

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Enginyeria Mecànica

**Títol:** Anàlisi i parametrització de dades pel processat làser d'un acer inoxidable.

**Document:** Memòria i Annexos

**Alumne:** Eloi Font Moreno

**Tutor:** Joaquim De Ciurana Gay

**Departament:** Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

**Àrea:** Enginyeria dels Processos de Fabricació

**Convocatòria:** Gener 2016

## Índex

1. Introducció.....	3
1.1 Antecedents.....	3
1.2 Objecte .....	4
1.3 Abast.....	4
2. Situació .....	4
3. Metodologia.....	5
4. Modificacions de la plataforma en la fase inicial de l'estudi .....	5
5. Acers inoxidables.....	6
5.1 Acers inoxidables austenítics.....	7
5.2 Sèrie 300 .....	7
5.3 AISI 316/316L.....	8
5.3.1 Composició química.....	8
5.3.2 Propietats.....	8
5.3.3 Aplicacions.....	9
6. Paràmetres influents en el procés de fabricació. ....	10
6.1 Propietats del material .....	10
6.2 Característiques de làser.....	12
6.3 Característiques geomètriques.....	13
7. Equipaments i material per a l'experimentació.....	15
7.1 Centre de mecanitzat CNC .....	15
7.1.1 Hardware CNC Kondia HS 1000.....	15
7.1.2 Capçal .....	16
7.1.3 Plataforma de treball .....	17
7.2 Làser Rofin FL X50.....	18
8. Equipaments per a l'adquisició de dades.....	20
8.1 Rugosímetre .....	20
8.2 Microscopi.....	20
9. Descripció del procés d'experimentació SLM.....	22
9.1 Experimentació <i>single-scanning</i> .....	22
9.1.1 Disseny de la proveta .....	22
9.1.2 Execució de la proveta .....	23
9.1.3 Visualització de resultats.....	24
9.1.4 Valoracions i conclusions de l'experimentació.....	28

9.2 Experimentació <i>multi-scanning</i> .....	29
9.2.1 Disseny de la proveta .....	29
9.2.2 Execució de la proveta .....	30
9.2.3 Visualització de resultat.....	31
9.2.4 Valoracions i conclusions de l'experimentació.....	37
10. Conclusions .....	42
11. Resum del pressupost .....	43
12. Bibliografia .....	43
ANNEX A. Fabricació Additiva (Additive Manufacturing).....	45
A.1 Introducció a la AM .....	46
A.2 Procés de fabricació AM .....	47
A.2.1 Arxiu STL a partir d'un arxiu CAD.....	47
A.2.2 Orientació de la peça.....	48
A.2.3 Divisió per capes.....	48
A.2.4 Escanejat.....	48
A.2.5 Finalització del procés .....	49
Annex B. Selective Laser Melting .....	50
B.1 Selective Laser Melting .....	51
B.2 Mètode de fabricació.....	51
Annex C. Programes CNC.....	53
C.1 Programa Simple - Scanning (Velocitat d'escanejar a 12000 mm/min) .....	54
C.2 Programa Multi - Scanning (Overlapping de 50% a 9000 mm/min).....	54
Annex D. Anàlisi imatges del processat.....	59
D.1 Imatges processat multi - scanning.....	60
Annex E. Anàlisi rugositat superficial .....	63
E.1 Adquisició de dades.....	64
E.1.1 Gràfiques .....	64
E.1.2 Model d'obtenció de valors .....	65

# 1.Introducció

## 1.1 Antecedents

En l'actualitat es coneixen diversos processos de fabricació, entre els que s'hi troba el procés de fabricació per substracció de material o la fabricació additiva.

La fabricació additiva és una tecnologia molt recent, la qual apareix a finals dels anys 80 amb el nom de *Rapid Prototyping*. A diferència de les tecnologies convencionals, aquest mètode utilitza l'aportació de material per a la fabricació de peces. Dins d'aquesta tecnologia existeixen diferents formes d'execució del processat del material, donant nom a diferents modalitats. Aquesta tecnologia s'explica de forma detallada a l'Annex A.

La tecnologia *Selective Laser Melting* (SLM) és una de les modalitats de fabricació additiva, la qual utilitza la radiació proporcionada per un làser sobre un llit de pols del material a processar per a l'obtenció d'una geometria final. Aquest mètode s'explica de forma detalla a l'Annex B.

El Grup de Recerca en Enginyeria de Producte, Procés i Producció (GREP) de la Universitat de Girona disposa d'unes instal·lacions adients per a l'execució de proves mitjançant la fabricació pel mètode *Selective Laser Melting* (SLM). Aquestes instal·lacions consisteixen en l'adaptació d'un làser de fibra a un centre de control numèric, i d'una plataforma de construcció que permeten en desenvolupament d'estructures 3D.

En aquestes instal·lacions el grup de recerca ha treballat en el desenvolupament d'aquesta tècnica i en la parametrització de dades de diferents materials o aliatges, com el Titani i el Crom Cobalt Molibdè molt utilitzats a nivell mèdic, obtenint resultats altament satisfactoris.

La innovació i millora de la plataforma de construcció de la que disposa el parc, facilita l'experimentació amb nous materials. El desenvolupament de les geometries adquireix una nova dimensió al poder treballar la profunditat d'aquestes, passant de proves en dues dimensions a generar estructures tridimensionals completes.

## 1.2 Objecte

L'objectiu del present projecte consisteix en l'estudi dels diferents valors de paràmetres de procés que permetin un correcte processat d'un acer inoxidable mitjançant la tecnologia de fabricació SLM (*Selective Laser Melting*).

## 1.3 Abast

L'abast del present projecte consisteix en la determinació de l'acer inoxidable amb unes propietats més adequades per al processat làser i l'obtenció d'uns valors òptims en l'anàlisi dels resultats obtinguts en la realització de provetes de material processat a través de la tecnologia de fabricació SLM utilitzant diferents valors de potència, velocitats d'escanejat, espessor de capa i solapament entre cordons de soldadura.

## 2. Situació

En el desenvolupament de l'estudi es treballa amb les limitacions pròpies d'una instal·lació en fase de millora.

La limitació principal que marca el transcurs de l'estudi és la dificultat de generar una capa de material que posseeixi unes condicions òptimes i una posterior obtenció d'una estructura tridimensional amb la realització de capes successives. En la plataforma de construcció es realitzen modificacions en el sistema de dipositat del material que, tot i això, no permet l'obtenció d'una segona capa de material processat. Aquest fet es deu a que en el dipositat del material per a una segona capa, el dipòsit topa amb el material solidificat en la capa inicial, no permetent la generació d'una capa de pols uniforme. Per aquest motiu en l'experimentació només es crea una única capa, ja que un dipositat no correcte podria falsejar les mesures dels resultats obtinguts.

També es realitzen modificacions en la cubeta del sistema de recuperació de material sobrant. Aquest fet no repercuteix directament en la realització de l'experimentació, però sí que afecta al preu final, ja que aquests canvis permet millorar de manera clara la recuperació de material no processat en l'execució de cada experimentació.

Com a impediment significatiu, també és destacable la dificultat de treballar amb una atmosfera controlada amb argó durant l'execució de les experimentacions.

### 3. Metodologia

Amb la identificació del material òptim per a l'experimentació del mètode de fabricació *Selective Laser Melting* com a pas previ, el present estudi de parametrització de dades segueix els passos que regeixen la fabricació additiva i una posterior valoració dels resultats obtinguts. Per tant, les operacions realitzades són:

- Identificació del material a través de les propietats més òptimes per a la soldadura.
- Generació de programes en format ISO amb el disseny de la proveta per ser executats al centre de control numèric. En aquesta operació també es porta a terme la identificació dels paràmetres influents en el processat. (Equivalent al pas de fitxer CAD a STL).
- Execució de les provetes amb les combinacions de valors dels diferents paràmetres del làser i característiques geomètriques. (Equivalent a l'escanejat i finalització del procés).
- Avaluació dels resultats i obtenció de conclusions.

En aquesta experimentació no és necessari realitzar tots els passos de la fabricació additiva definits en l'Annex A. Al processar una única capa de material és possible prescindir de la divisió de l'estructura 3D en capes, i el fet de generar geometries planes i simples també dona intrascendent a la orientació en que s'executa la fabricació de la peça.

### 4. Modificacions de la plataforma en la fase inicial de l'estudi

En la presa de contacte amb les instal·lacions del parc a l'inici del projecte, es realitzen proves del sistema de dipositat del material. S'observa, tal i com es comentat a l'apartat 2 de l'estudi, que apareixen limitacions a la hora de generar les capes de material per al processat. Per a la millora d'aquests impediments és realitzen dues modificacions principals. La primera consisteix en la modificació de la inclinació interior de la cubeta i s'engrandeix la ranura de dipositat de la mateixa per a una alimentació abundant de material, també s'inclou un voladís de goma que en el moviment de retorn de la cubeta pentina el llit de pols generant una capa uniforme en la part superior. La segona modificació consisteix en la fabricació de plaques rectificades que s'utilitzen com a suport de la base de la placa de fabricació, també es fabrica una placa base rectificada per una correcta alineació amb la placa de fabricació. Amb aquestes plaques d'una correcta planitud s'aconsegueix un bon paral·lelisme entre la part superior i inferior de la capa generant un gruix constant.

A més a més, i com a modificacions menys importants, es realitzen modificacions en la cubeta de recuperació de material no processat.

El fet de la necessitat de realitzar totes aquestes millores impedeix un avanç ràpid de l'estudi.

## 5. Acers inoxidables

Els acers inoxidables són aquells que presenten una alta resistència a la corrosió atmosfèrica o a la produïda per altres agents. La gran resistència a la corrosió d'aquests materials és degut a un alt contingut en crom (Cr) en la seva composició química, que comença a ser efectiva a partir d'un 10,5%.

Els orígens d'aquests aliatges daten de l'any 1865 on es comencen a produir acers inoxidables a petita escala amb percentatges de crom molt baixos i on se li dona molt poca importància a la seva capacitat anticorrosiva.

És durant el transcurs de la primera guerra mundial que l'evolució d'aquests aliatges fa un salt important i apareixen els primers acers inoxidables semblants als que coneixem avui en dia. Durant aquest període de guerra l'evolució es centra en l'armament militar i això permet una millora substancial en el desenvolupament d'aquest material. El metal·lúrgic anglès Harry Brearley genera estudis interessants sobre aliatges amb crom per a la millora dels cilindres del canons. L'any 1912 els doctors alemanys Strauss i Maurer patenten un aliatge níquel-crom amb un baix percentatge de carbona anomenat 18-8. Avui en dia aquest material és conegut com acer inoxidable AISI 304. Fins l'actualitat el nombre de graus en diferents presentacions, acabats i tractaments tèrmics a augmentat de manera exponencial.

Distingim els acers inoxidables en martensítics, ferrítics, austenítics o austenoferrítics segon la seva estructura cristal·lina.

- Acers inoxidables martensítics: Presenten un valor de entre 10,5 i 18% de crom i un alt percentatge de carboni, de fins a un 1,2%. El magnetisme i unes baixes soldabilitat i resistència a la corrosió són les principals característiques d'aquest grup d'inoxidables. Presenten la possibilitat de ser tractats tèrmicament, el que comportat adquirir alta duresa i resistència mecànica. (SÈRIE 400)<sup>1</sup>

- Acers inoxidables ferrítics: La principal característica d'aquesta família es troba en la capacitat de mantenir l'estructura estable fins al punt de fusió. El percentatge de crom és superior al martensítics variant de 10,5 a 30%, i el carboni presenta un valor de 0,08% aproximadament, fet que comporta una millor resistència a la corrosió. Algunes de les aliatges d'aquesta sèrie poden contenir silici, alumini, titani o molibdè variant les propietats. El magnetisme, la baixa soldabilitat i la possibilitat de ser tractats en fred, són algunes de les propietats d'aquests inoxidables. (SÈRIE 400 AISI)<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> 410, 420, 420F, 440A, 440B, 440C

<sup>2</sup> 405, 409, 410S, 430, 430F, 434, 436, 439, 444, 446

- Acers inoxidables austenítics: La conformació d'aquest element s'obté aportant níquel, nitrogen i molibdè a l'aliatge i d'aquesta manera l'estructura cristal·lina es transforma en austenita ( $\gamma$ ) sent estable independentment de la temperatura. En els austenítics el percentatge de crom varia entre 16 i 26% i el de carboni entre 0,03 i 0,08%. Com a propietats podem destacar una excel·lent resistència a la corrosió, una excel·lent soldabilitat, excel·lent factor d'higiene i neteja. No són magnètics i només hi ha la possibilitat de endurir-los mitjançant treball en fred.

- Acers inoxidables austenoferrítics: Presenten un percentatge de crom entre 18 i 26% i entre 4,5 -6,5 % de níquel a més a més de contenir un percentatge de entre 0,08 - 0,2 de nitrogen. Aquest tipus d'acer es coneix com a dúplex. Les seves principals característiques recauen en una gran resistència mecànica i al corrosió pròpia dels ferrítics, i una gran tenacitat i fàcil mecanitzat propi dels austenítics. La soldadura d'aquest material pot afectar a la seva tenacitat degut a la variació a gran velocitat produït en el procés de soldadura.

## 5.1 Acers inoxidables austenítics

Tal i com es mostra en l'apartat anterior, són els acer inoxidables austenítics els que presenten unes condicions més òptimes per a la soldadura, ja que és aquest grup el que posseeix un menor percentatge de carboni en el seu aliatge proporcionant un excel·lent soldabilitat.

Dins el grup dels austenítics es diferencien dues sèries. Per una banda, la sèrie 200 consisteix en aliatges de Crom - Manganès - Nitrogen, mentre que la sèrie 300 consisteix en aliatges de Crom - Níquel.

## 5.2 Sèrie 300

Tenint en compte que el níquel és un element que proporciona una alta estabilitat a la fase austenítica en un gran rang de temperatures, evitant d'aquesta manera el pas a fase martensítica en refredaments ràpids a temperatura ambient, com és el cas utilitzat pel mètode de *Selective Laser Melting*, la sèrie 300 inclou els materials més adients per a la realització de l'experimentació.

En aquesta sèrie hi trobem l'acer AISI 304/304L i l'AISI 316/316L, els quals presenten pràcticament les mateixes propietats. Ambdós són els més òptims i els més utilitzats en la realització de soldadures.

El material seleccionat per dur a terme l'experimentació és l'acer inoxidable AISI 316/316L. Són mínimes les diferències que porten a l'elecció d'un envers l'altre. L'AISI 316 presenta una temperatura de fusió de entre 1370 i 1400°C, mentre que el de l'AISI 304 és de entre 1400 i 1450°C. Aquesta diferència és veu reflectida en la quantitat d'energia necessària que s'haurà d'aportar al material per a la seva fusió completa influenciant els valors dels paràmetres del procés.



## 5.3 AISI 316/316L

Podem trobar els materials especificats amb diferents normes, tal i com s'observa a la Taula 1, sent les seves composició i propietats les mateixes.

AFNOR	AISI	BSI	DIN	EN	JIS	SS	UNE
Z 6 CND 17-11	316	316 S 31	1.4401	X 5 CrNiMo 17-12-2	SUS 316	2347	X6CrNiMo 17-12-03
Z 2 CND 17-12	316L	316 S 11	1.4404	X 2 CrNiMo 17-13-2	SUS 316L	2348	X2CrNiMo 17-12-03

Taula 1: Equivalències entre Normes

La principal diferència entre aquests dos aliatges es troba en el percentatge en massa de carboni fent que algunes de les seves propietats variïn. En l'acer inoxidable AISI 316 es troba en valors <0,08% mentre que els valor del carboni en AISI 316L no superen el 0,03%.

### 5.3.1 Composició química

#### AISI 316

DENOMINACIÓ	COMPOSICIÓ								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Altres
AISI 316	0,08	0,75	2,00	0,045	0,030	16/18	2/3	10/14	0,10 (N)

Taula 2: Composició AISI 316 segons Norma AISI (%)

#### AISI 316L

DENOMINACIÓ	COMPOSICIÓ								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Altres
AISI 316L	0,03	0,75	2,00	0,045	0,030	16/18	2/3	10/14	0,10 (N)

Taula 3: Composició AISI 316L segons Norma AISI (%)

Com es comenta a l'apartat anterior mirant les taules observem que la única diferència entre els dos materials la trobem en el percentatge del carboni, on un és inferior a l'altre.

### 5.3.2 Propietats

La principal característica d'aquests aliatges és la seva alta capacitat de resistència a la corrosió. Aquesta capacitat l'adquireix mitjançant la oxidació del crom amb agents externs que genera una capa protector antioxidant eficaç a temperatures de 300°C. El fet de l'existència del molibdè en la composició afavoreix la resistència a la corrosió per picadura.

PROPIETATS FÍSQUIES

PROPIETAT	VALOR	UNITATS
Densitat	7,90	g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de fusió	1390-1440	°C
Resistivitat elèctrica	74	μOhm cm (20°C)
Conductivitat tèrmica	14,6	W/m °K <sup>-1</sup>
Calor específic	450	J/Kg °K <sup>-1</sup> (0-100°C)
Mòdul elàstic	193x10 <sup>3</sup>	MPa (a tracció)
Mòdul elàstic	77x10 <sup>3</sup>	MPa (a torsió)

Taula 4: Propietats físiques AISI 316

PORPIETATS MECÀNIQUES

PROPIETAT	VALOR	UNITATS
Duresa	160-190	HB
Resistència a la tracció	460-860	MPa
Mòdul elàstic	193x10 <sup>3</sup>	MPa (a tracció)
Mòdul elàstic	77x10 <sup>3</sup>	MPa (a torsió)
Allargament	<60	%

Taula 5: Propietats mecàniques AISI 316

Trobem petites variacions en les propietats físiques i mecàniques entre l'AISI 316 i 316L degut a la variació del percentatge de carboni en la composició. Aquestes variacions no són significatives.

**5.3.3 Aplicacions**

Aquest material degut a la seva alta resistència a la corrosió a agents com són els àcids, atmosferes salines i ambients humits és utilitzat en la indústria química, nàutica, alimentaria, tèxtil o farmacèutica entre d'altres, tal i com es mostra a la Taula 6. El fet de admetre temperatures de -120 fins a 400°C és utilitzat en elements que treballen a temperatures extremes.

INDÚSTRIA	APLICACIONS
Química/Farmacèutica	- Dipòsits - Bescanviadors de calor - Condensadors - Sobreescalfadors
Nàutica	- Cables - Elements exposats a l'aigua marina - Cascs de vaixells
Alimentaria/Hostalera	- Safates - Coberts - Forns - Recipients d'emmagatzematge i transport - Neveres
Tèxtil/Paperera	- Rodets - Compressors

Taula 6: Aplicacions AISI 316

## 6. Paràmetres influents en el procés de fabricació.

El procés de fabricació mitjançant la tecnologia SLM depèn d'un gran nombre de paràmetres a controlar per a l'obtenció d'uns resultats òptims. En el processat hi intervenen tres components principals, que són, el material, el làser i la geometria de construcció, cadascun amb les seves propietats corresponents, tal i com es veu a la figura 1.

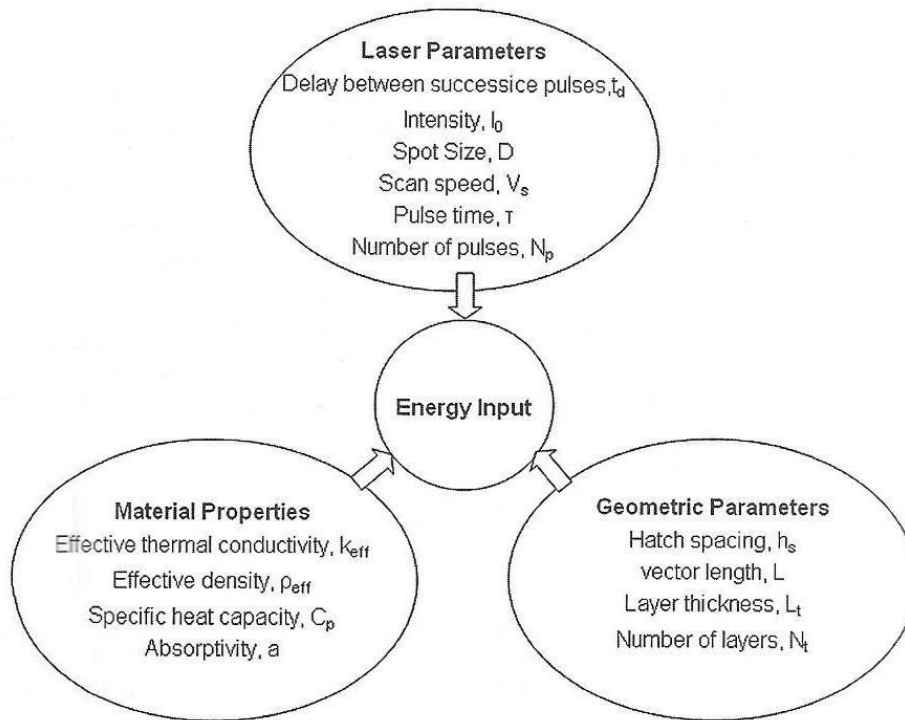


Figura 1: Esquema paràmetres influents en el procés (A.A. V.V. ,2010)

La variació dels paràmetres d'un dels components pot afectar de manera significativa a la resta, aquest fet es coneix com a sub - model de procés. Per altre banda, la complexitat de l'adquisició de cert valors no permet un control precís de la totalitat de la parametrització, havent de treballar amb rangs de valors obtinguts amb càlculs aproximats o investigacions anteriors, com és l'article *316L Stainless Steel with gradient porosity fabricated by Selective Laser Melting*.

El cas que es planteja en aquest projecte, la velocitat d'escanejat no depèn específicament del làser, sinó que ve donada per la màquina - eina a la que està adaptada el capçal làser. La resta de paràmetres són descrits en els següents apartats dins els components corresponents.

### 6.1 Propietats del material

Les propietats més important a tenir en conte durant la construcció són la densitat puntual i la conductivitat tèrmica del llit de pols, aquests poden variar al llarg de tot l'escanejat, ja que poden dependre d'elements com la porositat del material o la temperatura específica en cada punt. La

densitat es pot obtenir en moments puntuals com es mostra a la figura 2, mentre que el valor de la conductivitat tèrmica el podem obtenir mitjançant l'aplicació de l'equació 1 del model simplificat:

$$K_{eff} = K_s \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad Eq. 1$$

on:

$K_s$  = conductivitat del material en estat sòlid

$\rho$  = densitat local en el llit de pols

$\rho_s$  = densitat del material sòlid

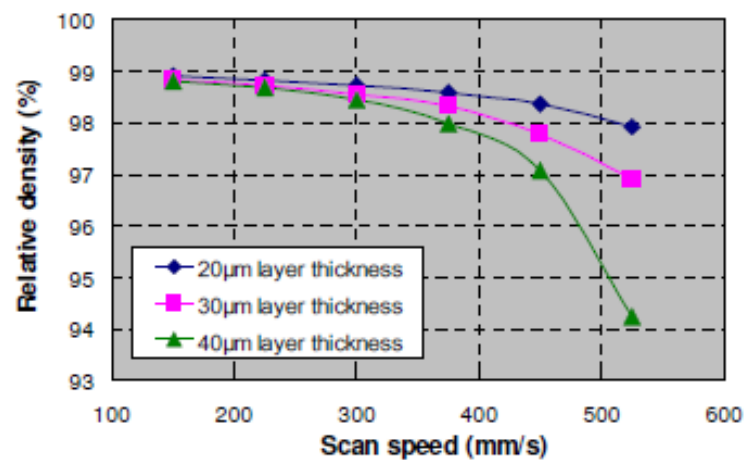


Figura 2: Relació entre velocitat d'escanejat i densitat del material (A.A. V.V., 2010)

La importància de la conductivitat tèrmica ve donada ja que una part de l'energia aportada en la zona de construcció és absorbida pel material, mentre que la resta es perd en el bescanvi de temperatura entre el material i la base.

