



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Desenvolupament i implementació de tècniques de microscòpia òptica per la mesura 3D de superfícies de manufactura additiva

Narcís Vilar Solé



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement 4.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento 4.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution 4.0. Spain License.**

Tesi doctoral

Desenvolupament i implementació de tècniques de microscòpia òptica per la mesura 3D de superfícies de manufactura additiva

Narcís Vilar Solé



UNIVERSITAT_{DE}
BARCELONA

Desenvolupament i implementació de tècniques de microscòpia òptica per la mesura 3D de superfícies de manufactura additiva

Programa de doctorat en Nanociències

Autor: Narcís Vilar Solé

Director i tutor: Dr. Martí Duocastella

Director: Dr. Guillem Carles



UNIVERSITAT_{DE}
BARCELONA

Taula d'abreviacions

Òptica

NA	<i>Numerical aperture</i>
PSF	<i>Point spread function</i>
MTF	<i>Modulation transfer function</i>
OTF	<i>Optical transfer function</i>
ITF	<i>Instrument transfer function</i>
SPQT	<i>spiral phase quadrature transform</i>
PSI	<i>Phase shifting interferometry</i>
CSI	<i>Coherence scanning interferometry</i>
TAG	<i>Tunable acoustic gradient</i>
PNM	Punts no mesurats
OSAM	<i>Optical system for additive manufacturing</i>
SBP	<i>Space-bandwidth product</i>
CDV	Camp de visió
ESFS	<i>Encoded Search Focal Scan</i>
PSP	<i>Plate splitter polaritzant</i>

Manufactura additiva

MA	Manufactura additiva
PBF	<i>Powder bed fusion</i>
DED	<i>Directed energy deposition</i>

Altres

SI	Sistema Internacional
FWHM	<i>Full width at half maximum</i>
LC	<i>Liquid crystal</i>
SNR	<i>Signal to noise ratio</i>
HDR	<i>High dynamic range</i>
RMS	<i>Root mean square</i>
FPS	Fotogrames per segon
MEMS	<i>Micro-electro-mechanical system</i>
AFM	Atomic force microscope
XCT	<i>X-ray coherence tomography</i>
DMD	<i>Digital micromirror device</i>

Agraïments

Vull expressar el meu més sincer agraïment a totes aquelles persones que han fet possible aquesta tesi.

En primer lloc, vull agrair als meus tutors, Guillem Carles i Martí Duocastella, per la seva orientació, suport i ajuda al llarg d'aquest projecte. Les seves valuoses recomanacions i dedicació a la meva formació acadèmica han estat fonamentals per aconseguir els objectius d'aquesta tesi. També vull agrair al Roger Artigas per les seves observacions i experiència, que sempre han estat rellevants durant el desenvolupament d'aquest treball.

A continuació, agraeixo als meus companys de departament, Pol Martínez i Lena Zhukova, per la seva col·laboració constant i el seu suport. Són persones extraordinàries que s'han convertit en més que companys de departament.

Vull expressar el meu agraïment al Carlos Bermúdez, per les seves aportacions i ajuda, que han estat essencials per al desenvolupament d'aquest projecte.

També vull agrair als meus companys del departament d'R+D i del Dynamic Optical Systems Lab de la UB. Em sento molt afortunat d'haver fet aquest camí amb persones tan amables i properes.

Per acabar, vull agrair als meus pares, Xavier i Susana, i al meu germà, Guillem, pels seus ànims i amor. Gràcies per ser-hi i per la vostra confiança incondicional.

Finalment, vull agrair a totes les persones que, d'una manera o altra, han contribuït a la meva formació i a l'èxit d'aquesta tesi. Perdoneu-me d'avançar si m'he oblidat de vosaltres.

Resum

La manufactura additiva ha revolucionat els paradigmes tradicionals de fabricació, oferint una llibertat de disseny i unes capacitats de personalització sense precedents. No obstant això, les complexitats inherents a aquests processos de manufactura requereixen tècniques de metrologia òptica precises i fiables per garantir la integritat dels components fabricats. Aquesta tesi està enfocada en la investigació de la metrologia òptica tradicional i d'avantguarda, introduint tècniques i sistemes òptics innovadors dissenyats per abordar els desafiaments de la fabricació additiva.

L'estudi comença amb una anàlisi dels processos de fabricació additiva existents, avaluant-ne els punts forts i febles. Posteriorment, es valoren les tècniques de metrologia més avançades, identificant-ne les limitacions per capturar geometries intrincades i propietats dels materials de fabricació additiva.

Per abordar les limitacions crítiques de la metrologia tradicional en la manufactura additiva, aquesta tesi introdueix un nou sistema òptic que millora l'eficiència i la velocitat de mesura. La metrologia tradicional afronta reptes com l'elevada rugositat superficial i les variacions en la reflectivitat, que dificulten la precisió i l'escalabilitat en els processos de manufactura additiva. El sistema proposat integra un disseny òptic personalitzat, incloent-hi una lent de tub dissenyada a mida per mitigar aquests desafiaments. Amb aquesta millora en les capacitats de microscòpia, aquesta tesi tanca la bretxa entre les tècniques de metrologia existents i els requisits creixents de la manufactura additiva. A més, es presenten diversos dissenys òptics per a un objectiu de microscopi, especialment personalitzats per abordar els reptes únics en la inspecció de peces fabricades additivament.

A la segona part es presenta una tècnica innovadora de metrologia òptica que permet velocitats de captura topogràfica sense precedents, superant significativament el rendiment dels mètodes convencionals. La integració d'aquest mètode en els fluxos de treball de la manufactura additiva es facilita mitjançant tècniques del control del focus axial, com l'enfocament remot i les lents varifocals. A més, la recerca explora els principis fonamentals del mètode, aprofitant propietats òptiques com la interferència i la polarització, alhora que es demostra la seva versatilitat mitjançant la implementació en un microscopi confocal. Aquestes aportacions milloren col·lectivament l'estat de l'art en la metrologia òptica.

En conclusió, aquesta tesi doctoral fa contribucions significatives als camps de la fabricació additiva i la metrologia òptica a través d'avanços innovadors en sistemes òptics, el desenvolupament de dissenys d'objectius de microscopi personalitzats i la introducció d'una nova tècnica de metrologia òptica per a la captura topogràfica.

Paraules clau: Microscòpia, òptica, manufactura additiva, metrologia

Abstract

Additive Manufacturing has revolutionized traditional manufacturing paradigms, providing unparalleled design freedom and customization capabilities. However, the inherent complexities of AM processes demand precise and reliable optical metrology techniques to ensure the integrity of the manufactured components. This thesis investigates traditional and cutting-edge metrological approaches, introducing novel techniques and optical systems designed to address the evolving challenges of additive manufacturing.

The study begins with an analysis of existing AM processes, assessing their strengths and weaknesses. Subsequently, state-of-the-art metrology techniques are evaluated, identifying their limitations in capturing intricate geometries and material properties specific to additive manufacturing.

To address the critical limitations of traditional metrology in additive manufacturing, this thesis introduces a novel optical system that enhances measurement efficiency and speed. Traditional metrology struggles with challenges such as high surface roughness and variations in reflectivity, which hinder precision and scalability in advanced manufacturing processes. The proposed system integrates a tailored optical design, including a custom tube lens specifically engineered to mitigate these challenges. By advancing microscopy capabilities, this work bridges the gap between existing metrology techniques and the evolving requirements of AM. Additionally, are presented various optical designs for a microscope objective, specially customized to address the unique challenges of inspecting additively manufactured parts.

In the second part is presented an innovative optical metrology technique that enables unprecedented topographic imaging speeds, significantly surpassing the performance of conventional methods. The integration of this method into additive manufacturing workflows is facilitated by axial focus control techniques, such as remote focusing and tunable lenses. Furthermore, the research delves into the fundamental principles of the method, leveraging interference and polarization effects, while also demonstrating its versatility through implementation in confocal microscopy. These contributions collectively advance the state of the art in optical metrology.

In conclusion, this Ph.D. thesis makes significant contributions to the fields of additive manufacturing and optical metrology through innovative advancements in optical systems, the development of tailored microscope objective designs, and the introduction of a novel optical metrology technique for rapid and precise topographic imaging.

Keywords: microscopy, optics, additive manufacturing, metrology

Índex

1	Introducció	28
1.1	Motivació	28
1.2	Estructura de la tesi	29
1.3	Objectius	31
2	Estat de l'art	32
2.1	Metrologia	34
2.1.1	Metrologia dimensional	34
2.1.2	Paràmetres de textura	36
2.1.3	Metrologia de contacte	37
2.1.4	Metrologia òptica	38
2.1.4.1	Microscòpia confocal	42
2.1.4.2	Variació de focus i il·luminació activa	48
2.1.4.3	HiLo	49
2.1.4.4	Tècniques interferomètriques	51
2.1.4.5	Phase shifting interferometry	53
2.1.4.6	Coherence scanning interferometry	54
2.1.4.7	Projecció de franges	55
2.1.5	Tècniques per al control del focus	57
2.1.5.1	Lents varifocals	57
2.1.5.2	Enfocament remot	59
2.2	Manufactura additiva	62
2.2.1	Tècniques de manufactura additiva	64
2.2.1.1	Manufactura additiva amb plàstics	64
2.2.1.2	Manufactura additiva amb metalls	67
2.2.1.3	Postprocessament i qualitat	69
2.2.2	Problemes i limitacions de la manufactura additiva	70
2.3	Metrologia de superfícies per a la manufactura additiva	72
3	Sistema òptic per a manufactura additiva	77
3.1	Requeriments i disseny del sistema òptic	78
3.2	Caracterització òptica	82
3.3	Caracterització topogràfica	89
3.4	Alt rang dinàmic	99
3.5	Combinació amb tècniques de control del focus	104
3.5.1	Prova de concepte de l'enfocament remot	104
3.5.2	Prova de concepte de lent varifocal	107
3.6	Objectiu de microscopi a mida	111

3.6.1	3×/0.45 NA monocromàtic	114
3.6.2	3×/0.45 NA amb 10 nm d'ample de banda	116
3.6.3	3×/0.45 amb lent de tub	118
3.6.4	Anell de llum	120
3.6.5	3×/0.20 NA	122
4	Tècnica innovadora - <i>Encoded Search Focal Scan</i>	125
4.1	Tècniques per a la caracterització ràpida de superfícies	126
4.2	Principi de funcionament de l'ESFS	127
4.3	Codis de Gray	133
4.4	Errors 2π	136
4.4.1	Alternativa a la modulació sinusoidal	138
4.5	Resultats	141
4.5.1	Prototip 1: escombrat focal mecànic	141
4.5.2	Prototip 2: escombrat focal amb lent varifocal	147
4.6	Discussió	151
4.7	Implementacions de l'ESFS	154
4.7.1	Implementació mitjançant interferència	154
4.7.1.1	<i>Unwrapping</i> a través de longituds d'ona heterodines	160
4.7.2	Implementació mitjançant polarització	162
4.7.3	Implementació amb confocal d' <i>spinning disk</i>	166
5	Conclusions	172
6	Publicacions	176
	Bibliografia	178
A		185
A.1	Demostració de l'equació 4.6	185
A.2	Demostració de l'augment del contrast amb una modulació de polsos	186

Índex de figures

2.1	Esquema de la cadena de traçabilitat. La traçabilitat es transfereix entre cada nivell a través de la calibració d'un estàndard, que inclou una avaluació de la incertesa i del valor mesurat.	35
2.2	Components de metrologia dimensional. A l'esquerra es veu un exemple d'un perfil d'un mapa topogràfic i a la dreta els components principals: textura, <i>waviness</i> i forma.	36
2.3	Representació esquemàtica d'un sistema de mesura de contacte. L' <i>stylus</i> es desplaça horitzontalment, i en vermell es mostra el moviment vertical que experimentarà en cada punt de la mostra, representant així el perfil detectat. La resolució d'aquests sistemes ve principalment dictada per la forma i mida de la punta de l' <i>stylus</i> . En el quadre taronja es veu una zona on aquest no podrà penetrar, fet que impedirà la mesura correcta d'aquesta regió.	37
2.4	Components principals d'un microscopi òptic. La font de llum emet el feix que travessa la lent col·limadora, el <i>beam-splitter</i> i l'objectiu de microscopi (OM). El feix es reflecteix en l'objecte, i la lent de tub fa imatge a la càmera. El diafragma de camp és el que determina el camp de visió i el diafragma d'obertura limita el feix de llum que prové de cada punt de la mostra i que recull l'objectiu.	39
2.5	Obertura numèrica per un objectiu de microscopi.	40
2.6	a) <i>Point spread function</i> (PSF) i b) <i>Modulation transfer function</i> (MTF) per un microscopi amb una obertura circular.	41
2.7	Esquema òptic d'un microscopi confocal amb un patró de <i>pinhole</i> . Inclou un objectiu de microscopi (OM), un <i>beam splitter</i> (BS), un mirall per l'escaneig en x i y , la lent de tub, fotodetector i làser. Els rajos verds corresponen a quan la mostra està al pla de focus, i la intensitat detectada és màxima. En els rajos vermells, en canvi, la posició de la mostra està fora del focus, llavors la imatge del <i>pinhole</i> està desenfocada i la intensitat detectada és menor, ja que el <i>pinhole</i> bloqueja la llum.	43
2.8	Intensitat al fotodetector en funció de la distància de la mostra al pla focal de l'objectiu de microscopi ($z = 0$). La posició axial de la mostra es determina calculant el màxim de la resposta axial.	44

2.9	Esquema òptic d'un microscopi confocal amb un modulador espacial per la il·luminació. Inclou un objectiu de microscopi (OM), un <i>beam splitter</i> (BS), la lent de tub, càmera, font de llum, lent col·limadora i la màscara que es projecta al pla focal de l'objectiu de microscopi. Per a la màscara s'acostuma a utilitzar un <i>digital micromirror device</i> (DMD).	44
2.10	Esquerra) Imatges del patró que es projecta amb fases inicials de 0, $\pi/3$, i $2\pi/3$. Com que la mostra és un mirall lleugerament inclinat en la direcció x , hi ha una relació lineal entre l'eix x i z . Dreta) Imatge de seccionament òptic que s'obté a partir de les tres anteriors.	46
2.11	Tall horitzontal de les imatges de la Figura 2.10. En blau, groc i verd les imatges amb el patró projectat i en vermell el seccionament òptic calculat. El valor del seccionament òptic és directament proporcional a la modulació del patró en cada píxel.	47
2.12	Exemple dels nivells de gris que s'obtenen a diferents posicions de focus amb la desviació estàndard corresponent. En aquest cas l'operador s'aplica a una regió de 3×3 píxels.	48
2.13	Esquema del procés de reconstrucció de la imatge de seccionament òptic amb la tècnica HiLo.	51
2.14	Esquema d'un microscopi interferomètric. Inclou un objectiu de microscopi interferomètric (OM), un <i>beam splitter</i> (BS), la lent de tub, càmera, font de llum (LED), lent col·limadora i diafragma de camp.	52
2.15	Dissenys òptics per a objectius interferomètrics: Michelson, Mirau i Linnik.	52
2.16	Senyal d'interferència que s'obté amb la tècnica CSI (blau) i el seu envolupant (taronja).	55
2.17	Seqüència de patrons binaris per la codificació de l'alçada.	56
2.18	Distorsió de les franges projectades en la superfície de: a) un esglaó, i b) una mostra complexa. La distorsió de les franges i la seva triangulació permet calcular la forma de l'objecte.	56
2.19	Sistema òptic 4f. En l'esquema s'hi troben les dues lents del sistema 4f (L1 i L2) i la lent de tub. Entre la L2 i la LT hi ha el pla de la pupila de l'objectiu. Utilitzar la lent varifocal en aquest pla permet re-enfocar a diferents posicions axials de la mostra sense canvi en l'augment.	58
2.20	Esquema d'un sistema òptic d'imatge. Per un sistema perfecte, $\gamma_o = \gamma_i$. Per complir la condició d'Abbe, tots els punts del pla perpendicular a l'eix òptic han de seguir $ M = \sin(\gamma_o)/\sin(\gamma_i)$.	60
2.21	Sistema de formació d'imatge típic per un microscopi òptic. Per enfocar diferents posicions de la mostra és necessari variar la distància entre la mostra i el sistema òptic.	60
2.22	Sistema òptic amb dos objectius de microscopi (OM) iguals i dues lents amb la mateixa distància focal. L'augment del primer objectiu i lent és igual a M , i l'augment de la segona lent i l'objectiu és $1/M$, i l'augment total és 1.	61

2.23	Sistema de formació d'imatge amb enfocament remot. Del pla objecte al pla imatge (mirall) hi ha un augment unitari. Del pla mirall al pla càmera hi ha un sistema de formació d'imatge estàndard com el de la Figura anterior 2.21.	61
2.24	Exemple de peça manufacturada amb <i>powder bed fusion</i> (PBF), cortesia de Manufacturing Metrology Team (University of Nottingham).	62
2.25	Tipus de tècniques de manufactura additiva. Les tècniques que utilitzen metalls són la <i>directed energy deposition</i> , <i>powder bed fusion</i> i la laminació de capes. Les que utilitzen plàstics són l'extrusió de materials, el <i>jetting</i> de materials, la polimerització VAT i el <i>binder jetting</i>	64
2.26	Esquema dels diferents tipus de manufactura additiva amb plàstics. a) Extrusió de materials. b) <i>Jetting</i> de materials. c) Polimerització VAT. d) <i>Binder jetting</i>	65
2.27	Esquema dels diferents tipus de manufactura additiva amb metalls. a) <i>Directed energy deposition</i> . b) <i>Powder bed fusion</i> . c) Laminació de capes.	68
2.28	Exemple de les característiques de la superfície de dues peces obtingudes amb PBF. En vermell, el camí de la soldadura; en blau, partícules sense fusionar; en verd, artefactes ondulatoris de la soldadura; i en taronja, porus. En les dues imatges també s'hi pot veure els canvis bruscos de reflectivitat. Les dues imatges fan $1690 \times 1413 \mu\text{m}$	74
2.29	Imatges de la superfície d'una peça manufacturada amb PBF i amb diferents objectius de microscopi. Les àrees pels objectius $5\times$, $10\times$, $20\times$ i $50\times$ són $3378 \times 2826 \mu\text{m}$, $1690 \times 1413 \mu\text{m}$, $844 \times 706 \mu\text{m}$ i $337 \times 282 \mu\text{m}$, respectivament.	75
3.1	Disseny òptic de la lent de tub. Té una obertura de 50 mm d'entrada i corregeix fins a $3 \times 3 \text{ mm}$ de camp de visió al pla imatge.	80
3.2	MTF en el pla imatge de la lent de tub en el programa de traçat de rajos pels camps central (blau), 1.06 mm (verd) i 2.12 mm (vermell) en la diagonal del camp de visió.	81
3.3	Caracterització de la distància focal de la lent de tub. La distància és de 8.5 mm, i per tant la distància focal de la lent de tub és de $170 \pm 10 \text{ mm}$	82
3.4	Esquerra) Fotografia del disseny òptic. Dreta) Esquema CAD corresponent. Pels dos canals d'il·luminació es fan servir LEDs (en vermell). La llum passa a través de les lents condensadores (groc), les lents, i finalment fins l'objectiu de microscopi. La senyal reflectida es fa imatge a través del canal estructurat fins a la càmera. La simulació de traçat de rajos s'inclou pels dos canals d'il·luminació i el d'imatge. Totes les unitats estan en mil·límetres.	83
3.5	a) Sistema d'estereomicroscòpia amb dos oculars. En aquest sistema, només una part de l'obertura de l'objectiu es fa servir per a cada ocular. b) Sistema òptic de microscòpia de superfícies. En aquest cas, s'utilitza l'obertura completa de l'objectiu.	84

3.6	Intensitat mitjana observada en la càmera en funció de l'angle de la mostra. A 35° pràcticament no es recull llum, que correspon a una obertura numèrica de 0.57.	84
3.7	Imatges de camp clar adquirides amb l'OSAM de a) <i>Target</i> de resolució USAF; b) <i>Slanted edge</i> . c) <i>Modulation transfer function</i> obtinguda amb el mètode de l' <i>slanted edge</i> (blau) i amb les mesures de l'USAF (vermell). La corba negra és la MTF teòrica en un sistema limitat per difracció.	85
3.8	Mapes topogràfics de la mostra NPL tipus AIR B40. Esquerra) OSAM, amb paràmetres de textura $Sa = 0.80 \pm 0.04 \mu\text{m}$ i $Sq = 1.01 \pm 0.03 \mu\text{m}$. Dreta) Sistema confocal comercial (S neox, Sensofar) amb paràmetres de textura $Sa = 0.80 \pm 0.04 \mu\text{m}$ i $Sq = 1.02 \pm 0.03 \mu\text{m}$. L'àrea certificada de la mostra mesura $1.5 \times 1.5 \text{ mm}$ i la mesura amb el sistema comercial és el resultat de l' <i>stitching</i> de 3×3 mapes topogràfics.	86
3.9	Perfil de la mostra esglaó mesurada d'acord amb la ISO 5436-1 A1. El valor obtingut és $7.62 \pm 0.06 \mu\text{m}$	87
3.10	Una de les mesures del a) soroll del sistema d'acord amb la ISO 25178-600; i b) <i>flatness deviation</i>	88
3.11	Fotografia de cadascuna de les cares del 3DRS de l'NPL. Les cares estan numerades amb números romans a cada costat.	89
3.12	Valors obtinguts de l' Sa en funció de l'àrea mesurada. Les barres d'error representen la incertesa al 95% de confiança, obtinguda a partir de 10 mesures diferents. Hi estan representats els valors obtinguts amb l'OSAM i el sistema confocal comercial fent servir objectius de microscopi $10\times/0.3 \text{ NA}$, $20\times/0.45 \text{ NA}$ i $50\times/0.8 \text{ NA}$	91
3.13	Representació de la importància de mesurar amb camps de visió grans. a) Mapa topogràfic de la cara I obtingut a través de l' <i>stitching</i> de 4×4 camps de visió amb un objectiu $10\times/0.3 \text{ NA}$. Els quadres negres representen dos regions d'interès de $700 \mu\text{m}$ de costat. b) Mapa topogràfic de la primera regió d'interès amb una Sa de $13.069 \mu\text{m}$. c) Mapa topogràfic de la segona regió d'interès amb una Sa de $7.710 \mu\text{m}$. La disparitat entre els valors obtinguts posa de manifest la necessitat de mesurar en grans àrees.	92
3.14	Mapes topogràfics de la cara I obtinguts amb l'OSAM fent servir una obertura de a) 20 mm, b) 14 mm, i c) 12 mm. A mesura que l'obertura es tanca, l'obertura numèrica de l'objectiu disminueix i augmenta el número de punts no mesurats.	92
3.15	Mapes topogràfics de la cara II obtinguts amb el perfilòmetre comercial S neox i l'objectiu $20\times/0.45 \text{ NA}$ fent servir una obertura de a) 9 mm, b) 6 mm, i c) 3 mm.	93
3.16	Representació del percentatge de punts no mesurats. a) En funció del diàmetre de l'obertura per l'OSAM. b) En funció de l'obertura numèrica pel perfilòmetre òptic comercial S neox. Vam escollir les cares I i II com a representatives de superfícies rugoses i llises, respectivament.	93
3.17	Espècimen fabricat amb làser PBF. Les dimensions són aproximadament de $40 \times 14 \times 10 \text{ mm}$	94

3.18	Mapes topogràfics de la superfície plana de l'espècimen fabricat amb PBF. A la part superior es veuen les topografies obtingudes amb el profilòmetre òptic comercial i els objectius 5×/0.15 NA, 10×/0.3 NA, 20×/0.45 NA i 50×/0.8 NA. A la part inferior es veu el mapa topogràfic obtingut amb l'OSAM, amb els camps de visió corresponents al sistema comercial indicats per referència. Qualitativament, l'OSAM és capaç d'adquirir mapes topogràfics acurats que no contenen artefactes i amb pocs punts no mesurats.	96
3.19	Perfils dels mapes topogràfics de la Figura 3.18. De dalt a baix, cadascun obtingut el profilòmetre comercial S neox i els objectius 5×/0.15 NA, 10×/0.3 NA, 20×/0.45 NA i 50×/0.8 NA. El perfil inferior correspon a l'OSAM.	97
3.20	Respostes axials capturades a nivells alt i baixos d'exposició per una àrea fosca i una reflectant. Augmentar l'exposició en zones fosques és idoni, ja que augmenta la resposta axial i els punts no mesurats es redueixen. Al contrari, per les zones reflectants, augmentar l'exposició satura la imatge, de manera que es redueix el contrast i la resposta axial decreix.	101
3.21	Mapes topogràfics obtinguts amb l'OSAM en una regió de 730 × 730 μm. a) Mapa topogràfic obtingut amb una exposició baixa i amb un 41.7 % de PNM. b) Mapa topogràfic obtingut amb una exposició alta i amb un 41.7 % de PNM. c) Mapa topogràfic obtingut amb la combinació dels dos anteriors i amb un 17.2 % de PNM. En l'exposició baixa, la majoria de PNM són àrees fosques, mentre que en la exposició alta són àrees brillants. Els PNM de cada mapa topogràfic són complementaris, de manera que la combinació resulta en una quantitat menor.	102
3.22	Mapes topogràfics de la superfície d'una mostra manufacturada amb MA de metalls. a) Mapes topogràfics super-imposats obtinguts amb el sistema comercial S neox i els objectius 5×/0.15 NA, 10×/0.3 NA, 20×/0.45 NA i 50×/0.8 NA. Per cada mapa topogràfic els punts no mesurats són 88.22%, 63.30%, 62.95% i 40.24%, respectivament. b) Mapa topogràfic obtingut amb l'OSAM de la mateixa zona amb els camps de visió corresponents al sistema comercial indicats per referència. L'OSAM té un camp de visió similar al 5× però és capaç d'adquirir topografies amb un nombre reduït de punts no mesurats (31.66%) i menys artefactes de mesura.	103
3.23	Sistema òptic convencional (blau) i d'enfocament remot (vermell) amb dos objectius de microscopi Nikon 20×/0.45 NA. En verd hi ha el camí comú dels dos sistemes òptics. Vam muntar aquest sistema per tal de comparar els resultats de l'enfocament remot amb el sistema òptic convencional.	105
3.24	Comparació de les PSFs obtingudes amb el sistema òptic convencional reenfocant la càmera (EC) i amb l'enfocament remot (ER) amb els objectius 20×/0.45 NA i 50×/0.8 NA.	106
3.25	Sistema òptic de reenfocament amb una lent varifocal i un objectiu de microscopi Nikon 20×/0.45 NA. La lent de Corning té una obertura de 5.8 mm i un rang de potències de −5 a 10 diòptries.	107

3.26	Comparació de les PSFs obtingudes amb el sistema òptic convencional reenfocant la càmera (EC) i amb l'enfocament amb lent varifocal (EV) amb els objectius $20\times/0.45$ NA i $50\times/0.8$ NA.	108
3.27	Voltatge vs. Focus per la lent varifocal Corning A-58N. L'ajust lineal té un coeficient R^2 de 0.996. La relació no és perfectament lineal i es pot apreciar com els valors segueixen lleugerament una paràbola.	109
3.28	Amplitud d'oscil·lació en funció de la freqüència de la lent varifocal. Degut al temps de resposta, a mesura que augmenta la freqüència disminueix l'amplitud efectiva. En vermell es representa el <i>fitting</i> dels valors mesurats, obtenint una freqüència de tall d'aproximadament 8 Hz.	110
3.29	Disseny òptic de l'objectiu de microscòpia $3\times/0.45$ NA amb una distància de treball de 50 mm, corregit fins a 4×4 mm en el pla de l'objectiu a la longitud d'ona de 550 nm.	114
3.30	Especificacions del disseny òptic de la figura 3.29. a) MTF policromàtica pel camp central (blau), 1.41 mm de camp (verd) i 2.82 mm de camp (vermell) i la MTF limitada per difracció del sistema òptic (negre). b) <i>Spot diagram</i> pel camp central (esquerra), 1.41 mm de camp (centre) i 2.82 mm de camp (dreta). El cercle negre representa el radi d'Airy pel sistema limitat per difracció.	115
3.31	Disseny òptic d'un objectiu de microscòpia $3\times/0.45$ NA amb una distància de treball de 50 mm, corregit fins a 4×4 mm en el pla de l'objectiu i amb 10 nm d'ample de banda a 550 nm de longitud d'ona.	116
3.32	Especificacions del disseny òptic de la figura 3.31. a) MTF policromàtica pel camp central (blau), 1.41 mm de camp (verd) i 2.82 mm de camp (vermell) i la MTF limitada per difracció del sistema òptic (negre). b) <i>Spot diagram</i> pel camp central (esquerra), 1.41 mm de camp (centre) i 2.82 mm de camp (dreta). El cercle negre representa el radi d'Airy pel sistema limitat per difracció.	117
3.33	Disseny òptic d'un objectiu de microscòpia $3\times/0.45$ NA amb una distància de treball de 50 mm, corregit fins a 4×4 mm en el pla de l'objectiu i la lent de tub corresponent. El sistema òptic també conté un <i>beam splitter</i> per la il·luminació estructurada i un altre per la il·luminació uniforme (camp clar).	118
3.34	Especificacions del disseny òptic de la figura 3.33. a) MTF policromàtica pel camp central (blau), 1.41 mm de camp (verd) i 2.82 mm de camp (vermell) i la MTF limitada per difracció del sistema òptic (negre). b) <i>Spot diagram</i> pel camp central (esquerra), 1.41 mm de camp (centre) i 2.82 mm de camp (dreta). El cercle negre representa el radi d'Airy pel sistema limitat per difracció.	119
3.35	Esquema dels rajos de llum quan s'il·lumina una esfera amb un radi de curvatura petit i amb reflexió especular. a) Els rajos es reflecteixen fora de l'obertura de l'objectiu. b) i c) Rajos al màxim angle de l'objectiu es reflecteixen dins l'obertura per diferents posicions de l'esfera. d) i e) Rajos de l'anell de llum es reflecteixen a dins de l'obertura per posicions de l'esfera amb pendents locals superiors a l'obertura numèrica màxima de l'objectiu.	121

3.36	Peça fabricada amb <i>powder bed fusion</i> amb múltiples gotes de material sense fondre amb il·luminació EPI i anell de llum. Per cada gota, l'anell exterior correspon a la llum que prové de l'anell de llum, i el cercle central correspon a la llum EPI.	121
3.37	Disseny òptic d'un objectiu de microscòpia $3\times/0.20$ NA amb una distància de treball de 50 mm, corregit fins a 4×4 mm en el pla de l'objecte i amb 10 nm d'ample de banda a 550 nm de longitud d'ona. .	122
3.38	Especificacions del disseny òptic de la figura 3.37. a) MTF policromàtica pel camp central (blau), 1.41 mm de camp (verd) i 2.82 mm de camp (vermell) i la MTF limitada per difracció del sistema òptic (negre). b) <i>Spot diagram</i> pel camp central (esquerra), 1.41 mm de camp (centre) i 2.82 mm de camp (dreta). El cercle negre representa el radi d'Airy pel sistema limitat per difracció.	123
4.1	Esquema de l'escaneig convencional que s'utilitza en la metrologia òptica. a) Modulació que s'utilitza en funció del rang axial. La modulació són deltes de Dirac perquè durant l'adquisició de la imatge no hi ha cap canvi en la posició de focus. b) Mostreig de la resposta axial que s'obté amb l'escaneig convencional. En la major part d'imatges adquirides no s'obté cap informació de la posició axial de la mostra. .	128
4.2	Esquema de la idea principal de l'ESFS. a) Posicions inicial i final en l'adquisició d'una imatge. b) Posició axial en funció del temps. c) Modulació de la llum en funció del temps. El temps d'exposició de la càmera és $t_f - t_i$	129
4.3	Esquema de l'escaneig proposat amb la tècnica d'ESFS. a) Modulació que s'utilitza en funció del rang axial. La binarització de les imatges resulta en el codi d que conté la posició de la mostra z_s . b) Mostreig de la resposta axial que s'obté amb l'escaneig proposat d'ESFS. En aquest cas totes les imatges contenen informació sobre la localització de la mostra.	130
4.4	Modulacions proposades per augmentar la precisió de l'ESFS en una segona etapa d'adquisició. S'adquireixen quatre imatges amb un canvi relatiu de fase de $\pi/2$, i les imatges corresponents de seccionat òptic s'utilitzen per calcular la posició axial de la mostra amb major precisió, encara que el resultat sigui <i>modulo</i> de l' <i>step</i> utilitzat, T	131
4.5	Imatges ESFS de la primera etapa per un mirall inclinat com a mostra i utilitzant codis binaris. Es mostra el seccionat òptic i la binarització per cada imatge adquirida. Amb les imatges binàries es calcula el codi d que conté la posició de la mostra. Degut al soroll i a les imprecisions mecàniques durant l'escaneig focal, el codi d conté errors en les posicions axials properes als canvis en la modulació de la il·luminació.	133
4.6	Modulacions basades en codis de Gray. Cada modulació té els canvis en la il·luminació en diferents posicions axials, de manera que no es superposaran les imatges binaritzades.	134

4.7	Imatges ESFS de la primera etapa per un mirall inclinat com a mostra fent servir codis de Gray. Es mostra el seccionat òptic i la binarització per cada imatge adquirida. Amb les imatges de Gray es calcula el codi intermedi que després es converteix al codi d que conté la posició de la mostra. El codi Gray és més robust, i encara que hi hagi soroll o imprecisions mecàniques en l'escaneig focal els resultats contenen menys errors.	135
4.8	Errors que es produeixen durant la fusió de la primera i segona etapa per a un mirall inclinat com a mostra. a) Codi binari resultant de la primera etapa. b) Mapa de fase corresponent a la segona etapa). c) Mapa topogràfic resultant de la suma del codi binari i el mapa de fase.	136
4.9	Talls horitzontals de la Figura 4.8 per la fase, el codi binari d i el mapa topogràfic. Allà on la fase i el mapa binari no coincideixen es veuen <i>spikes</i> molt notables, que poden ser positius o negatius en relació al valor real. La fase està normalitzada sobre 1.	137
4.10	Esquema pel càlcul robust del codi d . a) La seqüència de codis Gray amb N imatges dona el codi d , en groc. L'adquisició d'una imatge addicional del codi Gray dona d_+ , que es divideix entre 2 per mantenir el mateix rang. A diferència del codi d , d_+ pren valors fraccionaris. Per últim, es veu el codi $d_+/2$ arrodonit cap amunt (en vermell) i cap avall (en verd) a l'enter més pròxim. L'obtenció robusta del codi d es fa per parts amb aquests dos últims. b) En el primer i últim quart de cada període T s'utilitza informació del codi arrodonit cap amunt, mentre que en el segon i tercer quart s'utilitza el codi arrodonit cap avall. D'aquesta manera el càlcul és robust perquè s'utilitza informació de zones allunyades dels <i>steps</i> de transició.	138
4.11	Comparació entre les modulacions a) sinusoidal i c) polsada. Senyal adquirida amb la il·luminació b) sinusoidal i d) polsada. El període (T) és de $10\mu\text{m}$, i per tant es poden veure quatre modulacions amb un retard de $T/4$ en diferents colors. Per una comparació directa, en la Figura e) les dues il·luminacions i senyals es mostren conjuntament, on la diferència en contrast és evident. En la Figura f) es mostren les desviacions de la fase recuperada amb l'equació 4.12 fent servir la il·luminació polsada en comparació amb la sinusoidal.	140
4.12	a) Esquema del sistema òptic del primer prototip. Inclou un objectiu de microscopi (OM), un <i>beam splitter</i> (BS), lent de tub, càmera, font de llum (LED), lent col·limadora i la màscara que es projecta al pla focal de l'objectiu de microscopi. El control electrònic sincronitza la il·luminació, l'adquisició d'imatges i l'escaneig. b) Fotografia del primer prototip. Es veu l'objectiu de microscopi, la lent de tub (a sobre) i la càmera.	142
4.13	Resultats de l'ESFS per la mostra de rugositat AIR B40. a) Imatges binaritzades de la primera etapa. b) Codi binari d. c) Mapa de fase. d) Mapa topogràfic de la mostra.	142
4.14	Resultats de l'ESFS per a la estrella d'una moneda de 10 cèntims. a) Imatges binaritzades de la primera etapa. b) Codi binari d. c) Mapa de fase. d) Mapa topogràfic de la mostra.	143

4.15	Resultats de l'ESFS per a la ploma d'una moneda de 10 cèntims. a) Imatges binaritzades de la primera etapa. b) Codi binari d. c) Mapa de fase. d) Mapa topogràfic de la mostra.	143
4.16	Comparativa entre els mapes topogràfics obtinguts amb l'ESFS (esquerra) i el profilòmetre comercial (dreta) per a les mostres de a) l'AIR B40, b) ploma i c) estrella.	144
4.17	a) Mapa topogràfic de l' <i>step height</i> de $21.70 \pm 0.02 \mu\text{m}$. b) Perfil horitzontal del mapa topogràfic.	145
4.18	a) Mapa topogràfic d'un mirall inclinat i b) mapa de residuals de l'ajust d'un pla.	145
4.19	Caracterització de la resolució topogràfica i el soroll de mesura per l'ESFS i la tècnica de variació de focus. a) Mapa topogràfic d'una Siemens <i>star</i> adquirida amb un $50\times/0.8$ NA. b) ITF calculades a partir de les topografies anteriors. En els dos casos el <i>blur</i> gaussià aplicat és de $\sigma = 5$. c) Resolució topogràfica estimada en funció del <i>blur</i> gaussià. d) i e) Càlcul del soroll del sistema en funció del <i>blur</i> gaussià. Els resultats per l'ESFS tenen un rang de mesura de $15 \mu\text{m}$, per la de variació de focus el rang és irrellevant.	146
4.20	Esquema òptic del segon prototip. Inclou l'objectiu de microscopi (OM), <i>beam splitter</i> (BS), lent de tub, lent TAG, lents de <i>relay</i> (L1 i L2), càmera, lent col·limadora, màscara i LED.	147
4.21	Fotografia del prototip. Inclou LED, lent colimadora (CL), patró de texturització (IP), <i>beam splitter</i> (BS), lents de <i>relay</i> (L1 i L2), lent TAG, mostra i càmera.	148
4.22	Mapes topogràfics dels <i>step heights</i> de a) $0.5 \mu\text{m}$, b) $1 \mu\text{m}$ i c) $2 \mu\text{m}$. El perfil promig es mostra a sota de cada mapa topogràfic. d) Gràfic de l'alçada mesurada (en radians) en funció de l'alçada certificada que s'ha fet servir per calibrar el sistema.	149
4.23	a) Gràfic de la posició axial mesurada en funció de la posició del motor axial. La línia discontinua correspon a un pendent igual a 1. b) Mapa topogràfic d'un mirall inclinat amb el perfil corresponent. La línia vermella correspon al valor real.	149
4.24	<i>Stitching</i> dels mapes topogràfics obtinguts amb l'ESFS a 67 topografies per segon durant la translació manual de l'estàndard de rugositat AIR B40. A l'inferior es veu el mapa topogràfic a diferents instants temporals.	150
4.25	a) Sensor de gasos MEMS que consisteix de circuits interdigitats (esquerra) i una membrana penjada (centre). Mapa topogràfic de la membrana de $845 \times 707 \mu\text{m}$. b) Reconstrucció topogràfica a través de l'ESFS amb la imatge de camp clar a sota a diferents instàncies de temps. La deformació de la membrana és causada per una senyal elèctrica que indueix escalfament i refredament. c) Gràfic de la posició axial en funció del temps per 3 diferents posicions de la membrana.	151
4.26	Perfil topogràfic d'un <i>step height</i> . En aquest estan assenyalats els rangs axials on s'ha d'activar la il·luminació (en verd) i on s'ha d'apagar (en vermell) per tal d'obtenir un SNR el més alt possible.	152
4.27	Senyal d'interferència en funció de la posició axial per una font de llum d'alta coherència.	155

4.28	Esquema del sistema òptic per la implementació de l'ESFS mitjançant interferometria.	156
4.29	Modulacions ($M_1 - M_4$) per cada imatge adquirida. El període de les pulsacions (T) és $\lambda/2$ i la fase inicial de cada modulació és 0, $\pi/2$, π i $3\pi/2$. La fase de la modulació es recupera a través dels algorismes de <i>phase-shift</i> , que resulten en la localització axial de la mostra amb <i>modulo T</i>	157
4.30	a) Imatge adquirida per cadascuna de les modulacions (M_{1-4}). El canvi de fase entre elles és més fàcil d'apreciar a les cantonades de les imatges. b) Mapa de fase resultant de les 4 imatges anteriors. c) Mapa topogràfic de la mostra.	158
4.31	Mapa de fase de l'estàndard de rugositat AIR B40 de l'NPL. b) i c) Comparació entre el mapa topogràfic obtingut amb la tècnica proposada (b) i l'obtingut amb el profilòmetre òptic comercial i CSI (c). Els resultats de la tècnica proposada són fidels a la tècnica tradicional, i la principal diferència es troba en els components d'alta freqüència espacial de la mostra. A causa de la reducció en el contrast de les franges, aquests components no són tan visibles.	159
4.32	Esquema de l' <i>unwrapping</i> heterodí. a) Imatges interferomètriques adquirides amb una longitud d'ona de 525 nm i b) 400 nm. c) Mapa de fase obtingut amb una longitud d'ona de 525 nm i d) 400 nm. e) Combinació heterodina dels dos mapes de fase per obtenir un mapa topogràfic <i>unwrapped</i> de la mostra.	161
4.33	Esquema del muntatge per l'implementació de la tècnica ESFS mitjançant la polarització. En aquest cas, vam fer servir un polaritzador que es manté en una velocitat angular constant i per la detecció s'utilitza una càmera polaritzada.	162
4.34	Intensitat de la il·luminació en funció de la posició axial per a cada angle de polarització de la càmera.	163
4.35	a) Imatge adquirida separada en els seus components de polarització. En cadascuna d'aquestes imatges ja s'ha aplicat l'operador Laplaciana i es mostra la imatge de seccionat òptic. La freqüència del polaritzador era de 1.5 rotacions per imatge, que resulta en 3 franges visibles. b) Mapa de fase que resulta de les 4 imatges prèvies. c) Mapa de fase després de l' <i>unwrapping</i>	164
4.36	a) Imatge adquirida separada en els seus components de polarització. En cadascuna d'aquestes imatges ja s'ha aplicat l'operador Laplaciana i es mostra la imatge de seccionat òptic. La freqüència del polaritzador era de 3 rotacions per imatge, que resulta en 6 franges visibles. b) Mapa de fase que resulta de les 4 imatges prèvies. c) Mapa de fase després de l' <i>unwrapping</i>	165
4.37	a) Esquema del sistema òptic, s'inclouen el LED, lent col·limadora (LC), filtre d'emissió (FE), polaritzador lineal (PL), <i>plate splitter</i> polaritzat (PSP), <i>spinning disk</i> (SD), placa de fase $\lambda/4$, objectiu de microscopi (OM) i lent de tub (LT). b) X-Light-V1 del comerciant Crest Optics.	167
4.38	Imatge binaritzada dels <i>pinholes</i> de l' <i>spinning disk</i> . Aproximadament un 3.5 % dels píxels de la càmera es troben en un <i>pinhole</i>	168

4.39	Senyal confocal mesurada amb la càmera d'un <i>scan</i> de 20 μm amb passos de 0.1 μm	169
4.40	Mapes topogràfics amb el perfil corresponent per tres <i>step heights</i> obtinguts amb el confocal d' <i>spinning disk</i> i la tècnica ESFS. Els valors de referència de cada <i>step</i> són a) $541 \pm 6 \text{ nm}$, b) $925 \pm 6 \text{ nm}$ i c) $1918 \pm 6 \text{ nm}$	169
4.41	Mapes topogràfics de l'estrella Siemens obtinguts amb a) el microscopi confocal comercial (S neox, Sensofar) i b) el confocal d' <i>spinning disk</i>	170
4.42	Ondulació que s'observa en totes les topografies adquirides amb el sistema òptic del confocal d' <i>spinning disk</i> . L'amplitud és de 10 nm aproximadament.	171
A.1	a) Modulació polsada amb període T , amplitud A i <i>duty cycle</i> d de $\frac{k}{T}$. Modulació sinusoidal amb període T , amplitud A i un <i>offset</i> M	187
A.2	Amplitud en l'espai de Fourier de la il·luminació polsada i MTF del sistema òptic.	188

Índex de taules

2.1	Característiques òptiques d'objectius de microscopi tradicionals. A mesura que augmenta l'obertura numèrica disminueix la distància focal, i el diàmetre de la pupil·la es manté aproximadament constant.	76
3.1	Especificacions del sistema òptic OSAM.	79
3.2	Lents que s'han utilitzat per a la lent de tub (Edmund Optics i OptoSigma). Vam encolar les lents 5 i 6 amb l'adhesiu per a superfícies òptiques Norland i curat amb llum ultravioleta.	81
3.3	Paràmetres de textura Sa i Sq per a l'OSAM, el sistema comercial i els valors certificats de referència.	86
3.4	Valors d' <i>step height</i> mesurats amb l'OSAM i els valors de certificats de referència.	87
3.5	Característiques de cada objectiu representat en la Figura 3.18, incloent el camp de visió, mostreig i punts no mesurats.	95
3.6	Especificacions del sistema òptic. Les característiques més importants són l'obertura numèrica (0.45) i el camp de visió de 4×4 mm.	111
3.7	<i>Space-bandwidth product</i> (SBP) per objectius de microscòpia estàndard.	112
3.8	Especificacions de la càmera.	113
3.9	Lents que s'han utilitzat per a la l'objectiu de microscopi $3\times/0.45$ NA monocromàtic. Totes les unitats estan en mil·límetres.	114
3.10	Lents que s'han utilitzat per a la l'objectiu de microscopi $3\times/0.45$ NA amb 10 nm d'ample de banda. Totes les unitats estan en mil·límetres.	116
3.11	Lents que s'han utilitzat per a la l'objectiu de microscopi $3\times/0.20$ NA amb la lent de tub. Totes les unitats estan en mil·límetres.	118
3.12	Lents que s'han utilitzat per a la l'objectiu de microscopi $3\times/0.20$ NA amb 10 nm d'ample de banda. Totes les unitats estan en mil·límetres.	122
4.1	Obertura numèrica, mida d' <i>step</i> i número de plans corresponent per un escaneig de 100 μm .	127
4.2	Codis binari i Gray pels números entre el 0 i el 7. Els codis Gray només difereixen d'un sol bit entre números consecutius, en canvi els codis binaris no tenen aquesta propietat.	134
4.3	Paràmetres de simulació per comparar la precisió en localització axial fent servir llum amb modulació sinusoidal i polsada.	139
4.4	Augment, obertura numèrica, resolució i mida de la projecció del <i>pinhole</i> de 40 μm per a diferents objectius. Només el $100\times$ i $150\times$ tenen resolucions i mides similars, i per tant amb els altres objectius el seccionat òptic serà molt pobre.	166

Capítol 1

Introducció

En aquest primer capítol es presenten els temes que s’han investigat durant la tesi, juntament amb les motivacions que han dut a la seva realització. La tesi està emmarcada en un doctorat industrial, realitzada amb la col·laboració entre el grup Dynamic Optical Systems Lab del departament de Física Aplicada de la Universitat de Barcelona (UB) i l’empresa vallesana d’instruments de metrologia òptica Sensofar Tech S.L.

1.1. Motivació

Les noves tecnologies de fabricació, en concret la manufactura additiva (MA), ofereixen avantatges significatius respecte les metodologies convencionals, com ara la possibilitats d’aconseguir peces funcionals amb geometries complexes i una important reducció del cost, entre d’altres. Això ha permès que, avui dia, sigui possible aconseguir fabricar peces que en el passat haurien sigut impossibles de concebre. Però, a mesura que es desenvolupen aquestes noves tecnologies, també hi ha la necessitat de caracteritzar la forma i geometria de les peces resultants, així com quantificar la qualitat d’aquests components. A més, també és important conèixer com es comporten en entorns industrials, on la durabilitat i resistència a ruptures són essencials.

L’aplicació de la metrologia, la ciència de la mesura, juga, per tant, un paper fonamental en tots els camps relacionats amb la manufactura i el disseny de parts. A través de la metrologia es desenvolupa un procés de control de qualitat que ofereix eines per categoritzar les peces resultants del procés de manufactura. Per altra banda, també ofereix informació per a millorar el propi procés de fabricació, que obre pas a un cicle virtuós de retroalimentació i millora.

Sensofar Tech porta més de 20 anys oferint aquestes eines, que tenen la capacitat de mantenir un control de qualitat eficaç i repetitiu per la indústria manufacturera, ja sigui aeronàutica, automobilística, o de xips. En concret, Sensofar Tech ofereix productes per al monitoratge de la textura i forma de les superfícies a través de la caracterització amb tècniques de metrologia òptica, com per exemple la interferometria i la microscòpia confocal, entre d’altres.

Llavors, en el context de la manufactura additiva, el repte es fa encara més evident. Aquestes tècniques de fabricació generen peces amb superfícies més com-

plexes que les produïdes per mètodes tradicionals, i això obliga a que les tècniques de metrologia òptica hagin d'evolucionar per adaptar-se a aquestes noves exigències.

Les principals característiques de la manufactura additiva són les superfícies amb alta rugositat, una conseqüència de la naturalesa d'aquests processos capa per capa. Una rugositat elevada exigeix que es mesurin camps de visió considerablement grans per obtenir informació precisa i fiable sobre les superfícies i, per altra banda, evitar efectes locals en la mostra. En la metrologia tradicional, els camps de visió solen ser de centenars de micròmetres utilitzant objectius amb un augment entre $10\times$ i $20\times$ i, a mesura que augmenta, els camps de visió es redueixen fins a desenes de micròmetres. En canvi, per a les peces fabricades mitjançant manufactura additiva, és necessari ampliar el camp de visió fins a pocs mil·límetres, un ordre de magnitud superior en comparació amb les tècniques i aplicacions tradicionals.

Encara que existeixen solucions per mitigar aquestes limitacions, com l'ús d'objectius amb augments al voltant de $2.5\times$ i $5\times$, aquest tipus d'objectius solen presentar una obertura numèrica reduïda. Això implica una resolució lateral de l'ordre de $5\text{ }\mu\text{m}$ i una resolució axial de fins a les desenes de micres, uns valors massa elevats que no permeten la caracterització de la rugositat de la superfície ni dels seus detalls. D'altra banda, és possible utilitzar objectius amb una obertura numèrica més alta, però que també comporten un augment elevat, i per tant camps de visió de poques desenes de micròmetres, lluny dels mil·límetres necessaris a la caracterització adequada de manufactura additiva. Aquesta limitació obliga l'usuari a mesurar diversos camps de visió per obtenir resultats fiables (*stitching*), fet que provoca que el procés de mesura sigui, en general, lent.

Aquestes exigències impliquen que els sistemes òptics i les tècniques de mesura tradicionals no siguin adequades per a la caracterització de peces de manufactura additiva, ja que produeixen resultats amb poca consistència, fiabilitat, i amb temps de mesura prolongats. La indústria de la manufactura additiva necessita resultats que siguin simultàniament ràpids, precisos i fiables, allunyant-se de solucions lentes i ineficients.

Per aquest motiu, aquesta tesi s'ha centrat en l'anàlisi de les peces de fabricació additiva i en el desenvolupament de noves tècniques i equips per a la seva mesura a escala micromètrica, fent èmfasi en la velocitat i l'adaptabilitat de la metrologia a les característiques específiques d'aquestes superfícies.

1.2. Estructura de la tesi

La tesi es divideix en quatre capítols principals. En aquest primer capítol s'introdueix la tesi i els temes principals d'interès. En el segon es tracta l'estat de l'art. Els dos capítols següents presenten els resultats: el primer es centra en el desenvolupament d'un sistema òptic per a manufactura additiva, i el segon descriu una nova tècnica de metrologia òptica per reduir el temps d'adquisició i mesura. Finalment, el cinquè i darrer capítol recull les conclusions.

En el capítol 2, es realitza una revisió exhaustiva i anàlisi de la literatura relacionada amb la metrologia òptica i la manufactura additiva. En primer lloc, es defineix el concepte de metrologia, amb incís especial en la metrologia dimensional, àrea on es desenvolupa la metrologia òptica. A continuació, es presenten els parà-

metres més utilitzats per a la caracterització de superfícies, seguit d'una descripció de les tècniques de metrologia, tant de contacte com òptiques. També es revisen els mètodes per al control del focus axial, que s'utilitzen per aconseguir mesures ultrarràpides. Aquestes tècniques seran un element clau en el capítol 4, on s'implementaran juntament amb la tècnica innovadora. En segon lloc, es tracta la manufactura additiva, adreçant les diferents tècniques desenvolupades fins a l'actualitat, així com els processos de postprocessament habituals aplicats a les peces. En aquest capítol també es fa èmfasi en la metrologia aplicada a la manufactura additiva, analitzant les limitacions i les necessitats específiques de mesura per a les peces produïdes mitjançant aquests processos.

En el capítol 3 es descriu el desenvolupament d'un nou sistema òptic per a manufactura additiva, que vam anomenar OSAM (*optical system for additive manufacturing*). Aquest prototip ha estat dissenyat i fabricat específicament per superar les limitacions inherents a les tècniques tradicionals. El microscopi desenvolupat incorpora una lent de tub dissenyada a mida per aquest propòsit, combinada amb un objectiu de microscopi Nikon per a estereomicroscòpia, que proporciona un camp de visió ampli i una obertura numèrica elevada. Un cop dut a terme el sistema òptic, es detalla la seva caracterització òptica, mitjançant l'ús de la *modulation transfer function* (MTF) i estàndards de mesura per avaluar el rendiment del sistema. Finalment, es presenta la caracterització topogràfica, on es validen les capacitats de mesura d'aquest sistema òptic, demostrant l'eficiència i la precisió per a l'anàlisi de superfícies de manufactura additiva.

D'altra banda, durant el desenvolupament de l'OSAM i la seva caracterització, es va notar que l'objectiu comercial de Nikon no és capaç de corregir totes les aberracions òptiques. A més, Nikon no proporciona ni el disseny òptic de l'objectiu ni un model en forma de *black box*, fet que va posar de manifest la necessitat de dissenyar un objectiu propi. Això permetria controlar i corregir les aberracions òptiques, obtenint així un sistema òptic capaç de garantir una caracterització excel·lent de les peces de manufactura additiva. Per aquesta raó, en aquest apartat també es presenten quatre dissenys d'objectius de microscopi, un dels quals utilitza un anell de llum per augmentar l'obertura numèrica de la il·luminació, mantenint una obertura numèrica global baixa per reduir la complexitat del sistema òptic.

En el capítol 4 s'explica que la principal limitació en les tècniques tradicionals per obtenir mapes topogràfics a alta velocitat és l'escaneig axial. A més, aquesta limitació existeix per a qualsevol tipus de mostra, incloent-hi les de manufactura additiva. Un cop introduït el problema, s'introdueix la tècnica que s'ha desenvolupat durant la tesi, que hem anomenat ESFS (*encoded search focal scan*). L'ESFS es basa en aconseguir imatges amb una profunditat de camp igual al rang de mesura axial on es pressuposa que es troba la superfície de la mostra. Així, s'aconsegueix informació de tot el rang de mesura, i és possible localitzar la mostra més eficientment que amb l'enfoc tradicional de l'escaneig axial. En aquest capítol s'explica detalladament el principi de funcionament de la tècnica, així com els principals components que són necessaris per dur-la a terme. A continuació, es presenten els resultats obtinguts amb dos prototips diferents. En el primer prototip, s'utilitza un motor per dur a terme l'escaneig focal, mentre que en el segon s'utilitza una lent varifocal, la qual permet aconseguir velocitats d'adquisició molt més elevades que en el primer cas. Finalment, es presenta l'ESFS en diferents implementacions, aprofitant propietats

òptiques com la interferència i la polarització. També es demostra la seva versatilitat en un microscopi confocal d'*spinning disk*. Totes aquestes aportacions demostren la utilitat i la flexibilitat d'aquesta tècnica en diferents aplicacions.

En últim lloc, en el capítol 5 s'expliquen les conclusions de la tesi i s'analitzen els objectius que s'han aconseguit a través de les contribucions científiques i industrials que aporta la tesi.

Per acabar, al final de la tesi es llisten totes les publicacions, *proceedings* i patent que s'han escrit durant aquest període.

1.3. Objectius

L'objectiu principal de la tesi és desenvolupar un sistema de metrologia òptica adaptat a les necessitats de la manufactura additiva, per tal de millorar tant la velocitat com la fiabilitat de les tècniques de mesura convencionals. Per tal d'aconseguir aquest objectiu general, hem treballat en dos propòsits específics, com es detalla a continuació.

El primer objectiu és el de desenvolupar un sistema òptic capaç de caracteritzar peces rugoses de manufactura additiva amb resolució espacial alta i en camps de visió grans. Aquest primer objectiu comporta:

- Investigar les característiques de les peces de manufactura additiva que dificulten la caracterització amb tecnologies òptiques tradicionals.
- Dissenyar i desenvolupar el sistema òptic per a les necessitats de manufactura additiva.
- Caracteritzar les propietats òptiques i de topogràfiques de l'instrument òptic.
- Proposar dissenys òptics personalitzats d'objectius de microscopi per a la mesura de peces de manufactura additiva.

El segon objectiu és el desenvolupament d'una nova tècnica de metrologia òptica per a la mesura de superfícies, fent especial èmfasi en la velocitat d'adquisició i mesura. Per assolir aquest objectiu és necessari:

- Repassar les tècniques de metrologia òptica tradicionals.
- Desenvolupament de la tècnica i caracterització del principi de funcionament.
- Aplicar la tècnica en diversos esquemes de metrologia òptica per demostrar la seva versatilitat i efectivitat.

Aquest conjunt d'objectius té com a finalitat superar els desafiaments industrials associats a l'aplicació de la metrologia òptica en la manufactura additiva. Paral·lelament, s'aborden qüestions científiques que encara no han estat completament resoltes, com ara la mesura òptica ultraràpida, amb l'objectiu de desenvolupar solucions innovadores que ampliïn les possibilitats i les aplicacions en els àmbits de la caracterització i el control de qualitat.

Capítol 2

Estat de l'art

Aquest capítol té com a objectiu revisar l'estat de l'art de la metrologia òptica i la manufactura additiva. En primer lloc, es proporciona una descripció exhaustiva de la metrologia òptica, incloent les metodologies i tècniques més rellevants en l'actualitat, com la microscòpia confocal, la variació de focus i la interferometria. També es presenten els paràmetres de textura, utilitzats per caracteritzar i descriure les superfícies mesurades.

Per a una millor contextualització, s'introdueix breument la metrologia de contacte, enfocant-se en la mesura amb *stylus*, sense aprofundir en tecnologies més complexes com l'*atomic force microscopy* (AFM), ja que la resolució d'aquest tipus d'instruments és considerablement superior a la obtinguda amb les tècniques òptiques, i per tant, queda fora de l'abast d'aquesta tesi. És important destacar que aquesta tesi es centra principalment en la caracterització de la textura de superfícies a escala micromètrica. A més, s'especifica la diferència fonamental entre la caracterització de forma i textura: mentre que la forma es refereix a l'aspecte general de la peça, la textura fa referència a la rugositat de la superfície a escala més local. En aquest apartat també s'introdueix una tècnica de caracterització de forma, la projecció de franges. Aquesta tècnica es distingeix substancialment de les altres, ja que només s'han presentat tècniques per a la mesura de textura. La introducció de la projecció de franges en aquest punt resulta pertinent, ja que comparteix diversos aspectes amb la tècnica innovadora descrita al capítol 4. Destacar, però, que la mesura de forma queda fora de l'abast d'aquesta tesi. Per últim, es revisen diverses tècniques per al control ràpid del focus axial de sistemes òptics, entre les quals s'inclouen l'ús de lents varifocals i l'enfocament remot.

En segon lloc, s'introdueix la manufactura additiva i les principals tècniques desenvolupades en aquest camp, diferenciant les basades en plàstics i metalls. Es tracta també els processos de postprocessat i es revisen les limitacions i problemes principals que es presenten durant la manufactura, els quals poden influir directament en el rendiment de les peces produïdes.

Per concloure, es presenta un anàlisi de la metrologia de superfícies aplicada a peces de manufactura additiva. En aquest context, es discuteixen els aspectes que dificulten la seva caracterització amb sistemes òptics tradicionals, alhora que es proposen possibles solucions per a cada un dels problemes.

Aquesta revisió ofereix el context necessari per entendre els resultats exposats

en els dos capítols següents i estableix les bases per a comprendre les innovacions i avenços proposats en aquesta tesi.

2.1. Metrologia

La metrologia constitueix la disciplina científica dedicada a l'estudi de la mesura, que cobreix tant els aspectes teòrics com pràctics [1]. Aquesta ciència proporciona el fonament sobre el qual es basen factors com la qualitat, seguretat i eficiència en diversos àmbits, des de la manufactura fins a la construcció i la salut.

La mesura s'entén com el procediment per obtenir valors quantitatius de la característica d'un objecte, amb una incertesa associada. Aquesta incertesa es defineix com la dispersió dels resultats obtinguts d'una mateixa quantitat mesurada múltiples vegades. Es poden distingir dos components d'incertesa, els errors sistemàtics i els aleatoris. Els errors sistemàtics són susceptibles de ser corregits mitjançant calibratge, degut al seu caràcter repetitiu, mentre que els errors aleatoris, sense un patró de repetibilitat, només poden ser abordats estadísticament.

Per a corregir els errors sistemàtics es realitzen mesures traçables a un estàndard de mesura, que en aquest context específic és el metre del sistema internacional (SI). La traçabilitat es concep com la propietat d'una mesura per ser relacionada a un estàndard reconegut. A tal efecte, s'estableix una cadena de referències, on cada referència contribueix a la incertesa de la mesura, fins a arribar a l'estàndard. A través d'aquestes mesures, és factible quantificar l'error sistemàtic i calibrar els instruments de mesura per a un funcionament correcte. En termes generals, la traçabilitat constitueix un requisit indispensable per a qualsevol instrument que mesuri una magnitud del SI.

Per exemple, un cas on s'utilitza la traçabilitat i calibració en instruments de metrologia òptica és en la mesura d'alçades. Per això, l'alçada d'un estàndard es mesura utilitzant una determinada tècnica, que resulta en un valor $X \pm x$. Al mateix temps, aquest estàndard ha estat certificat mitjançant una tècnica de major exactitud, que va donar lloc a un valor $Y \pm y$. Els dos resultats X i Y s'obtenen repetint la mesura de l'alçada múltiples vegades, que permet establir l'estadística de l'error aleatori (x i y). Llavors, per a obtenir una mesura precisa amb la tècnica de metrologia òptica, s'haurà d'aplicar un factor de correcció sobre el resultat per tal que X s'aproximi al màxim al valor de referència Y . Així, es calibra l'error sistemàtic associat a un instrument de mesura. En aquest exemple només hi ha dos elements en la cadena de referències, però aquesta pot incloure múltiples etapes. En la Figura 2.1 es presenta un esquema de la cadena de traçabilitat [2]. En cadascuna de les fases anteriors de traçabilitat, l'exactitud i resolució són millors, de manera que cada instrument en fases posteriors presentarà característiques inferiors.

La metrologia es pot classificar en dos grups segons el seu objectiu principal: la científica i la industrial. La primera es focalitza en establir unitats de mesura, estàndards i metodologies per garantir l'exactitud i traçabilitat dels instruments. En canvi, la metrologia industrial implica l'aplicació de tècniques de mesura amb instruments per tal de valorar la qualitat i conformitat dels productes manufacturats i dels processos en si.

2.1.1 Metrologia dimensional

El camp de la metrologia es divideix en diverses àrees en funció dels estàndards de mesura emprats. En el cas de la mesura de distàncies, es denomina metrologia

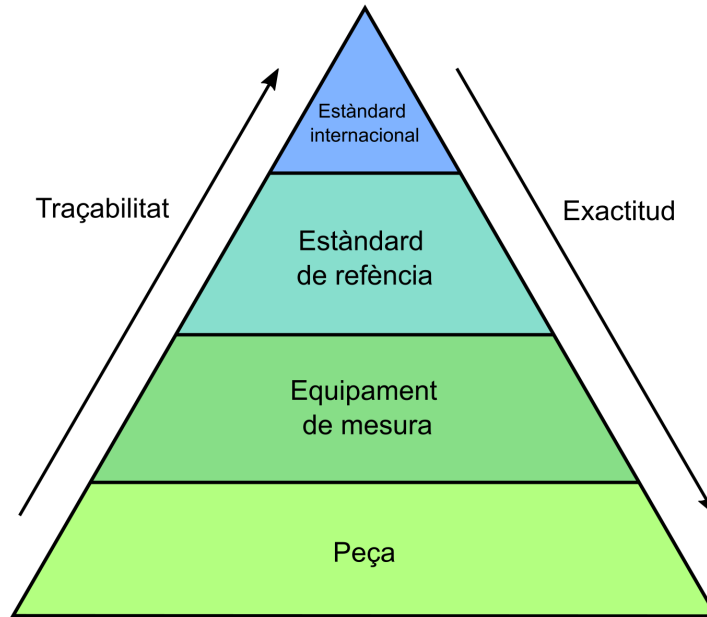


FIGURA 2.1: Esquema de la cadena de traçabilitat. La traçabilitat es transfereix entre cada nivell a través de la calibració d'un estàndard, que inclou una avaluació de la incertesa i del valor mesurat.

dimensional. Dins d'aquest camp es troben les mesures de distància (entre dos punts), els desplaçaments (entre un punt i una referència) i, finalment, el conjunt de forma, *waviness* i textura [3]. La metrologia dimensional s'aplica quotidianament per mantenir el control sobre les especificacions de peces manufacturades en diversos processos, establint dimensions crítiques i toleràncies que determinen l'acceptació d'aquesta.

La mesura de forma i *waviness*, en termes generals, fa referència a la quantificació de la desviació d'una peça respecte d'una referència, per tal de caracteritzar i quantificar la forma i desviació associades a aspectes específics del procés de manufactura. Habitualment, aquesta mesura s'aconsegueix amb una màquina de mesura per coordenades, un sistema que es serveix del contacte d'una punta esfèrica amb l'objecte a mesurar. A més, també s'utilitzen altres tècniques basades en tecnologies òptiques que principalment es fonamenten en la triangulació, com per exemple la projecció de franges. Aquesta tesi no aborda la mesura de forma ni de *waviness*, i es centra exclusivament en la metrologia de textura de superfície.

La metrologia de superfícies està vinculada a la caracterització de la topografia i a les tecnologies de mesura corresponents [4]. La distinció principal entre la mesura de forma i de textura rau en l'escala i les dimensions analitzades. La forma es relaciona amb dimensions grans, a l'escala de mil·límetres, mentre que la textura té dimensions significativament més petites -típicament, les irregularitats superficials i locals- que es mesuren en micròmetres. La Figura 2.2 il·lustra aquestes escales de dimensió. Així, a l'esquerra es mostra la topografia d'un mostra, i a la dreta els components de textura, *waviness* i forma. L'extracció de cada component s'executa mitjançant un filtratge en l'espai de Fourier utilitzant una funció gaussiana amb longituds de tall específiques [5].

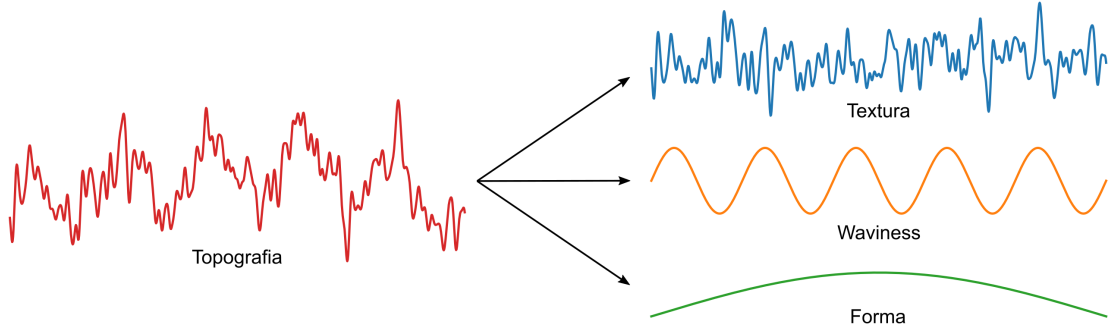


FIGURA 2.2: Components de metrologia dimensional. A l'esquerra es veu un exemple d'un perfil d'un mapa topogràfic i a la dreta els components principals: textura, waviness i forma.

Les tècniques principals en metrologia de superfícies es divideixen en dues categories: les de contacte i les òptiques [6]. Aquesta tesi proporciona una breu descripció de les tècniques de contacte, i es centra sobretot en les òptiques. En aquestes últimes s'incideix en la microscòpia confocal, la variació de focus, HiLo i les tècniques interferomètriques. Finalment, també s'aborda la tècnica de projecció de franges, emprada per a la mesura de forma. Aquesta tècnica presenta característiques substancialment diferents de les esmentades anteriorment, però és rellevant perquè comparteix diversos aspectes amb l'ESFS, que es descriu al capítol 4.

2.1.2 Paràmetres de textura

Per a la caracterització quantitativa de la textura de superfície és fonamental establir uns paràmetres reconeguts per la comunitat científica i industrial. La norma ISO 25178, part 2 [5], especifica aquests paràmetres de textura, d'entre els quals els dos que s'utilitzen més àmpliament són l' Sa i l' Sq .

L' Sa està definida com la mitjana aritmètica del valor absolut de l'altura respecte el valor mitjà,

$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y) - \bar{z}| dx dy, \quad (2.1)$$

on $\bar{z}$ és la mitjana aritmètica.

L' Sq és la mitjana quadràtica respecte el valor mitjà,

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A (z(x, y) - \bar{z})^2 dx dy}. \quad (2.2)$$

Altres paràmetres de textura són la *skewness* (Ssk) i la *curtosi* (Sku), que són el tercer i quart moments estandarditzats, respectivament. El seu ús, però, és més específic en funció de l'aplicació i no s'utilitzen en la tesi.

El prefix que s'utilitza per a la caracterització de la textura de superfícies és S . En canvi, per a instruments que només obtenen un perfil de la superfície, que en general són les tècniques de contacte amb *stylus*, s'utilitza la R . La formulació és conceptualment la mateixa, però es tracta d'integrals de línia a canvi d'àrea.

2.1.3 Metrologia de contacte

La metrologia de contacte, tal com el seu nom indica, es basa en l'ús d'eines o instruments que estableixen contacte físic directe amb la peça o objecte que s'ha de mesurar. La metrologia de contacte està significativament limitada a la mesura amb *stylus*. En contrast amb les tècniques òptiques, la mesura de contacte és fàcil de comprendre i implementar, la qual cosa li ha conferit un paper important durant el desenvolupament de la metrologia de superfícies.

A la Figura 2.3 es presenta un esquema bàsic del funcionament de la metrologia de contacte. Un instrument d'aquesta naturalesa es fonamenta en un *stylus* que estableix contacte físic amb la superfície a caracteritzar. A mesura que l'*stylus* ressegueix la superfície, experimenta desplaçaments verticals, que són analitzats per determinar el perfil topogràfic de la mostra [7].

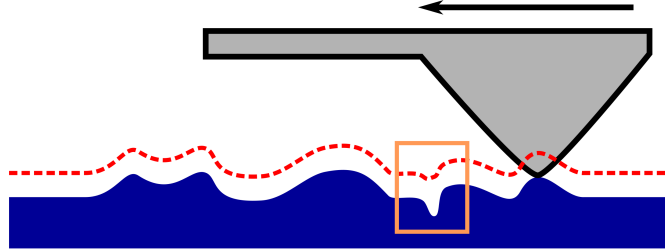


FIGURA 2.3: Representació esquemàtica d'un sistema de mesura de contacte. L'*stylus* es desplaça horitzontalment, i en vermell es mostra el moviment vertical que experimentarà en cada punt de la mostra, representant així el perfil detectat. La resolució d'aquests sistemes ve principalment dictada per la forma i mida de la punta de l'*stylus*. En el quadre taronja es veu una zona on aquest no podrà penetrar, fet que impedirà la mesura correcta d'aquesta regió.

El component essencial d'aquests instruments és l'*stylus*, juntament amb el seu material i la configuració. El perfil que obté no és una representació completament fidel de la superfície, ja que la punta no és infinitament petita i, per tant, afegirà efectes no desitjats en el resultat. Més concretament, aquest comportament es pot modular com una convolució entre el perfil de la punta de l'*stylus* i el perfil topogràfic real,

$$z(x) = \int m(\tau) s(x - \tau) d\tau \quad (2.3)$$

$$= m(x) * s(x), \quad (2.4)$$

on $z(x)$ és el perfil mesurat, $m(x)$ el perfil topogràfic real de la mostra i $s(x)$ el perfil de l'*stylus*. En aquesta equació 2.3, s'identifica la punta de l'*stylus* com a la resposta impulsional del sistema. En una situació ideal en que aquest fos infinitament petit, el perfil mesurat seria exactament el mateix que el real, i correspondria amb un sistema amb resolució infinita. En situacions més realistes, l'*stylus* té una certa amplada, i per tant actua com a filtre passa-baixos sobre el perfil de la mostra. La resolució lateral, en conseqüència, depèn de la seva amplada i forma.

A la Figura 2.3, dins el requadre taronja, es representa una vall estreta que no podrà ser mesurada adequadament degut a la grandària de la punta. Normalment, les puntes utilitzades són esfèriques amb un radi comprès entre 1 i 10 μm i tendeixen

a formar un angle de 60° o 90°. Per decidir quina punta utilitzar, és fonamental tenir en compte les característiques de la mostra a mesurar. Si prèviament es coneix que la superfície és llisa sense artefactes amb *aspect ratio* alts, es poden utilitzar puntes més amples que poden suportar velocitats majors d'escaneig, la qual cosa permet agilitzar tot el procés de mesura. En canvi, si la mostra presenta estructures petites, és necessari utilitzar puntes més fines i reduir la velocitat d'escaneig.

