



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

**ROL DELS PARÀMETRES D'IMPRESSIÓ 3D SOBRE LA
QUALITAT DE COMPONENTS D'ACER INOXIDABLE D'ALTA
FUNCIONALITAT**



Memòria i Annexos

Autor: David Domeque Macías
Director: Pere Barriobero Vila
Co-director: Felip Fenollosa
Convocatòria: Setembre 2023



Resum

Aquest treball analitza l'afectació del paràmetre alçada de capa a través de l'estudi de densitats i l'evolució de porositats superficials de cubs de calibratge d'acer inoxidable 316L fabricats amb el mètode FFF (Fused Filament Fabrication). També, s'han imprès i s'han assajat provetes a tracció per caracteritzar el comportament mecànic. Els resultats mostren que els cubs amb alçades de capa de 0,05 mm i de 0,15 mm tenen major densitat i per tant menor porositat que els cubs de 0,1 mm. A més, la mida de porus predominant en totes les mostres és d'entre 2 i 5 μm . No s'ha trobat una correlació ni semblança de les porositats analitzades dels cubs al llarg de les àrees analitzades al llarg de l'eix X que demostrï una homogeneïtat de porus en totes les mostres. S'han assajat provetes de tracció impreses en el pla XY, la resistència a tracció obtinguda ha estat de 487,26 MPa amb una deformació del 52%.

Resumen

Este trabajo analiza la afectación del parámetro altura de capa a través del estudio de densidades y la evolución de porosidades superficiales de cubos de calibración con acero inoxidable 316L fabricados con el método FFF (Fused Filament Fabrication). También, se han imprimido y ensayado probetas de tracción para caracterizar el comportamiento mecánico. Los resultados muestran que los cubos con alturas de capa de 0,05 mm y de 0,15 mm tienen una mayor densidad y por tanto menor porosidad que los cubos de 0,1 mm. Además, el tamaño de poros predominante en todas las muestras es de entre 2 y 5 μm . No se ha encontrado una correlación ni semejanza de las porosidades analizadas de los cubos a lo largo de las áreas analizadas a lo largo del eje X que demuestre una homogeneidad de poro en todas las muestras. Se han ensayado probetas de tracción en el plano XY, la resistencia a tracción obtenida ha sido de 487,26 MPa con una deformación del 52% de la pieza.

Abstract

This work analyses the effect of the layer height parameter through the study of densities and the evolution of surface porosities of 316L stainless steel calibration cubes manufactured with the FFF (Fused Filament Fabrication) method. Also, tensile specimens have been printed and tested to characterize the mechanical behaviour. The results show how cubes with layer heights of 0.05 mm and 0.15 mm have a higher density and lower surface porosity than 0.1 mm cubes. Furthermore, the predominant pore size in all samples is between 2 and 5 μm . No correlation or similarity of the analysed porosities of the cubes along the analysed areas along the X-axis has been found to demonstrate pore homogeneity throughout the samples. Tensile specimens were tested in the XY plane, the tensile strength obtained was 487.26 MPa with a deformation of 52%.



Agraïments

Agraïr al Marc i a l'Enrique per ajudar-me i aconsellar-me amb les impressions i amb els assajos. Agraïr a la meva família, per encoratjar-me en cadascuna de les etapes d'aquest projecte.



Glossari

EEBE – Escola de Enginyeria de Barcelona Est

UPC – Universitat Politècnica de Catalunya

RepRap – Replicating Rapid-prototyper

TFG – Treball de Fi de Grau

AM – Additive Manufacturing

FFF – Fused Filament Fabrication

FDM – Fused Deposition Modeling

VPP -- Fotopolimerització

PBF – Powder Bed Fusion

MEX -- Material Extrusion

MJT – Material Jetting

BJT – Binder Jetting

SHL – Sheet Lamination

DED -- Directed Energy Deposition

Ra – Duresa mitja

DMLS – Direct Metal Laser Sintering

SLS – Selective Laser Sintering

SLM – Selective Laser Melting

EBM – Electron Beam Melting

UTS – Ultimate Tensile Strenght

D&S – Debinding i sintering



MIM – Metal Molding Injection



Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	V
GLOSSARI	VII
1. PREFACI	1
Motivació	1
2. INTRODUCCIÓ	3
2.1. Objectius del treball.....	3
2.2. Abast del treball.....	3
3. ESTAT DE L'ART	5
3.1. Antecedents.....	5
3.1.1. FDM o FFF	8
3.1.2. Fabricació additiva de metalls	9
3.1.3. Problemes del Fused Deposition Modeling (FDM)	11
3.1.4. Composició de l'acer inoxidable 316L	11
3.1.5. Densitat i porositat.....	12
3.1.6. Comportament mecànic.....	12
3.1.7. Rugositat superficial.....	14
4. METODOLOGIA	15
4.1. Tècniques de fabricació	15
4.2. Fused Filament Fabrication	16
4.2.1. Posada en marxa impressora.....	16
4.2.2. Preparació cubs.....	16
4.3. Tècniques de caracterització	19
4.3.1. Dimensionament.....	19
4.3.2. Assaig d'Arquímedes.....	19
4.3.3. Preparació de les mostres.....	22
4.3.4. Assaig de tracció.....	28
5. RESULTATS	30

5.1.	Dimensions.....	30
5.2.	Contraccions.....	31
5.3.	Densitats.....	33
5.4.	Fotografia microscòpica.....	33
5.4.1.	1-0,05-6,3.....	34
5.4.2.	2-0,05-9,75.....	35
5.4.3.	3-0,05-9,7.....	36
5.5.	Porositat superficial dels cubs	38
5.6.	Dimensions dels porus.....	41
5.7.	Assaig de Tracció	43
5.7.1.	Primera proveta impresa en el pla XY	43
5.7.2.	Segona proveta impresa en el pla XY	43
6.	DISCUSSIÓ DE RESULTATS	44
6.1.	Dimensions.....	44
6.2.	Contraccions.....	45
6.3.	Densitats.....	46
6.4.	Fotografia microscòpica.....	47
6.5.	Porositat superficial dels cubs	48
6.6.	Dimensions dels porus.....	49
6.7.	Assaig de tracció.....	50
7.	ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	51
	CONCLUSIONS	53
	PRESSUPOST I/O ANÀLISI ECONÒMICA	55
	BIBLIOGRAFIA	57
	ANNEX	69
A1.	Estratègies dels paràmetres d'impressió	69
A2.	Fotografia microscòpica.....	73
A3.	Dimensions dels porus.....	105

1. Prefaci

Motivació

Vaig descobrir el sector de l'AM ("additive manufacturing") o fabricació additiva a través de dues assignatures que van ser impartides a la UPC (Universitat Politècnica de Catalunya). Fabricació i fabricació additiva van ser dues assignatures les quals em van despertar ganes de conèixer més el sector, ja que donaven pinzellades sobre la parametrització i les propietats dels materials a l'hora de les impressions, però no aprofundien en el contingut.

A més, durant el període en el que estava inscrit en aquestes assignatures, es va trencar a casa un suport del qual no hi havia peces de recanvi. Se'm va ocórrer dissenyar la peça i enviar-la a fabricar a l'associació FABLAB. El procés va ser tan divertit i enriquidor que a l'acabar totes les assignatures estava determinat a realitzar un TFG (treball de fi de grau) focalitzat en l'estudi de la impressió 3D.

2. Introducció

En aquest apartat s'informarà dels objectius i abast del projecte. En el 3r apartat del treball s'explicaran els estudis previs i el que se sap del mètode d'impressió FFF i del material Ultrafuse 316L.. En el 4t apartat s'explicarà la metodologia dels assajos i el procediment seguit per a l'obtenció de les peces. Es tractaran els resultats dels assajos en 5è i 6è apartat i es finalitzarà amb les conclusions del projecte. També, es realitzarà un petit estudi de l'impacte ambiental del treball i del cost del projecte.

2.1. Objectius del treball

Els objectius del treball són els següents:

- 1- Justificar quin dels valors del paràmetre alçada de capa (0,05 mm, 0,1 mm, 0,15 mm) és el més òptim analitzant la densitat i la porositat superficial dels cubs impresos amb el material Ultrafuse 316L.
- 2- Caracteritzar les provetes de tracció impreses amb el material Ultrafuse 316L en diferents plans i comparar els resultats per demostrar la importància de les impressions variant l'orientació d'una peça.

2.2. Abast del treball

Les peces estan fabricades variant només el paràmetre alçada de capa i deixant la resta de paràmetres predeterminats per el programa de forma invariable. Hi ha tres models de peces amb alçades de capes diferents (0,05 mm, 0,1 mm i 0,15 mm). Aquestes mostres s'han caracteritzat per trobar quin valor del paràmetre alçada de capa és el més adequat.

3. Estat de l'art

Cada dia els processos per AM estan sent implementats en més sectors. S'estan utilitzant aquests processos en indústries com l'automobilística [1], l'aeroespacial [2] i la medicina [3][4] entre d'altres [1] [5]. El sector de la impressió 3D va esclatar amb el projecte RepRap (Replicating Rapid-prototyper), nascut el 2007. El projecte va permetre obrir les portes a la fabricació 3D des de casa [6] seguint un principi simple, però extremadament útil: la fabricació d'impressores 3D imprimint certs components amb altres impressores 3D.

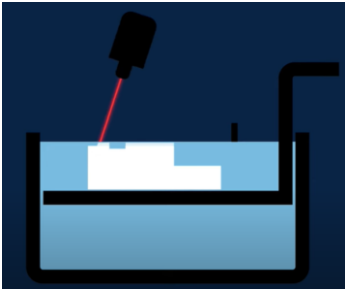
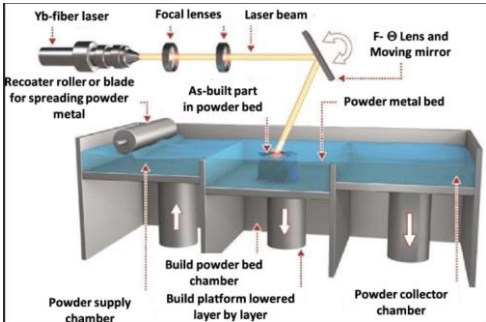
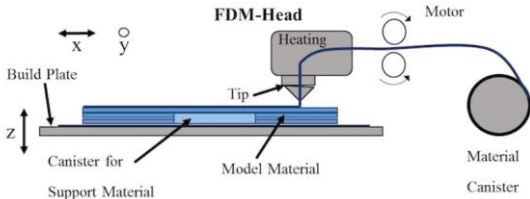
La fabricació additiva va començar amb el doctor Hideo Kodama, a principis dels anys 80, creador de la idea de "dispositiu de prototipat ràpid". Charles Hull, cap a finals dels 80, va crear la primera màquina de prototipat en 3D, amb el nom de "Stereolithography Apparatus" (SLA), utilitzant el principi de la solidificació de materials mitjançant làsers d'alta energia. El 1991, Scott Crump va desenvolupar la tècnica "Fused Deposition Modeling" o FDM i fundà la empresa Stratasys. Es va utilitzar polímers per al desenvolupament d'aquesta tècnica. A partir d'aquest moment, es van anar creant diferents mètodes i tècniques de fabricació mitjançant l'adició de material. A principis dels 90, Ely Sachs i els seus companys van crear el "Binder Jetting" i Carl Deckard desenvolupà el "Direct Metal Laser Sintering" o DMLS, sent una extensió de l'ara conegut "Selective Laser Sintering" (SLS) [7][8].

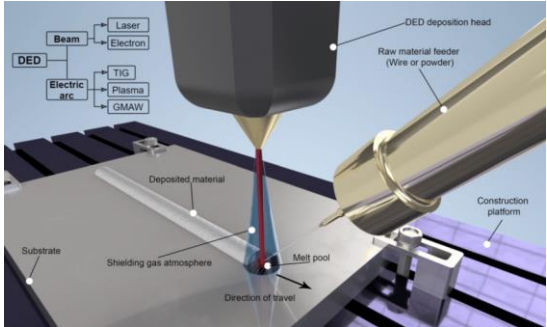

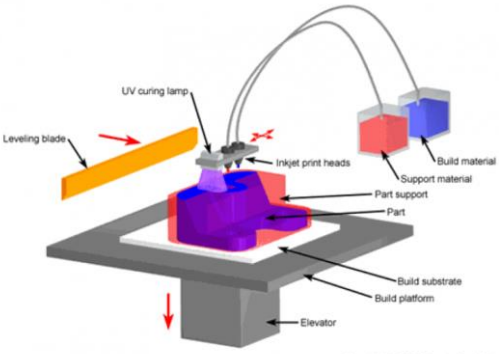
3.1. Antecedents

A dia d'avui, hi ha molta literatura sobre els diferents processos d'AM. En total, l'AM està dividida en 7 categories: VPP o Fotopolimerització, PBF o "Powder Bed Fusion", MEX o Extrusió de Materials, MJT o "Material Jetting, BJT o "Binder Jetting", SHL o "Sheet Lamination" i DED o "Directed Energy Deposition" [1].

Tots aquests processos, normalment segueixen les mateixes etapes abans de l'obtenció de la peça final, 1. Generació del model en 3D, 2. Conversió a arxiu STL, 3. Transferència de l'arxiu a la màquina AM, 4. Posada en marxa de la màquina, 5. Fabricació del model a la màquina, 6. Extracció de la peça de la màquina, 7. Post processat de la peça, 8. Utilització de la peça per les aplicacions desitjades [1].

Taula 1: Processos AM i la seva metodologia. Font [9]

Processos AM	Metodologia del procés
<p>Vat Photo-polymerization</p>	<p>Les resines (fotopolímers) són endurides per rajos de llum d'una específica longitud d'ona.</p>  <p><i>figura 1: Vat Photo-polymerization. Font: [69]</i></p>
<p>Powder Bed Fusion (PBF)</p>	<p>L'energia s'utilitza per fusionar el material en pols que s'ha estès amb una fina capa utilitzant agents de fusió.</p>  <p><i>figura 2: PBF. Font [70]</i></p>
<p>Material Extrusion (ME)</p>	<p>El material fos s'extrudeix amb precisió a través d'un filtre</p>  <p><i>figura 3: Impressió 3D (ME). Font [71]</i></p>

<p>Directed Energy Deposition (DED)</p>	<p>Material en pols o filament es fusiona aplicant energia tèrmica procedent, per exemple, d'un làser o d'un feix d'electrons.</p>  <p><i>figura 4: DED. Font [72]</i></p>
<p>Binder Jetting (BJT)</p>	<p>Els estrats de material en pols s'uneixen utilitzant material aglutinant.</p>  <p><i>figura 5: BJT. Font [73]</i></p>
<p>Material Jetting (MJT)</p>	<p>Les gotes de material es polvoritzen amb precisió.</p>  <p><i>figura 6: MJT. Font [74]</i></p>

Sheet Lamination

Les peces es construeixen mitjançant làmines.

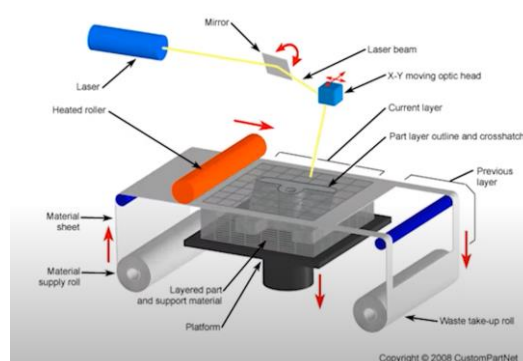


figura 7: Sheet lamination. Font [75]

3.1.1. FDM o FFF

S'utilitzen diferents mètodes en cada procés per arribar a la mateixa finalitat: produir una sèrie de peces amb unes especificacions per a una aplicació concreta. El FFF (Fused Filament Fabrication) o FDM (Fused Deposition Modeling) és un dels tres mètodes utilitzats en el procés MEX [10].

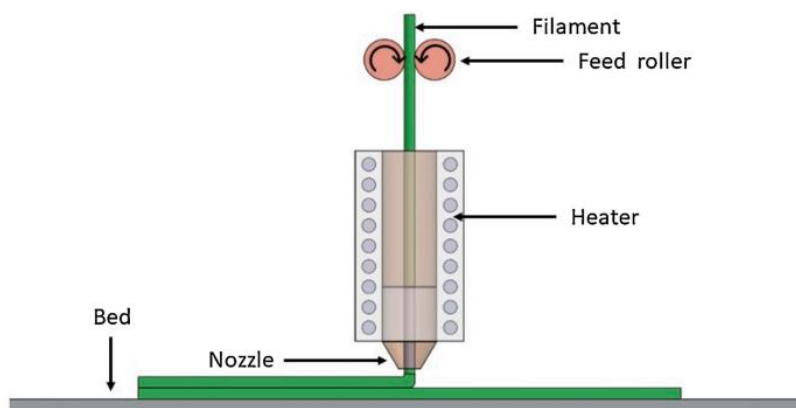


figura 8: Esquema del funcionament d'un FFF. Font [10]

El funcionament del FFF o FDM és simple, s'utilitza un extrusor de rodets que impulsa el material fins al broquet [10]. Del broquet surt el material en forma de filament que es deposita al llit que fa de base per a les impressions. Aquest mètode és el més utilitzat i la majoria de les impressores 3D funcionen d'aquesta manera. A més, aquest és el mètode d'impressió que s'ha utilitzat en aquest projecte.

3.1.2. Fabricació additiva de metalls

Els materials formats per metalls són fabricats utilitzant el procés PBF. Alguns processos de fabricació que es situen dintre d'aquesta categoria són el SLS (Selective Laser Sintering), el SLM (Selective Laser Melting), el EBM (Electron Beam Melting) i el DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Però en els últims anys, degut al baix cost dels FFF [11], s'han estat desenvolupant materials metàl·lics que es puguin imprimir amb aquest mètode [12]. La literatura mostra comportaments mecànics molt satisfactoris, però més pobres si es comparen amb els altres mètodes [13].

Taula 2: Comparació de les propietats mecàniques de diferents materials per els processos FDM, DMLS i SLS per a diferents materials. Font [10]

Propietats mecàniques	Material i procés AM		
	Acer inoxidable (17-4PH)		
	FDM	DMLS	SLS
Límit elàstic (MPa)	800	Horitzontal: 590 Vertical 550	620
Tensió de rotura (MPa)	1050	Horitzontal: 1100 Vertical 980	1100
Allargament fins trencament (%)	5	25 ± 5	16
Densitat (g/cm ³)	--	7,8	--
Densitat relativa (%)	96	100	100
Duresa (HV)	285	428	414
Rugositat superficial(μm)	--	--	Sa = 19,008 Sq = 20,391
Porositat (%)	4,3	0,41	--
Contracció (%)	Longitud:20,3 Espessor: 15,9 Altura: 15,2	--	--
Referències	[60],[61]	[62],[63]	[64],[65]

Propietats mecàniques	Material i procés AM					
	Acer inoxidable (316L)			Titanium alloy (Ti6Al4V)		
	FDM	FDM	SLS	SLS	FDM	SLS
Límit elàstic (MPa)	--	194 ± 19	172,369	Horitzontal: 530 ± 20 Vertical 440 ± 20	--	Horitzontal: 943 ± 40 Vertical: 925 ± 40
Tensió de rotura (MPa)	--	441 ± 27	482,633	Horitzontal: 660 ± 20 Vertical 570 ± 20	--	Horitzontal: 1020 ± 40 Vertical: 1000 ± 40
Allargament fins trencament (%)	--	29,5 ± 3,8	30	Horitzontal: 39 ± 5 Vertical: 49 ± 5	--	Horitzontal: 12 ± 2 Vertical: 12 ± 3
Densitat (g/cm ³)	--	7,63	4,95 - 7,65	8	--	--
Densitat relativa (%)	95	--	--	--	--	--
Duresa (HV)	--	145,2 ± 6,7	140	--	--	Horitzontal: 368 Vertical: 372
Rugositat superficial(μm)	--	--	--	5 - 10	--	Horitzontal: 4-6 Vertical: 4-7
Porositat (%)	8	7,8	4,38 - 38,52	--	10,965	3,662
Contracció (%)	--	17	--	--	--	--
Referències	[29]	[13]	[66],[34]	[22]	--	[22],[67],[68]

Una vegada s’ha imprès una peça amb una impressora 3D, la peça es denomina “Green Part”. A continuació s’hauran de realitzar una sèrie de post processos per a que la peça finalment estigui acabada. En primer lloc, es realitza el “debinding”, on s’elimina l’aglutinant format per diferents polímers. Una vegada el “debinding” està fet, la peça rep el nom de “Brown Part”. A continuació es calenta la peça a temperatures entre 1360 i 1380 °C per acabar d’eliminar els additius restants i deixar només el metall. Aquest mètode es diu sinteritzat [13]. Se li dóna molta importància al post processat de les peces fabricades amb FFF o FDM degut a les contraccions que es pateixen en el sinteritzat. Normalment, les peces pateixen una contracció anisòtropa. En els eixos X i Y la contracció és la mateixa, mentre que en el Z és major. Per aquesta raó s’han de sobredimensionar les peces. Segons [14] el percentatge adequat a l’hora de sobredimensionar els eixos és d’un 19% en X i Y i un 24% en el Z. Tot i així, el sobredimensionament depèn molt de la geometria de cada peça. Per aquesta raó, es recomana provar de fabricar un lot sencer abans de la manufactura en cas que les geometries siguin complexes [14].

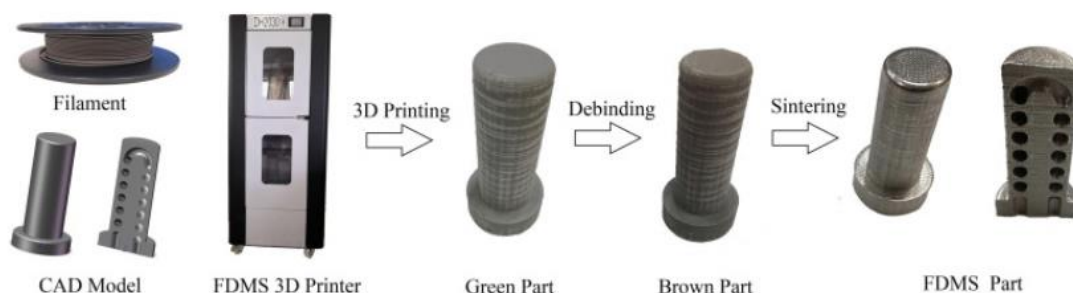


figura 9: Etapes d'un procès FFF o FDM. Font [13]

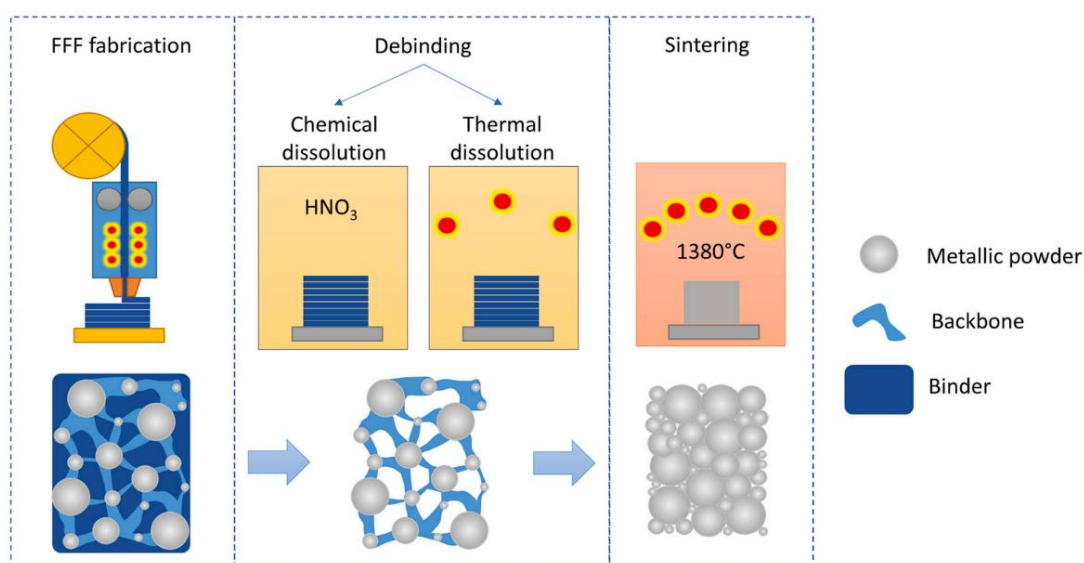


figura 10: Post processat d'una peça fabricada amb una impressora 3D. Font [15]

Per conèixer més informació sobre el post processat , consultar [16].

3.1.3. Problemes del Fused Deposition Modeling (FDM)

Segons [10], el mètode FFF presenta algunes limitacions, com el pobre acabat superficial, la poca precisió dimensional, la baixa resolució i les baixes propietats mecàniques en comparació amb altres mètodes com el SLS o el DMLS, atribuïdes al defecte de l'alta porositat i insuficient compactació i adhesió entre les capes. Com a conseqüència, les peces impreses amb el mètode FDM normalment solen ser anisòtropes.

Es requereix d'un bon post-processat i d'una optimització dels paràmetres per a que els resultats siguin de molt bona qualitat i també hi ha certa dificultat en l'extracció dels suports de l'estructura sense danyar l'estructura principal.

Tot i així, amb la recerca i investigació que s'està fent en aquest camp, la situació està canviant gràcies a les innovacions en materials i refinament de maquinària més precisa.

Per adreçar aquests problemes, en aquest treball es pretén optimitzar el paràmetre d'impressió que s'ha cregut el més important (alçada de capa) per obtenir les majors densitats i menors porositats i obtenir el valor d'alçada de capa més adequat per a les impressions.

3.1.4. Composició de l'acer inoxidable 316L

L'acer inoxidable 316L està format per una matriu polimèrica i un 88wt% de partícules d'acer inoxidable d'entre 30 i 50 µm. La matriu polimèrica (l'aglutinant) està composta de Poliacetal (POM) i d'additius com el polipropilè (PP) entre d'altres, per incrementar la fluïdesa, la termo-estabilitat i la plasticitat del compost [13].

Taula 3: Composició de l'aglutinant [10].

Tipus	Material	Marca	Component principal (50-90%)	Columna vertebral (0-50%)	Additius (0-10%)	Referència
Filament	Acer inoxidable 316L (SS31603)	BASF Ultrafuse 316L	Poliacetal (POM)	Polipropilè (PP) entre altres	-	[13]

Aquest material (316L) té una excel·lent resistència a la corrosió i a agents químics, no és magnètic i ofereix una alta elongació abans del trencament [17][18]. Les aplicacions en les que aquest material està present són el prototipatge, producció en sèrie, fabricació d'eines i d'accessoris entre d'altres [19].

La composició de l'acer inoxidable 316L una vegada sinteritzat es pot veure a la Taula 4.

Taula 4: Composició de l'acer inoxidable 316L després del sinteritzat [20][21].

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Fe
0.03wt%	2wt%	0.045wt%	0.03wt%	0.75wt%	16- 18wt%	10- 14wt%	2- 3wt%	10wt%	52- 59wt%

3.1.5. Densitat i porositat

La densitat i la porositat depenen molt dels paràmetres d'impressió, però no a tots els materials els afecta de la mateixa manera [22][23]. És per aquesta raó que tots els estudis busquen les configuracions òptimes dels paràmetres que més influeixen en les fabricacions. Alguns exemples podrien ser [24][25][26][27][28] entre d'altres.

En [28] es mostra que amb el material 316L i el mètode d'impressió FFF s'aconsegueixen valors del 89,6% de densitat relativa i un rang de porositat que va del 2,32% fins al 4,12% amb alçades de capa entre 0,3 i 0,5 mm respectivament. En un altre estudi [9], es van aconseguir valors de 92,9% de densitat relativa amb altura de capa 0,1 mm i orientació plana (XY). Ara bé, s'han aconseguit valors de densitats relatives superiors al 95% segons [29]. Seguint l'estudi [30] es van obtenir densitats relatives de fins a 96% adherint aglutinants. Segons BASF, la densitat obtinguda una vegada s'ha sinteritzat és de 7,850 g/cm³ [20].

En [31], per posar perspectiva, amb l'acer inoxidable 316L i seguint el mètode d'Arquímedes, es va aconseguir una densitat relativa del 99,8% mitjançant la tècnica de fabricació LPBF ("Laser Powder Bed Fusion").

Per últim, la densitat teòrica de l'acer inoxidable 316L, de 8,00 g/cm³, serveix per comparar les densitats dels estudis anteriors i comparar les densitats obtingudes en aquest estudi [32][33][34].

3.1.6. Comportament mecànic

3.1.6.1. Orientació

Els estudis mostren que hi ha una forta dependència entre la resistència a la tracció i el cost de fabricació depenent de l'orientació en que les peces s'imprimeixin [35]. Sent l'orientació plana la més

òptima i la vertical la que menys. [36] informa que hi ha una diferència clara entre l'orientació plana i la vertical, sent el valor de la resistència a tracció plana més de 4 vegades la vertical.

3.1.6.2. Resistència a la tracció

Segons el proveïdor del Ultrafuse 316L [20] la resistència a la tracció d'aquest material és 561 MPa en orientació plana (XY) i 521 MPa en orientació vertical (ZX). L'allargament fins al trencament és 53% i 36% respectivament. Aquests valors són amb les provetes ja sinteritzades.

Tal com es menciona en [36] el valor de resistència a la tracció en orientació plana és de 465 MPa, mentre que en vertical el valor disminueix notablement fins als 100 MPa. En [24] s'informa de valors de resistència a la tracció (XY) i allargament fins al trencament de 513,3 MPa i 59,9% respectivament. A [25] i [37] els valors són de 453 i 521 MPa.

A mode de comparació, en [38] es troba que el valor de resistència a la tracció és de 517 MPa i 50% d'allargament fins al trencament seguint el mètode MIM ("Metal Injection Molding") i 600 MPa amb 28% d'allargament seguint el mètode SLM ("Selective Laser Melting") [39].

En la Taula 5, es comparen els diferents valors de resistència a la tracció i d'allargament fins al trencament de la proveta trobats a la literatura seguint la taula 12 de [24].

Taula 5. Comparació de propietats de diferents mètodes de fabricació additiva.

Mètode utilitzat	Resistència Tracció (MPa)	Allargament a trencament (%)	Referències
FDM + D&S	513,3	59,9	[24]
FDM + D&S	465	31	[36]
FDM + D&S	453	-	[25]
FDM + D&S	500-520	32-37	[40]
FDM + D&S	521	-	[37]
MIM	517	50	[38]
MIM	520	50-60	[41]
MIM	460-560	29-58	[42]
MIM	510	-	[43]
SLM	574	49,6	[44]
SLM	600	28	[39]
SLM	659	16,6	[45]

3.1.7. Rugositat superficial

En [15] s'obtenen models matemàtics que permeten predir valors de Rugositat mitja (Ra). Aquests models prediuen la Ra depenent de l'angle de deposició a l'hora d'imprimir. En concret s'obtenen quatre models matemàtics pels angles de 0° , 45° , 90° i 135° . En la Figura 4 es veuen aquests angles amb les mostres utilitzades a [15].

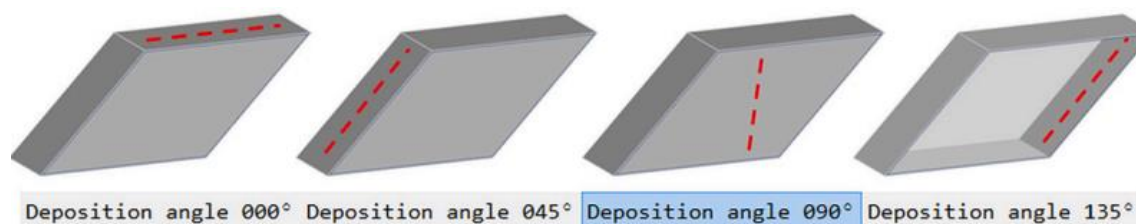


figura 11: Angles de deposició de l'estudi. Font [15]

En [50] s'estudia el comportament dels paràmetres alçada de capa, la densitat de farciment ("Infill ratio") i la velocitat d'impressió. Sent l'alçada de capa el més influent. Seguida de la velocitat d'impressió. La densitat de farciment només pot afectar les propietats mecàniques, ja que modifica la densitat del sòlid que s'estigui imprimint [50].

4. Metodologia

4.1. Tècniques de fabricació

S'han imprès 9 cubs de calibratge, variant el valor alçada de capa. Per mostrar repetibilitat, de cada estratègia s'han imprès tres mostres. És a dir s'han imprès els cubs amb un total de 3 valors d'alçada de capa diferents. El 9è cub es va imprimir amb un patró d'impressió diferent a la resta i al final s'ha eliminat dels resultats per a l'afectació que pugui tenir. S'ha volgut que el dimensionament dels cubs, una vegada sinteritzats, fos de 15 mm en els tres eixos. Seguint amb els percentatges de sobredimensionament de cada eix, comentats a l'apartat 3.1, s'han augmentat les longituds dels cubs un 19% en els eixos X i Y i un 24% en l'eix Z.

Per més informació sobre els paràmetres d'impressió descrits i com afecten a la qualitat de les peces fabricades, consultar [47][48].

Taula 6: Paràmetres utilitzats per a totes les impressions realitzades.

Paràmetres impressió	Unitats	Valor
Hotend	mm	0,4
Velocitat de retracció	mm/s	35
Distància de retracció	mm	5
Velocitat extrusor	mm/s	30
Flow	%	100
Temperatura impressió	°C	245
Temperatura llit	°C	105
Densitat de farciment	%	100
Patró de farciment	-	Concèntric
Sobredimensionament (x, y)	%	19
Sobredimensionament (z)	%	24

Taula 7: Estratègies d'impressió

Paràmetre impressió	Unitats	1a estratègia	2a estratègia	3a estratègia
Alçada de cada	mm	0,05	0,1	0,15

4.2. Fused Filament Fabrication

El FFF o FDM és la tècnica de fabricació que s'ha seguit en aquest treball degut als potencials efectes positius en el sector com el baix cost de fabricació de les peces en comparació amb altres mètodes com el SLS o el DMLS.

4.2.1. Posada en marxa impressora

Per preparar la impressora s'ha de netejar el llit per si hi ha restes de impressions anteriors i a més, habitualment es realitza una cal·libració del llit. La impressora Epsilon W27 calibra el llit sense intervenció humana. Una vegada fet aquests passos previs, es pot procedir amb la fabricació de les peces.

4.2.2. Preparació cubs

En primer lloc, el que s'ha de fer és dissenyar els cubs i a continuació guardar l'arxiu en format .stl, ja que és el format que utilitzen les impressores per llegir les peces [49]. També es pot buscar per internet la peça en .stl. Com la mostra és un cub de calibratge i no una peça a mida, a la pàgina web thingiverse.com s'ha trobat un model de 20 mm en els 3 eixos [50] (no s'ha trobat un cub amb 15 mm en XYZ).

Tot seguit, amb el programari BCN3D Stratos s'han configurat els paràmetres amb els valors vistos en les Taules 6 i 7. A més, s'han ajustat les dimensions del cub tenint en compte el sobredimensionament degut a les contraccions que ha sofert en la peça en el post procés. Com les dimensions del cub, en una primera instància, eren de 20 mm, s'han ajustat els valors dels eixos amb la escala desitjada. Com es pot veure en la Figura 5b les dimensions finals de la "Green Part" hauran de ser 17,85 mm en X i Y, mentre que en Z serà de 18,6 mm.

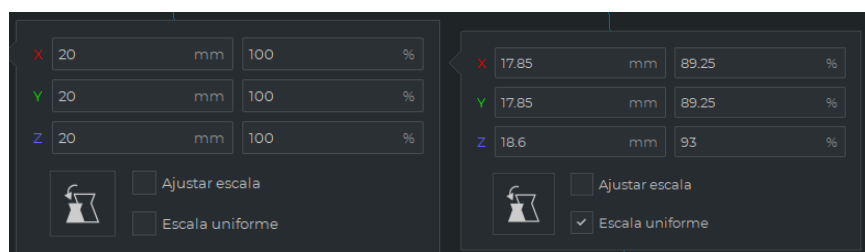


figura 12a,12b: Dimensions del cub desitjat, dimensions del cub a l'hora d'imprimir-lo. Font: Pròpia

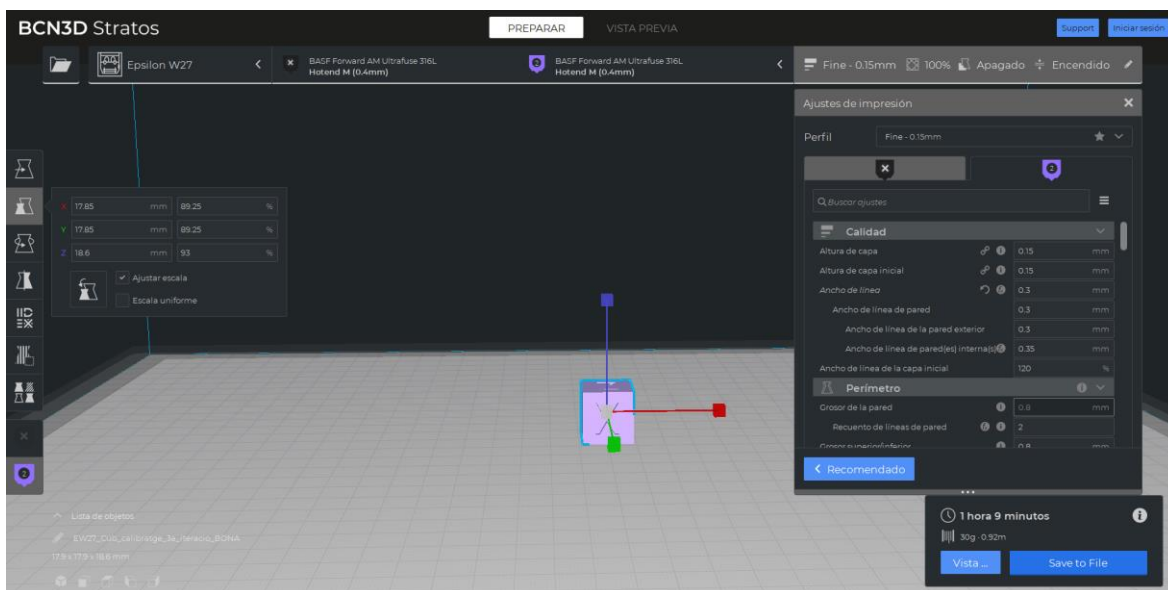


figura 13: Interfície del BCN3D Stratos. Font: Pròpia

Una vegada s’han configurat tots els valors en el programa, és necessari generar un gcode, llenguatge que utilitzen les impressores 3D, i guardar l’arxiu en una microSD. Aquesta microSD s’insereix en la impressora i es selecciona el gcode per començar a imprimir. Abans d’imprimir, és necessari enganxar un aglutinant en la superfície del llit per tal que les primeres capes estiguin més adherides al llit en cas de patir contraccions degudes a la diferència de temperatures entre l’extrusor i el llit.

El temps d'impressió que mostra el programa amb les diferents alçades de capa es mostra en la Taula 8.

Taula 8: Duració de les impressions depenent de l'alçada de capa

Estratègies	Temps d'impressió*
0,05 mm	3 h 18 min
0,10 mm	1 h 42 min
0,15 mm	1 h 09 min

* Els temps que dona el programa són estimatius. S’ha vist que el rang de temps està en ± 10 min el estimat per Stratos.

Per agilitzar el procés, es va disposar de dues impressores Epsilon W27. Per una banda, la 1a i 2a estratègia van ser impreses en la mateixa màquina, on el hotend estava situat al capçal de l’esquerra.

Per l'altra banda, la 3a estratègia es va imprimir amb l'altra màquina disponible. Aquesta impressora tenia el hotend localitzat en el capçal de la dreta.



figura 14: Hotend utilitzat amb la Epsilon W27. Font: Pròpia

Els primers minuts són crucials per a que la impressió sigui satisfactòria. Per tant, en els primers 5-10 minuts s'ha de donar un cop d'ull per si les primeres capes s'imprimeixen bé i estan ben adherides al llit, ja que la diferència de temperatures des de l'extrusor fins al llit és de 140°C (extrusor a 245°C i llit a 105°C) i el material pot patir contraccions i deformar-se.

Una vegada tenim les impressions de tots els cubs, el següent pas és enviar-ho al post-processat, on es realitza el "debinding" i el "sintering" de la "Green Part". El "debinding" i el "sintering" ho realitza una empresa externa. Les seves instal·lacions estan a Ebhausen, Alemanya.

A la literatura l'aplicació del "debinding" és a 750°C durant 90 min a 5°C/s i el "sintering" a 1360°C durant 120 min a 10°C/min [76][77].

Finalment, una vegada ja han arribat els cubs sinteritzats, es pot procedir amb els assajos.



figura 15: Cub sinteritzat. Font: Pròpia

4.3. Tècniques de caracterització

4.3.1. Dimensionament

El primer que s'ha fet amb les mostres sinteritzades és mesurar la longitud dels 3 eixos. S'ha mesurat 5 vegades la longitud de cada un dels 3 eixos i s'ha fet la mitjana d'aquests. Aquests mesurament s'han fet amb un peu de rei analògic.

4.3.2. Assaig d'Arquímedes

L'Assaig d'Arquímedes consisteix en determinar el valor de la densitat de la mostra a partir de la densitat del medi líquid que s'utilitzi a la temperatura que es troba l'ambient i l'obtenció de la massa de la mostra en el medi líquid i en l'aire [51]. Per tant, la fórmula per calcular la densitat serà la següent:

$$\rho = \frac{A}{A - B} * \rho_0 \quad (\text{Eq. 1})$$

La mostra utilitzada s'ha fet amb els cubs de calibratge sinteritzats, el medi líquid ha estat aigua destil·lada. A continuació es mostra l'equipament utilitzat per a la realització de l'assaig:



- ❶ Upper sample dish of the immersion basket
- ❷ Beaker
- ❸ Lower sample dish of the immersion basket
- ❹ Platform
- ❺ Weighing plate "density kit"

figura 16: Equip utilitzat a l'assaig. Font: [51]

En primer lloc s'ha de connectar la màquina a la corrent i encendre-la. Assegurar-se que s'estigui mesurant en grams. A continuació, tarar la màquina per posar-la a zero i prémer l'opció de "sòlid", tal com es mostra en la figura 11, en la balança. A continuació es procedeix a pesar la massa del cub a l'aire i dins del líquid. En [51] es mostra una taula amb les densitats a diferents temperatures dels líquids que es poden utilitzar per l'assaig. Una vegada s'han pesat les masses, la màquina et mostra directament la densitat, seguint **Eq 1**.

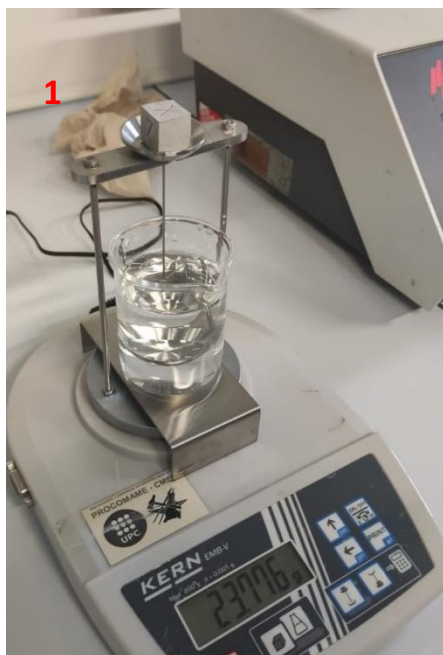


figura 17a: Pasos a seguir per a determinar la densitat (1).
Font: Pròpia

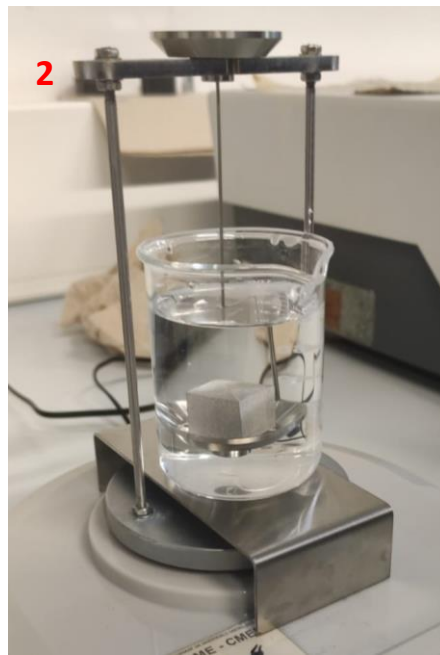


figura 17b: Pasos a seguir per a determinar la densitat (2). Font: Pròpia

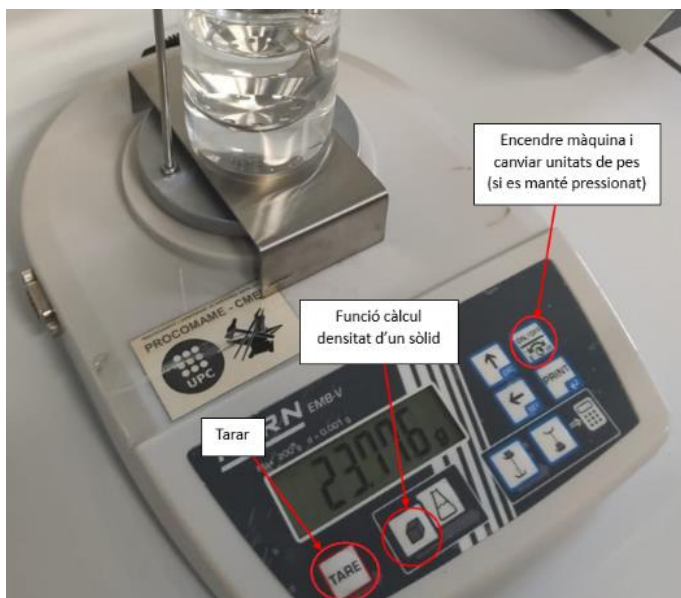


figura 18: Botonera. Font: Pròpia

4.3.3. Preparació de les mostres

4.3.3.1. Tall

Quan s'hagin obtingut les densitats, es podrà procedir a tallar els cubs. La finalitat d'aquest assaig és fer-li tres talls als cubs sobre el pla ZY per avaluar la porositat de les mostres tallades en tot l'eix Z. L'eix que variarà serà el X, ja que la distància sobre una de les cares anirà augmentant a mesura que es vagin fent més talls sobre el pla ZY. S'ha utilitzat un disc de coure banyat amb pols de diamant per els talls.

Per procedir a tallar, en primer lloc s'ha d'ajustar el cub a la bancada, a continuació mitjançant la palanca de control de la màquina posicionar el cub a la zona adequada. A continuació, configurar els paràmetres adequats amb els quals es vol tallar des de la pantalla tàctil de la màquina (veure Taula 9). Per acabar, es baixa el vidre protector i es prem el botó "Start".

Taula 9: Paràmetres de tall

Paràmetres de tall	Unitats	Valor
Velocitat disc	rpm	3000
Velocitat avançament disc	mm/s	0,02
Longitud de tall	mm	>15
Nombre de talls	-	-
Grossor del tall	-	-

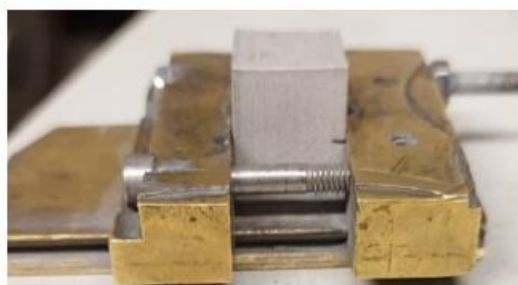


figura 19: Bancada. Font: Pròpia



figura 20: Cub tallat. Font: Pròpia



figura 21: Botonera. Font: Pròpia

4.3.3.2. Embudidora

Quan les peces han estat tallades, el següent pas és la embotició d'aquestes peces en baquelita. Per poder fer-ho, es col·locarà la mostra que es vulgui embotir en el cilindre. Mentre baixa la mostra fins al fons del tub, se li afegirà la baquelita. Tot seguit, es tancarà amb el mecanisme de roscat, s'ajustaran els paràmetres de força, temps d'escalfament i temps de refredament i es premerà el botó d'inici. La configuració de l'equip ha estat de 15kN de força i 5 minuts d'escalfament a 180°C i 5 minuts de refredament.

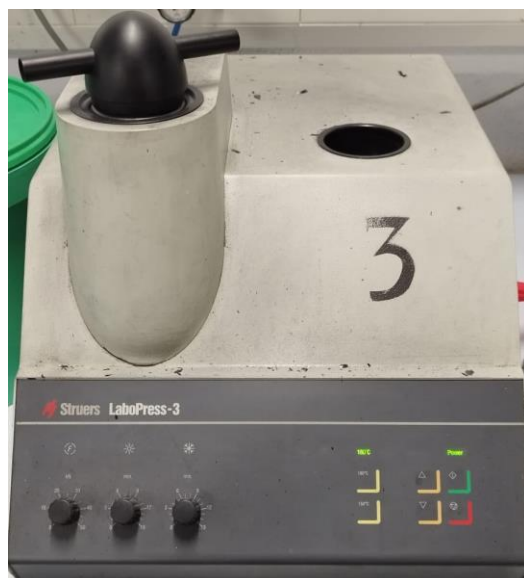


figura 22: Màquina embutidora Struers. Font: Pròpia

4.3.3.3. Desbastar i polir

En aquesta etapa, una vegada s'han embotit en baquelita totes les mostres, es passa a desbastar el material seguint els noms de gra de menor a major (P240, P400, P800, P1200, P2500).

És important seguir l'ordre de discs adequat, ja que una vegada s'hagi passat al següent disc abrasiu i no s'hagi desbastat bé la mostra amb el disc anterior, els pics que no s'hagin desbastat no s'eliminaran amb la resta de discs abrasius. Això és degut a l'augment de longitud entre els grans dels discs, a major longitud entre grans major precisió en el desbastat i per tant menys material s'elimina.



figura 23: Qpol 250 M1 de QATM. Font: Pròpia



figura 24: Struers LaboPol-5. Font: Pròpia

El primer que s'ha de fer és col·locar el disc abrasiu amb el que es vol desbastar en el plat de la màquina. Tot seguit s'ajustaran les revolucions a les que es vol girar el plat. En aquest cas, s'ha posat entre 150 i 200 rpm, ja que s'ha vist que amb l'acer inoxidable es poden arribar a formar plànols fàcilment i no es vol eliminar gran quantitat de material en poc temps. A continuació, s'agafarà la mostra i es mantindrà, gentilment, sobre la superfície del disc abrasiu mentre està girant. S'estarà lubricant de forma constant amb aigua, per evitar danyar massa ràpid els discs. La proveta s'ha de mantenir estàtica amb les mans o es pot fer a màquina en cas que es tinguin les eines adequades. S'ha preferit fer-ho a mà, ja que a màquina és molt fàcil que apareguin diferents plànols. S'ha de netejar la mostra per eliminar pols metàl·lica que pugui quedar a la superfície i s'ha de mirar el patró de ratlladures de la mostra. Quan el patró sigui uniforme, canviar disc abrasiu i girar la mostra 90° i continuar amb el procediment explicat fins arribar al disc P2500.

Una vegada la mostra ha estat desbastada, es passarà a l'etapa de poliment o polit fi. Es canviarà el plat per un altre on hi hagi adherit un drap amb un teixit únic i es banyarà el teixit amb suspensió de

diamant i amb una pipeta s'anirà lubricant el disc. Es procedirà de la mateixa forma que el desbast. Una vegada es vegin les línies uniformes, passar a la següent suspensió de diamant.

Quan s'acaba de desbastar el disc P2500 es passa a la suspensió de $9\mu\text{m}$, seguida de la de $6\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$ i $1\mu\text{m}$. Quan s'arriba a $1\mu\text{m}$, la superfície de la mostra es veurà com un mirall. En aquest moment es pot procedir a realitzar l'assaig de porositat.

4.3.3.4. Microscopia

En aquesta etapa, mitjançant el microscopi Olympus GX51, es fotografien a escala x5 les mostres polides. Es divideix cada mostra en quatre quadrants i es fotografia la part de cada quadrant que sigui més representativa. El programa utilitzat per a la fotografia de les imatges es diu OmniMet.

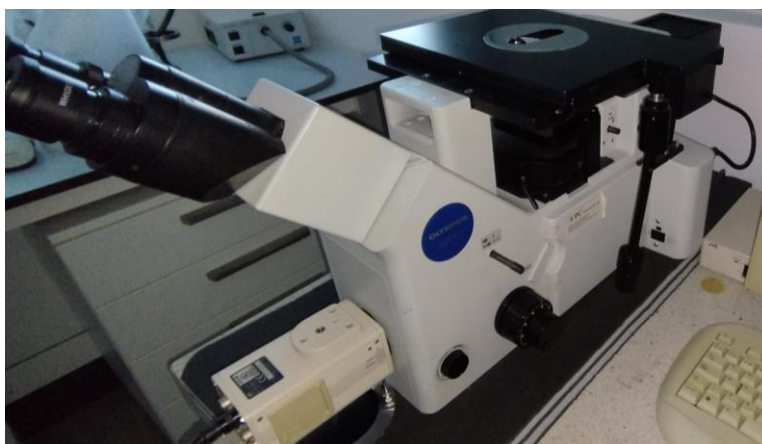


figura 25: Olympus GX51. Font: Pròpia

4.3.3.5. Determinació de porositats

Per acabar, utilitzant el programari ImageJ, s'han determinat les porositats superficials i les dimensions de cada porus de cada una de les imatges preses en el microscopi.

Per determinar les dimensions dels porus s'han agafat els valors d'àrea que el programa donava per cada porus i per determinar el diàmetre equivalent s'ha assumit que totes les porositats eren circulars.

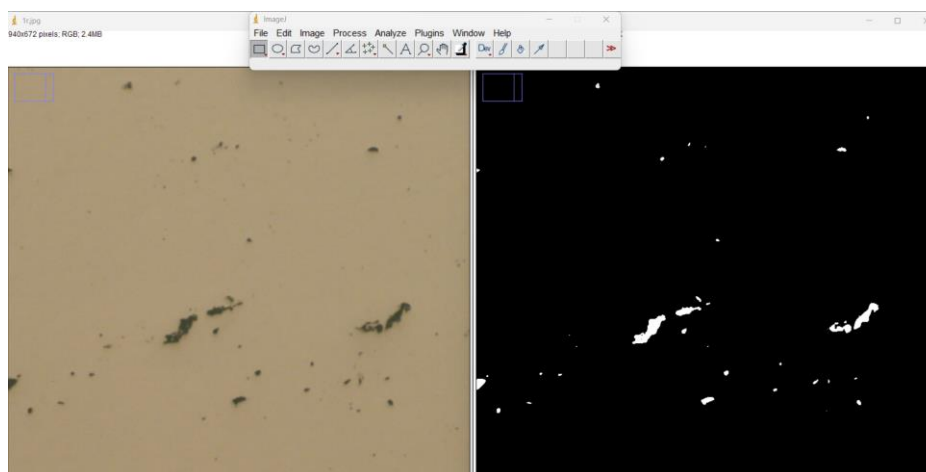


figura 26: Interfície del programa ImageJ. Font: Pròpia

S'ha seguit una terminologia per ordenar les imatges i també les gràfiques extretes de cada imatge.

X-Y-Z- Ω on Y és el paràmetre alçada de capa que s'ha imprès amb el Stratos, X s'utilitza per quantificar el cub amb la mateixa alçada de capa, Z és el valor que determina la distància del tall respecte la cara X del cub i Ω és el quadrant en el que s'ha fotografiat. Per exemple, en el cas que s'estigui mirant una imatge o gràfica de 2-0,05-9,7-3 significa que és el segon cub que s'ha imprès a 0,05 mm d'alçada de capa, que el tall s'ha fet a 9,7 mm de la cara X i que s'està mirant la informació del tercer quadrant.

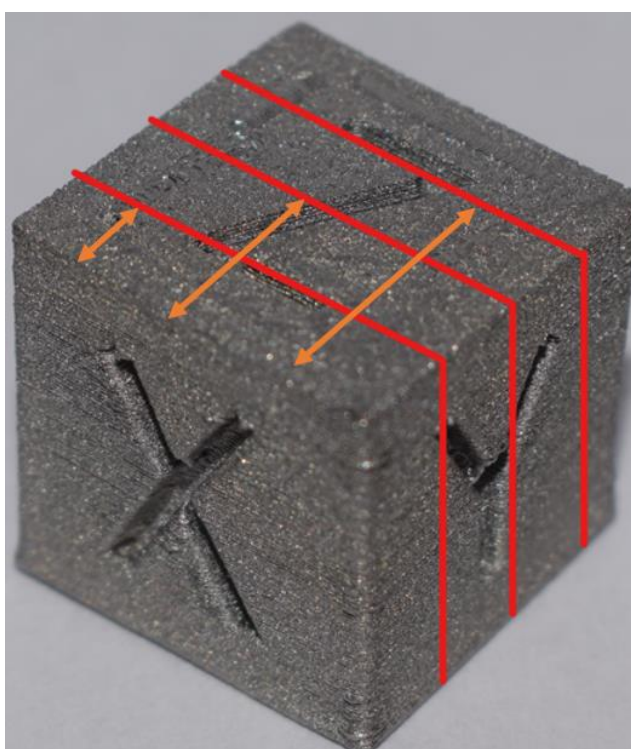


figura 27: Representació de la distància de cada tall respecte la cara X. Font: Pròpia

4.3.4. Assaig de tracció

Per últim, a més de les impressions dels cubs, s'han imprès 4 provetes; 2 en el pla XY i 2 en el pla XZ.

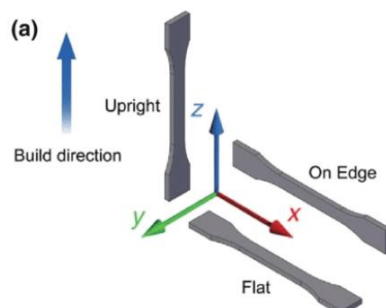


figura 28: Direcció d'impressió. Font: [52]

Les provetes en verd es van imprimir bé. Però quan van arribar del post-processat, les dues provetes impreses en el pla XZ no estaven en bon estat i es van haver de descartar.

Aquest assaig també s'ha realitzat a les instal·lacions de la EEBE. Amb l'ajut d'una màquina d'assaig Instron 4507.



figura 29 i 30: Màquina utilitzada en l'assaig, proveta llesta per assajar. Font: Pròpia

Una vegada ajustada la proveta, es col·loca un sensor que mesurarà la força aplicada a la proveta i la elongació que pateix.

Es guardaran les dades i es repetirà l'experiment pel nombre de provetes que es tingui.



figura 31: Provetes trencades en XY una vegada fet l'assaig. Font: Pròpia

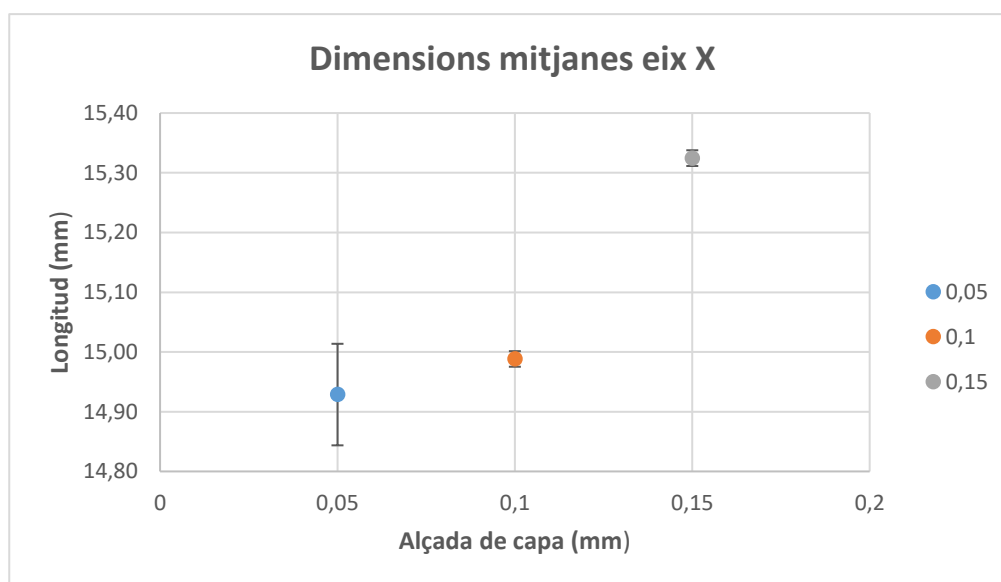


figura 32: Provetes sinteritzades en el pla ZX. Font: Pròpia

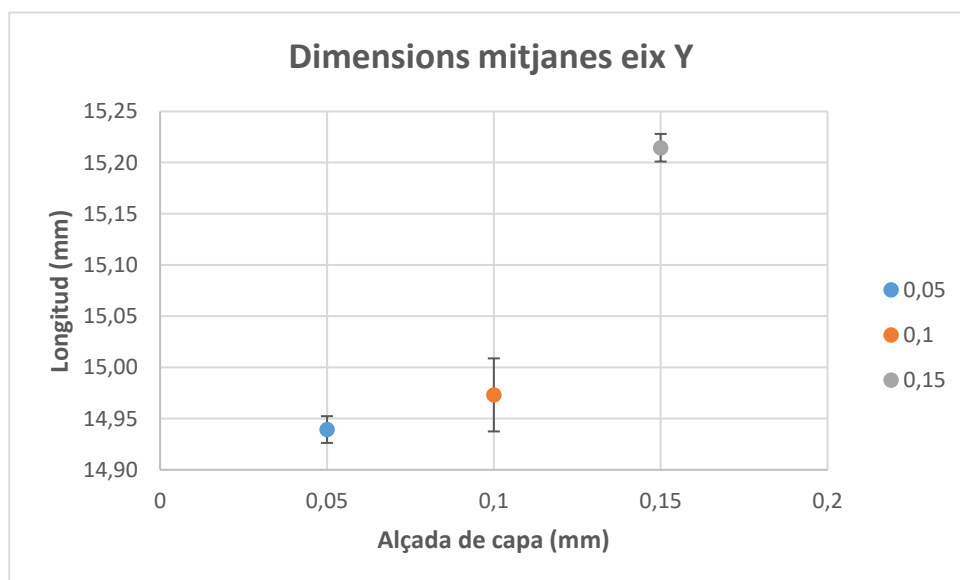
5. Resultats

5.1. Dimensions

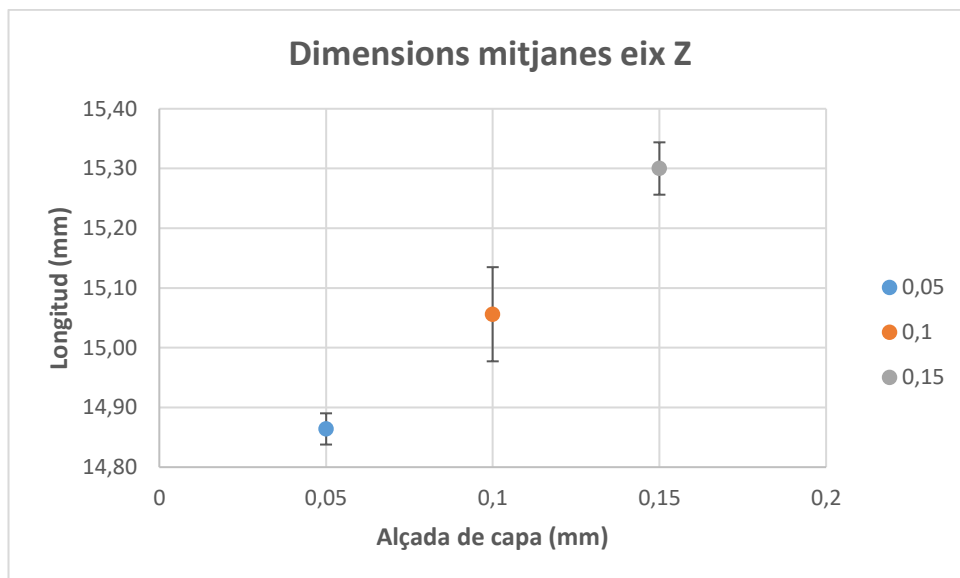
A continuació, es mostren les dimensions dels cubs de calibratge mesurats després del post-processat.



Gràfica 1: Dimensions mitjanes en X

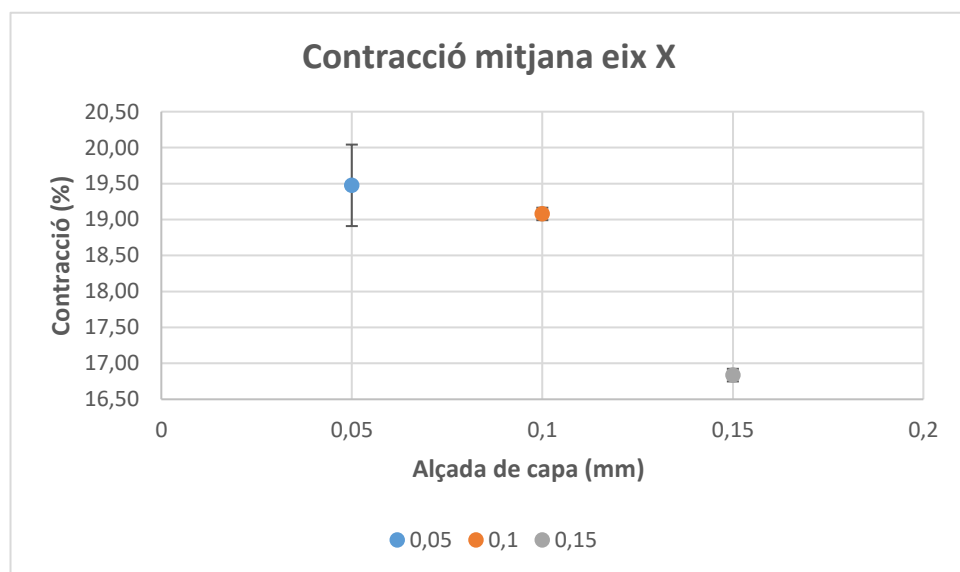


Gràfica 2: Dimensions mitjanes en Y

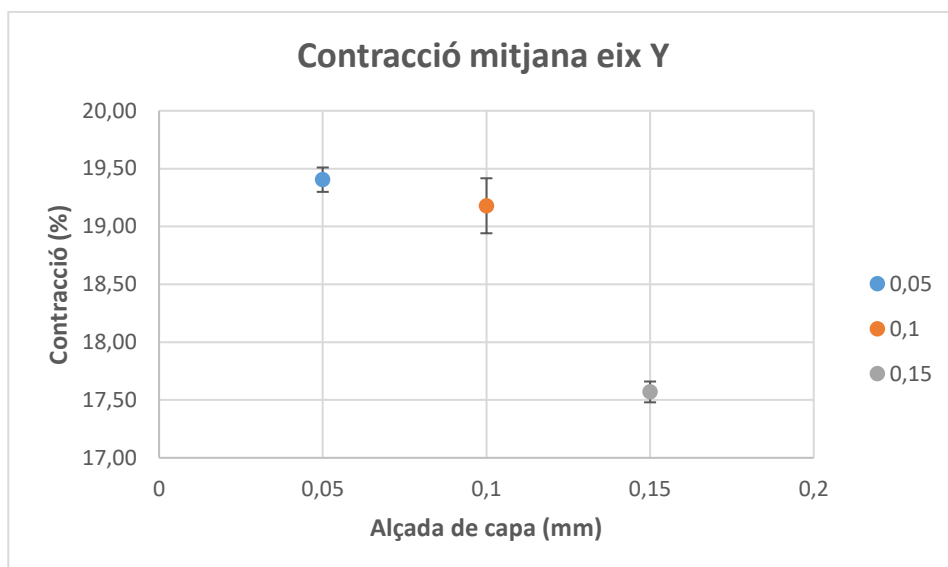


Gràfica 3: Dimensions mitjanes en Z

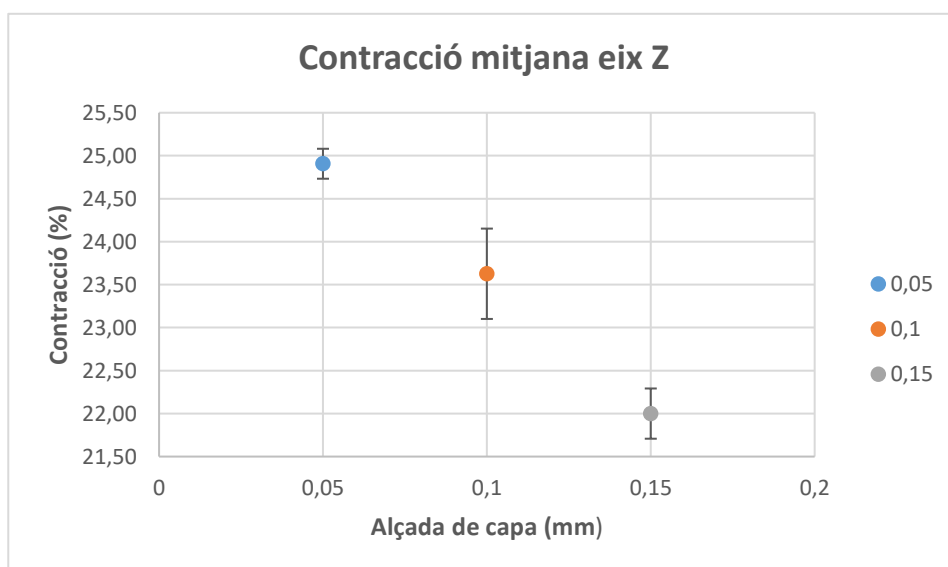
5.2. Contraccions



Gràfica 4: Contraccions mitjanes en X

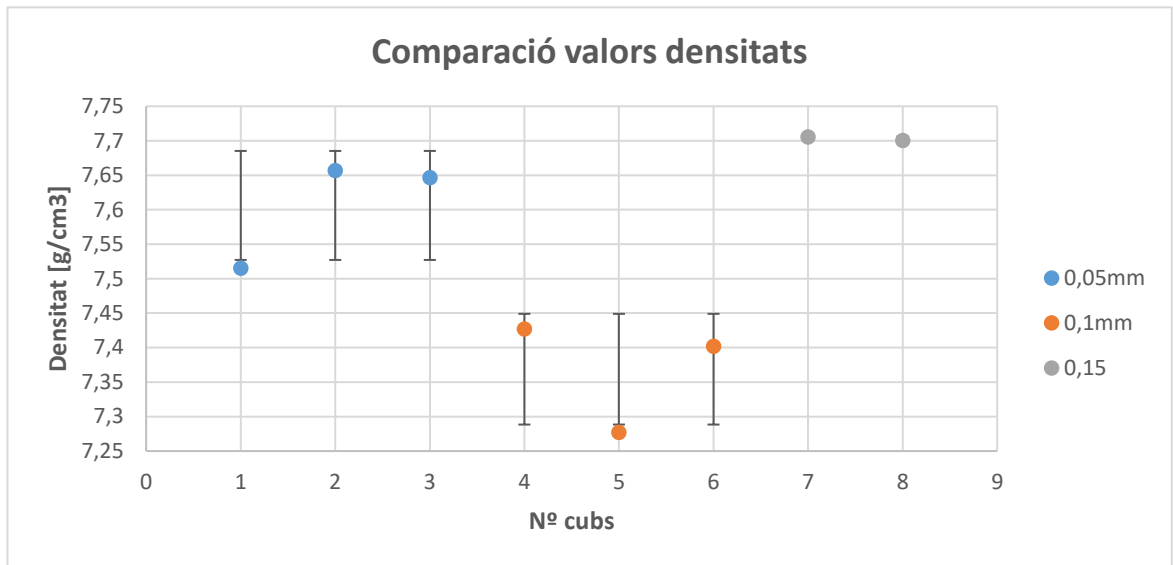


Gràfica 5: Contraccions mitjanes en Y

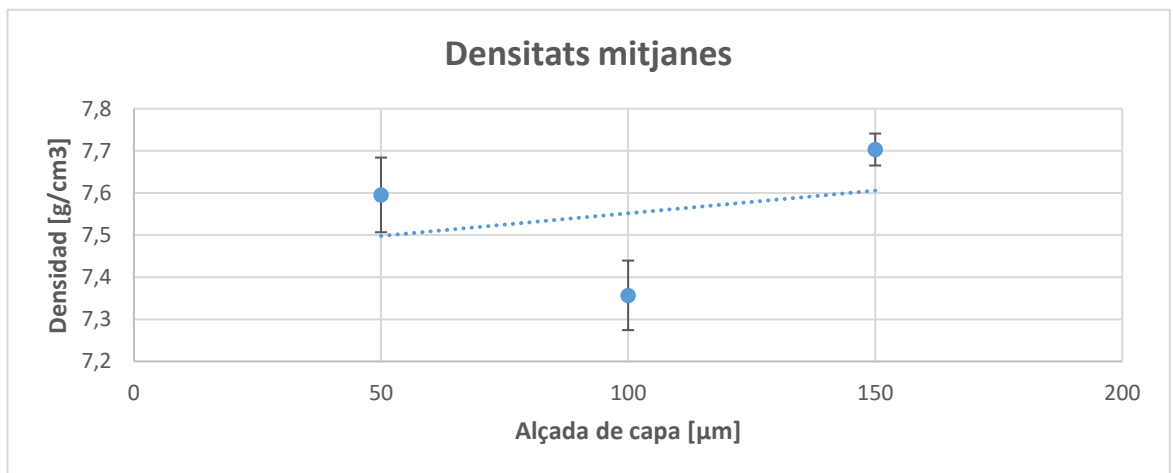


Gràfica 6: Contraccions mitjanes en Z

5.3. Densitats



Gràfica 7: Densitats de cada un dels cubs



Gràfica 8: Densitats mitjanes per a cada alçada de capa

5.4. Fotografia microscòpica

Comparació de les imatges fotografiades en microscopi respecte les imatges processades amb el programa ImageJ. En la imatge de l'esquerra es pot veure la fotografia obtinguda pel microscopi, a la dreta, la imatge obtinguda una vegada passada pel programa ImageJ. Degut a la quantitat de imatges, s'han escollit aquelles més representatives. La resta estan adjuntades en l'apartat A2 de l'Annex. La nomenclatura seguida per classificar les imatges està explicat en l'apartat 4.3.3.5.

