

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Estudi per a la minimització de la porositat localitzada en una peça conformada per injecció d'alumini a alta pressió

Document: 1. Memòria i annexos

Alumne: Marc Julià i Pi

Director/tutor: Maria Luisa Garcia-Romeu de Luna

Isabel Bagudanch Frigolé

Departament: Enginyeria mecànica i de la construcció industrial

Àrea: Enginyeria dels processos de fabricació

Convocatòria: Setembre/2015

Índex

MEMÒRIA	3
1. Introducció	4
1.1. Antecedents	4
1.2. Objecte	6
1.3. Abast i Especificacions.....	6
2. Metodologia	8
2.1. Materials	8
2.2. Equips.....	8
2.2.1. Peça a estudiar – Base variador de freqüència	8
2.2.2. Motlle d'injecció – Base variador de freqüència.....	10
2.2.3. Màquina d'injecció d'alumini a alta pressió.....	10
2.3. Mètodes	12
2.3.1. Selecció dels paràmetres de procés a controlar	12
2.3.2. Disseny d'experiments (DOE)	13
2.3.3. Realització de l'experimentació	14
2.3.4. Verificació dels components un cop mecanitzats	17
2.3.5. Anàlisi estadístic	19
3. Resultats i discussió.....	20
3.1. Factor de qualitat S/N.....	22
3.1.1. Factor de qualitat S/N – senyal - soroll.....	22
3.1.2. Factor de qualitat – mitjanes	24
3.1.3. Comparativa del factor de qualitat obtingut pels dos tipus d'anàlisi	26
3.2. Regressió lineal múltiple (MLR).....	27
4. Conclusions finals	29
5. Relació de documents.....	30
6. Bibliografia	30

ANNEXOS	32
A. Control i variació dels paràmetres – incidències.....	33
B. Metodologia per a la verificació de la porositat localitzada	39
C. Resultats de l'experimentació	43

MEMÒRIA

1. Introducció

1.1. Antecedents

La injecció d'alumini a alta pressió és un procés de fabricació que permet produir components amb geometries molt complexes, amb un cost molt reduït per peça, sempre que parlem de sèries de gran quantitats. Permet una gran repetibilitat dimensional entre una peça i la següent, a més d'un bon acabat superficial.

La pròpia naturalesa del procés, el material fos a alta temperatura dins la cambra d'injecció i les altes velocitats que assoleix al fluir dins les cavitats del motllo, fan que s'introdueixi una certa quantitat d'aire durant el procés d'injecció dins de la peça. Aquest aire que forma petites cavitats un cop la peça es solidifica, és el que s'anomena porositat.

La porositat és un dels principals defectes de qualitat que podem trobar en una peça conformada per injecció d'alumini a alta pressió. Si la peça produïda té uns requeriments mecànics baixos, aquest defecte pot no ser un problema, però moltes de les peces que es produeixen per aquest procés pertanyen al sector automobilístic o industrial i és per això que normalment la porositat és permesa en una mínima quantitat o inclús inadmissible en certes zones, ja que aquesta pot perjudicar a la funció del propi component.

La porositat pot ser deguda a dues causes principals:

- **Per aire atrapat:** És deguda a l'aire que queda atrapat en la fase d'aproximació lenta del pistó. S'entén que sempre que s'injecta material estem parlant de material més una part de l'aire que hi ha a l'ambient, que correspon a l'aire que hi ha dins el contenidor d'injecció i el que hi pot haver dins del motllo. Si el disseny d'aquest motllo no és l'adequat o la velocitat d'aproximació és massa ràpida, l'aire no es podrà escapar correctament i quedarà encapsulat dins del motllo pel propi material, al produir-se la fase ràpida d'injecció, generant cavitats.
- **Per contracció de material:** aquest tipus de porositat és deguda a l'espai que deixa el canvi de volum que exerceix el material al passar d'estat líquid a sòlid. Parlem doncs, d'una contracció volumètrica. Se sol produir en les zones més allunyades de l'atac de colada, la zona per on

s'alimenta el motllo amb alumini, ja que és més complicat d'aportar el metall líquid que ocuparia l'espai deixat pel material al contraure's.

En una empresa de Banyoles, que es dedica a la injecció d'alumini a alta pressió, s'han trobat en repetides ocasions amb incidències de porositat en les peces que conformen.

Un d'aquests casos i el que s'estudiarà en aquest TFG, és la porositat que apareix localitzada en una zona crítica d'una peça; es tracta d'una base – suport per a l'assentament d'un variador de freqüència sobre un motor elèctric.

Un variador de freqüència és un aparell electrònic que permet la variació de la velocitat de gir d'un motor elèctric. Conté una gran quantitat de components electrònics, molt sensibles a les temperatures elevades i que veuen reduït el seu rendiment i correcte funcionament amb l'increment d'aquestes. Alguns d'aquests components requereixen d'una base de dissipació de la calor que ha de ser completament planera i amb absència de porus, es pot veure a la Figura 1, que afectarien negativament a la dissipació i funció d'aquesta base. En aquest cas es pot veure una peça mecanitzada amb una porositat en tota la zona de dissipació excessivament elevada, pel que considerem que és una peça defectuosa.



Figura 1: Base per al variador de freqüència – zona de dissipació (peça defectuosa).

Actualment, en aquesta empresa, s'estan trobant amb un rebuig intern elevat d'aquest component per problemes de porositat a la zona del dissipador de calor. Aquest rebuig està generant unes pèrdues econòmiques importants, pel que es requereix de prendre accions al respecte per tal de minimitzar aquesta pèrdua fins a un nivell acceptable.

Per tal de reduir aquesta pèrdua, existeixen diverses solucions al mercat, moltes de les quals passen per una modificació de la geometria del motllo o un car sistema de buit que permeti d'eliminar l'aire alhora de dur a terme la injecció.

Prèviament al planteig d'aquests recursos, però, sorgeix el dubte de si la configuració del procés i de la màquina pot no ser la més adequada i afavorir a l'aparició d'aquesta porositat. De ser així, es podria buscar aquesta millora en el procés que, amb un cost més contingut, pogués ajudar a reduir els nivells de porositat.

1.2. Objecte

L'objecte d'aquest projecte és el d'estudiar com es pot reduir la porositat localitzada en la zona crítica de dissipació de calor d'una peça, verificant, en base a un mètode estadístic, com influeixen els paràmetres més crítics de procés en relació a la porositat sobre la peça final obtinguda.

1.3. Abast i Especificacions

Per tal d'arribar a una reducció d'aquest rebuig intern per porositat es proposa de millorar els paràmetres de procés, ja que un mal ajust d'aquests pot portar a un increment de la porositat en la zona a estudiar.

Per fer-ho es dissenyarà una experimentació, en base al Disseny d'experiments de *Taguchi*, pel que es realitzaran diverses peces amb una determinada parametrització de procés, s'analitzaran els resultats obtinguts i s'observarà quina configuració va lligada a un mínim grau de porositat.

La verificació o anàlisi dels resultats es farà mitjançant el mètode de la micro - secció a través del qual es podrà conèixer el grau de porositat en superfície analitzada.

Les especificacions per a aquest projecte són les que es determinen a la Taula 1.

Taula 1: Especificacions del projecte. R, Requerides i C, Complementàries

Designació	Tipus	Descripció
Objectiu	R	Identificació dels paràmetres de procés que afecten negativament a la porositat
	R	Aplicació d'un tipus d'experimentació que permeti associar una parametrització del procés a un nivell adequat de porositat
Experimentació - Condicionants	R	Utilització del material habitual per a la fabricació de les peces: aliatge d'alumini L-2521 EN AC 47100
	R	Utilització del motlle en les condicions habituals per a produir aquesta peça (no es pot modificar la geometria per ser el motlle propietat del client)
	R	Utilització d'una màquina d'injecció de cambra freda horitzontal per a l'experimentació, de les que es disposen al parc de maquinària de l'empresa
	C	L'experimentació s'ha de realitzar un cop acabada la comanda en curs de peces d'aquesta referència per tal de minimitzar els canvis de motlle i posada a punt de la màquina
	R	Les fases d'acabat del producte (desbarbat, mecanització i pintura) han de ser les habituals i les que marca el client per a les peces de l'experimentació
	R	Un cop produïdes i analitzades les peces per a l'experimentació, passaran a formar part de la producció que ha demanat el client (aquest últim es farà càrrec dels costos de producció de l'experimentació)
Experimentació - resultats	R	Per a la mesura de la porositat, la variable que es vol observar és el percentatge de superfície porosa respecte de la superfície total de control
Lliurament	R	El lliurament d'aquest projecte s'ha de fer durant la convocatòria de setembre 2015
Costos	R	Els costos d'aquest projecte no poden ascendir dels 1500€

2. Metodologia

2.1. Materials

Com s'ha comentat anteriorment, són molts els factors que tenen incidència sobre la qualitat final de la peça produïda. Una de les decisions importants a prendre és amb quin material s'injectarà aquesta peça. En aquest cas el material és invariable per ser una decisió que marca el client. Es tracta de l'aliatge d'alumini L-2521 o EN AC 47100. És un aliatge àmpliament utilitzat en la injecció a alta pressió per tenir unes propietats de bona fluïdesa dins el motlle i fàcil maquinabilitat posterior.

En aquest cas s'ha realitzat l'espectrometria d'una proveta (Figura 2) de la mateixa colada amb què s'ha realitzat l'experimentació. Els resultats de composició química fruit d'aquesta espectrometria són els que es mostren a la Taula 2.



Figura 2: Proveta per a la realització de l'espectrometria

Taula 2: Composició química de l'aliatge utilitzat per a l'experimentació

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb	Sn	Ti	Al
Límit	10,5	-	0,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13,5	1,30	1,20	0,55	0,34	0,50	0,30	0,10	0,20	0,10	0,20	Resta
% pes	10,6	0,72	0,734	0,0815	0,298	0,493	0,0157	0,0458	0,187	0,0916	0,0565	86,64

2.2. Equips

2.2.1. Peça a estudiar – Base variador de freqüència

La peça objecte d'aquest estudi es tracta, tal i com s'ha comentat, d'una base que subjecta un variador de freqüència sobre un motor elèctric. No es tracta d'un

component amb uns alts requeriments mecànics però sí que, per la seva funció de dissipació de la calor, no pot contenir porus en certes zones. A la Figura 3 es poden observar diferents vistes de la peça així com el seu atac de colada (zona per on s'alimenta d'alumini). A les imatges de dalt i baix a la dreta també es poden observar les massalotes, es tracta d'una extensió de la peça que no forma part de la geometria d'aquesta però que s'utilitza per absorbir una part de la contracció i també concentra una part dels possibles residus del material injectat.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

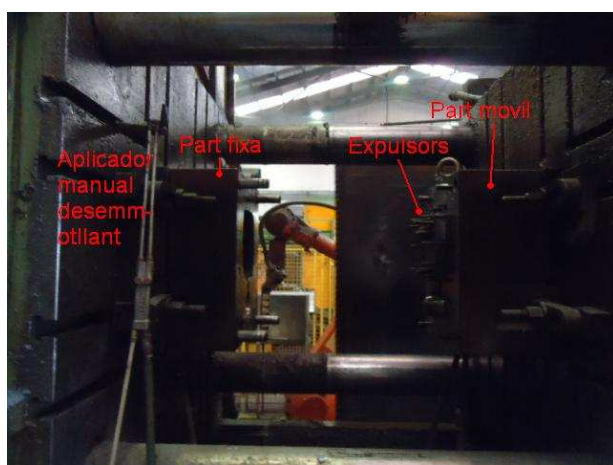
Figura 3: (a, b, c, d) Vistes del component a estudiar, (e) Vista del component final muntat

2.2.2. Motlle d'injecció – Base variador de freqüència

Per tal de produir una peça pel procés d'injecció a alta pressió és necessari de disposar d'un motlle. El motlle és l'element principal que determinarà la geometria de la peça però, en gran part, el seu disseny també determinarà la qualitat de les peces que produeixi. Cal dir doncs, que el disseny del motlle requereix de molta experiència per part de l'enginyer per evitar que es generin fluxos turbulents a l'interior, tampoc ha de tenir canvis d'espessor excessius que puguin afavorir les porositats, s'ha de calcular correctament la contracció, etc.

En aquest estudi no es permet fer cap modificació al motlle ja existent, que sovint també és una solució eficaç per a disminuir els defectes de qualitat que es poden donar en un component.

A la Figura 4 (a) es poden observar alguns dels elements que forment part del motlle. Es tracta del motlle de la base VF. Es pot observar la part fixa a l'esquerra, la part mòbil a la dreta i l'expulsió al centre que és la que permet d'extreure la peça un cop s'ha solidificat i obert el motlle. A la Figura 4 (b) es poden observar les sortides d'aire que es realitzen per tal d'evitar problemes de gasos atrapats a l'interior.



(a)



(b)

Figura 4: (a) Estructura general del motlle, (b) Vista interior: disseny part fixa del motlle

2.2.3. Màquina d'injecció d'alumini a alta pressió

La màquina d'injecció d'alumini a alta pressió que s'utilitzarà per a la realització de l'experimentació es tracta de la màquina 312, una IDRA de 700Tn de força de

tancament, adquirida l'any 2003. Es tracta d'una màquina de cambra freda horitzontal, això significa que la cambra o contenidor d'injecció, per on entra l'alumini a través del pistó, és en posició horitzontal i està situada fora del forn.

El forn es troba situat juntament a la màquina i requereix d'un sistema mecànic que transporta l'alumini líquid des del forn fins al contenidor d'injecció.

La part del control d'aquesta màquina funciona en llaç tancat, és a dir que es re-alimenta i genera respostes a partir de la informació que li proporcionen els seus propis sensors.

Una de les avantatges que té aquesta màquina respecte de la resta de les del parc, és que compta amb un mòdul d'adquisició de dades, que són tractades pel mateix sistema de control de la màquina i que permet d'extreure les corbes de velocitat i pressió de cada injectada. Aquest punt serà molt important per a la nostra experimentació i és la raó per la qual s'ha triat aquesta màquina per a la realització de les proves. A la Figura 5 es pot veure una imatge general i alguns detalls de la màquina utilitzada, val a dir que té tots els elements de protecció davant, fet que dificulta el poder veure la màquina en si.



Figura 5: Imatge general de la màquina 312 IDRA OS 700Tn

2.3. Mètodes

2.3.1. Selecció dels paràmetres de procés a controlar

Els paràmetres que més influeixen a nivell de porositat han estat estudiats per multitud d'especialistes en ciència de materials i processos de fabricació, Tsoukalas V.D. (2003) o Verran G.O. et al. (2006). A la Figura 6 es mostra un diagrama de causa i efecte segons el qual es poden determinar els processos que tenen incidència sobre la porositat en la injecció a pressió.

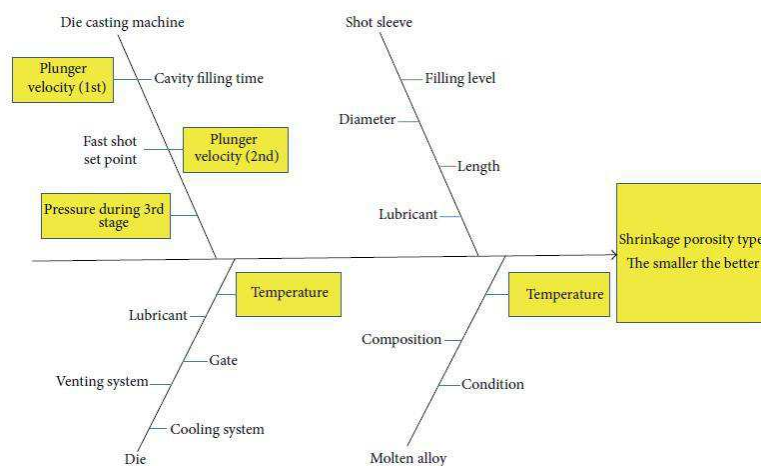


Figura 6: Diagrama de causa i efecte sobre la porositat

Aquests experts coincideixen en cinc paràmetres com als més crítics i que tenen més influència sobre el grau de porositat:

- **Temperatura del material (°C)**
- **Temperatura del motllo (°C)**
- **Velocitat del pistó d'injecció en primera fase (aproximació lenta) (m/s)**
- **Velocitat del pistó d'injecció en segona fase (emplenat del motllo) (m/s)**
- **Pressió de multiplicació en tercera fase (compactació del material) (bar)**

Així doncs es procedirà a injectar peces de mostra amb uns valors consigna d'aquests paràmetres i controlant en tot moment que aquests estiguin dins d'uns límits. S'identificaran aquestes peces i posteriorment al mecanitzat s'analitzaran els resultats, utilitzant com a variable de sortida el percentatge de porositat sobre la superfície total analitzada.

Cal dir que hi ha molts d'altres paràmetres que també poden influir en el grau de porositat que presenti una peça tals com la composició química del material, la

geometria del motlle o la quantitat de desemmotllant que s'aplica entre cada injecció. Així doncs, per tal d'obtenir uns resultats coherents, la resta de paràmetres es mantindran constants al llarg de totes les peces realitzades durant l'experimentació.

S'han establert uns rangs de valors per a cada un d'aquests paràmetres tenint en compte certs factors, factors de seguretat, factors que venen donats per l'experiència o dels que s'han realitzat certes proves físiques (en referència a les velocitats) o simplement factors que, en augmentar o disminuir massa el seu valor, podria derivar en problemes mecànics a curt termini (pressió de multiplicació massa elevada), etc. Aquests rangs de valors són els que es mostren a la Taula 3.

Taula 3: Els paràmetres i el seu valor a tres nivells

Denominació	Paràmetres de procés	Rang	Nivell 1	Nivell 2	Nivell 3
A	Temperatura del material (°C)	640 - 700	640	670	700
B	Temperatura del motlle (°C)	210 - 250	210	230	250
C	Velocitat del pistó d'injecció en primera fase (m/s)	0,05 - 0,35	0,05	0,20	0,35
D	Velocitat del pistó d'injecció en segona fase (m/s)	1,5 - 3,5	1,5	2,5	3,5
E	Pressió de multiplicació en tercera fase (bar)	200 - 280	200	240	280

Aquests rangs s'han establert, a més, a través de la bibliografia utilitzada i també s'ha comprovat que són assumibles amb l'equip que utilitzarem. També val a dir que, en gran part, contenen els paràmetres de procés habituals.

2.3.2. Disseny d'experiments (DOE)

Amb aquest disseny d'experiments volem estudiar l'impacte dels paràmetres seleccionats com a crítics sobre una variable de sortida que es tractarà de la porositat mesurada sobre una superfície coneguda o superfície de control.

Les variables d'entrada a controlar seran la temperatura del material al forn, A; la temperatura del motlle un cop realitzada la injecció, B; la velocitat del pistó o aproximació, en primera fase d'injecció, C; la velocitat del pistó en segona fase d'injecció o emplenat del motlle, D; i la pressió de multiplicació en tercera fase, E.

Per al disseny d'aquesta experimentació s'ha triat el disseny de *Taguchi*, que és una de les eines més eficients per a la millora de productes i processos amb una reducció important de costos i temps. És una eina sistemàtica que permet l'optimització de processos amb varies variables d'entrada, en matèria de qualitat (Taguchi (1986)).

Per tal de seleccionar un nombre d'experimentacions adequades, no es realitza una combinatòria pura dels cinc paràmetres a tres nivells, si no que es treballarà amb una matriu ortogonal reduïda de 27 experimentacions, que són suficients per tal d'estudiar l'efecte dels cinc paràmetres d'entrada. Aquesta matriu es mostra a la Taula 4.

Taula 4: Matriu ortogonal L27 – experimentació a realitzar

Prova	Temperatura del material al forn (A)	Temperatura del motllo (B)	Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	Pressió de multiplicació (E)
P-001	700	250	0,05	1,5	200
P-002	700	250	0,2	2,5	240
P-003	700	250	0,35	3,5	280
P-004	700	230	0,05	2,5	240
P-005	700	230	0,2	3,5	280
P-006	700	230	0,35	1,5	200
P-007	700	210	0,05	3,5	280
P-008	700	210	0,2	1,5	200
P-009	700	210	0,35	2,5	240
P-010	670	250	0,05	2,5	280
P-011	670	250	0,2	3,5	200
P-012	670	250	0,35	1,5	240
P-013	670	230	0,05	3,5	200
P-014	670	230	0,2	1,5	240
P-015	670	230	0,35	2,5	280
P-016	670	210	0,05	1,5	240
P-017	670	210	0,2	2,5	280
P-018	670	210	0,35	3,5	200
P-019	640	250	0,05	3,5	240
P-020	640	250	0,2	1,5	280
P-021	640	250	0,35	2,5	200
P-022	640	230	0,05	1,5	280
P-023	640	230	0,2	2,5	200
P-024	640	230	0,35	3,5	240
P-025	640	210	0,05	2,5	200
P-026	640	210	0,2	3,5	240
P-027	640	210	0,35	1,5	280

2.3.3. Realització de l'experimentació

Un cop realitzat el planteig d'aquest disseny d'experiments, s'ha de procedir a la fabricació de les mostres. En aquest cas no es realitzarà una simulació amb un

software destinat a tal efecte, sinó que es realitzarà una experimentació real, amb peces físiques produïdes per una màquina d'injecció d'alumini, la 312.