L'avantatge principal de la mesura per contacte resideix en la fiabilitat i la comprensió del procés físic subjacent, el qual és senzill i fàcil d'analitzar. L'únic component a tenir en compte és la punta de l'*stylus*, i si es coneix la seva forma es pot optar per utilitzar tècniques de deconvolució per obtenir resultats més fidels. Per contra, degut al contacte de la punta amb la mostra, amb aquesta tècnica es pot malmetre la mostra, especialment si el material és fràgil. L'inconvenient principal, però, és la velocitat de mesura, que oscil·la al voltant de centenars de micròmetres per segon en funció del tipus de punta. Si aquesta és gran, llavors es pot augmentar la velocitat, però no es podran mesurar correctament els detalls més petits. Això fa que sigui inviable adaptar aquesta tècnica per a la mesura d'àrees, ja que mesurar uns pocs centenars de perfils podria durar diverses hores. Per aquesta tipologia de mesura, és aconsellable emprar tècniques òptiques, ja que la seva naturalesa permet mesurar àrees en un temps considerablement menor.

2.1.4 Metrologia òptica

La metrologia òptica es fonamenta en l'ús de les propietats òptiques de la llum per mesurar superfícies, permetent així la caracterització sense necessitat d'establir contacte físic directe. Aquest mètode comporta un avantatge considerable respecte a les tècniques de contacte, ja que elimina el risc de malmetre la mostra durant el procés de mesura.

A la Figura 2.4 es mostren els components principals d'un microscopi òptic per reflexió. En general, els microscopis utilitzats en metrologia de superfícies treballen en reflexió, ja que les superfícies analitzades són opaques. En la Figura 2.4 s'hi poden identificar la font de llum, que sovint és un LED o un làser. A continuació, es troben les òptiques i el diafragma de camp, que té la funció de limitar el camp de visió del sistema òptic. Després es troba el diafragma d'obertura, que en general sempre es troba dins l'objectiu del microscopi. Aquest diafragma és el que limita l'angle del con de llum que prové de cada punt de l'objecte. És un component que està estretament lligat amb l'obertura numèrica de l'objectiu, i per això es troba dins d'aquest. Finalment, la llum es reflecteix a la mostra i segueix el camí invers fins la lent de tub, que fa imatge de l'objecte a la càmera.

Les bases de la microscòpia òptica moderna van ser establertes per Ernst Abbe [8]. Aquest científic va demostrar que, a causa de la difracció de la llum, la resolució lateral està determinada per l'obertura numèrica de l'objectiu (*numerical aperture*, NA) i la longitud d'ona emprada,

$$d = k \frac{\lambda}{NA}, \quad (2.5)$$

on d representa la distància mínima que es pot resoldre, λ la longitud d'ona de la font de llum, NA és l'obertura numèrica de l'objectiu i k un factor que depèn

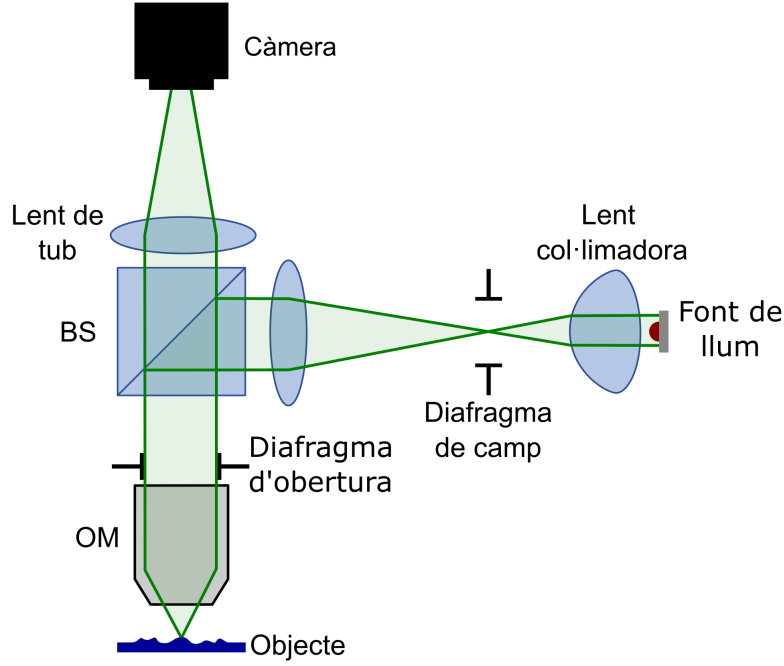


FIGURA 2.4: Components principals d'un microscopi òptic. La font de llum emet el feix que travessa la lent col·limadora, el *beam-splitter* i l'objectiu de microscopi (OM). El feix es reflecteix en l'objecte, i la lent de tub fa imatge a la càmera. El diafragma de camp és el que determina el camp de visió i el diafragma d'obertura limita el feix de llum que prové de cada punt de la mostra i que recull l'objectiu.

del criteri de resolució que s'utilitza. En aquest cas vam treballar amb el criteri de Rayleigh, amb una k de 0.61. Per altra banda, l'obertura numèrica de l'objectiu està relacionada amb l'amplitud del feix de llum que emergeix de cada punt de l'objecte,

$$NA = n \sin \theta, \quad (2.6)$$

on n és l'índex de refracció entre l'objectiu i l'objecte, i θ constitueix la meitat de l'angle del con de llum que l'objectiu recull. La Figura 2.5 il·lustra l'angle θ . És fonamental tenir en compte que aquest criteri de resolució només és aplicable quan l'objectiu del microscopi i la lent de tub estan lliures d'aberracions. Les aberracions òptiques més importants són l'aberració esfèrica, la coma, l'astigmatisme, la curvatura de camp i la distorsió [9], i la seva presència en el sistema òptic resulta en una pèrdua de la resolució lateral i axial.

Per tant, si es considera un objectiu perfecte sense aberracions i un punt de llum infinitament petit situat al pla objecte que actua com un impuls (δ), la imatge resultant al pla d'imatge no és un punt infinitament petit, sinó una imatge difractiva amb una mesura finita, coneguda com a resposta impulsiva. En el cas que el diafragma d'obertura sigui circular, com és típic en microscopis, la resposta impulsiva presenta simetria circular amb una secció transversal que es pot observar a la Figura 2.6a). El terme 'resposta impulsiva' és àmpliament utilitzat en els camps de processament de senyals i telecomunicacions, però en òptica es denomina *point spread function* (PSF). La forma de la PSF deriva del patró de difracció de Fraunhofer del diafragma d'obertura, i el radi del primer mínim s'ajusta a l'equació 2.5. A continuació, a la Figura 2.6b), s'observa la transformada de Fourier de la PSF, que

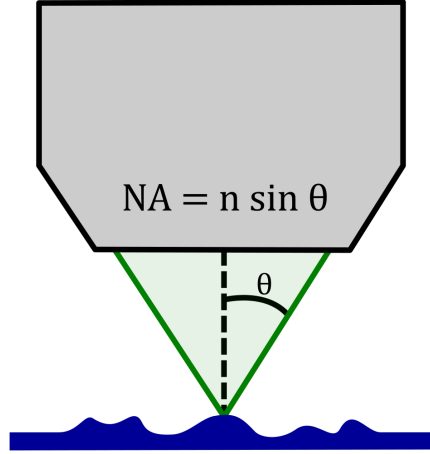


FIGURA 2.5: Obertura numèrica per un objectiu de microscopi.

determina com el sistema òptic transmet diverses freqüències espacial de l'objecte, i s'anomena *modulation transfer function* (MTF).

La MTF prové de la funció complexa que es coneix com *optical transfer function* (OTF), i segueix que,

$$OTF(f) = MTF(f)e^{iPh(f)} \quad (2.7)$$

on

$$Ph(f) = \arg(OTF(f)) \quad (2.8)$$

$$MTF(f) = |OTF(f)|. \quad (2.9)$$

La OTF, per tant, proporciona una descripció exhaustiva del sistema òptic, incloent el canvi de fase associat a cada freqüència transmesa. En situacions on únicament interessa conèixer l'atenuació, s'acostuma a utilitzar la MTF.

En resum, les funcions PSF i MTF proporcionen una representació de la formació d'imatge del sistema òptic en els eixos x i y . Tanmateix, la caracterització del sistema en l'eix axial (z) no ve donada per aquestes funcions. En aquest context de metrologia òptica per a la caracterització superfícies, l'especificació de la resolució axial del sistema òptic és imprescindible, ja que aquesta determina la precisió i exactitud del microscopi.

L'estudi de la resolució axial implica l'ús de la resposta impulsiva tridimensional del sistema òptic a partir d'una font puntual (δ) localitzada en el pla focal de l'objectiu. De manera anàloga a la resolució lateral, s'examina la forma de la PSF en direcció axial per identificar la distància del centre fins al primer mínim, que s'expressa com a [10]

$$d_z = \frac{2\lambda}{NA^2}, \quad (2.10)$$

on d_z representa la distància mínima axial que es pot resoldre, λ denota la longitud d'ona de la font de llum, i NA fa referència a l'obertura numèrica.

En general, l'objecte a mesurar no és necessàriament una superfície, és a dir, pot ser tridimensional. En aquest cas, la resolució axial està efectivament limitada

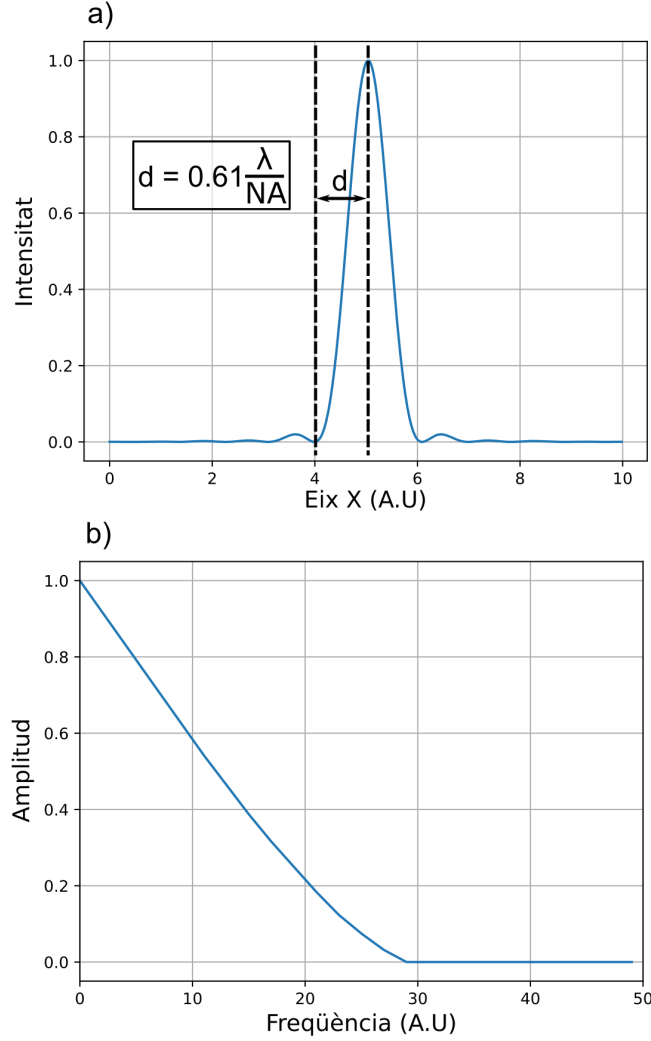


FIGURA 2.6: a) *Point spread function* (PSF) i b) *Modulation transfer function* (MTF) per un microscopi amb una obertura circular.

per l'equació 2.10. Tanmateix, en el cas de la mesura de superfícies, l'objecte no presenta una distribució tridimensional real. Sovint es considera que les superfícies són de dimensió 2.5D, ja que per a cada punt (x, y) només existeix un únic valor de z . Aquesta característica contrasta clarament amb el cas de les mostres biològiques, on múltiples objectes poden estar apilats a diferents altures, com ara orgànuls o cèl·lules. Aquesta propietat de les superfícies, sovint anomenada *sparsity*, ofereix avantatges significatius en l'àmbit de la metrologia. En particular, la precisió i l'exactitud d'un microscopi es poden millorar substancialment si s'aprofita aquesta característica intrínseca durant el procés de mesura i anàlisi.

Per aprofitar aquesta característica específica, totes les tècniques òptiques segueixen el mateix procediment. En primer lloc, la mostra s'escaneja en la direcció axial amb un nombre predeterminat de plans. A cada pla de l'escaneig, s'obté una imatge que proporciona informació sobre la posició axial de la mostra. Aquest pas és específic per a cada tècnica i s'explica en detall en els apartats següents. Un cop completat l'escaneig, es genera, per a cada punt del camp de visió, la resposta axial, definida com el valor obtingut en funció de l'eix z . Aquesta funció destaca per una

propietat: el seu valor augmenta a mesura que la superfície s'apropa al pla focal de l'objectiu i decreix quan s'allunya, resultant en un pic pronunciat.

L'últim pas consisteix a determinar, amb la màxima precisió possible, el màxim de la resposta axial, que permet generar un mapa topogràfic de la superfície. Normalment, aquest pas es realitza ajustant una funció gaussiana, ja que la resposta axial acostuma a tenir aquesta forma. Aquest últim pas és l'únic que només es pot aplicar en superfícies, ja que en el cas de mostres tridimensionals no és possible identificar cap màxim en la resposta axial. Això es deu al fet que poden existir múltiples objectes apilats i, per tant, la resposta axial no presentarà cap pic.

Les tècniques de metrologia òptica que s'expliquen en els apartats següents segueixen el procediment descrit, i només es diferencien en la manera d'obtenir la imatge que proporciona informació sobre la posició axial. Aquest pas és intrínsec de cada tècnica, i pot requerir l'adquisició de més d'una imatge, fet que implica que cada tècnica ofereix diferents prestacions en termes de resolució, velocitat i complexitat. Aquestes diferències determinen l'elecció de la tècnica més adequada, en funció de l'aplicació concreta i dels requisits específics de la mesura.

2.1.4.1 Microscòpia confocal

La microscòpia confocal, també coneguda com a microscòpia de seccionament òptic, es basa en bloquejar la llum fora del pla focal de l'objectiu a través de diferents tècniques o mitjans. S'anomena seccionament òptic a la capacitat de visualitzar només un pla axial de la mostra de forma virtual i no invasiva. Gràcies al seccionament òptic, s'aconsegueix augmentar el contrast de la imatge de la mostra i, combinat amb el procediment explicat en l'apartat anterior, permet reconstruir un mapa topogràfic d'aquesta. El principi de la tècnica, inventada per Marvin Minsky [11], és produir un patró de llum estructurada i observar la llum reflectida de la mostra a través d'un altre patró idèntic al d'il·luminació, que bloqueja la llum que prové de regions fora del pla de focus. En la versió original de Minsky, el patró utilitzat fou un *pinhole*, però es pot fer servir qualsevol altra geometria, com per exemple *slits* [12], un disc giratori de *Nipkow* [13] o un làser [14].

La configuració clàssica d'un microscopi confocal es mostra a la Figura 2.7. Un *pinhole* d'il·luminació es col·loca al diafragma de camp, de manera que la imatge d'aquest es projecta a la superfície de la mostra. Actualment, l'ús de làsers amb perfils Gaussians permet obviar l'ús del *pinhole* d'il·luminació, ja que el propi làser exerceix la mateixa funció. La llum reflectida per la mostra passa per un altre *pinhole* de detecció que es troba en una posició conjugada amb el *pinhole* d'il·luminació, i darrere d'aquest es troba un detector que registra la intensitat de la llum.

A la Figura 2.7 els rajos verds corresponen a quan la mostra es troba al pla focal de l'objectiu. En aquest cas, la major part de la llum reflectida passa a través del *pinhole* de detecció, registrant així una intensitat màxima. En canvi, pels rajos vermells la mostra està fora del pla focal, llavors la llum reflectida es troba fora de focus i la imatge del *pinhole* d'il·luminació està desenfocada. Per tant, es bloqueja la major part de la llum i el detector registra una intensitat significativament més baixa. A la Figura 2.8 es representa la intensitat de la llum que arriba al fotodetector en funció de la posició axial de la mostra. Aquesta funció és la resposta axial que s'ha introduït en l'apartat anterior, i és la base de molts mètodes de metrologia

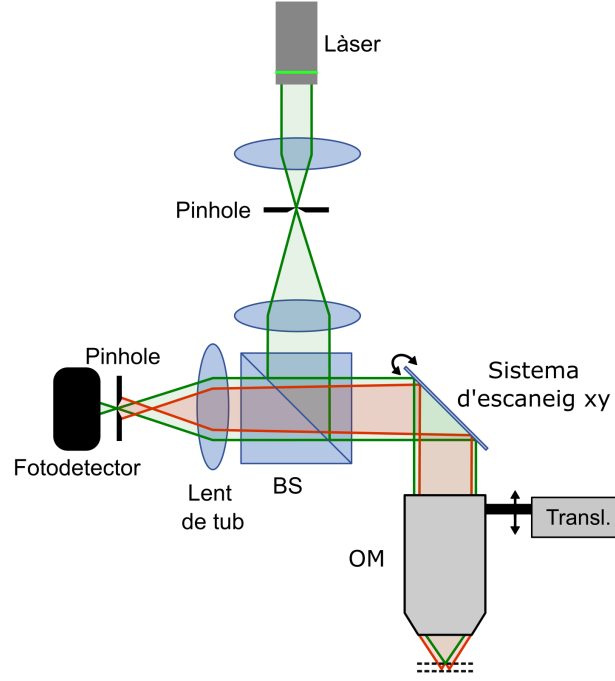


FIGURA 2.7: Esquema òptic d'un microscopi confocal amb un patró de *pinhole*. Inclou un objectiu de microscopi (OM), un *beam splitter* (BS), un mirall per l'escaneig en x i y , la lent de tub, fotodetector i làser. Els rajos verds corresponen a quan la mostra està al pla de focus, i la intensitat detectada és màxima. En els rajos vermells, en canvi, la posició de la mostra està fora del focus, llavors la imatge del *pinhole* està desenfocada i la intensitat detectada és menor, ja que el *pinhole* bloqueja la llum.

òptica tradicionals usats per al càlcul del mapa topogràfic de la mostra.

És important remarcar que, per aconseguir una imatge confocal de tota la mostra utilitzant el microscopi confocal clàssic, és necessari escombrar punt per punt tot el camp de visió. Justament per això, a la Figura 2.7 també hi ha incorporat un sistema d'escaneig que serveix per mesurar en les direccions x i y .

Una implementació alternativa del microscopi confocal es basa en utilitzar un modulador espacial de llum [15, 16] (*digital micromirror device*, DMD) enlloc de *pinholes*, com es mostra en la Figura 2.9. Aquesta tècnica es basa en projectar un patró sinusoidal de llum en la mostra. Quan la mostra es troba en la posició de focus, el patró apareix enfocat i la modulació és màxima. A mesura que la mostra es desenfoca, però, el patró perd visibilitat i la modulació es veu reduïda. Per tant, recuperar computacionalment la modulació del patró és sinònim de seccionar òpticament la mostra, que també permet reconstruir la topografia amb l'ajuda de l'escaneig axial.

L'algorisme de post processament per al càlcul de la imatge confocal és el següent. El patró d'il·luminació amb una transmitància sinusoidal es representa de la forma

$$T(x, y) = 1 - m(x, y) \left(\frac{1 + \cos(kx + \phi)}{2} \right), \quad (2.11)$$

on x i y són coordenades espacials, k és una freqüència espacial determinada amb

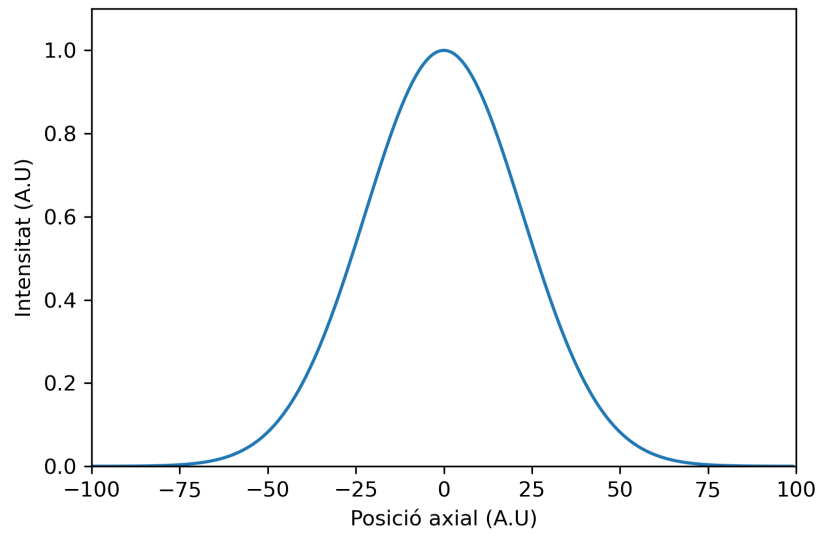


FIGURA 2.8: Intensitat al fotodetector en funció de la distància de la mostra al pla focal de l'objectiu de microscopi ($z = 0$). La posició axial de la mostra es determina calculant el màxim de la resposta axial.

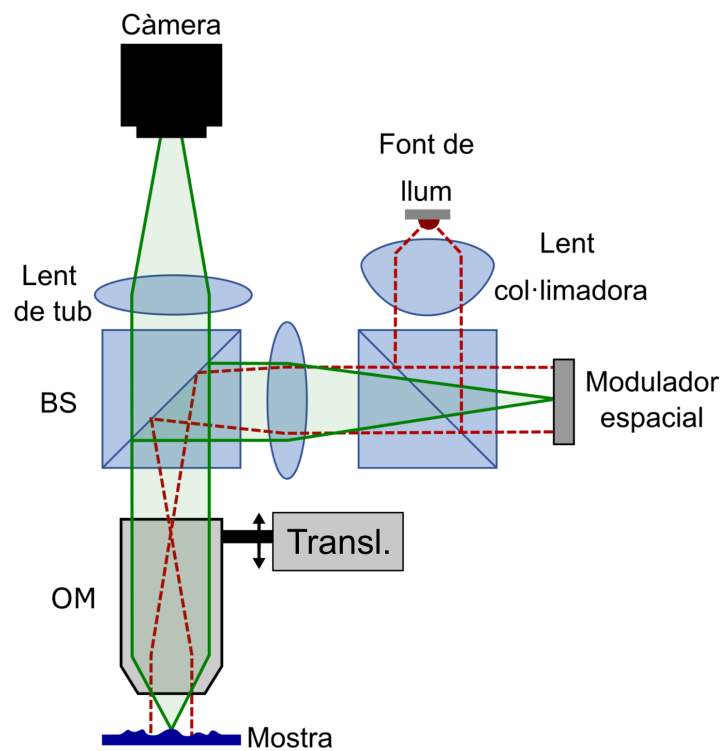


FIGURA 2.9: Esquema òptic d'un microscopi confocal amb un modulador espacial per la il·luminació. Inclou un objectiu de microscopi (OM), un *beam splitter* (BS), la lent de tub, càmera, font de llum, lent col·limadora i la màscara que es projecta al pla focal de l'objectiu de microscopi. Per a la màscara s'acostuma a utilitzar un *digital micromirror device* (DMD).

fase inicial ϕ , i $m \in (0, 1)$ és la profunditat de la modulació. Aquest patró es projecta a la mostra, i es fa imatge de tot el conjunt a la càmera. La imatge adquirida és

$$I(x, y) = I_{CC}(x, y) \cdot T(x, y), \quad (2.12)$$

on I_{CC} és la imatge de camp clar i $T(x, y)$ és el patró d'il·luminació. En funció de la posició axial de la mostra, el patró apareixerà més o menys enfocat en la imatge final. Aquesta profunditat de modulació detectada en la imatge final té, en general, un valor diferent per a cada píxel de la imatge, ja que només tindria el mateix valor si la mostra fos perfectament plana. Precisament, calculant la profunditat de la modulació $m(x, y)$ a cada píxel de la imatge és possible determinar si aquell píxel es troba o no en el pla focal. En altres paraules, $m(x, y)$ correspon a una imatge que presenta seccionament òptic, és a dir, una imatge com les adquirides amb un microscopi confocal clàssic.

Per tal de recuperar la profunditat de modulació $m(x, y)$ per a un pla focal determinat, es projecten tres patrons amb fases inicials de $-2\pi/3$, 0 i $2\pi/3$, tal i com es mostra a la Figura 2.10. En aquest cas, les imatges resultants són:

$$I_0 = I_{CC} \left(1 - m(x, y) \frac{1 + \cos\left(kx - \frac{2\pi}{3}\right)}{2} \right), \quad (2.13)$$

$$I_1 = I_{CC} \left(1 - m(x, y) \frac{1 + \cos(kx)}{2} \right), \quad (2.14)$$

$$I_2 = I_{CC} \left(1 - m(x, y) \frac{1 + \cos\left(kx + \frac{2\pi}{3}\right)}{2} \right). \quad (2.15)$$

Després, a través de simples operacions algebraïques, es pot recuperar $m(x, y)$. En particular, es resten i s'eleva al quadrat les tres parelles d'imatges:

$$(I_1 - I_0)^2 = I_{CC}^2(x, y) \frac{m(x, y)^2}{4} (\cos(kx) - \cos\left(kx - \frac{2\pi}{3}\right))^2, \quad (2.16)$$

$$(I_1 - I_2)^2 = I_{CC}^2(x, y) \frac{m(x, y)^2}{4} (\cos(kx) - \cos\left(kx + \frac{2\pi}{3}\right))^2, \quad (2.17)$$

$$(I_2 - I_1)^2 = I_{CC}^2(x, y) \frac{m(x, y)^2}{4} (\cos\left(kx + \frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(kx - \frac{2\pi}{3}\right))^2. \quad (2.18)$$

S'expandeix a través de la suma d'angles:

$$(I_1 - I_0)^2 = I_{CC}^2(x, y) \frac{m(x, y)^2}{4} \left(\frac{9}{4} \cos^2(kx) + \frac{3}{4} \sin^2(kx) - \frac{3\sqrt{3}}{2} \sin(kx) \cos(kx) \right), \quad (2.19)$$

$$(I_1 - I_2)^2 = I_{CC}^2(x, y) \frac{m(x, y)^2}{4} \left(\frac{9}{4} \cos^2(kx) + \frac{3}{4} \sin^2(kx) + \frac{3\sqrt{3}}{2} \sin(kx) \cos(kx) \right), \quad (2.20)$$

$$(I_2 - I_1)^2 = I_{CC}^2(x, y) \frac{m(x, y)^2}{4} (3 \sin^2(kx)). \quad (2.21)$$

Finalment, si es sumen les tres equacions anteriors s'arriba a:

$$(I_1 - I_0)^2 + (I_1 - I_2)^2 + (I_2 - I_1)^2 = I_{CC}^2(x, y) \frac{9m(x, y)^2}{8}. \quad (2.22)$$

Així, la modulació $m(x, y)$ s'obté de la següent fórmula (veure Figura 2.10):

$$I_{CC}(x, y) \cdot m(x, y) = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sqrt{(I_1 - I_0)^2 + (I_1 - I_2)^2 + (I_2 - I_0)^2}. \quad (2.23)$$

El producte $I_{CC}(x, y) \cdot m(x, y)$ és el que es coneix com a imatge de seccionament òptic. El terme $I_{CC}(x, y)$ correspon a la reflectivitat de la mostra, que és un factor d'atenuació en la modulació projectada. A la Figura 2.11 s'han representat els perfils corresponents a la projecció de les franges i la imatge de seccionament òptic de la Figura 2.10.

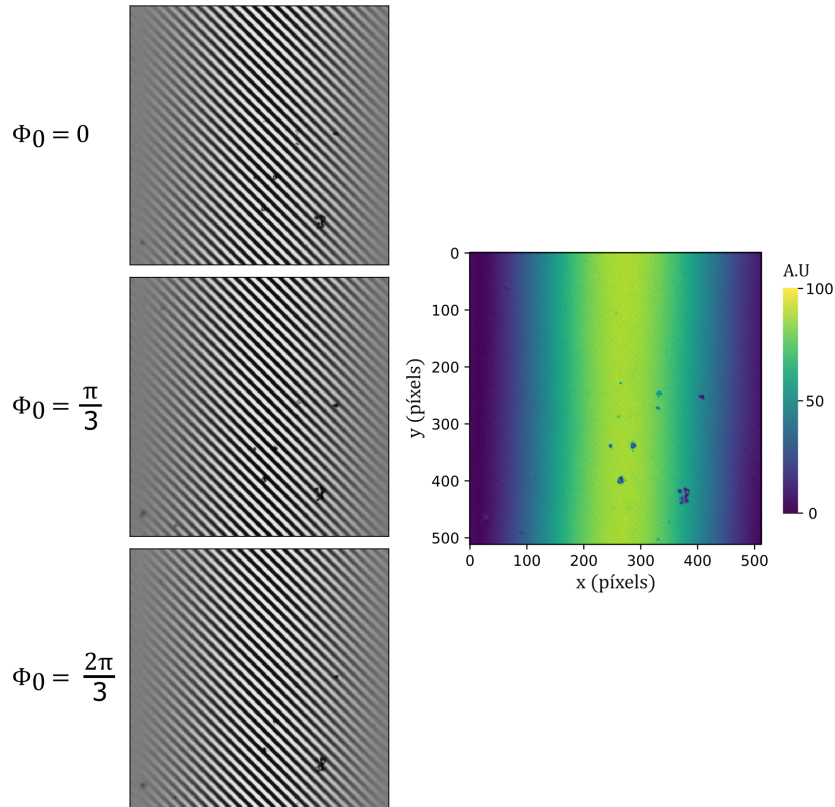


FIGURA 2.10: Esquerra) Imatges del patró que es projecta amb fases inicials de 0, $\pi/3$, i $2\pi/3$. Com que la mostra és un mirall lleugerament inclinat en la direcció x , hi ha una relació lineal entre l'eix x i z . Dreta) Imatge de seccionament òptic que s'obté a partir de les tres anteriors.

En molts casos, per simplificar la projecció del patró sinusoidal, s'opta per utilitzar un patró d'ona quadrada. Aquest tipus de patró resulta més senzill d'implementar, ja que aquesta funció només pren dos valors (0 i 1), una característica que la fa més senzilla de digitalitzar. En canvi, la modulació sinusoidal presenta valors continus, i és especialment difícil d'implementar quan la freqüència lateral és elevada i hi ha un número de micromiralls per període molt baix. Per exemple, a la Figura 2.10, només s'utilitzen tres micromiralls per cada franja projectada.

Llavors, l'ús de l'ona quadrada permet simplificar l'esquema de projecció i, a més, permet calcular la imatge confocal. L'ona quadrada es pot representar com a

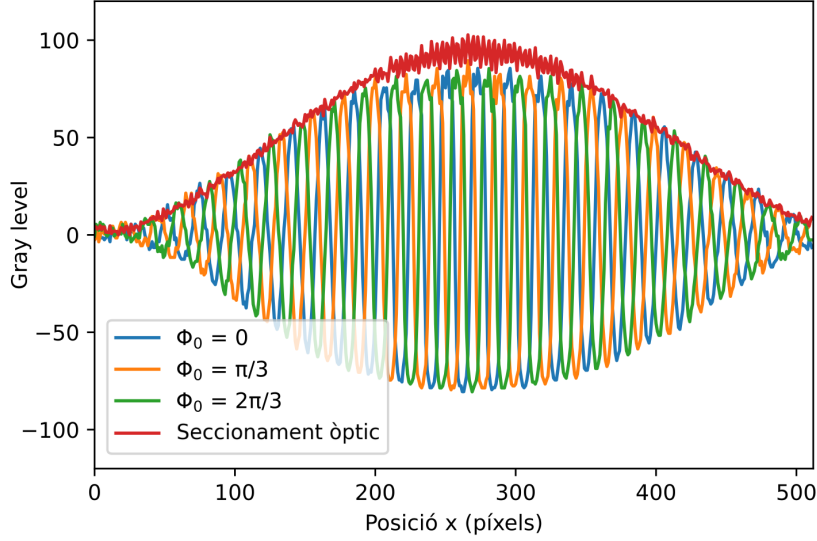


FIGURA 2.11: Tall horitzontal de les imatges de la Figura 2.10. En blau, groc i verd les imatges amb el patró projectat i en vermell el seccionament òptic calculat. El valor del seccionament òptic és directament proporcional a la modulació del patró en cada píxel.

una suma infinita de sinusoides mitjançant sèries de Fourier,

$$S(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{L/2}\right), \quad (2.24)$$

on $S(x)$ és l'ona quadrada i L representa el seu període. Es pot seguir el mateix esquema de càlcul presentat anteriorment, i la freqüència fonamental de l'ona quadrada contribuirà principalment a la formació de la imatge confocal. Tot i així, la presència d'harmònics pot generar efectes no desitjats. Aquests harmònics poden alterar la mesura de la superfície i, per aquest motiu, és imprescindible quantificar la seva presència i filtrar-los adequadament per evitar que afectin els resultats.

En últim lloc, com s'ha comentat anteriorment, per obtenir la topografia de la mostra és necessari dur a terme un escaneig axial i, en cada posició, calcular la imatge de seccionament òptic. D'aquesta manera, per cada píxel es pot recuperar la resposta axial, que correspon amb la modulació calculada en funció de la posició axial. La forma de la resposta axial depèn de l'obertura numèrica de l'objectiu de microscopi. En concret, l'amplada a mitja alçada (*full width at half maximum*, FWHM) de la resposta axial és inversament proporcional a l'obertura numèrica de l'objectiu al quadrat,

$$FWHM_{RA} \propto \frac{1}{NA^2}, \quad (2.25)$$

similar a l'equació de la resolució axial 2.10. A mesura que s'augmenta l'obertura numèrica, la resposta axial és més estreta. Així, el màxim de la resposta es pot obtenir amb més precisió.

Per últim, l'amplada de la resposta axial també depèn de la freqüència del patró projectat. Freqüències espacials baixes produeixen respostes axials més amples, i en general una resolució axial més baixa. La freqüència òptima és propera a la

frequència de tall de l'objectiu de microscopi, sempre que es pugui mantenir una profunditat de modulació el màxim alta possible.

2.1.4.2 Variació de focus i il·luminació activa

La variació de focus (*focus variation*) és una altra tècnica àmpliament utilitzada per a la caracterització òptica de superfícies. Aquesta tècnica permet la mesura de la topografia d'una superfície mitjançant l'ús d'un microscopi òptic tradicional de camp clar equipat amb un motor d'escaneig axial [17]. La diferència principal amb la microscòpia confocal rau en l'algorisme utilitzat per obtenir la imatge de seccionament òptic, ja que no s'empra cap patró per estructurar la llum; en canvi, la pròpia mostra actua com a patró. Aquesta tècnica es basa en el fet que, quan la mostra està en focus, la MTF és òptima, de manera que permet la transferència de les freqüències espacials més elevades de la mostra amb el màxim contrast. Al contrari, quan es troba fora de focus, la MTF actua com un filtre passa-baixos, atenuant les freqüències altes. Així, la detecció computacional de freqüències altes en les imatges capturades és una indicació directa de la proximitat de la mostra a la posició de focus.

Per a la detecció computacional s'acostumen a utilitzar operadors matemàtics que s'apliquen directament a la imatge de camp clar. L'operador es calcula a cada píxel de la imatge, i extreu informació d'una regió local al voltant de cada píxel. Existeixen diversos operadors que poden utilitzar-se en aquest pas [18], amb l'objectiu comú de mesurar les freqüències altes en la regió seleccionada.

En general, una mostra amb textura que es troba al pla de focus presenta variacions locals de llum elevades, mentre que, si està desenfocada, les zones clares i fosques es mesclen produint una intensitat mitjana més homogènia. Per tant, l'operador matemàtic ha de retornar un valor elevat quan existeixen variacions d'intensitat, i un valor baix quan la intensitat és uniforme. Un operador senzill és la desviació estàndard de la regió local seleccionada. Quan la mostra estigui desenfocada, els valors en la regió seran similars i la desviació serà baixa; en canvi, si la mostra està en el pla focal, la variació serà significativament més gran. La Figura 2.12 il·lustra aquest comportament.

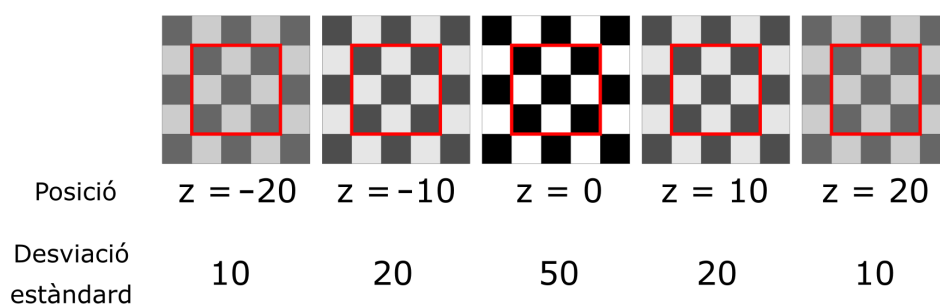


FIGURA 2.12: Exemple dels nivells de gris que s'obtenen a diferents posicions de focus amb la desviació estàndard corresponent. En aquest cas l'operador s'aplica a una regió de 3×3 píxels.

Aquest mètode és més ràpid que la microscòpia confocal, principalment perquè només cal adquirir una imatge de camp clar en cada pas de l'escaneig axial. També

és computacionalment eficient, ja que només necessita aplicar l'operador matemàtic a cada imatge adquirida. Tanmateix, l'amplada de la resposta axial és considerablement més gran que en la microscòpia confocal, i això comporta una menor precisió a l'hora de calcular l'altura de la mostra. A més, la tècnica presenta una limitació fonamental, ja que és incapaç de mesurar mostres sense textura, com ara un mirall polit. Aquestes mostres, en no tenir textura i ser poc rugoses, presenten una imatge de camp clar homogènia tant a la posició de focus com fora de focus. En aquests casos, l'operador matemàtic no genera una resposta axial amb un pic destacat, impedit així la determinació precisa de l'altura.

Per tal d'evitar aquesta limitació, nous microscopis incorporen la projecció d'un patró de llum estructurada per a texturitzar artificialment la mostra, tal com en la microscòpia confocal [19, 20]. D'aquesta manera, l'operador matemàtic sí que resulta en una resposta axial amb un pic ben definit, ja que es detecta el patró projectat. Per aquesta tècnica es pot utilitzar qualsevol patró que texturitzi la mostra, però per obtenir uns resultats òptims és preferible un que sigui el més homogeni i isòtrop possible. Per això, utilitzar un patró d'*slits* com en microscòpia confocal no és convenient, ja que la direcció perpendicular de les franges queda afavorida i en canvi la paral·lela es desafavoreix. És més recomanable utilitzar-ne un de tauler d'escacs (*checkerboard*), ja que la texturització és igual en les direccions x i y de la imatge i el seccionament òptic és millor.

La variació de focus és una tècnica senzilla i ràpida que permet l'adquisició de mapes topogràfics de superfícies rugoses i llises. No obstant això, els seus resultats són menys precisos i acurats que els obtinguts mitjançant microscòpia confocal, degut a la naturalesa del seccionament òptic, que depèn dels operadors matemàtics. Aquests operadors, tot i ser útils, presenten menys robustesa i ofereixen una resolució axial i lateral inferior a la de la microscòpia confocal.

2.1.4.3 HiLo

L'última tècnica de seccionament òptic que s'utilitza en metrologia òptica és una combinació de les dues anteriors, confocal i variació de focus. Aquest mètode no necessita tres imatges com el cas de confocal, ni tampoc una com en la variació de focus, sinó que es basa en dues imatges. La primera correspon a l'obtinguda quan s'il·lumina uniformement la mostra, és a dir, camp clar, i la segona quan s'empra una il·luminació estructurada per texturitzar la superfície [21]. El nom de la tècnica prové de la informació que s'extreu de cada imatge: de la primera, les freqüències espacials altes (**H**igh) i, de la segona, les freqüències baixes (**L**ow). Com la microscòpia confocal, el motiu final de la tècnica és el de recuperar la modulació de la il·luminació estructurada i obtenir la imatge de seccionament òptic.

L'algorisme per al càlcul de la imatge HiLo és el següent. La imatge de camp clar adquirida es defineix com $I_u(x, y)$ (uniforme), i la imatge estructurada $I_e(x, y)$ s'obté a partir de l'anterior:

$$I_e(x, y) = I_u(x, y) \cdot T(x, y), \quad (2.26)$$

on $T(x, y)$ és el patró d'il·luminació, que en general pren una funció tal que

$$T(x, y) = 1 - m(x, y)f(x, y), \quad (2.27)$$

on $f(x, y)$ és la il·luminació estructurada i $m(x, y)$ és la modulació del patró a cada punt de la imatge. Típicament, s'utilitzen dos tipus d'il·luminació estructurada. En certs casos s'utilitza un patró d'*slits* (també conegut com a patró Ronchi). En aquest cas:

$$f(x, y) = \frac{1 + \cos(kx)}{2}. \quad (2.28)$$

Per tal de tenir una imatge de seccionament més isòtropa, és més adient utilitzar un patró d'escacs igual que en el cas de variació de focus presentat abans. S'obté:

$$f(x, y) = \frac{1 + \cos(kx) \cdot \cos(ky)}{2} \quad (2.29)$$

En qualsevol cas, si es resten les imatges uniforme i estructurada, la imatge resultant s'escriu com:

$$I_{u-e} = I_u \cdot m(x, y) f(x, y). \quad (2.30)$$

A mesura que la mostra es desenfoca, el contrast del patró projectat és menys visible, per tant $m(x, y)$ disminueix. En altres paraules, si la mostra es troba desenfocada, encara que s'hi projecti un patró estructurat, les dues imatges adquirides resultaran idèntiques, i la seva resta serà nul·la. Inversament, quan la mostra es focalitza, $m(x, y)$ augmenta, permetent que el patró projectat sigui visible en les regions enfocades. Així, la imatge I_{u-e} ja es considera de seccionament òptic, ja que s'ha eliminat la llum fora de focus; tanmateix, continua incloent el patró projectat ($f(x, y)$), que cal suprimir per recuperar la modulació $m(x, y)$.

Aquest és un problema conegut en els camps de processament de senyals i telecomunicacions, que es pot formular de la següent manera. En general, es rep un senyal modulat ($f(x, y)$), i es busca calcular l'envolupant ($m(x, y)$) per tal de recuperar la informació transmesa. Per a això, s'aplica la transformada de Hilbert, que proporciona el senyal analític, a partir del qual es pot calcular l'envolupant. En dues dimensions, la transformada és més complexa i es coneix com la transformada espiral de quadratura de fase (*spiral phase quadrature transform*, SPQT). Donada la complexitat d'aquesta transformada, s'han proposat altres mètodes per recuperar la imatge de seccionament òptic, com l'aplicació d'un operador de variació de focus a la imatge I_{u-e} [22]. Aquest darrer mètode és el que s'utilitza en aquesta tesi.

El pas final consisteix en la combinació de les imatges de camp clar (Hi) i de seccionament òptic (Lo). Això requereix filtrar cada imatge a l'espai de Fourier amb filtres gaussians complementaris abans de combinar-les. La Figura 2.13 presenta un esquema de la reconstrucció de la tècnica HiLo.

L'avantatge principal de la tècnica HiLo és que només requereix dues imatges, una menys que en la microscòpia confocal, mentre que els resultats són semblants. A més, comporta altres avantatges relacionats amb el menor cost i complexitat del sistema òptic. En microscòpia confocal, com que es necessiten tres patrons estructurats diferents, es requereix un DMD, un aparell costós. En canvi, la tècnica HiLo només necessita una imatge estructurada, que es pot implementar fàcilment amb un patró de vidre. La imatge de camp clar es pot obtenir a través d'un altre canal de llum multiplexat amb un *beam splitter*.

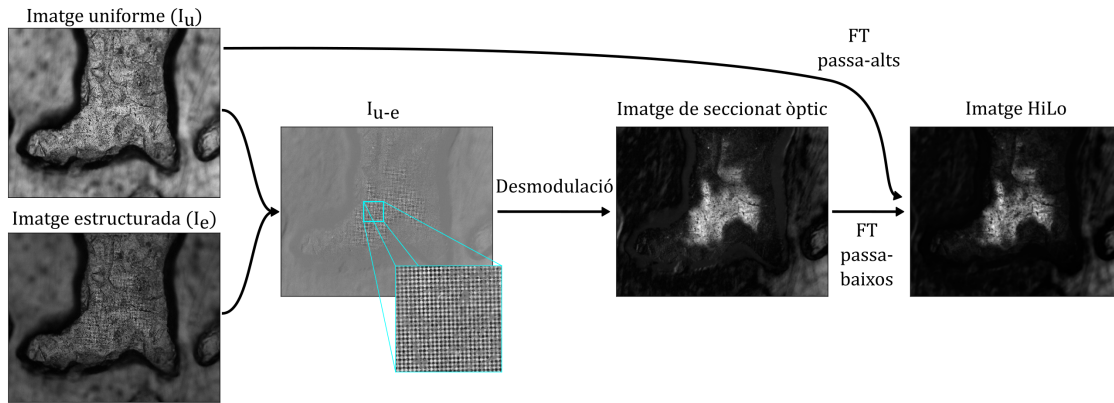


FIGURA 2.13: Esquema del procés de reconstrucció de la imatge de seccionament òptic amb la tècnica HiLo.

2.1.4.4 Tècniques interferomètriques

Fins al moment, totes les tècniques que s'han descrit utilitzen la naturalesa de filtre de passa baixos de la PSF per a la reconstrucció de mapes topogràfics. Aquesta dependència implica que la resolució axial depèn de l'obertura numèrica del sistema. Alternativament, és possible utilitzar tècniques interferomètriques que aprofiten les propietats ondulatòries de la llum, les quals romanen invariables independentment de l'obertura numèrica del sistema. Així, en interferometria, la resolució axial és constant per a objectius diferents, ja que depèn únicament de la longitud d'ona utilitzada. Aquesta característica permet mesurar caps de visió grans amb objectius de baix augment amb alta resolució, un fet impossible d'aconseguir amb les tècniques anteriors.

Més concretament, aquests microscopis divideixen la llum amb un *beam splitter* per a què aquesta segueixi dues trajectòries diferents: una destinada a un mirall de referència i l'altra cap a la mostra. Posteriorment, els dos feixos es combinen de nou formant un patró d'interferència, que és capturat per una càmera que mesura la intensitat resultant. La Figura 2.14 ofereix un esquema del sistema òptic d'aquests microscopis.

Els microscopis interferomètrics utilitzen objectius de microscopi específicament dissenyats per a aquestes tècniques. Per separar el feix de llum, inclouen un *beam splitter* i un mirall de referència en el seu interior. Segons el disseny opto-mecànic, aquests objectius es classifiquen en tres tipus: Michelson, Mirau i Linnik. En el disseny Michelson, hi ha un prisma *beam splitter* entre les lents de l'objectiu i la mostra. El segon tipus de disseny, el Mirau, és semblant al Michelson, però el prisma *beam splitter* es substitueix per una làmina *beam splitter* paral·lela entre les lents de l'objectiu i la mostra. La referència és un petit mirall intern que ocasiona una ofuscació a una part de l'obertura de l'objectiu. Finalment, en el disseny Linnik, el *beam splitter* és el primer component òptic i les lents de l'objectiu estan incloses en ambdós camins. La Figura 2.15 mostra un esquema dels tres tipus de dissenys.

El disseny Mirau és el més utilitzat, especialment amb objectius que tenen augments superiors a $20\times$. En aquests casos, la distància de treball es redueix a mesura que l'augment incrementa, i conseqüentment, l'espai disponible per incorporar un prisma *beam splitter* no és suficient, la qual cosa fa que la geometria Michelson sigui

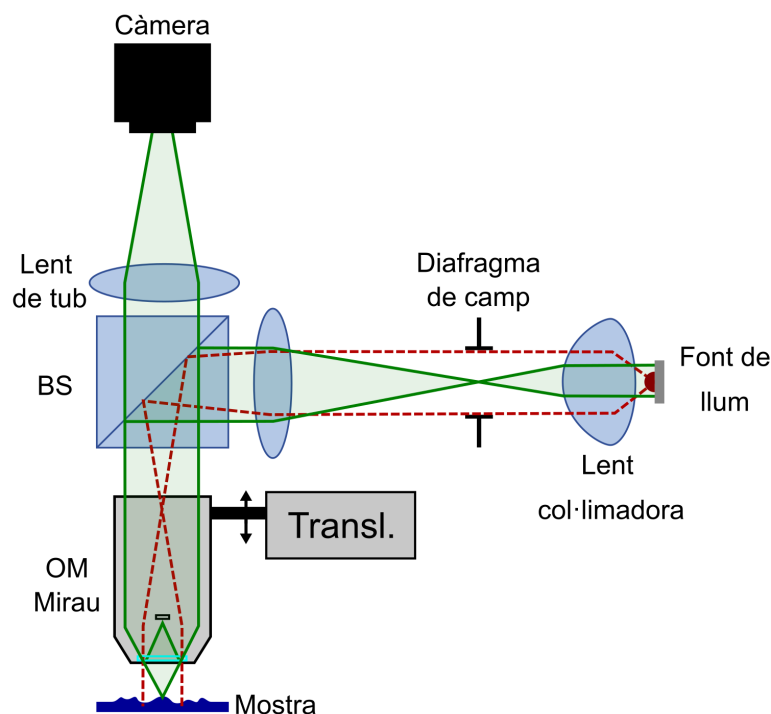


FIGURA 2.14: Esquema d'un microscopi interferomètric. Inclou un objectiu de microscopi interferomètric (OM), un *beam splitter* (BS), la lent de tub, càmera, font de llum (LED), lent col·limadora i diafragma de camp.

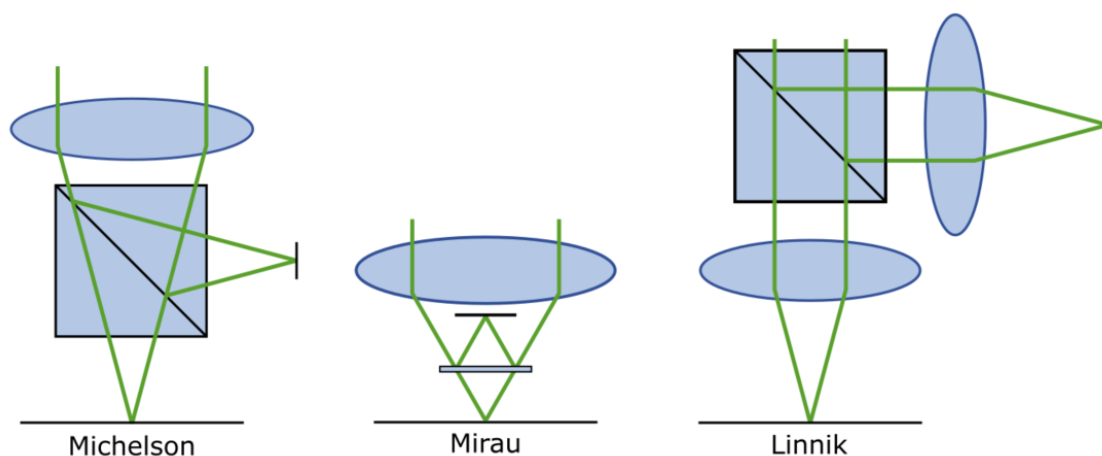


FIGURA 2.15: Disseny òptics per a objectius interferomètrics: Michelson, Mirau i Linnik.

impracticable. Alternativament, amb augments inferiors a $10\times$, la geometria Mirau presenta problemes a causa de la ofuscació central provocada pel mirall de referència, que esdevé massa gran i bloqueja massa llum. En aquests escenaris, la geometria Michelson és preferible, tot i que els objectius podrien arribar a tenir dimensions considerables. En últim lloc, el disseny Linnik és molt particular, ja que els avantatges que presenta no són suficients per contrarestar la seva complexitat i cost. A més, ambdues òptiques han de compartir característiques similars d'aberracions i dispersió, limitant així el seu ús a aplicacions especials [23].

Llavors, les dues tècniques interferomètriques més reconegudes són la *phase shifting interferometry* (PSI) i la *coherence scanning interferometry* (CSI). En ambdós casos, s'empra un sistema òptic similar al de la Figura 2.14, diferenciant-se únicament en l'espectre de la font de llum. En el primer cas, es fa servir una font de llum monocromàtica, mentre que en el segon s'utilitza un espectre el més ampli possible, tal i com es detalla a continuació.

2.1.4.5 Phase shifting interferometry

En la *phase shifting interferometry* (PSI), el microscopi ha de ser equipat amb una font de llum d'alta coherència temporal, com per exemple un làser o un díode làser, per a tenir un espectre pràcticament monocromàtic [24]. També es poden utilitzar LEDs monocromàtics, i encara que tinguin una amplada de banda major a la dels làsers, és suficientment petita per obtenir resultats satisfactoris. Per desenvolupar la teoria, en general s'assumeix que la font de llum és monocromàtica, i la senyal d'interferència observada a la càmera es descriu com a [25]:

$$I = I_c + I_v \cos(\phi) = I_c + I_v \cos\left(2\pi \frac{z}{\lambda/2} + \delta\right), \quad (2.31)$$

on I_c i I_v són constants, ϕ és la fase, δ és un *offset* de fase i λ és la longitud d'ona que s'utilitza. És important remarcar que, degut a la implementació en reflexió, el període d'oscil·lació de la interferència és $\lambda/2$. El factor 2 prové del fet que, per un cert desplaçament z , la llum ha d'anar i tornar i per tant hi ha una diferència de camí òptic de $2z$.

Per obtenir un mapa topogràfic de la mostra es necessita un algorisme amb la capacitat de recuperar el valor de la fase ϕ . De fet, coneguda la fase, el valor de z corresponent a la topografia de la mostra es pot extreure directament de 2.31. Per a tal efecte, primer s'assumeix que l'*offset* és constant i, per tant, es pot igualar a zero. En segon lloc, s'adquireixen imatges afegint un *offsets* de fase controlat:

$$\delta' = n \cdot \varphi, \quad (2.32)$$

on n és un enter i φ el *phase shift* entre cada imatge adquirida. Aquest canvi de fase s'aconsegueix variant la distància entre la mostra i l'objectiu de microscopi. En els mètodes més comuns de PSI, el valor del *phase shift* és de $\pi/2$ o de $2\pi/3$; i el número d'adquisicions pot variar de 3 fins a 20. Incrementar el número d'adquisicions proporciona algorismes més robustos i menys susceptibles a errors en el posicionament de la fase, soroll com vibracions, i no-linealitats de la càmera o motor axial.

Els algorismes de PSI retornen el valor de ϕ , que comprèn un rang de $[0, 2\pi]$ i és igual a un període de la freqüència de la interferència $\lambda/2$. Aquest tipus d'algorisme, però, té una ambigüïtat fonamental perquè és incapaç de diferenciar posicions axials amb la mateixa fase. Això implica que si la mostra té un rang axial superior a $\lambda/2$ el resultat es veurà *wrapped*, és a dir:

$$z_c = z \bmod \frac{\lambda}{2}, \quad (2.33)$$

on z_c és l'alçada obtinguda amb l'algorisme presentat, z l'alçada real i $\lambda/2$ el període de la interferència.

Per a l'obtenció del mapa topogràfic de la mostra a partir del mapa de fase, existeix el procediment designat *unwrapping*. L'objectiu d'aquest procediment és senzill, afegir un nombre enter de períodes en cada canvi de fase de 2π . Hi ha una àmplia gamma d'algorismes disponibles per a l'execució de l'*unwrapping* [26, 27]; tanmateix, cap d'aquests és completament robust. Durant l'*unwrapping*, l'error més freqüent és la determinació incorrecta de l'ordre d'una franja, conegut com a error 2π . Aquests errors són fàcilment identificables, manifestant-se com a *spikes* o esglaons falsos a la topografia. A més, l'*unwrapping* no és inequívoc, especialment quan s'analitzen mostres esglaonades, on l'ordre de les franges no pot ser determinat a causa de la discontinuïtat de la mostra.

Tot i les dificultats associades a l'*unwrapping*, la PSI és una tècnica madura àmpliament utilitzada en el camp de la metrologia de superfícies llises, particularment per a la mesura de lents i altres components òptics. A més, només requereix un nombre molt reduït d'imatges per obtenir un mapa topogràfic, i, per tant, resulta considerablement més ràpida que les tècniques esmentades anteriorment. En canvi, no és una tècnica adequada per a la mesura de superfícies rugoses, ja que el mapa de fase presentarà una densitat de franges alta, i l'*unwrapping* esdevé complicat i propens a errors.

2.1.4.6 Coherence scanning interferometry

La *coherence scanning interferometry* (CSI) és una de les tècniques més utilitzades en el camp de la interferometria. Com el seu nom indica, es basa en l'escaneig axial de la mostra utilitzant un objectiu interferomètric. En contrast amb la tècnica anterior PSI, en CSI no es detecta el canvi de fase dels interferogrames, sinó que s'analitza la potència de la interferència emprant llum de baixa coherència temporal. Per tal d'obtenir aquest tipus de llum, es requereix una font amb un espectre el més ampli possible, utilitzant-se per això un LED de llum blanca [28]. En aquest context, el senyal resultant correspon a la suma de les interferències de cada longitud d'ona present en la font de llum. L'únic punt on totes les longituds d'ona es troben en fase i interfereixen de manera constructiva es dona quan la mostra es troba en la mateixa posició que el mirall de referència. Al contrari, a mesura que es desplaça d'aquesta posició, les interferències de cada longitud d'ona es compensen entre si, reduint-se així la potència de la interferència.

Per al càlcul de l'alçada de la mostra, es determina la posició on l'amplitud de la interferència és màxima. Per aquest motiu, resulta necessari calcular l'envolupant de l'interferograma, amb la finalitat d'identificar la posició on l'amplitud de la interferència arriba a ser màxima. A diferència de la tècnica HiLo, on s'ha de calcular l'envolupant d'una imatge, el problema en aquest cas és unidimensional, permetent així seguir la solució convencional prèviament proposada mitjançant la transformada de Hilbert. A més, existeix un altre algorisme no lineal [29] que permet trobar l'envolupant de manera més ràpida sense necessitar recórrer a transformades, les quals acostumen a ser computacionalment costoses. La Figura 2.16 il·lustra un exemple de l'interferograma obtingut amb la tècnica CSI i l'envolupant resultant.

L'avantatge principal de la CSI sobre la PSI resideix en la capacitat per mesurar superfícies sense necessitat d'emprar un *unwrapping* degut a la naturalesa pròpia de la tècnica. Això permet la mesura de superfícies rugoses; així, encara que les franges

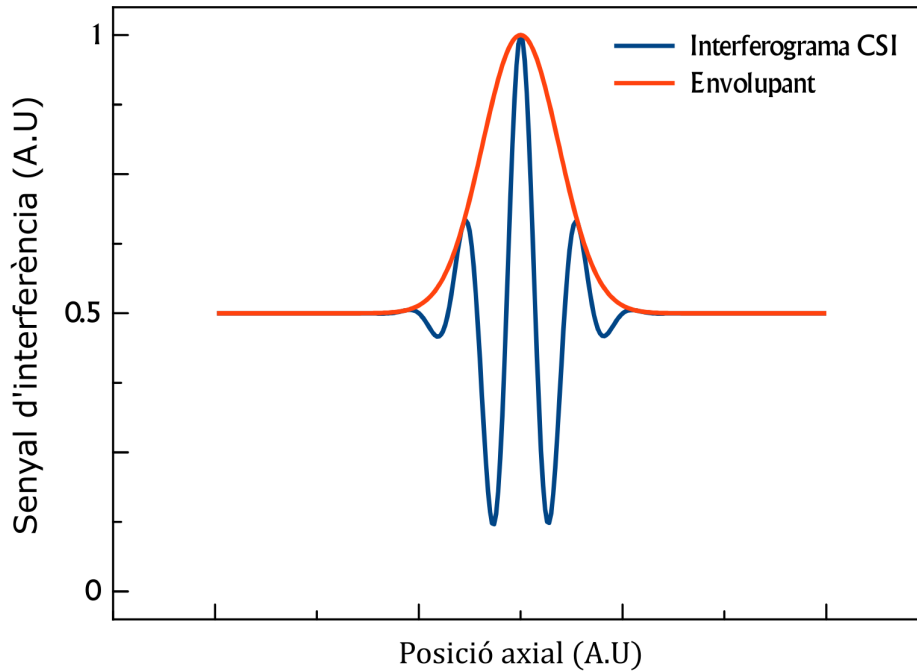


FIGURA 2.16: Senyal d'interferència que s'obté amb la tècnica CSI (blau) i el seu envolupant (taronja).

d'interferència resultin poc definides i hi hagi presència de soroll, el postprocessament del senyal obtingut es pot optimitzar per a aconseguir bons resultats. Amb aquesta tècnica també es pot incrementar el rang de mesura de manera arbitrària, sense les limitacions presents en la PSI, fet que permet la mesura de peces amb alçades de pic a vall considerablement més altes. En canvi, per a superfícies més llises i planes, la PSI és la tècnica preferida, ja que permet obtenir topografies amb més rapidesa.

2.1.4.7 Projectió de franges

La projecció de franges constitueix una tècnica d'anàlisi de la forma, diferenciant-se així de les altres tècniques de metrologia òptica presentades fins ara [30], que s'utilitzen per l'anàlisi de textura. En les tècniques anteriors es requereix l'ús d'objectius de microscopi amb augments alts per examinar la rugositat de la mostra. En canvi, la tècnica de projecció de franges fa ús de lents telecèntriques amb augments baixos, que permeten aconseguir camps de visió que poden assolir desenes de mil·límetres. Una altra distinció fonamental es manifesta en l'escaneig axial. En la projecció de franges, l'obertura numèrica de l'òptica és baixa, conferint una profunditat de camp considerablement superior en comparació amb els objectius de microscopi. Així, tota la mostra queda continguda dins la profunditat de camp, fent innecessari l'escaneig axial.

Com el seu nom indica, aquesta tècnica es basa en la projecció de màscares binàries (franges) sobre la superfície de la mostra. En la Figura 2.17 es mostra una seqüència de d'aquests patrons de franges. Per aquesta tècnica també és comú l'ús d'un dispositiu DMD, com en la tècnica de microscòpia confocal. Les franges, en funció de la topografia de la mostra, exhibeixen diferents distorsions, les quals s'analitzen a partir de la seva triangulació per a calcular la forma de l'objecte. La

Figura 2.18 il·lustra les franges projectades sobre dues mostres diferents, un esglaó (a) i una mostra complexa (b).

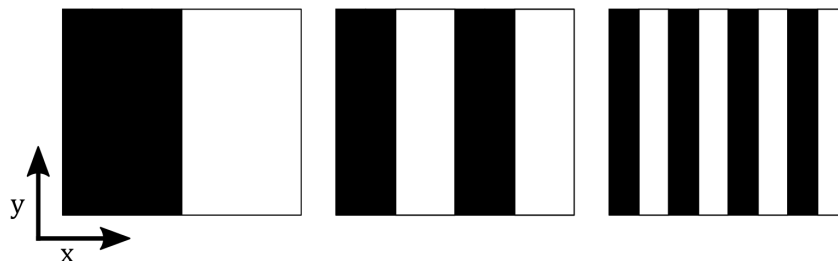


FIGURA 2.17: Seqüència de patrons binaris per la codificació de l'alçada.

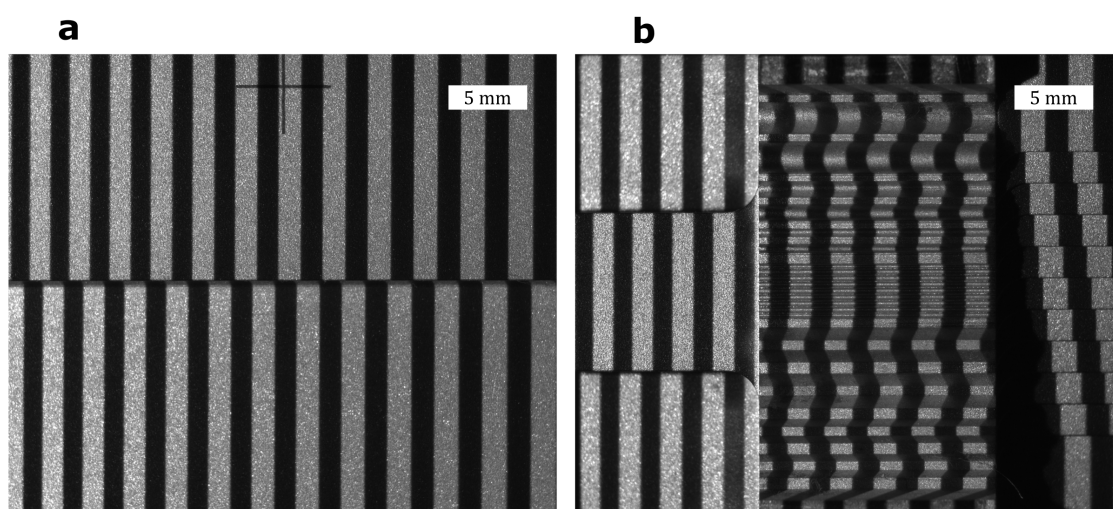


FIGURA 2.18: Distorsió de les franges projectades en la superfície de: a) un esglaó, i b) una mostra complexa. La distorsió de les franges i la seva triangulació permet calcular la forma de l'objecte.

Aquesta implementació de franges binàries permet dividir el rang axial en 2^N nivells amb només N imatges. No obstant això, també seria possible implementar aquesta tècnica de manera similar a les tècniques presentades anteriorment, on només s'obté informació d'un pla axial per imatge. Per aconseguir-ho, seria suficient projectar una única franja per imatge. En aquest cas, però, el nombre d'imatges necessàries augmenta linealment amb el rang axial, fet que comporta un temps d'adquisició molt més elevat. Per exemple, si amb l'esquema binari s'adquireixen vuit imatges per generar un mapa topogràfic amb 256 nivells, amb l'esquema de projecció d'una única franja seria necessari adquirir 256 imatges, una per cada nivell.

Aquest esquema de projecció és molt menys eficient que el binari, motiu pel qual no s'utilitza. No obstant això, la qüestió interessant que es planteja és si seria possible traslladar aquest esquema binari a les tècniques tradicionals de metrologia òptica. Això permetria reduir significativament el nombre d'imatges necessàries per obtenir un mapa topogràfic, facilitant així una caracterització més ràpida i eficient. En el capítol 4 es presenta una tècnica que demostra com és possible implementar aquest esquema, adaptant-lo per als sistemes de microscòpia. D'aquesta manera,

s'aconsegueix una reducció considerable del nombre d'imatges necessàries, permetent una caracterització ultraràpida.

2.1.5 Tècniques per al control del focus

La capacitat d'aconseguir la topografia de la mostra en un temps curt, idealment en temps real, és clau en diversos processos industrials, com ara la inspecció de peces en cadenes de producció. Desafortunadament, existeixen factors que limiten la velocitat d'adquisició topogràfica dels perfilòmetres òptics descrits en l'apartat anterior. Totes les tècniques presentades es basen en realitzar un escaneig axial de la mostra i, a cada posició, adquirir una imatge. Així, el factor principal que limita la velocitat d'aquests instruments és la quantitat d'imatges que s'han d'adquirir. Aquest aspecte es tracta en el capítol de resultats 4, on s'introdueix una nova tècnica que permet una reducció dràstica de la quantitat d'imatges necessàries per a la reconstrucció del mapa topogràfic.

El segon factor limitant de la velocitat és l'escaneig axial, que típicament es realitza de forma mecànica. En sistemes comercials, la distància entre la mostra i el sistema òptic es controla amb motors mecànics o actuadors piezoelèctrics. En aquests instruments, com que tot el sistema òptic s'integra en un capçal, és relativament fàcil moure'l i mantenir la mostra en una posició fixa. L'estratègia contrària, és a dir, moure la mostra i deixar estàtic el capçal, no sol utilitzar-se, ja que amb mostres voluminoses o complexes seria difícil o gairebé impossible desplaçar la mostra amb precisió i de forma adequada. Així, la qüestió principal en el disseny de qualsevol instrument òptic per a l'obtenció ultraràpida de mapes topogràfics és la controlar ràpidament la posició focal axial.

Malgrat la fiabilitat i facilitat d'integració dels mètodes mecànics tradicionals, aquests es troben limitats per la inèrcia de tot el pes del capçal i no ofereixen velocitats elevades de moviment. Per tant, per l'adquisició ràpida de la informació 3D d'una mostra, és necessari utilitzar altres mètodes que no depenguin d'elements mecànics. Cal remarcar que el control ràpid de la llum en les direccions x i y és senzill d'implementar amb miralls, com amb un galvanòmetre [31]. En canvi, en la direcció z , ha estat un problema més complex aconseguir el mateix tipus de control. En l'actualitat, existeixen dos mètodes per controlar el focus en z , ja sigui a través de lents varifocals [32], lents que tenen una potència òptica variable; o amb l'enfocament remot [33, 34].

2.1.5.1 Lents varifocals

Les lents varifocals permeten l'ajust de la posició de focus axial, però és imprescindible dissenyar un arranjament òptic adequat per evitar variacions en l'augment. En general, la modificació de la potència òptica d'una lent implica un canvi en l'augment del sistema. No obstant això, existeix un arranjament específic on l'augment roman constant, alhora que es permet el re-enfocament en diferents plans axials de la mostra. Per això és imprescindible un sistema 4f per replicar la pupil·la de l'objectiu i col·locar la lent varifocal en la mateixa posició. La Figura 2.19 il·lustra un exemple d'aquest tipus de sistema òptic. En aquesta esquema, el pla de la pupil·la es troba entre la segona lent (L2) i la lent de tub (LT), i és l'ubicació òptima per la lent varifocal.

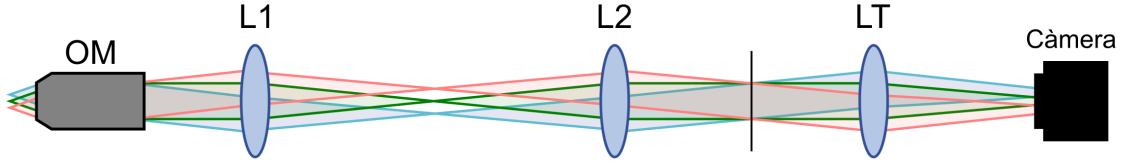


FIGURA 2.19: Sistema òptic 4f. En l'esquema s'hi troben les dues lents del sistema 4f (L1 i L2) i la lent de tub. Entre la L2 i la LT hi ha el pla de la pupila de l'objectiu. Utilitzar la lent varifocal en aquest pla permet re-enfocar a diferents posicions axials de la mostra sense canvi en l'augment.

Per obtenir una lent varifocal, és necessari alterar la potència òptica, la qual per a una lent es determina mitjançant la fórmula

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - 1)d}{nR_1R_2} \right), \quad (2.34)$$

on n representa l'índex de refracció de la lent, R els radis de curvatura, i d el gruix de la lent. Per aconseguir una lent varifocal, cal ser capaç de variar l'índex de refracció, la curvatura de la superfície, o el gruix, qualsevol de les variables de les quals depèn la distància focal. Modificar el gruix de la lent resulta subòptim a causa de la seva complexitat i el seu impacte mínim en la potència de la lent. A la fórmula, aquest es veu multiplicat pel factor $(n - 1)/nR_1R_2$, el qual és considerablement inferior a 1, que indica que la poca influència del gruix en la distància focal. Per aquesta raó, en lents primes, es considera una bona aproximació eliminar aquest factor. Per tant, només queden dues vies per modificar la potència òptica: alterant la curvatura de la lent o l'índex de refracció [32, 35].

L'estratègia més àmpliament utilitzada és la variació de la curvatura de la lent. Per a tal efecte, s'utilitzen líquids encapsulats amb la interfície immiscible d'un altre líquid o amb una membrana flexible. La curvatura de la interfície varia en funció de múltiples variables, permetent així la modificació de la potència òptica. Existeixen dos tipus principals de lents varifocals basades en aquest canvi: les que contenen un volum constant de líquid i aquelles en què aquest canvia. En el primer tipus, es controla elèctricament la forma de la lent, per exemple, a través de l'efecte d'*electrowetting* [36], o en altres casos, amb actuadors piezoelèctrics [37] o electromagnètics [38]. En el segon cas, el volum del líquid encapsulat es modifica. Si aquest augmenta, la pressió interna a la càpsula també s'incrementa, corbant la membrana cap enfora. Contràriament, si el volum disminueix, la pressió es redueix i la membrana es corba cap endins, alterant així la potència òptica [39].

Una segona possibilitat involucra la modulació de l'índex de refracció de la lent, per a la qual actualment només es contemplen dues estratègies. La primera es basa en lents de cristall líquid (*liquid crystal*, LC) que presenten índexs de refracció variables a causa de la seva anisotropia òptica i dielèctrica, atribuïble al canvi d'orientació dels cristalls en resposta a l'aplicació d'un camp elèctric [40]. Les variacions en la longitud focal es poden assolir mitjançant l'ús d'un LC amb una superfície corba o, alternativament, aplicant un camp elèctric no uniforme. Aquestes lents, però, són sensibles a la polarització de la llum. La segona estratègia per modificar l'índex de refracció és a través dels ultrasons. En particular, usar lents fluides modulades mitjançant ones acústiques (*tunable acoustic gradient*, TAG), també conegudes com

a lents d'ultrasons [41]. Aquestes lents utilitzen ones acústiques estacionàries aplicades per un material piezoelèctric, que excita radialment una cavitat cilíndrica plena de fluid refractiu, generant així una variació en l'índex de refracció. Per tal d'assolir una ona estacionària dins del fluid, és imprescindible modular la lent amb una ona acústica sinusoidal a la freqüència de ressonància de la lent, que permet un escaneig complet del rang axial en l'ordre de microsegons.

L'avantatge principal de les lents varifocals resideix en la capacitat d'obtenir informació volumètrica sense necessitat de moviments mecànics. L'absència de peces mòbils per a la translació del focus permet una adquisició més ràpida de les imatges necessàries per a la reconstrucció topogràfica de la mostra. En el cas de lents varifocals ultraràpides, com és el cas de la lent TAG, l'escaneig deixa de ser un factor limitant en la velocitat d'adquisició. Llavors, en l'instrument de mesura, la velocitat passa a estar limitada per altres factors, com el temps d'exposició de la càmera o el *signal to noise ratio* (SNR).

