



EPS

Escola Politècnica
Superior

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Títol: Modelització dels paràmetres del procés d'emmotllament per ultrasons per a la fabricació de peces a escala micro per a diferents materials

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Paula Negre Gubau

Director/Tutor: Inés Ferrer Real

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria de Processos de Fabricació

Convocatòria (mes/any): Juny 2014

ÍNDEX

MEMÒRIA.....	5
1. Introducció.....	6
1.1. Antecedents.....	6
1.2. Objecte.....	7
1.3. Abast.....	7
2. Descripció de la tecnologia.....	8
2.1. Descripció del procés.....	8
2.2. Paràmetres de procés.....	14
3. Metodologia del projecte.....	16
3.1. Experimentació.....	16
3.1.1. Experimentació amb el motlle a temperatura ambient.....	17
3.1.2. Experimentació amb el motlle a 35°C.....	20
3.1.3. Quadre d'experiments.....	21
3.1.4. Material.....	22
3.2. Anàlisi.....	23
3.3. Elaboració del Procediment de caracterització de procés.....	27
4. Resultats.....	28
4.1. Resultats de l'experimentació.....	28
4.2. Anàlisi de resultats de l'experimentació.....	30
4.2.1. Experimentació amb el motlle a temperatura ambient.....	30
4.2.2. Experimentació amb el motlle a 35°C.....	56
4.3. Procediment de caracterització de procés.....	71
5. Resum del pressupost.....	76
6. Conclusions i treballs futurs.....	77
6.1. Conclusions.....	77
6.2. Treballs futurs.....	78
7. Relació dels documents.....	79

ANNEXOS.....	80
Annex A. Taula de resultats	81
A.1. Resultats de la Fase 1 de l'Estudi preliminar de l'Experimentació amb el motlle a temperatura ambient.	81
A.2. Resultats de la Fase 2 de l'Estudi preliminar de l'Experimentació amb el motlle a temperatura ambient.	83
A.3. Resultats de la Fase 3 de l'Estudi preliminar de l'Experimentació amb el motlle a temperatura ambient.	85
A.4. Resultats de la Verificació de l'Estudi preliminar de l'Experimentació amb el motlle a temperatura ambient.	87
A.5. Resultats de la Verificació amb el motlle a 35°C.	89
Annex B. Recull fotogràfic	92
B.1. Experimentació amb el motlle a temperatura ambient.....	92
B.1.1. Estudi preliminar	92
B.1.2. Verificació de l'estudi preliminar.....	95
B.2. Experimentació amb el motlle a 35°C.	98
Annex C. Diagrama de procés.....	102
Annex D. Equipament utilitzat.....	103
D.1. Màquina de mesura de coordenades Mitutoyo Crysta Apex 544.....	103
D.2. Estereomicroscopi Nikon SMZ-745T.....	104
Annex E. Pressupost.....	105

MEMÒRIA

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

Actualment la tecnologia de fabricació de micropeces de plàstic més estesa és el procés d'emmotllament per microinjecció, però tot i ser la més estesa, presenta algunes limitacions com la falta de precisió en la dosificació del material, la repetició i l'elevat volum de les massalotes.

D'altra banda, en els últims anys s'ha estat treballant amb la nova tecnologia dels ultrasons que ja és industrialment utilitzada per a algunes aplicacions com la soldadura o el tall amb diferents materials. Tanmateix, aquest nou procés d'emmotllament utilitza els ultrasons per fondre el material que es troba a la càmera de plastificació dins el motlle i alhora genera la pressió necessària per què el material ompli la cavitat del motlle. Això disminueix la possibilitat de degradació del material durant l'etapa de fusió d'aquest.

El projecte d'aquest nou procés de fabricació s'ha desenvolupat al Centre Tecnològic ASCAMM i ha suposat un concepte totalment revolucionari en la producció de peces a escala mini i micro.

Es tracta d'un procés capaç d'omplir cavitats molt petites del motlle sense necessitat d'aplicar grans valors de pressió, en comparació al procés de microinjecció convencional. A més es poden produir peces en pocs segons i s'aconsegueix reduir considerablement el volum de les massalotes.