L'ordre de realització d'aquestes proves s'ha adaptat als requisits físics de la situació, per exemple s'ha partit d'una temperatura del forn elevada, de 700°C per a la primera prova i s'ha deixat refredar el forn simplement deixant-lo apagat per tal d'arribar a les temperatures inferiors.

Val a dir, que realitzar proves físiques en front de simulació té algunes avantatges però també inconvenients. A nivell d'avantatges es pot dir que els resultats obtinguts depenen de tots els factors que poden incidir en l'acabat de la peça i en la porositat, són resultats reals. Com a inconvenients en podem trobar bastants, entre ells el que no es pot treballar amb un valor consigna, el valor real mesurat no és exactament el que es vol obtenir, per tant són necessàries unes certes toleràncies per a considerar un valor com a vàlid. El criteri de toleràncies que s'ha aplicat és igual per a tots els paràmetres. Si tenim en compte que per a un mateix paràmetre, el salt entre nivells és igual per al nivell 1, 2 i 3. El criteri de tolerància es mostra a l'Eq. 1, per tant la taula de paràmetres i els seus valors (Taula 3) queda modificada a la taula de valors amb toleràncies (Taula 5).

$$Tolerància = \pm \frac{\text{Nivell2} - \text{Nivell1}}{2} \quad (\text{Eq. 1})$$

Taula 5: Valors dels paràmetres de procés i les seves toleràncies

Paràmetre	Rang	Nivell 1	Nivell 2	Nivell 3	Tolerància	Unitats
Temperatura del material al forn (A)	640 - 700	640	670	700	+/-15	°C
Temperatura del motllo (B)	210 - 250	210	230	250	+/-10	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,05 - 0,35	0,05	0,2	0,35	+/-0,075	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	1,5 - 3,5	1,5	2,5	3,5	+/-0,5	m/s
Pressió de multiplicació (E)	200 - 280	200	240	280	+/-20	bar

També cal afegir que s'ha de realitzar un control i registre dels paràmetres, tal com s'explica a l'Annex A: Control dels paràmetres i incidències. A nivell dels paràmetres de cada prova, i com que aquesta no es tracta d'una simulació, cal tenir en compte que hi pot haver errors de lectura dels paràmetres per part del tècnic o bé errors propiciats pels aparells de mesura, etc. Com que ens podíem trobar amb varis errors, es va decidir de fer unes 3 o 4 peces per a cada prova - experimentació, d'aquesta

manera es podria seleccionar posteriorment una peça en què tots els valors dels seus paràmetres estiguessin dins de la tolerància establerta.

Tot seguit i a mode de resum, es farà una breu cronologia de com es va realitzar cada peça dins d'una mateixa experimentació:

- Membres implicats: A.Serra (A.S., resp. producció), F.Moreno (F.M., qualitat), M.Julià (M.J., resp. qualitat)
- Duració de les proves: 10.30h – 16.30h

1.- Un cop es tenia el forn a temperatura consigna i els paràmetres de velocitat i multiplicació regulats, A.S. procedia a realitzar una injecció en mode d'extracció de la peça manual.

2.- Acabada la injecció A.S. retirava la peça i M.J. verificava la temperatura del motlle a la zona d'estudi ràpidament, ja que aquesta temperatura queia al tenir el motlle obert. A.S. aplicava el líquid desemmotllant al motlle per a la següent injecció.

3.- Si la temperatura motlle era adequada, M.J. verificava la resta de paràmetres, primer la temperatura del material al forn, segon pressions i velocitats. Si tots aquests paràmetres eren correctes i dins de tolerància, M.J. donava l'OK a F.M., qui verificava que la peça no tingués faltes de material o defectes visuals i la marcava per tal de no perdre la traçabilitat dels paràmetres XX.X (nº prova . nºassaig).

4.- M.J. registrava tots els paràmetres per a aquesta injecció.

5.- Si era necessari es realitzaven més peces d'aquesta mateixa prova o altrament, M.J. feia els canvis de paràmetres de procés i es realitzava la següent experimentació tornant al punt 1.

Acabada la realització de peces per a l'experimentació, aquestes seguien el procés habitual per a aquests components, desbarbat, pintura i mecanització. Això va provocar que s'haguessin de mantenir separades de la resta de la producció, per tal de no barrejar-se, fet que va requerir d'algunes gestions amb els proveïdors.

Es poden veure algunes imatges fetes durant la realització de l'experimentació a la Figura 7.



(a)



(b)

Figura 7: Realització de l'experimentació - (a) aplicació del desemmotllant (b) taula de treball

2.3.4. Verificació dels components un cop mecanitzats

Al rebre les peces, es van ordenar verificant que no se n'havia extraviat cap. Posteriorment es va seleccionar, dins de totes les peces realitzades sota la mateixa prova, quina tenia uns paràmetres més propers a la consigna i per tant, la que seria analitzada.

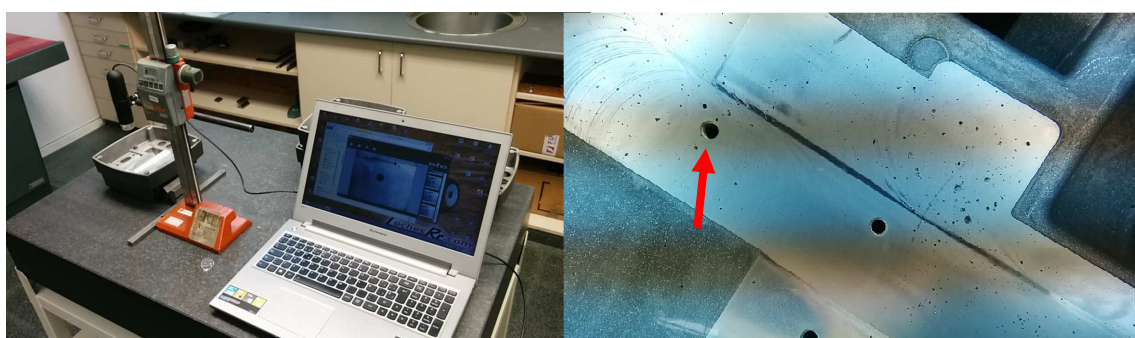
Per a analitzar la porositat sobre una peça existeixen varis mètodes, destructius i no destructius. Un dels mètodes pel càlcul de la porositat total, en percentatge, sobre el volum de la peça és el de la balança hidrostàtica. Es tracta d'una aplicació del principi d'Arquímedes que permet la determinació de les densitats de porus i peça. En aquest cas no ens interessaria ja que estem treballant amb porositat localitzada sobre una superfície concreta.

Un altre dels mètodes existents és el de verificació per rajos X en 2 i 3D. Aquest mètode també seria adequat per a la verificació que volem realitzar però requereix d'un equip de verificació del que no es disposa per tant també es descarta aquest mètode.

Finalment un altre dels mètodes existents és el mètode de la micro – secció. Es tracta d'un mètode d'inspecció amb un augment òptic que permet d'identificar els porus existents en una superfície. Els resultats depenen tant de l'acabat de la superfície a

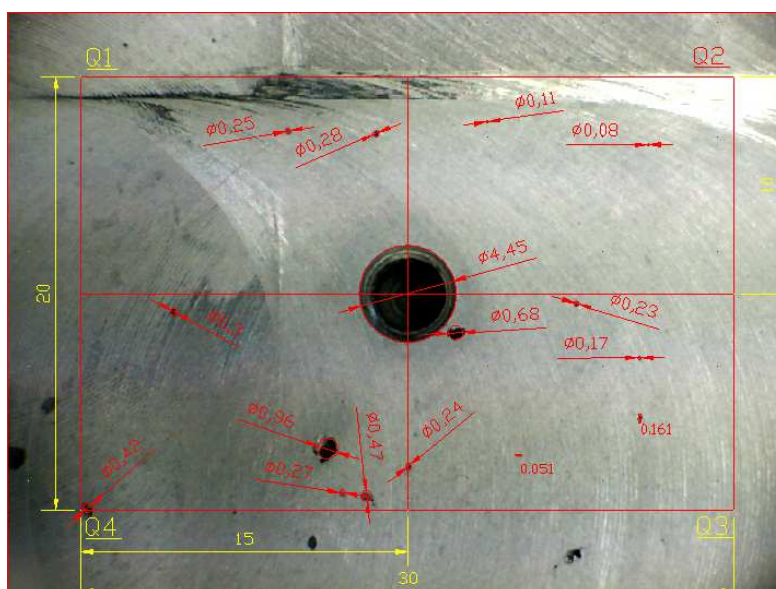
analitzar com de la qualitat de l'instrument utilitzat per a l'augment òptic. Pel que aquest mètode pot tenir un cost i una dificultat en la realització que depèn directament dels resultats que es vulguin obtenir així com de l'equip utilitzat.

En aquest cas la superfície que es vol analitzar és una superfície mecanitzada a una rugositat d'1.6 micròmetres pel que ha de permetre obtenir un bona qualitat de les imatges preses. Per altre banda l'equip d'augment òptic és una càmera model *Veho discovery VMS-004 Deluxe* que permet un augment digital de fins a 400x, si bé no és necessària una ampliació tant elevada en aquest cas, ofereix unes imatges suficients per a l'anàlisi requerit. A la Figura 8 es poden observar algunes imatges de la realització de la verificació. La metodologia seguida per a la realització de la verificació dels components s'adjunta a l'Annex B: Metodologia per a la verificació de peces.



(a)

(b)



(c)

Figura 8: (a) Muntatge per a la verificació, (b) Vista ampliada de la zona de dissipació (peça defectuosa), (c) imatge obtinguda amb delimitació de la secció i anàlisi ja realitzat

De cada peça s'obté, per mitjà d'una fulla de càlcul que s'ha realitzat i que es pot veure a l'annex B, Figures 19 i 20, la porositat respecte de la superfície per cada quadrant i, finalment, un valor global dels quatre quadrants en què s'ha dividit la zona crítica a estudiar.

D'aquest anàlisi i segons la metodologia seguida a l'annex B, se n'extreu una taula de resum dels resultats, la Taula 6 (que es mostra dins del punt 3, resultats i discussió).

2.3.5. Anàlisi estadístic

Per tal de poder analitzar els resultats obtinguts en l'experimentació, el mètode analític de *Taguchi* proposa la utilització de dos tipus de factors:

- **Factor de qualitat S/N**

El factor de qualitat ens donarà una relació de com és de robusta la relació de senyal – soroll per a cada paràmetre i nivell. *Taguchi* anomena soroll als efectes de factors incontrolables del procés.

En aquest projecte es focalitzarà l'estudi en cinc paràmetres d'entrada, A – E, i una variable de sortida, la porositat mesurada en superfície crítica. Llavors ens interessa que aquesta variable de sortida sigui mínima, per tant seleccionarem com a criteri: el mínim el millor.

L'equació aplicada per a obtenir el resultats del factor de qualitat (relació senyal – soroll en dB) és la Eq. 2:

$$\frac{S}{N_{smaller}} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (Eq. 2)$$

On:

y → valor mesurat del percentatge de porositat en superfície crítica

n → nombre de repeticions realitzades per a una mateixa experimentació (n=1)

Veurem que l'anàlisi del factor de qualitat es realitza en relació senyal – soroll i també en mitjanes. Obtindrem els resultats en ambdós casos, obtenint en cada cas el nivell del paràmetre que dona com a sortida una menor porositat. Després es compararan els resultats obtinguts per mitjà dels dos mètodes.

• Regressió lineal múltiple (MLR)

La regressió lineal múltiple és un mètode que permet de modelar la relació entre una variable dependent i una o més variables independents com és el cas. Per al càlcul del MLR s'utilitzen mínims quadrats: es redueixen al mínim la suma del quadrat de les diferències dels valors experimentals i els valors predits.

Variable dependent → Percentatge de porositat

Variables independents → A, B, C, D, E

Si considerem la variable dependent com a funció $F(x)$ de la resta de variables independents podem dir que l'equació resultant (Eq. 3) seria la de la forma (segons el model de regressió lineal):

$$F(x) = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_4 D + \beta_5 E \quad (Eq. 3)$$

On:

$F(x)$ → Percentatge de porositat en superfície de control (%)

A → Temperatura del material al forn (°C)

B → Temperatura de la matriu (°C)

C → Velocitat del pistó en primera etapa (m/s)

D → Velocitat del pistó en segona etapa (m/s)

E → Pressió de multiplicació (bar)

Amb aquesta corba s'analitzarà la relació entre els resultats de l'experimentació i els resultats predits, permetent d'identificar valors atípics així com l'adequació del model a la realitat.

Tots els resultats s'han obtingut per mitjà del software *Minitab v16*, utilitzant com a dades de partida totes les dades extretes de la taula resum de resultats, Taula 6.

3. Resultats i discussió

Un cop realitzada l'experimentació i obtinguts els resultats dels components produïts, s'ha realitzat una resum de resultats, que es reflexa a la Taula 6.

Taula 6: Resum de resultats segons condicions d'entrada

Prova	Input					Output
	Temperatura del material al forn (A)	Temperatura del motllo (B)	Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	Pressió de multipilcació (E)	RESULTATS PROVES (% porus superficie)
P-001	700	250	0,05	1,5	200	0,05
P-002	700	250	0,2	2,5	240	0,03
P-003	700	250	0,35	3,5	280	0,45
P-004	700	230	0,05	2,5	240	0,12
P-005	700	230	0,2	3,5	280	0,95
P-006	700	230	0,35	1,5	200	0,06
P-007	700	210	0,05	3,5	280	0,34
P-008	700	210	0,2	1,5	200	0,83
P-009	700	210	0,35	2,5	240	0,77
P-010	670	250	0,05	2,5	280	0,08
P-011	670	250	0,2	3,5	200	0,06
P-012	670	250	0,35	1,5	240	0,01
P-013	670	230	0,05	3,5	200	0,3
P-014	670	230	0,2	1,5	240	0,03
P-015	670	230	0,35	2,5	280	0,12
P-016	670	210	0,05	1,5	240	0,14
P-017	670	210	0,2	2,5	280	0,1
P-018	670	210	0,35	3,5	200	0,14
P-019	640	250	0,05	3,5	240	1,57
P-020	640	250	0,2	1,5	280	0,04
P-021	640	250	0,35	2,5	200	1,14
P-022	640	230	0,05	1,5	280	0,33
P-023	640	230	0,2	2,5	200	0,17
P-024	640	230	0,35	3,5	240	0,08
P-025	640	210	0,05	2,5	200	0,16
P-026	640	210	0,2	3,5	240	0,84
P-027	640	210	0,35	1,5	280	0,86

Com ja s'ha comentat, l'experimentació per a aquest projecte no s'ha realitzat per mitjà de simulació sinó que s'ha fet una experimentació amb peces reals en una màquina d'injecció d'alumini a alta pressió. És per això que els paràmetres de procés aplicats no són valors consigna sinó que són valors dins d'una tolerància, tal com s'ha explicat al punt 2.3.3, Taula 5. Per a cada experiment s'ha realitzat una mitja de tres o quatre peces, el que significa que en total s'han realitzat aproximadament unes noranta-cinc peces. El registre dels paràmetres amb què s'ha produït cada peça s'ha realitzat amb una fulla de control de paràmetres, es mostra a l'annex A, Figura 16. Es disposa de la fulla de cada experimentació informàticament però no s'ha inclòs dins del TFG.

De les tres o quatre peces produïdes, se n'ha seleccionat una per a analitzar-la, la que té uns paràmetres mes ajustats al valor consigna buscat. El motiu d'aquesta selecció és el fet de comptar amb un temps limitat per a la realització del projecte, així com uns costos acotats.

Els paràmetres concrets de cada prova es poden veure a l'annex C: Resultats de l'experimentació. Aquest annex conté la informació següent:

- N° de peça escollida
- Percentatge de porositat en superfície
- Taula amb els valors consigna de l'experimentació i valor real mesurat amb què s'ha realitzat la peça
- Captura de l'anàlisi per micro – secció de la peça seleccionada

Un cop obtinguts tots els resultats, aquests s'avaluen seguint la metodologia descrita en el punt 2.3.5 Anàlisi estadístic. La realització dels resultats i anàlisi d'aquests es mostra a continuació.

3.1. Factor de qualitat S/N

3.1.1. Factor de qualitat S/N – senyal - soroll

Obtinguts per mitjà del Minitab, els resultats del factor de qualitat en relació a la senyal – soroll (mesura en dB) són els que es mostren a la Figura 9.

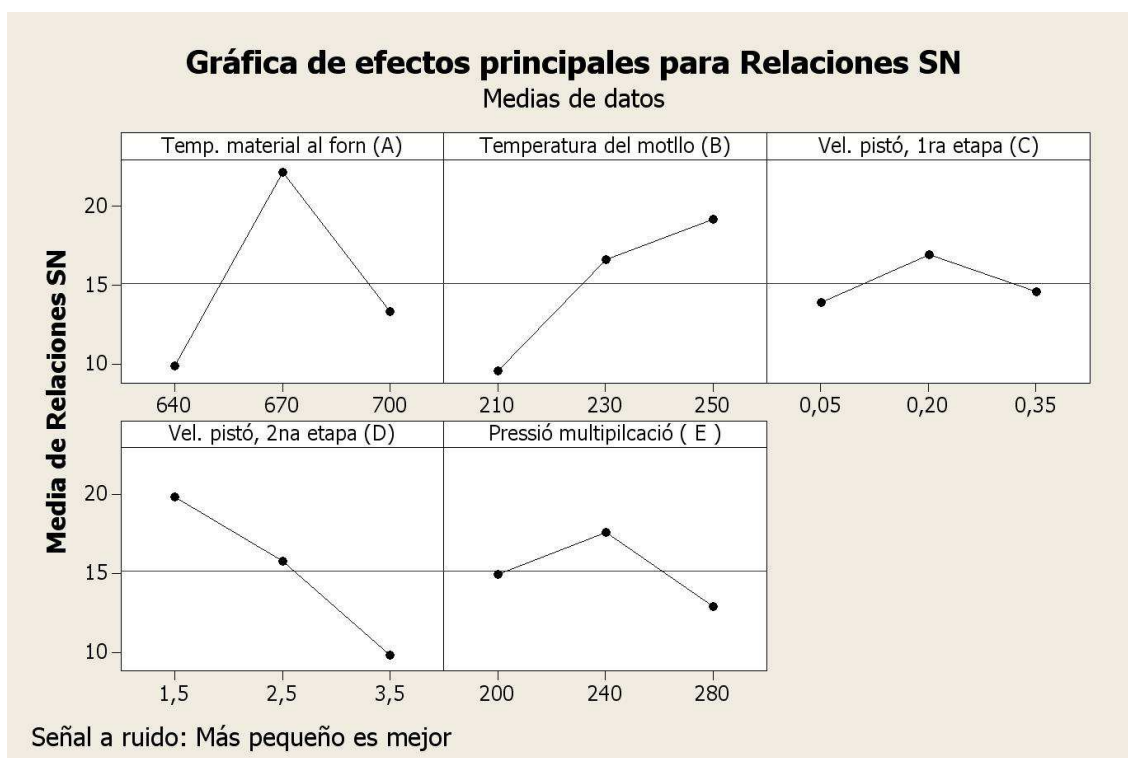


Figura 9: Gràfics de resposta S/N

Aquesta gràfica de resposta ens mostra que per a aquest estudi, els valors que donen com a sortida una mínima porositat són: A₁; B₁; C₁; D₃; E₃.

A₁ → 640°C; B₁ → 210°C; C₁ → 0.05 m/s; D₃ → 3.5 m/s; E₃ → 280 bar

Globalment ja d'entrada es poden observar certs paràmetres que divergeixen del que ens diu l'experiència. El primer resultat obtingut, la temperatura del material (A), s'obté un mínim global a 640°C (nivell 1), aquest és un resultat fora del comú ja que tal com he comentat en punts anteriors, l'aliatge a una temperatura excessivament baixa, com és el cas, accentua defectes de qualitat tals com xuclets o faltes de material per solidificacions prematures, etc. Per tant aquest resultat no pot donar-se com a correcte. El motiu d'aquest resultat erroni es pot deure a factors tals com el fet d'haver realitzat l'anàlisi sobre una sola mostra per experimentació, encara que aquesta sigui la que tingui els paràmetres de procés que més encaixen amb els valor consigna, dins de totes les realitzades per a cada prova. El resultat esperat era una progressiva disminució de la porositat a mesura que augmenta la temperatura del material, de manera que la temperatura del material baixa (640°C) tingués un factor de qualitat per sobre de la temperatura mitja del material (670°).