2.1.5.2 Enfocament remot

Una alternativa als sistemes per al control ràpid del focus amb lents varifocals és l'enfocament remot [42, 43]. Per comprendre el funcionament d'aquesta tècnica, primer és fonamental comprendre el funcionament d'un sistema d'imatge. La Figura 2.20 il·lustra un sistema òptic, incloent-hi els angles d'objecte i d'imatge γ_o i γ_i . Generalment, tots els sistemes òptics per a microscòpia compleixen el criteri formulat per Ernst Abbe, anomenat *sine condition*, que garanteix la captura perfecta de tota una imatge en un pla perpendicular a l'eix òptic. La condició d'Abbe requereix una transformació dels raigs procedents del pla objecte al pla imatge per a cada punt perpendicular a l'eix òptic, de manera que

$$|M| = \frac{\sin(\gamma_o)}{\sin(\gamma_i)}, \quad (2.35)$$

on M representa l'augment del sistema i γ l'angle dels raigs en els plans objecte i imatge. Aquesta condició determina que només hi ha un pla axial en què es pot formar imatge en condicions òptimes. Fora d'aquest pla, apareixen aberracions òptiques, i per tant no és ideal capturar imatges fora d'aquest pla òptim del sistema. Per tal d'enfocar altres plans i mantenir la qualitat òptica, no és possible ajustar el pla d'imatge, és a dir, la posició de la càmera. Per això, cal modificar la distància entre l'objecte i el sistema òptic, tal com ho fan habitualment els instruments òptics comercials. Aquest procés és intrínsecament lent, ja que el capçal que conté tot el sistema òptic sol pesar, i el moviment ha de ser altament precís per evitar errors en la mesura. La Figura 2.21 il·lustra l'esquema d'un microscopi òptic tradicional amb un augment determinat per l'objectiu de microscopi i la distància focal de la lent de tub.

En el cas específic d'un sistema òptic amb un augment unitari, llavors $\gamma_o = \gamma_i$. En aquestes condicions, no només es compleix la condició d'Abbe, sinó que el sistema òptic actua com un sistema d'imatge perfecte, i això implica que tot el volum està sota condicions òptimes de qualitat d'imatge.

En la tècnica de l'enfocament remot es combina un sistema d'imatge perfecte amb augment unitari amb un que només compleix la condició d'Abbe. Primer, es té

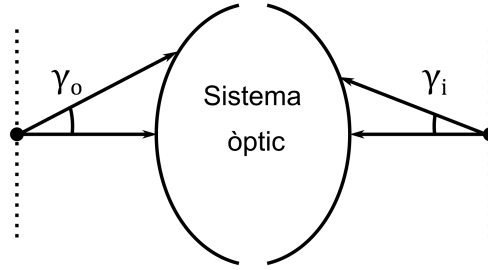


FIGURA 2.20: Esquema d'un sistema òptic d'imatge. Per un sistema perfecte, $\gamma_o = \gamma_i$. Per complir la condició d'Abbe, tots els punts del pla perpendicular a l'eix òptic han de seguir $|M| = \sin(\gamma_o)/\sin(\gamma_i)$.

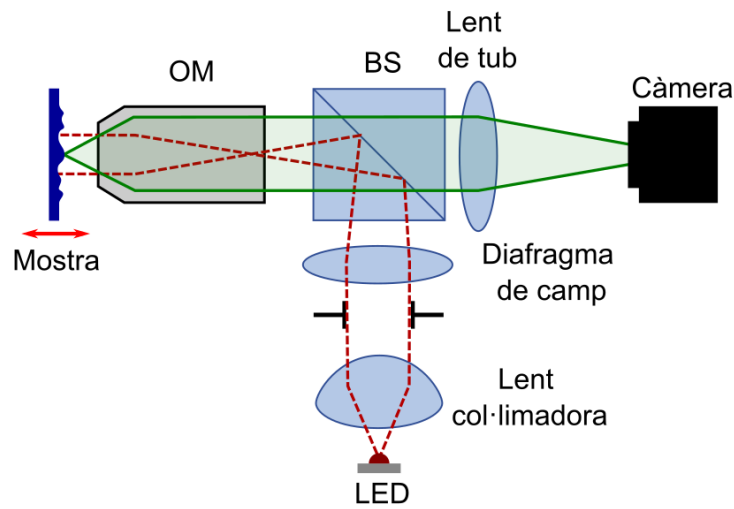


FIGURA 2.21: Sistema de formació d'imatge típic per un microscopi òptic. Per enfocar diferents posicions de la mostra és necessari variar la distància entre la mostra i el sistema òptic.

el sistema d'imatge perfecte, que replica perfectament la distribució 3D de l'objecte. La manera més apropiada d'aconseguir un sistema amb augment unitari és utilitzant dos objectius de microscopi iguals, enllaçats mitjançant un sistema òptic 4f. A la Figura 2.22 hi ha representat un esquema d'aquest sistema òptic. Els dos objectius de microscopi OM són els mateixos, i les dues lents L també tenen la mateixa distància focal. L'augment total del sistema òptic és unitari i per tant s'aconsegueix replicar la distribució 3D de l'objecte en el segon objectiu de microscopi.

Per a l'enfocament de diversos plans de l'objecte, cal incorporar un sistema d'imatge com el de la Figura 2.21, que disposi de l'augment i de la lent de tub adequades. La Figura 2.23 presenta un esquema del microscopi d'enfocament remot amb les branques d'il·luminació i d'imatge respectives. El re-enfocament s'implementa mitjançant una variació en la posició del mirall en el qual es replica la distribució tridimensional de l'objecte. Aquest sistema òptic permet enfocar en diferents posicions axials de l'objecte sense introduir aberracions esfèriques.

En un primer anàlisi, es podria considerar que l'enfocament remot no proporciona avantatges substancials, atès que, en lloc de variar la distància entre la mostra

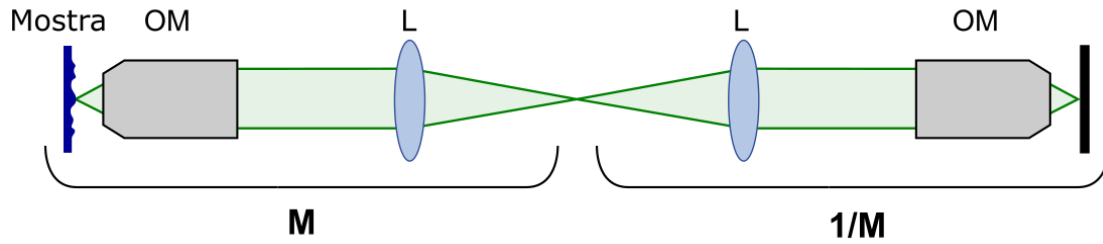


FIGURA 2.22: Sistema òptic amb dos objectius de microscopi (OM) iguals i dues lents amb la mateixa distància focal. L'augment del primer objectiu i lent és igual a M , i l'augment de la segona lent i l'objectiu és $1/M$, i l'augment total és 1.

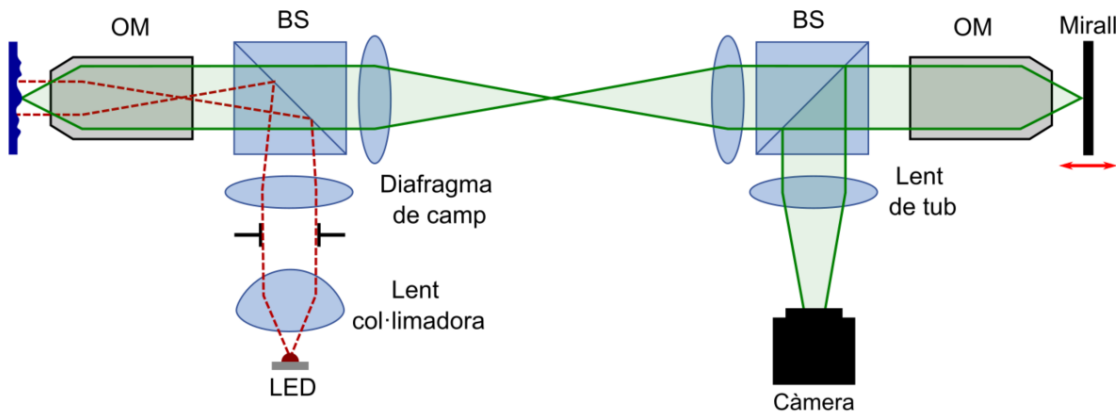


FIGURA 2.23: Sistema de formació d'imatge amb enfocament remot. Del pla objecte al pla imatge (mirall) hi ha un augment unitari. Del pla mirall al pla càmera hi ha un sistema de formació d'imatge estàndard com el de la Figura anterior 2.21.

i el sistema òptic, resulta necessari ajustar la posició relativa del mirall respecte al sistema òptic. No obstant, aquest fet transforma completament la metodologia d'escaneig axial. Tal com s'ha explicat anteriorment, tradicionalment l'escaneig s'aconsegueix amb el moviment de tot el capçal òptic, circumstància que restringeix significativament la velocitat de l'escaneig i fa inviable les adquisicions ultraràpides. En canvi, amb l'enfocament remot només cal desplaçar un mirall i no tot el capçal òptic. A més, el mirall es pot seleccionar amb una massa reduïda, permetent així el seu moviment a velocitats molt més elevades, en l'ordre dels mil·lisegons, gràcies a l'ús d'actuadors *voice-coil*. També es poden emprar actuadors piezoelèctrics que, malgrat no assolir velocitats tan altes, ofereixen una precisió nanomètrica.

En resum, aquestes dues tècniques suposen un avanç important en la metodologia d'escaneig axial, ja que permeten augmentar considerablement la velocitat de l'escaneig. En substituir el moviment del capçal òptic per elements més lleugers, es fa possible aconseguir velocitats més elevades, essencial per a agilitzar tot el procés d'escaneig i aconseguir adquisicions ultraràpides.

2.2. Manufactura additiva

La manufactura additiva (MA), també més coneguda com a impressió 3D, constitueix el procés de fabricació d'objectes tridimensionals a partir d'un model digital [44]. La seva característica distintiva davant dels mètodes tradicionals radica en la formació d'objectes mitjançant un procés capa a capa i amb l'addició de material. En contrast, els mètodes tradicionals es fonamenten en la subtracció de material, també anomenats *top-down*. La Figura 2.24 il·lustra un exemple de dues peces obtingudes amb tècniques de manufactura additiva.

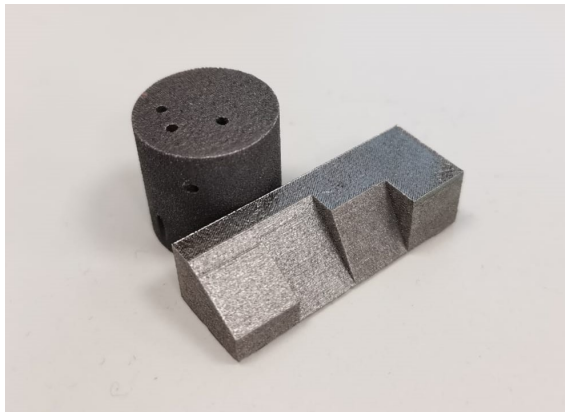


FIGURA 2.24: Exemple de peça manufacturada amb *powder bed fusion* (PBF), cortesia de Manufacturing Metrology Team (University of Nottingham).

La manufactura additiva ha adquirit importància ràpidament a causa dels beneficis i característiques pròpies d'aquesta tecnologia. El procés de capa a capa permet la fabricació de peces personalitzades amb geometries complexes o, fins i tot, impossibles d'assolir mitjançant els mètodes tradicionals. A més, la MA té una capacitat única de produir peces sota demanda que la fa idònia per al prototipat. En comparació, els mètodes tradicionals inclouen procediments amb costos molt elevats que resulten prohibitius per a peces de les quals només se'n necessiten petites quantitats, fent que el prototipat amb aquests mètodes sigui extremadament costós. En canvi, amb la manufactura additiva, els costos fixos són inexistent, oferint una tècnica ideal per a la producció de peces de volums reduïts. Aquesta situació resulta òptima per al prototipat i redisseny de peces. A més, aquestes es poden modificar i produir ràpidament sense necessitat de modificar els plànols, un aspecte que pot esdevenir tediós especialment quan l'operari no és la mateixa persona que el dissenyador.

La MA ha estat una innovació important en el món de la fabricació, i ha millorat la gamma de peces que es poden fabricar, però no és un substitut de la manufactura tradicional, tot el contrari. Els dos tipus de manufactura es complementen entre sí, i s'utilitzen en diferents etapes del desenvolupament i fabricació de productes. Així, el procés de prototipatge generalment és més econòmic i ràpid desenvolupar-lo amb processos de MA. En etapes posteriors, on es necessiten lots més grans, els processos de sostracció es tornen més competitius, especialment per a peces grans i menys complexes. Aleshores, utilitzar cada tipus de manufactura resulta en un procés híbrid que permet als dissenyadors i fabricants de productes combinar els punts positius de cada tècnica. En poques paraules, la manufactura additiva és

una eina més que s'ha afegit dins del camp de la manufactura, que ofereix més possibilitats i rapidesa en tasques que requereixen lots petits.

Un altre avantatge potencial de la manufactura additiva resideix en la producció de components amb nivells de complexitat tan elevats que, utilitzant mètodes tradicionals, resulta necessari dividir-los en diferents parts per a ser muntades posteriorment. Mitjançant la MA, el procés de fabricació pot simplificar-se en una sola etapa, eludint així el muntatge posterior, un procés que pot ser lent si els components no compleixen les toleràncies requerides [45]. Generalment, el procés de MA segueix diverses etapes, que poden dividir-se en:

- Disseny digital CAD (*computer-aided design*): la peça és dissenyada amb aplicacions CAD i s'exporta a un model triangulat, normalment STL, on cada cara de la peça és dividida en triangles.
- *Slicing*: el model triangulat es converteix en capes (*slices*). Aquestes són les que utilitzarà la màquina d'impressió per crear l'objecte. Aquest pas l'acostuma a fer el propi software de la màquina, ja que hi ha característiques pròpies de la impressió que s'han de tenir en compte.
- Manufactura: es produeix la peça capa per capa.
- Postprocessament: En funció de la tècnica de MA existeixen diferents postprocessaments per millorar les propietats de la peça manufacturada. Entre aquests s'inclouen processos de curat amb llum ultravioleta (en cas de resines) o tractaments de calor (en cas de metalls). Existeix una gran varietat de postprocessaments, i la utilització de cada un depèn de l'aplicació final de la peça.

Una de les etapes fonamentals que determinarà les propietats finals de la peça manufacturada és l'*slicing*. Aquest procés pot efectuar-se en qualsevol orientació de la peça; no obstant això, sovint existeix una orientació preferent. Amb aquesta orientació, les peces manufacturades presenten propietats estructurals superiors i major fidelitat al model CAD. Normalment, aquesta orientació és seleccionada per l'operador, així que l'experiència prèvia és essencial.

Per altra banda, si la peça té parts voladisses, serà necessari que durant la manufactura s'afegeixin estructures de suport, les quals serviran com a superfície inicial per a la construcció d'aquests voladissos. Aquestes estructures s'elaboren amb una integritat estructural baixa expressament, així al finalitzar el procés es poden eliminar fàcilment.

En definitiva, la manufactura additiva és una tecnologia que aporta noves solucions i flexibilitat en el camp de la producció, on gràcies a la seva naturalesa de fabricació capa per capa, permet que els dissenys més complexos es redueixin a *slices* i la seva fabricació esdevingui possible.

2.2.1 Tècniques de manufactura additiva

Les tècniques de MA es poden classificar segons el tipus de material que s'utilitza en la fabricació, que sovint és un plàstic o un metall. Aquests materials s'utilitzen de manera extensiva, però cadascun s'adreça a mercats diferents. La figura 2.25 presenta un esquema de les tècniques de manufactura additiva. A més del material emprat, aquestes tècniques es poden subdividir en funció del mecanisme de formació de la capa, distingint entre aquelles que disposen material de manera selectiva i aquelles que utilitzen processos d'adhesió.

En les primeres, el material es disposa de manera selectiva a través d'un *nozzle* o un element similar. En canvi, el segon conjunt de tècniques engloba aquelles que adhireixen selectivament el material de fabricació, normalment un polímer líquid o en pols. En aquest cas, un cop s'ha distribuït el material sobre la peça, s'aplica selectivament un agent que el fixa. Per aquest procés, s'acostuma a utilitzar llum ultraviolada, calor, o adhesius químics.

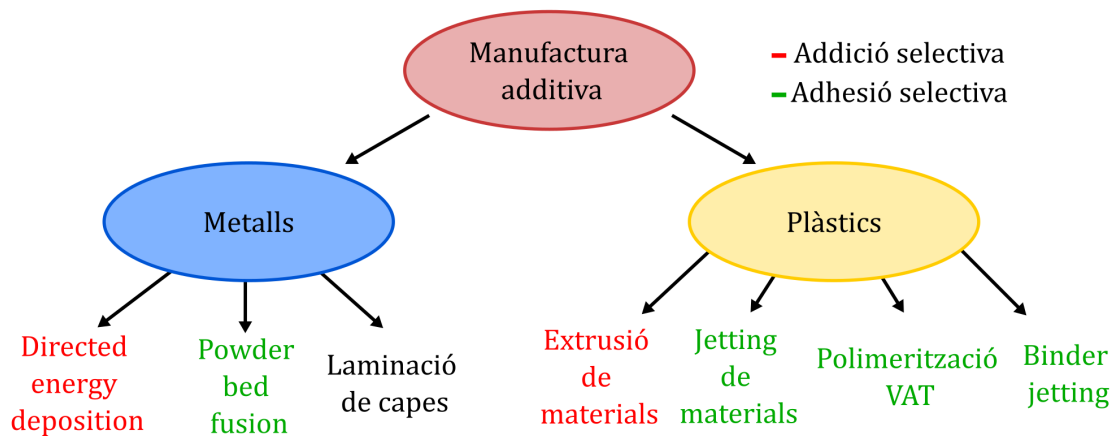


FIGURA 2.25: Tipus de tècniques de manufactura additiva. Les tècniques que utilitzen metalls són la *directed energy deposition*, *powder bed fusion* i la laminació de capes. Les que utilitzen plàstics són l'extrusió de materials, el *jetting* de materials, la polimerització VAT i el *binder jetting*.

Malgrat l'ús d'un nom propi diferent per a les tècniques de metalls i les de plàstic, moltes comparteixen el mateix principi. És el cas de la *directed energy deposition* i l'extrusió de materials, on la primera s'utilitza per a metalls i la segona per a plàstics, però el funcionament és anàleg. També succeeix el mateix entre *powder bed fusion* i *binder jetting*.

Per últim, dins de les categories d'addició i adhesió selectiva, no s'hi pot incloure incloure la tècnica de laminació de capes, ja que es troba enmig de les dues. A continuació, es detallen les característiques principals de les principals tècniques de MA.

2.2.1.1 Manufactura additiva amb plàstics

Per la manufactura additiva amb plàstics s'utilitzen polímers termoplàstics, com l'*acrylonitrile butadiene styrene* (ABS), el *polylactic acid* (PLA), *polycarbonate* (PC) i la *polyamide* (PA). Aquests materials es caracteritzen per la seva mal-leabilitat a

partir de determinades temperatures i la seva solidificació una vegada es refreden. La manufactura additiva de plàstics és preferida sovint degut al seu cost significativament inferior, tant per les impressores 3D com per els materials, en comparació amb la versió destinada a metalls. Aquestes particularitats han fet de la manufactura additiva amb plàstics una eina valuosa en contextos domèstics i individuals, però no en el seu ús industrial. Aquesta tesi no focalitza l'atenció en aquests mètodes, ja que els components fabricats a través d'aquestes tècniques generalment no compten amb aplicacions comercials, i per tant, no requereixen una caracterització metrològica.

Dins la manufactura additiva amb plàstics hi ha quatre tècniques principals: extrusió de materials, *jetting* de materials, polimerització VAT i *binder jetting*, cadascuna d'elles representada en la Figura 2.26.

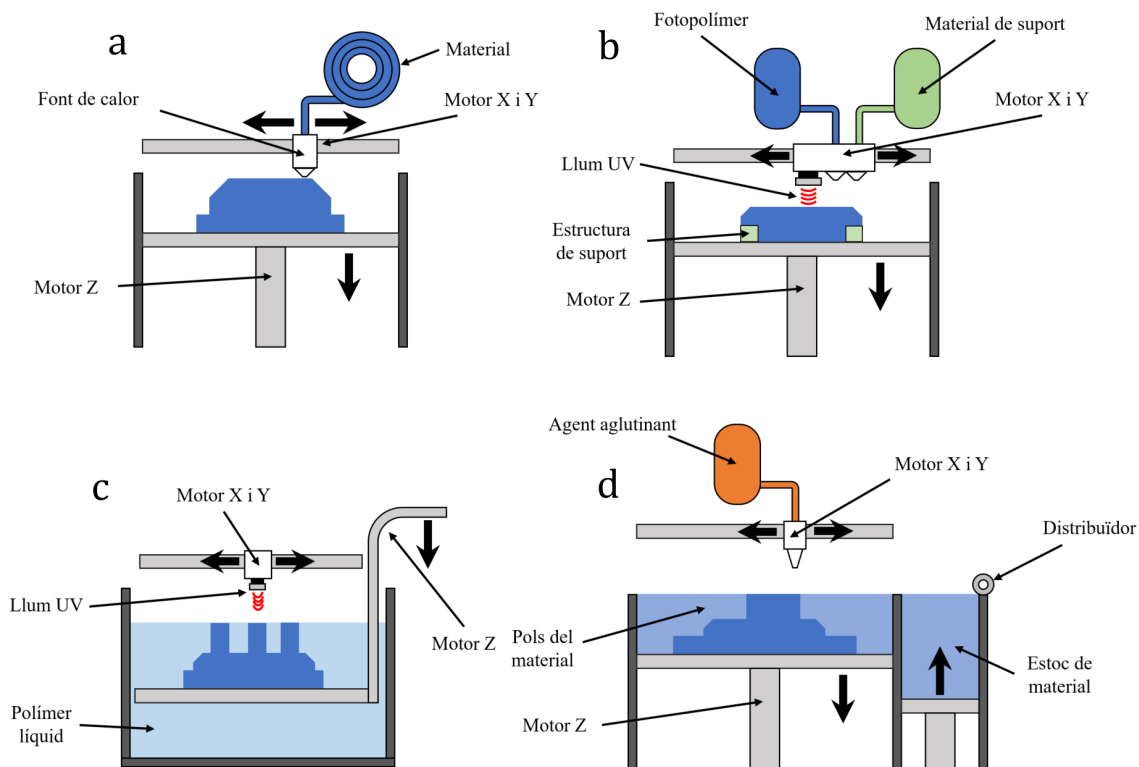


FIGURA 2.26: Esquema dels diferents tipus de manufactura additiva amb plàstics.
a) Extrusió de materials. b) *Jetting* de materials. c) Polimerització VAT. d) *Binder jetting*.

Extrusió de materials

L'extrusió de materials es fonamenta en l'addició selectiva de material, utilitzant un filament de termoplàstic que s'introdueix en un extrusor mòbil. A mesura que es desplaça, l'extrusor fon el filament i el diposita. Per assolir parts amb millors propietats mecàniques, la plataforma on es realitza la manufactura també sol estar a una temperatura específica per evitar la solidificació sobtada del material. La Figura 2.26a) il·lustra un esquema de la tècnica.

Aquesta tècnica emergeix com la més predominant per a la fabricació a baix cost. A més, la majoria d'equips són de sobretaula i presenten dimensions reduïdes,

la qual cosa els fa compatibles amb l'ús domèstic de la tecnologia. S'hi pot utilitzar una àmplia varietat de plàstics, dels quals destaquen l'ABS (acrilonitril butadiè estirè) i el PLA (àcid polilàctic), tots ells amb un cost molt assequible. Aquesta accessibilitat ha permès créixer una comunitat de desenvolupament *open source* de peces 3D, que ha contribuït a augmentar la popularitat d'aquesta tècnica en un ampli ventall d'usos.

No obstant això, és important destacar que la majoria dels sistemes comercials d'extrusió de materials no ofereixen ni una alta precisió ni unes propietats mecàniques excel·lents, fet que limita la seva aplicació en usos industrials.

Jetting de materials

El *jetting* de materials es un mètode basat en l'addició selectiva de material i rep el seu nom de les impressores *inkjet*, atès que ambdues utilitzen una tecnologia similar. En les impressores *inkjet*, es realitza la deposició de tinta mitjançant un *nozzle*, que aplica gotes microscòpiques sobre el paper. De manera anàloga, el *jetting* de materials segueix una metodologia similar. El material es manté en estat líquid per, posteriorment, ser expulsat a través d'un *nozzle* damunt de la peça que s'ha de manufacturar. En aquest cas, però, hi ha la necessitat d'afegir un agent polimeritzant, normalment llum ultraviolada, per solidificar cada capa. A més, el dispensador de material es compon de centenars de *nozzles*, que operen simultàniament per agilitzar el procés capa per capa. En la Figura 2.26b) es proporciona un esquema d'aquesta tècnica.

El *jetting* de materials representa una opció excel·lent per a la creació de prototips realistes, atès que ofereix alta resolució i precisió, i l'acabat de les superfícies és llis. A més, la tècnica permet la manufactura de peces en diversos colors dins d'un procés únic, de manera anàloga al d'una impressora *inkjet*.

Polimerització VAT

La polimerització VAT implica la utilització d'un recipient ple de polímer, el qual es cura selectivament capa per capa mitjançant llum ultraviolada. La Figura 2.26c) il·lustra un esquema d'aquest mètode. Tot i que en la figura s'aprecia l'aparell de curat des d'una posició superior, aquest es pot col·locar a la base del recipient. Aquesta disposició permet reduir les dimensions de l'equip, ja que, a mesura que les capes es completen, la peça es desplaça cap a l'exterior del recipient. Aquesta configuració és la més comuna, ja que ofereix més flexibilitat a l'hora de fabricar les peces.

Binder jetting

El *binder jetting* es basa en la deposició selectiva d'un agent adhesiu sobre capes primes de material en pols. La Figura 2.26d) proporciona un esquema d'aquesta tècnica.

La seva operació és anàloga al *jetting* de materials; tanmateix, en aquest cas el material no es diposita sinó que ja es troba estès en la peça, i només es necessita aplicar l'agent adhesiu. En aquesta tècnica, cada vegada que es completa una capa, s'ha estendre una capa fina de material damunt de la peça, repetint-se aquest

procés fins a la finalització de la peça. Un cop acabada, les peces requereixen un postprocessament per optimitzar les seves propietats mecàniques, principalment per minimitzar la quantitat de porositat i perfeccionar la microestructura del material.

2.2.1.2 Manufactura additiva amb metalls

La MA amb metalls és molt més costosa i complexa que la de plàstics. Com que els metalls posseeixen temperatures de fusió significativament més elevades, és necessari utilitzar làsers o altres equipaments més sofisticats i, per tant, més costosos per aconseguir la fusió dels materials. Els metalls usualment emprats són el Ti6Al4V, acers com el 316L, súper aliatges de níquel com l'Inconel 625, i el AlSi10Mg.

En MA de metalls, la matèria primera és en forma de pols, que es pot obtenir a través de diversos mètodes, on el més comú és a través de la *gas atomization*. En aquesta tècnica, el material fos és injectat mitjançant un *nozzle* en un corrent de gas a alta pressió, provocant la seva divisió en gotes petites. El corrent de gas pot consistir en aire o gas inert (argó, nitrogen) i, en funció del mètode utilitzat, les característiques de la pols varien.

Les característiques més importants inclouen l'esfericitat, la mida i la densitat de les partícules. En general, la pols esfèrica proporciona millors propietats a la peça manufacturada, mentre que la pols de formes irregulars resulta en pitjor qualitat degut a la heterogeneïtat durant la fusió d'aquestes. La mida de la pols és especificada per cada proveïdor, on s'acostumen a indicar els límits inferior i superior. Els rangs més comuns es localitzen entre 15 µm i 45 µm per a sistemes de làser i de 45 µm a 100 µm per a sistemes amb *electron-beam*. En últim lloc, la densitat de la pols també influeix en la interacció del material amb la font de calor, impactant el procés formació del material fos, estretament vinculat en la generació de defectes. Aquests defectes sovint es produeixen degut a la porositat de la pols, que conté gasos a l'interior i que ha de ser eliminats durant la fusió i solidificació subsegüents. Si el gas queda confinat, pot provocar porositats internes i defectes superficials en la peça.

Finalment, existeix una àmplia varietat de paràmetres que afecten el procés de MA de metalls, els quals han de ser optimitzats per obtenir una peça amb propietats òptimes. Entre aquests paràmetres s'inclouen la potència del feix (làser o d'electrons), el gruix de les capes, la velocitat d'escaneig, l'*spot size*, entre d'altres. En funció d'aquests paràmetres es poden manifestar defectes en la mostra, com ara la fusió incompleta de la pols, baixa densitat, partícules *spattered* (pols esfèrica solidificada sobre la superfície), estrès residual i contaminació, entre altres. Tots aquests defectes contribueixen a una porositat i rugositat excessives de la peça, afectant així les seves propietats.

En l'àmbit de la MA de metalls, es poden identificar tres tècniques diferents: *directed energy deposition* (DED) i *powder bed fusion* (PBF), considerades les més utilitzades i, en últim lloc, la laminació de capes. La Figura 2.27 proporciona un esquema de cadascuna d'aquestes tècniques.

Directed energy deposition (DED)

La DED constitueix la versió per a metalls de l'extrusió de materials. Aquest mètode implica la fusió i deposició directa d'una vara o pols del material sobre la

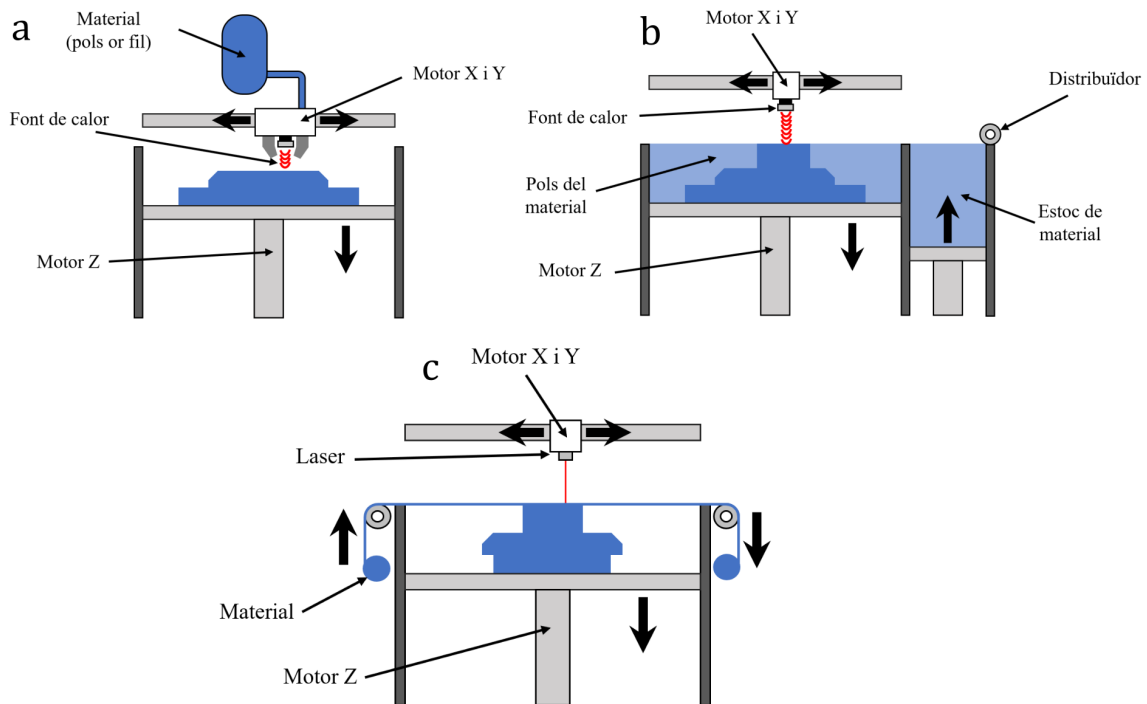


FIGURA 2.27: Esquema dels diferents tipus de manufactura additiva amb metalls.
a) *Directed energy deposition*. b) *Powder bed fusion*. c) Laminació de capes.

peça a manufacturar. La Figura 2.27a) il·lustra un esquema de la tècnica.

Les impressores de DED són equipaments industrials de gran complexitat que necessiten un entorn altament controlat per garantir un funcionament òptim. Dins de la tècnica DED, es poden distingir diverses tecnologies, que varien segons la font de calor utilitzada. Les més comunes incorporen làser, un feix d'electrons, o descàrregues d'arcs elèctrics (*electric arc*).

Powder bead fusion (PBF)

La PBF és una tecnologia d'impressió de metalls que utilitza una font de calor per fondre partícules en pols que han estat prèviament dipositades sobre la peça. La Figura 2.27b) il·lustra un esquema de la tècnica. La tècnica PBF destaca per la seva precisió, que facilita la fabricació d'elements amb geometries complexes. A més, ofereix una llibertat de disseny considerable, ja que es poden utilitzar múltiples tipus de materials. Un dels avantatges significatius és que no són necessàries estructures de suport, donat que la pròpia pols del material compleix aquesta funció.

Dins de les tecnologies més destacades de PBF es troben el *selective laser sintering* (SLS) i el *selective laser melting* (SLM). En el cas del SLS, el material no es fon completament, sinó que es sinteritza. Això implica que no és necessari arribar fins a la temperatura de fusió del material, simplificant el procés, especialment quan es treballa amb materials amb altes temperatures de fusió. En canvi, en l'SLM es fon completament el material, que sol resultar en peces amb millors propietats mecàniques, tot i que el ventall de materials disponibles és més limitat.

Laminació de capes

La laminació de capes consisteix a superposar capes del material, que està emmagatzemat en una bobina. En aquest procés, cada capa es talla segons l'*slice* del component a fabricar. Posteriorment, la capa es fusiona utilitzant un agent aglutinant i es retira el material sobrant. La Figura 2.27d) presenta un esquema de la tècnica. La laminació de capes permet l'ús de diversos materials, com paper, polímers, fibres, ceràmiques i, especialment, metalls, oferint una àmplia varietat d'aplicacions en diferents sectors industrials.

2.2.1.3 Postprocessament i qualitat

Generalment, tot i la optimització dels paràmetres d'impressió que s'ha explicat anteriorment, les peces poden continuar presentant defectes intrínsecs de la tècnica utilitzada. Mitjançant tècniques de postprocessat, però, és possible mitigar aquests defectes per obtenir una peça que satisfaci les exigències del producte. Aquest pas resulta especialment crucial per a peces que incorporen elements voladissos, ja que les estructures de suport afecten directament a la qualitat superficial de la peça [46].

Aquestes tècniques constitueixen l'etapa final i es divideixen en dos tipus. Primer, aquelles que milloren les propietats mecàniques minimitzant l'estrès residual, com les microestructures anisotròpiques i la porositat. Això s'aconsegueix a través de tractaments tèrmics i de pressió (*hot isostatic pressure*, HIP), que afecten el volum complet de la peça. El segon tipus de postprocessat s'enfoca en l'acabat superficial de la peça, principalment per a la reducció de la rugositat, i inclou tècniques com el mecanitzat, el *shot peening*, el *media blasting* i el *plating*, entre d'altres.

El *hot isostatic pressing* és una tècnica de postprocessat destinada a reduir la porositat i incrementar la densitat. Aquest procés implica la pressurització de la peça amb gasos inerts a altes temperatures, amb l'objectiu de tancar els porus i prevenir qualsevol reacció química potencial a llarg termini [47]. Per aquest motiu, les peces són fabricades amb dimensions superiors, anticipant la reducció dimensional associada a aquest postprocessat. Existeixen altres tècniques similars que, en essència, es fonamenten en el mateix principi: incrementar la temperatura de la peça sota condicions de pressió, com el *warm isostatic pressing*.

Els tractaments tèrmics representen una altra tècnica de postprocessament àmpliament utilitzada, especialment per reduir les tensions residuals, que poden produir distorsions si no es gestionen adequadament. La tècnica més utilitzada és l'*annealing* [48], que també és eficaç en l'eliminació dels gasos atrapats dins la peça, un fenomen molt comú en la manufactura additiva.

En últim lloc, es troben els tractaments de superfície, un conjunt de tècniques molt ampli i diversificat amb l'objectiu final de reduir la rugositat superficial. En primer lloc, es troben tècniques físiques, com el *sand blasting*, que utilitza sorra a altes pressions per desbastar la superfície. En segon lloc, consten les tècniques que empren components químics per atacar la superfície i eliminar material, com el *chemical etching* [49]. Altres tècniques inclouen els tractaments electroquímics, la curació amb llum ultraviolada o amb ultrasons, i la implantació d'ions.

El postprocessament per augmentar la qualitat dels components és fonamental, ja que les peces elaborades a partir de metalls són utilitzades en productes i en-

torns industrials. Això els imposa un procés rigorós de revisió i anàlisi de qualitat, per assegurar que es comporten de manera anàloga als seus equivalents fabricats mitjançant tècniques tradicionals de manufactura. Aquest requisit implica que cada màquina d'impressió 3D de metalls necessita una optimització adequada per garantir un resultat satisfactori. En aquest sentit, el *feedback* resulta essencial per comprendre el procés a nivell microscòpic, proporcionant orientacions clares als fabricants per produir peces amb millors característiques.

D'una peça manufacturada se'n pot extreure una gran quantitat d'informació, i la més rellevant està vinculada amb les característiques mecàniques, la microestructura, la porositat i l'acabat. Les propietats mecàniques s'obtenen a través de proves de mal·leabilitat i fatiga. Pel que fa a la primera, la mostra més utilitzada es coneix com a *dog bone* (per la seva forma similar). Aquesta és sotmesa a una tensió controlada fins que es produeix una fallida. Això permet extreure propietats com el mòdul de Young i el coeficient de Poisson. En la prova de fatiga, una càrrega específica s'aplica de manera cíclica sobre la peça fins que es produeix una fallida. Aquest mètode permet identificar les àrees més vulnerables a la fatiga i identificar les posicions on és necessari reforçar la peça.

Respecte a la microestructura, que és una característica volumètrica, la tècnica capaç d'obtenir informació rellevant és la tomografia de coherència de rajos X (*X-ray coherence tomography*, XCT). Aquesta tècnica captura imatges de rajos X de la mostra des de múltiples angles per a, posteriorment, reconstruir el volum 3D. Aquesta tècnica permet quantificar la porositat interna de les peces, una dada essencial que no es pot aconseguir amb cap altra tècnica no destructiva. No obstant això, aquesta tècnica presenta certs *trade-offs*. L'equipament requereix té unes dimensions físiques considerables, i cal tenir en compte que l'ús de rajos X implica el seguiment de protocols de seguretat i salut. Aquests obstacles fan que la XCT sigui una tècnica accessible només per a un limitat nombre d'empreses o centres d'investigació.

Finalment, les característiques de la superfície estan relacionades amb la rugositat i l'acabat, i s'analitzen amb eines tradicionals de mesura com la profilometria amb *stylus* o amb tècniques òptiques. Aquestes tècniques, a diferència de la XCT, no requereixen equipament de grans dimensions, ja que normalment són equips de sobretaula. A més, l'ús d'aquests instruments és senzill i ràpid, que facilita un anàlisi eficient de les mostres. Per aquest motiu, aquestes tècniques són adequades per a la caracterització de les superfícies de les peces manufacturades, ja que proporcionen resultats fiables de manera àgil i amb una inversió menor en equipament.

2.2.2 Problemes i limitacions de la manufactura additiva

La MA ha proporcionat una gamma de noves tècniques de fabricació; no obstant això, presenta una complexitat considerable i nombroses limitacions. En primer lloc, comparada amb les tècniques tradicionals, el seu temps de producció és més extens. Generalment, tots els processos de MA es desenvolupen de manera més lenta a causa de la naturalesa de la producció capa per capa. Aquesta característica limita la quantitat de peces que es poden produir dins d'un període determinat, fent-la inadequada per a la fabricació de grans volums de peces.

En segon lloc, existeixen restriccions en l'elecció dels materials de fabricació, ja que només una petita part d'aquests materials és adequada per al seu ús [50].

Els materials més utilitzats inclouen acers, aliatges d'alumini, aliatges de titani, i superaliatges de níquel, especialment per a aplicacions a altes temperatures.

Les peces de MA, a més, requereixen un postprocessament significatiu. En el pitjor escenari, les peces poden presentar defectes com porositat, tensions residuals [51], presència de bombolles de gas, fusió incompleta, contaminació i acabats de baixa qualitat. En funció del defecte, una peça pot resultar completament invàlida i, en altres casos, només requerirà postprocessament addicional per ser funcional.

Finalment, la precisió i la tolerància dimensional assolibles per la MA es situen en l'ordre de desenes de micròmetres [52], un nivell considerablement més baix comparat amb la resolució nanomètrica assolible mitjançant mecanitzat d'alta precisió [53]. Existeixen altres tècniques de MA que poden aconseguir resolucions de centenars de nanòmetres, com és el cas de la polimerització per dos fotons [54]. Tanmateix, aquestes tècniques només permeten la fabricació de peces de dimensions molt reduïdes, limitant les seves aplicacions.

Paral·lelament a les problemàtiques i limitacions de la MA, es troba la complexitat de les màquines de manufactura. Cada aparell de MA requereix l'optimització d'un ampli conjunt de paràmetres per tal d'obtenir un producte final que posseeixi unes característiques acceptables, ja sigui en termes de propietats materials, característiques de la peça o de la superfície. Per a millorar el procés de fabricació, és essencial la inspecció i la caracterització de les peces fabricades.

La inspecció i caracterització de les peces de MA, però, és complicada degut a la naturalesa d'aquestes tècniques. Aquestes produeixen superfícies amb una rugositat alta i pendents locals elevats, principalment degut a la falta de fusió de la pols i els porus oberts i tancats. Per altra banda, les superfícies de manufactura additiva són una barreja de regions brillants (especulars), com la pols *spattered*, i altres més fosques. Totes aquestes característiques dificulten la seva caracterització amb instruments òptics i de contacte. Aquesta complexitat en la mesura requereix l'ús de tècniques especialitzades i equips avançats per poder obtenir resultats precisos, així com una adaptació dels processos de caracterització tradicionals per afrontar les peculiaritats de les superfícies fabricades mitjançant manufactura additiva.

2.3. Metrologia de superfícies per a la manufactura additiva

Les tecnologies de manufactura additiva ofereixen avantatges únics, com ara una major flexibilitat en el disseny i la possibilitat de crear geometries complexes que serien inviables amb els mètodes tradicionals [55]. Però, tot i els seus avantatges, les tecnologies de MA no han aconseguit complir els requisits de disseny de moltes peces amb funcions crítiques, tal com s'ha mencionat en la secció anterior, principalment a causa de la incapacitat per assolir la integritat estructural, les propietats mecàniques o la precisió geomètrica desitjades pel dissenyador. En contraposició, això sí que és assolible mitjançant tècniques de manufactura convencionals [56]. Addicionalment, existeixen barreres per a l'adopció de la MA associades a la varietat de materials disponibles i les dimensions de les peces susceptibles de fabricació, ja sigui a gran o petita escala [57].

Per altra banda, també presenten dificultats en els estàndards de verificació, que són exigents per tal de garantir la qualitat d'una peça. En general, tots els fabricants interessats a integrar una nova peça en un producte comercial han de complir aquests estàndards. En comparació amb les peces produïdes mitjançant mètodes convencionals, les fabricades per manufactura additiva afronten problemes relacionats amb un rendiment mecànic insuficient, com ara la fatiga i la deformació [58]. Així, encara que l'adopció de la manufactura additiva ha crescut, per assolir una acceptació més generalitzada com a mètode de manufactura avançada, la tecnologia ha de ser capaç de satisfer aquests requisits de disseny.

Per tal de proporcionar solucions als obstacles associats amb l'adopció de les tecnologies de MA, és necessari aprofundir en la comprensió del procés físic de cada tecnologia, per exemple, a través del seu modelatge [59]. Aquesta tasca resulta complexa, ja que les interaccions físiques d'interès sovint presenten una complexitat considerable. Un avanç en aquesta comprensió del procés físic constitueix, per tant, una condició prèvia per a l'optimització de la fabricació que, en última instància, ha de desembocar en productes de més alta qualitat. La via més directa per obtenir informació útil per al procés de modelatge és mitjançant la caracterització de les peces manufacturades, on dues eines fonamentals són la investigació de l'interior de les peces i la topografia de les superfícies.

La caracterització de l'interior de les peces i, en última instància, del seu volum complet, es limita a la tècnica de tomografia de coherència de raigs X (XCT) [60]. Aquesta tècnica no es detallarà en profunditat aquí, atès que la seva complexitat tècnica i computacional és elevada i excedeix els objectius d'aquesta tesi, que són la caracterització de superfícies.

En comparació, la caracterització de la superfície amb mètodes òptics o de contacte és relativament simple. A més, existeix una àmplia varietat de tècniques que permeten obtenir informació sobre la peça a escales micro i sub-micromètriques. Les pràctiques d'inspecció i verificació existents estan ben desenvolupades i funcionen adequadament per a peces fabricades de manera convencional. Per altra banda, la investigació de la topografia de la superfície és àmpliament reconeguda com una eina essencial per a la millora dels processos de fabricació [61], ja que la superfície i totes les seves característiques són el resultat directe del procés. L'avaluació qualitativa

i quantitativa dels mapes topogràfics ajuda a aclarir com es desenvolupa aquest procés i té un impacte directe en la millora i optimització del mateix.

Les tècniques de caracterització de la superfície es classifiquen en dos grups: les basades en contacte i les òptiques. Aquestes tècniques han estat explicades a la secció 2.1, i les més significatives són l'*stylus*, la microscòpia confocal [16], la variació de focus [17] i les tècniques interferomètriques [28]. Pel que fa a la verificació de peces produïdes amb MA de metalls, s'ha identificat la necessitat d'investigació per a la mesura correcta de la topografia en 3D. Més concretament, es necessiten identificar els paràmetres que influeixen durant el procés de manufactura, així com els materials que resulten en millors propietats en la peça fabricada, ja siguin estructurals, mecàniques o geomètriques. La necessitat d'investigació addicional prové de la naturalesa de les peces de MA, que són difícils de caracteritzar amb tecnologies de mesura convencionals [62].

Tal com s'ha explicat en la secció anterior 2.2.2, les principals característiques de la superfície de peces de MA inclouen pendents locals abruptes, rugositat elevada, geometries complexes i canvis sobtats de reflectivitat. Totes aquestes característiques dificulten la seva caracterització amb instruments òptics i de contacte tradicionals. A la Figura 2.28 es mostra la superfície de dues peces manufacturades amb PBF, on es poden identificar el camí de la soldadura (vermell), molt notable en la superfície superior de la figura, partícules sense fusionar (blau), artefactes ondulatoris de la soldadura (verd) i porus (taronja).

Totes aquestes característiques provoquen que la mesura d'aquestes superfícies presenti dificultats, tant per als mètodes de contacte com per als òptics. En el cas de l'*stylus*, existeix la possibilitat que aquest impacti contra les parets abruptes de la superfície, produint-se una pèrdua de contacte de la punta, que pot ocasionar desperfectes o ruptures en aquesta. A més, si el material és tou, es pot ratllar durant el pas de la punta; per contra, si el material és dur, la punta podria trencar-se. Això comporta la necessitat d'escollir acuradament el material de l'*stylus* així com la força de contacte [63]. També cal considerar el radi i l'angle de la punta emprada per tal d'obtenir informació significativa de la superfície sense que hi hagi un excés de filtrat mecànic. Tanmateix, si s'opta per una mida massa petita, es corre el risc de trencar la punta al travessar zones amb canvis bruscos d'elevació, molt comuns en mostres de MA. En general, si la superfície a caracteritzar està dominada per una ondulació específica, llavors la mesura a través d'*stylus* permet obtenir una caracterització satisfactòria. Al contrari, si la superfície és complexa, la mesura resulta limitada a causa de la naturalesa intrínseca de la tècnica, que requereix un temps molt elevat per d'obtenir informació d'àrees. Malgrat les dificultats per mesurar les superfícies de MA amb *stylus*, aquest és el mètode històricament més utilitzat [64-66]. Tot i això, recentment hi ha hagut un canvi de paradigma i cada cop més reconeixen les capacitats dels instruments òptics per a la caracterització d'aquestes peces, majoritàriament utilitzant microscòpia confocal, variació de focus i interferometria [67].

Les superfícies de manufactura additiva exhibeixen detalls topogràfics significatius en diverses escales, amb una combinació de formacions de diferents alçades, *aspect ratios*, pendents, i rugositats pronunciades [68]. Totes aquestes característiques influeixen directament en la degradació de la qualitat de la mesura [52, 69]. Les partícules no fusionades generen zones d'alta reflectivitat al centre de l'esfera

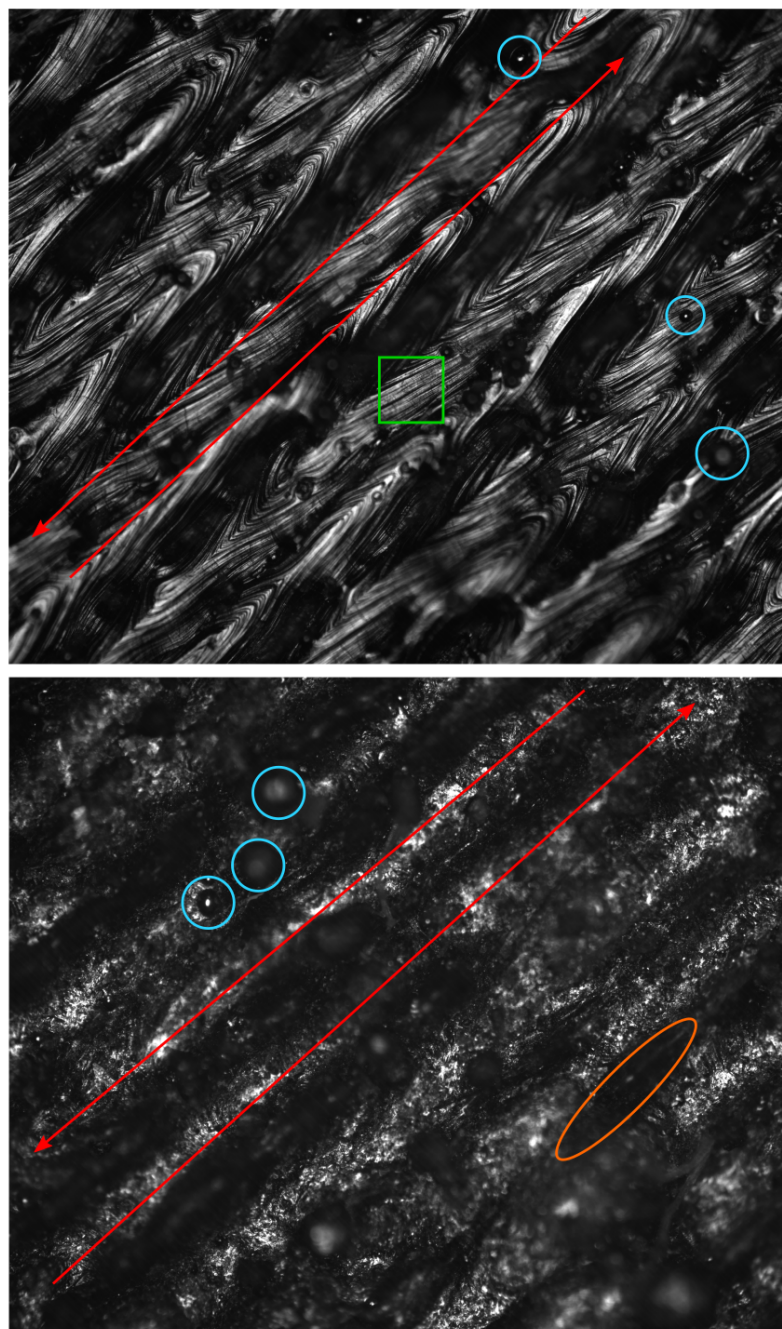


FIGURA 2.28: Exemple de les característiques de la superfície de dues peces obtingudes amb PBF. En vermell, el camí de la soldadura; en blau, partícules sense fusionar; en verd, artefactes ondulatoris de la soldadura; i en taronja, porus. En les dues imatges també s'hi pot veure els canvis bruscos de reflectivitat. Les dues imatges fan $1690 \times 1413 \mu\text{m}$.

que saturen la imatge, mentre que les zones exteriors reflecteixen la llum fora de l'obertura numèrica de l'objectiu i apareixen fosques [70, 71]. Per exemple, a la Figura 2.28, s'observen punts brillants envoltats de zones fosques (indicats amb cercles blaus). Els artefactes ondulatoris i els porus també generen àrees on la llum gairebé no arriba, afectant significativament les mesures amb soroll o impossibilitant-ne la detecció. La reflectància no uniforme redueix el rang dinàmic de treball i augmenta

considerablement el soroll de la mesura [72].

Aquestes superfícies, a més, també són altament rugoses, i requereixen escanejos axials llargs, de l'ordre de centenars de micres. Això no és problemàtic amb objectius d'obertura numèrica baixa, aproximadament per sota de 0.30, ja que el número de plans per escaneig es redueix a mesura que disminueix l'obertura numèrica. Aquest tipus d'objectius, però, no són adequats, ja que els pendents locals elevats en la mostra reflecteixen la llum a angles superiors al de l'obertura numèrica, fet que provoca mesures errònies. En canvi, amb objectius d'obertura numèrica més gran (i també major augment), s'incrementa el temps de mesura i es restringeix l'àrea mesurada, comportant una pèrdua d'informació sobre les característiques d'escapes amb major interès. La Figura 2.29 mostra la superfície d'una peça fabricada amb manufactura additiva utilitzant diferents objectius de microscopi. En el cas del 5×, es destaca una pèrdua significativa de llum a causa de la rugositat, que produeix punts no mesurats. En canvi, l'objectiu 50× és capaç de captar més llum reflectida en la mostra, però com que el rang a mesurar és d'aproximadament 100 µm, es requereix al voltant de 500 imatges, alentint així tot el procés de mesura.

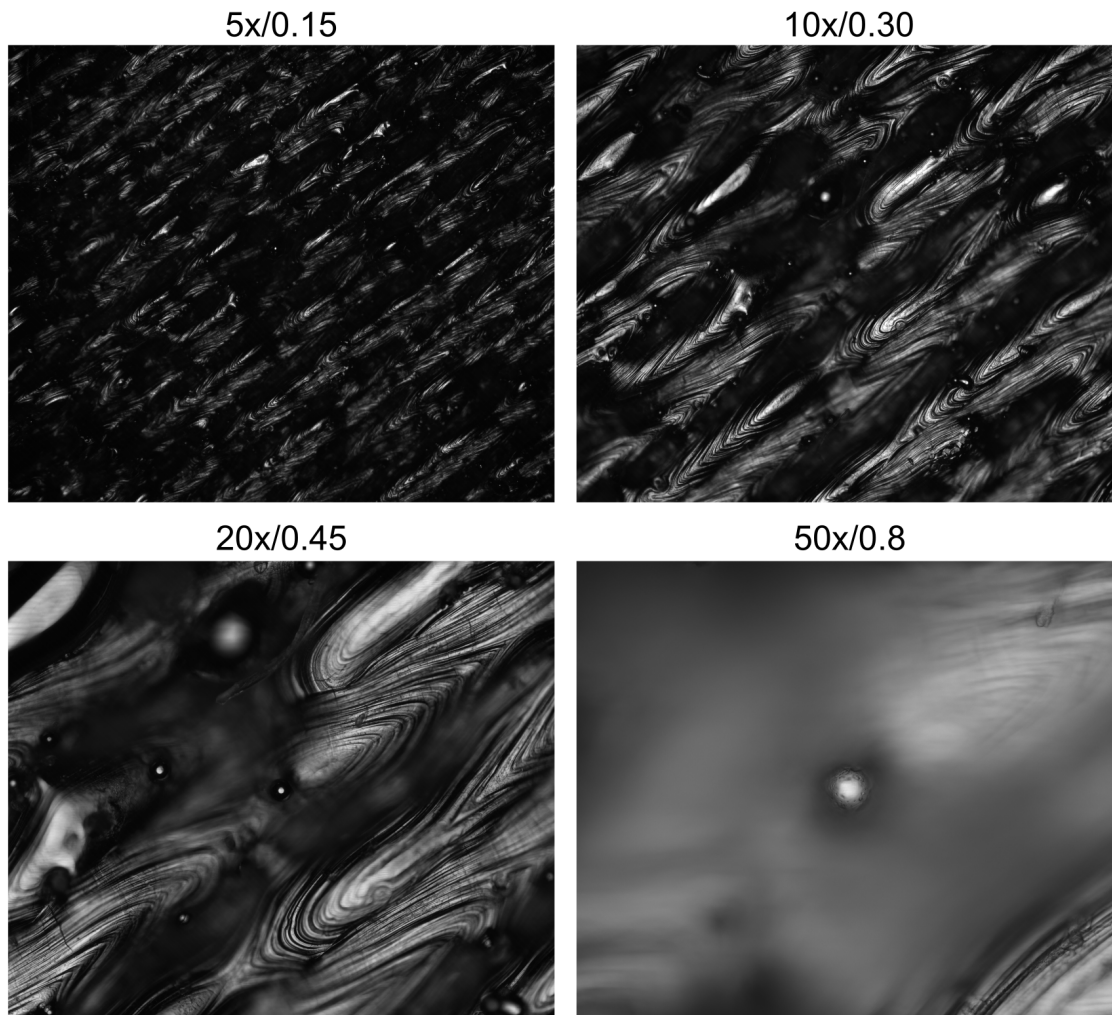


FIGURA 2.29: Imatges de la superfície d'una peça manufacturada amb PBF i amb diferents objectius de microscopi. Les àrees pels objectius 5×, 10×, 20× i 50× són $3378 \times 2826 \mu\text{m}$, $1690 \times 1413 \mu\text{m}$, $844 \times 706 \mu\text{m}$ i $337 \times 282 \mu\text{m}$, respectivament.

En les tècniques òptiques, per tant, existeix un compromís inevitable entre el camp de visió, l'obertura numèrica i la resolució lateral, que esdevé especialment crític en la mesura de peces de MA. En primer lloc, és necessari un camp de visió ampli per obtenir informació de les escales d'interès de la peça, que implica l'ús d'objectius de baix augment. En canvi, també és imprescindible una obertura relativament alta per capturar la llum que es reflecteix en la mostra, tal com es mostra a la Figura 2.29. Malauradament, aquesta combinació de característiques no es pot trobar en els objectius tradicionals de microscòpia.

La solució més evident consisteix a ampliar el camp de visió total mesurant múltiples camps de visió adjacents i, a continuació, integrar totes les mesures en una sola, en un procés anomenat *stitching*. L'augment en el temps d'adquisició, però, és significatiu, ja que cada mesura d'un camp de visió requereix un escaneig propi. D'altra banda, un sistema òptic amb una obertura numèrica adequada i un camp de visió optimitzat per a la caracterització de peces de MA podria constituir una solució personalitzada que, a més, no requeriria *stitching*. No obstant això, el disseny d'un tal sistema òptic és complex. Per tal d'aconseguir una obertura numèrica alta sense incrementar l'augment es requereix augmentar la pupil·la de l'objectiu de microscopi. La mida d'aquesta es pot calcular mitjançant

$$D = 2 \cdot NA \cdot F, \quad (2.36)$$

on D representa el diàmetre de l'obertura, NA l'obertura numèrica i F la distància focal de l'objectiu. Els objectius tradicionals de microscòpia òptica són dissenyats de tal manera que, quan l'obertura numèrica augmenta, la distància focal es redueix, implicant un increment de l'augment i una conservació de la mida de la pupil·la. A la Taula 2.1 s'observa que el diàmetre de la pupil·la per aquests objectius es manté aproximadament constant, per la qual cosa tots poden ser utilitzats amb un mateix sistema òptic sense pèrdua de qualitat d'imatge.

Augment	obertura numèrica	Distància focal	Diàmetre pupil·la
5	0.15	40	12
10	0.30	20	12
20	0.45	10	9
50	0.8	4	6.4

TAULA 2.1: Característiques òptiques d'objectius de microscopi tradicionals. A mesura que augmenta l'obertura numèrica disminueix la distància focal, i el diàmetre de la pupil·la es manté aproximadament constant.

En contraposició, un objectiu amb baix augment i una obertura numèrica alta requerirà inevitablement una pupil·la considerablement més gran que la dels objectius esmentats anteriorment. Per exemple, un objectiu amb un augment de $3\times$ i una obertura numèrica de 0.45 tindrà una pupil·la de 60 mm. Aquesta característica augmenta significativament la complexitat en el control d'aberracions del sistema òptic. A més, una pupil·la més gran implica un increment en la mida de totes les lents que conformen el sistema òptic.

En resum, aquestes condicions fan inevitable el disseny d'un sistema òptic personalitzat per a un objectiu amb aquestes especificacions, amb la intenció de garantir un rendiment òptic alt i obtenir un anàlisi satisfactori de les superfícies de manufactura additiva.

Capítol 3

Sistema òptic per a manufactura additiva

Aquest capítol descriu el desenvolupament del sistema òptic per a manufactura additiva, anomenat OSAM (*Optical System for Additive Manufacturing*). En primer lloc, es defineixen les necessitats específiques relacionades amb la manufactura additiva i es presenten les característiques principals del sistema òptic. A continuació, s'introdueix l'objectiu de microscopi seleccionat per al sistema, així com la lent de tub dissenyada específicament per a aquesta aplicació. Posteriorment, es realitza una caracterització exhaustiva del rendiment òptic mitjançant la *modulation transfer function* (MTF). En últim lloc s'ha realitzat una caracterització metrològica amb estàndards certificats de mesura, que permeten quantificar paràmetres com ara el soroll instrumental.

A continuació, es presenta el treball principal, on es valida la capacitat de l'OSAM per caracteritzar mostres de manufactura additiva. S'ha dut a terme una anàlisi exhaustiva amb mostres de diferents nivells de rugositat i camps de visió diversos. Aquesta anàlisi ha permès identificar els paràmetres òptims, especialment pel que fa a l'obertura numèrica i al camp de visió requerits per obtenir mesures representatives de la mostra. A més, s'han constatat millores significatives en la qualitat de la caracterització de peces de manufactura additiva gràcies al sistema òptic desenvolupat.

En tercer lloc, es presenta un algorisme desenvolupat per abordar les dificultats derivades de la combinació de regions brillants i especulars amb altres més fosques. Aquest problema s'ha solucionat amb un algorisme d'alt rang dinàmic que utilitza diferents temps d'exposició i fusiona les topografies obtingudes, aconseguint una millora en la qualitat de la mesura i reduint els punts no mesurats.

En quart lloc, s'introdueixen els resultats experimentals de les tècniques de control de focus, principalment amb les lents varifocals i el *remote focusing*. Aquestes tècniques s'han avaluat de manera independent per determinar quina és la més adequada per a futurs desenvolupaments.

Finalment, basant-se en els resultats obtinguts, vam determinar que era necessari investigar el disseny d'un objectiu de microscopi a mida. Atès que Nikon no comparteix els detalls del disseny de l'objectiu utilitzat en l'OSAM, és va considerar essencial desenvolupar un objectiu propi que permeti controlar i corregir les aberraci-

ons, per garantir així una qualitat d'imatge òptima. En aquest apartat es presenten quatre dissenys d'objectius, un dels quals incorpora un anell de llum per augmentar l'obertura numèrica de la il·luminació, però manté una obertura numèrica global baixa per reduir la complexitat de l'objectiu.

3.1. Requeriments i disseny del sistema òptic

Les capacitats úniques de les tecnologies de MA són ideals per al prototipatge i la creació de geometries complexes o fins i tot impossibles d'aconseguir amb mètodes tradicionals [73]. Desafortunadament, les peces fabricades són difícils de mesurar i caracteritzar amb mètodes tradicionals de mesura [52, 69]. Específicament, les peces de MA de metall presenten un ampli rang d'escales rellevants, pendents locals elevats, alternança entre zones fosques i brillants, i altres característiques complexes intrínseques del procés de fabricació [70, 71]. Totes aquestes propietats són particularment problemàtiques per les tecnologies de mesura òptiques [68], que ofereixen mesures areals ràpides però que poden contenir errors quan s'utilitzen per caracteritzar superfícies irregulars. Els pendents locals elevats reflecteixen la llum a angles superiors al de l'obertura numèrica del sistema òptic, fet que provoca mesures errònies i punts no mesurats (PNM). Per tal de resoldre aquest problema, s'utilitzen objectius de microscopi amb obertures numèriques més altes. No obstant això, els objectius amb obertura numèrica major presenten camps de visió més petits i no capturen els components més grans de baixa freqüència espacial de la mostra. La solució és augmentar el camp de mesura a través de l'escaneig lateral de la mostra i la combinació de les mesures de camps de visió individuals, però l'augment associat en el temps d'adquisició i els errors induïts poden ser inacceptables.

En aquest capítol proposem un sistema òptic amb obertura numèrica suficient per peces de MA i un camp de visió de 3×3 mm. Aquestes característiques permeten la mesura de peces de MA amb resolució i velocitats adequades sense la necessitat de combinar camps de visió (*stitching*) i amb la captura dels components de baixa freqüència espacial de la mostra. Aquest sistema òptic desenvolupat per a la mesura de superfícies de manufactura additiva l'hem anomenat OSAM (*optical system for additive manufacturing*). El disseny d'un sistema òptic d'aquestes característiques és complex, ja que per aconseguir una obertura numèrica alta i un camp de visió gran al mateix temps es necessiten obertures grans, que dificulten el control de les aberracions òptiques i augmenta el cost dels components. Tot i això, el benefici d'aconseguir una mesura ràpida i precisa justifica els desafiaments tècnics i econòmics del seu desenvolupament.

El component més important per tal d'aconseguir la combinació d'obertura numèrica elevada i un camp de visió gran és l'objectiu de microscopi. Entre els objectius comercials disponibles, els únics que ofereixen aquestes característiques són els dissenyats per a la estereomicroscòpia, ja que tenen una obertura relativament alta pels camps de visió en els quals estan corregits. És per això que vam escollir utilitzar, per a l'OSAM, un objectiu d'aquesta tipologia. En particular, vam seleccionar l'objectiu de Nikon SHR Plan Apo 2 $\times$, amb una obertura numèrica de 0.312, un diàmetre de l'obertura posterior al voltant de 50 mm i una distància de treball de 20 mm. El desavantatge és que aquests objectius estan optimitzats per a ser utilitzats amb oculars, de manera que no estan perfectament corregits per a un

microscopi òptic. Malgrat intentar obtenir un model òptic de l'objectiu en forma de *black box*, Nikon no el va proporcionar, de manera que pel disseny òptic del sistema vam acabar modelant l'objectiu com una lent paraxial i assumir que la majoria de les aberracions es corregeixen.

Un cop seleccionat l'objectiu, vam procedir a caracteritzar la seva distància focal. Aquesta propietat és crucial, ja que la distància focal de l'objectiu del microscopi, juntament amb la de la lent de tub, determina l'augment total del sistema òptic. Per tant, conèixer amb precisió la distància focal de l'objectiu és imprescindible per dissenyar una lent de tub que permeti assolir l'augment desitjat. Teòricament, la distància focal de l'objectiu es pot aconseguir assumint que la lent de tub de Nikon té la distància focal estàndard de 200 mm. No obstant això, l'objectiu utilitzat no segueix aquests estàndards, ja que es tracta d'un model d'estereomicroscòpia. Per aquesta raó, vam dur a terme una caracterització experimental.

Vam realitzar la caracterització de la distància focal de l'objectiu SHR Plan Apo 2× utilitzant una lent de tub amb una distància focal coneguda. Vam mesurar l'augment resultant mitjançant la captura de la imatge d'una regla calibrada (Geller Microanalytical Laboratory Inc, MR-1). A partir d'aquestes dades, vam determinar que la distància focal de l'objectiu és de 46 ± 2 mm. Aquesta mesura permet un disseny precís de la lent de tub per obtenir les especificacions òptiques requerides.

Un cop seleccionat l'objectiu i caracteritzada la seva distància focal, vam determinar les especificacions del sistema òptic, que es detallen a la Taula 3.1. Per a la càmera, vam optar pel model BFS-U3-244S8M-C (FLIR), de fins a 24.5 megapíxels. Per aconseguir la màxima resolució espacial possible, era essencial utilitzar una càmera amb un gran nombre de píxels. En aquest cas, vam configurar la càmera amb una regió d'interès de 4096×4096 píxels, que correspon a una àrea de 11.22×11.22 mm. Per al disseny del sistema òptic OSAM, vam establir com a objectiu augmentar el camp de visió fins a 3×3 mm. Amb la càmera seleccionada, això requereix un augment de

$$M = \frac{11.22}{3} = 3.75 \times . \quad (3.1)$$

Per un augment de $3.75 \times$, tenint en compte que la distància focal de l'objectiu de microscopi és de 46 ± 2 mm, la distància focal per a la lent de tub ha de ser de 172 ± 8 mm. La Taula 3.1 resumeix les especificacions més rellevants del sistema òptic OSAM.

Càmera	BFS-U3-244S8M-C (FLIR)
Mida de píxel	2.74 μ m
Àrea càmera	11.22×11.22 mm
Camp de visió	3×3 mm
Distància focal de la lent de tub	172 ± 8 mm
Distància focal de l'objectiu	46 ± 2 mm
Augment	$3.75 \times$

TAULA 3.1: Especificacions del sistema òptic OSAM.

El següent pas en el desenvolupament del sistema òptic va consistir en el disseny de la lent de tub. Per això, també vam tenir en compte que en aquest instrument es vol utilitzar la tècnica de seccionament òptic HiLo, explicada en el

capítol 2.1.4.3. Utilitzar la tècnica d'HiLo implica la multiplexació de dos canals d'il·luminació, un estructurat i un altre de camp clar, amb un *beam splitter*. També es requereix un altre *beam splitter* per afegir la càmera, per tant, en total la lent de tub n'ha d'incloure dos.

La motivació principal per dissenyar l'OSAM amb un seccionament òptic a través de HiLo [22, 74] és que aquesta tècnica, en contrast amb la microscòpia confocal tradicional [15, 16], no requereix equipament especialitzat, com un DMD. Això redueix significativament la complexitat i el cost de l'instrument. El disseny òptic també permet implementar la tècnica de variació de focus per obtenir imatges de seccionament òptic [19]. No obstant això, la tècnica HiLo presenta una major robustesa, ja que també pot ser utilitzada en superfícies llises. Això la fa més adequada pel sistema OSAM, motiu pel qual vam preferir utilitzar-la.

Així doncs, atès que l'objectiu seleccionat té una pupil·la de 50 mm, vam utilitzar lents amb un diàmetre de fins a 75 mm per mantenir l'obertura numèrica màxima de l'objectiu i evitar el vinyetatge. Vam realitzar el disseny òptic mitjançant el programa de traçat de rajos Zemax OpticStudio i vam incorporar una limitació addicional, l'ús exclusiu de lents comercials. Aquesta restricció, tot i que va incrementar la complexitat del procés de disseny, la vam establir amb l'objectiu de reduir els costos associats a la fabricació de les lents, ja que el sistema es planteja com a prova de concepte. Aquesta limitació va restringir la llibertat per seleccionar materials, curvatures i gruixos òptims, fet que va requerir un disseny que inclogués fins a cinc elements, dos singlets i tres doblets, per assolir el rendiment òptic desitjat. El disseny de la lent de tub es presenta a la Figura 3.1, mentre que la Taula 3.2 enumera les lents utilitzades en l'esquema, ordenades d'esquerra a dreta. Cal destacar que vam encolar les lents 5 i 6 mitjançant adhesiu òptic Norland, a causa de la baixa disponibilitat de lents comercials amb geometria de menisc, adequades per a les especificacions del disseny.

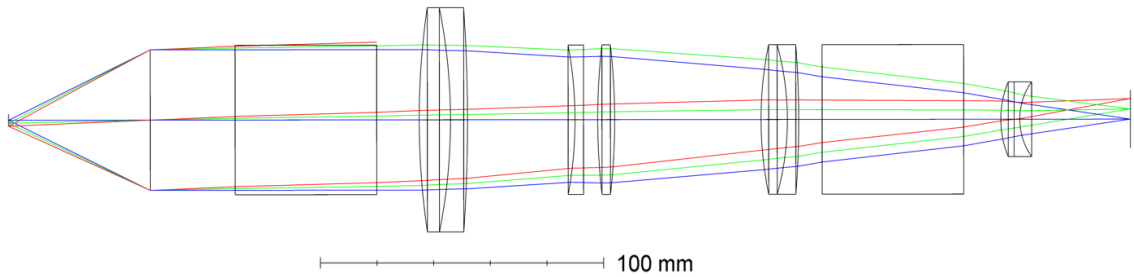


FIGURA 3.1: Disseny òptic de la lent de tub. Té una obertura de 50 mm d'entrada i corregeix fins a 3×3 mm de camp de visió al pla imatge.

A la Figura 3.2 es presenta la caracterització de la lent de tub mitjançant el programari Zemax OpticStudio. La lent de tub dissenyada té una distància focal de 169.7 mm i opera gairebé al límit de difracció en un camp de visió de 3×3 mm al pla objecte. La lent de tub incorpora dos *beam splitters*, el primer per multiplexar els dos canals d'il·luminació i el segon per la càmera. A la Figura 3.2 es pot observar la *modulation transfer function* (MTF) en el pla imatge, que mostra una freqüència de tall aproximada de 450 mm^{-1} als camps central (blau), 1.06 mm (verd) i 2.12 mm (vermell) en la diagonal del camp de visió. En els tres casos la MTF és propera a la teòrica en el límit de difracció, fet que confirma que la lent de tub és capaç de

Lent	Tipus	Diàmetre (mm)	Referència
1	Doblet	75	45419
2	Singlet	50	SLB-50-250NM
3	Singlet	50	SLB-50B-200PM
4	Doblet	50	DLB-50-200PM
5	Singlet	25	45128
6	Singlet	25	SLB-25-40NM

TAULA 3.2: Lents que s'han utilitzat per a la lent de tub (Edmund Optics i Opto-Sigma). Vam encolar les lents 5 i 6 amb l'adhesiu per a superfícies òptiques Norland i curat amb llum ultravioleta.

proporcionar una qualitat d'imatge consistent en tot el camp de visió dissenyat.