Es tracta doncs d'una tecnologia molt recent amb un gran ventall de possibilitats en l'àmbit de la producció de peces micro i mini, però que encara requereix una important investigació per tal d'estabilitzar el procés, estudiar l'efecte dels diferents paràmetres sobre la peça final, utilització de materials, etc. D'aquesta necessitat sorgeix el present treball que consisteix en l'estudi dels diferents paràmetres de procés, quins són els seus límits, com afecten aquests sobre la peça obtinguda i determinar quina és la metodologia que permet establir els paràmetres òptims de treball.

1.2. Objecte

L'objectiu principal d'aquest treball és desenvolupar una metodologia que permeti ajustar els paràmetres de procés que afecten a la fabricació de les peces amb materials plàstics mitjançant la fabricació de provetes estandarditzades emprant diferents condicions de treball i realitzant un estudi de les repercussions d'aquestes condicions sobre les peces obtingudes per tal d'assegurar-ne la seva qualitat.

Per tal d'assolir-lo, en aquest treball es duran a terme les següents tasques:

- Fer experiments preliminars per tal de conèixer la tecnologia i l'efecte dels paràmetres de procés sobre la peça final. En aquesta fase inicial es treballa amb polipropilè (PP) per les seves bones qualitats d'emmotllament.
- Analitzar la qualitat de les peces obtingudes i les propietats més rellevants a través de l'estudi de la porositat de les peces, el seu pes final i les seves dimensions, entre altres.
- Definir la metodologia que permeti establir els paràmetres de procés per a diferents materials.

1.3. Abast

La realització d'aquest treball inclou la fabricació de provetes estandarditzades amb material polimèric i la posterior anàlisi dels resultats mitjançant diversos controls de qualitat per determinar com afecten els diferents paràmetres sobre la peça final i establir una metodologia que permeti ajustar els paràmetres de procés adequats per aconseguir peces que s'adaptin a uns requeriments de qualitat.

Queda exclosa la caracterització química del material prèvia i posterior al procés d'emmotllament.

2. DESCRIPCIÓ DE LA TECNOLOGIA

2.1. Descripció del procés

El procés d'emmotllament per ultrasons té com a principi fonamental utilitzar l'energia vibratòria generada pel capçal ultrasònic per fondre el material i proveir aquest de la pressió necessària perquè flueixi a l'interior de la cavitat del motlle. El cicle d'injecció es duu a terme en cinc fases:

- La primera fase comença quan el motlle ha estat prèviament tancat. A partir d'aquí el material sòlid en forma de pellet o de pols entra de manera automatitzada o manual dins el motlle en el que s'anomena la cambra de plastificació.
- La segona fase s'inicia un cop el material es troba dins la cambra de plastificació. En aquest moment la unitat ultrasònica comença el moviment vertical de baixada i quan entra en contacte amb el material dins la cambra de plastificació s'inicia el període de temps en què genera els ultrasons ja que el contacte entre el sonotrode i el material produeix una força de resistència contrària al moviment del sonotrode que, quan excedeix un valor predeterminat, genera l'ordre d'inici dels ultrasons.
- A partir d'aquí comença la tercera fase en què es produeix la plastificació del material, fet que representa un dels aspectes innovadors d'aquesta tecnologia: la plastificació del material dins el motlle. Aquesta tercera fase consta també de diverses etapes (Figura 2.1). En la primera etapa el material comença a fondre i flueix entre les partícules de material que encara estan en estat sòlid sense entrar encara en la cavitat del motlle. En la segona etapa el procés de plastificació es completa i el material comença a omplir la cavitat del motlle. En l'última etapa el material penetra dins la cavitat del motlle fins que s'acaba el temps d'ultrasons o bé fins que el sonotrode ha arribat a la posició límit predeterminada.

A la Figura 2.1. es mostren les diferents etapes del procés de plastificació. Les A, B i C corresponen a la primera etapa; la imatge D correspon a la segona; i la imatge D correspon a la última etapa.

