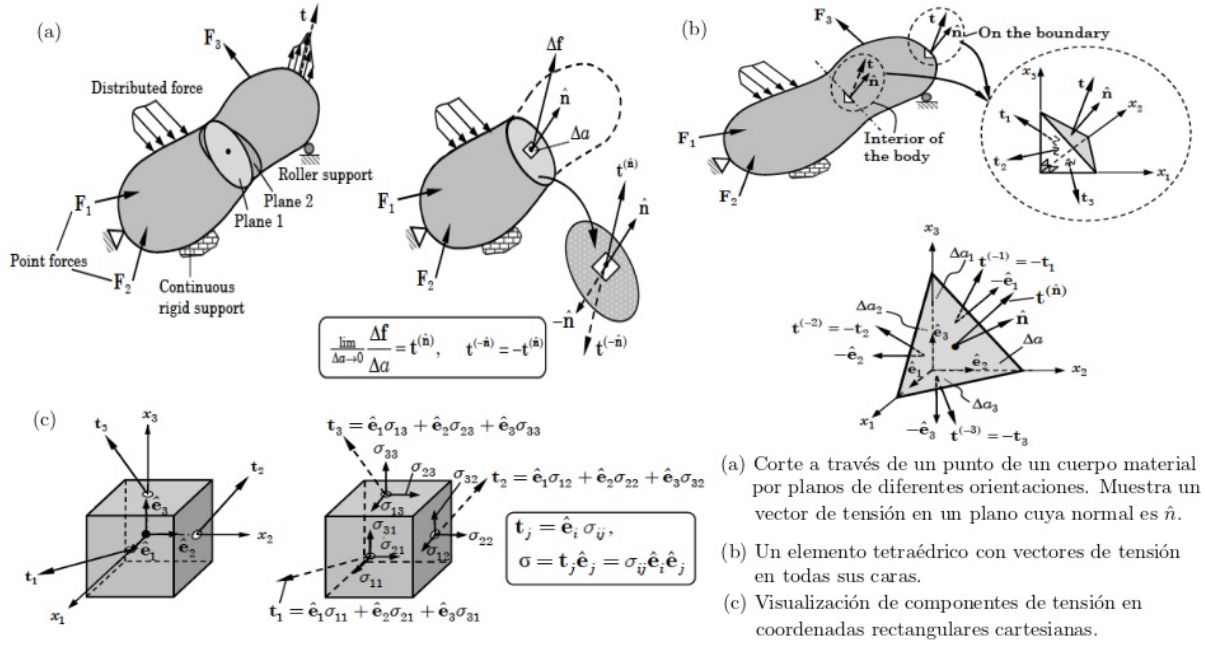


Figura 7.2. Esquemas utilizados para describir el tensor de tensiones. Tomado de (Reddy, J.N. y Reddy, J.N., 2013).

que aparece una fuerza (segunda Ley de Newton) compensada en ambas caras del sólido dividido por el plano (Tercera Ley de Newton). Dicha fuerza es de origen superficial y no solo depende de la magnitud del área, sino también de la orientación del área. Esto se observa en la Ec. 7.7 donde el vector fuerza depende del vector normal unitario al plano, $\hat{n}$. Si hacemos infinitesimal dicha área alrededor del punto material propiamente dicho, lo cual nos conduce a un límite donde $\Delta a \rightarrow 0$, se obtiene el vector tensión.

$$\vec{t}(\hat{n}) = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{f}(\hat{n})}{\Delta a} \quad (7.7)$$

Ya que se encuentra establecida la relación infinitesimal entre $\vec{t}$ y $\hat{n}$, definimos un elemento tetraédrico infinitesimal en coordenadas cartesianas, donde el punto material se encuentra en la cara inclinada. Aplicando sobre este elemento tetraédrico la segunda Ley de Newton, se obtiene

$$\vec{t} = \vec{t}_i (\hat{e}_i \cdot \hat{n}) \quad (7.8)$$

como $\hat{e}_i$ son los vectores unitarios del sistema cartesiano, la Ec. 7.8 (conocida como formula de *Cauchy*) puede ser desarrollada y re escrita de la siguiente forma

$$\sigma \equiv \vec{t}_1 \hat{e}_1 + \vec{t}_2 \hat{e}_2 + \vec{t}_3 \hat{e}_3 = \vec{t}_j \hat{e}_j \quad (7.9)$$

donde σ es el tensor de tensiones y él mismo es una propiedad del medio, independiente del vector normal unitario. Reemplazando la Ec. 7.9 en la Ec. 7.8 se obtiene

$$\begin{aligned}\vec{t}(\hat{n}) &= \sigma \cdot \hat{n} = \hat{n} \cdot \sigma \\ t_i &= \sigma_{ij} n_j\end{aligned}\tag{7.10}$$