5.4.1. 1-0,05-6,3

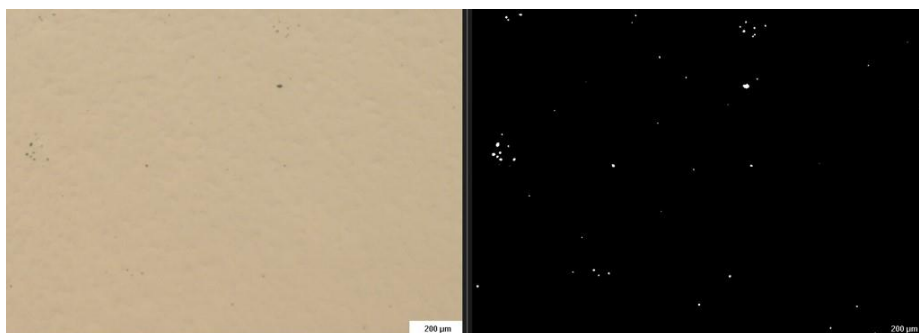


Figura 33: 1-0,05-6,3-1r quadrant



Figura 34: 1-0,05-6,3-2n quadrant

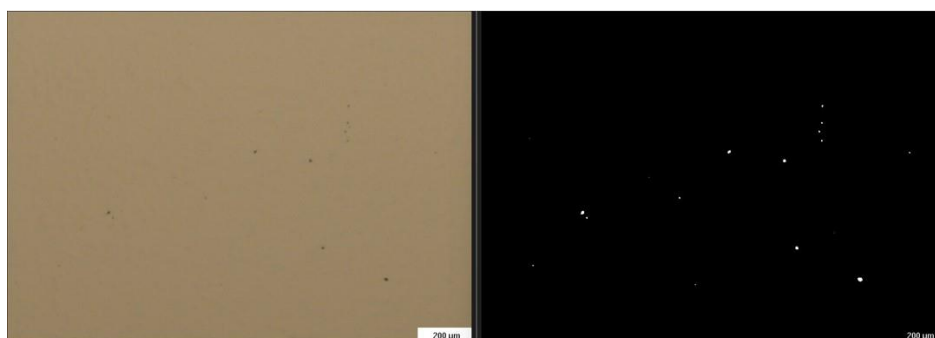


Figura 35: 1-0,05-6,3-3r quadrant

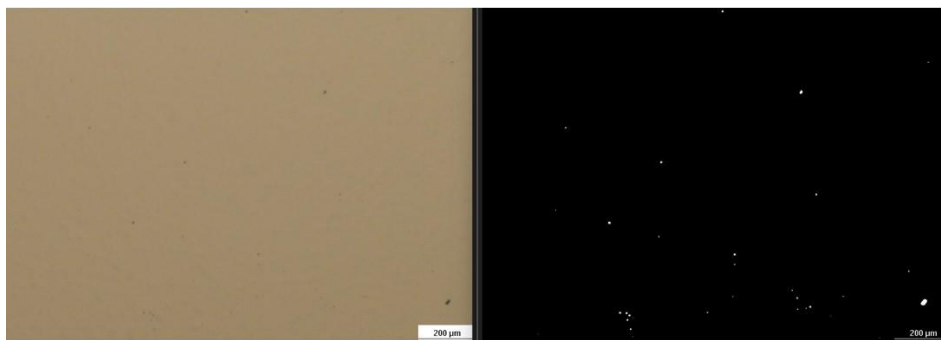


Figura 36: 1-0,05-6,3-4t quadrant

5.4.2. 2-0,05-9,75

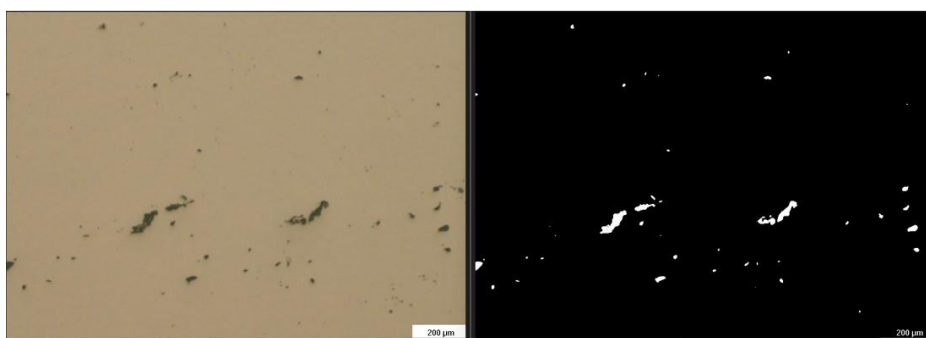


Figura 37: 2-0,05-9,75-1r quadrant

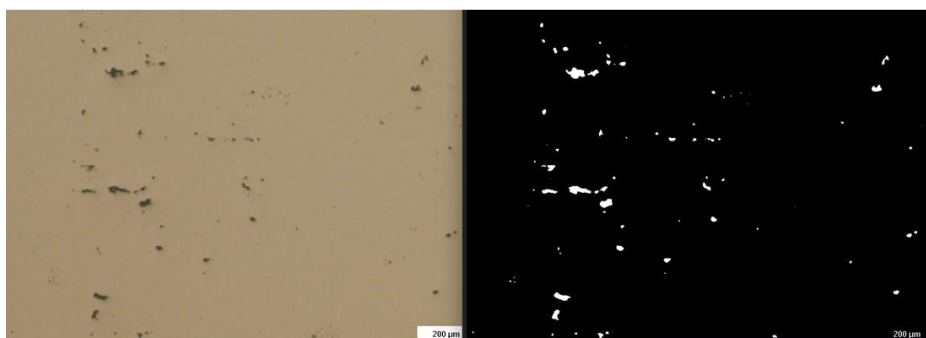


figura 38: 2-0,05-9,75-2n quadrant

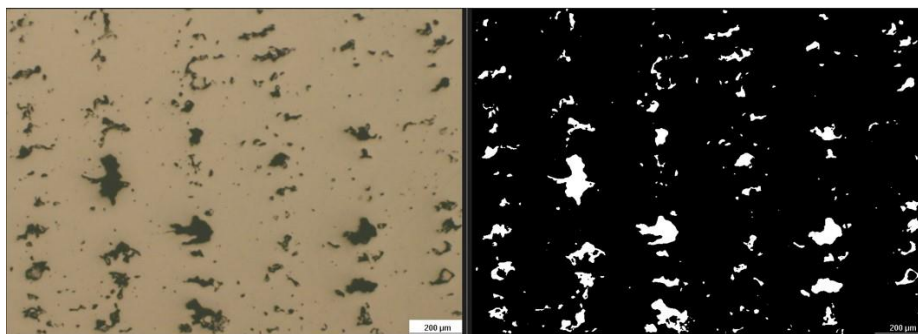


figura 39: 2-0,05-9,75-3r quadrant

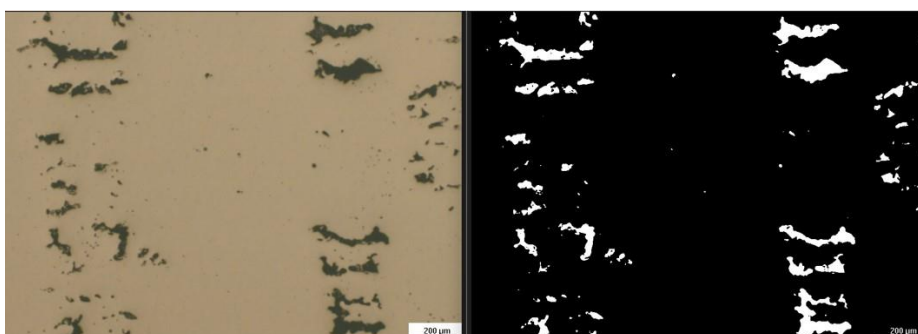


figura 40: 2-0,05-9,75-4t quadrant

5.4.3. 3-0,05-9,7

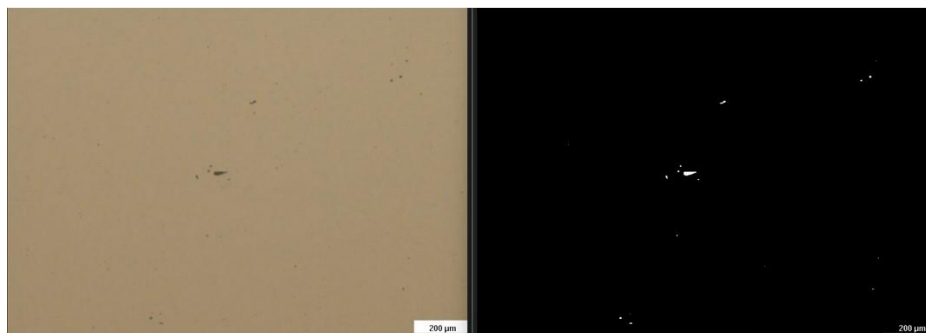


figura 41: 3-0,05-9,7-1r quadrant

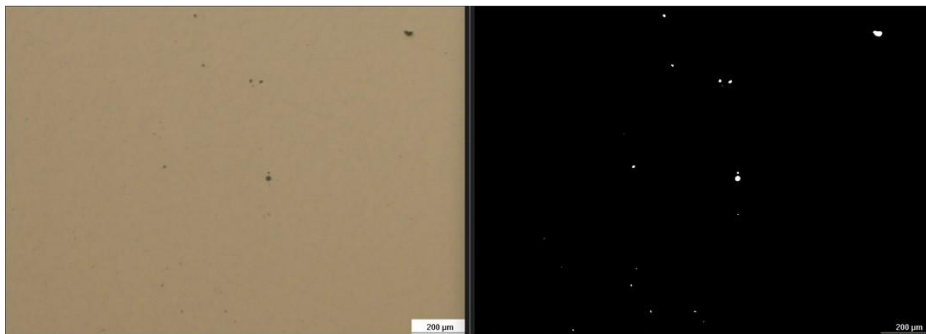


figura 421: 3-0,05-9,7-2n quadrant

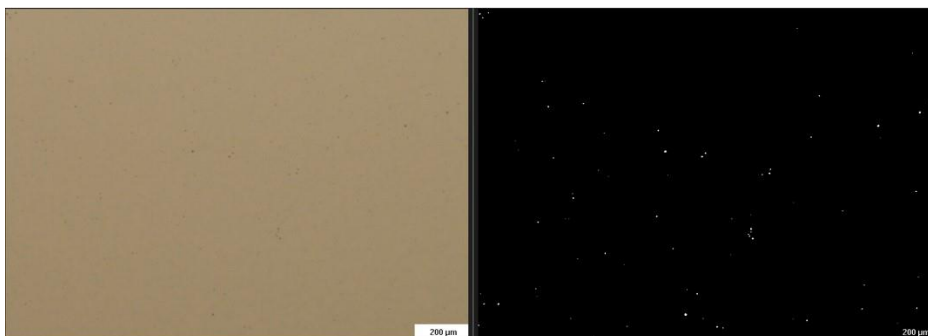


figura 432: 3-0,05-9,7-3r quadrant

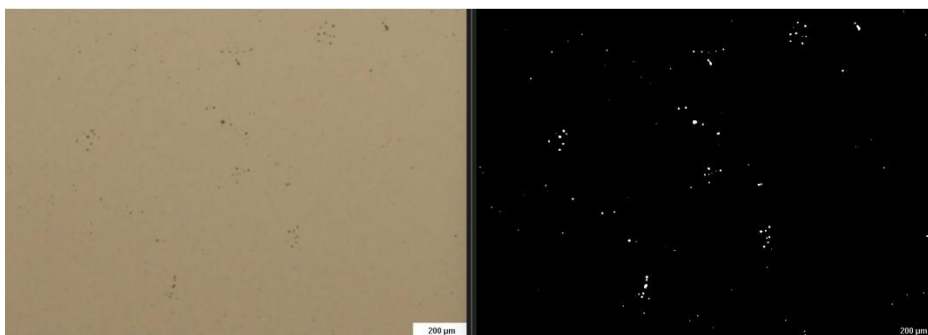
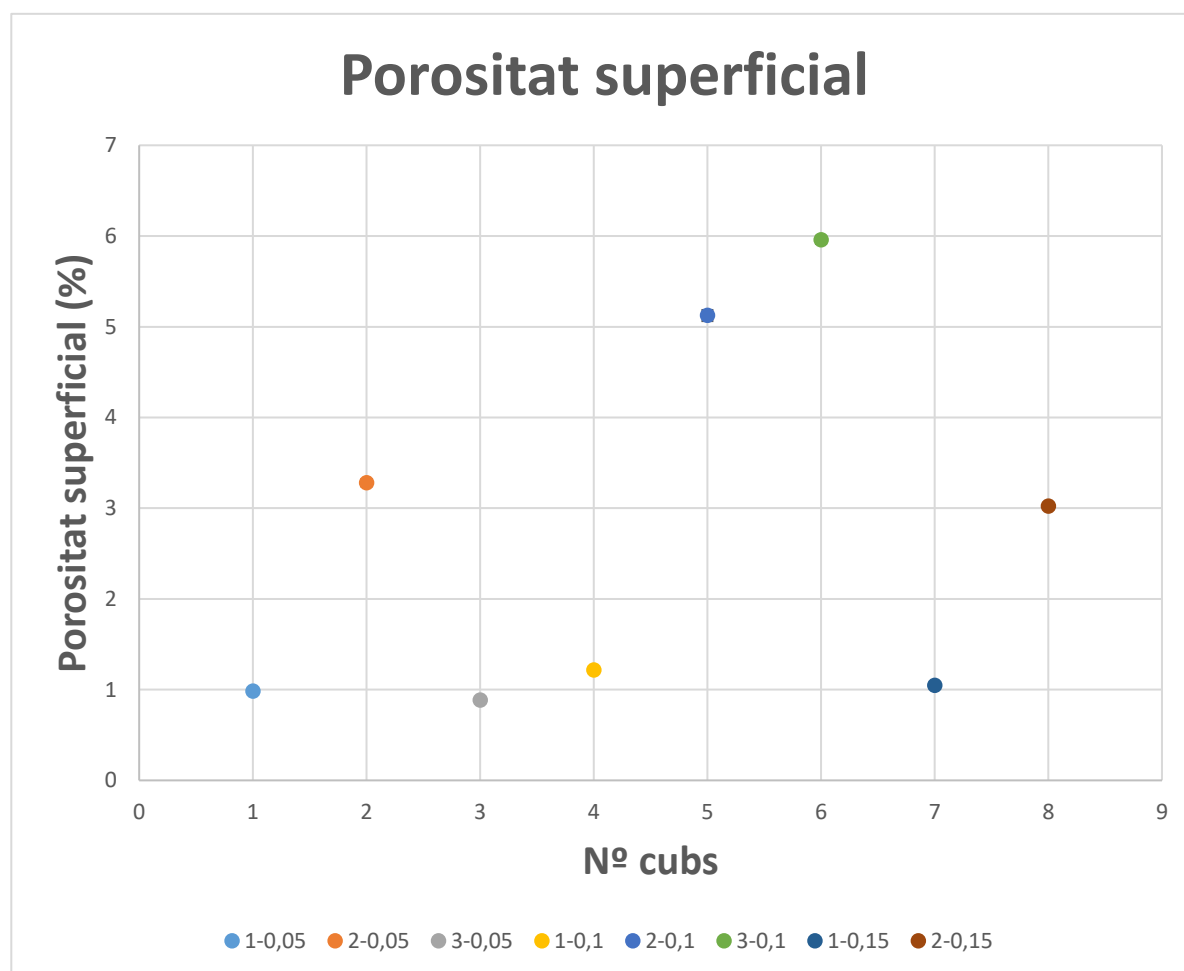


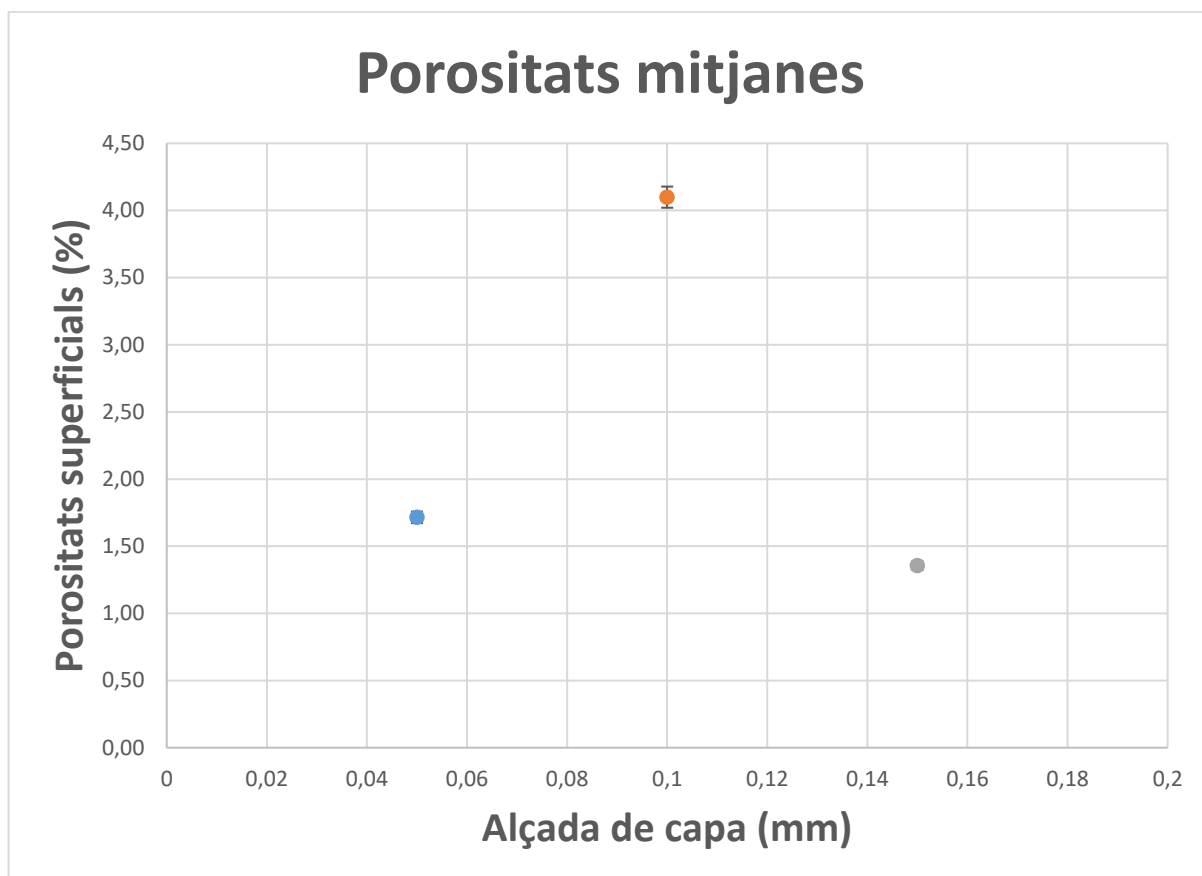
figura 443: 3-0,05-9,7-4t quadrant

5.5. Porositat superficial dels cubs

A continuació, es presenta la gràfica de les porositats de les seccions estudiades mitjanes de cada tall per a cada mostra i les porositats de les seccions estudiades mitjanes per cada altura de capa.



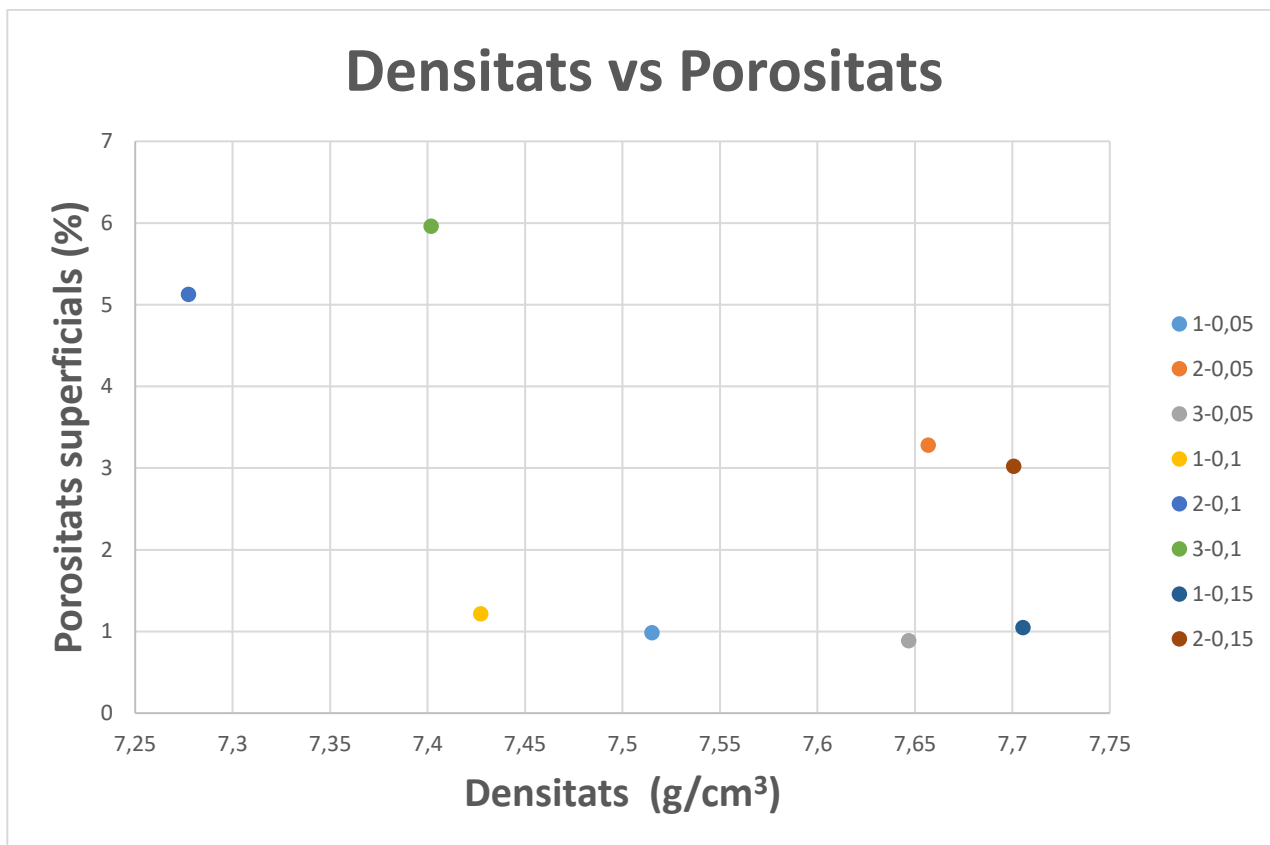
Gràfica 9: Mitjana de la porositat superficial de cada cub



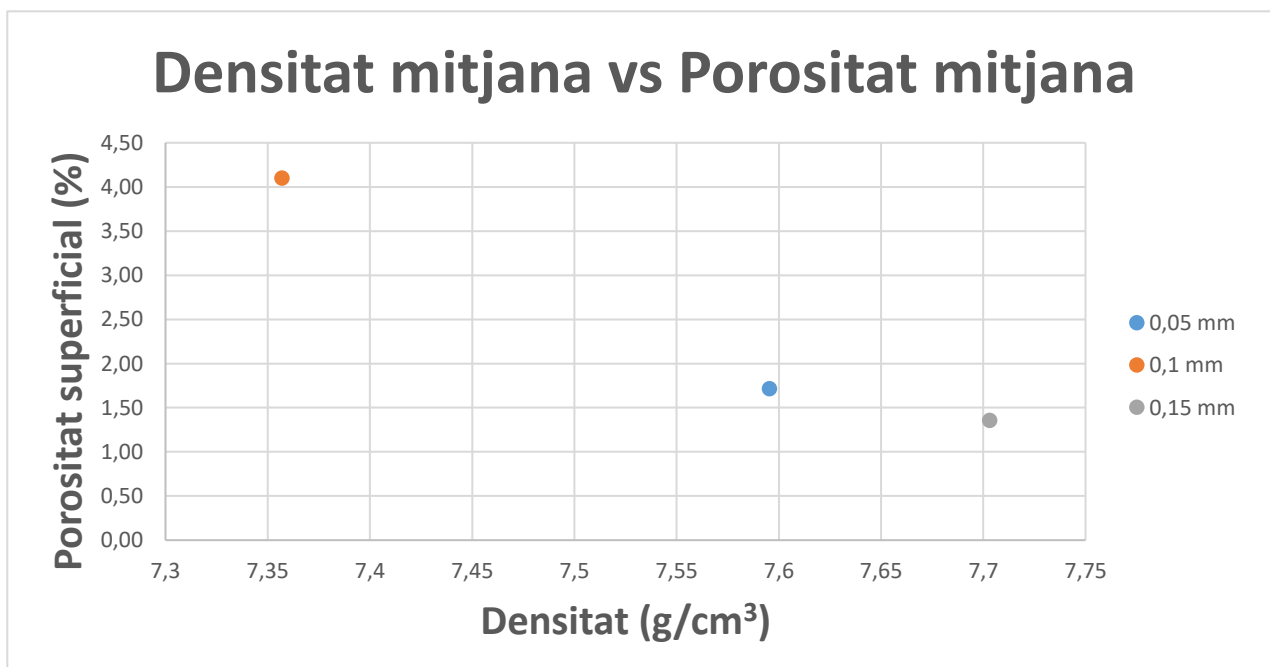
Gràfica 10: Porositats mitjanes de cada alçada de capa

En la gràfica 11 es presenta la densitat de cada cub respecte la mitjana de les porositats de les seccions de cada cub. En la gràfica 12 es presenta la densitat mitjana de cada cub imprès amb la mateixa alçada de capa respecte la mitjana de les porositats de les seccions de tots els cubs impresos amb la mateixa alçada de capa.

La densitat de les gràfiques 11 i 12 s'han obtingut de l'assaig d'Arquímedes, les mitjanes de les porositats de les seccions s'han obtingut de la segmentació de les imatges del programa ImageJ.



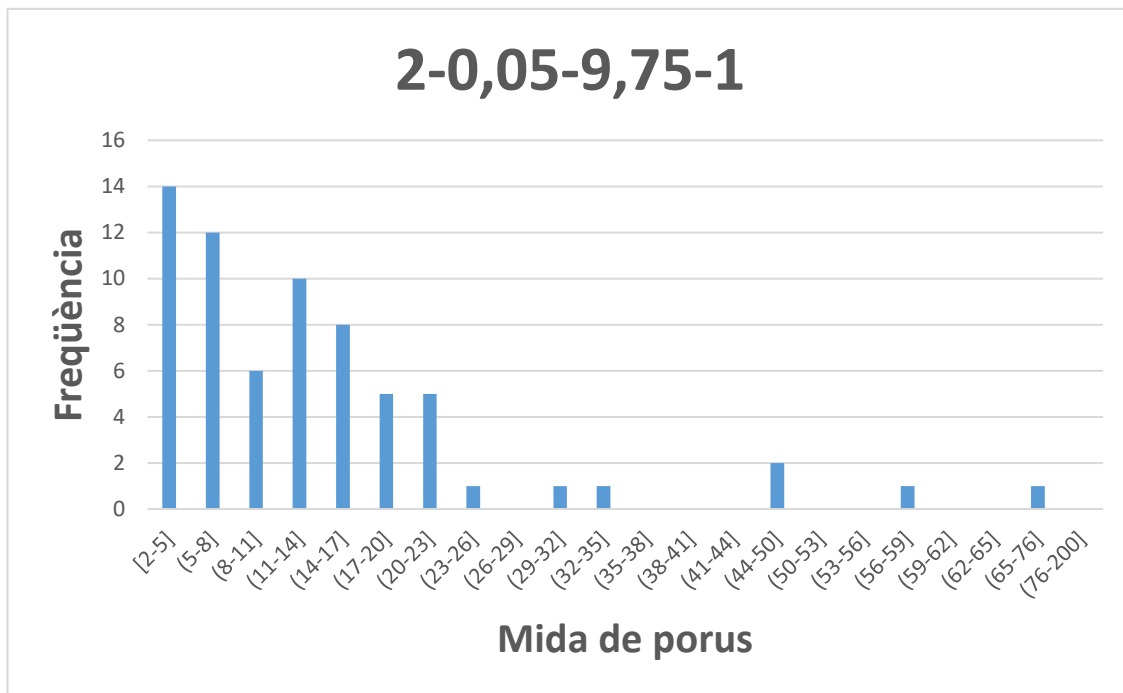
Gràfica 11: Comparació de densitat vs porositats de cada cub



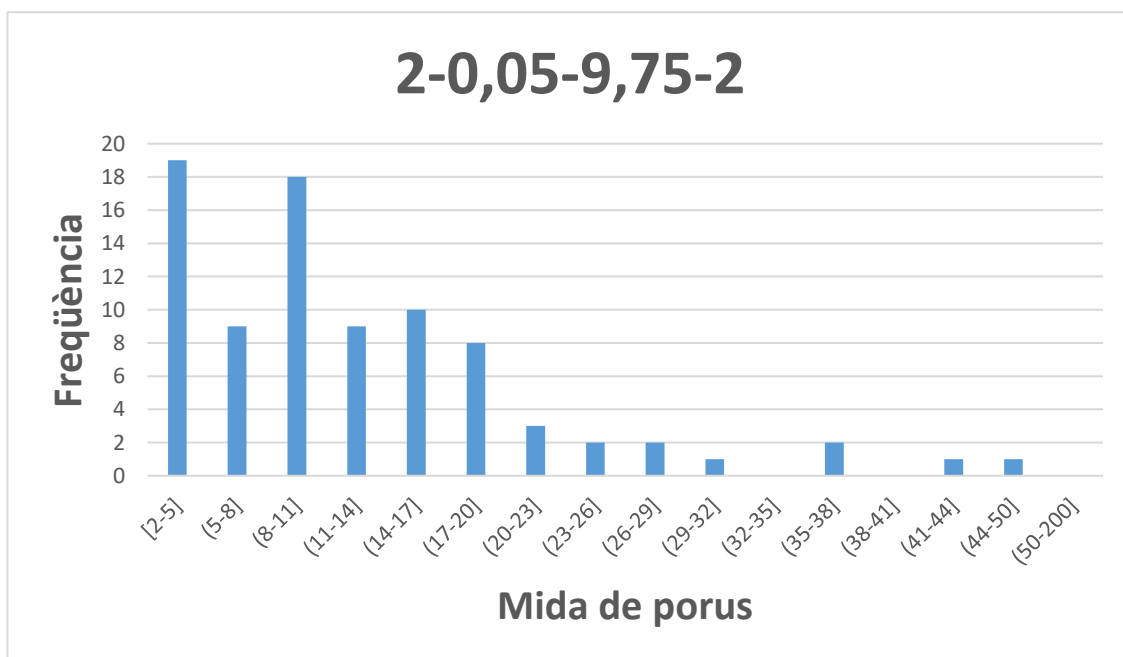
Gràfica 12: Comparació entre les mitjanes de densitat vs porositat de les alçades de capa

5.6. Dimensions dels porus

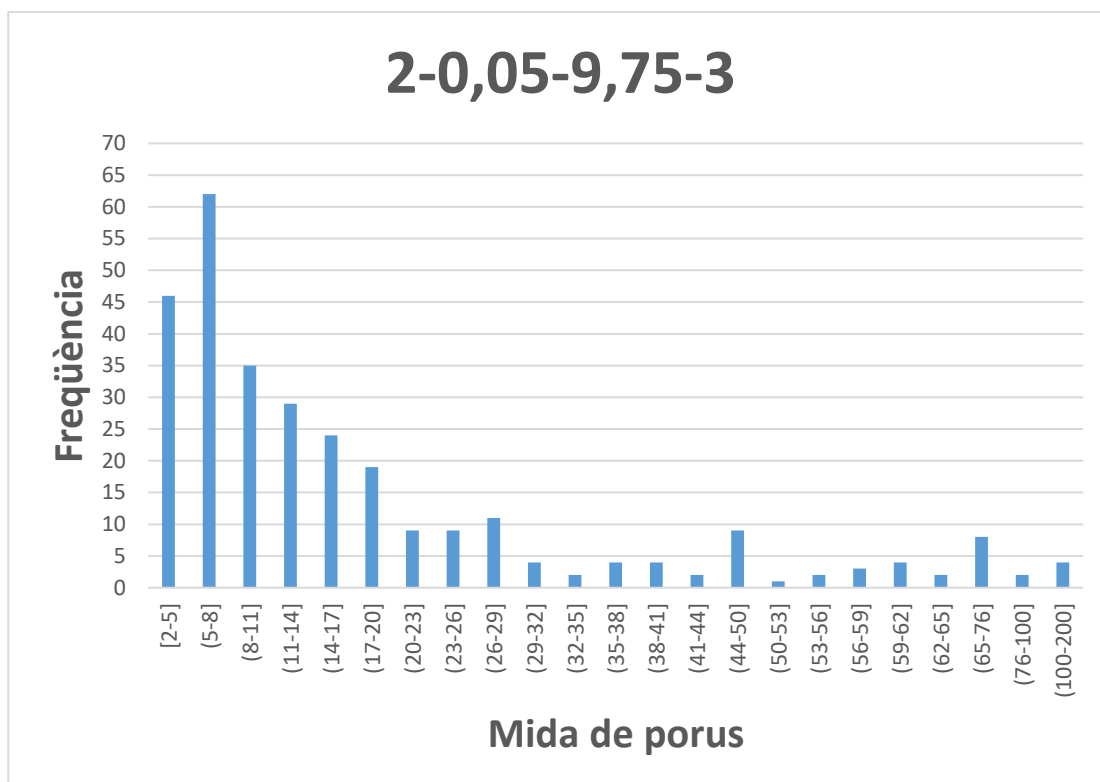
S'han afegit 4 gràfiques representatives en aquest apartat. La resta estan adjuntades en l'apartat A3 de l'Annex.



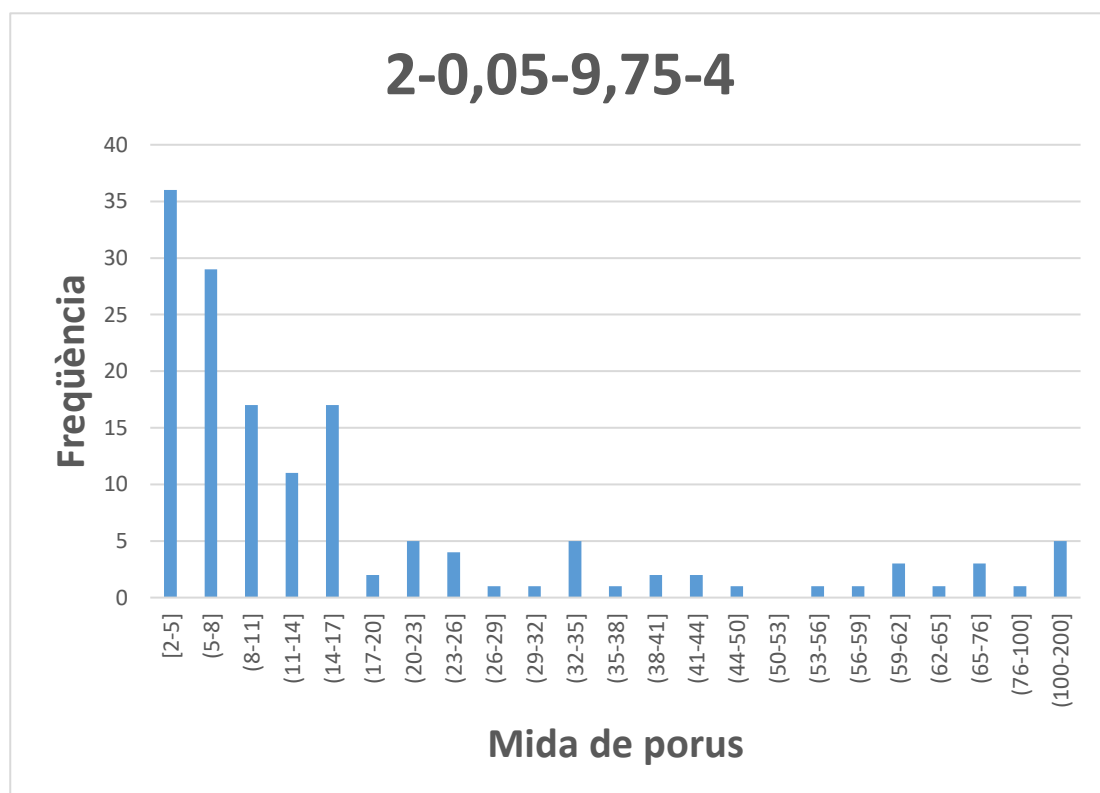
Gràfica 13: Dimensions dels porus de 2-0,05-9,75-1r quadrant



Gràfica 14: Dimensions dels porus de 2-0,05-9,75-2n quadrant



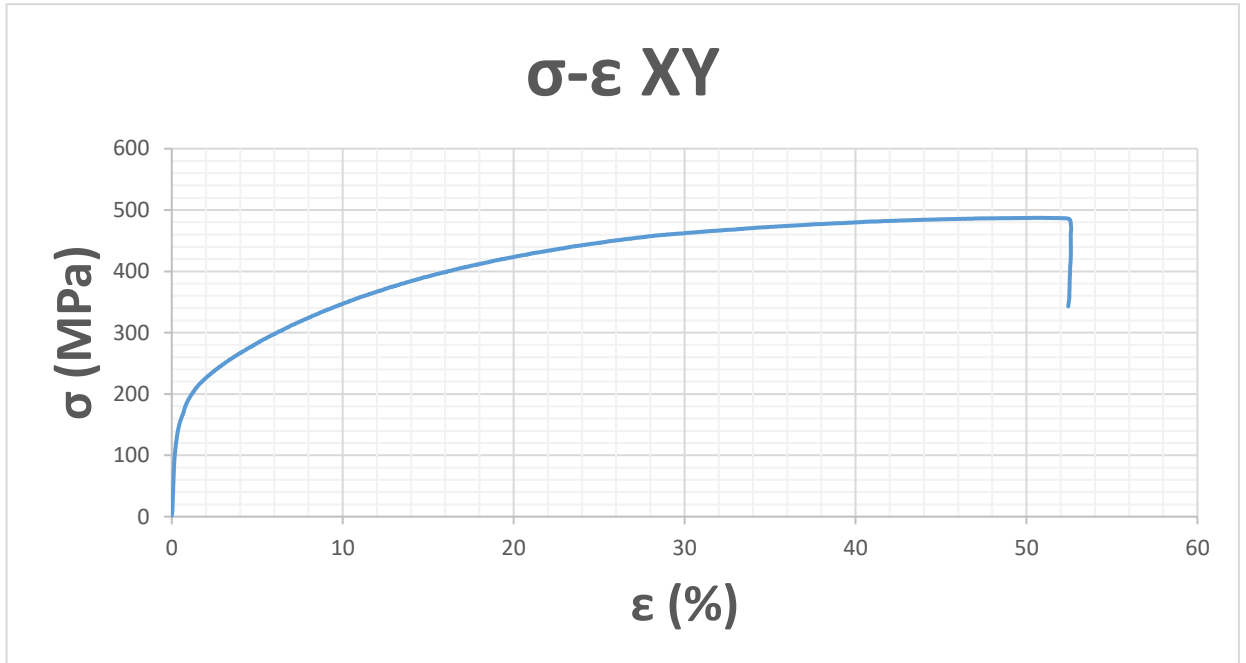
Gràfica 15: Dimensions dels porus de 2-0,05-9,75-3r quadrant



Gràfica 16: Dimensions dels porus de 2-0,05-9,75-4t quadrant

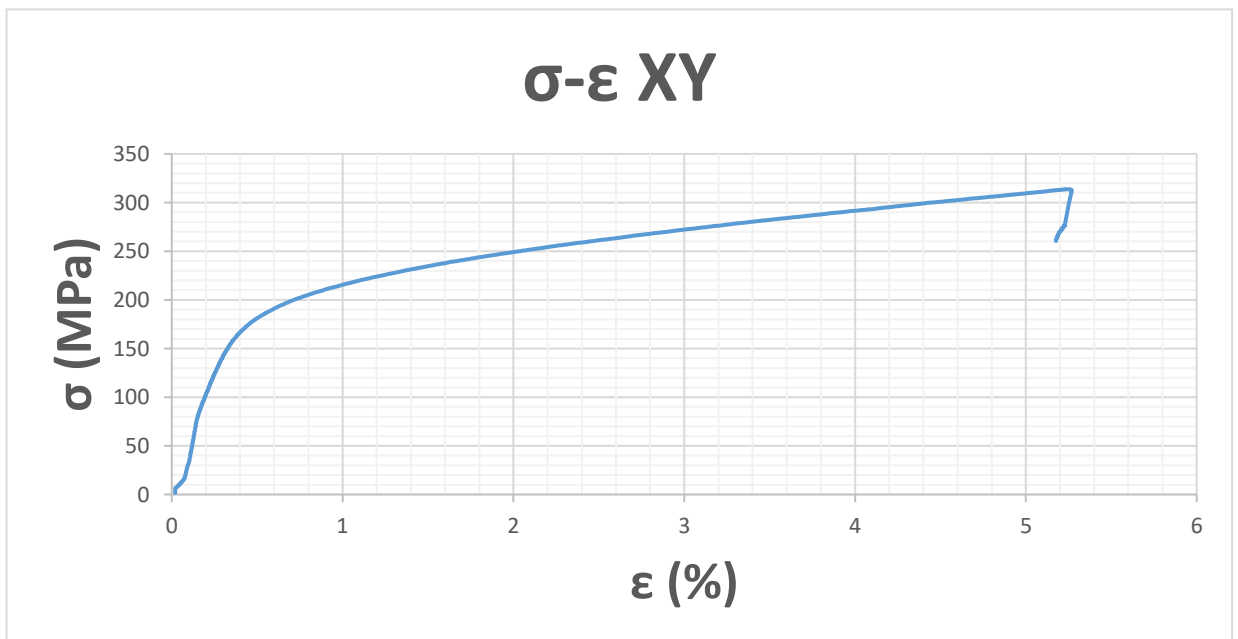
5.7. Assaig de Tracció

5.7.1. Primera proveta impresa en el pla XY



Gràfica 17: Esforç-deformació pla XY, primera proveta

5.7.2. Segona proveta impresa en el pla XY



Gràfica 18: Esforç-deformació pla XY, segona proveta

6. Discussió de resultats

6.1. Dimensions

Els gràfics 1, 2 i 3 mostren les mitjanes de la longitud dels eixos dels cubs després del post-processat segons la variació alçada de capa (0.05 mm, 0.1mm, 0.15mm).

En el gràfic 1, les mostres de 0,1 mm s'han imprès amb la longitud estimada: 15mm. Les mostres de 0,05 mm han patit massa contracció en el post sinteritzat i s'han vist reduïdes a 14,95 mm. A més, les mostres de 0,05 mm tenen una desviació molt més alta que les altres, degut a la diferència de valors entre els tres cubs. Les mostres de 0,15 mm són més grans del que s'esperava. Arribant als 15,34 mm.

Passant al gràfic 2, es pot veure un comportament similar. Les mostres de 0,05 mm tenen una longitud de 14,95 mm en l'eix Y. En el cas de les mostres de 0,1 mm, s'han contret més que en l'eix X, però segueixen sent les més exactes. Les dues mostres de 0,15 mm d'alçada de capa estan sobredimensionades, amb valors superiors als 15,20 mm.

Per acabar amb les dimensions dels cubs, en el gràfic 3 es mostra la longitud Z. Seguint amb les 2 gràfiques comentades, les mostres de 0,05 mm han patit una contracció massa agressiva i estan per sota del valor esperat de 15 mm. Les de 0,1 són les més exactes, amb valors de 15,05 mm de mitja. Les de 0,15 mm, amb valors de 15,30 mm, no s'han contret amb el valor desitjat en cap dels eixos.

6.2. Contraccions

Tal com s'ha comentat a l'apartat 3.1, s'ha de sobredimensionar els eixos degut a la contracció que pateixen les peces en el post-processat. En concret, un 19% en X i Y i un 24% en Z. Si s'observa la gràfica 4, la contracció mitjana dels cubs amb alçada de capa de 0,05 mm és de 19,5% i les de 0,1 mm és de 19,1%, una mica més alt de l'esperat. En canvi, la mitjana de la contracció amb els cubs de 0,15 mm és de 16,84%, molt menys del desitjat.

En la gràfica 5, es segueix el mateix comportament que en la gràfica 4. Tot i que els valors varien una mica. Els cubs de 0,05 s'han contret un 19,4% i els de 0,1 un 19,18%. Ara bé, per als cubs de 0,15 mm, la contracció en l'eix Y ha estat major; un 17,57%.

Per últim, a la gràfica 6, les contraccions han estat del 24,91% en 0,05, del 23,63% en 0,1 i del 22% en 0,15. En aquest cas, s'esperava una contracció del 24% en l'eix Z.

6.3. Densitats

A la gràfica 7 es compara les densitats de cada un dels cubs impresos. Els tres primers han estat impresos amb una alçada de capa de 0,05 mm. El primer cub té una densitat de $7,515 \text{ g/cm}^3$, mentre que els altres dos la tenen de $7,657 \text{ g/cm}^3$ i de $7,647 \text{ g/cm}^3$. Si es compara la densitat del primer cub amb la dels altres dos i veient la similitud de densitats entre el segon i el tercer cub, és plausible que el primer cub tingui més porositats que els altres dos.

Els tres cubs següents, impresos a 0,1 mm d'alçada de capa, mostren una inferior densitat en comparació amb els tres primers. La densitat del quart cub és de $7,427 \text{ g/cm}^3$, la del cinquè és de $7,277 \text{ g/cm}^3$ i la del sisè de $7,402 \text{ g/cm}^3$. En aquest cas, sembla sensat creure que el cinquè cub, segueixi un comportament similar al primer, tenint més porositats que els altres dos cubs.

Si es comparen els últims dos cubs amb la resta, amb valors de $7,705 \text{ g/cm}^3$ i $7,701 \text{ g/cm}^3$ respectivament, aquests dos mostren els valors més alts de densitat. És possible que això sigui degut a la baixa contracció d'aquests dos, ja que com s'ha vist amb els 6 primers gràfics, les dimensions dels cubs amb alçada de capa 0,15 mm són més grans.

El gràfic 8 mostra la mitjana dels cubs agrupats per alçada de capa. Tal com s'ha comentat, els de 0,15 mm tenen una major densitat, seguits dels de 0,05 mm i finalment, amb una densitat mitjana de $7,357 \text{ g/cm}^3$, els de 0,1 mm.

Per acabar, cal afegir que les primeres mesures de densitat mesurades en l'assaig d'Arquímedes donaven valors més baixos que els últims, possiblement degut a imperfeccions superficials per on l'aigua pugui entrar i omplir alguns porus.

6.4. Fotografia microscòpica

A l'hora de comparar cada quadrant respecte els altres es veu com, en la majoria dels talls, els quadrants no tenen una porositat semblant entre ells. A més, no es pot trobar un patró que indiqui una semblança de porositats en alguns quadrants. Hi ha excepcions, per exemple el tall 1-0,05-6,3 de l'apartat 5.4.1. En aquest tall es pot veure com la porositat de la peça és molt baixa i a la vegada també precisa en tots els quadrants. Un altre exemple similar és el tall 3-0,05-9,7 de l'apartat 5.4.3. En canvi, el tall 2-0,05-9,75 (apartat 5.4.2.) no segueix aquest comportament uniforme. El primer i segon quadrant mostren porositats superficials baixes, de 0,86% i 0,75% respectivament. Mentre que el tercer i quart quadrant tenen porositats molt més altes, 8,47% i 5,75%, i no mostren semblança alguna.

Si es comparen els quadrants de cada tall dels cubs impresos amb una alçada de capa del 0,05 (1-0,05-3; 1-0,05-6,3...3-0,05-9,7 i 3-0,05-14,55) no es veu un patró de porositats similar. Per a 1-0,05-3 es veu una semblança amb el primer i el quart quadrant. Per a 1-0,05-6,3, tal com s'ha dit en el paràgraf anterior, és dels únics talls que mostra una porositat baixa i uniforme en tots els seus quadrants. En el cas de 1-0,05-8,5 es mostra una precisió en porositat superficial en el segon, tercer i quart quadrants (0,7% aproximadament) mentre que el primer quadrant té una porositat del 1,52%.

La majoria dels altres talls (apartat A2 de l'Annex) tenen porositats més altes i desiguals si es comparen tots els seus quadrants.

Al comparar totes les imatges obtingudes de totes les alçades de capa i cubs diferents, es pot veure com la tendència és que hi hagi menys porositats en el segon tall, situat majoritàriament en la meitat del cub. El primer tall i el tercer mostren més porositats, sobretot el tercer.

L'única semblança que tenen la majoria d'imatges és el patró que segueixen les porositats de la fotografia. En aquelles imatges on la porositat és baixa no es pot apreciar, però en les que superen un 3% es veu la mateixa tendència. Les porositats que estan alineades verticalment, mostren un patró de línies. Com és el cas de les imatges 2-0,1-4,9-4 o 2-0,15-4,9-1. A més, comparant aquestes dues imatges es pot observar com la distància entre les línies de porus verticals són diferents. Les distàncies de la imatge 2-0,1-4,9-4 són més petites perquè l'alçada de capa és 0,1 mm, mentre que les distàncies de les imatges 2-0,15-4,9-1 són més grans degut a que l'alçada de capa és de 0,15mm. Amb aquestes dues imatges es pot veure l'impacte del paràmetre alçada de capa.

6.5. Porositat superficial dels cubs

Visualitzant la gràfica 9 de l'apartat 5.5 i comparant-la amb les gràfiques de densitats de l'apartat 5.3, sembla que els resultats no siguin els adequats per a cada cub. En el cas dels tres primers cubs, si ens fixem en les gràfiques de densitat el més sensat és que el cub amb major porositat superficial hagués sigut el primer, en canvi, és el segon.

Amb els quart, cinquè i sisè cubs passa el mateix. Observant les gràfiques de densitat el raonament més sensat és pensar que la porositat més alta es trobi en el quart cub, però en la gràfica 9 es veu com el cub amb major porositat superficial és el sisè.

Per acabar, els cubs setè i vuitè mostren unes porositats de l'1% i del 3%. Aquests cubs haurien de ser els que menor porositat superficial tinguessin, ja que en les gràfiques de densitat són els que tenen els valors més alts. Però el vuitè mostra més porositat que el tercer i quart.

La gràfica 10 mostra com en els cubs d'alçada de capa de 0,1 mm s'observa més porositat que la resta, amb un valor de 4,10%. Seguit dels cubs impresos amb 0,05 mm amb un valor del 1,72%. L'alçada de capa que mostra menys porositats és la de 0,15 mm, amb un valor mitjà del 1,36%.

En la gràfica 11 es comparen les densitats obtingudes de l'assaig d'Arquímedes respecte les porositats de cada cub. Els cubs que mostren els pitjors valors de densitat i porositat són 2-0,1 i 3-0,1. Els que mostren major densitat i menor porositat són els cubs 1-0,15 i 3-0,05.

Finalment en la gràfica 12, s'observen com els cubs amb alçada de capa 0,1 mm són els que mostren els pitjors valors si es comparen amb la resta dels cubs, mentre que els cubs impresos a 0,15 mm tenen una menor porositat i una major densitat que els cubs de 0,05 mm.

Aquestes incongruències poden ser degudes a diversos fets que al llarg del projecte s'han anat qüestionant. El primer, pot ser al mesurar la densitat amb l'assaig d'Arquímedes, ja que al mesurar la densitat del cub dins l'aigua, és probable que les porositats superficials d'alguns cubs hagin permès a l'aigua entrar dins de les mostres i esbiaixar els valors de densitat reals. El segon, degut als mesuraments de les porositats superficials amb un microscopi i no a la mesura de la porositat amb SEM (Scanning Electron Micrograph). És possible que les mesures de les porositats superficials no hagin estat suficient per extrapolar els resultats de porositats del cub.

6.6. Dimensions dels porus

En el cas del primer cub, 1-0,05, hi ha certa variabilitat de diàmetres de porus. Però els més predominants són els de 2-5 μm , 5-8 μm i 14-17 μm .

El cub 2-0,05 conté una gran quantitat de porus amb un diàmetre d'entre 2-5 μm i 5-8 μm .

En el cas de 3-0,05 les porositats de 2-5 μm són les més habituals en tots els talls realitzats en el cub.

Comparant els tres cubs impresos amb una alçada de capa de 0,05 mm, es pot afirmar que la majoria de porus tenen un diàmetre entre 2 i 5 μm .

Passant als cubs de 0,1 mm, el cub 1-0,1 mostra el mateix comportament que el cub 1-0,05, predominen els porus de 2-5 μm , 5-8 μm i 14-17 μm .

El cub 2-0,1 principalment conté porus de diàmetre 2-5 μm i el cub 3-0,1 és el primer que mostra semblances en la quantitat de porus de diàmetres menors a 17 μm en alguns quadrants, com és el cas de la gràfica 3-0,1-4,80-3 o la 3-0,1-9,65-1.

Si es comparen els tres cubs amb alçada de capa de 0,1 mm s'observa el mateix comportament que amb els cubs de 0,05 mm; els porus dins del rang de 2 a 5 μm de diàmetre són els més habituals.

En el cas dels dos cubs impresos amb una alçada de capa de 0,15mm, segueixen el mateix comportament descrit que els anteriors cubs. Predomina una mida de porus de 2-5 μm .

Per tant, si s'observen totes les gràfiques es pot afirmar amb claredat que la majoria de porus tenen un diàmetre entre 2 i 14 micròmetres. Principalment el rang més habitual és entre 2 i 5 micròmetres. Remarcar que no hi ha porositats menors a dos micròmetres i que la longitud més petita mesurada és de 2,07 micròmetres. Les longituds més grans mesurades superen els 200 micròmetres.

6.7. Assaig de tracció

Observant les gràfiques es poden observar diverses diferències entre les dues provetes. En la primera proveta, el límit elàstic és d'uns 160 MPa, mentre que en la segona és de 185 MPa. En la primera proveta, la UTS (Ultimate Tensile Strength) té un valor de 487,26 MPa, mentre que en la segona és de 313,68 MPa. L'elongació és el valor més dispar que tenen entre elles. Abans d'arribar a la UTS, la primera proveta s'elonga un 52,592%. Un increment en longitud més de la meitat que la seva longitud inicial. En canvi, la segona proveta només s'elonga un 5,268%. Per tant, la primera proveta s'elonga 10 vegades més que la segona.

Tot i aquestes diferències, les dues gràfiques mostren semblances. Ninguna de les dues gràfiques mostra una plasticitat perfecta, només un enduriment per deformació. Tampoc mostren estricció, és a dir, una vegada s'arriba a la UTS, les dues provetes es trenquen.

Si es comparen els valors amb [53], la UTS i el límit elàstic de les provetes és més petit amb l'acer fabricat per mètodes convencionals, amb valors de 515 MPa i 205 MPa respectivament. Al comparar l'elongació, els valors són bastant similars si es compara amb la gràfica de la primera proveta, ja que l'elongació estimada per [53] és del 60%. Els valors de la resistència a la tracció de les dues provetes són molt semblants a les descrites en la Taula 5 [24][36][25][40][37] de l'aparat 3.2.3.2. La primera proveta es troba dintre del rang de valors de resistència a la tracció i elongació, en canvi, la segona proveta mostra una resistència menor que les comprovades en la Taula 5 i pràcticament no pateix una deformació, cosa que sí passa en les provetes de la Taula 5.

Deguda a la diferència observada en les deformacions de les dues provetes i la diferència entre la segona proveta i la Taula 5, es pot extrapolar que la segona proveta sigui defectuosa, possiblement causada per alguna esquerda.

7. Anàlisi de l'impacte ambiental

S'estudia el impacte de les emissions de CO₂ que directament han estat emesos en aquest projecte. No s'ha inclòs les emissions en la creació del material d'acer inoxidable 316L ni les emissions creades en el post-processat.

Amb una potència de 840W [54], amb la impressora Epsilon W27 s'han imprès 9 cubs amb els temps vistos a la Taula 8 i 4 provetes d'assaig amb un temps d'impressió de 2 hores. Per tant, s'ha consumit 19,74 kWh durant l'etapa de impressió.

La màquina embudidora té una potència de 1500 W [55], amb 27 mostres i un temps de 10 minuts per cada mostra s'ha consumit 6,75kWh.

La màquina de polir Labpol-5 té una potència de 320 W [56], el temps estimatiu que s'ha estat polint cada una de les 27 mostres són 3 hores per cada una. Per tant, s'ha consumit 25,92kWh.

Les emissions de CO₂ per viatger i per quilòmetre en el metro són de 23,7 g/vkm [57]. El trajecte realitzat en metro en cada viatge fins a la universitat són d'uns 8,6 quilòmetres i s'han fet uns 120 viatges. Per tant, s'han produït un total de 24,5 kg de CO₂ en el transport.

S'ha consumit un total de 52,41 kWh en el transcurs d'aquest projecte. Amb unes emissions de 278,4 g de CO₂/KWh a Espanya [58][59], 14,59 kg de CO₂ han estat produïts. Si se li suma les emissions produïdes en el transport, s'arriba a 39,09 kg de CO₂ emesos durant el transcurs d'aquest projecte.



Conclusions

En aquest treball s'han analitzat les densitats, porositats i dimensions de porus obtinguts de cubs de calibratge d'acer inoxidable 316L fabricats amb el mètode FFF, així com la impressió de provetes de tracció i el seu estudi.

Els resultats mostren com les porositats superficials són un factor crític quan es volen mesurar les densitats de mostres mitjançant l'assaig d'Arquímedes. Una bona solució seria polir les mostres amb algun mètode de post-processat abans de realitzar l'assaig. Els talls realitzats en cada un dels cubs mostra com, si el tall està massa a prop de la superfície, hi ha un augment en la porositat. No s'ha trobat un patró que pugui demostrar una uniformitat de percentatge de porositats en els 4 quadrants de cada tall dels cubs i tampoc s'ha trobat un patró que demostrï una homogeneïtat respecte al percentatge de porositats en tots els talls d'un cub. Però s'ha observat com la majoria de porositats de tots els cubs impresos, sigui quin sigui el valor d'alçada de capa, mostren unes longituds entre 2 i 5 micròmetres.

L'estudi del percentatge de porositats superficials en cada cub fet amb l'aplicació ImageJ no concorda amb els valors de densitat obtinguts. Una possible solució seria realitzar un estudi amb SEM per comparar els valors de porositat que s'obtinguin amb els de la porositat superficial.

El valor del paràmetre alçada de capa més adequat per imprimir els cubs són els de 0,05 mm i els de 0,15 mm. No està clar quin dels dos és el valor òptim degut a la inconsistència i falta de proves entre els gràfics de porositat i densitat. El que s'ha pogut concloure és que els cubs impresos amb valors de 0,1 mm han obtingut menor densitats i major porositats superficials.

Les provetes de tracció impreses en el pla XZ no s'han pogut assajar degut a que en el post-processat les provetes s'han deformat, degut a l'efecte de la gravetat a l'hora de la impressió de la mostra i la deformació causada pel post-processat. La primera proveta impresa en el pla XY mostra uns valors molt similars als de provetes del mateix material. Els valors de la segona proveta no són tan bons, possiblement degut a dislocacions o fractures microscòpiques en la proveta.

S'ha d'estudiar més en detall els efectes del "debinding" i "sintering" en el post-processat de mostres, depenent de la geometria de la peça, la temperatura i la pressió. S'hauria d'estudiar les mostres abans i després del post-processat per comparar els resultats i l'efecte dels processos en les peces.



Pressupost i/o Anàlisi Econòmica

Utilitzant l'energia calculada en l'apartat del impacte ambiental, 52,41 kWh, i el preu actual del kWh a Espanya que és de 0,2966 €/kWh s'han gastat 15,55 € aproximadament en el transcurs d'aquest projecte.

En el cas del material utilitzat:

Material comprat	Cost [€]	Unitats	Total [€]
Hotend M	174,95	1	174,95
Magigoo 3D Printing adhesive	41	1	41
460g de filament BASF Ultrafuse 316L	71,8	---	71,8
Discs abrasius	1,2	21	25,2
Draps de polir	22	4	88

En el cas de la mà d'obra:

Mà d'obra	Hores invertides [h]	Cost per hora [€/h]	Total [€]
Enginyer Júnior	750	11	8250
Tècnic de laboratori	8	13	104
Tècnic de laboratori	25	13	325

Per tant, el cost total del projecte ha estat de 9.079,95€

Bibliografia

- [1] GIBSON, I., 2021. Additive manufacturing technologies. Third edition. Cham, Switzerland: Springer. ISBN 3-030-56127-5.
- [2] HUI, W., HU, Y., LIU, Y., CAI, Q. y ZHAO, W., 2023. Ablation Characteristics Research in Solid Rocket Motor's Combustion Chamber Produced by 3D Printing. *Materials*, vol. 16, no. 8, pp. 3021-. ISSN 1996-1944. DOI 10.3390/ma16083021.
- [3] Journal of 3D printing in medicine., 2017. London, UK : #b Future Medicine Ltd., #c [2017]-: s.n.
- [4] 3D printing in medicine., 2015. London, United Kingdom: SpringerOpen.
- [5] Art, I. (2022). How concrete homes are built with A 3D printer [Video]. In *YouTube*.
<https://www.youtube.com/watch?v=vL2KoMNzGTo>
- [6] RepRap. (n.d.). *RepRap*. RepRap. Retrieved June 5, 2023, from <https://reprap.org/wiki/RepRap>
- [7] Gregurić, L. (2020, February 25). Historia de la impresión 3D: Fechas clave. All3DP.
<https://all3dp.com/es/2/impresion-3d-historia-fechas-clave/>
- [8] Markforged. (2022, March 7). Additive manufacturing: History, where we're at now, drivers of industry growth. Markforged. <https://markforged.com/es/resources/blog/additive-manufacturing-history-from-the-1980s-to-now>
- [9] Kaushik, K., Divya, Z., & Paulo, D., J. (2019). Additive manufacturing technologies from an optimization perspective (p. 3). IGI Global.
- [10] NURHUDAN, A.I., SUPRIADI, S., WHULANZA, Y. y SARAGIH, A.S., 2021. Additive manufacturing of metallic based on extrusion process: A review. *Journal of manufacturing processes*, vol. 66, pp. 228-237. ISSN 1526-6125. DOI 10.1016/j.jmapro.2021.04.018.

- [11] TOSTO, C., TIRILLÒ, J., SARASINI, F. y CICALA, G., 2021. Hybrid metal/polymer filaments for fused filament fabrication (FFF) to print metal parts. *Applied sciences*, vol. 11, no. 4, pp. 1-. ISSN 2076-3417. DOI 10.3390/app11041444.
- [12] SUWANPREECHA, C. y MANONUKUL, A., 2022. A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding. *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 3, pp. 429-. ISSN 2075-4701. DOI 10.3390/met12030429.
- [13] LIU, B., WANG, Y., LIN, Z. y ZHANG, T., 2020. Creating metal parts by Fused Deposition Modeling and Sintering. *Materials letters*, vol. 263, pp. 127252-. ISSN 0167-577X. DOI 10.1016/j.matlet.2019.127252.
- [14] BCN3D. (S.F.) Introducing Metal Kit. Retrieved June 4, 2023
- [15] BOSCHETTO, A., BOTTINI, L., MIANI, F. y VENIALI, F., 2022. *Roughness investigation of steel 316L parts fabricated by Metal Fused Filament Fabrication. Journal of manufacturing processes*, vol. 81, pp. 261-280. ISSN 1526-6125. DOI 10.1016/j.jmapro.2022.06.077.
- [16] BASF. (n.d.). *forward-AM_OnePager_Ultrafuse316L Process Instructions.indd*.
- [17] BASF. (2021, January 8). *Ultrafuse 316L 3D printer metal filament*. BASF 3D Printing Materials and Services. <https://forward-am.com/material-portfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-fabrication-fff/metal-filaments/ultrafuse-316l/>
- [18] Protolabs. (2019). *Sinterizado directo de metal por láser: Acero inoxidable 316L*. <https://doi.org/https://www.protolabs.com/media/1022990/acero-inoxidable-316l-1-4404.pdf>
- [19] BCN3D. (2021, December 13). *Ultrafuse 316L*. BCN3D Technologies. <https://www.bcn3d.com/es/producto/ultrafuse-316l/>

- [20] Basf. (2021). *Ultrafuse 316L*. Technical data sheet. https://www.ultrafuseff.com/wp-content/uploads/2019/11/Ultrafuse_316L_Technical_Data_Sheet_TDS.pdf
- [21] M A240 / A240M-05a. (2004). Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications. In: Ussa.su.
- [22] ZHANG, Y., BAI, S., RIEDE, M., GARRATT, E. y ROCH, A., 2020. A comprehensive study on fused filament fabrication of Ti-6Al-4V structures. *Additive manufacturing*, vol. 34, pp. 101256-. ISSN 2214-8604. DOI 10.1016/j.addma.2020.101256.
- [23] Shergill, K., Chen, Y., & Bull, S. (2023). An investigation into the layer thickness effect on the mechanical properties of additively manufactured polymers: PLA and ABS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(7–8), 3651–3665. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11270-y>
- [24] TOSTO, C., TIRILLO, J., SARASINI, F., SERGI, C. y CICALA, G., 2022. Fused Deposition Modeling Parameter Optimization for Cost-Effective Metal Part Printing. *Polymers*, vol. 14, no. 16, pp. 3264-. ISSN 2073-4360. DOI 10.3390/polym14163264.
- [25] KUROSE, T., ABE, Y., SANTOS, M.V.A., KANAYA, Y., ISHIGAMI, A., TANAKA, S. y ITO, H., 2020. Influence of the layer directions on the properties of 316l stainless steel parts fabricated through fused deposition of metals. *Materials*, vol. 13, no. 11, pp. 2493-. ISSN 1996-1944. DOI 10.3390/ma13112493.
- [26] DABWAN, A., ANWAR, S., AL-SAMHAN, A.M., ALFAIFY, A. y NASR, M.M., 2021. Investigations on the effect of layers' thickness and orientations in the machining of additively manufactured stainless steel 316l. *Materials*, vol. 14, no. 7, pp. 1797-. ISSN 1996-1944. DOI 10.3390/ma14071797.