El segon resultat obtingut es tracta de la temperatura del mollo, en aquest cas l'anàlisi estadística també indica que el mínim global el trobem a una temperatura de 210°

(nivell 1). Aquest resultat també sembla, a priori, una dada anòmla doncs una temperatura del motlle baixa farà que la peça solidifiqui abans (fa l'acció de disminuir la temperatura del material). Això seria positiu ja que augmentaria la cadència de la producció però augmentaria també la dificultat en la injecció havent de treballar amb pressions més elevades del que és habitual, també augmenta la probabilitat d'obtenir defectes de qualitat. Probablement aquest resultat és degut al mateix que s'ha comentat per a la temperatura del material.

El tercer resultat obtingut es tracta de la velocitat del pistó en primera fase (aproximació lenta). En aquest cas el mínim es troba a 0,05m/s. Cal comentar que el valor del factor de qualitat però, és molt similar al de la velocitat màxima, 0,35m/s, quedant la velocitat mitja 0,20m/s amb un valor del factor de qualitat superior als dos anteriors. La interpretació dels resultats en aquest cas és complicada, deixant a entendre que la relació porositat – velocitat 1ra fase no és lineal. Com s'ha comentat anteriorment, existeix una “velocitat crítica” que fa que el material empleni el contenidor d'injecció atrapant una mínima quantitat d'aire. En aquest cas i vista la forma de la gràfica del factor de qualitat no es pot donar com a vàlid ni els 0,05m/s ni els 0,35m/s ja que es suposa que en un dels dos casos i ha algun factor incontrolable que fa que el resultat sigui erroni.

El quart resultat obtingut, velocitat del pistó en segona fase o emplenat del motlle obté un mínim a 3,5m/s. Aquest resultat no és l'esperat ja que una velocitat alta, com és el cas, afavoreix un règim molt turbulent durant la segona fase de la injecció. Aquest règim alhora, afavoreix un increment de la porositat. Val a dir que la tendència d'aquest paràmetre és totalment inversa a l'esperada tot i tenir una forma lineal.

Finalment pel que fa a pressió de multiplicació es pot observar un mínim a 280 bars. És el resultat esperat ja que precisament la multiplicació s'aplica per a disminuir el nivell de gasos atrapats. A més pressió menor porositat. Si bé la tendència obtinguda no és ben lineal, el resultat sí que quadra amb l'esperat.

3.1.2. Factor de qualitat – mitjanes

Per altra banda, s'han obtingut els resultats del factor de qualitat, però aquest cop mesurat per mitjanes (% porositat en superfície). Els resultats obtinguts en aquest cas són els de la Figura 10.

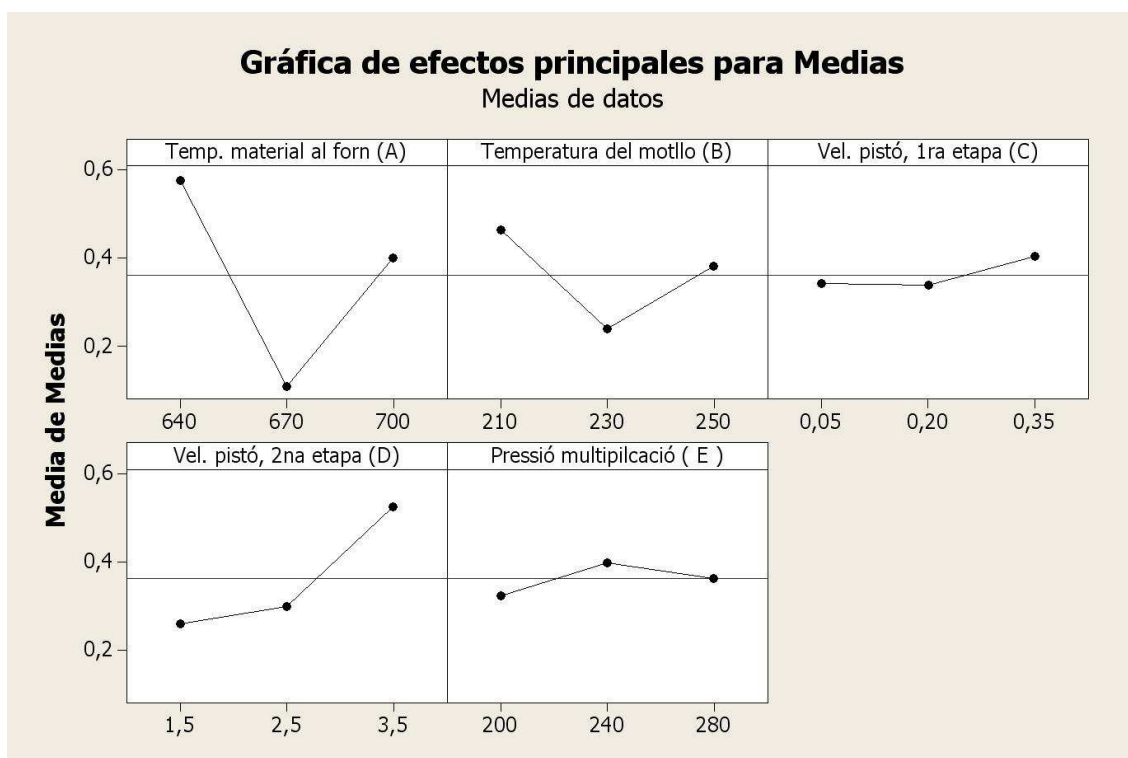


Figura 10: Gràfics de resposta - mitjanes

Aquesta gràfica de resposta ens mostra que per a aquest estudi, els valors que donen com a sortida una mínima porositat són: A_2 ; B_2 ; C_2 ; D_1 ; E_1 .

$A_2 \rightarrow 670^\circ\text{C}$; $B_2 \rightarrow 230^\circ\text{C}$; $C_2 \rightarrow 0.20 \text{ m/s}$; $D_1 \rightarrow 1.5 \text{ m/s}$; $E_1 \rightarrow 200 \text{ bar}$

El primer dels resultats obtinguts, sobre la temperatura del material, té un factor de qualitat mínim als 670°C (nivell 2). Es tracta del resultat esperat, doncs a una temperatura baixa (640°C) es produeixen solidificacions prematures, i a nivell més metal·lúrgic, degut a la naturalesa de l'aliatge saturat en silici, es produeixen punts durs a baixes temperatures. Per altra banda a una temperatura alta com són 700°C , es pot produir una major oxidació del material, que genera decantacions d'aquest dins del forn i que també afecta negativament a la qualitat final de la peça, ja que s'està modificant la homogeneïtat de l'aliatge. Així doncs es pot dir que tant la tendència del gràfic com els resultats mantenen una lògica i, a priori, es consideren vàlids.

A nivell de temperatura del motllo, s'obté un valor mínim a 230°C (nivell 2). La temperatura mínima de 210°C és la que ofereix com a sortida un valor major de porositat, que coincideix amb les dades esperades. Per altra banda la gràfica d'aquest paràmetre té la mateixa tendència que la de la temperatura del material, aquest fet també dóna veracitat als resultats. En aquest cas també es considerarà com a vàlid.

La velocitat del pistó en primera etapa té una gràfica amb una tendència molt horitzontal. D'aquí es pot deduir que l'efecte d'aquest paràmetre sobre la porositat és relativament baix. El mínim en aquest cas és a 0,20 m/s. Es tracta d'una velocitat mitja entre el nivell baix i alt, té sentit que aquesta velocitat s'aproximi a la velocitat crítica ja que l'objectiu d'aquesta velocitat és que produeixi en el material un efecte de portar la cresta de l'ona, que es genera amb el moviment, a la part superior del contenidor d'injecció minimitzant d'aquesta manera l'aire atrapat en primera fase.

El paràmetre velocitat del pistó en segona etapa mostra un valor mínim de porositat a 1,5 m/s (nivell 1). La tendència de la gràfica es pot veure que és augmentar el valor de la porositat a mesura que s'augmenta la velocitat d'emplenat del motllo, per tant és lineal. Aquest resultat té molt de sentit doncs s'estan evitant els règims turbulents que apareixen a velocitats altes, tal com s'ha comentat anteriorment. Així doncs també es considera aquest resultat com a vàlid.

Finalment pel que fa a la pressió de multiplicació en bars, la gràfica obtinguda per al factor de qualitat té una forma força horitzontal. D'entrada aquest factor xoca amb la idea general que es té dins de la indústria de que augmentar la pressió en tercera fase o multiplicació sempre redueix el nivell de gasos atrapats. Per altra banda també es pot pensar que, en combinació amb la resta de paràmetres adequats, no és necessari aplicar una multiplicació tan elevada per a obtenir un nivell de porositat correcte. En aquest cas i tenint en compte que augmentar la multiplicació té un efecte negatiu sobre totes les parts mecàniques amb desgast de la màquina, aquests resultats si són els correctes, que en consonància amb la resta de paràmetres obtinguts sembla que sí, són doblement beneficiosos.

3.1.3. Comparativa del factor de qualitat obtingut pels dos tipus d'anàlisi

-Resultats obtinguts pel mètode S/N:

$A_1 \rightarrow 640^{\circ}\text{C}$; $B_1 \rightarrow 210^{\circ}\text{C}$; $C_1 \rightarrow 0.05 \text{ m/s}$; $D_3 \rightarrow 3.5 \text{ m/s}$; $E_3 \rightarrow 280 \text{ bar}$

-Resultats obtinguts pel mètode de les mitjanes:

$A_2 \rightarrow 670^{\circ}\text{C}$; $B_2 \rightarrow 230^{\circ}\text{C}$; $C_2 \rightarrow 0.20 \text{ m/s}$; $D_1 \rightarrow 1.5 \text{ m/s}$; $E_1 \rightarrow 200 \text{ bar}$

Tal com es pot observar, els valors dels paràmetres obtinguts no són coincidents. El fet d'haver analitzat només una sola mostra per experimentació, tot i ser la que té uns paràmetres més ajustats a la consigna, dóna lloc a que el soroll, o el que és el mateix, els factors incontrolables, tinguin un pes molt important en alguns casos sobre la senyal correcta, fet que desestabilitza el resultat final, observat pel mètode S/N, donant errors en aquest cas.

Tal com s'ha comentat anteriorment, la mostra triada per al seu anàlisi, i que representa a la parametrització consigna de cada experimentació, s'ha seleccionat tenint en compte que tots o la majoria dels seus paràmetres fossin propers al valor consigna, o en altre cas, els millors de totes les peces realitzades per cada experimentació.

Cal destacar que en el cas del factor de qualitat en mitjanes, el resultat obtingut té sentit i sembla ser que els valors dels paràmetres trobats són correctes, segons s'ha raonat al punt 3.1.2.

3.2. Regressió lineal múltiple (MLR)

Un cop analitzats els resultats en funció de les variables d'entrada per mitjà del Minitab, s'han trobat els valors dels coeficients que minimitzen els residus. Amb aquests coeficients es pot extreure l'Eq. 4, que es tracta de la equació del model generada a partir dels resultats experimentals.

$$F(x) = 2,32 + 0,00294.A + 0,00208.B + 0,2.C + 0,132.D + 0,0005.E \quad (Eq. 4)$$

A la Figura 11 es mostra una comparativa dels resultats experimentals (blau) respecte a dues corbes de predicció (verd i lila) que s'han trobat aplicant l'MLR amb el Minitab.

Aquest gràfic te representats a l'eix d'abscisses totes les experimentacions realitzades de la u fins a la vint-i-set. A l'eix d'ordenades es pot veure representat el percentatge de porositat en superfície.

La corba blava reflexa els resultats experimentals que es recullen a la Taula 6, dins del punt 3.

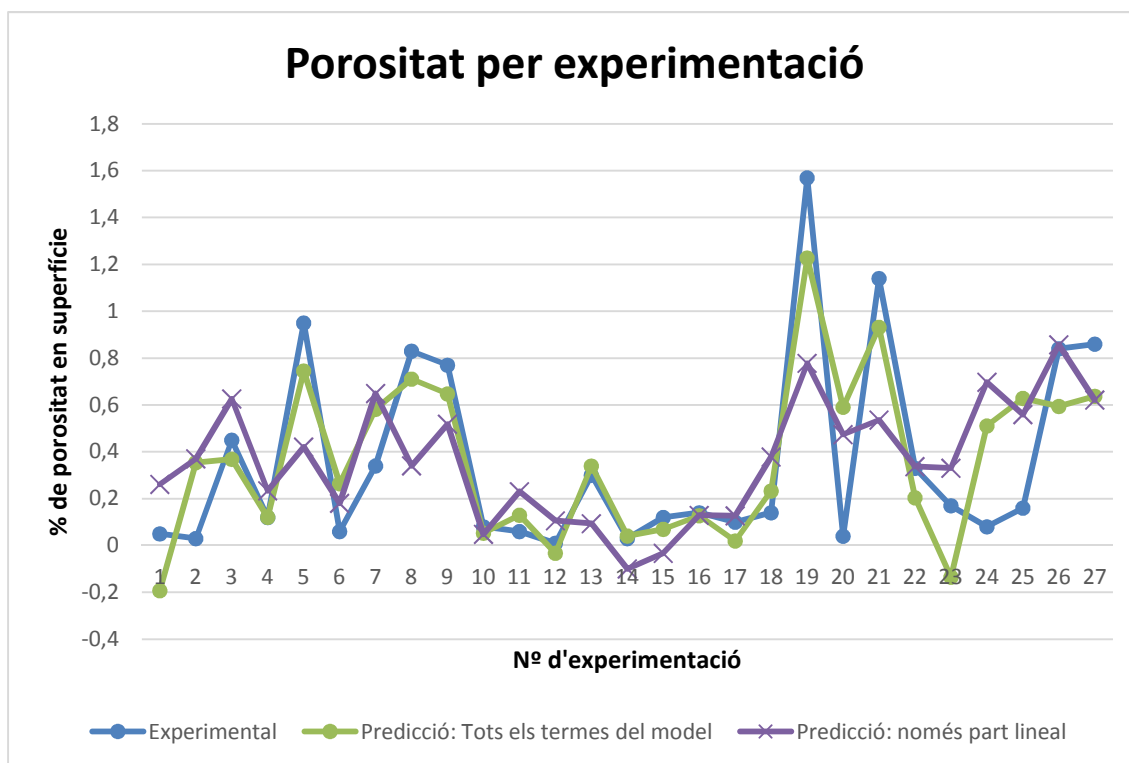


Figura 11: Gràfica de resultats experimentals i predits per nº d'experimentació

La corba lila representa els resultats predits tenint en compte només la part lineal del model (Eq. 4) obtinguda per mitjà dels resultats experimentals. Com es pot observar hi ha una divergència important entre el valor experimental i el valor predit, si bé la tendència és similar, l'ajust entre les dues corbes és molt dolent amb una $R^2 = 23.61\%$.

Un cop obtinguda i representada l'equació anterior i el seu corresponent anàlisi estadístic, el programa Minitab permet, a més, l'opció de representar una corba de predicció que té en compte una interacció entre tots els termes del model (representada en verd). Com es pot veure en aquest cas, les tendències són molt similars, tret d'alguna dada anòmla, però s'ajusta molt millor a la corba experimental.

Observant el gràfic es pot veure ràpidament que en les experimentacions de la deu fins la divuit són les que donen una sortida menor de porositat en mitjana. Aquestes experimentacions coincideixen amb les realitzades a temperatura del material 670°C. Es pot dir, doncs, que aquesta observació també dóna veracitat als resultats obtinguts i comentats al punt 3.1.2.

Aquesta falta d'ajust que s'observa es deu al fet d'haver realitzat una sola observació per experimentació principalment, el que significa que per a treballs futurs s'hauria d'aplicar un criteri estadístic més robust.

4. Conclusions finals

Aquest treball final de grau s'ha realitzat com a estudi preliminar per a la millora d'un procés de fosa per injecció d'alumini a altra pressió, ja que l'aparició de la porositat generava un rebuig del 10 – 15% dels components produïts. La finalitat d'aquest era trobar una configuració de la màquina d'injecció adequada, que permetés obtenir peces amb un baix nivell de porositat localitzada a la zona del dissipador i, per tant, que reduís el percentatge de rebuig.

Els resultats finals obtinguts i que es consideren vàlids són aquests:

- **Temperatura del material → 670 (°C)**
- **Temperatura del motllo → 230 (°C)**
- **Velocitat del pistó d'injecció en primera fase → 0.20 (m/s)**
- **Velocitat del pistó d'injecció en segona fase → 1.5 (m/s)**
- **Pressió de multiplicació en tercera fase → 200 (bar)**

Actualment s'està treballant des de molts àmbits amb estudis similars a aquest que estan permetent reduir cada dia més les limitacions de la fosa per injecció d'alumini, que no es tracta d'un procés nou ni avantguardista però que, per totes les avantatges que ofereix en front d'altres tipus de processos, conforma una gran quantitat de components per a tota la indústria en general i que, per tant, té un pes molt important dins de la cadena de subministrament de les empreses.

Aquest TFG pot aportar respecte d'altres estudis trobats en publicacions de referència, on l'experimentació es fa majoritàriament per mitjà de simulacions, el fet de comptar amb un disseny d'experiments dut a terme en una empresa i aplicat en una màquina d'injecció d'alumini i que, per tant, ha obtingut uns resultats reals. Alhora, els resultats semblen bastant convincents tal com s'ha comentat. Val a dir que estan pendents de validació; es pretén realitzar-la en la pròxima comanda d'aquest component.

Cal dir que prèviament a la validació de resultats, ja s'han observat millores en el rebuig al llarg de la realització de l'experimentació respecte de la comanda que es va realitzar anteriorment, així que es pot constatar que per mitjà d'una configuració del procés adequada es pot arribar a l'objecte d'aquest projecte.

També s'ha d'afegir que hi ha lloc per a la millora, per exemple, realitzant aquest mateix experiment amb un nombre d'observacions més ampli o bé realitzant una

simulació, amb algun software destinat a tal efecte, per tal de contrastar els resultats obtinguts.

Així doncs, considero que els objectius d'aquest treball final de grau s'han complert en línies generals i que, a més, s'ha aportat un punt de vista i d'anàlisi diferent al que és habitual dins de l'empresa.

5. Relació de documents

1.- Memòria i Annexos

- Annex A: Control i variació dels paràmetres - incidències
- Annex B: Metodologia per a la verificació de la porositat
- Annex C: Resultats de l'experimentació

2.- Pressupost

- Annex: Costos del projecte

6. Bibliografia

Anastasiou, K.S., 2002, "Optimitzation of the Aluminium Die Casting Process Based on the Taguchi Method", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B- Journal of Engineering Manufacture, vol. 216, no. 7, pp. 969-977.

Brevick, J.R., Armentrout, D.J., i Chu, Y.L., 1994, "Minimization of Entrained Gas Porosity in Aluminium Horizontal Cold Chamber Die Castings", Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of Sme, Vol XXII, pp. 41-46.

Garber, L. I Draper, A.B., 1979, "The Effects of Process Variables on the Internal Quality of Aluminium" Transactions of the tenth SDCE International Die Casting Exposition & Congress, St. Louis, Missouri, Paper No G-T79-022, pp.1-11.

Gordon, A., Meszaros, G., Naizer, J., i Mobley. C., 1993, "Equations for predicting the percent porosity in die castings", Die Casting Technology in harmony with the environment, NADCA, Cleveland, Ohio, T93-024, pp. 55-62.

Karni, Y., 1991, "Selection of process variables for die casting", PhD Thesis The Ohio State University, Ohio, USA.

Kirkman, S., 2003, Shrinkage porosity: A guide to correcting the problems, NADCA, Rosemont.

McClain, S.T., 1997, " A study of porosity quantification techniques and pore morphology in aluminium alloy castings" MS Degree thesis, Mississippi State University.

Sycros, G.P., 1-04-2003, " Die Casting Process Optimiztion Using Taguchi Method", Journal of Materials Processing Technology, vol. 135, no. 1, pp68-74.

Tsoukalas, V.D., 2003, "The effect of die casting machine parameters on porosity aluminium die castings", International Journal of Cast Metals Research, vol. 15, no. 6, pp. 581-588.

Quang-Cherng Hsu and Anh Tuan Do, "Minimum Porosity Formation in Pressure Die Casting by Taguchi Method," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2013, Article ID 920865, 9 pages, 2013. doi:10.1155/2013/920865

Verran, G.O., Mendes, R.P.K., i Rossi, M.A., 2006. "Influence of injection parameters on defects formation in die casting Al₁₂Si₁₃Cu: Experimental results and numeric simulation", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 179, no. 1-3, pp. 190-195.

ANNEXOS

A. Control i variació dels paràmetres – incidències

L'experimentació que s'ha realitzat, és real, no a través de la simulació sinó per mitja de proves físiques, és per això que els paràmetres requeriran d'un control per tal de verificar que aquests es mantenen dins dels límits de tolerància del valor consigna.