Mitjançant la conductivitat tèrmica i una de les altres propietats destacades en el control de la temperatura del substrat, com és la calor específica del material, podem obtenir un valor indicatiu de la quantitat d'energia a aportar per a un processat correcte.

Els paràmetres geomètrics aplicats en el procés podrien incidir sobre els de material com em vist anteriorment amb la relació directe entre la velocitat d'escanejat i la densitat del material, o bé amb el fet de treballar amb solapaments importants entre línies d'escanejat. Aquest fet genera l'aparició de zones afectades per la calor o *HAZ (Head Affected Zone)*, que és la zona més propera al punt d'aplicació on no s'arriba al valor de fusió i provocant la modificació de les propietats del material, o fins i tot, amb l'aparició d'efectes no desitjables com esquerdes o fragilitat en el material processat, tal i com es mostra a la figura 3.

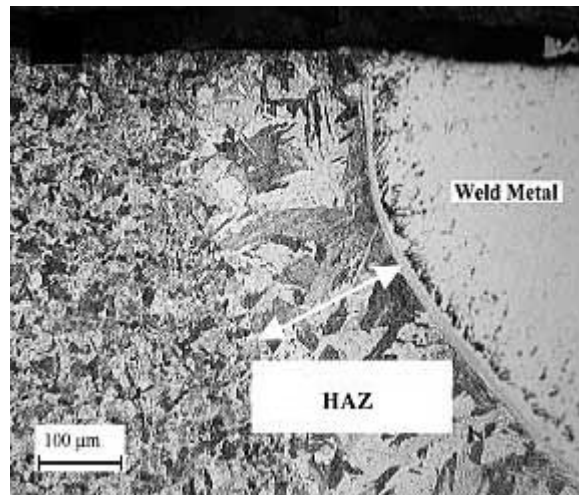


Figura 3: HAZ o zona afectada per la calor (P.Woollin, 2002)

Les propietats de l'acer inoxidable AISI 316 en estat sòlid, les quals s'observen a la taula 5, difereixen de manera significativa en el seu estat líquid durant la fusió en el processat, imposant una dificultat de control de les propietats del material durant l'experimentació. El no ser possible l'adquisició de valor durant la fusió, impossibilita el càlcul de densitat puntuals i temperatura fent que no s'agafin referències pel que fa a la parametrització del material.

## 6.2 Característiques de làser

En la parametrització de les característiques del làser hi trobem la potència de radiació, la distància i el diàmetre focal.

Existeix una relació directe entre la mesura del diàmetre i la distància focal. Ambdues dimensions han estat optimitzades pel fabricant del làser i facilitades per a la seva aplicació. Mitjançant la distància focal s'aconsegueix un diàmetre focal òptim amb la concentració màxima d'energia i la millor definició del feix de llum.

### DADES FACILITADES PEL FABRICANT

Distància focal: **125 mm**. (En l'experimentació es treballa a una distància respecte el punt inferior del capçal de 92,5 mm fins a la superfície del substrat).

Diàmetre focal: **0,150 mm**.

El valor del diàmetre focal es pot obtenir mitjançant l'equació 2:

$$Df = \frac{4F \times \lambda}{\pi \times D_1} \quad Eq. 2$$

on:

$D_f$  = diàmetre focal

$F$  = distància focal

$\lambda$  = longitud d'ona

$D_l$  = diàmetre feix de llum en lent focal

La potència utilitzada s'obté mitjançant l'experimentació 1, on s'executen escanejats a diferents potències fins a la obtenció de cordons de soldadura òptims en mida i formació, sent un dels paràmetres d'estudi. Durant tots els processats del present projecte s'utilitza un capçal làser indicat per a la realització de soldadures i es treballa amb l'execució d'un programa intern de feix continu de radiació làser.

### 6.3 Característiques geomètriques

Dins l'experimentació realitzada és allà on s'han de determinar un major nombre de paràmetres. Mitjançant les geometries que es volen estudiar, es treballa sobre els valors de la velocitat d'escanejat, l'espessor de capa i el solapament entre línies o "*overlapping*".

Per un part, l'espessor de capa bé restringit per la precisió de la qual disposa la plataforma de construcció (interval de 50 $\mu$ m) i per les dimensions de grà del material utilitzat, ja que ha de ser superior al màxim valor del rang de mida del grà. Pel que fa a la velocitat d'escanejat i el solapament entre línies, existeix un gran rang de possibles configuracions en les quals es treballa a partir dels estudis comentats en l'apartat 1.1.

La velocitat d'escanejat és el valor en el que recau l'anomenat efecte bola o balling. Durant el procés si no s'aplica una radiació prou prolongada (velocitat d'escanejament massa alta) el material no assoleix una estructura suficientment líquida que li permeti fluir per sobre la superfície de construcció cobrint el màxim de porositats existents, i adquireix la forma d'un cordó discontinu amb forma de petites esferes tal i com es mostra a la figura 4.

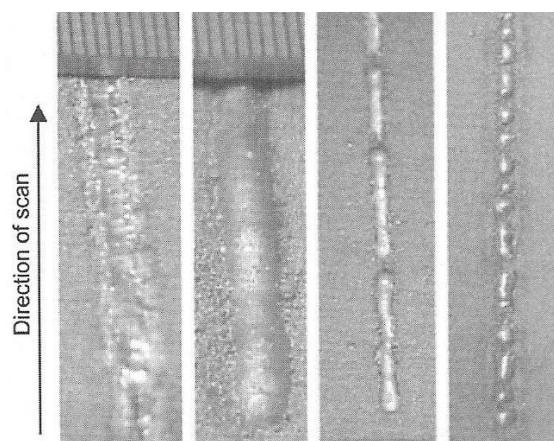


Figura 4: Efecte bola. Cordons a diferents velocitats d'escanejament. (A.A. V.V., 2010)

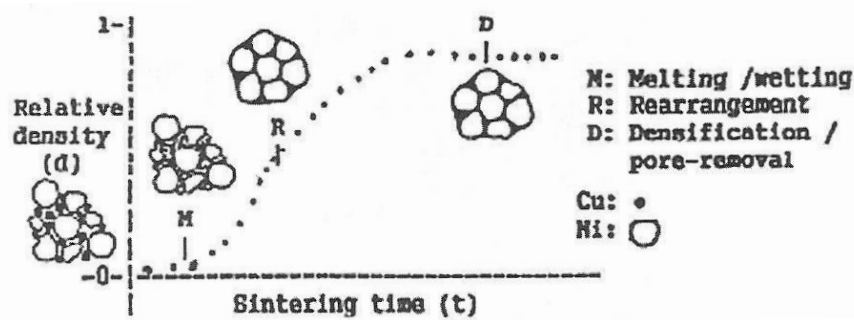


Figura 5: Gràfica de relació entre densitat i temps de sinteritzat (A.A. V.V., 2010)

En aquest cas obtenim el mateix sub - model comentat anteriorment entre la densitat del material i la velocitat d'escanejat.

En el solapament entre cordons o "*overlapping*" també es genera un sub - model que relaciona aquest factor amb el fenomen de *HAZ* o zona afectada per la calor. L'*overlapping* consisteix en la sobre posició de cordons per a la generació d'una superfície uniforme de material consolidant un bon acabat superficial i reduint al mínim les porositats i zones sense material. Aquest paràmetre és d'una important influència en l'acabat superficial de l'element a fabricar, ja que un solapament insuficient genera un buit en forma còncava entre cordons, i un solapament excessiu produeix l'acumulació de cordons uns sobre altres incentivant l'acumulació de radiació. El dimensionament es realitza mitjançant el tant per cents del diàmetre del cordó que no es sobreposa, tal i com es mostra a la figura 6.

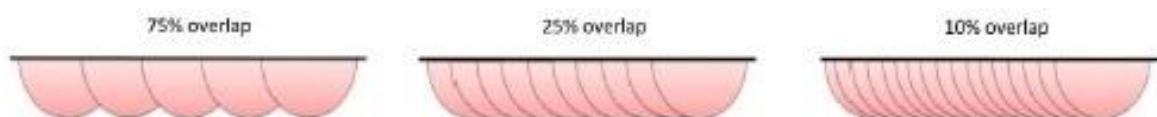
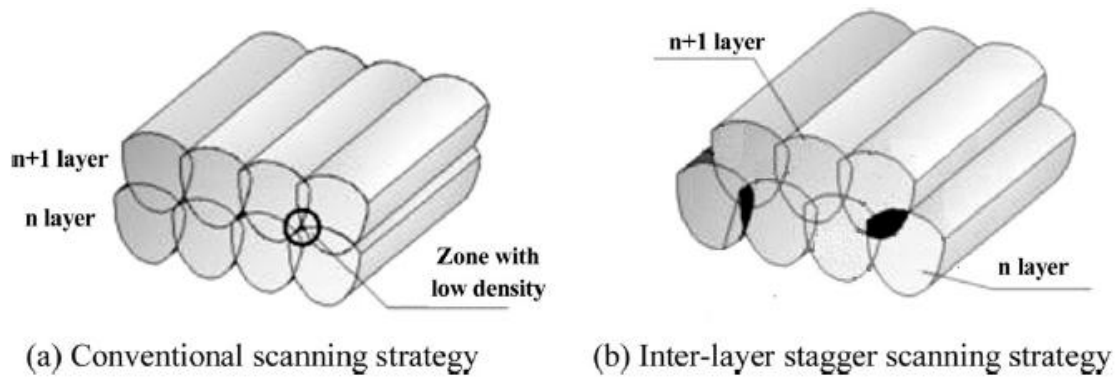


Figura 6: *Overlapping* en una única capa (E.Yasa, 2011)

Es produeix un solapament horitzontal (2D) entre cordons a la mateixa alçada en la generació de la superfície d'una capa (Figura 6), mentre que es produeix un solapament vertical (3D) quan es fabrica una capa successiva sobre l'anterior augmentant la dimensió vertical de la peça a fabricar (sub - model entre el gruix de capa i l'*overlapping*). Les capes superiors es poden realitzar mitjançant la generació de cordó sobre cordó o bé sobreposant els cordons, de manera que el cordó superior es crea entre dos cordons inferiors eliminant la falta de material en forma còncava que sorgeix entre cordons horitzontals. En el primer cas en generen zones amb una baixa densitat en la intersecció entre cordons, tal i com es mostra a la figura 7.

Figura 7: *Overlapping multicapa* (X.Su, 2012)

## 7. Equipaments i material per a l'experimentació

Per dur a terme l'experimentació principal del projecte s'utilitzen les instal·lacions de que disposa el Grup de Recerca en Enginyeria de Producte, Procés i Producció al Parc Científic i Tecnològic de la Universitat de Girona, consistent en l'adaptació d'un capçal làser Rofin FL x50 a un centre de mecanitzat Kondia HS 1000. El fet de la col·locació del capçal làser al centre de control numèric permet el desplaçament del feix làser en la direcció X i el moviment de la taula de treball en la Y, mentre que la profunditat (direcció Z) s'aconsegueix mitjançant el moviment en vertical d'una plataforma dissenyada explícitament per a la generació d'estructures tridimensionals a través de la tècnica de fabricació additiva Selective Laser Melting.

Per a l'adquisició de dades s'utilitza un microscopi òptic per a la generació d'imatges dels cordons realitzats, i un rugosímetre per a l'obtenció de l'acabat final de les superfícies generats.

### 7.1 Centre de mecanitzat CNC

El centre de mecanitzat utilitzat és una fresadora de construcció convencional i 17 KW de potència on els tres components principals són definits en els següents apartats:

- Hardware CNC
- Capçal
- Plataforma de treball

#### 7.1.1 Hardware CNC Kondia HS 1000

Hardware amb tecnologia de control numèric que permeten el moviment del capçal i de la taula de la màquina en la direcció dels eixos de coordenades. Les direccions X i Z són donades pel moviment del capçal, mentre que el desplaçament en Y s'obté amb el moviment de la taula. En el cas del present projecte només s'utilitza el moviment de la màquina en les direccions X i Y dels eixos de



coordenades, treballant en un sol pla. En la següent figura s'observa el centre de control numèric utilitzat.



Figura 8: Hardware CNC Kondia HS1000

### 7.1.2 Capçal

En la maquina original s'elimina el porta - eines i s'adapta el capçal làser *Precitec* mitjançant unions cargolades, tal i com s'observa a la figura 9. Amb la instal·lació realitzada és possible l'obtenció de la distància i diàmetre focal òptims a través del moviment vertical del capçal. S'ajusta manualment a una alçada de 11,5 mm respecte la tapa de metacrilat de la plataforma, obtenint d'aquesta manera la distància focal de 125 mm respecte la base del substrat.

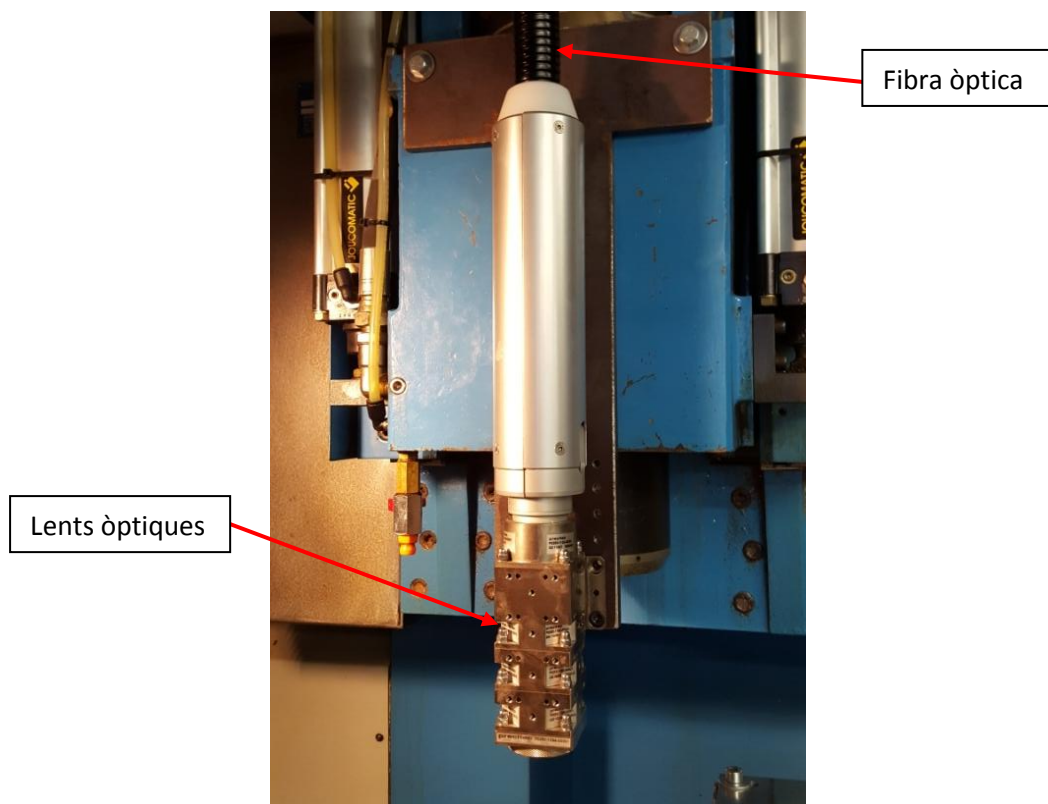


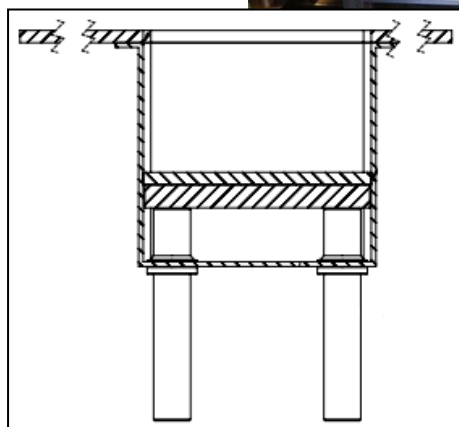
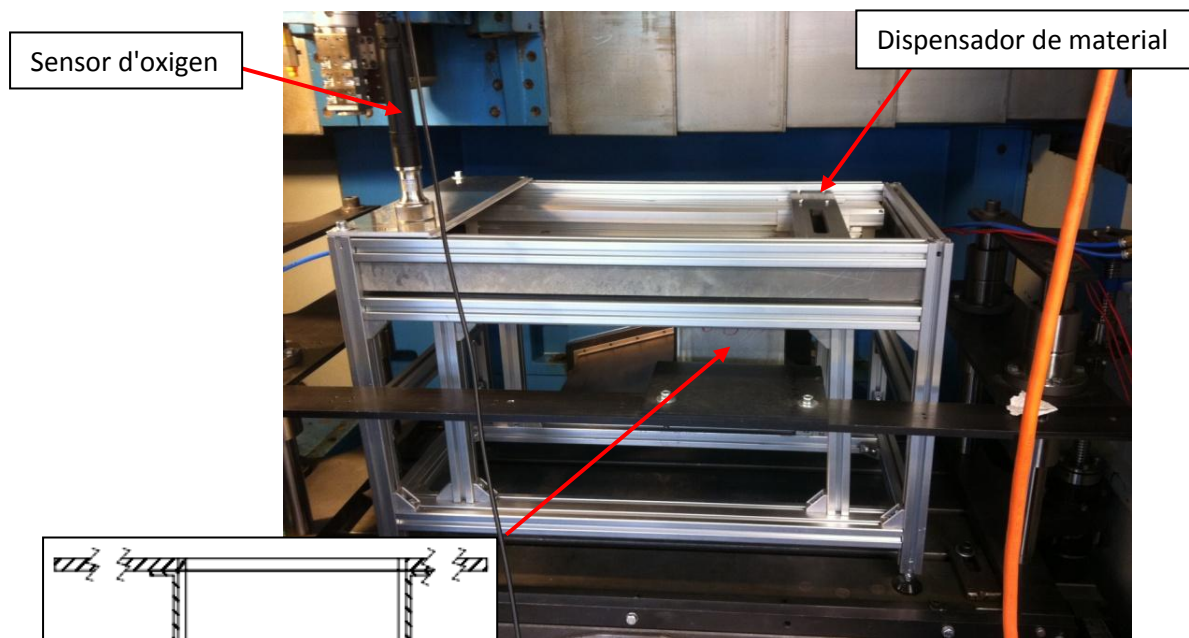
Figura 9: Capçal làser

### 7.1.3 Plataforma de treball

La taula de treball de la màquina s'utilitza com a ancoratge per a la plataforma de construcció i permet el moviment en la direcció Y.

La plataforma de construcció és fonamental per a un correcte conformat del processat del material. És una estructura de barres d'alumini embridada a la taula de treball de la màquina, fent possible el moviment en l'eix Y durant l'ecanejant.

La plataforma disposa d'un dispensador de material amb el qual es genera la capa del substrat en pols sobre la superfície de treball. El funcionament de la instal·lació segueix el procediment de fabricació descrit en l'Annex B, on amb el desplaçament vertical de la superfície de treball s'obté la dimensió Z. En la figura 10 s'observa la plataforma sobre la taula de treball.



Tal i com s'observa a la figura 11, el sistema disposa d'una gaveta per a la recuperació del material no processat dins la qual es desplaça la superfície de construcció per a l'obtenció del gruix de capa desitjat, donant profunditat a la superfície generada de material processat.

En la zona de treball de la plataforma es genera una cavitat estanca on mitjançant una tapa de metacrilat<sup>3</sup> s'obté una atmosfera controlada d'argó. A través d'un sensor es controla la quantitat d'oxigen existent amb la possibilitat de ser regulada al valor òptim.

## 7.2 Làser Rofin FL X50

El làser Rofin FL x50 és un làser de fibra d'excitació per díodes amb la capacitat de generar potències de fins a 500 Watts que pot ser utilitzat en tècniques de soldadura o de tall. Aquest model de làser proporciona una gran qualitat de feix de llum amb una longitud d'ona en el rang d'un micra, fet que el fa adient per treballar amb un ventall molt ampli de materials. En el cas del present projecte s'utilitza el capçal làser de soldadura treballant a pols continu. El sistema és governat des d'un comandament amb la possibilitat de l'ajust dels diferents paràmetres com la potència, càrrega i descàrrega o l'execució, tal i com s'observa a la figura 12.

A la següent taula es mostren les característiques principals del làser:

<b>LÀSER ROFIN FL x50 (Single Mode)</b>	
<b>DADES TÈCNIQUES ESPECÍFIQUES</b>	
Potència nominal	<b>500 W</b>
Rang de potència	<b>10 - 100%</b>
Qualitat del feix làser	<b>≤0,4 mm mrad</b>
Estabilitat de potència	<b>±2%</b>
<b>DADES TÈCNIQUES TÍPIQUES</b>	
Longitud d'ona	<b>1,08 μm ± 10nm</b>
Excitació	<b>Díodes làser</b>
<b>DADES TÈCNIQUES GENERALS I REQUERIMENTS</b>	
Voltatge	<b>3x230/400V ± 10%/480V ± 10%; 50/60 Hz</b>
Càrrega connectada	<b>4,2 kVA</b>
Dimensions	<b>1160x900x1480 mm</b>
Pes	<b>&lt;450 Kg</b>
Potència instal·lada	<b>4,2 KVA</b>
Potència efectiva	<b>3,8 KW</b>
Consum màxim	<b>8 A</b>
Protecció magneto tèrmica	<b>25 A</b>

Taula 7: Característiques Làser Rofin FL x50

La instal·lació disposa d'un sistema de refrigeració intern de circuit tancat amb refrigerant R 407C que manté la temperatura de treball del làser entre 21 i 27°C, tal i com es mostra a la figura 13.

A la següent taula es mostren les característiques principals del sistema de refrigeració:

<sup>3</sup> S'utilitza metacrilat al ser un material transparent, resistent als cops, lleuger i amb un preu assequible.

SISTEMA DE REFRIGERACIÓ ROFIN FL x50 (Single Mode)	
REFRIGERACIÓ	
Capacitat de refrigeració recomanada	≥3 KW
Velocitat de flux	2000 l/h
Rang de temperatura recomanada	15-19°C (per sobre el punt de rosada)
Rang tolerància temperatura	±2°C
Pressió de subministrament	3000-6000 hPa (3-6 bars)
Contrapressió	1000 hPa (1 bar)

Taula 8: Característiques del sistema de refrigeració Roфин FL x50



Figura 12: Laser Roфин FL x50



Figura 13: Sistema de refrigeració

La conducció del feix làser des de la seva generació fins al capçal es realitza mitjançant una fibra òptica (Single Mode) de 50 µm diàmetre de nucli i sistema de seguretat RSY i una longitud total de 8 metres. La fibra disposa de refrigeració directe als connectors d'entrada i sortida. El capçal marca *Precitec* conté un sistema de lents òptiques que la seva funció principal és la de focalitzar el feix làser en un punt obtenint un diàmetre focal òptim segons el fabricant de 150 µm.