Esta fórmula es la conocida como tensor de Cauchy y σ es el tensor de tensiones de Cauchy, con la tensión definida como fuerza por unidad de área deformada. Ahora podemos definir el tensor de tensiones por sus componentes en coordenadas cartesianas (figura 7.2(c)):

$$\sigma = \sigma_{ij} \hat{e}_i \hat{e}_j \tag{7.11}$$

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{12} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \tag{7.12}$$

donde los subíndices ij indican las direcciones del sistema coordenado ortogonal, en el sistema cartesiano (x, y, z) o (x_1, x_2, x_3) . Aquí también se puede discriminar entre componentes de corte τ o σ con $i \neq j$ y las componentes normales con $i = j$.

7.2 Relaciones constitutivas

En este apartado se enunciarán las relaciones físico matemáticas para un material lineal elástico, conocida como *Ley de Hooke generalizada*. Las ecuaciones constitutivas son las que relacionan variables correspondientes a campos primarios $(\vec{u}, \nabla \vec{u})$ con variables de campos secundarios (σ) , e involucra propiedades físicas intrínsecas del continuo. Éstas no son derivadas de ningún principio físico. En esencia las relaciones constitutivas son modelos matemáticos del comportamiento real de materiales que son validados mediante resultados experimentales.

7.2.1 Ley de Hooke Generalizada

Para desarrollar esta relación entre tensiones y deformaciones para un sólido lineal elástico se establece un sistema de coordenadas del cual se pueden medir parámetros del material (x_1, x_2, x_3) , el cual no debe confundirse con el usado para la descripción

material (x, y, z) . El sistema de coordenadas es alineado con los planos de simetría del material, y con ello se puede definir con cierta pérdida de generalidad (si tenemos un cuerpo libre de tensiones antes de aplicarle carga)

$$[\sigma] = [C][\varepsilon] \quad (\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}) \quad (7.13)$$

Esta ecuación es conocida como Ley Generalizada de Hooke. Los coeficientes C_{ijkl} son llamados coeficientes de rigidez elásticos, y es un tensor de cuarto orden con un total de 81 constantes. Ese número es reducido, ya que el tensor de constantes de rigidez elásticas es simétrico y, como los tensores de tensiones y deformaciones también lo son, se reducen las constantes a 36.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} \\ & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{2212} \\ & & C_{3333} & C_{3323} & C_{3313} & C_{3312} \\ & & & C_{2323} & C_{2313} & C_{2312} \\ & & & & C_{1313} & C_{1312} \\ & & & & & C_{1212} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix} \quad (7.14)$$

Una forma de notación mucho más simple para las tensiones y deformaciones es la conocida notación ingenieril o de Voigt-Kelvin, en donde la Ec. 7.13 queda reducida a

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j \quad (7.15)$$

con i y j que van de 1 a 6, y nótese que $C_{ij} = C_{ji}$. Se asume que la relación tensión - deformación dada por la Ec 7.13, Ec 7.14 y Ec 7.15 son invertibles. Por lo tanto se puede definir una relación deformación - tensión dada por

$$\varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j \quad (7.16)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ & & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ & & & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ & & & & S_{55} & S_{56} \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (7.17)$$

donde $S_{ij} = S_{ji}$ y es la matriz de coeficientes de *compliance* del material, y $[S] = [C]^{-1}$. Los elementos de estos tensores de rigidez y *compliance* pueden ser determinados experimentalmente.

Otro punto a tener en cuenta es la simetría de planos materiales, lo cual se resume en la tabla 7.1 para diferentes tipo de redes y simetrías, en donde se enumeran la cantidad de constantes elásticas independientes que se deben determinar para caracterizar ya sea la matriz de rigidez o la de *compliance*.

Tipo de red	Nº de constantes elásticas
isotrópico	2
cúbico	3
hexagonal	5
tetragonal	6
ortotrópico	9
monoclínico	13
triclínico	21

Tabla 7.1. Tabla resumen de constantes elásticas para diferentes tipos de redes (Roesler J. , Harders H., y Baeker, M., 2007).

8. Apéndice II: Interferometría

8.1 Técnicas Portadoras de Fase

Se presentan dos técnicas ampliamente utilizadas en Shearografía en donde se evalúa la visualización de las franjas en función de la complejidad del dispositivo. En la figura 8.1 se esquematiza cómo la información de la fase puede estar modulada en el tiempo o en el espacio según se considere a estas dos alternativas. Una de las técnicas es la SPS desarrollada en esta tesis y la otra es Portador... (TPS) que se explicará brevemente aquí.