Recordar que els paràmetres que s'han tingut en compte són els següents:

- **Temperatura del material (°C)**
- **Temperatura del motllo (°C)**
- **Velocitat del pistó d'injecció en primera fase (aproximació lenta) (m/s)**
- **Velocitat del pistó d'injecció en segona fase (emplenat del motllo) (m/s)**
- **Pressió de multiplicació en tercera fase (compactació del material) (bar)**

- Temperatura del material al forn (°C)

Per a la lectura de la temperatura del material al forn, s'ha utilitzat la sonda piromètrica de la que disposa el forn. A la Figura 12, es pot veure a l'indicador de l'esquerra, la temperatura inferior marca el valor consigna en el que es para el forn i el valor superior marca la temperatura actual de l'aliatge.



Figura 12: Detall de l'indicador de temperatura del material

- Temperatura del motlle (°C)

Per a la mesura de la temperatura del motlle s'ha utilitzat un termòmetre per infrarojos model RAYTEK Raynger ST. Aquest tipus de termòmetres mesuren la temperatura a

la superfície d'un objecte captant l'energia que emet i transmet una superfície, en aquest cas el motlle.

La mesura s'ha pres sobre la zona de l'IGBT tot just després d'extreure la peça i sempre abans d'aplicar el desemmotllant. Per a la correcta mesura de la temperatura, la zona de l'IGBT s'ha aproximat a un oval amb la diagonal més gran de 3cm. L'aparell té una distància d'enfocament (per a la correcta presa de la temperatura) de D:S 8:1, per tant si volem obtenir la temperatura en una zona de 3cm, la temperatura presa s'ha d'agafar des de 24 cm aproximadament (Figura 13).

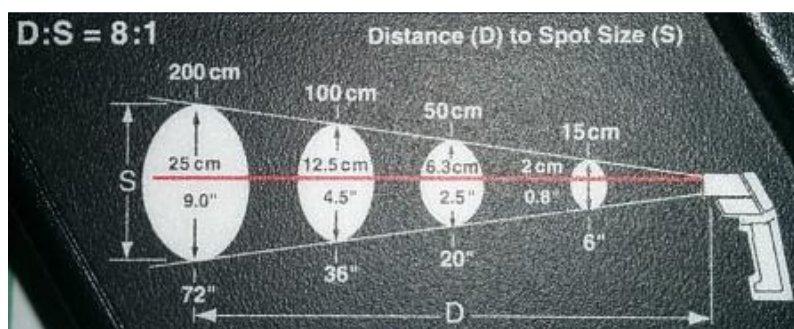


Figura 13: Detall per al correcte ajust de la distància

Pel que fa a la variació de la temperatura del motlle, aquest és un factor complicat de variar. Per tal d'assolir una temperatura més baixa s'activa la refrigeració del motlle. Aquesta refrigeració era bastant pobre en la part mòbil del motlle, que era la part d'estudi, pel que la temperatura no baixava suficientment. Les peces que podíem aconseguir amb una temperatura de motlle baixa eren les primeres després d'un canvi de paràmetres (per estar el motlle més temps sense injectar).

Pel que fa a una temperatura de motlle alta, era suficient en fer unes quantes injeccions prèvies per a tenir el motlle estabilitzat a alta temperatura. Per a la temperatura intermèdia es combinava la refrigeració del motlle semioberta amb peces inicials amb motlle semi fred.

Val a dir que el rang inicial dels valors de temperatura que es volia utilitzar era de 180 – 220 – 260°C, però era complicat d'obtenir pel que es va ajustar a un rang menor de 210 – 230 -250°C. Aquest fet també resta veracitat alhora de calcular els resultats, doncs s'han reduït molt les diferències entre nivells, que no seria un problema en cas de ser una experimentació per simulació, però sí que ho és en aquest cas.

- Velocitat del pistó en primera i segona fase (aproximació lenta i emplenat del motllo)
(m/s)

Tal com s'ha comentat, l'experimentació s'ha realitzat a la màquina 312 ja que és la única que permet una lectura directa de les velocitats del pistó durant la injecció. Això es fa per mitja d'uns gràfics de control que, entre d'altres funcions, permeten veure les velocitats i pressions mitjanes i instantànies. Es pot veure el gràfic a la Figura 14.

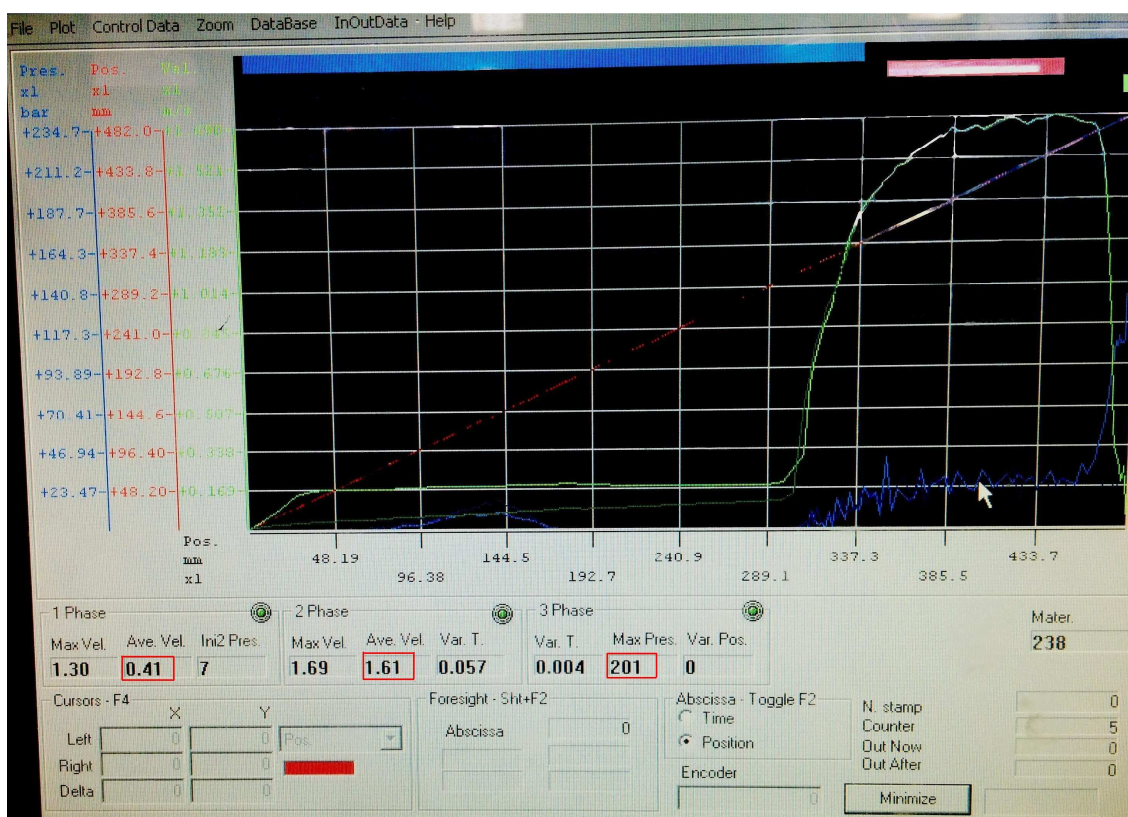


Figura 14: Gràfica de sortida velocitats i pressions

Aquest gràfic representa tot el recorregut del pistó (eix horitzontal) i en l'eix vertical es mostren les velocitats i pressions. Les mitjanes es calculen segons les marques superiors de primera fase blau (la que fa un major recorregut del pistó), segona fase vermell i tercera fase verd (recorregut mínim del pistó). Aquestes marques es mouen segons a on es posa l' inici de cada fase. Els resultats poden observar-se a la part inferior. En aquest cas les marques per fase no estaven ben situades, es pot veure que no coincideixen amb les fases d'injecció.

- Pressió de multiplicació en tercera fase (compactació del material) (bar)

La pressió de multiplicació s'obté per mitjà del gràfic igualment, considerem en aquest cas la pressió màxima. Observar que durant la tercera fase, el pistó pràcticament no avança ja que és una fase de compactació del material on el motlle ja està ple.

Un dels punts que s'ha tingut en compte durant la realització de peces és que la pressió de multiplicació, al fer un canvi del seu valor, no s'aplica immediatament a la següent peça injectada sinó que s'ha d'esperar a la següent ja que el nitrogen líquid que permet d'aconseguir unes pressions tan elevades s'ha de carregar al final de cada injecció per a la següent.

- Entrada de paràmetres a màquina

Per a realitzar els canvis de paràmetres, val a dir que la màquina no accepta la introducció de dades finals com serien velocitats o pressions, sinó que treballa amb obertures parcials d'electrovàlvules o valors de pressió bi-constant (Figura 15).

Així doncs va ser necessari prèviament, realitzar una equivalència entre els valors màquina i els valors finals, es mostra a la Taula 7.

Taula 7: Equivalència valors màquina i valors desitjats

Paràmetre	Rang	Nivell 1		Nivell 2		Nivell 3		Unitats
		Velocit.	% obertura	Velocit.	% obertura	Velocit.	% obertura	
Vel. pistó, 1ra etapa (C)	0,05-0,35	0,05	+/-15%	0,2	+/-30%	0,35	+/-45%	m/s
Vel. pistó, 2na etapa (D)	1,5 - 3,5	1,5	+/-35%	2,5	+/-45%	3,5	+/-55%	
		Pres. biconst.		Pres. biconst.		Pres. biconst.		
		Pressió		Pressió		Pressió		
Pressió de multiplicació (E)	200 - 280	200	+/-100	240	+/-65	280	+/-50	bar

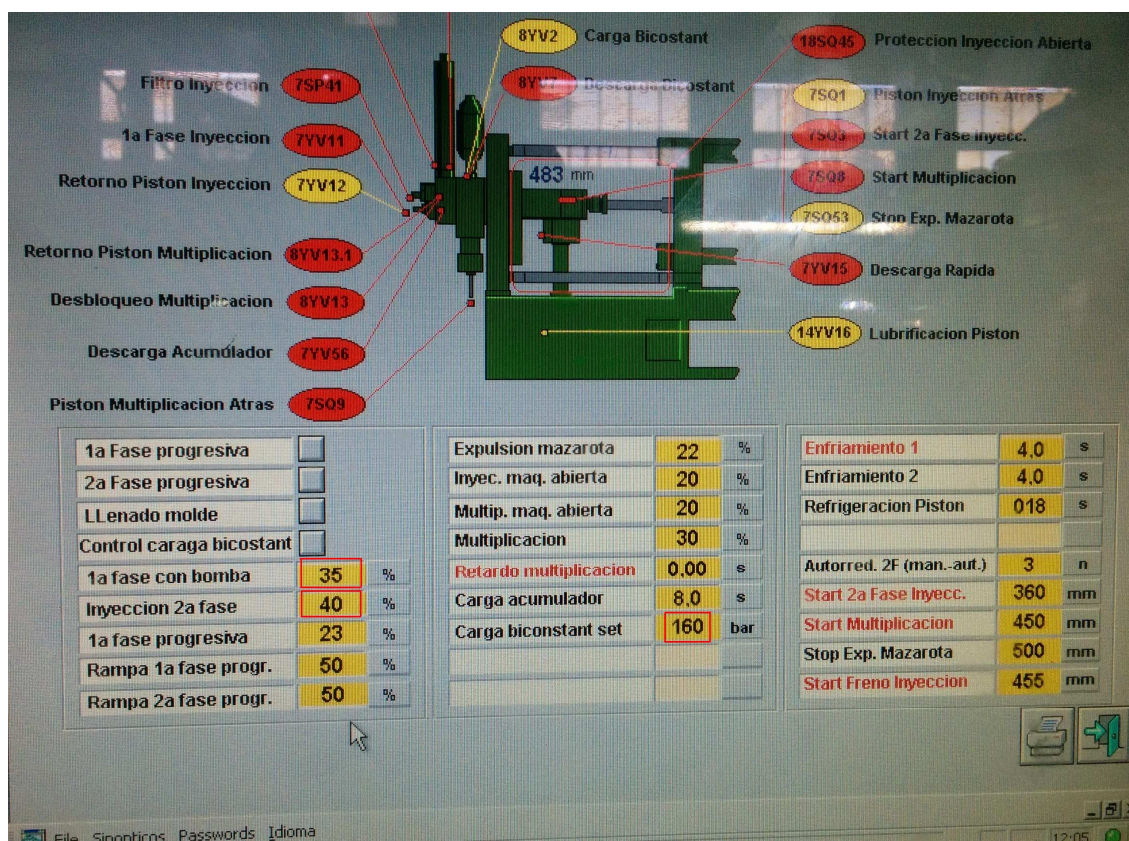


Figura 15: Pantalla de control dels paràmetres de procés

Per últim cal destacar que per a la realització de totes les proves es va fer un registre dels paràmetres de procés associat a cada peça, d'aquesta manera es va preveure de que podria aportar informació de valor alhora d'interpretar els resultats així com de separar peces defectuoses, valors fora del comú, etc.

Previ a la verificació de les peces de l'experimentació es va fer una selecció, per a cada una de les 27 proves, de la peça que s'ajustava més al paràmetres consigna, dins de tolerànci, utilitzant aquest registre del que es mostra una captura a la Figura 16.

Fulla de control de paràmetres injecció

Data:	09/07/2015
--------------	------------

Nº prova: P-019

Nº fulla: 1

Temp. Ambient: 35°C

Paràmetre	Valor						Unitat
	Consigna	M1	M2	M3	M4	M5	
Temperatura del material al forn (A)	640	640	645	648	650		°C
Temperatura del motllo (B)	260	241	242	246	248		°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,05	0,09	0,09	0,09	0,09		m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	3,5	2,48	3,83	3,74	3,74		m/s
Pressió de multiplicació (E)	240	268	236	272	250		bar
PEÇA NO OK				A VERIFICAR			

Comentaris:

- Peça amb aspecte correcte

Figura 16: Fulla de control i registre dels paràmetres d'injecció

B. Metodologia per a la verificació de la porositat localitzada

En aquest annex es veurà com s'ha realitzat l'anàlisi de la porositat en superfície per a cada peça.

Equip utilitzat:

- Microscopi: *Veho® Discovery VMS-004 Deluxe*
- Suport microscopi: Gramil adaptat *TESA HITE® 300*
- Taula calibrada
- Utillatges per al centrat de la imatge
- Software captació d'imatges: *Microcapture®* (propi de *Veho*)
- Software d'anàlisi de la imatge *AutoCAD® 2007*
- Fulla d'excel per a l'anàlisi dels resultats
- Fulla d'excel de registre dels resultats

Obtenció de la imatge: micro - secció

Per a la obtenció de les imatges s'ha fet un petit muntatge experimental (Figura 17) que ha permès d'obtenir aquestes imatges. Està compost de la càmera – microscopi, el suport de la càmera, que es tracta d'un gramil adaptat que permet de realitzar un enfocament combinat amb el del microscopi, i uns utillatges que permeten de posicionar correctament la peça. Tot això sobre una taula calibrada que permet de mantenir la perpendicularitat de la imatge.

La zona d'estudi és la zona de dissipació de calor que està en contacte directe amb l'IGBT, es tracta d'una zona de superfície 20x30mm amb un forat roscat de M4 centrat en aquesta superfície (Figura 18).

Aquesta imatge s'obtindrà finalment amb el software que ofereix la mateixa càmera que és un software molt senzill que només permet d'obtenir la imatge sense tractament.



Figura 17: Muntatge experimental per a la obtenció de les imatges

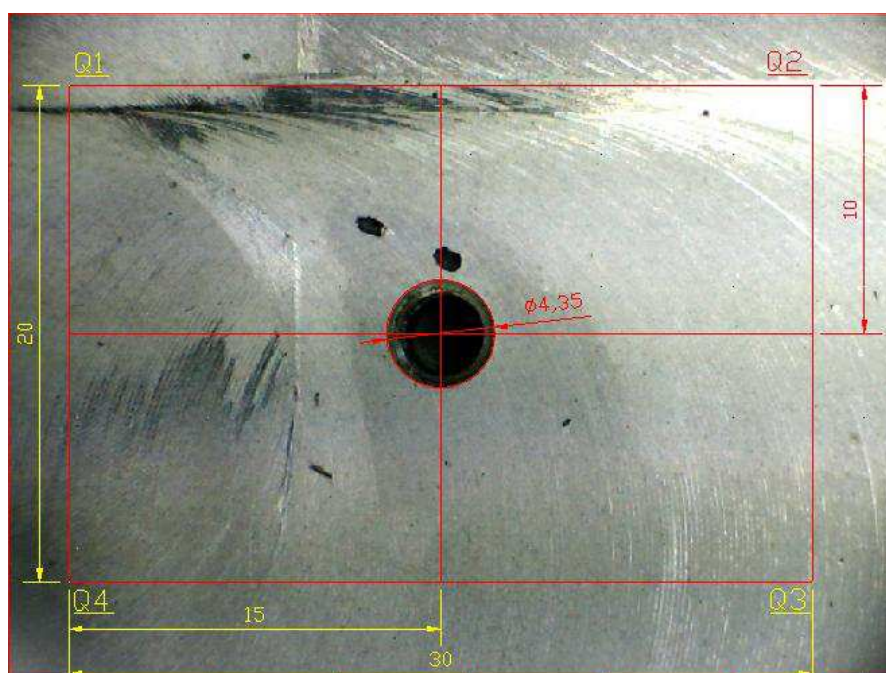


Figura 18: Zona d'estudi superfície IGBT

Anàlisi de la imatge i registre dels resultats

Un cop obtinguda la imatge, aquesta es processa amb AutoCAD, es mesura el diàmetre central conegut i es visualitza el diàmetre que apareix al CAD, a partir d'aquests dos es genera un factor d'escala que permet passar de les mides originals del CAD a les mides reals.

D'aquesta manera es pot marcar la superfície de control sobre la imatge així com dividir-la en quatre quadrants (Figura 18 anterior).

Posteriorment es passa a marcar la superfície amb porus manualment a través de la figura geomètrica que més s'adapta a la superfície del poru i es registra a la fulla de control en excel (Figura 20) per quadrants. Aquesta fulla dóna com a sortida el percentatge de porositat sobre el total de la superfície (per quadrants i general), però també s'ha preparat per a obtenir més paràmetres com serien diàmetre del poru major, porus ignorats, concentració de porositats, etc, per si interessen en un futur. Les dades de cada quadrant es traslladen a la fulla de resum (Figura 19) obtenint la porositat total en superfície.

Finalment tot el conjunt de resultats es registren en una única taula de resum de resultats, que és la que s'ha inclòs en el punt 3, Taula 6.

Fitxa avaluació de porositat

Resum resultats

Data anàlisi	04/08/2015	Zona analitzada	IGBT	
Data injecció	09/07/2015	Àrea de referència total	20x30	600 mm ²
Experimentació nº	26	Nº de sub-àrees	4	
Nº mostra	2	Superfície sub-àrees	10x15	150 mm ²

Fitxa de paràmetres injecció

-

	<i>Resultat</i>	<i>Quadrant</i>	<i>Comentaris</i>
%Porositat sobre superfície referència	0,84%	-	
Diàmetre del poru major/longitud (ø)	1	Q3	mm
Porus ignorats (U)	-		unitats
Nº de porus permesos (Z)	-		unitats
Distància adjacent entre porus (A)	-		mm
Acumulació de porus (H)	-		
Porositat localitzada (N)	-		

Figura 19: Fitxa d'anàlisi de la porositat - resum

Analisi de la porositat

Quadrant 1

Dades inicials

Secció analitzada	
H	10 mm
L	15 mm
Superfície (+)	150 mm ²
Superf. Real referència	146,2846 mm ²
Augments	-
Dimensió de referència	4,35 mm

Forat roscat (-)		
Ø	4,35	14,8617 mm ²
1/4 superfície		3,715424 mm ²

Porus per diàmetre

Nº	Diàmetre	Superf.
1.	0,15	0,017671
2.	0,15	0,017671
3.	0,18	0,025447
4.	0,18	0,025447
5.	0,2	0,031416
6.	0,21	0,034636
7.		0
8.		0
9.		0
10.		0
11.		0
12.		0
13.		0
14.		0
15.		0
16.		0
Subtotal		0,152289 mm ²

Porus per superfície

Nº	Superf.
1.	2,608
2.	
3.	
4.	
5.	
6.	
7.	
8.	
9.	
10.	
11.	
12.	
13.	
14.	
15.	
16.	
Subtotal	2,608 mm ²

Superf. Referència	146,285 mm ²
Superf. amb porus	2,76029 mm ²

% Superf. Porus	1,89%		
Diàmetre del poru major (ø)	0,21	2,608	mm
Dist. Adjacent entre porus (A)			mm
Acumulació de porus (H)			
Porositat localitzada (N)			

Figura 20: Fitxa d'anàlisi de la porositat – quadrant

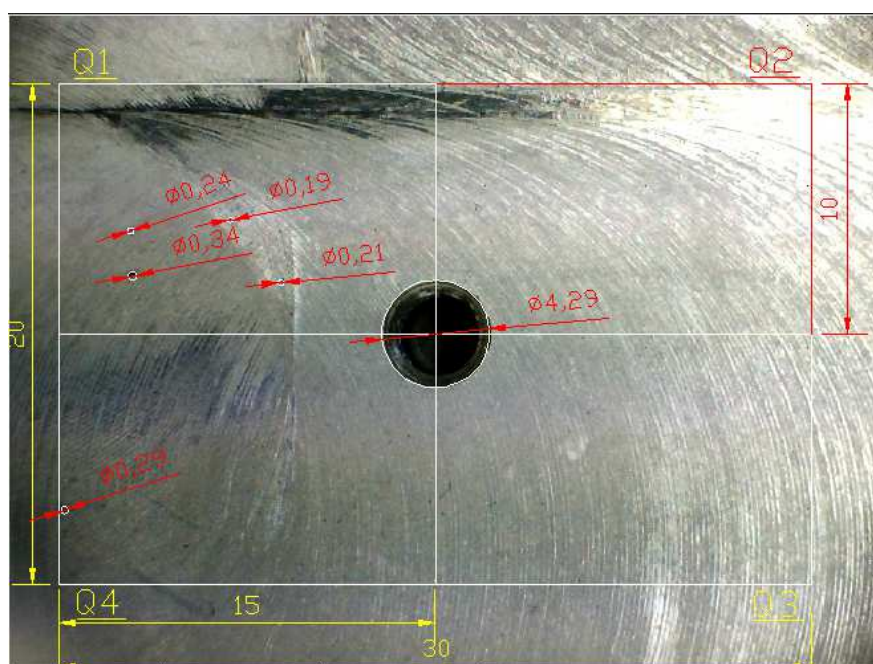
C. Resultats de l'experimentació

En aquest annex s'afegiran un per un tots els resultats que s'han obtingut de l'experimentació, segons la metodologia descrita a l'annex C. També s'inclouran els paràmetres de procés en què s'ha obtingut aquella peça. Per a algunes de les proves realitzades, s'ha escollit una peça concreta amb algun paràmetre fora de tolerància, en aquest el valor del paràmetre està ressaltat amb color vermell.