A la següent taula es mostren les característiques principals del sistema de refrigeració:

FIBRA ÒPTICA	
SISTEMA DE SUBMINISTRAMENT DE FIBRA	
Interfície	QBH
Diàmetre del nucli	50 µm
Longitud	8 m
Model	Step index fiber amb sistema de segu. RSY

Taula 9: Característiques fibra òptica

## 8. Equipaments per a l'adquisició de dades

### 8.1 Rugosímetre

Per a l'adquisició dels valors  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) de l'acabat superficial s'utilitza el rugosímetre que disposa el GREP, ubicat al Parc Científic i Tecnològic de la Universitat de Girona.

Rugosímetre de la marca Mitutoyo model SurfTest SV-2000 amb software d'adquisició de dades Surfpak, tal i com s'observa a la figura 14.

A la següent taula es mostren les característiques principals del rugosímetre:

Rugosímetre Mitutoyo SurfTest SV-2000	
CARACTERÍSTIQUES PRINCIPALS	
Carrera del palpador	800 $\mu\text{m}$
Resolució	0,0001 $\mu\text{m}$
Avanç (Eix X)	50 mm
Mínim cut-off	0,025 mm
Desviació lineal	0,3 $\mu\text{m}/50$ mm
Medicions	55 Paràmetres ( $R_a$ , $R_t$ , $R_z$ ,...)

Taula 10: Característiques Rugosímetre Mitutoyo SurfTest SV-2000



Figura 14: Rugosímetre Mitutoyo SurfTest SV-2000 amb Programa d'adquisició de dades Surfpak

### 8.2 Microscopi

Per a l'adquisició d'imatges de les superfícies processades s'utilitza el microscopi òptic que disposa el GREP, ubicat al Laboratori de Mecanització de l'edifici Politècnica II de la Universitat de Girona.

Microscopi òptic de la marca Nikon model SMZ 745T amb software d'adquisició de dades ProReg CT3 amb capacitat de generar imatges a diferents zooms i amb un aplicació per a la mesura de distàncies a les imatges generades, tal i com s'observa a la figura 15.

A la següent taula es mostren les característiques principals del sistema de refrigeració:

Microscopi òptic Nikon SMZ 745T	
CARACTERÍSTIQUES PRINCIPALS	
Sistema òptic	<b>Sistema Òptic Greenough</b>
Ampliació total	<b>3.35-300x</b>
Tub ocular	<b>Fix</b>
Inclinació ocular	<b>45°</b>
Ajust distància interpupil·lar	<b>52-75 mm</b>
Rang Zoom	<b>0.67-5x</b>
Relació de zoom	<b>7.5:1</b>

Taula 11: Característiques Microscopi òptic Nikon SMZ 745T

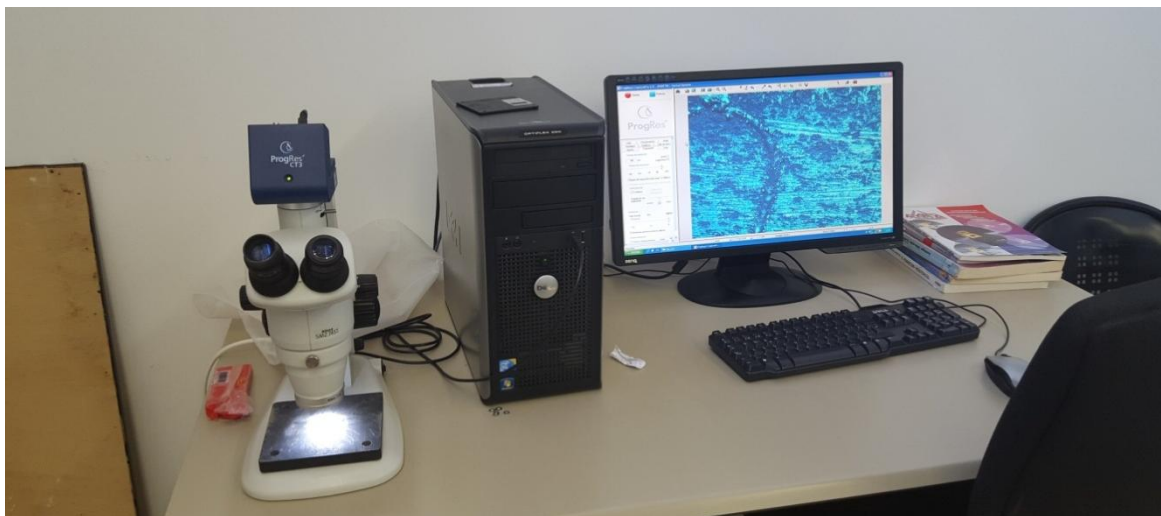


Figura 15: Microscopi Nikon SMZ 745T amb sistema d'adquisició de dades ProgRes CT3

## 9. Descripció del procés d'experimentació SLM

La base de l'estudi consisteix en la realització de dues experimentacions per a la obtenció dels paràmetres més adients per a la fabricació d'una superfície d'acer inoxidable processat mitjançant el mètode de fabricació additiva *Selective Laser Melting* generant una sola capa de material. Es parteix d'un rang de valors descrits en estudis anteriors i en proves ja realitzades en la posta apunt de la instal·lació conjuntament amb membres del GREP.

Tot el procés es porta a terme mitjançant les instal·lacions i aparells definits en els apartats 7 i 8. S'utilitza com a base per a la conformació una placa d'acer inoxidable rectificada de 144x144x14,5 unida a la plataforma de construcció mitjançant unions cargolades, i durant tot el processat es treballa en una atmosfera controlada amb argó a un nivell d'oxigen vigilat mitjançant un sensor. Com es comenta a l'apartat 6.2 totes les experimentacions s'executen amb un diàmetre focal de 0,150 mm generant un cordó de la mateixa amplada. La distància focal també és invariable durant tot l'estudi a 125 mm. El material utilitzat és un acer inoxidable AISI 316 en estat de micro-partícules de dimensions entre 40 i 63  $\mu\text{m}$ . A conseqüència de la mida de grà el valor mínim d'espessor de capa amb que es pot treballar el processat és de 100  $\mu\text{m}$ .

La realització de les experimentacions segueix els passos que conformen el procés de fabricació de la tècnica de fabricació additiva descrits en l'Annex A.

### 9.1 Experimentació *single-scanning*

#### 9.1.1 Disseny de la proveta

El primer pas a realitzar en l'experimentació consisteix en la generació d'un programa 2D simple per a la conformació de *single-scanning* que ens permetin provar diferents paràmetres per a la obtenció d'un cordó uniforme. El programa executat es troba en l'Annex C. La forma utilitzada presenta una similitud al que podria ser una petit àlep d'un impulsor. S'escull aquesta geometria ja que es combinen línies rectes que afavoreixen la visualització i l'estudi de la forma/propietats finals del cordó, i una petita corba que simplement ens mostra la formació en un cordó no lineal. El programa generat en codi G s'introdueix al servidor del GREP des d'on és possible executar-lo a través del centre de control numèric.

L'objectiu de la proveta *single-scanning* és l'obtenció d'uns valors aproximats de potència làser i velocitat d'escajejat que permetin una fusió correcte del material durant tot el recorregut del programa. En els resultats obtinguts es valora la continuïtat i homogeneïtat del cordó amb la formació de l'efecte bola i les dimensions del cordó.

- **Continuïtat:** Aparició de material processat en tot el recorregut del programa.
- **Homogeneïtat:** Fusió completa i compacte del material en tot el recorregut del programa. Es mesura mitjançant l'aparició de l'efecte bola, tal i com es mostra a la figura 4.
- **Dimensions:** Es mesuren en referència a les mides del diàmetre focal i altura òptima. En la figura 16 s'observa la relació amplada i alçada del cordó que es tenen en compte a la valoracions. Les mesures reals s'obtenen mitjançant els software ProgRes CT3.

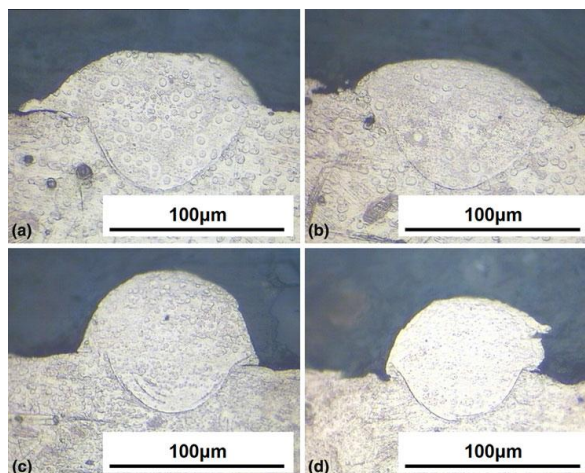


Figura 16: Dimensions de cordó a diferents velocitats d'escanejat utilitzats com a referència. (R.Li, 2009)

### 9.1.2 Execució de la proveta

En l'execució del primer programa es construeixen un total de vint combinacions diferents en les quals es varia la velocitat d'escanejat des de 6.000 fins a 12.000 mm/min i on la potència canvia des de 60 fins a 170 watts. El valor de l'espessor de capa és una constant a 100 µm. En la taula següent apareixen les combinacions utilitzades.

	Vel. escanejat (mm/min)	Potència (W)	Espessor de capa (µm)
1.1	6.000	60	100
1.2	9.000		
1.3	10.500		
1.4	12.000		
2.1	6.000	80	100
2.2	9.000		
2.3	10.500		
2.4	12.000		
3.1	6.000	100	100
3.2	9.000		
3.3	10.500		
3.4	12.000		
4.1	6.000	130	100
4.2	9.000		
4.3	10.500		
4.4	12.000		
5.1	6.000	170	100
5.2	9.000		
5.3	10.500		
5.4	12.000		

Taula 12: Paràmetres utilitzats en l'experimentació 1





Figura 17: Capa de material (espesor 100 µm)

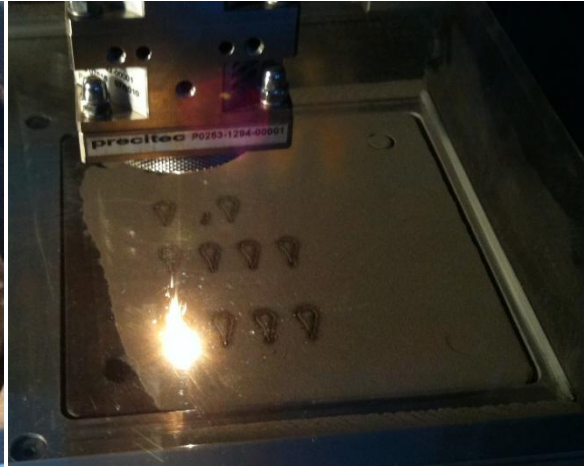


Figura 18: Figura del processat

### 9.1.3 Visualització de resultats

Finalitzat el processat de l'experimentació es realitza la visualització dels resultats obtinguts. En la construcció dels primers escanejats a potències de 60 i 80 Watts la fusió del material no és completa, presentant un marcatge molt fi i poc compacte sobre la base. Pel que fa a la homogeneïtat durant l'execució, a mesura que augmenta la velocitat d'escanejat apareixen petites esferes de material processat corresponents a l'efecte bola, les quals són degudes a una exposició molt curta de la radiació sobre el material. Les dimensions del cordó són, de forma evident, molt inferiors a la mida nominal del diàmetre focal tal i com s'observa a la figura 19.



Figura 19: Processat a 80 watts amb valors de velocitat d'escanejat de 6000, 9000, 10500 i 12000 mm/min

Conforme s'augmenta la potència del processat a 100 Watts les característiques del cordó milloren lleugerament, adquirint una continuïtat més regular en tot l'escanejat quan s'utilitzen velocitats de 6.000 i 9.000 mm/min. Tot i això, la homogeneïtat dels cordons a aquestes velocitats no es considera òptima, ja que apareix efecte bola en tot el recorregut del programa, tal i com es mostra a la figura 21. Pel que fa a l'amplada final del cordó dista clarament del gruix òptim.

A velocitats de 10.500 i 12.000 mm/min la fusió del material és molt escassa, deixant una petita marca sobre la base a l'inici de l'escanejat, i un cordó com irregular i amb gran quantitat d'efecte bola al final del programa, semblant a l'obtingut amb velocitats més baixes. A les zones on hi ha material soldat, la mida del cordó és molt irregular i inferior a la mesura nominal, tal i com es mostra a la figura 21.



Figura 20: Processat a 100 watts amb valors de velocitat d'escanejat de 6000, 9000, 10500 i 12000 mm/min

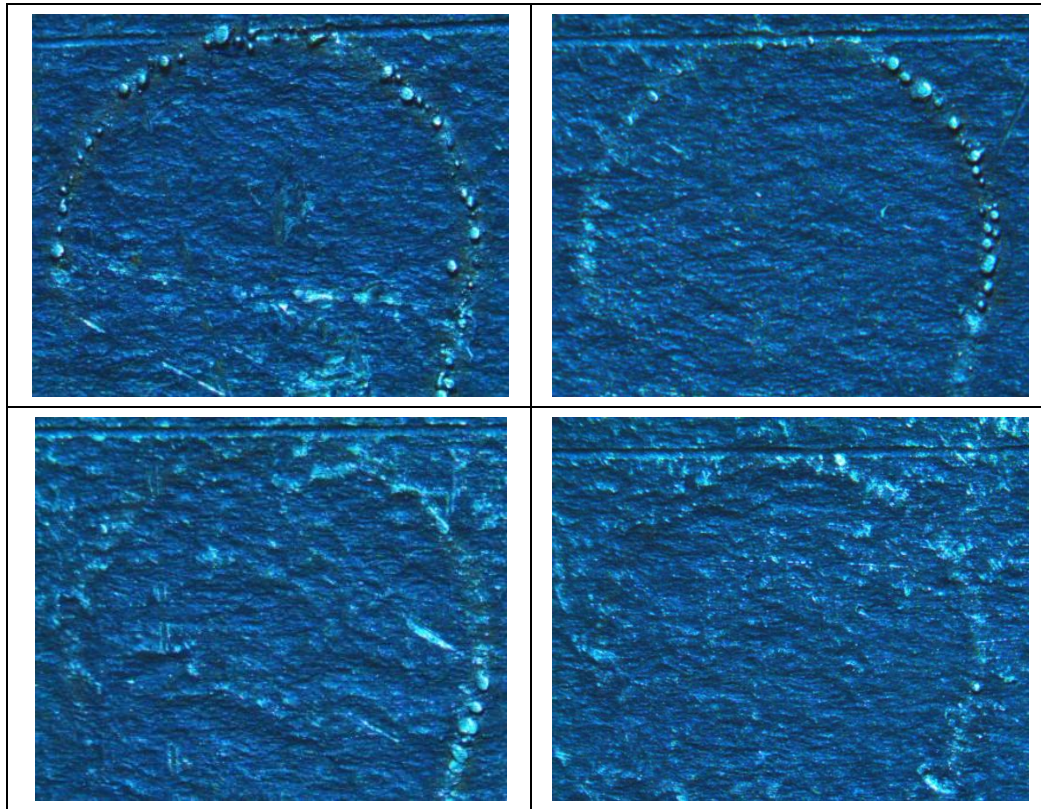


Figura 21: De esquerra a dreta i de dalt a baix, processat a 100 watts amb valors de velocitat d'escanejat de 6000, 9000, 10500 i 12000 mm/min (Rang Zoom 0.65X)

En la utilització de potències de 130 i 170 Watts els resultats obtinguts són similars en els dos casos, i és on el processat presenta unes característiques més òptimes.

A velocitats d'execució de 6.000 mm/min la continuïtat del cordó és completa, i presentant una correcta homogeneïtat sense aparició d'efecte bola. Tot i això, el fet de treballar amb potències altes i velocitats baixes produeix una exposició prolongada d'energia en el mateix punt, fent el material en pols i la base al mateix temps, i provocant que el cordó obtingut adquireixi una alçada molt reduïda, efecte semblant al que s'observa a les posicions a i b de la figura 16.

A 9000 mm/min la continuïtat del cordó segueix sent completa, però es genera un percentatge entre el 10 i el 20% d'efecte bola a l'inici trencant la homogeneïtat de l'escanejat. Tot i reduir-se l'exposició

de la radiació, la fusió sobre la base continua sent massa elevada produint el mateix efecte que es troba en el cas de l'escanejat a 6.000 mm/min amb efectes semblants a les posicions a i b de la figura 16. L'alçada del cordó és lleugerament superior que l'obtinguda en el cas anterior.

Als escanejats realitzats a 10.500 mm/min s'aconsegueixen uns cordons amb una continuïtat completa on la homogeneïtat es trenca per l'aparició d'efecte bola en un percentatge del 15 i 25% en el recorregut. L'alçada i forma del cordó obtingut són correctes, efecte semblant al que s'observa en les posicions c i d de la figura 16. L'amplada d'aquest és lleugerament inferior a l'inici respecte el final de l'escanejat.

En l'últim processat d'aquestes provetes realitzat a 12.000 mm/min, la continuïtat del cordó segueix sent completa però es perd la homogeneïtat per l'aparició d'efecte bola en una part reduïda del recorregut. Les dimensions del cordó en les zones processades correctament són similars a les obtingudes en l'execució a 10.500 mm/min, semblants als efectes que s'observen a les posicions c i d de la figura 16.



**Figura 22:** En la part superior processat a 130 watts amb valors de velocitat de 6000, 9000, 10500 i 12000 mm/min  
En la part inferior processat a 170 watts amb valors de velocitat de 6000, 9000, 10500 i 12000 mm/min

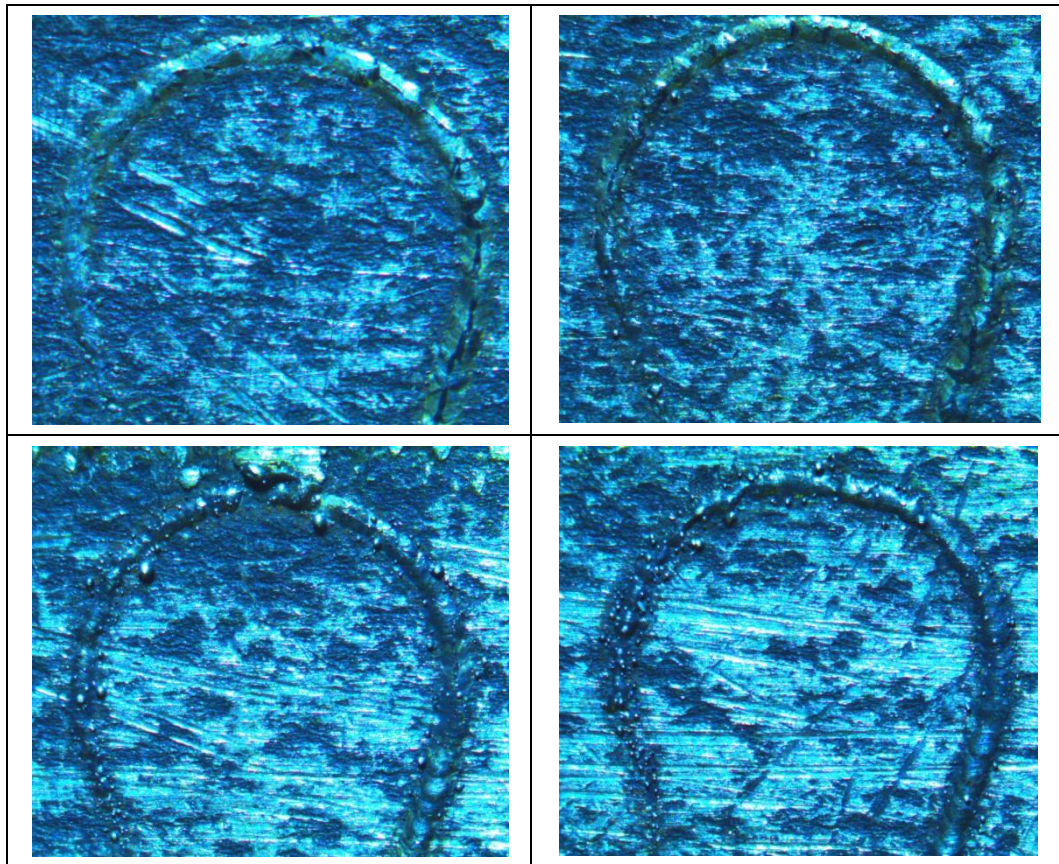


Figura 23: De esquerra a dreta i de dalt a baix, processat a 130 watts amb valors de velocitat d'escanejat de 6000, 9000, 10500 i 12000 mm/min (Zoom 0.65x)

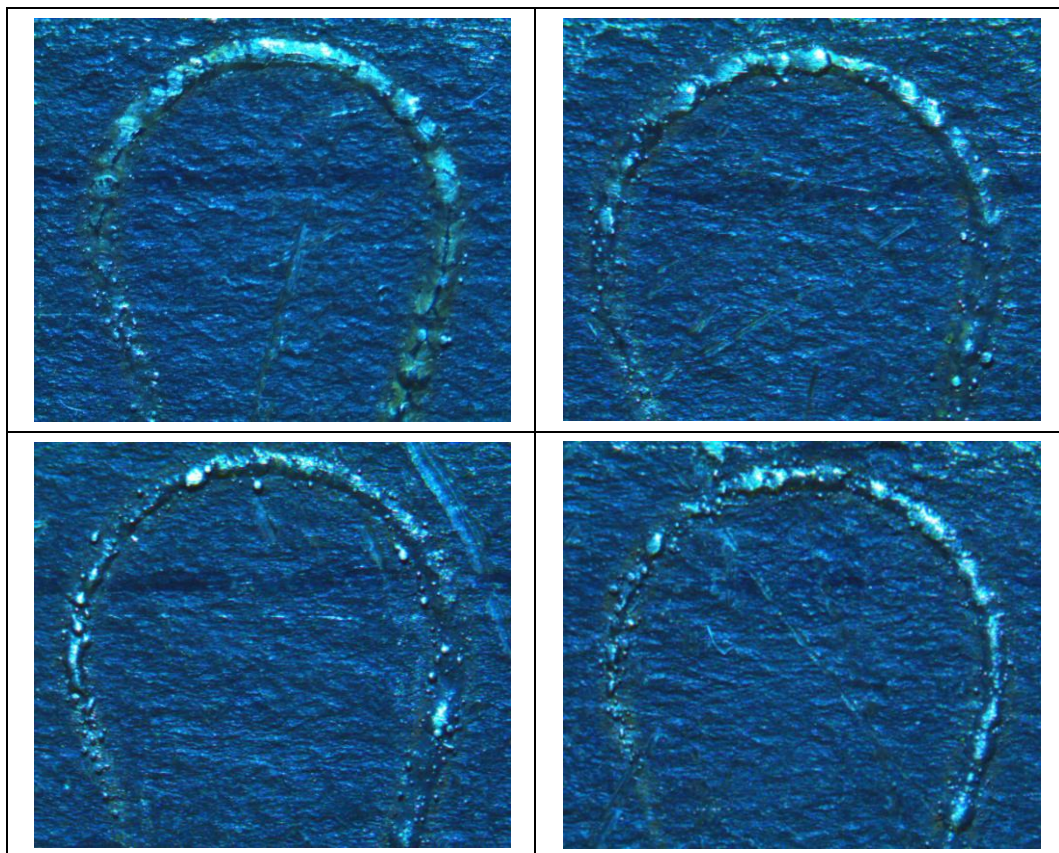


Figura 24: De esquerra a dreta i de dalt a baix, processat a 170 watts amb valors de velocitat d'escanejat de 6000, 9000, 10500 i 12000 mm/min (Zoom 0.65x)

### 9.1.4 Valoracions i conclusions de l'experimentació

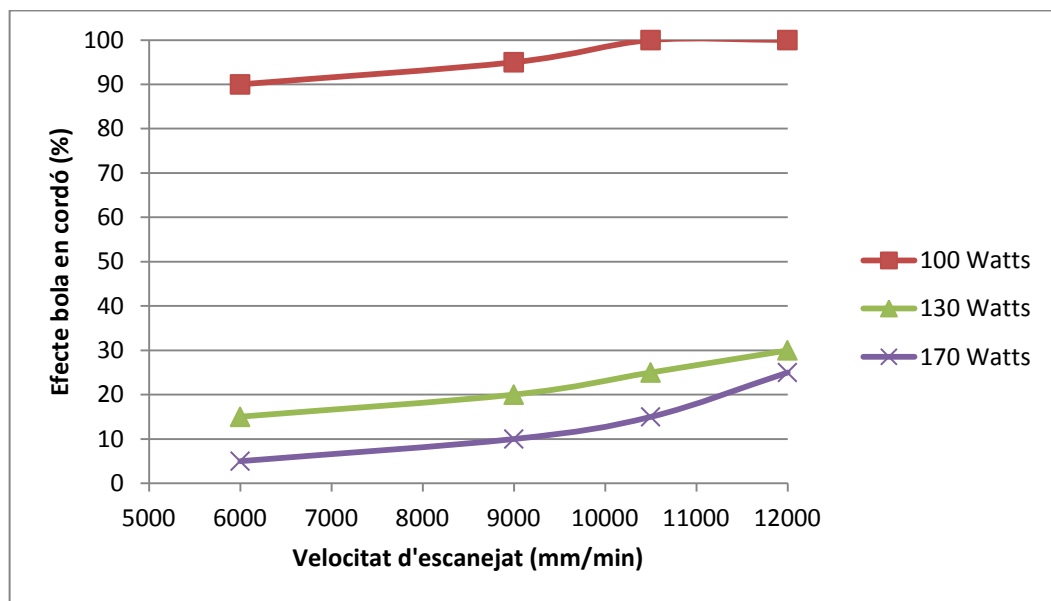
Les conclusions de l'experimentació s'obtenen a partir de l'anàlisi dels valors obtinguts en la continuïtat, homogeneïtat i dimensions/ forma del cordó comentats en el punt 9.1.1.