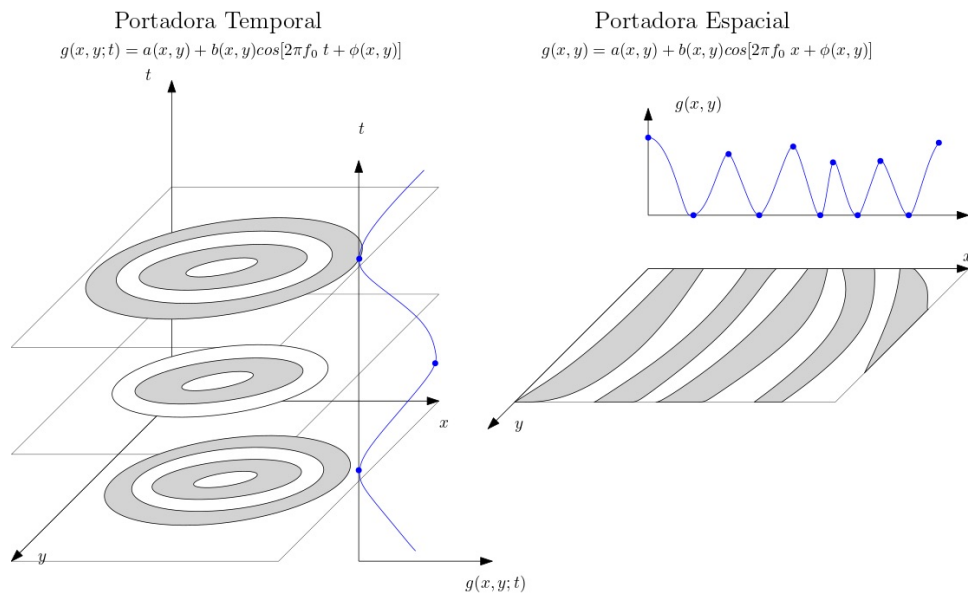


Figura 8.1. Técnica de portadora temporal y técnica de portadora espacial.

8.1.1 Portadora de fase temporal (TPS)

En esta técnica la fase se encuentra modulada en el tiempo y f_0 la frecuencia portadora característica del sistema esta asociada en el tiempo. La idea en la que se basa la técnica de *temporal phase shifting* es determinar las incógnitas del sistema mediante la medición de varias intensidades, con la introducción de una diferencia de fase conocida entre cada una de estas mediciones. Este procedimiento se lleva a cabo para el estado de referencia como para el estado deformado. En la figura 8.2 se resumen diversos algoritmos disponibles

para obtener el valor de la fase envuelta de un interferograma, aunque existen varios más que pueden ser consultados de la bibliografía ([Qihan Zhao, Xizuo Dan, Fangyuan Sun, Yonghong Wang, Sijin Wu y Lianxiang Yang, 2018](#)), ([S. Waldner y N. Goudemand, 2000](#)), ([D. Francis, R. P. Tatam y R. M. Groves, 2010](#)).

TABLE 4.2
Phase-Shift Algorithms

Some Phase-Shift Algorithms		
S. No.	Steps	Algorithms
1	$-\alpha, 0, \alpha$	$\delta(x, y) = \arctan \left\{ \left[(1 - \cos \alpha) / \sin \alpha \right] \left[(I_1 - I_3) / (2I_2 - I_1 - I_3) \right] \right\}$ $\delta(x, y) = \arctan \left[(I_1 - I_3) / (2I_2 - I_1 - I_3) \right] \quad \text{for } \alpha = \pi/2$
2	$0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$	$\delta(x, y) = \arctan \left[(I_2 - I_4) / (-I_1 + I_3) \right]$
3	$-3\alpha/2, -\alpha/2, \alpha/2, 3\alpha/2$	$\tan [\delta(x, y) + 3\alpha/2] = \tan (\alpha/2) \left[(-I_1 - I_2 + I_3 + I_4) / (I_1 - I_2 - I_3 + I_4) \right]$ with $\tan [\alpha(x, y)/2] = \sqrt{[3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)] / [(I_2 - I_3) + (I_1 - I_4)]}$
4	$-2\alpha, -\alpha, 0, \alpha, 2\alpha$	$\delta(x, y) = \arctan \left\{ 2 \sin \alpha \left[(I_2 - I_4) / (2I_3 - I_5 - I_1) \right] \right\}$ with $\alpha(x, y) = \arccos \left\{ (1/2) \left[(I_5 - I_1) / (I_4 - I_2) \right] \right\}$

Figura 8.2. Tabla resumen de diversas alternativas de algoritmos para cálculos de TPS, tomado de ([Sirohi R. S., 2016](#)).