Experimentació 1:

- N° de peça escollida → 2
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.05%

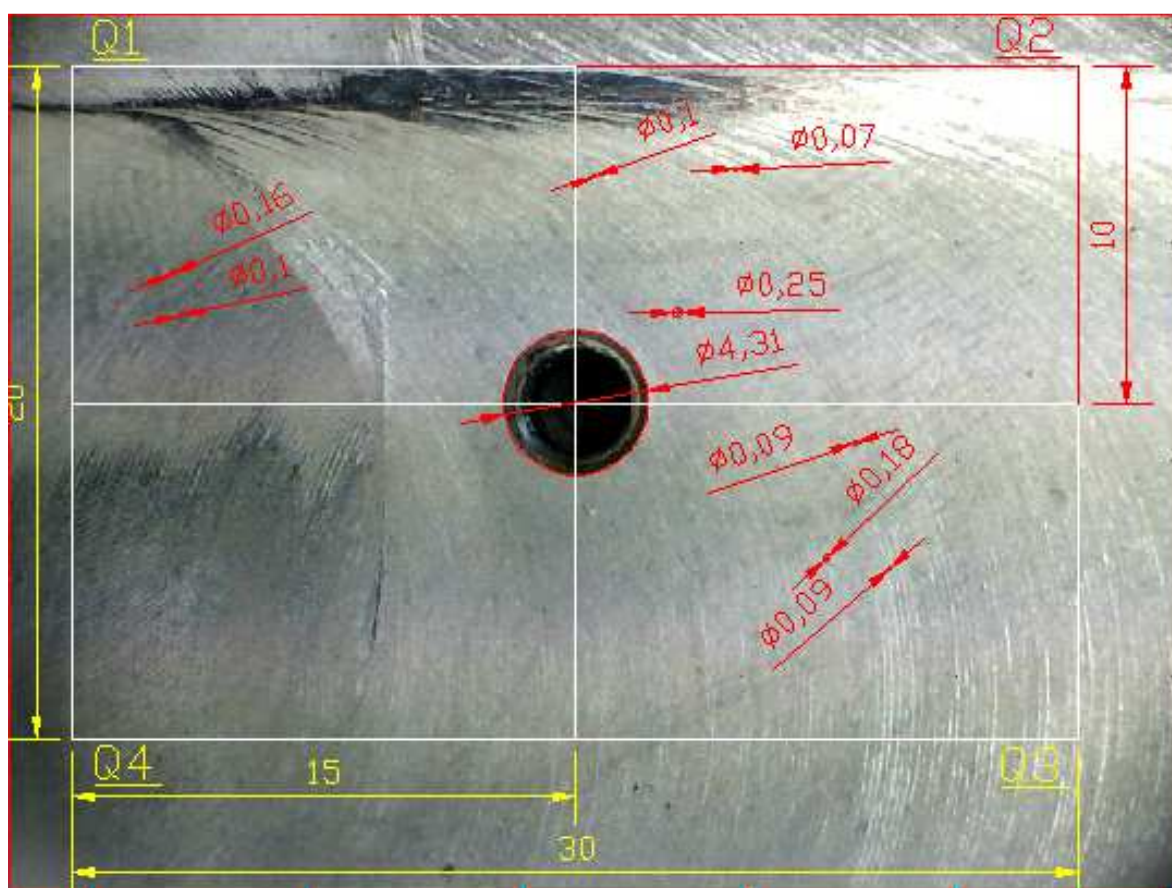
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M2	
Temperatura del material (A)	700	695	°C
Temperatura del motllo (B)	250	250	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,05	0,08	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	1,5	1,46	m/s
Pressió de multiplicació (E)	200	196	bar



Experimentació 2:

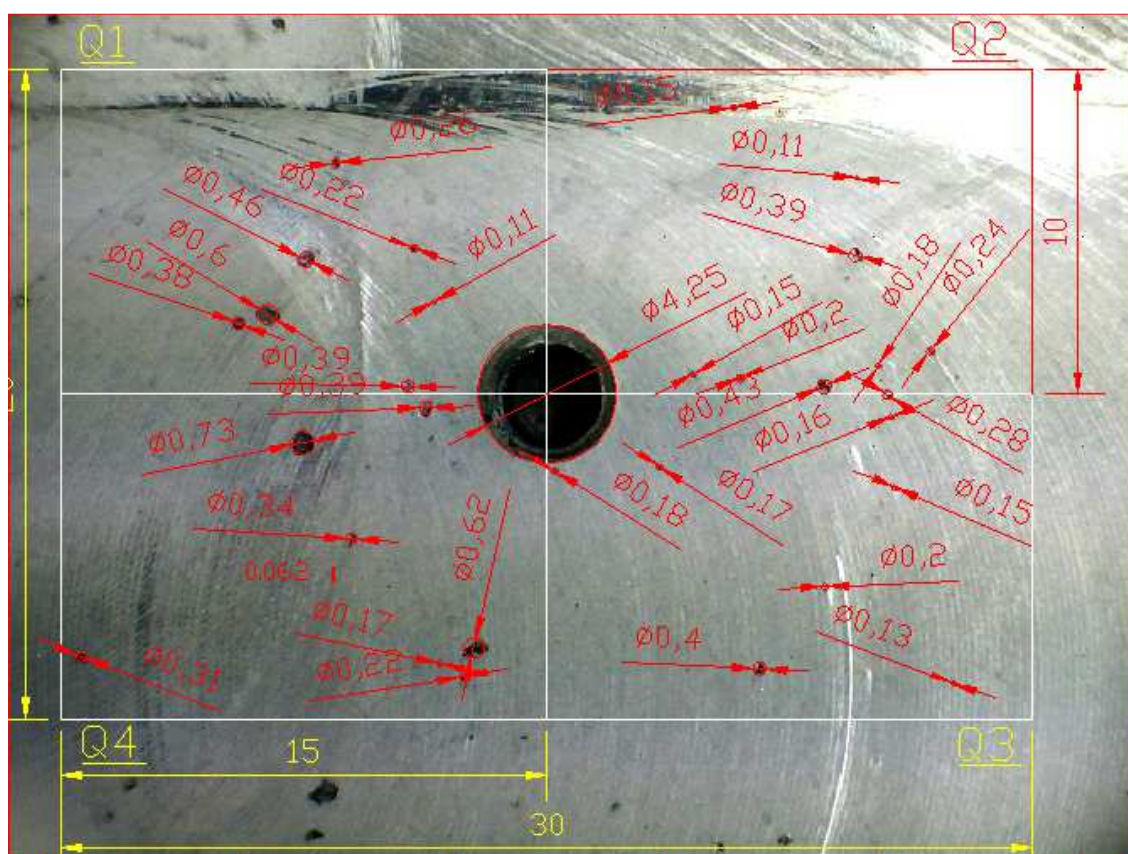
- N° de peça escollida → 3
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.03%

Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M3	
Temperatura del material (A)	700	703	°C
Temperatura del motllo (B)	250	240	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,2	0,2	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	2,5	2,47	m/s
Pressió de multiplicació (E)	240	232	bar



- N° de peça escollida → 2
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.45%

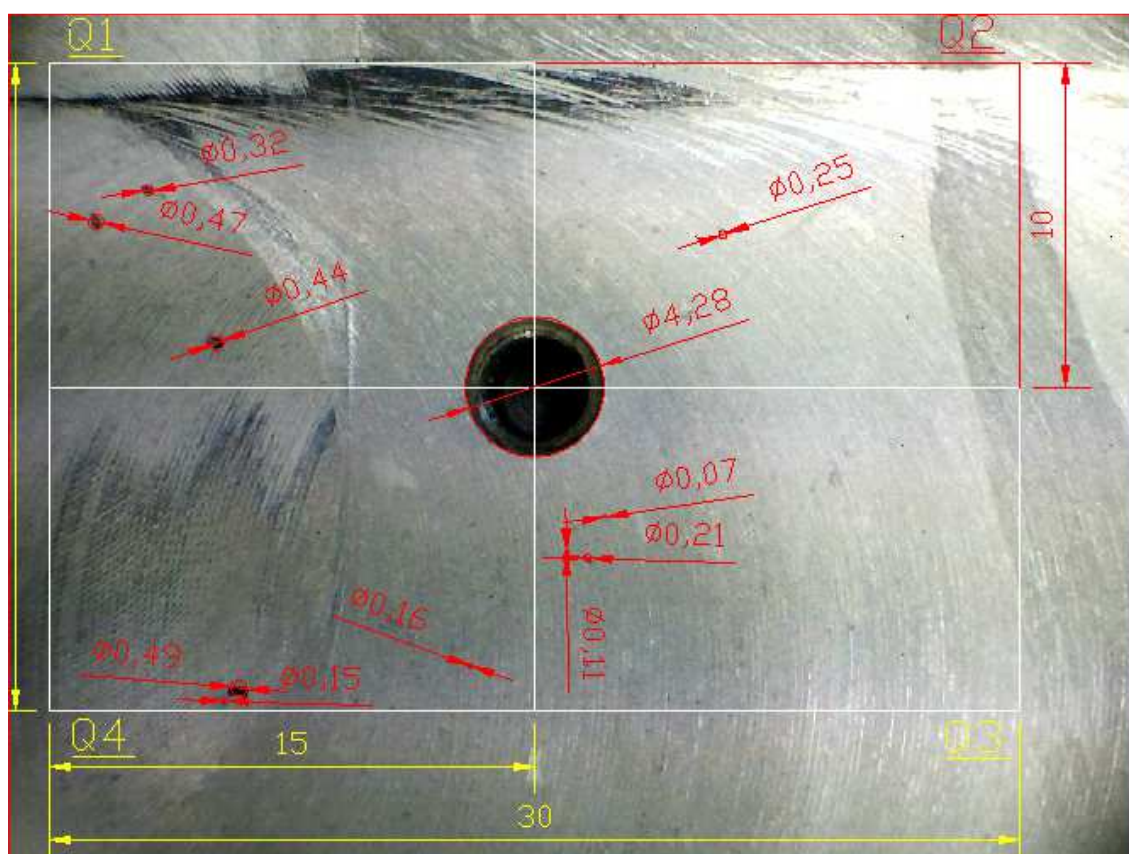
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M3	
Temperatura del material (A)	700	708	°C
Temperatura del motllo (B)	250	244	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,35	0,35	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	3.5	3.94	m/s
Pressió de multiplicació (E)	280	257	bar



Experimentació 4:

- N° de peça escollida → 2
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.12%

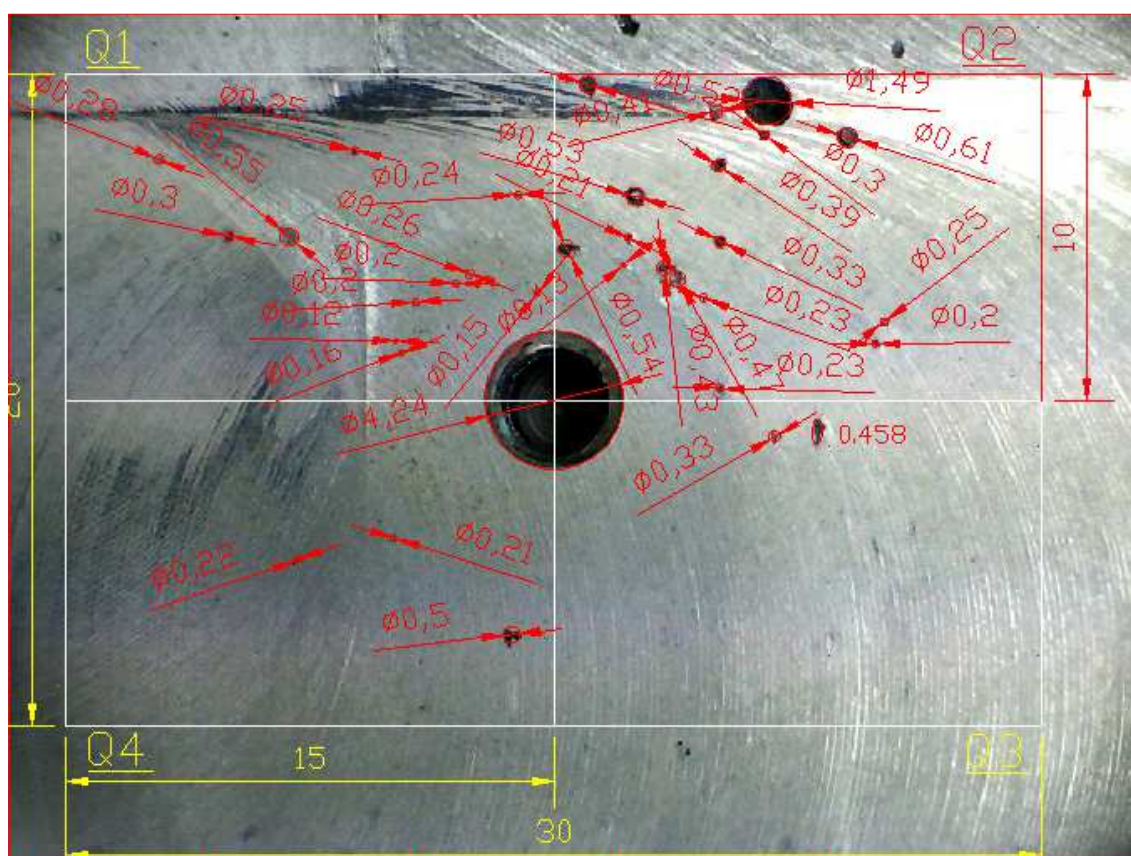
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M2	
Temperatura del material (A)	700	712	°C
Temperatura del motllo (B)	230	238	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,05	0.10	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	2.5	2.62	m/s
Pressió de multiplicació (E)	240	245	bar



Experimentació 5:

- N° de peça escollida → 2
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.95%

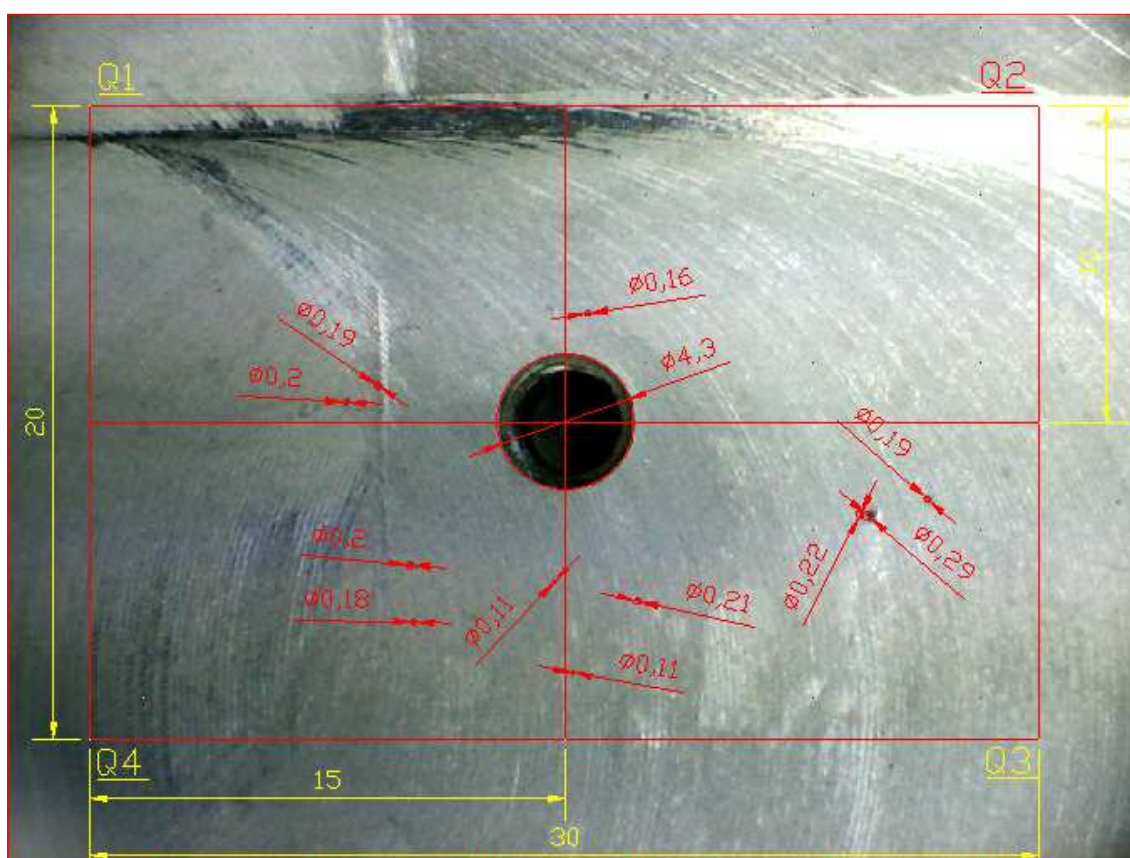
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M2	
Temperatura del material (A)	700	687	°C
Temperatura del motllo (B)	230	235	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,20	0.20	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	3.5	3.95	m/s
Pressió de multiplicació (E)	280	262	bar



Experimentació 6:

- N° de peça escollida → 1
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.06%

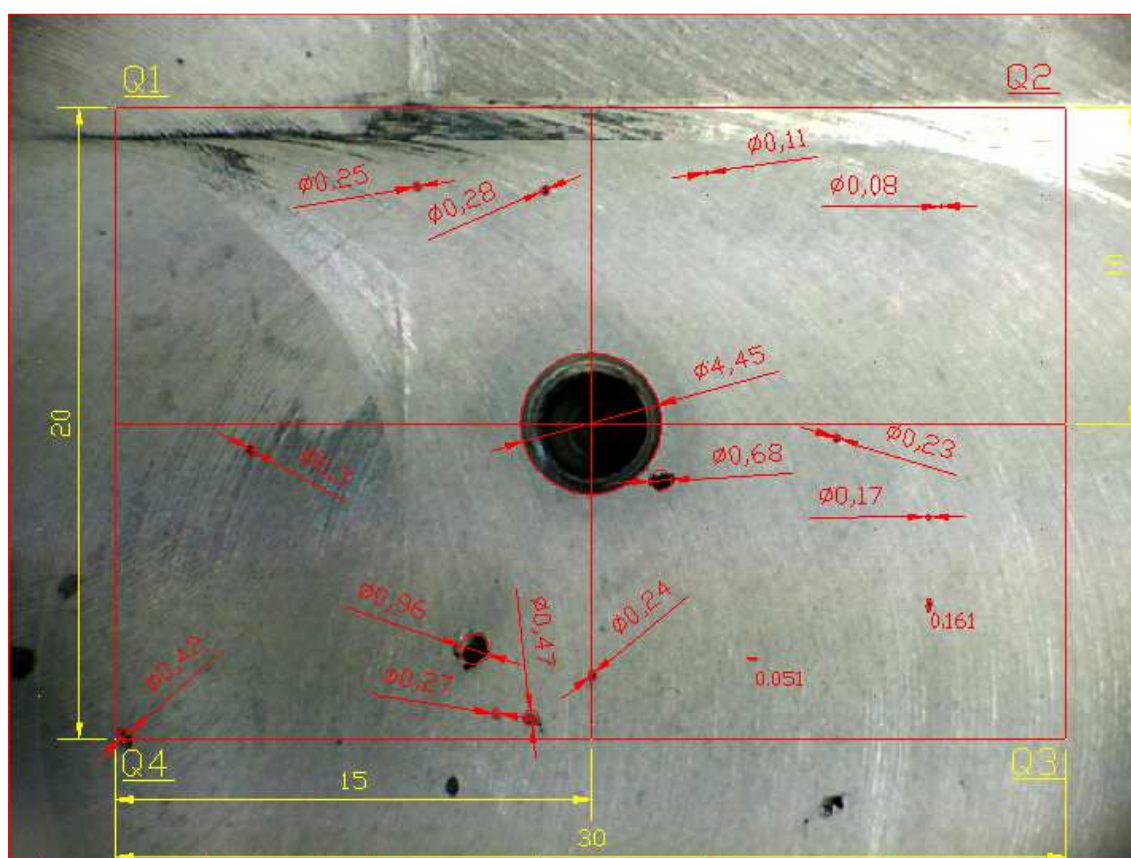
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M1	
Temperatura del material (A)	700	686	°C
Temperatura del motllo (B)	230	229	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,35	0.34	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	1.5	1.60	m/s
Pressió de multiplicació (E)	200	214	bar