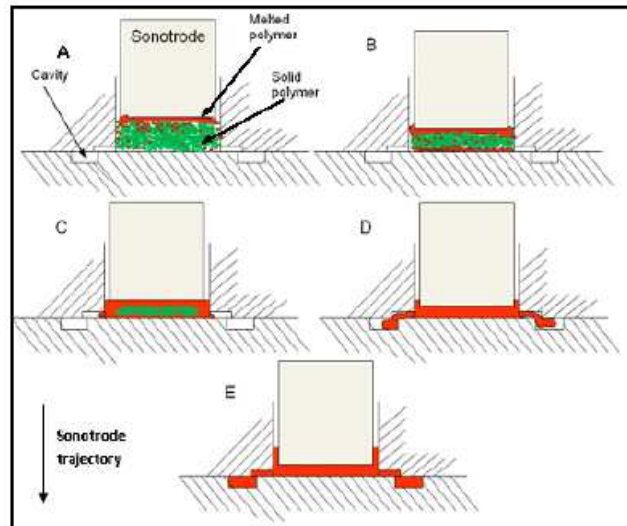


Figura 2.1. Procés de plastificació del material dins el motlle.

- La quarta fase del procés d'emmotllament s'inicia quan el capçal ultrasònic ha arribat al final del recorregut. En aquesta fase es produeix la pressió de refredament que serà constant durant tot el temps en què ha estat programat el temps de refredament.
- Seguidament es produeix la cinquena fase en què el capçal de la unitat generadora d'ultrasons retorna a la seva posició inicial, s'obre el motlle i entra en acció el sistema d'extracció de la peça. Aquest sistema forma part també de la cambra de plastificació i consta d'una barra que es mou en sentit perpendicular al pla de partició del motlle de manera que quan el procés ha finalitzat i el motlle s'ha obert, la barra extractora puja des de la seva posició inicial fins a elevar la massalota de la peça facilitant així la seva extracció.

Així doncs, de manera resumida, els passos que es produeixen en el procés d'emmotllament per ultrasons són els següents:

- Entrada del material dins el motlle.
- Inici del moviment de la unitat ultrasònica i inici del temps d'ultrasons.
- Procés de plastificació del material i entrada d'aquest a la cavitat del motlle
- Període de refredament i compactació del material dins el motlle.
- Retorn de la unitat ultrasònica al punt inicial, obertura del motlle i extracció de la peça.

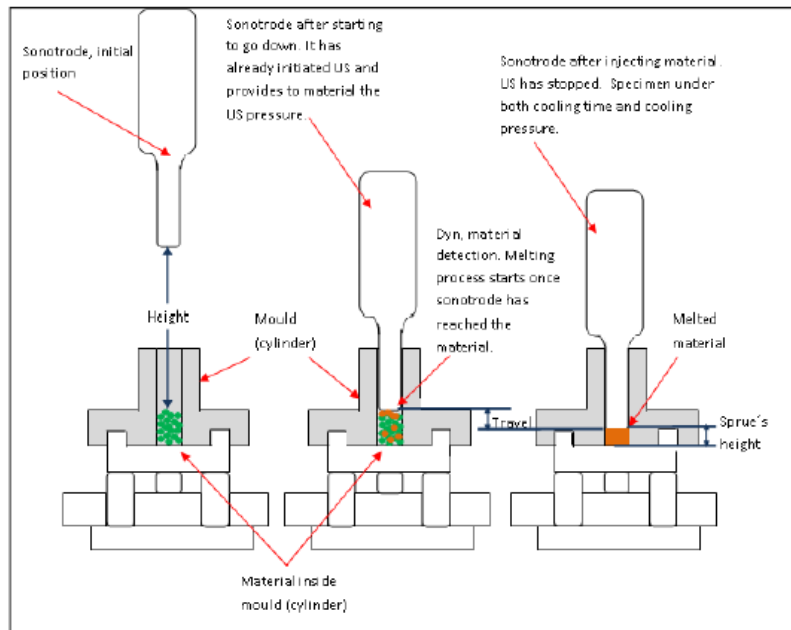


Figura 2.2. Procés d'emmotllament per ultrasons.

A continuació es detallen les parts i funcions de: a) capçal ultrasònic i b) la màquina d'emmotllament per ultrasons Sonorus 1G emprada pel desenvolupament d'aquest projecte.

a) Capçal ultrasònic

El capçal ultrasònic consta de tres parts: transductor, booster i sonotrode (Figura 2.3).