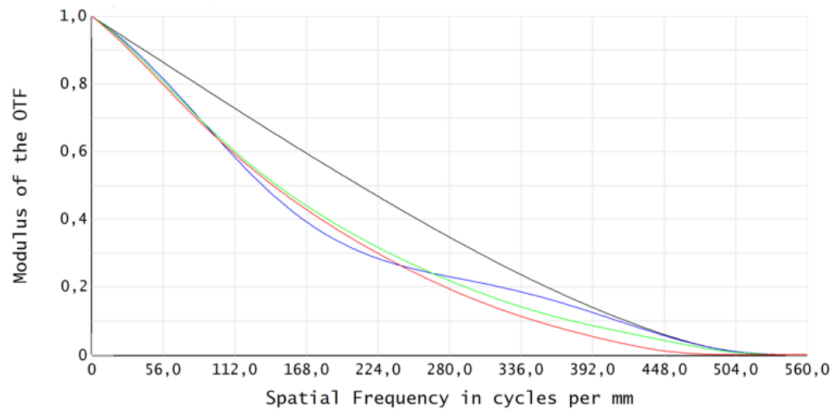


FIGURA 3.2: MTF en el pla imatge de la lent de tub en el programa de traçat de rajos pels camps central (blau), 1.06 mm (verd) i 2.12 mm (vermell) en la diagonal del camp de visió.

Per a caracteritzar la longitud focal de la lent del tub, vam substituir l'objectiu de microscopi per un objectiu 10×/0.3 NA (Nikon) amb una distància focal coneguda de 20 mm. Així vam mesurar l'augment resultant mitjançant la mateixa regla calibrada que per la caracterització de l'objectiu de Nikon. A la Figura 3.3 es mostra l'augment resultant i, utilitzant aquest mètode, vam mesurar una distància focal de 170 ± 10 mm. Aquest valor va permetre calcular l'augment global de l'OSAM, resultant en $3.7 \pm 0.3\times$. Els valors experimentals obtinguts compleixen perfectament amb els requeriments de camp de visió establerts, validant així el disseny del sistema òptic.

A continuació, es presenta el disseny opto-mecànic del sistema. A la Figura 3.4 es mostra l'esquema complet. Per tal d'implementar HiLo, es necessiten dos canals d'il·luminació, un de camp clar i un altre estructurat amb un patró. En aquesta Figura, el *beam splitter* inferior té la funció de combinar els dos canals d'il·luminació, i el superior serveix per combinar la càmera i la il·luminació. El canal d'il·luminació estructurada incorpora un patró fet d'una estructura periòdica de ratlles transmissives i reflectants, conegut com a patró *Ronchi*, amb una freqüència espacial de 20 mm^{-1} . En aquest canal estructurat s'utilitza la lent de tub perquè és necessari que el patró es projecti al pla de la mostra amb el màxim de contrast

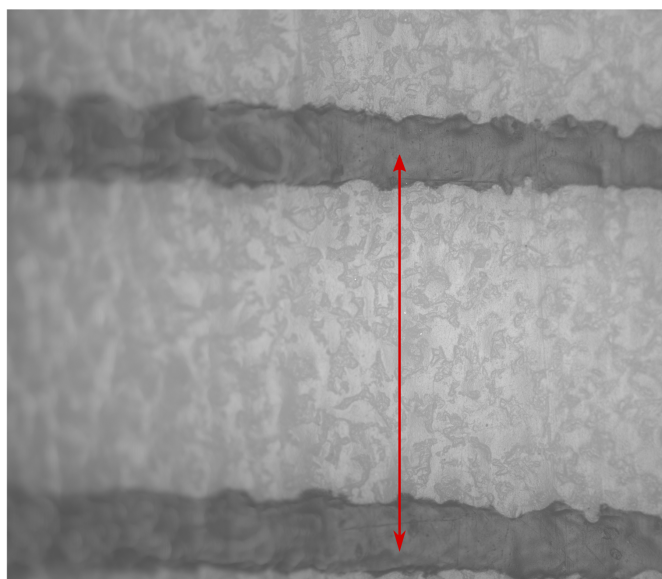


FIGURA 3.3: Caracterització de la distància focal de la lent de tub. La distància és de 8.5 mm, i per tant la distància focal de la lent de tub és de 170 ± 10 mm.

possible. Al contrari, pel canal de camp clar no és necessari projectar cap patró, i per tant vam utilitzar una lent més senzilla.

Per últim, per realitzar l'escaneig axial vam incorporar un motor lineal, necessari per obtenir la resposta axial, ja que es segueix la mateixa metodologia que s'ha explicat en el capítol anterior.

3.2. Caracterització òptica

Vam començar la caracterització òptica de l'OSAM amb la mesura de l'obertura numèrica de l'objectiu. El valor nominal proporcionat per Nikon, de 0.312, es refereix a quan s'utilitza l'objectiu en un sistema amb oculars. En canvi, en el nostre cas, en un principi utilitzàvem la pupil·la completa del sistema. A la Figura 3.5 es mostren els dos sistemes òptics, en l'a) el sistema d'estereomicroscòpia i en la b) el sistema òptic que s'utilitza en l'OSAM.

Per estimar l'obertura numèrica màxima de l'objectiu, vam col·locar un mirall inclinat al pla de mostra. Augmentar l'angle del mirall disminueix la quantitat de llum que és recollida per l'objectiu i, per tant, l'intensitat capturada per la càmera, tal i com es pot veure a la Figura 3.6. L'angle en el qual pràcticament no es recull llum va ser d'aproximadament 35° , que correspon a una obertura màxima de 0.57. No obstant això, l'objectiu no està corregit per treballar amb una obertura tan alta en estereomicroscòpia, ja que normalment s'utilitza la meitat de l'obertura per cada ocular, com es mostra a la Figura 3.5. Per això, vam afegir un diafragma obturador de 20 mm de diàmetre a prop del seu pla focal posterior per controlar l'obertura numèrica efectiva. Aquesta modificació va reduir l'obertura fins a aproximadament 0.26, un valor que vam considerar suficient per la majoria de superfícies de MA que hem estudiat, tal com es demostrarà més endavant en aquest capítol.

En comparació, els objectius més tradicionals que s'utilitzen en microscòpia i

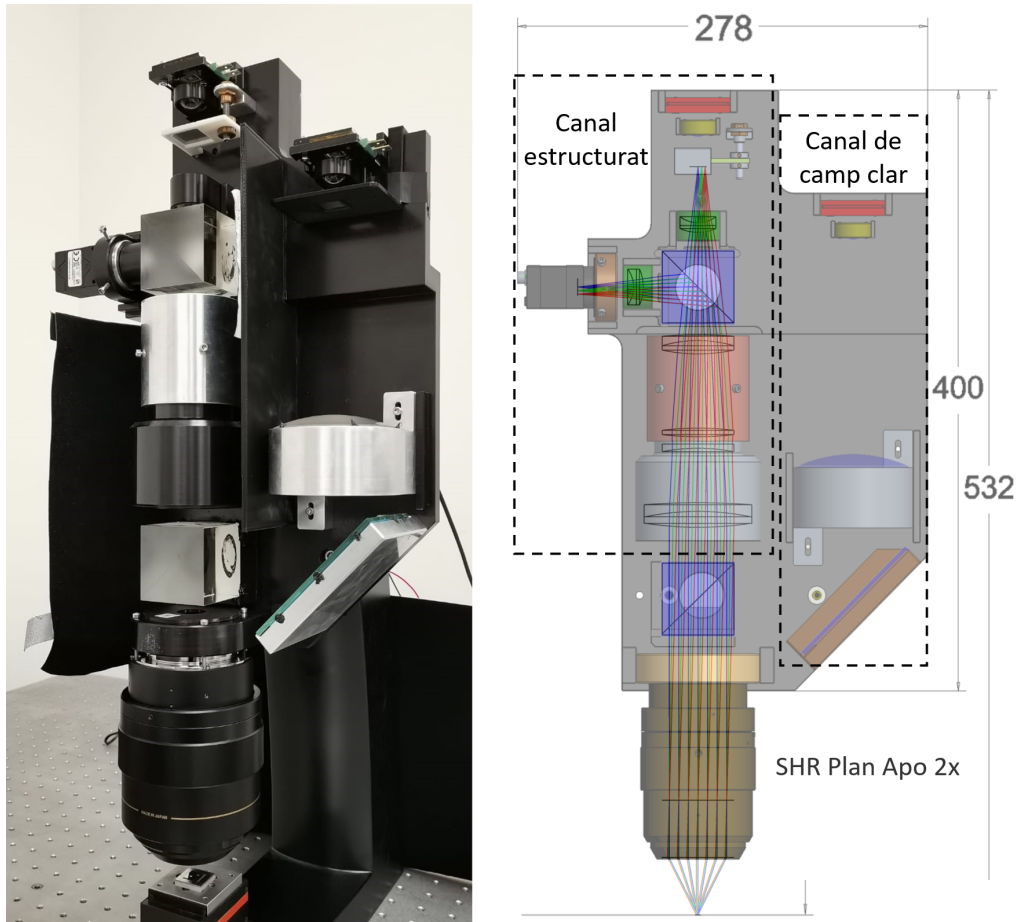


FIGURA 3.4: Esquerra) Fotografia del disseny òptic. Dreta) Esquema CAD corresponent. Pels dos canals d'il·luminació es fan servir LEDs (en vermell). La llum passa a través de les lents condensadores (groc), les lents, i finalment fins l'objectiu de microscopi. La senyal reflectida es fa imatge a través del canal estructurat fins a la càmera. La simulació de traçat de rajos s'inclou pels dos canals d'il·luminació i el d'imatge. Totes les unitats estan en mil·límetres.

que poden oferir un camp de visió similar a l'OSAM tenen obertures numèriques més reduïdes. Per exemple, alguns objectius de Nikon inclouen el $2.5\times/0.075$ NA, $5\times/0.15$ NA, i el $10\times/0.3$ NA. D'entre aquests, el més similar és el $5\times$, però té una obertura numèrica insuficient per la mesura de peces de manufactura additiva. En canvi, un augment de l'obertura fins a 0.26 permet reduir dels punts no mesurats i *spikes*, mentre que es manté controlada l'aberració esfèrica, que tendeix a augmentar considerablement amb l'obertura numèrica de l'objectiu.

Un cop caracteritzat l'objectiu, vam procedir a la caracterització del rendiment global del sistema òptic. En primer lloc, vam utilitzar un *target* de resolució USAF, que es mostra a la Figura 3.7a). La imatge de camp clar del *target* proporciona una mesura directa de la resolució lateral del sistema. El sistema òptic pot resoldre clarament totes les freqüències espacials presents fins a la freqüència màxima de 645 mm^{-1} (novè grup, tercer element). Per un anàlisi més detallat de la resolució del sistema i per estimar el seu límit òptic, vam utilitzar el mètode de l'*slanted edge* [75, 76]. A partir d'una única imatge d'una vora nítida i inclinada, tal com es veu a la Figura 3.7b), vam calcular la *modulation transfer function* (MTF). Com era

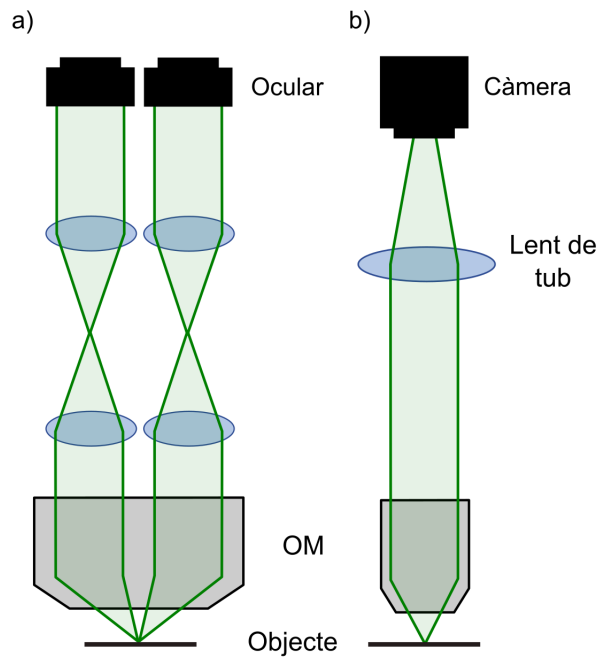


FIGURA 3.5: a) Sistema d'estereomicroscòpia amb dos oculars. En aquest sistema, només una part de l'obertura de l'objectiu es fa servir per a cada ocular. b) Sistema òptic de microscòpia de superfícies. En aquest cas, s'utilitza l'obertura completa de l'objectiu.

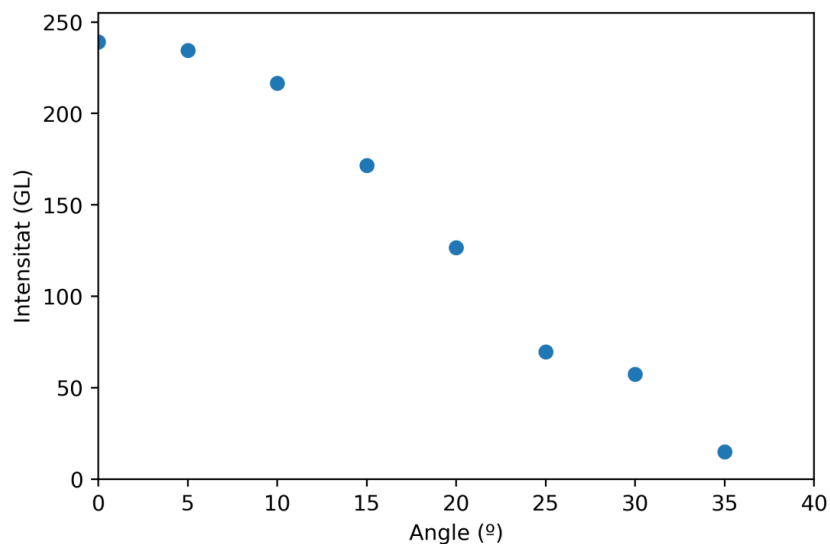


FIGURA 3.6: Intensitat mitjana observada en la càmera en funció de l'angle de la mostra. A 35° pràcticament no es recull llum, que correspon a una obertura numèrica de 0.57.

d'esperar, la MTF experimental presenta un decaïment progressiu cap a freqüències espacials elevades (Figura 3.7c). Aquest comportament és semblant al de la MTF teòrica per a un sistema monocromàtic al límit de difracció amb una obertura numèrica de 0.26. De fet, la freqüència lateral de tall per a la qual la MTF és de 0.1, és a 615 mm^{-1} , consistent amb la freqüència màxima resoluble utilitzant el *target* de resolució.

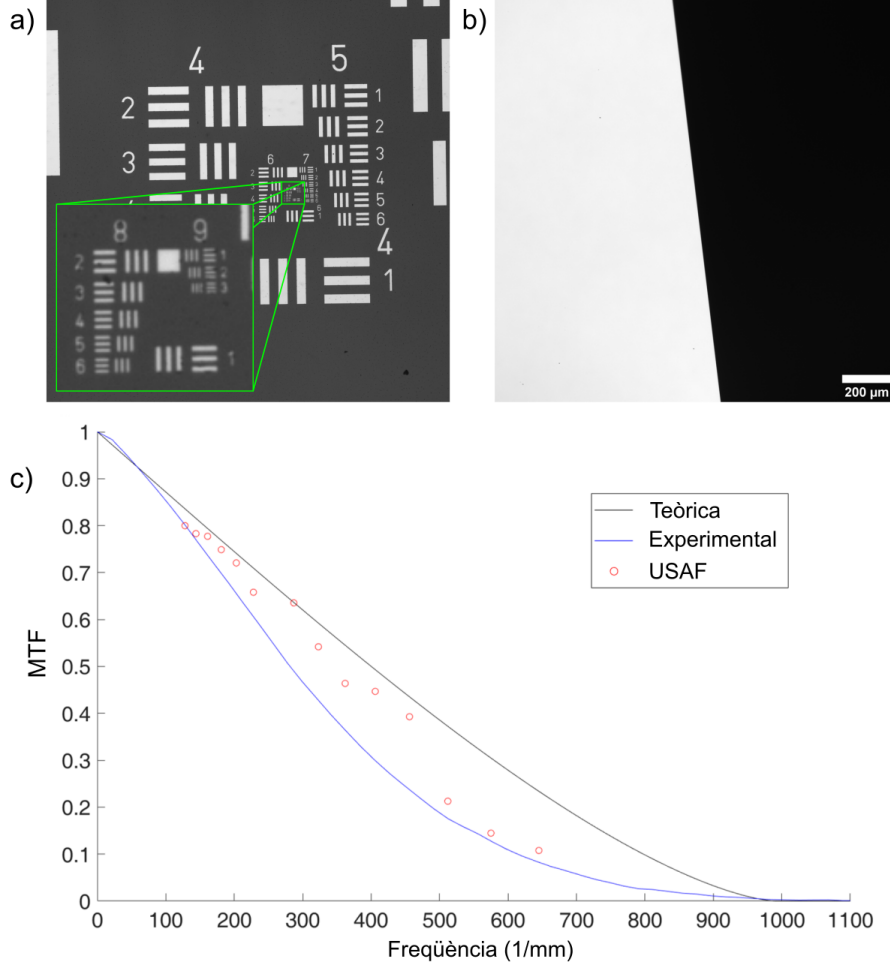


FIGURA 3.7: Imatges de camp clar adquirides amb l'OSAM de a) *Target* de resolució USAF; b) *Slanted edge*. c) *Modulation transfer function* obtinguda amb el mètode de l'*slanted edge* (blau) i amb les mesures de l'USAF (vermell). La corba negra és la MTF teòrica en un sistema limitat per difracció.

A continuació, vam analitzar el rendiment del sistema per obtenir informació tridimensional quantitativa d'una mostra. Per això vam fer servir dues mesures de materials certificats NPL tipus AIR B40 [77, 78] i una sèrie d'*step heights* tipus PGR (ISO 5436-1)[79]. Els resultats per a la mesura de la mostra NPL tipus AIR B40 es mostren a la Figura 3.8, que es comparen amb la topografia obtinguda amb un sistema confocal comercial (S neox, Sensofar) per a referència. Es pot observar una alta similitud qualitativa entre ambdues mesures. És important destacar que l'àrea capturada amb el sistema comercial a la Figura 3.8 és el resultat de l'*stitching* de nou camps de visió individuals, com es pot comprovar amb la presència d'algunes traces de l'*stitching* en la imatge. En canvi, vam mesurar la mateixa àrea total amb l'OSAM utilitzant una única mesura. Per aquesta mostra també vam calcular els

	OSAM	Sistema comercial	Valors certificats
Sa	$0.80 \pm 0.04 \mu\text{m}$	$0.80 \pm 0.04 \mu\text{m}$	$0.79 \pm 0.03 \mu\text{m}$
Sq	$1.01 \pm 0.03 \mu\text{m}$	$1.02 \pm 0.03 \mu\text{m}$	$1.01 \pm 0.02 \mu\text{m}$

TAULA 3.3: Paràmetres de textura Sa i Sq per a l'OSAM, el sistema comercial i els valors certificats de referència.

paràmetres de textura Sa i Sq a partir de 10 mesures diferents per l'OSAM i el sistema comercial. Els valors obtinguts es troben a la Taula 3.3. Les dues mesures són coherents amb els valors certificats.

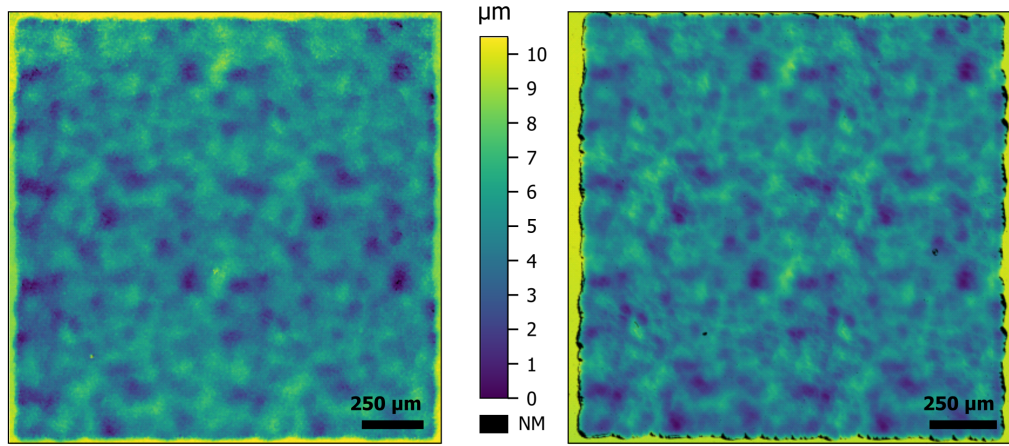


FIGURA 3.8: Mapes topogràfics de la mostra NPL tipus AIR B40. Esquerra) OSAM, amb paràmetres de textura $Sa = 0.80 \pm 0.04 \mu\text{m}$ i $Sq = 1.01 \pm 0.03 \mu\text{m}$. Dreta) Sistema confocal comercial (S neox, Sensofar) amb paràmetres de textura $Sa = 0.80 \pm 0.04 \mu\text{m}$ i $Sq = 1.02 \pm 0.03 \mu\text{m}$. L'àrea certificada de la mostra mesura $1.5 \times 1.5 \text{ mm}$ i la mesura amb el sistema comercial és el resultat de l'*stitching* de 3×3 mapes topogràfics.

En segon lloc vam mesurar una sèrie de mostres tipus PGR *step height* (segons ISO 5436-1) per quantificar el coeficient d'amplificació de l'eix z [80, 81]. A la Taula 3.4 estan representats els valors certificats i els obtinguts amb l'OSAM. Per il·lustrar el procés de mesura de l'altura, el perfil de la mesura d'un *step height* es mostra a la Figura 3.9. En aquesta mesura, els valors obtinguts acostumen a estar fora dels valors certificats a causa dels errors sistemàtics en el posicionament del motor. Aquesta prova serveix per calibrar el moviment axial del sistema òptic, tal com es descriu al principi de la secció 2.1. Per aconseguir una mesura precisa, s'utilitzen diferents valors d'*step height* i es calcula el factor que minimitza l'error sistemàtic. En aquest cas concret, el factor de calibració s'anomena coeficient d'amplificació en l'eix z (α_z).

Finalment, vam quantificar tres paràmetres metrològics de la ISO 25178-600 [82] per tal de quantificar el rendiment d'un sistema de mesura en àrea: la *flatness deviation*, el soroll de l'instrument i el coeficient d'amplificació en l'eix z [80]. Per la *flatness deviation* i el soroll de l'instrument vam obtenir $Sz = 67 \pm 20 \text{ nm}$ i $Sq = 62 \pm 3 \text{ nm}$, respectivament, i es veuen a la Figura 3.10. El valor de la Sz correspon al pic a vall més gran de tot el mapa topogràfic. Per determinar el coeficient d'amplificació de l'eix z vam utilitzar les mesures de les alçades dels *step heights* esmentats

	OSAM	Valors certificats
Step height 1	$7.62 \pm 0.06 \mu\text{m}$	$7.61 \pm 0.06 \mu\text{m}$
Step height 2	$10.2 \pm 0.1 \mu\text{m}$	$9.96 \pm 0.07 \mu\text{m}$
Step height 3	$22.04 \pm 0.07 \mu\text{m}$	$21.70 \pm 0.02 \mu\text{m}$

TAULA 3.4: Valors d'*step height* mesurats amb l'OSAM i els valors de certificats de referència.

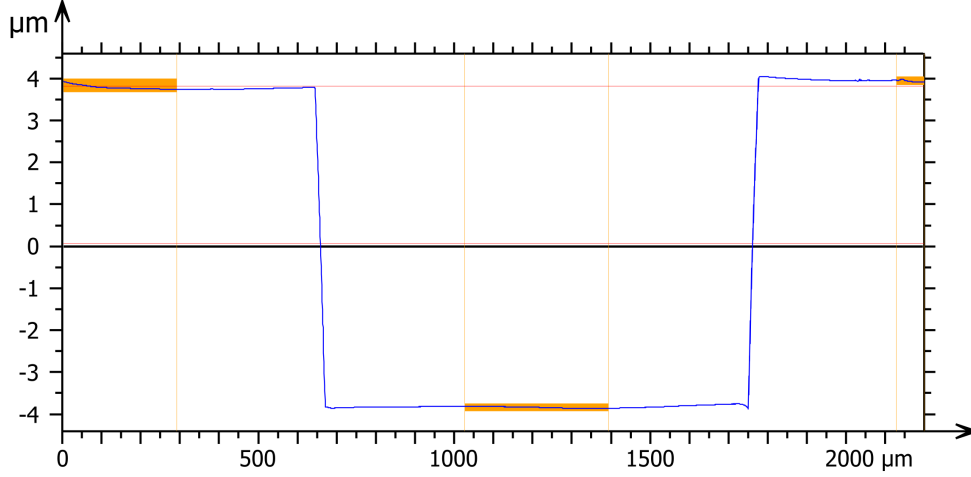


FIGURA 3.9: Perfil de la mostra esglaó mesurada d'acord amb la ISO 5436-1 A1. El valor obtingut és $7.62 \pm 0.06 \mu\text{m}$.

anteriorment, les quals van donar un resultat de $\alpha_z = 0.992$. Totes les incerteses són del tipus A i les vam obtenir a partir de 10 mesures diferents.

Els valors obtinguts en la *flatness deviation* i el soroll són els valors esperats per un sistema amb aquestes característiques d'obertura numèrica i camp de visió. En comparació, el sistema comercial confocal (S neox, Sensofar) equipat amb objectius $10\times/0.30 \text{ NA}$ i $20\times/0.45 \text{ NA}$ obté uns valors de soroll amb un Sq de 30 nm i 8 nm. En segon lloc, el coeficient d'amplificació representa una mesura quantitativa de l'error sistemàtic associat al desplaçament axial durant l'escaneig. Aquest valor acostuma a ser inferior a 1, però s'ha d'aproximar-hi el més possible, ja que això indica que l'error és mínim. En general aquest factor acostuma a estar per sobre de 0.98. Aquest error és considerat sistemàtic perquè es repeteix de manera constant en cada mesura i, per això, es calibra mitjançant el factor d'amplificació. Aquest procés de calibratge permet compensar l'error i garantir mesures més precises en les proves posteriors.

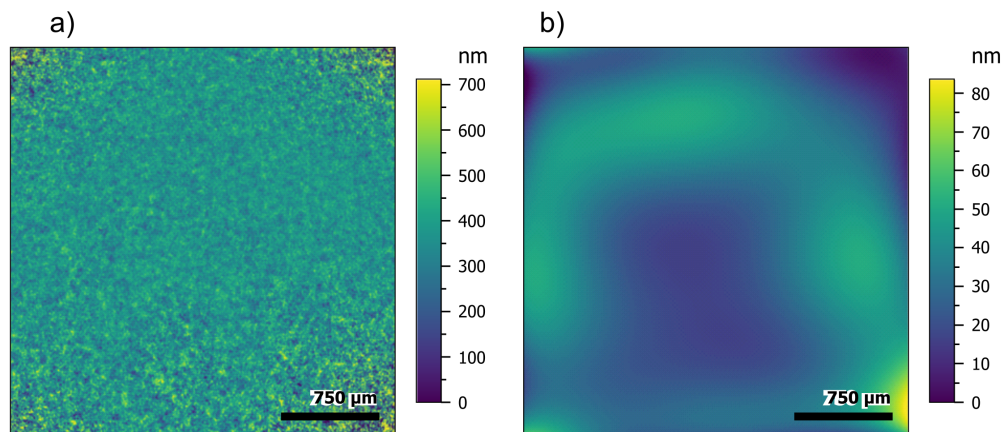


FIGURA 3.10: Una de les mesures del a) soroll del sistema d'acord amb la ISO 25178-600; i b) *flatness deviation*.

3.3. Caracterització topogràfica

Per tal de demostrar la capacitat de l'OSAM per mesurar mostres de MA, vam adquirir mapes topogràfics del prototip d'artefacte de rugositat 3DRS [83]. Aquest artefacte va ser fabricat utilitzant tècniques de MA i té quatre cares diferents (anomenades I, II, III i IV) que tenen com a objectiu il·lustrar els acabats de diversos processos de MA de metall. Les quatre cares es veuen a la Figura 3.11. Cada cara està dissenyada per tenir paràmetres de textura superficial diferents en comparació amb les altres cares. Les cares I i IV de l'artefacte són més rugoses que les cares II i III, que són més llises.

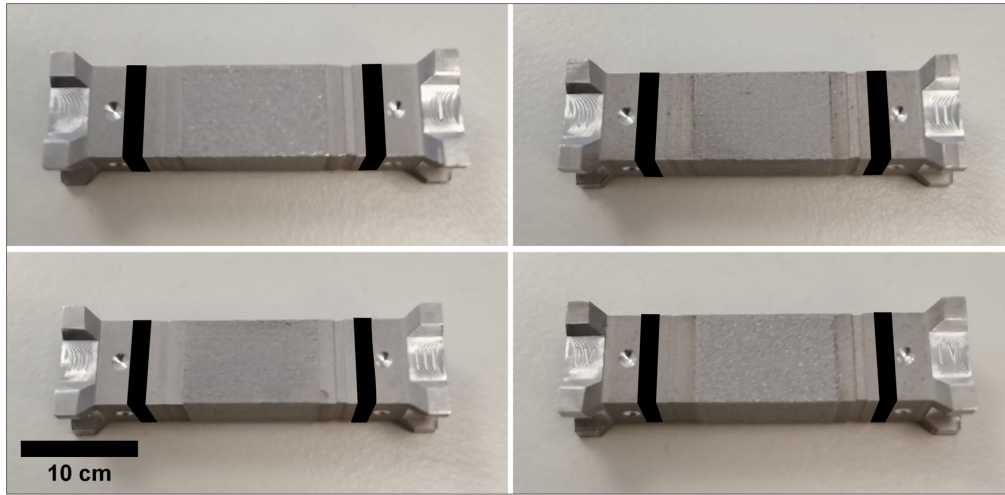


FIGURA 3.11: Fotografia de cadascuna de les cares del 3DRS de l'NPL. Les cares estan numerades amb números romans a cada costat.

En primer lloc, vam avaluar com depèn la mesura dels paràmetres de textura superficial fets amb l'OSAM, més precisament l' Sa , amb diferents mides de camps de visió. Degut a que l'artefacte 3DRS encara es tracta d'un prototip, no existeixen valors de referència de la Sa de les seves cares. Per aconseguir valors de referència, vam utilitzar un sistema confocal comercial (S neox, Sensofar) amb tres objectius diferents: $10\times/0.30$ NA, $20\times/0.45$ NA i $50\times/0.8$ NA. Així, a partir dels valors obtinguts amb aquest sistema, vam calcular la mitjana i la incertesa a partir de 10 mesures independents de cada cara de l'artefacte i en quatre àrees quadrades amb longituds laterals de 0.73 mm, 1.46 mm, 2.20 mm i 2.92 mm, que van constituir els valors de referència.

Posteriorment, vam repetir el mateix procediment utilitzant l'OSAM. Per aconseguir aquestes àrees de mesura vam necessitar l'escaneig lateral i l'*stitching* dels camps de visió individuals amb el sistema comercial per als objectius $10\times$ i $20\times$. L'objectiu $50\times$ té un camp de visió amb una grandària considerablement menor, així que només vam fer *stitching* de camps de visió fins aconseguir una àrea de mesura total de longitud lateral de 1.095 mm. Malgrat aquesta reducció en l'àrea mesurada, el vam utilitzar per proporcionar una referència amb objectius d'alta obertura numèrica. Per a l'OSAM, vam adquirir tota l'àrea de mesura de 2.92×2.92 mm amb una sola adquisició, i vam obtenir els camps de visió més petits que corresponen a les mateixes longituds laterals retallant la mesura a 1024, 2048, 3072 i 4096 píxels,

que van permetre una comparació directa.

Els resultats es mostren a la Figura 3.12. Per a tots dos sistemes, el valor mitjà de l'*Sa* roman aproximadament constant per sobre d'un determinat camp de visió, aproximadament 1.0 mm, mentre que la incertesa disminueix. Això indica que el camp de visió juga un paper crític, ja que ha de ser prou gran per capturar els components de baixa freqüència espacial de la topografia que són funcionalment rellevants. Per exemple, per a un camp de visió petit, la mesura podria incloure només un pic o una vall, que resulti en una mesura local que no és representativa de tota la superfície.

Aquest factor explica la gran incertesa amb l'objectiu 50×, ja que té el camp de visió més petit. Aquest efecte s'il·lustra a la Figura 3.13, on es veu una topografia completa de la cara I utilitzant l'objectiu 10× amb un *stitching* de 4 × 4 camps de visió (a) i dues subregions amb un camp de visió més petit de longitud lateral de 0.73 mm (b i c). Degut a la gran variació local de la textura, els valors obtinguts per l'*Sa* en els mapes topogràfics b) i c) són de 13.069 μm i de 7.710 μm, amb gairebé un factor dos de diferència. Aquests resultats destaquen la necessitat de mesurar grans àrees per obtenir resultats representatius. En general observem que, pel que fa a la mostra considerada, es requereix un camp de visió d'aproximadament 3 × 3 mm.

Per obtenir mesures representatives de peces de MA de metall amb una proporció prou baixa de punts no mesurats, no només es necessita un camp de visió alt, sinó també una obertura numèrica prou alta per capturar la llum reflectida de la superfície, que en MA té pendents locals elevats. Per això, vam avaluar l'impacte de l'obertura a través de la qualitat dels mapes topogràfics de l'OSAM i del sistema de mesura comercial. Específicament, vam obtenir mapes topogràfics de la mostra 3DRS utilitzant un diafragma amb diferents diàmetres. Per a l'OSAM, vam utilitzar obertures de 20 mm, 14 mm i 12 mm de diàmetre. Per al sistema de mesura comercial vam utilitzar un objectiu 20×/0.45 NA amb una obertura posterior de 9 mm, 6 mm i 3 mm. Els resultats per a l'OSAM i el sistema comercial es mostren a les Figures 3.14 i 3.15, respectivament. En aquestes dues figures, els píxels que es mostren en negre es consideren no mesurats, ja que la seva resposta axial no ha arribat a una ràtio senyal-soroll prou alta ni tampoc a un llindar mínim (un valor empíric seleccionat per l'usuari que depèn del tipus de mostra). En ambdós casos, quan el diàmetre del diafragma disminueix, el nombre de punts no mesurats augmenta.

Una avaluació quantitativa d'aquest efecte es presenta a la Figura 3.16, on es mostra el nombre de punts no mesurats en funció de l'obertura numèrica del sistema comercial (a) i en funció de la grandària del diafragma per a l'OSAM (b). S'inclouen els resultats obtinguts per a les cares I i II, representatives de superfícies relativament més rugoses i més llises que es poden trobar en peces de MA de metall. Pel sistema comercial es poden diferenciar dues regions. La primera regió correspon a obertures numèriques amb valors inferiors a 0.3, on hi ha una relació forta entre el nombre de punts no mesurats i l'obertura numèrica. La segona regió correspon a valors d'obertura superiors a 0.3, on el nombre de punts no mesurats té una variació més baixa. Aquest resultat indica que la major part de la superfície de la mostra té pendents que es poden mesurar amb una obertura inferior a 0.3. Per a obertures numèriques més grans de 0.3 el nombre de punts no mesurats només disminueix lleugerament i, només uns pocs píxels addicionals (aproximadament un 7 % en ambdós casos), es mesuren correctament. Les mateixes tendències s'observen

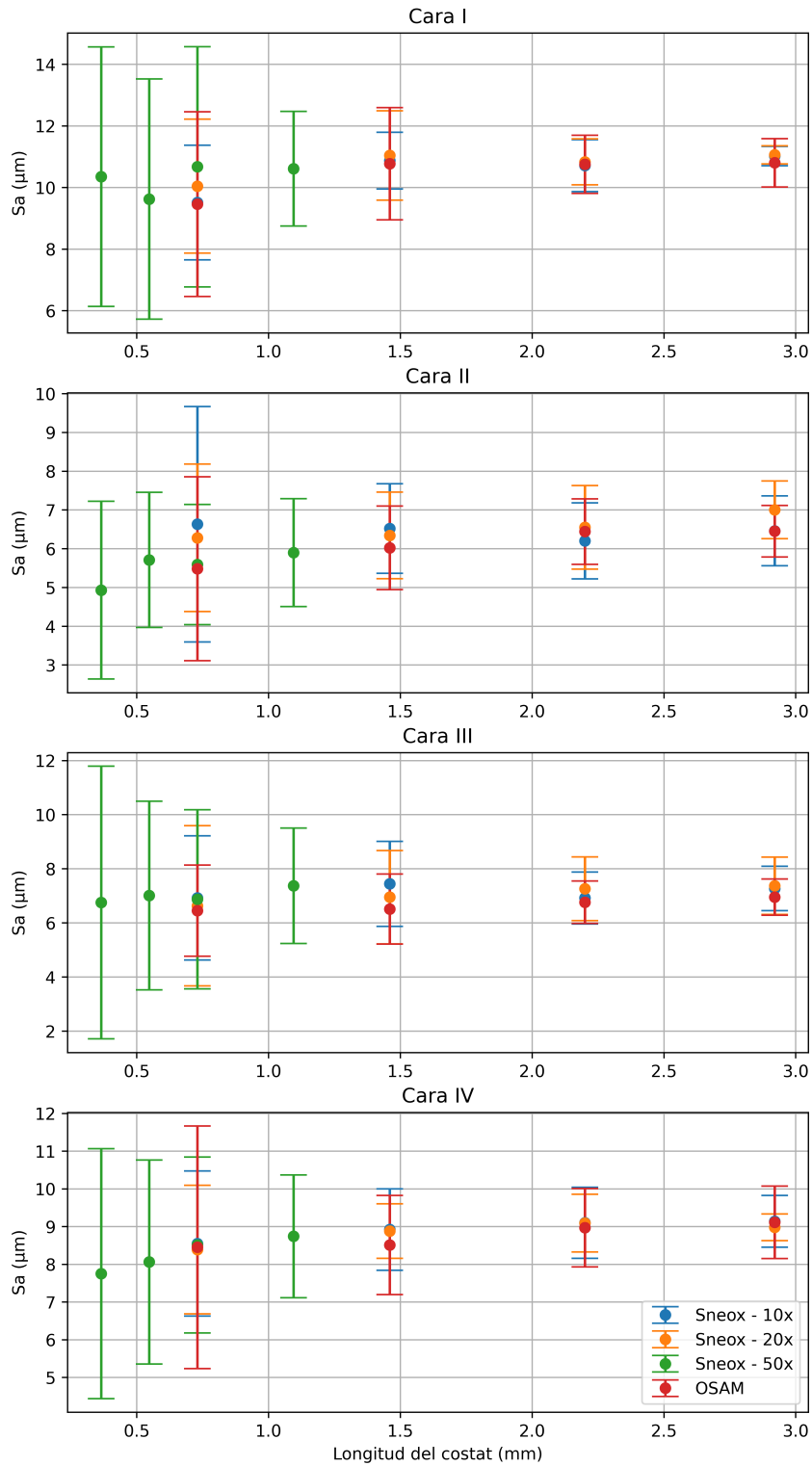


FIGURA 3.12: Valors obtinguts de l'Sa en funció de l'àrea mesurada. Les barres d'error representen la incertesa al 95% de confiança, obtinguda a partir de 10 mesures diferents. Hi estan representats els valors obtinguts amb l'OSAM i el sistema confocal comercial fent servir objectius de microscopi 10×/0.3 NA, 20×/0.45 NA i 50×/0.8 NA.

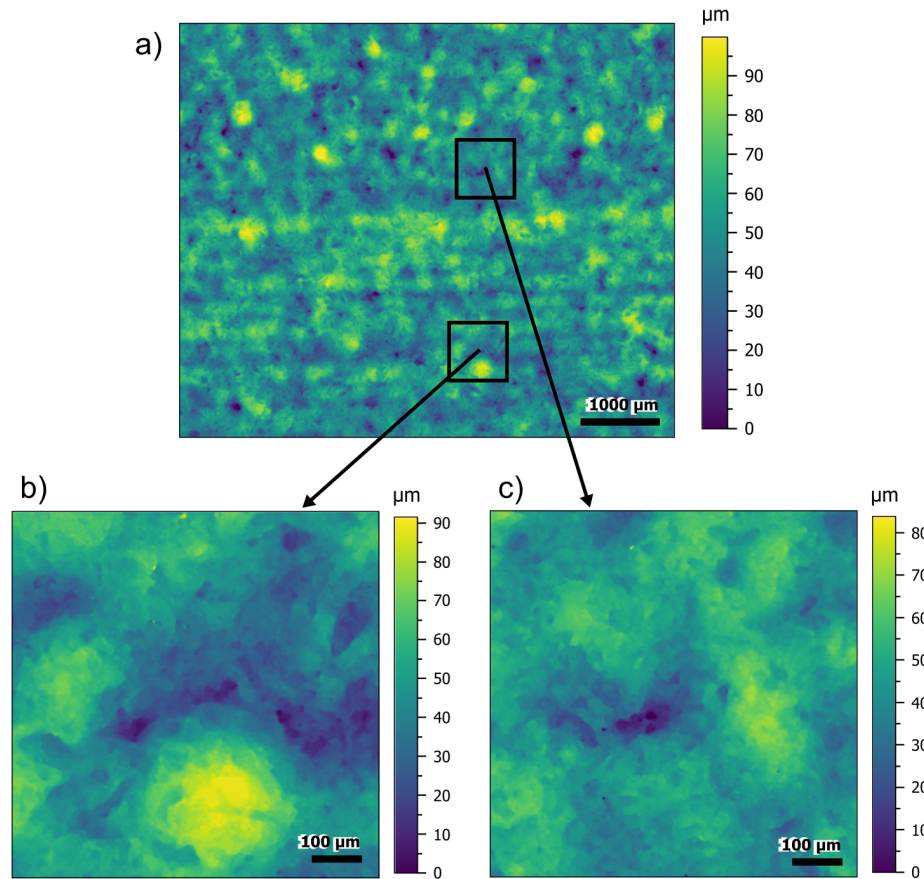


FIGURA 3.13: Representació de la importància de mesurar amb camps de visió grans. a) Mapa topogràfic de la cara I obtingut a través de l'*stitching* de 4×4 camps de visió amb un objectiu 10×/0.3 NA. Els quadres negres representen dos regions d'interès de 700 µm de costat. b) Mapa topogràfic de la primera regió d'interès amb una Sa de 13.069 µm. c) Mapa topogràfic de la segona regió d'interès amb una Sa de 7.710 µm. La disparitat entre els valors obtinguts posa de manifest la necessitat de mesurar en grans àrees.

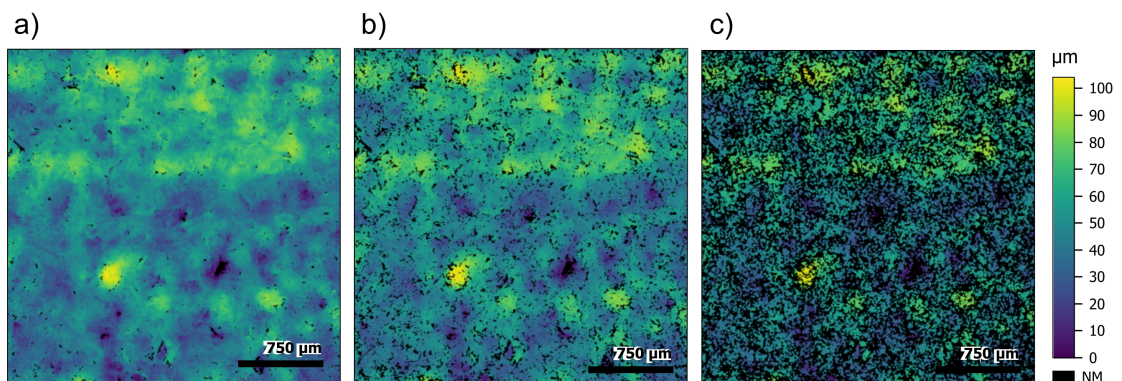


FIGURA 3.14: Mapes topogràfics de la cara I obtinguts amb l'OSAM fent servir una obertura de a) 20 mm, b) 14 mm, i c) 12 mm. A mesura que l'obertura es tanca, l'obertura numèrica de l'objectiu disminueix i augmenta el número de punts no mesurats.

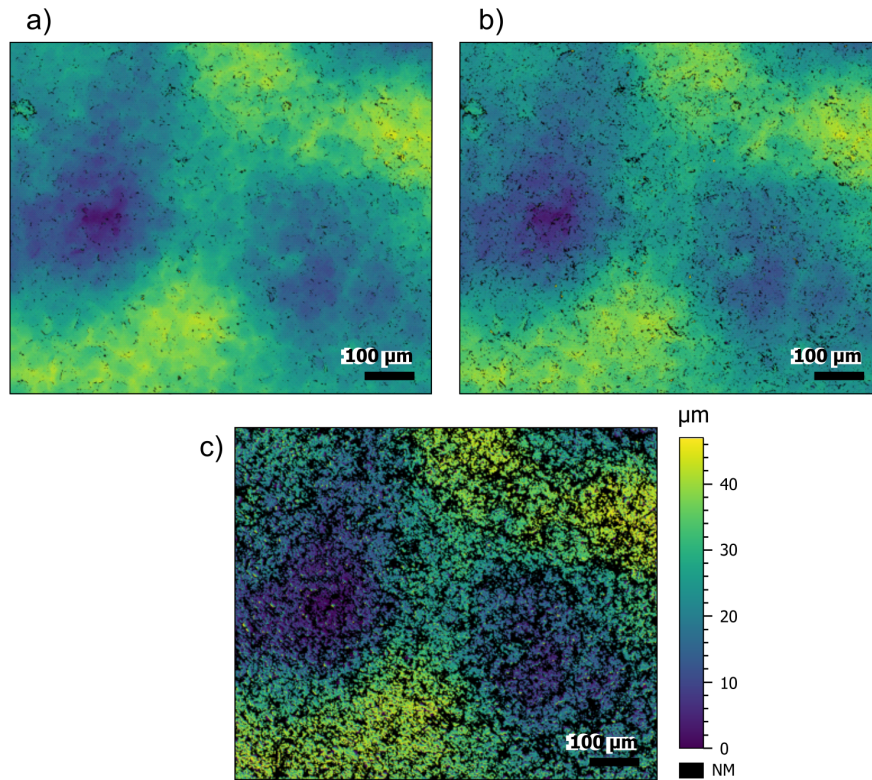


FIGURA 3.15: Mapes topogràfics de la cara II obtinguts amb el profilòmetre comercial S neox i l'objectiu 20×/0.45 NA fent servir una obertura de a) 9 mm, b) 6 mm, i c) 3 mm.

per a les mesures amb l'OSAM. Com es pot observar en el gràfic a) de la Figura 3.16, el llindar apareix al voltant dels 15 mm de diàmetre del diafragma. En conjunt, aquests resultats indiquen que, en mesurar peces de MA de metall, s'hauria de fer servir una obertura numèrica d'almenys 0.3, que es tradueix en un diafragma mínim de 15 mm en el disseny de l'OSAM.

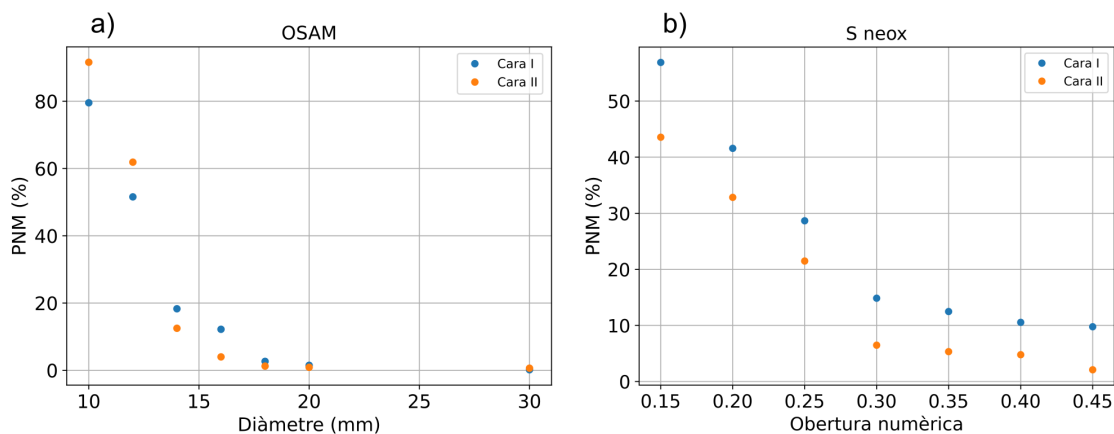


FIGURA 3.16: Representació del percentatge de punts no mesurats. a) En funció del diàmetre de l'obertura per l'OSAM. b) En funció de l'obertura numèrica pel profilòmetre òptic comercial S neox. Vam escollir les cares I i II com a representatives de superfícies rugoses i llises, respectivament.

Una quantitat baixa de punts no mesurats en general té un efecte negligible en el mapa topogràfic final, ja que tota la topografia es pot reconstruir correctament de manera algorítmica mitjançant la interpolació dels píxels veïns. No obstant, quan el nombre de punts no mesurats és elevat, la interpolació falla perquè els PNM s'acumulen en grans agrupacions, tal com es veu a les Figures 3.14c) i 3.15c). Per tant, l'ús d'una obertura numèrica prou alta és imprescindible. Desafortunadament, els objectius convencionals amb obertura suficient proporcionen augments més alts, com per exemple el $20\times/0.45$ NA i $50\times/0.8$ NA, que comporta una pèrdua del camp de visió i conseqüentment la necessitat de l'*stitching*, que provoca un increment del temps de mesura. El sistema OSAM, en canvi, assoleix els objectius de disseny, amb una obertura numèrica suficient per una reconstrucció completa del mapa topogràfic. A més, proporciona un camp de visió gran sense un increment prohibitiu en el temps d'adquisició. Aquesta combinació fa que el sistema sigui especialment adequat per a l'anàlisi eficient de superfícies de manufactura additiva.

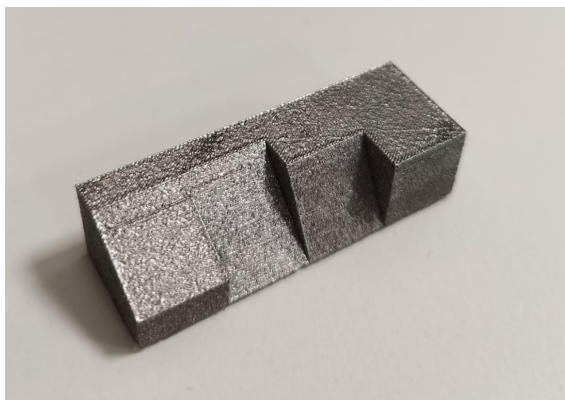


FIGURA 3.17: Espècimen fabricat amb làser PBF. Les dimensions són aproximadament de $40 \times 14 \times 10$ mm.

Per il·lustrar encara més aquest *trade-off* entre el camp de visió i l'obertura numèrica i, destacar el benefici que proporciona l'OSAM, vam mesurar la superfície d'una mostra fabricada amb PBF en un instrument Renishaw AM250. La peça es mostra a la Figura 3.17.

Vam adquirir mesures utilitzant el sistema confocal comercial amb els objectius següents: $5\times/0.15$ NA, $10\times/0.30$ NA, $20\times/0.45$ NA i $50\times/0.8$ NA. Els resultats de les mesures es mostren a la Figura 3.18, on s'indica a sobre de cada mapa topogràfic amb quin objectiu el vam obtenir. La compensació entre el camp de visió i la qualitat de la mesura, qualitativament a través del nombre de punts no mesurats, és evident. Els objectius amb obertures numèriques més altes proporcionen millors mesures però perden la capacitat d'adquirir un camp de visió estadísticament significatiu. També vam incloure mesures utilitzant l'objectiu de $5\times/0.15$ NA, ja que tot i que la qualitat de les mesures és clarament deficient, proporciona un camp de visió similar a l'OSAM.

La topografia que es mostra a la part inferior de la Figura 3.18 la vam obtenir utilitzant l'OSAM a la mateixa ubicació aproximada. En aquest cas hem indicat, per a referència, la mida equivalent dels camps de visió proporcionats pel sistema comercial utilitzant els objectius enumerats anteriorment. Com es pot observar, l'OSAM pot proporcionar mapes topogràfics amb un baix nombre de punts no mesurats en

un camp de visió relativament ampli. Les característiques de la mesura obtinguda amb el sistema comercial (utilitzant cadascun dels objectius) i l'OSAM es mostren a la Taula 3.5, incloent la freqüència de mostratge al pla de la mostra i el percentatge de punts no mesurats. L'OSAM proporciona un camp de visió significativament més ampli de 2.92×2.92 mm amb la proporció més baixa de PNM, aproximadament d'un 7%. A més, la qualitat de la mesura es pot observar a la Figura 3.19, on s'ha representat un perfil horitzontal extret de les topografies presentades a la Figura 3.18. Els objectius de baixa obertura numèrica no són capaços de mesurar correctament la superfície. A més, produeixen artefactes significatius i PNM. En canvi, els objectius d'obertura més alta proporcionen mesures més precises tot i tenir un camp de visió reduït. Les dades de l'OSAM proporcionen un baix nombre de punts no mesurats, alhora que cobreixen un camp de visió relativament gran.

Objectiu	NA	Camp de visió		Mostreig ($\mu\text{m}/\text{pixel}$)	PNM (%)
		Y (mm)	X (mm)		
5×	0.15	2.8	3.3	1.38	32.57
10×	0.30	1.4	1.68	0.69	19.99
20×	0.45	0.7	0.84	0.34	11.48
50×	0.80	0.28	0.34	0.14	9.11
OSAM	0.26	2.92	2.92	0.71	7.02

TAULA 3.5: Característiques de cada objectiu representat en la Figura 3.18, incloent el camp de visió, mostreig i punts no mesurats.

Les altes pendents i la textura de les peces de MA de metall imposen unes especificacions òptiques importants per als sistemes de mesura de superfícies. Per evitar un nombre significatiu de punts no mesurats és desitjable una obertura superior a 0.3. Alhora, es requereix una àrea de mesura mínima d'aproximadament 3×3 mm per capturar les freqüències espacials més baixes que són rellevants en les superfícies típiques de les peces de MA de metall. En general, cap objectiu de microscopi tradicional compleix simultàniament aquestes característiques, però els objectius que més s'apropen són el $10\times/0.3$ NA o el $20\times/0.45$ NA. Aquests dos ofereixen una obertura prou alta, però venen amb el requisit de fer *stitching* de diversos camps de visió individuals per reconstruir l'àrea a mesurar, la qual cosa consumeix temps i a més pot donar lloc a errors durant l'*stitching*.

El sistema OSAM, en canvi, permet l'adquisició de camps de visió d'aproximadament 3×3 mm mantenint una obertura numèrica de 0.26. Aquest resultat s'aconsegueix gràcies a la combinació d'un sistema òptic específicament dissenyat per a aquesta aplicació i una càmera amb una quantitat de píxels un ordre de magnitud superior a la de les càmeres tradicionals.

En general, els microscopis òptics tradicionals acostumen a utilitzar càmeres de 2048×2048 píxels (4 megapíxels), mentre que l'OSAM arriba fins a 4096×4096 píxels (16 megapíxels). Aquest elevat nombre de píxels és imprescindible per mantenir un camp de visió ampli sense comprometre la resolució lateral i caracteritzar adequadament les freqüències espacials més elevades de la mostra. En conseqüència, aquest sistema trasllada el problema de l'*stitching* a la necessitat de gestionar un *data rate* molt elevat, ja que cada imatge conté cinc cops més d'informació. Aquesta exigència es manifesta en la velocitat màxima de la càmera, que es limita a 12 fotogrames per

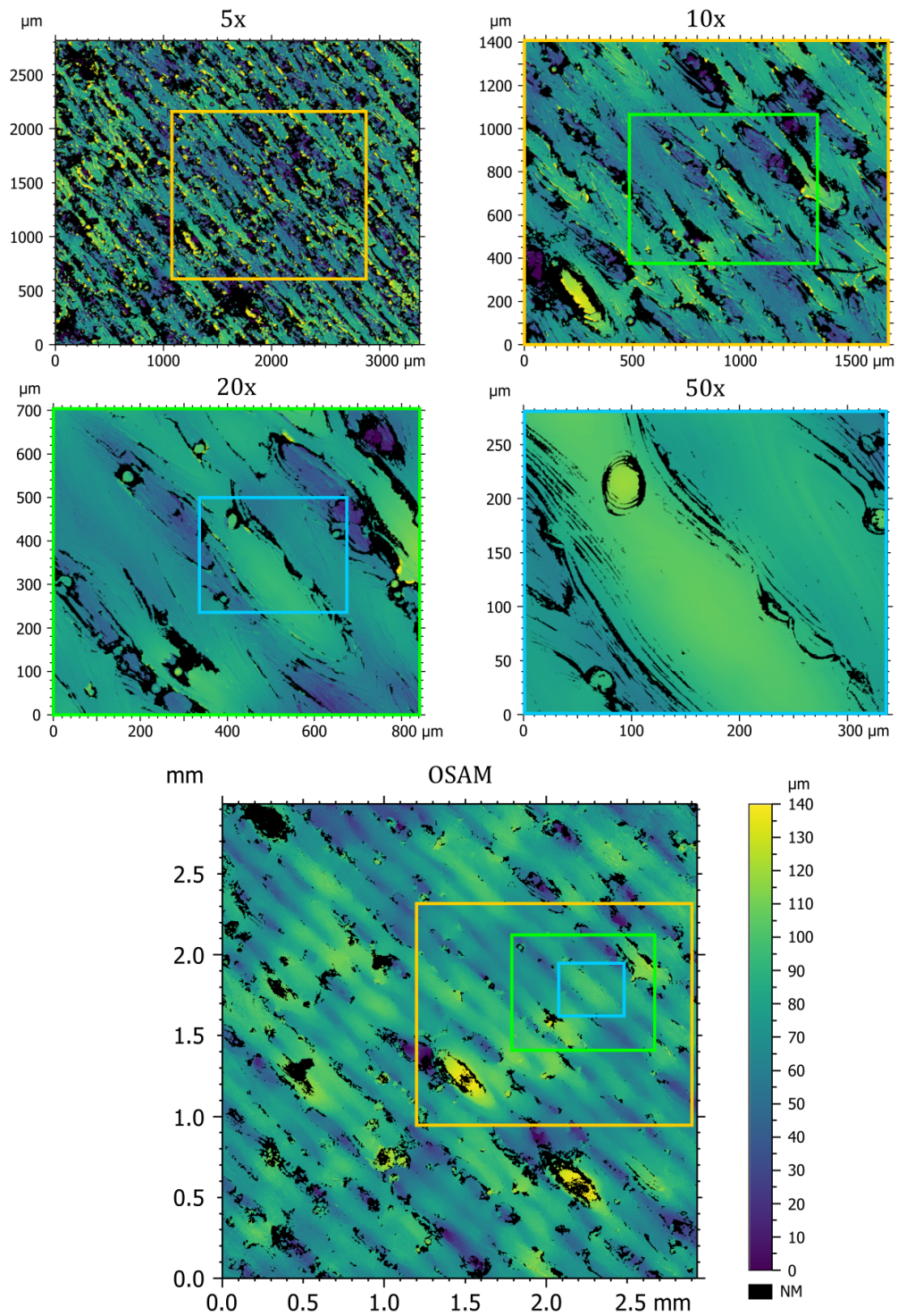


FIGURA 3.18: Mapes topogràfics de la superfície plana de l'espècimen fabricat amb PBF. A la part superior es veuen les topografies obtingudes amb el profilòmetre òptic comercial i els objectius 5×/0.15 NA, 10×/0.3 NA, 20×/0.45 NA i 50×/0.8 NA. A la part inferior es veu el mapa topogràfic obtingut amb l'OSAM, amb els camps de visió corresponents al sistema comercial indicats per referència. Qualitativament, l'OSAM és capaç d'adquirir mapes topogràfics acurats que no contenen artefactes i amb pocs punts no mesurats.

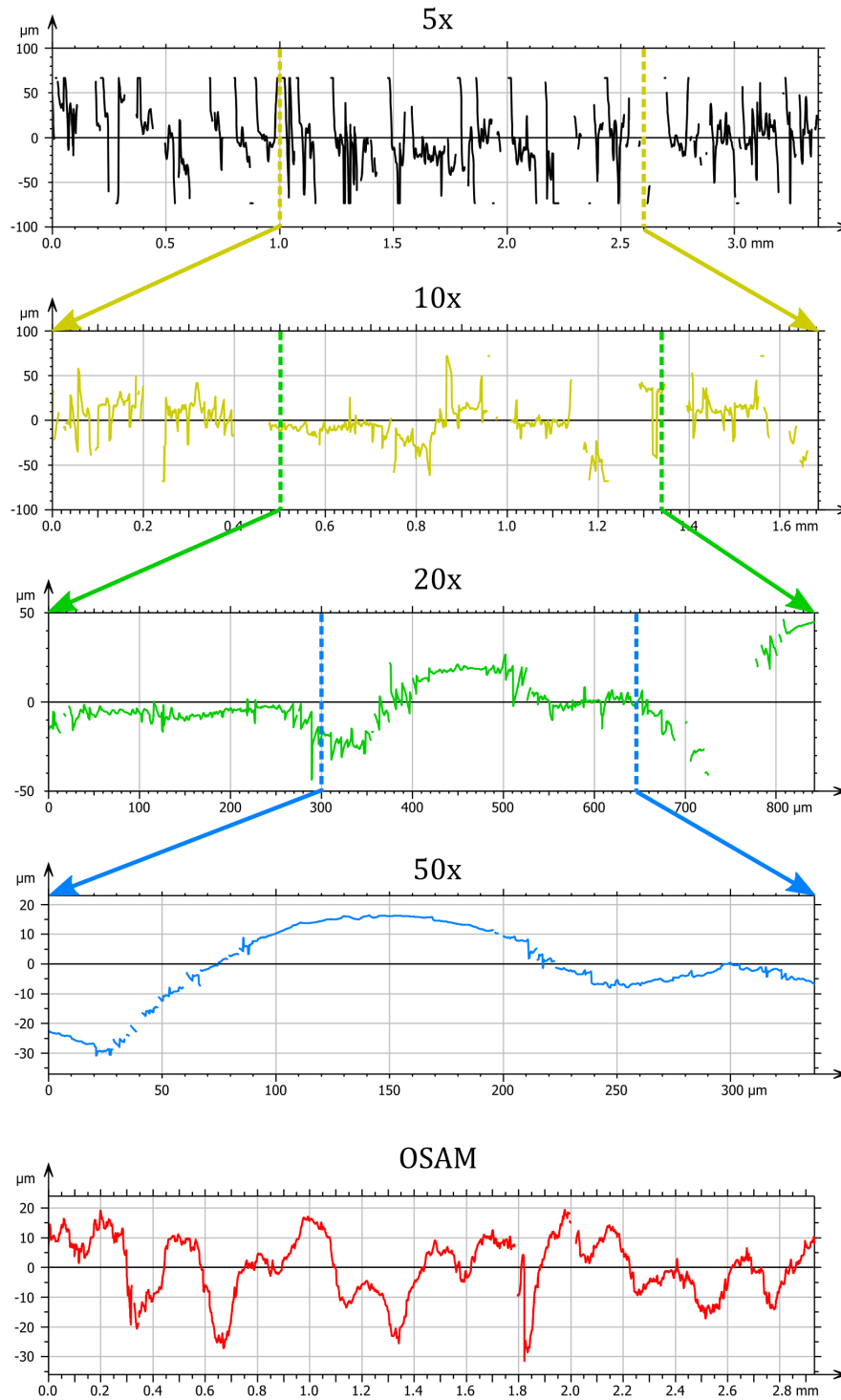


FIGURA 3.19: Perfils dels mapes topogràfics de la Figura 3.18. De dalt a baix, cadascun obtingut el profilòmetre comercial S neox i els objectius 5×/0.15 NA, 10×/0.3 NA, 20×/0.45 NA i 50×/0.8 NA. El perfil inferior correspon a l'OSAM.

segon, mentre que altres càmeres més convencionals poden assolir valors entre un i dos ordres de magnitud més alts. Així, la necessitat de mantenir una resolució lateral elevada, juntament amb l'escaneig axial de la mostra, imposa un límit en la capacitat d'adquisició de dades que ve donat per la pròpia tecnologia.

Com a alternativa per realitzar adquisicions més ràpides, vam desenvolupar una tècnica innovadora, que es detalla al capítol següent (4). Aquesta tècnica redefineix el paradigma de l'escaneig axial establert fins ara en l'estat de l'art (2) i que segueix el sistema OSAM. La principal aportació és la reducció significativa del nombre d'imatges necessàries per a la reconstrucció topogràfica, que permet minimitzar el temps total d'adquisició del mapa topogràfic.

3.4. Alt rang dinàmic

En l'apartat anterior s'ha presentat l'OSAM, el sistema òptic dissenyat expressament per mostres de MA. Durant el desenvolupament d'aquest sistema òptic vam observar les característiques d'aquest tipus de mostres i, més precisament, vam notar que una de les dificultats per mesurar correctament és deguda a les variacions molt altes de la reflectivitat de la mostra. En general, aquestes variacions de reflectivitat són causades per la combinació de materials amb propietats òptiques diferents, que interaccionen de manera desigual amb la llum. En el cas de la MA, cal tenir en compte que les mostres solen presentar una rugositat elevada i pendents locals pronunciats. Això provoca que les zones amb pendents elevats reflecteixin la llum fora de l'obertura numèrica de l'objectiu. Com a resultat, es produeix una disminució de la intensitat de la llum reflectida en aquestes àrees, que es pot interpretar com una variació aparent de la reflectivitat, fins i tot quan la mostra estigui composta d'un únic material.

Aquest problema és especialment crític en les tècniques de metrologia òptica, ja que és imprescindible que la mostra estigui adequadament il·luminada per obtenir resultats òptims. Aquestes tècniques, tal com s'ha explicat a l'estat de l'art, requereixen seccionar les imatges adquirides per calcular el mapa topogràfic de la superfície. Per garantir els millors resultats, les imatges no poden estar ni saturades ni massa fosques. Tanmateix, el rang dinàmic de les imatges està limitat per la digitalització a 8 bits, que suposa un repte significatiu quan les mostres presenten reflectivitats molt dispars. Si l'exposició de la càmera s'ajusta per optimitzar la captura de les zones més reflectants, les àrees menys reflectants tindran nivells de llum massa baixos, i el senyal de seccionament òptic resultant tindrà un SNR insuficient. En canvi, si l'exposició s'adequa a les zones menys reflectants, les àrees més reflectants quedaran saturades, fent impossible calcular correctament el seccionat òptic.

A falta d'alternatives, la solució consisteix a trobar un punt intermedi en l'exposició de la imatge, ja sigui a través de modificar la intensitat de llum o el temps d'adquisició de la càmera. El *trade-off* és que cap zona podrà estar completament ben il·luminada, que comporta una pèrdua de senyal de seccionament òptic i en definitiva una reducció del SNR. És per això que vam implementar un algoritme d'alt rang dinàmic per tal de resoldre el problema plantejat.

Les tècniques d'alt rang dinàmic (*high dynamic range*, HDR) són àmpliament reconegudes i utilitzades en camps com la fotografia, l'astrofísica i també en la metrologia òptica. Normalment, aquestes es basen l'adquisició de múltiples imatges amb nivells d'exposició diferents, seguit de la seva combinació per produir una imatge HDR. A diferència d'altres camps, en els quals els algoritmes es basen exclusivament en produir aquesta imatge HDR final, la metrologia òptica no requereix necessàriament la combinació d'aquestes imatges. Enlloc d'això, l'objectiu últim és produir un mapa topogràfic de la mostra millor [84]. Per això, vam enfocar l'algoritme a minimitzar el nombre de punts no mesurats i mitigar els artefactes de mesura a través de la combinació de topografies adquirides amb diferents nivells d'exposició. El mètode proposat és senzill i no requereix procediments complexos de fusió d'imatges que poden donar lloc a mesuraments erronis i artefactes topogràfics.

Abans de l'escaneig, els nivells d'exposició han de ser determinats per l'usuari.

En el cas de les peces de MA de metall, les superfícies generalment consten de dos tipus distintius d'àrees. Una categoria consisteix en píxels molt brillants i reflectants que són propensos a la saturació ràpida, mentre que l'altra categoria comprèn píxels foscos que necessiten una intensitat de llum substancialment més alta per aconseguir una imatge adequada. En general, s'ha observat que dos nivells d'exposició són suficients per capturar el rang dinàmic de les peces de MA de metall. No obstant això, és possible que mostres amb una àmplia gamma de materials, que abasten des d'àrees reflectants fins a opaques, i amb diferents pendents locals, que van des de la reflexió especular fins a la difusa, requereixin una adquisició de més de dos nivells d'exposició per augmentar encara més el rang dinàmic.

Per realitzar l'adquisició HDR, es realitza un escaneig axial convencional mentre, en cada pas d'escaneig, s'adquireixen dues imatges amb els nivells d'exposició configurats. Després de l'escaneig, es calcula la resposta axial en cada píxel per a ambdós nivells d'exposició. Llavors, s'identifica la resposta axial amb el senyal més alt per a cada píxel i s'utilitza per determinar el valor de l'altura corresponent a aquell píxel. És important assenyalar que, augmentar l'exposició, en general, no resulta en un augment del senyal de resposta axial. Això només ocorre si les imatges no estan saturades. Pel contrari, si les imatges estan saturades, el contrast local disminueix, fet que provoca una disminució del senyal de seccionament òptic. Aquesta circumstància es produeix a causa de l'ús de la tècnica HiLo per calcular imatges de seccionament òptic, però també seria el cas d'altres tècniques que es basen en il·luminació estructurada com la variació de focus i la microscòpia confocal. Aquest efecte es pot observar en les respostes axials que es mostren a la Figura 3.20. Per a àrees fosques es prefereix una exposició més alta, mentre que per a àrees reflectants, una exposició més alta produeix un senyal de resposta reduït.

Finalment, l'algorisme inclou un pas addicional amb l'objectiu de suprimir els *spikes* i els artefactes de mesura. En les imatges de camp clar adquirides, si es detecta que la imatge està saturada, es força l'ús de la resposta axial amb una exposició baixa. Com s'ha explicat anteriorment, si la imatge adquirida està saturada, el seccionat òptic serà baix, i per tant es pot pressuposar que s'utilitzarà la resposta axial de l'exposició baixa. No obstant això, cal tenir en compte que, a mesura que la mostra es desplaça fora de focus, pot succeir que la imatge deixi d'estar saturada o parcialment saturada. En aquest cas, podrien haver-hi píxels amb un contrast local elevat, tot i estar fora de focus. Això provocaria un pic significatiu en la resposta axial, i l'algorisme utilitzaria la resposta axial de l'exposició alta, que generaria un *spike* molt pronunciat. Per tant, aquest pas resulta especialment important, ja que força l'ús de la resposta axial baixa i redueix de manera significativa la quantitat d'artefactes en el mapa topogràfic.

Els resultats de l'algoritme HDR es mostren a la Figura 3.21, en la qual vam mesurar la superfície d'una peça metàl·lica de MA. Vam obtenir els mapes topogràfics utilitzant l'exposició baixa (a), l'exposició alta (b) i la topografia HDR (c) és la combinació utilitzant l'algorisme proposat. En el mapa topogràfic amb l'exposició baixa la majoria dels píxels no mesurats estan principalment situats en àrees de baixa reflexió. Això es produeix perquè les seves respostes axials són més baixes que un determinat llindar, ja que els algoritmes de reconstrucció normalment inclouen un llindar en la resposta axial per assignar els píxels sense senyal suficient com a no mesurats. En canvi, en el mapa topogràfic d'exposició alta, els punts no mesurats

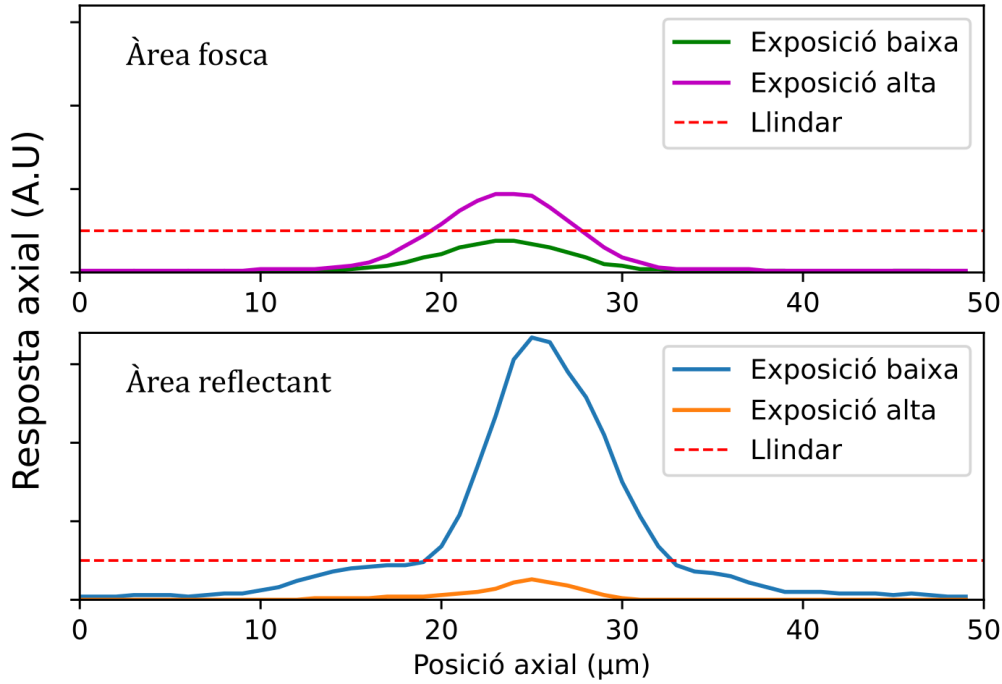


FIGURA 3.20: Respostes axials capturades a nivells alt i baixos d'exposició per una àrea fosca i una reflectant. Augmentar l'exposició en zones fosques és idoni, ja que augmenta la resposta axial i els punts no mesurats es redueixen. Al contrari, per les zones reflectants, augmentar l'exposició satura la imatge, de manera que es redueix el contrast i la resposta axial decreix.

són principalment a causa de la saturació de les imatges de camp clar. Degut a això, els mapes topogràfics amb exposició baixa i alta tenen punts no mesurats que són complementaris entre ells. Per tant, la seva combinació en la topografia HDR té una quantitat reduïda de PNM i artefactes de mesura.