- [27] YAKOUT, M., ELBESTAWI, M.A. y VELDHUIS, S.C., 2019. Density and mechanical properties in selective laser melting of Invar 36 and stainless steel 316L. *Journal of materials processing technology*, vol. 266, pp. 397-420. ISSN 0924-0136. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2018.11.006.
- [28] HASSAN, W., FARID, M.A., TOSI, A., RANE, K. y STRANO, M., 2021. The effect of printing parameters on sintered properties of extrusion-based additively manufactured stainless steel 316L parts. *International journal of advanced manufacturing technology*, vol. 114, no. 9-10, pp. 3057-3067. ISSN 0268-3768. DOI 10.1007/s00170-021-07047-w.
- [29] THOMPSON, Y., GONZALEZ-GUTIERREZ, J., KUKLA, C. y FELFER, P., 2019. Fused filament fabrication, debinding and sintering as a low cost additive manufacturing method of 316L stainless steel. *Additive manufacturing*, vol. 30, pp. 100861-. ISSN 2214-8604. DOI 10.1016/j.addma.2019.100861.
- [30] KAN, X., YANG, D., ZHAO, Z. y SUN, J., 2021. 316L FFF binder development and debinding optimization. *Materials research express*, vol. 8, no. 11, pp. 116515-. ISSN 2053-1591. DOI 10.1088/2053-1591/ac3b15.
- [31] WANG, X., MUÑIZ-LERMA, J.A., ATTARIAN SHANDIZ, M., SANCHEZ-MATA, O. y BROCHU, M., 2019. Crystallographic-orientation-dependent tensile behaviours of stainless steel 316L fabricated by laser powder bed fusion. *Materials science & engineering. A, Structural materials : properties, microstructure and processing*, vol. 766, pp. 138395-. ISSN 0921-5093. DOI 10.1016/j.msea.2019.138395.
- [32] PARK, K., PARK, J. y KWON, H., 2017. Fabrication and characterization of Al-SUS316L composite materials manufactured by the spark plasma sintering process. *Materials science & engineering. A, Structural materials : properties, microstructure and processing*, vol. 691, pp. 8-15. ISSN 0921-5093. DOI 10.1016/j.msea.2017.03.029.

- [33] U.P. Metals, Stainless 316, 316L, 317, 317L, in: U.P. Metals (Ed.)
- [34] 3D systems. (2023, June 11). *Safety Data Sheet LaserForm 316L (A)*. 3D Systems.
https://printer-docs-public.s3.amazonaws.com/sites/default/files/sds-files/production/dmp/316L_A/151803_S12_2_SDS%20GHS_UK-English_LaserForm%20316L%20%28A%29.pdf
- [35] Eryildiz, M. (2021). Effect of build orientation on mechanical behaviour and build time of FDM 3d-printed PLA parts: An experimental investigation. *European Mechanical Science*, 5(3), 116–120. <https://doi.org/10.26701/ems.881254>
- [36] GONG, H., SNELLING, D., KARDEL, K. y CARRANO, A., 2019. Comparison of Stainless Steel 316L Parts Made by FDM- and SLM-Based Additive Manufacturing Processes. *JOM* (1989), vol. 71, no. 3, pp. 880-885. ISSN 1047-4838. DOI 10.1007/s11837-018-3207-3.
- [37] SADAF, M., BRAGAGLIA, M. y NANNI, F., 2021. A simple route for additive manufacturing of 316L stainless steel via Fused Filament Fabrication. *Journal of manufacturing processes*, vol. 67, pp. 141-150. ISSN 1526-6125. DOI 10.1016/j.jmapro.2021.04.055.
- [38] *316L stainless steel - MIM materials*. (n.d.). Optimim. Retrieved June 4, 2023, from <https://www.optimim.com/metal-injection-molding-mim/material-options/stainless-steel/mim-316l>
- [39] BRYTAN, Z., 2017. Comparison of Vacuum Sintered and Selective Laser Melted Steel AISI 316L. *Archives of metallurgy and materials*, vol. 62, no. 4, pp. 2125-2131. ISSN 1733-3490. DOI 10.1515/amm-2017-0314.
- [40] DAMON, J., DIETRICH, S., GORANTLA, S., POPP, U., OKOLO, B. y SCHULZE, V., 2019. Process porosity and mechanical performance of fused filament fabricated 316L stainless steel.

Rapid prototyping journal, vol. 25, no. 7, pp. 1319-1327. ISSN 1355-2546. DOI 10.1108/RPJ-01-2019-0002.

- [41] Yoon, T. S., Lee, Y. H., Ahn, S. H., Lee, J. H., & Lee, C. S. (2003). Effects of sintering conditions on the mechanical properties of metal injection molded 316L Stainless Steel. *ISIJ International*, 43(1), 119–126. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.119>
- [42] ZHANG, Y., FENG, E., MO, W., LV, Y., MA, R., YE, S., WANG, X. y YU, P., 2018. On the microstructures and fatigue behaviors of 316L stainless steel metal injection molded with gas-and water-atomized powders. *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 11, pp. 893-. ISSN 2075-4701. DOI 10.3390/met8110893.
- [43] Afian, M., & Subuki, I. (2012). Sintering characteristics of injection moulded 316L component using palm-based biopolymer binder. In *Sintering - Methods and Products*. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/32737>
- [44] ESHKABILOV, S., ARA, I., SEVOSTIANOV, I., AZARMI, F. y TANGPONG, X., 2021. Mechanical and thermal properties of stainless steel parts, manufactured by various technologies, in relation to their microstructure. *International journal of engineering science*, vol. 159, pp. 103398-. ISSN 0020-7225. DOI 10.1016/j.ijengsci.2020.103398.
- [45] Mertens, A., Reginster, S., Paydas, H., Contrepolis, Q., Dormal, T., Lemaire, O., & Lecomte-Beckers, J. (2014). Mechanical properties of alloy Ti–6Al–4V and of stainless steel 316L processed by selective laser melting: Influence of out-of-equilibrium microstructures. *Powder Metallurgy*, 57(3), 184–189. <https://doi.org/10.1179/1743290114y.0000000092>
- [46] PENG, T. y YAN, F., 2018. Dual-objective Analysis for Desktop FDM Printers: Energy Consumption and Surface Roughness. *Procedia CIRP*. S.l.: Elsevier B.V, pp. 106-111. DOI 10.1016/j.procir.2017.11.084.

- [47] AGARWALA, M.K., JAMALABAD, V.R., LANGRANA, N.A., SAFARI, A., WHALEN, P.J. y DANFORTH, S.C., 1996. Structural quality of parts processed by fused deposition. Rapid prototyping journal, vol. 2, no. 4, pp. 4-19. ISSN 1355-2546. DOI 10.1108/13552549610732034.
- [48] DURÃO, L.F.C.S., BARKOCZY, R., ZANCUL, E., LEE HO, L. y BONNARD, R., 2019. Optimizing additive manufacturing parameters for the fused deposition modeling technology using a design of experiments. Progress in additive manufacturing, vol. 4, no. 3, pp. 291-313. ISSN 2363-9512. DOI 10.1007/s40964-019-00075-9.
- [49] MarkusMay. (2018, August 29). *The file format STL and its importance for 3D printing*. 3Faktur. <https://3faktur.com/en/the-file-format-stl-and-its-importance-for-3d-printing/>
- [50] Thingiverse.com. (2016, January 19). *XYZ 20mm Calibration Cube by iDig3Dprinting*. Thingiverse. <https://www.thingiverse.com/thing:1278865>
- [51] EMB-V-BA-e-1624. (2016, April). Kern-Sohn. <https://dok.kern-sohn.com/manuals/files/English/EMB-V-BA-e-1624.pdf>
- [52] Hanon, M. M. (n.d.). *Fig. 1 a Print orientations of tensile test specimens; b print...* ResearchGate. Retrieved September 13, 2023, from https://www.researchgate.net/figure/a-Print-orientations-of-tensile-test-specimens-b-print-orientations-of-tribology-test_fig1_341430663
- [53] Asm. (n.d.). *ASM material data sheet*. ASM Aerospace Specification Metals Inc. Retrieved September 16, 2023, from <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mq316q>
- [54] BCN3D. (n.d.). *BCN3D Epsilon W27 (Gen 2)*. Specifications. Retrieved June 4, 2023, from <https://www.bcn3d.com/documents/BCN3D-Datasheet-Epsilon-W27-EN.pdf>
- [55] Struers. (2008). *LaboPress-3 Instruction Manual*. Struers.

- [56] Struers. (2013). *Labopol-1 Labopol-2 Labopol-3 Labopol-4 Labopol-5 Instruction Manual*.
Struers.
- [57] *Movilidad sostenible con TMB*. (n.d.). Transports Metropolitans de Barcelona. Retrieved September 17, 2023, from <https://www.tmb.cat/es/sobre-tmb/calidad-medio-ambiente/movilidad-sostenible>
- [58] *Live 24/7 CO₂ emissions of electricity consumption*. (n.d.). Live 24/7 CO₂ Emissions of Electricity Consumption. Retrieved September 17, 2023, from <https://app.electricitymaps.com/zone/ES?lang=fr>
- [59] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, G. de E. (n.d.). *Emisiones de gases de efecto invernadero en España*. Ministerio Para La Transición Ecológica y El Reto Demográfico. Retrieved September 17, 2023, from <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/emisiones.html>
- [60] GONZALEZ-GUTIERREZ, J., ARBEITER, F., SCHLAUF, T., KUKLA, C. y HOLZER, C., 2019. Tensile properties of sintered 17-4PH stainless steel fabricated by material extrusion additive manufacturing. *Materials letters*, vol. 248, pp. 165-168. ISSN 0167-577X. DOI 10.1016/j.matlet.2019.04.024.
- [61] Markforged. (n.d.). Material Datasheet 17-4 PH Stainless Steel. Retrieved June 11, 2023, from https://static.markforged.com/downloads/markforged_datasheet_17-4_ph_stainless_steel.pdf
- [62] SEDLAK, J., RICAN, D., PISKA, M. y ROZKOSNY, L., 2015. Study of Materials Produced by Powder Metallurgy Using Classical and Modern Additive Laser Technology. *Energy Procedia*. S.I.: Elsevier Ltd, pp. 1232-1241. DOI 10.1016/j.proeng.2015.01.488.

- [63] e-Manufacturing Solutions. (n.d.). EOSINT M Materials for direct metal laser sintering (DMLS). 3dimpuls. Retrieved June 11, 2023, from https://www.3dimpuls.com/sites/default/files/dok_book/m_materials_en.pdf
- [64] PONNUSAMY, P., MASOOD, S.H., PALANISAMY, S., RAHMAN RASHID, R.A. y RUAN, D., 2017. Characterization of 17-4PH alloy processed by selective laser melting. Materials Today: Proceedings, vol. 4, no. 8, pp. 8498-8506. ISSN 2214-7853. DOI 10.1016/j.matpr.2017.07.196.
- [65] 3D systems. (n.d.). LaserForm 17-4PH for ProX DMP 100, 200 and 300 Direct Metal Printers. 3D Systems. Retrieved June 11, 2023, from https://de.3dsystems.com/sites/default/files/2017-06/3D-Systems_17-4_PH_%28B%29_DMP_DATASHEET_US_A4_2017.06.21_WEB.pdf
- [66] IBRAHIM, K.A., WU, B. y BRANDON, N.P., 2016. Electrical conductivity and porosity in stainless steel 316L scaffolds for electrochemical devices fabricated using selective laser sintering. Materials & design, vol. 106, pp. 51-59. ISSN 0264-1275. DOI 10.1016/j.matdes.2016.05.096.
- [67] TruForm Metal Powders. (2023, June 11). TruForm™ Metal Powders for Additive Manufacturing. I3dmfg. <https://www.i3dmfg.com/wp-content/uploads/2019/01/TruForm-64-Metal-Powder.pdf>
- [68] Renishaw. (n.d.). Ti6Al4V ELI-0406 powder for additive manufacturing. Renishaw. Retrieved June 11, 2023, from <https://www.renishaw.com/resourcecentre/es/details/Data-sheet-Ti6Al4V-ELI-0406-powder-for-additive-manufacturing--94700?lang=English>
- [69] Systèmes, D. (2022). What is VAT Photopolymerization (SLA, DLP, CDLP)? [Video]. In YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=2zvxfzC6prk>

- [70] Özel, T. (n.d.). Fig. 1 A typical laser powder bed fusion for layers built on the XY... ResearchGate. Retrieved September 23, 2023, from https://www.researchgate.net/figure/A-typical-laser-powder-bed-fusion-for-layers-built-on-the-XY-surface-with-Z-build_fig1_337445319
- [71] Baich, L. (n.d.). Figure 1 Material extrusion process. ResearchGate. Retrieved September 23, 2023, from https://www.researchgate.net/figure/Material-extrusion-process_fig1_295396135
- [72] Dávila, J. L. (n.d.). Illustration of the directed energy deposition (DED) process; the... ResearchGate. Retrieved September 23, 2023, from https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-the-directed-energy-deposition-DED-process-the-deposition-head-defines_fig1_344339380
- [73] voxeljet. (2018). How does the Binder Jetting 3D printing process work? [Video]. In YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=hjloGPZPNjU>
- [74] A, N. (2017, January 10). 3D printing processes - Material jetting (part 7/8). Engineers Garage. <https://www.engineersgarage.com/3d-printing-processes-material-jetting-part-7-8/>
- [75] Testing, N. A. &. (2021). Episode 23: Process principle of sheet lamination (LOM) [Video]. In YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=XTmL_2BA4dc
- [76] Wang, Zhang, L., Li, X., & Yan, Z. (2021). On hot isostatic pressing sintering of fused filament fabricated 316L stainless steel – Evaluation of microstructure, porosity, and tensile properties. *Materials Letters*, 296, 129854–. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129854>
- [77] Thompson, Gonzalez-Gutierrez, J., Kukla, C., & Felfer, P. (2019). Fused filament fabrication, debinding and sintering as a low cost additive manufacturing method of 316L stainless steel. *Additive Manufacturing*, 30, 100861–. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100861>



Annex

A1. Estratègies dels paràmetres d'impressió

A continuació s'adjunten captures de pantalla del programa Stratos amb els paràmetres d'impressió dels cubs i de les provetes. No tots els paràmetres que surten a les imatges han estat modificats i la resta que no surten a les imatges s'han deixat amb els valors per defecte.

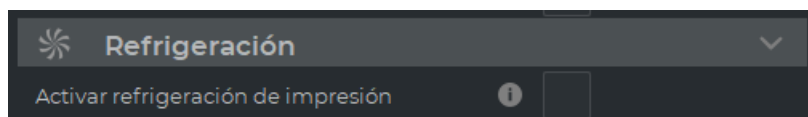
Els paràmetres dels cubs són tots els mateixos, menys el paràmetre "Altura de capa".

Iteració de cubs amb 0,05 mm d'alçada de capa

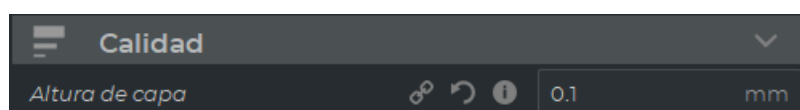
Calidad			
Altura de capa			0.05 mm
Altura de capa inicial			0.15 mm
Ancho de línea			0.3 mm
Ancho de línea de pared			0.3 mm
Ancho de línea de la pared exterior			0.3 mm
Ancho de línea de pared(es) interna(s)			0.35 mm
Ancho de línea de la capa inicial			120 %

Relleno			
Densidad de relleno			100 %
Distancia de línea de relleno			0.4 mm
Patrón de relleno			Concéntrico

Material			
Temperatura de impresión			245 °C
Temperatura de impresión de la capa inicial			245 °C
Temperatura de impresión inicial			245 °C
Temperatura de impresión final			245 °C
Temperatura de la placa de impresión			105 °C
Temperatura de la p... en la capa inicial			105 °C
Flujo			100 %



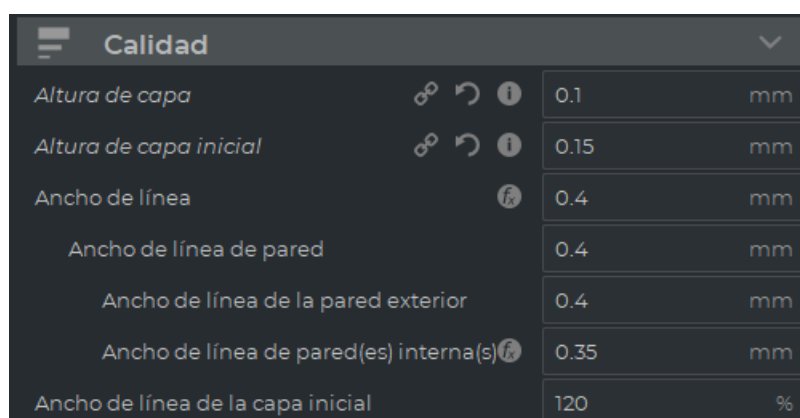
Iteració de cubs amb 0,1 mm d'alçada de capa



Iteració de cubs amb 0,15 mm d'alçada de capa



Provetes



Perímetro		
Grosor de la pared	<input type="text" value="0.8"/>	mm
Recuento de líneas de pared	<input type="text" value="2"/>	
Grosor superior/inferior	<input type="text" value="0.8"/>	mm
Grosor superior	<input type="text" value="0.8"/>	mm
Capas superiores	<input type="text" value="2"/>	
Grosor inferior	<input type="text" value="0.8"/>	mm
Capas inferiores	<input type="text" value="2"/>	
Patrón superior/inferior	<input type="text" value="Concéntrico"/>	▼
Optimizar el orden de impresión de paredes	<input checked="" type="checkbox"/>	

Perímetro		
Grosor de la pared	<input type="text" value="0.8"/>	mm
Recuento de líneas de pared	<input type="text" value="2"/>	
Grosor superior/inferior	<input type="text" value="0.8"/>	mm
Grosor superior	<input type="text" value="0.8"/>	mm
Capas superiores	<input type="text" value="2"/>	
Grosor inferior	<input type="text" value="0.8"/>	mm
Capas inferiores	<input type="text" value="2"/>	
Patrón superior/inferior	<input type="text" value="Concéntrico"/>	▼
Optimizar el orden de impresión de paredes	<input checked="" type="checkbox"/>	

Relleno		
Densidad de relleno	<input type="text" value="100"/>	%
Distancia de línea de relleno	<input type="text" value="0.4"/>	mm
Patrón de relleno	<input type="text" value="Concéntrico"/>	▼

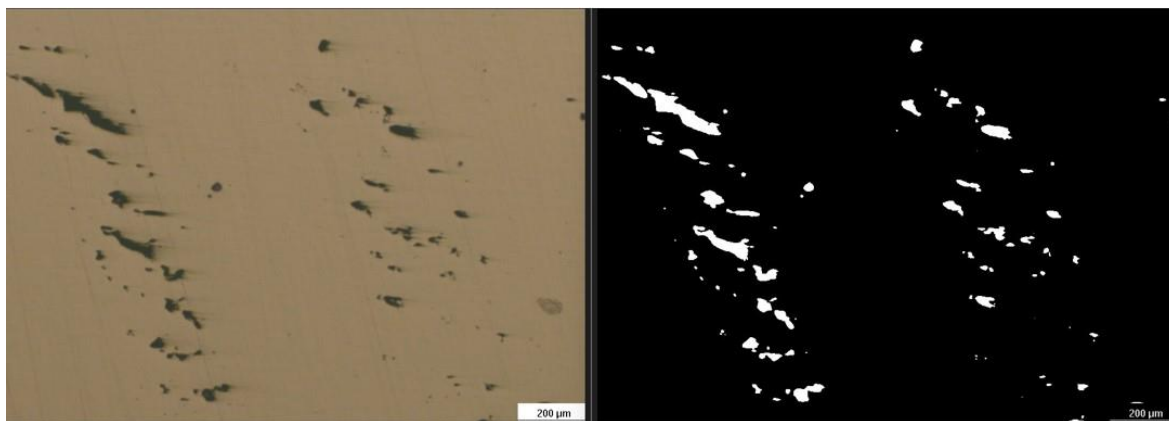
Material			
Temperatura de impresión		245	°C
Temperatura de impresión de la capa inicial		245	°C
Temperatura de impresión inicial		245	°C
Temperatura de impresión final		245	°C
Temperatura de la placa de impresión		105	°C
Temperatura de la p... en la capa inicial		105	°C
Flujo		100	%

Velocidad		
Velocidad de impresión	30	mm/s

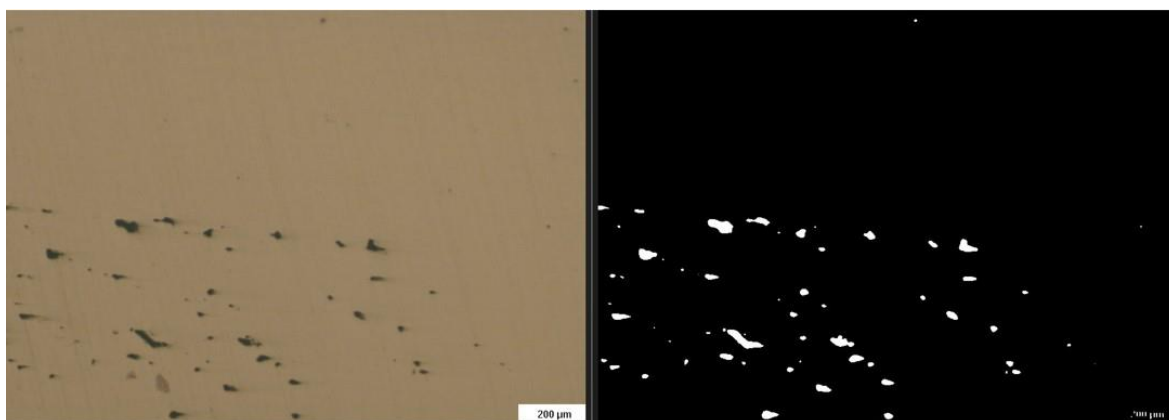
Refrigeración	
Activar refrigeración de impresión	<input type="checkbox"/>