- **Transductor.** És l'element encarregat de generar energia mecànica en forma de vibracions a partir d'energia elèctrica. Aquest transductor està fabricat d'unes capes de material ceràmic com el quarz, la turmalina o el sulfat de liti ja que presenten efecte piezoelèctric de manera natural, separades per petits plats mecànics units entre ells per una alta pressió. Quan s'aplica una tensió alterna al transductor es produeix un camp elèctric altern també en el material ceràmic que provoca un canvi en el seu gruix. La variació del gruix de la ceràmica del transductor es tradueix en una ona de pressió variant en el temps que quan es reflecteix en el final de la massa metàl·lica del transductor es transforma en una ona de propagació, generant un moviment de vibració que es pot programar per a què entri en ressonància.
- **Booster.** Es tracta d'un element opcional que es col·loca seguidament del transductor i que augmenta o disminueix segons convingui l'amplitud de vibració que prové del convertidor. Si el guany del booster és superior a 1 aquest actua com a amplificador; en cas contrari actua com a atenuador.

- Sonotrode. Aquest és l'element que transfereix l'energia mecànica vibratòria al material que es troba a la cambra de plastificació a través del contacte físic. A més també aplica la pressió necessària per què el material fos entri a la cavitat del motlle. També actua com a amplificador de l'amplitud de vibració provinent del transductor o del booster si n'hi ha, per tal de tenir l'amplitud desitjada quan aquest entra en contacte amb el material.

Els sonotrodes normalment estan fets d'aliatges d'alumini o titani, ja que presenten una bona transmissió de l'energia ultrasònica i una baixa atenuació, i estan maquinats amb diferents geometries per tal de que vibri entre 15kHz i 50kHz, i obtenir així l'energia necessària en el punt de contacte amb el material per tal de dur a terme la seva fusió.

L'esquema d'una unitat generadora d'ultrasons es mostra a la Figura 2.3.

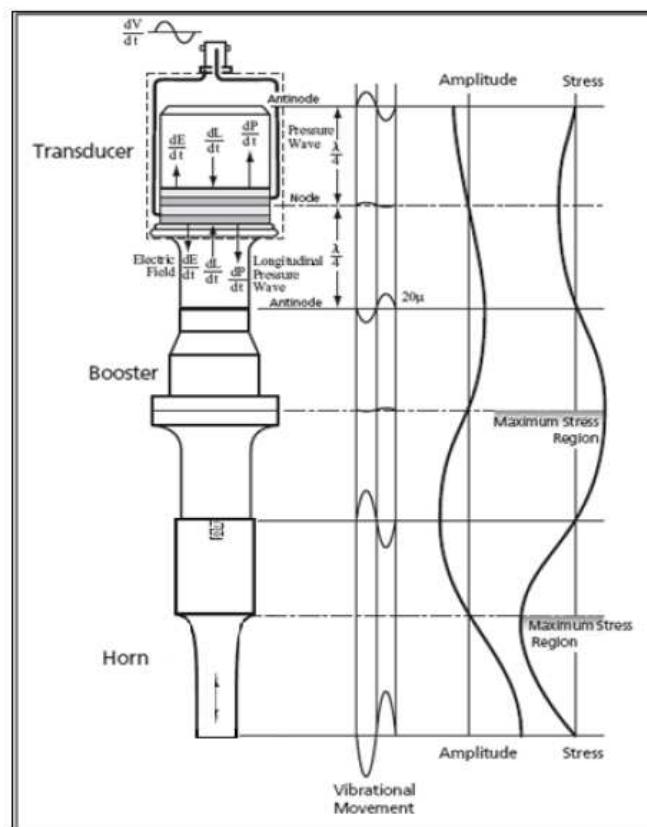


Figura 2.3. Funcionament d'una unitat generadora d'ultrasons.

En la màquina emprada en aquets projecte, el guany del transductor és de 9,8, mentre que el booster atenua amb 1,7 i el sonotrode amplifica 6,25. De manera que el guany del capçal generador d'ultrasons és gairebé de 35.

b) Sonorus 1G

Les parts de què consta la màquina es mostren a la Figura 2.4.