#### CONTINUITAT

Considerant com a òptims els cordons amb més continuïtat, observem que a potències de 60,80 i 100 Watts no és possible la realització d'un cordó continu, és en la utilització de potències de 130 i 170 Watts és on s'aconsegueix una continuïtat més elevada arribant a ser de pràcticament el 100%.

#### HOMOGENEÏTAT

La homogeneïtat del cordó s'avalua mitjançant l'aparició de l'efecte bola durant el recorregut del programa, sent la mínima aparició la considerada com a apte. A la gràfica 1 es mostra el percentatge d'efecte bola obtingut durant la utilització dels diferents valors de potència i velocitat d'escanejat.



Gràfica 1: Relació entre vel. escanejat i efecte bola a diferents potències

El fet de treballar a altes potències i velocitats baixes permet al material una major absorció d'energia provocant una total fusió i reduint clarament l'aparició d'efecte bola i la porositat. És a valors de 170 Watts i 6.000 mm/min quan trobem una menor aparició d'efecte bola (5%), mentre que la major (100%) s'obté a uns valors de 100 Watts i 12.000 mm/min.

#### DIMENSIONS/ FORMA

Considerant com a òptimes les formacions del cordó les observades en la posició c de la figura 16, obtenim les resultats similars en els processats realitzats a potències de 130 i 170 Watts a velocitats d'encanejat de 10.500 i 12.000 mm/min, on l'amplada del cordó mesurada és pràcticament el mateix

valor utilitzat com a diàmetre focal i l'alçada és òptima. El la realització dels programes a les mateixes potències, però amb velocitats més baixes (6.000 i 9.000 mm/min), s'obtenen cordons similars al observats a les posicions a i b de la figura 16 on les dimensions disten del valor òptim o nominal.

Per tant, a través de la valoració de les diferents combinacions, es consideren com a òptims els valors obtinguts als assajos realitzats a 130 i 170 Watts de potència i 10.500 i 12.000 mm/min. Mitjançant la unió d'aquests paràmetres s'obté un cordó amb les dimensions d'amplada i alçada més semblants als considerats òptims o nominals, i una continuïtat pràcticament del cent per cent en tota l'execució del programa. Pel que fa a la homogeneïtat els millors resultats es troben en els assajos realitzats a les mateixes potències però amb velocitats més reduïdes (6.000 i 9.000 mm/min), tot i això, es dona més importància a la correcte formació del cordó i són 10.500 i 12.000 mm/min les velocitats que s'utilitzaran en la següent experimentació i considerades com a òptims, ja que entre els resultats en percentatge d'efecte bola només s'aprecien unes variacions poc importants del 10 i 15% entre els valors màxims i mínims obtinguts a 130 i 170 Watts.

## 9.2 Experimentació *multi-scanning*

### 9.2.1 Disseny de la proveta

La segona experimentació parteix dels resultats obtinguts en la primera. Amb la generació d'un programa *multi-scanning* s'estudiarà la conformació d'una superfície de material processat utilitzant diferents valors d'*overlapping*. El programa en codi G es troba en l'Annex C i s'introdueix al servidor del GREP des d'on és possible executar-lo a través del centre de control numèric. La geometria utilitzada consisteix en quadrats de 5x5 mm on s'utilitzen solapaments entre cordons del 50, 60, 80 i 100%, tal i com s'observa a la figura 6.

L'objectiu de la proveta *multi-scanning* és l'obtenció d'uns valors òptims de potència làser, velocitat d'escanejat i solapament entre cordons, utilitzant un rang reduït de potències combinades amb les velocitats òptimes obtingudes en la primera experimentació. Amb la utilització dels valors escollits es volen aconseguir composicions amb baixa concentració de radiació (130W - 12.000 mm/min) i d'altres amb alta exposició de radiació sobre el material (170W - 9.000 mm/min) per poder observar les diferències en els processats. S'utilitza com a material d'aportació, igual que la primera experimentació, acer inoxidable AISI 316 en micro-partícules de rang 40-63 µm de mida de grà, i un espessor de capa de 100 µm. En els resultats obtinguts es valora l'acabat superficial resultant en cada combinació, les dimensions del cordó i l'aspecte visual.

- Acabat superficial: Rugositat que presenta el material processat mesurada perpendicularment a la direcció dels cordons amb el rugosímetre. S'obté mitjançant el valor de la rugositat mitjana aritmètica Ra en mil·lèsimes ( $\mu\text{m}$ ), tal i com s'observa a l'equació 3.

$$Ra = \frac{1}{ln} \int_0^{ln} |y(x)| dx \quad \text{Eq. 3}$$

on:

*ln*: longitud d'avaluació

El valor es calcula mitjançant l'operació següent representada en l'equació 4:

$$\frac{\sum(\text{Àrea Positiva}) + \sum(\text{Àrea Negativa})}{ln} \quad \text{Eq. 4}$$

on:

Àrea Positiva 

Àrea Negativa 

*ln*= longitud d'avaluació

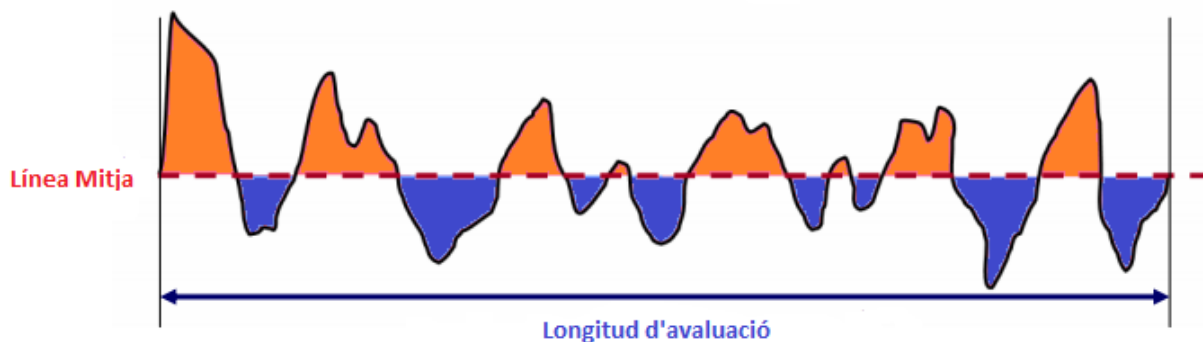


Figura 25: Gràfica de rugositat

- Dimensions del cordó: Es mesuren en referència a les mides del diàmetre focal i altura òptima. En la figura 16 s'observa la relació amplada i alçada del cordó que es tenen en compte a la valoracions. Les dimensions s'obtenen mitjançant el software ProgRes CT3.
- Aspecte visual: Valoració visual de la conformació i solapament dels cordons, juntament amb l'aparició d'esferes en el material processat.

### 9.2.2 Execució de la proveta

En l'execució de la segona experimentació s'estudien un total de vint-i-quatre combinacions en les quals es varia la velocitat d'escanejat mantenint els valors de 9.000, 10.500 i 12.000 mm/min de la primera experimentació, i es redueix el camp de potències utilitzant els valors de 130 i 170 watts.

Respecte la primera experimentació s'aplica una variable més a les combinacions, aquesta consisteix en aplicar *overlapping* entre cordons dels diferents escanejats. Es realitzen superposicions des d'un 50 fins a un 100% del diàmetre del cordó. A la següent taula 13 s'observen els valors utilitzats.

	Overlapping (%)	Vel. escanejat (mm/min)	Potència (W)	Espessor de capa (mm)
1.1	50	9.000	130	100
1.2	60			
1.3	80			
1.4	100			
2.1	50	9.000	170	100
2.2	60			
2.3	80			
2.4	100			
3.1	50	10.500	130	100
3.2	60			
3.3	80			
3.4	100			
4.1	50	10.500	170	100
4.2	60			
4.3	80			
4.4	100			
5.1	50	12.000	130	100
5.2	60			
5.3	80			
5.4	100			
6.1	50	12.000	170	100
6.2	60			
6.3	80			
6.4	100			

Taula 13: Paràmetres utilitzats en l'experimentació 2

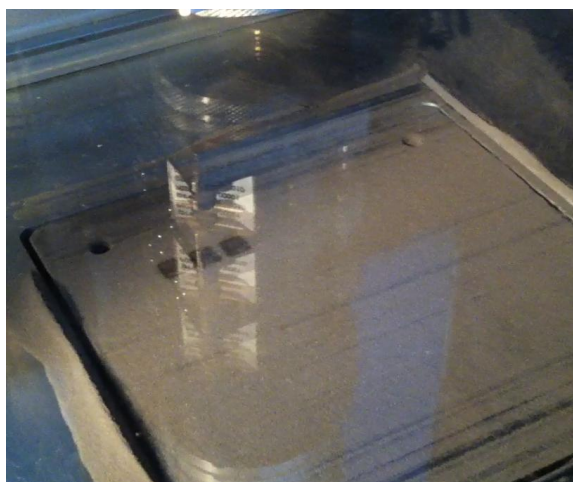


Figura 26: Capa de material (100 µm d'espessor)



Figura 27: Figura del processat

### 9.2.3 Visualització de resultat

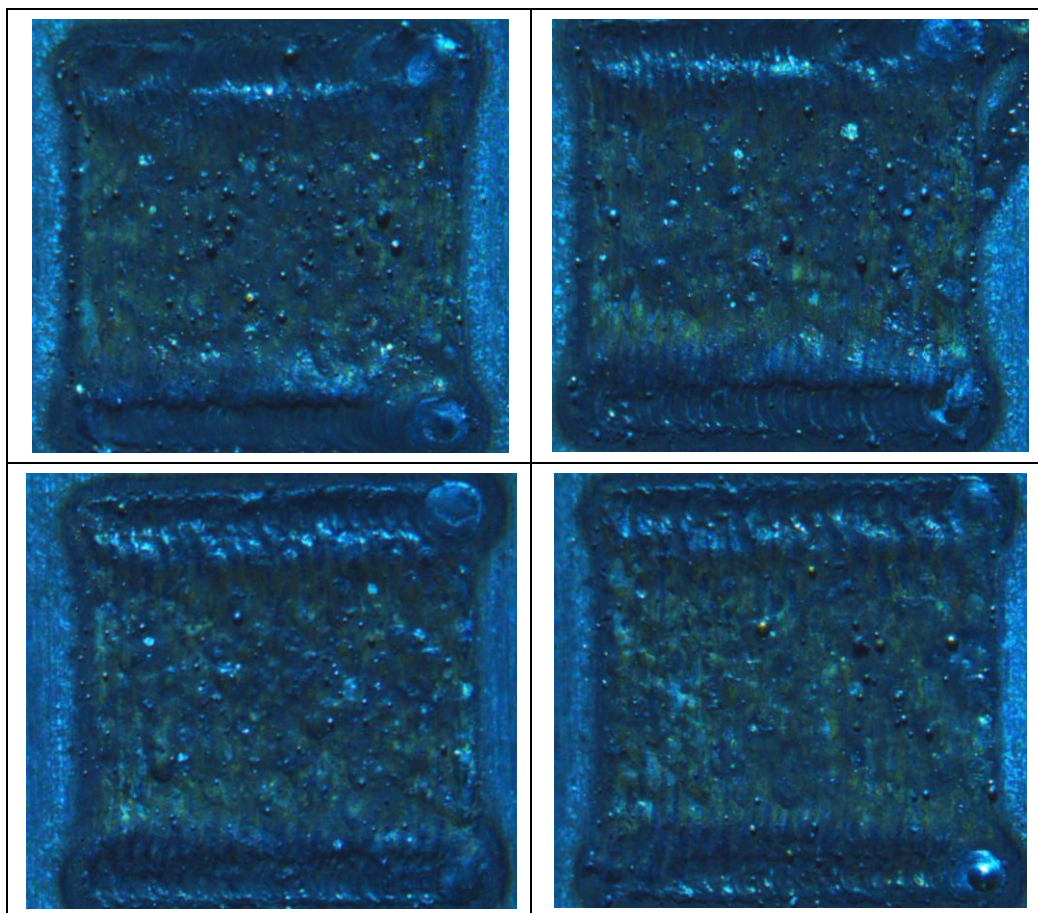
En els resultats obtinguts en la utilització d'una velocitat d'escanejat de 9.000 mm/min i les potències de 130 i 170 s'observa una diferencia clara en la formació d'esferes sobre la superfície, existint-ne una menor quantitat en el processat a 170 Watts, tal i com s'observa a les figures 29 i 31. És en



aquesta potència on també s'observa una major homogeneïtat en la superfície generada. Els cordons presenten unes dimensions d'alçada de capa i gruix del cordó inferiors al valor nominal o diàmetre focal. Pel que fa a la rugositat superficial, s'obtenen resultats semblants entre les combinacions, amb valor mínim de  $5,832 \mu\text{m}$  en overlapping del 50% a 170 Watts i valor màxim de  $9,174 \mu\text{m}$  a solapaments de 50% a 130 Watts. (Veure annexos D i E)



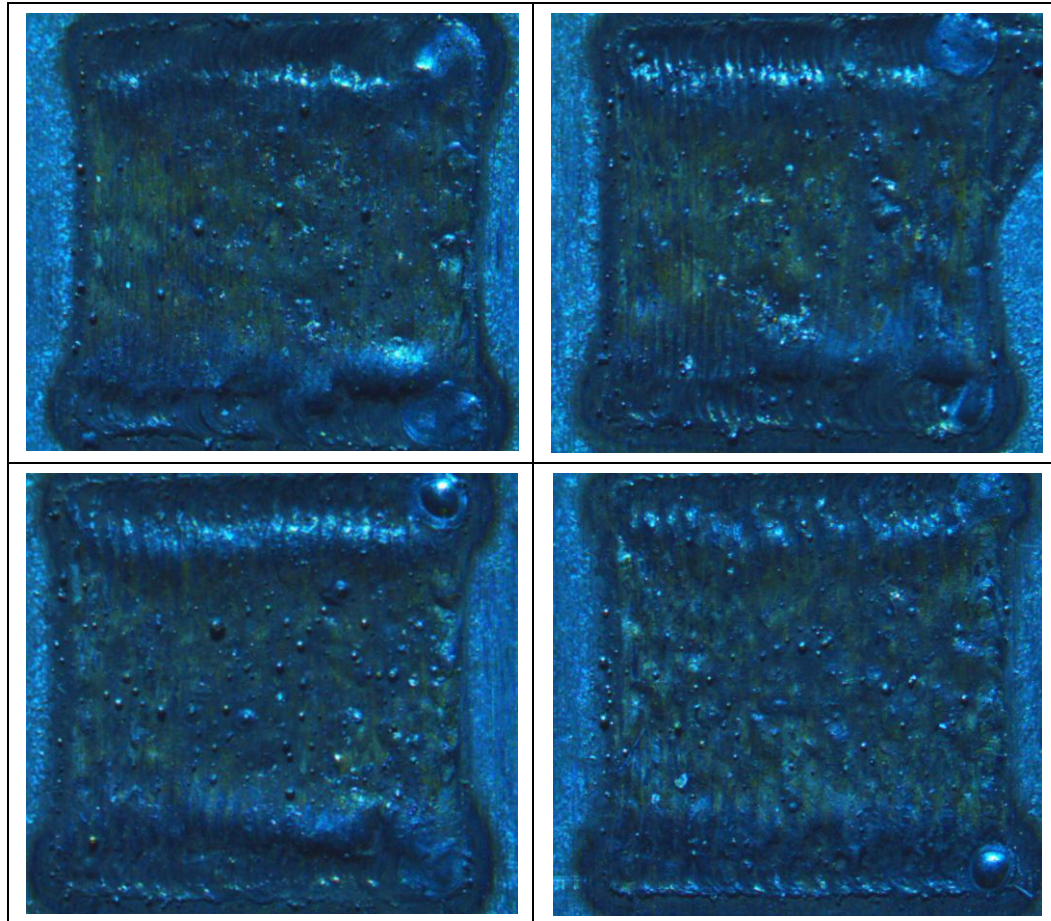
**Figura 28:** Processat a 130 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 9000 mm/min amb overlapping de 50, 60, 80 i 100%



**Figura 29:** De esquerra a dreta i de dalt a baix, processat a 130 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 9000 mm/min i overlapping de 50, 60, 80 i 100% (Zoom 0.65x)



**Figura 30:** Processat a 170 watts amb valors de velocitat d'escanejat de 9000 mm/min amb overlapping de 50, 60, 80 i 100%



**Figura 31:** De esquerra a dreta i de dalt a baix, processat a 170 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 9000 mm/min i overlapping de 50, 60, 80 i 100% (Zoom 0.65x)

En la utilització de 10.500 mm/min com a velocitat d'escanejat, es repeteix el fenomen vist en el cas anterior. A 170 Watts l'aparició d'esferes sobre la superfície es molt escàs, sent en alguna de les provetes pràcticament nul·la. Al contrari, a 130 Watts s'observen gran quantitat d'esferes sobre la superfície de dimensions considerables, tal i com s'observa a les figures 33 i 35. En aquest cas l'alçada de capa i el gruix de cordó són lleugerament superiors als obtinguts en el assajos a 9.000 mm/min però tot i així, disten de les mesures nominals. En referència a l'acabat superficial, s'obtenen mesures amb grans variacions entre les combinacions. Aquestes diferències es deu a l'aparició d'esferes de dimensions considerables en la superfície. En el solapament del 50% a 170 Watts s'obté una valor de rugositat de 3,196  $\mu\text{m}$ , mentre que utilitzant un overlapping del 100% a 130 Watts s'obté un valor de 26,176  $\mu\text{m}$ . (Veure annexos D i E)



Figura 32: Processat a 130 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 10500 mm/min amb overlapping de 50, 60, 80 i 100%

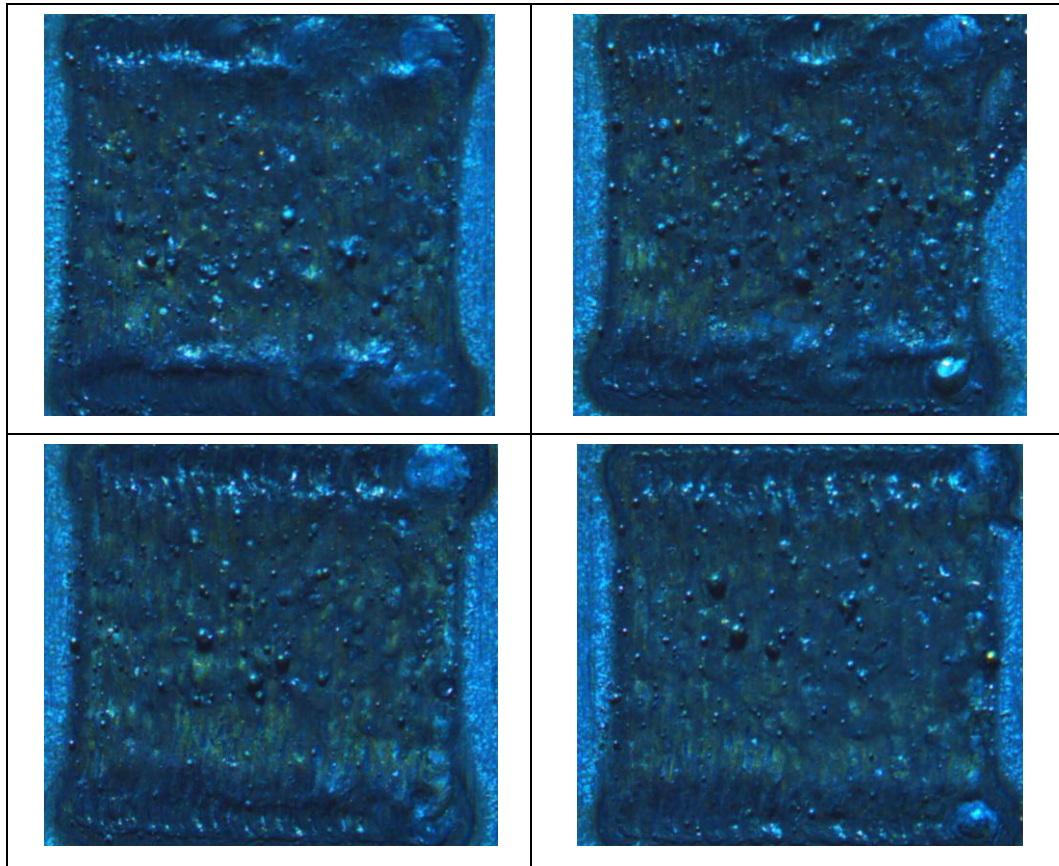
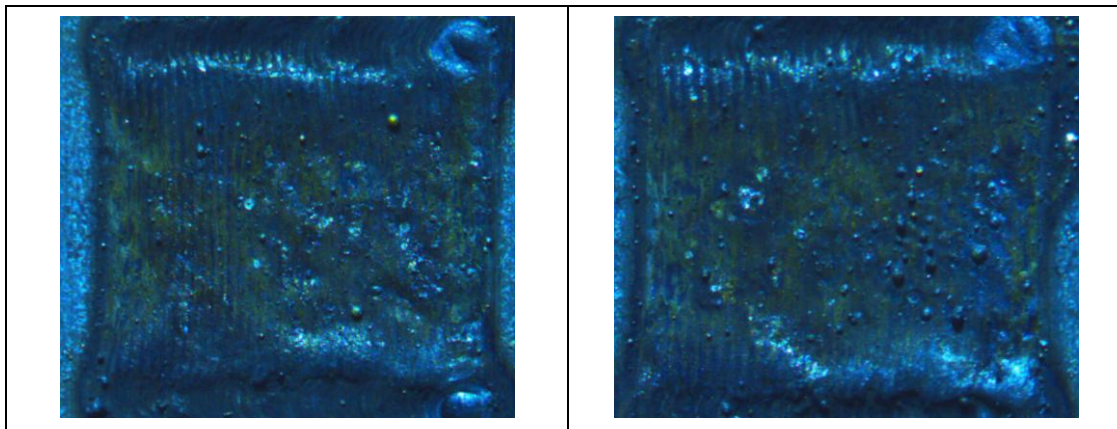