A2. Fotografia microscòpica

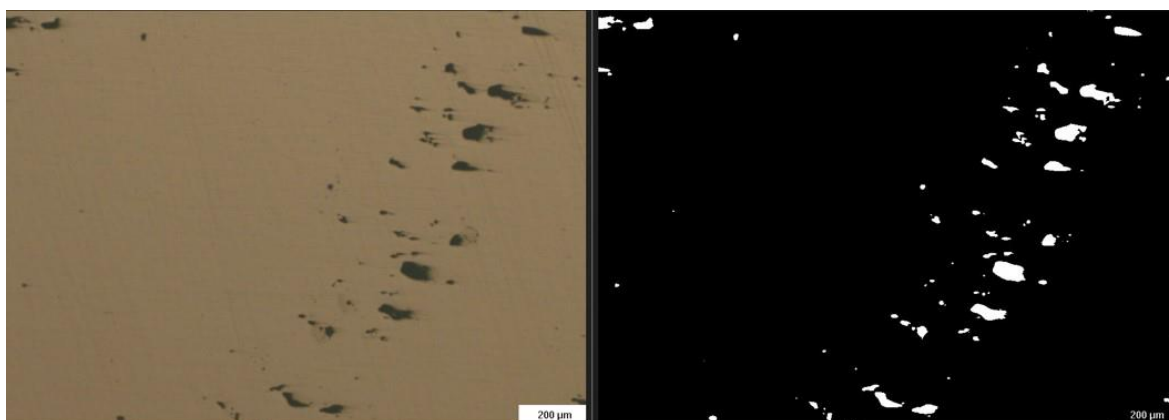
1-0,05-3



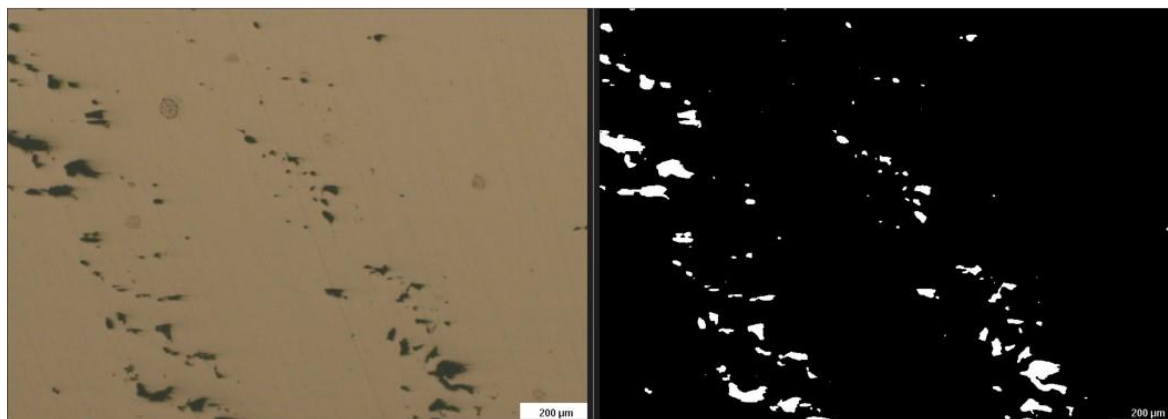
1r quadrant



2n quadrant

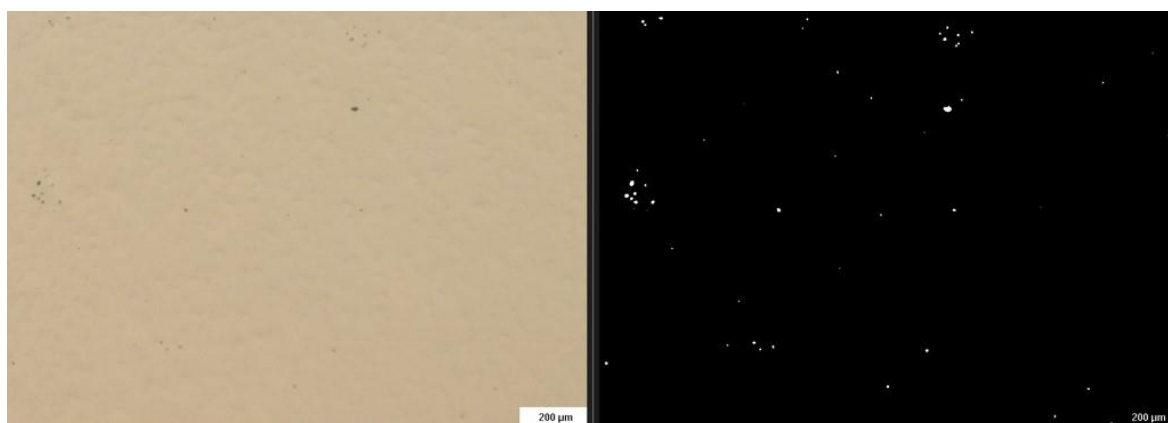


3r quadrant

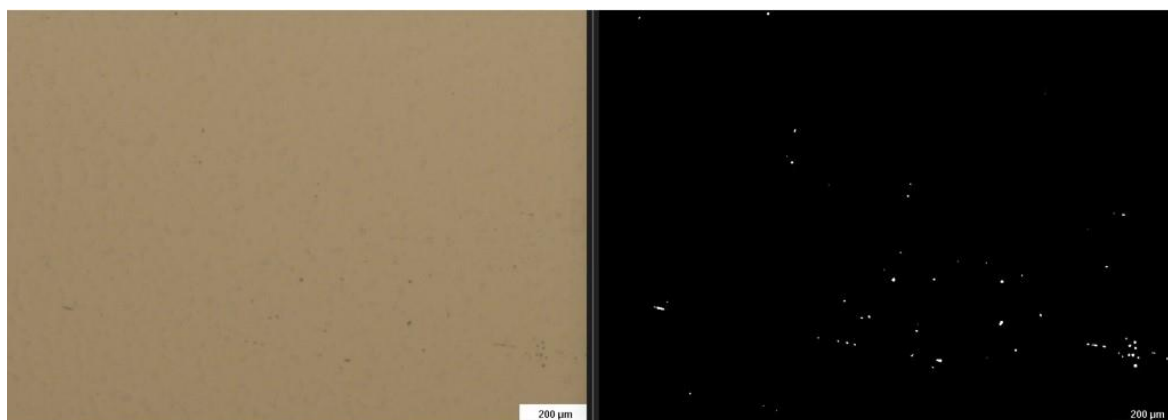


4t quadrant

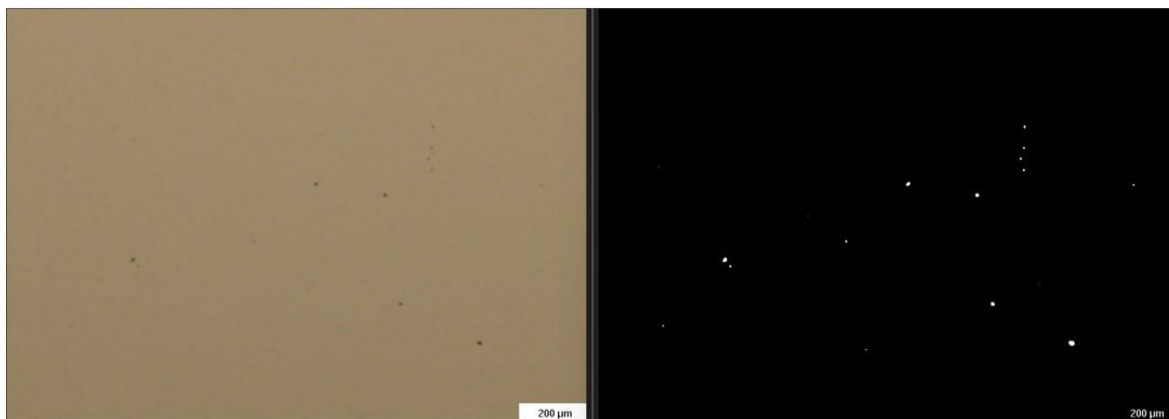
1-0,05-6,3



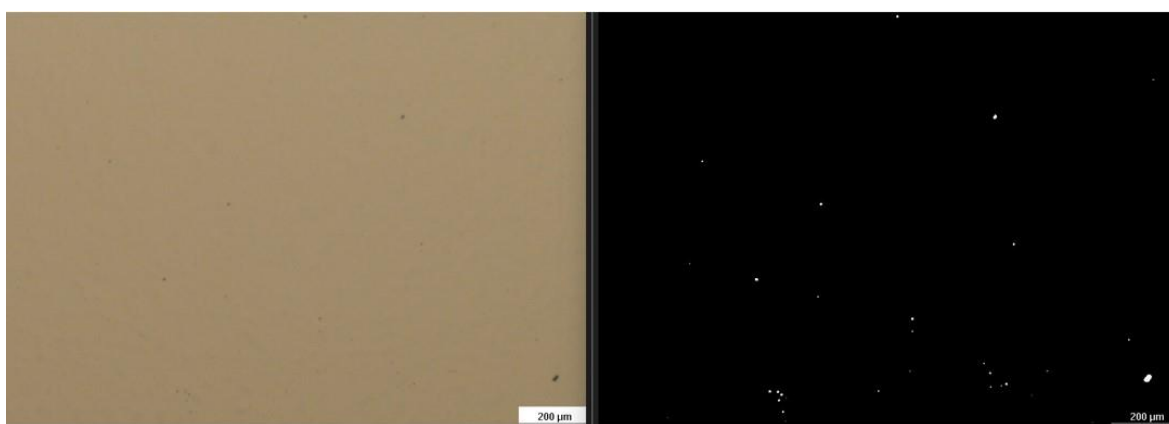
1r quadrant



2n quadrant

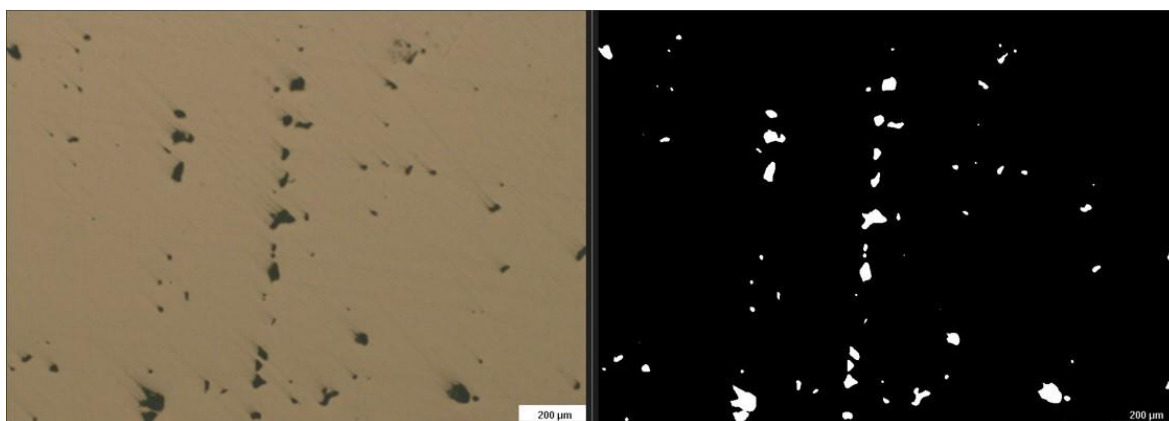


3r quadrant

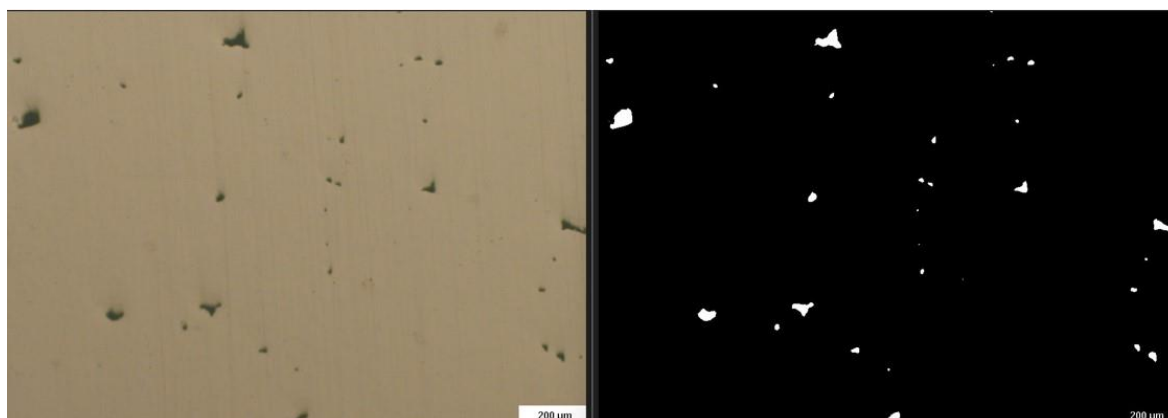


4t quadrant

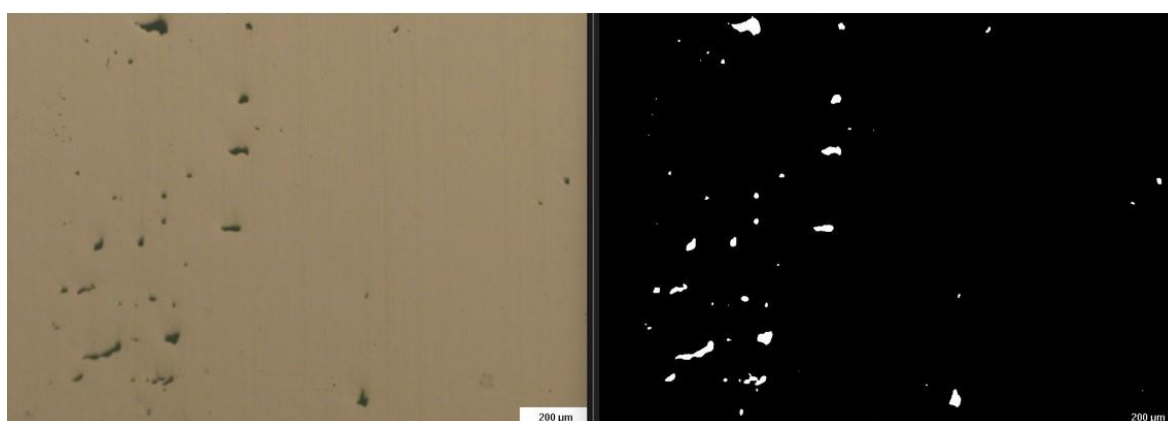
1-0,05-8,5



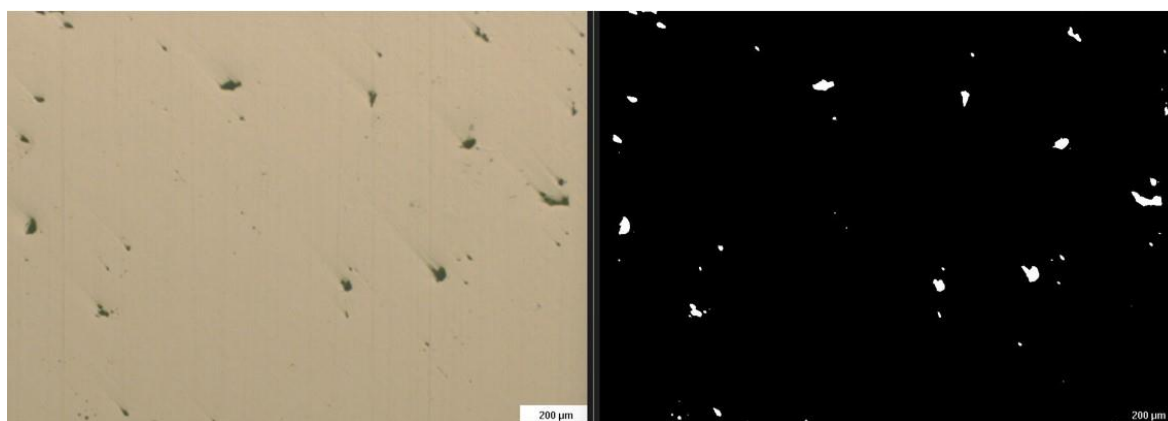
1r quadrant



2n quadrant

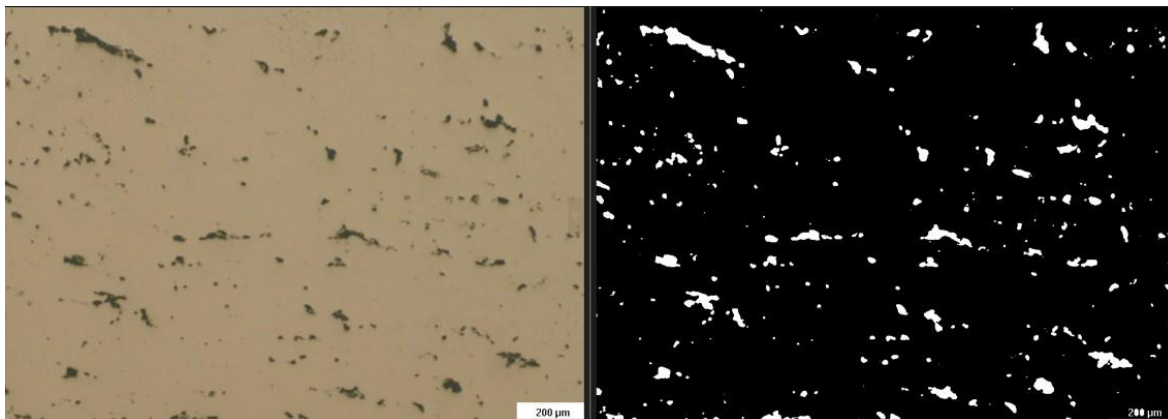


3r quadrant

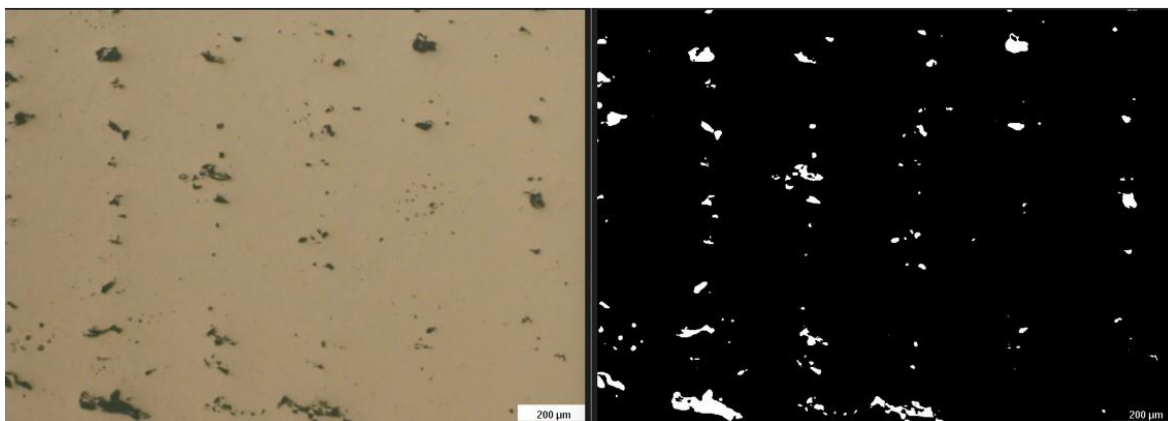


4t quadrant

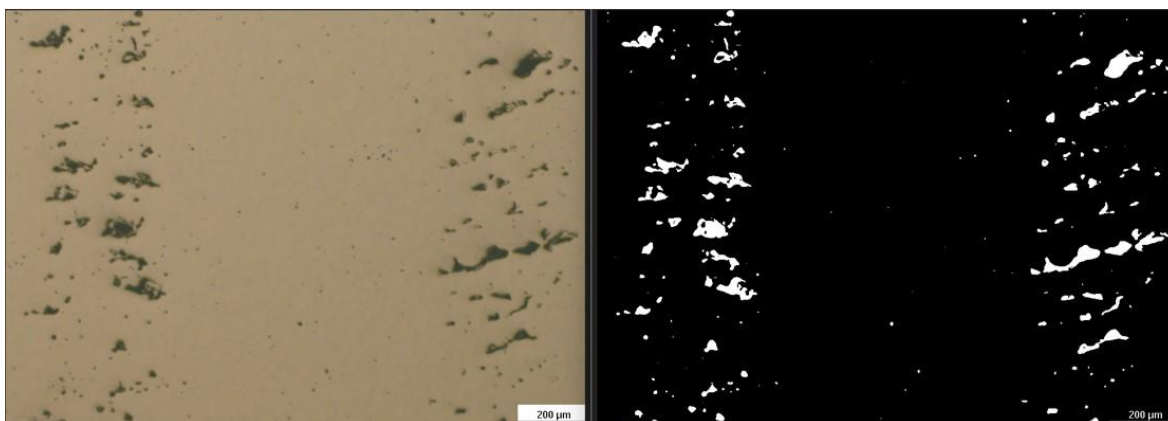
2-0,05-5



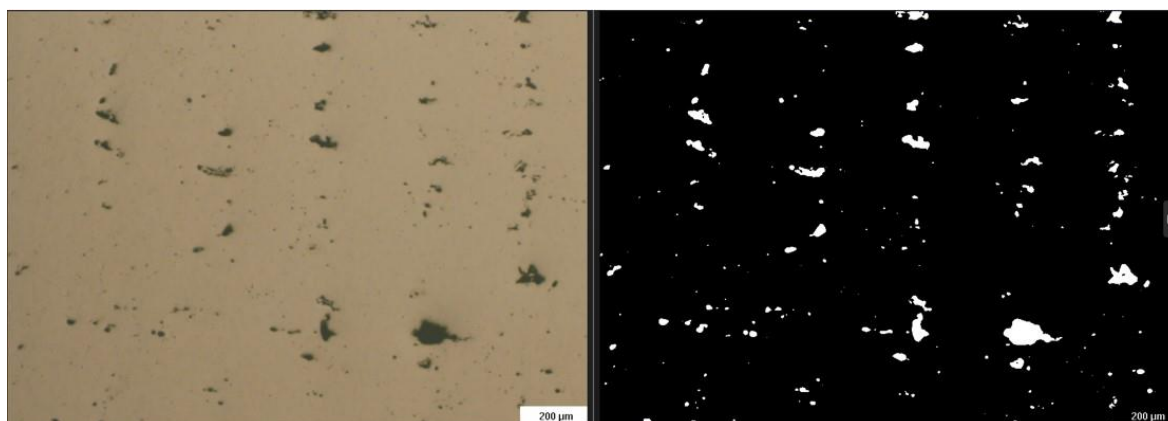
1r quadrant



2n quadrant

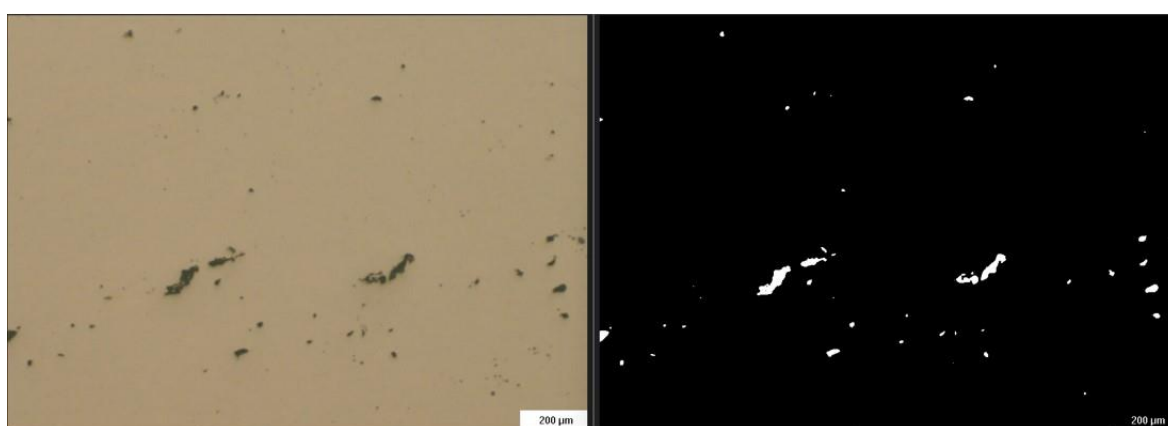


3r quadrant

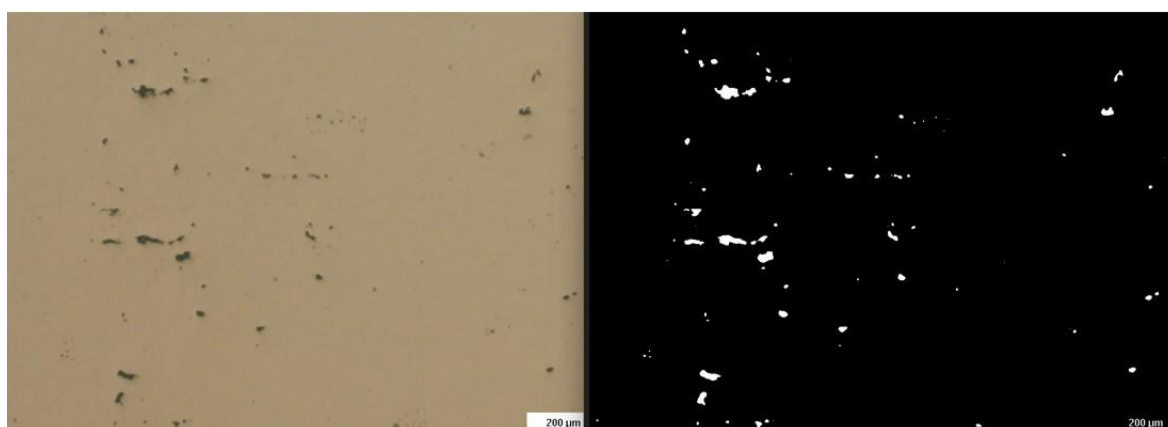


4t quadrant

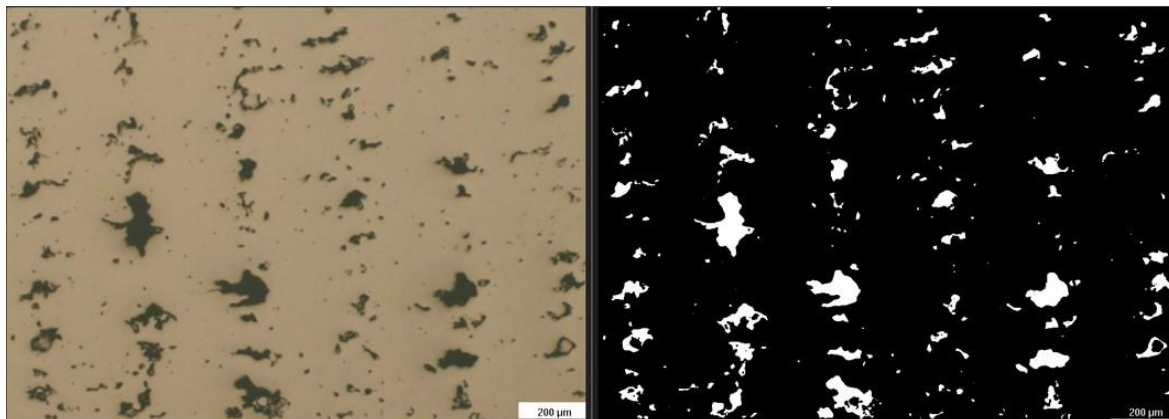
2-0,05-9,75



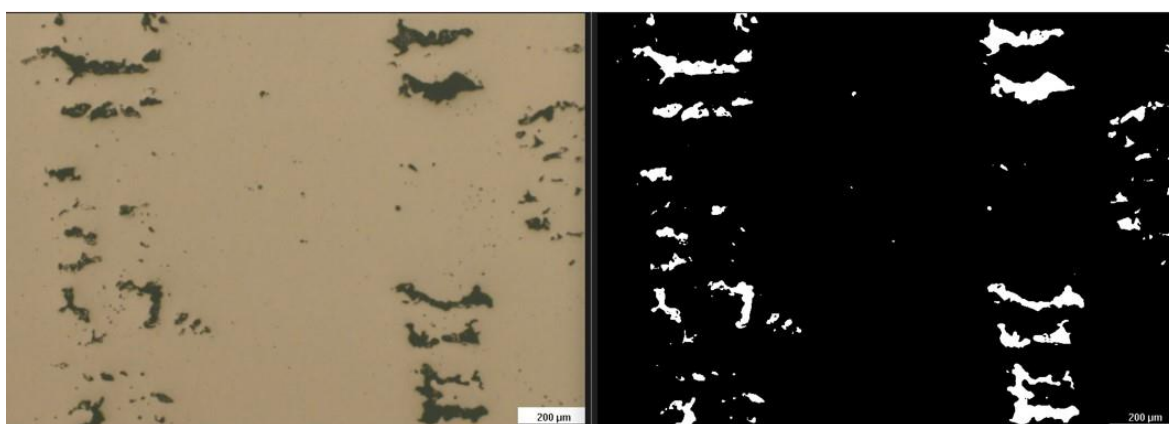
1r quadrant



2n quadrant

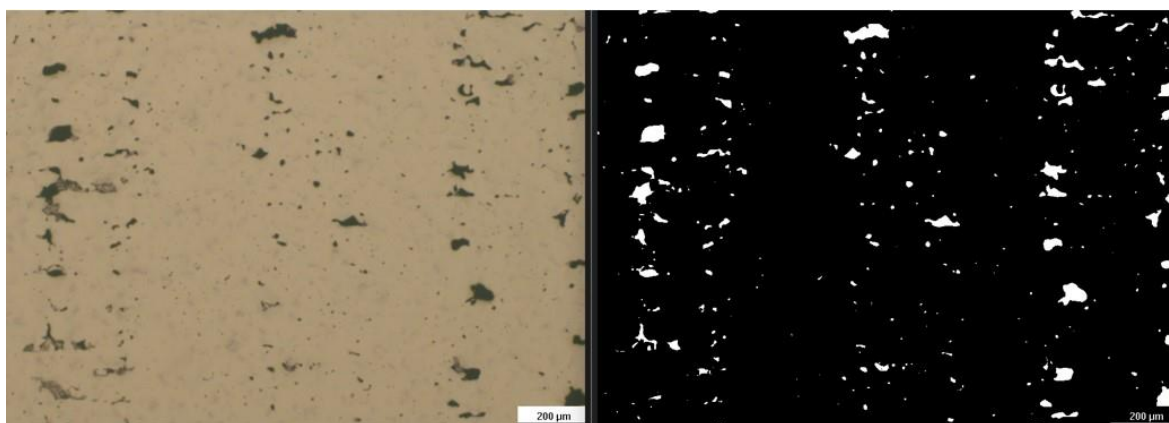


3r quadrant

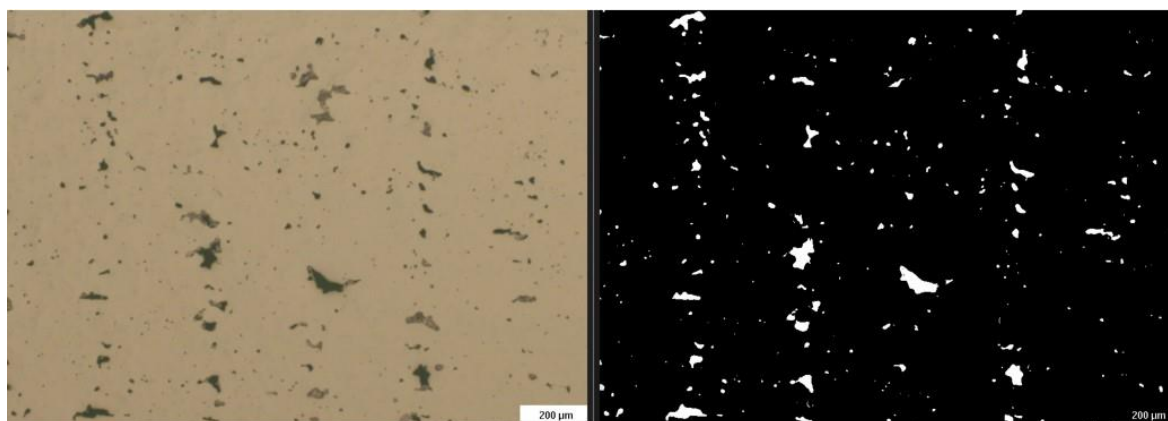


4t quadrant

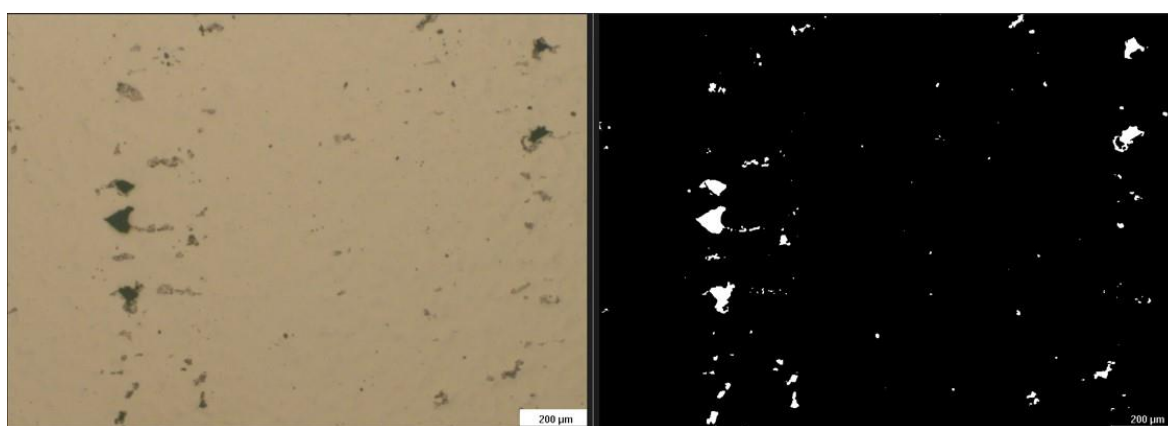
2-0,05-14,55



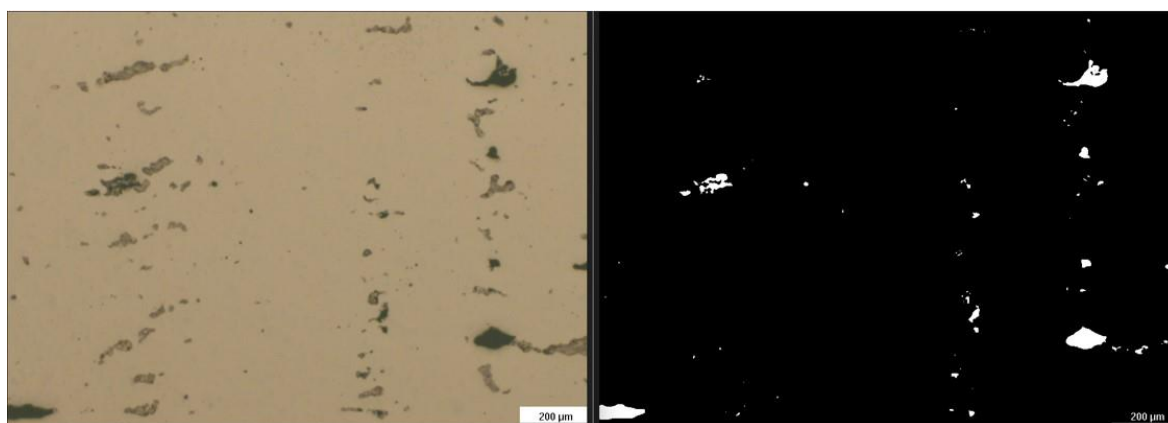
1r quadrant



2n quadrant



3r quadrant

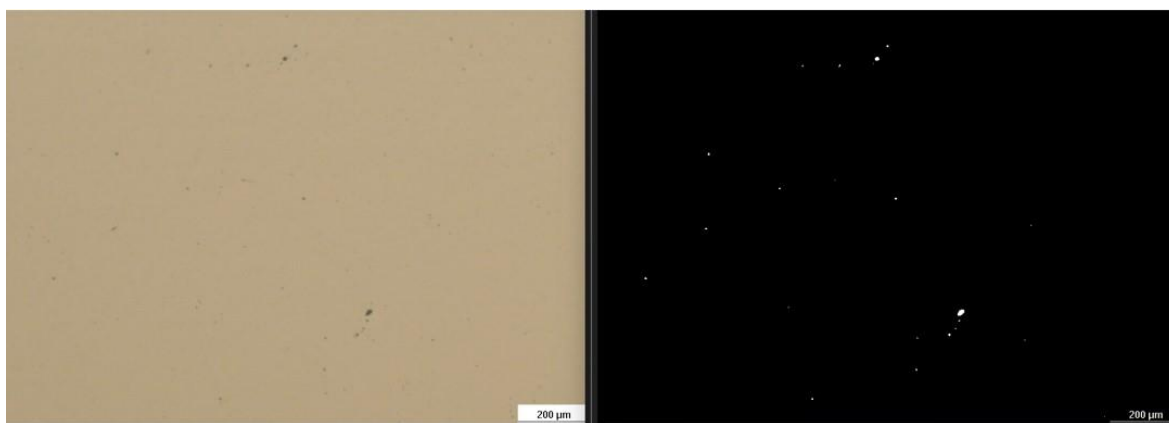


4t quadrant

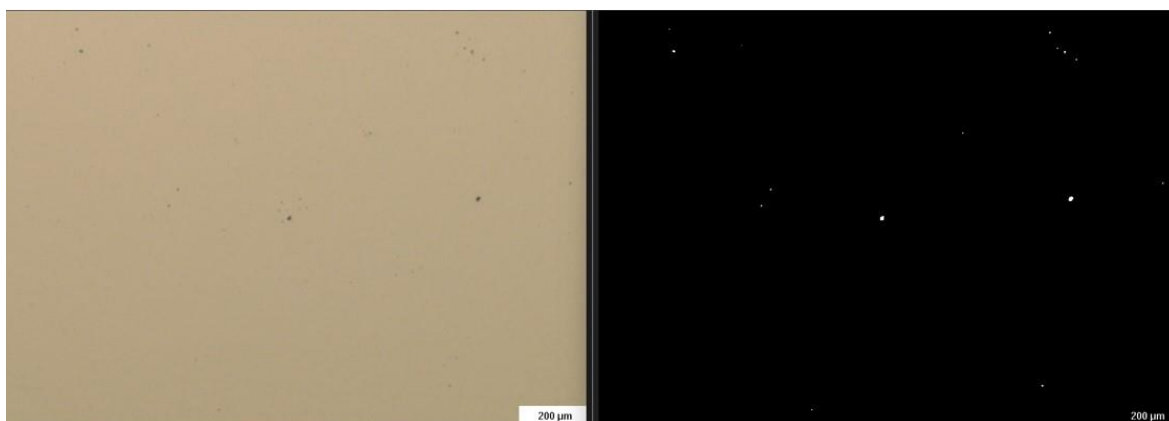
3-0,05-3,8



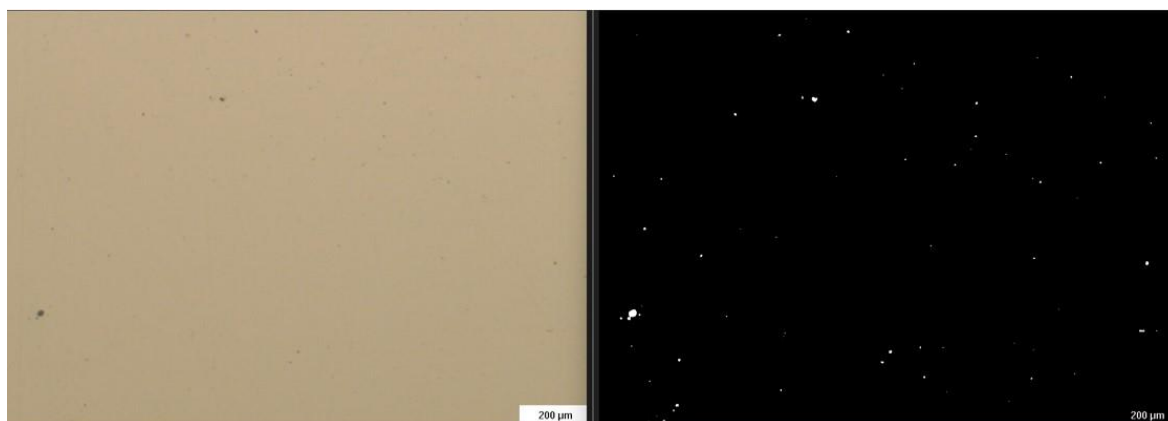
1r quadrant



2n quadrant



3r quadrant



4t quadrant

3-0,05-9,7



1r quadrant



2n quadrant

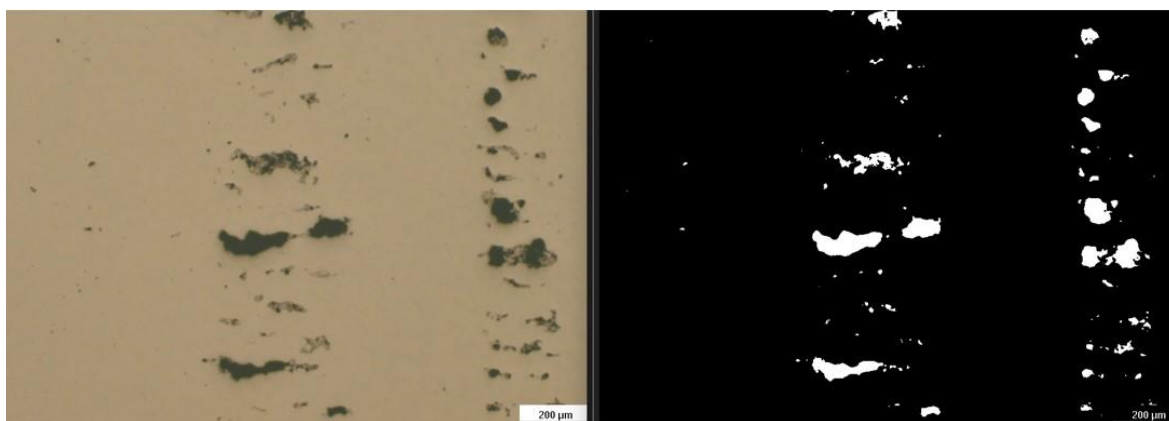


3r quadrant

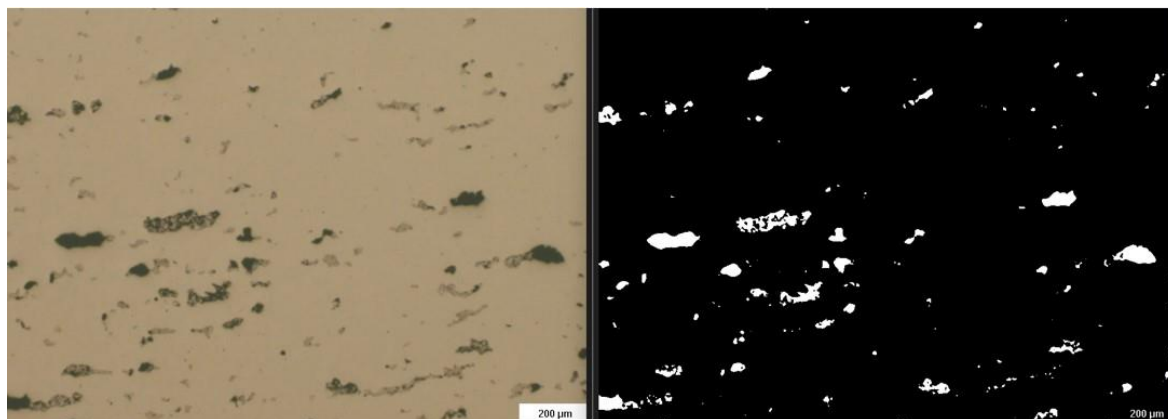


4t quadrant

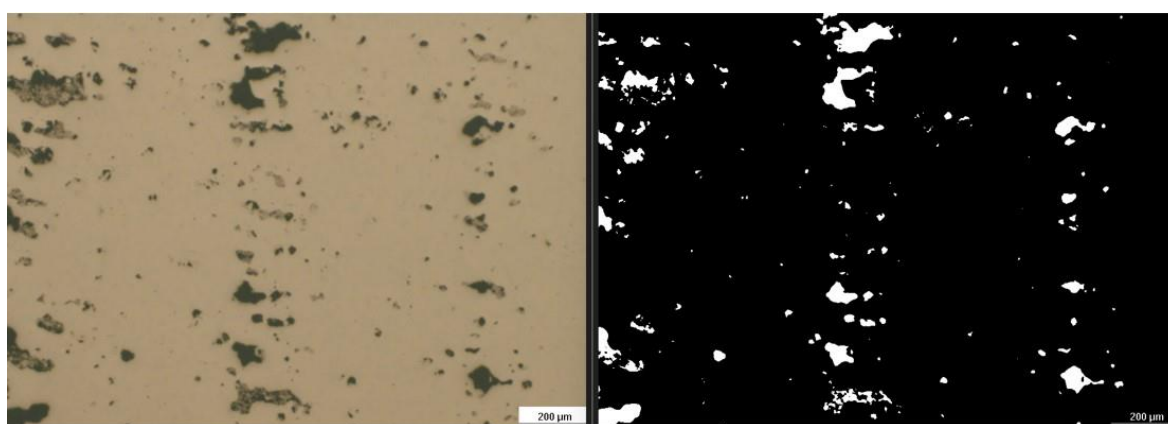
3-0,05-14,55



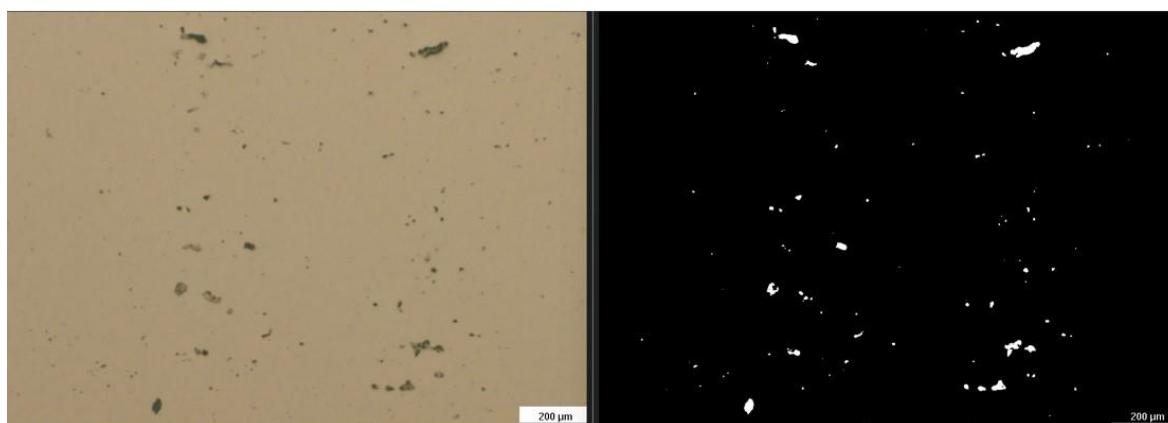
1r quadrant



2n quadrant

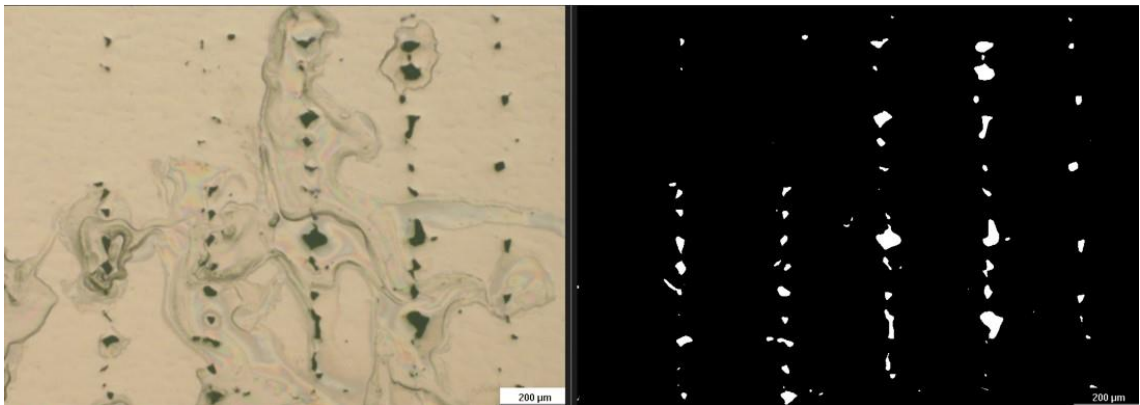


3r quadrant

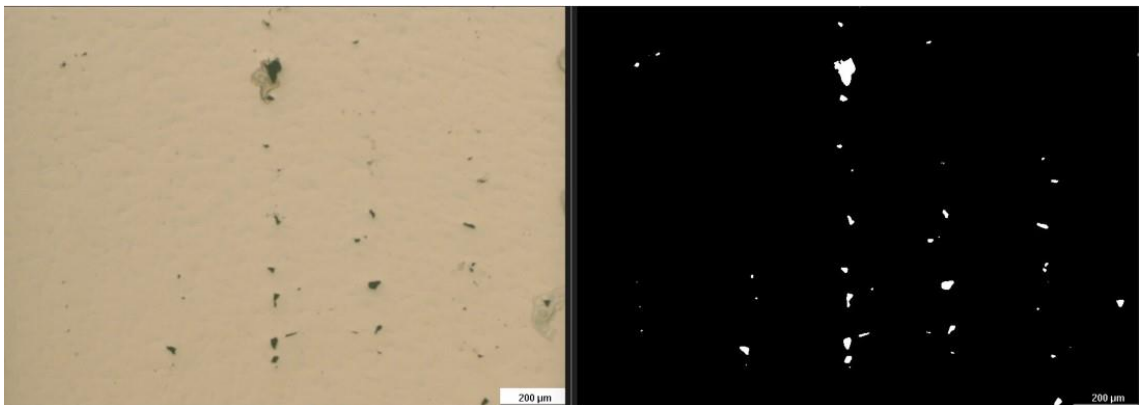


4t quadrant

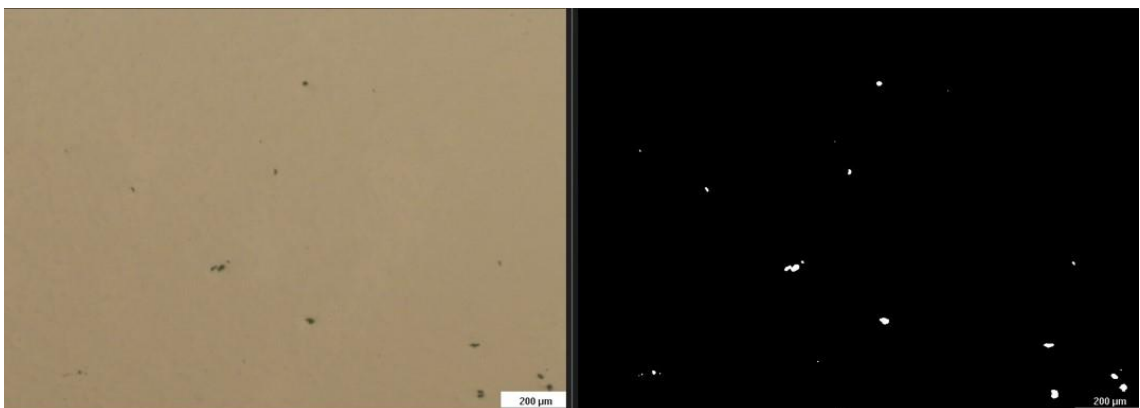
1-0,1-2,85



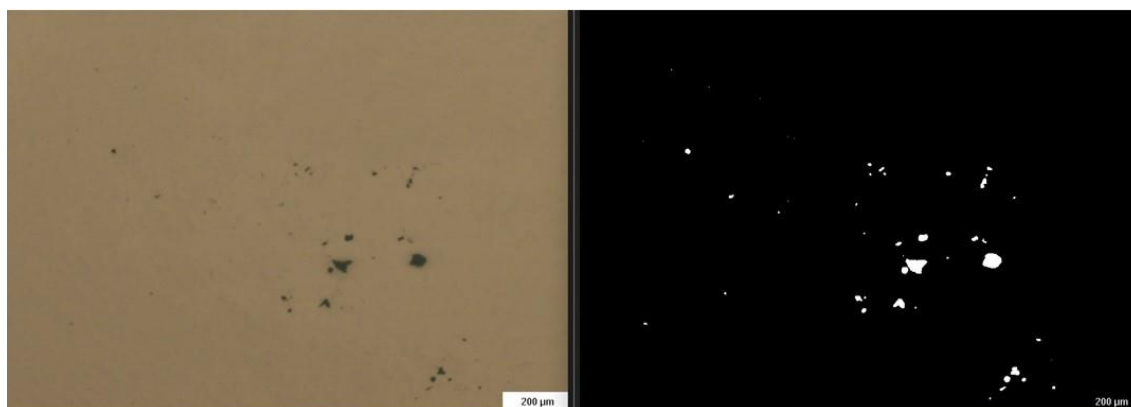
1r quadrant



2n quadrant



3r quadrant

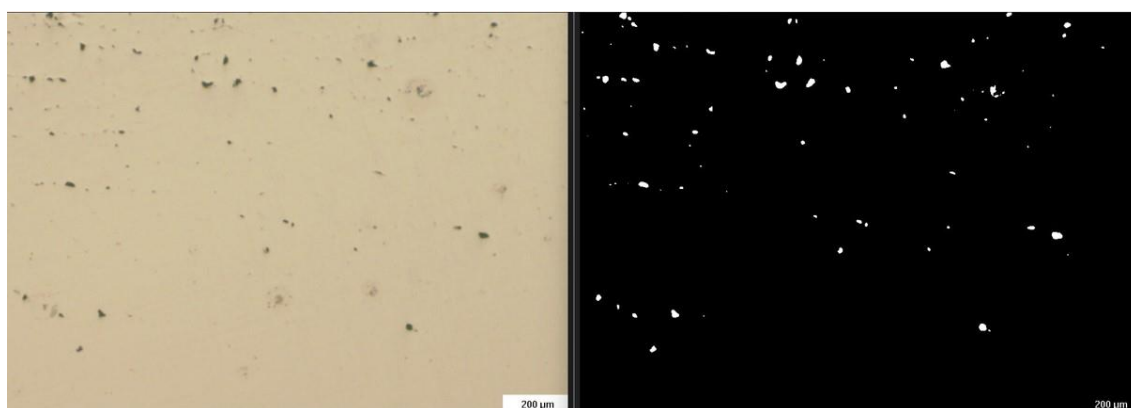


4t quadrant

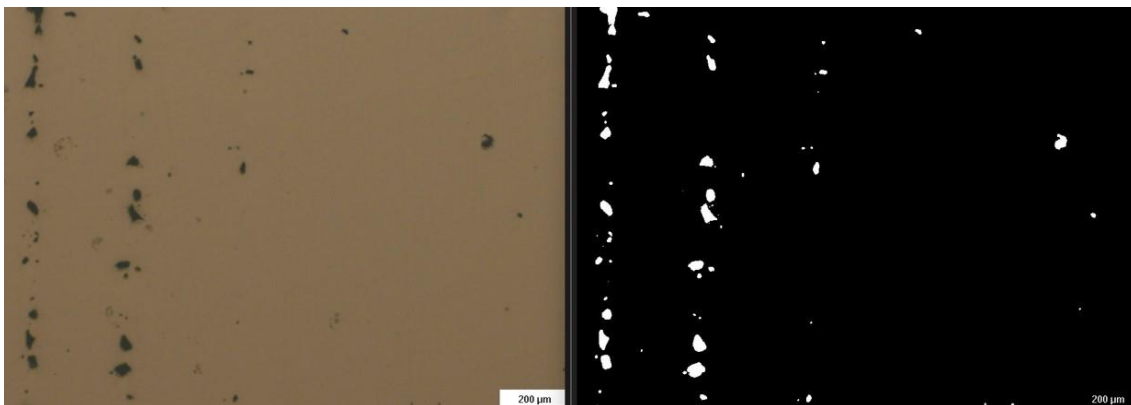
1-0,1-5,30



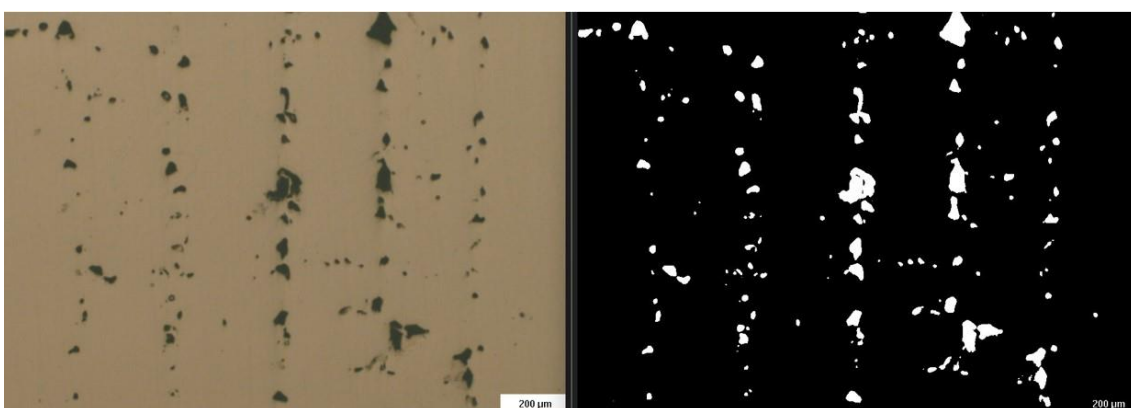
1r quadrant



2n quadrant

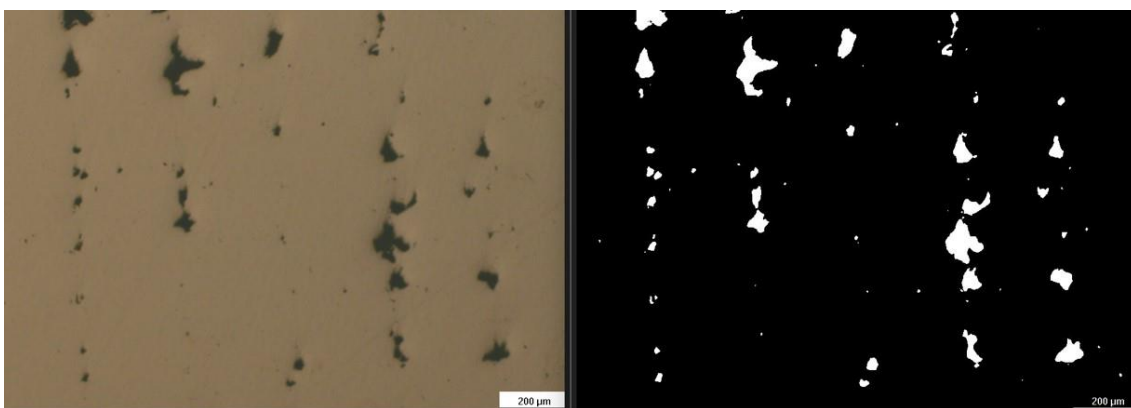


3r quadrant

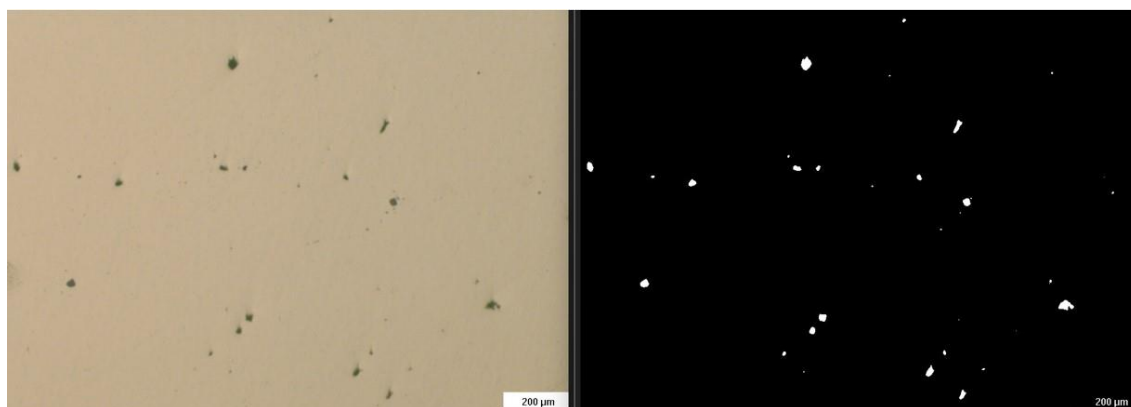


4t quadrant

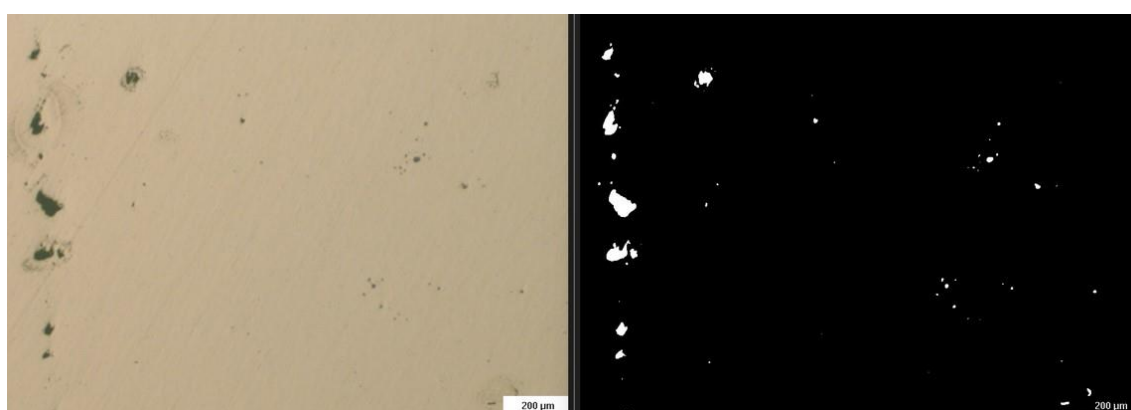
1-0,1-8,30



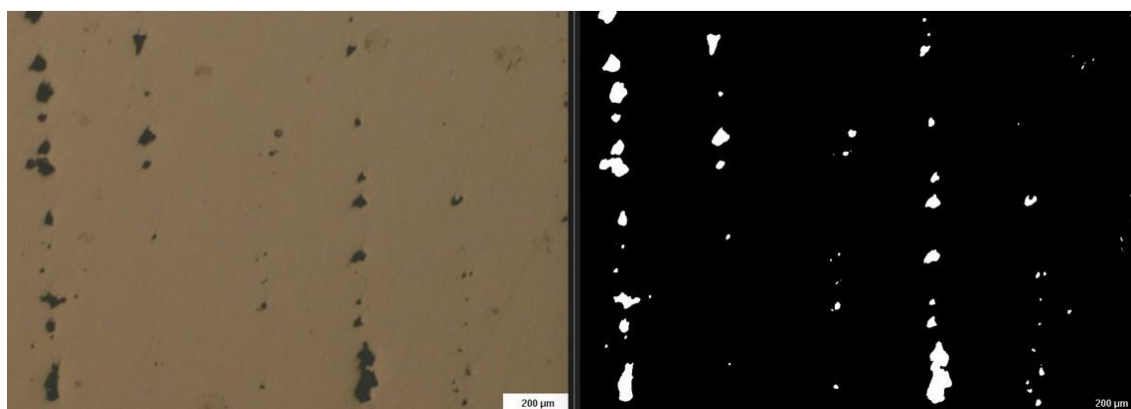
1r quadrant



2n quadrant

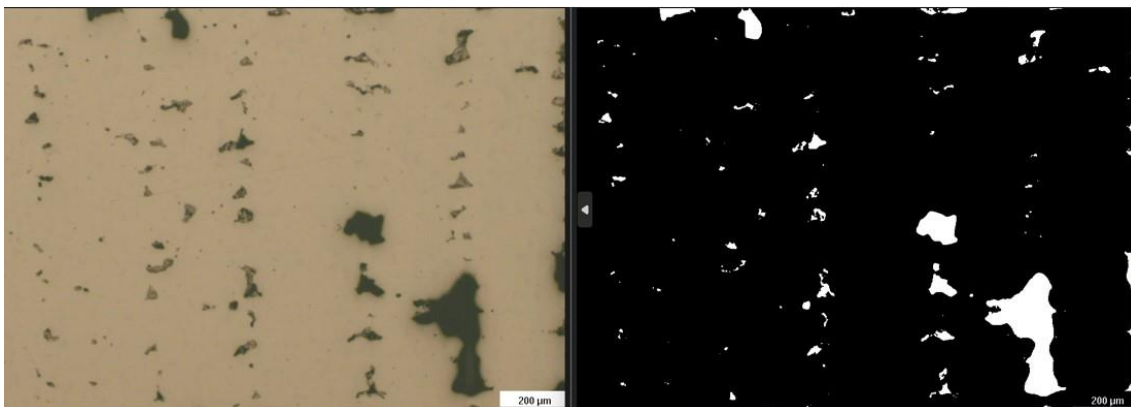


3r quadrant

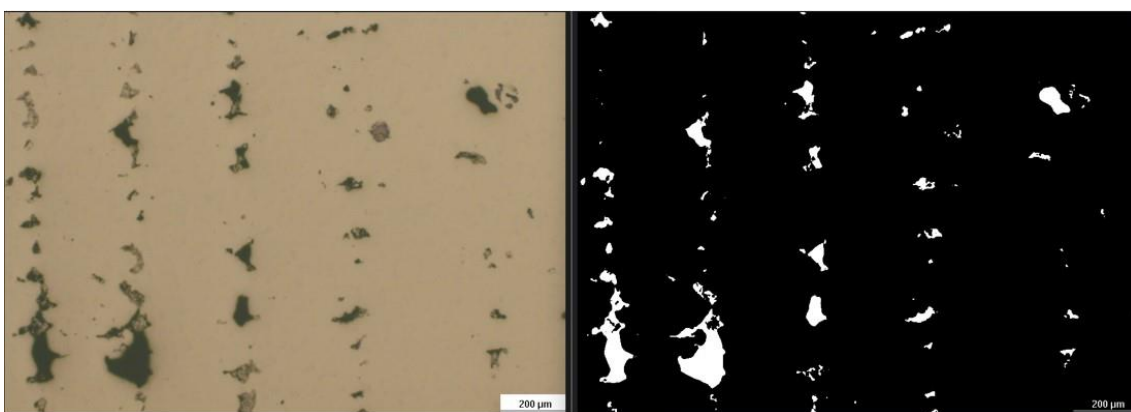


4t quadrant

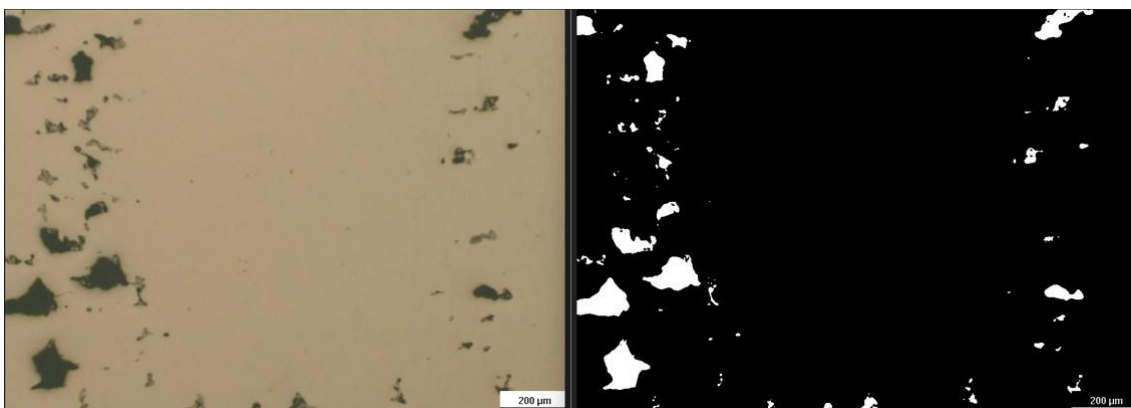
2-0,1-4,90



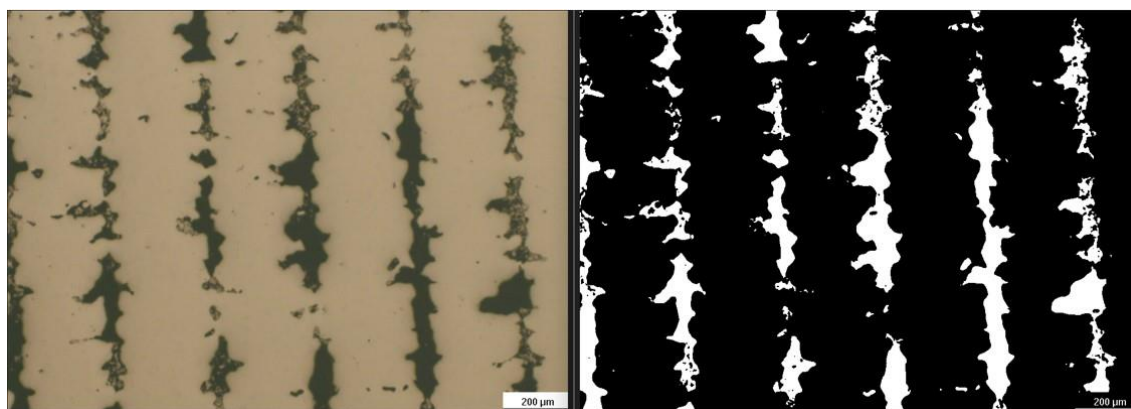
1r quadrant



2n quadrant

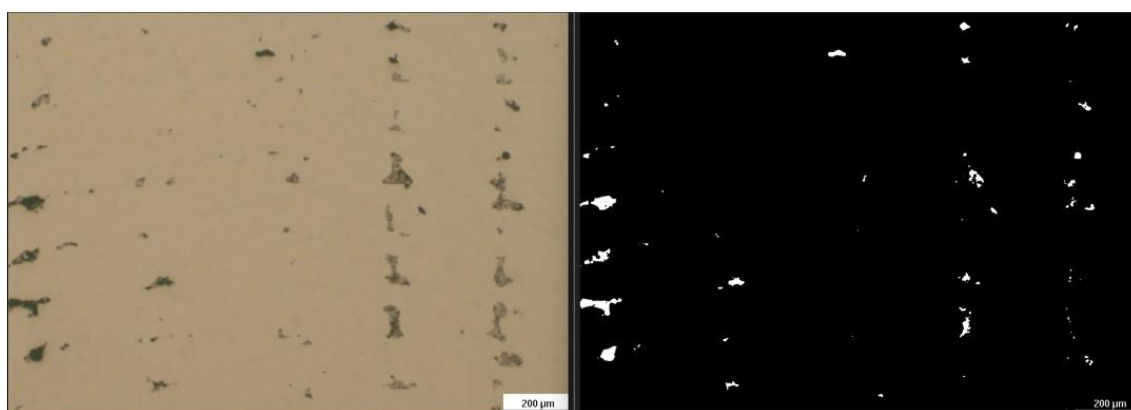


3r quadrant

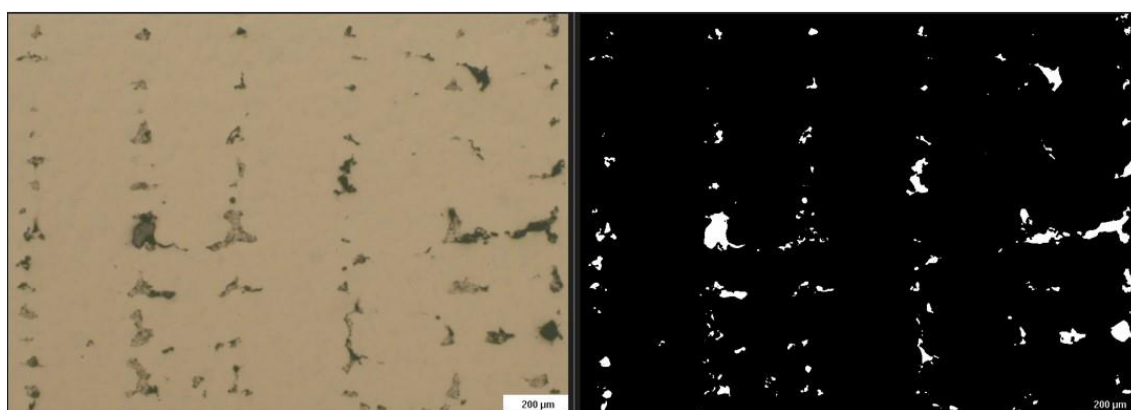


4t quadrant

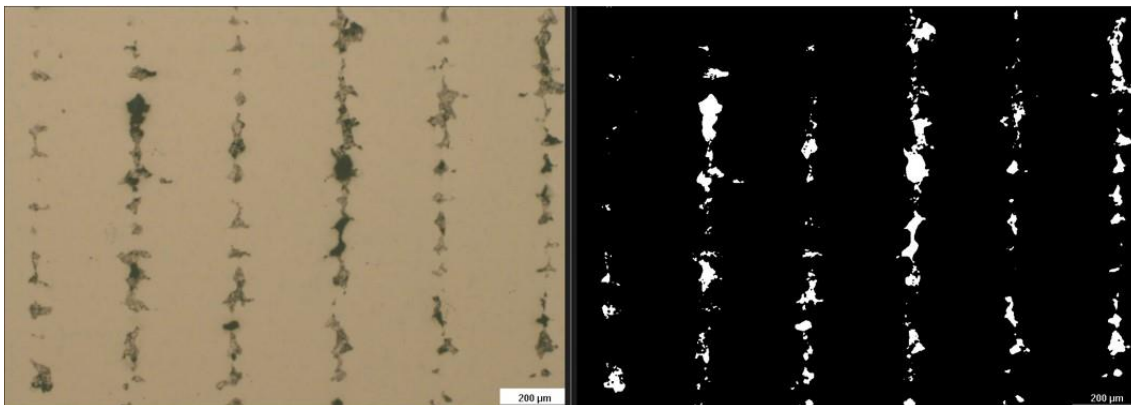
2-0,1-9,72



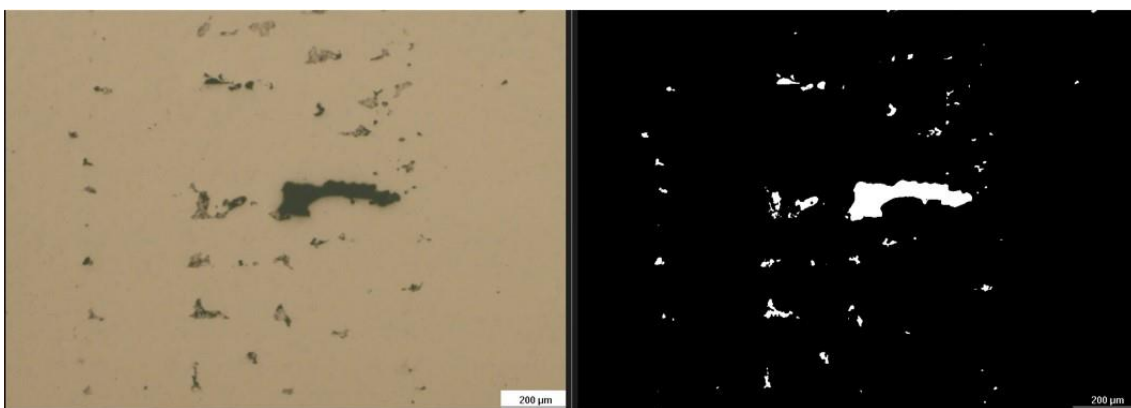
1r quadrant



2n quadrant

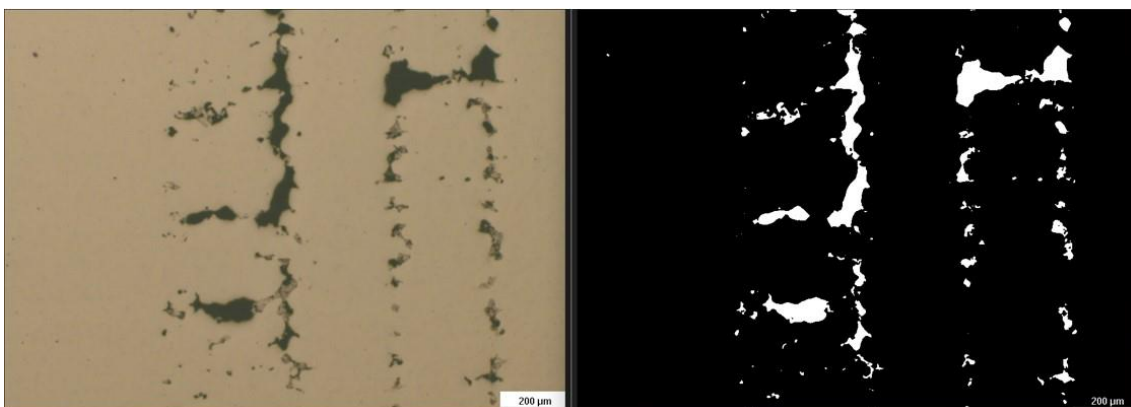


3r quadrant

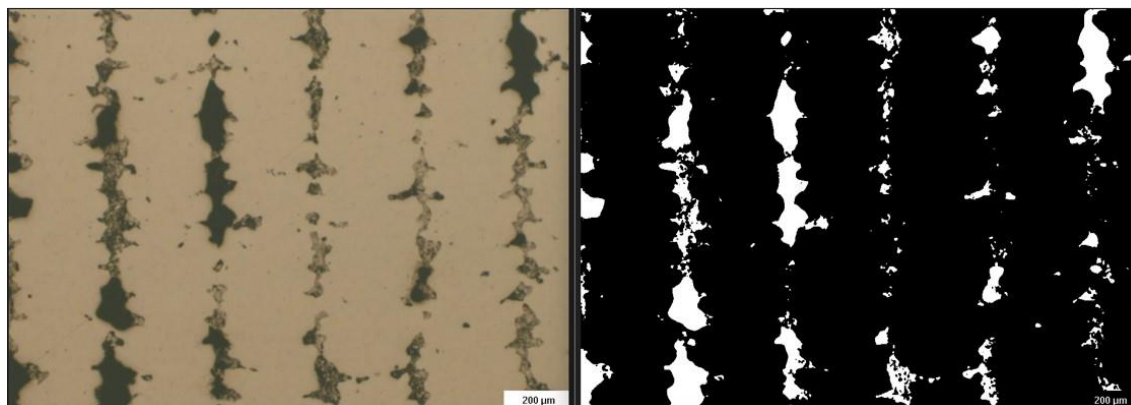


4t quadrant