A forma de ejemplo se presenta el algoritmo 2 de la tabla. Se consideran las intensidades antes (I) y después (I) *derealizada de formación* (8.1)

$$I' = I'_0 + I'_m \cdot \cos \Delta \phi_d \quad (8.2)$$

donde I_0 es la intensidad del ruido de fondo (*background*), I_m es la intensidad de la fase modulada por la interferencia. Bajo la consideración que $I_0 = I'_0$ y que $I_m = I'_m$, el número de incógnitas se reduce a cuatro, es decir I_0 , I_m , $\Delta \phi_r$ y $\Delta \phi_d$. Para encontrar estas cuatro incógnitas, se adquieren registros de intensidad con variaciones de fase conocidas. El método de cuatro mediciones de intensidad es el seleccionado aquí. La figura 8.3 muestra un esquema del algoritmo TPS 4+4 que se emplea. En el estado de referencia,

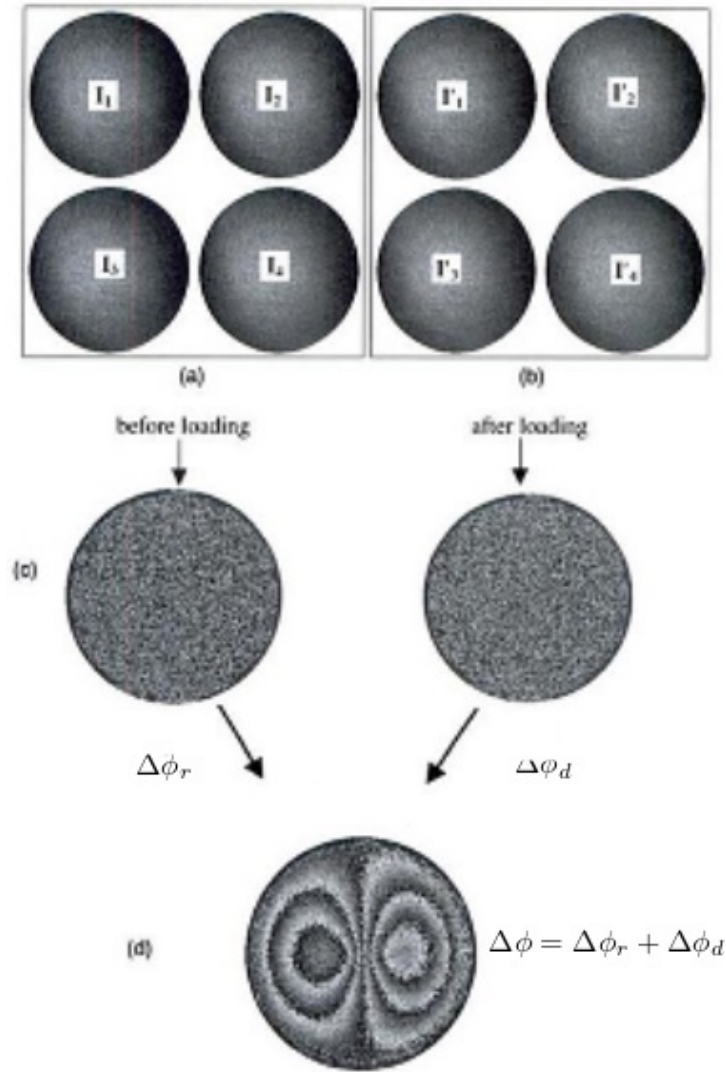


Figura 8.3. Esquema de TPS 4+4, tomado y adaptado de (steinchen2003digital).

se adquieren cuatro imágenes con un cambio de fase de $\pi/2$ entre ellas:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_0 + I_m \cdot \cos \Delta\phi_r \\
 I_2 &= I_0 + I_m \cdot \cos(\Delta\phi_r + \pi/2) \\
 I_3 &= I_0 + I_m \cdot \cos(\Delta\phi_r + \pi) \\
 I_4 &= I_0 + I_m \cdot \cos(\Delta\phi_r + 3\pi/2)
 \end{aligned}
 \tag{8.3}$$