Figura 33: De esquerra a dreta i de dalt a baix, processat a 130 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 10500 mm/min i overlapping de 50, 60, 80 i 100% (Zoom 0.65x)



Figura 34: Processat a 170 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 10500 mm/min amb overlapping de 50, 60, 80 i 100%



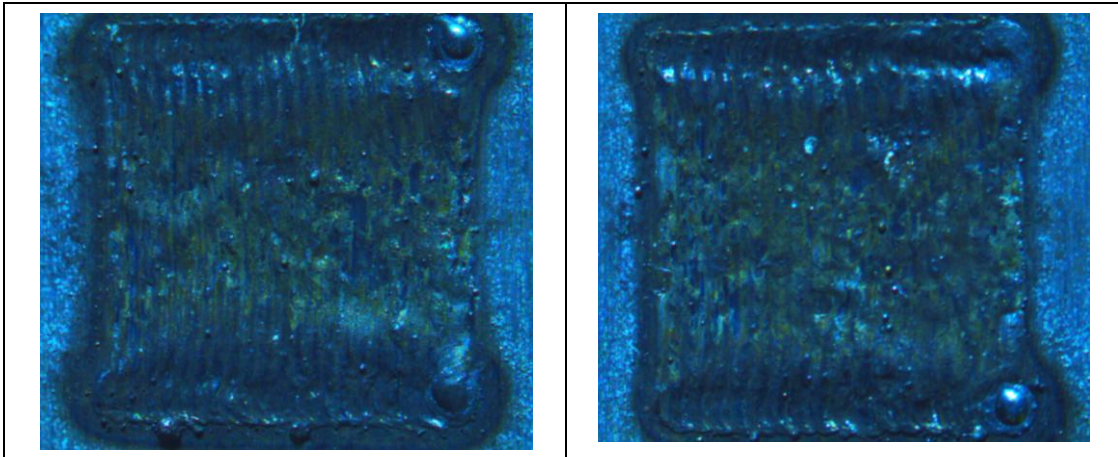


Figura 35: De esquerra a dreta i de dalt a baix, processat a 170 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 10500 mm/min i overlapping de 50, 60, 80 i 100% (Zoom 0.65x)

En la generació de la capa a 12.000 mm/min i potències de 130 i 170 Watts els resultats són similars als obtinguts els les dues experimentacions prèvies. L'aparició d'esferes en superfície de les combinacions a 170 Watts són inferiors clarament a les observades a 130 Watts, on presenten dimensions importants, tal i com s'observa a les figures 37 i 39. La fusió del material és completa, conformant una superfície uniforme amb una homogeneïtat excel·lent. Els valors de rugositat obtinguts en les proves de diferents combinacions es troben dins un rang molt reduït, obtenint una rugositat mínim de 2,872  $\mu\text{m}$  a 130 Watts i 50% de solapament i 7,931  $\mu\text{m}$  de màxima en la utilització de 130 Watts i 100% d'overlapping. Pel que fa a les dimensions obtingues, en aquestes últimes són on s'obtenen uns valors idèntics al nominals. Aquest fet ve definit per una menor aplicació de radiació sobre el material degut a l'augment de la velocitat d'escanejat provocant una fusió òptima. (Veure annexos D i E)



Figura 36: Processat a 130 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 12000 mm/min amb overlapping de 50, 60, 80 i 100%

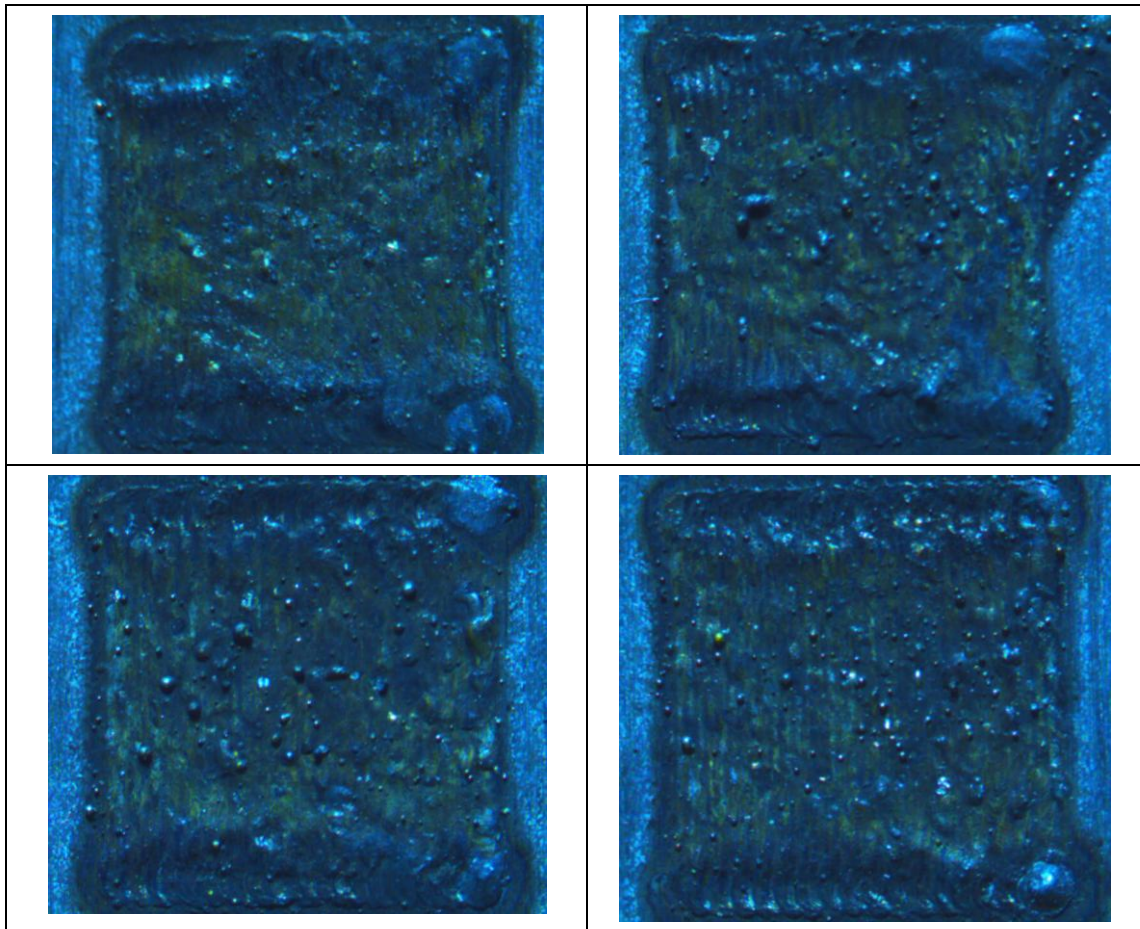
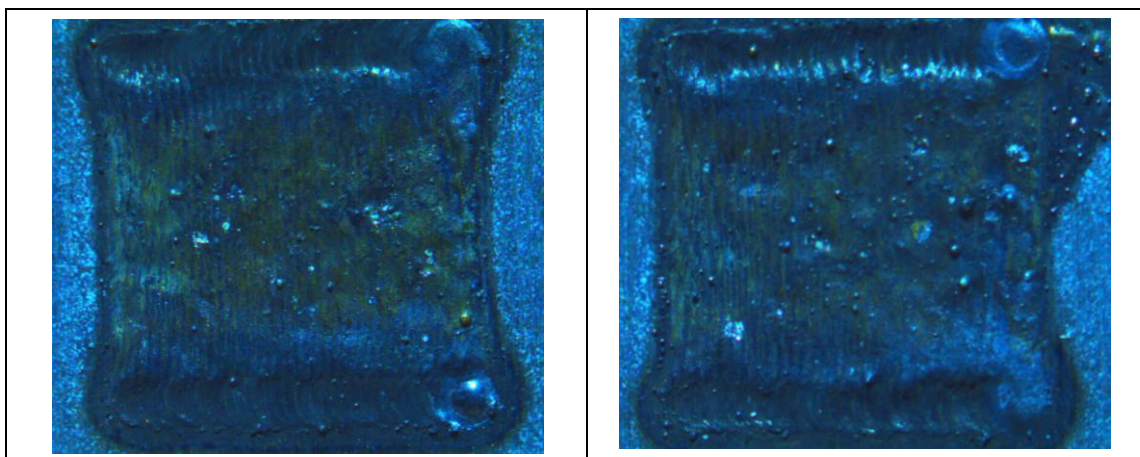


Figura 37: De esquerra a dreta i de dalt a baix, processat a 130 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 12000 mm/min i overlapping de 50, 60, 80 i 100% (Zoom 0.65x)



Figura 38: Processat a 170 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 12000 mm/min amb overlapping de 50, 60, 80 i 100%



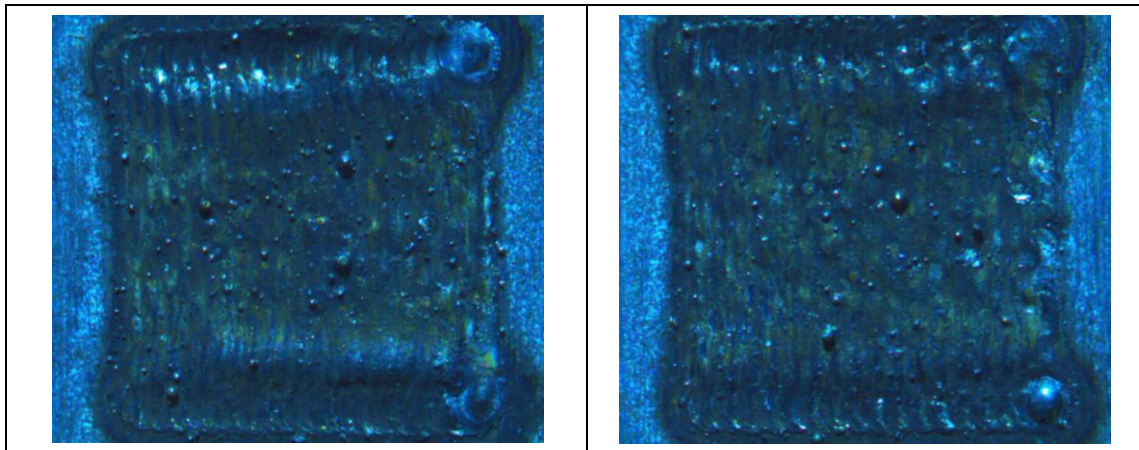


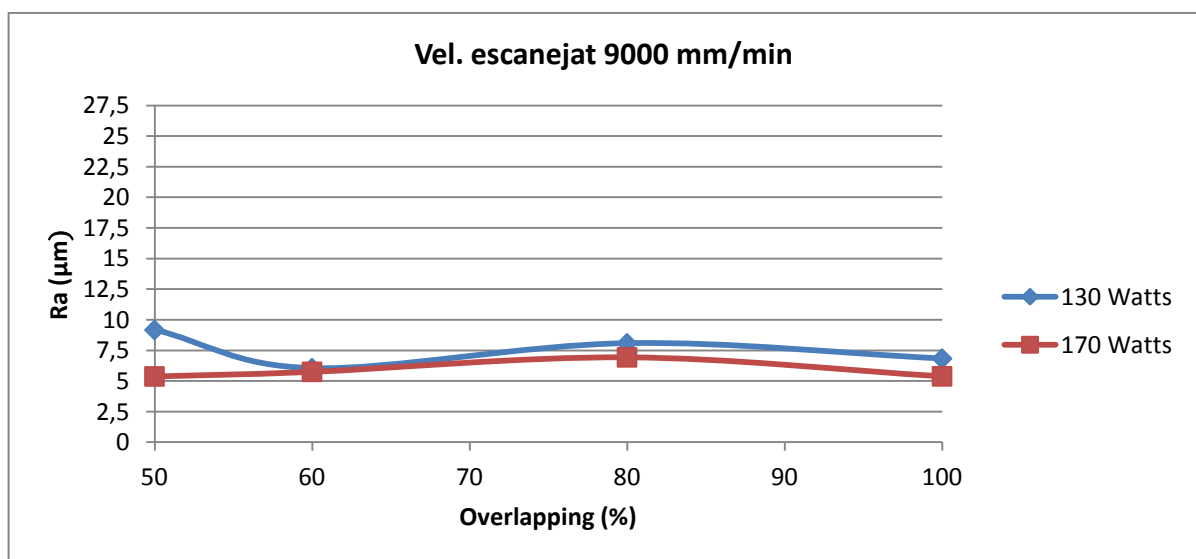
Figura 39: De esquerra a dreta i de dalt a baix, processat a 170 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 12000 mm/min i overlapping de 50, 60, 80 i 100% (Zoom 0.65x)

#### 9.2.4 Valoracions i conclusions de l'experimentació

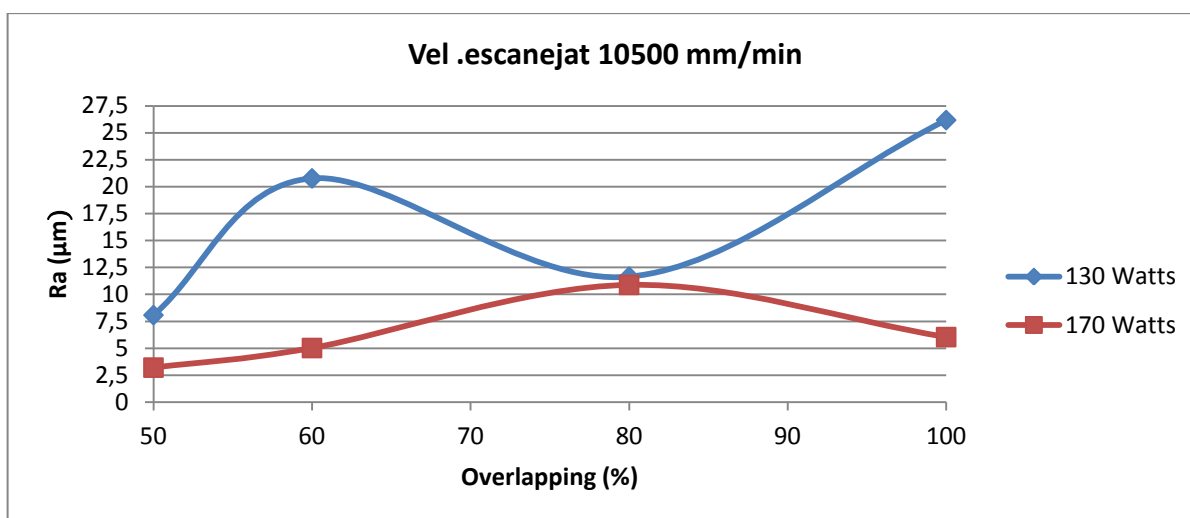
Les conclusions de l'experimentació s'obtenen a partir de l'anàlisi dels valors obtinguts en la continuïtat, homogeneïtat i dimensions/ forma del cordó comentats en el punt 9.2.1.

#### ACABAT SUPERFICIAL

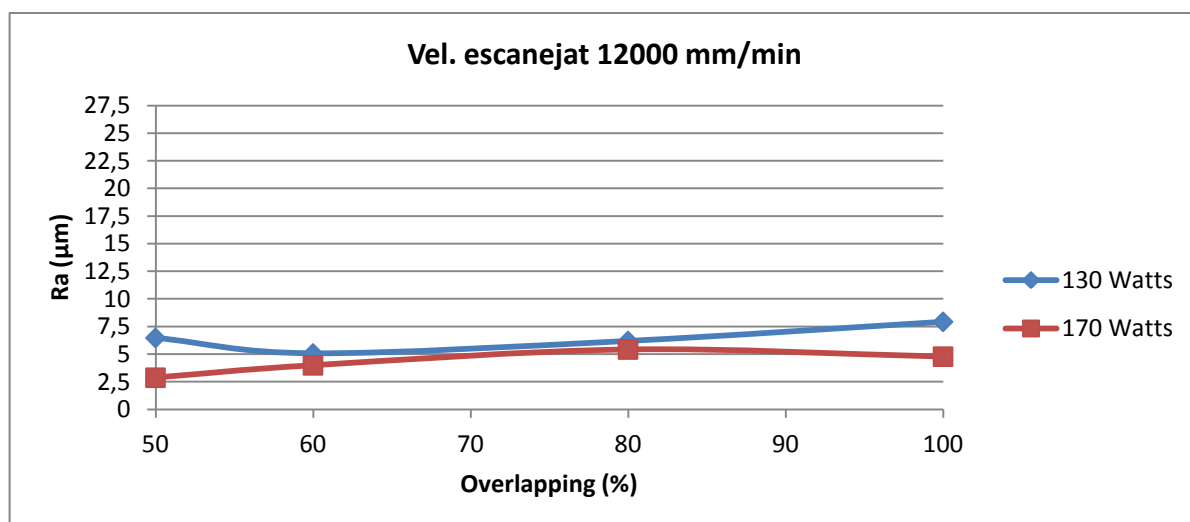
L'acabat superficial de la capa processada es valora a partir de la rugositat mitja que s'obté a través de la lectura amb el rugosímetre. Com menor és el valor obtingut en la mesura més uniforme és la superfície obtinguda, entenent la uniformitat com a paràmetre òptim en l'experimentació. En les següents gràfiques es mostra el valor de rugositat respecte el solapament i la potència utilitzades.



Gràfica 2: Relació entre overlapping i rugositat a 9000 mm/min i 130/170 Watts



Gràfica 3: Relació entre overlapping i rugositat a 10500 mm/min i 130/170 Watts



Gràfica 4: Relació entre overlapping i rugositat a 12000 mm/min i 130/170 Watts

En les tres gràfiques els valors obtinguts amb potència de 170 Watts (corbes vermelles) són inferiors als obtinguts a 130 Watts (corbes blaves). Aquest fet és degut a la major aportació d'energia que rep el material quan es treballa amb potències més elevades. El material absorbeix la radiació i com més alta és l'aportació d'energia més flueix, ocupant una major superfície i reduint la porositat de la superfície obtinguda.

Observant les gràfiques a través dels resultats del solapament, les corbes obtingudes a 170 Watts (corbes vermelles) segueixen un patró, trobant el valor més baix, o molt proper al més baix, quan s'utilitza un overlapping del 50%. Quan el solapament disminueix a 60 i 80% els valors augmenten, obtenint el màxim en el solapament entre cordons del 80% degut a l'aparició d'esferes a la part central de la proveta. En el cas d'overlapping 100% la rugositat torna a disminuir fins arribar a valor semblants als obtinguts al 50% per la menor quantitat i dimensió de les esferes existents.

A través d'anàlisi numèric els valors obtinguts a velocitat de 9.000 mm/min varien de 5,382  $\mu\text{m}$  a 6,942  $\mu\text{m}$ , a 10.500 mm/min de 3,196  $\mu\text{m}$  a 10,876  $\mu\text{m}$  i a 12.000 mm/min les variacions són de 2,872  $\mu\text{m}$  a 5,428  $\mu\text{m}$ , sent en aquesta última on s'aconsegueixen uns valors de rugositat més baixos.

Analitzant els resultats obtinguts utilitzant una potència de 130 Watts (corbes blaves) els valors finals presenten grans desviacions fent complicat extreure conclusions clares.

#### DIMENSIONS DEL CORDÓ

De les provetes amb les diferents combinacions, s'analitza la conformació dels cordons generats mitjançant el microscopi òptic. En l'anàlisi s'observa que en les execucions realitzades a 9.000 mm/min els cordons obtinguts presenten un dimensió més gran respecte el diàmetre focal o òptim. Aquest fenomen és degut a una exposició prolongada de radiació en un sol punt que fa el material fos flueixi de manera excessiva. En l'observació dels resultats obtinguts a 10.500 mm/min les dimensions del cordó milloren lleugerament respecte la mida nominal, però disten dels valors nominals. És en l'anàlisi dels cordons realitzat a 12.000 mm/min quan s'observa que els cordons realitzats presenten unes dimensions pràcticament idèntiques als valor nominals. En la figura 40 s'observa la mesura entre dos cordons realitzats a 170 Watts, 12.000 mm/min i 80% d'overlapping, per tant, tenint en conte la dimensió del diàmetre focal del feix de 125  $\mu\text{m}$ , la distància entre cordons és de 245  $\mu\text{m}$  i el valor obtingut és de 263,8  $\mu\text{m}$ .

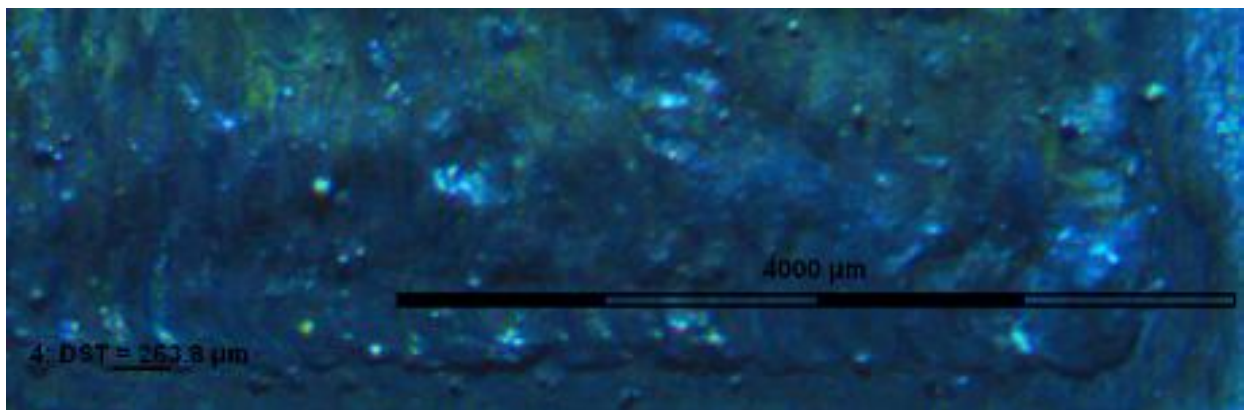


Figura 40: Mesura entre cordons mitjançant el software ProReg CT3 (80% Overlapping)

El fet de que els cordons resultants siguin més amples de la mesura nominal implica que la capa obtinguda de material processat serà inferior al que hauria de ser si la mesura del cordó fos la idònia. Com més baixa sigui la capa generada major serà el nombre de capes successives que s'hauran de construir en el cas de generar estructures tridimensionals augmentant el cos de l'execució.



### ASPECTE VISUAL

Tal i com es veu en les figures amplifiades de les superfícies generades, s'observa una diferència en la homogeneïtat i aparició d'esferes entre els escanejats realitzats a 130 i 170 Watts. En els conformats a potències de 170 Watts la homogeneïtat de la superfície és total només amb l'aparició puntual d'esferes de petites dimensions. Per contra, en les provetes fetes a 130 Watts apareixen esferes de dimensions semblants al gruix nominal de cordó, o fins i tot més grans, proporcionant una superfície molt irregular, tal i com s'observa a la figura 41.