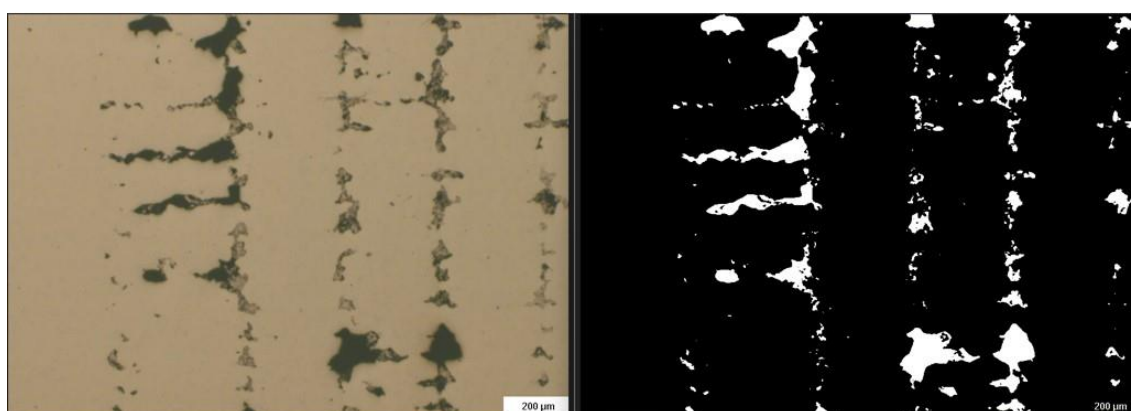
2-0,1-14,52



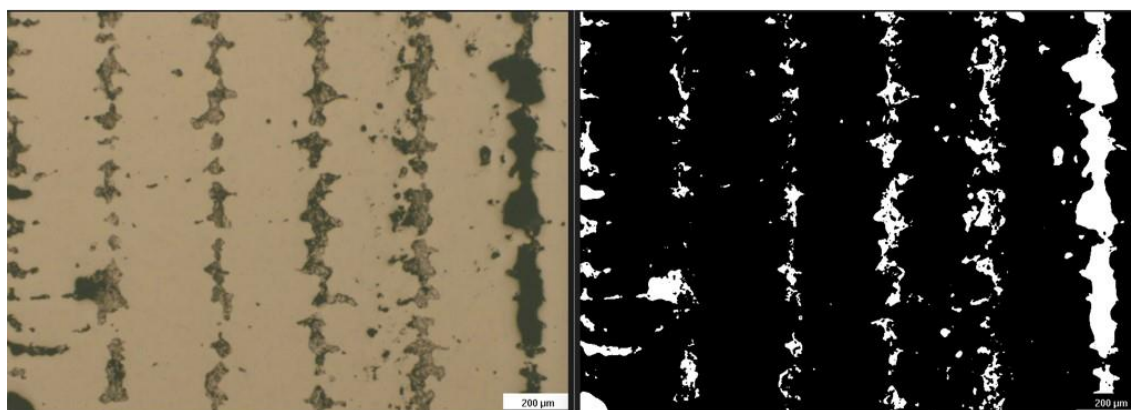
1r quadrant



2n quadrant

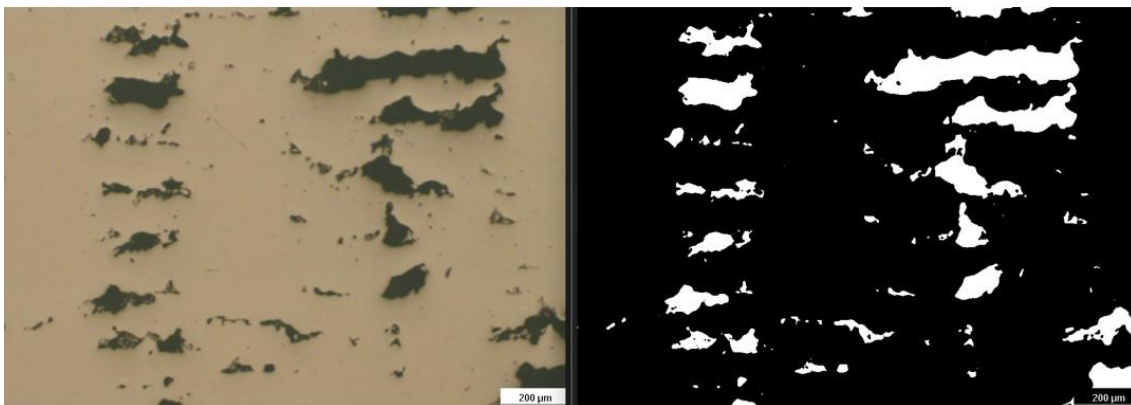


3r quadrant

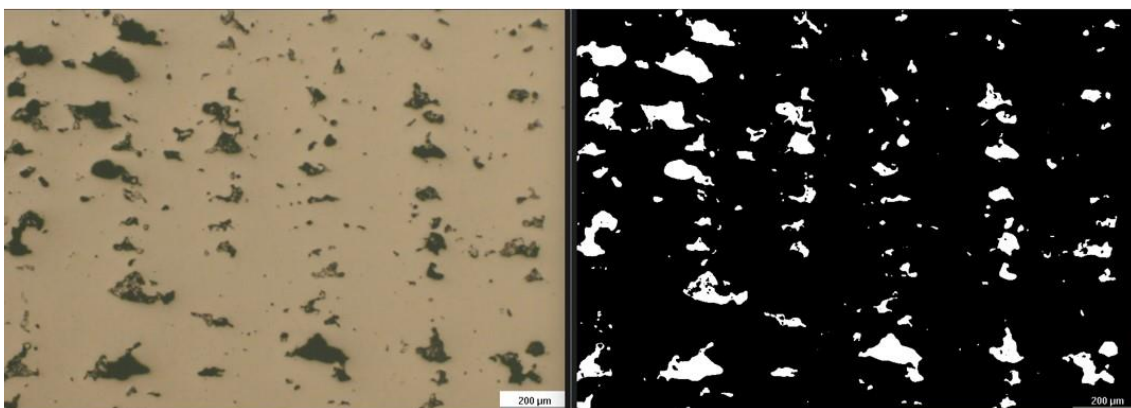


4t quadrant

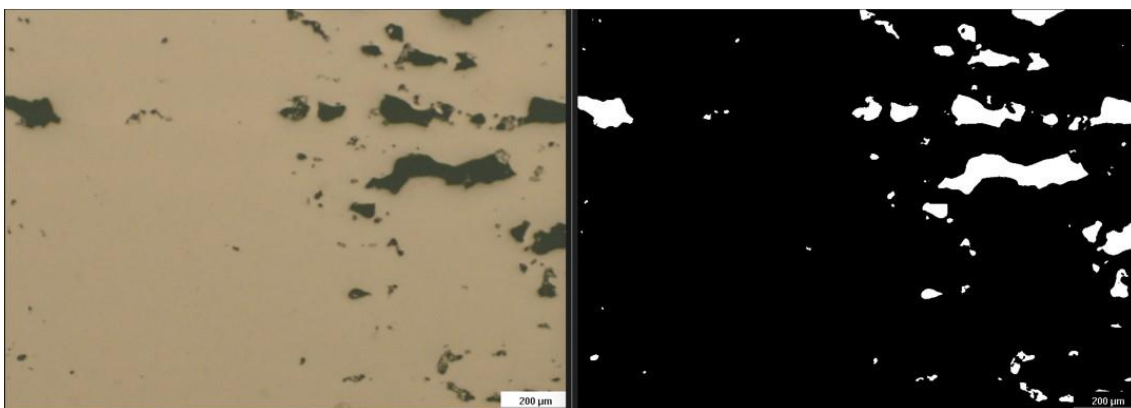
3-0,1-4,80



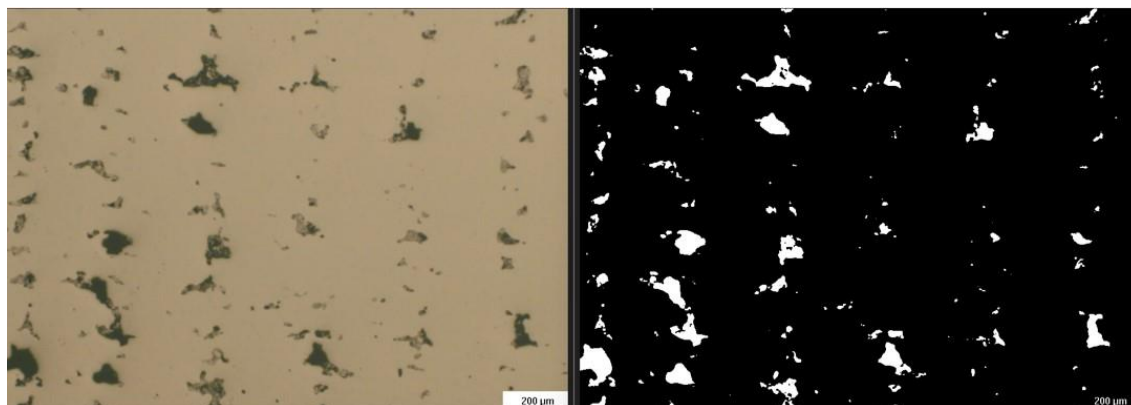
1r quadrant



2n quadrant

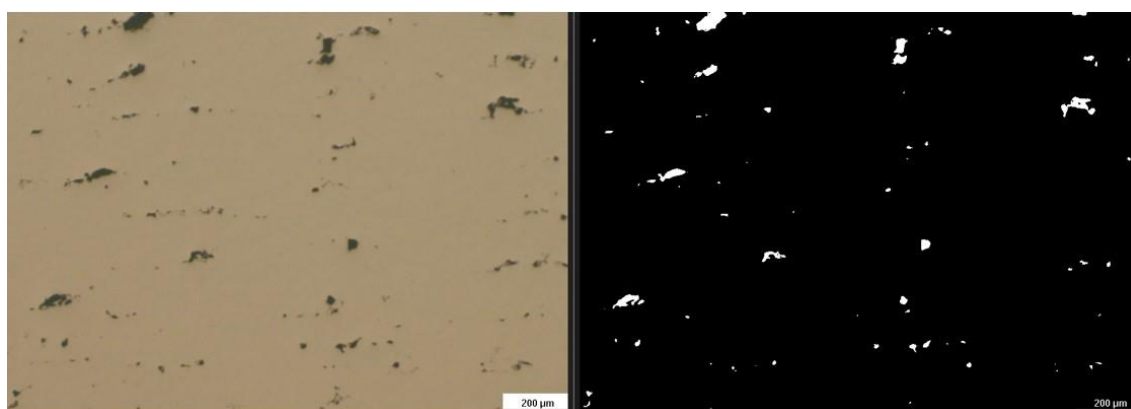


3r quadrant

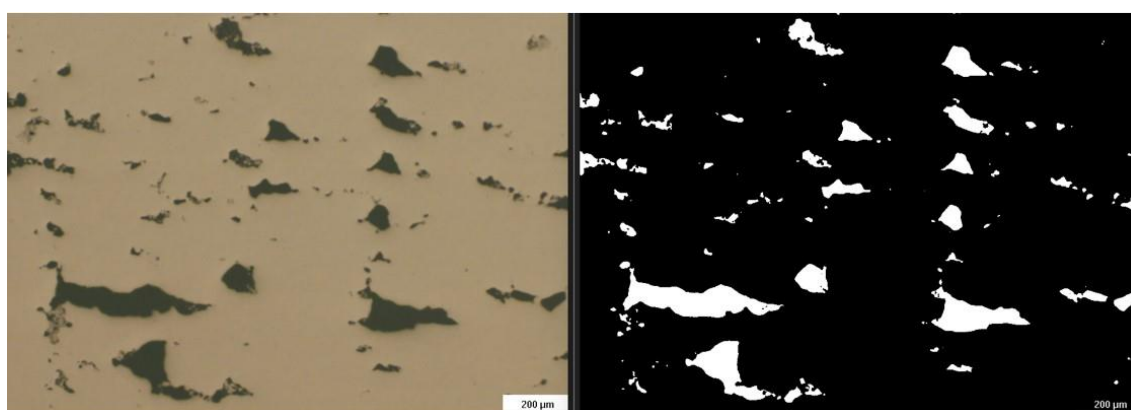


4t quadrant

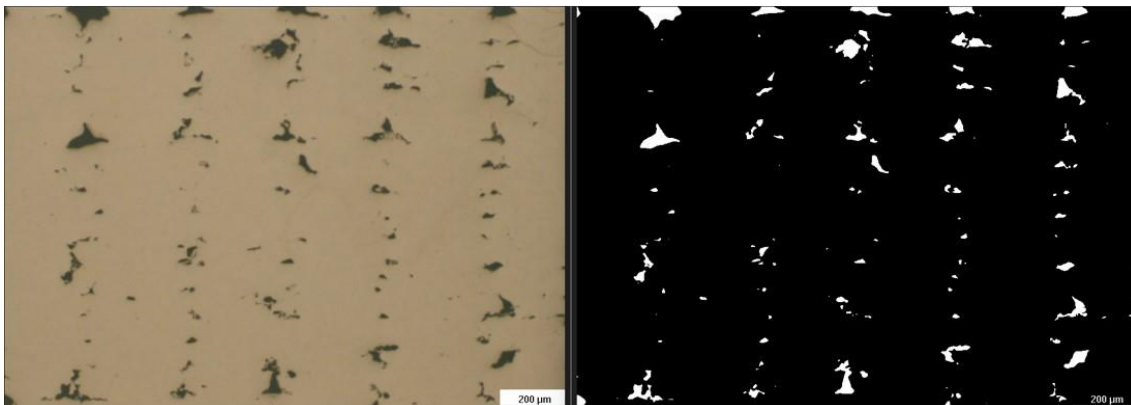
3-0,1-9,65



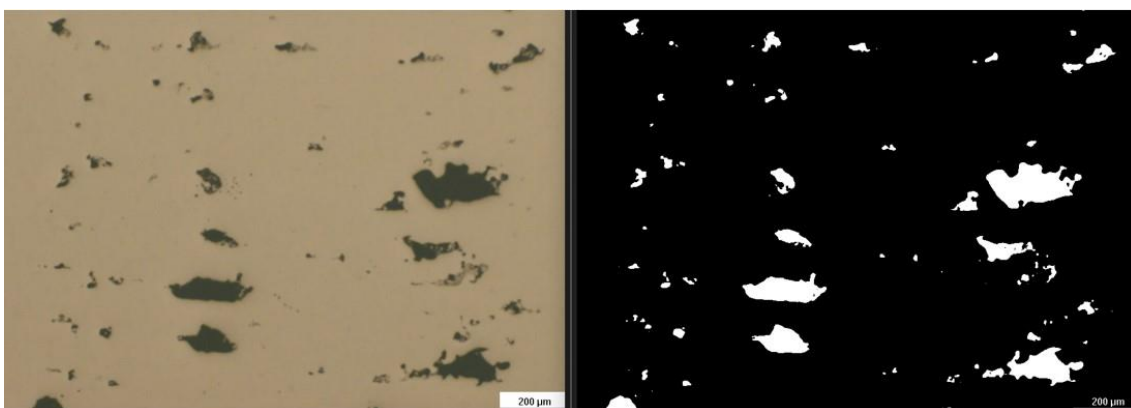
1r quadrant



2n quadrant

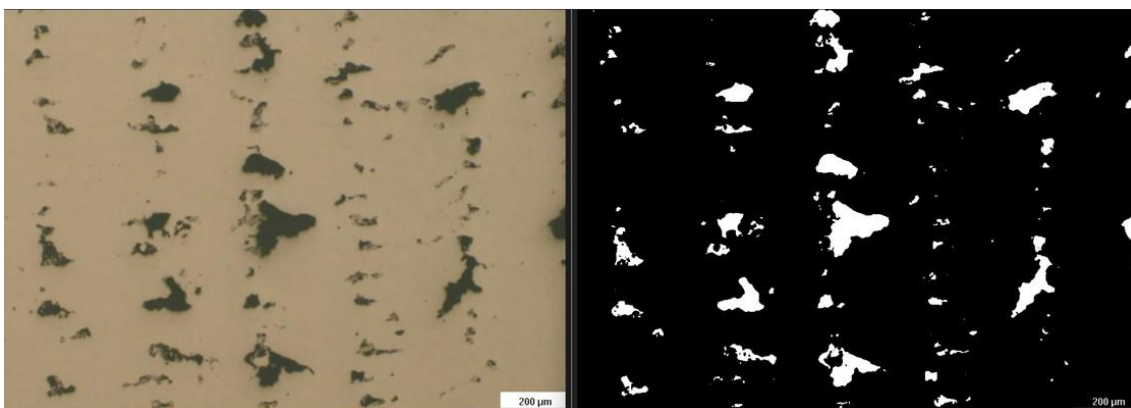


3r quadrant

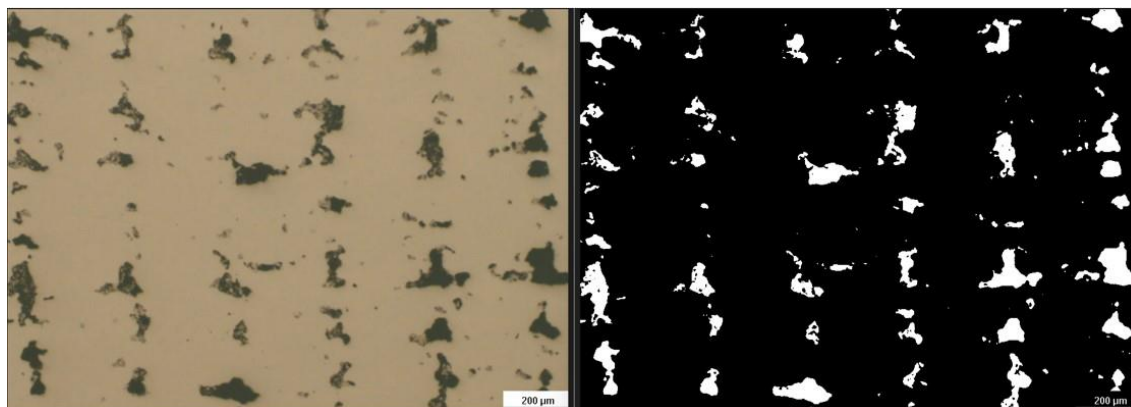


4t quadrant

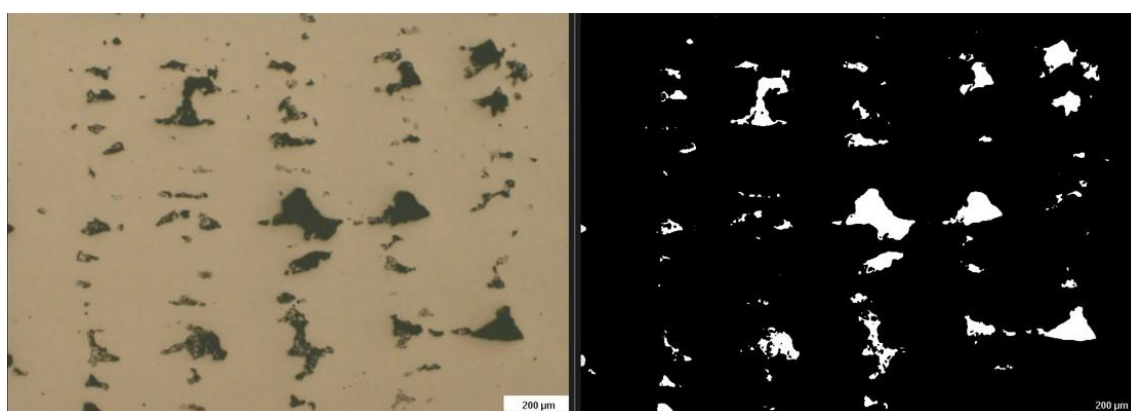
3-0,1-14,50



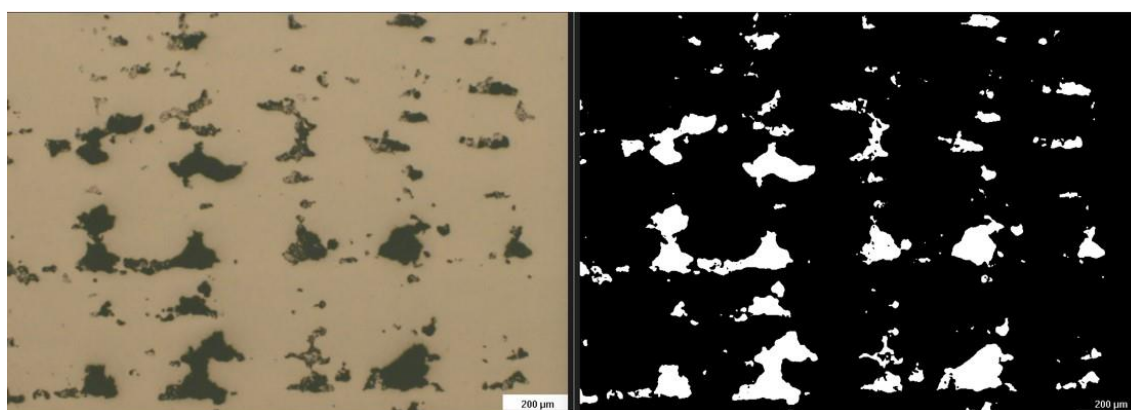
1r quadrant



2n quadrant

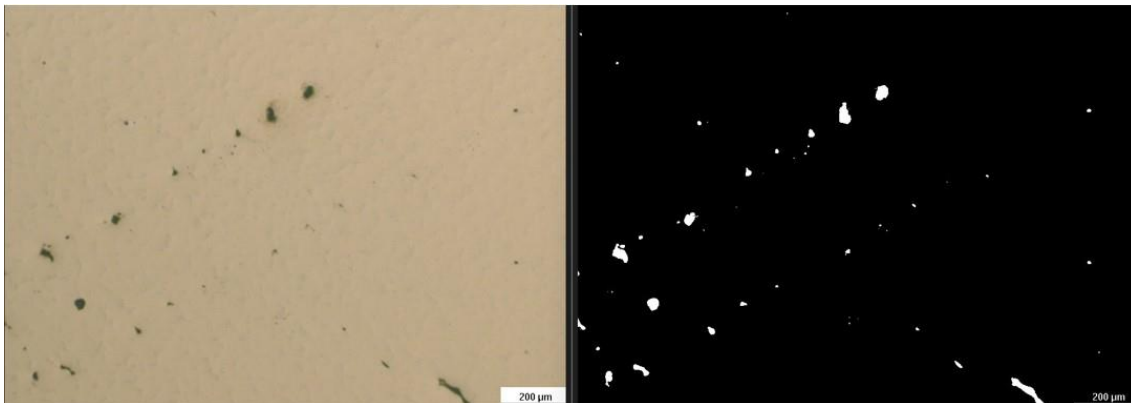


3r quadrant

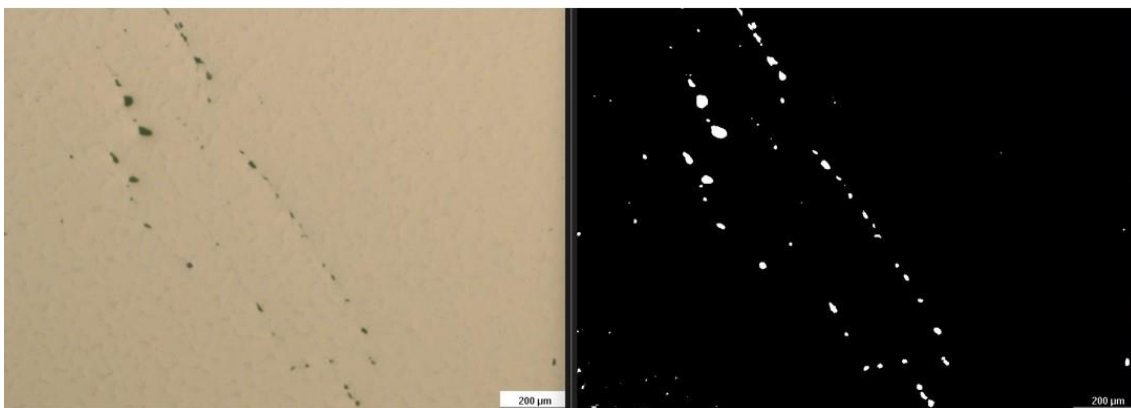


4t quadrant

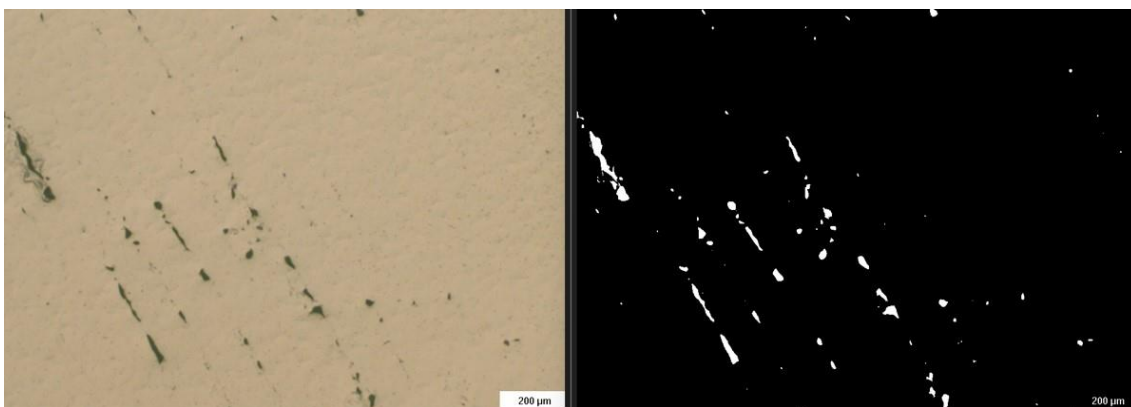
1-0,15-2,20



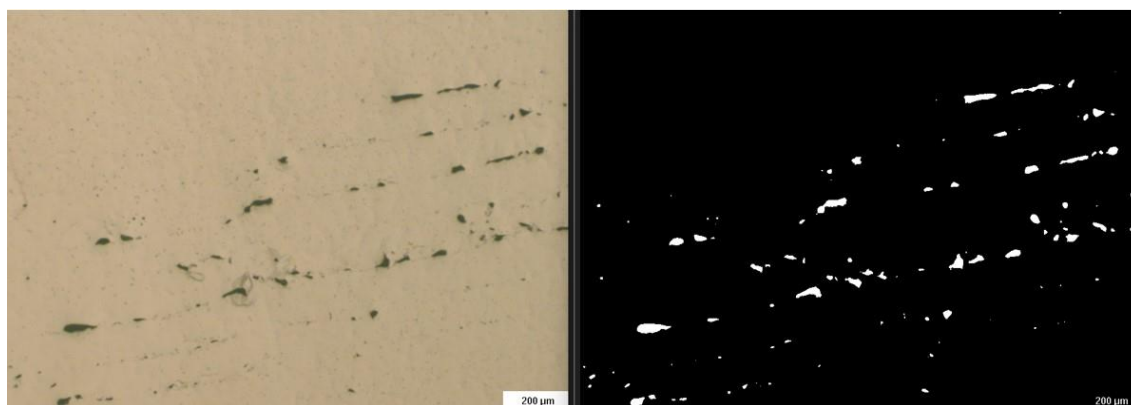
1r quadrant



2n quadrant

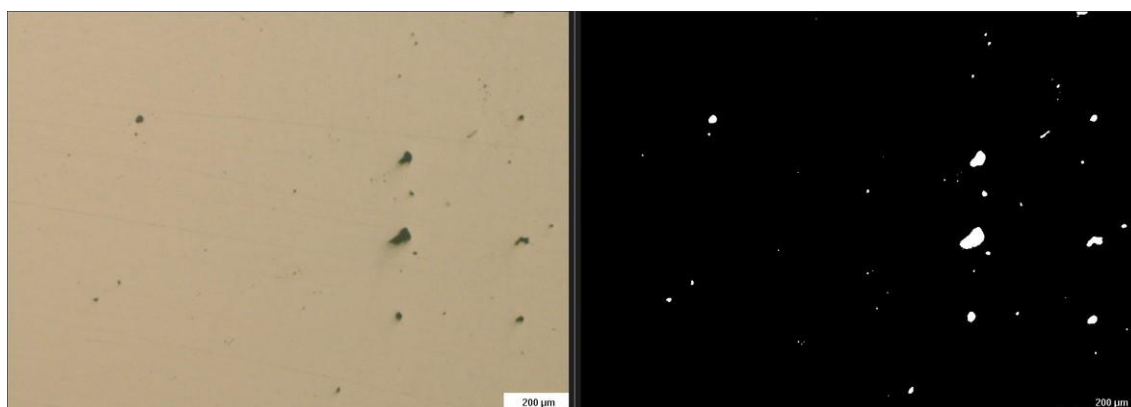


3r quadrant

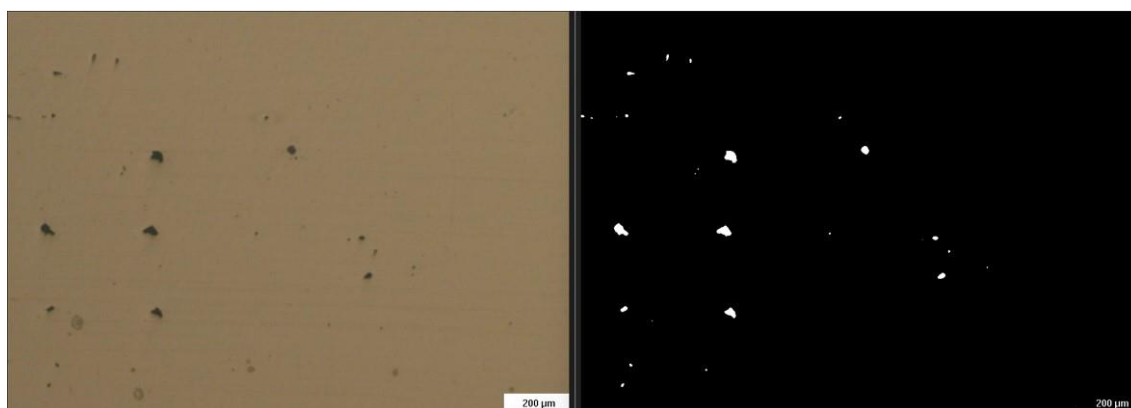


4t quadrant

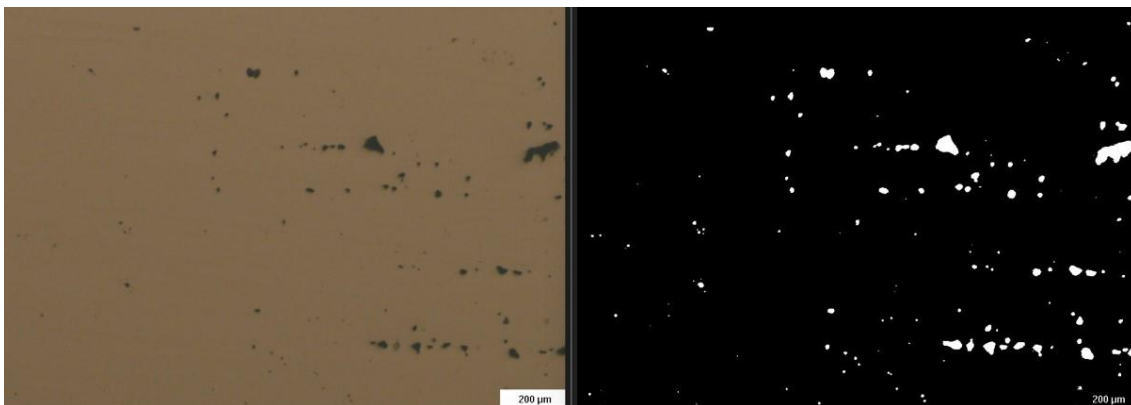
1-0,15-4,62



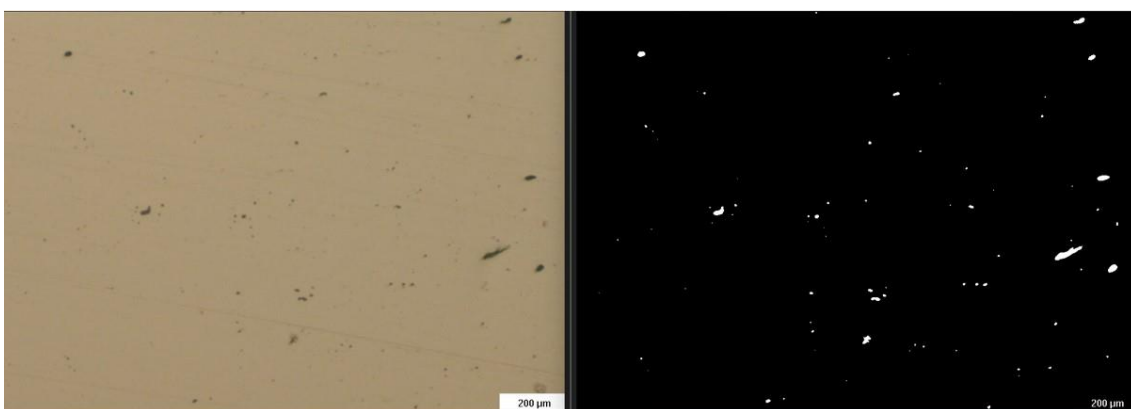
1r quadrant



2n quadrant

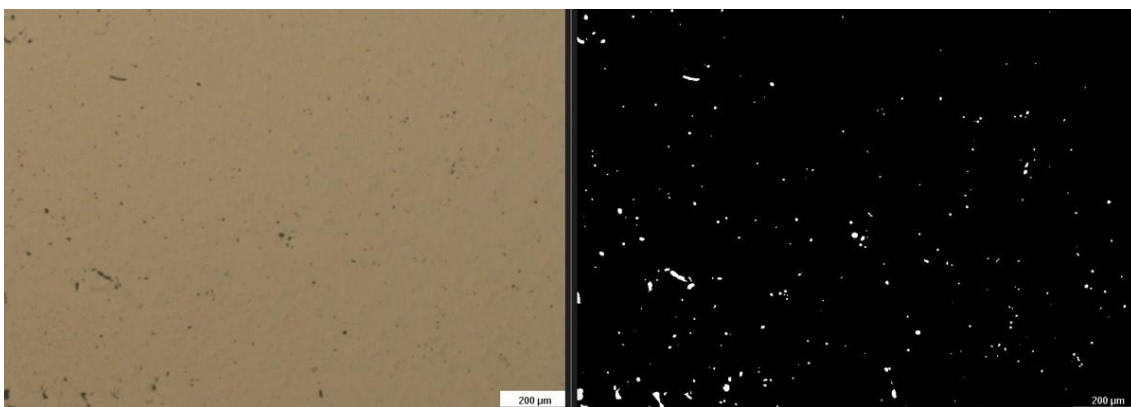


3r quadrant

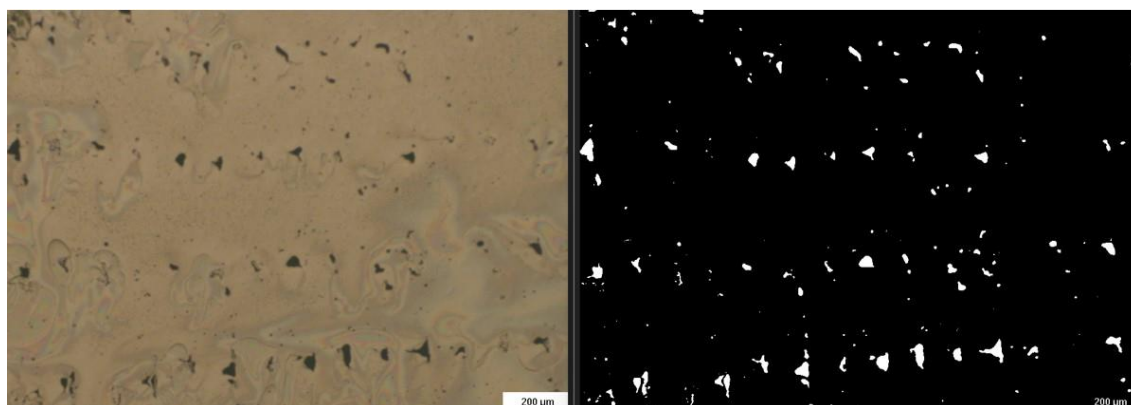


4t quadrant

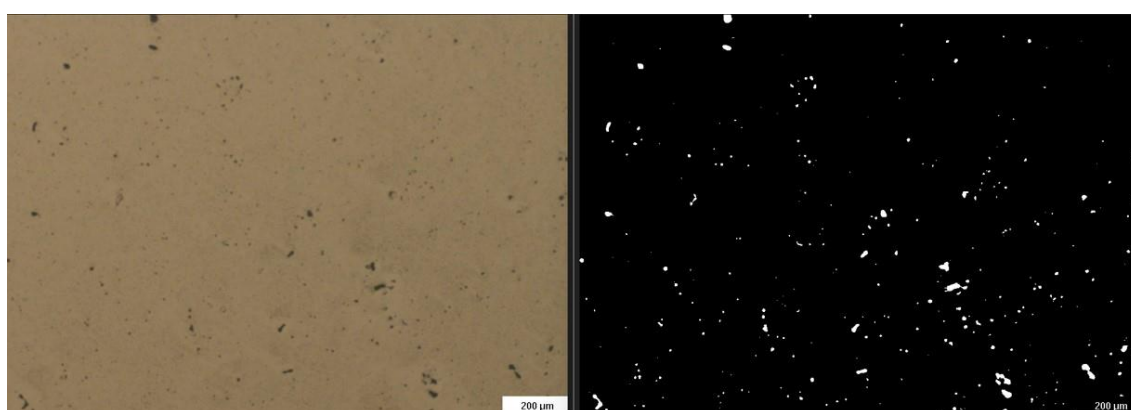
1-0,15-7,62



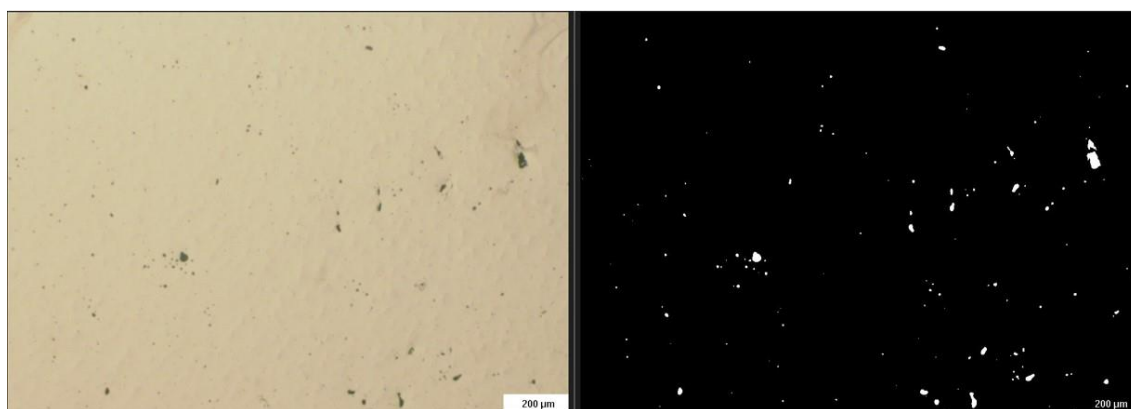
1r quadrant



2n quadrant

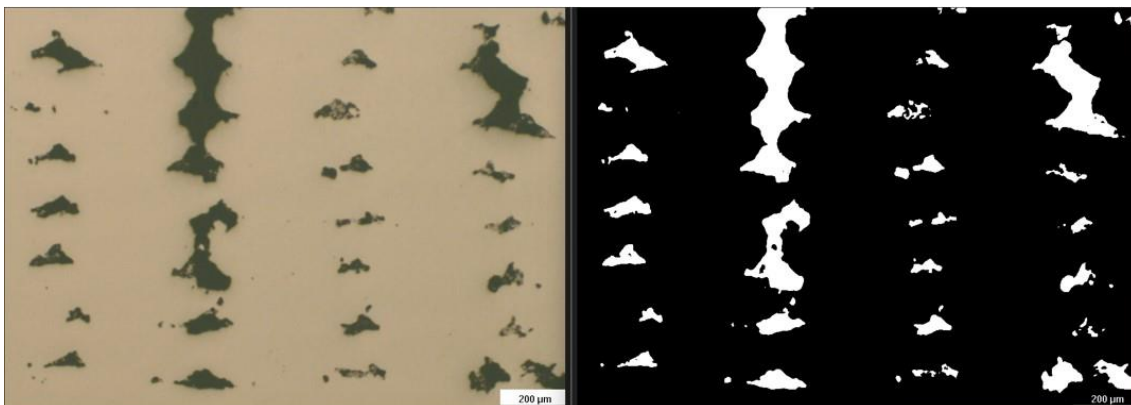


3r quadrant

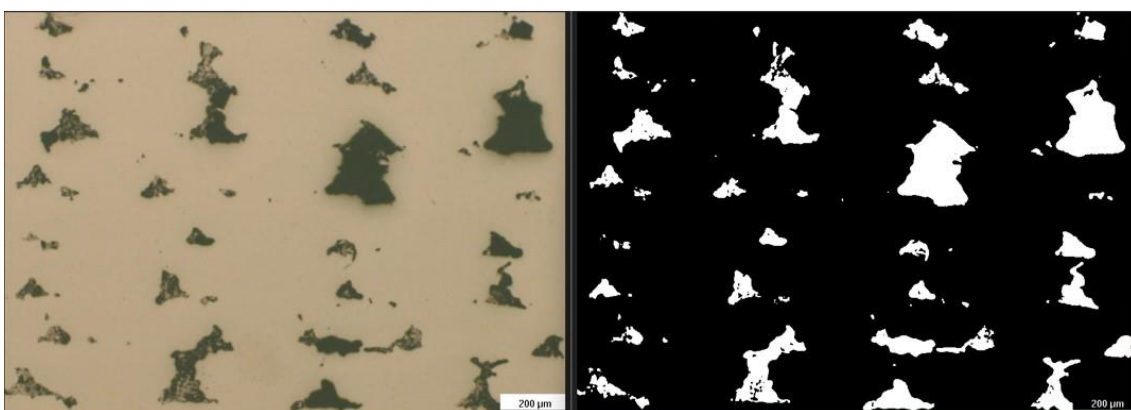


4t quadrant

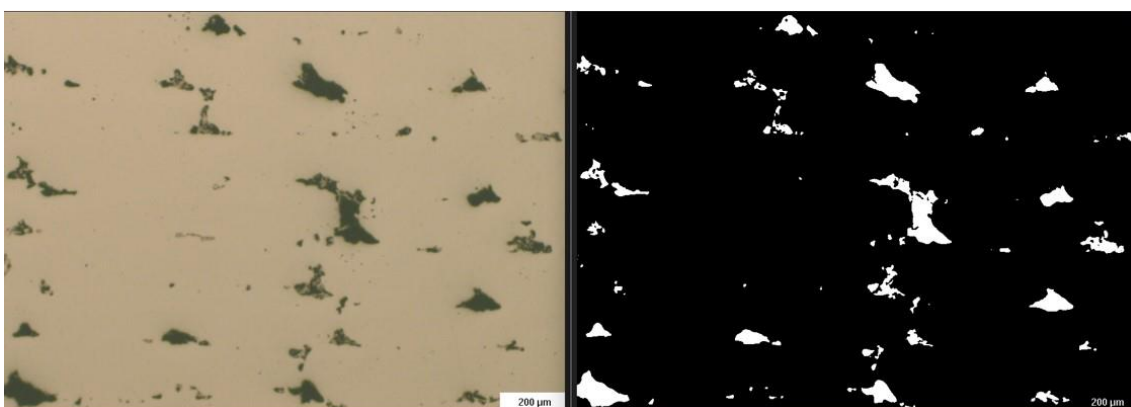
2-0,15-4,90



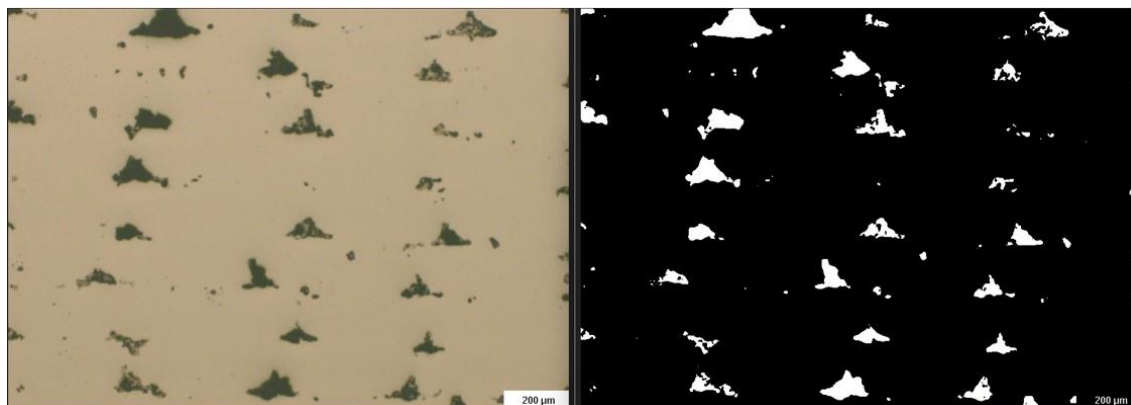
1r quadrant



2n quadrant

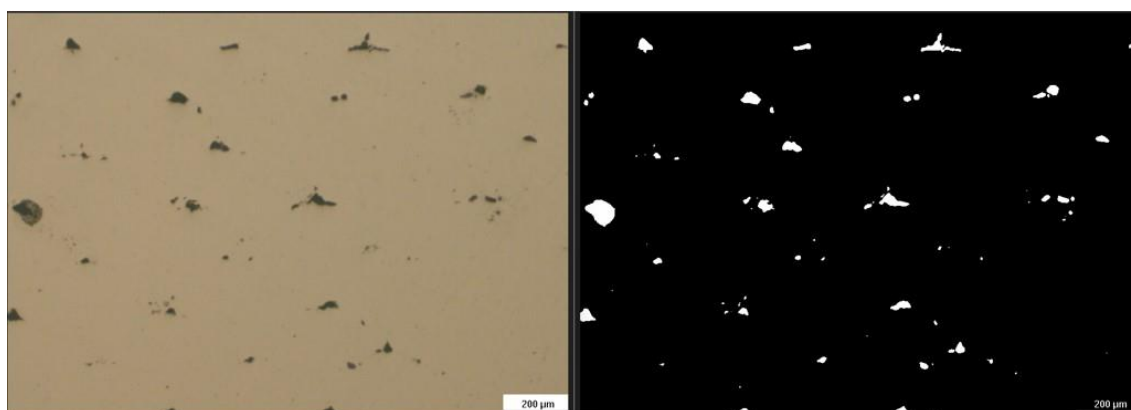


3r quadrant

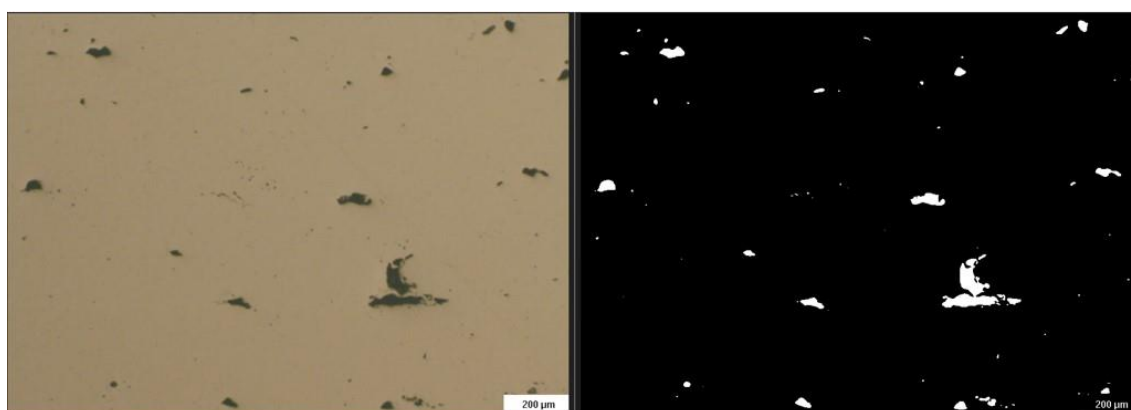


4t quadrant

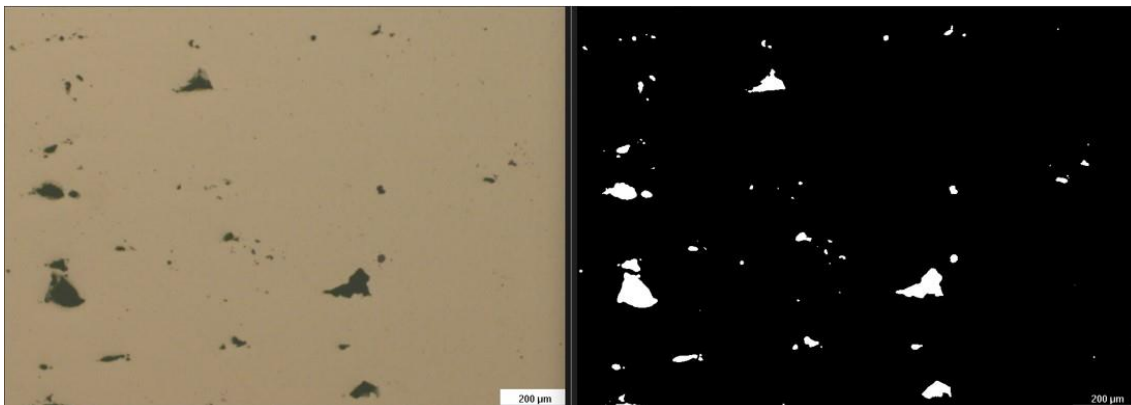
2-0,15-9,75



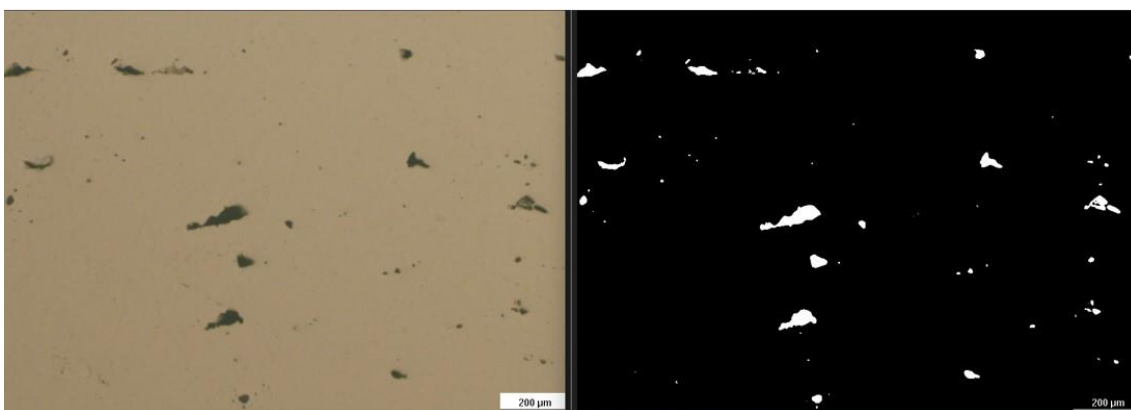
1r quadrant



2n quadrant

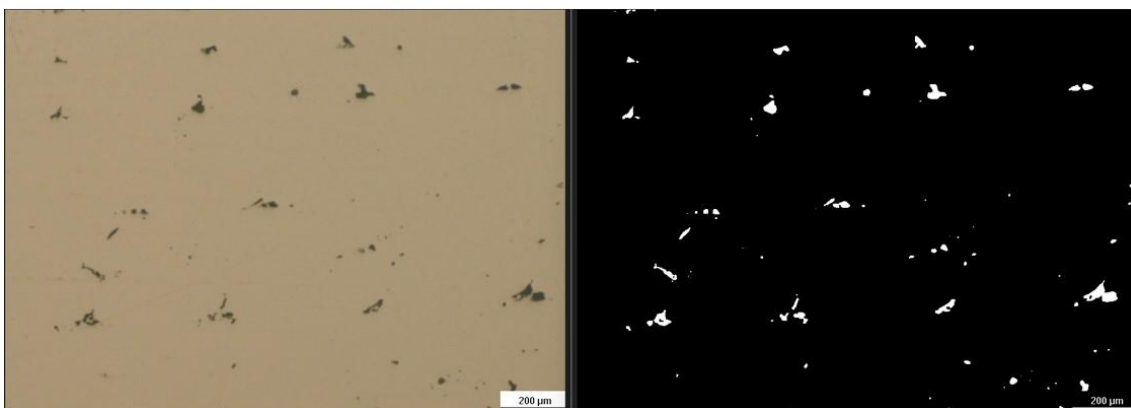


3r quadrant

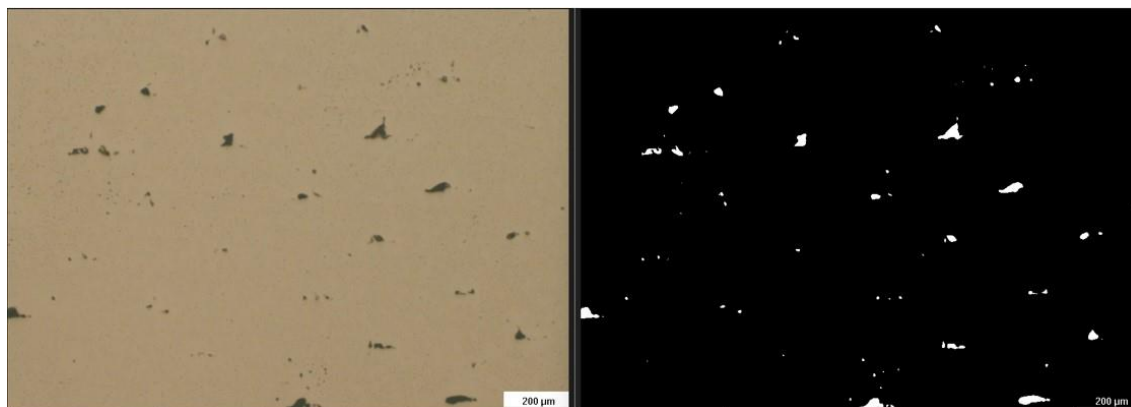


4t quadrant

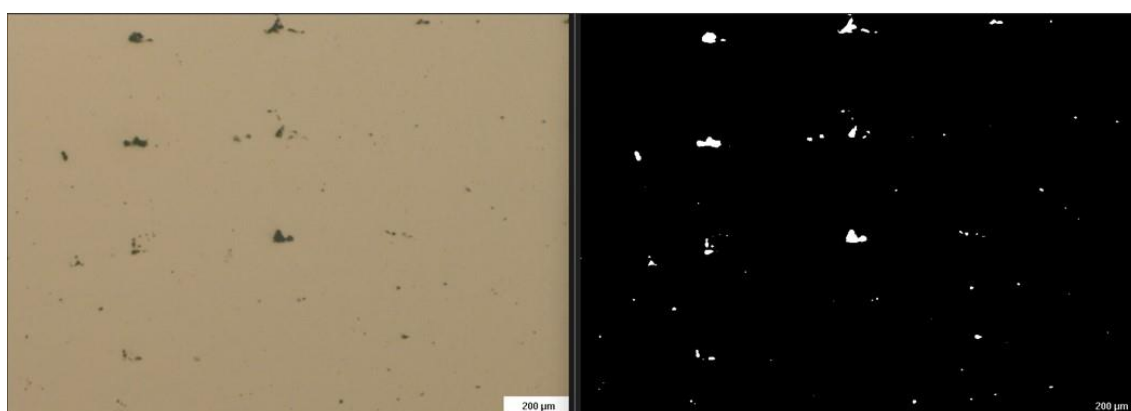
2-0,15-14,65



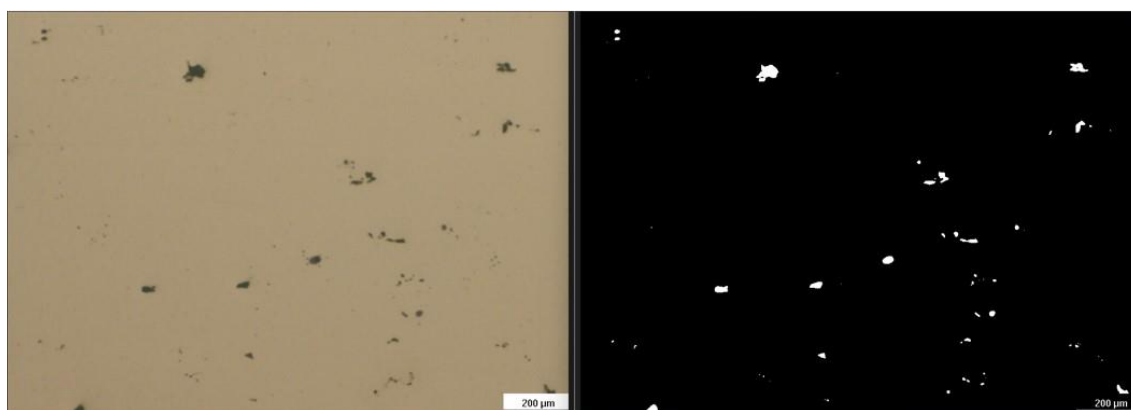
1r quadrant



2n quadrant



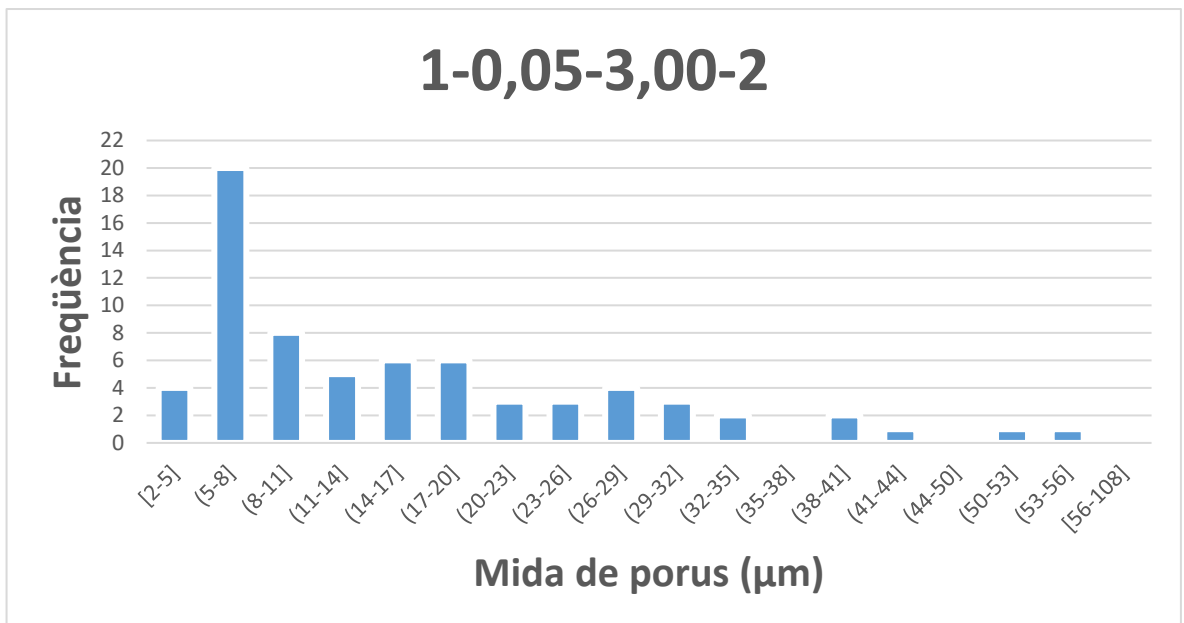
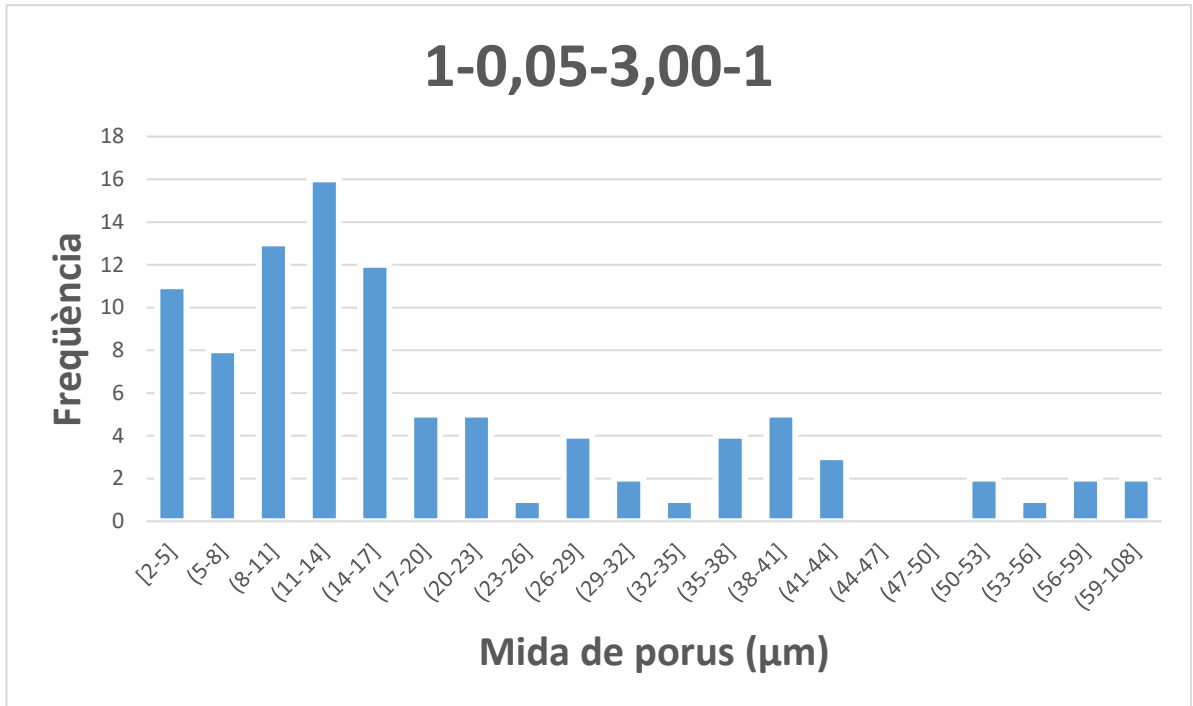
3r quadrant

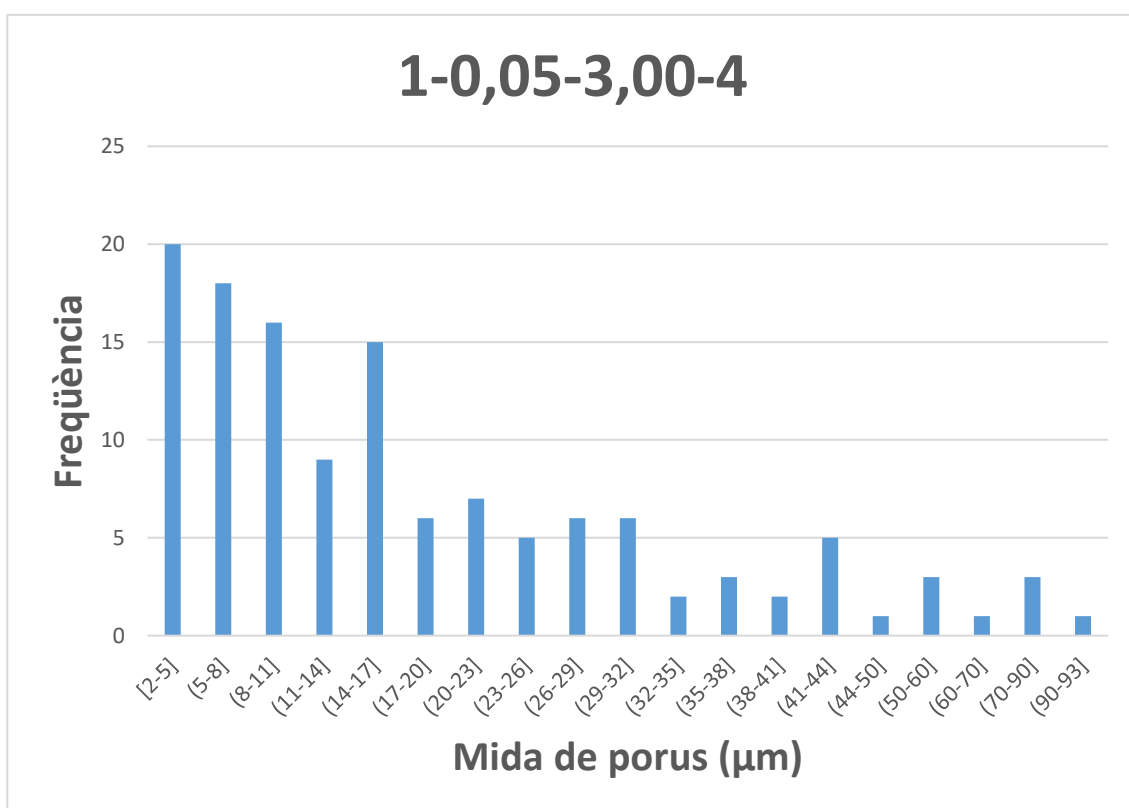
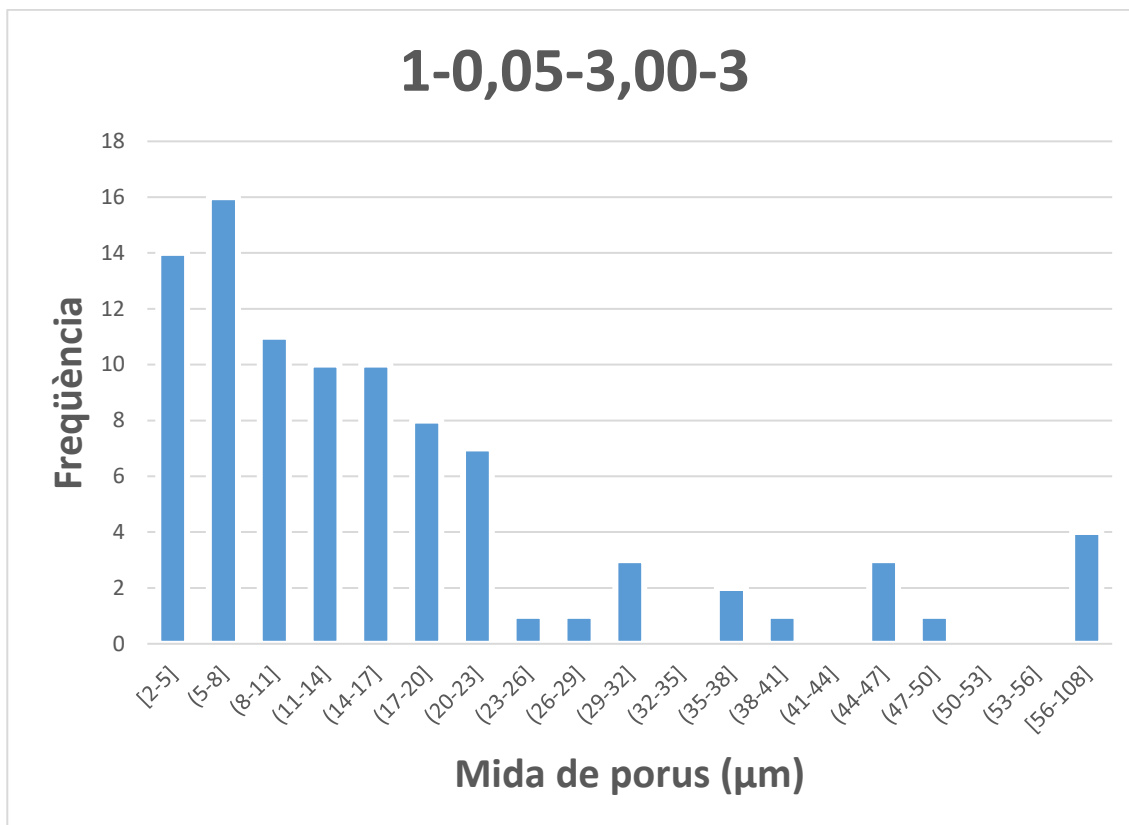


4t quadrant

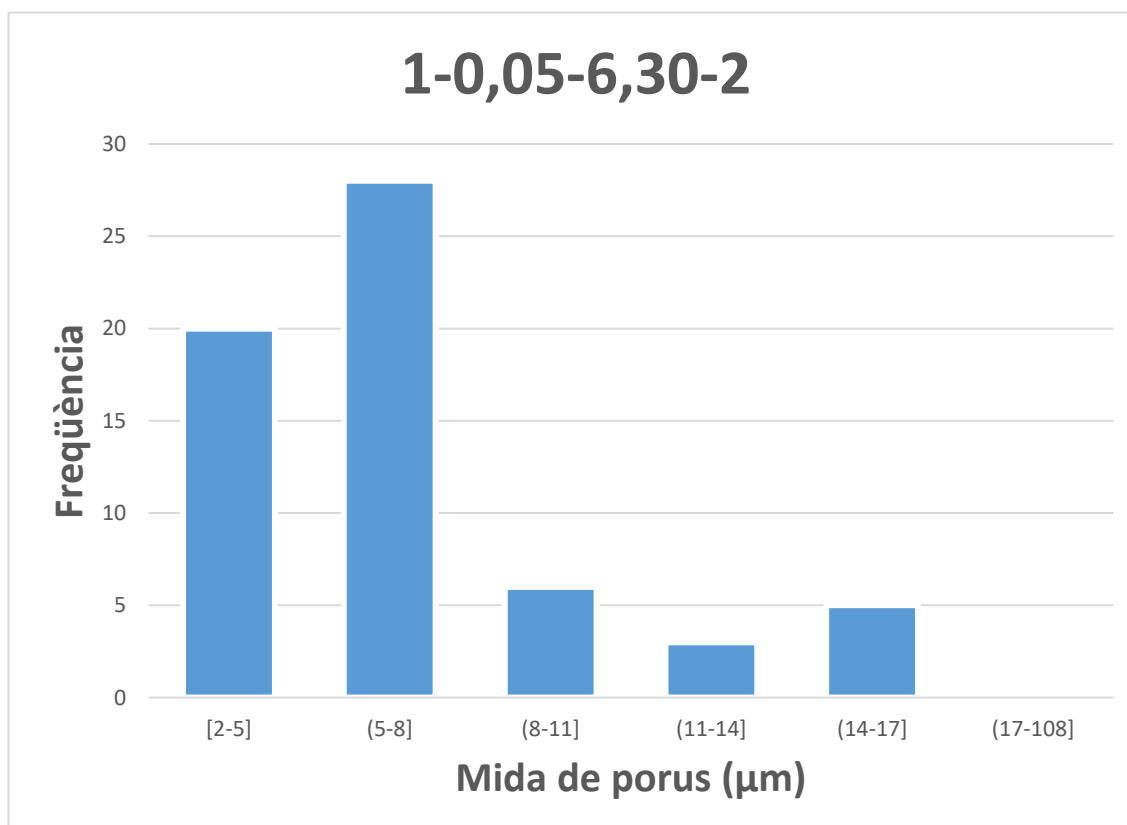
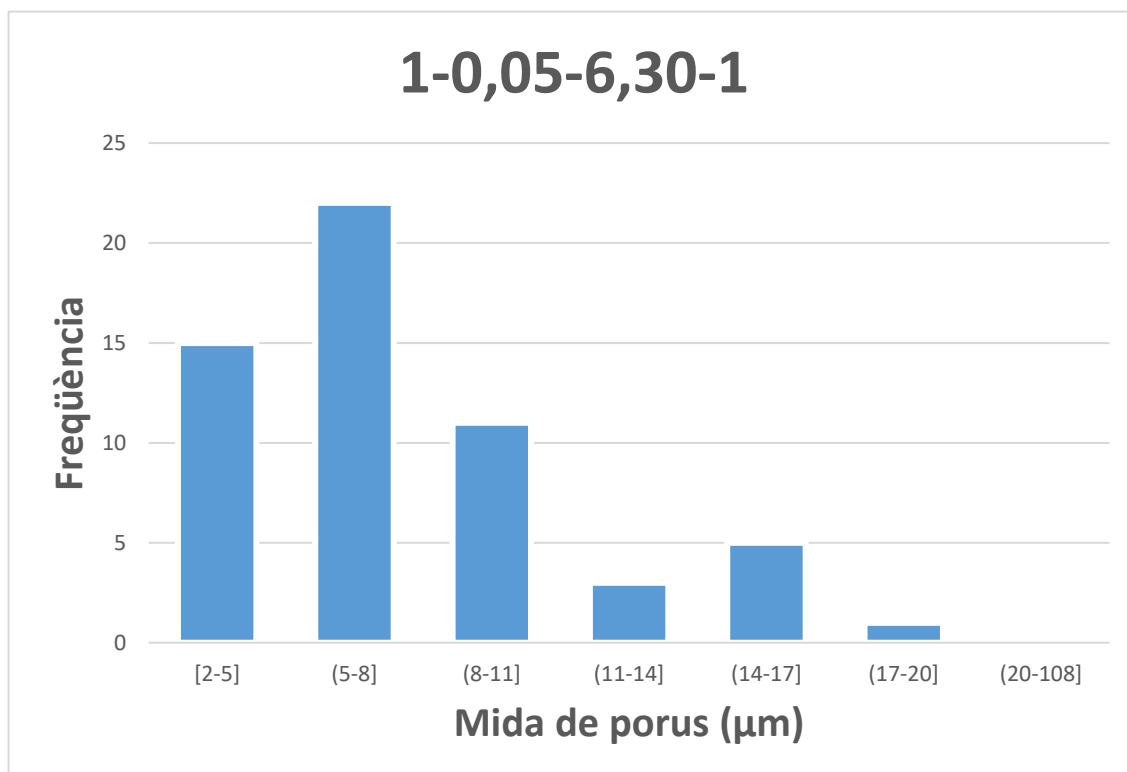
A3. Dimensions dels porus

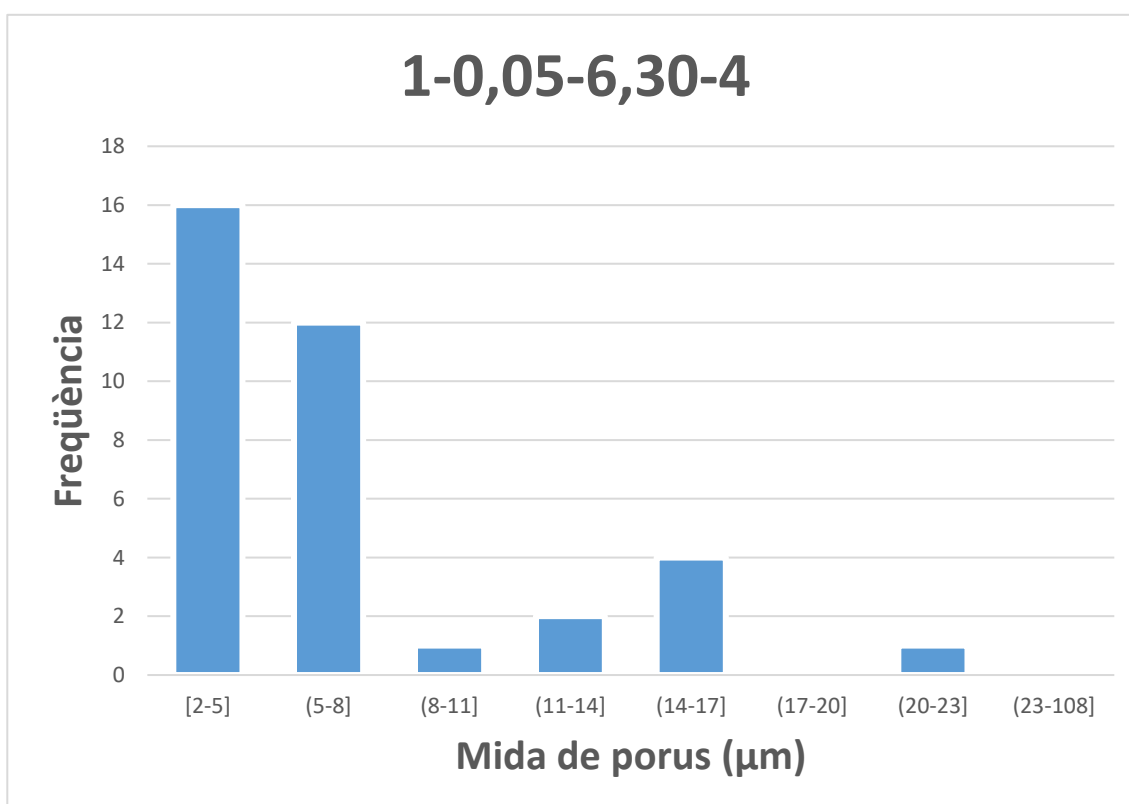
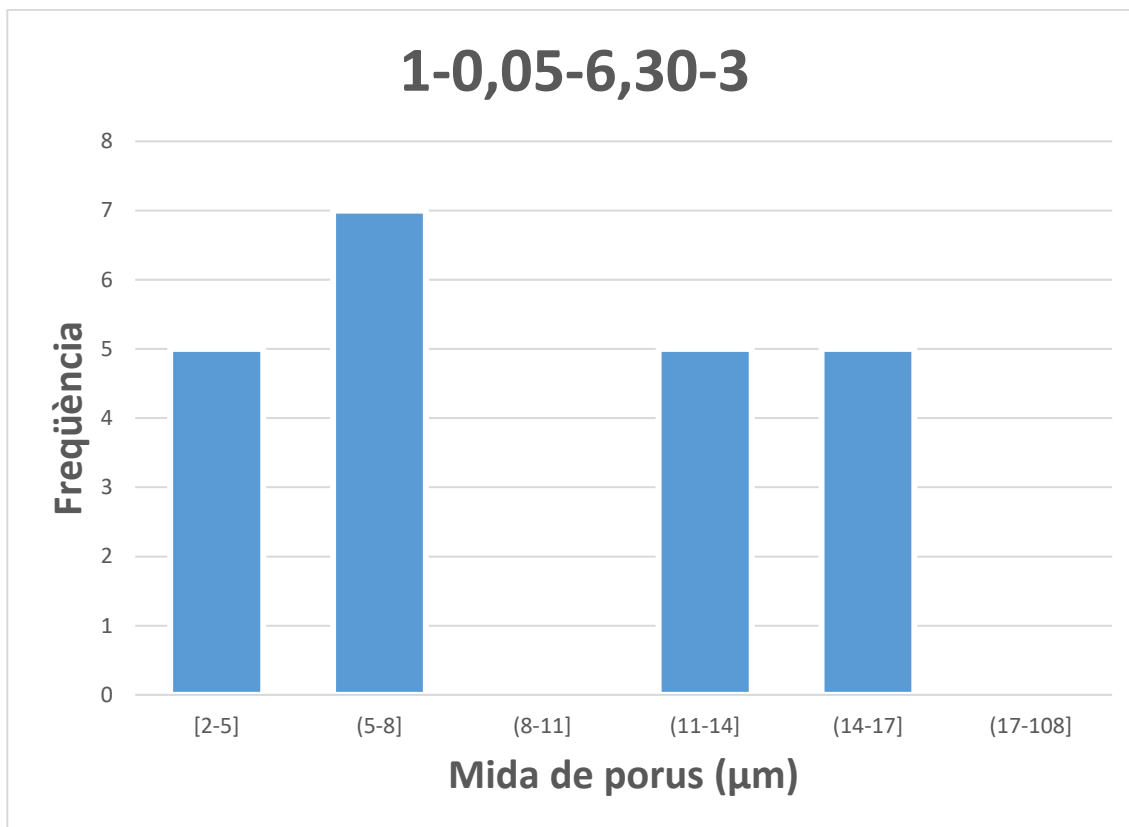
1-0,05-3,00



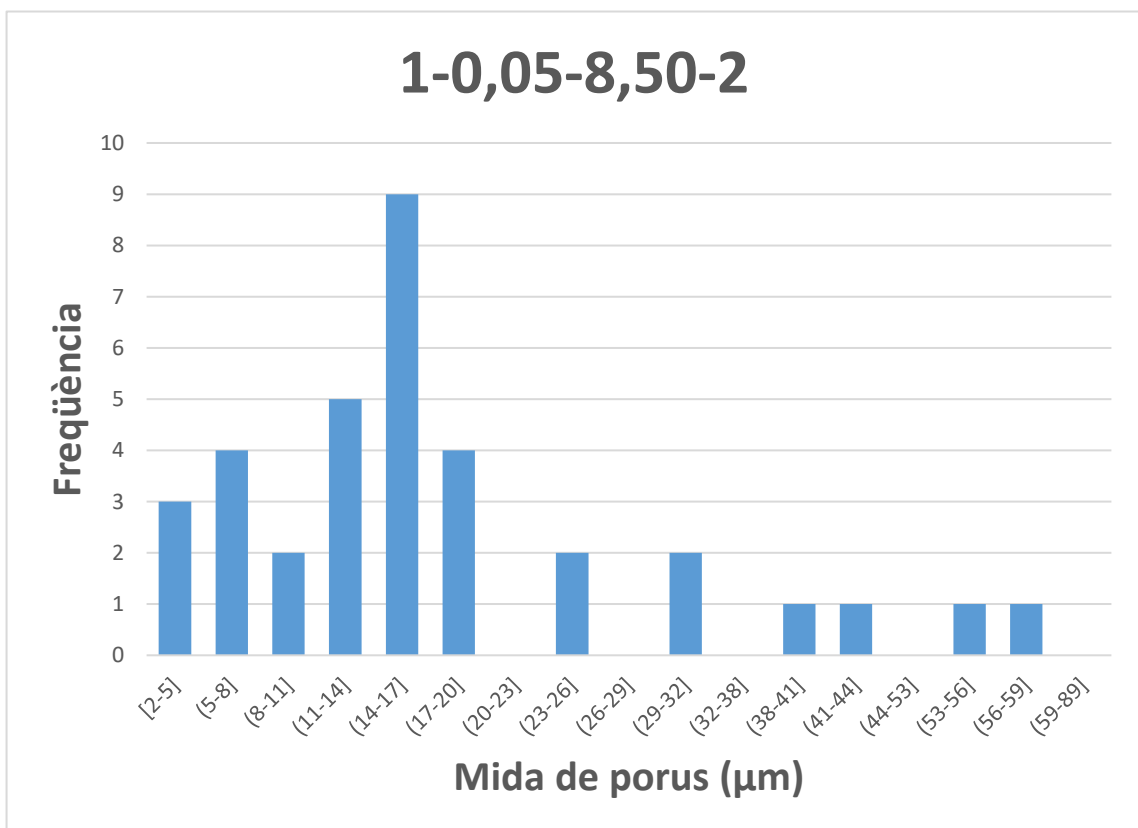
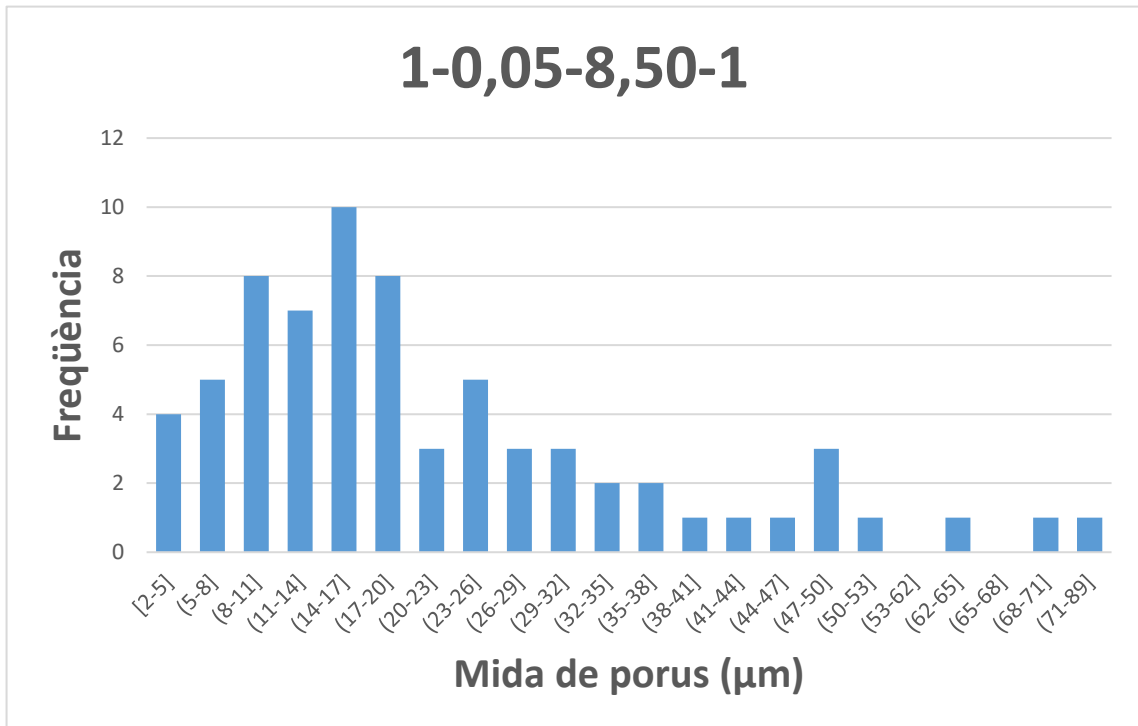


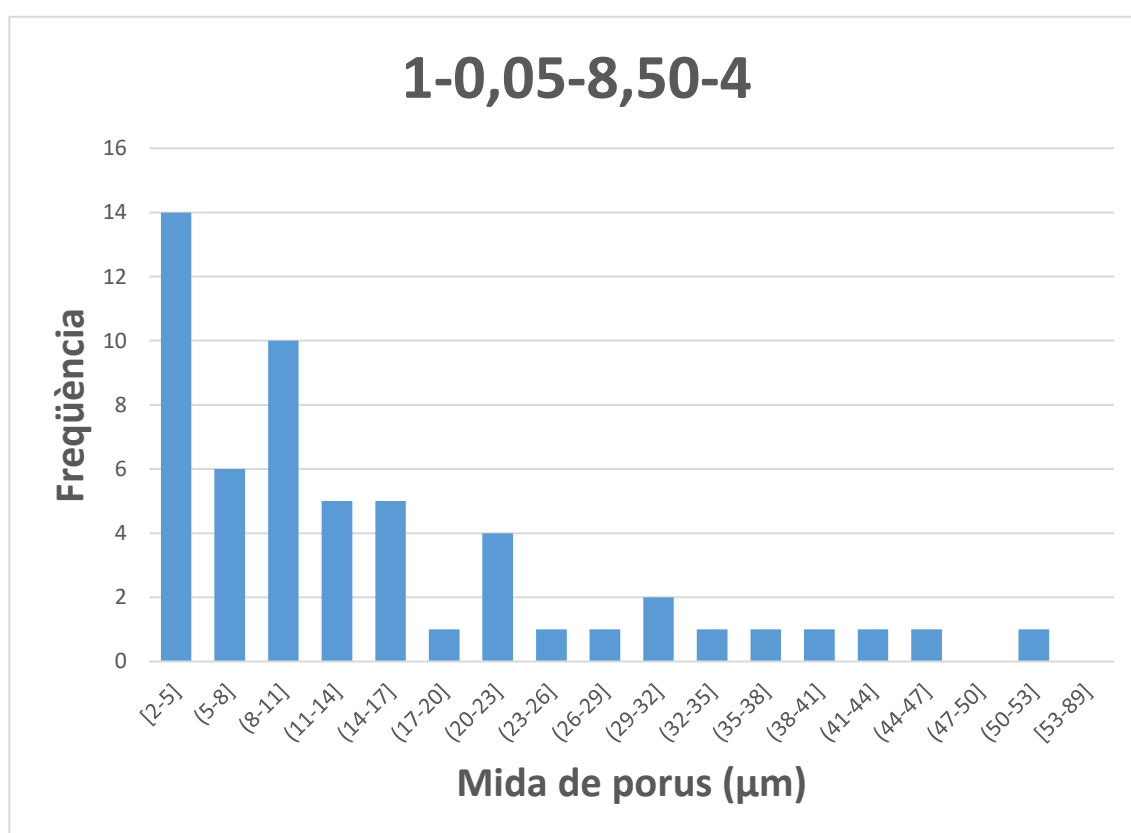
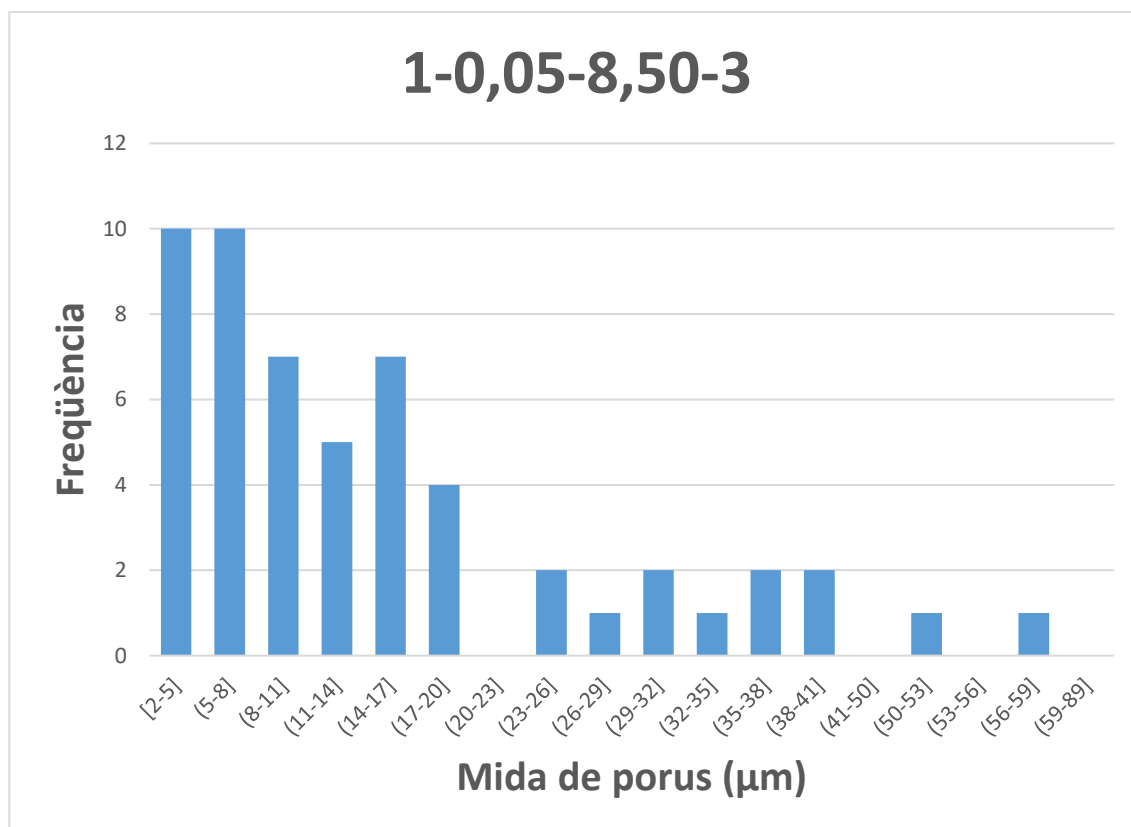
1-0,05-6,30



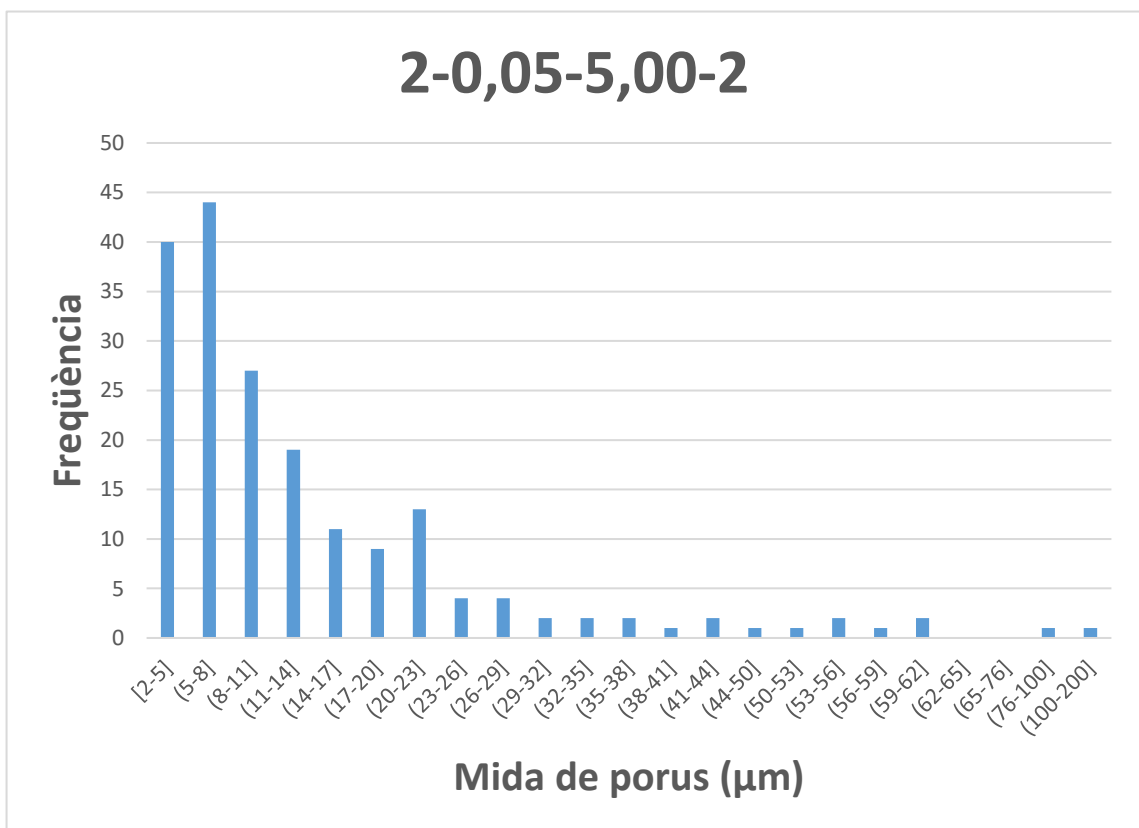
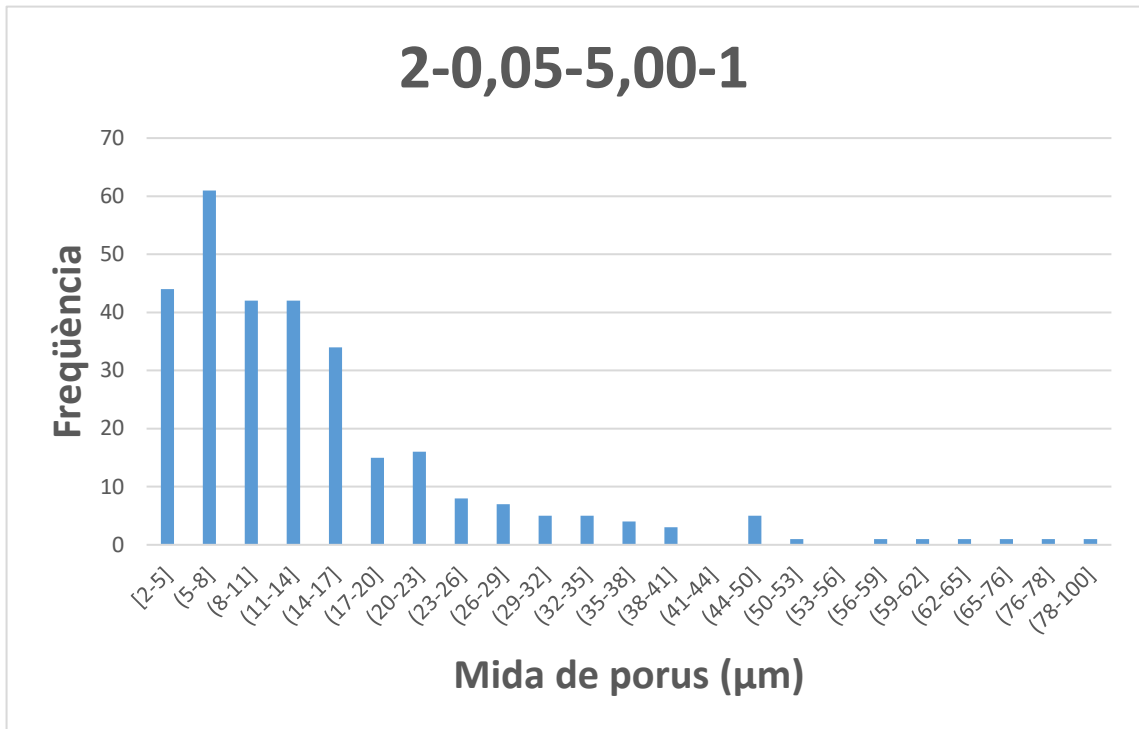


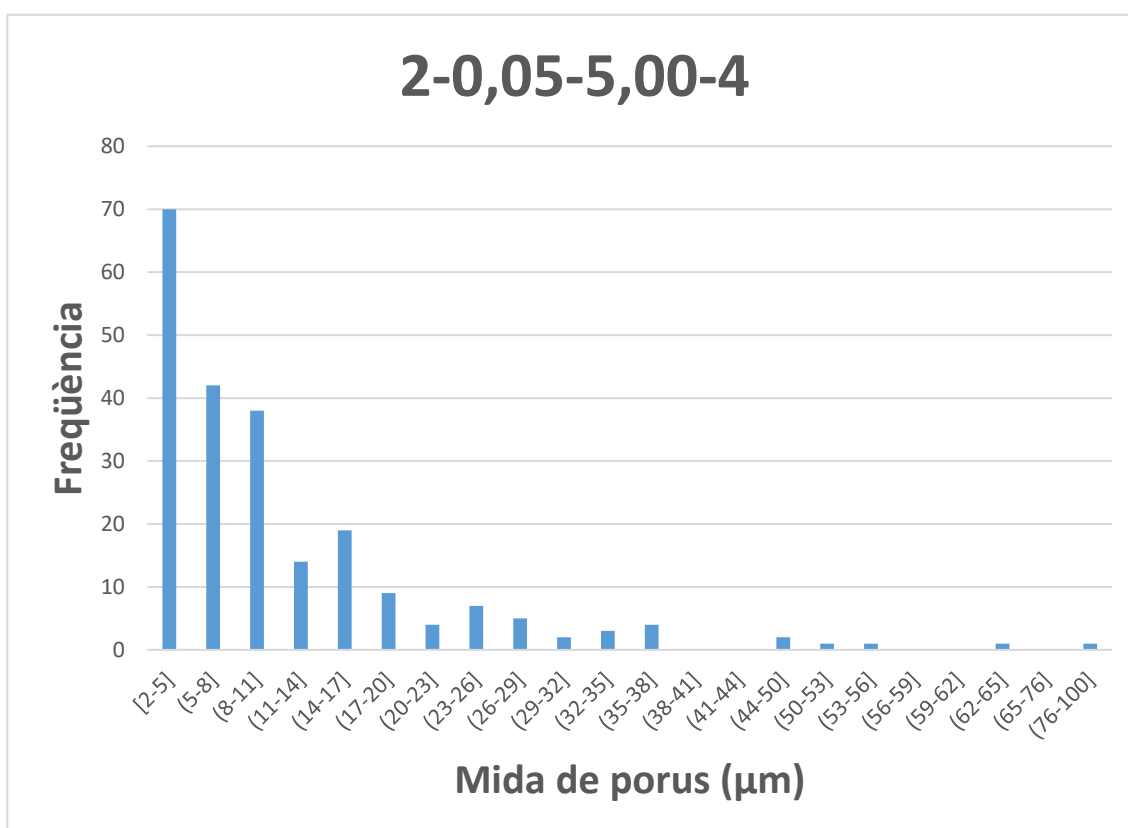
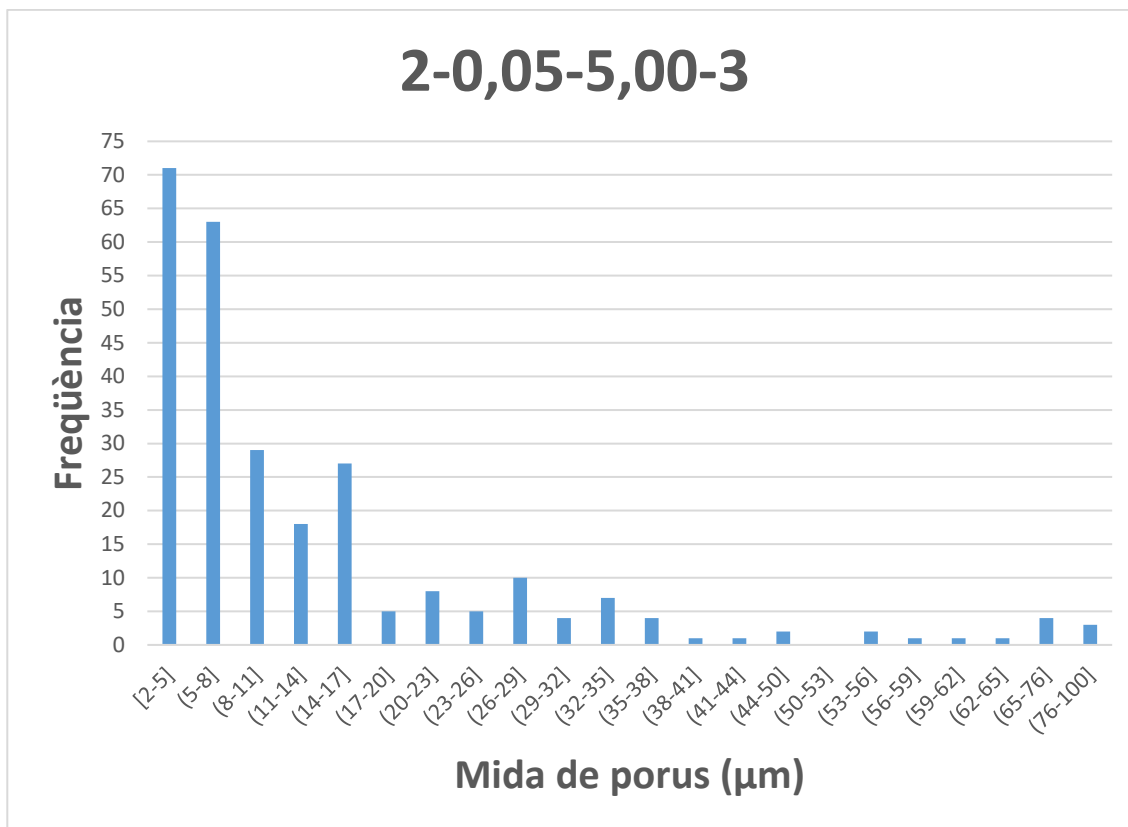
1-0,05-8,50



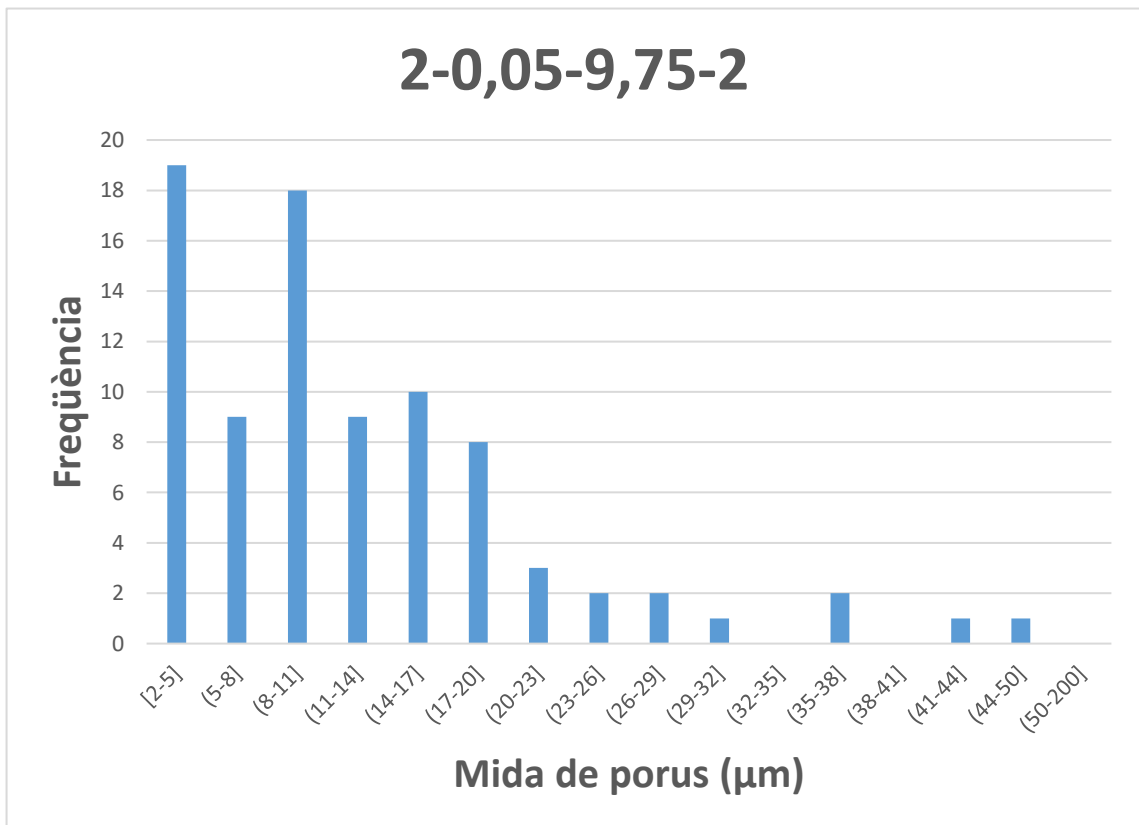
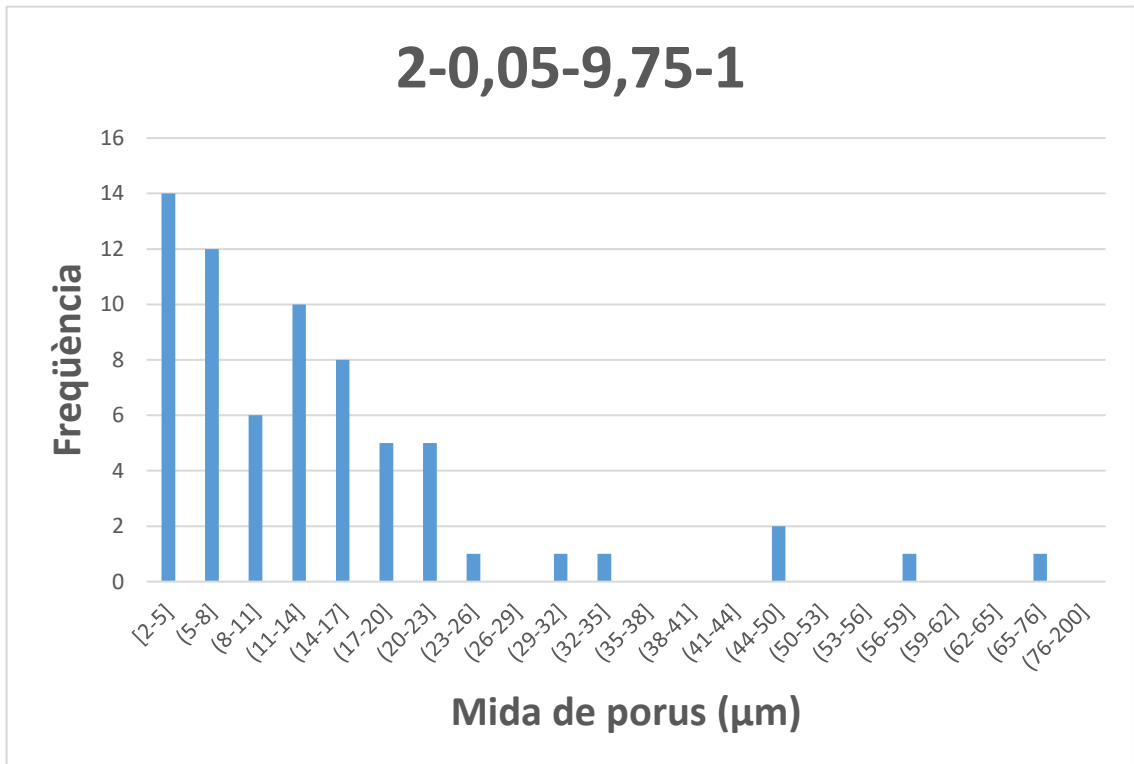