Experimentació 7:

- N° de peça escollida → 3
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.34%

Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M3	
Temperatura del material (A)	700	696	°C
Temperatura del motllo (B)	210	237	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,05	0.10	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	3.5	3.71	m/s
Pressió de multiplicació (E)	280	273	bar



Experimentació 8:

- N° de peça escollida → 2
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.83%

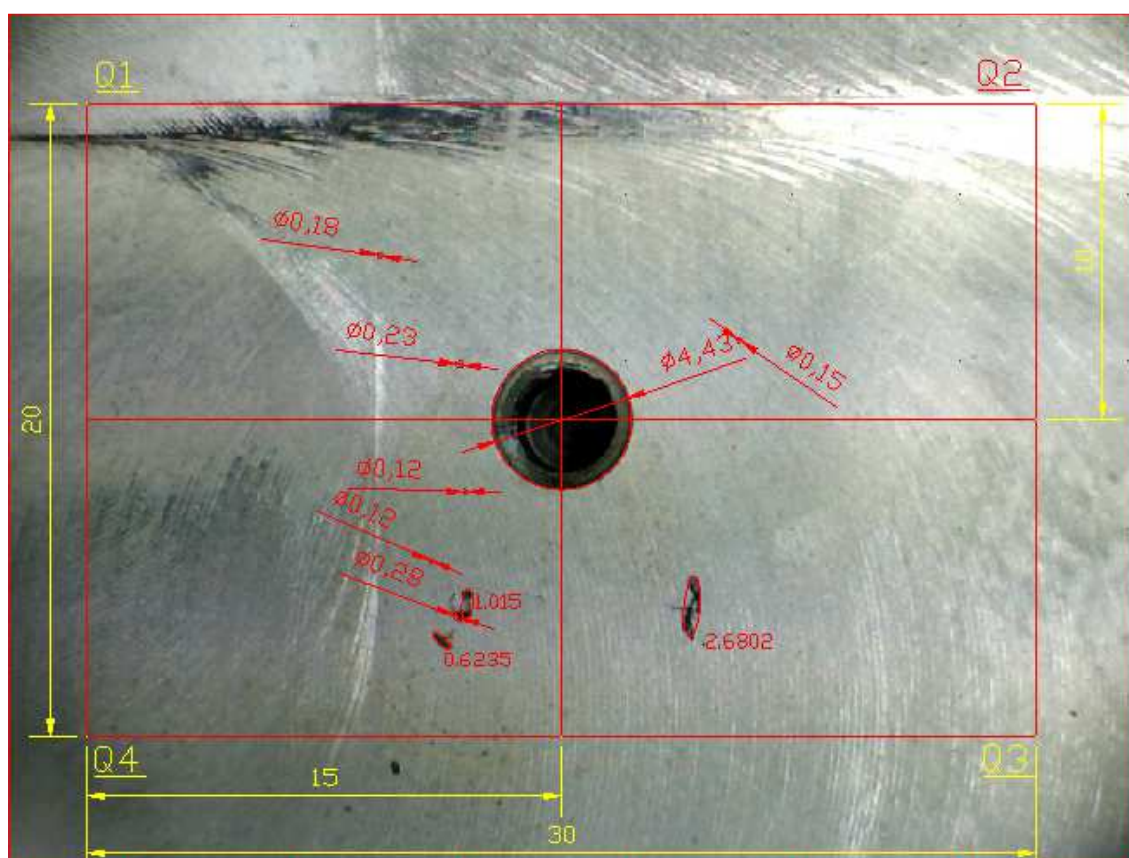
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M2	
Temperatura del material (A)	700	702	°C
Temperatura del motllo (B)	210	240	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,20	0.20	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	1.5	1.55	m/s
Pressió de multiplicació (E)	200	204	bar



Experimentació 9:

- N° de peça escollida → 2
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.77%

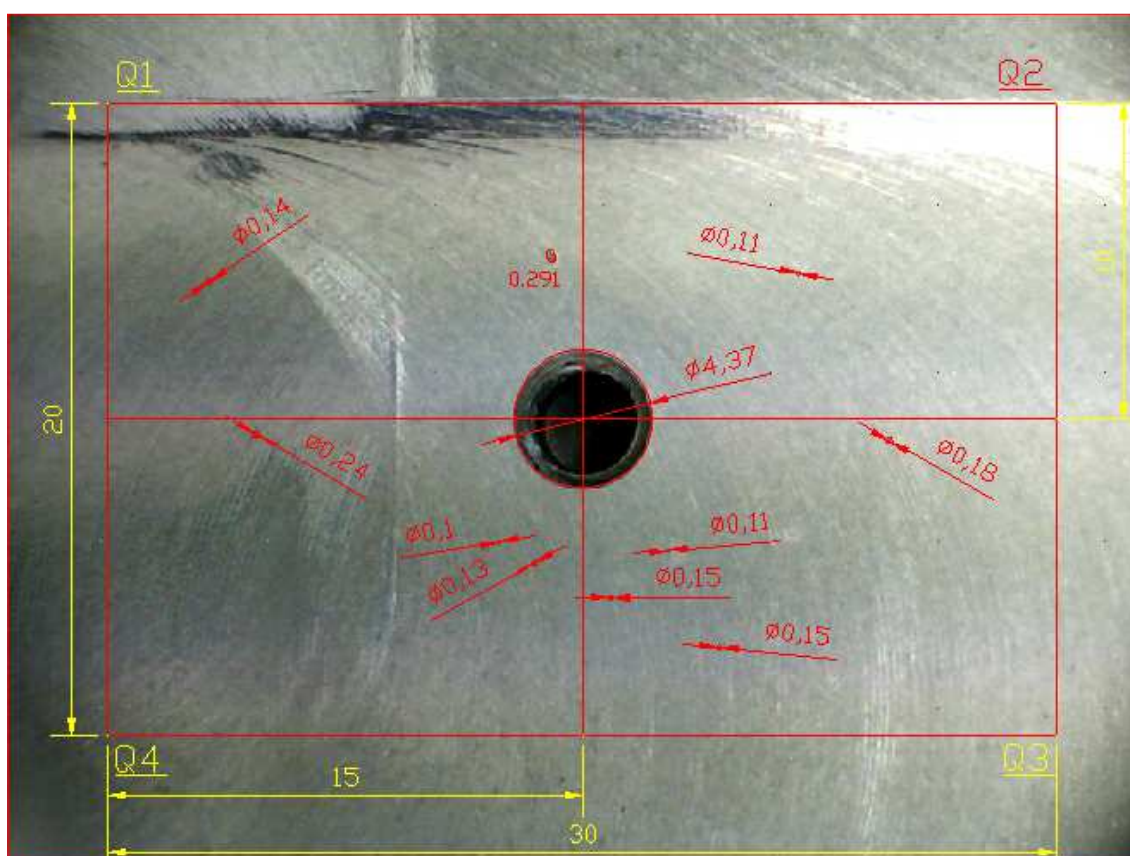
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M2	
Temperatura del material (A)	700	690	°C
Temperatura del motllo (B)	210	215	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,35	0.35	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	2.5	2.82	m/s
Pressió de multiplicació (E)	240	258	bar



Experimentació 10:

- N° de peça escollida → 2
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.08%

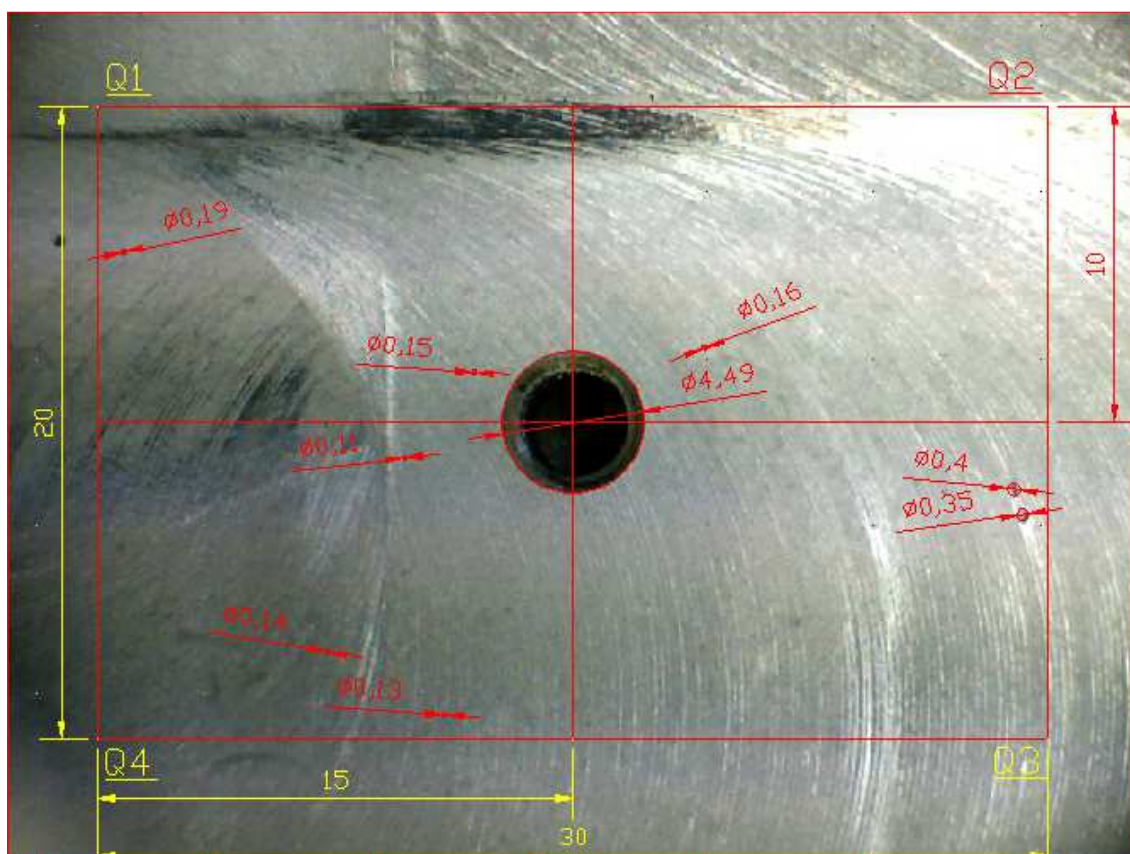
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M2	
Temperatura del material (A)	670	657	°C
Temperatura del motllo (B)	250	248	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,05	0.09	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	2.5	2.48	m/s
Pressió de multiplicació (E)	280	277	bar



Experimentació 11:

- N° de peça escollida → 3
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.06%

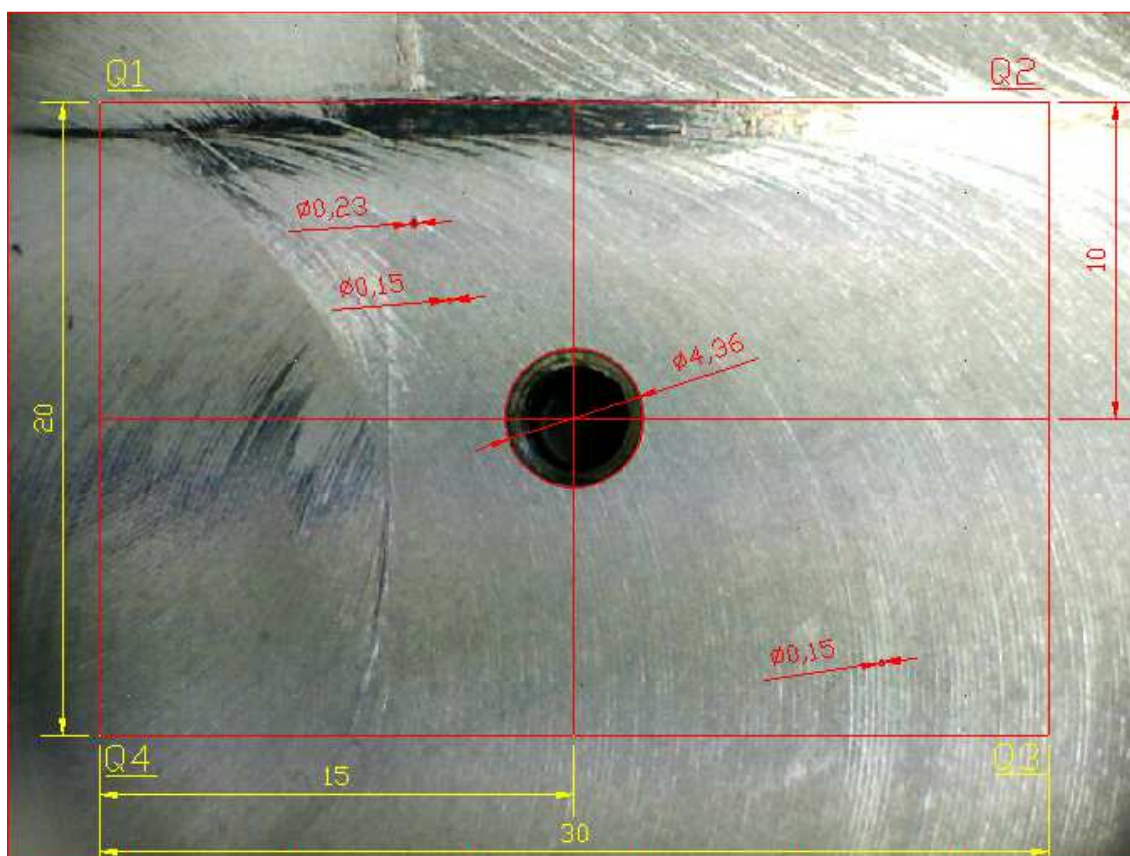
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M3	
Temperatura del material (A)	670	667	°C
Temperatura del motllo (B)	250	240	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,2	0.20	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	3.5	4.08	m/s
Pressió de multiplicació (E)	200	219	bar



Experimentació 12:

- N° de peça escollida → 2
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.01%

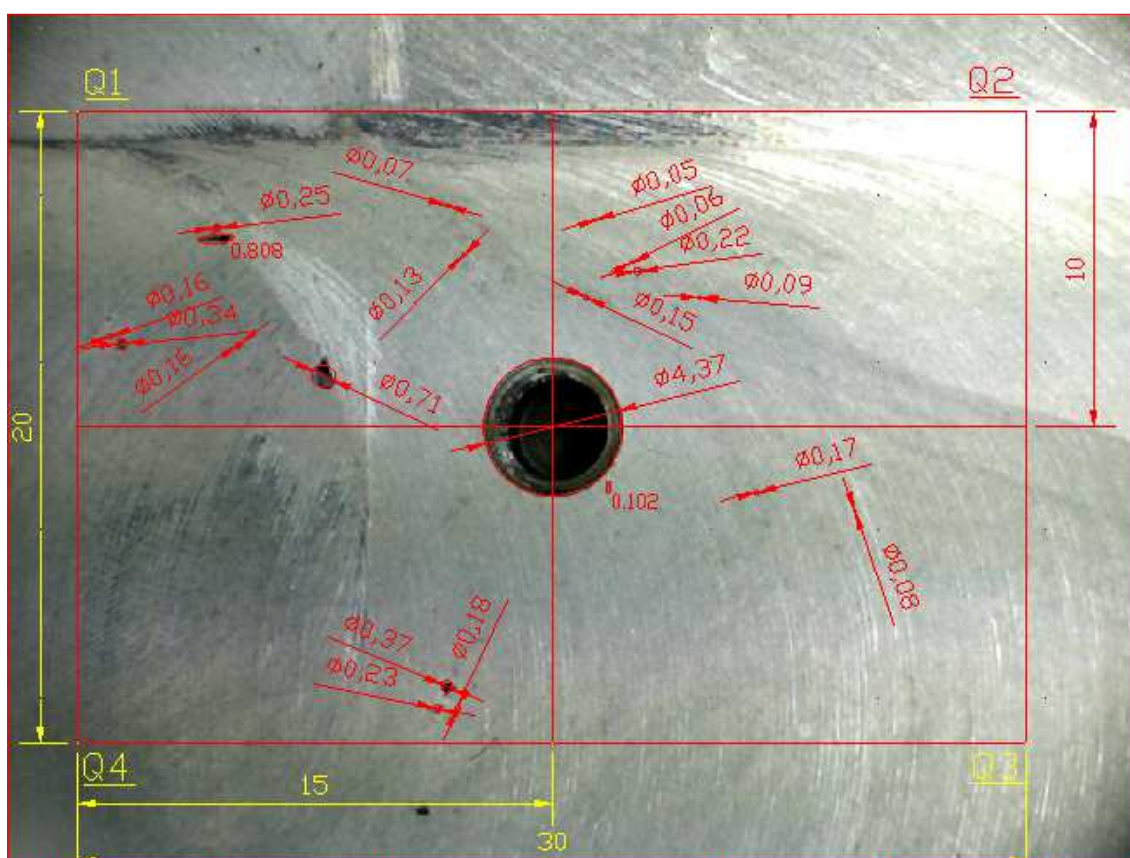
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M2	
Temperatura del material (A)	670	674	°C
Temperatura del motllo (B)	250	243	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,35	0.33	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	1.5	1.62	m/s
Pressió de multiplicació (E)	240	261	bar



Experimentació 13:

- N° de peça escollida → 2
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.30%

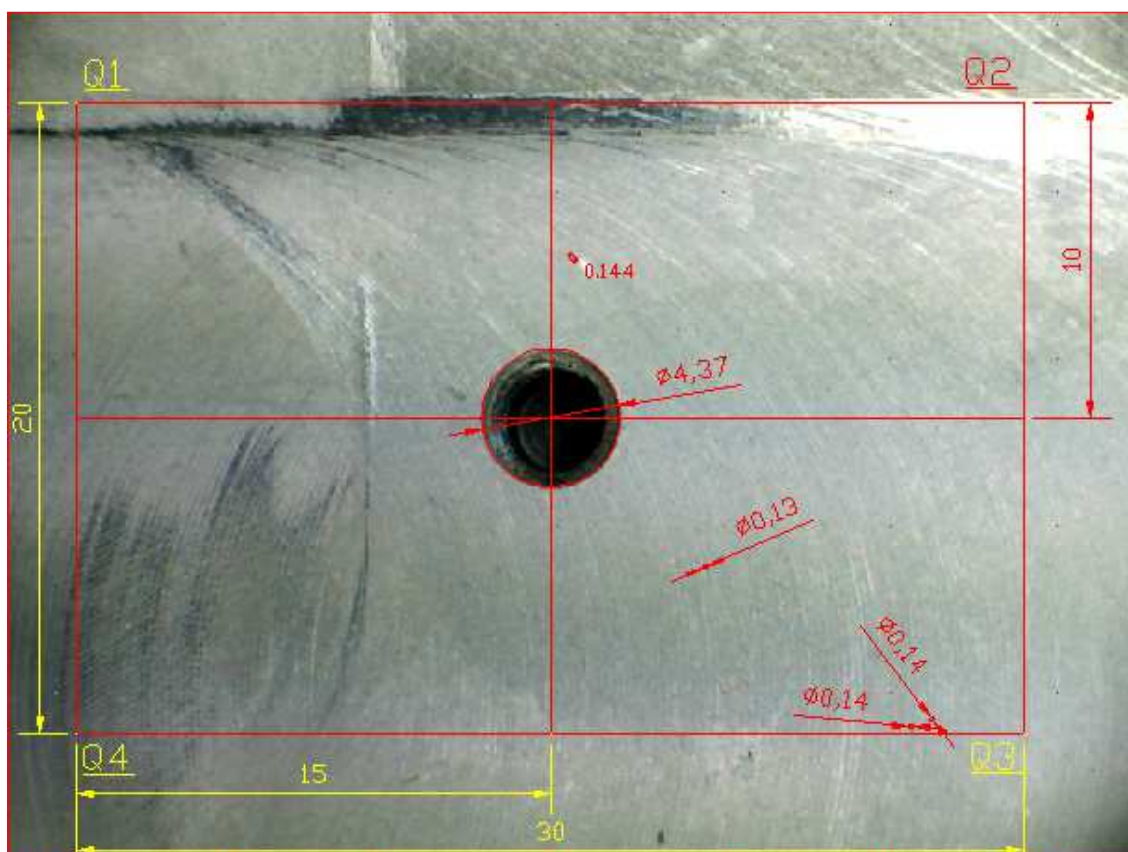
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M2	
Temperatura del material (A)	670	678	°C
Temperatura del motllo (B)	230	238	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,05	0.09	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	3.5	3.34	m/s
Pressió de multiplicació (E)	200	210	bar