Per acabar, vam comparar l'algoritme HDR aplicat al sistema OSAM i a un perfilòmetre òptic comercial (S neox, Sensofar). A tal efecte, vam adquirir topografies de la mateixa mostra AM de metall amb quatre objectius de microscopi diferents ($5\times/0.15$ NA, $10\times/0.3$ NA, $20\times/0.45$ NA i $50\times/0.8$ NA, Nikon) en el sistema comercial i els vam superposar totes en una sola vista, com es mostra a la Figura 3.22. El compromís entre els objectius és clar: les obertures numèriques més altes proporcionen una millor precisió i una quantitat més baixa de NMP, però a canvi d'un camp de visió reduït. També incloem el mapa topogràfic d'aproximadament la mateixa ubicació obtinguda amb l'OSAM, en aquest cas amb el camp complet de 4096×4096 píxels, en el qual hem indicat com a referència els camps de visió proporcionats pel sistema comercial. L'OSAM, en conjunt amb l'algoritme HDR és capaç de proporcionar mesures precises de superfície de peces de MA de metall sobre un gran camp de visió, alhora que manté una quantitat reduïda de punts no mesurats.

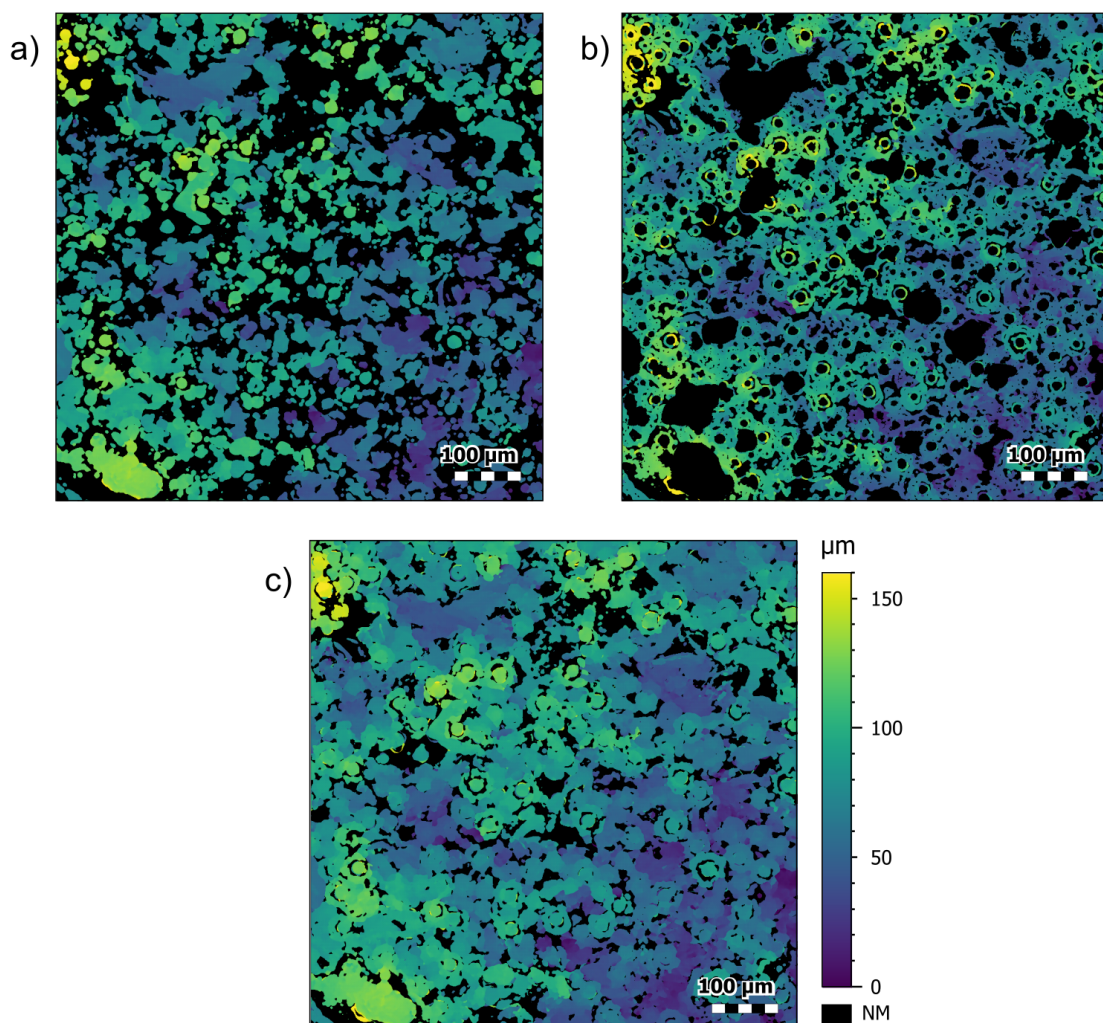


FIGURA 3.21: Mapes topogràfics obtinguts amb l'OSAM en una regió de $730 \times 730 \mu\text{m}$. a) Mapa topogràfic obtingut amb una exposició baixa i amb un 41.7% de PNM. b) Mapa topogràfic obtingut amb una exposició alta i amb un 41.7% de PNM. c) Mapa topogràfic obtingut amb la combinació dels dos anteriors i amb un 17.2% de PNM. En l'exposició baixa, la majoria de PNM són àrees fosques, mentre que en la exposició alta són àrees brillants. Els PNM de cada mapa topogràfic són complementaris, de manera que la combinació resulta en una quantitat menor.

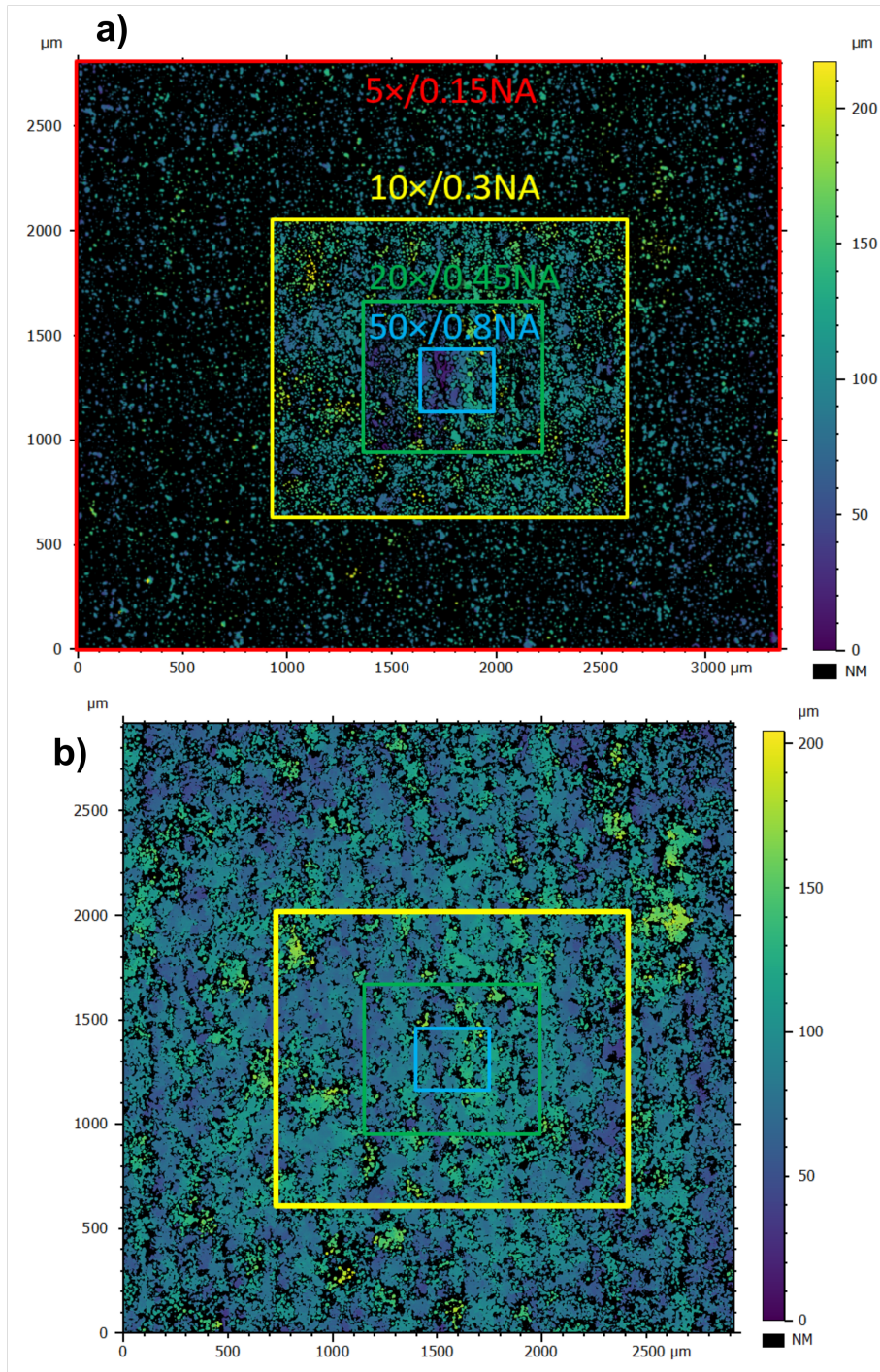


FIGURA 3.22: Mapes topogràfics de la superfície d'una mostra manufacturada amb MA de metalls. a) Mapes topogràfics super-imposats obtinguts amb el sistema comercial S neox i els objectius 5×/0.15 NA, 10×/0.3 NA, 20×/0.45 NA i 50×/0.8 NA. Per cada mapa topogràfic els punts no mesurats són 88.22%, 63.30%, 62.95% i 40.24%, respectivament. b) Mapa topogràfic obtingut amb l'OSAM de la mateixa zona amb els camps de visió corresponents al sistema comercial indicats per referència. L'OSAM té un camp de visió similar al 5× però és capaç d'adquirir topografies amb un nombre reduït de punts no mesurats (31.66%) i menys artefactes de mesura.

3.5. Combinació amb tècniques de control del focus

L'OSAM permet l'obtenció de mapes topogràfics en camps de visió extensos sense requerir d'*stitching*, però aquests beneficis venen a canvi d'altres desavantatges. Tal com s'ha explicat abans, hi ha limitacions en el *data rate*, que imposa un límit en la capacitat d'adquisició de dades que ve donat per la pròpia tecnologia de l'escaneig axial. Per altra banda, com que el camp de visió és elevat, totes les lents tenen una pupila considerablement gran que incrementa significativament el pes del capçal de mesura. Un dels elements que més contribueix a aquest augment és l'objectiu de microscopi, que com en aquest cas és de estereomicroscòpia, és un pes molt major que els objectius tradicionals, que oscil·len al voltant de 200 g. Aquest pes addicional fa que el moviment d'escombrat axial sigui més lent, presenti més errors de posicionament i, en general, sigui menys robust.

Per aconseguir un capçal més lleuger, la solució més evident consisteix a dissenyar lents que siguin primes i elaborades amb vidres de baixa densitat. Aquesta estratègia, no obstant, redueix les possibilitats de disseny òptic, i esdevé un límit per a sistemes òptics d'alta qualitat. Per tant, és essencial explorar alternatives per realitzar l'escombrat axial sense necessitat de moure el capçal òptic. En la secció 2.1.5 ja s'han presentat diferents metodologies per dur a terme aquest escombrat, ja sigui amb lents varifocals o amb l'enfocament remot. A continuació, detallem la implementació de les dues estratègies, així com una anàlisi òptica dels sistemes resultants, que va permetre avaluar cada tècnica per utilitzar-la a l'OSAM.

3.5.1 Prova de concepte de l'enfocament remot

Per demostrar el concepte de l'enfocament remot, vam utilitzar dues parelles d'objectius Nikon 20×/0.45 NA i 50×/0.8 NA. Una llista completa dels elements òptics emprats es pot veure a la Figura 3.23.

Com a prova de concepte d'aquesta estratègia vam mesurar la PSF en diferents posicions axials en un sistema òptic tradicional i en un amb enfocament remot. Així, vam poder determinar quan el sistema deixa de ser limitat per difracció i comença a aparèixer aberració esfèrica.

A tal efecte, vam projectar un *pinhole* al pla de la mostra de l'objectiu. La mida del *pinhole* la vam escollir per tal que la seva imatge fos sempre més petita que la resolució espacial de l'objectiu de microscopi. En aquest cas la mida física és de 5 µm, que forma una imatge de 250 nm per l'objectiu 20× i de 100 nm pel 50×. En ambdós casos, la mida de la projecció es troba molt per sota el límit de resolució del sistema, de manera que la imatge del *pinhole* correspon efectivament a la PSF del sistema. Així, movent axialment la mostra, és possible caracteritzar la PSF en diferents posicions axials de la mostra.

En el cas del sistema d'enfocament remot, un cop s'ha mogut la mostra axialment es pot reenfocar a través del segon objectiu (branca vermella de la Figura 3.23). En canvi, amb un sistema òptic convencional, el reenfocament s'ha de fer movent físicament la càmera, ja que no hi ha cap altre element òptic per compensar el desenfoc de la mostra. Aquest fet provoca que el sistema no compleixi la condició d'Abbe, i per tant s'afegeixen aberracions en la imatge adquirida per la càmera. En el primer cas, com que sí es compleix la condició d'Abbe, s'hauria d'observar una

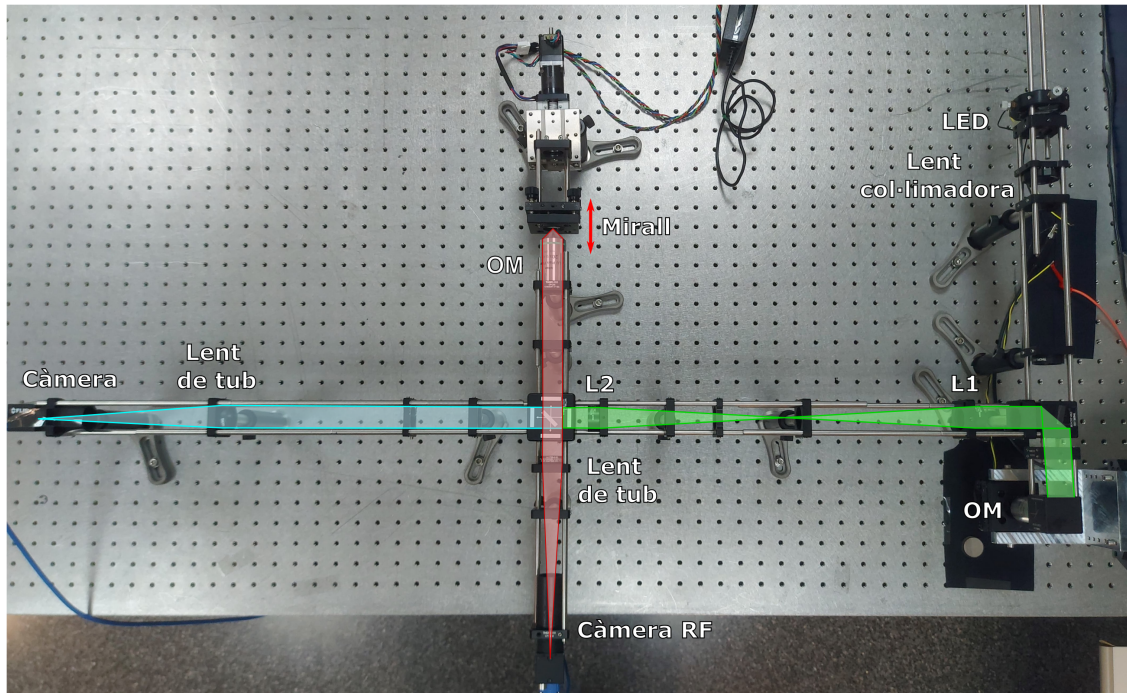


FIGURA 3.23: Sistema òptic convencional (blau) i d'enfocament remot (vermell) amb dos objectius de microscopi Nikon $20\times/0.45$ NA. En verd hi ha el camí comú dels dos sistemes òptics. Vam muntar aquest sistema per tal de comparar els resultats de l'enfocament remot amb el sistema òptic convencional.

PSF constant al llarg de totes les posicions axials.

Els resultats obtinguts estan representats a la Figura 3.24, on es veuen les PSFs adquirides per a cada objectiu amb el sistema d'enfocament amb la càmera (EC) i amb l'enfocament remot (ER). Cada columna de PSFs està normalitzada respecte al màxim comú de totes les imatges. D'aquesta manera, una reducció en intensitat està directament relacionada amb una reducció de la qualitat òptica de la PSF. De la mateixa manera, l'allargament de la PSF en qualsevol direcció significa que hi ha més aberracions presents en la PSF i, per tant, que el sistema òptic té una pitjor qualitat òptica.

En el cas del $20\times/0.45$ NA el reenfocament amb la càmera manté una PSF constant en la major part del rang axial explorat. Com que aquest objectiu té una obertura numèrica reduïda, quan es reenfoca la càmera no apareix una gran quantitat d'aberració esfèrica que empitjori la PSF. D'aquesta manera, la PSF es manté constant i només a l'extrem del rang es veu com es comença a degradar. En l'enfocament remot es veu un comportament similar: la PSF es manté constant tot i que té una forma més allargada.

Per altra banda, amb l'objectiu $50\times/0.8$ NA, com que l'obertura numèrica ha augmentat, la PSF ja no es manté constant amb l'enfocament amb la càmera i en les posicions allunyades de l'origen es veuen PSFs molt aberrades. En el cas de l'enfocament remot, la qualitat òptica tampoc es manté constant i apareix aberració esfèrica com en el cas anterior. Això indica que el sistema no està alineat correctament, o que hi ha algun element òptic que afegeix aberracions, ja que teòricament la PSF hauria de mantenir-se aproximadament constant.

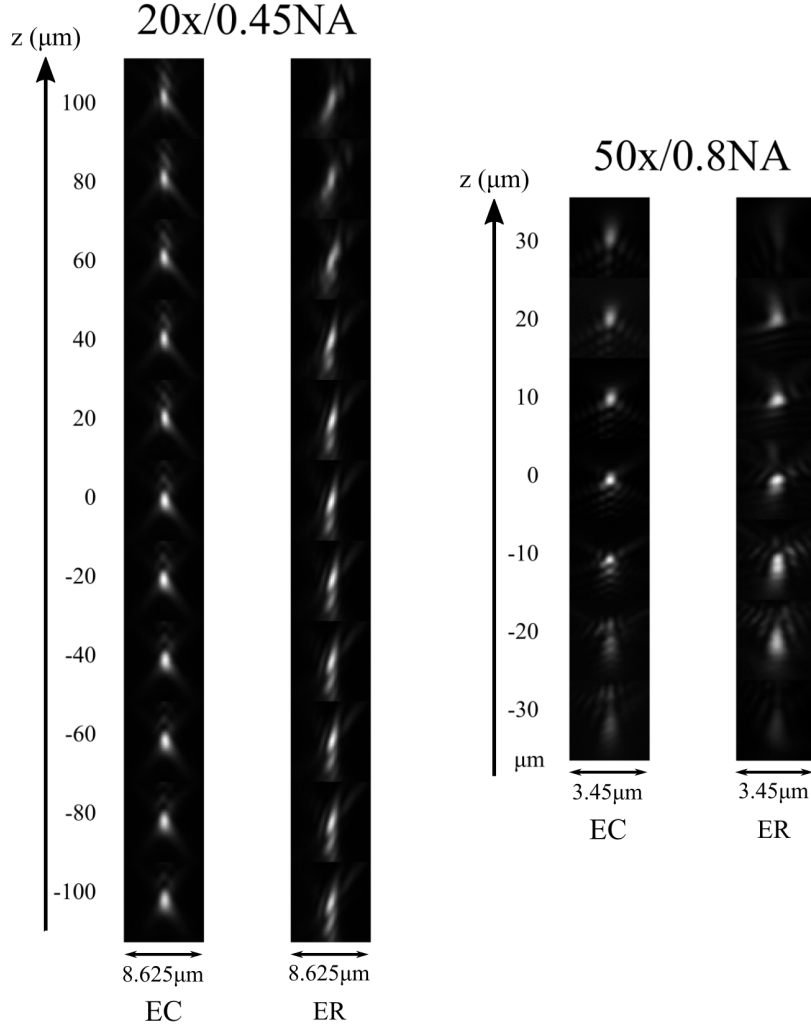


FIGURA 3.24: Comparació de les PSFs obtingudes amb el sistema òptic convencional reenfoquant la càmera (EC) i amb l'enfocament remot (ER) amb els objectius 20×/0.45 NA i 50×/0.8 NA.

Els resultats obtinguts no són els esperats, ja que s'hauria de veure molta diferència entre les PSFs amb el sistema òptic convencional i enfocament remot. Més precisament, en aquelles posicions axials allunyades de l'origen, és on més aberració esfèrica s'acumula en el sistema convencional. Els resultats, però, no mostren això, sinó que en ambdós casos les PSFs són molt semblants, i fins i tot es podria argumentar que les del sistema convencional són lleugerament millors.

En comparació amb els experiments que s'han trobat en la literatura, en la majoria de casos s'utilitzen només objectius amb una obertura numèrica molt alta, de fins a 1.4 [42, 43]. Això suggereix que aquesta tècnica aporta beneficis amb objectius que tenen una obertura numèrica molt alta, situació en què l'aberració esfèrica és dominant. En canvi, amb objectius amb més baixa obertura numèrica els beneficis de l'enfocament remot no són tan importants. A més, degut a la complexitat del sistema òptic i del seu alineament, la conclusió que vam extreure és que és millor optar per altres alternatives de reenfoquant, com és el cas de lents varifocals. Aquests sistemes són més senzills de muntar i a més no necessiten un objectiu extra, com en

el cas del reenfocament remot, que també redueix el seu cost d'implementació.

3.5.2 Prova de concepte de lent varifocal

Com a prova de concepte del sistema de reenfocament amb lent varifocal vam utilitzar una lent varifocal (Corning Varioptic D-A-58) amb 5.8 mm d'obertura i amb un rang de potències de -5 a 10 diòptries. Per això, vam muntar un sistema òptic $4f$ que es mostra a la Figura 3.25. També vam seguir la mateixa caracterització de les PSFs del sistema òptic que en el cas del reenfocament remot.

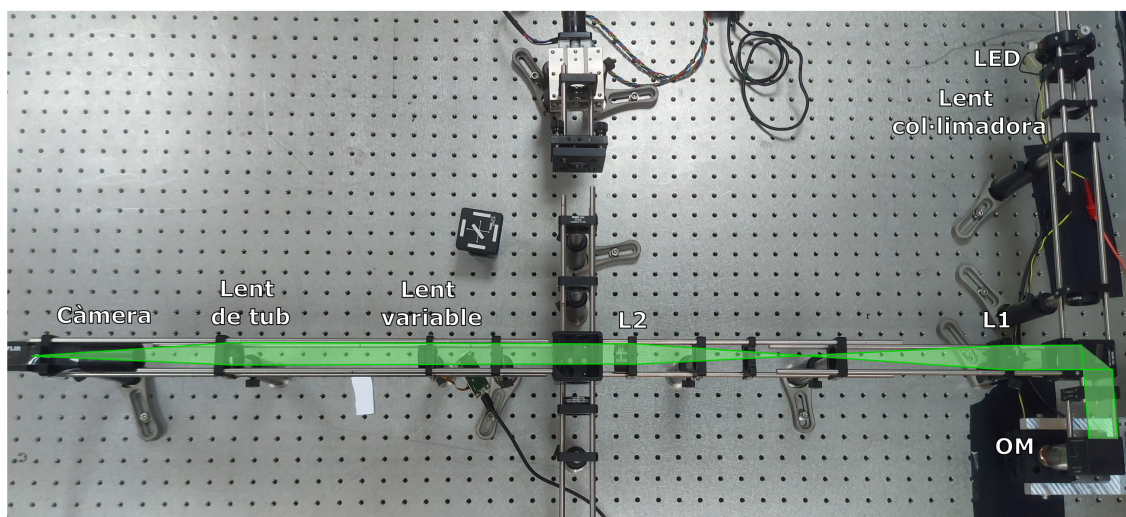


FIGURA 3.25: Sistema òptic de reenfocament amb una lent varifocal i un objectiu de microscopi Nikon $20\times/0.45$ NA. La lent de Corning té una obertura de 5.8 mm i un rang de potències de -5 a 10 diòptries.

Com que la lent varifocal té una obertura més petita que l'objectiu de microscopi (9 mm), vam haver de reduir la mida de la pupila de l'objectiu. A tal efecte, vam utilitzar una L1 amb una focal de 200 mm, i una L2 amb una focal de 100 mm, que produeixen un augment de 0.5. D'aquesta manera, la mida efectiva de la pupila de l'objectiu en la lent varifocal fou de 4.5 mm. Aquesta reducció de mida ve a canvi d'una disminució en el rang màxim de reenfocament amb la lent varifocal, però com que el rang de potències d'aquesta lent és molt elevat això no suposa cap problema. També vam utilitzar una lent de tub de 100 mm per mantenir el mateix camp de visió que en el reenfocament remot.

Per comparar el sistema òptic de la lent varifocal amb el sistema òptic convencional, vam repetir la caracterització de les PSFs de l'apartat anterior. A la Figura 3.26 es veuen els resultats obtinguts pels objectius de Nikon $20\times/0.45$ NA i $50\times/0.8$ NA. En el cas del $50\times/0.8$ NA no vam poder mesurar les PSFs en les posicions $15\ \mu\text{m}$ i $20\ \mu\text{m}$ degut a la col·lisió entre la muntura de la lent de tub i la càmera.

A diferència de l'enfocament remot, la tècnica de l'enfocament amb lent varifocal no assegura que la PSF sigui limitada per difracció en tot el rang de reenfocament, ja que no es compleix la condició d'Abbe. Per tant, interessa utilitzar aquesta tècnica amb objectius d'obertura numèrica baixa, on l'aberració esfèrica tingui menor pes. Aquest fenomen s'aprecia a la Figura 3.26, on les PSFs de l'objectiu $20\times/0.45$ NA són molt similars en tot el rang d'adquisició i, en canvi, amb l'obertura numèrica

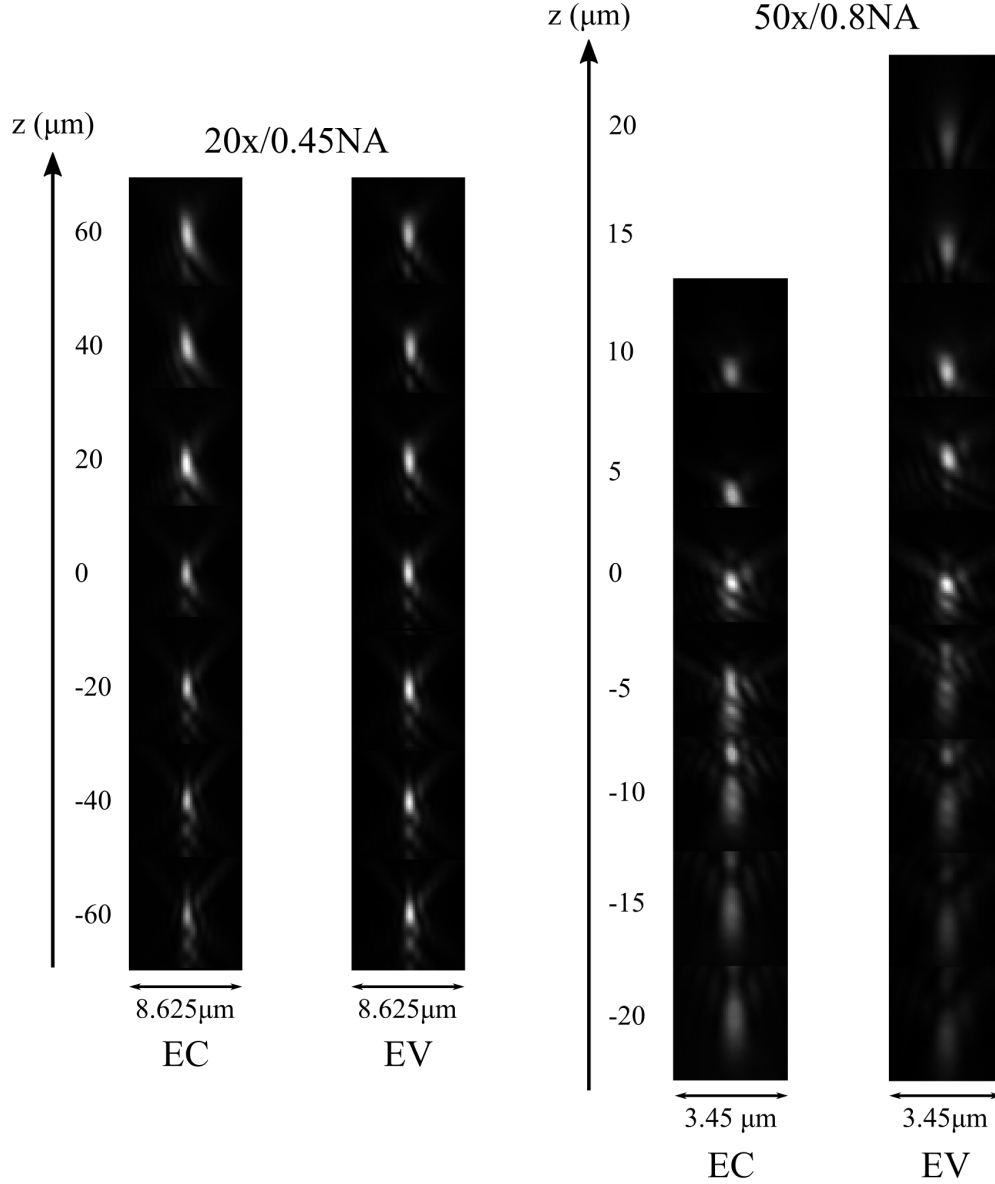


FIGURA 3.26: Comparació de les PSFs obtingudes amb el sistema òptic convencional reenfoçant la càmera (EC) i amb l'enfocament amb lent varifocal (EV) amb els objectius 20×/0.45 NA i 50×/0.8 NA.

major de l'objectiu de 50×/0.8 NA, la qualitat de la PSF es degrada ràpidament amb la distància axial.

Per últim, també vam caracteritzar la linealitat i la velocitat de la lent varifocal. Aquesta lent es controla a través d'un voltatge i un controlador, que altera la seva potència. A la Figura 3.27 es mostren els resultats obtinguts relacionant el voltatge amb la posició de focus de l'objectiu 20×/0.45 NA. S'observa que la relació és principalment lineal, amb un coeficient de determinació (R^2) de 0.996, tot i que es presenta una desviació quadràtica notable, especialment als extrems del rang.

En segon lloc, vam caracteritzar la funció de transferència de la lent per obtenir una idea del temps de resposta temporal. Malgrat que el fabricant va proporcionar el temps de resposta de la lent, d'aproximadament 100 ms, aquesta caracterització

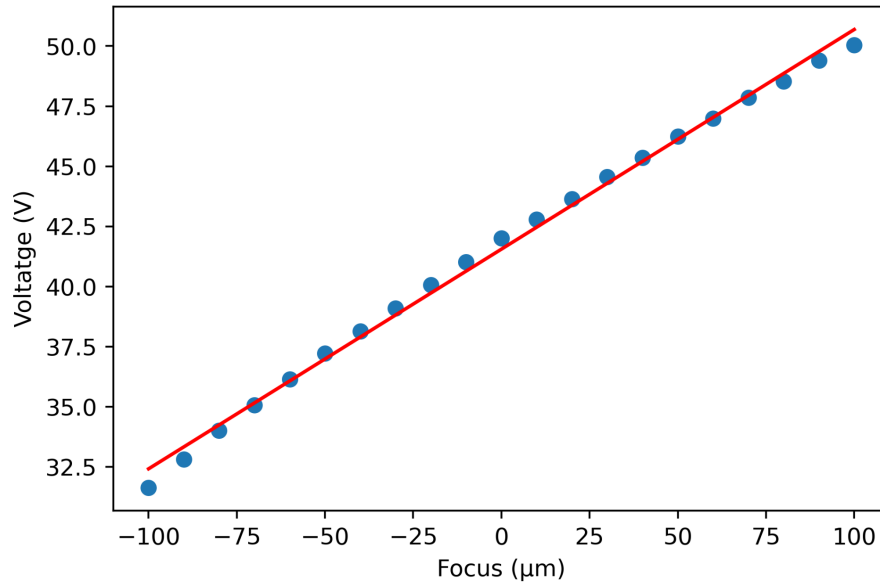


FIGURA 3.27: Voltatge vs. Focus per la lent varifocal Corning A-58N. L'ajust lineal té un coeficient R^2 de 0.996. La relació no és perfectament lineal i es pot apreciar com els valors segueixen lleugerament una paràbola.

permet una descripció més completa de la lent. Per fer-ho, vam mesurar l'amplitud d'oscil·lació de la lent en funció de la freqüència. Per això, vam aplicar un voltatge sinusoidal en funció del temps i, per cada freqüència, vam mesurar l'amplitud d'oscil·lació de la lent.

Per aconseguir-ho, vam desalinejar el sistema òptic per evitar que fos telecèntric en la càmera, movent el conjunt de lent de tub i càmera fora de la posició telecèntrica. D'aquesta manera, els canvis de potència de la lent varifocal es tradueixen en un canvi de la posició lateral de la imatge, que es pot seguir realitzant una imatge de la PSF i calculant-ne el centre de masses. Abans, però, és necessari calibrar el centre de masses en estàtic per poder calcular l'amplitud a cada freqüència. A la Figura 3.28 es mostren els resultats obtinguts. Aquesta lent varifocal és ordres de magnitud més lenta en comparació amb la lent TAG, amb una freqüència de tall d'aproximadament 8 Hz.

Tot i que la velocitat d'aquesta lent no és el seu principal avantatge, continua superant en rapidesa un sistema mecànic d'escaneig. A més, un sistema mecànic té parts mòbils que, amb l'ús prolongat, tenen tendència a fallar. En canvi, l'ús d'una lent varifocal elimina aquests inconvenients, proporcionant una solució més fiable i duradora.

La comparativa de les dues proves de concepte permet extreure varies conclusions respecte l'estratègia més adequada per a controlar l'enfocament axial en el sistema OSAM. En primer lloc, si l'obertura numèrica de l'objectiu és baixa (menor a 0.45), no hi ha necessitat de compensar les aberracions òptiques i una lent varifocal és la millor opció. D'aquesta manera, el sistema òptic guanya en facilitat d'implementació i en reducció de cost. En canvi, si l'obertura numèrica de l'objectiu és superior, l'enfocament remot és l'estratègia desitjable. En aquest cas, són necessaris un sistema òptic i alineament molt més complex, degut a l'ús de dos objectius.

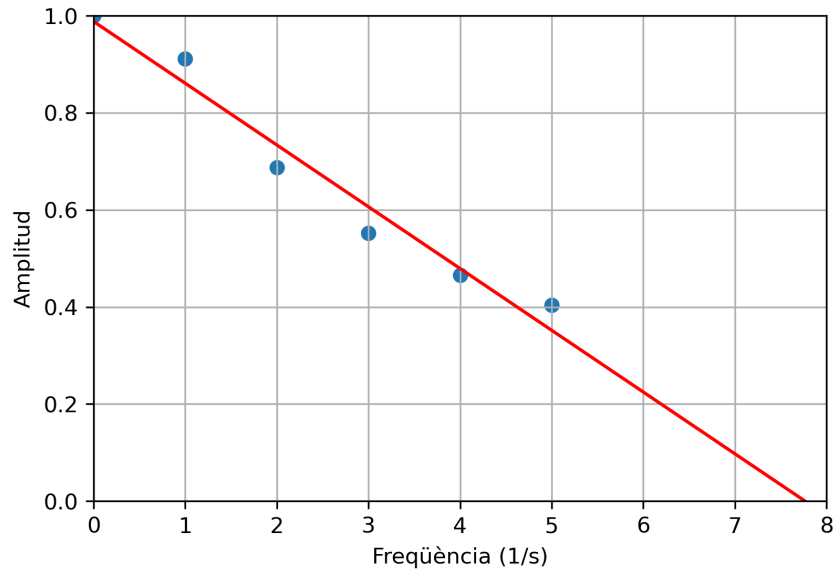


FIGURA 3.28: Amplitud d'oscil·lació en funció de la freqüència de la lent varifocal. Degut al temps de resposta, a mesura que augmenta la freqüència disminueix l'amplitud efectiva. En vermell es representa el *fitting* dels valors mesurats, obtenint una freqüència de tall d'aproximadament 8 Hz.

Per tant, és important valorar si un 20× amb 0.45 d'obertura numèrica és suficient per l'aplicació, ja que amb aquest objectiu s'ha obtingut un rang de 200 µm de reenfocament amb la lent varifocal, que en molts casos ja pot ser suficient.

3.6. Objectiu de microscopi a mida

En el sistema òptic proposat en l'apartat anterior s'ha utilitzat amb un objectiu de microscopi d'estereomicroscòpia (SHR Plan Apo 2×, Nikon) que es va adaptar a les necessitats del sistema. Aquest era un dels pocs objectius comercials que complia les característiques mínimes que es necessitaven pel sistema òptic, ja que la majoria d'objectius de microscòpia estàndards s'allunyaven molt de les condicions.

Un dels principals problemes que va sorgir de l'ús d'aquest objectiu és la dificultat de conèixer el rendiment de les lents i de com es comporten les aberracions òptiques en el conjunt del sistema òptic. Com que es desconeixen les característiques de les lents de l'objectiu; curvatures, gruixos, materials; és impossible simular el comportament del sistema òptic en un programa de traçat de rajos. En general, tot aquest coneixement no és necessari, ja que el proveïdor detalla les característiques de l'objectiu en les quals està corregit i ja garanteix un funcionament correcte.

En aquest cas, però, atès que l'objectiu s'utilitza en un àmbit diferent, concretament en estereomicroscòpia, la informació proporcionada pel fabricant no resulta tan rellevant. Això es deu al fet que l'objectiu ha estat dissenyat i caracteritzat per aquesta aplicació específica, mentre que, en l'ús descrit en l'apartat anterior, s'està utilitzant per a una funció substancialment diferent, fet que pot comprometre el seu rendiment òptic i requerir una nova avaluació de les seves propietats.

És per això que, havent vist les limitacions que s'imposen si es fa servir un objectiu d'aquest tipus, es va decidir dissenyar un objectiu de microscopi a mida de les necessitats del sistema òptic. D'aquesta manera es pot tenir un coneixement complet de les especificacions de les òptiques del sistema, i conseqüentment, augmentar el rendiment de tot el sistema d'adquisició de topografies.

Per al disseny de l'objectiu, primer vam concretar les especificacions de tot el sistema òptic, que es detallen a la Taula 3.6. Aquest havia de ser molt similar al que ja s'havia fet servir en la prova de concepte, i per tant, vam escollir una obertura numèrica de 0.45 amb un camp de visió de 4×4 mm.

Camp de visió	4×4 mm
Augment	$3.12 \times$
<i>Field number</i>	12.5×12.5 mm
Obertura numèrica	0.45
Distància de treball	45 mm
Longitud d'ona central	550 nm
Ample de banda	10 nm
Freqüència de tall (mostra)	1341 mm^{-1}
Freqüència de tall (càmera)	430 mm^{-1}
Distància focal de la lent de tub	100 mm
Distància focal de l'objectiu	32 mm

TAULA 3.6: Especificacions del sistema òptic. Les característiques més importants són l'obertura numèrica (0.45) i el camp de visió de 4×4 mm.

Amb aquestes especificacions, és possible calcular l'*space-bandwidth product* (SBP) [85], una quantitat sense dimensions que permet estimar la informació que

pot adquirir el sistema òptic. Aquesta quantitat es calcula com el producte del cercle del camp de visió (CDV) amb el cercle de freqüències capturades,

$$SBP = \pi r_{CDV}^2 \cdot \pi \left(\frac{NA}{0.61\lambda} \right)^2, \quad (3.2)$$

on el cercle del camp de visió correspon a πr_{CDV}^2 , i el cercle de freqüències d'un objectiu de microscopi ve donat per la resolució espacial,

$$d = 0.61 \frac{\lambda}{NA}, \quad (3.3)$$

i per tant correspon a $\pi \left(\frac{NA}{0.61\lambda} \right)^2$.

A la Taula 3.7 es mostren els valors de l' SBP calculats per als objectius tradicionals, assumint una longitud d'ona de 550 nm, un *field number* de 20 mm i una lent de tub de 200 mm. Per a augments baixos els valors obtinguts són del voltant de 8 milions, i disminueix per als objectius amb augments més alts.

Objectiu	Resolució (μm)	Radi del CDV (mm)	SBP (·10 ⁶)
2.5×/0.075	4.47	4.00	7.9
5×/0.15	2.23	2.00	7.9
10×/0.3	1.11	1.00	7.9
20×/0.45	0.74	0.50	4.44
50×/0.8	0.42	0.20	2.24

TAULA 3.7: *Space-bandwidth product* (SBP) per objectius de microscòpia estàndard.

Per l'objectiu de microscopi que es vol dissenyar, amb una obertura numèrica de 0.45, la resolució és de 0.74 μm i el camp de visió de 4 × 4 mm té un radi de 2.82 mm. Això suposa una SBP de 141 milions, però aquest resultat és assumint que la càmera pot mostrejar la freqüència més alta, és a dir, 430 mm⁻¹ a l'espai de la càmera. Perquè això sigui cert, hauria de tenir una mida de píxel igual a la meitat del període d'aquesta freqüència:

$$d = \frac{1000}{2 \cdot 430} = 1.16 \text{ } \mu\text{m} \quad (3.4)$$

Per altra banda, per mantenir el camp de visió de 4×4 mm també es necessitaria una càmera amb més de 116 megapíxels. Malauradament, aquestes especificacions són prohibitives per una càmera comercial. Per tant, es va optar per una mida de 2.74 μm per píxel, el valor més proper que es va trobar a 1.16 μm. En segon lloc, com que era necessari una càmera amb una quantitat elevada de píxels, es va escollir la mateixa que l'OSAM, de marca FLIR i amb 5320 × 4600 píxels. Les especificacions es troben a la Taula 3.8.

En aquest cas, com que la mida de píxel és superior al que marca la resolució espacial, l'espai de freqüències sobre el qual s'obté informació queda reduït, i per tant l' SBP també disminueix. Si es té en compte aquest factor, l' SBP és de 2.6 milions, un valor més raonable i proper als objectius estàndards de la Taula 3.7.

En la majoria dels microscopis òptics tradicionals es corregeixen totes les aberracions a l'objectiu i, a més, aquest està col·limat a l'infinit. Aquesta característica

Fabricant	FLIR
Model	BFS-U3-244S8M-C
Píxels	5320×4600
Regió d'interés	4600×4600
Mida de pixel	$2.74 \mu\text{m}$
Mida de la càmera (ROI)	$12.6 \times 12.6 \text{ mm}$
Freqüència de Nyquist	182 mm^{-1}
Fotogrames per segon	12

TAULA 3.8: Especificacions de la càmera.

ofereix certa llibertat en l'elecció de la lent de tub. Normalment, s'utilitzen lents amb distàncies focals que varien entre 160 i 250 mm. D'aquesta manera, és possible utilitzar els objectius de microscòpia en diversos sistemes òptics. Com que totes les aberracions es corregeixen a l'objectiu, la lent de tub té un disseny senzill, ja que l'obertura numèrica en l'espai d'imatge és considerablement més baixa.

En canvi, en altres sistemes òptics, la correcció de les aberracions es pot dividir entre l'objectiu de microscopi i la lent de tub. Això facilita la manufactura de l'objectiu, però es perd flexibilitat, ja que la lent de tub també corregeix les aberracions i, per tant, no es pot modificar. En general, això no suposa un problema, ja que els components òptics d'aquests sistemes no s'acostumen a vendre per separat, sinó en conjunt.

Per al disseny de l'objectiu per al sistema OSAM es va optar per les dues opcions. En el primer, segon i quart disseny presentats es corregeixen totes les aberracions en l'objectiu, i en el tercer cas es corregeixen també en la lent de tub. En tots els casos s'ha sacrificat l'aberració cromàtica, que en general només s'ha corregit fins a 10 nm d'ample de banda. Això queda lluny dels objectius apocromàtics, on s'arriba a corregir tot el rang de llum visible. A més, es va escollir una lent de tub de 100 mm, una distància més curta que la estàndard de 180 mm (Olympus) o 200 mm (Nikon). Així, es pot incrementar la distància focal de l'objectiu, de manera que s'alleugereix la complexitat tot i que l'augment és el mateix. Per tant, tots els augments que apareixen durant aquest apartat queden referenciades a una lent de tub de 100 mm.

Com es detalla a continuació, vam proposar quatre dissenys diferents per l'objectiu de microscopi, un dels quals inclou tot el sistema òptic des de la mostra fins a la càmera. El disseny d'aquest tipus d'objectiu és poc comú, i no s'han pogut trobar exemples en la literatura ni tampoc en patents que no siguin d'objectius d'estereomicroscòpia. A més, els objectius amb baix augment i alta obertura numèrica es classifiquen com a objectius d'extrema complexitat [86-88], degut a la combinació d'aquestes característiques. En aquests casos, per tal d'obtenir un funcionament correcte òptic, és necessari sacrificar altres paràmetres del disseny com la distància de treball o l'aberració cromàtica, com en aquest cas.

3.6.1 3×/0.45 NA monocromàtic

El primer objectiu dissenyat va ser completament monocromàtic, amb un augment de 3× (sempre respecte una lent de tub de 100 mm) i una NA de 0.45. A la Figura 3.29 es mostra el disseny de l'objectiu, que és del tipus positiu-positiu-negatiu (PPN). Les dues primeres lents formen el primer grup i són positives, les dues següents lents també són positives i formen el segon grup, i per últim les dues lents finals són negatives i formen l'últim i tercer grup. La distància de treball és de 50 mm, necessària per a mesurar peces de manufactura additiva amb geometries complexes sense haver d'apropar-se excessivament a la mostra. Aquest paràmetre no s'ha variat en tots els dissenys que es presenten. Aquesta distància provoca que totes les lents tinguin un diàmetre gran, de fins a 70 mm. A la Taula 3.9 estan enumerades les lents amb les seves característiques principals.

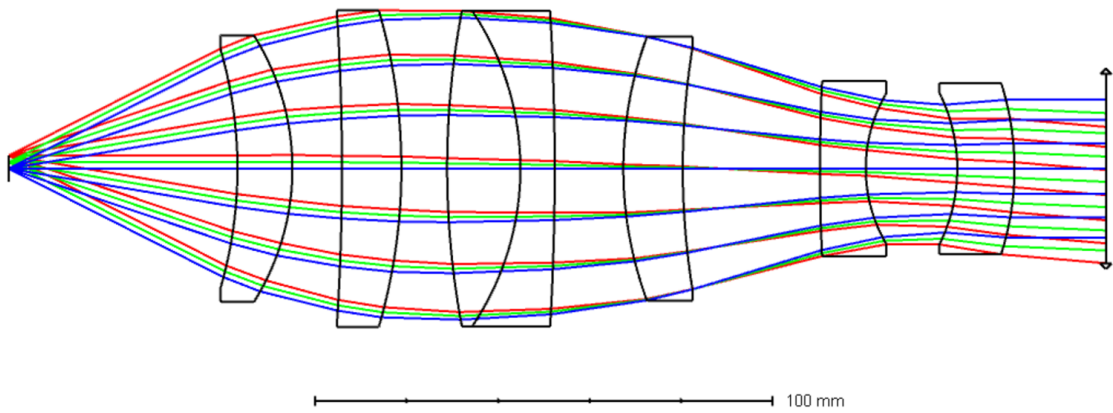


FIGURA 3.29: Disseny òptic de l'objectiu de microscòpia 3×/0.45 NA amb una distància de treball de 50 mm, corregit fins a 4 × 4 mm en el pla de l'objectiu a la longitud d'ona de 550 nm.

Lent	Curvatura 1	Curvatura 2	Gruix	Índex de refracció
1	-93.11	-54.31	12.00	1.85
2	-523.08	-122.59	13.00	2.00
3	177.10.26	-73.13	16.00	1.70
4	-73.13	-453.37	7.5	1.72
5	82.42	164.55	13.00	1.75
6	405.19	32.41	10.00	1.49
7	-36.85	61.08	12.5	1.47

TAULA 3.9: Lents que s'han utilitzat per a la l'objectiu de microscopi 3×/0.45 NA monocromàtic. Totes les unitats estan en mil·límetres.

El disseny òptic està limitat per difracció, tal com es demostra a la Figura 3.30. Les unitats estan referenciades al pla de la càmera, de manera que la resolució axial obtinguda amb la fórmula 3.3 s'ha multiplicat per l'augment. Pels tres camps escollits, la mida de l'*spot size* és inferior al radi d'Airy, i les MTFs obtingudes són totes molt similars a la limitada per difracció.

Tot i les excel·lents característiques d'aquest objectiu de microscopi, el seu caràcter estrictament monocromàtic no és realista, ja que la majoria de sistemes òptics

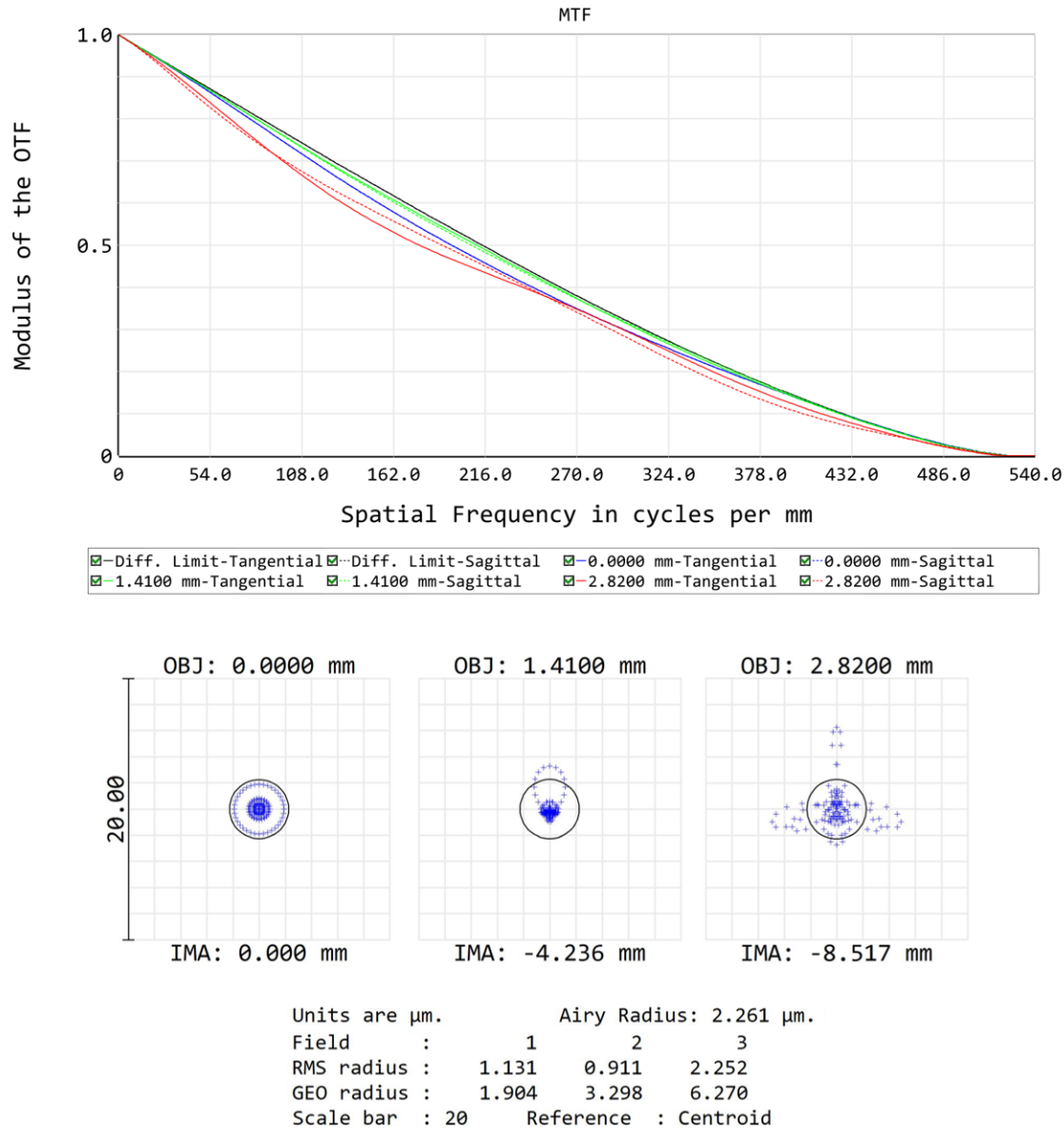


FIGURA 3.30: Especificacions del disseny òptic de la figura 3.29. a) MTF policromàtica pel camp central (blau), 1.41 mm de camp (verd) i 2.82 mm de camp (vermell) i la MTF limitada per difracció del sistema òptic (negre). b) *Spot diagram* pel camp central (esquerra), 1.41 mm de camp (centre) i 2.82 mm de camp (dreta). El cercle negre representa el radi d'Airy pel sistema limitat per difracció.

utilitzen LEDs amb un ample de banda de desenes de nanòmetres. Per aquest motiu, el següent disseny proposat aborda aquesta limitació ampliant l'ample de banda fins a 10 nm, permetent així una adaptació millor a les condicions d'il·luminació habituals.

3.6.2 $3\times/0.45$ NA amb 10 nm d'ample de banda

El segon objectiu dissenyat va ser amb la correcció de 10 nm d'ample de banda, amb un augment de $3\times$ i una NA de 0.45. A la Figura 3.31 es mostra el disseny de l'objectiu, que també és del tipus positiu-positiu-negatiu (PPN). En aquest cas el número de lents és major, i s'ha passat de set a nou per poder corregir la cromaticitat de l'objectiu. Tal com es pot veure, el disseny és molt similar a l'anterior, ja que aquest es va utilitzar com a punt de partida per desenvolupar-lo. A la Taula 3.10 estan enumerades les lents amb les seves característiques principals.

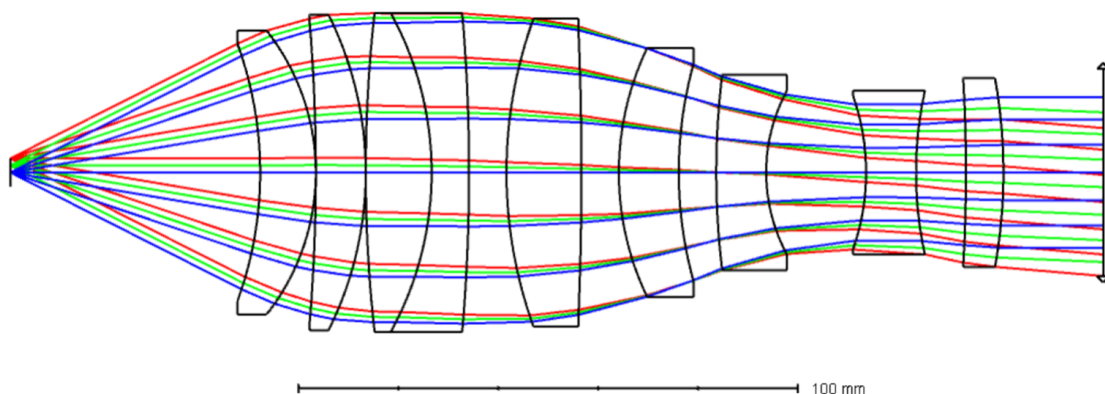


FIGURA 3.31: Disseny òptic d'un objectiu de microscòpia $3\times/0.45$ NA amb una distància de treball de 50 mm, corregit fins a 4×4 mm en el pla de l'objectiu i amb 10 nm d'ample de banda a 550 nm de longitud d'ona.

Lent	Curvatura 1	Curvatura 2	Gruix	Índex de refracció
1	-74.89	-45.70	11.14	1.59
2	-364.65	-70.27	10.00	1.59
3	288.76	-66.14	13.18	1.75
4	-66.14	-369.95	7.50	1.85
5	90.08	-690.57	15.00	1.59
6	57.41	81.19	12.00	1.74
7	160.68	34.26	10.00	1.70
8	-46.14	76.14	10.00	1.47
9	-320.32	-106.02	7.50	2.00

TAULA 3.10: Lents que s'han utilitzat per a l'objectiu de microscopi $3\times/0.45$ NA amb 10 nm d'ample de banda. Totes les unitats estan en mil·límetres.

A la Figura 3.32 es veu la MTF i l'*spot diagram* del sistema òptic. El disseny està limitat per difracció en el camp central i el de 1.41 mm, i pel de 2.82 mm hi ha aberracions que no s'han pogut acabar d'eliminar, tot i que el radi *root mean square* (RMS) de l'*spot diagram* és molt proper al radi d'Airy. De la mateixa manera, la MTF és quasi limitada per difracció en tots els camps excepte pel de 2.82 mm, on hi ha més atenuació a les freqüències tangencials.

Aquest disseny proposat proporciona una correcció millorada de la cromaticitat, aconseguint un ample de banda òptic de 10 nm. Malgrat no aconseguir un ample de banda major, es considera un resultat satisfactori, ja que permet una major

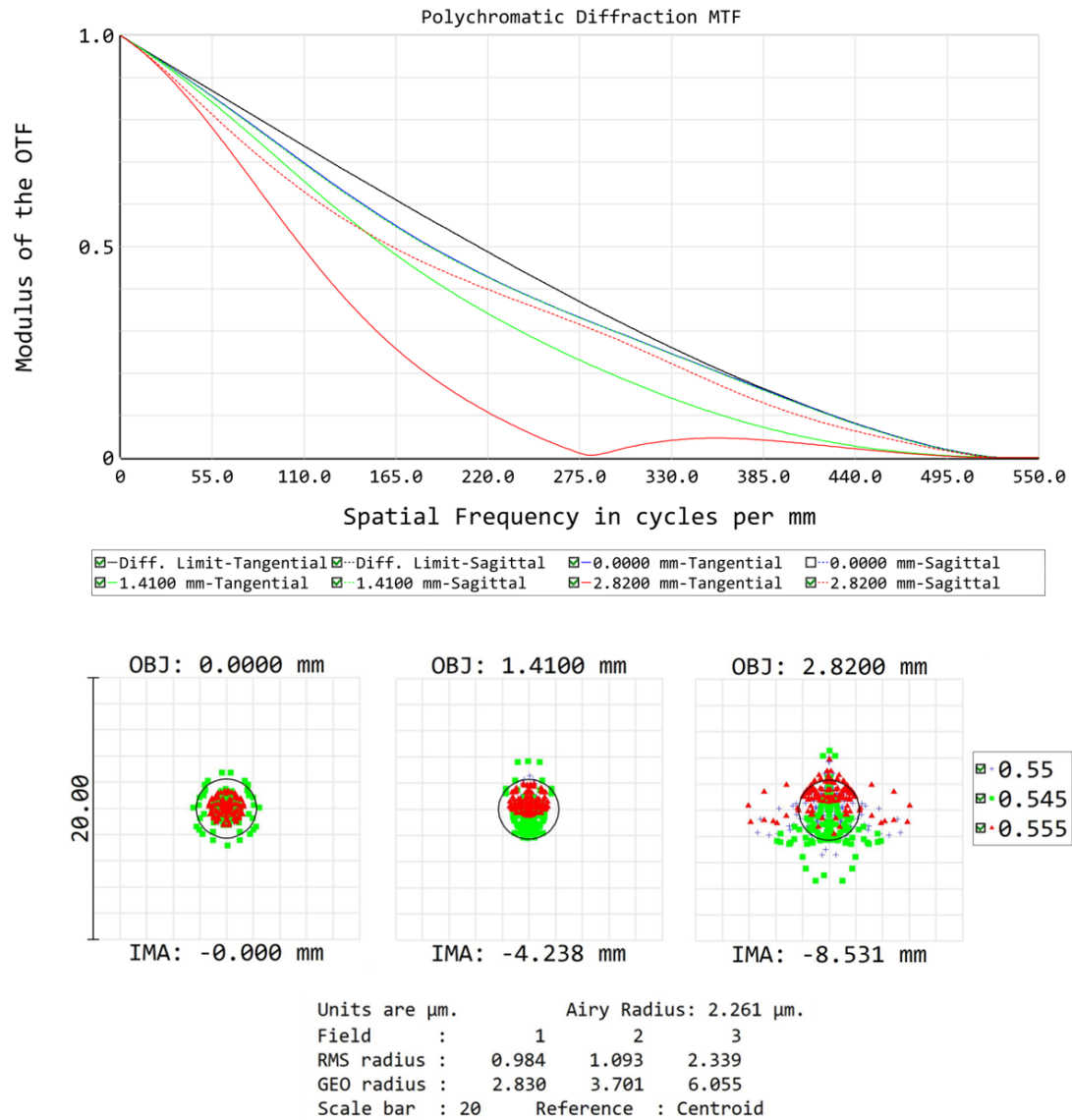


FIGURA 3.32: Especificacions del disseny òptic de la figura 3.31. a) MTF policromàtica pel camp central (blau), 1.41 mm de camp (verd) i 2.82 mm de camp (vermell) i la MTF limitada per difracció del sistema òptic (negre). b) *Spot diagram* pel camp central (esquerra), 1.41 mm de camp (centre) i 2.82 mm de camp (dreta). El cercle negre representa el radi d'Airy pel sistema limitat per difracció.

adequació a les condicions d'il·luminació reals sense comprometre significativament el rendiment òptic del sistema.

3.6.3 3×/0.45 amb lent de tub

El tercer objectiu també consta de la lent de tub, i tot el sistema òptic té un augment de 3× i una NA de 0.45. A la Figura 3.33 es veu el disseny de l'objectiu de tot el sistema òptic. S'inclouen dos *beam splitters* com en el disseny de la lent de tub de l'OSAM, ja l'objectiu es va concebre per utilitzar HiLo com a tècnica de seccionament òptic. El primer s'utilitza per multiplexar els dos canals d'il·luminació, estructurada i camp clar, i el segon per la càmera. A la Taula 3.11 estan enumerades les lents amb les seves característiques principals.

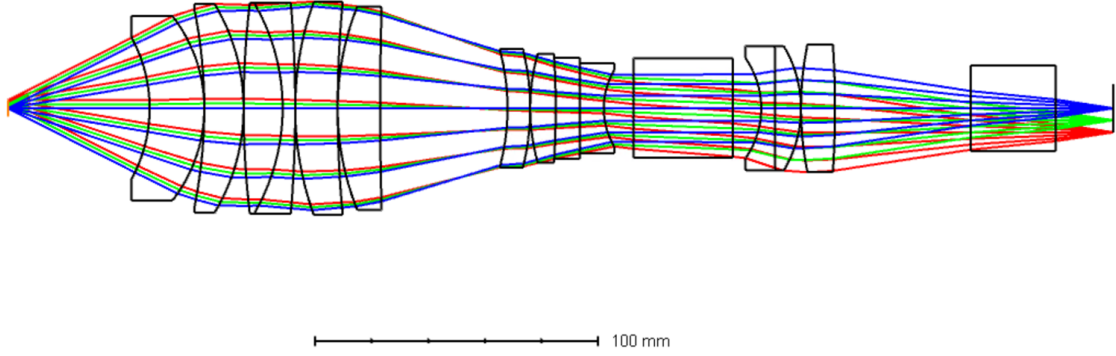


FIGURA 3.33: Disseny òptic d'un objectiu de microscòpia 3×/0.45 NA amb una distància de treball de 50 mm, corregit fins a 4 × 4 mm en el pla de l'objectiu i la lent de tub corresponent. El sistema òptic també conté un *beam splitter* per la il·luminació estructurada i un altre per la il·luminació uniforme (camp clar).

Lent	Curvatura 1	Curvatura 2	Gruix	Índex de refracció
1	-51.70	-52.41	19.31	1.91
2	-175.63	-70.93	13.89	1.91
3	314.55	-73.31	13.787	1.55
4	-73.31	-439.11	4.44	1.95
5	110.44	394.51	15.00	1.66
6	95.87	1149.41	15.00	1.61
7	-77.21	-82.67	7.87	1.61
8	70.04	-242.97	9.00	1.52
9	-242.97	1451.93	8.5	1.75
10	1451.93	26.25	8.5	1.82
11	-30.69	inf	4.91	1.65
12	inf	-42.46	9.14	1.82
13	111.91	-345.56	12.00	1.82

TAULA 3.11: Lents que s'han utilitzat per a la l'objectiu de microscopi 3×/0.20 NA amb la lent de tub. Totes les unitats estan en mil·límetres.

A la Figura 3.34 es mostra la MTF i l'*spot diagram* de tot el sistema òptic. En aquest cas, com que hi ha més lents, s'han pogut controlar millor les aberracions a l'extrem del camp de visió, de manera que tots els camps estan limitats per difracció. El camp de 2.82 mm pateix una lleugera atenuació en les freqüències centrals, però el rendiment continua sent alt, i el radi RMS de l'*spot* és inferior al radi d'Airy.

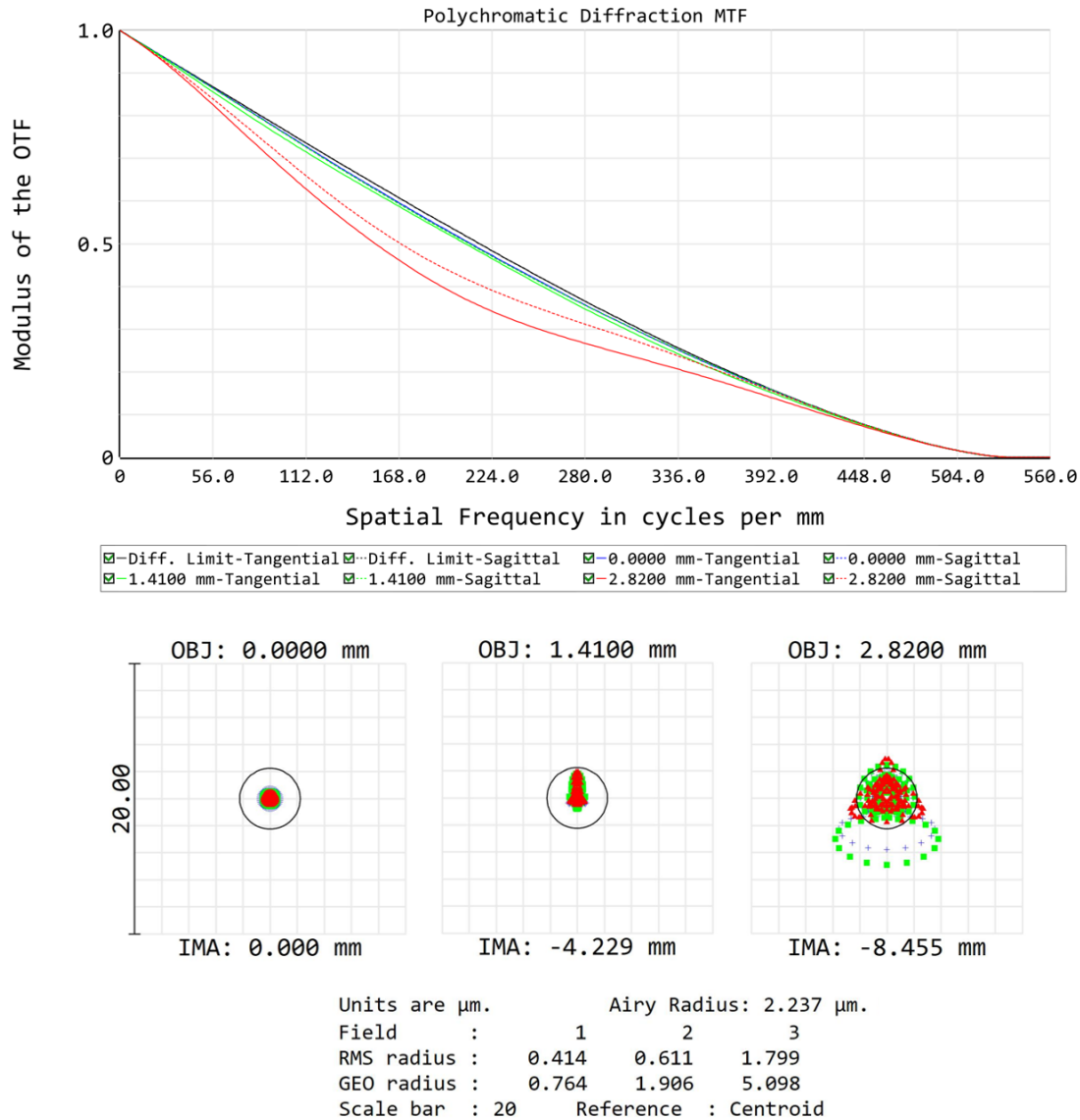


FIGURA 3.34: Especificacions del disseny òptic de la figura 3.33. a) MTF policromàtica pel camp central (blau), 1.41 mm de camp (verd) i 2.82 mm de camp (vermell) i la MTF limitada per difracció del sistema òptic (negre). b) *Spot diagram* pel camp central (esquerra), 1.41 mm de camp (centre) i 2.82 mm de camp (dreta). El cercle negre representa el radi d'Airy pel sistema limitat per difracció.

3.6.4 Anell de llum

En els apartats anteriors s'han presentat els dissenys òptics per a la mesura de peces de manufactura additiva. Degut a l'alta obertura numèrica i baix augment ($3\times$) d'aquests objectius, la complexitat del disseny òptic és elevada. Com s'ha vist, obtenir un disseny limitat per difracció requereix la utilització de moltes lents. A més, aquestes han de tenir diàmetres considerablement més grans que els dissenys òptics tradicionals, on normalment es treballa amb lents d'una polzada.

Cal remarcar, però, que no és estrictament necessari la utilització d'una obertura numèrica tan elevada per aconseguir caracteritzar peces de MA. Tal com s'ha comentat en l'apartat 3.6, per a un augment $3\times$ i una obertura numèrica de 0.45, el sistema òptic necessita una mida de píxel en la càmera de $1.16\mu\text{m}$. Això significa que no es requereix tanta obertura numèrica, ja que la càmera és el principal limitant per a la resolució espacial. En aquest cas, però, una obertura numèrica elevada permet capturar la llum que es reflecteix en la mostra. Dit d'altra manera, com que les mostres de manufactura additiva són molt rugoses i reflecteixen la llum a angles elevats, una obertura numèrica gran permet recol·lectar la llum a aquests angles.

Tenint en compte aquestes consideracions, és possible utilitzar una il·luminació en forma d'anell de llum combinada amb un objectiu d'obertura numèrica reduïda. Considerant una mida de píxel de $2.74\mu\text{m}$ i un augment de $3\times$, l'obertura numèrica que es necessita per tenir un disseny limitat per difracció és

$$NA = 0.61 \frac{\lambda}{d} \approx 0.14. \quad (3.5)$$

El funcionament de l'anell de llum és senzill. Tal com indica el seu nom, es tracta d'un anell que s'ubica al voltant de l'objectiu de microscopi. A l'interior d'aquest anell hi ha LEDs distribuïts que s'enfoquen cap a la mostra, que després es cobreixen amb elements difusors per garantir una il·luminació homogènia de la mostra i des del màxim rang d'angles possible. A la Figura 3.35 es mostra un esquema de la il·luminació EPI (a través de l'objectiu) i amb anell de llum quan la mostra a mesurar té partícules esfèriques que reflecteixen la llum de manera especular, fet molt comú en manufactura additiva. Amb la il·luminació EPI només s'observen de tornada els rajos que arriben a punts de la mostra amb un pendent local per sota de l'obertura numèrica. En canvi, amb l'anell de llum és possible il·luminar la mostra des d'angles més grans, de manera que es compensen els pendents locals elevats i els rajos es reflecteixen dins del rang d'angles que l'objectiu pot capturar.

A la Figura 3.36 es mostra una peça de manufactura additiva il·luminada amb anell de llum i EPI. A les esferes es distingeix un anell exterior, que correspon a la llum que prové de l'anell de llum, i un cercle interior que correspon a la llum EPI. Si les dues il·luminacions que s'utilitzen no estan combinades correctament hi haurà cert rang d'angles que no s'il·luminaran correctament. N'és un exemple aquesta Figura, on es veu clarament com les esferes de material tenen un anell fosc, corresponent als angles que no s'il·luminen correctament, i que per tant no es mesuraran correctament.

Tot i les possibilitats que ofereix la utilització d'un anell de llum, també comporta limitacions respecte el seccionament òptic. Aquest tipus d'il·luminació no permet utilitzar llum estructurada, ja que il·lumina tota la mostra homogèniament i

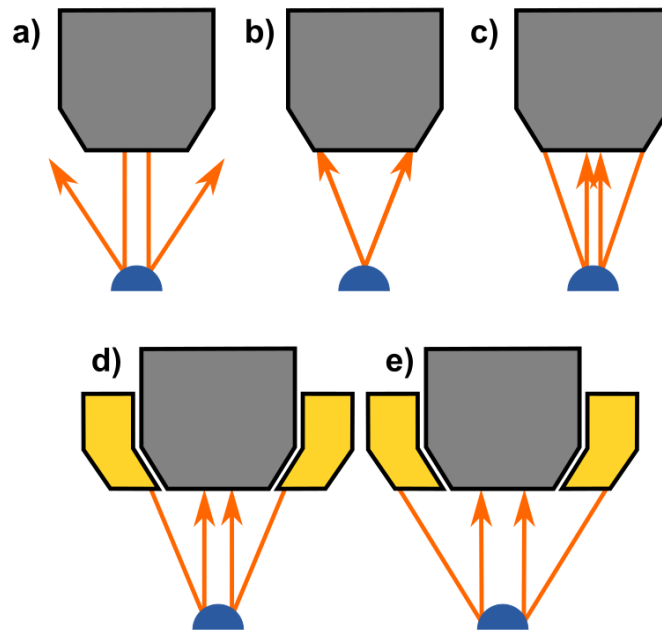


FIGURA 3.35: Esquema dels rajos de llum quan s'il·lumina una esfera amb un radi de curvatura petit i amb reflexió especular. a) Els rajos es reflecteixen fora de l'obertura de l'objectiu. b) i c) Rajos al màxim angle de l'objectiu es reflecteixen dins l'obertura per diferents posicions de l'esfera. d) i e) Rajos de l'anell de llum es reflecteixen a dins de l'obertura per posicions de l'esfera amb pendents locals superiors a l'obertura numèrica màxima de l'objectiu.