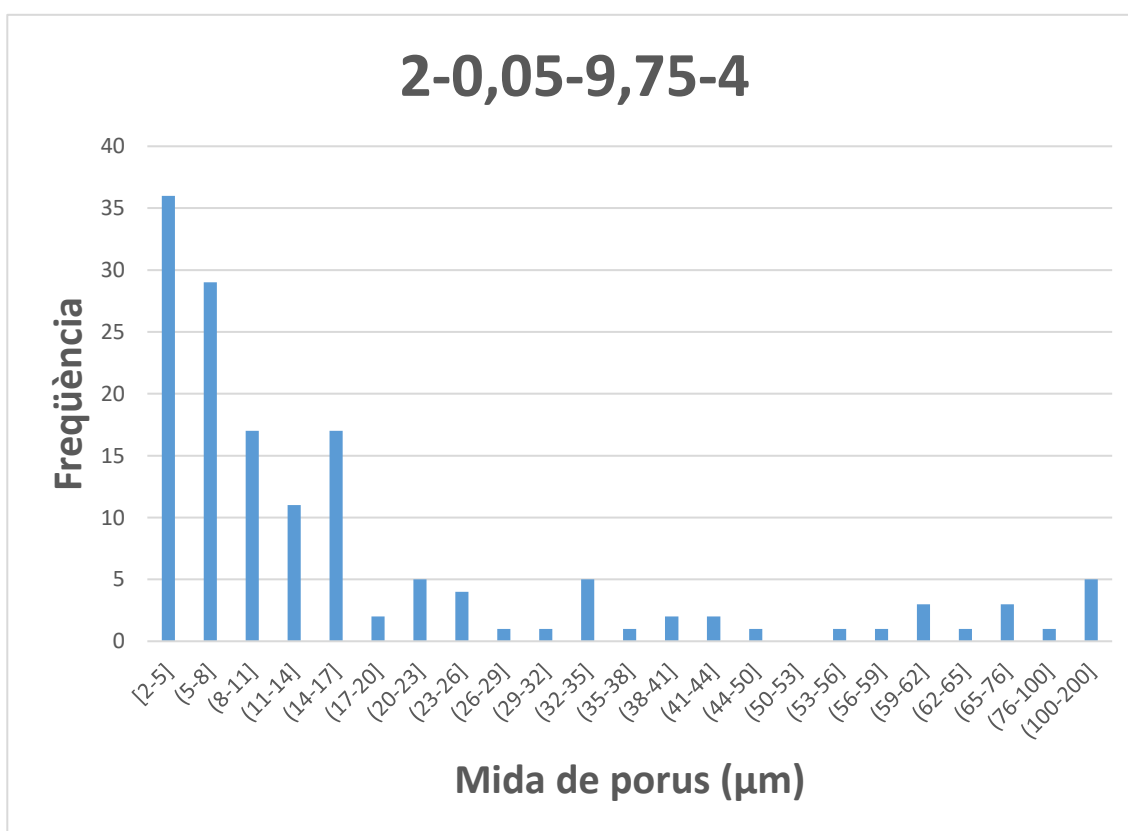
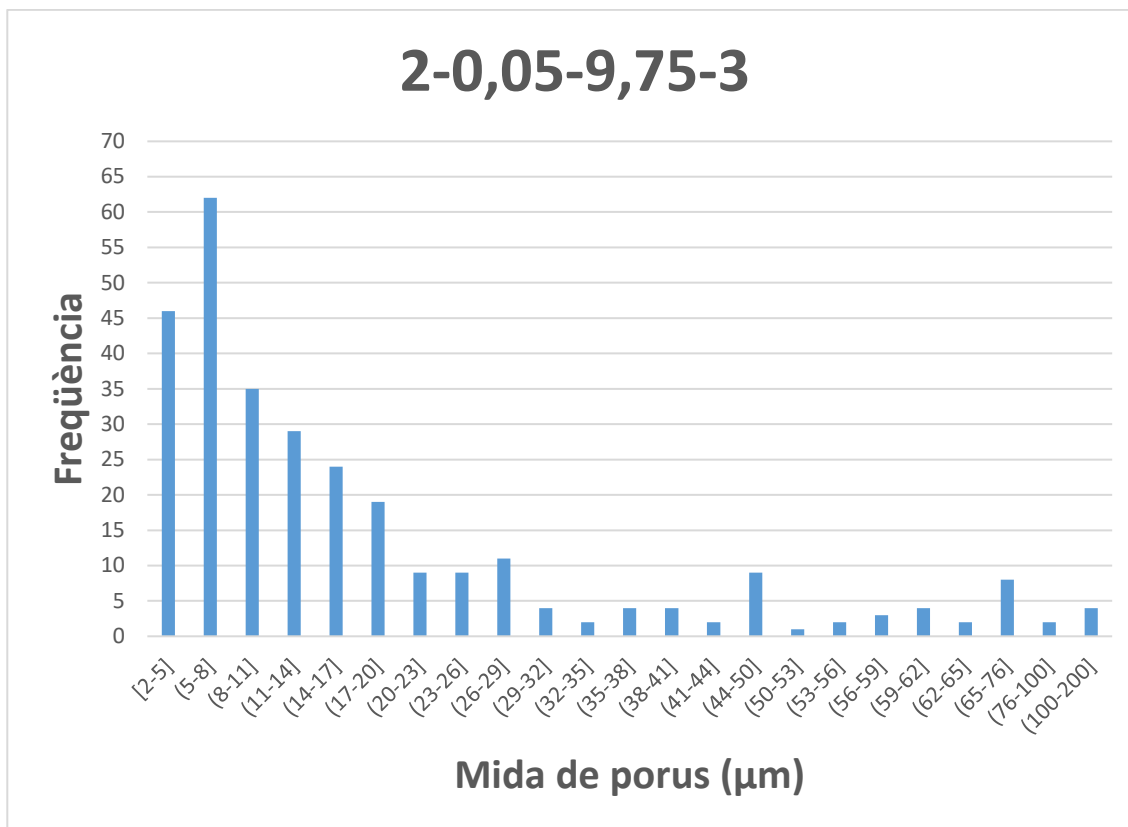
2-0,05-5,00



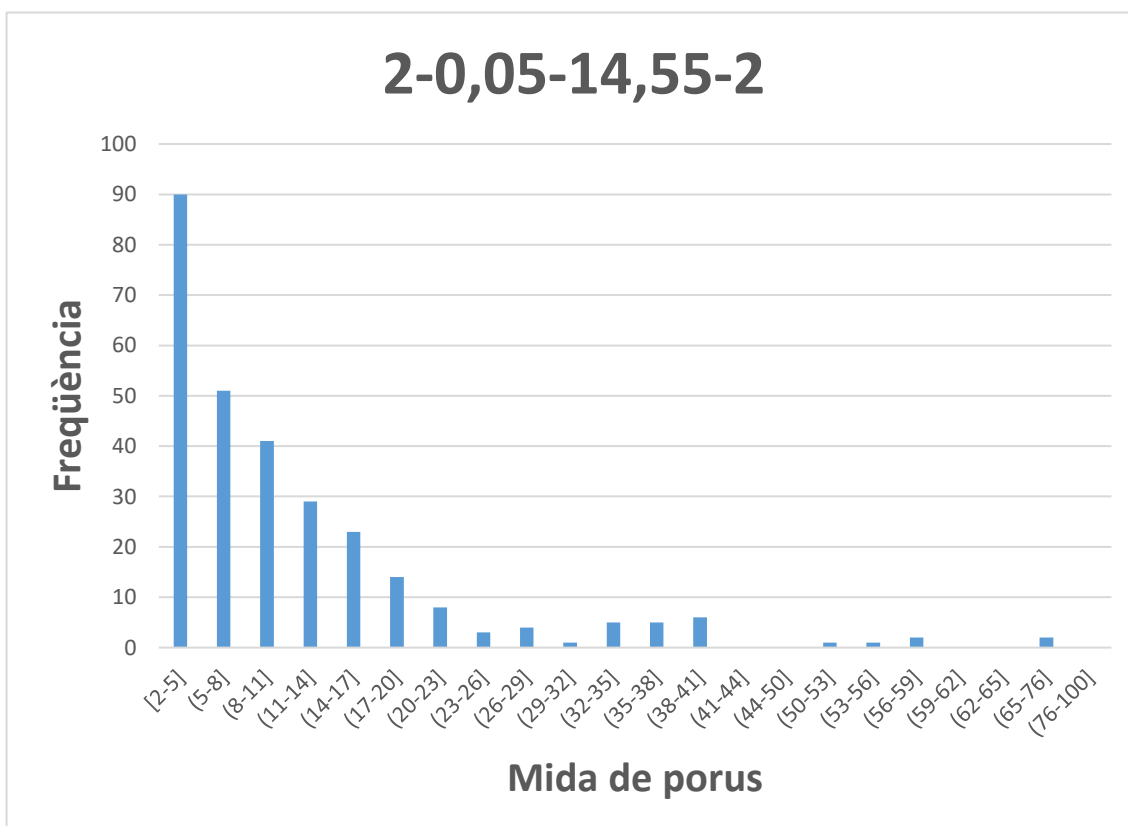
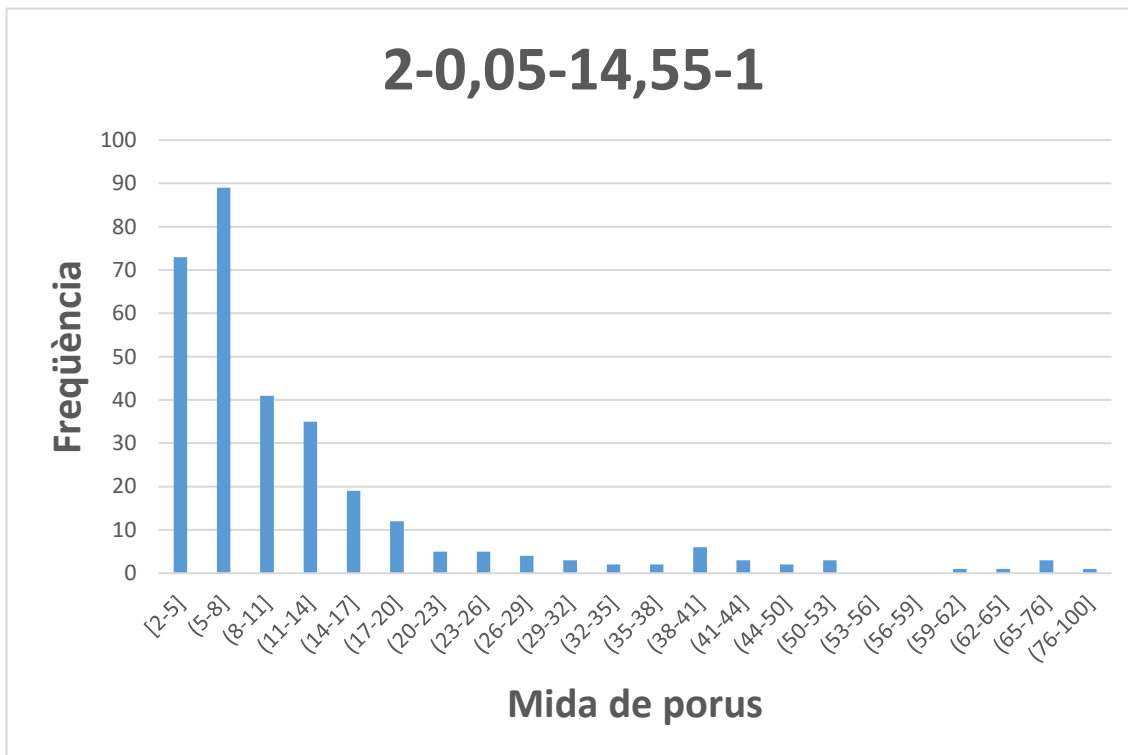


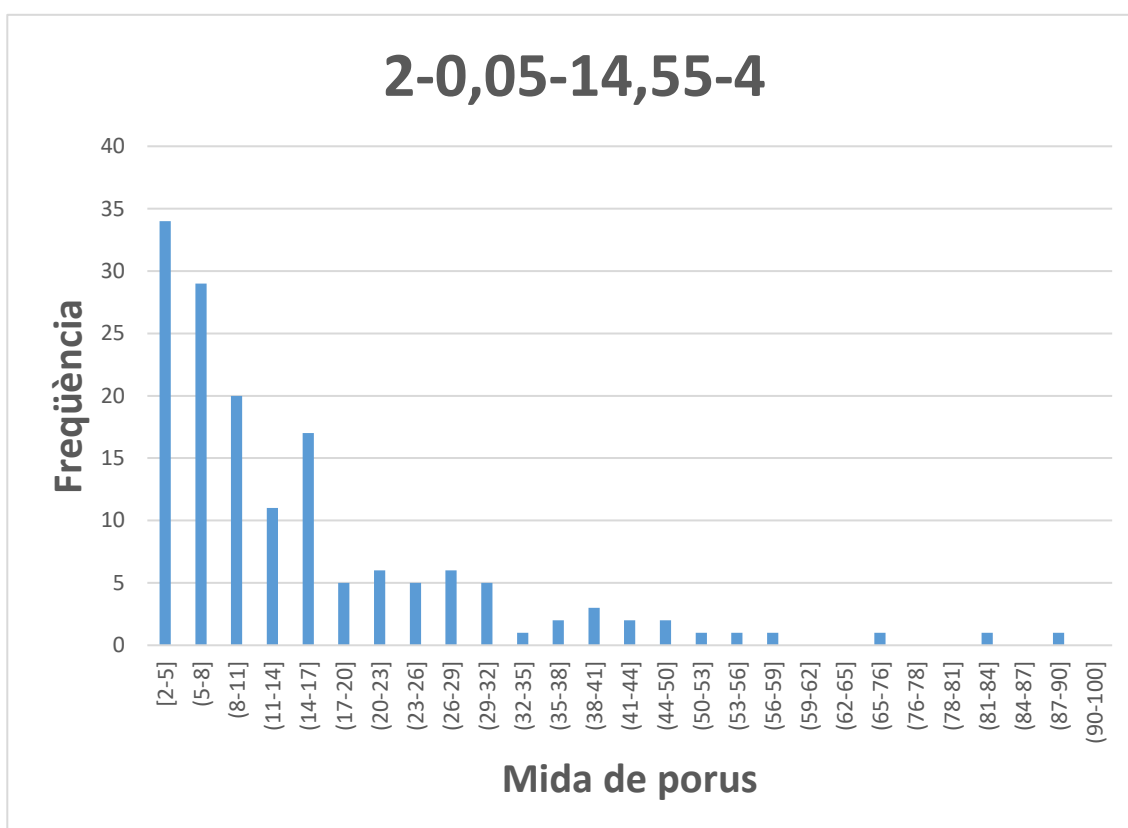
2-0,05-9,75



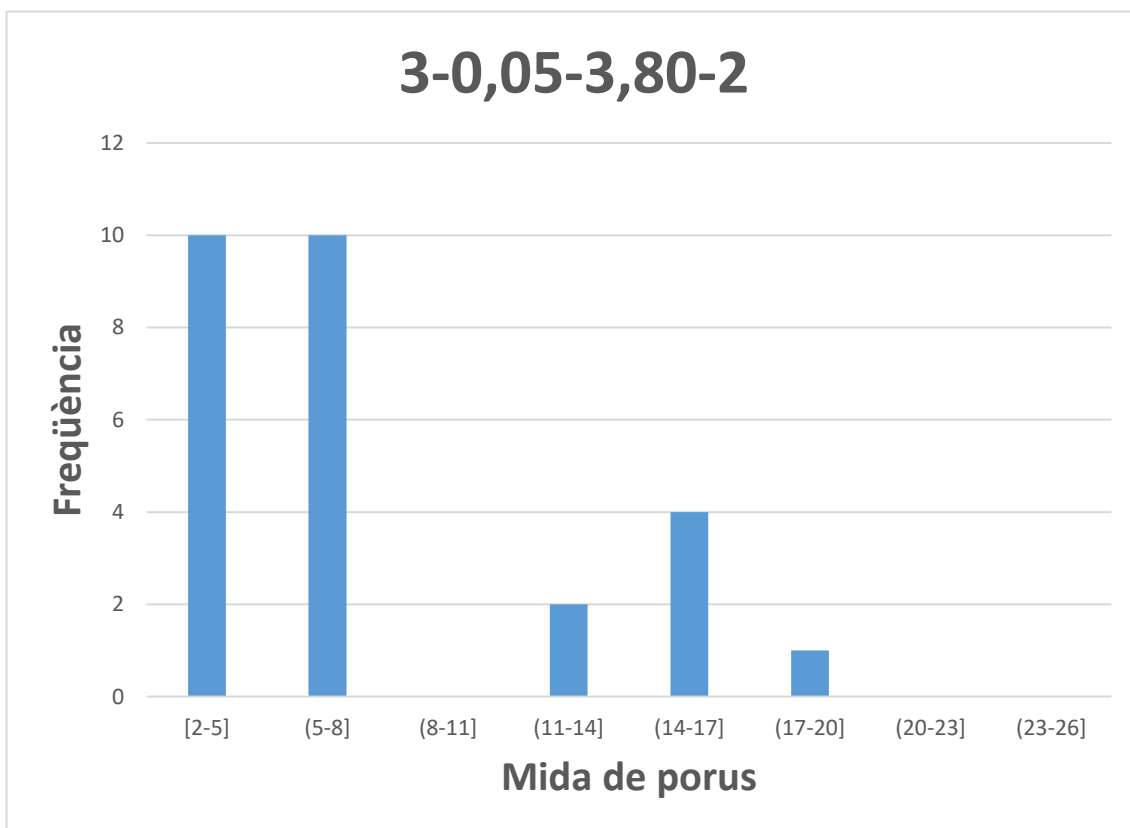
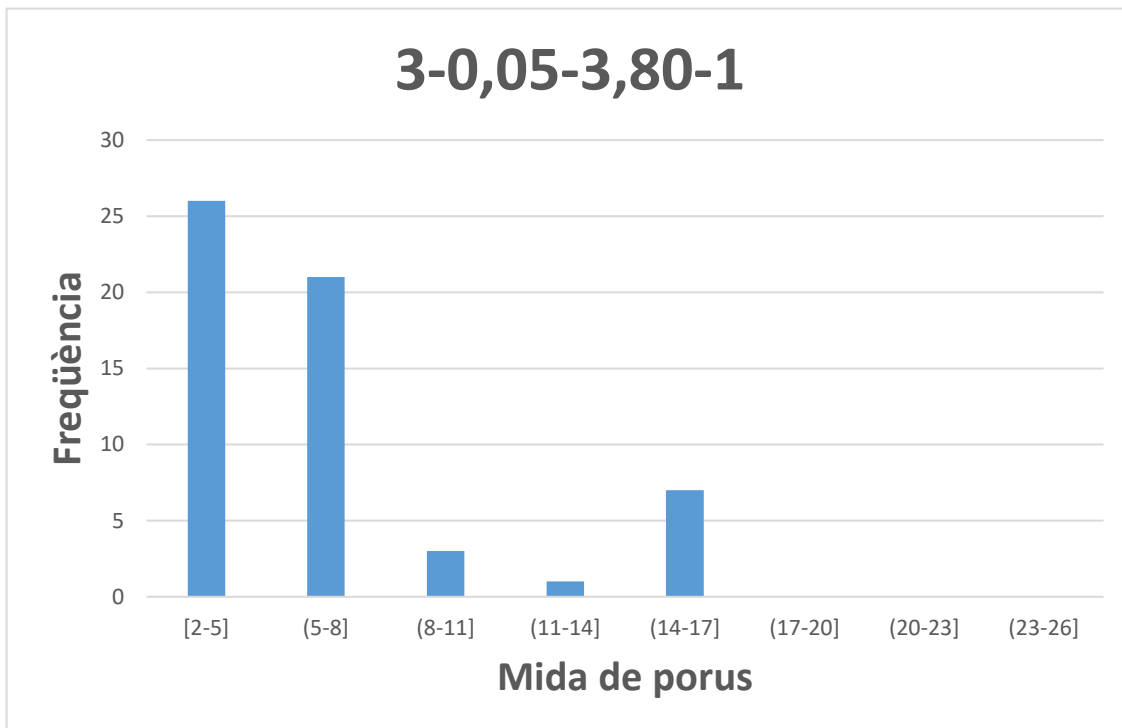


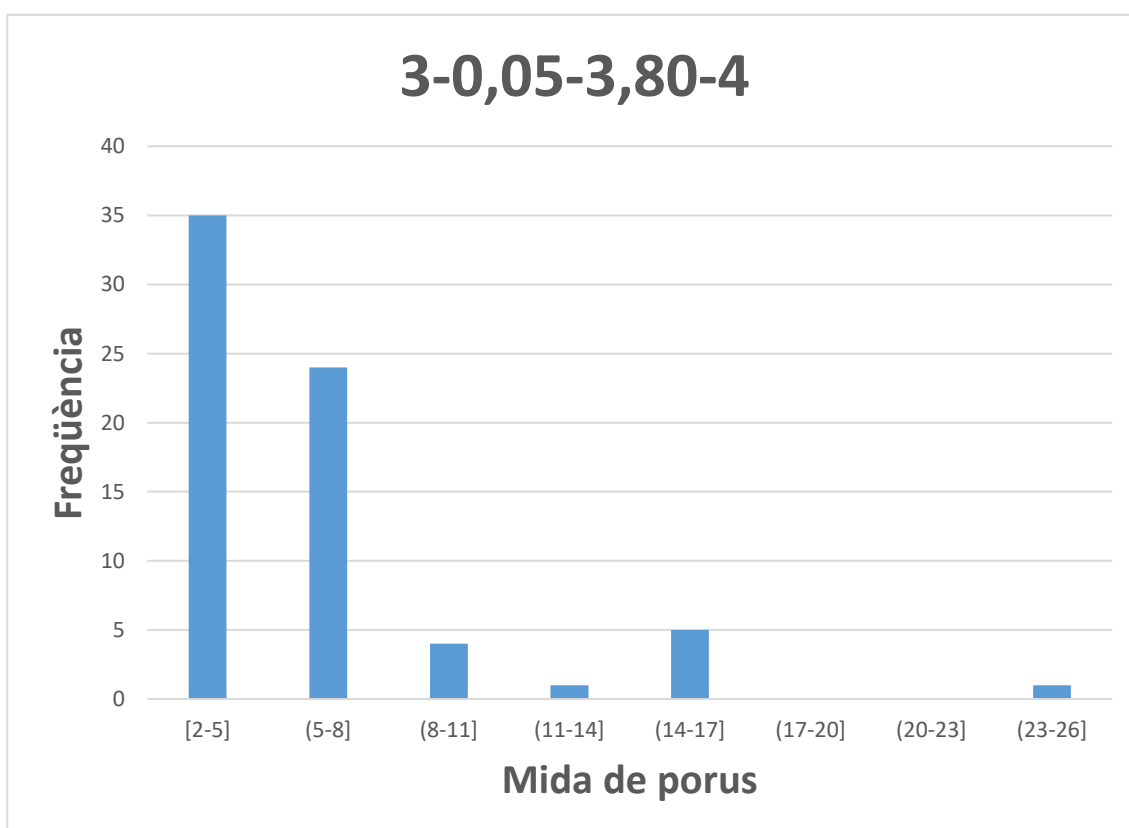
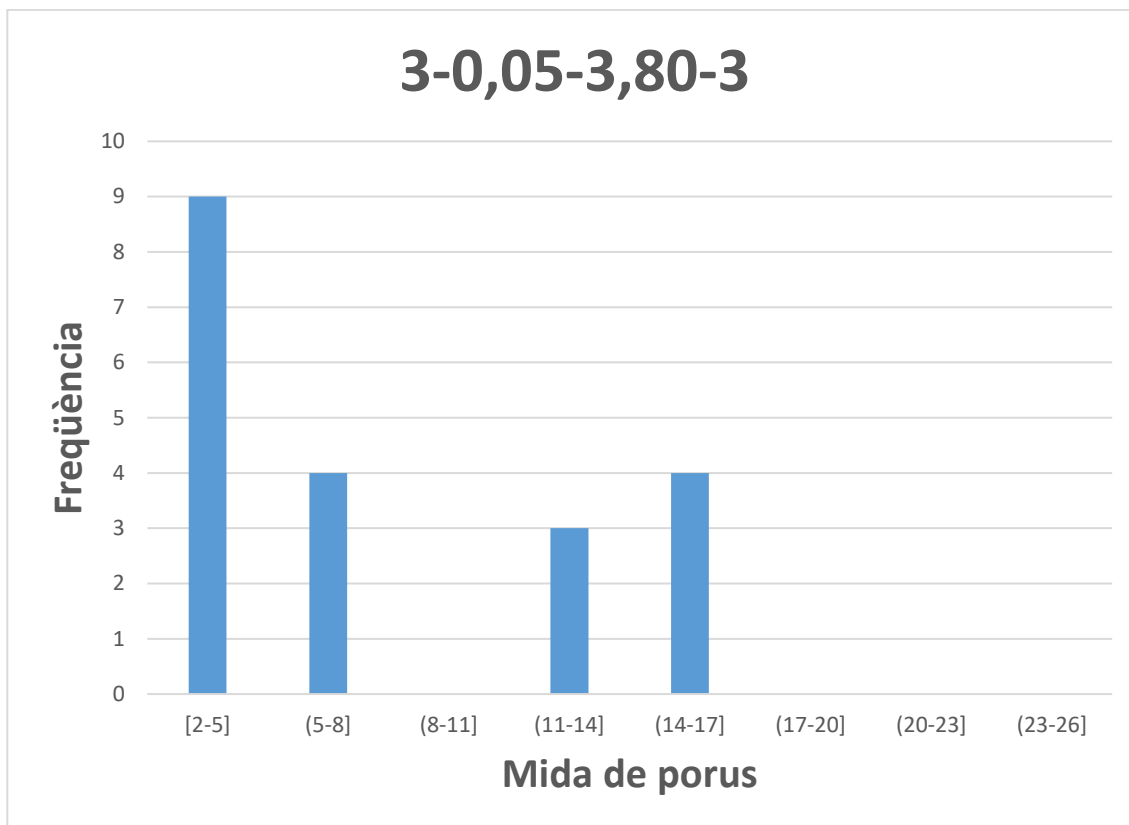
2-0,05-14,55



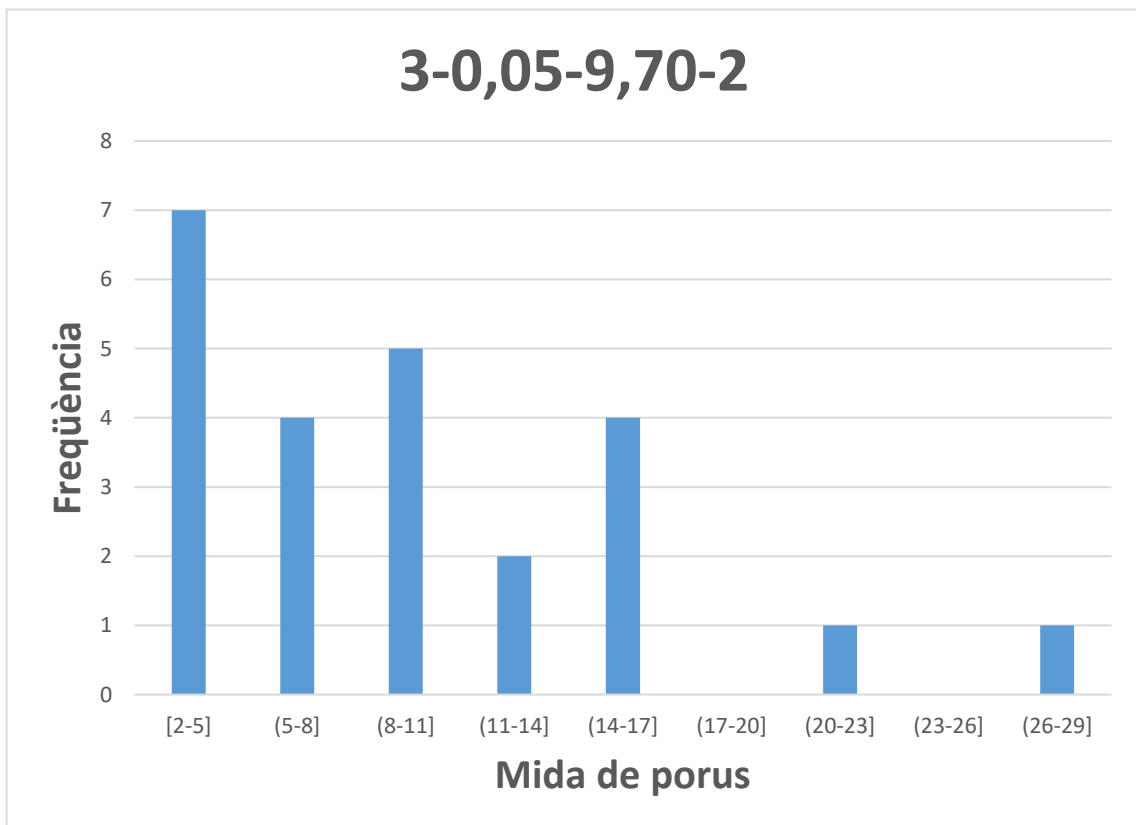
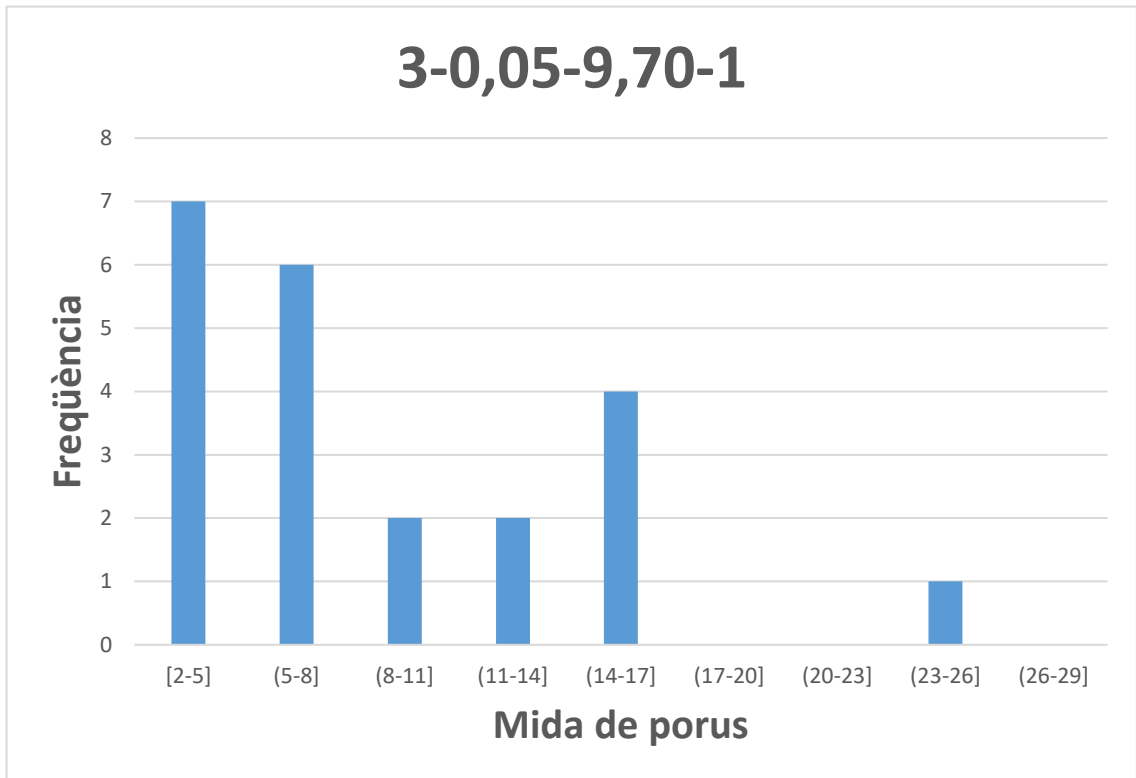


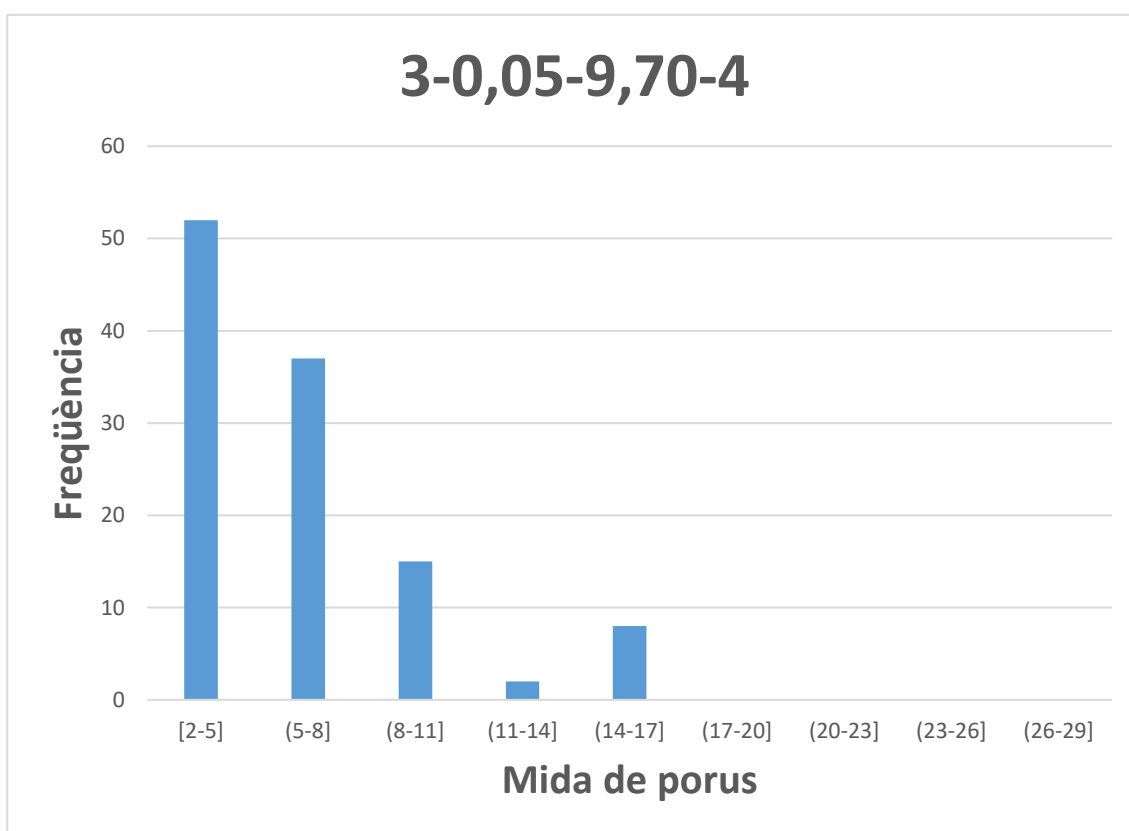
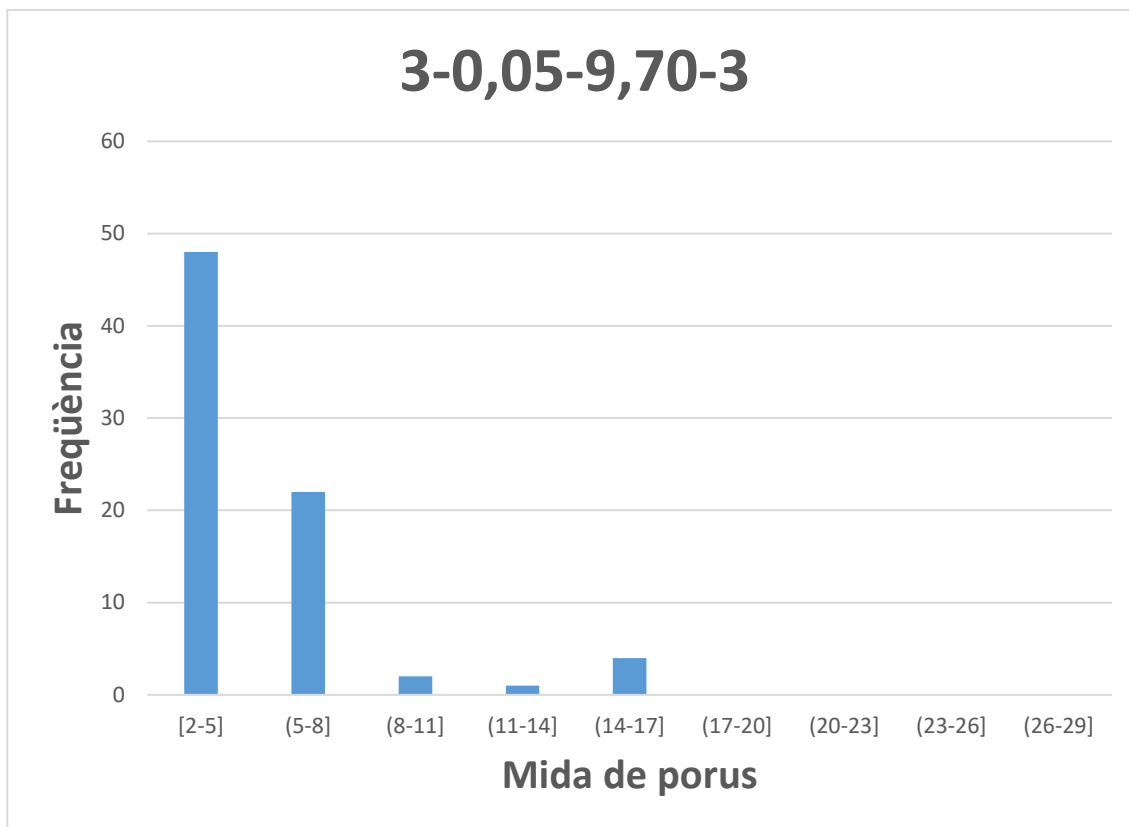
3-0,05-3,80



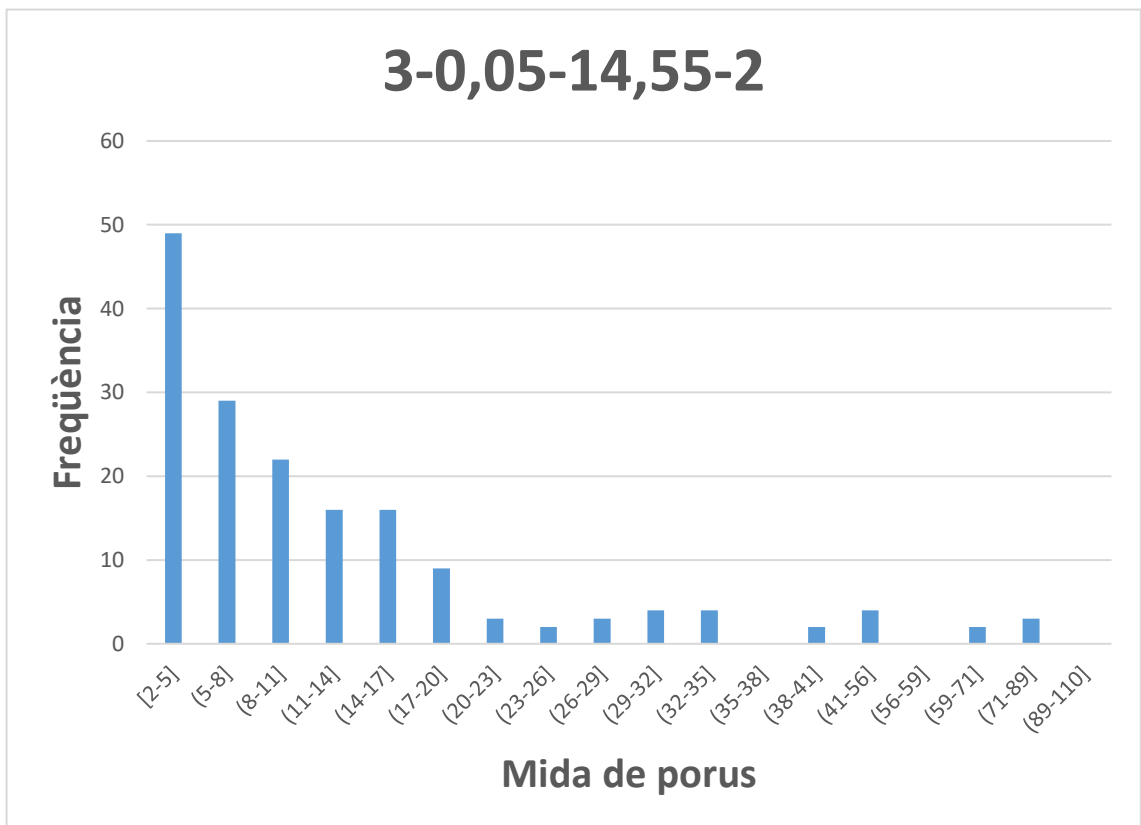
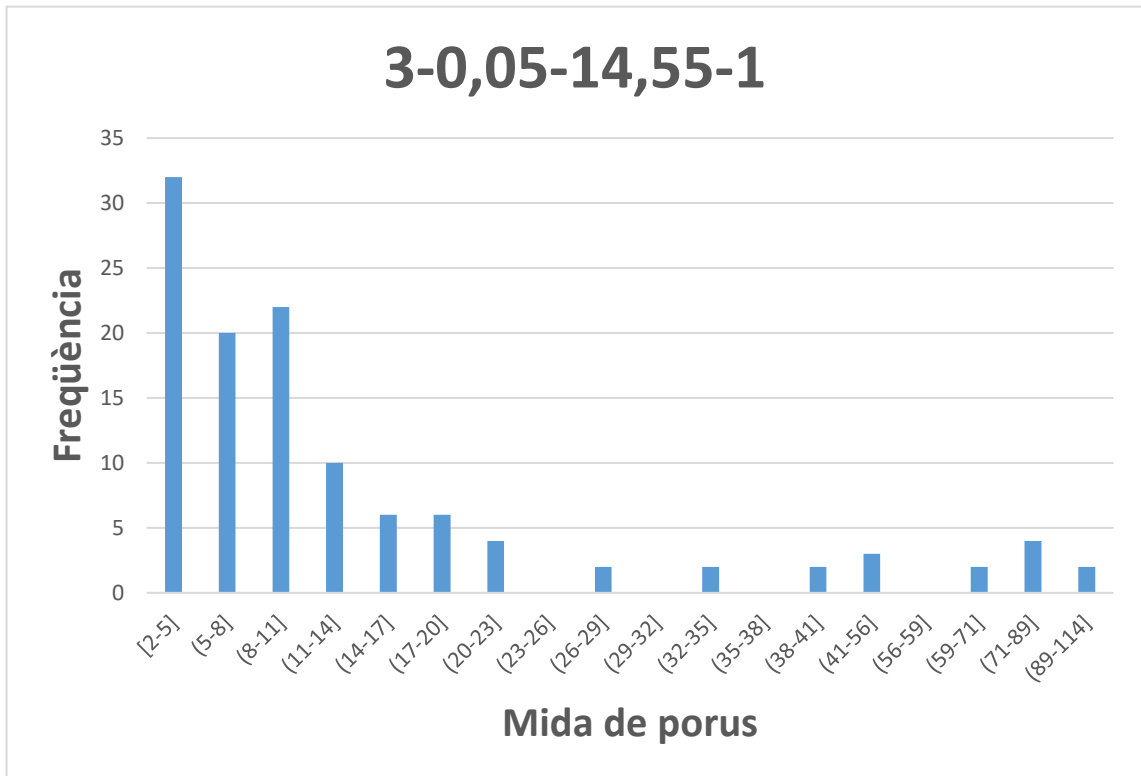


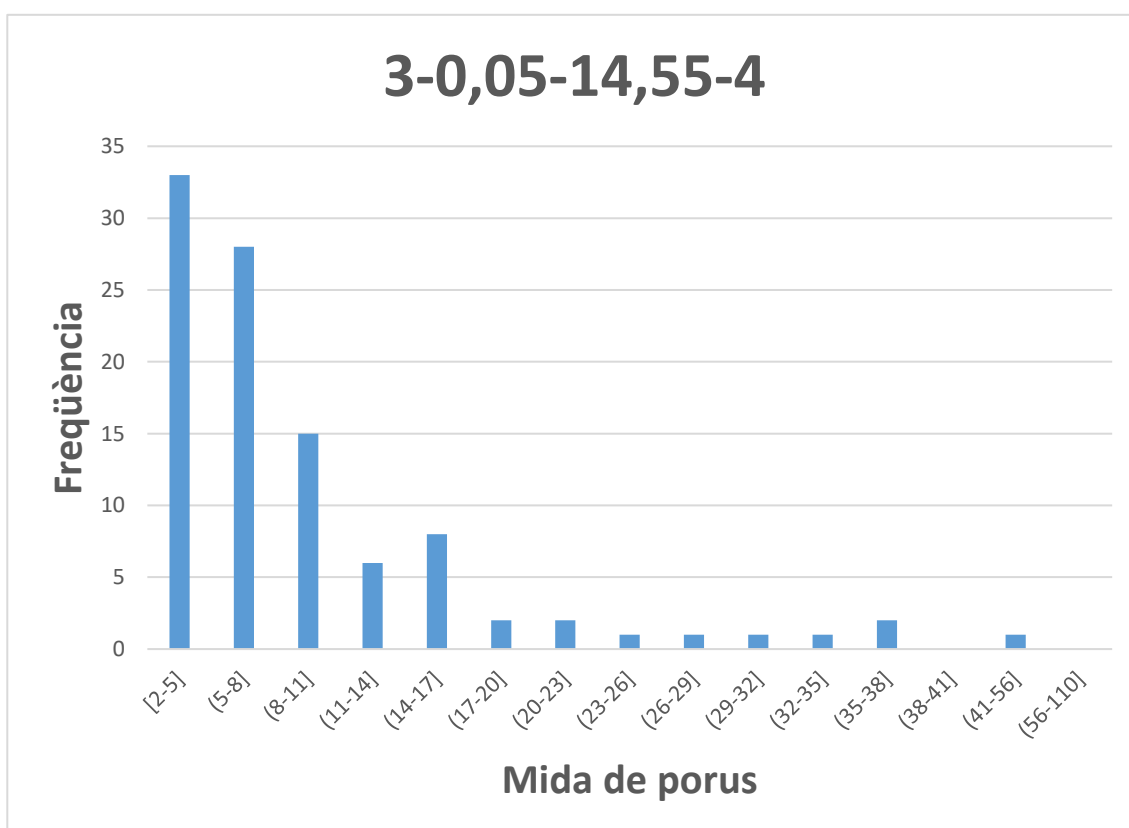
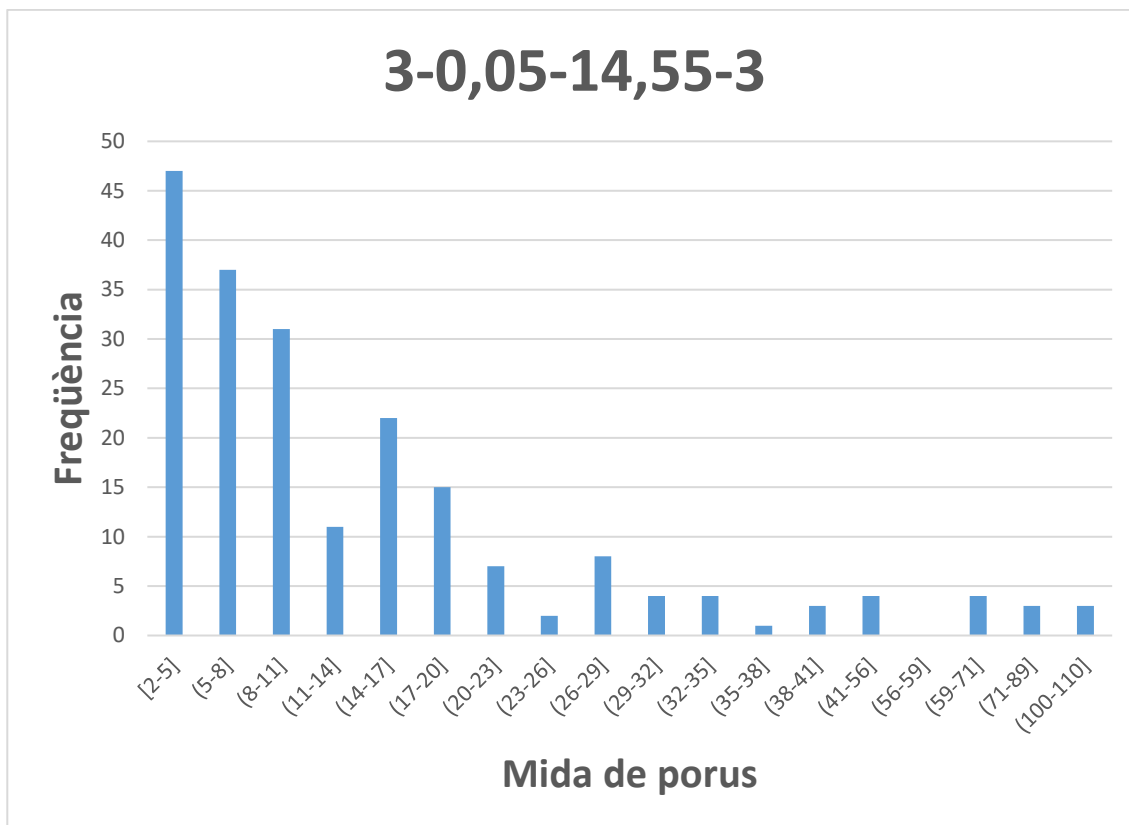
3-0,05-9,70



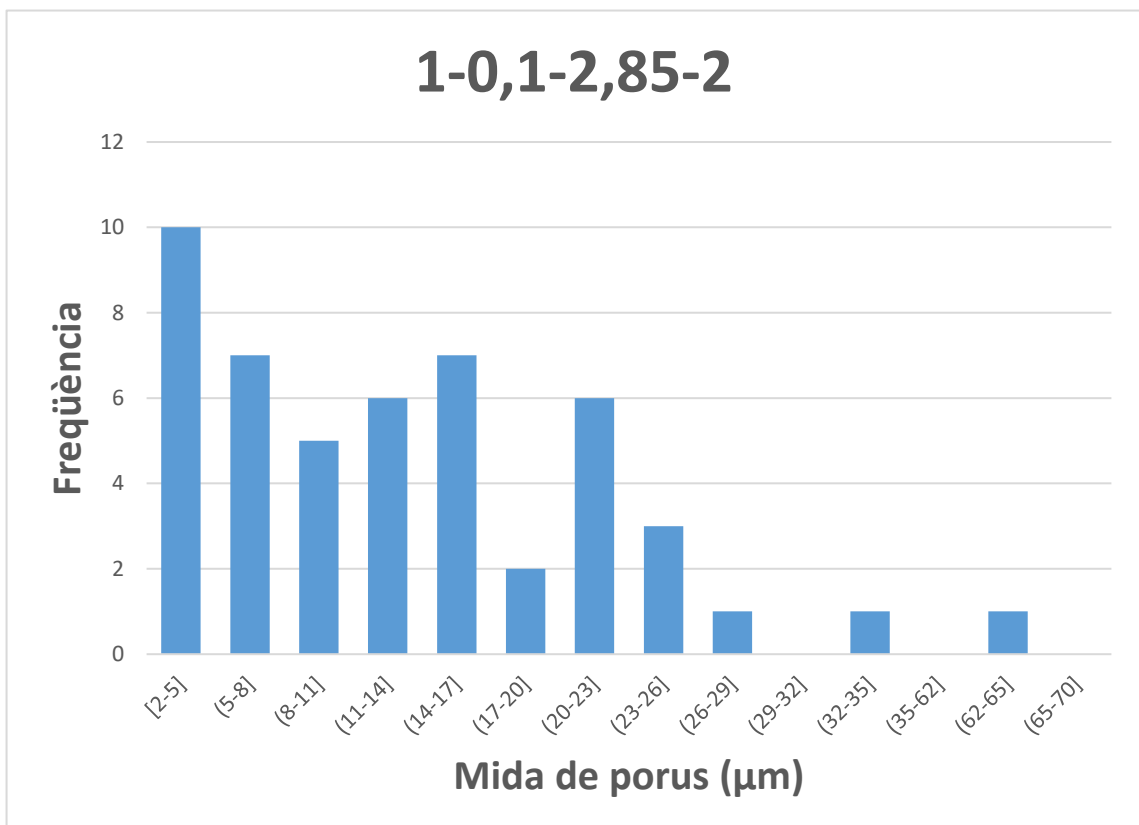
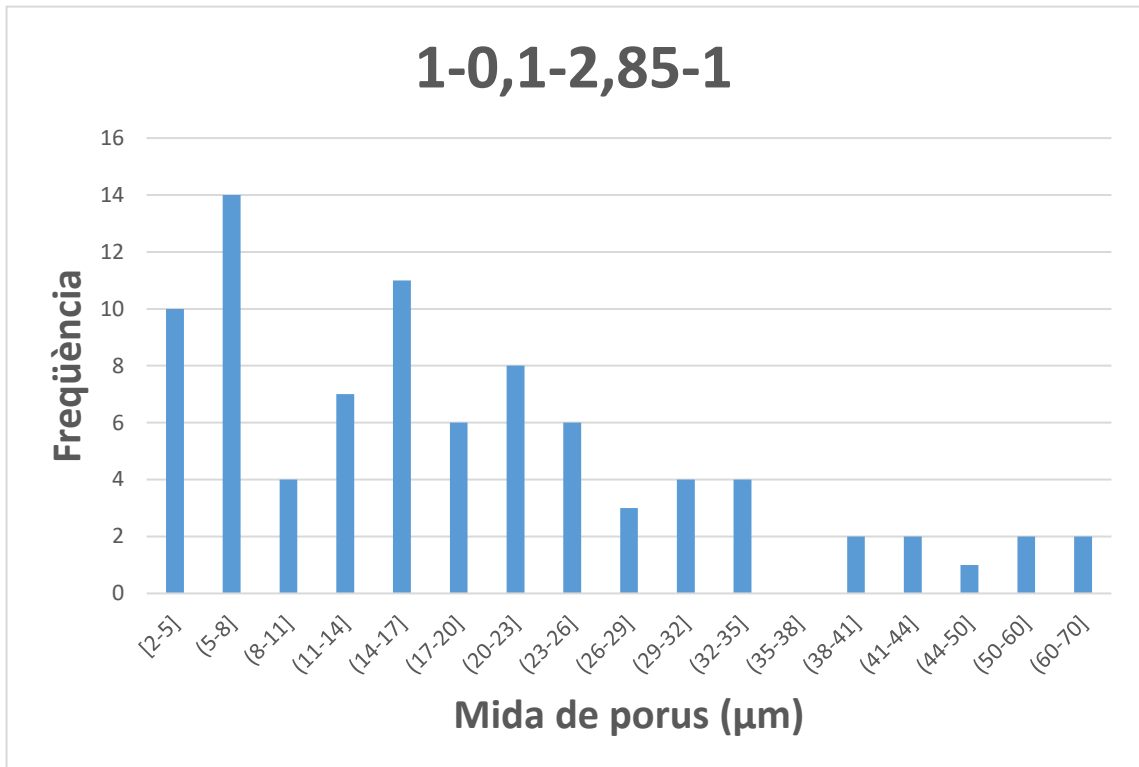


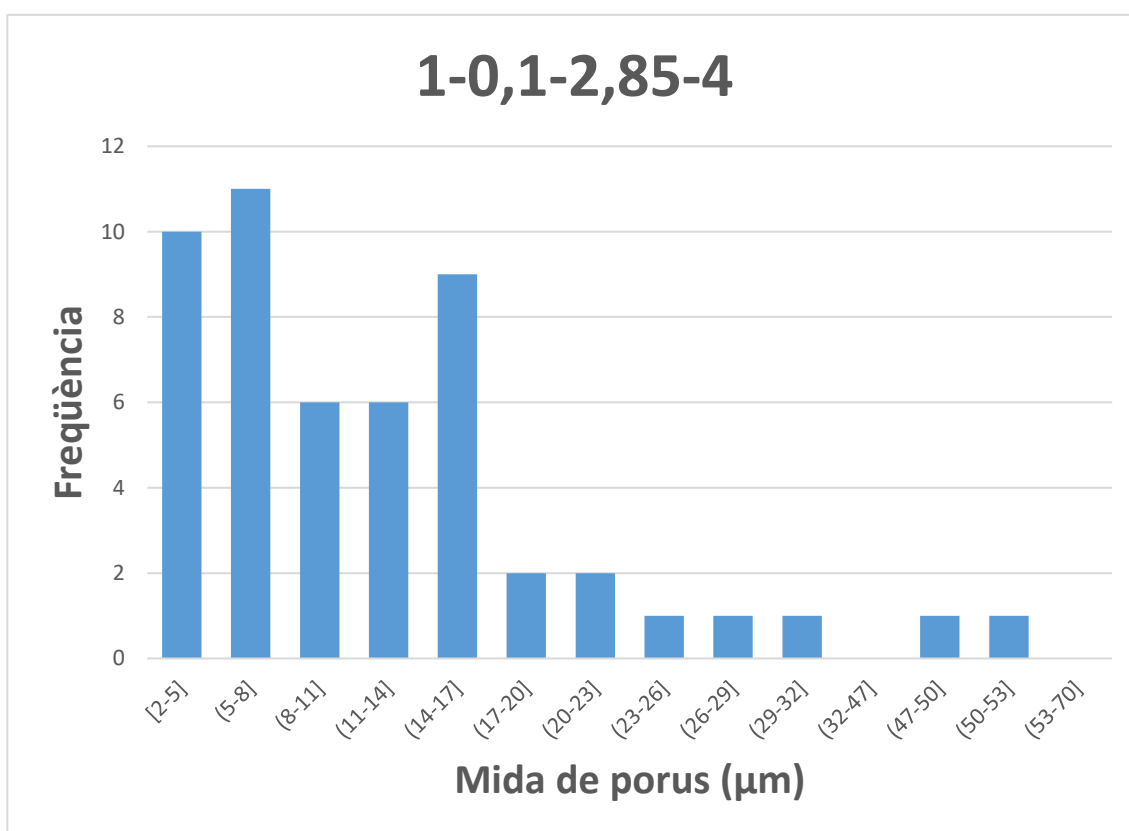
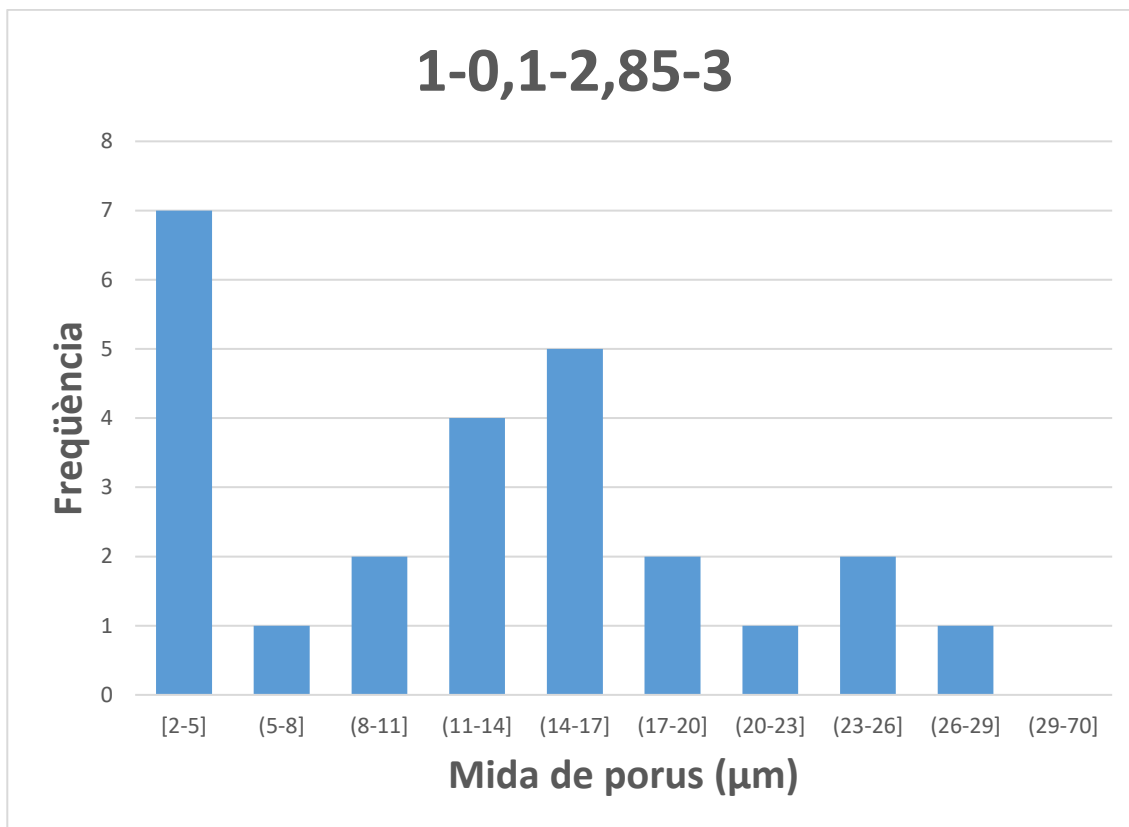
3-0,05-14,55



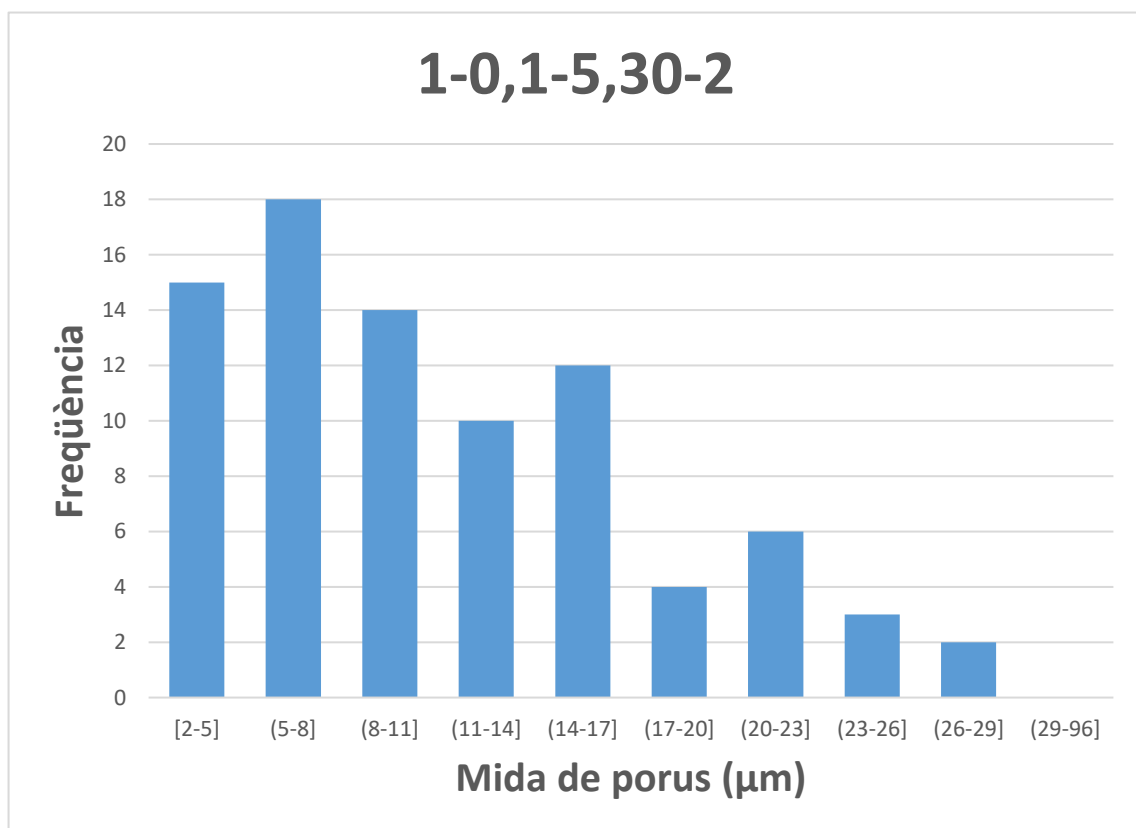
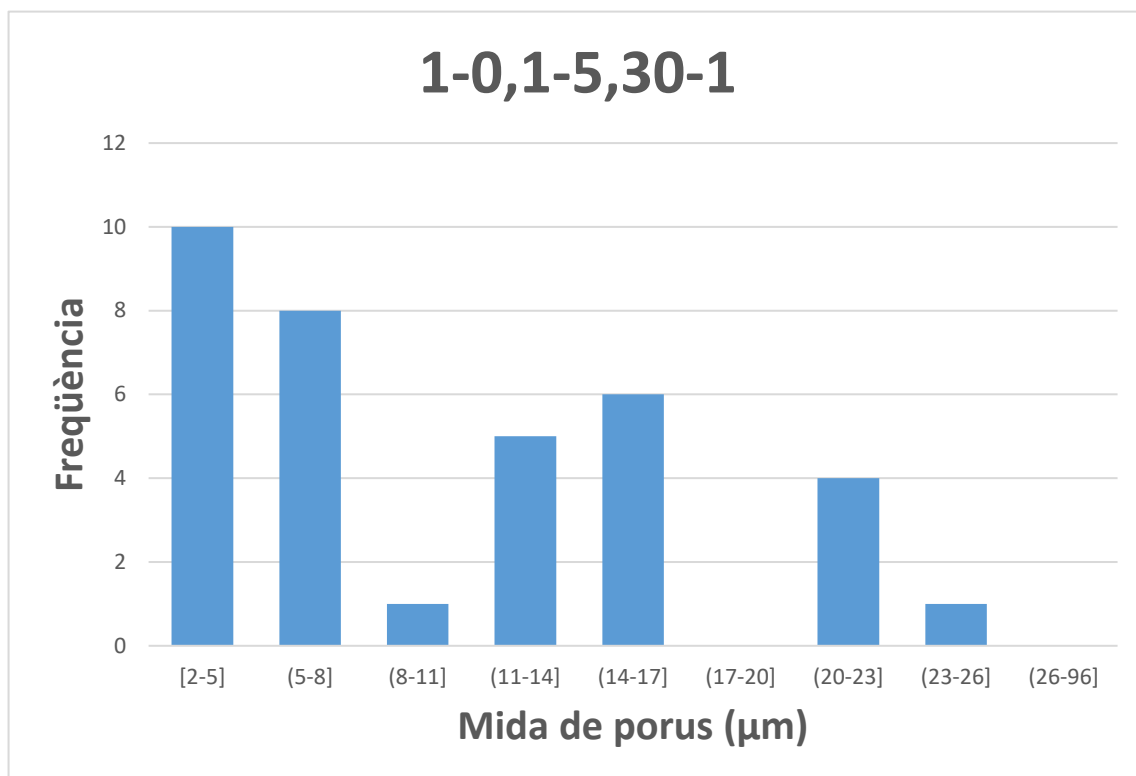


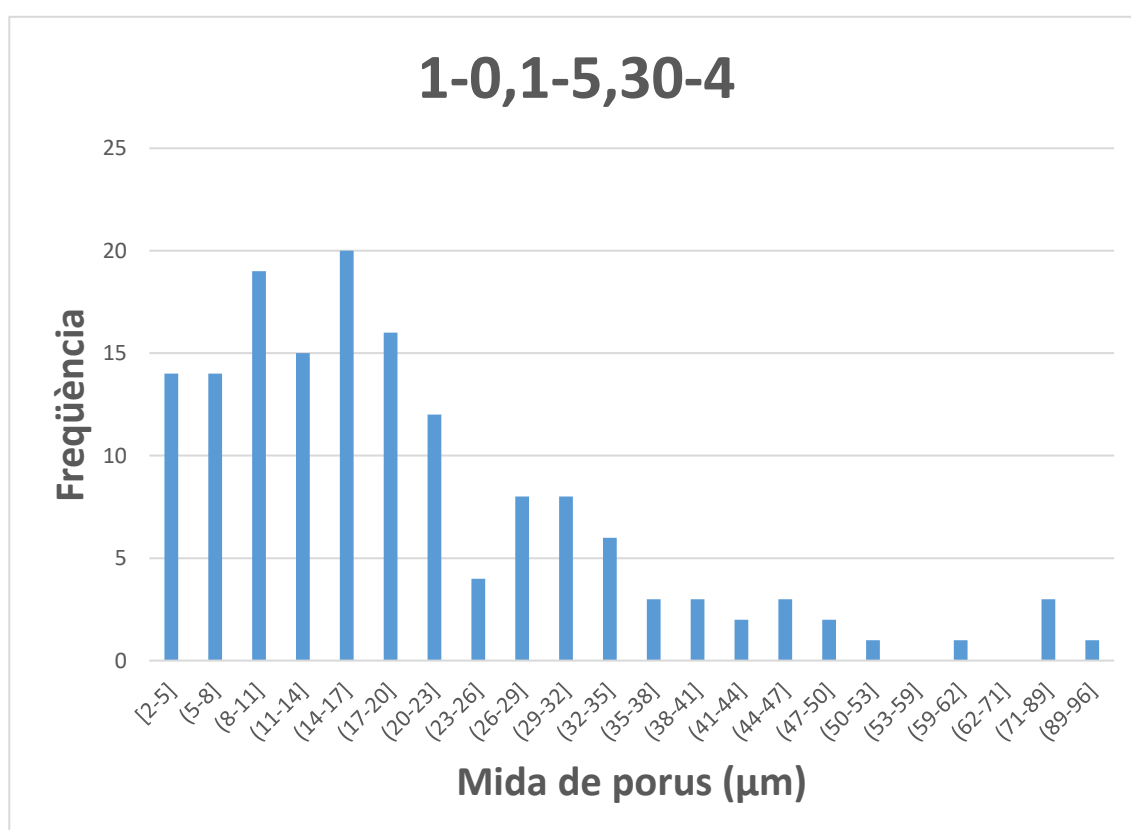
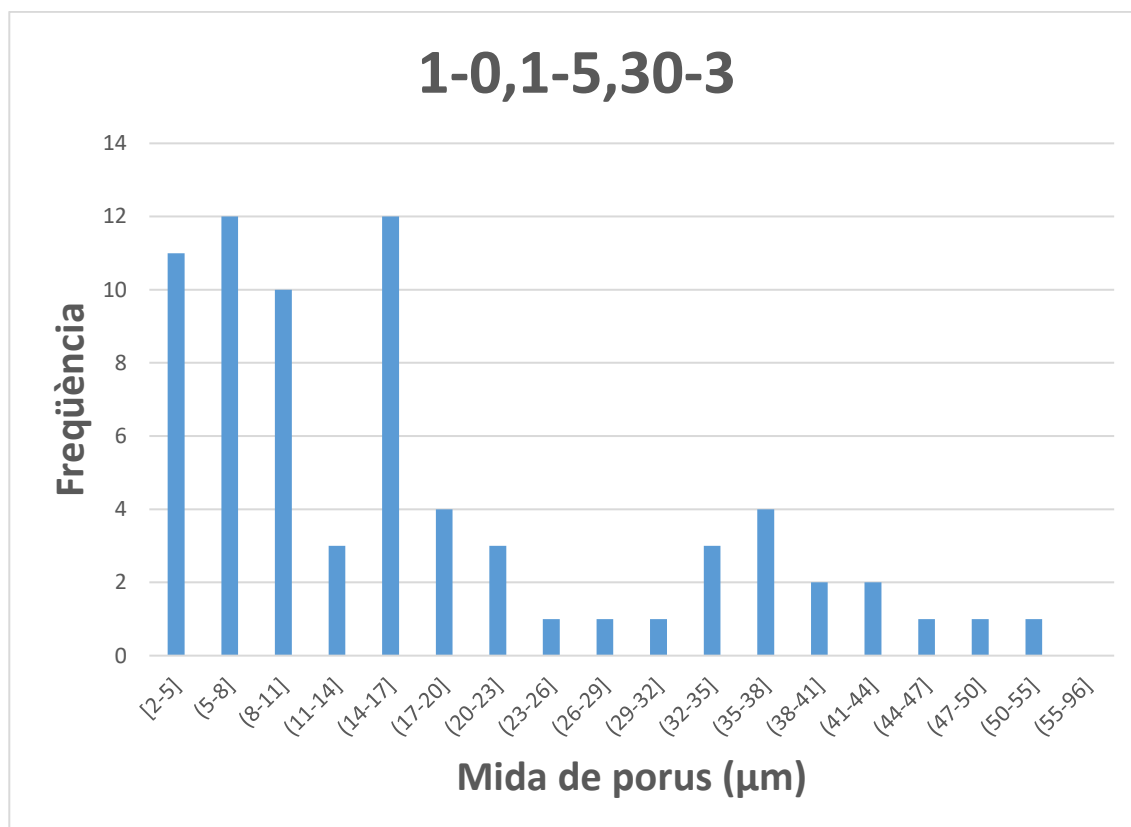
1-0,1-2,85