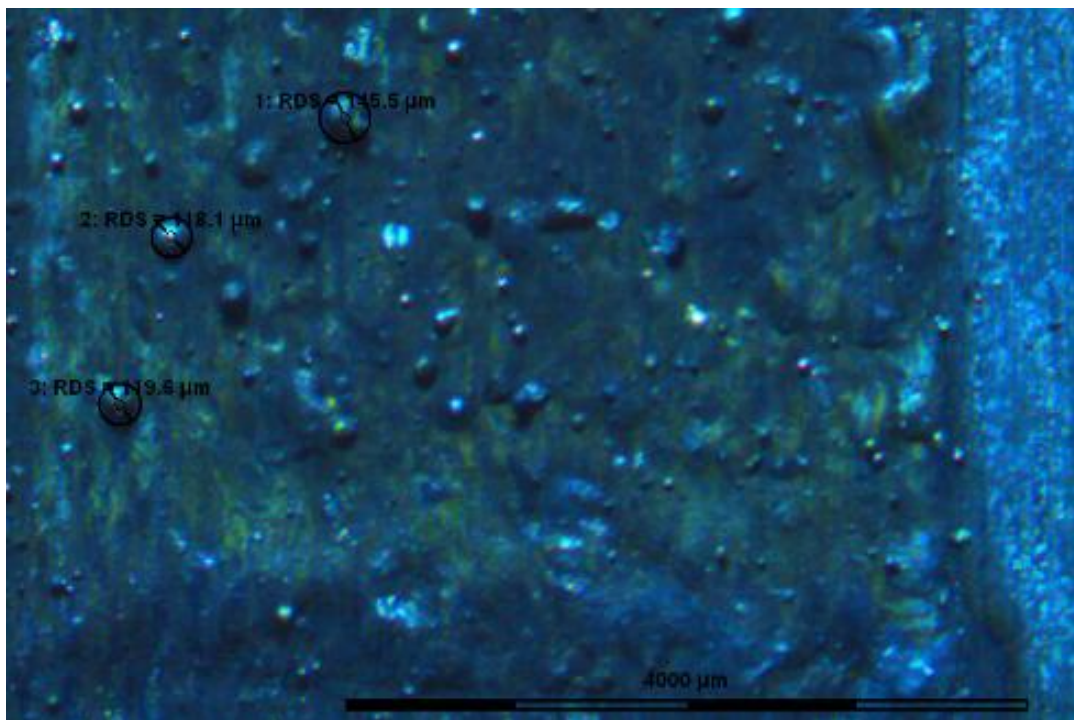


Figura 41: Mesura d'esferes en l'escanejat de 130 Watts i 12000 mm/min

Mitjançant l'anàlisi visual, s'observa que a 130 Watts apareixen més esferes en el solapament del 50% i va disminuint conforme es separen els cordons, al contrari que succeeix en els escanejats a 170 Watts, on al 50% l'aparició d'esferes és inferior que al solapament del 100% augmentant progressivament.

En aquesta experimentació s'ha de diferenciar entre les esferes que apareixen sobre la superfície i l'efecte bola comentat en l'experimentació anterior. En el cas de l'experimentació single-scanning l'efecte bola és conseqüència d'una no fusió completa de material per falta d'energia que genera unes boles en el recorregut de l'escanejat, i en l'experimentació multi-scanning les esferes que es generen són conseqüència de impureses del material o concentracions de gasos que s'acumulen en l'escanejat d'un primer cordó i quan reben una segona radiació d'energia, al realitzar-se el cordó contigu, es creen aquestes esferes quan el material encara no està solidificat.

Finalitzat l'anàlisi dels resultats obtinguts en la segona experimentació es consideren com a òptim els valors de 170 Watts a 12.000 mm/min de velocitat d'escanejat i un solapament entre línies del 50%. Amb la combinació d'aquests paràmetres s'obté una superfície de material sinteritzat amb un acabat mesurat mitjançant la rugositat mitjana de 2,872  $\mu\text{m}$ . Amb la velocitat seleccionada s'obté una dimensió de cordó idèntic al diàmetre focal, volent dir que s'aconsegueix una fusió del material òptima, aprofitant al màxim el material i permeten optimitzar el nombre de capes a realitzar en cas de generar una estructura 3D. A nivell visual la proveta obtinguda d'aquesta combinació és la que presenta un millor aspecte amb una existència d'esferes sobre la superfície pràcticament nul·la i de dimensions molt reduïdes.

## 10. Conclusions

A l'inici del projecte es planteja l'obtenció dels paràmetres necessaris per al processat d'un acer inoxidable i, a partir de l'estudi generat, s'obtenen els valors òptims que proporcionen els millors resultats possibles dins les limitacions de mitjans i temps de que es disposa.

Amb un estudi per eliminació i avaluació de les propietats dels més adients es decideix realitzar el present estudi amb un acer inoxidable AISI 316. Dels inoxidables austenítics, que són els que presenten millors propietats per a la soldadura, és el que presenta el punt de fusió més baix facilitant la soldadura.

En el desenvolupament del projecte es planteja la parametrització dels valors de potència, velocitat d'escanjeat i solapament entre cordons com a principals punts d'estudi i durant l'experimentació es veu com influeixen dins el sistema de fabricació additiva Selective Laser Melting.

Treballant per la part alta del rang de potències escollides, s'obté una fusió correcta del material, on el grau d'optimització de les dimensions dels cordons depèn de la velocitat d'escanjeat. Utilitzant les velocitats més lentes del rang seleccionat, s'obtenen cordons amb dimensions molt distants a les òptimes proporcionades pel diàmetre focal i l'espessor de capa. És en la utilització de les velocitats altes quan el material rep la radiació correcta per a la millor conformació dels cordons. Els resultats de l'anàlisi de les variacions dels solapaments mostren un millor acabat quan existeix un solapament important entre els cordons.

A nivell tècnic els paràmetres escollits com a òptims (170 W, 12.000 mm/min, 50% overlap.) són els que proporcionen unes millors característiques finals de processat del material quan es realitzen múltiples cordons (multi-scanning). Però si es realitza una valoració ràpida a nivell industrial o de producció, es podria contemplar com a òptim una modificació del solapament, considerant un overlapping del 60% com a òptim. Els valors de mesura del cordó són idèntics en les dues combinacions i els valors de Ra mesurats presenten poca desviació, sent en 50% de solapament de 2,872  $\mu\text{m}$  i en 60% de 3,992  $\mu\text{m}$ . El fet d'utilitzar un overlapping del 60% proporcionaria la realització d'una superfície amb les mateixes dimensions del cordó que els escollits com a òptims en el present estudi, i permetria realitzar superfícies amb menys temps, ja que al augmentar la separació entre cordons es realitzarien superfícies més grans en el mateix temps de fabricació. Amb la reducció de temps de fabricació el preu final del producte i el desgast de les instal·lacions seria inferior.

## 11. Resum del pressupost

En el present projecte no es contempla una execució final, sinó que el cost total engloba la redacció del propi projecte i el cost de l'experimentació realitzada per a la obtenció de les conclusions finals adquirides. També s'inclou en el resum del pressupost la prèvia documentació i recerca d'informació per a la realització de l'estudi.

El cost total de l'estudi realitzat és de TRENTA - DOS MIL DOS - CENTS euros amb VINT - I –UN cèntims..... **32.200,21€.**

## 12. Bibliografia

### Llibres

- A.A.V.V. El láser: La luz de nuestro tiempo. Global Ediciones. 2010.
- NARENDRA B. DAHOTRE, SANDIP P. HARIMKAR. Laser fabrication and machining of materials. Springer. 2008.

### Articles

- WILEY-VCH; Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim; Selective Laser Melting A manufacturing technology for the future?. 2012
- KAI ZHANG, WEIJUN LIU, XIAOFENG SHANG; Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping. Optics & Laser Technology 39 (2007) 549-557.
- E. YASA, JP. KRUTH; Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting. Procedia Engineering 19 (2011) 389-395.
- M. BADROSSAMAY, E.YASA, J. DECKERS, L. THIJS, J. VAN HUMBEECK, JP. KRUTH; Part and material properties laser melting of metals. April 2010.
- RUIDI LI, JINHUI LIU, YUSHENG SHI, MINGZHANG DU AND ZHAN XIE; 316L Stainless Steel with gradient porosity fabricated by Selective Laser Melting. July 2009.
- S. KUMAR, JP KRUTH; Wear Performance of SLS/SLM materials. 2008

- X.SU, Y. YANG; Research on track overlapping during Selective LAser Melting of powders; 2012.
- P. WOOLLIN, D. CARROUGE; Heat affected zone microstructures in supermartensitic stainless steels. Octubre 2002.
- P. ALVAREZ, F. GARCIANDIA, O. GUERMENDI. Tecnologies i aplicacions en fabricació additiva de materials metàl·lics. Associació centre de recerca en tecnologies d'unió IK4-Lortek. 2014.

#### **Tesis doctoral**

- J. DELGADO. Contribución a la fundición selectiva por láser de pieza metálica mediante el estudio de propiedades mecánicas y de manufactura. Tesis Doctoral. Universitat de Girona. 2013.

#### **Pàgines web**

- ROFIN - BAASEL ESPAÑA, S.L. <http://www.rofin.es/es/productos/fuentes-laser/laser-de-fibra/> (Consulta 10 de Setembre de 2015)
- EOS e-MANUFACTURING SOLUTIONS; [http://www.eos.info/additive\\_manufacturing](http://www.eos.info/additive_manufacturing) (Consulta 20 d'Octubre de 2015)
- AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE  
<https://www.steel.org/search.aspx?search=stainless#search> (Consulta 07 de Juny del 2015)
- AIMES; Manufacturing Engineering Basics; Gener 2012.  
<https://sseaim.es.wordpress.com/category/mechanical/manufacturing-process>

## **ANNEX A. Fabricació Additiva (Additive Manufacturing)**

## A.1 Introducció a la AM

*"Additive Manufacturing refers to a process by which digital 3D design is used to build up a component in layers by depositing material." <[http://www.eos.info/additive\\_manufacturing](http://www.eos.info/additive_manufacturing) >*

En l'actualitat es coneixen diversos processos de fabricació, entre els que s'hi troba el procés de fabricació per substracció de material o la fabricació additiva.

El mètode més utilitzat i també més antic és el procés de fabricació per substracció de material. Aquest, consisteix en eliminar material fins a la obtenció de la forma i mides desitjades, partint d'un cos en brut de dimensions més grans (mecanitzat, tall per làser, electroerosió,...). Per altra banda, el mètode de conformació utilitza models o motlles per a l'obtenció de la peça final (colada en buit, injecció de material, "*Electroforming*",...). I finalment, trobem la fabricació additiva.

La fabricació additiva (Additive Manufacturing) consisteix en la fabricació de qualsevol peça imaginable, prèviament generada digitalment, mitjançant la superposició de capes micromètriques de material fins a obtenir les mides i forma desitjada d'un a estructura 3D. Aquest tipus de fabricació treballa sense la utilització d'eines o utilitatges, fet que permet realitzar peces amb complexitat geomètrica.

La fabricació additiva o per aportació de material és molt recent. Apareix a finals dels anys 80 amb el nom de *Rapid Prototyping*. La finalitat d'aquesta tecnologia era la de fabricar els dissenys inicials del producte requerit per a la seva aprovació amb temps molt reduïts. A partir d'aquest inici, la tecnologia evoluciona de forma molt ràpida i mitjançant l'estudi de diferents material per a l'aplicació en aquest àmbit i la parametrització d'aquests, deriva en diverses modalitats. Aquest fet genera l'aparició de diferents tecnologies per a distingir les diferents modalitats de fabricació additiva. A continuació se n'indiquen algunes:

- SLS: Selective Laser Sintering
- LC: Laser Cladding
- SLM: Selective Laser Melting
- FDM: Fused Deposition Modeling
- LOM: Laminated Object Manufacturing

Les tecnologies existents podrien classificar-se de moltes maneres. Com a rellevants en aquest projecte, els classificarem mitjançant dos aspectes bàsics. Un d'ells és l'estat en que es troba el material utilitzat, aquest pot trobar-se en estat de micro-partícules (pols), en estat líquid o en estat sòlid.

Algunes de les més importants es recullen a la taula 14:

ESTAT DEL MATERIAL	TECNOLOGIES
Material en pols	- Selective Laser Melting (SLM) - Selective Laser Sintering (SLS) - Selective Mask Sintering (SMS) - Sprayed metal - Electron Beam Melting (EBM)
Material líquid	- Stereolithography (SLA) - Direct Light Processing (DLP) - Inkjet
Material sòlid	- Laminated Object Manufacturing (LOM) - Ultrasonic Compaction - Fused Deposition Modeling (FDM)

Taula 14: Tecnologies segons estat del material

L'altre aspecte distintiu és el tipus d'unió que s'aconsegueix entre les línies d'escanejat durant l'execució del procés.

- Unió per sinterització.
- Unió per fusió.

La diferència entre aquestes dues unions es troba en l'estat del material durant l'aplicació del flux làser. En la unió per sinterització el substrat adquireix una temperatura lleugerament inferior a la temperatura de fusió del material mitjançant l'energia aportada pel làser, mentre que en la unió per fusió la temperatura és superior a aquesta fent que el substrat adquireixi l'estat líquid.

## A.2 Procés de fabricació AM

En aquest apartat es descriuen les etapes en el procés de la fabricació additiva. Com en qualsevol altre mètode, la fase de disseny és l'origen del procés. L'estructura principal és la mateixa per a les diferents modalitats de AM comentades en apartats anteriors, amb les variacions puntuals corresponents al material o fonts d'energia utilitzats.

### A.2.1 Arxiu STL a partir d'un arxiu CAD.

La realització d'estructures a partir de software 3D permet exportar els arxius CAD a arxius STL. La denominació d'aquest format sorgeix de l'acrònim d'*estereolitografia* d'origen anglès "*STereo Lithography*". Aquest format només té en compte la geometria de la peça deixant de banda el color, el material o altres característiques de la peça i divideix l'estructura en triangles generant una malla. El fet de dividir l'estructura en triangles permet ocupar la totalitat del cos.

La resolució és una característica fonamental en la generació d'arxius STL. Com s'observa a la figura 44, la divisió de l'element pot portar-se a terme en un nombre infinit de porcions. Com més alt és la



quantitat de divisions més alta és la resolució, això comporta una major càrrega d'emmagatzematge digital i una millor definició de l'element.



Figura 44: Diferents resolucions del disseny d'un àlep d'impulsor

### A.2.2 Orientació de la peça

L'estratègia de fabricació d'una peça varia segons la forma d'aquesta, per tant la posició en la plataforma durant la fabricació s'ajusta a les capacitats i limitacions del tipus de tecnologia utilitzat.

Per a peces de geometries complexes o que estan compostes d'elements estructurals específics, com podrien ser un voladís esvelt de grans llargades o inclinacions respecte la vertical major a 45°, s'utilitza una plataforma virtual que es construeixen en el mateix escanejant de fabricació del component. Aquesta plataforma consisteix en suports on es recolzen els elements estructurals crítics del mateix material que la peça original i són eliminats en un post - procés d'acabat per a l'obtenció del producte final. En el cas específic de la fabricació SLS la conformació d'aquets postissos no és necessària, ja que el mateix material utilitzat realitza aquesta funció.

### A.2.3 Divisió per capes

Amb el procés de fabricació de la peça plantejat, el següent pas consisteix en la divisió del model 3D del component final en diferents capes de mida micromètrica. Com en l'apartat A.2.1 explicat anteriorment, l'estructura pot disposar de diferents resolucions segons el nombre de capes amb que es descompon. Es considera una alta resolució quan el nombre de divisions resulta en un gruix de capa de entre 20 i 80  $\mu\text{m}$ . La majoria de tecnologies que utilitzen metalls en estat pols treballen amb gruixos de capa de entre 100 i 250  $\mu\text{m}$ .

### A.2.4 Escanejant

L'escanejant és el procés on es genera físicament l'objecte. En aquesta etapa s'envia a la màquina de FA el fitxer digital de la divisió de l'estructura 3D en capes. Els passos fonamentals en la fabricació que realitza la màquina són:

- Dipositat del material: Mitjançant un dosificador es genera sobre la superfície de treball una capa de material amb el gruix requerit segons les divisions de la peça.

- Tractat del material: Mitjançant la font específica per a cada tecnologia, s'aplica sobre la capa de material l'energia necessària per al processat. Seguint l'escanejat programat a la màquina de FA s'obté la forma desitjada, i amb la regulació dels paràmetres de la font d'energia les característiques mecàniques i físiques requerides.

Els dos passos anteriors es repeteixen fins a la obtenció del component final. La seqüència comença amb el dipositat de material i el processat de la primera capa. Finalitzada la primera capa, la plataforma del substrat disminueix en posició vertical la distància exacte al gruix de capa i es reinicia la seqüència amb el dipositat de la segona capa i així successivament fins a la obtenció de la peça final. El material que no és processat serveix com a plataforma per a la següent capa.

### **A.2.5 Finalització del procés**

El procés de finalitzat comença un cop completat el programa de fabricació i la retirada del component de la plataforma. Aquesta etapa consta de diferents passos de la quals no sempre s'utilitzen tots, ja que mitjançant tecnologies amb alta precisió, alguns components queden acabats en la mateixa etapa d'escanejat.

#### **- Material sobrant**

El primer pas consisteix en la recuperació del material sobrant que no ha estat processat per a una possible reutilització. S'utilitzen estris especialitzats per a la recollida depenent de la tecnologia utilitzada. Per exemple en SLS l'escanejat es porta a terme dins d'un compartiment estanc que permet recollir el material sobrant al fons d'aquest. El bufat amb aire a pressió o el sorrejat s'utilitzen com a suport per a la eliminació completa de material sobrant.

#### **- Plataforma virtual**

Amb l'element net, es procedeix a la retirada dels suports auxiliars. En aquets pas s'eliminen les seccions que han servit de plataforma per a les seccions crítiques de la peça durant el processat.

#### **- Zones d'acabat**

Aquest últim pas seria necessari en el cas de que la peça a fabricar requerís de zones amb un molt bon acabat. Com en comentat anteriorment amb resolucions baixes de fabricació seria necessari mecanitzar (fresar, rectificat,...) les zones crítiques de la peça per assolir els criteris d'acabat superficial.

## **Annex B. Selective Laser Melting**

## B.1 Selective Laser Melting

La tecnologia de fabricació additiva (descrita en l'Annex A) coneguda com *Selective Laser Melting* consisteix en l'obtenció de peces mitjançant la fusió homogènia del material a través de l'energia aportada per un làser d'alta potència. Aquesta tecnologia es diferencia del Selective Laser Sintering ja que en aquest últim no s'arriba a la temperatura de fusió del material.

En el procés de fabricació són necessaris tres elements bàsics:

- El material del qual volem obtenir la peça en forma de micro-partícules.
- El làser per a l'aportació d'energia.
- Plataforma de construcció. Dins d'una càmera hermètica i formada per una plataforma mòbil juntament amb un sistema de dipositat de material. La plataforma es desplaça verticalment i el sistema de dipositat genera una capa de material tal i com s'observa a la figura 45.

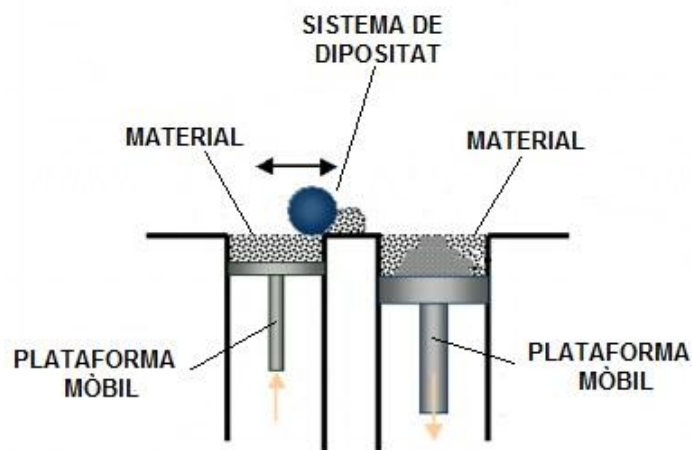


Figura 45: Plataforma de construcció (Aimes, 2012)

## B.2 Mètode de fabricació

El substrat en forma de micro-partícules s'estén de manera uniforme generant una llit de material sobre la plataforma mòbil. Amb l'aplicació d'un raig làser d'alta potència sobre la capa de material, aquest passa d'estat sòlid a líquid en un període molt curt de temps, generant una connexió entre molècules. El substrat solidificat de nou crea una capa compacte de material.

Amb l'escanejat del làser sobre el llit de material s'obté la geometria desitjada en la primera capa, finalitzat aquest pas, la plataforma disminueix la mida exacte del gruix de capa requerit i el sistema de dipositat genera una nova capa per a un segon escanejat. Es repeteix reiteradament aquesta operació fins a la obtenció de les dimensions i formes de la peça final. El material no processat es recupera un cop finalitzat tot el processat de la peça.

Durant el procés de fabricació s'ha de tenir en compte com a paràmetre indispensable la mida que es desplaça la plataforma per crear una nova capa, ja que aquest moviment en micras donarà el gruix de capa amb el que treballarà el sinteritzat. Per a l'obtenció d'un correcte sinteritzat aquest desplaçament sempre ha de ser superior al valor màxim del rang dimensional de les micro-partícules de la material.

Tot el procés es desenvolupa dins un cambra hermètica amb atmosfera controlada mitjançant un gas inert, normalment nitrogen o argó, que permet una màxima homogeneïtat del llit de material. El fet de ser un espai hermètic evita possibles moviments del substrat per agents externs.