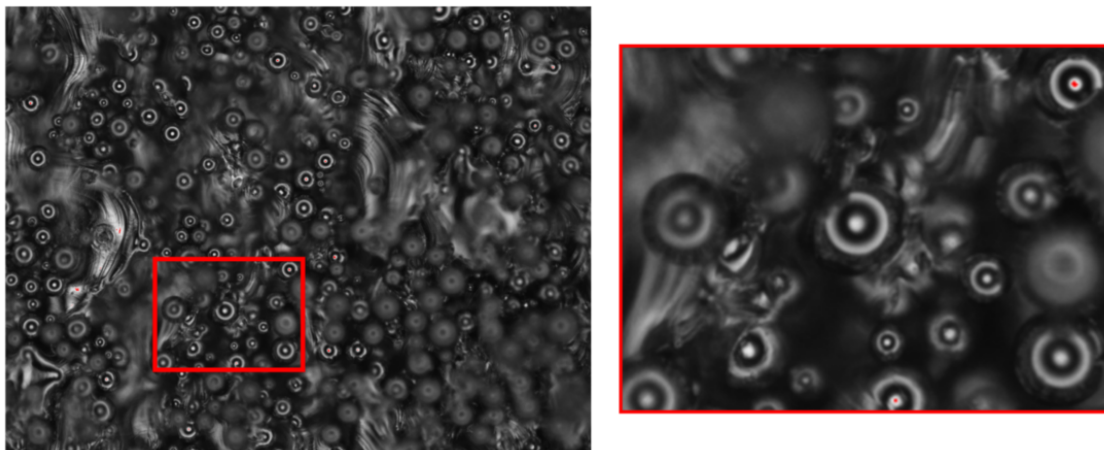


FIGURA 3.36: Peça fabricada amb *powder bed fusion* amb múltiples gotes de material sense fondre amb il·luminació EPI i anell de llum. Per cada gota, l'anell exterior correspon a la llum que prové de l'anell de llum, i el cercle central correspon a la llum EPI.

no permet projectar un patró. Per tant, no és possible utilitzar tècniques com HiLo i la microscòpia confocal de projecció de franges. L'única tècnica que és compatible és la de variació de focus, i per tant, la utilització de l'anell en general està molt restringida a mostres molt rugoses i difícils de caracteritzar amb qualsevol de les tècniques anomenades.

3.6.5 3×/0.20 NA

L'últim disseny proposat és més senzill, ja que l'obertura numèrica és de 0.2. Aquest disseny està concebut per utilitzar-se amb un anell de llum, tal com s'ha explicat en l'apartat anterior. En aquest cas, degut a la reducció en la obertura numèrica, la complexitat es redueix. A més, les lents tenen diàmetres més petits i les aberracions es poden controlar millor.

En els sistemes òptics anteriors, la resolució va marcada per la mida del píxel de la càmera, ja que és el principal limitant del sistema òptic. Així, un objectiu amb una obertura numèrica més baixa oferiria un rendiment òptic equivalent en termes de qualitat d'imatge. A la Figura 3.37 es veu el disseny de l'objectiu, que només consta de 3 doblats. És un disseny basat en una lent de Petzval, que consta de dos doblats i és útil per corregir les aberracions de sistemes òptics amb baix augment (5 i 10×) i baixa obertura numèrica. En aquest cas, vam afegir un tercer doblet per controlar les aberracions que apareixen als extrems del camp de visió, on les aberracions són més difícils de controlar degut al baix augment. A la Taula 3.12 s'enumeren les lents amb les seves característiques principals.

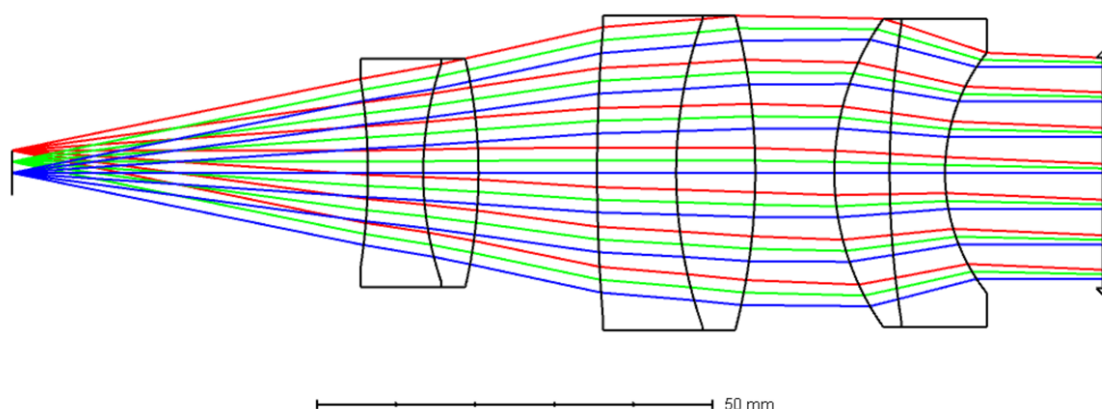


FIGURA 3.37: Disseny òptic d'un objectiu de microscòpia 3×/0.20 NA amb una distància de treball de 50 mm, corregit fins a 4 × 4 mm en el pla de l'objecte i amb 10 nm d'ample de banda a 550 nm de longitud d'ona.

Lent	Curvatura 1	Curvatura 2	Gruix	Índex de refracció
1	-77.23	42.19	7.00	1.72
2	42.19	-62.22	7.00	1.59
3	225.21	57.69	10.00	1.85
4	57.69	-78.76	10.00	1.77
5	33.47	118.75	7.00	1.83
6	118.75	24.31	7.00	1.70

TAULA 3.12: Lents que s'han utilitzat per a la l'objectiu de microscopi 3×/0.20 NA amb 10 nm d'ample de banda. Totes les unitats estan en mil·límetres.

A la Figura 3.38 es mostra la MTF i l'*spot diagram* de l'objectiu. El rendiment òptic és molt semblant a l'objectiu 3×/0.45 NA amb 10 nm d'ample de banda. Els dos primers camps estan limitats per difracció, però el camp més extrem pateix una

atenuació forta en les freqüències centrals de la MTF. Tot i això, tots els radis RMS dels *spots* tenen valors similars o per sota d'aquest, i indica que el sistema tindrà un bon rendiment.

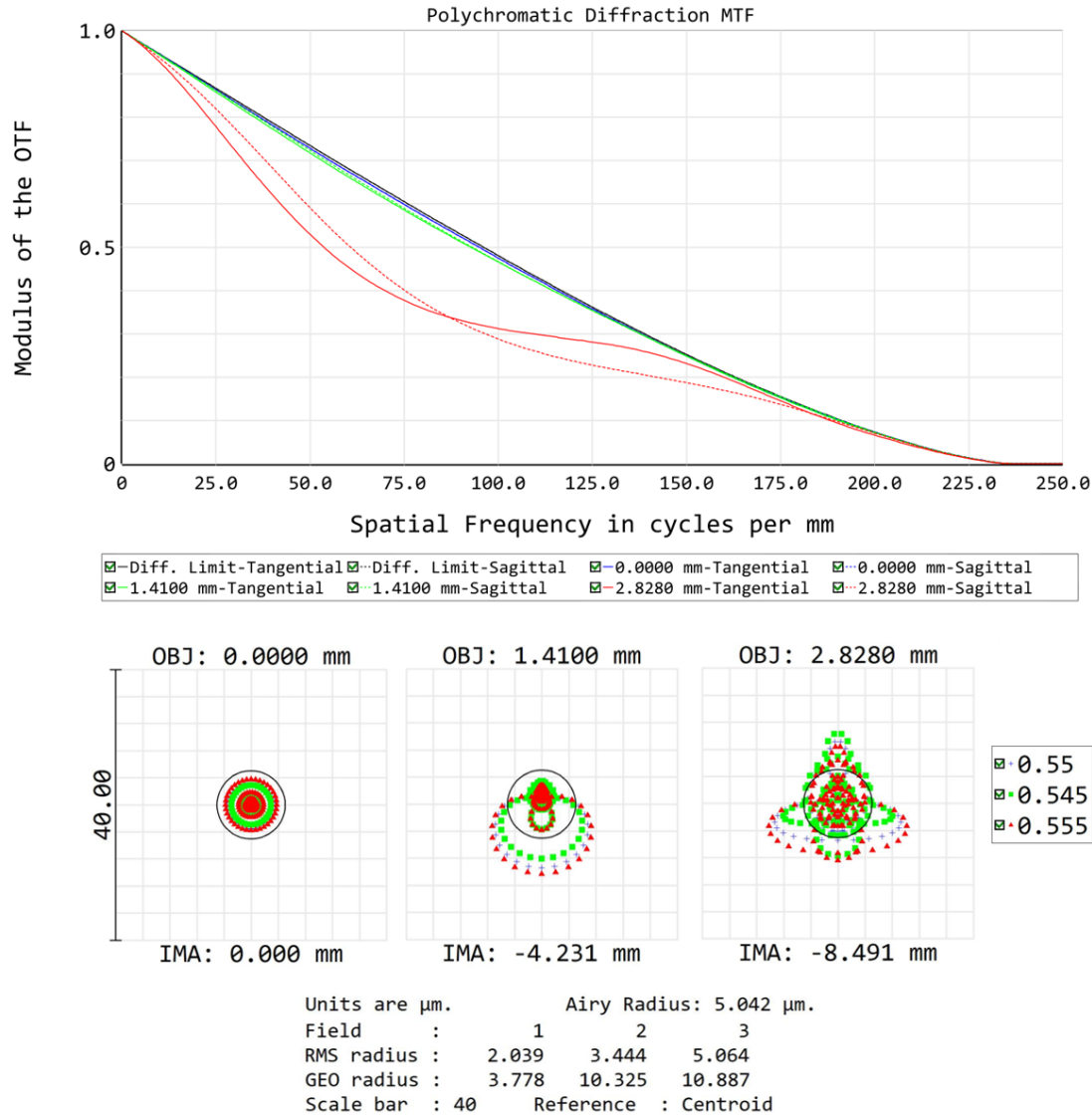


FIGURA 3.38: Especificacions del disseny òptic de la figura 3.37. a) MTF policromàtica pel camp central (blau), 1.41 mm de camp (verd) i 2.82 mm de camp (vermell) i la MTF limitada per difracció del sistema òptic (negre). b) *Spot diagram* pel camp central (esquerra), 1.41 mm de camp (centre) i 2.82 mm de camp (dreta). El cercle negre representa el radi d'Airy pel sistema limitat per difracció.

Els dissenys proposats en aquest apartat aborden diferents estratègies per al desenvolupament d'un objectiu òptic específicament adaptat a la caracterització de la manufactura additiva. La combinació de baix augment i una obertura numèrica de fins a 0.45 s'ha demostrat com un repte considerable, atès que comporta una elevada complexitat en el disseny òptic. L'alternativa basada en l'ús d'un anell de llum permet una simplificació significativa del sistema, reduint la dificultat d'aconseguir un rendiment òptic adequat i limitat per difracció. No obstant això, per garantir una il·luminació homogènia des de tots els angles i maximitzar l'eficiència del sistema,

és imprescindible un anell de llum dissenyat per oferir unes prestacions òptimes.

Capítol 4

Tècnica innovadora - *Encoded Search Focal Scan*

En aquest capítol es presenta el desenvolupament d'una nova tècnica de metrologia òptica per a la caracterització de superfícies. En el capítol anterior s'ha demostrat que l'OSAM permet una caracterització precisa de les peces de manufactura additiva, però actualment es veu limitat en velocitat a causa de la gran quantitat de dades que cal adquirir. Per tant, s'arriba a la conclusió que la qüestió ja no és augmentar la velocitat d'adquisició, sinó determinar si es pot reduir la quantitat de dades a adquirir, més concretament, disminuir el nombre d'imatges necessàries per al càlcul d'un mapa topogràfic.

La tècnica presentada en aquest capítol, l'*encoded search focal scan* (ESFS), ofereix una nova manera per reduir dràsticament el número d'imatges necessàries per al càlcul del mapa topogràfic. L'ESFS redefineix el paradigma de l'escaneig axial establert fins ara en l'estat de l'art (2) i que també segueix el sistema OSAM. Tradicionalment, les tècniques s'han basat en un escaneig axial per plans, on a cada pla s'hi adquireix una imatge de seccionament òptic. L'ESFS proposa una tècnica d'adquisició d'imatges diferent, on cada imatge conté informació de tot el rang d'escaneig axial. D'aquesta manera, és possible una reducció significativa del nombre d'imatges necessàries per a la reconstrucció topogràfica i permet minimitzar el temps total d'adquisició. Aquesta reducció del número d'imatges és tan dràstic, que s'obre la possibilitat a la mesura en temps real, un assoliment que no és possible amb les tècniques tradicionals.

En la segona part del capítol s'estudia la versatilitat de la tècnica desenvolupada. L'ESFS representa un canvi de paradigma en el mètode d'escaneig axial, que és un element comú en moltes tècniques de metrologia òptica. Per tant, l'ESFS es pot aplicar en diverses tècniques de metrologia òptica tradicional. En aquest apartat es demostra la implementació de l'ESFS en diferents sistemes òptics, aprofitant propietats òptiques com la interferència i la polarització. També es demostra la seva versatilitat en un microscopi confocal d'*spinning disk*. Aquestes contribucions confirmen la utilitat i flexibilitat de l'ESFS, que demostra el seu potencial en múltiples aplicacions.

4.1. Tècniques per a la caracterització ràpida de superfícies

L'adquisició de topografies a escala micromètrica és crucial en contextos industrial i científics [89, 90]. Per citar alguns exemples, existeix la inspecció òptica a línies de producció [91], metrologia de peces que provenen de manufactura additiva [72], i la caracterització en 3D de la superfície de biomaterials [92]. Típicament, els mapes topogràfics es reconstrueixen d'un escaneig d'imatges adquirits seqüencialment en diferents plans focals de l'eix z , com per exemple en la microscòpia confocal [93] o interferometria [94], tal com s'ha explicat a l'estat de l'art. Aquest procés és lent, en particular per mostres voluminoses, que requereixen grans desplaçaments mecànics. El problema empitjora quan es desitja aconseguir una resolució òptica sub-micromètrica. Les grans obertures numèriques dels objectius de microscopi presenten una profunditat de camp curta, i conseqüentment es requereix escanejar una quantitat major de plans focals en l'eix z per a una reconstrucció correcta. Per aquesta raó, els microscopis òptics de superfície són inadequats per caracteritzar processos industrials i sistemes biològics ràpids.

Per això, s'han desenvolupat estratègies per reduir el temps d'adquisició en topografies. Aquestes poden ser classificades en dos grups. El primer consisteix en les tècniques que tenen com a objectiu agilitzar l'obtenció de l'escaneig en l'eix z . Per exemple, en aquesta categoria es troba la multiplexació espai-temporal [95], la microscòpia de multi-focus [96, 97], els mètodes de codificació de la il·luminació [98-100], el *light-field imaging* [101], o l'utilització d'elements òptics variables per un control del focus més ràpid [32]. Aquests mètodes són capaços d'obtenir informació 3D de la mostra a temps real, però estan limitats en el rang axial, la complexitat de la tècnica, el cost de l'implementació, o pel tipus de mostres que poden caracteritzar.

Alternativament, és possible utilitzar un segon grup de tècniques basades en reduir la informació necessària per la reconstrucció 3D. Aquest fet s'aconsegueix aprofitant-se de la *sparsity* intrínseca de la majoria de mostres. Aquestes poden ser més simples, com per exemple seleccionar regions predefinides d'una mostra, com és en el cas de la microscòpia d'escaneig *random* [102], però en general la informació que es necessita *a priori* no és accessible. En canvi, altres plantejaments computacionals com el *compressed sensing* o l'enginyeria de la *point-spread function* [103, 104] permeten la reconstrucció de la topografia a partir de menys imatges, fins un ordre de magnitud menys, que les tècniques tradicionals [105]. Tot i això, la millora en la velocitat de la reconstrucció 3D ve donada per un sacrifici en la fidelitat de la reconstrucció. A més, aquestes tècniques són computacionalment costoses, i requereixen un post-processat després de l'adquisició [106]. Simplement, no existeix una tècnica fàcil d'implementar capaç d'obtenir topografies a temps real de volums grans a la micro-escala.

Per tal d'intentar omplir aquest buit, en aquesta tesi hem desenvolupat l'*Encoded Search Focal Scan* (ESFS), que es basa en un nou paradigma que no segueix el plantejament tradicional de l'escaneig pla per pla. En canvi, utilitza un conjunt reduït d'imatges, que cadascuna s'ha adquirit durant una escombrada focal de tot el rang axial d'interès. Conjuntament, s'utilitza llum sincronitzada i modulada durant l'escombrada focal que codifica informació de la posició axial de la mostra. El resultat

permet una reducció en l'ordre de magnitud de la quantitat d'imatges necessàries sense afegir complexitat addicional. A més, el mètode es pot implementar en qualsevol sistema òptic d'escaneig amb petites modificacions.

4.2. Principi de funcionament de l'ESFS

L'objectiu principal de la metrologia de superfícies és la d'obtenir un mapa topogràfic de la mostra. Per això, existeixen les tècniques tradicionals com la microscòpia confocal, la variació de focus i l'interferometria, on la mostra s'escaneja en un rang de l'eix z , on es suposa que la mostra es troba, amb un número N determinat de plans, que en general ve donat per l'obertura numèrica de l'objectiu de microscopi que s'utilitza i el rang a escanejar. Aquest número de plans canvia en funció de l'objectiu de microscopi, ja que l'*step* òptim està relacionat amb la resolució axial de l'objectiu,

$$d_{axial} = \frac{2\lambda}{NA^2} \quad (4.1)$$

on λ és la longitud d'ona de la llum, i NA és l'obertura numèrica de l'objectiu. L'amplitud de la resposta axial decreix a mesura que l'obertura numèrica augmenta, i per tant l'*step* serà més petit. És essencial que aquest sigui suficientment petit per tal de mostrejar correctament la resposta axial, però no massa petit per evitar un temps de mesura massa llarg. La taula 4.1 mostra la mida d'*step* ideal per a diferents obertures numèriques i el número de plans per a un rang d'escaneig de 100 μm .

Obertura numèrica	Mida d' <i>step</i> (μm)	Plans (100 μm de rang)
0.3	8.0	13
0.45	1.0	100
0.8	0.4	250

TAULA 4.1: Obertura numèrica, mida d'*step* i número de plans corresponent per un escaneig de 100 μm .

Atès que cada pla correspon a una imatge, es requereixen com a mínim N imatges per fer tot l'escaneig axial. Més concretament, en microscòpia confocal es necessiten tres imatges en cada pla ($3N$), en HiLo dues ($2N$), i en variació de focus només una (N). Malgrat les diferències en els algorismes de seccionament òptic, totes aquestes tècniques impliquen l'adquisició d'una quantitat considerable d'imatges, en un ordre de magnitud similar.

La Figura 4.1 mostra un esquema de l'escaneig convencional. La major part d'informació amb aquest tipus d'escaneig es troba concentrada al voltant de la posició axial de la mostra z_s . En canvi, les altres imatges adquirides no donen cap tipus d'informació.

L'alternativa per evitar l'adquisició d'un gran nombre d'imatges, i en la qual es fonamenta la idea principal de l'ESFS, és adquirir imatges amb una profunditat de camp estesa, més concretament amb una profunditat de camp igual al rang axial a mesurar. La manera d'aconseguir-ho és a través d'un escaneig del rang axial mentre que la càmera adquireix una imatge [107]. El *trade-off* és una pèrdua de contrast

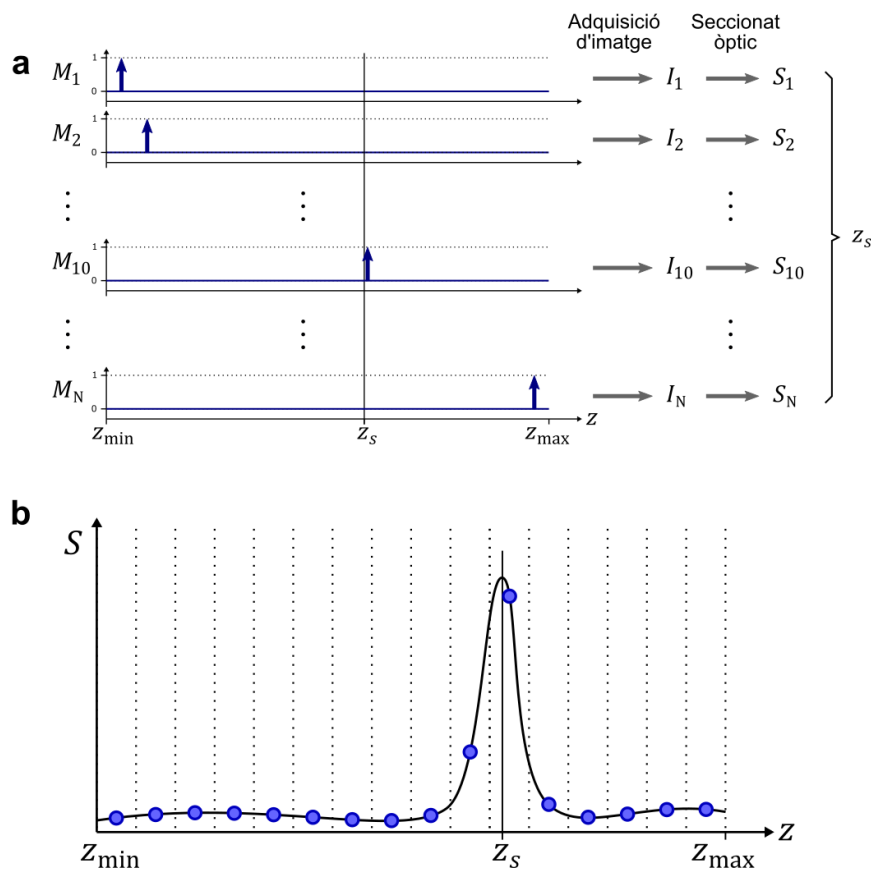


FIGURA 4.1: Esquema de l'escaneig convencional que s'utilitza en la metrologia òptica. a) Modulació que s'utilitza en funció del rang axial. La modulació són deltes de Dirac perquè durant l'adquisició de la imatge no hi ha cap canvi en la posició de focus. b) Mostreig de la resposta axial que s'obté amb l'escaneig convencional. En la major part d'imatges adquirides no s'obté cap informació de la posició axial de la mostra.

degut a la informació que es captura quan la mostra està desenfocada. A través d'aquest mètode s'estén la profunditat de camp, però no es codifica informació axial de la mostra. Per tal de codificar informació axial de la mostra en la imatge, es projecta un patró de texturització a la mostra i es modula la il·luminació durant l'adquisició. El patró de texturització és necessari que tingui una freqüència espacial alta, i com a exemple es podria utilitzar un patró *Ronchi* o un tauler d'escacs (*checkerboard*). A la Figura 4.2 es mostra un esquema de la idea principal del moviment i la modulació de la llum. En aquest cas, la modulació és senzilla, el LED està apagat durant la primera meitat del rang axial i encès durant la segona meitat. Això implica que si la mostra es troba en la primera meitat, tota la llum que integrarà la càmera serà fora de focus. Per tant, el patró projectat no serà visible. En canvi, si es troba a la segona meitat, en la llum integrada per la càmera també hi haurà la contribució del pla en focus, i en aquest cas el patró sí que serà visible. D'aquesta manera es pot codificar informació axial de la mostra en les imatges.

Per formalitzar la tècnica d'adquisició d'imatges de l'ESFS, escrivim les imatges adquirides com a:

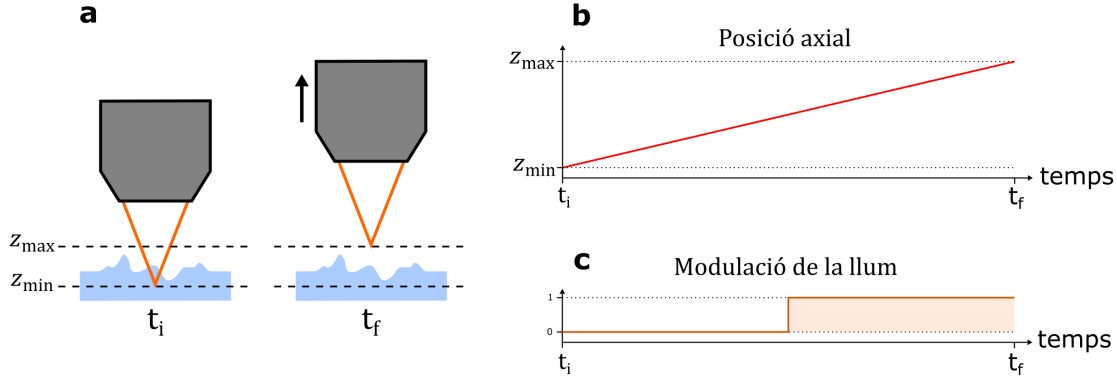


FIGURA 4.2: Esquema de la idea principal de l'ESFS. a) Posicions inicial i final en l'adquisició d'una imatge. b) Posició axial en funció del temps. c) Modulació de la llum en funció del temps. El temps d'exposició de la càmera és $t_f - t_i$.

$$I(x, y) = \int_{z_{min}}^{z_{max}} \{ [r(x, y) \cdot L(x, y)] * PSF(x, y, z - z_s) \} M(z) dz, \quad (4.2)$$

on $z_{max} - z_{min}$ és el rang de mesura, $r(x, y)$ és la reflectivitat de la mostra, $L(x, y)$ és el patró d'il·luminació de la mostra, PSF és la *point-spread function*, z_s és l'alçada de la mostra a la posició (x, y) , $M(z)$ és la modulació de la font de llum i l'operador $*$ denota convolució en el pla (x, y) . En el nostre cas l'escombrat axial s'implementa a velocitat constant i per tant temps i espai es poden intercanviar a través de $z = vt$.

Per saber si la il·luminació estava encesa o apagada, es necessita determinar si el patró està enfocat en cada punt de la mostra. Una opció és detectar el contingut d'altres freqüències espacials en la imatge, de manera similar a la tècnica de variació de focus. Per exemple, una mètrica basada en la magnitud del Laplacà de la imatge proporciona aquesta senyal:

$$S(x, y) = G_{\sigma_b} [\nabla^2 G_{\sigma_a} \{ I(x, y) \}], \quad (4.3)$$

on G_σ denota filtratge espacial Gaussià amb una desviació estàndard σ . Qualsevol altra mètrica que detecti el contingut de altes freqüències espacials també seria útil en aquest pas. Llavors, a través d'una simple binarització de la imatge resultant d'aquest últim pas, es pot determinar si la mostra es trobava a qualsevol de les localitzacions axials de la modulació $M(z)$.

És evident que amb una sola imatge no és possible trobar la posició axial de la mostra, però sí que podem detectar si la il·luminació estava encesa o apagada en el moment que la mostra passa a través de focus de l'escombrat. Això ens permet detectar si la mostra es troba en les posicions on la il·luminació estava encesa o apagada. La idea és utilitzar codis binaris per tal d'implementar un algorisme similar a la cerca binària [108] i en la projecció de franges. El gran potencial d'aquest algorisme és la capacitat de trobar la posició axial de la mostra fent servir només $\log_2(N)$ imatges, i per tant porta a una reducció important del nombre d'imatges a adquirir. La Figura 4.3 mostra les modulacions proposades per trobar la posició axial de la mostra. En el mètode proposat totes les imatges contenen informació rellevant de la posició axial de la mostra.

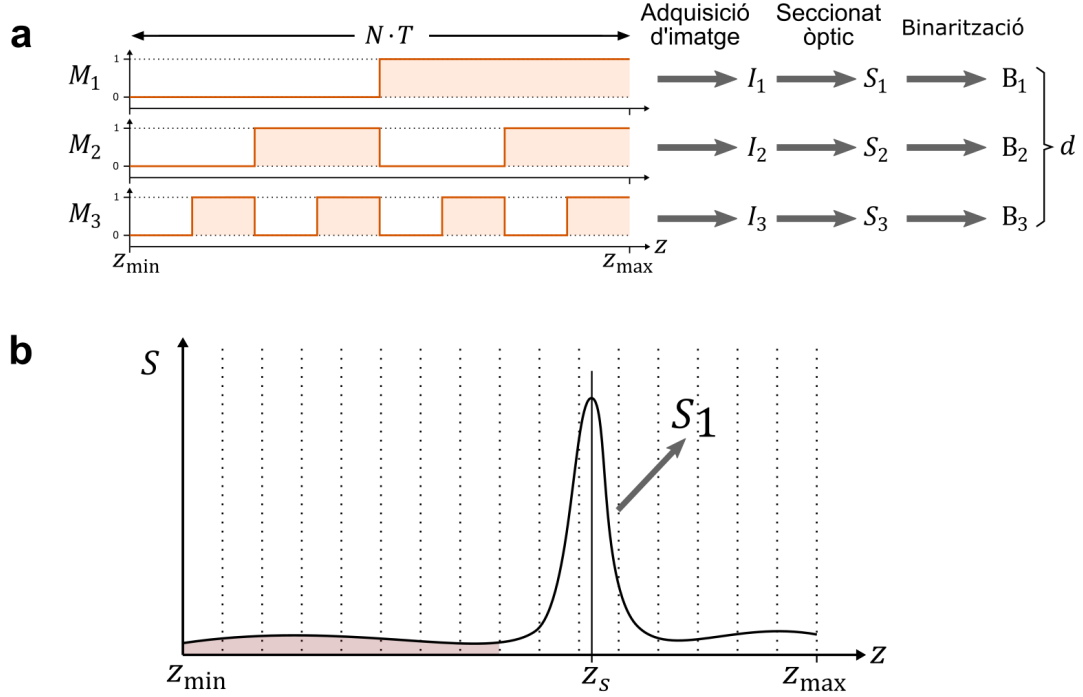


FIGURA 4.3: Esquema de l'escaneig proposat amb la tècnica d'ESFS. a) Modulació que s'utilitza en funció del rang axial. La binarització de les imatges resulta en el codi d que conté la posició de la mostra z_s . b) Mostreig de la resposta axial que s'obté amb l'escaneig proposat d'ESFS. En aquest cas totes les imatges contenen informació sobre la localització de la mostra.

Per últim, a partir de totes les imatges adquirides, es calcula el codi d que conté la posició de la mostra amb

$$d(x, y) = \sum_{i=1}^n 2^{n-i} H(S_i(x, y) - S_{th}(x, y)), \quad (4.4)$$

on n és el número d'imatges, H és la funció de Heaviside, i $S_{th}(x, y)$ és el llindar de la binarització.

La principal limitació d'aquest mètode és que l'*step* axial més petit que es pot implementar i detectar ve donat per la profunditat de camp de l'objectiu. Si s'implementessin *steps* més petits no hi hauria una millora de la resolució axial. Malgrat això, és possible augmentar la precisió en la localització axial. En els mètodes convencionals normalment es fa un *fitting* de la resposta axial [109]. En l'ESFS, es basa en utilitzar modulacions que segueixin una funció sinusoidal, amb un període igual a l'*step* més petit de l'etapa anterior.

Llavors, en una segona etapa d'adquisició, s'utilitzen modulacions tal que

$$M_j(z) = \frac{1 + \cos\left(\frac{2\pi}{T}z + \delta_j\right)}{2}, \quad (4.5)$$

on δ_j és un *offset* de fase i T és la mida d'*step* definit en l'etapa prèvia que satisfà $T = (z_{max} - z_{min})/2^n$. La Figura 4.4 mostra les modulacions proposades, on totes segueixen una funció sinusoidal però amb fases inicials de 0 , $\pi/2$, π i $3\pi/2$.

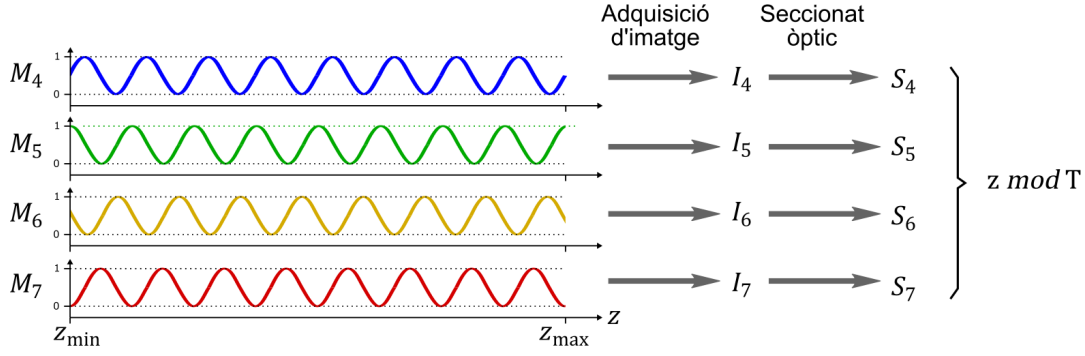


FIGURA 4.4: Modulacions proposades per augmentar la precisió de l'ESFS en una segona etapa d'adquisició. S'adquireixen quatre imatges amb un canvi relatiu de fase de $\pi/2$, i les imatges corresponents de seccionat òptic s'utilitzen per calcular la posició axial de la mostra amb major precisió, encara que el resultat sigui *modulo* de l'*step* utilitzat, T .

Com que el filtratge de l'Equació 4.3 extreu la informació d'altres freqüències espacials, la magnitud de les imatges seccionades S_j és directament proporcional a la modulació en la posició axial de la mostra $M_j(z = z_s)$. Es pot intuir que això és cert perquè el sistema òptic actua com un sistema lineal. Llavors, el resultat d'una freqüència pura d'entrada a un sistema lineal és la mateixa freqüència amb una reducció de la modulació. Això es demostra més formalment a l'apèndix A.1. Per tant, la senyal detectada S_j és

$$S_j(x, y) = S_{\max}(x, y) \frac{1 + m \cos\left(\frac{2\pi}{T} z + \delta_j\right)}{2}, \quad (4.6)$$

on $S_{\max}(x, y)$ és el valor central de l'oscil·lació i m és la reducció de contrast resultant. $S_{\max}(x, y)$ depèn localment de la mostra, i per zones brillants aquest valor serà alt, ja que el patró projectat tindrà més contrast. Pel contrari, en una zona fosca el contrast serà inferior i el valor obtingut serà més baix. En qualsevol cas, aquest valor no és una incògnita i es pot calcular. Les quatre imatges adquirides en aquesta segona etapa es poden escriure com:

$$S_1 = A - B \cos\left(\frac{2\pi}{T} z\right), \quad (4.7)$$

$$S_2 = A + B \sin\left(\frac{2\pi}{T} z\right), \quad (4.8)$$

$$S_3 = A + B \cos\left(\frac{2\pi}{T} z\right), \quad (4.9)$$

$$S_4 = A - B \sin\left(\frac{2\pi}{T} z\right), \quad (4.10)$$

on $A = S_{\max}/2$, $B = mS_{\max}/2$. Si sumem aquestes quatre imatges i dividim entre quatre obtenim

$$\frac{S_{\max}}{2} = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} S_j(x, y) = S_{\text{th}}(x, y), \quad (4.11)$$

on $n_2 = 4$, que és el número d'imatges adquirides en la segona etapa. A més, com que el valor de $S_{max}(x, y)$ depèn localment de la mostra, es pot utilitzar com a llindar de la primera etapa. Si el llindar fos un valor global per tota la mostra, podria haver-hi errors en la binarització degut als canvis locals de reflectivitat que pugui tenir la mostra. D'aquesta manera, la binarització és robusta i amb menys errors.

Llavors, la posició axial de la mostra *modulo* T es pot calcular amb

$$z_{mod}(x, y) = \frac{T}{2\pi} \arg((S_2 - S_4) + i(S_3 - S_1)), \quad (4.12)$$

on $\arg(z)$ és l'argument del nombre complex $z = x + iy$ en el rang $[0, 2\pi]$. Aquesta fórmula és la mateixa que s'utilitza en la PSI per obtenir la fase de la interferència.

Finalment, es pot obtenir la posició axial de la mostra amb

$$z_s(x, y) = z_{min} + d(x, y) \cdot T + z_{mod}(x, y), \quad (4.13)$$

on d és el número de l'*step* obtingut en la primera etapa i z_{mod} és el resultat de la segona etapa. Combinant les dos etapes d'il·luminació, l'ESFS maximitza la precisió en la localització axial mantenint un rang de mesura gran. A més, en aquesta implementació només es necessiten vuit imatges, quatre en la primera etapa i quatre en la segona.

4.3. Codis de Gray

A l'apartat anterior s'han introduït els codis binaris com a modulació de la il·luminació per la primera etapa de l'ESFS. Aquest tipus de codis, tot i ser els primers que es van implementar durant el desenvolupament de la tècnica, no són els més adients per els errors que generen.

En la Figura 4.5 es mostra un exemple de la problemàtica referent als codis binaris. El codi d que s'obté conté errors molt visibles que es concentren a les zones axials properes als canvis de la il·luminació.

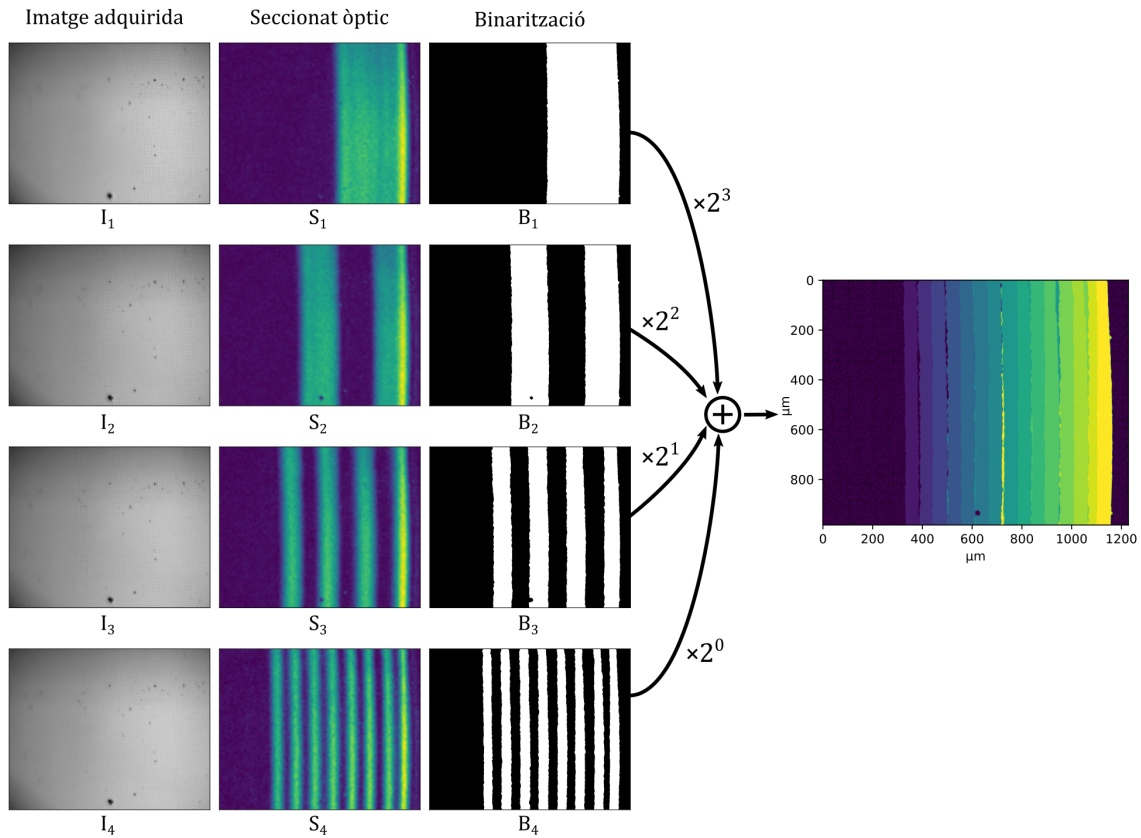


FIGURA 4.5: Imatges ESFS de la primera etapa per un mirall inclinat com a mostra i utilitzant codis binaris. Es mostra el seccionat òptic i la binarització per cada imatge adquirida. Amb les imatges binàries es calcula el codi d que conté la posició de la mostra. Degut al soroll i a les imprecisions mecàniques durant l'escaneig focal, el codi d conté errors en les posicions axials properes als canvis en la modulació de la il·luminació.

En teoria, si el moviment de l'escaneig fos perfecte i no existís soroll durant l'adquisició de la imatge, les imatges binaritzades encaixarien perfectament. En una situació més realista, però, s'obtenen els errors a la Figura 4.5. Els codis binaris no són robustos per reconstruir la topografia, i la causa és la manera com estan dissenyats. Per tal de solucionar aquest problema, la millor manera és substituir els codis binaris per codis de Gray [110]. Aquest tipus de codis continuen sent binaris, però amb una propietat important, ja que dos números consecutius només difereixen en un sol bit. A la Taula 4.2 es mostren els codis binaris i Gray per els números

entre el zero i el set, i la Figura 4.6 es veuen les modulacions basades en els codis de Gray.

Decimal	Binari	Gray
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110
5	101	111
6	110	101
7	111	100

TAULA 4.2: Codis binari i Gray pels números entre el 0 i el 7. Els codis Gray només difereixen d'un sol bit entre números consecutius, en canvi els codis binaris no tenen aquesta propietat.

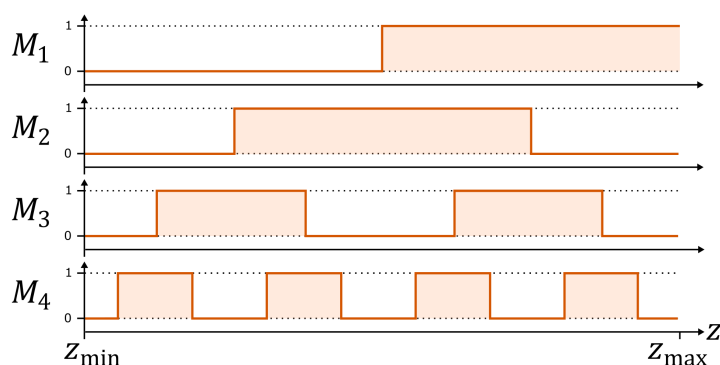


FIGURA 4.6: Modulacions basades en codis de Gray. Cada modulació té els canvis en la il·luminació en diferents posicions axials, de manera que no es superposaran les imatges binaritzades.

La propietat dels codis de Gray soluciona els errors observats en la Figura 4.5. A la Figura 4.7 es mostra l'esquema de reconstrucció del codi binari a partir de les imatges amb el codi Gray. Com que cada imatge tindrà diferents límits de binarització, no es superposaran com en el cas dels codis binaris, i per tant no hi haurà problemes quan les imatges binaritzades s'afegeixin.

Els codis de Gray permeten que l'ESFS sigui més robust davant el soroll i les imprecisions durant l'escaneig axial de la mostra, augmentant així la tolerància del sistema als errors. A més, la seva implementació no comporta cap desavantatge, per la qual cosa representa una millora significativa sense cost addicional.

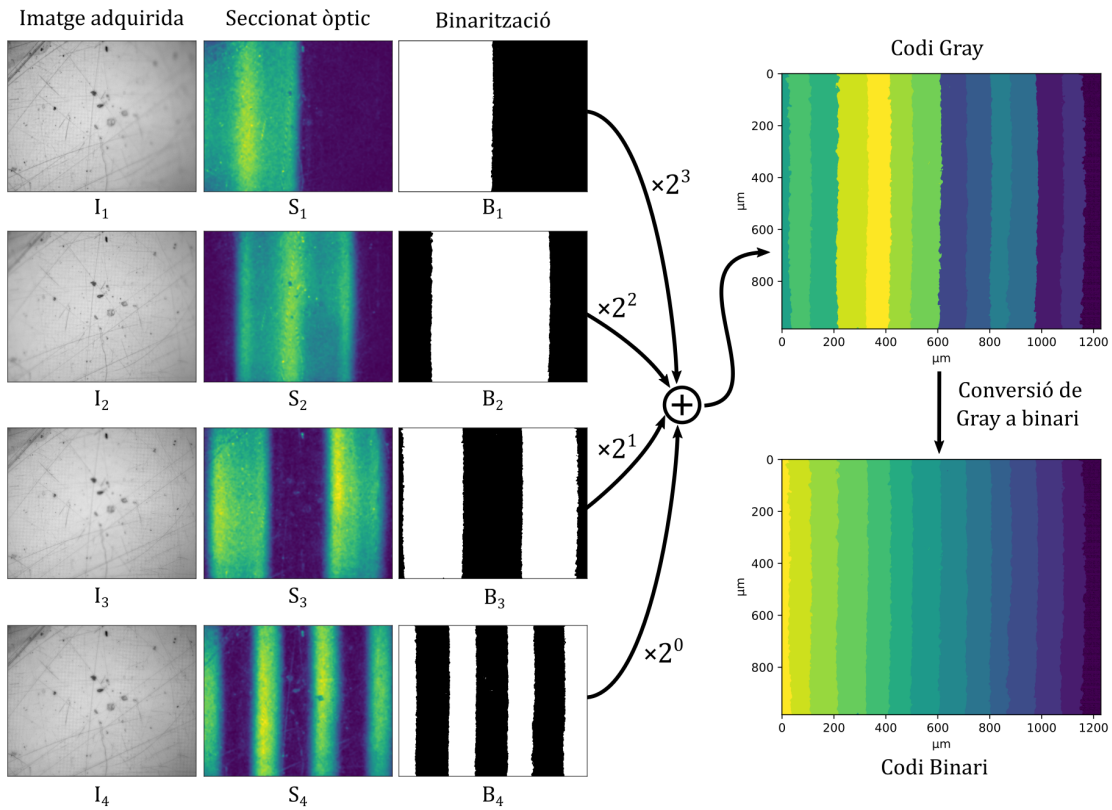


FIGURA 4.7: Imatges ESFS de la primera etapa per un mirall inclinat com a mostra fent servir codis de Gray. Es mostra el seccionat òptic i la binarització per cada imatge adquirida. Amb les imatges de Gray es calcula el codi intermedi que després es converteix al codi d que conté la posició de la mostra. El codi Gray és més robust, i encara que hi hagi soroll o imprecisions mecàniques en l'escaneig focal els resultats contenen menys errors.

4.4. Errors 2π

En l'últim pas de l'ESFS, el corresponent a l'Equació 4.13, es fusionen les dues etapes per obtenir la topografia final de la mostra. Aquest pas és senzill, però en realitat és poc robust degut a la naturalesa dels algorismes de cada etapa. A la Figura 4.8 es pot veure els resultats de cada etapa per a un mirall inclinat com a mostra, el codi binari per la primera i el mapa de fase per la segona, i la suma resultant d'aquestes dos. A la Figura 4.8c) es veu com hi ha zones on el codi binari i el mapa de fase no coincideixen, fet que produeix *spikes* molt visibles en la topografia de la mostra i, que a més, no són fidels a la topografia real.

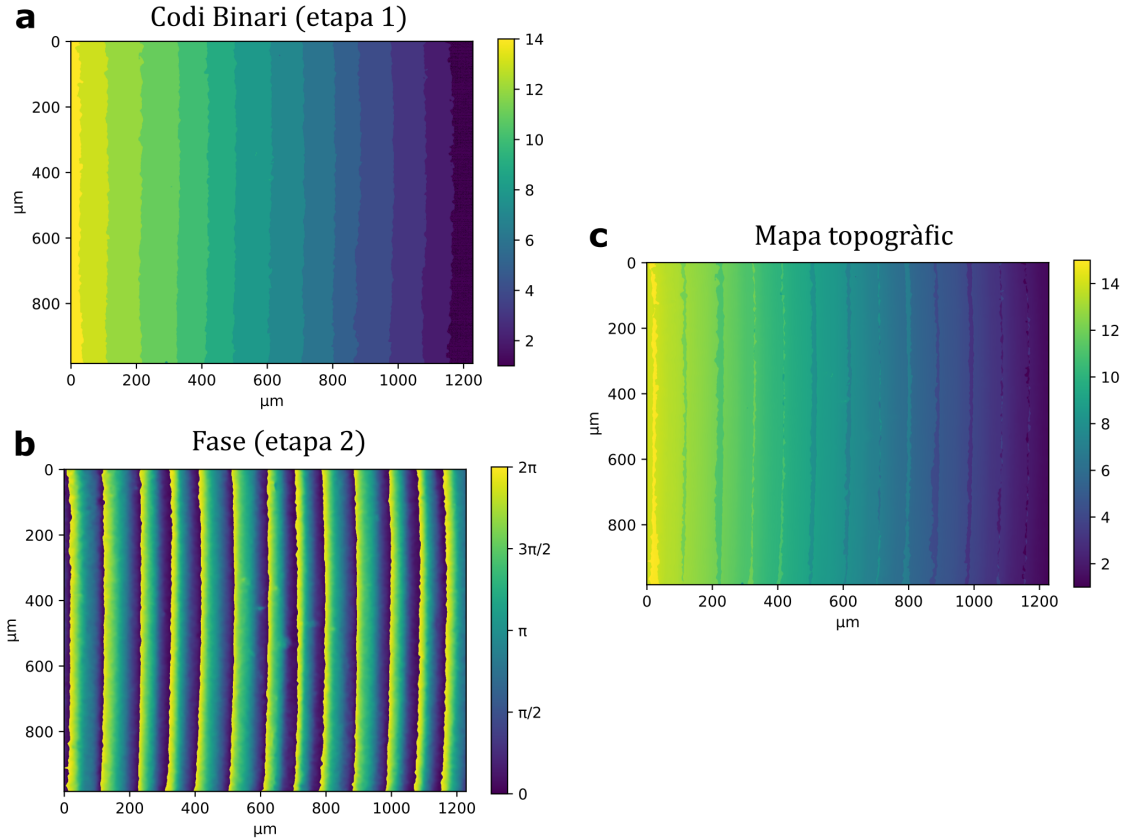


FIGURA 4.8: Errors que es produeixen durant la fusió de la primera i segona etapa per a un mirall inclinat com a mostra. a) Codi binari resultant de la primera etapa. b) Mapa de fase corresponent a la segona etapa). c) Mapa topogràfic resultant de la suma del codi binari i el mapa de fase.

Aquests errors també són coneguts en altres tècniques tradicionals de metrologia òptica, sobretot en PSI i projecció de franges, i s'acostumen a anomenar errors 2π . L'origen físic és completament diferent en cada tècnica, però en tots els casos l'error és degut pel mateix concepte. En general, aquestes tècniques obtenen un mapa de fase de la mostra, i per obtenir la topografia han de passar pel procés d'*unwrapping*. És a dir, donada l'equació

$$z_s(x, y) = n(x, y) \cdot T + z_{mod}(x, y) \quad (4.14)$$

es coneix el mapa de fase $z_{mod}(x, y)$ però es desconeix $n(x, y)$, el número de períodes

a sumar en cada punt del mapa de fase. Si el valor computat de $n(x, y)$ és erroni, llavors apareixeran els *spikes* tan visibles que es poden veure en la Figura 4.8.

En el cas de PSI, els errors sorgeixen perquè no es pot calcular inequívocament $n(x, y)$, sobretot quan la mostra no és contínua i té una naturalesa esglaonada. En el cas de projecció de franges i ESFS, sí que es pot calcular el mapa $n(x, y)$ (en ESFS l'anomenem codi d), però pel soroll, digitalització i altres fonts d'error, els dos mapes no coincideixen a la perfecció. A la Figura 4.9 es veuen talls horitzontals de les imatges de la Figura 4.8 de la fase, del codi binari d i del mapa topogràfic. Allà on la fase i el mapa binari no coincideixen es veuen *spikes* molt notables, que poden ser positius o negatius en relació al valor real.

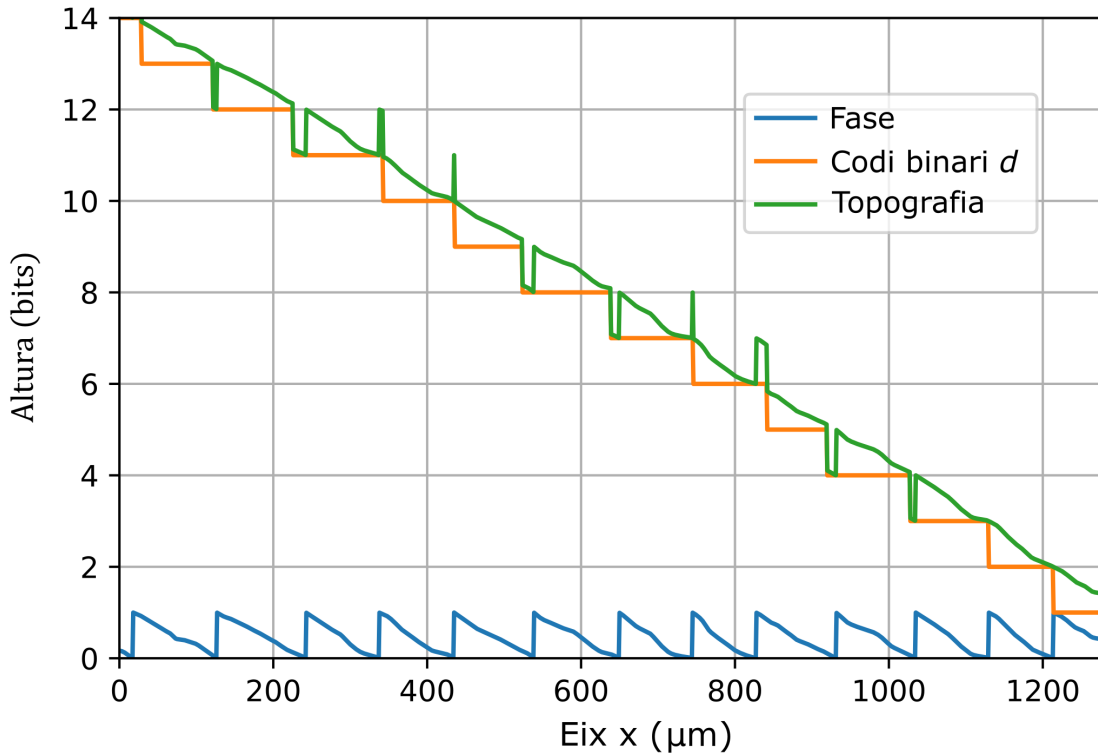


FIGURA 4.9: Talls horitzontals de la Figura 4.8 per la fase, el codi binari d i el mapa topogràfic. Allà on la fase i el mapa binari no coincideixen es veuen *spikes* molt notables, que poden ser positius o negatius en relació al valor real. La fase està normalitzada sobre 1.

La manera de solucionar la incompatibilitat entre el mapa de fase i el codi binari és a través de dos codis binaris complementaris, de la mateixa manera com es va proposar en el camp de projecció de franges [111]. A través de l'obtenció d'una imatge addicional, el rang de mesura es pot dividir en 2^{n+1} zones, i el codi Gray corresponent el definim com a d_+ . Aquest codi es divideix entre dos per mantenir el mateix rang que el codi d , amb la diferència fonamental que $d_+/2$ prendrà valors fraccionaris a la meitat de cada enter. Per últim, s'arrodoneix el codi $d_+/2$ cap amunt i cap avall, que dona els codis $\lceil d_+/2 \rceil$ i $\lfloor d_+/2 \rfloor$. Els operadors $\lceil \cdot \rceil$ i $\lfloor \cdot \rfloor$ representen arrodoniment cap amunt o cap avall a l'enter més pròxim, respectivament. Aquests

dos codis són els que s'utilitzaran per el càlcul robust de d amb

$$d = \begin{cases} \lceil d_+ \rceil & \text{si } 0 \leq z_{\text{mod}}(x, y) < \frac{1}{4}T \\ \lfloor d_+ \rfloor & \text{si } \frac{1}{4}T \leq z_{\text{mod}}(x, y) < \frac{3}{4}T \\ \lceil d_+ \rceil - 1 & \text{si } \frac{3}{4}T \leq z_{\text{mod}}(x, y) < T \end{cases} \quad (4.15)$$

La Figura 4.10 mostra un esquema dels codis d (en groc) i $d_+/2$ (en negre). A través de $d_+/2$ s'obtenen els codis complementaris $\lfloor d_+/2 \rfloor$ (en verd) i $\lceil d_+/2 \rceil$ (en vermell), que són els que s'utilitzen pel càlcul robust de d . Amb aquest mètode s'utilitza informació de la fase per seleccionar de manera convenient un codi que no tingui transicions en la zona axial propera, i eliminar els errors 2π del mapa topogràfic final de la mostra.

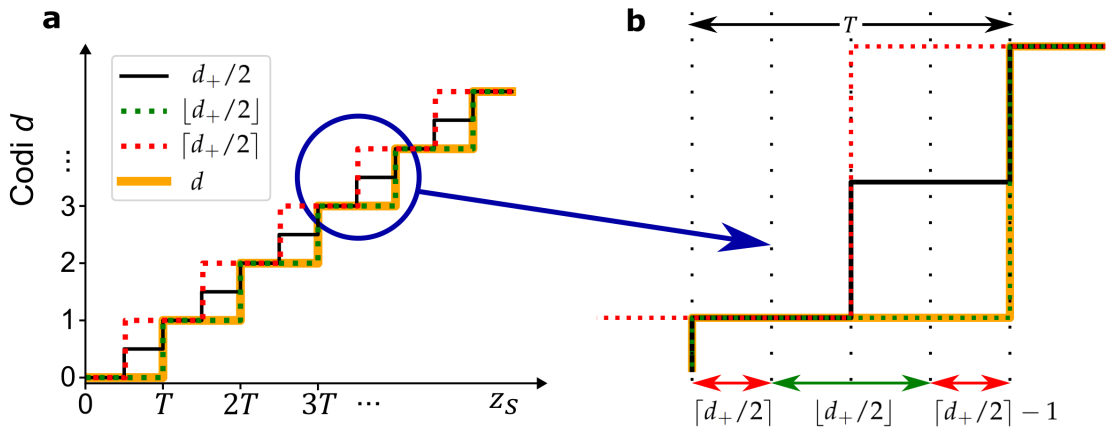


FIGURA 4.10: Esquema pel càlcul robust del codi d . a) La seqüència de codis Gray amb N imatges dona el codi d , en groc. L'adquisició d'una imatge addicional del codi Gray dona d_+ , que es divideix entre 2 per mantenir el mateix rang. A diferència del codi d , d_+ pren valors fraccionaris. Per últim, es veu el codi $d_+/2$ arrodonit cap amunt (en vermell) i cap avall (en verd) a l'enter més pròxim. L'obtenció robusta del codi d es fa per parts amb aquests dos últims. b) En el primer i últim quart de cada període T s'utilitza informació del codi arrodonit cap amunt, mentre que en el segon i tercer quart s'utilitza el codi arrodonit cap avall. D'aquesta manera el càlcul és robust perquè s'utilitza informació de zones allunyades dels *steps* de transició.

Aquesta tècnica permet combinar els resultats de les dues etapes de l'ESFS sense generar errors, obtenint així un mapa topogràfic de la mostra amb una resolució axial molt superior a la que s'aconseguiria utilitzant només la primera etapa. Tot i que requereix l'adquisició d'una imatge addicional per calcular el codi $d_+/2$, la millora obtinguda és tan significativa que aquest requeriment esdevé mínim en comparació amb els avantatges que aporta. Per això, en els prototips que es presenten més endavant s'han utilitzat codis de Gray juntament amb la tècnica presentada en aquest apartat.

4.4.1 Alternativa a la modulació sinusoidal

En el principi de funcionament de l'ESFS, s'ha explicat que per la segona etapa és necessari implementar una modulació sinusoidal per recuperar la fase de la mostra. La

implementació d'aquesta modulació pot ser complexa, ja que si es fa directament en el LED pot haver-hi efectes no lineals degut a la característica d'intensitat-voltatge (I-V) que tenen aquest elements. En canvi, si s'utilitzen elements externs per modular la llum es poden eliminar fàcilment aquest efectes indesitjats, però s'afegeix complexitat i cost al sistema òptic. Una alternativa a aquesta modulació es basa en utilitzar polsos amb el mateix període que la modulació sinusoidal. D'aquesta manera, la modulació és fàcil d'implementar, ja que torna a ser binària com en la primera etapa de l'ESFS.

Per altra banda, utilitzar una modulació polsada no només és beneficiós per la seva simplicitat, sinó que també proporciona un augment del contrast del senyal adquirida. Aquest fet es pot observar en la Figura 4.11, on s'han simulat els dos tipus de modulacions. Aquestes es van fer amb els paràmetres de la Taula 4.3. En el cas sinusoidal, la convolució d'aquesta modulació (a) amb la PSF genera una senyal també sinusoidal (b) però amb una reducció del contrast, ja que la PSF actua com un filtre passa-baixos i atenua més la freqüència de la modulació que el component constant ($f = 0$).

En canvi, quan s'utilitza una modulació amb polsos (c), l'atenuació de la PSF es pot compensar i el contrast es manté més alt, tal com es veu en la Figura d). La demostració d'aquest fet es pot trobar a l'apèndix A.2. En la Figura 4.11e) es mostren les dues il·luminacions i els senyals adquirits, amb la diferència de contrast evident. En la Figura 4.11f) es representa la fase calculada amb la il·luminació polsada i sinusoidal, i es veu la desviació de la primera respecte la segona. Si el període escollit és similar a la profunditat de camp de l'objectiu, llavors la diferència amb la modulació sinusoidal és redueix en gran mesura, ja que els harmònics superiors s'atenuen.

Paràmetre	Valor
Augment	20 ×
Obertura numèrica	0.45
Longitud d'ona	0.5 μm
Període T	10 μm

TAULA 4.3: Paràmetres de simulació per comparar la precisió en localització axial fent servir llum amb modulació sinusoidal i polsada.

Mitjançant la il·luminació polsada, es simplifica tot l'esquema de modulacions de l'ESFS utilitzant únicament senyals quadrades. En la primera etapa, s'aplica una senyal quadrada amb un duty cycle del 50 % a diferents freqüències. En la segona etapa, si la modulació també es fa mitjançant polsos, s'utilitza una senyal quadrada amb freqüència fixa però amb un duty cycle reduït. Aquest esquema simplifica considerablement el control de la il·luminació, permetent la seva implementació amb microcontroladors senzills, com per exemple una Arduino.

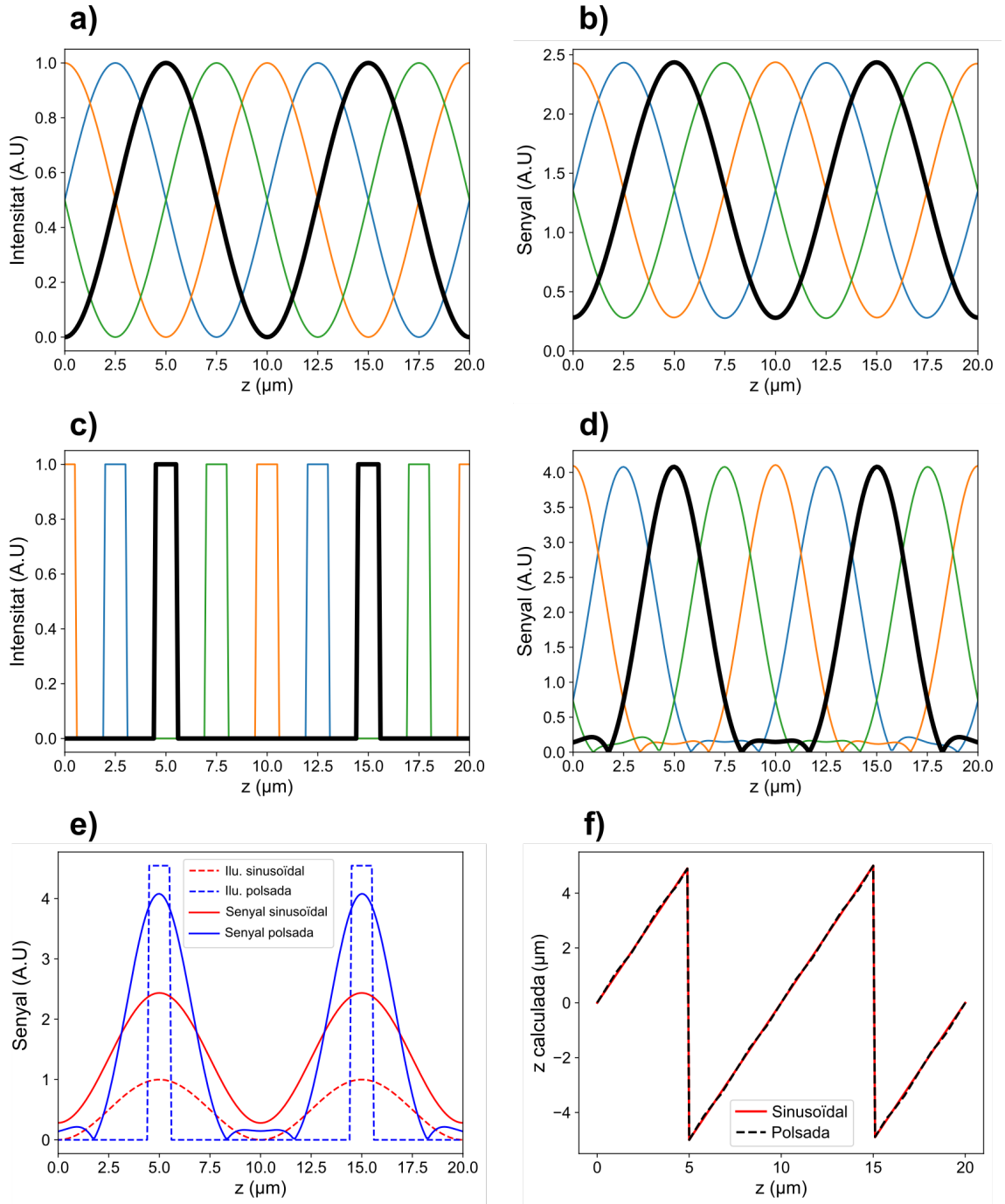


FIGURA 4.11: Comparació entre les modulacions a) sinusoidal i c) pulsada. Senyal adquirida amb la il·luminació b) sinusoidal i d) pulsada. El període (T) és de $10 \mu\text{m}$, i per tant es poden veure quatre modulacions amb un retard de $T/4$ en diferents colors. Per una comparació directa, en la Figura e) les dues il·luminacions i senyals es mostren conjuntament, on la diferència en contrast és evident. En la Figura f) es mostren les desviacions de la fase recuperada amb l'equació 4.12 fent servir la il·luminació pulsada en comparació amb la sinusoidal.

4.5. Resultats

L'ESFS es pot implementar en qualsevol sistema òptic per a la caracterització de superfícies amb unes poques modificacions. Els principals elements necessaris són el sistema per la modulació de la il·luminació, el patró que es projecta sobre la mostra per texturitzar-la, i l'escaneig focal. En aquí presentem la prova de concepte de l'ESFS amb dos prototips diferents. En els dos casos s'utilitza un LED polsat per la modulació de la il·luminació, i una màscara de crom sobre vidre per generar la texturització artificial. La principal diferència es troba en el sistema per fer l'escaneig focal, que en el primer cas es fa mecànicament amb un motor lineal i en el segon cas s'utilitza una lent varifocal.

4.5.1 Prototip 1: escombrat focal mecànic

El primer prototip inclou un motor lineal (DOF-5, Dover Motion) que fa l'escaneig focal movent l'objectiu de microscopi en relació a la posició de la mostra. El sistema d'il·luminació inclou un LED amb longitud d'ona central de 525 nm, i com a màscara que es projecta a la mostra vam utilitzar un patró d'escacs de crom sobre vidre amb un període de 13 μm . A la Figura 4.12a) es pot veure un esquema del sistema òptic, on també es veu la lent de tub de 50 mm i la càmera (VCXU-13M, Baumer) amb 1024 $\times$ 1280 píxels i una mida de píxel de 4.8 μm . A la Figura 4.12b) es pot veure una fotografia del sistema. La implementació de les seqüències d'il·luminació per generar els patrons de codificació, juntament amb la sincronització de l'escaneig de focal i la càmera la vam realitzar amb una placa Arduino (Mega 2560, Arduino). El rang de mesura el vam escollir de 100 μm , el motor el vam configurar per moure's a una velocitat de 1000 $\mu\text{m/s}$ i, per tant, el temps d'exposició de la càmera és necessari que sigui 100 μs per tal que tot el rang axial de la mostra s'escanegi durant l'exposició.

Vam fer servir un objectiu de microscopi 20 $\times$ /0.45 NA (Nikon) amb una profunditat de camp aproximadament de 2.6 μm . Vam decidir dividir el rang de mesura en 8 zones axials, amb una mida de zona de 12.5 μm , i per tant només es requereixen 3 imatges de codis Gray. A més, pel càlcul robust i suprimir els errors 2π , vam adquirir una imatge addicional del codi de Gray. Per la segona etapa vam implementar una il·luminació amb un període de 12.5 μm , i vam adquirir quatre imatges amb un canvi de fase entre imatges de $\pi/2$. En total, vam adquirir vuit imatges, quatre en la primera etapa i quatre en la segona.

A la Figura 4.13 es mostren els resultats obtinguts amb l'ESFS per l'estàndard de rugositat AIR B40. Es veuen les imatges binaritzades de la primera etapa (a), el codi binari obtingut (b) el mapa de fase obtingut en la segona etapa (c) i el mapa topogràfic que s'obté de la combinació de les dues etapes (d). A més, també vam obtenir els paràmetres de rugositat, ja que es tracta d'una mostra certificada amb un valor d' Sa de $0.79 \pm 0.03 \mu\text{m}$ i d' Sq de $1.00 \pm 0.02 \mu\text{m}$. Els valors experimentals mesurats van ser de 0.77 μm per l' Sa i de 0.99 μm per l' Sq . En els dos casos els valors obtinguts estan en perfecte concordança amb els certificats.

També vam mesurar altres mostres més comunes, com una estrella i ploma que es troben a la moneda de 10 cèntims d'euro, i es veuen a les Figures 4.14 i 4.15, respectivament. En ambdues figures es pot veure les imatges binaritzades de la primera etapa (a), el codi binari obtingut (b) el mapa de fase obtingut en la segona

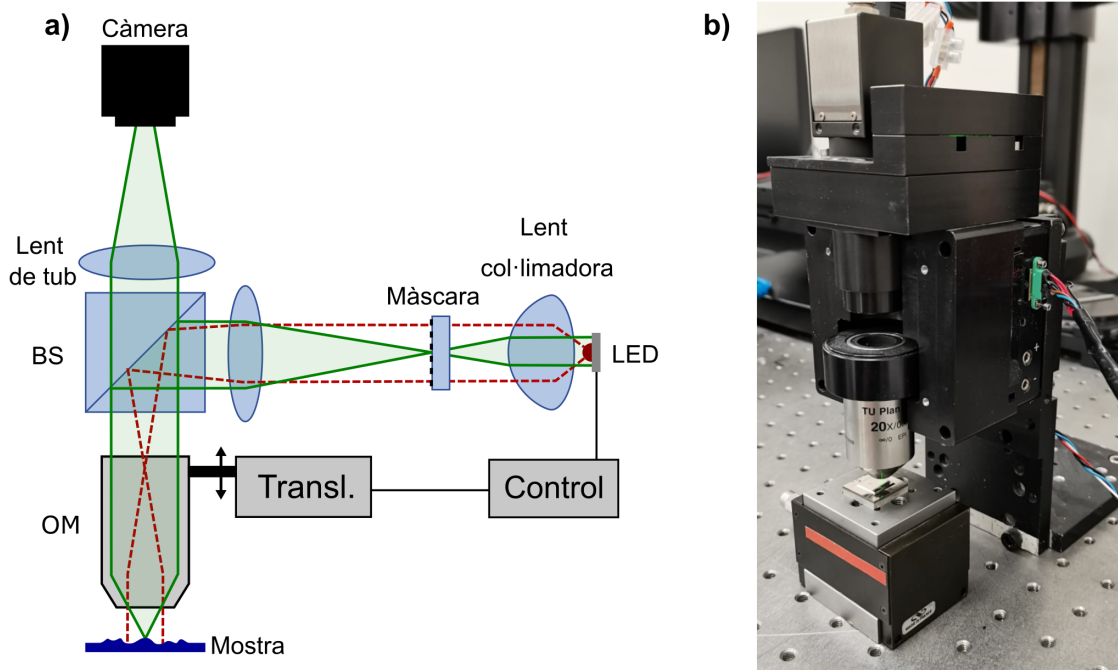


FIGURA 4.12: a) Esquema del sistema òptic del primer prototip. Inclou un objectiu de microscopi (OM), un *beam splitter* (BS), lent de tub, càmera, font de llum (LED), lent col·limadora i la màscara que es projecta al pla focal de l'objectiu de microscopi. El control electrònic sincronitza la il·luminació, l'adquisició d'imatges i l'escaneig. b) Fotografia del primer prototip. Es veu l'objectiu de microscopi, la lent de tub (a sobre) i la càmera.

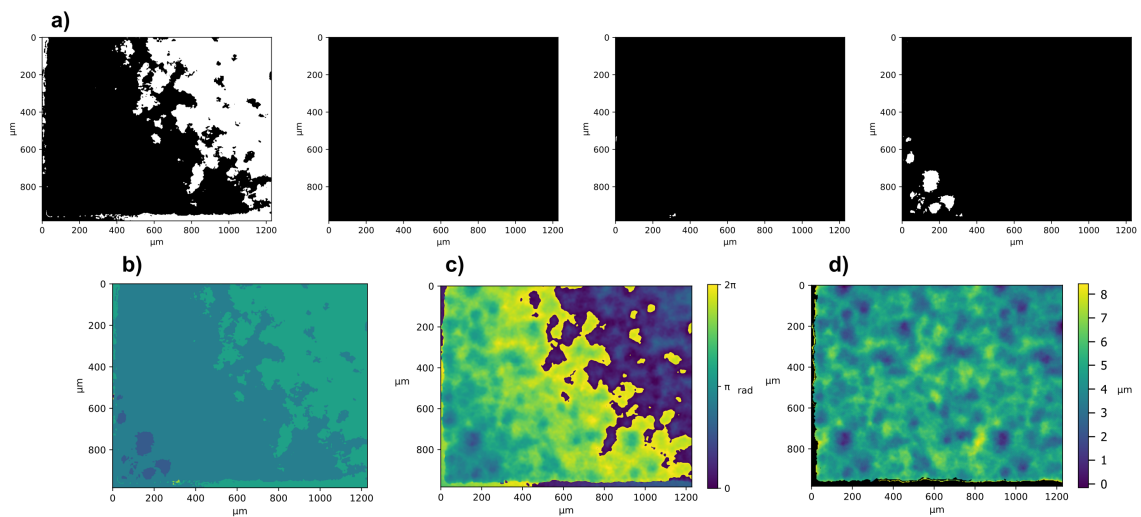


FIGURA 4.13: Resultats de l'ESFS per la mostra de rugositat AIR B40. a) Imatges binaritzades de la primera etapa. b) Codi binari d. c) Mapa de fase. d) Mapa topogràfic de la mostra.

etapa (c) i el mapa topogràfic que s'obté de la combinació de les dues etapes (d).