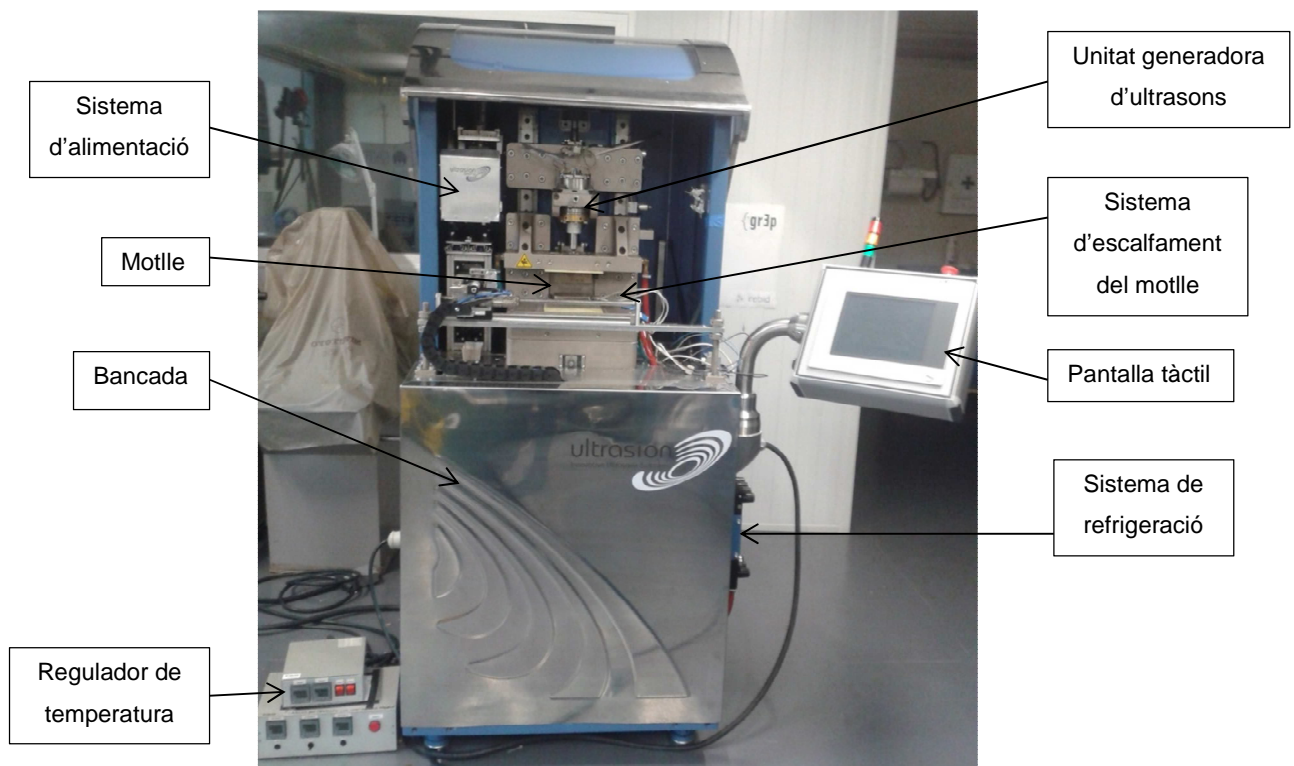


Figura 2.4. Fotografia de la màquina Sonorus 1G.

- Pantalla tàctil: permet programar tots els paràmetres de procés controlables. També s'utilitza per a indicar les els zeros relatius i per definir els límits de posició de les diferents parts de la màquina entre altres.
- Zona del motlle: inclou el motlle, el sistema d'extracció i les plaques aïllants.
- Unitat generadora d'ultrasons: inclou el transductor, el booster i el sonotrode i s'utilitza per a convertir l'energia elèctrica en energia mecànica vibracional.
- Sistema d'alimentació: el dispensador de material proporciona el número exacte de pellets per a cada cicle d'emmotllament. Es basa en un canal vibratori que alinea els pellets i els fa passar per un dispositiu làser que compta els pellets i quan s'ha arribat a la quantitat necessària, la vibració s'atura i aquests pellets s'emmagatzemen

momentàniament en un recipient fins que el motlle està completament tancat, moment a partir del qual s'obre automàticament una escotilla que permet l'entrada del material a la cambra de plastificació.