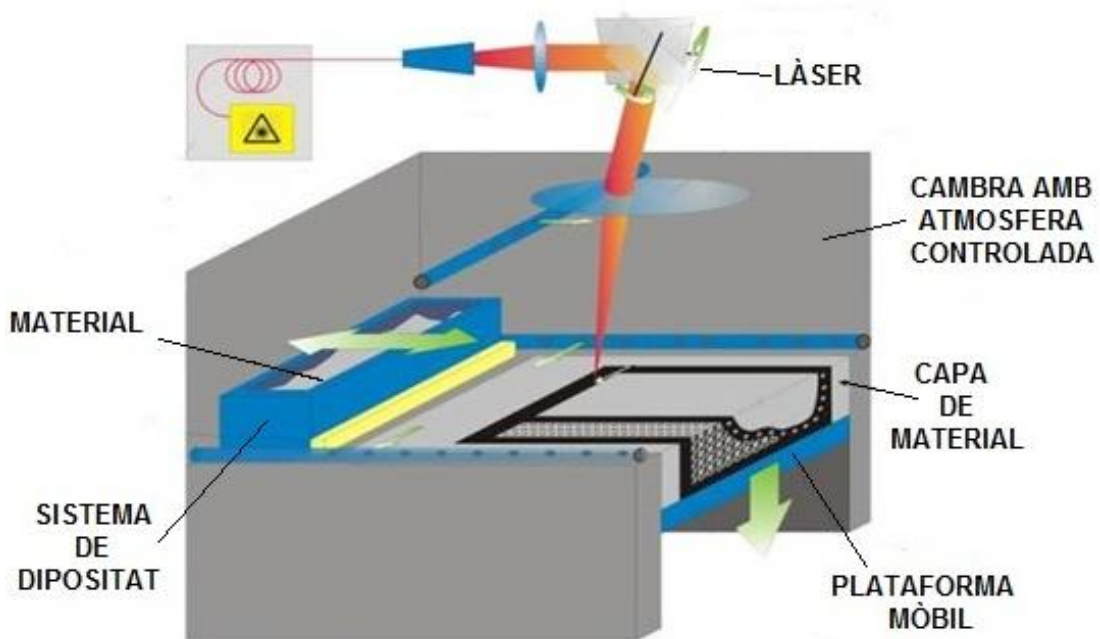


Figura 46: Selective Laser Melting (P.Alvarez,2014)

## **Annex C. Programes CNC**

**C.1 Programa Simple - Scanning (Velocitat d'escanejar a 12000 mm/min)**

```

N10 M158
N20 M05
N30 G90
N40 G01 X0.000 Y-10.000 Z5.000 F12000
N50 G01 Z0.000
N60 M00
N70 G01 X2.800 Y-0.799 F12000
N80 G03 X-2.800 Y-0.799 R2.9100
N90 G01 X0.000 Y-10.000 F12000
N100 M30

```

**C.2 Programa Multi - Scanning (Overlapping de 50% a 9000 mm/min)**

N10 M158 M05 G00 G90 X0 Y0	N2030 G01 X13.060 Y5.000
N15 M00	N2040 G01 X13.060 Y0
N20 G01 X0 Y5.000 F9000	N2050 G01 X13.150 Y0
N30 G01 X0.075 Y5.000	N2060 G01 X13.150 Y5.000
N40 G01 X0.075 Y0	N2070 G01 X13.240 Y5.000
N50 G01 X0.150 Y0	N2080 G01 X13.240 Y0
N60 G01 X0.150 Y5.000	N2090 G01 X13.330 Y0
N70 G01 X0.225 Y5.000	N2100 G01 X13.330 Y5.000
N80 G01 X0.225 Y0	N2110 G01 X13.420 Y5.000
N90 G01 X0.300 Y0	N2120 G01 X13.420 Y0
N100 G01 X0.300 Y5.000	N2130 G01 X13.510 Y0
N110 G01 X0.375 Y5.000	N2140 G01 X13.510 Y5.000
N120 G01 X0.375 Y0	N2150 G01 X13.600 Y5.000
N130 G01 X0.450 Y0	N2160 G01 X13.600 Y0
N140 G01 X0.450 Y5.000	N2170 G01 X13.690 Y0
N150 G01 X0.525 Y5.000	N2180 G01 X13.690 Y5.000
N160 G01 X0.525 Y0	N2190 G01 X13.780 Y5.000
N170 G01 X0.600 Y0	N2200 G01 X13.780 Y0
N180 G01 X0.600 Y5.000	N2210 G01 X13.870 Y0
N190 G01 X0.675 Y5.000	N2220 G01 X13.870 Y5.000
N200 G01 X0.675 Y0	N2230 G01 X13.960 Y5.000
N210 G01 X0.750 Y0	N2240 G01 X13.960 Y0
N220 G01 X0.750 Y5.000	N2250 G01 X14.050 Y0
N230 G01 X0.825 Y5.000	N2260 G01 X14.050 Y5.000
N240 G01 X0.825 Y0	N2270 G01 X14.140 Y5.000
N250 G01 X0.900 Y0	N2280 G01 X14.140 Y0
N260 G01 X0.900 Y5.000	N2290 G01 X14.230 Y0
N270 G01 X0.975 Y5.000	N2300 G01 X14.230 Y5.000
N280 G01 X0.975 Y0	N2310 G01 X14.320 Y5.000
N290 G01 X1.050 Y0	N2320 G01 X14.320 Y0

N300 G01 X1.050 Y5.000	N2330 G01 X14.410 Y0
N310 G01 X1.125 Y5.000	N2340 G01 X14.410 Y5.000
N320 G01 X1.125 Y0	N2350 G01 X14.500 Y5.000
N330 G01 X1.200 Y0	N2360 G01 X14.500 Y0
N340 G01 X1.200 Y5.000	N2370 G01 X14.590 Y0
N350 G01 X1.275 Y5.000	N2380 G01 X14.590 Y5.000
N360 G01 X1.275 Y0	N2390 G01 X14.680 Y5.000
N370 G01 X1.350 Y0	N2400 G01 X14.680 Y0
N380 G01 X1.350 Y5.000	N2410 G01 X14.770 Y0
N390 G01 X1.425 Y5.000	N2420 G01 X14.770 Y5.000
N400 G01 X1.425 Y0	N2430 G01 X14.860 Y5.000
N410 G01 X1.500 Y0	N2440 G01 X14.860 Y0
N420 G01 X1.500 Y5.000	N2450 G01 X14.950 Y0
N430 G01 X1.575 Y5.000	N2460 G01 X14.950 Y5.000
N440 G01 X1.575 Y0	N2470 M00
N450 G01 X1.650 Y0	N2480 G00 G90 X20.000 Y0
N460 G01 X1.650 Y5.000	N2490 M00
N470 G01 X1.725 Y5.000	N2500 G01 X20.000 Y5.000 F6000
N480 G01 X1.725 Y0	N2510 G01 X20.120 Y5.000
N490 G01 X1.800 Y0	N2520 G01 X20.120 Y0
N500 G01 X1.800 Y5.000	N2530 G01 X20.240 Y0
N510 G01 X1.875 Y5.000	N2540 G01 X20.240 Y5.000
N520 G01 X1.875 Y0	N2550 G01 X20.360 Y5.000
N530 G01 X1.950 Y0	N2560 G01 X20.360 Y0
N540 G01 X1.950 Y5.000	N2570 G01 X20.480 Y0
N550 G01 X2.025 Y5.000	N2580 G01 X20.480 Y5.000
N560 G01 X2.025 Y0	N2590 G01 X20.600 Y5.000
N570 G01 X2.100 Y0	N2600 G01 X20.600 Y0
N580 G01 X2.100 Y5.000	N2610 G01 X20.720 Y0
N590 G01 X2.175 Y5.000	N2620 G01 X20.720 Y5.000
N600 G01 X2.175 Y0	N2630 G01 X20.840 Y5.000
N610 G01 X2.250 Y0	N2640 G01 X20.840 Y0
N620 G01 X2.250 Y5.000	N2650 G01 X20.960 Y0
N630 G01 X2.325 Y5.000	N2660 G01 X20.960 Y5.000
N640 G01 X2.325 Y0	N2670 G01 X21.080 Y5.000
N650 G01 X2.400 Y0	N2680 G01 X21.080 Y0
N660 G01 X2.400 Y5.000	N2690 G01 X21.200 Y0
N670 G01 X2.475 Y5.000	N2700 G01 X21.200 Y5.000
N680 G01 X2.475 Y0	N2710 G01 X21.320 Y5.000
N690 G01 X2.550 Y0	N2720 G01 X21.320 Y0
N700 G01 X2.550 Y5.000	N2730 G01 X21.440 Y0
N710 G01 X2.625 Y5.000	N2740 G01 X21.440 Y5.000
N720 G01 X2.625 Y0	N2750 G01 X21.560 Y5.000
N730 G01 X2.700 Y0	N2760 G01 X21.560 Y0
N740 G01 X2.700 Y5.000	N2770 G01 X21.680 Y0



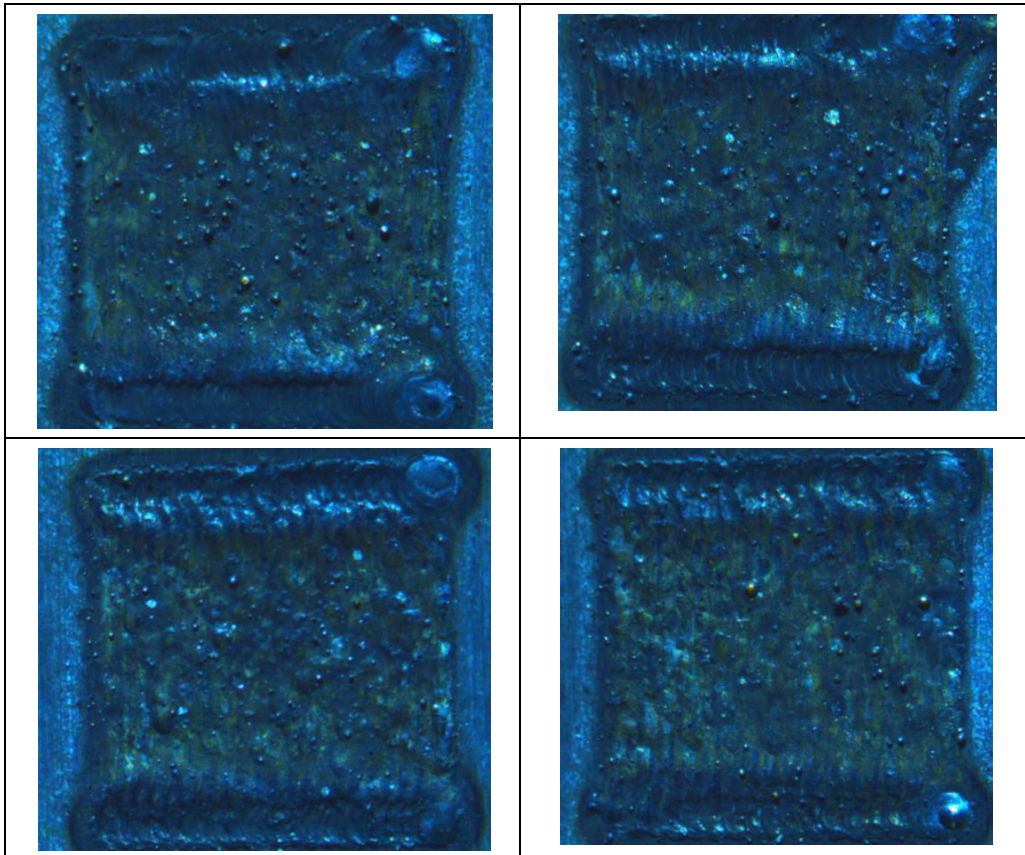
N750 G01 X2.775 Y5.000	N2780 G01 X21.680 Y5.000
N760 G01 X2.775 Y0	N2790 G01 X21.800 Y5.000
N770 G01 X2.850 Y0	N2800 G01 X21.800 Y0
N780 G01 X2.850 Y5.000	N2810 G01 X21.920 Y0
N790 G01 X2.925 Y5.000	N2820 G01 X21.920 Y5.000
N800 G01 X2.925 Y0	N2830 G01 X22.040 Y5.000
N810 G01 X3.000 Y0	N2840 G01 X22.040 Y0
N820 G01 X3.000 Y5.000	N2850 G01 X22.160 Y0
N830 G01 X3.075 Y5.000	N2860 G01 X22.160 Y5.000
N840 G01 X3.075 Y0	N2870 G01 X22.280 Y5.000
N850 G01 X3.225 Y0	N2880 G01 X22.280 Y0
N860 G01 X3.225 Y5.000	N2890 G01 X22.400 Y0
N870 G01 X3.300 Y5.000	N2900 G01 X22.400 Y5.000
N880 G01 X3.300 Y0	N2910 G01 X22.520 Y5.000
N890 G01 X3.375 Y0	N2920 G01 X22.520 Y0
N900 G01 X3.375 Y5.000	N2930 G01 X22.640 Y0
N910 G01 X3.450 Y5.000	N2940 G01 X22.640 Y5.000
N920 G01 X3.450 Y0	N2950 G01 X22.760 Y5.000
N930 G01 X3.525 Y0	N2960 G01 X22.760 Y0
N940 G01 X3.525 Y5.000	N2970 G01 X22.880 Y0
N950 G01 X3.600 Y5.000	N2980 G01 X22.880 Y5.000
N960 G01 X3.600 Y0	N2990 G01 X23.000 Y5.000
N970 G01 X3.675 Y0	N3000 G01 X23.000 Y0
N980 G01 X3.675 Y5.000	N3010 G01 X23.120 Y0
N990 G01 X3.750 Y5.000	N3020 G01 X23.120 Y5.000
N1000 G01 X3.750 Y0	N3030 G01 X23.240 Y5.000
N1010 G01 X3.825 Y0	N3040 G01 X23.240 Y0
N1020 G01 X3.825 Y5.000	N3050 G01 X23.360 Y0
N1030 G01 X3.900 Y5.000	N3060 G01 X23.360 Y5.000
N1040 G01 X3.900 Y0	N3070 G01 X23.480 Y5.000
N1050 G01 X3.975 Y0	N3080 G01 X23.480 Y0
N1060 G01 X3.975 Y5.000	N3090 G01 X23.600 Y0
N1070 G01 X4.050 Y5.000	N3100 G01 X23.600 Y5.000
N1080 G01 X4.050 Y0	N3110 G01 X23.720 Y5.000
N1090 G01 X4.125 Y0	N3120 G01 X23.720 Y0
N1100 G01 X4.125 Y5.000	N3130 G01 X23.840 Y0
N1110 G01 X4.200 Y5.000	N3140 G01 X23.840 Y5.000
N1120 G01 X4.200 Y0	N3150 G01 X23.960 Y5.000
N1130 G01 X4.275 Y0	N3160 G01 X23.960 Y0
N1140 G01 X4.275 Y5.000	N3170 G01 X24.080 Y0
N1150 G01 X4.350 Y5.000	N3180 G01 X24.080 Y5.000
N1160 G01 X4.350 Y0	N3190 G01 X24.200 Y5.000
N1170 G01 X4.425 Y0	N3200 G01 X24.200 Y0
N1180 G01 X4.425 Y5.000	N3210 G01 X24.320 Y0
N1190 G01 X4.500 Y5.000	N3220 G01 X24.320 Y5.000

N1200 G01 X4.500 Y0	N3230 G01 X24.440 Y5.000
N1210 G01 X4.575 Y0	N3240 G01 X24.440 Y0
N1220 G01 X4.575 Y5.000	N3250 G01 X24.560 Y0
N1230 G01 X4.650 Y5.000	N3260 G01 X24.560 Y5.000
N1240 G01 X4.650 Y0	N3270 G01 X24.680 Y5.000
N1250 G01 X4.725 Y0	N3280 G01 X24.680 Y0
N1260 G01 X4.725 Y5.000	N3290 G01 X24.800 Y0
N1270 G01 X4.800 Y5.000	N3300 G01 X24.800 Y5.000
N1280 G01 X4.800 Y0	N3310 G01 X24.920 Y5.000
N1290 G01 X4.875 Y0	N3320 G01 X24.920 Y0
N1300 G01 X4.875 Y5.000	N3330 G01 X25.040 Y0
N1310 G01 X4.950 Y5.000	N3340 G01 X25.040 Y5.000
N1320 G01 X4.950 Y0	N3350 M00
N1330 M00	N3360 G00 G90 X30.000 Y0
N1340 G00 G90 X10.000 Y0.000	N3370 M00
N1350 M00	N3380 G01 X30.000 Y5.000 F6000
N1360 G01 X10.000 Y5.000 F6000	N3390 G01 X30.150 Y5.000
N1370 G01 X10.090 Y5.000	N3410 G01 X30.150 Y0
N1380 G01 X10.090 Y0	N3420 G01 X30.300 Y0
N1390 G01 X10.180 Y0	N3430 G01 X30.300 Y5.000
N1400 G01 X10.180 Y5.000	N3440 G01 X30.450 Y5.000
N1410 G01 X10.270 Y5.000	N3450 G01 X30.450 Y0
N1420 G01 X10.270 Y0	N3460 G01 X30.600 Y0
N1430 G01 X10.360 Y0	N3470 G01 X30.600 Y5.000
N1440 G01 X10.360 Y5.000	N3480 G01 X30.750 Y5.000
N1450 G01 X10.450 Y5.000	N3490 G01 X30.750 Y0
N1460 G01 X10.450 Y0	N3500 G01 X30.900 Y0
N1470 G01 X10.540 Y0	N3510 G01 X30.900 Y5.000
N1480 G01 X10.540 Y5.000	N3520 G01 X31.050 Y5.000
N1490 G01 X10.630 Y5.000	N3530 G01 X31.050 Y0
N1500 G01 X10.630 Y0	N3540 G01 X31.200 Y0
N1510 G01 X10.720 Y0	N3550 G01 X31.200 Y5.000
N1520 G01 X10.720 Y5.000	N3560 G01 X31.350 Y5.000
N1530 G01 X10.810 Y5.000	N3570 G01 X31.350 Y0
N1540 G01 X10.810 Y0	N3580 G01 X31.500 Y0
N1550 G01 X10.900 Y0	N3590 G01 X31.500 Y5.000
N1560 G01 X10.900 Y5.000	N3600 G01 X31.650 Y5.000
N1570 G01 X10.990 Y5.000	N3610 G01 X31.650 Y0
N1580 G01 X10.990 Y0	N3620 G01 X31.800 Y0
N1590 G01 X11.080 Y0	N3630 G01 X31.800 Y5.000
N1600 G01 X11.080 Y5.000	N3640 G01 X31.950 Y5.000
N1610 G01 X11.170 Y5.000	N3650 G01 X31.950 Y0
N1620 G01 X11.170 Y0	N3660 G01 X32.100 Y0
N1630 G01 X11.260 Y0	N3670 G01 X32.100 Y5.000
N1640 G01 X11.260 Y5.000	N3680 G01 X32.250 Y5.000

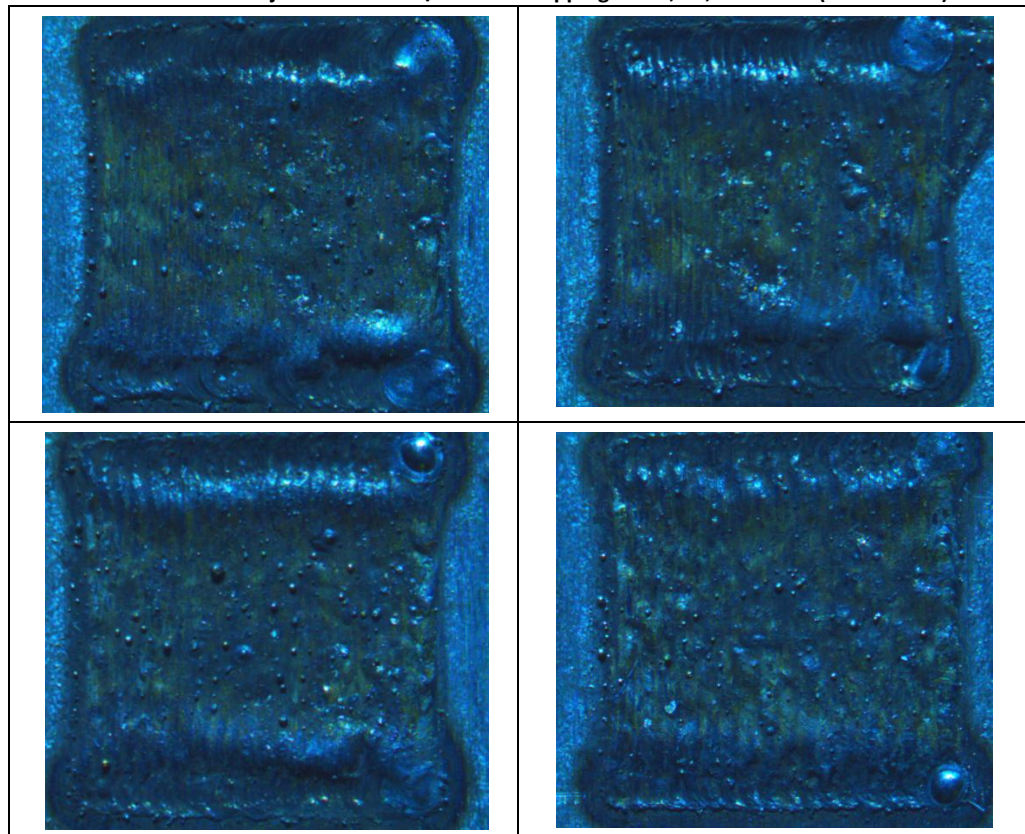
N1650 G01 X11.350 Y5.000	N3690 G01 X32.250 Y0
N1660 G01 X11.350 Y0	N3700 G01 X32.400 Y0
N1670 G01 X11.440 Y0	N3710 G01 X32.400 Y5.000
N1680 G01 X11.440 Y5.000	N3720 G01 X32.550 Y5.000
N1690 G01 X11.530 Y5.000	N3730 G01 X32.550 Y0
N1700 G01 X11.530 Y0	N3740 G01 X32.700 Y0
N1710 G01 X11.620 Y0	N3750 G01 X32.700 Y5.000
N1720 G01 X11.620 Y5.000	N360 G01 X32.850 Y5.000
N1730 G01 X11.710 Y5.000	N3770 G01 X32.850 Y0
N1740 G01 X11.710 Y0	N3780 G01 X33.000 Y0
N1750 G01 X11.800 Y0	N3790 G01 X33.000 Y5.000
N1760 G01 X11.800 Y5.000	N3800 G01 X33.150 Y5.000
N1770 G01 X11.890 Y5.000	N3810 G01 X33.150 Y0
N1780 G01 X11.890 Y0	N3820 G01 X33.300 Y0
N1790 G01 X11.980 Y0	N3830 G01 X33.300 Y5.000
N1800 G01 X11.980 Y5.000	N3840 G01 X33.450 Y5.000
N1810 G01 X12.070 Y5.000	N3850 G01 X33.450 Y0
N1820 G01 X12.070 Y0	N3860 G01 X33.600 Y0
N1830 G01 X12.160 Y0	N3870 G01 X33.600 Y5.000
N1840 G01 X12.160 Y5.000	N3880 G01 X33.750 Y5.000
N1850 G01 X12.250 Y5.000	N3890 G01 X33.750 Y0
N1860 G01 X12.250 Y0	N3900 G01 X33.900 Y0
N1870 G01 X12.340 Y0	N3910 G01 X33.900 Y5.000
N1880 G01 X12.340 Y5.000	N3920 G01 X34.050 Y5.000
N1890 G01 X12.430 Y5.000	N3930 G01 X34.050 Y0
N1900 G01 X12.430 Y0	N3940 G01 X34.200 Y0
N1910 G01 X12.520 Y5.000	N3950 G01 X34.200 Y5.000
N1920 G01 X12.520 Y0	N3960 G01 X34.350 Y5.000
N1930 G01 X12.610 Y0	N3970 G01 X34.350 Y0
N1940 G01 X12.610 Y5.000	N3980 G01 X34.500 Y0
N1950 G01 X12.700 Y5.000	N3990 G01 X34.500 Y5.000
N1960 G01 X12.700 Y0	N4000 G01 X34.650 Y5.000
N1970 G01 X12.790 Y0	N4010 G01 X34.650 Y0
N1980 G01 X12.790 Y5.000	N4020 G01 X34.800 Y0
N1990 G01 X12.880 Y5.000	N4030 G01 X34.800 Y5.000
N2000 G01 X12.880 Y0	N4040 G01 X34.950 Y5.000
N2010 G01 X12.970 Y0	N4050 G01 X34.950 Y0
N2020 G01 X12.970 Y5.000	N4060 M30