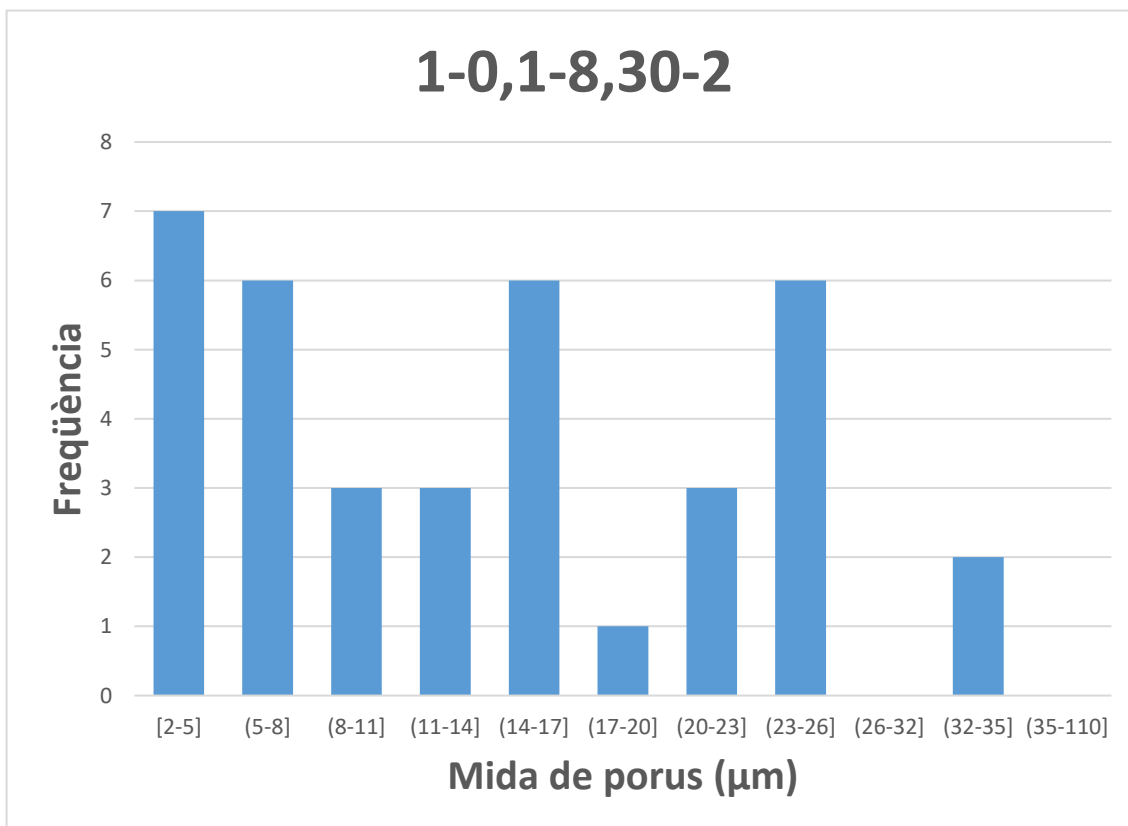
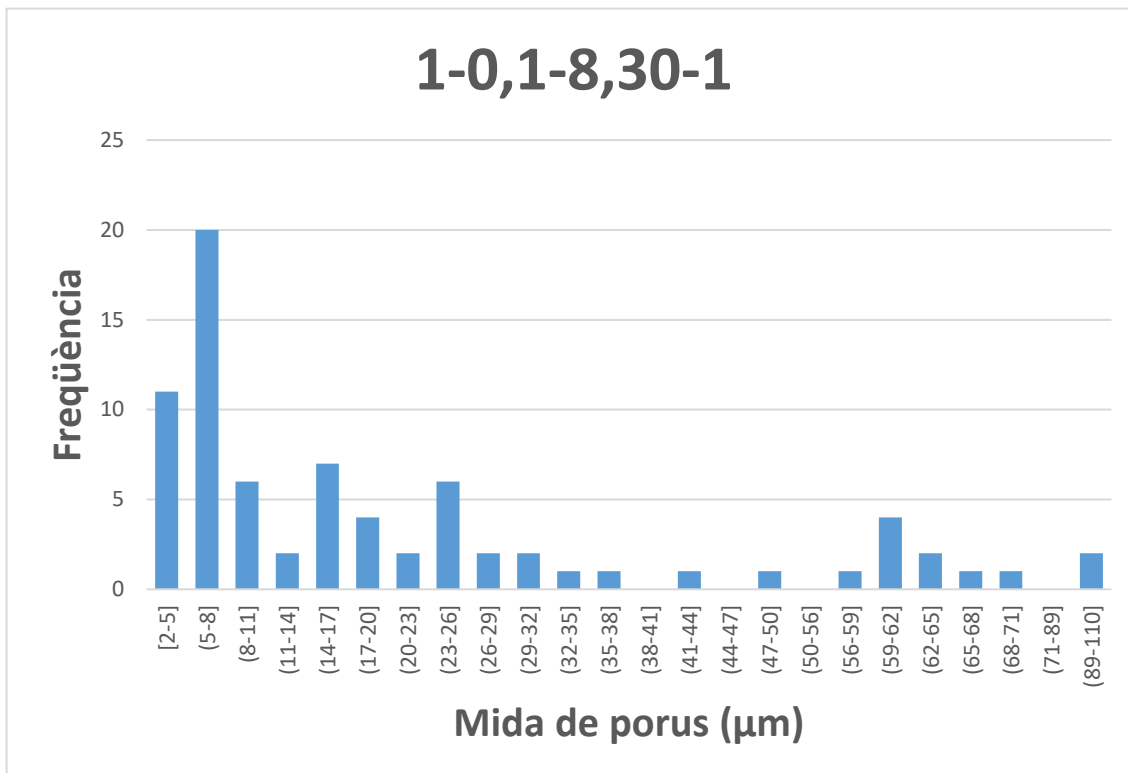


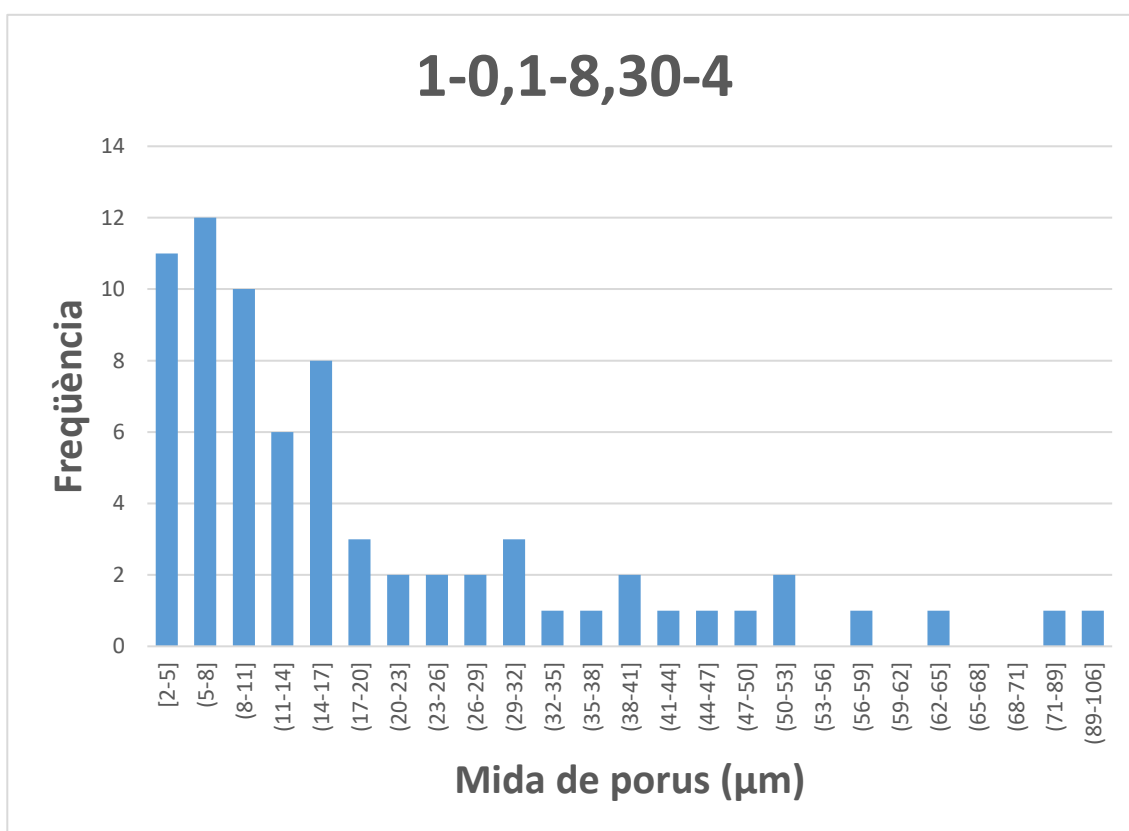
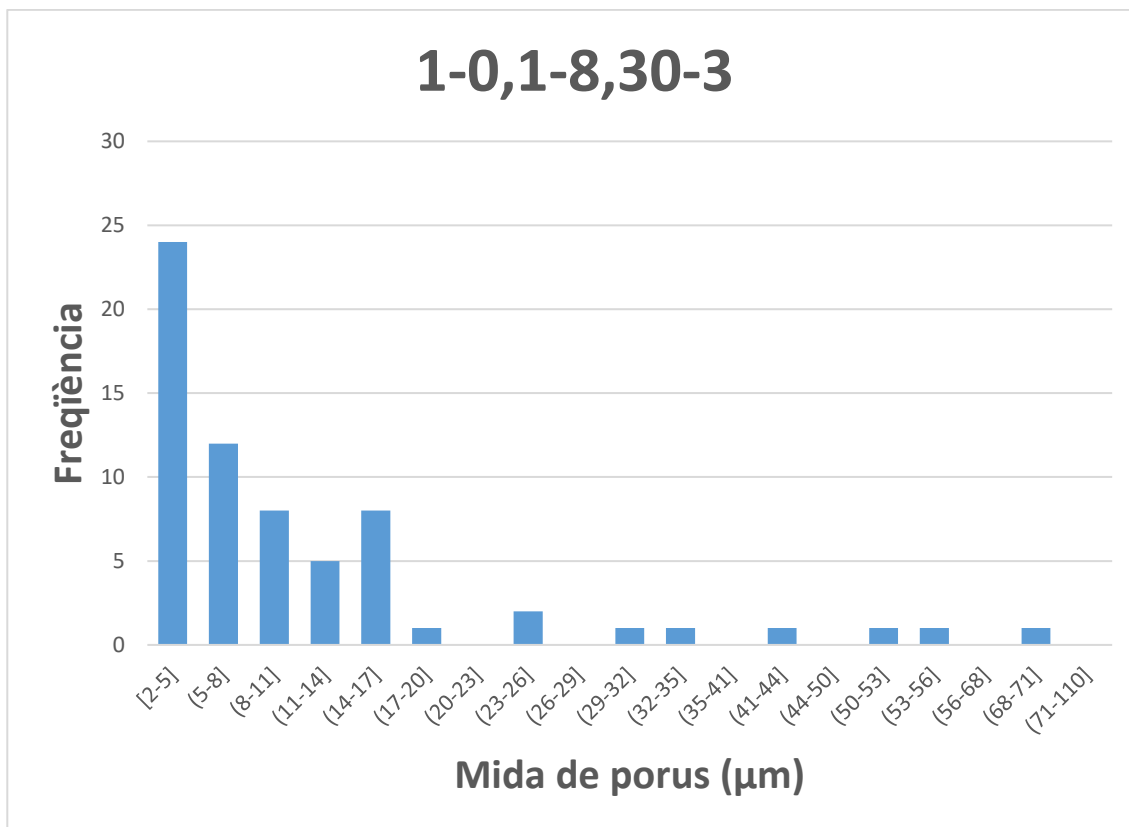
1-0,1-5,30



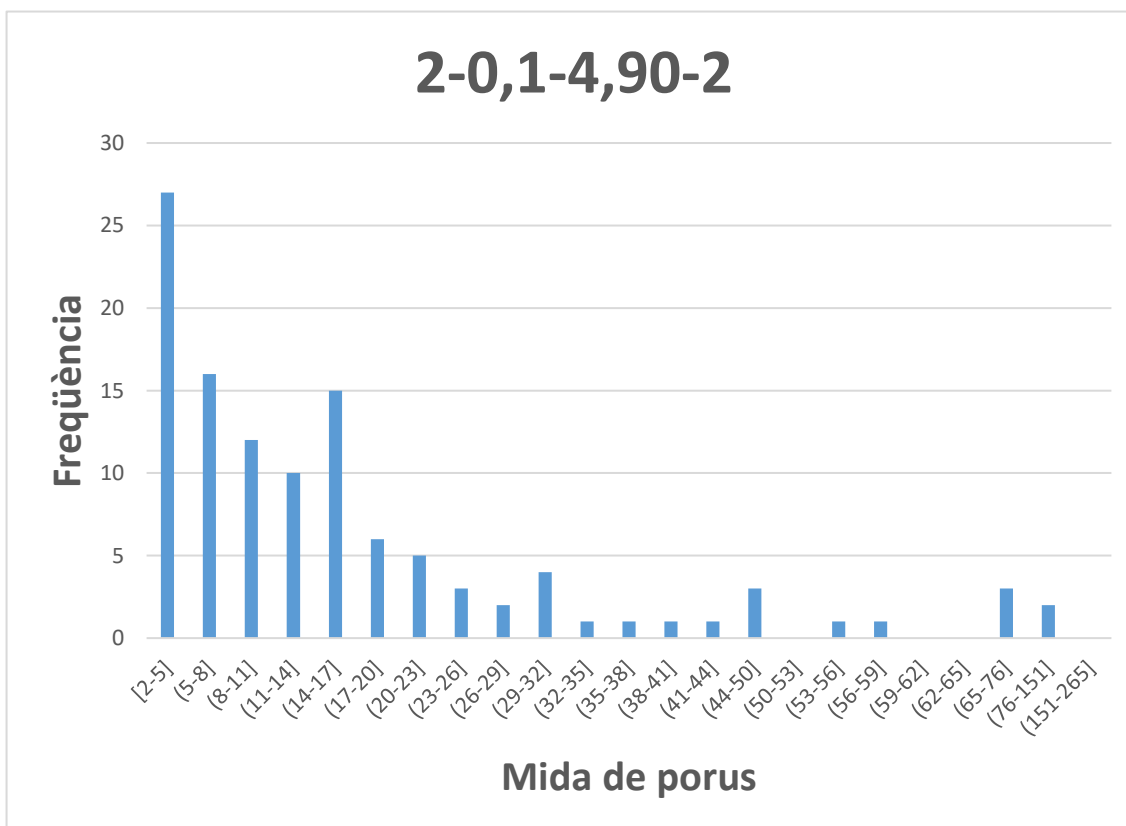
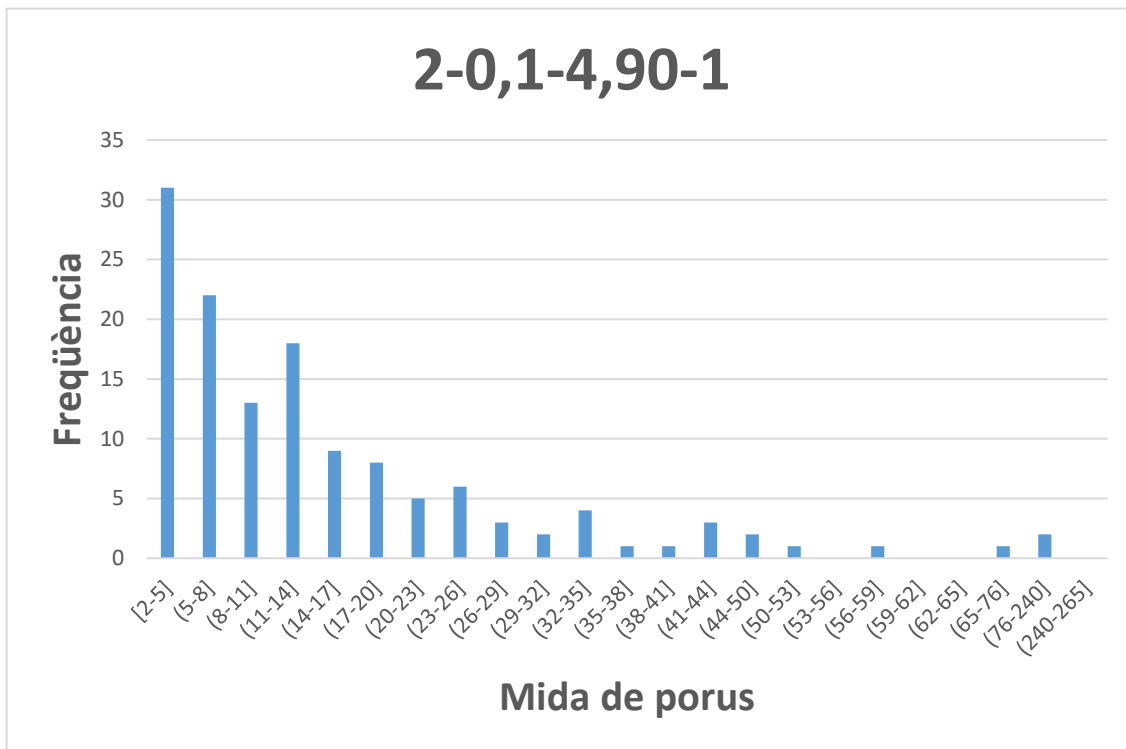


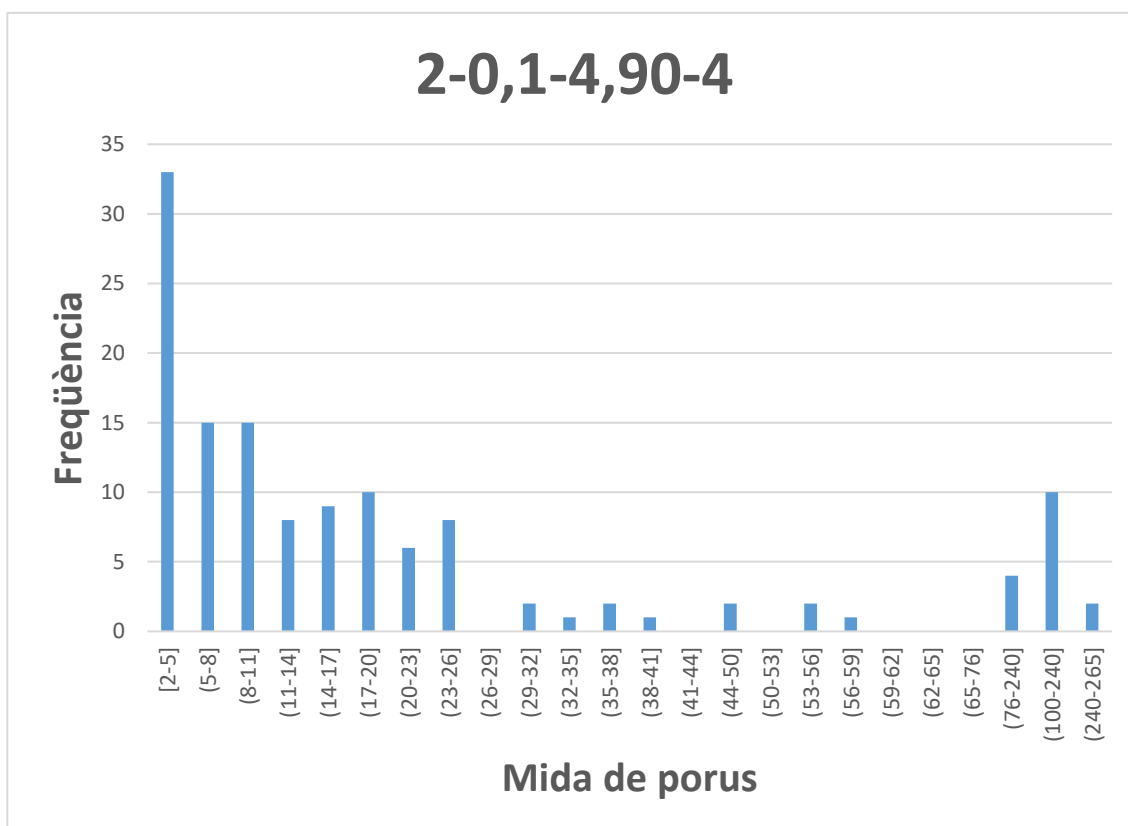
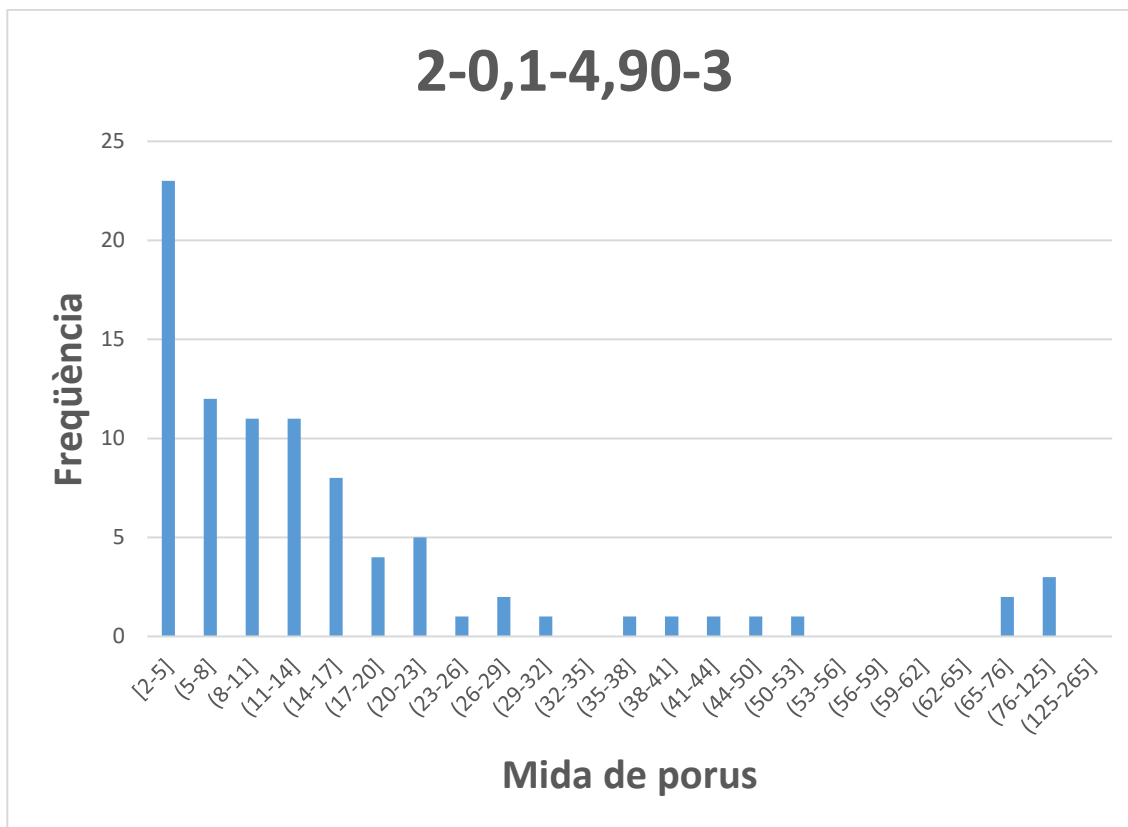
1-0,1-8,30



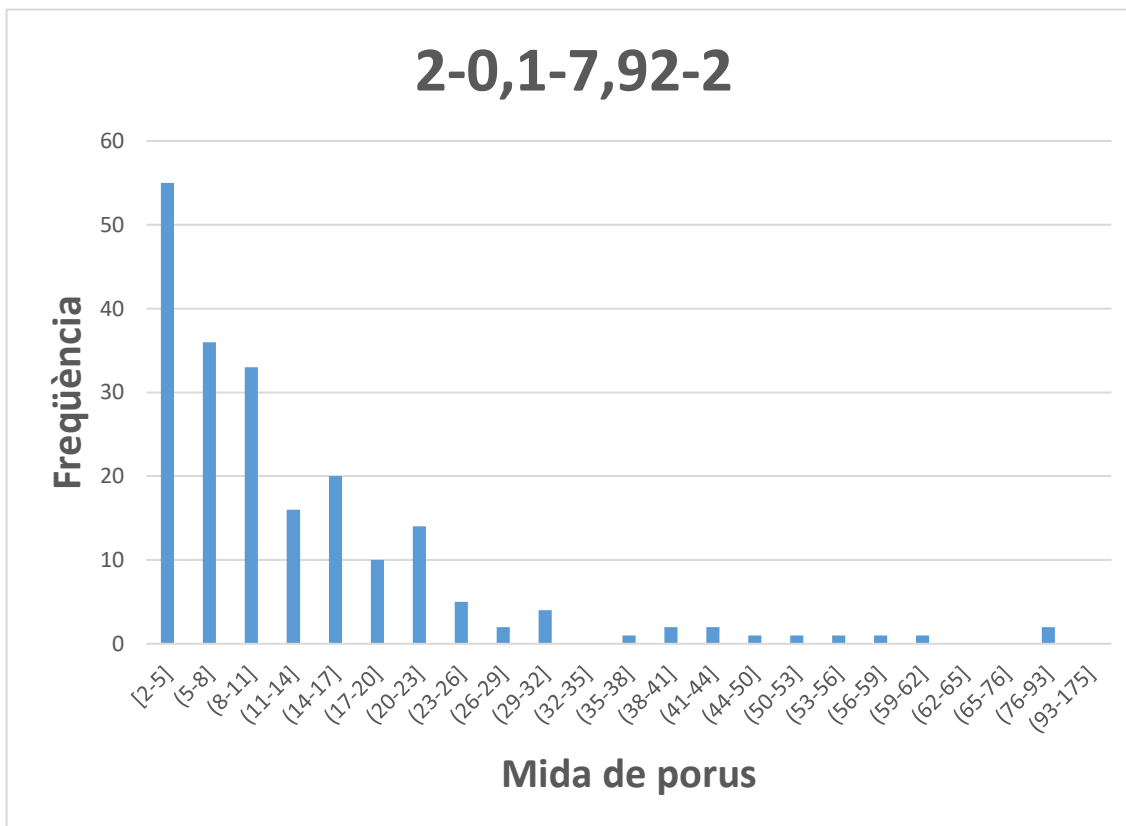
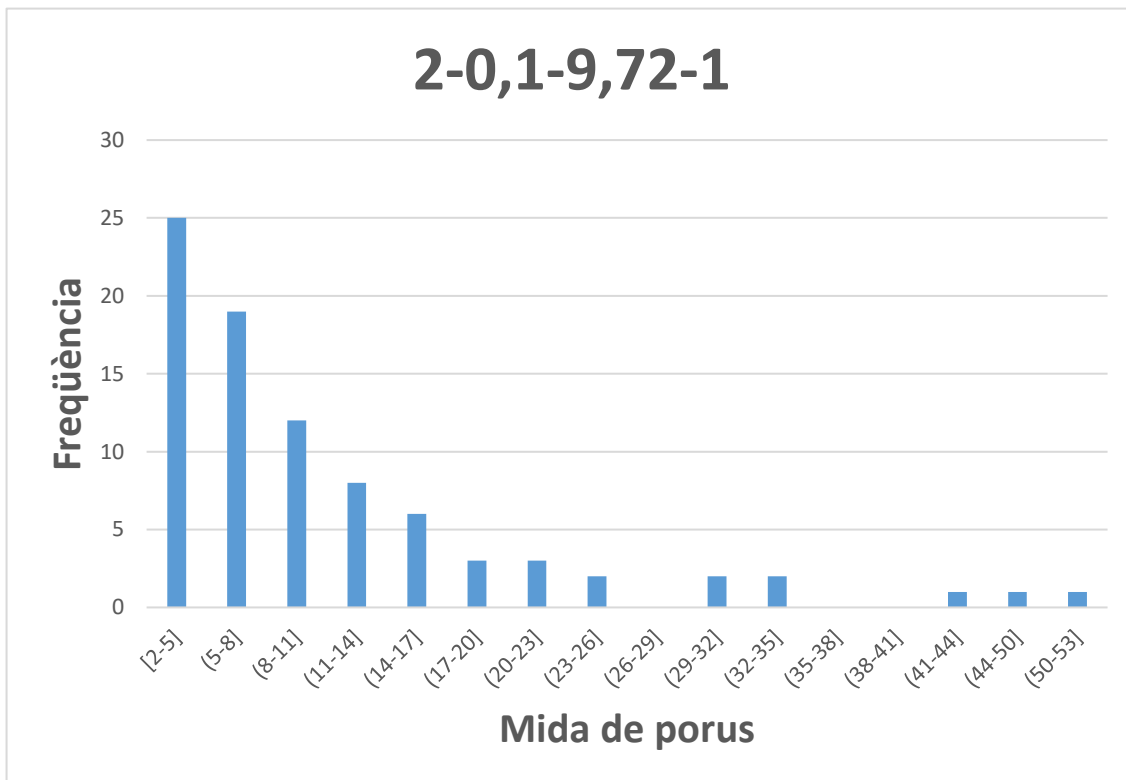


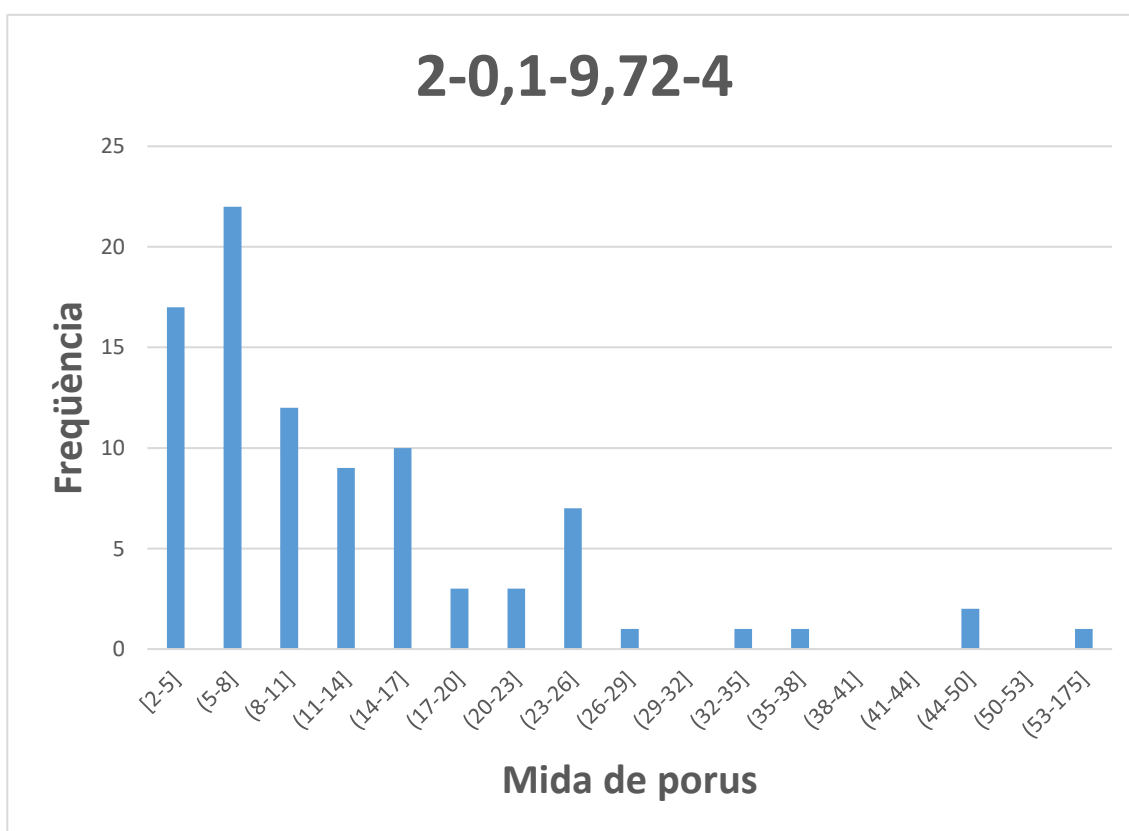
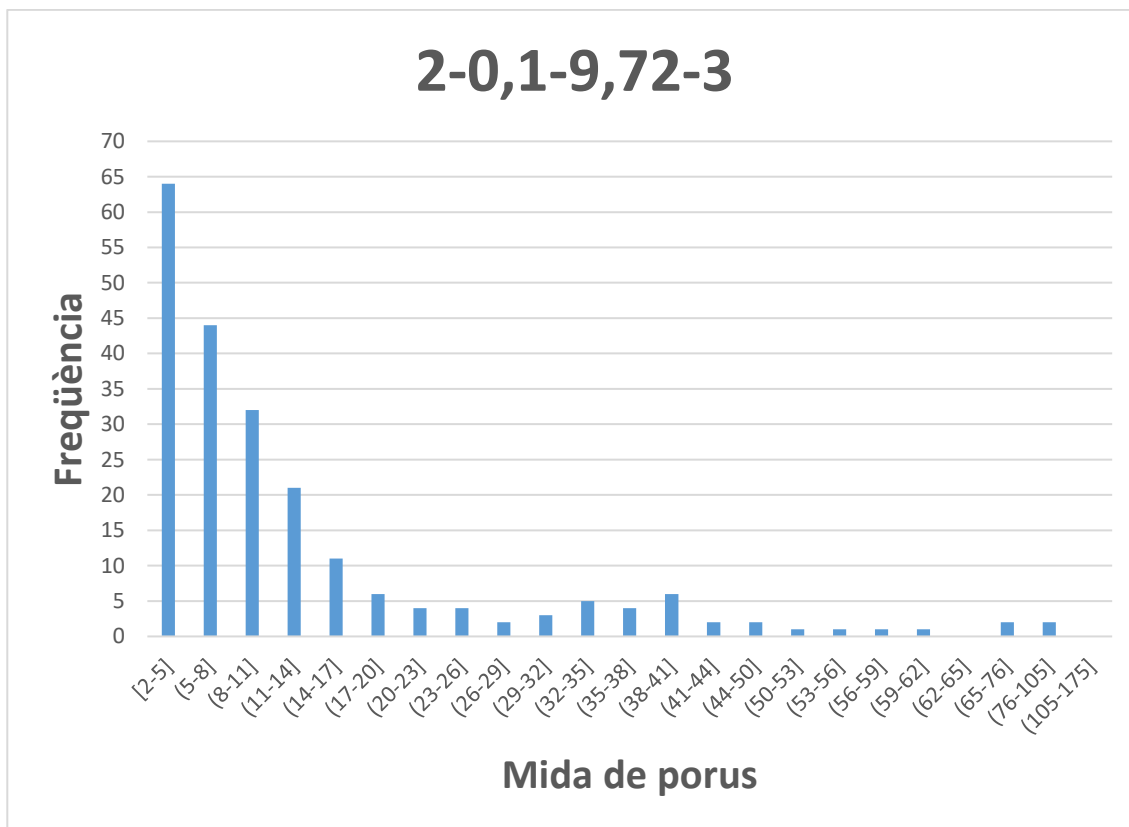
2-0,1-4,90



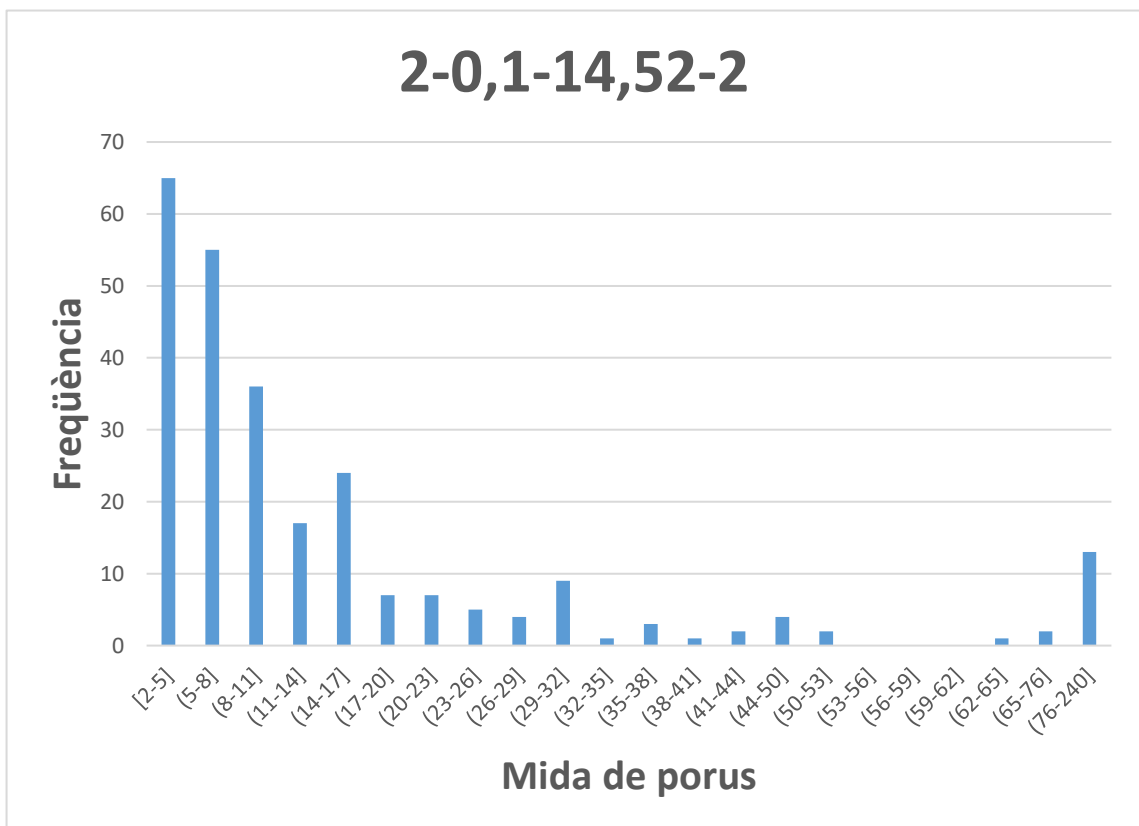
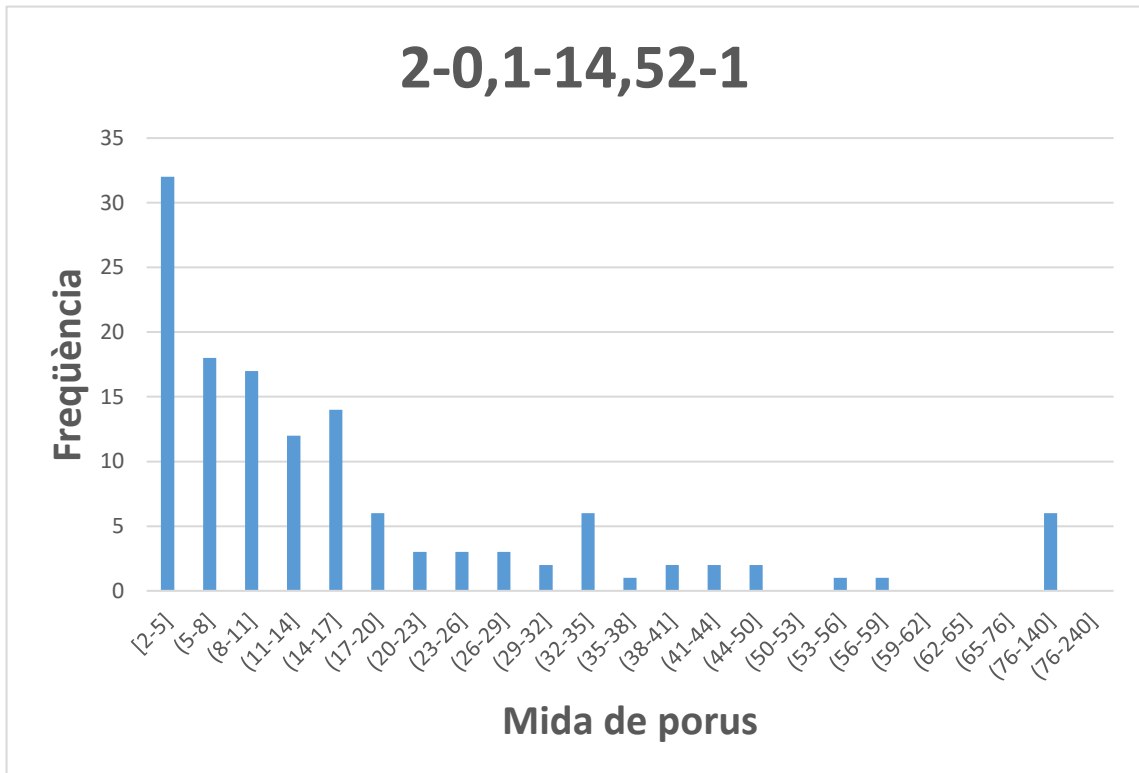


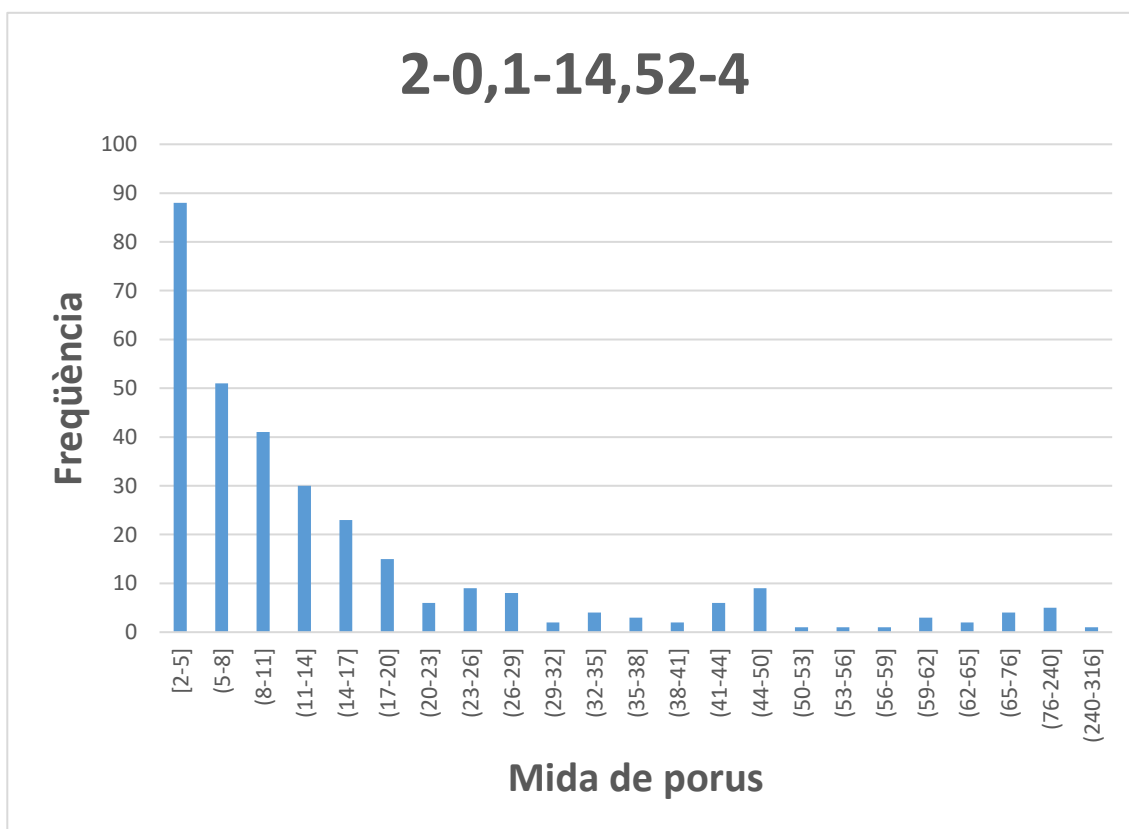
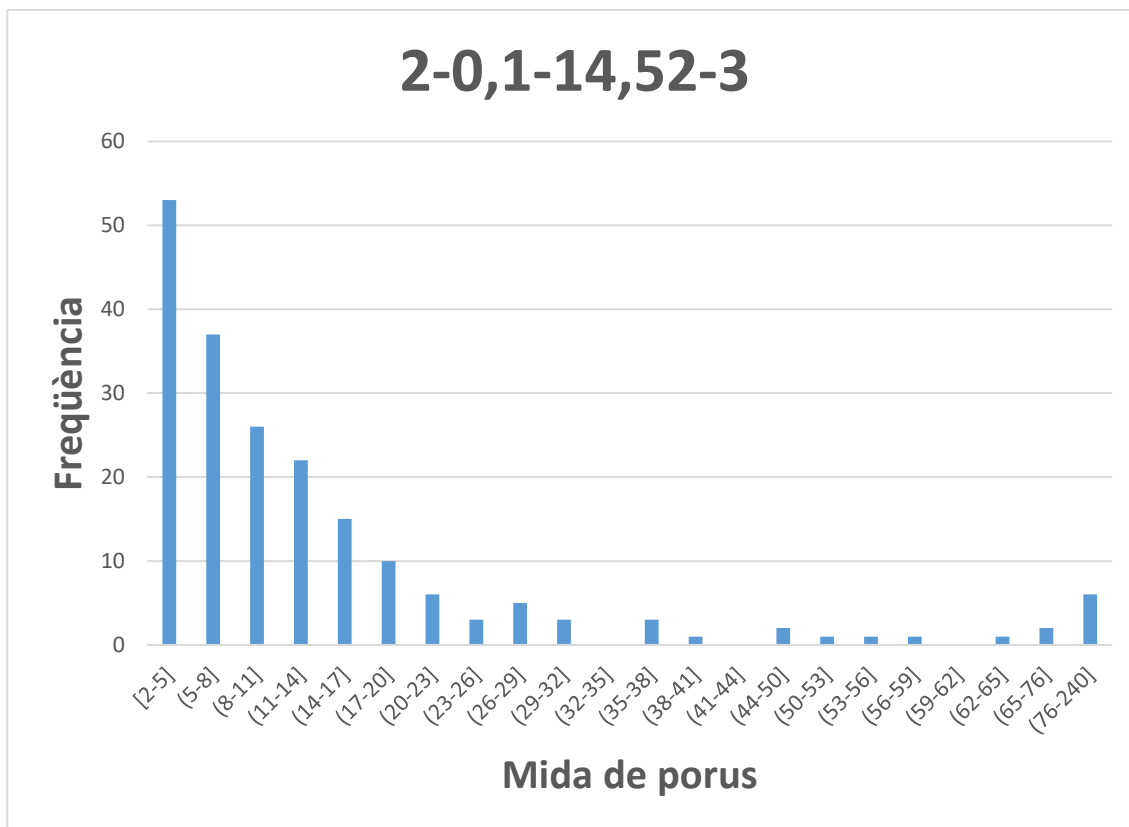
2-0,1-9,72



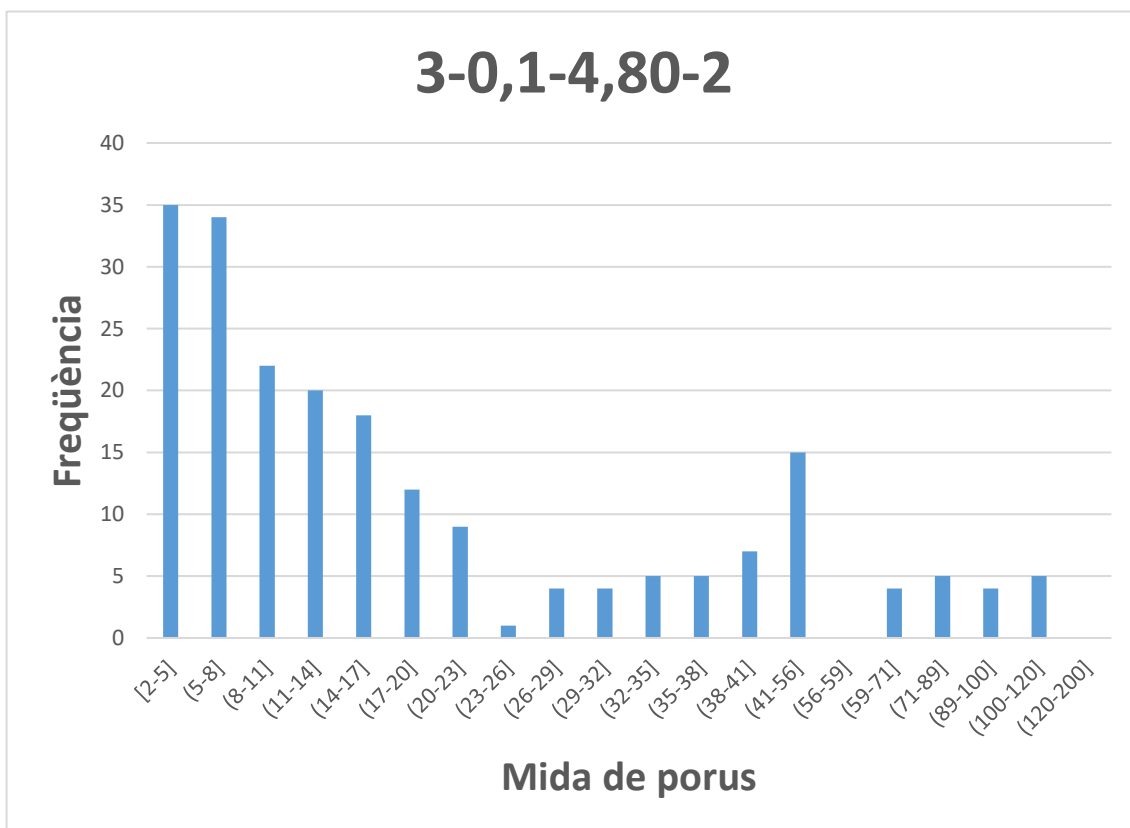
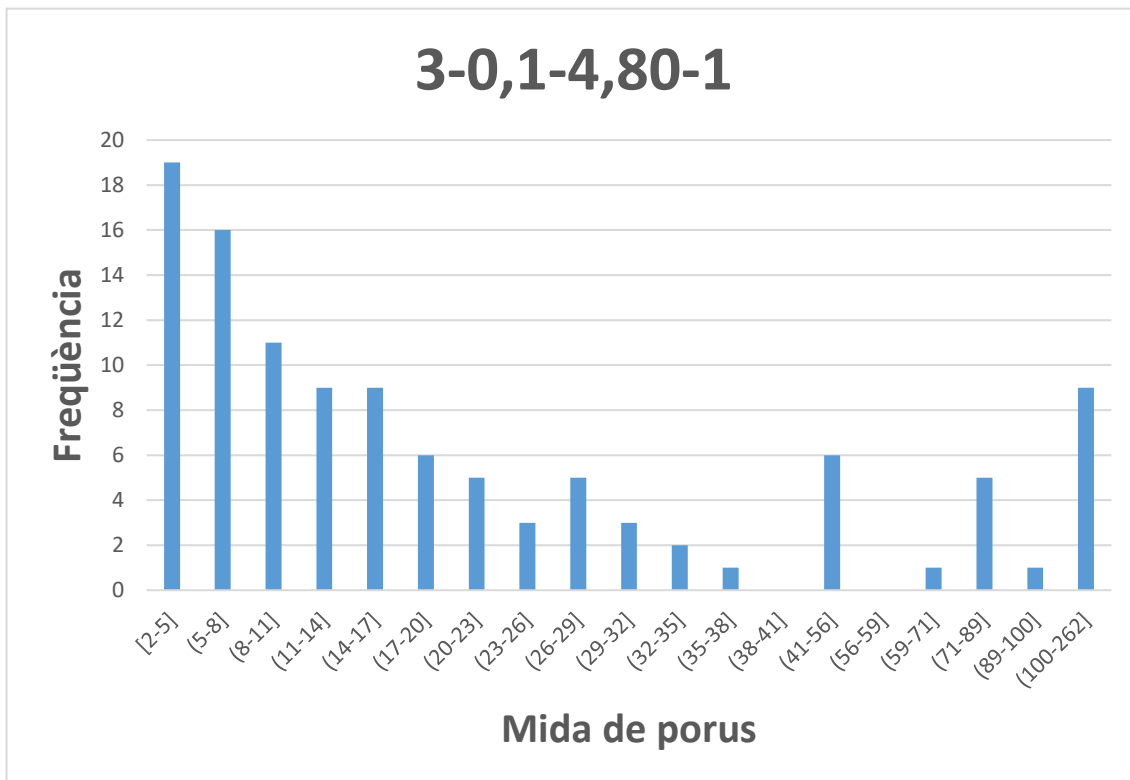


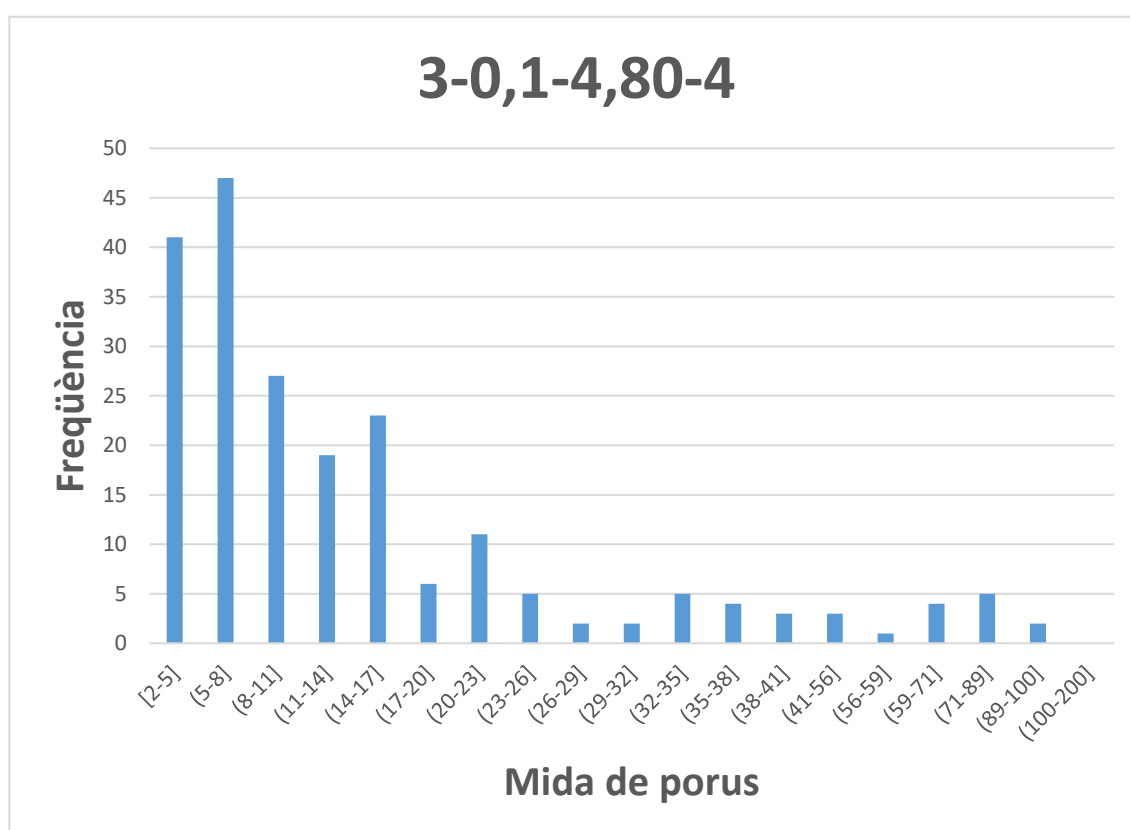
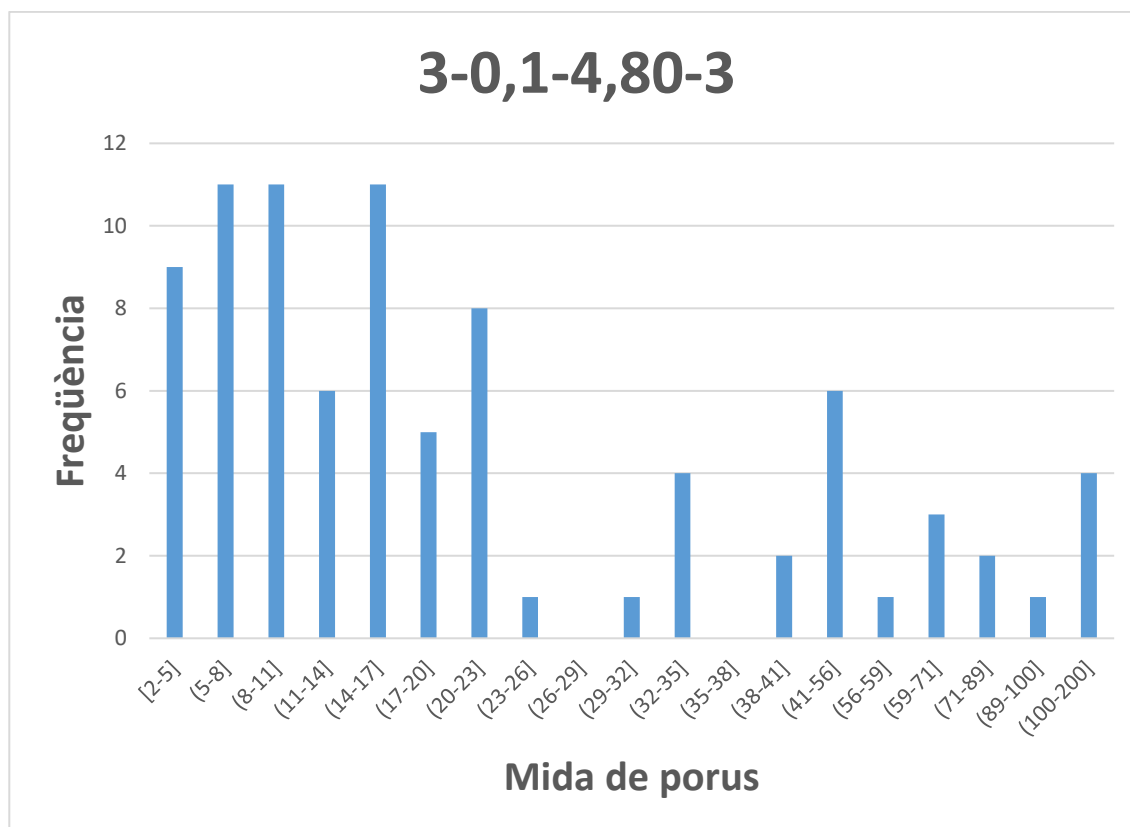
2-0,1-14,52



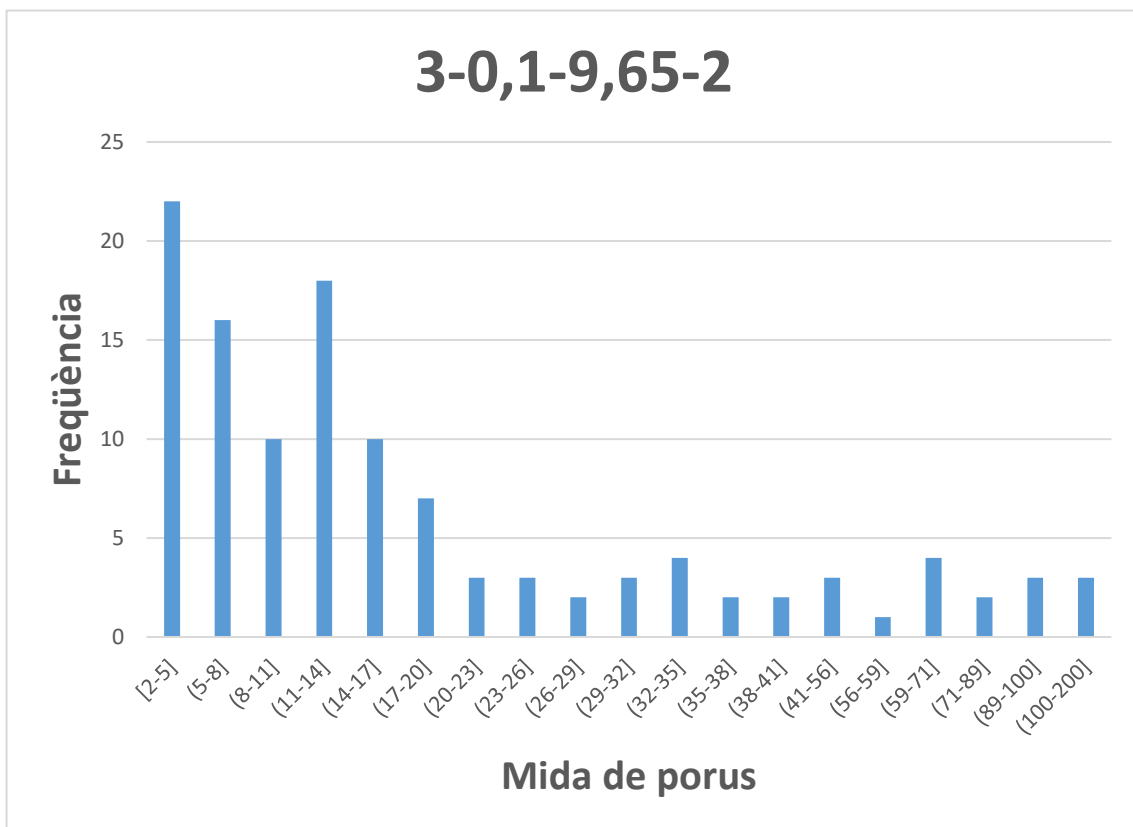
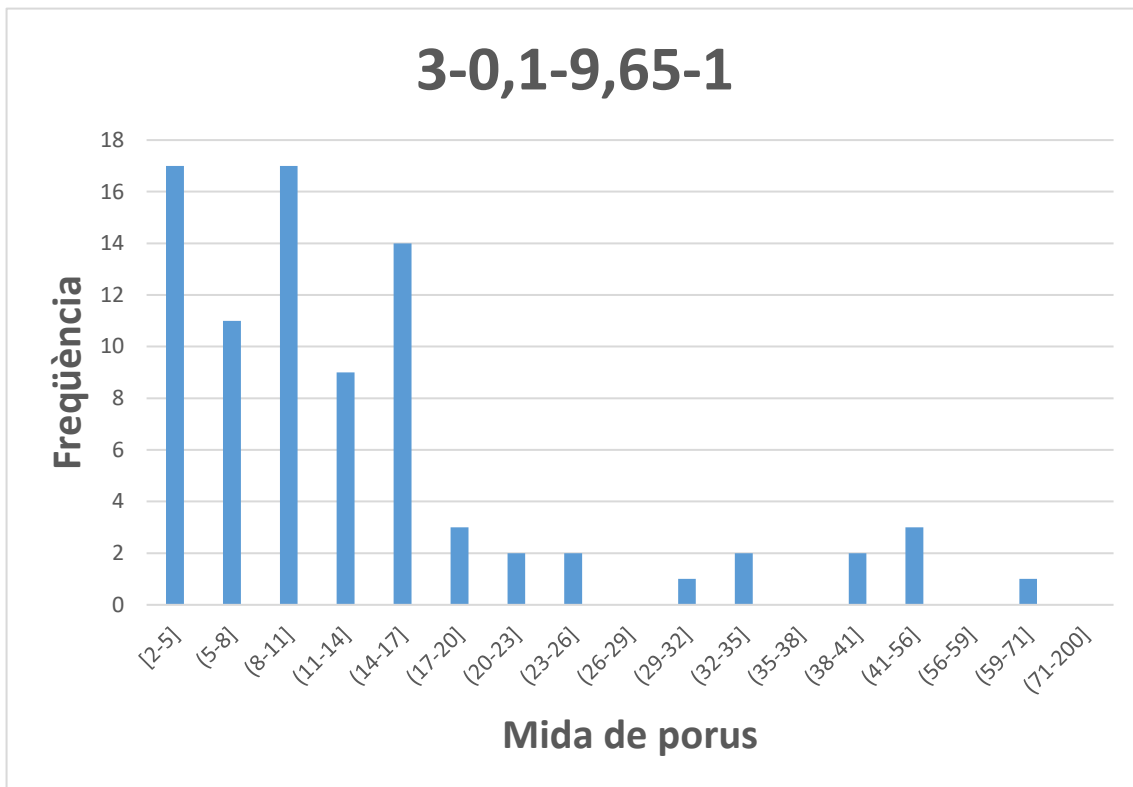


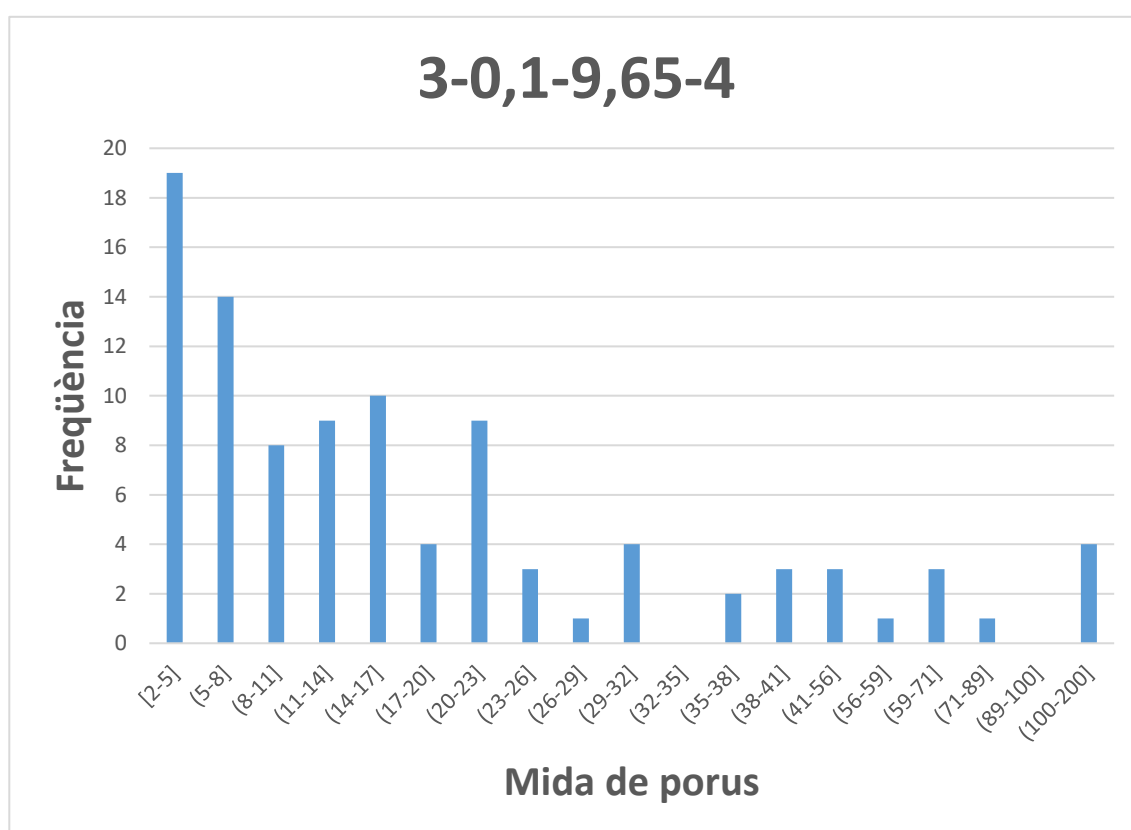
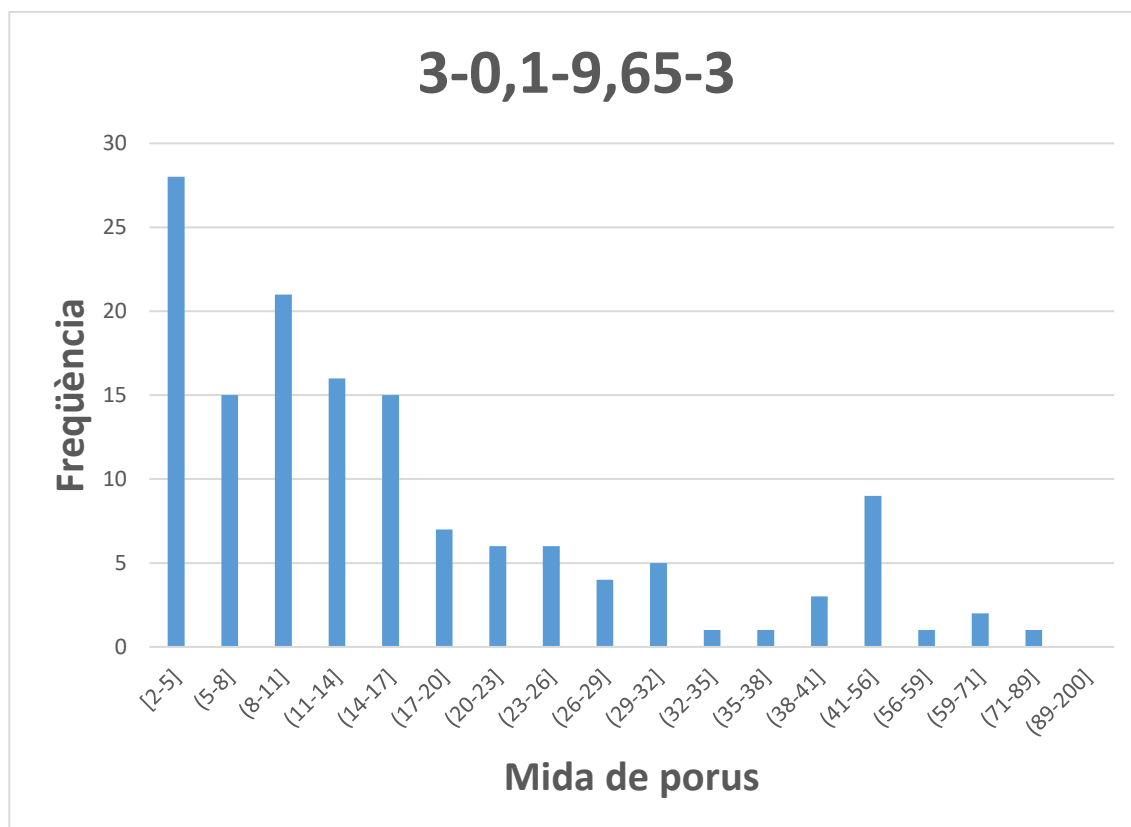
3-0,1-4,80