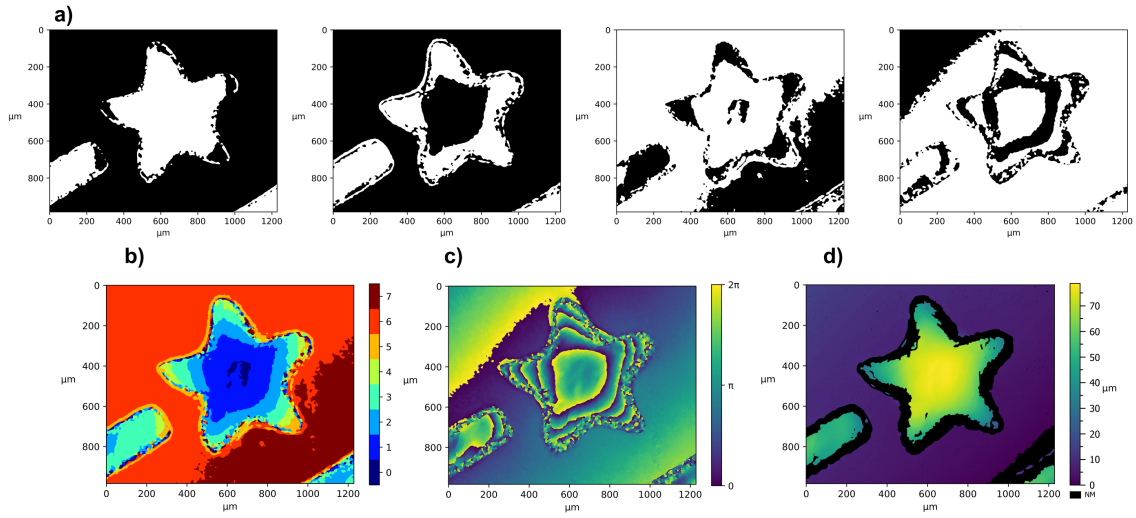


FIGURA 4.14: Resultats de l'ESFS per a la estrella d'una moneda de 10 cèntims. a) Imatges binaritzades de la primera etapa. b) Codi binari d. c) Mapa de fase. d) Mapa topogràfic de la mostra.

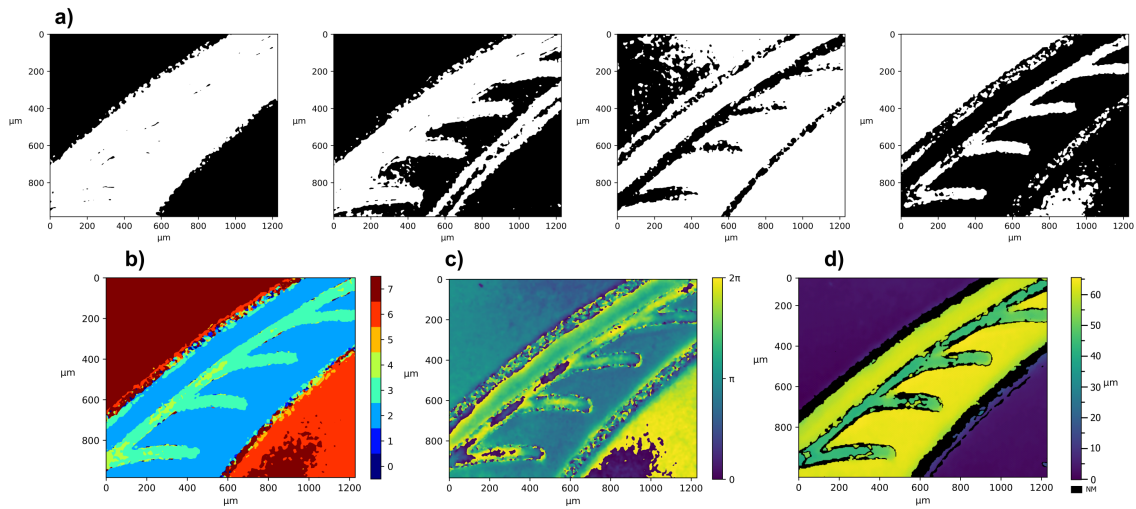


FIGURA 4.15: Resultats de l'ESFS per a la ploma d'una moneda de 10 cèntims. a) Imatges binaritzades de la primera etapa. b) Codi binari d. c) Mapa de fase. d) Mapa topogràfic de la mostra.

Per un anàlisi qualitatiu, vam comparar els resultats obtinguts amb un perfilòmetre comercial (S neox, Sensofar) utilitzant la tècnica de variació de focus, ja que utilitza el mateix tipus de seccionament òptic que l'ESFS. En la Figura 4.16 hi ha la comparativa dels mapes topogràfics adquirits amb l'ESFS (esquerra) i els obtinguts amb el perfilòmetre comercial (dreta) per a les mostres de a) l'AIR B40, b) ploma, i c) estrella.

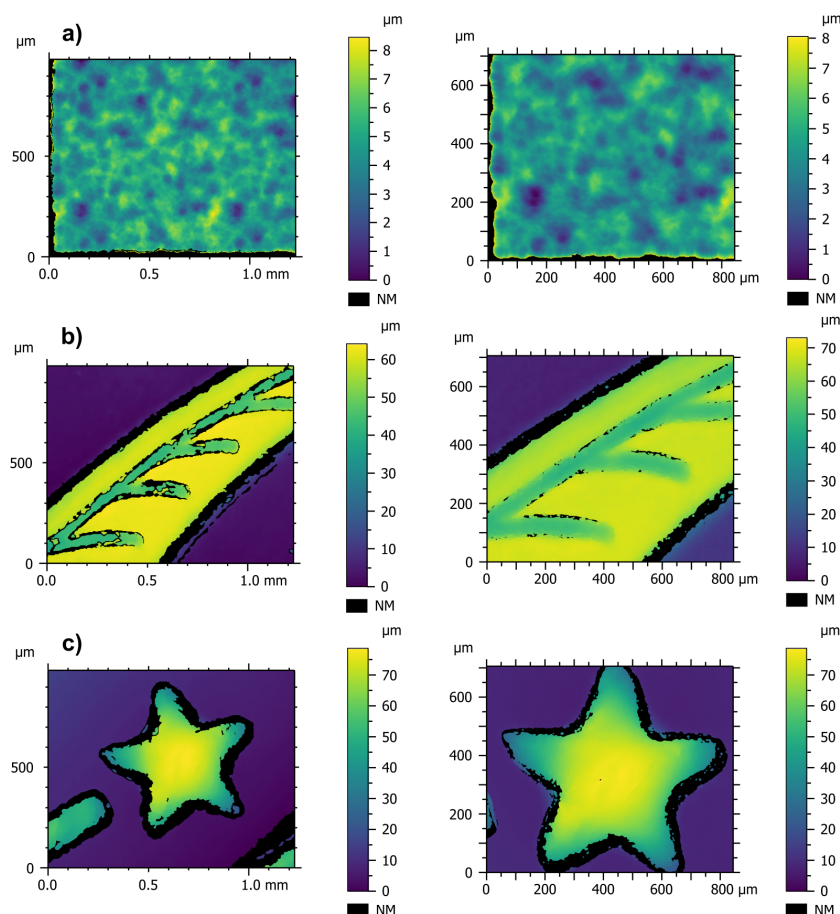


FIGURA 4.16: Comparativa entre els mapes topogràfics obtinguts amb l'ESFS (esquerra) i el perfilòmetre comercial (dreta) per a les mostres de a) l'AIR B40, b) ploma i c) estrella.

Per altra banda, per un anàlisi més quantitatiu, vam mesurar un *step height* per tal de determinar la precisió del mètode. A la Figura 4.17 es pot veure a) el mapa topogràfic obtingut i b) un perfil del mapa topogràfic. El valor obtingut per l'*step height* és de $21.70\text{ }\mu\text{m}$, que està en perfecte concordança amb el valor certificat de $21.70 \pm 0.02\text{ }\mu\text{m}$.

Per analitzar els errors no-lineals vam mesurar un mirall inclinat i vam fer un ajust d'un pla al mapa topogràfic obtingut. A la Figura 4.18 es mostren els resultats obtinguts. Després, vam obtenir l'*Sq* dels residuals, obtenint un valor de $0.59\text{ }\mu\text{m}$. En aquests errors també hi ha l'afectació de la curvatura de camp, que canvia quan es mesura una superfície inclinada respecte la calibració inicial amb un mirall pla [112].

Com que la implementació actual de l'ESFS es basa en la variació de focus,

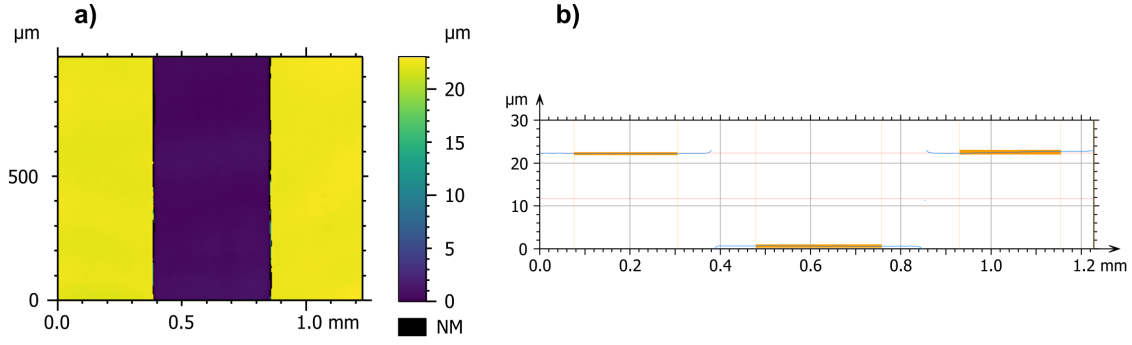


FIGURA 4.17: a) Mapa topogràfic de l'*step height* de $21.70 \pm 0.02 \mu\text{m}$. b) Perfil horitzontal del mapa topogràfic.

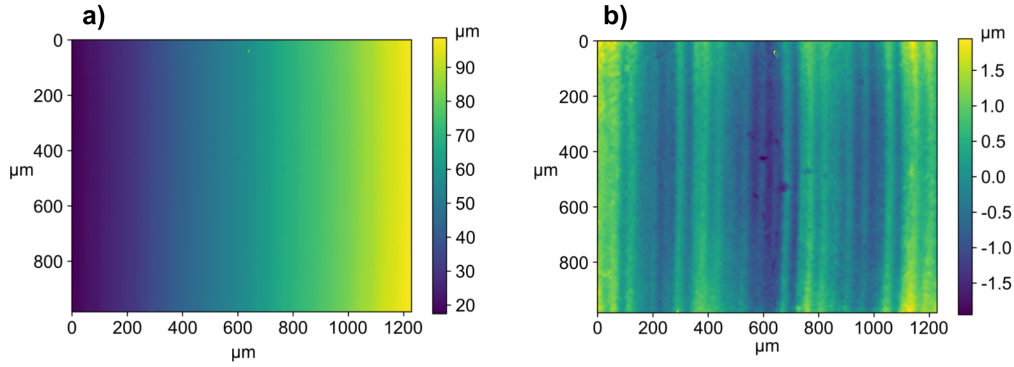


FIGURA 4.18: a) Mapa topogràfic d'un mirall inclinat i b) mapa de residuals de l'ajust d'un pla.

els valors de resolució lateral depenen dels filtres gaussians aplicats. Augmentar la desviació estàndard del filtre gaussià (σ) redueix la resolució lateral, però es necessita un valor mínim d'aquest paràmetre per reduir el soroll i poder calcular la imatge de secció òptica per a la reconstrucció de la topografia. En canvi, reduir el valor de σ fa augmentar el soroll del sistema però la resolució és millor.

Per quantificar experimentalment aquest compromís, en ambdós casos vam calcular la pèrdua de resolució lateral i la reducció del soroll del sistema en funció de σ . La resolució la vam estimar com la inversa de la freqüència espacial on la *instrument transfer function* (ITF) cau al 10 %. Per altra banda, el soroll del sistema el vam calcular restant dues mesures consecutives i després calculant l' Sq . Com que el soroll és present en les dues adquisicions, llavors és necessari dividir el valor resultant per $\sqrt{2}$. Els resultats de la resolució es mostren en la Figura 4.19c) on es veu com la resolució del sistema només es sacrifica lleugerament en el cas de l'ESFS. Els resultats del soroll es veuen en la Figura 4.19d) i e). El soroll del sistema augmenta significativament en el cas de l'ESFS en comparació amb la variació de focus, però és important destacar que el nombre d'imatges necessàries per reconstruir correctament un mapa de topogràfic es redueix dràsticament en l'ESFS, de manera que és previsible un *trade off* entre velocitat de reconstrucció i soroll.

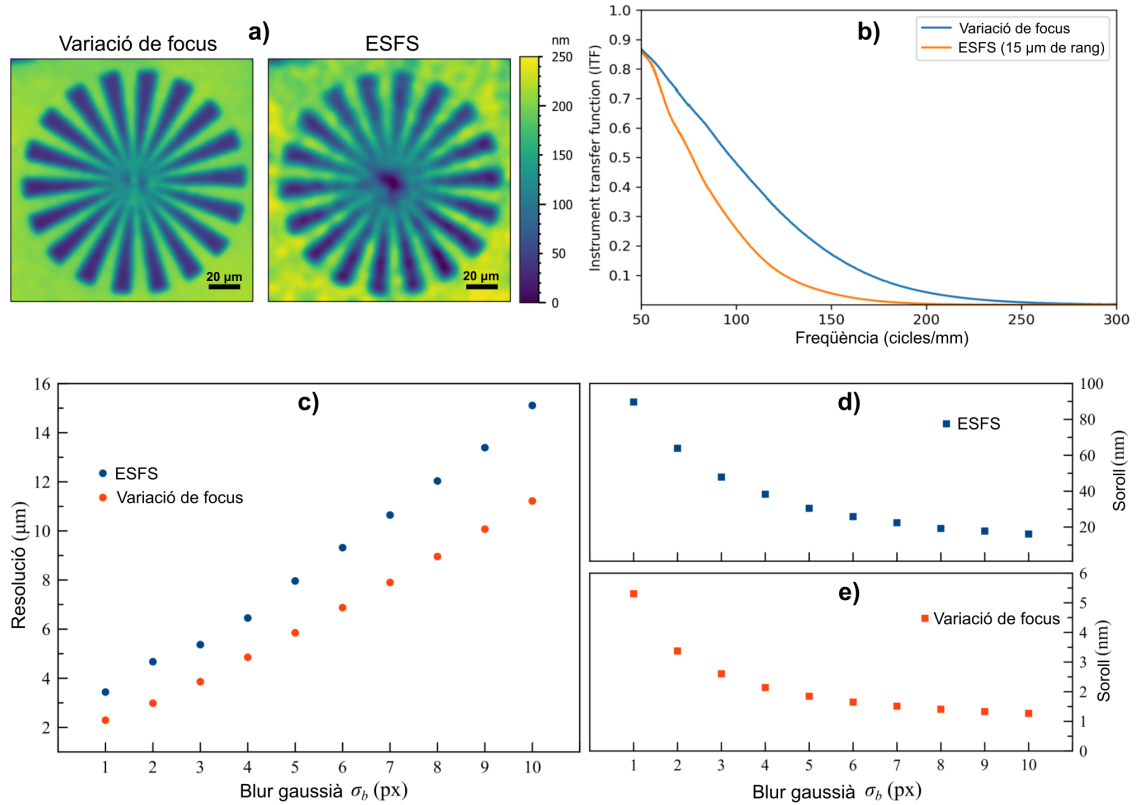


FIGURA 4.19: Caracterització de la resolució topogràfica i el soroll de mesura per l'ESFS i la tècnica de variació de focus. a) Mapa topogràfic d'una Siemens *star* adquirida amb un $50\times/0.8$ NA. b) ITF calculades a partir de les topografies anteriors. En els dos casos el *blur* gaussià aplicat és de $\sigma = 5$. c) Resolució topogràfica estimada en funció del *blur* gaussià. d) i e) Càlcul del soroll del sistema en funció del *blur* gaussià. Els resultats per l'ESFS tenen un rang de mesura de $15\mu\text{m}$, per la de variació de focus el rang és irrellevant.

4.5.2 Prototip 2: escombrat focal amb lent varifocal

El segon prototip el vam implementar en un microscopi invertit comercial (Nikon, Eclipse Ti2) modificat per incloure un sistema d'il·luminació fet a mida amb un LED amb una longitud d'ona central de 525 nm. Vam utilitzar un patró de Ronchi de crom sobre vidre amb un període de 50 μm com a màscara per projectar a la mostra. En aquest cas també vam utilitzar un objectiu de microscopi 20 $\times$ /0.45 NA (Nikon). Per l'escombrat focal vam utilitzar una lent *tunable acoustic gradient* (TAG 2.0, TAG Optics Inc.), que vam col·locar en el pla conjugat de la pupil·la de l'objectiu mitjançant una configuració 4f, tal com es mostra a la Figura 4.20. D'aquesta manera és possible enfocar-se en diferents plans axials de la mostra sense induir un canvi en l'augment total del sistema òptic. El sistema d'il·luminació el vam introduir amb un cub *beam splitter* abans de la lent TAG per tal de mantenir la màscara projectada i la mostra en el mateix pla focal. En canvi, si es projecta directament la màscara sense passar per la lent TAG, aquesta es mantindrà estacionària en un pla i per tant la tècnica no funcionarà correctament. El sistema òptic de la Figura 4.20 també inclou un parell de lents de *relay*, la lent de tub de 200 mm, i la càmera (DMK33UX287, The Imaging Source) amb 540 $\times$ 720 píxels i una mida de píxel de 6.9 μm . A la Figura 4.21 es veu una fotografia del sistema òptic complet, des del LED fins a la càmera, passant pel microscopi invertit comercial.

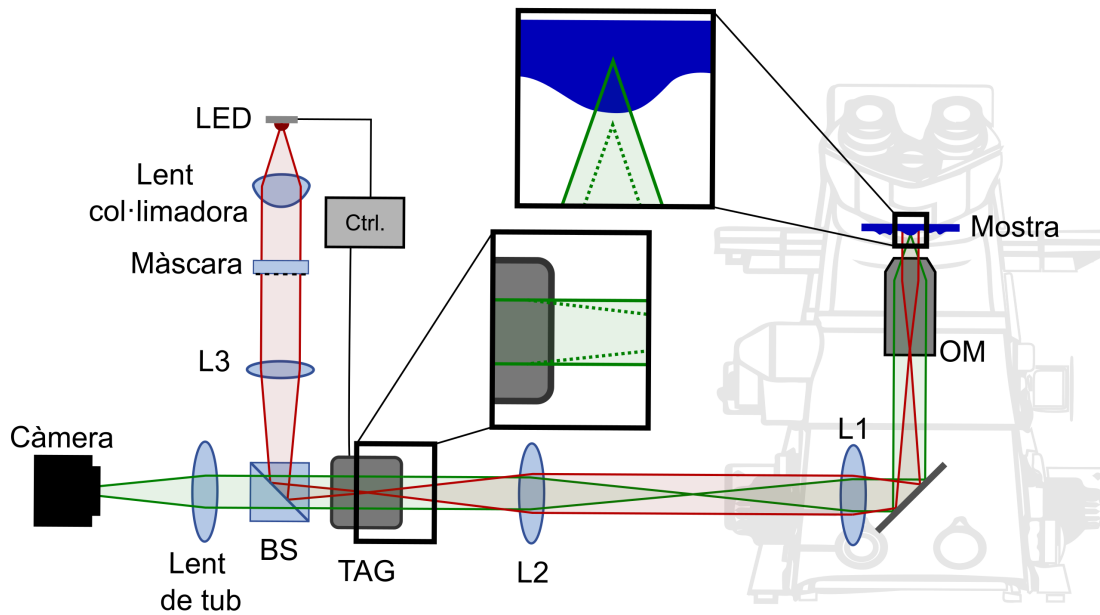


FIGURA 4.20: Esquema òptic del segon prototip. Inclou l'objectiu de microscopi (OM), *beam splitter* (BS), lent de tub, lent TAG, lents de *relay* (L1 i L2), càmera, lent col·limadora, màscara i LED.

Llavors, la lent TAG la vam controlar amb una funció sinusoidal amb una amplitud de 20 V a la freqüència d'oscil·lació aproximadament de 70 kHz amb un generador de funcions (SDG6022X, Siglent). A aquesta freqüència la lent TAG permet un escaneig focal en aproximadament 7 μs . Així, vam utilitzar una il·luminació polsada sincronitzada amb el senyal que controla la lent TAG per tal d'aconseguir reconstruccions topogràfiques amb l'ESFS només limitades per la velocitat de fotogrames de la càmera. La implementació de les seqüències d'il·luminació i la seva sincronit-

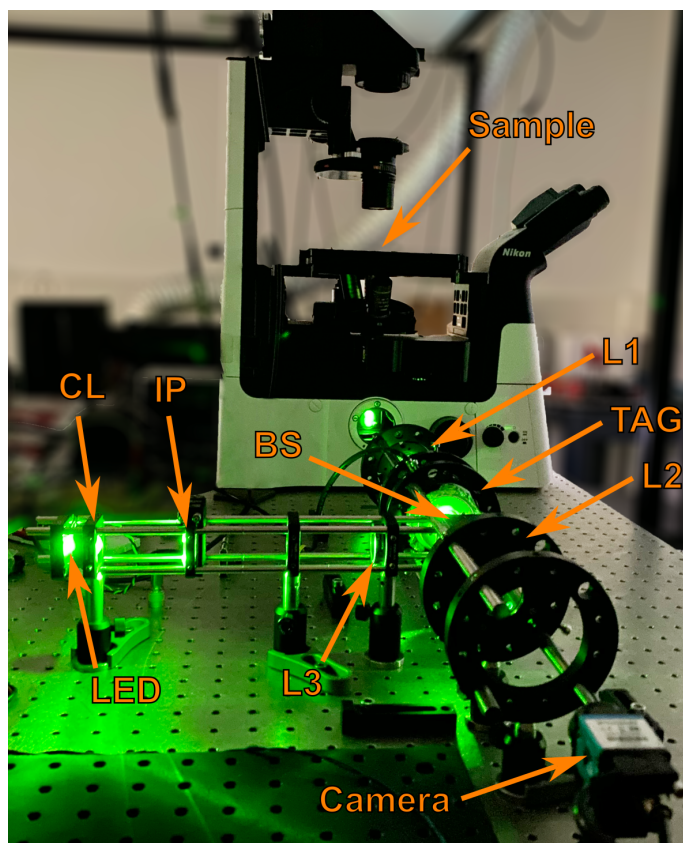


FIGURA 4.21: Fotografia del prototip. Inclou LED, lent colimadora (CL), patró de texturització (IP), *beam splitter* (BS), lents de *relay* (L1 i L2), lent TAG, mostra i càmera.

zació la vam obtenir amb una *field programmable gate array* (FPGA) (DE0-Nano, Terasic).

Inicialment, vam calibrar la resposta del sistema amb la lent TAG per tal de treballar dins la regió lineal de l'escaneig axial sinusoidal. En aquestes condicions, la calibració consisteix en un factor d'escala, que ve donat pel període d'il·luminació. Per determinar el seu valor, vam mesurar tres mostres *step height* amb diferents altures certificades i vam fer un ajust lineal, tal com es mostra a la Figura 4.22.

En segon lloc, per tal de comprovar que la calibració fos correcta, vam mesurar un mirall pla en diferents posicions axials. A la Figura 4.23a) es mostra el gràfic de la posició axial mesurada en funció de la posició comandada i l'ajust d'una recta. Per altra banda, també vam mesurar un mirall inclinat, i el mapa topogràfic obtingut es mostra a la Figura 4.23b). En aquest cas es poden veure les mateixes afectacions que en el primer prototip (Figura 4.18), on hi ha errors de no-linealitat i de curvatura de camp. Tot i això, es pot veure com el mapa topogràfic és correcte, i per tant que la sincronització i calibració són apropiades.

Un cop calibrat el sistema vam reconstruir els mapes topogràfics de diferents mostres amb l'ESFS. En aquest cas els paràmetres de l'ESFS eren els mateixos que el prototip anterior (vuit imatges, quatre per la primera etapa i quatre per la segona) però el rang de mesura és aproximadament $54\mu\text{m}$. La diferència fonamental amb el prototip anterior és el temps de mesura, que només ve limitat pels fotogrames per

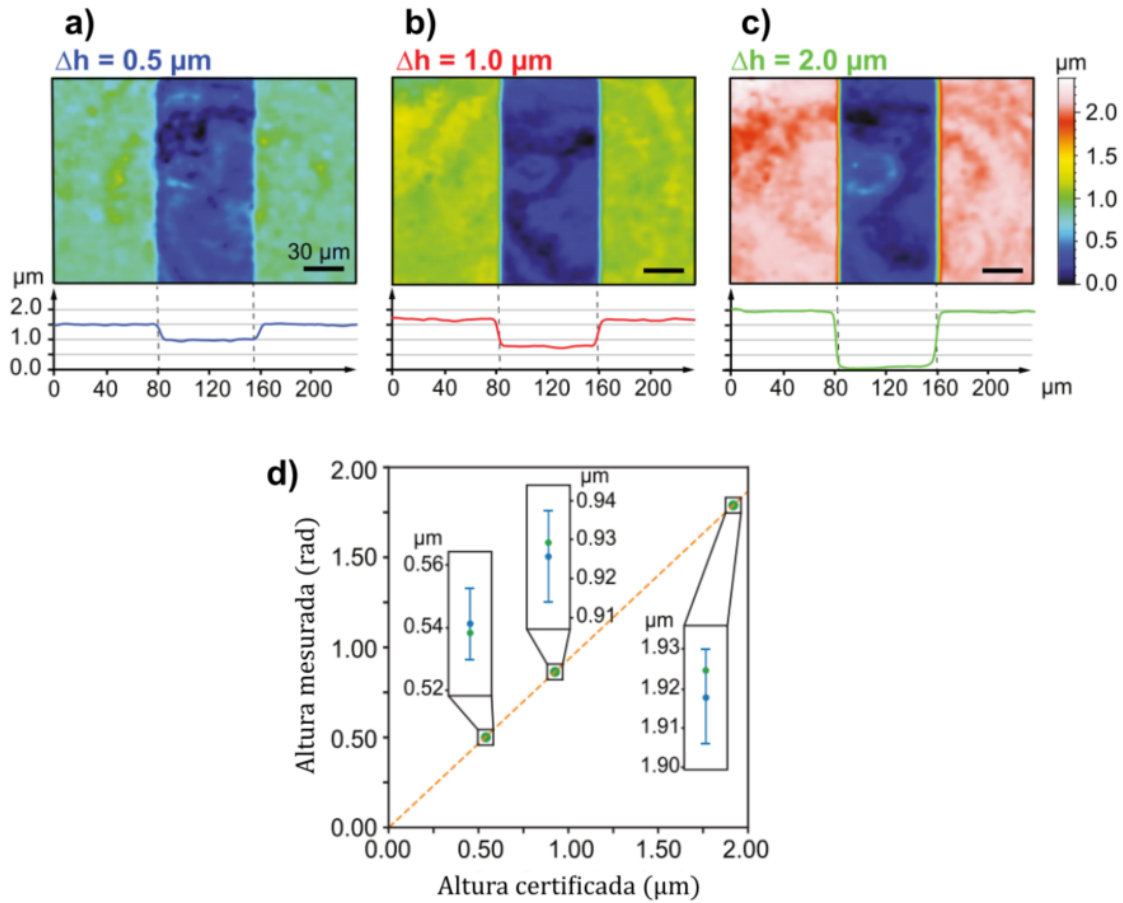


FIGURA 4.22: Mapes topogràfics dels *step heights* de a) $0.5 \mu\text{m}$, b) $1 \mu\text{m}$ i c) $2 \mu\text{m}$. El perfil promig es mostra a sota de cada mapa topogràfic. d) Gràfic de l'alçada mesurada (en radians) en funció de l'alçada certificada que s'ha fet servir per calibrar el sistema.

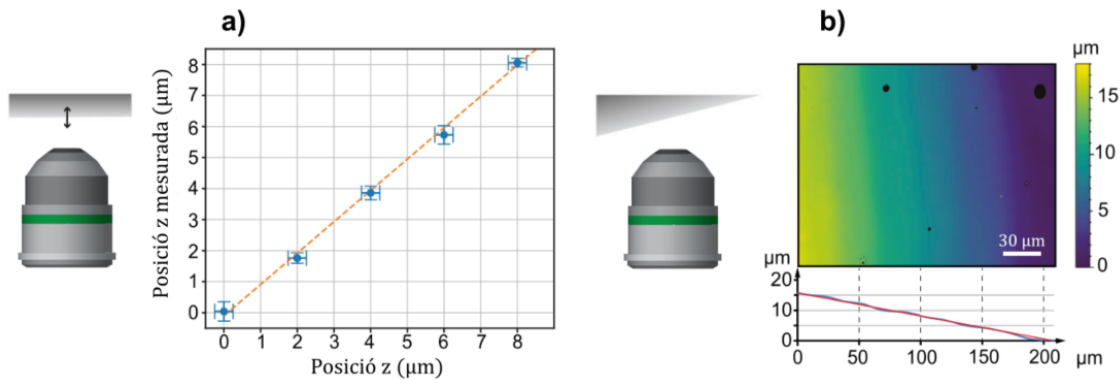


FIGURA 4.23: a) Gràfic de la posició axial mesurada en funció de la posició del motor axial. La línia discontinua correspon a un pendent igual a 1. b) Mapa topogràfic d'un mirall inclinat amb el perfil corresponent. La línia vermella correspon al valor real.

segon (FPS) de la càmera, de fins a 539, i que dividit entre vuit dona 67 topografies per segon.

En primer lloc, vam mesurar el mapa topogràfic d'una mostra en moviment.

Per això, vam utilitzar l'estàndard de rugositat AIR B40 mentre el traslladàvem manualment i es capturaven les imatges amb les seqüències corresponents a 539 fotogrames per segon. Quatre mapes topogràfics en diferents instants de temps es mostren a la Figura 4.24, juntament amb l'*stitching* de tots els mapes topogràfics obtinguts. A mesura que la mostra es trasllada pel camp de visió del sistema òptic es poden unir perfectament els mapes topogràfics fotograma a fotograma. La capacitat de l'ESFS per obtenir mapes topogràfics amb només vuit imatges permet mesurar mostres en moviment que són difícils o impossibles de caracteritzar amb perfilòmetres òptics convencionals.

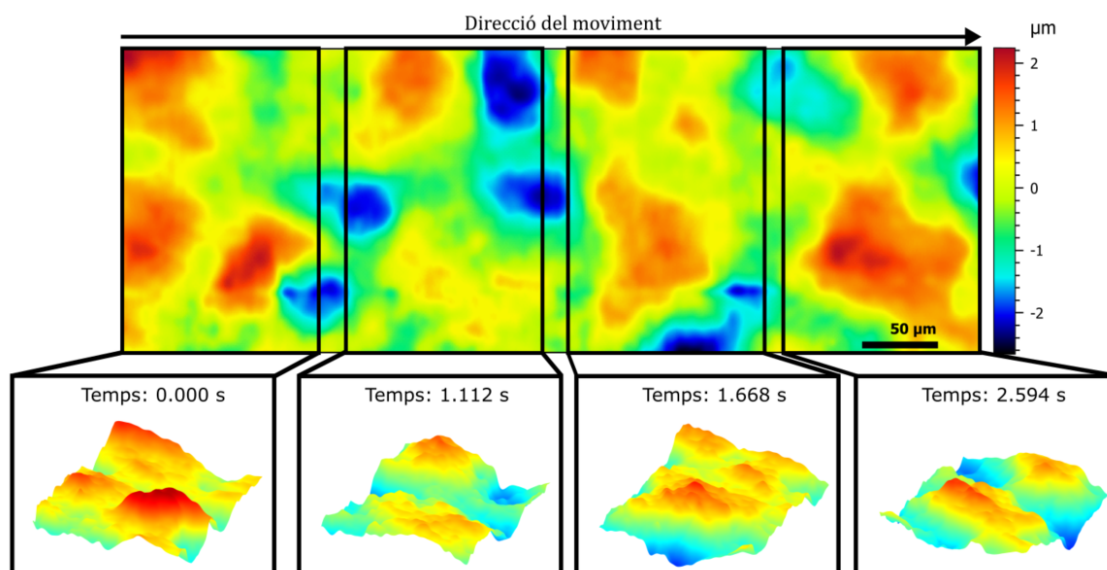


FIGURA 4.24: *Stitching* dels mapes topogràfics obtinguts amb l'ESFS a 67 topografies per segon durant la translació manual de l'estàndard de rugositat AIR B40. A l'inferior es veu el mapa topogràfic a diferents instants temporals.

En segon lloc, per avaluar més a fons el benefici de l'ESFS, vam caracteritzar un dispositiu *micro-electro-mechanical system* (MEMS) funcional i dinàmic, que es mostra a la Figura 4.25a). En la imatge de l'esquerra es pot veure tot el dispositiu, inclosos els pins, i a les imatges de la dreta es veu un zoom de la zona activa. Aquest dispositiu té una membrana suspesa connectada a dos terminals, on s'aplica un voltatge sinusoidal, i a mesura que dissipa calor es deforma [113]. Aquesta modulació permet fer un anàlisis espectral de les característiques dels compostos en l'ambient, i per tant s'utilitza com a sensor de gasos [114].

Llavors, vam mesurar aquestes deformacions de la membrana en funció del temps, ja que l'ESFS permet mesurar amb suficient resolució temporal i espacial. Per això vam aplicar un voltatge sinusoidal amb una freqüència de 6 Hz a la membrana, i els resultats obtinguts es mostren a la Figura 4.25b) i c). En la b) hi ha els mapes topogràfics d'uns quants fotogrames seleccionats, juntament amb la imatge de camp clar. En la c) hi ha la posició axial de 3 punts diferents de la membrana, assenyalats en la imatge b) de l'esquerra, en funció del temps. Els canvis periòdics en l'altura de la membrana es poden resoldre clarament, i es període mesurat coincideix en l'aplicat de 6 Hz.

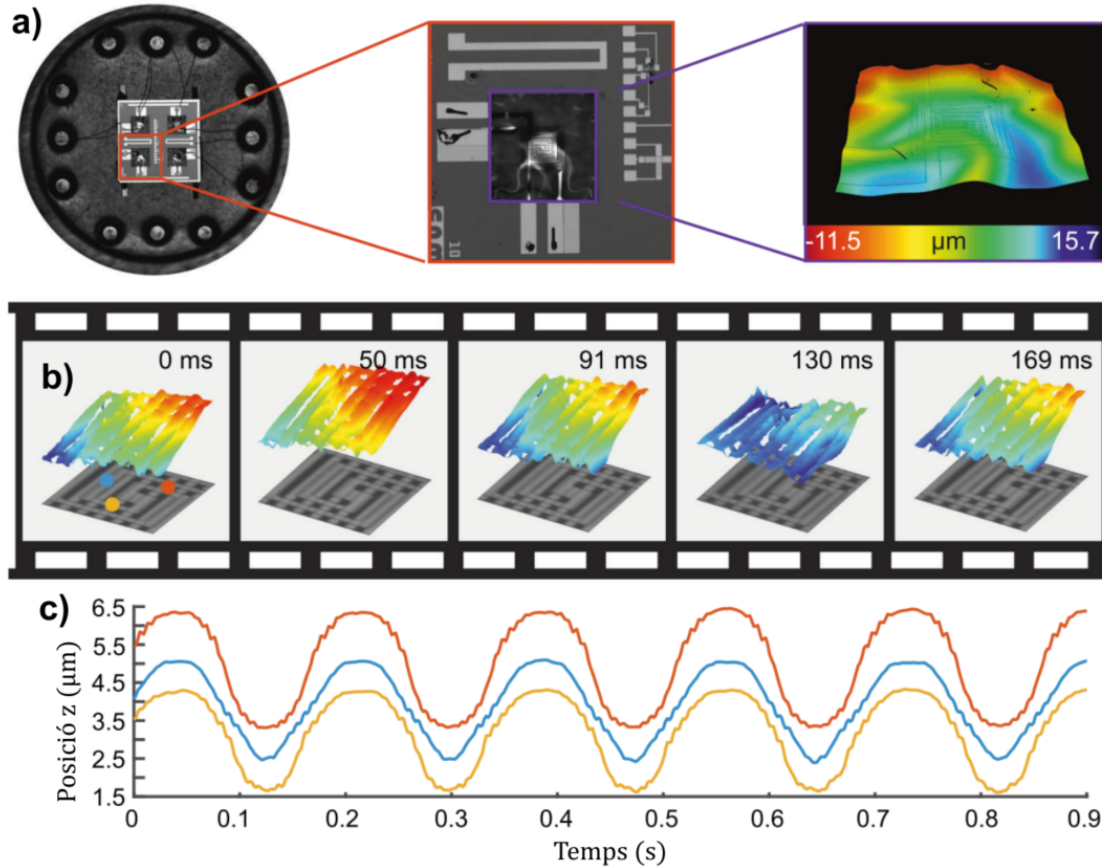


FIGURA 4.25: a) Sensor de gasos MEMS que consisteix de circuits interdigitats (esquerra) i una membrana penjada (centre). Mapa topogràfic de la membrana de $845 \times 707 \mu\text{m}$. b) Reconstrucció topogràfica a través de l'ESFS amb la imatge de camp clar a sota a diferents instàncies de temps. La deformació de la membrana és causada per una senyal elèctrica que indueix escalfament i refredament. c) Gràfic de la posició axial en funció del temps per 3 diferents posicions de la membrana.

4.6. Discussió

La tècnica ESFS permet reconstruir mapes topogràfics de mostres 3D amb una reducció d'ordres de magnitud en el número d'imatges necessàries. Consta de dues etapes diferents. Una primera, anomenada etapa binària, que localitza de manera aproximada la mostra dins del rang de mesura; i una segona, anomenada etapa de *phase shift*, que localitza la mostra amb més precisió. Aquest procés de dos passos s'assembla al que s'utilitza en la projecció de franges. En aquest cas, diferents patrons de llum estructurada es projecten seqüencialment sobre la mostra, a partir dels quals es pot inferir la posició axial de la mostra per triangulació. A més, no hi ha necessitat d'escaneig axial, ja que tota la mostra es troba dintre la profunditat de camp del sistema de visió. No obstant, degut a les limitacions geomètriques de projecció i les de triangulació, la projecció de franges presenta una resolució espacial de centenars de micres, de manera que no es pot considerar microscòpia d'alta resolució. Amb l'ESFS, aquesta resolució pot ser ordres de magnitud millor, ja que s'utilitza una obertura numèrica molt major.

En qüestió de velocitat, s'esperarien artefactes de moviment si s'intenten cap-

turar processos dinàmics que canviïn més ràpidament que la freqüència de mostreig. No obstant això, la gran reducció en el nombre d'imatges necessàries redueix aquesta freqüència, convertint efectivament l'ESFS en una tècnica ultraràpida. Per exemple, en el segon prototip, el temps d'adquisició de dades per a una mesura es realitza en només 15 ms, permetent la captura d'imatges a 67 topografies per segon.

En relació amb el rang axial, hi ha un compromís entre aquest i la senyal de seccionament òptic. Augmentar el rang de mesura redueix la senyal del seccionament òptic, ja que s'integra més llum fora de focus i, per tant, es redueix el SNR. Amb aquesta implementació el rang màxim és el que doni una senyal que permeti distingir-se del soroll i que es pugui binaritzar.

Existeix, però, una manera de mantenir alt el SNR sempre que la mostra estigui concentrada en pocs punts axials, com per exemple en un *step height*. En aquest tipus de mostres, tot i tenir una alçada de pic a vall considerable, la major part de la superfície es troba a la mateixa alçada, ja sigui a la part superior o en la inferior. En aquestes situacions, els resultats de la primera etapa de l'ESFS es poden utilitzar per a una adquisició optimitzada de les imatges de la segona etapa. Amb aquesta adquisició, només s'activaria la il·luminació en el rang axial que conté la mostra, de manera que el SNR en les imatges de la segona etapa no es reduiria encara que s'augmenti el rang axial de mesura. A la Figura 4.26 es mostra el perfil topogràfic d'un *step height*, on s'assenyalen els rangs axials on la il·luminació hauria d'estar encesa (en verd) i on s'hauria d'apagar (en vermell). D'aquesta manera, per molt alt que sigui l'*step height*, el SNR que s'obté a les imatges de la segona etapa es manté constant.

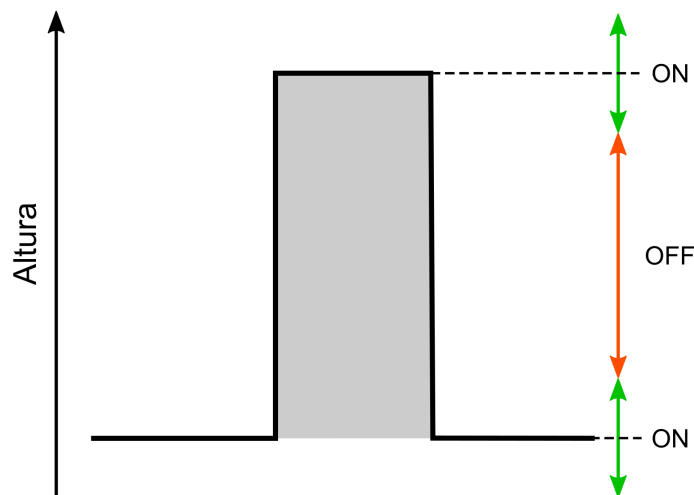


FIGURA 4.26: Perfil topogràfic d'un *step height*. En aquest estan assenyalats els rangs axials on s'ha d'activar la il·luminació (en verd) i on s'ha d'apagar (en vermell) per tal d'obtenir un SNR el més alt possible.

La gran reducció en el nombre d'imatges que són necessàries per al càlcul del mapa topogràfic és gràcies a la primera etapa. En el capítol 2 ja s'ha explicat com totes les tècniques òptiques actuals necessiten l'escaneig axial. D'aquesta manera, es busca linealment la posició de la mostra, però quan els rangs axials són grans això suposa l'adquisició d'un nombre molt elevat d'imatges. En canvi, amb l'ESFS es

trenca amb aquesta dinàmica i la cerca passa a ser binària. Així doncs, per cada imatge de la primera etapa adquirida es multiplica per dos el número de posicions axials que es poden diferenciar i, per tant, hi ha un augment exponencial. Més concretament, el número de posicions axials augmenta en funció de 2^N , on N és el número d'imatges adquirides. L'augment exponencial en base dos és degut a la binarització de les imatges, però si el SNR ho permet, la llum es pot modular amb més nivells. Així, la binarització passa a ser una separació a M nivells, i per tant la reducció en el número d'imatges necessàries és encara major.

Tot i això, la implementació a més de dos nivells és més complicada, ja que no és simplement una seqüència ON-OFF del LED, sinó que s'han d'afegir els nivells intermedis. A més, si el SNR no és suficientment alt, llavors els nivells es mesclaran i el resultat contindrà errors.

En últim lloc, també és important afegir que existeix una manera d'aconseguir un mapa topogràfic per imatge adquirida si es sacrifica la primera etapa i només s'adquireixen les imatges de la segona etapa. Tal com s'ha explicat anteriorment, després de l'adquisició de les quatre imatges amb diferent fase inicial (S_1, S_2, S_3, S_4) es recupera la fase de la topografia amb

$$z_{mod}(x, y) = \frac{T}{2\pi} \arg((S_2 - S_4) + i(S_3 - S_1)). \quad (4.16)$$

Per obtenir un segon mapa de fase no és estrictament necessari adquirir de nou les quatre imatges. Només cal capturar una imatge addicional, S_5 , que substitueix la primera imatge del conjunt inicial, S_1 . D'aquesta manera, la fase es pot recuperar utilitzant el conjunt actualitzat de dades (S_5, S_2, S_3, S_4).

Aquest algorisme és particularment adequat per a la caracterització de sistemes dinàmics. Per implementar-lo, cal adquirir imatges successives, cadascuna segons la modulació corresponent de la segona etapa de l'ESFS. A mesura que s'incorpora una nova imatge, aquesta s'utilitza conjuntament amb les tres imatges anteriors per calcular el mapa topogràfic. En conseqüència, es pot obtenir un mapa topogràfic per cada imatge capturada, incrementant virtualment la velocitat de caracterització de la tècnica en una topografia per imatge, però limitant-se només al mapa de fase.

4.7. Implementacions de l'ESFS

L'ESFS introdueix un nou paradigma d'escaneig que, combinat amb il·luminació modulada, aconsegueix una reducció significativa en el nombre d'imatges necessàries per generar un mapa topogràfic. A més, l'ESFS no es limita a una única tècnica de metrologia òptica, sinó que es pot adaptar a diferents contextos segons les necessitats específiques de cada aplicació.

Com que es va identificar el potencial d'ampliar aquesta tècnica més enllà de la seva versió inicial, en aquesta secció es presenten les diferents implementacions de l'ESFS que s'han desenvolupat. En aquestes, s'han utilitzat elements com la interferència i la polarització, i també s'ha integrat amb un microscopi confocal d'*spinning disk*, demostrant així la seva versatilitat en diferents sistemes d'imatge.

A través d'aquestes implementacions també s'han explorat els principals avantatges i limitacions de cada tècnica, així com les seves aplicacions potencials. Aquesta secció demostra les possibilitats de l'ESFS de convertir-se en una eina prometedora en el camp de la metrologia òptica per a la mesura ultraràpida, obrint noves possibilitats en la caracterització precisa de superfícies.

4.7.1 Implementació mitjançant interferència

En el capítol de l'estat de l'art [2.1.4.4](#) ja s'han introduït les dues tècniques interferomètriques més conegudes, PSI i CSI. En aquesta implementació vam aplicar el concepte principal de l'ESFS a la PSI per tal d'estendre la profunditat de camp de l'objectiu de microscopi, però també per incrementar artificialment la longitud de coherència de la font de llum. Això permet la reconstrucció de mapes topogràfics de mostres amb alçades grans però només amb un nombre reduït d'imatges.

En general, la PSI s'utilitza per a la caracterització de superfícies llises, com ara lents i altres components òptics. Aquesta tècnica es basa en l'ús d'una font de llum d'alta coherència, que genera interferència al llarg de tot el rang axial, que permet calcular un mapa de fase de la superfície de la mostra. La Figura [4.27](#) il·lustra un exemple del senyal d'interferència obtingut en funció de la posició axial quan s'utilitza una font de llum d'alta coherència.

La principal limitació de la PSI és que, tot i utilitzar una font de llum d'alta coherència per estendre la interferència al llarg de tot el rang axial, l'objectiu del microscopi presenta una profunditat de camp limitada, determinada per la seva obertura numèrica. En conseqüència, si es pretén mesurar una mostra amb una alçada superior a la profunditat de camp de l'objectiu, algunes zones de la mostra apareixeran desenfocades, fet que provocarà que la mesura sigui incorrecta en aquestes regions.

Aquesta limitació es pot resoldre utilitzant objectius amb una obertura numèrica inferior, ja que aquests ofereixen profunditats de camp més grans. Per aquest motiu, en interferometria sovint s'empren objectius de microscopi amb augment i obertura numèrica molt baixa, ja que permeten mesurar mostres amb un camp de visió ample i amb una alçada relativament gran sense comprometre la resolució axial. Això es degut a que la resolució axial en interferometria depèn exclusivament de la longitud d'ona de la llum utilitzada, a diferència d'altres tècniques com la

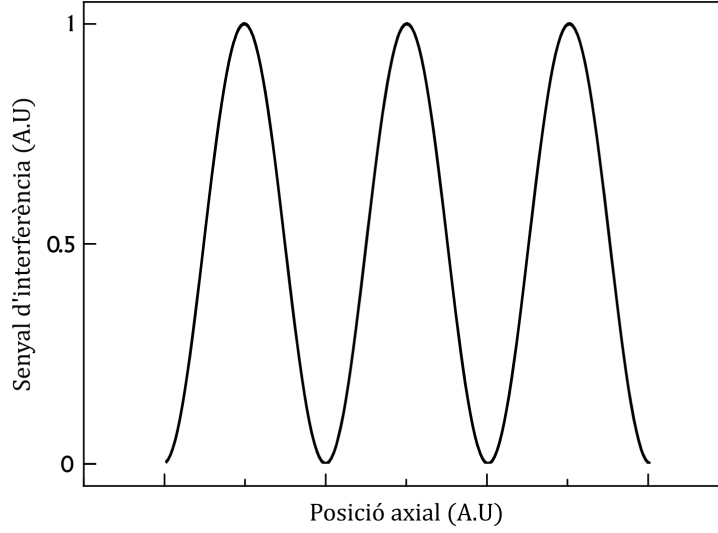


FIGURA 4.27: Senyal d'interferència en funció de la posició axial per una font de llum d'alta coherència.

microscòpia confocal, on l'obertura numèrica hi juga un paper determinant.

Per altra banda, la resolució lateral en interferometria sí que està determinada per l'obertura numèrica de l'objectiu. Així doncs, si es desitja mesurar estructures amb un alt nivell de detall espacial, en aquest cas és imprescindible utilitzar objectius amb alt augment i una obertura numèrica elevada. En aquest context, l'aplicació de l'ESFS esdevé una solució clau, ja que permet estendre tant la profunditat de camp de l'objectiu com la longitud de coherència de la font de llum per adaptar-les a les característiques específiques de la mostra a mesurar, fent possibles aquest tipus de mesures amb una major versatilitat.

Per aquest motiu, és necessari modular la font de llum durant l'adquisició de la imatge seguint el mateix principi explicat en el capítol anterior. En aquest cas, però, per tal de preservar les franges d'interferència observades a la mostra, resulta imprescindible utilitzar una il·luminació polsada amb un *duty cycle* el més reduït possible i amb un període igual al de les franges d'interferència, és a dir, $\lambda/2$. Aquesta modulació implica que l'alçada (z) en cada pols de la modulació és

$$z = z_0 + n \frac{\lambda}{2}, \quad (4.17)$$

on z_0 és l'alçada inicial, n el número del pols i $\lambda/2$ el període de les franges d'interferència. A partir de l'equació 2.31, es troba que la interferència observada serà

$$I = N \cdot I_c + \sum_{n=0}^N I_v \cos\left(2\pi \frac{z_0}{\lambda/2} + n \cdot 2\pi\right), \quad (4.18)$$

on I_c i I_v són constants i N el número de polsos totals. Atès que el període de la interferència és igual al període dels polsos, la interferència generada per cada pols mantindrà la mateixa fase, de manera que no es produirà una reducció en el contrast de la suma total de les franges. En aquest cas únic, la interferència observada serà

$$I = N \left(I_c + I_v \cos\left(2\pi \frac{z_0}{\lambda/2}\right) \right), \quad (4.19)$$

i, per tant, s'haurà estès el rang de mesura satisfactòriament mentre es manté el contrast de les franges interferomètriques. Al contrari, si el període dels polsos no coincideix amb el període de la interferència, la fase de la interferència canviarà en cada pols, i això comportarà una reducció en el contrast de les franges. En última instància, una reducció massa gran del contrast de les franges implica una pèrdua de la informació interferomètrica, fet que impedeix la mesura correcta de la mostra.

Per altra banda, tot i utilitzar una modulació polsada amb la freqüència correcta, aquesta implementació de l'ESFS també presenta una pèrdua de contrast degut a la profunditat de camp finita de l'objectiu de microscopi, de la mateixa manera que en les altres implementacions presentades en el capítol anterior. Quan la mostra es desenfoca, també es desenfocuen les franges interferomètriques, i inevitablement el contrast es redueix. Tot i això, és essencial utilitzar una modulació polsada per mantenir el contrast de les franges el més elevat possible.

Per a aquesta implementació vam utilitzar un sistema òptic molt similar que el del primer prototip (4.5.1) de l'apartat anterior. En aquest cas, vam substituir l'objectiu de camp clar per un objectiu interferomètric de tipus Mirau. En la Figura 4.28 es mostra el sistema òptic que vam utilitzar per l'adquisició d'imatges.

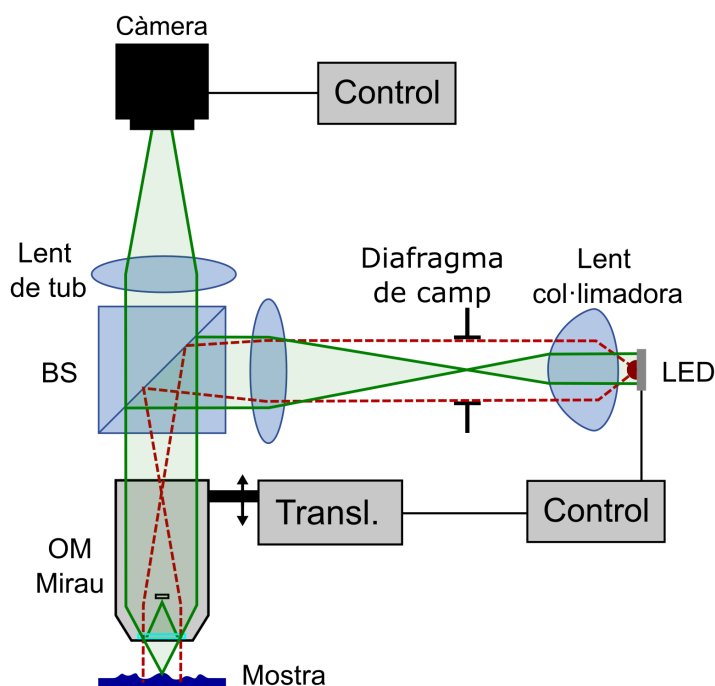


FIGURA 4.28: Esquema del sistema òptic per la implementació de l'ESFS mitjançant interferometria.

Per obtenir un mapa topogràfic vam seguir el mateix plantejament que en PSI. Vam adquirir quatre imatges amb un retard de $\lambda/8$ en la pulsació de la il·luminació. La Figura 4.29 mostra les quatre modulacions en funció del rang axial a mesurar. El resultat és un interferograma amb una profunditat de camp estesa on és possible resoldre per la posició axial a través dels algorismes de *phase-shift*. En aquest cas vam utilitzar l'algorisme de quatre imatges amb un canvi de fase de $\pi/2$ [25].

Encara que l'alçada obtinguda sigui amb *modulo T*, és possible fer un *unwrapping* del mapa de fase a través d'algorismes computacionals, com el proposat

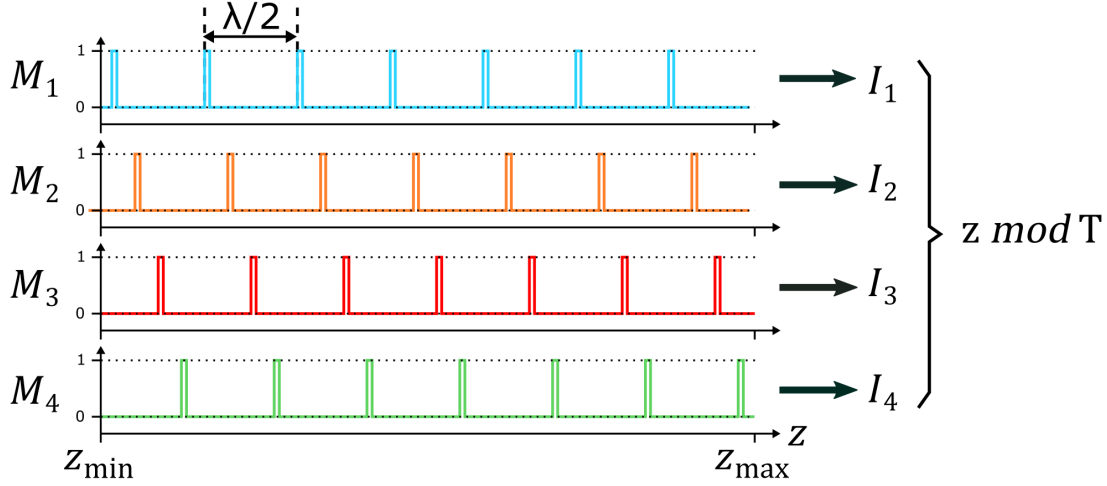


FIGURA 4.29: Modulacions ($M_1 - M_4$) per cada imatge adquirida. El període de les pulsacions (T) és $\lambda/2$ i la fase inicial de cada modulació és $0, \pi/2, \pi$ i $3\pi/2$. La fase de la modulació es recupera a través dels algorismes de *phase-shift*, que resulten en la localització axial de la mostra amb *modulo* T .

per Goldstein [27], o altres més moderns [115]. El principal problema d'aquests algorismes és que poden produir errors o artefactes quan la mostra té un mapa de fase complex o quan existeixen discontinuïtats en la superfície de la mostra. Tot i això, només per la demostració del concepte d'aquesta implementació vam utilitzar aquests algorismes, més concretament, el proposat per Arevalillo *et al.* (2002) [115].

Vam fer servir un objectiu de microscopi interferomètric (Nikon $20\times/0.4$ NA DI Mirau) amb una il·luminació que consistia d'un LED verd amb un ample de banda aproximadament d'uns 50 nm i una longitud d'ona central de 525 nm. Per il·lustrar el procés de reconstrucció de la tècnica, en la Figura 4.30a) es mostren les 4 imatges adquirides amb les modulacions de la Figura 4.29. En la Figura 4.30b) es mostra el mapa de fase obtingut de les 4 imatges anteriors i en la Figura 4.30c) el mapa de fase després de l'*unwrapping*, que correspon a la topografia de la mostra.

Després, vam mesurar l'estàndard de rugositat AIR B40 de l'NPL [77] i vam comparar els resultats amb un profilòmetre òptic comercial (S neox, Sensofar) amb la tècnica CSI. La Figura 4.31a) mostra el mapa de fase obtingut i la Figura 4.31b) el mapa topogràfic de la mostra. En la Figura 4.31c) es mostra el mapa topogràfic obtingut amb el profilòmetre òptic comercial per poder comparar.

Ambdós mapes topogràfics són molt similars, i els resultats de la tècnica proposada són molt fidels als obtinguts amb tècnica tradicional de CSI. La principal diferència es troba en els components d'alta freqüència espacial de la mostra, que no són tan visibles degut a la reducció de contrast de les franges d'interferència, que fa perdre informació dels detalls més petits. En contrast, pel que fa a la quantitat d'imatges, el mètode proposat només en necessita 4. En canvi, la tècnica tradicional de CSI necessita fer passos de $\lambda/8$, que correspon a 68 nm aproximadament, i que resulta en 150 imatges per a un rang axial de 10 μm .

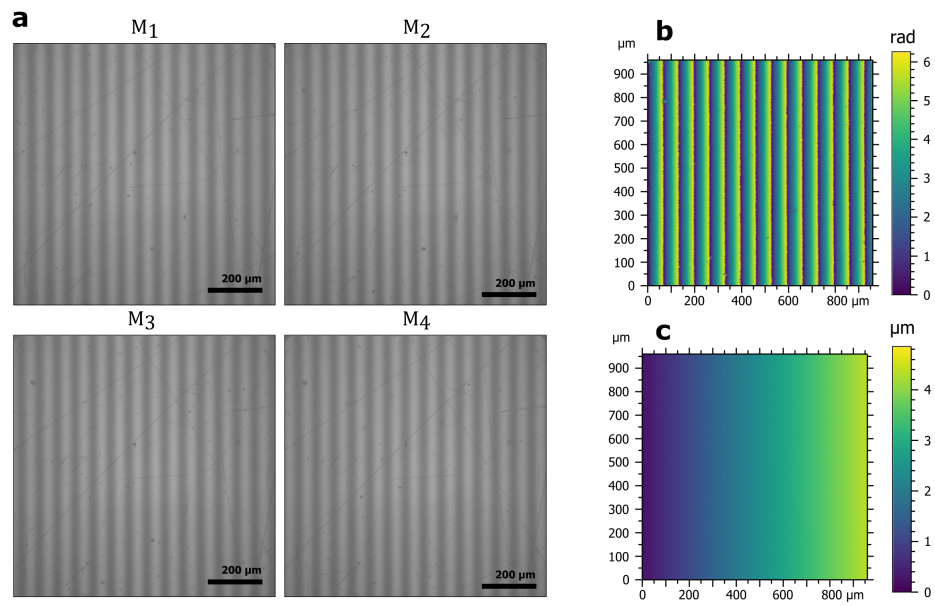


FIGURA 4.30: a) Imatge adquirida per cadascuna de les modulacions (M_{1-4}). El canvi de fase entre elles és més fàcil d'apreciar a les cantonades de les imatges. b) Mapa de fase resultant de les 4 imatges anteriors. c) Mapa topogràfic de la mostra.

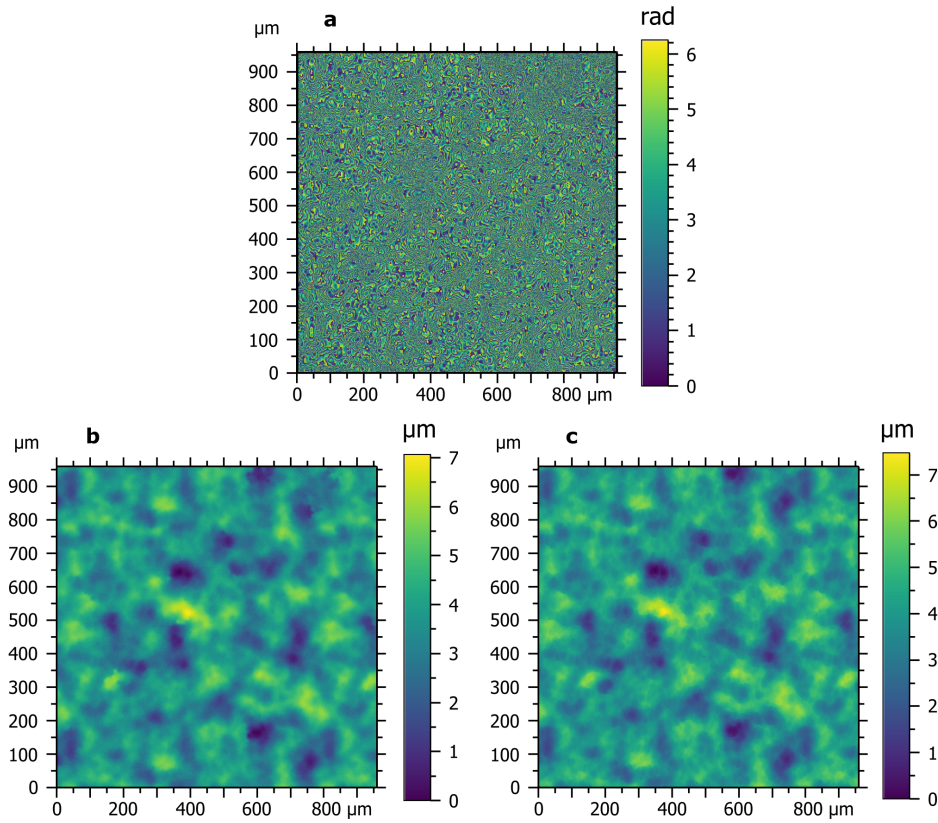


FIGURA 4.31: Mapa de fase de l'estàndard de rugositat AIR B40 de l'NPL. b) i c) Comparació entre el mapa topogràfic obtingut amb la tècnica proposada (b) i l'obtingut amb el perfilòmetre òptic comercial i CSI (c). Els resultats de la tècnica proposada són fidels a la tècnica tradicional, i la principal diferència es troba en els components d'alta freqüència espacial de la mostra. A causa de la reducció en el contrast de les franges, aquests components no són tan visibles.

4.7.1.1 *Unwrapping* a través de longituds d'ona heterodines

Fins ara s'han presentat dues maneres per tal d'obtenir un mapa topogràfic a través de l'*unwrapping* del mapa de fase. El primer mètode s'ha presentat en l'apartat anterior 4, i utilitza els codis de Gray. Aquest mètode és útil amb sistemes òptics de camp clar, però no és extrapolable a sistemes interferomètrics. El segon tipus de mètodes són purament computacionals. Aquests permeten aconseguir l'*unwrapping* a canvi de possibles errors i artefactes quan la mostra té un mapa de fase complex o quan hi ha discontinuïtats en la topografia de la mostra. En últim lloc, existeix un altre mètode per aconseguir l'*unwrapping* del mapa de fase, a través del principi heterodí [116, 117].

El principi heterodí consisteix en la combinació de dos mapes de fase obtinguts amb dos longituds d'ona diferents per formar una longitud d'ona considerablement major. D'aquesta manera és possible augmentar el període del mapa de fase per tal que no hi hagi discontinuïtats en la mostra, que resulta en una fase inequívoca. La longitud d'ona heterodina es descriu com a

$$\lambda_{12} = \left| \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \right|, \quad (4.20)$$

on λ_1 i λ_2 són cadascuna de les longituds d'ona de les fonts de llum utilitzades i λ_{12} la longitud d'ona heterodina resultant. Per exemple, si s'utilitzen dos fonts de llum amb longituds d'ona de 400 nm i 525 nm s'obté una longitud d'ona heterodina de 840 nm.

Per obtenir el mapa de fase de la longitud d'ona heterodina, és necessari calcular el mapa de fase de cada font de llum per separat, tal com s'ha explicat en el capítol de l'estat de l'art 2. Després, l'algorisme per combinar els dos mapes de fase φ_1 i φ_2 es basa en el següent:

$$\varphi_{12} = \begin{cases} \varphi_1 - \varphi_2 & \text{si } \varphi_1 \geq \varphi_2 \\ \varphi_1 - \varphi_2 + 2\pi & \text{si } \varphi_1 < \varphi_2 \end{cases} \quad (4.21)$$

En aquest procés s'utilitzen els dos mapes de fase per fer l'*unwrapping* l'un a l'altre. A través d'aquest mètode, s'eviten incerteses i errors a canvi d'un augment en el número d'imatges a adquirir. A la Figura 4.32 es mostra un esquema de l'algorisme de reconstrucció del mapa de fase heterodí. En la Figura 4.32a) i b) es veuen les imatges adquirides cadascuna de les fonts de llum diferents, i la c) i d) el mapa de fase corresponent. En últim lloc, en la e) hi ha el mapa de fase heterodí, on no s'observen salts de fase i que per tant es considera el mapa topogràfic de la mostra.

En l'*unwrapping* heterodí, a mesura que les dues longituds d'ona utilitzades són més properes, la longitud resultant incrementa considerablement. Aquest fet, però, és a canvi de la pèrdua de robustesa en la combinació dels dos mapes de fase. Si els dos mapes tenen períodes molt similars, el soroll de cada mesura provocarà salts entre els dos casos de l'algorisme presentat ($\varphi_1 \geq \varphi_2$ o $\varphi_1 < \varphi_2$), i en el mapa de fase resultant es veuran *spikes*, artefactes molt visibles que no són fidels a la topografia de la mostra.

En canvi, si s'utilitzen dos longituds d'ona més allunyades, aquests artefactes es minimitzen però el rang de mesura es redueix. Per augmentar més el rang, es pot

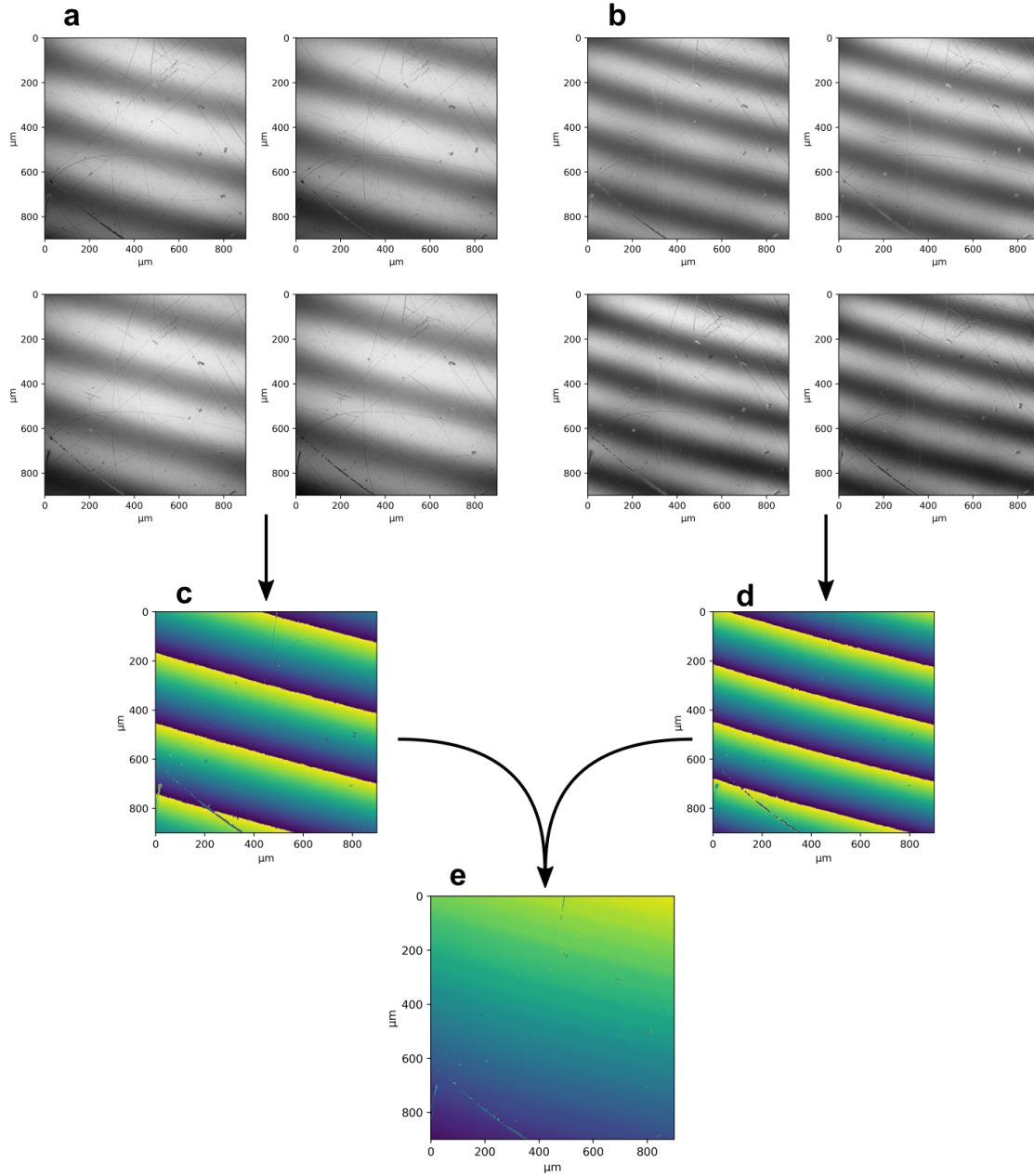


FIGURA 4.32: Esquema de l'*unwrapping* heterodí. a) Imatges interferomètriques adquirides amb una longitud d'ona de 525 nm i b) 400 nm. c) Mapa de fase obtingut amb una longitud d'ona de 525 nm i d) 400 nm. e) Combinació heterodina dels dos mapes de fase per obtenir un mapa topogràfic *unwrapped* de la mostra.

utilitzar una tercera longitud d'ona. Llavors, amb tres longituds d'ona diferents, la longitud d'ona heterodina total és:

$$\lambda_{123} = \left| \frac{\lambda_{12}\lambda_{23}}{\lambda_{23} - \lambda_{12}} \right| \quad (4.22)$$

D'aquesta manera, és possible incrementar el rang axial de mesura sense artefactes com *spikes* en la reconstrucció topogràfica de la mostra.

4.7.2 Implementació mitjançant polarització

En la següent implementació vam utilitzar un objectiu de camp clar i, igual que la implementació presentada al capítol anterior, vam projectar un patró d'alta freqüència per texturitzar la mostra. Vam utilitzar un objectiu 20×/0.45 NA i una lent de tub amb distància focal de 100 mm. A la Figura 4.33 es mostra l'esquema del sistema òptic utilitzat. En aquest cas vam modular la il·luminació amb un polaritzador, que es manté en rotació constant durant l'escaneig focal i l'adquisició de la imatge. Per la detecció, vam utilitzar una càmera que detecta la polarització a quatre angles diferents: 0°, 45°, 90° i 135°.

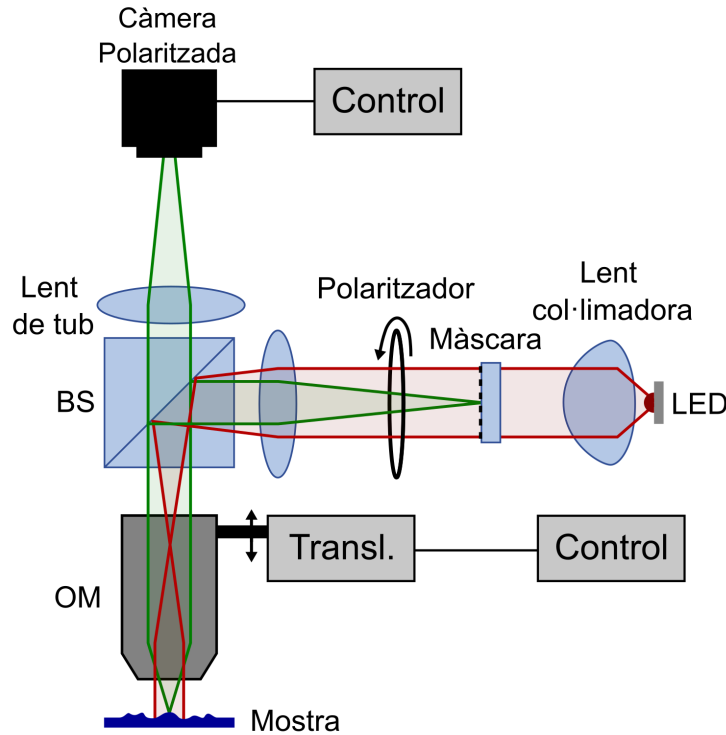


FIGURA 4.33: Esquema del muntatge per l'implementació de la tècnica ESFS mitjançant la polarització. En aquest cas, vam fer servir un polaritzador que es manté en una velocitat angular constant i per la detecció s'utilitza una càmera polaritzada.