A partir de estas ecuaciones combinadas con relaciones trigonométricas se puede calcular la magnitud de la fase de interés:

$$\Delta\phi_r = \tan^{-1} \left(\frac{I_3 - I_1}{I_4 - I_2} \right)
 \tag{8.4}$$

De la misma forma, con las cuatro imágenes del estado deformado, se calcula el valor de la fase para el estado de deformación. La resta de las fases nos da el valor de la diferencia de fase. Los valores de las fases que se obtienen oscilan entre $-\pi$ y π , por lo que la resta oscilará entre -2π y 2π , es decir que se encontrarán discontinuidades de valor 4π . Este rango debe ser acortado en el intervalo de 0 a 2π . Uno de los métodos recomendados en la bibliografía es adicionar 2π al resultado negativo de la resta de las dos ondas (R. Romero y M. F. Ruiz Gale, 2016). Como resultado se obtiene un mapa de fases que consiste en franjas que oscilan entre claras y oscuras (interferograma). Si se observa a lo largo de una fila de ese mapa de franjas de fases, se verá un perfil tipo dientes de sierra, como se observa en la figura 8.4 que está a la derecha y como resultado del desenvolvimiento de la fase se obtiene una sinusoidal como se observa en la figura 8.4 de la izquierda, con valores entre $-\pi$ y π . Una vez alcanzado su valor máximo se produce un salto abrupto retornando al valor mínimo, lo cual indica el paso a otra franja. Por lo tanto la fase se encuentra “envuelta” entre valores de 0 a 2π (*wrapped phase*). Para solventar este problema se recurre a algoritmos de desenvoltura de la fase (*unwrapped phase*), que transforman la fase envuelta con módulo 2π en un mapa de fases sin discontinuidades.

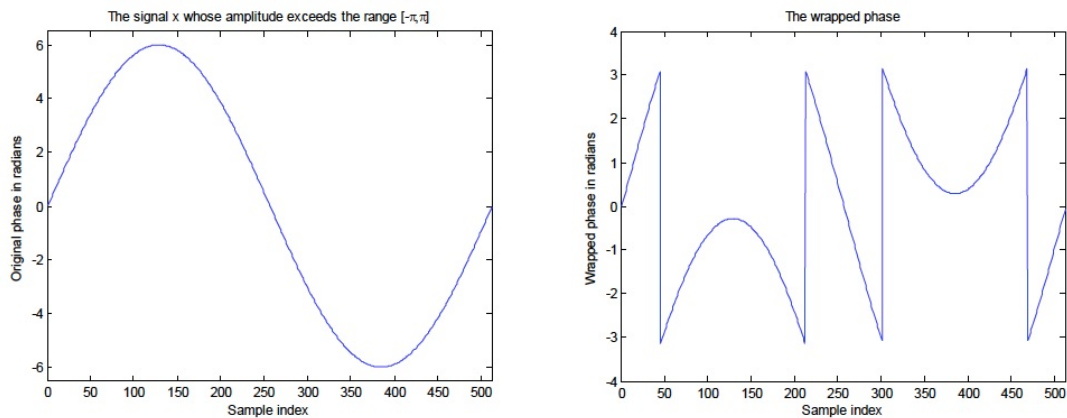


Figura 8.4. Esquema de fase envuelta y desenvuelta, tomado de (gdeisat2011).

Una de las desventajas que presenta esta técnica es el tiempo invertido en cada medición, lo cual la hace inviable a mediciones dinámicas y otro elemento que no debe olvidarse es que utiliza para las introducciones de corrimientos de fase conocidas un transductor piezoeléctrico. Esto ultimo implica que se debe contar con un sistema de control para establecer los valores de tensión en dicho transductor y con ello el desplazamiento de uno de los espejos del *michelson* ((R. Romero y M. F. Ruiz Gale, 2015)). Para más información

respecto de esta técnica se puede consultar las referencias ya mencionadas, dentro del trabajo no se dedicará mayor tiempo, simplemente debe tomarse como una introducción.

9. Apéndice III: Estadística y correlación de Speckle

Cuando un haz de luz incide sobre una superficie rugosa, la rugosidad óptica presente en dicha superficie provoca la dispersión de la luz en múltiples direcciones, dando origen a varios emisores secundarios que contribuyen a la señal reflejada. Estos emisores secundarios pueden exhibir tanto amplitudes como fases aleatorias, o en ciertos casos, amplitudes conocidas pero con fases aleatorias.