## **Annex D. Anàlisi imatges del processat**

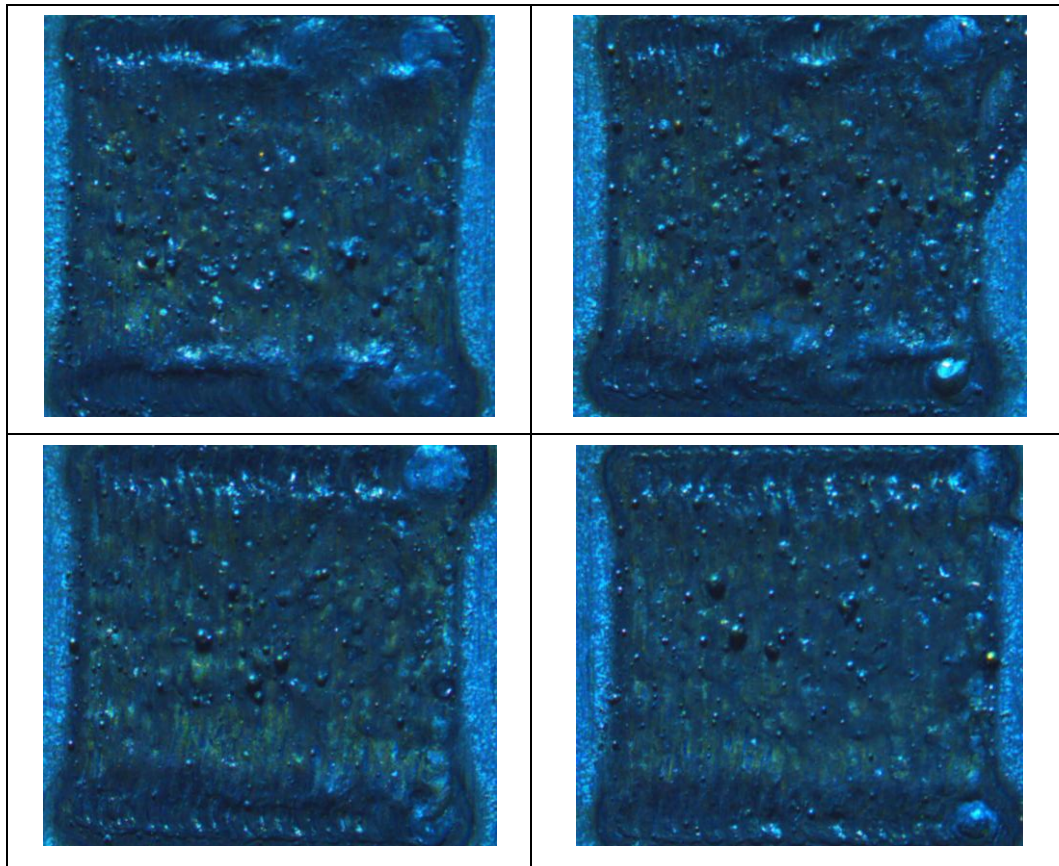
### D.1 Imatges processat multi - scanning



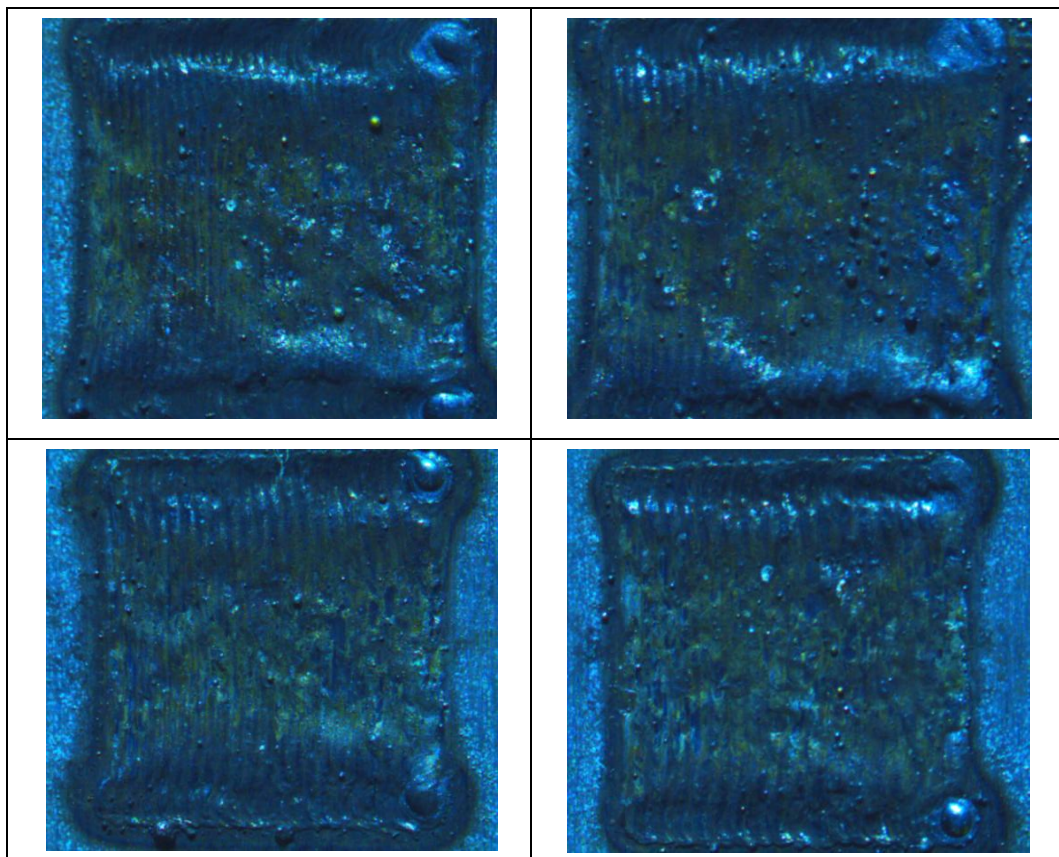
Imatge 47: De esquerra a dreta i de dalt a baix, processat a 130 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 9000 mm/min i overlapping de 50, 60, 80 i 100% (Zoom 0.65x)



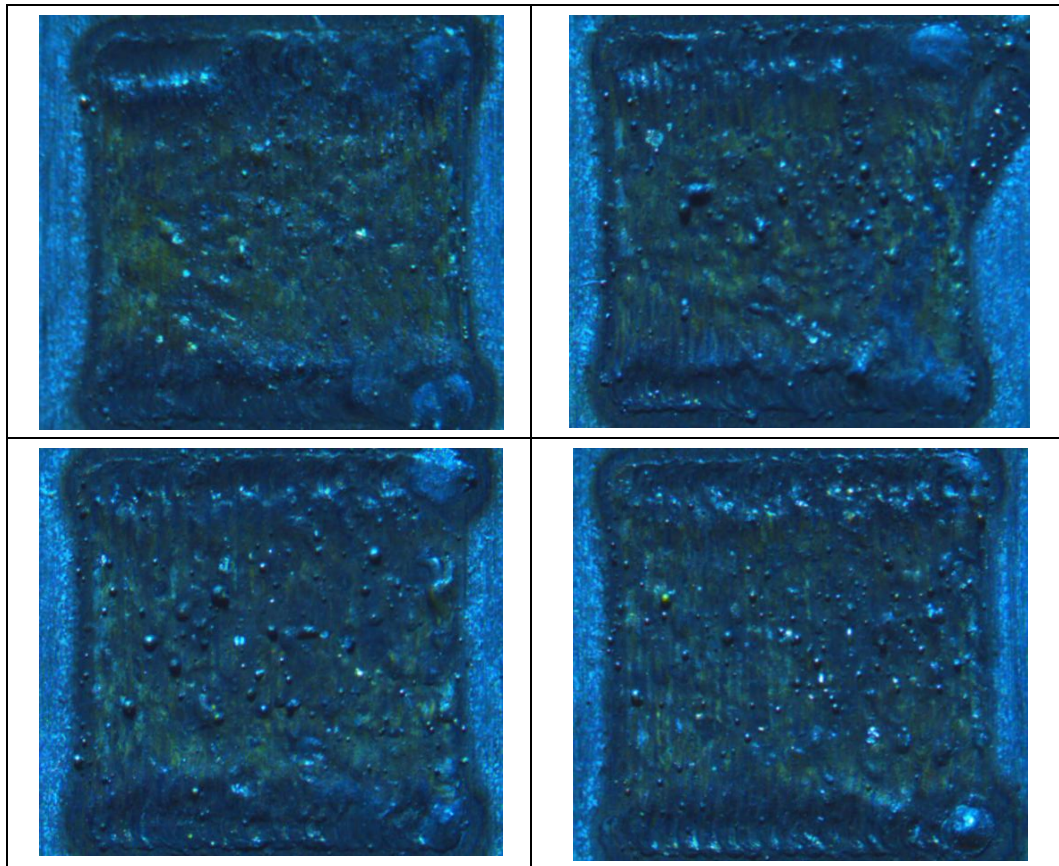
Imatge 48: De esquerra a dreta i de dalt a baix, processat a 170 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 9000 mm/min i overlapping de 50, 60, 80 i 100% (Zoom 0.65x)



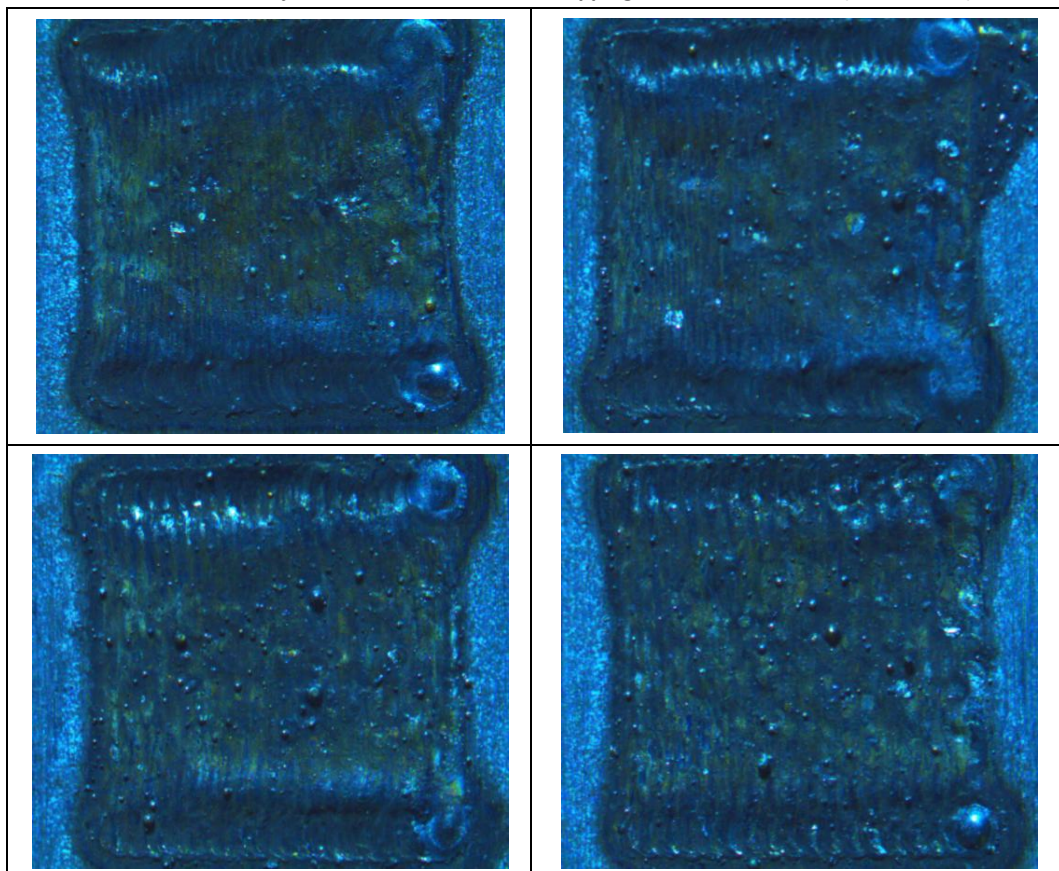
**Imatge 49:** De esquerra a dreta i de dalt a baix, processat a 130 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 10500 mm/min i overlapping de 50, 60, 80 i 100% (Zoom 0.65x)



**Imatge 50:** De esquerra a dreta i de dalt a baix, processat a 170 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 10500 mm/min i overlapping de 50, 60, 80 i 100% (Zoom 0.65x)



Imatge 51: De esquerra a dreta i de dalt a baix, processat a 130 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 12000 mm/min i overlapping de 50, 60, 80 i 100% (Zoom 0.65x)



Imatge 52: De esquerra a dreta i de dalt a baix, processat a 170 watts amb valor de velocitat d'escanejat de 12000 mm/min i overlapping de 50, 60, 80 i 100% (Zoom 0.65x)

## **Annex E. Anàlisi rugositat superficial**



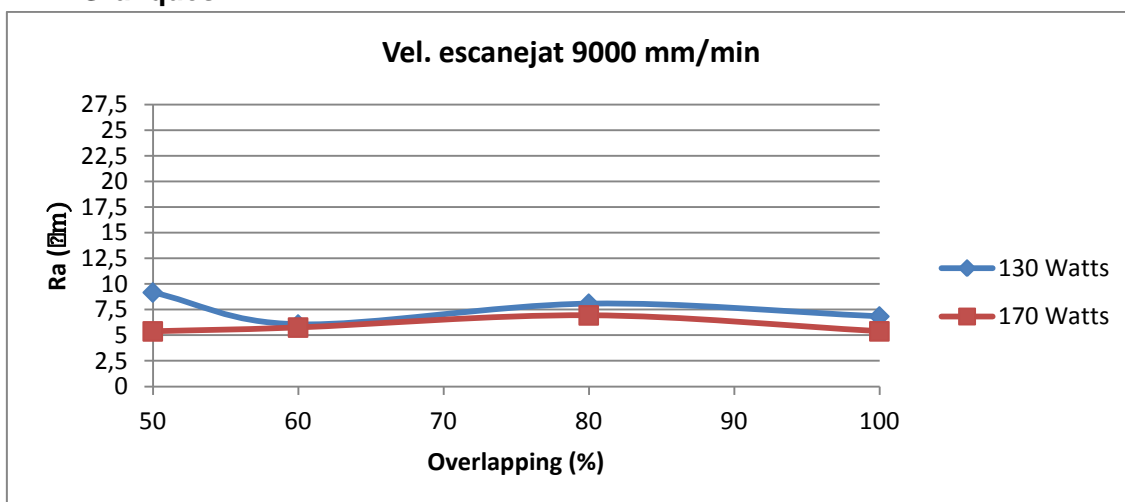
## E.1 Adquisició de dades

Mitjançant la utilització del rugosímetre Mitutoyo Suretest SV-2000 amb els software d'adquisició de dades Surfpack s'obtenen els valors de la rugositat mitjana de les superfícies generades amb les diferents combinacions de paràmetres definides. Les lectures es realitzen perpendicularment a la direcció de formació dels cordons.

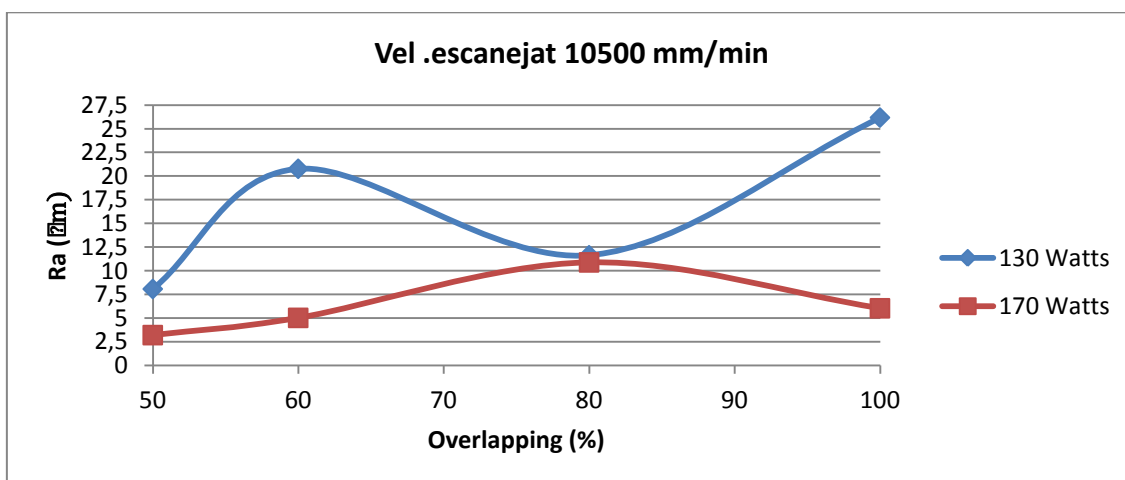
Overlap./Pot	130 Watts	170 Watts	130 Watts	170 Watts	130Watts	170 Watts
50%	9,174 $\mu\text{m}$	5,382 $\mu\text{m}$	8,069 $\mu\text{m}$	3,196 $\mu\text{m}$	6,472 $\mu\text{m}$	2,872 $\mu\text{m}$
60%	6,056 $\mu\text{m}$	5,757 $\mu\text{m}$	20,766 $\mu\text{m}$	5,017 $\mu\text{m}$	5,067 $\mu\text{m}$	3,992 $\mu\text{m}$
80%	8,084 $\mu\text{m}$	6,942 $\mu\text{m}$	11,636 $\mu\text{m}$	10,876 $\mu\text{m}$	6,193 $\mu\text{m}$	5,428 $\mu\text{m}$
100%	6,838 $\mu\text{m}$	5,389 $\mu\text{m}$	26,176 $\mu\text{m}$	6,030 $\mu\text{m}$	7,931 $\mu\text{m}$	4,78 $\mu\text{m}$
	9000 mm/min		10500 mm/min		12000 mm/min	

Taula 15: Resultats obtinguts de la rugositat mitjana

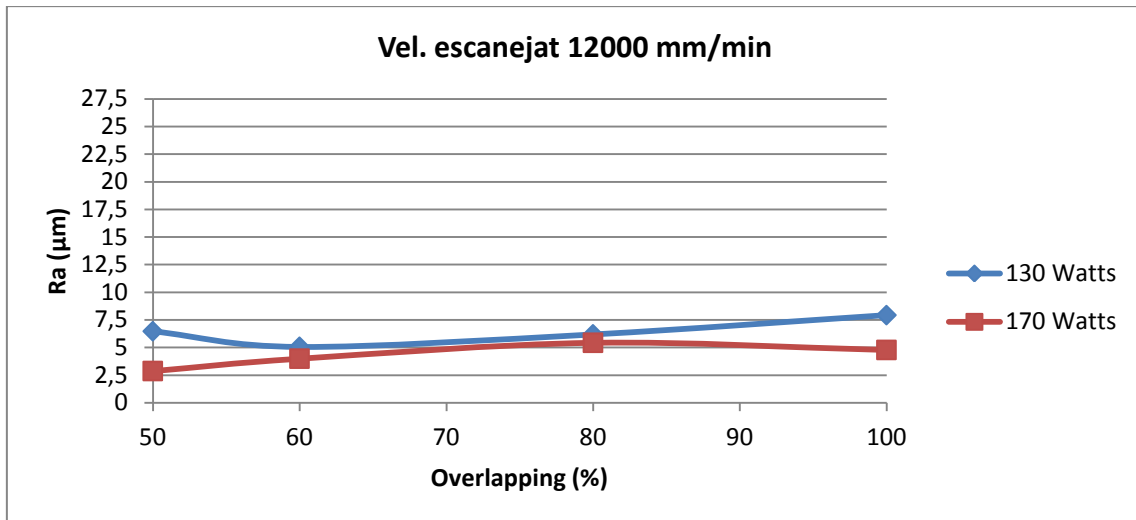
### E.1.1 Gràfiques



Gràfica 16: Relació entre overlapping i rugositat a 9000 mm/min i 130/170 Watts



Gràfica 4: Relació entre overlapping i rugositat a 10500 mm/min i 130/170 Watts



Gràfica 4: Relació entre overlapping i rugositat a 12000 mm/min i 130/170 Watts

E.1.2 Model d'obtenció de valors

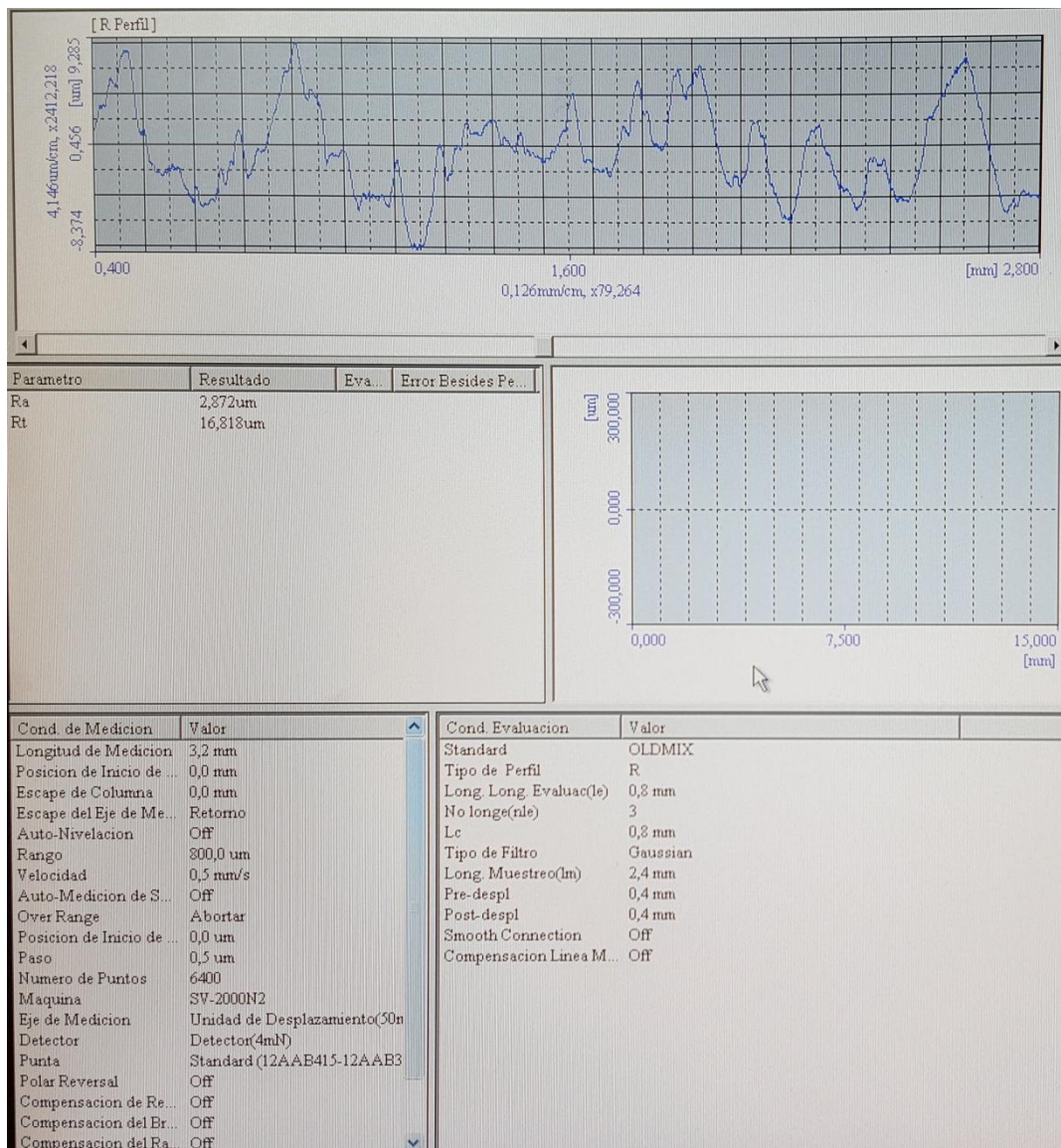


Figura 53: Anàlisi de rugositat en la proveta realitzada a 170 W, 12000 mm/min i 50% d'overlap.