Experimentació 14:

- N° de peça escollida → 1
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.03%

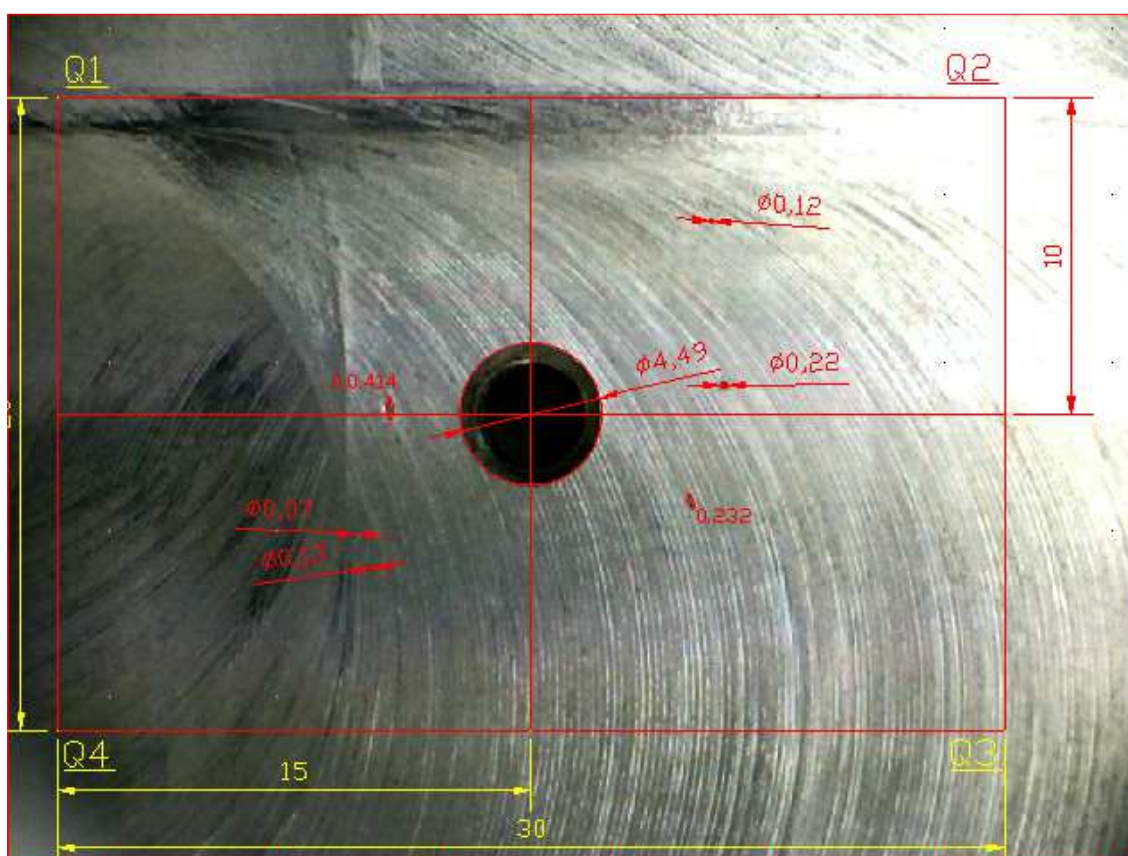
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M1	
Temperatura del material (A)	670	685	°C
Temperatura del motllo (B)	230	232	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,20	0.20	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	1.5	1.60	m/s
Pressió de multiplicació (E)	240	264	bar



Experimentació 15:

- N° de peça escollida → 1
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.12%

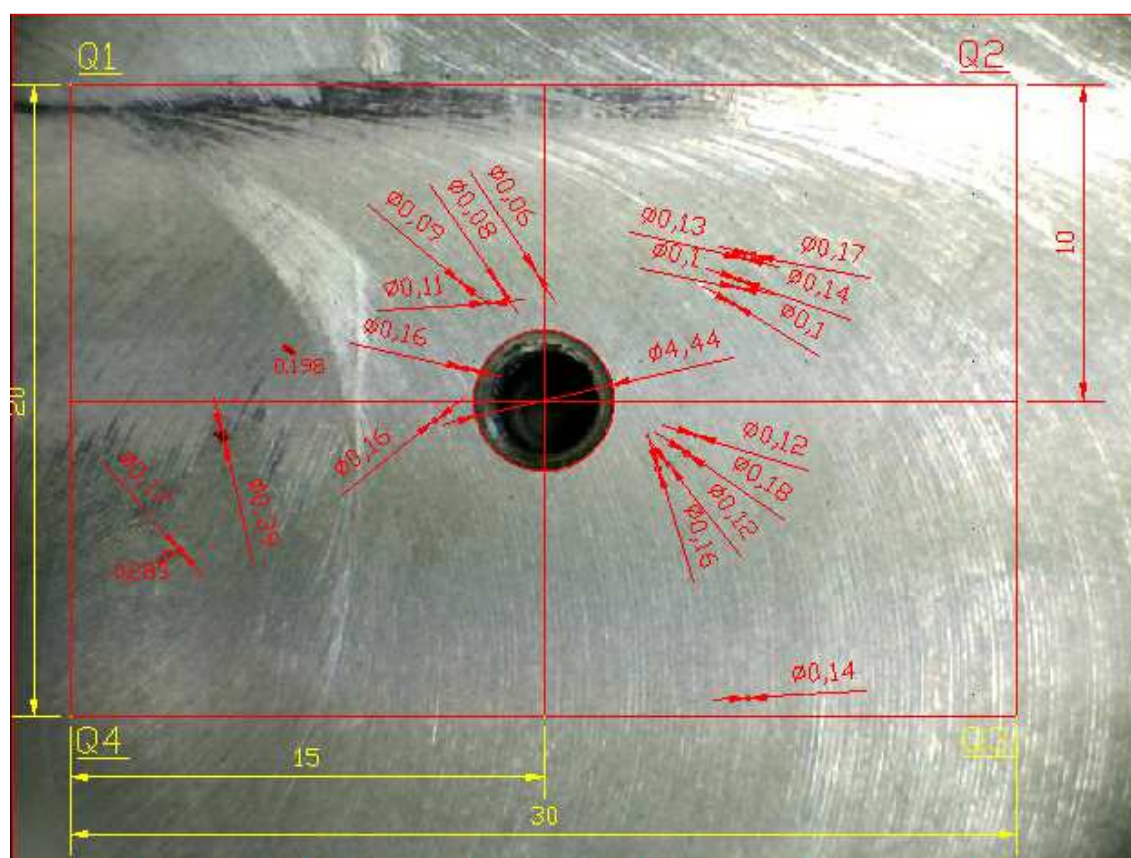
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M1	
Temperatura del material (A)	670	682	°C
Temperatura del motllo (B)	230	243	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,35	0.32	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	2.5	2.76	m/s
Pressió de multiplicació (E)	280	272	bar



Experimentació 16:

- N° de peça escollida → 1
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.14%

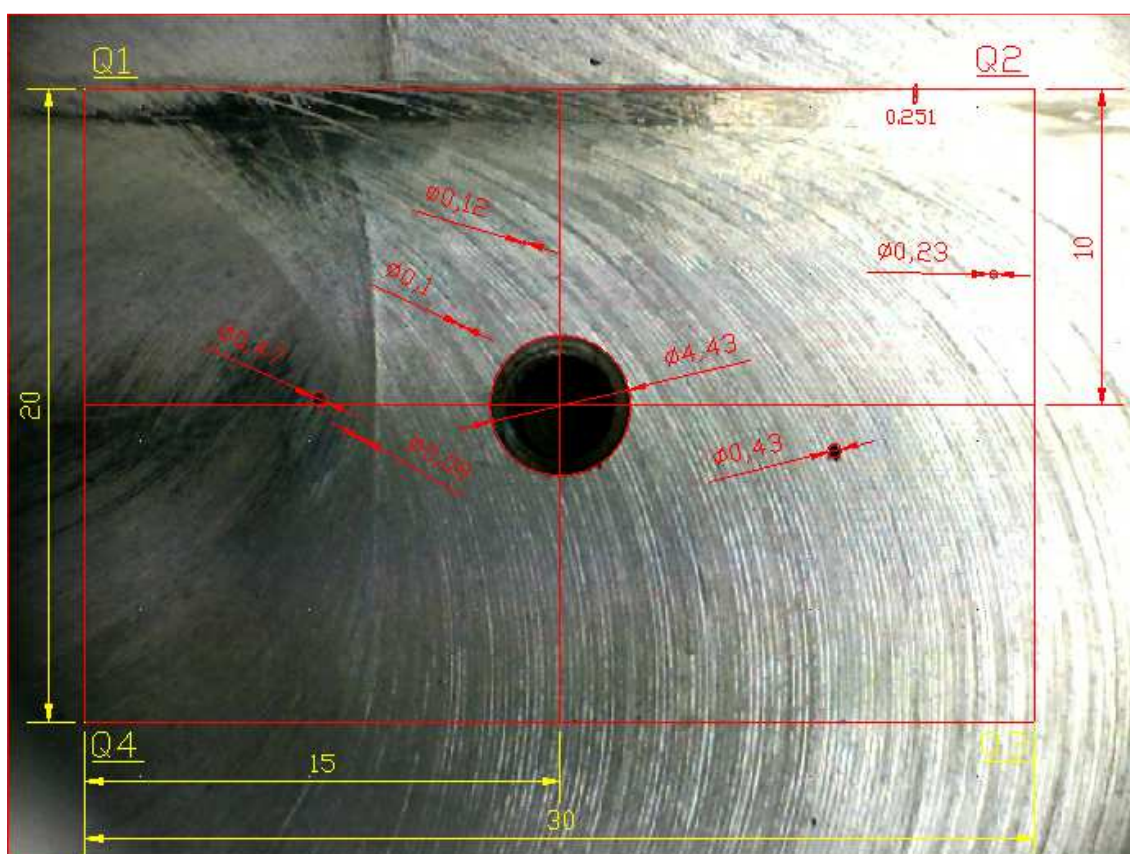
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M1	
Temperatura del material (A)	670	668	°C
Temperatura del motllo (B)	210	247	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,05	0.09	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	1.5	1.47	m/s
Pressió de multiplicació (E)	240	258	bar



Experimentació 17:

- N° de peça escollida → 2
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.10%

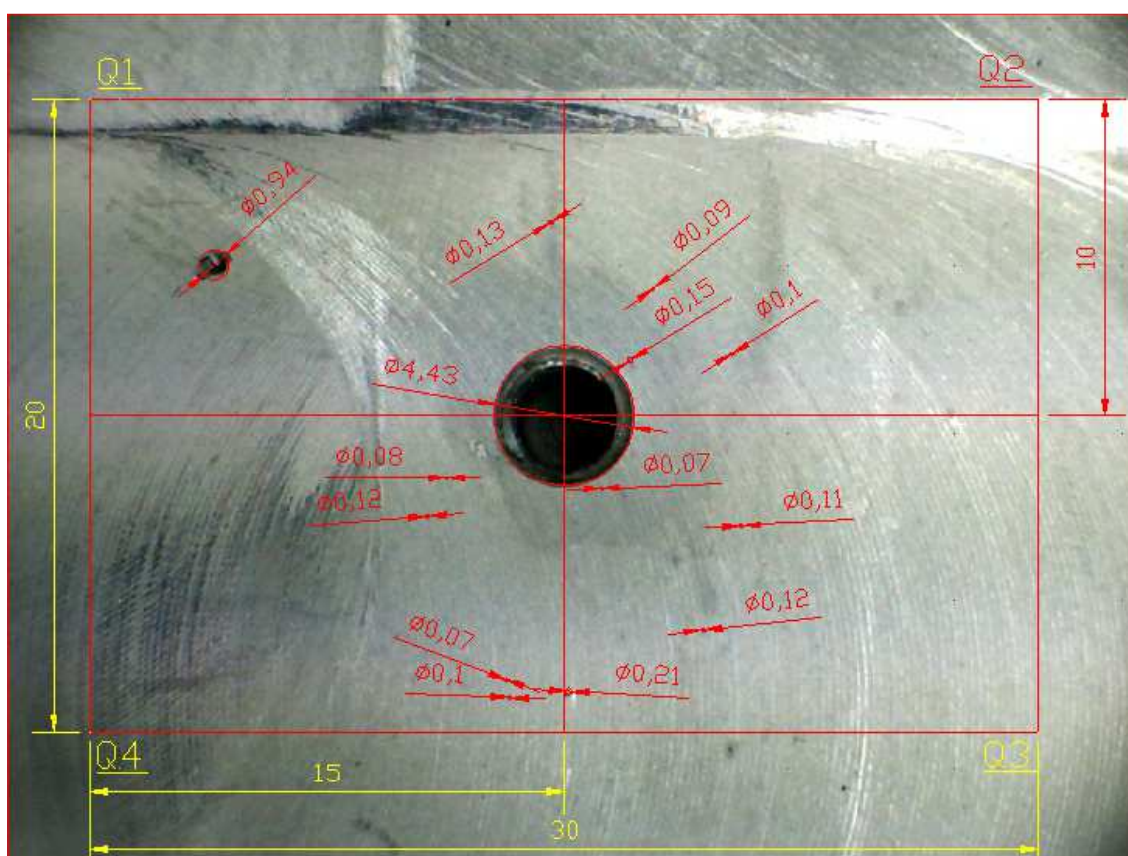
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M2	
Temperatura del material (A)	670	669	°C
Temperatura del motllo (B)	210	246	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,20	0.21	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	2.5	2.50	m/s
Pressió de multiplicació (E)	280	269	bar



Experimentació 18:

- N° de peça escollida → 1
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.14%

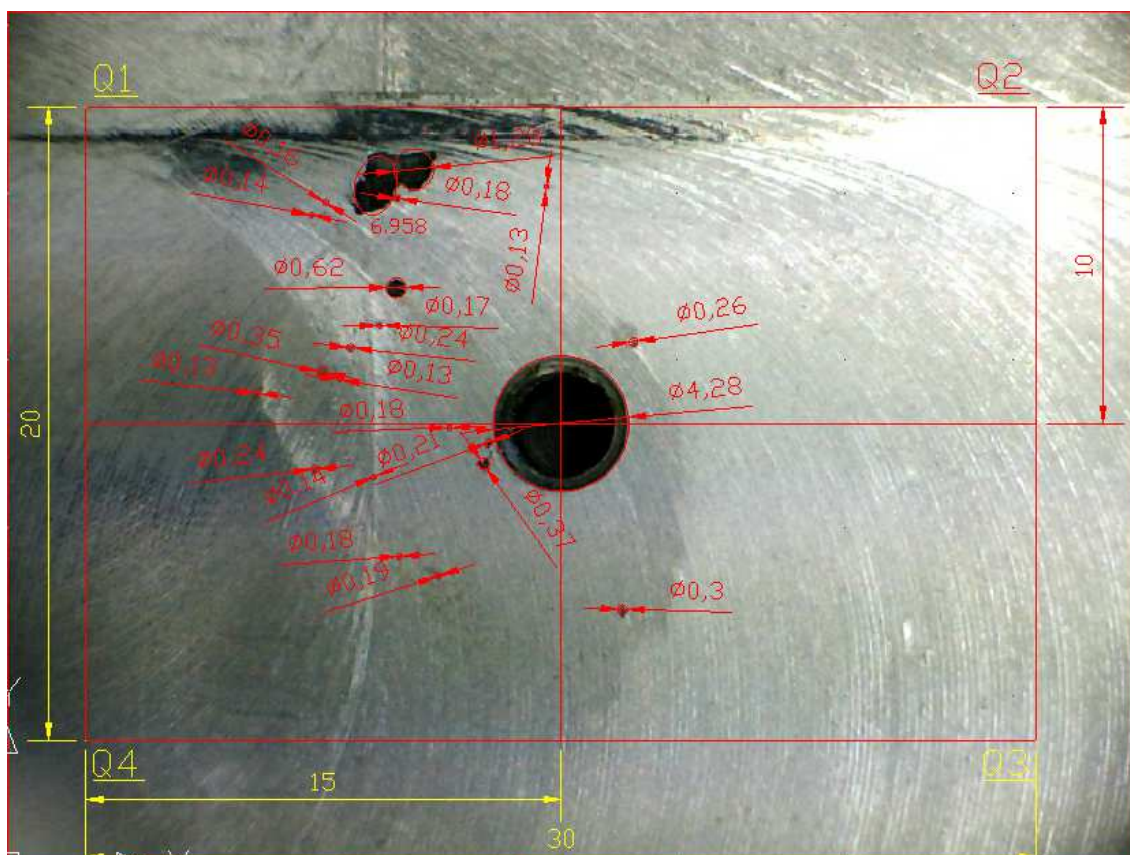
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M1	
Temperatura del material (A)	670	671	°C
Temperatura del motllo (B)	210	245	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,35	0.33	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	3.5	3.98	m/s
Pressió de multiplicació (E)	200	194	bar



Experimentació 19:

- N° de peça escollida → 4
- Resultat (% porositat en superfície) → 1.57%

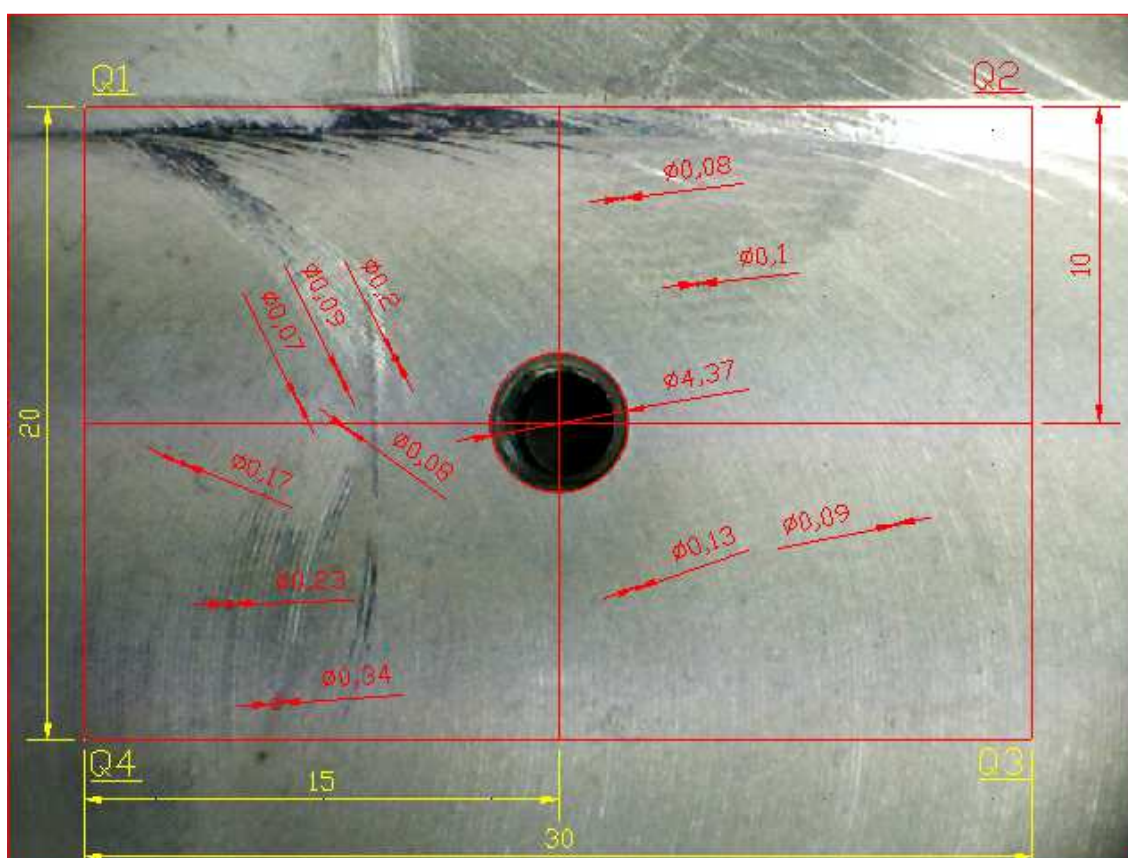
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M4	
Temperatura del material (A)	640	650	°C
Temperatura del motllo (B)	250	248	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,05	0.09	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	3.5	3.74	m/s
Pressió de multiplicació (E)	240	250	bar