La suma de todas estas contribuciones de los emisores secundarios da lugar a lo que se denomina *camino aleatorio* (Ec. 9.1). Este término alude al hecho de que las diversas reflexiones y dispersiones resultantes de la rugosidad generan un patrón complejo en la distribución de la intensidad de la luz reflejada, aparentemente caótico y aleatorio. La función de distribución mencionada (Ec. 9.2) posiblemente se refiere a cómo la intensidad de la luz reflejada se distribuye estadísticamente debido a las múltiples interacciones con la superficie rugosa.

Por su parte, los coeficientes de correlación (Ec. 9.3) podrían estar relacionados con cómo las diferentes componentes de la luz reflejada guardan correlación en términos de fase y amplitud, originado a partir de las múltiples interacciones con la superficie.

La referencia a la distribución estadística Gaussiana señala que la distribución de intensidad de la luz reflejada sigue un patrón gaussiano, fenómeno común en sistemas físicos en los cuales múltiples factores aleatorios contribuyen al resultado final (Sirohi R. S., 2016).

La aparición de regiones brillantes y oscuras, causada por la interferencia constructiva y destructiva aleatoria, alude a cómo las diferentes ondas de luz reflejada pueden sumarse de manera constructiva en ciertas zonas (generando brillo) y anularse en otras (creando oscuridad). Esto origina patrones cambiantes de intensidad en la superficie observada (Goodman J. W., 2020).

$$\mathbf{u}(x, y) = u(x, y)e^{i\phi} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^N u_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^N a_k e^{i\phi} \quad (9.1)$$

$$p(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} e^{(-I/\langle I \rangle)} \quad (9.2)$$

9.1 Rugosidad ζ

La rugosidad (ζ) (desviación cuadrática media de las alturas respecto de su plano medio) superficial de una muestra espejada puede considerarse igual a cero. La luz por ella reflejada no presenta una distribución aleatoria de manchas brillantes y oscuras.

Cuando la superficie es ópticamente rugosa, $\zeta > \lambda$, la superficie se comporta como formada por múltiples centros dispersores, que interfieren entre si, generando un patrón de speckle, cuya intensidad mínima es cero.

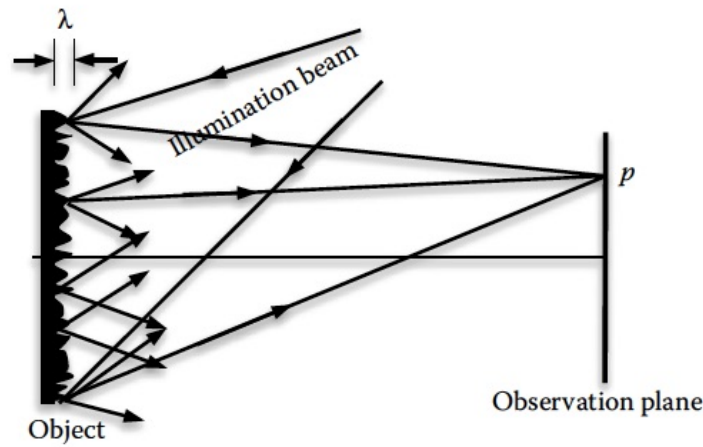


Figura 9.1. Formación de Speckle sobre una superficie rugosa, tomada de (Sirohi R. S., 2016)

9.2 Coeficiente de correlación μ

El coeficiente de correlación de *Speckle*, es el que permite establecer claramente cuando dos estados consecutivos de un patrón de interferencia de *Speckle*, están correlacionados o decorrelacionados. Se define el coeficiente de correlación μ para dos variables X e Y aleatorias

$$\mu = \frac{\langle XY \rangle - \langle X \rangle \langle Y \rangle}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (9.3)$$

y

$$\sigma_X = \sqrt{(\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2)}, \sigma_Y = \sqrt{(\langle Y^2 \rangle - \langle Y \rangle^2)} \quad (9.4)$$

siendo X e Y variables independientes se puede demostrar que

$$\langle XY \rangle = \langle X \rangle \langle Y \rangle \quad (9.5)$$

para este caso la correlación es cero. El coeficiente de correlación para dos estados viene dado por

$$I^i(\phi) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi) \quad (9.6)$$

$$I^j(\phi) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (9.7)$$

$$\mu(\Delta\phi) = \frac{\langle I^i I^j \rangle - \langle I^i \rangle \langle I^j \rangle}{(\langle I^{i2} \rangle - \langle I^i \rangle^2)^{1/2} (\langle I^{j2} \rangle - \langle I^j \rangle^2)^{1/2}} \quad (9.8)$$