D'acord amb la Llei de Malus [118], la intensitat que s'observa després de dos polaritzadors orientats en un angle respecte els seus eixos principals és

$$I \propto I_0 \cos^2(\theta) = I_0 \frac{1 + \cos(2\theta)}{2}. \quad (4.23)$$

En aquest cas θ és igual a $\theta_P - \theta_C$, la diferència d'angles entre el polaritzador i la càmera, i I_0 és l'amplitud de la intensitat. Per una càmera polaritzada θ_C és igual a 0°, 45°, 90° i 135°, que resulta en les següents 4 intensitats

$$I_1 \propto I_0 \frac{1 + \cos(2\theta_P)}{2}, \quad (4.24)$$

$$I_2 \propto I_0 \frac{1 + \cos(2\theta_P - \frac{\pi}{2})}{2}, \quad (4.25)$$

$$I_3 \propto I_0 \frac{1 + \cos(2\theta_P - \pi)}{2}, \quad (4.26)$$

$$I_4 \propto I_0 \frac{1 + \cos(2\theta_P - \frac{3\pi}{2})}{2}, \quad (4.27)$$

$$(4.28)$$

on θ_P és l'angle del polaritzador, que rota a una velocitat angular constant. Per una velocitat d'escaneig focal v_s i una freqüència de rotació del polaritzador f_P determinada, s'obté que el període de la il·luminació és

$$T = \frac{v_s}{2f_P}, \quad (4.29)$$

on el factor $1/2$ prové del fet que en cada rotació la intensitat passa per 2 cicles de modulació, a un angle α i a $\alpha + \pi$. A la Figura 4.34 es mostra la intensitat de la il·luminació per a cada polarització en funció de la posició axial.

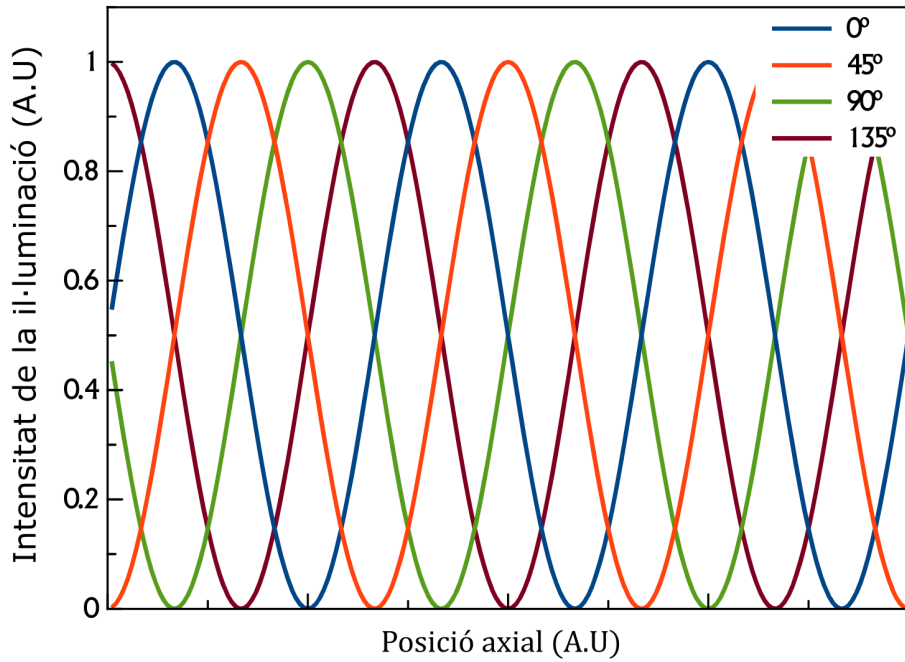


FIGURA 4.34: Intensitat de la il·luminació en funció de la posició axial per a cada angle de polarització de la càmera.

Amb aquesta configuració, cada imatge adquirida està composta per quatre subimatges que contenen una modulació sinusoidal perfecte, amb un desplaçament de fase de $\pi/2$ entre elles. La imatge adquirida s'integra a través de totes les posicions axials i mentre el polaritzador rota durant el temps d'exposició. De la mateixa manera que en la implementació de l'apartat anterior, es pot detectar la presència del patró d'alta freqüència mitjançant un operador laplaciana.

Aquest operador s'aplica a cada sub-imatge de polarització individualment, i s'obté una magnitud que és proporcional a la intensitat de la il·luminació a l'ubicació de la mostra. Així doncs, es resol la ubicació axial de la mostra aplicant la mateixa fórmula que en la implementació anterior i que en PSI. Per l'*unwrapping*, vam utilitzar el mateix algorisme computacional que en els casos anteriors.

Per aquesta implementació vam utilitzar un objectiu de microscopi de camp clar $20\times/0.45$ NA (Nikon), una càmera polaritzada (BFS-U3-51S5PC, FLIR) i un patró d'escacs amb un període de $25\mu\text{m}$. Vam establir el rang de mesura axial a $120\mu\text{m}$ i, com a prova de concepte, vam mesurar un mirall inclinat amb una alçada pic a vall similar amb diferents freqüències de rotació del polaritzador. En el primer cas, la freqüència del polaritzador la vam fixar a 1.5 rotacions per imatge, i en el segon cas fins a 3.

Les imatges adquirides després d'aplicar l'operador laplacià es mostren a la Figura 4.35a). Tot i que la freqüència és de 1.5 rotacions per imatge, el nombre de franges que apareixen a les imatges és el doble. Per altra banda, tot i que s'extreuen 4 imatges separades, es capturen a través d'un únic fotograma de càmera, tal com s'ha explicat anteriorment. La Figura 4.35b) mostra el mapa de fase reconstruït a partir de les 4 imatges anteriors, i en la c) el mateix mapa després de l'*unwrapping*.

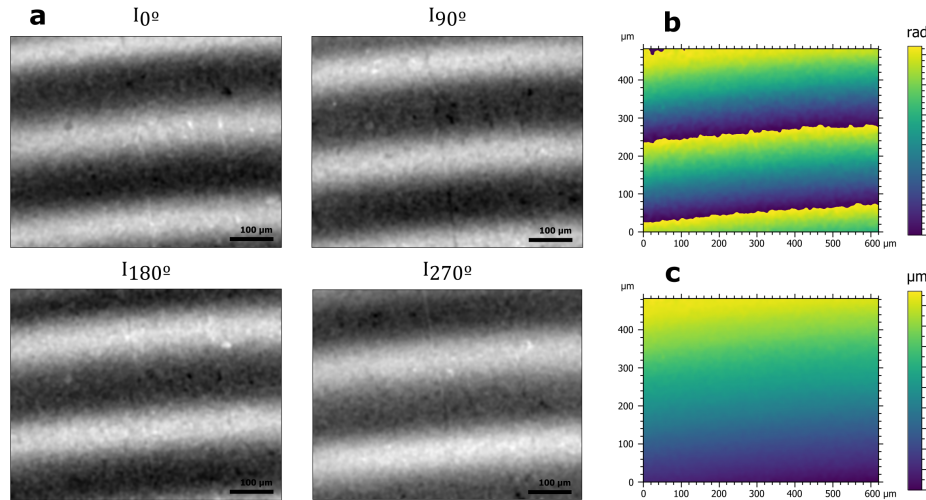


FIGURA 4.35: a) Imatge adquirida separada en els seus components de polarització. En cadascuna d'aquestes imatges ja s'ha aplicat l'operador Laplacià i es mostra la imatge de seccionat òptic. La freqüència del polaritzador era de 1.5 rotacions per imatge, que resulta en 3 franges visibles. b) Mapa de fase que resulta de les 4 imatges prèvies. c) Mapa de fase després de l'*unwrapping*.

Els resultats per a una freqüència de 3 rotacions per imatge es mostren a la Figura 4.36. En la c) es mostra les imatges després d'aplicar l'operador laplacià, en la b) el mapa de fase obtingut i en la c) el mapa de fase després de l'*unwrapping*.

Per comparació, un perfilòmetre òptic que utilitzi una tècnica tradicional (confocal o variació de focus) ha de mostrejar el rang de mesura axial amb *steps* d'aproximadament $1\mu\text{m}$ (utilitzant un $20\times/0.45$ NA). Per tant, necessita 120 imatges per a un rang axial de $120\mu\text{m}$. En canvi, amb la tècnica proposada només cal adquirir una única imatge, amb la possibilitat d'estendre encara més el rang axial.

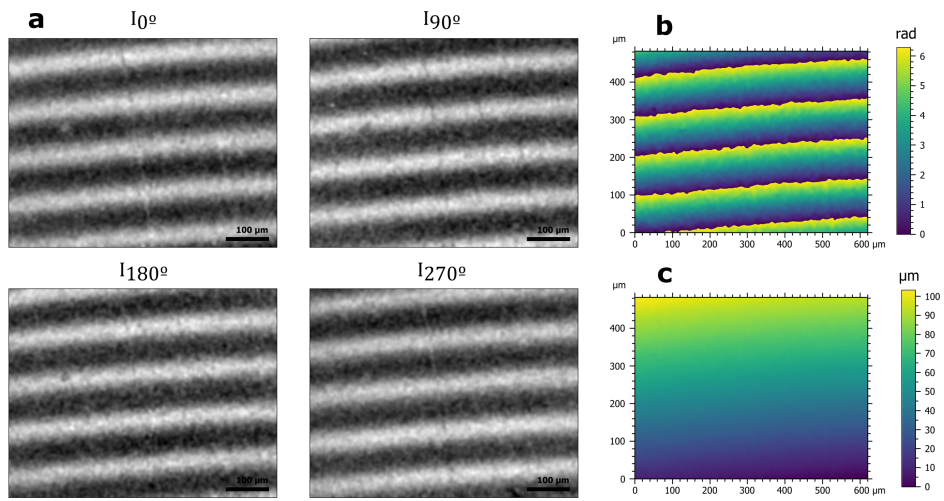


FIGURA 4.36: a) Imatge adquirida separada en els seus components de polarització. En cadascuna d'aquestes imatges ja s'ha aplicat l'operador Laplaciana i es mostra la imatge de seccionat òptic. La freqüència del polaritzador era de 3 rotacions per imatge, que resulta en 6 franges visibles. b) Mapa de fase que resulta de les 4 imatges prèvies. c) Mapa de fase després de l'*unwrapping*.

4.7.3 Implementació amb confocal d'*spinning disk*

Per combinar la tècnica de l'ESFS amb el confocal d'*spinning disk* vam utilitzar el X-Light V1 (CrestOptics), que és un producte comercial per a microscopis invertits que s'utilitza per microscòpia de fluorescència. Aquest producte inclou el sistema òptic d'imatge juntament amb el disc giratori, que té dues mides possibles de *pinhole*, 40 μm i 70 μm .

Per a cada objectiu de microscopi els *pinholes* tenen diferents mides, ja que els augments són diferents, i per tant no estan pensats per utilitzar-se amb qualsevol objectiu. Més específicament, s'han d'utilitzar amb objectius amb alt augment, sinó la mida del *pinhole* és considerablement més gran que la PSF del sistema òptic i el seccionat òptic es veu reduït. A la Taula 4.4 hi estan representats la resolució i la mida de la projecció del *pinhole* de 40 μm per a diferents objectius. Només pel 100 i el 150 $\times$ la resolució i la mida del *pinhole* són similars, de manera que vam utilitzar l'objectiu 100 $\times$ per aquesta implementació, ja que el 150 $\times$ reduïa el camp de visió considerablement amb una millora poc apreciable en el seccionat òptic.

Augment	Obertura numèrica	Resolució (nm)	<i>Pinhole</i> (nm)
10	0.3	1118	4.000
20	0.45	745	2.000
50	0.8	419	800
100	0.9	372	400
150	0.9	372	266

TAULA 4.4: Augment, obertura numèrica, resolució i mida de la projecció del *pinhole* de 40 μm per a diferents objectius. Només el 100 $\times$ i 150 $\times$ tenen resolucions i mides similars, i per tant amb els altres objectius el seccionat òptic serà molt pobre.

Atès que aquest producte està concebut per ser utilitzat en aplicacions de fluorescència, incorpora miralls dicroics per separar la il·luminació del sistema d'imatge. Per això, en aquest cas vam haver-lo d'adaptar per mesurar superfícies reflectores, substituint el mirall dicroic per un *plate splitter* polaritzant (PSP) combinat amb una placa de fase $\lambda/4$. Aquest ajust permet que la il·luminació, inicialment polaritzada, sigui reflectida pel PSP. Quan la llum travessa la placa de fase $\lambda/4$ dues vegades (abans i després de reflectir-se a la superfície), la seva polarització es modifica. Així, quan torna al PSP, la llum polaritzada és transmesa, que permet formar la imatge en la càmera.

D'altra banda, també vam incorporar un filtre d'emissió. Tot i que la placa de fase $\lambda/4$ utilitzada era acromàtica, ja que manté un canvi de fase gairebé constant en un rang ampli de longituds d'ona, el PSP no posseïa aquesta propietat. Això implica que, a causa de la seva dependència amb la longitud d'ona, una part de la llum es reflecteix quan realment es desitja que es transmeti, i viceversa. Aquest fenomen genera senyals no desitjats a la càmera, i es fa més evident a mesura que augmenta l'ample de banda òptic de la il·luminació. Per tal de minimitzar el soroll i millorar la qualitat de les mesures, vam utilitzar un filtre d'emissió amb un ample de banda de 42 nm i longituds de tall de 491 nm fins a 531 nm.

A la Figura 4.37a) hi ha l'esquema del sistema òptic. Hi inclou el LED, amb un FWHM de 50 nm; lent col·limadora (LC), filtre d'emissió (FE), polaritzador lineal

(PL), *plate splitter* polaritzat (PSP), *spinning disk* (SD), placa de fase $\lambda/4$, objectiu de microscopi (OM) i lent de tub (LT). A la Figura 4.37b) es veu el producte integrat amb el microscopi invertit abans de muntar la branca d'il·luminació.

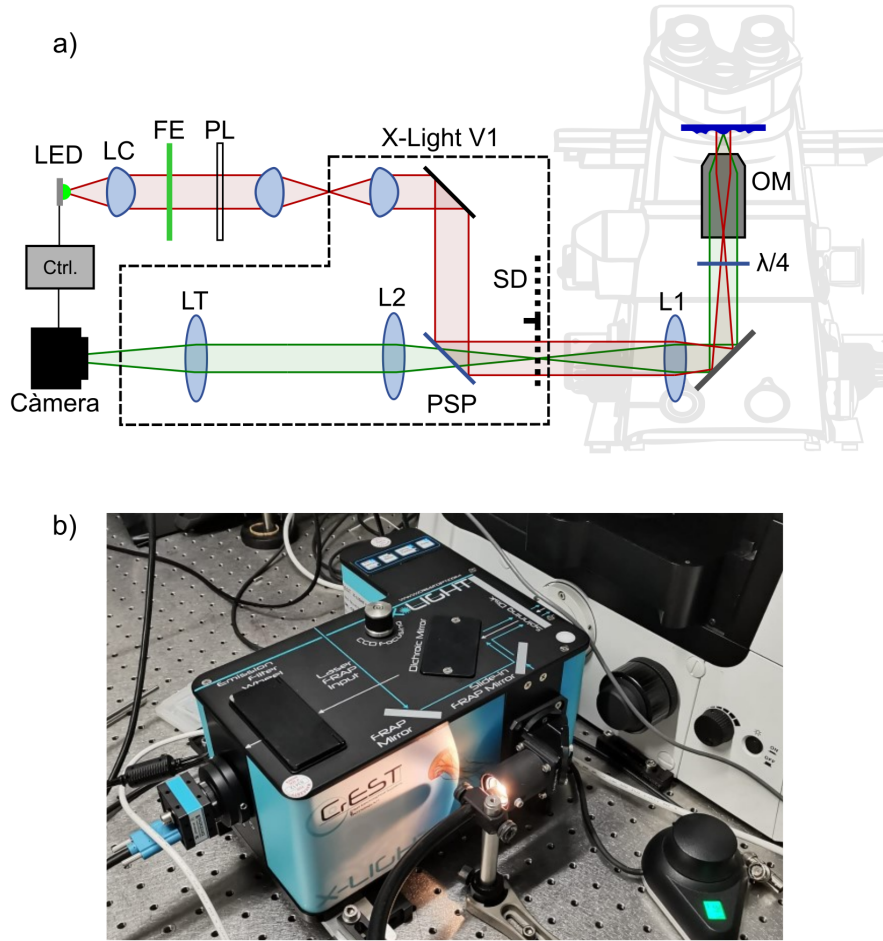


FIGURA 4.37: a) Esquema del sistema òptic, s'inclouen el LED, lent col·limadora (LC), filtre d'emissió (FE), polaritzador lineal (PL), *plate splitter* polaritzat (PSP), *spinning disk* (SD), placa de fase $\lambda/4$, objectiu de microscopi (OM) i lent de tub (LT). b) X-Light-V1 del comerciant Crest Optics.

A la Figura 4.38 es mostra una imatge saturada i binaritzada dels *pinholes* del sistema *spinning disk*. Aproximadament un 3.5 % dels píxels es troben saturats. A mesura que aquest percentatge augmenta, és a dir, com més alta és la densitat de *pinholes*, menys temps es requereix per obtenir senyal de seccionament òptic per a tota la imatge. Per exemple, segons el *datasheet* del model X-Light V1, aquest sistema opera amb una velocitat angular del disc de 250 revolucions per segon i un *frame rate* màxim de 1000 FPS. Això indica que, en només un quart de volta, el disc pot generar una imatge completa de seccionament òptic. Si s'utilitzés un disc amb major densitat de *pinholes*, seria possible reduir el temps necessari per seccionar la imatge completa. Per exemple, si la imatge es pogués seccionar en cada vuitè de volta del disc, s'assoliria un *frame rate* de fins a 2000 FPS, sempre que la càmera no limités el procés d'adquisició.

Tanmateix, aquest augment de densitat comporta un compromís amb el SNR del seccionament òptic. A mesura que la mostra es desenfoca, la PSF s'eixampla, i

una part de la llum comença a passar a través dels *pinholes* més propers. Aquest fenomen, que anomenem *cross-talk*, provoca un augment del senyal fora de focus, disminuint així el SNR del microscopi confocal.

Per contra, reduir la densitat de *pinholes* comporta una disminució de la velocitat, ja que es necessitarà més d'un quart de volta per completar el seccionament de la imatge. En aquest cas, però, en tenir menys *pinholes* i més espai entre ells implica un *cross-talk* menor, millorant el SNR. Aquesta relació inversa entre la velocitat del sistema i la qualitat del seccionament òptic exemplifica els compromisos en el disseny d'un sistema d'*spinning disk*.

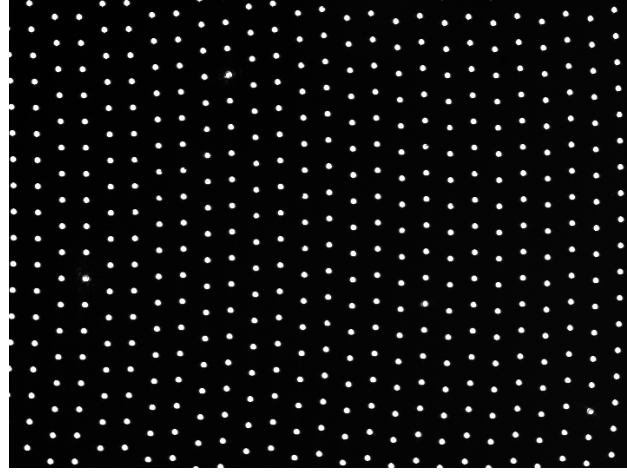


FIGURA 4.38: Imatge binaritzada dels *pinholes* de l'*spinning disk*. Aproximadament un 3.5 % dels píxels de la càmera es troben en un *pinhole*.

Per caracteritzar el seccionament òptic del microscopi, vam realitzar un escaneig axial de 20 μm utilitzant un posicionador piezoelèctric. A la Figura 4.39 es representa la intensitat mesurada per la càmera en funció de la posició axial. La senyal obtinguda és adequada per a la mesura de superfícies en reflexió, ja que presenta un pic pronunciat en la posició focal de l'objectiu del microscopi, que permet calcular amb precisió la localització axial de la mostra.

Vam combinar el sistema confocal d'*spinning disk* amb la tècnica de l'ESFS i utilitzant el mateix posicionador piezoelèctric. El potencial d'aquesta combinació es troba en el fet que les imatges adquirides ja es troben seccionades òpticament, en contrast amb la implementació descrita a l'apartat 4, on és necessari aplicar un operador matemàtic per identificar el patró projectat sobre la mostra.

Vam escollir un rang d'escaneig axial de 10 μm i vam sincronitzar l'adquisició mitjançant el *trigger* de sortida del posicionador. El temps d'adquisició el vam establir en 250 ms, ja que l'ús del filtre d'emissió reduïa significativament la quantitat de llum disponible, requerint així un temps d'exposició més llarg. Per tant, vam fixar la velocitat del posicionador en 40 $\mu\text{m/s}$. La quantitat d'imatges adquirides va ser idèntica a la de la implementació descrita a l'apartat 4: quatre imatges per a la primera fase i quatre més per a la segona fase.

En primer lloc, vam mesurar tres *step heights* amb valors de referència de $541 \pm 6 \text{ nm}$, $925 \pm 6 \text{ nm}$ i $1918 \pm 6 \text{ nm}$. Vam realitzar aquestes mesures amb l'objectiu de calibrar l'error sistemàtic del sistema, i els valors obtinguts en tots tres

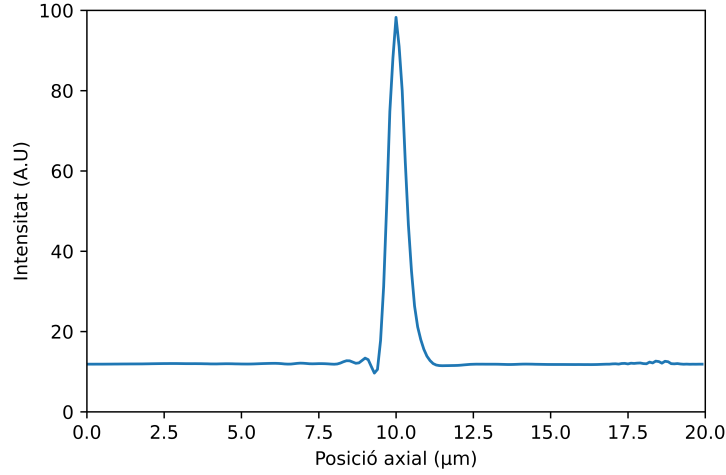


FIGURA 4.39: Senyal confocal mesurada amb la càmera d'un *scan* de 20 μm amb passos de 0.1 μm.

casos coincideixen amb els valors de referència dins de l'interval d'incertesa. En comparació amb el prototip presentat a l'apartat 4, l'error és notablement menor gràcies a l'ús d'un posicionador piezoelèctric, que ofereix una precisió molt superior a la d'un motor lineal. A la Figura 4.40 s'il·lustren els mapes topogràfics i els perfils corresponents a cadascun dels *step heights* mesurats.

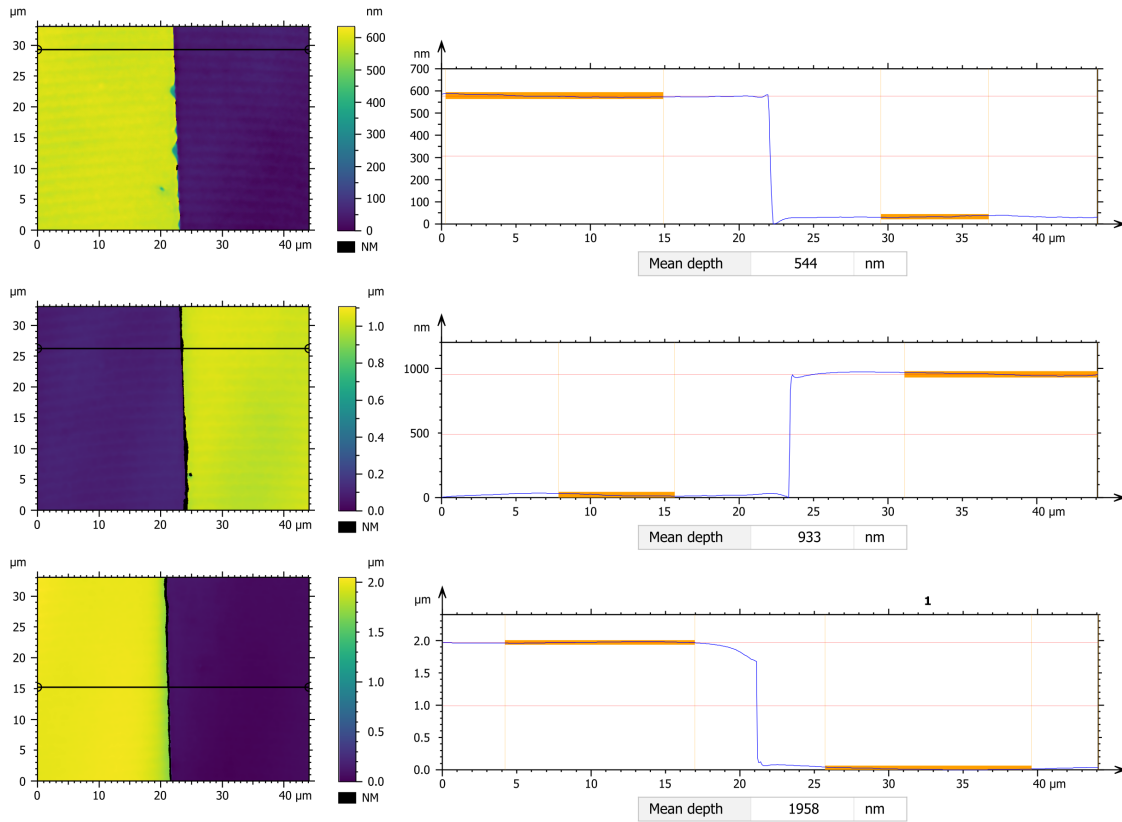


FIGURA 4.40: Mapes topogràfics amb el perfil corresponent per tres *step heights* obtinguts amb el confocal d'*spinning disk* i la tècnica ESFS. Els valors de referència de cada *step* són a) 541 ± 6 nm, b) 925 ± 6 nm i c) 1918 ± 6 nm.

En segon lloc, vam mesurar una estrella Siemens per caracteritzar qualitativament la resolució lateral de l'ESFS en comparació amb un microscopi confocal comercial. A la Figura 4.41a) es presenta el mapa topogràfic de l'estrella Siemens obtingut amb el microscopi confocal comercial, mentre que a la b) es mostra el resultat amb el microscopi confocal d'*spinning disk*. El sistema confocal comercial proporciona una resolució lateral més elevada, que permet resoldre clarament les puntes de l'estrella Siemens. En canvi, degut a l'escaneig axial de l'ESFS, es produeix una pèrdua de resolució lateral, que es manifesta en la menor definició de les puntes de l'estrella.

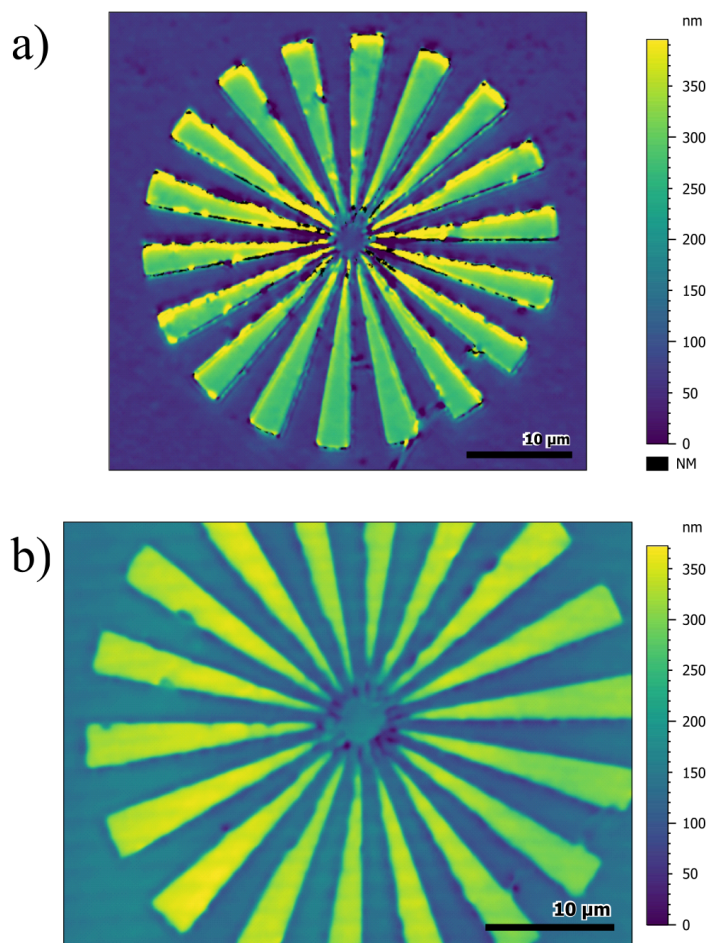


FIGURA 4.41: Mapes topogràfics de l'estrella Siemens obtinguts amb a) el microscopi confocal comercial (S neox, Sensofar) i b) el confocal d'*spinning disk*.

Per últim, vam observar que totes les topografies adquirides amb aquest sistema òptic presenten una lleugera ondulació de fons amb una amplitud molt baixa. A la Figura 4.40, aquesta ondulació es detecta més clarament en el *step* de 0.5 µm. Per tal de visualitzar-la amb més detall, s'ha aïllat i representat a la Figura 4.42. Una possible explicació d'aquest fenomen és el desfasament entre el moviment del posicionador i el disc de *pinholes*. En l'ESFS el posicionador es desplaça durant l'adquisició de cada imatge, fet que genera un desfasament en la posició axial en què es secciona cada píxel. Aquesta discrepància en la senyal adquirida podria ser la causa de l'ondulació observada a la Figura 4.42, que presenta una amplitud aproximada de 10 nm.

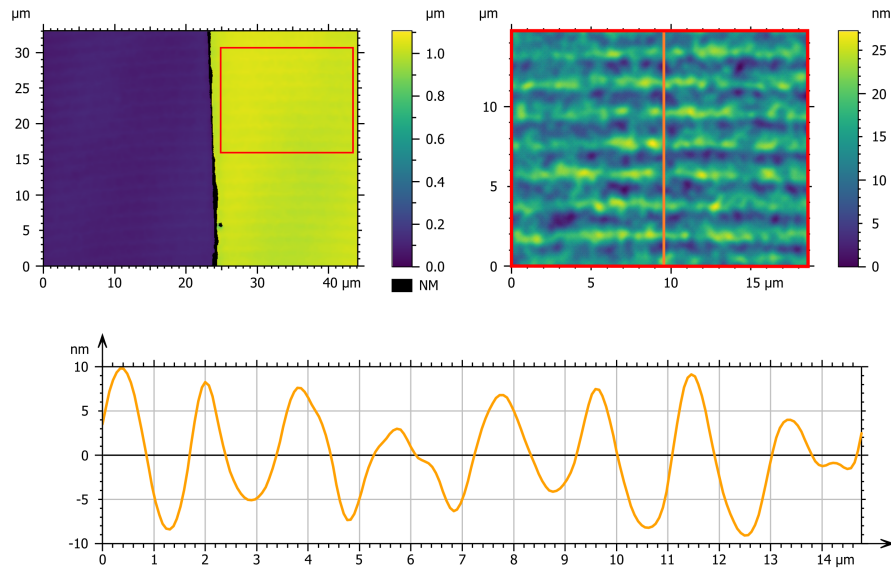


FIGURA 4.42: Ondulació que s’observa en totes les topografies adquirides amb el sistema òptic del confocal d’*spinning disk*. L’amplitud és de 10 nm aproximadament.

Per poder-ho resoldre, una possibilitat seria que la rotació de l’*spinning disk* es sincronitzés amb el posicionador. D’aquesta manera, la ondulació seria la mateixa per tots els mapes topogràfics que s’adquireixin, i es podria eliminar després amb un factor de correcció.

En aquesta secció s’han posat de manifest les capacitats de l’ESFS per adaptar-se a diverses tècniques de metrologia òptica, com ara la interferometria, la variació de focus o la microscòpia confocal. La clau d’aquesta versatilitat rau en el fet que l’ESFS no introdueix un nou fonament òptic, sinó que introdueix un canvi de paradigma en l’escaneig axial, del qual totes les tècniques òptiques poden beneficiar-se.

Mitjançant aquestes implementacions, també s’han explorat els principals avantatges i limitacions de cada tècnica. Per exemple, s’ha demostrat com la interferometria permet assolir una resolució axial excepcional, mentre que la polarització contribueix a incrementar en un factor quatre la velocitat d’adquisició. Aquestes millores posen en relleu el potencial de l’ESFS per optimitzar sistemes de mesura òptica en aplicacions on la precisió i la rapidesa són factors clau.

Capítol 5

Conclusions

En aquesta tesi s'ha desenvolupat un treball exhaustiu centrat en la manufactura additiva, amb l'objectiu d'aportar noves contribucions en l'àmbit de la metrologia òptica de superfícies grans i amb alta rugositat.

Els resultats obtinguts durant el desenvolupament del sistema òptic per a la metrologia de peces de manufactura additiva, anomenat OSAM (*Optical system for additive manufacturing*), destaquen la importància de disposar de sistemes capaços de mesurar camps de visió amplis, de fins a 3×3 mm, combinats amb una obertura numèrica propera a 0.3. Un camp de visió ampli permet capturar les freqüències espacials d'interès, mentre que una obertura numèrica elevada possibilita la captura de llum reflectida a angles elevats sense incrementar massa les aberracions òptiques del sistema. Aquesta combinació de requisits implica un diàmetre de pupila considerablement gran en comparació amb sistemes òptics convencionals, fet que representa un desafiament significatiu en el desenvolupament del sistema òptic.

Per aquest motiu es va considerar necessari dissenyar un objectiu de microscopi específic per a aplicacions de manufactura additiva. Els resultats presentats mostren que un objectiu amb aquestes característiques implica una complexitat elevada, ja que requereix una gran quantitat de lents per assolir un funcionament al límit de difracció. A més, aquesta complexitat va impedir obtenir un objectiu acromàtic, limitant l'ample de banda òptic a només 10 nm. En canvi, l'alternativa basada en l'anell de llum permet reduir l'obertura numèrica del sistema d'imatge mentre es manté alta la de la il·luminació. Això comporta una simplificació significativa del disseny òptic i redueix el nombre de lents necessàries a només cinc. Aquest mètode representa un pas prometedori cap a solucions més eficients en el disseny de l'objectiu, a més d'obrir la porta a la possibilitat de desenvolupar un disseny plenament acromàtic.

En darrer lloc, durant el desenvolupament de l'OSAM es va evidenciar la necessitat de reduir el nombre d'imatges adquirides durant l'escaneig. A diferència dels sistemes tradicionals, on és necessari l'*stitching*, l'OSAM elimina aquest requisit gràcies al camp de visió de fins 3×3 mm, però les limitacions en el *data rate* condicionen la velocitat d'escaneig del sistema. Sobretot, la gran quantitat de píxels de la càmera, de fins a 21 megapíxels, restringeix un *frame rate* elevat.

En aquest context, la proposta d'un nou mètode per a l'adquisició de mapes topogràfics, anomenat ESFS (*encoded search focal scan*), permet una reducció d'un

ordre de magnitud de la quantitat d'imatges necessàries en comparació amb mètodes tradicionals pla a pla. La combinació d'aquesta tècnica amb l'OSAM proporciona una solució per a la caracterització ràpida de peces de manufactura additiva, aprofitant les característiques òptiques úniques del sistema. D'altra banda, la integració de l'ESFS amb tècniques de control del focus axial converteix el sistema òptic en una eina capaç de realitzar mesures ultra-ràpides, ja sigui amb l'enfocament remot o lents varifocals.

L'ESFS representa un canvi de paradigma de l'escaneig axial en la metrologia òptica. No constitueix una tècnica òptica independent, sinó que permet adaptar les metodologies convencionals a una versió més ràpida, tot i que amb una reducció en la resolució lateral com a *trade-off*. Aquesta flexibilitat s'ha demostrat àmpliament en diverses implementacions, en primer lloc amb un motor lineal i una lent TAG (4.5), i posteriorment (4.7) aprofitant propietats òptiques com la interferència, la polarització i, fins i tot, un sistema confocal d'*spinning disk*.

Els resultats obtinguts en aquesta tesi suposen un avenç significatiu en el camp de la metrologia òptica aplicada a la mesura ràpida de peces de manufactura additiva. A més, l'ESFS no només ha demostrat el seu gran potencial, sinó que també obre la porta a noves línies d'investigació. En particular, la reducció del temps d'adquisició en els sistemes de mesura actuals podria permetre la caracterització de sistemes dinàmics que fins ara no es podien analitzar amb les tècniques tradicionals d'escaneig.

Conclusions

In this thesis, an exhaustive study focused on additive manufacturing has been developed, with the aim of providing new contributions in the field of optical metrology for large and rough surfaces.

The results obtained during the development of the optical system for the metrology of additive manufacturing parts, named OSAM (Optical system for additive manufacturing), have highlighted the importance of having systems capable of measuring wide fields of view, up to 3×3 mm, combined with a numerical aperture close to 0.3. A wide field of view allows the detection of spatial frequencies of interest, while a high numerical aperture enables the capture of light reflected at high angles without significantly increasing the optical aberrations in the system. This combination of requirements implies a considerably large pupil diameter compared to conventional optical systems, which presents a significant challenge in the development of the optical system.

For this reason, it was considered necessary to design a microscope objective specifically for additive manufacturing applications. The presented results show that an objective with these characteristics entails high complexity, as it requires a large number of lenses to achieve diffraction-limited performance. Furthermore, this complexity prevented the development of an achromatic objective, limiting the optical bandwidth to only 10 nm. In contrast, the alternative based on the ring light allows reducing the numerical aperture of the imaging system while maintaining a high illumination aperture. This leads to a significant simplification of the optical design and reduces the number of necessary lenses to just five. This method represents a promising step toward more efficient objective designs, as well as opening the door to the possibility of developing a fully achromatic design.

Lastly, during the development of OSAM, the need to reduce the number of images acquired during scanning became evident. Unlike traditional systems, where stitching is required, OSAM eliminates this requirement thanks to its field of view of up to 3×3 mm. However, limitations in data rate constrain the system's scanning speed. In particular, the large number of pixels in the camera, up to 21 megapixels, restricts a high frame rate.

In this context, the proposed new method for acquiring topographic maps, called ESFS (encoded search focal scan), enables a one-order-of-magnitude reduction in the number of images required compared to traditional scanning methods. The combination of this technique with OSAM provides a solution for the rapid characterization of additive manufacturing parts, leveraging the system's unique optical properties. Additionally, integrating ESFS with axial focus control techniques transforms the optical system into a powerful tool for ultra-fast measurements, whether

using remote focusing or varifocal lenses.

ESFS represents a paradigm shift in axial scanning within optical metrology. It does not constitute an independent optical technique but rather allows conventional methodologies to be adapted into a faster version, although with lateral resolution reduction as a trade-off. This flexibility has been widely demonstrated through various implementations, first using a linear motor and a TAG lens (4.5) and later (4.7) exploiting optical properties such as interference, polarization, and even with a confocal spinning disk system.

The results obtained in this thesis represent a significant advance in the field of optical metrology applied to the rapid measurement of additive manufacturing parts. Moreover, ESFS has not only demonstrated its great potential but also opens the door to new lines of research. In particular, the reduction of acquisition time in current measurement systems could enable the characterization of dynamic systems that, until now, could not be analyzed using traditional scanning techniques.

Capítol 6

Publicacions

Publicacions en revistes científiques

1. Vilar, N., Artigas, R., Bermudez, C., Thompson, A., Newton, L., Leach, R., Duocastella, M., Carles, G. Optical system for the measurement of the surface topography of additively manufactured parts. *Measurement Science and Technology* **33**, 104001 (2022)
2. Vilar, N., Artigas, R., Duocastella, M., Carles, G. Fast topographic optical imaging using encoded search focal scan. *Nature Communications* **15**, 2065 (2024)

Proceedings

1. Vilar, N., Artigas, R., Duocastella, M., Carles, G. Robust measurement of surface topography for additive manufacturing using imaging confocal microscopy. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XIII* (2023)
2. Vilar, N., Artigas, R., Duocastella, M., Carles, G. Microscopic optical surface profiling at 67 Hz. *Optica Imaging Congress (3D, COSI, DH, FLatOptics, IS, pcAOP)* (2023)
3. Vilar, N., Artigas, R., Duocastella, M., Carles, G. Topographic imaging of three-dimensional samples at 67 Hz. *Three-Dimensional and Multidimensional Microscopy: Image Acquisition and Processing XXXI* (2024)
4. Vilar, N., Artigas, R., Duocastella, M., Carles, G. Implementations of ESFS for fast topographic acquisition. *Optics and Photonics for Advanced Dimensional Metrology III* (2024)
5. Vilar, N., Artigas, R., Duocastella, M., Carles, G. Large range interferometric optical profiling using encoded search focal scan. *OPTICA IMAGING CONGRESS* (2024)

Patents

1. Carles, G., Vilar, N., Artigas, R. Method and apparatus for measuring a height map of a surface of a three-dimensional object using light. PCT/EP2023/066181 (2023). Patent pending.

Bibliografia

1. *International Vocabulary of Metrology: Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)* (BIPM, Bureau International des Poids et Mesures, 2012).
2. Leach, R. *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology* (gen. de 2009).
3. Leach, R. & Smith, S. *Basics of Precision Engineering* (març de 2018).
4. Leach, R. *Characterisation of Areal Surface Texture* ISBN: 978-3-642-36457-0 (juny de 2013).
5. ISO 25178-2:2021. Geometrical product Specification (GPS) Surface texture: Areal, Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. *International Organization for Standardization*, Geneva, CH (2021).
6. *Advances in Optical Surface Texture Metrology* (ed. Leach, R.) ISBN: 978-0-7503-2528-8 (IOP Publishing, 2020).
7. Leach, R. *The measurement of surface texture using stylus instruments* (gen. de 2001).
8. Oldenbourg, R. & Shribak, M. a, 28.1 - 28.62 (Mc Graw Hill, gen. de 2010). ISBN: 9780071498890.
9. Kingslake, R. & Barry Johnson, R. a *Lens Design Fundamentals (Second Edition)* (ed. Kingslake, R. & Barry Johnson, R.) Second Edition, 101 - 135 (Academic Press, Boston, 2010).
10. Vesely, P. *Handbook of Biological Confocal Microscopy*, 3rd ed. By James B. Pawley, Editor. Springer Science + Business Media, LLC, New York (2006). ISBN 10: 0-387-25921-X; ISBN 13: 987-0387-25921-5; hardback; 28 + 985 pages. *Scanning* **29**, 91 - 91 (2007).
11. Minsky, M. *Microscopy apparatus*, U.S. Patent 3013467, Dec. 1961.
12. Sheppard, C. & Mao, X. Confocal Microscopes with Slit Apertures. *Journal of Modern Optics* **35**, 1169 - 1185 (març de 1988).
13. Halpern, A. R. *et al.* Versatile, do-it-yourself, low-cost spinning disk confocal microscope. *Biomed. Opt. Express* **13**, 1102 - 1120 (febr. de 2022).
14. Bayguinov, P. O. *et al.* Modern Laser Scanning Confocal Microscopy. *Current Protocols in Cytometry* **85**, e39 (2018).
15. Neil, M. A. A., Juškaitis, R. & Wilson, T. Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope. *Opt. Lett.* **22**, 1905 - 1907 (des. de 1997).
16. Artigas, R., Pinto, A. & Laguarda, F. *Three-dimensional micromerements on smooth and rough surfaces with a new confocal optical profiler a Optical Measurement Systems for Industrial Inspection* **3824** (SPIE, 1999), 93 - 104.

17. Danzl, R., Helml, F. & Scherer, S. Focus Variation—A Robust Technology for High Resolution Optical 3D Surface Metrology. *Strojniski Vestnik* **2011**, 245-256 (març de 2011).
18. Pertuz, S., Puig, D. & Garcia, M. A. Analysis of focus measure operators for shape-from-focus. *Pattern Recognition* **46**, 1415-1432 (2013).
19. Bermudez, C., Martínez, P., Cadevall, C. & Artigas, R. *Active illumination focus variation a Optical Metrology* (2019).
20. Noguchi, M. & Nayar, S. *Microscopic shape from focus using active illumination a Proceedings of 12th International Conference on Pattern Recognition* **1** (1994), 147-152 vol.1.
21. Lim, D., Chu, K. K. & Mertz, J. Wide-field fluorescence sectioning with hybrid speckle and uniform-illumination microscopy. *Opt. Lett.* **33**, 1819-1821 (ag. de 2008).
22. Martínez, P. *et al.* Metrological characterization of different methods for recovering the optically sectioned image by means of structured light a *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XII* **11782** (SPIE, 2021), 147-157.
23. De Groot, P. & Biegen, J. Interference microscope objectives for wide-field areal surface topography measurements. *Optical Engineering* **55**, 074110 (jul. de 2016).
24. De Groot, P. a *Optical Measurement of Surface Topography* (ed. Leach, R.) 167-186 (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011). ISBN: 978-3-642-12012-1.
25. Schreiber, H. & Bruning, J. H. a *Optical Shop Testing* 547-666 (John Wiley & Sons, Ltd, 2007). ISBN: 9780470135976.
26. Ghiglia, D. & Pritt, M. *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software* ISBN: 9780471249351 (Wiley, 1998).
27. Goldstein, R. M., Zebker, H. A. & Werner, C. L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science* **23**, 713-720 (1988).
28. De Groot, P. a *Optical Measurement of Surface Topography* (ed. Leach, R.) 187-208 (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011). ISBN: 978-3-642-12012-1.
29. Larkin, K. G. Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry. *Journal of The Optical Society of America A-optics Image Science and Vision* **13**, 832-843 (1996).
30. Zhang, S. *High-Speed 3D Imaging with Digital Fringe Projection Techniques* ISBN: 1482234335 (CRC Press, Inc., USA, 2016).
31. Xi, P., Liu, Y. & Ren, Q. a *Laser Scanning, Theory and Applications* (IntechOpen, 2011).
32. Kang, S., Duocastella, M. & Arnold, C. Variable optical elements for fast focus control. *Nature Photonics* **14**, 533-542 (set. de 2020).
33. Jabbour, J. M. *et al.* Optical axial scanning in confocal microscopy using an electrically tunable lens. *Biomed. Opt. Express* **5**, 645-652 (febr. de 2014).
34. Bawart, M. *et al.* Diffractive tunable lens for remote focusing in high-NA optical systems. *Opt. Express* **28**, 26336-26347 (ag. de 2020).
35. Chen, L., Ghilardi, M., Busfield, J. & Carpi, F. Electrically Tunable Lenses: A Review. *Frontiers in robotics and AI* **8**, 678046 (2021).

36. Mugele, F. & Baret, J.-C. Electrowetting: from basics to applications. *Journal of Physics: Condensed Matter* **17**, R705 (jul. de 2005).
37. Hasan, N., Banerjee, A., Kim, H. & Mastrangelo, C. H. Tunable-focus lens for adaptive eyeglasses. *Opt. Express* **25**, 1221-1233 (gen. de 2017).
38. Casutt, S., Bueeler, M., Blum, M. & Aschwanden, M. *Fast and precise continuous focusing with focus tunable lenses a Optical Components and Materials XI* (ed. Digonnet, M. J. F. & Jiang, S.) **8982** (SPIE, 2014), 89820Y.
39. Zhang, D.-Y., Lien, V., Berdichevsky, Y., Choi, J. & Lo, Y.-H. Fluidic adaptive lens with high focal length tunability. *Applied Physics Letters* **82**, 3171-3172. ISSN: 0003-6951 (maig de 2003).
40. Ren, H. & Wu, S.-T. Adaptive liquid crystal lens with large focal length tunability. *Opt. Express* **14**, 11292-11298 (nov. de 2006).
41. Mcleod, E. & Arnold, C. Mechanics and refractive power optimization of tunable acoustic gradient lenses. *Journal of Applied Physics - J APPL PHYS* **102** (ag. de 2007).
42. Botcherby, E., Juškaitis, R., Booth, M. & Wilson, T. An optical technique for remote focusing in microscopy. *Optics Communications* **281**, 880-887. ISSN: 0030-4018 (2008).
43. Botcherby, E. J., Juskaitis, R., Booth, M. J. & Wilson, T. Aberration-free optical refocusing in high numerical aperture microscopy. *Opt. Lett.* **32**, 2007-2009 (jul. de 2007).
44. ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing - General principles. *International Organization for Standardization*, Geneva, CH (2021).
45. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. & Khorsani, A. *Additive Manufacturing Technologies* ISBN: 978-3-030-56127-7 (nov. de 2020).
46. Upcraft, S. & Fletcher, R. The rapid prototyping technologies. *Assembly Automation* **23** (des. de 2003).
47. Leon, A., Levy, G. K., Ron, T., Shirizly, A. & Aghion, E. The effect of hot isostatic pressure on the corrosion performance of Ti-6Al-4V produced by an electron-beam melting additive manufacturing process. *Additive Manufacturing* **33**, 101039. ISSN: 2214-8604 (2020).
48. Garibaldi, M., Ashcroft, I., Lemke, J., Simonelli, M. & Hague, R. Effect of annealing on the microstructure and magnetic properties of soft magnetic Fe-Si produced via laser additive manufacturing. *Scripta Materialia* **142**, 121-125. ISSN: 1359-6462 (2018).
49. Murray, J. W., Speidel, A., Spierings, A., Marsh, I. J. & Clare, A. T. Extending powder lifetime in additive manufacturing: Chemical etching of stainless steel spatter. *Additive Manufacturing Letters* **3**, 100057. ISSN: 2772-3690 (2022).
50. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. & Emmelmann, C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* **117**, 371-392. ISSN: 1359-6454 (2016).
51. Parry, L., Ashcroft, I. & Wildman, R. Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation. *Additive Manufacturing* **12**, 1-15. ISSN: 2214-8604 (2016).
52. Townsend, A., Senin, N., Blunt, L., Leach, R. & Taylor, J. Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review. *Precision Engineering* **46**, 34-47. ISSN: 0141-6359 (2016).

53. Yuan, J., Lyu, B., Hang, W. & Deng, Q. Review on the progress of ultra-precision machining technologies. *Frontiers of Mechanical Engineering* **12**, 158-180 (juny de 2017).
54. Ovsianikov, A. & Chichkov, B. N. a *Nanoelectronics and Photonics: From Atoms to Materials, Devices, and Architectures* (ed. Korkin, A. & Rosei, F.) 427-446 (Springer New York, New York, NY, 2008).
55. Gao, W. *et al.* The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design* **69**, 65-89. ISSN: 0010-4485 (2015).
56. Frazier, W. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* **23** (juny de 2014).
57. Leach, R. Metrology for Additive Manufacturing. *Measurement and Control* **49**, 132-135 (maig de 2016).
58. Spierings, A., Starr, T. & Wegener, K. Fatigue performance of additive manufactured metallic parts. *Rapid Prototyping Journal* **19** (març de 2013).
59. Bikas, H., Stavropoulos, P. & Chryssolouris, G. Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **83** (jul. de 2015).
60. Townsend, A., Pagani, L., Scott, P. & Blunt, L. Areal surface texture data extraction from X-ray computed tomography reconstructions of metal additively manufactured parts. *Precision Engineering* **48**, 254-264. ISSN: 0141-6359 (2017).
61. Gao, W. *et al.* On-machine and in-process surface metrology for precision manufacturing. *CIRP Annals* **68**, 843-866. ISSN: 0007-8506 (2019).
62. Stavroulakis, P. & Leach, R. Review of post-process optical form metrology for industrial-grade metal additive manufactured parts. *Review of Scientific Instruments* **87**, 041101 (abr. de 2016).
63. Smith, G. *Industrial Metrology: Surfaces and Roundness* ISBN: 9781447138143 (Springer London, 2013).
64. Triantaphyllou, A. *et al.* Surface texture measurement for additive manufacturing. *Surface Topography: Metrology and Properties* **3**, 024002 (maig de 2015).
65. Mumtaz, K. & Hopkinson, N. Top surface and side roughness of Inconel 625 Parts processed using selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* **15**, 96-103 (març de 2009).
66. Król, M., Dobrzanski, L., Reimann, L. & Czaja, I. Surface quality in selective laser melting of metal powders. *Archives of Materials Science and Engineering* **60**, 87-92 (abr. de 2013).
67. Thompson, A., Senin, N., Giusca, C. & Leach, R. Topography of selectively laser melted surfaces: A comparison of different measurement methods. *CIRP Annals* **66**, 543-546. ISSN: 0007-8506 (2017).
68. Grimm, T., Wiora, G. & Witt, G. Characterization of typical surface effects in additive manufacturing with confocal microscopy. *Surface Topography: Metrology and Properties* **3**, 014001 (gen. de 2015).
69. Leach, R. *et al.* Geometrical metrology for metal additive manufacturing. *CIRP Annals* **68**, 677-700. ISSN: 0007-8506 (2019).
70. Senin, N., Thompson, A. & Leach, R. K. Characterisation of the topography of metal additive surface features with different measurement technologies. *Measurement Science and Technology* **28**, 095003 (ag. de 2017).

71. Senin, N., Thompson, A. & Leach, R. Feature-based characterisation of signature topography in laser powder bed fusion of metals. *Measurement Science and Technology* **29**, 045009 (març de 2018).
72. Vilar, N. *et al.* Optical system for the measurement of the surface topography of additively manufactured parts. *Measurement Science and Technology* **33**, 104001 (jul. de 2022).
73. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. & Hui, D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering* **143**, 172-196. ISSN: 1359-8368 (2018).
74. Lim, D., Ford, T. N., Chu, K. K. & Metz, J. Optically sectioned in vivo imaging with speckle illumination HiLo microscopy. *Journal of Biomedical Optics* **16**, 016014 (2011).
75. Burns, P. *Slanted-Edge MTF for Digital Camera and Scanner Analysis* a (gen. de 2000), 135-138.
76. Xie, X., Fan, H., Wang, A., Zou, N. & Zhang, Y. Regularized slanted-edge method for measuring the modulation transfer function of imaging systems. *Appl. Opt.* **57**, 6552-6558 (ag. de 2018).
77. Leach, R., Giusca, C., Rickens, K., Riemer, O. & Rubert, P. Development of material measures for performance verifying surface topography measuring instruments. *Surface Topography: Metrology and Properties* **2**, 025002 (març de 2014).
78. ISO 25178-70:2014. Geometrical product Specification (GPS) Surface texture: Areal, Part 70: Material measures. *International Organization for Standardization*, Geneva, CH (2014).
79. ISO 5436-1:2000. Geometrical product Specification (GPS) Surface texture: Profile method; Measurement Standards - Part 1: Material measures. *International Organization for Standardization*, Geneva, CH (2000).
80. Haitjema, H. & Leach, R. a *CIRP Encyclopedia of Production Engineering* 1-5 (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018).
81. Giusca, C. & Leach, R. *Calibration of stylus instruments for areal surface texture measurement* (NPL, gen. de 2013).
82. ISO 25178-600:2010. Geometrical product Specification (GPS) Surface texture: Areal, Part 600: Metrological characteristics for areal-topography measuring methods. *International Organization for Standardization*, Geneva, CH (2010).
83. Jones, C. W., Sun, W., Boulter, H. & Brown, S. 3D roughness standard for performance verification of topography instruments for additively-manufactured surface inspection. *Measurement Science and Technology* **33**, 084003 (maig de 2022).
84. Fay, M. F., de Lega, X. C. & de Groot, P. *Measuring High-Slope and Super-Smooth Optics with High-Dynamic-Range Coherence Scanning Interferometry a Classical Optics 2014* (Optica Publishing Group, 2014), OW1B.3.
85. Park, J., Brady, D. J., Zheng, G., Tian, L. & Gao, L. Review of bio-optical imaging systems with a high space-bandwidth product. *Advanced Photonics* **3**, 044001 (2021).
86. Zhang, Y. & Gross, H. *Advanced Optical Technologies* **8**, 313-347 (2019).
87. Zhang, Y. & Gross, H. *Advanced Optical Technologies* **8**, 349-384 (2019).

88. Zhang, Y. & Gross, H. Systematic design of microscope objectives. Part I/II/III. *Advanced Optical Technologies* **8**, 385-402 (2019).
89. Zuo, C. *et al.* Deep learning in optical metrology: a review. *Light: Science & Applications* **11**, 39. ISSN: 2047-7538 (febr. de 2022).
90. Chen, B. C. *et al.* Lattice Light Sheet Microscopy: Imaging Molecules to Embryos at High Spatiotemporal Resolution. *Science* **346**, 1257998 (oct. de 2014).
91. Ebayyeh, A. A. R. M. A. & Mousavi, A. A Review and Analysis of Automatic Optical Inspection and Quality Monitoring Methods in Electronics Industry. *IEEE Access* **8**, 183192-183271 (2020).
92. Marrugo, A., Gao, F. & Zhang, S. State-of-the-art active optical techniques for three-dimensional surface metrology: a review [Invited]. *Journal of the Optical Society of America A* **37**, B60-B77 (jul. de 2020).
93. Ji, N., Freeman, J. & Smith, S. Technologies for imaging neural activity in large volumes. *Nature Neuroscience* **19**, 1154-1164 (ag. de 2016).
94. Contributions of holography to the advancement of interferometric measurements of surface topography. *Light: Advanced Manufacturing* **3**, 258. ISSN: 2689-9620 (2022).
95. Cheng, A., Gonçalves, J. T., Golshani, P., Arisaka, K. & Portera-Cailliau, C. Simultaneous two-photon calcium imaging at different depths with spatiotemporal multiplexing. *Nature methods* **8**, 139-42 (febr. de 2011).
96. Abrahamsson, S. *et al.* Fast multicolor 3D imaging using aberration-corrected multifocus microscopy. *Nature methods* **10**, 60-63 (des. de 2012).
97. Beaulieu, D., Davison, I., Kılıç, K., Bifano, T. & Mertz, J. Simultaneous multiplane imaging with reverberation two-photon microscopy. *Nature Methods* **17**, 1-4 (març de 2020).
98. He, H. *et al.* Tomographic-encoded multiphoton microscopy. *bioRxiv* (2022).
99. Zunino, A. *et al.* Multiplane Encoded Light-Sheet Microscopy for Enhanced 3D Imaging. *ACS Photonics* **8**, 3385-3393 (nov. de 2021).
100. Ren, Y. *et al.* Parallelized volumetric fluorescence microscopy with a reconfigurable coded incoherent light-sheet array. *Light: Science & Applications* **9**, 8 (gen. de 2020).
101. Martinez-Corral, M. & Javidi, B. Fundamentals of 3D imaging and displays: A tutorial on integral imaging, light-field, and plenoptic systems. *Advances in Optics and Photonics* **10**, 512 (set. de 2018).
102. Nadella, K. *et al.* Random-access scanning microscopy for 3D imaging in awake behaving animals. *Nature Methods* **13**, 1001-1004 (oct. de 2016).
103. Zammit, P., Harvey, A. & Carles, G. Extended depth-of-field imaging and ranging in a snapshot. *Optica* **1**, 209-216 (oct. de 2014).
104. Martinez, P., Bermudez, C., Artigas, R. & Carles, G. Single-shot optical surface profiling using extended depth of field 3D microscopy. *Opt. Express* **30**, 34328-34342 (set. de 2022).
105. Edgar, M., Gibson, G. & Padgett, M. Principles and prospects for single-pixel imaging. *Nature Photonics* **13**, 13-20 (des. de 2018).
106. Gao, L., Liang, J., Lin, L. & Wang, L. Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second. *Nature* **516**, 74-7 (des. de 2014).

107. Kuthirummal, S., Nagahara, H., Zhou, C. & Nayar, S. K. Flexible Depth of Field Photography. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **33**, 58-71 (2011).
108. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L. & Stein, C. *Introduction to Algorithms, Third Edition* 3rd. ISBN: 0262033844 (The MIT Press, 2009).
109. Artigas, R. a (ed. Leach, R.) cap. Imaging Confocal Microscopy (Springer Berlin Heidelberg, 2011).
110. Knuth, D. *The art of computer programming* (Addison-Wesley, 1997).
111. Zhang, Q., Su, X., Xiang, L. & Sun, X. 3-D shape measurement based on complementary Gray-code light. *Optics and Lasers in Engineering - OPT LASER ENG* **50** (abr. de 2012).
112. Bermudez, C. *et al. Residual flatness error correction in three-dimensional imaging confocal microscopes a Optical Micro- and Nanometrology VII* (ed. Gorecki, C., Asundi, A. K. & Osten, W.) **10678** (SPIE, 2018), 106780M.
113. Brauns, E., Morsbach, E., Kunz, S., Bäumer, M. & Lang, W. Temperature Modulation of a Catalytic Gas Sensor. *Sensors (Basel, Switzerland)* **14**, 20372-81 (nov. de 2014).
114. Cerdà, J. *et al. High-temperature low-power performing micromachined suspended micro-hotplate for gas sensing applications. Sensors and Actuators B: Chemical* **114**, 826-835 (abr. de 2006).
115. Herráez, M. A., Burton, D. R., Lalor, M. J. & Gdeisat, M. A. Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path. *Appl. Opt.* **41**, 7437-7444 (des. de 2002).
116. Reich, C., Ritter, R. & Thesing, J. *White light heterodyne principle for 3D-measurement a Sensors, Sensor Systems, and Sensor Data Processing* (ed. Loffeld, O.) **3100** (SPIE, 1997), 236-244.
117. Houairi, K. & Cassaing, F. Two-wavelength interferometry: extended range and accurate optical path difference analytical estimator. *J. Opt. Soc. Am. A* **26**, 2503-2511 (des. de 2009).
118. Collett, E. *Field Guide to Polarization* ISBN: 9780819458681 (SPIE Press, 2005).

Apèndix A

A.1. Demostració de l'equació 4.6

Comencem amb:

$$S_j(x, y) = G_{\sigma_b} \left\{ \left| \int_{z_{min}}^{z_{max}} K(x, y, z_s - z) M_j(z) dz \right| \right\} \quad (\text{A.1})$$

On s'ha definit:

$$K(x, y, z) = L(x, y) * [r(x, y) \cdot L(x, y)] * PSF(x, y, z - z_s) \quad (\text{A.2})$$

On r i L són la reflectivitat i el patró de llum projectat a la mostra, i $L(x, y)$ és l'operador *Laplacian-of-Gaussian* que implementa el filtre Gaussià i l'operador Laplacià inclosos en l'equació 4.3. L'operador $*$ denota convolució en el pla (x, y) .

Degut a l'operador Laplacià, la magnitud de K decau ràpidament amb z . Això passa perquè el desenfocament incrementa, i la PSF es torna més ample, de manera que redueix l'*output* de l'operador. Es pot assumir que $|K|$ és 0 quan $z < z_{min}$ i quan $z > z_{max}$, i per tant els límits d'integració de l'equació A.1 es poden estendre. Això permet considerar aquesta integral com una convolució en la direcció axial i per tant es pot fer servir el teorema de la convolució per arribar a:

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(x, y, z_s - z) M_j(z) dz = (M_j \star K)(x, y) \quad (\text{A.3})$$

$$= \mathcal{F}^{-1} \{ \tilde{K}(x, y, \xi) \cdot \tilde{M}_j(\xi) \} \quad (\text{A.4})$$

On $\star$ és una convolució 1D en l'eix z i:

$$\tilde{K}(x, y, \xi) = \mathcal{F} \{ K(x, y, z) \} \quad (\text{A.5})$$

$$\tilde{M}_j(\xi) = \mathcal{F} \{ M_j(z) \} \quad (\text{A.6})$$

$\mathcal{F}$ denota la transformada de Fourier a través de la variable z i $\mathcal{F}^{-1}$ la seva inversa. Per una banda, si $M_j(z) = 1$ llavors,

$$S_j(x, y) = G_{\sigma_b} \left\{ \left| \int_{z_{min}}^{z_{max}} K(x, y, z_s - z) dz \right| \right\} \quad (\text{A.7})$$

$$= G_{\sigma_b} \{ \mathcal{F}^{-1} [\tilde{K}(x, y, \xi) \cdot \delta(\xi)] \} \quad (\text{A.8})$$

$$= G_{\sigma_b} \{ | \tilde{K}(x, y, 0) | \} \quad (\text{A.9})$$

$$= S_{max}(x, y) \quad (\text{A.10})$$

On δ és la funció delta de Dirac i $S_{max}(x, y)$ és definida com a tal.

Per altra banda, si $M_j(z) = \cos(2\pi f z)$ llavors,

$$S_j(x, y) = G_{\sigma_b} \left\{ \left| \mathcal{F}^{-1} \left\{ \tilde{K}(x, y, \xi) \cdot \left(\frac{1}{2} \delta(\xi - f) + \frac{1}{2} \delta(\xi + f) \right) \right\} \right| \right\} \quad (\text{A.11})$$

$$= G_{\sigma_b} \{ |\tilde{K}(x, y, f) \cdot \cos(2\pi f z_s)| \} \quad (\text{A.12})$$

On s'ha explotat que $\tilde{K}(x, y, -f) = \tilde{K}(x, y, f)$ perquè $K(x, y, z)$ té un valor real. Aquest resultat indica l'*output* és una funció cosinus amb una modulació atenuada, que és un resultat predictable per un sistema lineal amb una freqüència pura com a *input*. En altres paraules, la convolució d'una funció cosinus és també una funció cosinus però amb una reducció de la modulació. La reducció de la modulació és:

$$m = \frac{|\tilde{K}(x, y, f)|}{\tilde{K}(x, y, 0)} \quad (\text{A.13})$$

Finalment, ajuntant els dos resultats tenim:

$$S_j(x, y) = G_{\sigma_b} \left\{ \left| \frac{1}{2} \tilde{K}(x, y, 0) + \frac{1}{2} \tilde{K}(x, y, \frac{2\pi}{T}) \cos\left(\frac{2\pi}{T} z_s + \delta_j\right) \right| \right\} \quad (\text{A.14})$$

$$= G_{\sigma_b} \left\{ \left| \frac{1}{2} \tilde{K}(x, y, 0) \left(1 + m \cos\left(\frac{2\pi}{T} z_s + \delta_j\right) \right) \right| \right\} \quad (\text{A.15})$$

$$= G_{\sigma_b} \{ |\tilde{K}(x, y, 0)| \left\{ \frac{1 + m \cos\left(\frac{2\pi}{T} z_s + \delta_j\right)}{2} \right\} \} \quad (\text{A.16})$$

$$= S_{max}(x, y) \frac{1 + m \cos\left(\frac{2\pi}{T} z_s + \delta_j\right)}{2} \quad (\text{A.17})$$

Com a comentari final, si $K(x, y, z \neq z_s) = 0$, aproximant-se a una delta de Dirac, s'aproparia al límit on no hi ha reducció de contrast, amb $m = 1 \forall \xi$, el que correspondria amb un sistema òptic d'imatge amb una profunditat de camp infinitament petita. Per a sistemes òptics realistes, amb una profunditat de camp finita, la funció de transferència a $\xi = \omega > 0$ ha de ser necessàriament $m < 1$.

Finalment, si la $PSF(x, y, z)$ és axialment simètrica, llavors també ho és $K(x, y, z)$. Per tant, $\arg\{\tilde{K}(x, y, \omega)\} = 0$, fet que ja s'havia assumit prèviament. Si la $PSF(x, y, z)$ no fos simètrica, simplement afegiria un *offset* de fase a l'equació 4.6.

A.2. Demostració de l'augment del contrast amb una modulació de polsos

Primer, definim la modulació polsada amb un període T , amplitud A i un *duty cycle* d . En segon lloc, definim la modulació sinusoidal amb període T , amplitud A i un *offset* M . Es poden veure les dos modulacions a la Figura A.1.

La senyal que s'adquireix de cada imatge amb una modulació M la recuperem de l'equació A.3:

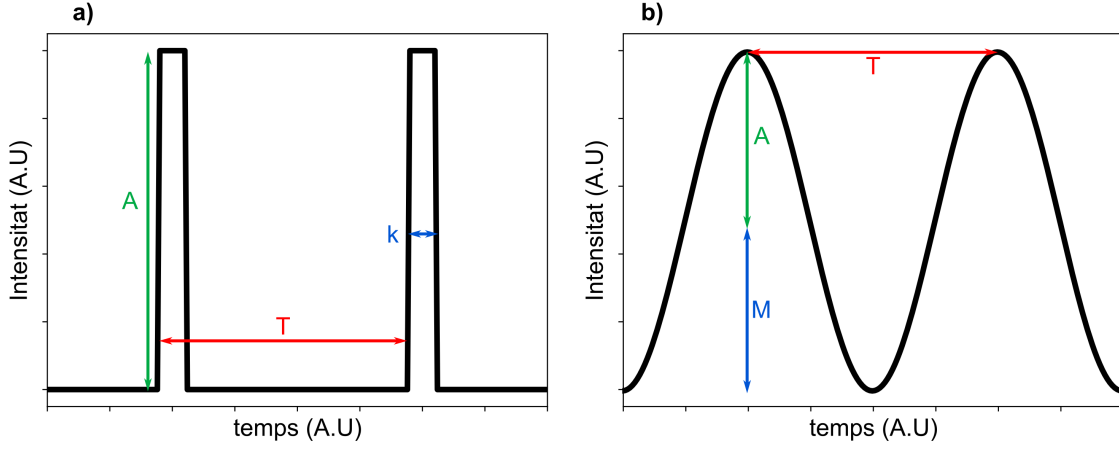


FIGURA A.1: a) Modulació pulsada amb període T , amplitud A i *duty cycle* d de $\frac{k}{T}$. Modulació sinusoidal amb període T , amplitud A i un *offset* M .

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(x, y, z_s - z) M_j(z) dz = (M_j \star K)(x, y) \quad (\text{A.18})$$

$$= \mathcal{F}^{-1}\{\tilde{K}(x, y, \xi) \cdot \tilde{M}_j(\xi)\} \quad (\text{A.19})$$

Veiem que la senyal depèn de la PSF ($\tilde{K}(x, y, \xi)$) i de la modulació ($\tilde{M}_j(\xi)$). La PSF és intrínseca del sistema òptic i per tant no es pot modificar. En canvi, sí que podem modificar la modulació per tal d'obtenir una millor senyal. Com que les modulacions són periòdiques amb el temps, es poden representar amb una sèrie de Fourier:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \quad (\text{A.20})$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad (\text{A.21})$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad (\text{A.22})$$

En el cas de la modulació de la Figura A.1 b), com que és una senyal sinusoidal, la sèrie de Fourier només té dos components. Obtenim per cadascun:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} (M + A \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)) dt = M \quad (\text{A.23})$$

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} (M + A \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)) \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) dt = A \quad (\text{A.24})$$

A més, en particular per aquesta cas tots dos coeficients prenen el mateix valor $A = M = \frac{1}{2}$.

Pel cas de la modulació de la Figura A.1 a), podem assumir que és una funció parell sense pèrdua de generalitat i per tant els coeficients b_n són tots 0. Pel coeficient a_0 obtenim:

$$a_0 = \frac{A}{T} \int_{-\frac{k}{2}}^{\frac{k}{2}} dt = A \frac{k}{T} = A \cdot d \quad (\text{A.25})$$

I pels coeficients a_n :

$$a_n = A \frac{2}{T} \int_{-\frac{k}{2}}^{\frac{k}{2}} \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt = \frac{A}{n\pi} \sin(2\pi n d) \quad (\text{A.26})$$

Si el *duty cycle* és petit, és a dir, són polsos estrets en el temps, podem aproximar els coeficients a:

$$a_n = \frac{A}{n\pi} (2\pi n d) = 2A \cdot d \quad (\text{A.27})$$

Veiem que pel primer coeficient a_0 , com que es troba centrat en la posició 0 no s'atenuarà, ja que $\tilde{K}(x, y, 0)$ és igual a 1. Per altra banda, $\tilde{K}(x, y, f)$ sí que serà menor que 1, i per tant s'atenuarà, de manera que la senyal recuperada serà una sinusoide però amb una pèrdua de contrast. En canvi, amb la modulació polsada, com que el coeficient a_1 és el doble que el a_0 , quan s'atenuï acabarà resultant a un valor similar que a_0 i per tant hi haurà una menor pèrdua de contrast.

Com a aproximació, podem assumir un sistema òptic amb una MTF en l'eix axial que segueixi una funció triangular i una freqüència de tall espacial f . Llavors si la modulació polsada té una freqüència $f/2$, l'atenuació per a_1 és 1/2, de manera que es compensa l'atenuació a la perfecció. A més, com que tots els harmònics tenen freqüències superiors a la freqüència de tall del sistema òptic, són completament eliminats.

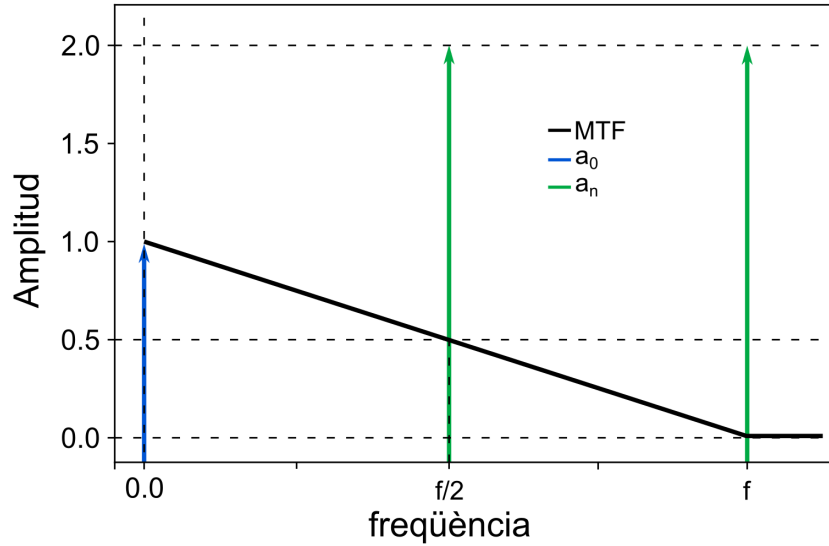


FIGURA A.2: Amplitud en l'espai de Fourier de la il·luminació polsada i MTF del sistema òptic.