- Bancada: inclou els elements de suport de la zona del motlle, de la unitat generadora dels ultrasons i els sistemes de control de moviment de les parts mòbils de la màquina.
- Sistema hidràulic de refrigeració: la màquina disposa d'un mesurador de flux que es pot connectar a un sistema de refrigeració amb aigua o oli.
- Sistema d'escalfament del motlle: consta de quatre resistències que s'introdueixen dues a la meitat superior i dues a la meitat inferior del motlle. A més es disposa d'un termoparell que recull les dades de temperatura del motlle que serveixen per al funcionament del regulador de temperatura que permet augmentar o disminuir la temperatura de les resistències per assolir la temperatura del motlle desitjada.
- Sistema regulador de temperatura: aquest sistema s'encarrega de controlar la temperatura del motlle. Està connectat per una banda amb les resistències que escalfen el motlle i també està connectat a un termoparell que mesura la temperatura real del motlle. Així s'encarrega de proporcionar la intensitat necessària a les resistències per tal d'assolir la temperatura programada en el regulador en funció de la temperatura real del motlle que rep del termoparell.

2.2. Paràmetres de procés

El procés d'emmotllament per ultrasons està governat per diverses variables de procés que es poden controlar i que tenen diferents repercussions sobre la peça final obtinguda. Aquestes variables de procés són les següents:

- Quantitat de material (*Quantity Q*): és la quantitat de material sòlid en forma de pellets o de pols que s'introdueix a la cambra de plastificació per a cada cicle d'emmotllament.
- Temps d'ultrasons (*Ultrasound time UST*): és el temps total durant el qual es generen ultrasons al capçal del sonotrode per dur a terme la plastificació del material.
- Velocitat de baixada del sonotrode (*Sonotrode velocity SV*): és la velocitat del moviment de baixada que realitza la unitat generadora d'ultrasons des de l'inici del procés d'emmotllament fins que aquest arriba a la posició mínima predeterminada.
- Posició del sonotrode en la que s'inicia la velocitat (*Sonotrode position SP*): és la posició en el moviment de baixada del sonotrode a partir de la qual aquest adquireix una velocitat preestablerta.
- Temps de refredament (*Cooling time CT*): és el temps durant el qual la peça es refreda i adquireix la temperatura necessària per desemmotllar la peça sense que aquesta pateixi cap deformació. El temps de refredament comença quan el sonotrode ha arribat a la seva posició mínima i acaba quan aquest inicia el moviment de retorn a la seva posició inicial.
- Temperatura del motlle (*Mould temperature MT*): és la temperatura a la que s'escalfa o refreda el motlle previ al procés d'emmotllament. La variació de la temperatura s'aconsegueix amb la introducció de dues resistències a l'interior de les dues meitats del motlle i es controla amb una unitat reguladora de la temperatura que capta les dades de temperatura del motlle a través de termoparells instal·lats al motlle.
- Amplitud de vibració (*Amplitude of vibration AV*): és l'amplitud del moviment axial de vibració a la punta del sonotrode quan aquest està realitzant els ultrasons. Està relacionat amb la quantitat d'energia que es transfereix a material per fer la

plastificació i generar un flux dins la cavitat del motlle. A la pantalla tàctil de la màquina es pot regular el percentatge respecte la màxima amplitud aplicable que es vol utilitzar. A més, l'amplitud de vibració també es pot variar canviant la configuració del capçal ultrasònic; és a dir, utilitzant un transductor, booster o sonotrode amb característiques diferents.

Tot i que no es considera un paràmetre de procés perquè no es tracta de cap característica que es pugui variar en la màquina, l'assecatge dels pellets també representa un punt important en el procés d'emmotllament. El nombre de proves processades en cada una de les diferents experimentacions tampoc és un paràmetre de procés però s'ha de regular per poder estudiar l'eficàcia del procés.