este puede ser evaluado sabiendo que

- I_1, I_2 y ϕ son variables independientes que pueden ser promediadas independientemente.
- $\langle \cos(\phi) \rangle = \langle \cos(\phi + \Delta\phi) \rangle = 0$
- $\langle I^2 \rangle = 2\langle I \rangle^2$

si se asume que $\langle I_1 \rangle = \langle I_2 \rangle = \langle I \rangle$ se obtiene

$$\mu(\Delta\phi) = \frac{1 + \cos(\Delta\phi)}{2} = \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (9.9)$$

de esta ecuación se deriva que para $\Delta\phi = 2m\pi$ la correlación es unitaria, por lo tanto, existe correlación y es posible observar la formación de franjas. Si $\Delta\phi = (2m+1)\pi$ el valor de correlación es cero, por lo cual no existe correlación y no es posible observar franjas. Para mas información respecto del tema, se pueden consultar las referencias ([Sirohi R.S., 1999](#)), ([Sirohi R. S., 2016](#)), ([Jones, R. y Wykes, C., 1989](#)) y ([Goodman J. W., 2020](#)).

10. Apéndice IV: *Speckle*

La mayoría de las superficies son rugosas en la escala de las longitudes de onda ópticas, es decir, las diferencias de altura entre puntos vecinos de la superficie son del orden o mayores a la longitud de onda de la luz utilizada para iluminarlas. Bajo una iluminación coherente como lo es la luz láser, la onda reflejada por una superficie rugosa es, de acuerdo con el principio de Huygens, la superposición de las ondas que provienen de los diferentes elementos microscópicos de la superficie. Desde una posición de observación lejana, el campo óptico es igual al generado por la superposición de las ondas difundidas por cada punto de la superficie iluminada. Como resultado se obtiene una distribución espacial consistente en regiones claras y oscuras que corresponden a las interferencias constructivas y destructivas de dichas ondas, respectivamente. Esta figura granular es la que se conoce como *speckle* y tiene el aspecto de la figura [10.1](#)

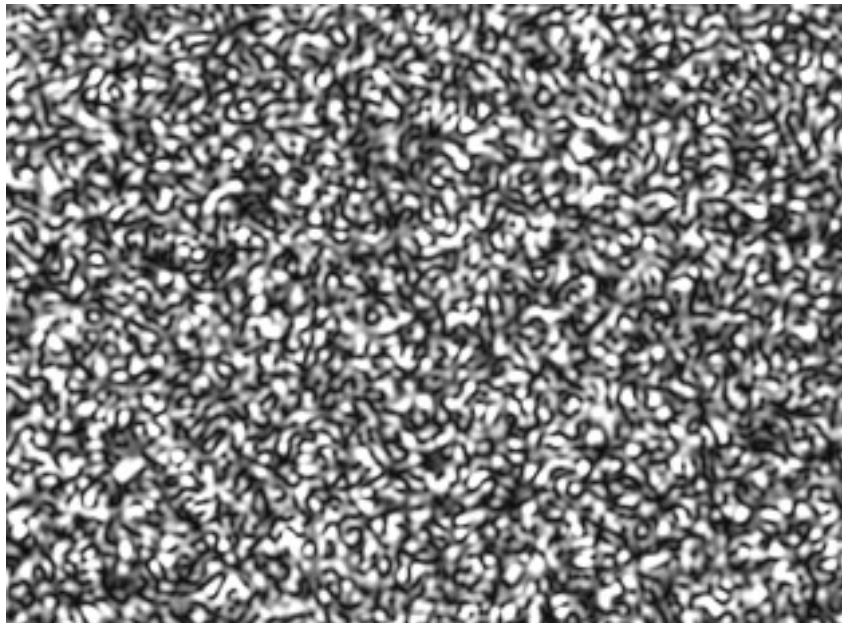


Figura 10.1. Figura de *speckle*.

La distribución de *speckle* generada por un objeto rugoso ocupa todo el espacio que atraviesa la luz difundida y se puede observar interponiendo una pantalla (*speckle* objetivo) o visualizando la imagen que se obtiene mediante un sistema óptico (*speckle* subjetivo).

La figura [10.2a](#) muestra un esquema para obtener un *speckle* objetivo: Se ilumina

con un haz láser expandido la superficie rugosa y se observa la luz dispersada sobre una pantalla ubicada en la zona de Fraunhofer o campo lejano.

La figura 10.2b muestra un esquema para *speckle* subjetivo: una cámara o el propio ojo humano enfocados sobre la superficie rugosa, observan igualmente la aparición de un patrón de *speckle*. En este caso, puede considerarse que este patrón corresponde a la difracción del campo situado en la apertura del sistema óptico.