Experimentació 20:

- N° de peça escollida → 2
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.04%

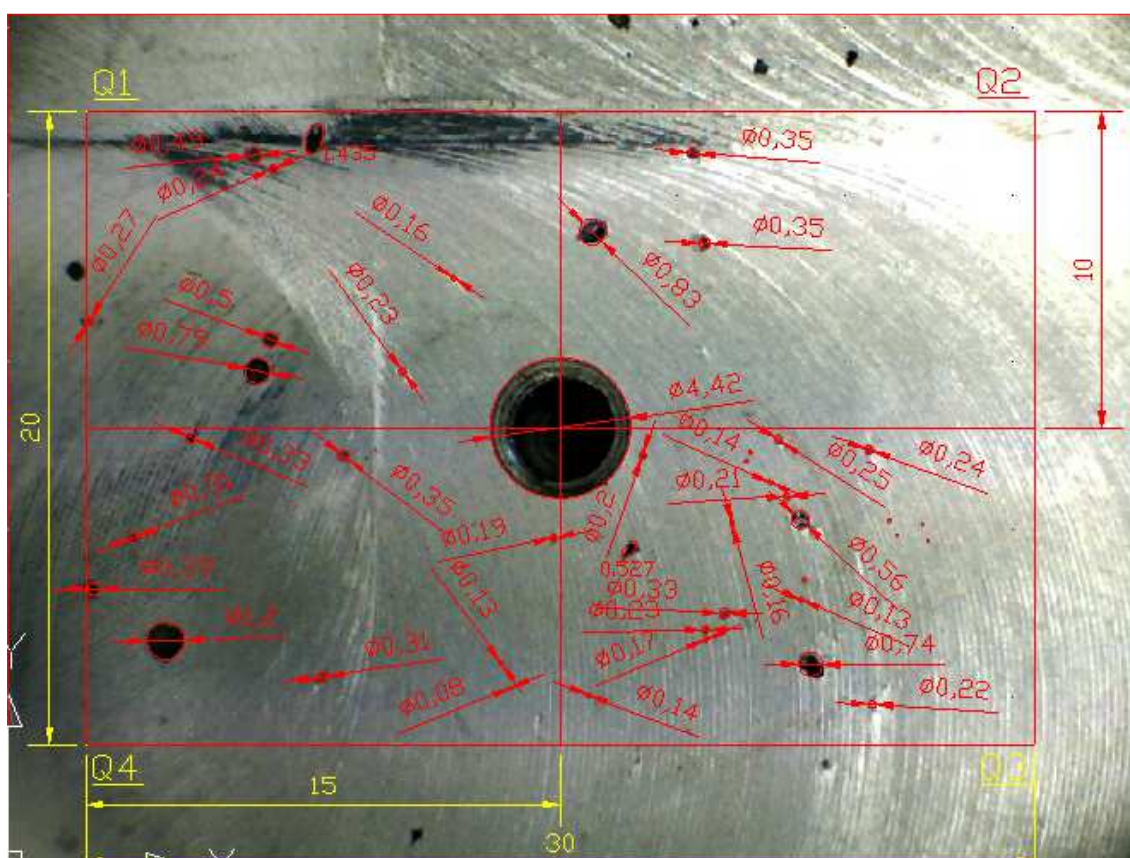
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M2	
Temperatura del material (A)	640	655	°C
Temperatura del motllo (B)	250	255	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,20	0.20	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	1.5	1.59	m/s
Pressió de multiplicació (E)	280	269	bar



Experimentació 21:

- N° de peça escollida → 1
- Resultat (% porositat en superfície) → 1.14%

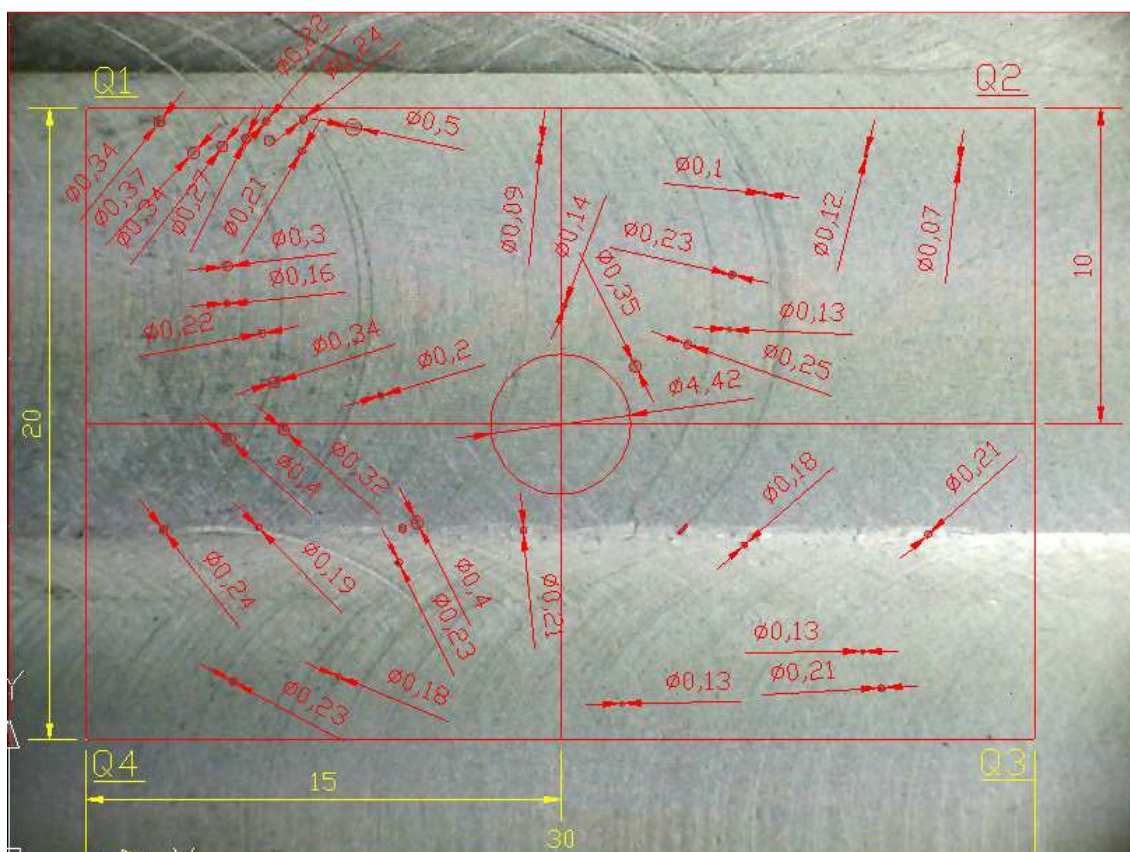
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M1	
Temperatura del material (A)	640	665	°C
Temperatura del motllo (B)	250	244	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,35	0.34	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	2.5	2.77	m/s
Pressió de multiplicació (E)	200	226	bar



Experimentació 22:

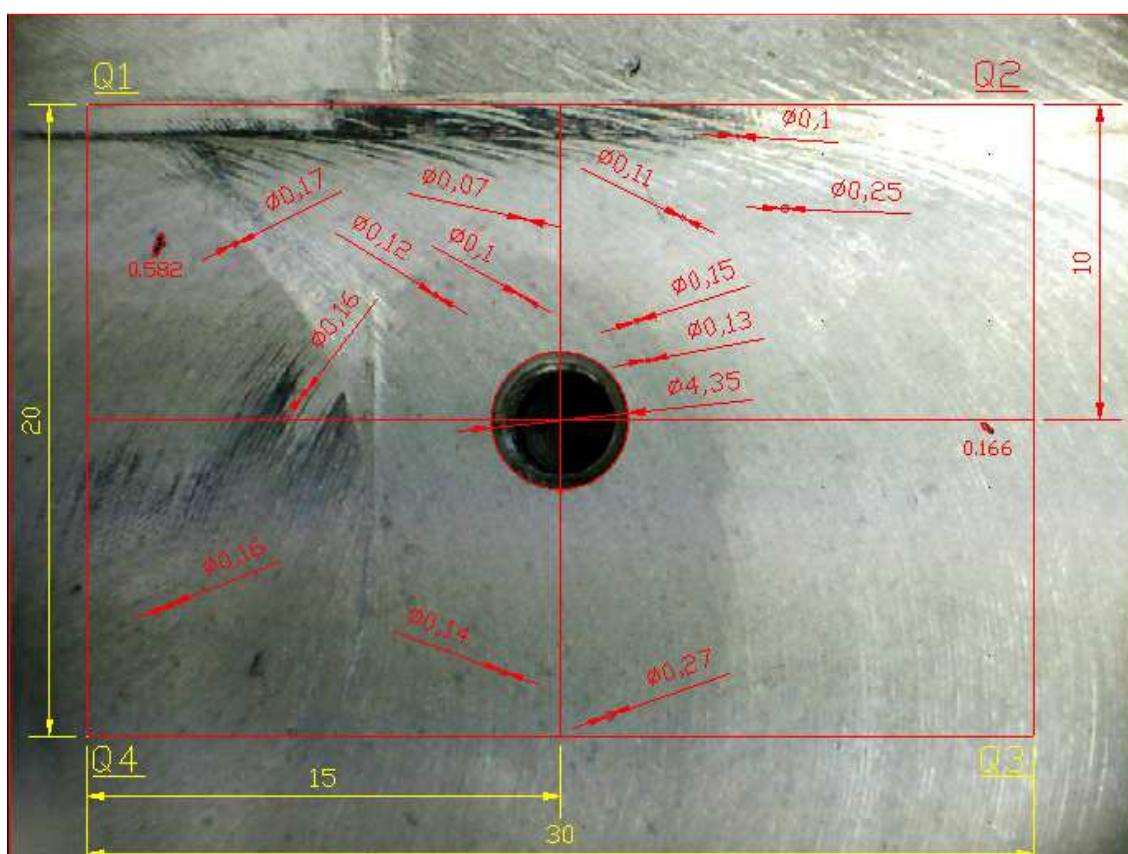
- N° de peça escollida → 2
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.33%

Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M2	
Temperatura del material (A)	640	630	°C
Temperatura del motllo (B)	230	236	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,05	0.09	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	1.5	1.40	m/s
Pressió de multiplicació (E)	280	253	bar



- N° de peça escollida → 2
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.17%

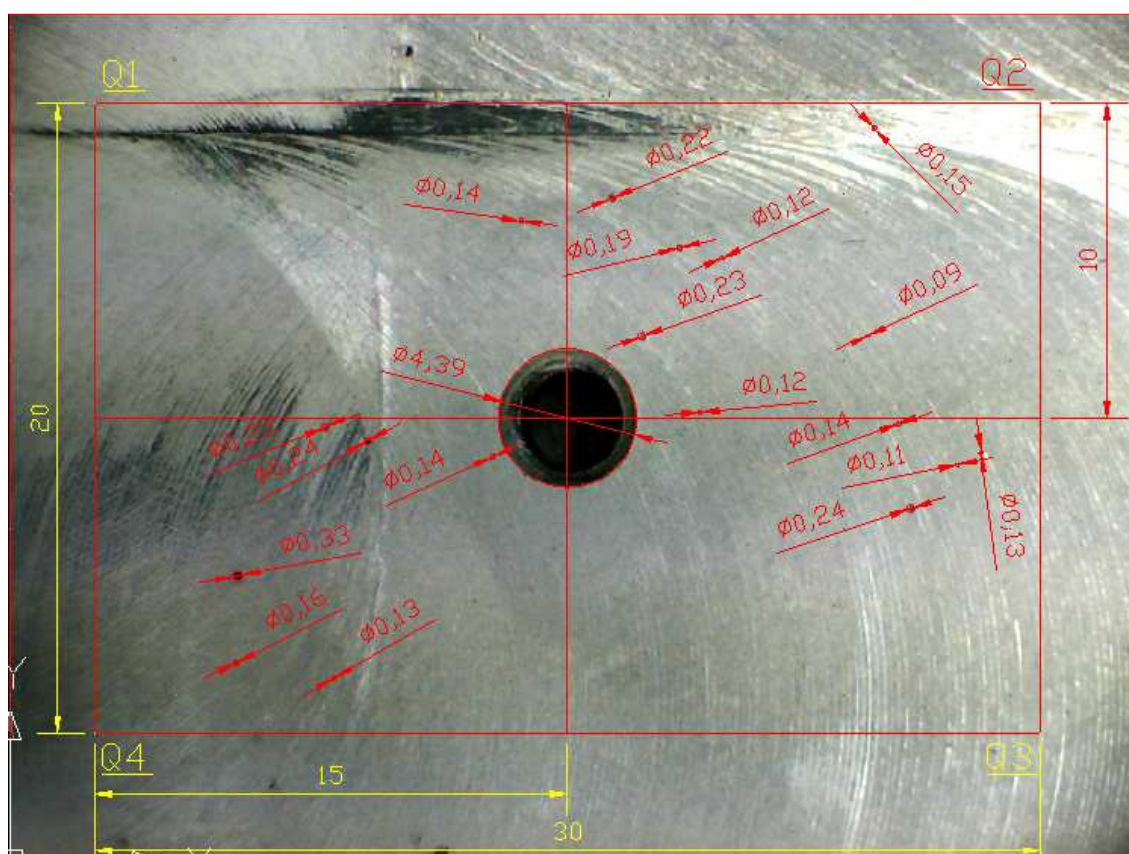
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M2	
Temperatura del material (A)	640	645	°C
Temperatura del motllo (B)	230	240	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,20	0.20	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	2.5	2.67	m/s
Pressió de multiplicació (E)	200	181	bar



Experimentació 24:

- N° de peça escollida → 1
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.08%

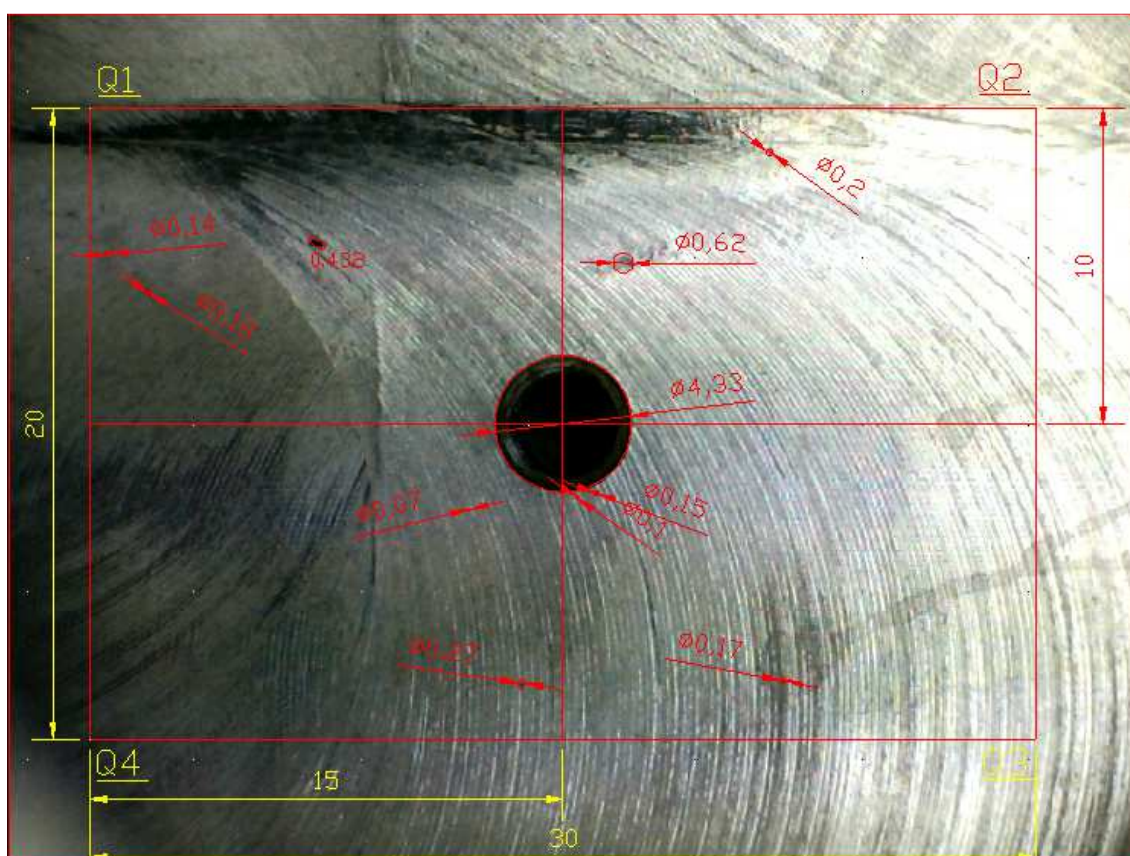
Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M1	
Temperatura del material (A)	640	649	°C
Temperatura del motllo (B)	230	242	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,35	0.35	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	3.5	3.42	m/s
Pressió de multiplicació (E)	240	231	bar



Experimentació 25:

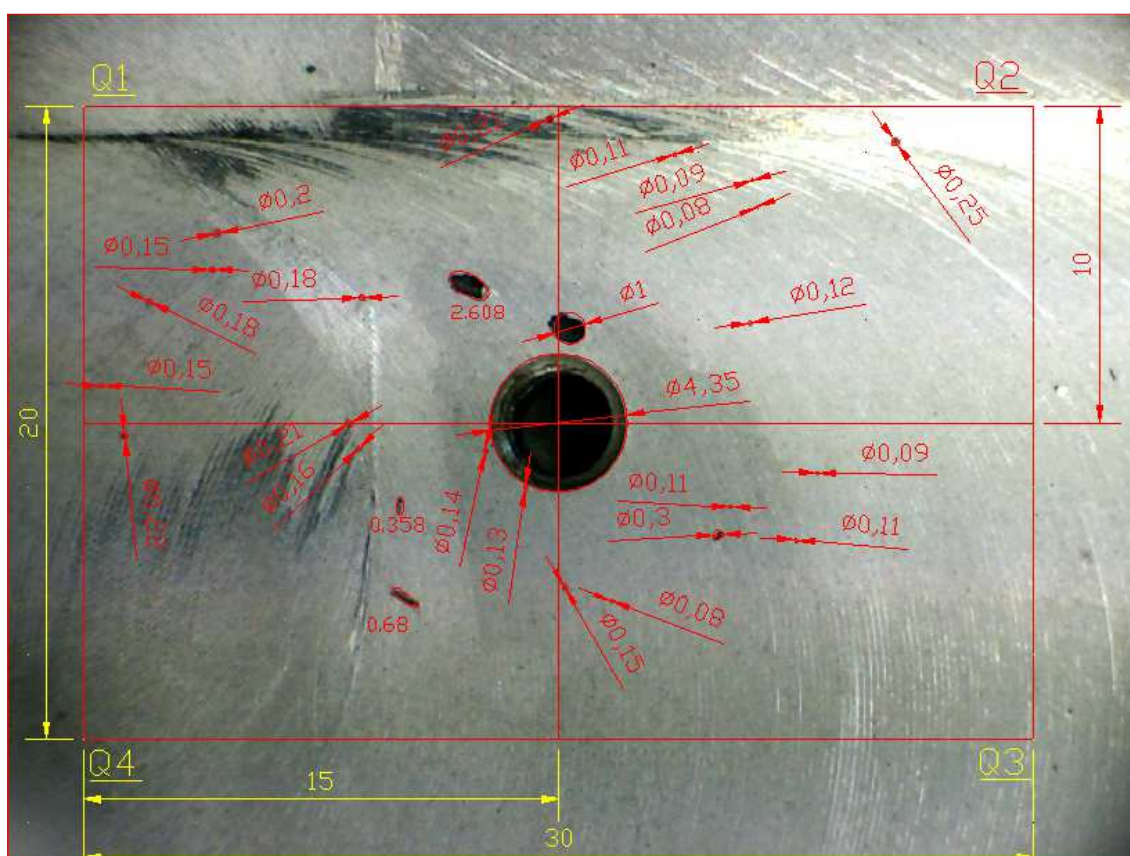
- N° de peça escollida → 2
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.16%

Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M2	
Temperatura del material (A)	640	622	°C
Temperatura del motllo (B)	210	210	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,05	0.09	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	2.5	2.61	m/s
Pressió de multiplicació (E)	200	177	bar



- N° de peça escollida → 2
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.84%

Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M2	
Temperatura del material (A)	640	637	°C
Temperatura del motllo (B)	210	226	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,20	0.20	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	3.5	3.86	m/s
Pressió de multiplicació (E)	240	245	bar



Experimentació 27:

- N° de peça escollida → 1
- Resultat (% porositat en superfície) → 0.86%

Paràmetre	Valor		Unitats
	Consigna	M2	
Temperatura del material (A)	640	643	°C
Temperatura del motllo (B)	210	217	°C
Velocitat del pistó, 1ra etapa (C)	0,35	0.32	m/s
Velocitat del pistó, 2na etapa (D)	1.5	1.57	m/s
Pressió de multiplicació (E)	280	272	bar