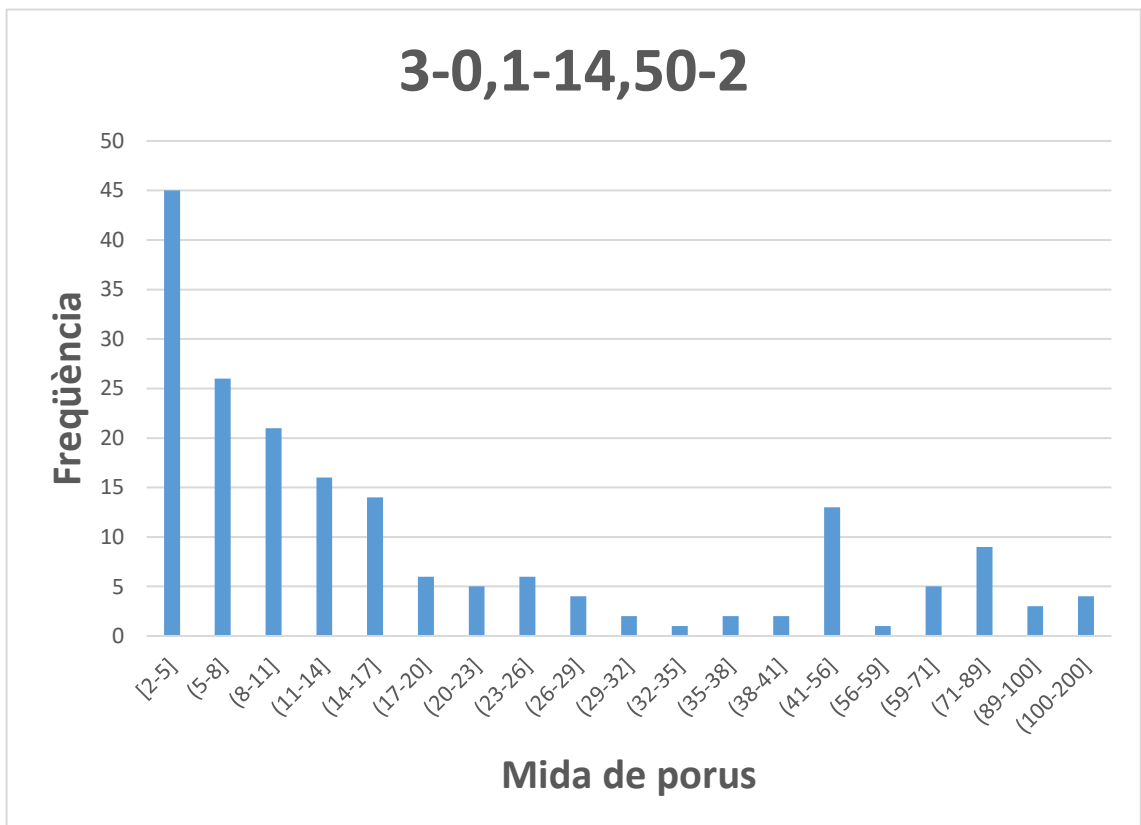
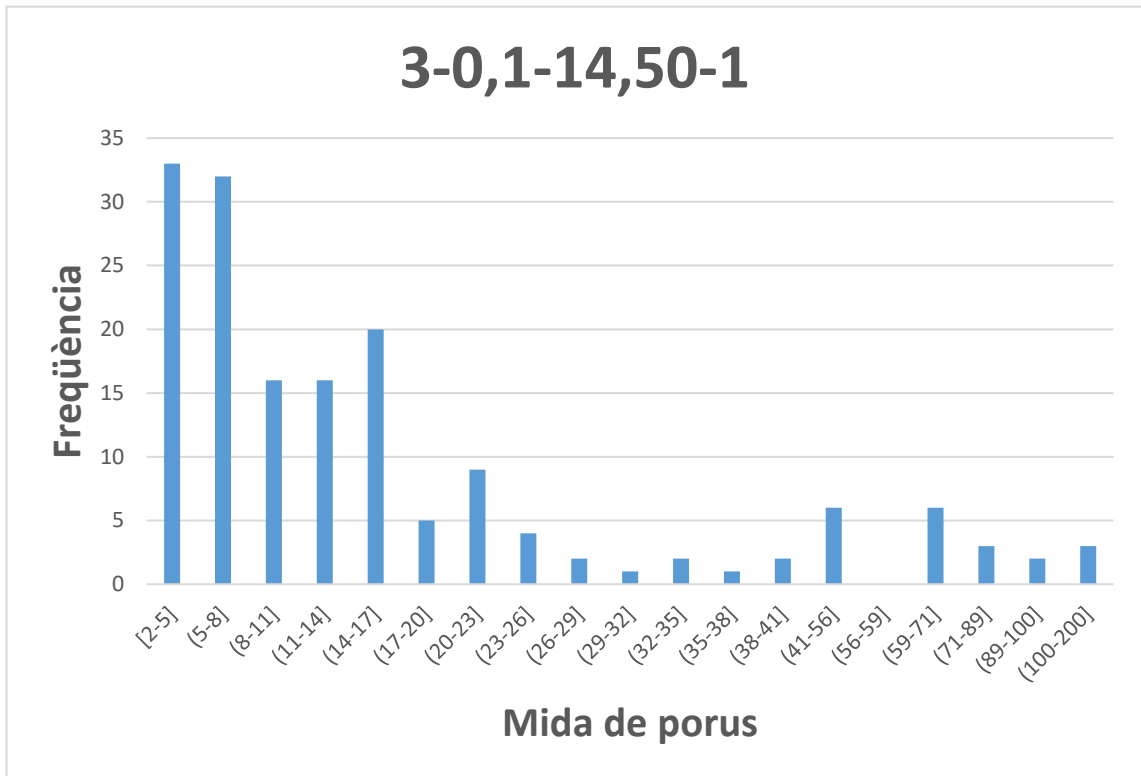


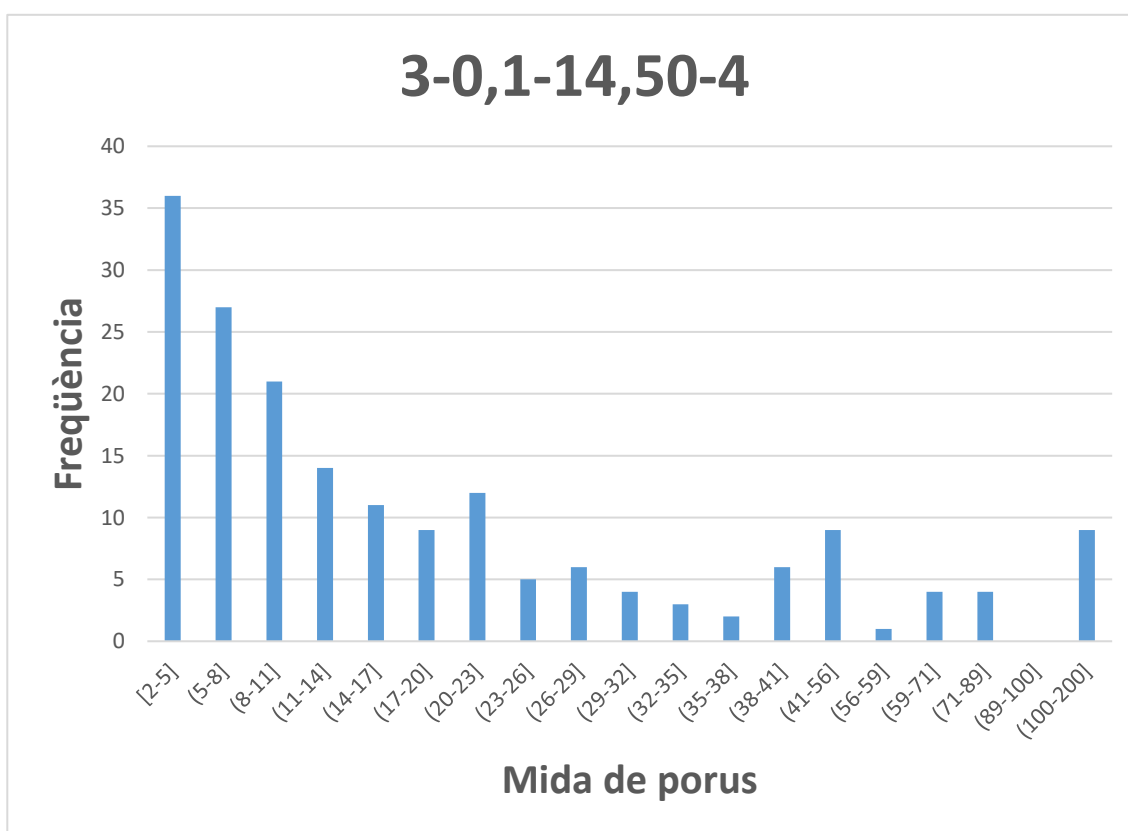
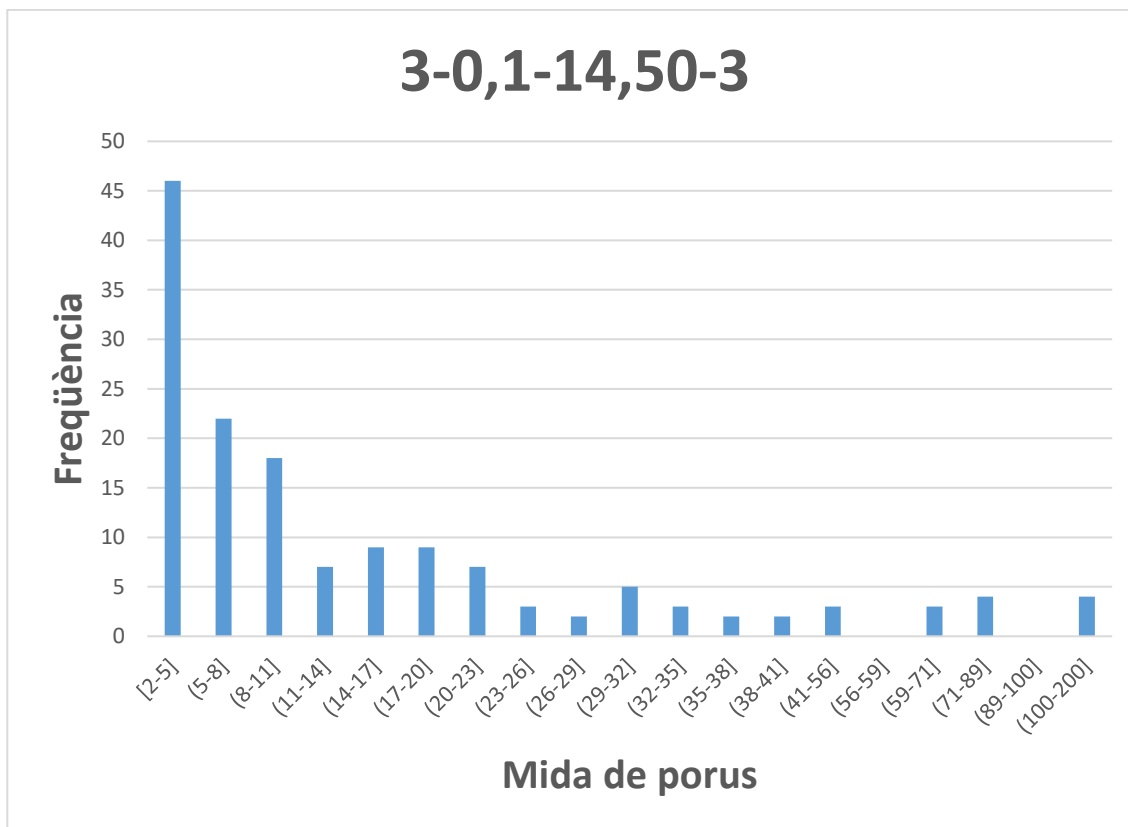
3-0,1-9,65



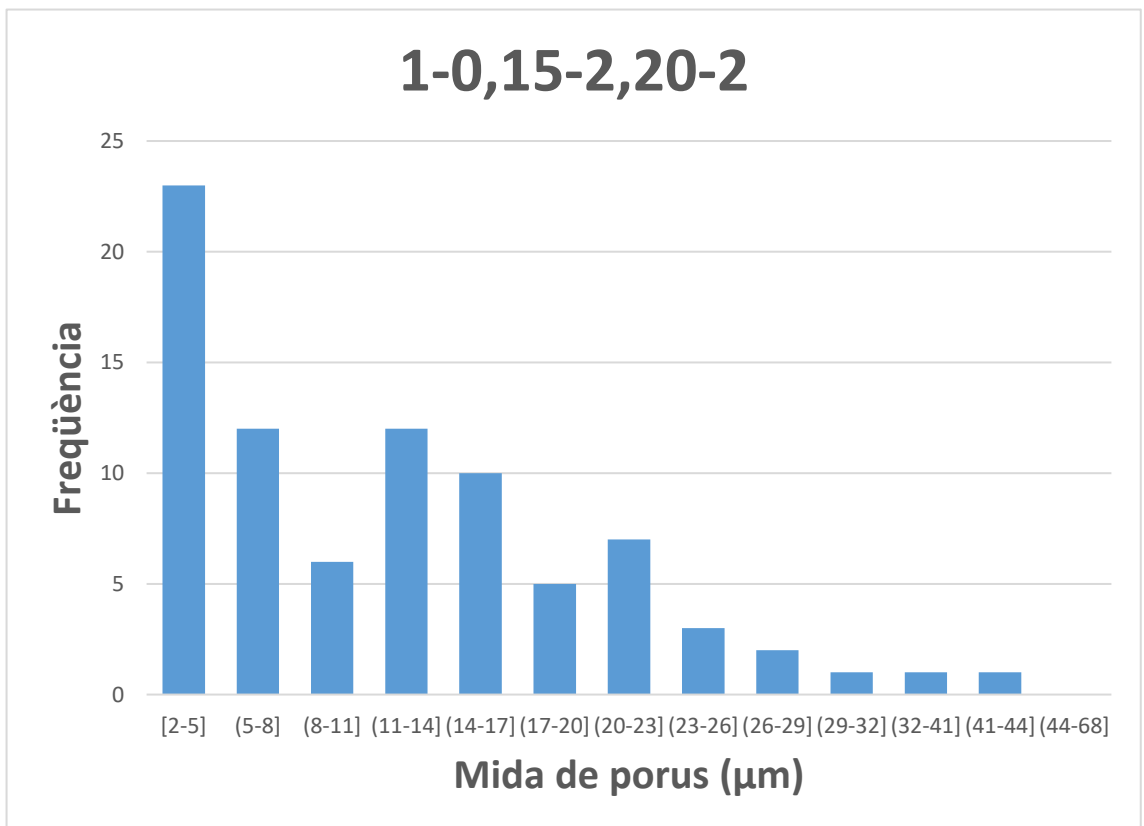
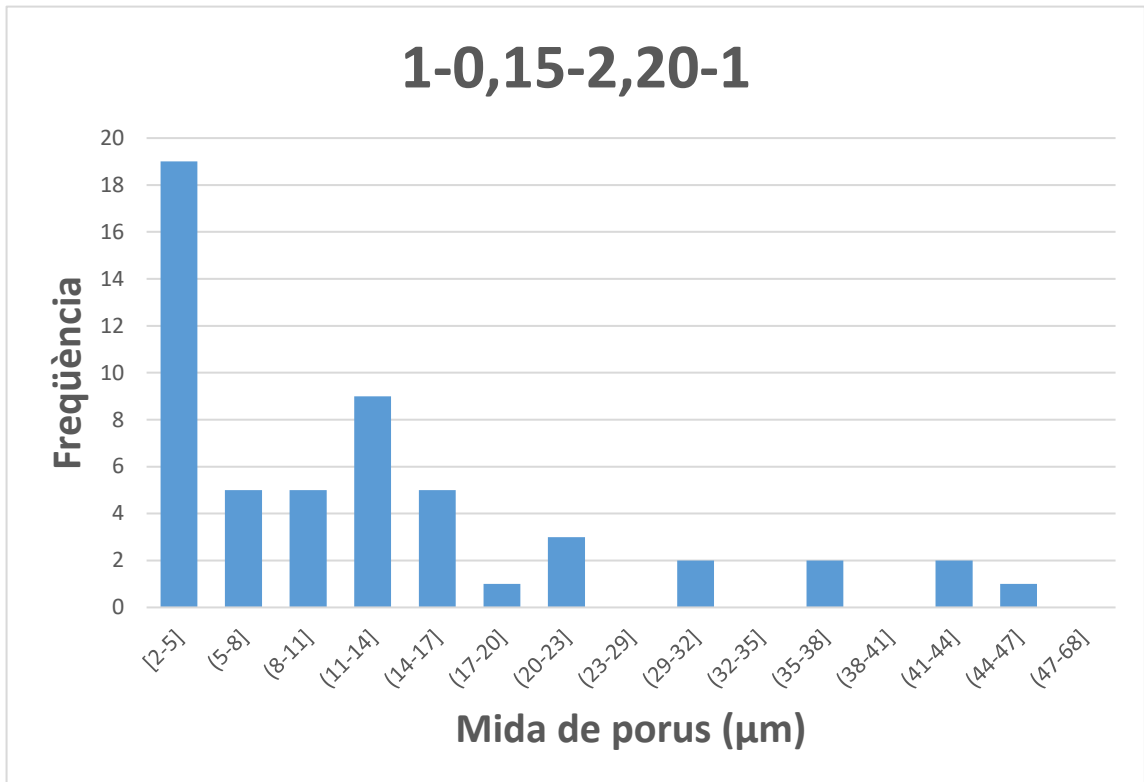


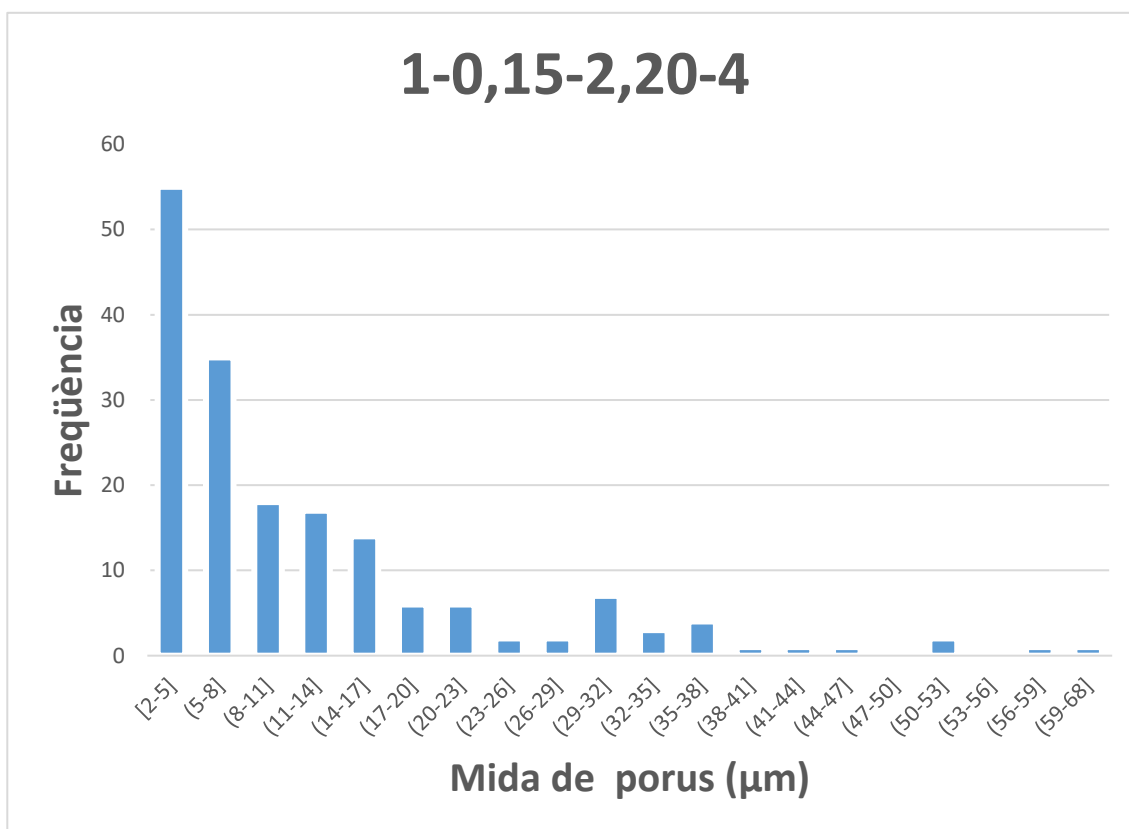
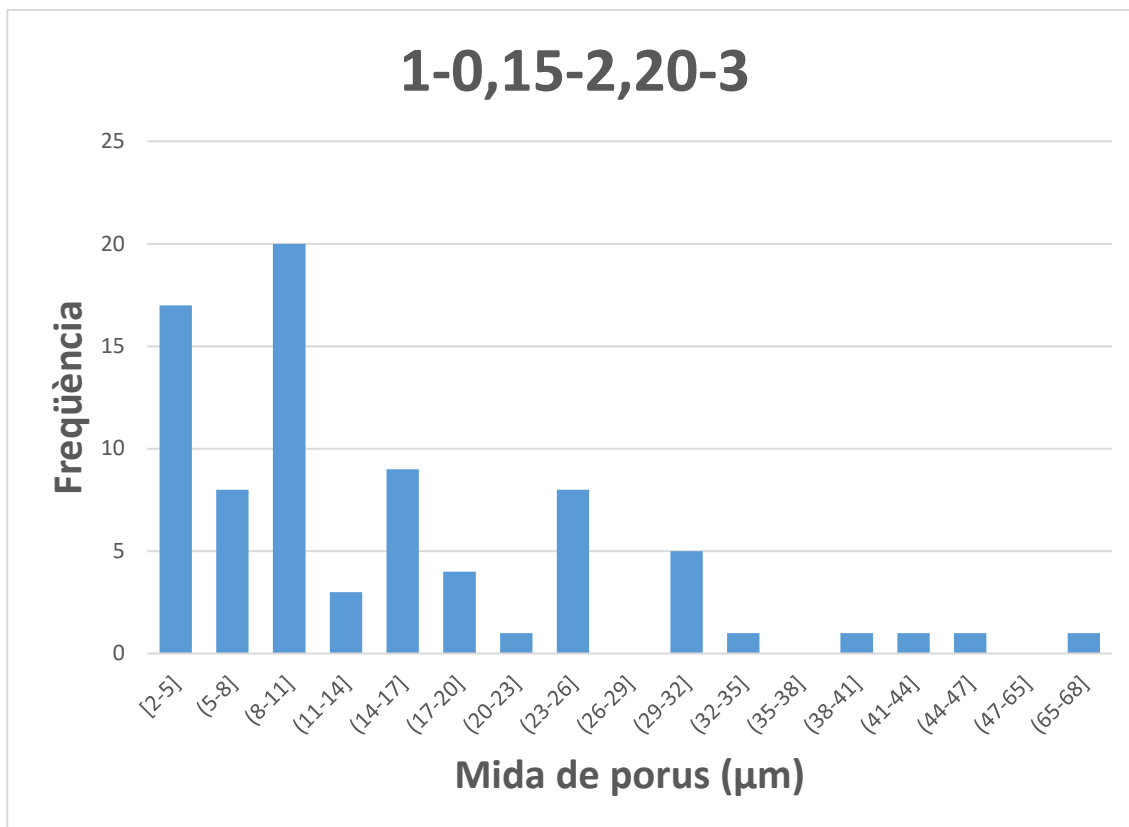
3-0,1-14,50



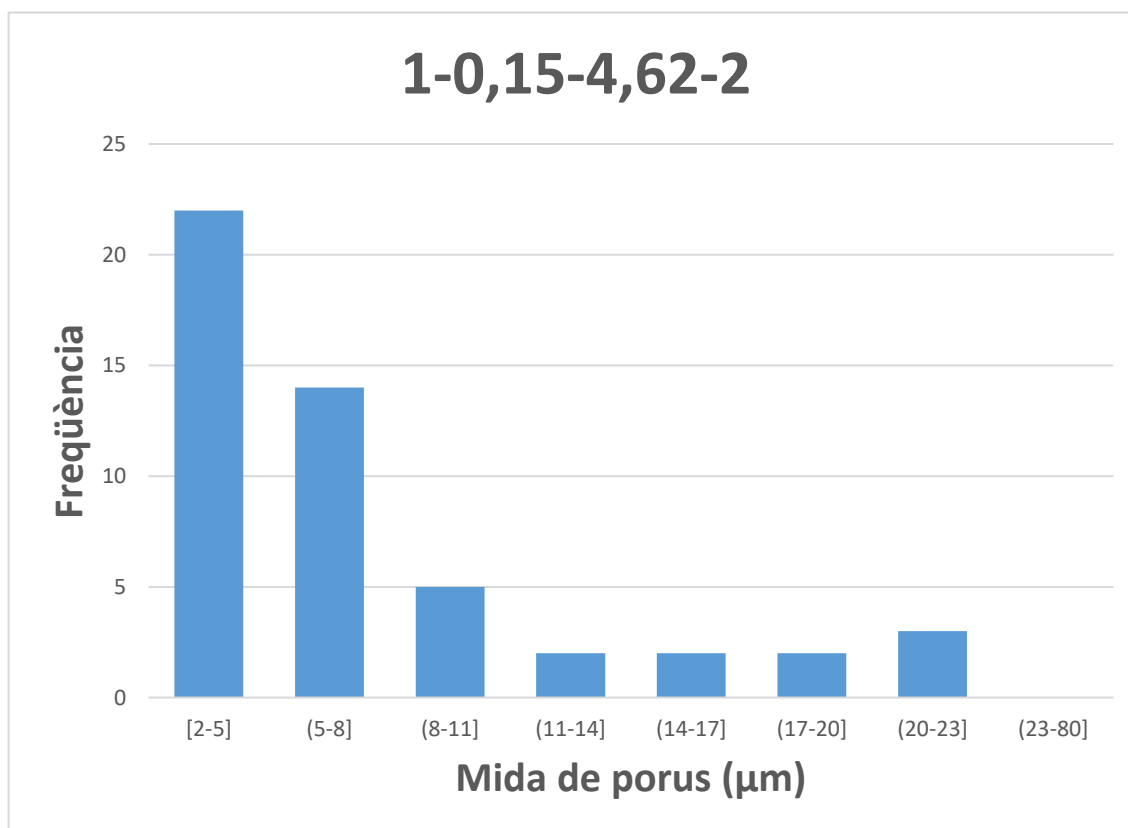
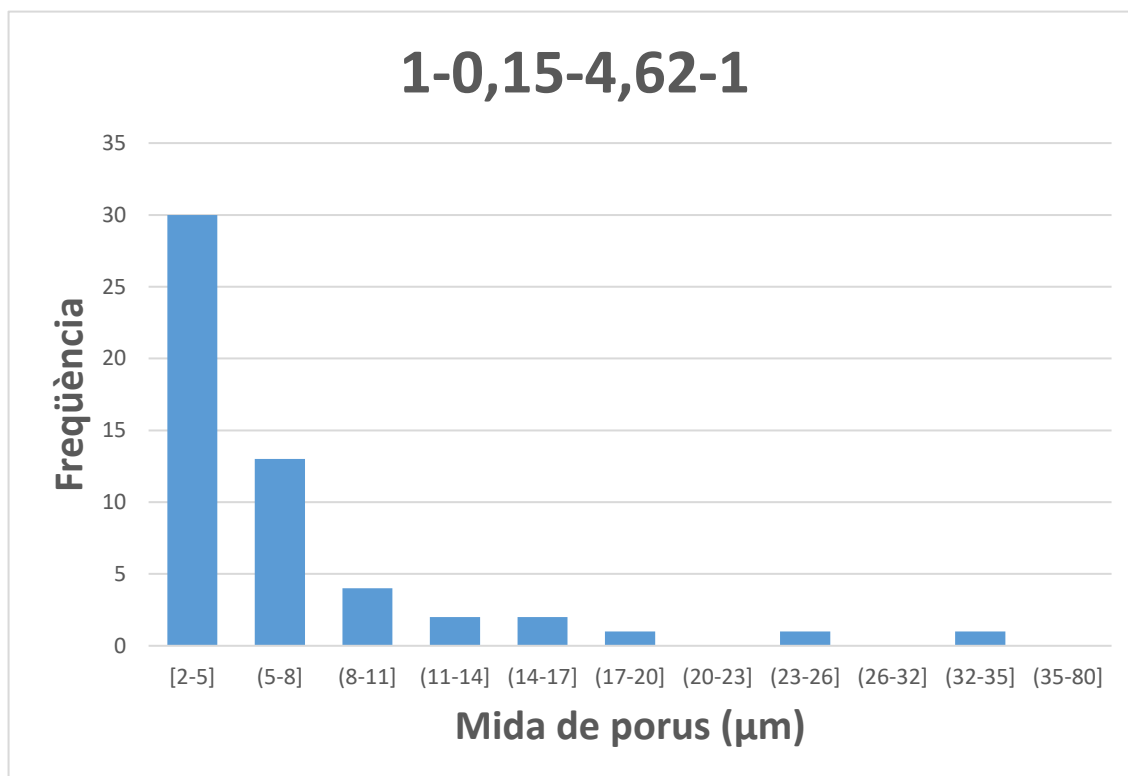


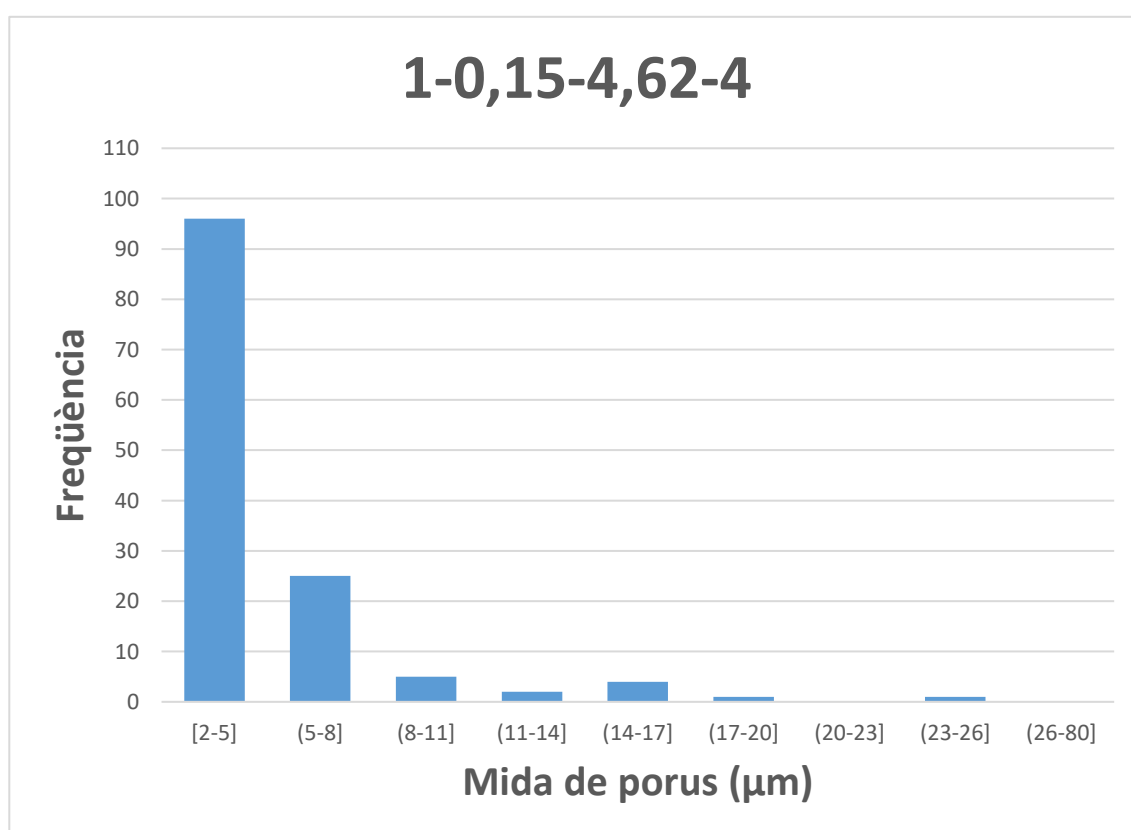
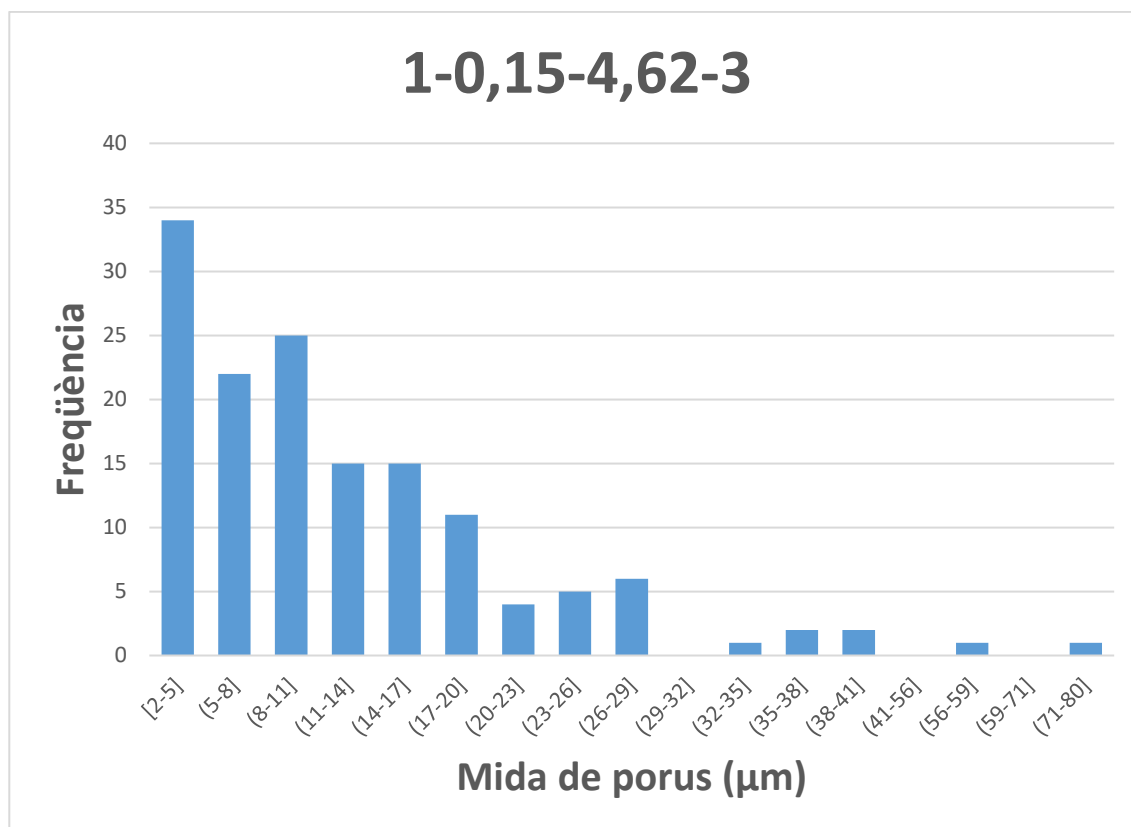
1-0,15-2,20



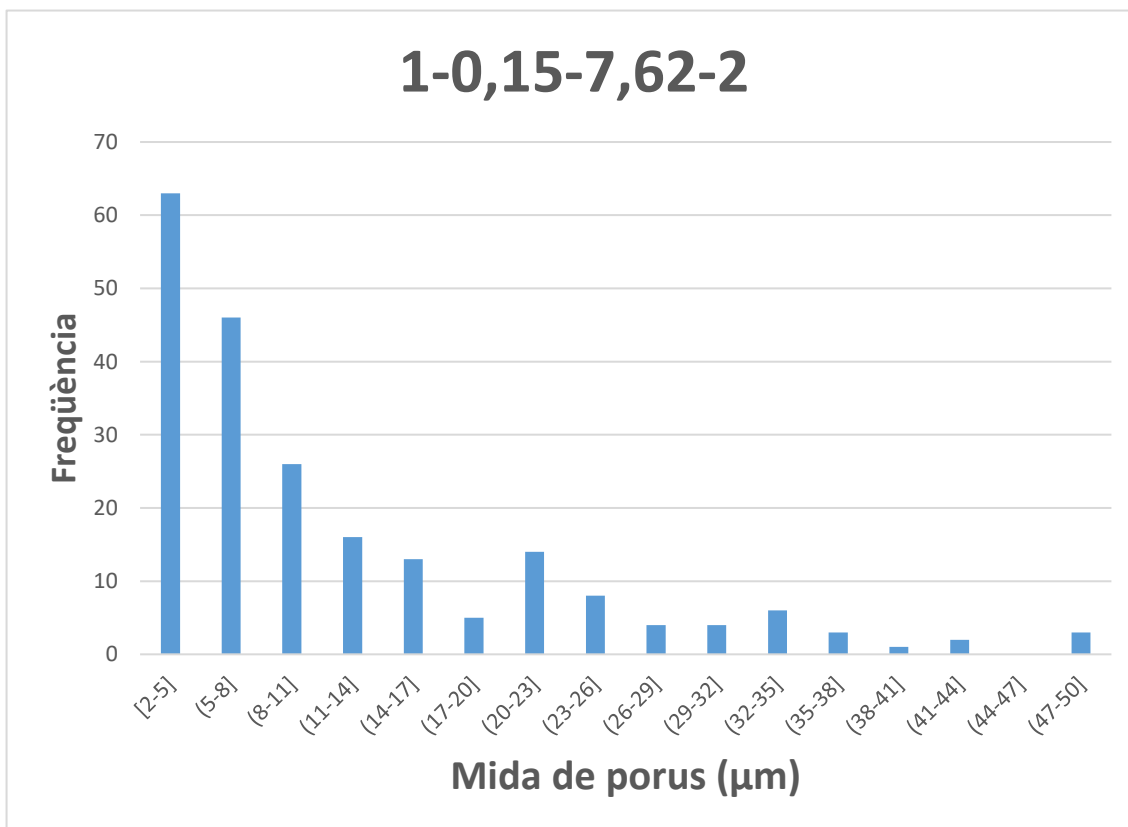
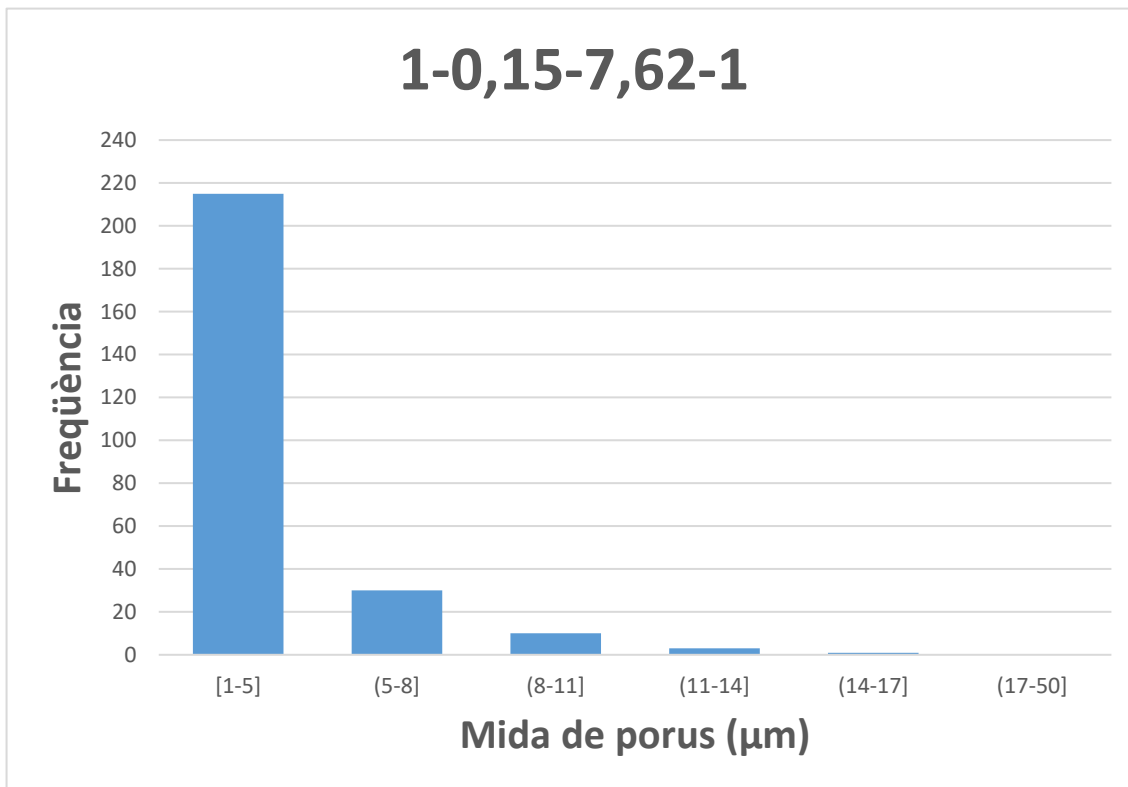


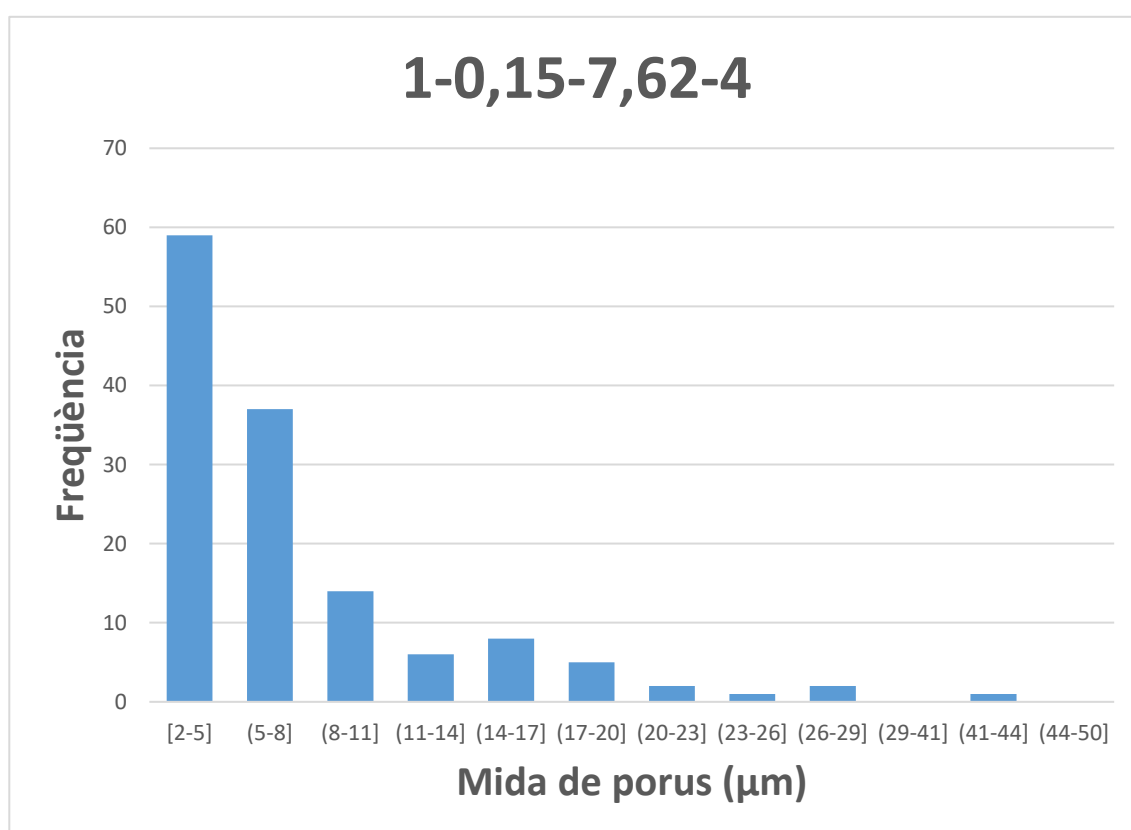
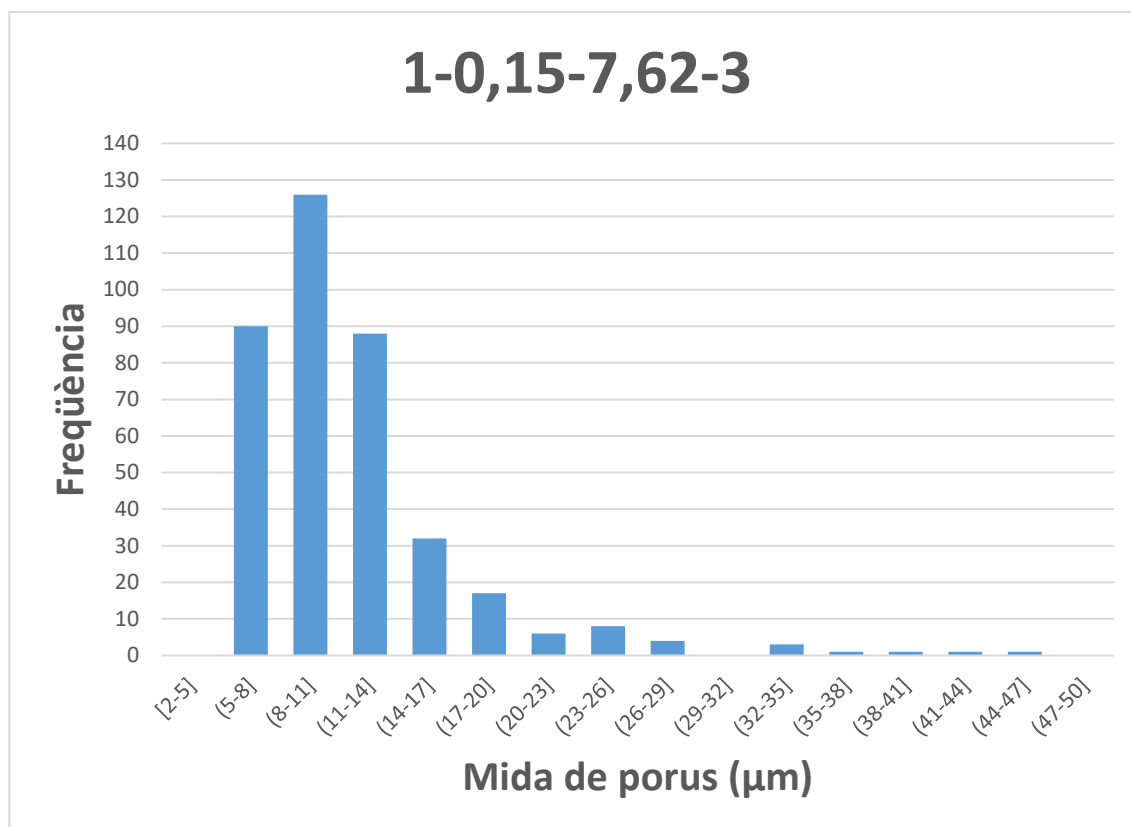
1-0,15-4,62



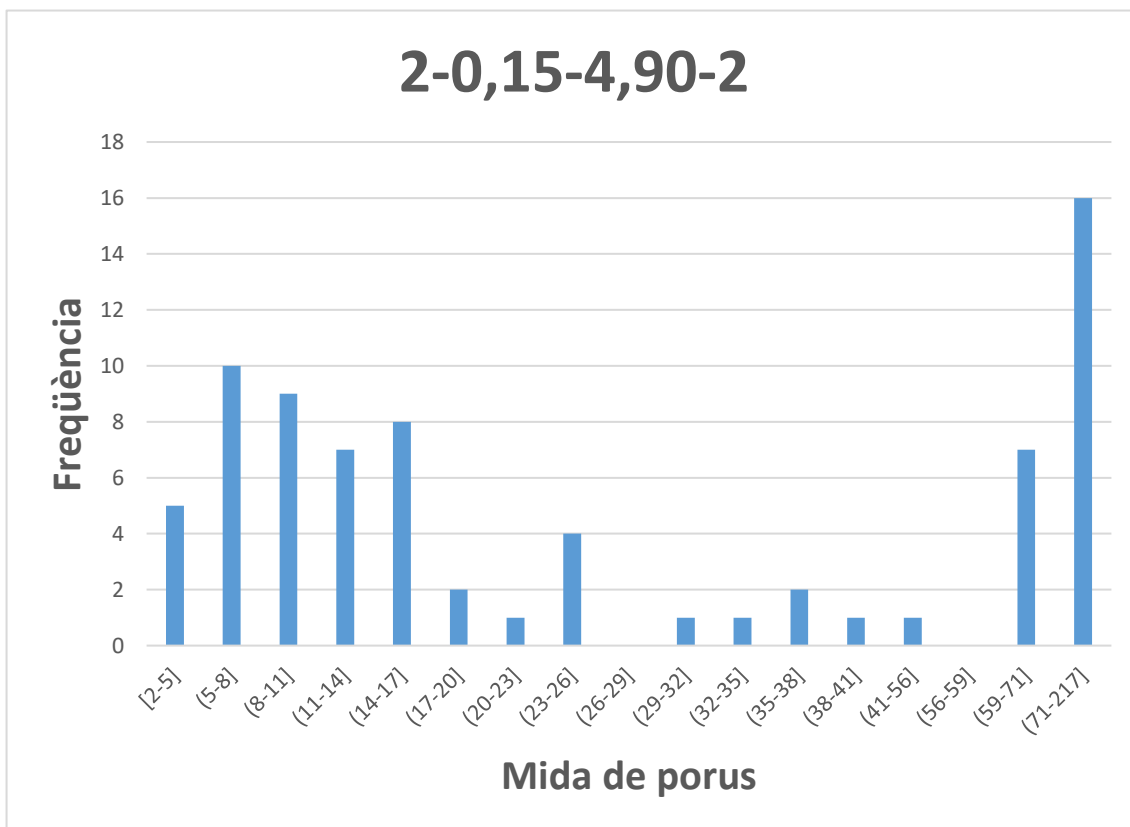
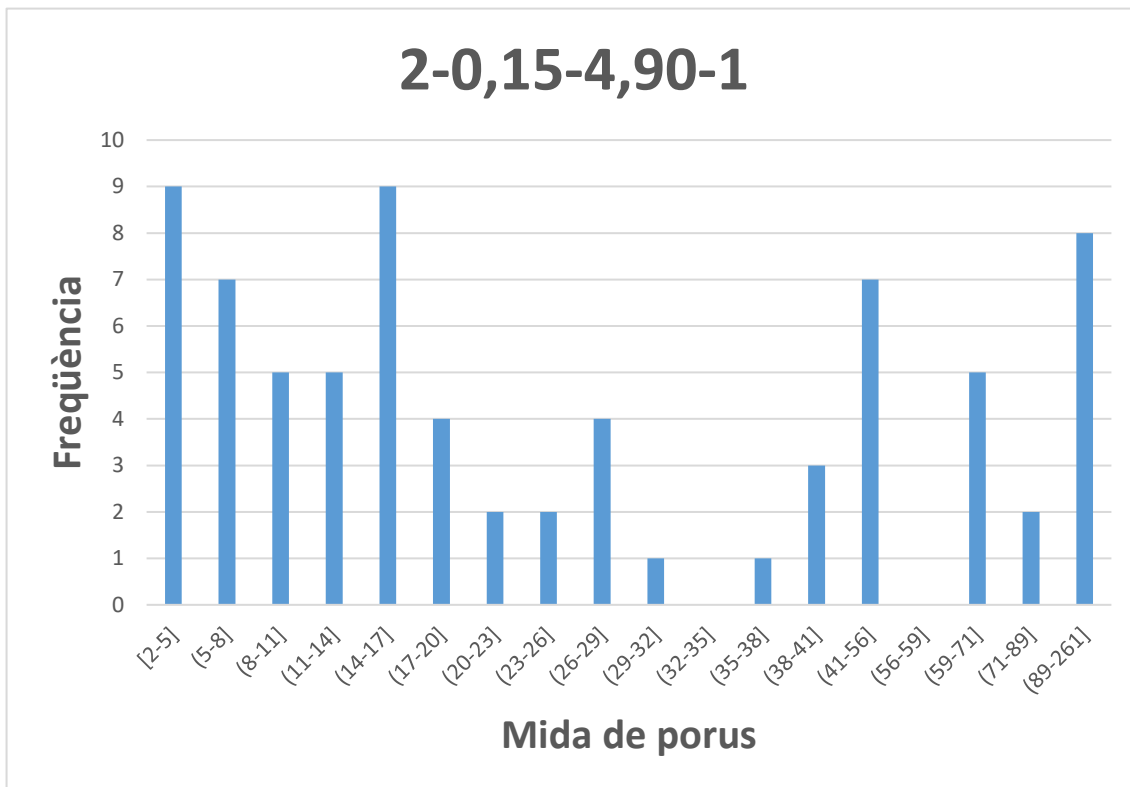


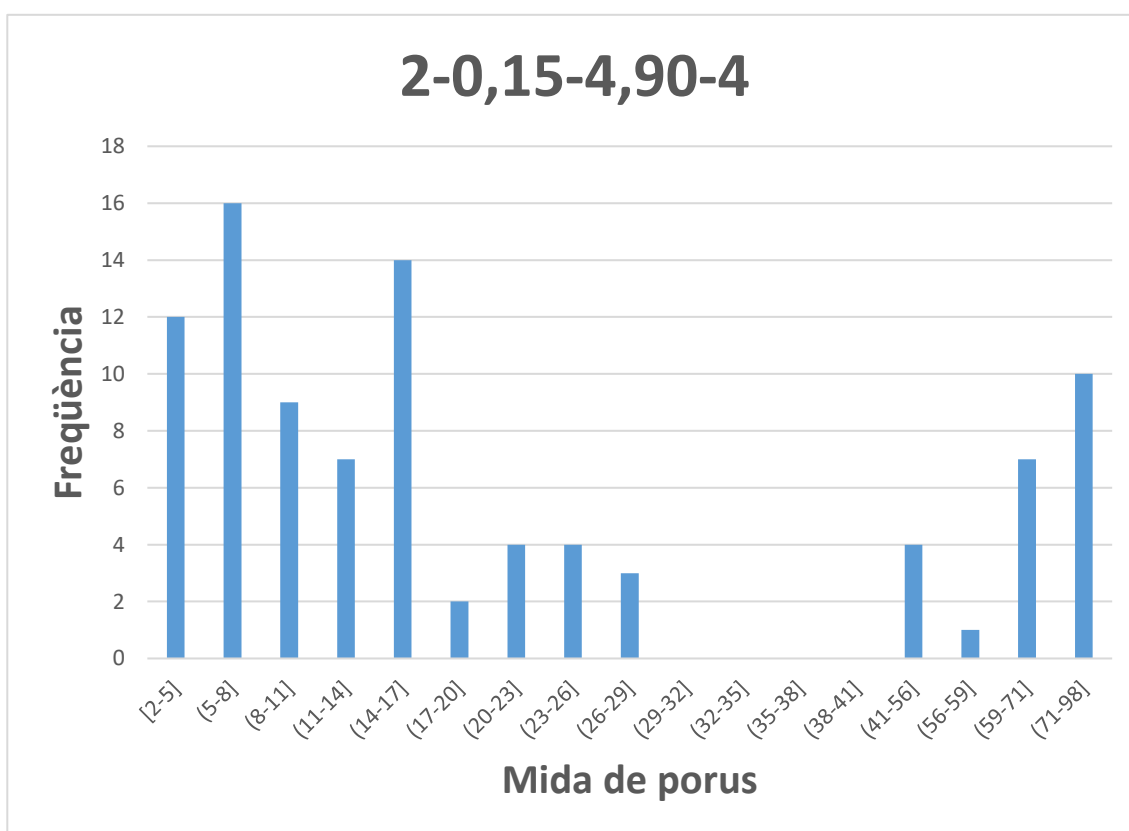
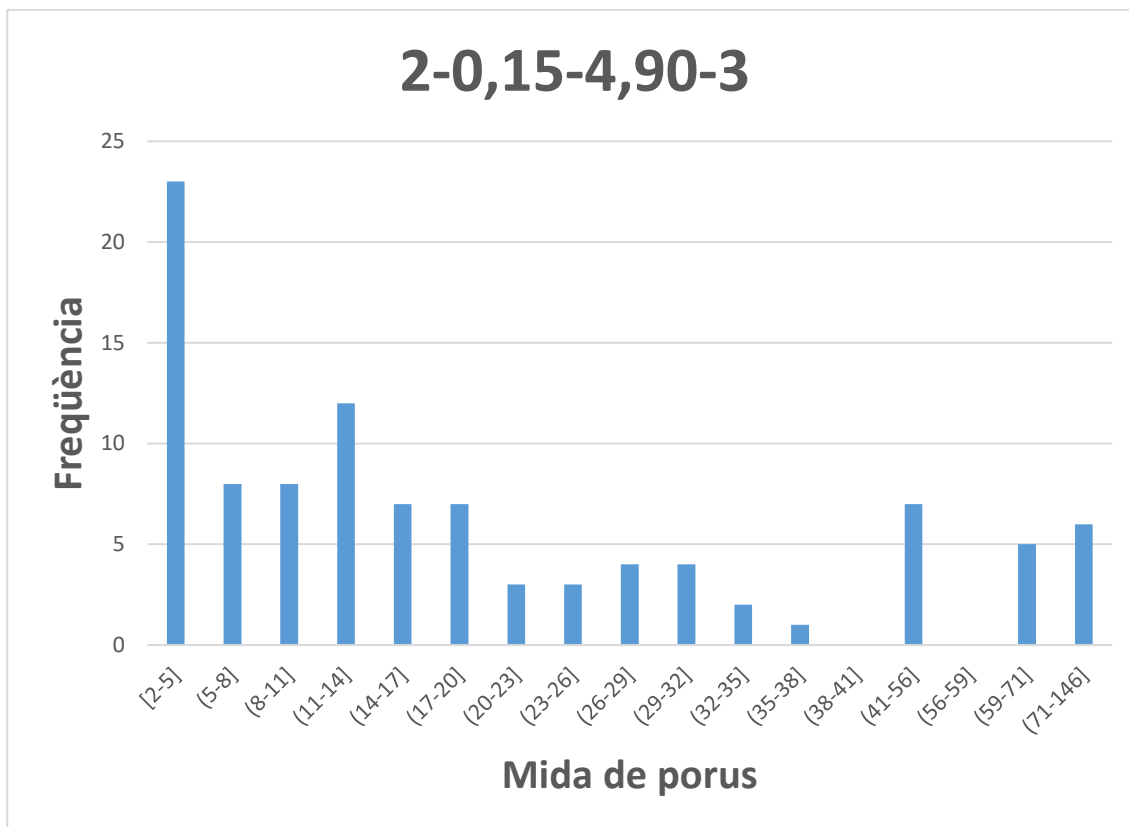
1-0,15-7,62



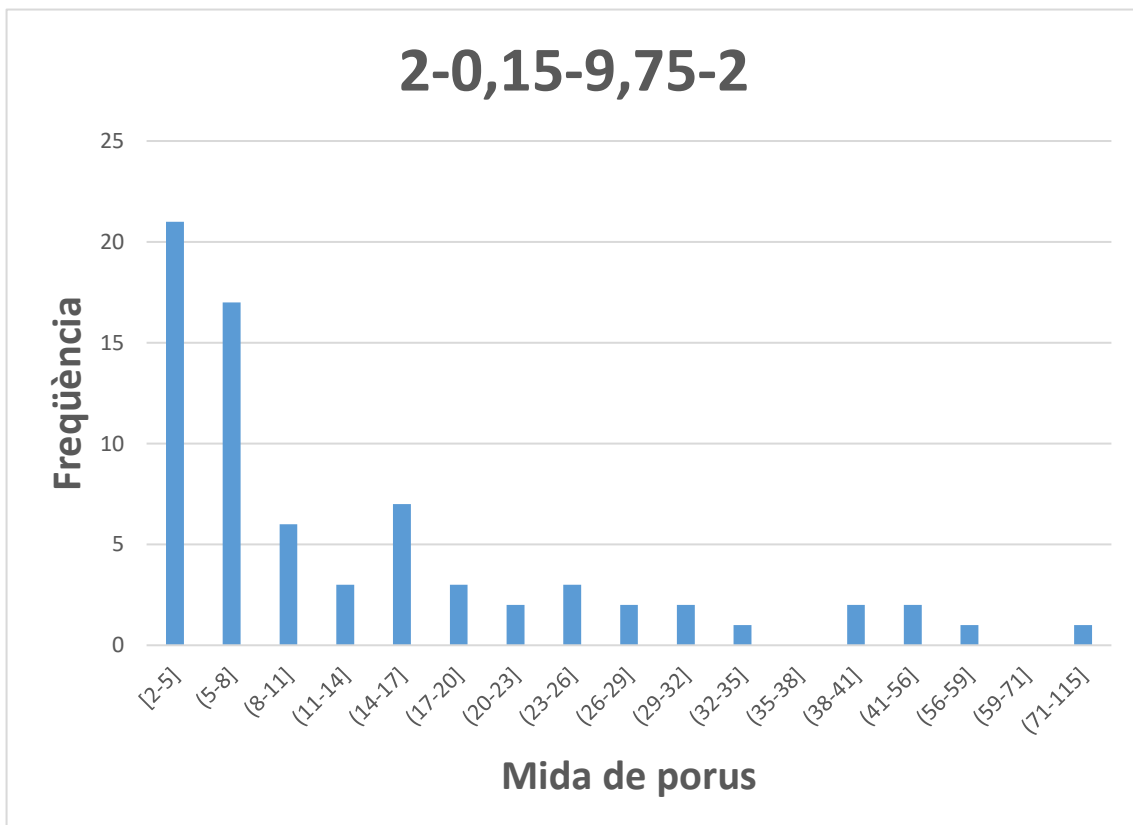
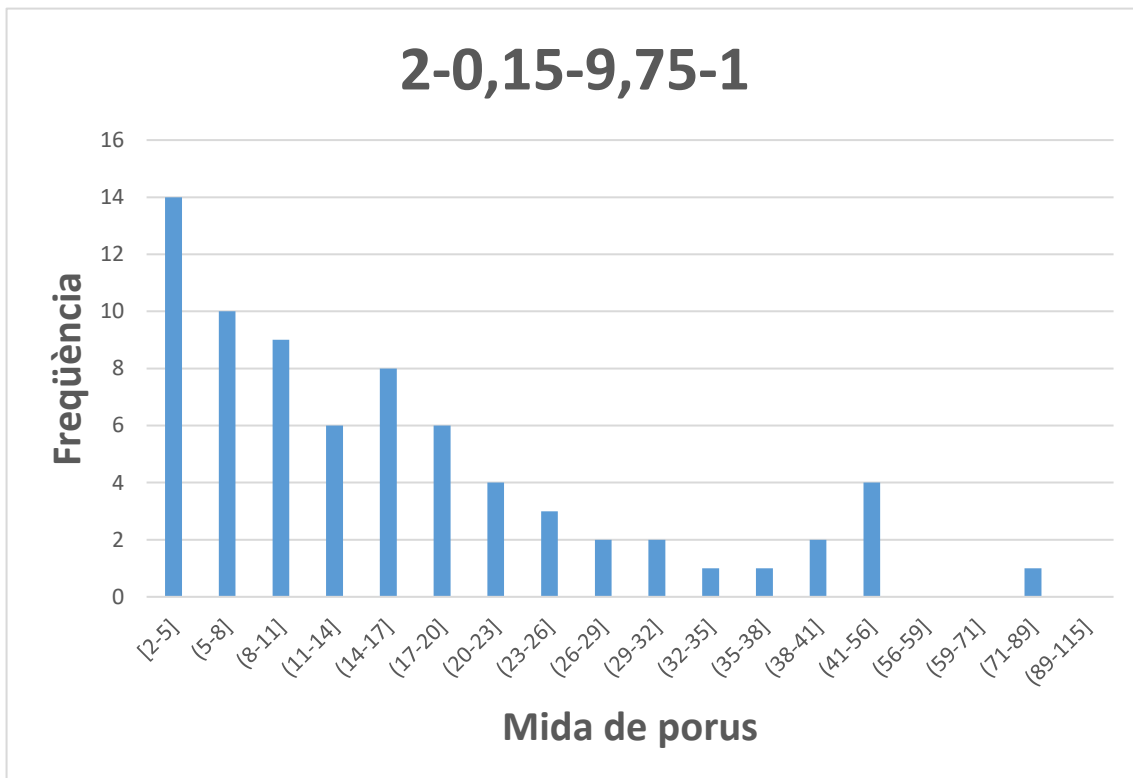


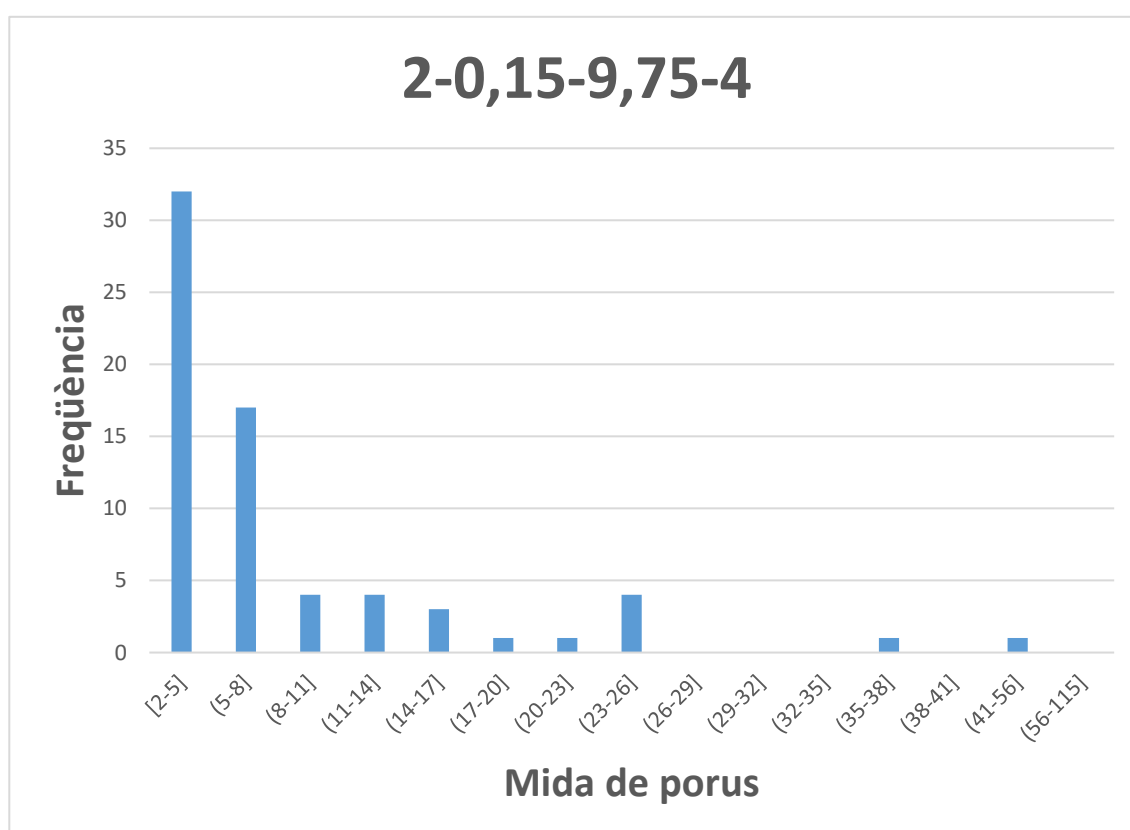
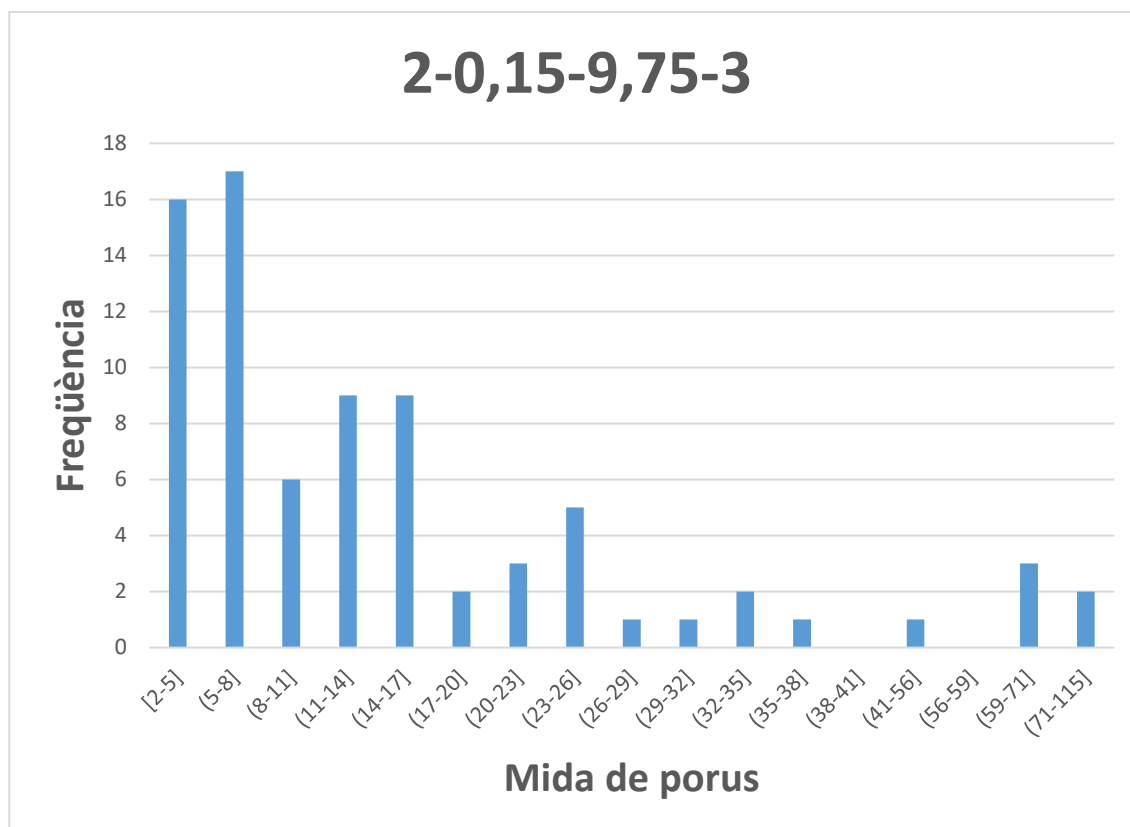
2-0,15-4,90





2-0,15-9,75





2-0,15-14,65