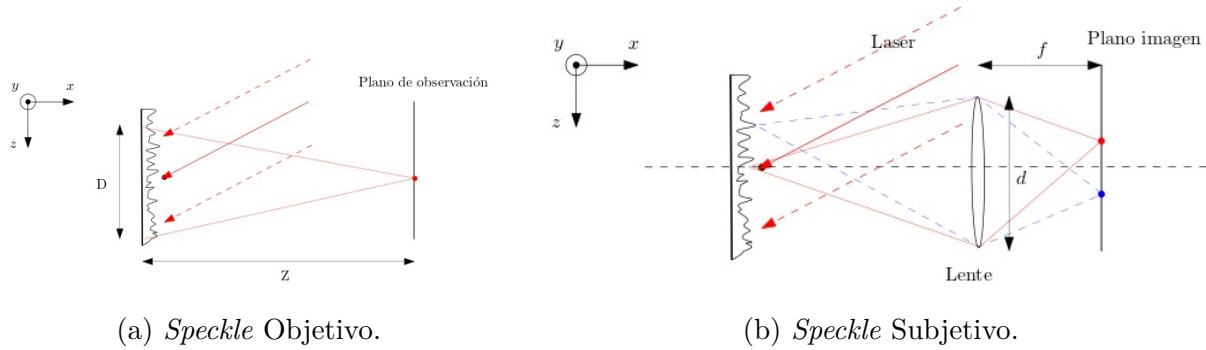


Figura 10.2. Formación de *speckle*

Un parámetro a tener en cuenta en ambas configuraciones es el tamaño de grano de *speckle* promedio. Para una figura de *speckle* objetiva se encuentra que dicho tamaño es

$$S_{ob} = \lambda \frac{Z}{D} \quad (10.1)$$

Donde Z es la distancia desde la superficie a la pantalla, D es la dimensión lineal del área iluminada y λ es la longitud de onda de la luz.

Para una figura de *speckle* objetiva el tamaño promedio del grano de *speckle* es

$$S_{sub} = 1,22\lambda \frac{f}{d} \quad (10.2)$$

donde f es la distancia de la lente al plano de observación y d es el diámetro de la pupila de entrada que puede ser un diafragma o el diámetro de la lente.

El análisis de las propiedades estadísticas del *speckle* se simplifica si se asumen las siguientes hipótesis [Goodman, 1975], [Kreis, 1996]:

- La luz utilizada es monocromática y está polarizada linealmente.
- El medio dispersor no despolariza la luz, es decir que la luz difundida también está polarizada linealmente.

- El número de elementos dispersores que contribuyen a la formación del *speckle* es muy grande y del mismo orden de magnitud para todos los puntos de la distribución.
- Las áreas dispersoras de la superficie no están correlacionadas entre sí y la amplitud de una dada componente no guarda relación con su fase. Por lo tanto, la amplitud y fase de las ondas elementales que originan el *speckle* son variables aleatorias independientes entre sí.
- Dado que la superficie difusora es ópticamente rugosa, la fase de las ondas elementales es una variable aleatoria de distribución uniforme en el intervalo $(-\pi, \pi)$.

Al verificarse todas estas hipótesis, la distribución obtenida se denomina *speckle* completamente desarrollado y en caso contrario se llama *speckle* parcialmente desarrollado. Dado que cualquier instrumento óptico de medición es un receptor cuadrático, o sea determina la intensidad media de la luz, se estudia ésta magnitud en lugar del campo eléctrico. Como se mencionó más arriba, el *speckle* tiene un carácter aleatorio. En cualquier punto del plano de observación, la parte real e imaginaria de la amplitud compleja de la luz dispersada por un difusor tiene una distribución Gaussiana con valor medio cero, la intensidad del *speckle* obedece a una distribución exponencial. Se prescinde del desarrollo matemático que se puede encontrar en los libros referidos. Se encuentra que para un *speckle* completamente desarrollado, la función densidad de probabilidad (fdp) conjunta de la intensidad I y ϕ la fase es

$$p_{I,\phi}(I, \phi) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\sigma_c^2} \exp\left[-\frac{I}{2\sigma_c^2}\right] & I \geq 0 \\ & -\pi \leq \phi \leq \pi \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (10.3)$$

La fdp marginal de la intensidad sola es

$$p_I(I) = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma_c^2} \exp\left[-\frac{I}{2\sigma_c^2}\right] & I \geq 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (10.4)$$

y la fdp marginal de la fase está dada por

$$p_\phi(\phi) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & -\pi \leq \phi \leq \pi \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (10.5)$$