- Assecatge dels pellets (*Drying of pellets DP*): es tracta de l'assecatge dels pellets abans del procés d'emmotllament a una temperatura i un temps determinats segons el tipus de material que s'utilitzi per tal de reduir la humitat del material i reduir la presència d'humitat en forma de porositat a la peça final obtinguda.
- Nombre de proves (*Number of tests NT*): correspon al nombre de provetes que es processen per a cada un dels experiments.

3. METODOLOGIA DEL PROJECTE

En aquesta secció s'explica la metodologia que s'ha seguit per a la realització de la part experimental del treball. S'estructura en tres parts clarament diferenciades.

- Experimentació: es realitzen un seguit d'experiments en què es treballa amb diferents condicions de treball seleccionades segons els paràmetres que es pretenen estudiar en cada etapa.
- Anàlisi: aquesta part consisteix en l'avaluació de les peces obtingudes en l'etapa d'experimentació realitzant diversos estudis com l'anàlisi de la porositat de les peces, el seu pes o bé les dimensions.
- Elaboració del procediment de caracterització del procés: en aquesta secció es s'estudien els resultats de l'experimentació i el seu anàlisi per generar la metodologia que permeti ajustar els paràmetres de procés segons uns criteris de qualitat.

3.1. Experimentació

Pel que fa a l'experimentació, en primer lloc es realitza una etapa d'estudi preliminar amb el motlle a temperatura ambient per tal de conèixer la tecnologia i l'efecte dels diferents paràmetres de procés sobre les peces obtingudes. Aquest estudi preliminar comprèn una experimentació inicial que consta de tres fases en les quals es variaran l'assecatge de pellets, el temps d'ultrasons i la velocitat del sonotrode. Seguidament s'efectua una segona part d'aquesta experimentació amb el motlle a temperatura ambient que consisteix en la validació dels resultats obtinguts en l'estudi preliminar. Per això es repeteixen les proves més significatives de l'anterior experimentació i s'estudia la repetibilitat dels resultats.

En una segona etapa de l'experimentació s'introdueix l'estudi de l'efecte de la temperatura del motlle. Alguns materials plàstics requereixen temperatura en el motlle, com és el PEEK, per això abans de treballar amb aquest material es validen de nou els resultats de l'experimentació inicial introduint temperatura en el motlle.

Les diferents etapes de l'experimentació es mostren a continuació:

3.1.1. Experimentació amb el motlle a temperatura ambient

3.1.1.1. *Estudi preliminar*

L'experimentació inicial amb polipropilè (PP) s'estructura en tres fases diferents.

FASE 1. Assecatge dels pellets i temps d'ultrasons.

En la primera fase es pretén estudiar l'efecte de l'assecatge dels pellets previ a l'emmotllament i el temps d'ultrasons en les peces obtingudes, per tal de determinar el temps mínim amb el qual s'obté peça. Per això es realitzen experiments partint des d'un temps d'ultrasons baix de 1 segon, fins a un temps d'ultrasons elevat de 5 segons amb la velocitat de baixada del sonotrode lenta de 3mm/s (veure Taula 3.1). D'aquesta manera es garanteix que s'obtindrà el temps d'ultrasons mínim necessari, ja que si s'obté peça completa amb un determinat temps d'ultrasons a baixa velocitat, també s'obtindrà peça completa si la velocitat augmenta. Aquests experiments es fan a partir de pellets humits i es repeteixen amb pellets assecats durant dues hores en un forn a 90°C.

La quantitat de material injectat és prèviament pesat de manera que s'ajusti al màxim a la quantitat de material teòric necessari segons el volum del motlle teòric que calcula el software de dibuix gràfic amb què s'ha dissenyat el motlle i la densitat del PP. Les posicions que regulen la velocitat de baixada del sonotrode es mantenen constants en aquesta fase així com també el temps de refredament de 5 segons. Es treballa sense temperatura en el motllo, ja que el polipropilè és un dels polímers termoplàstics que no requereix escalfar el motlle.

Així es processen cinc peces a partir de pellets humits i cinc peces a partir de pellets assecats per a cada un dels temps d'ultrasons indicats anteriorment.

FASE 2. Estudi de velocitat constant.

Previ a la realització de la segona fase de l'experimentació, es realitza una operació de mecanitzat del motlle perquè la superfície d'aquest ha quedat malmesa en les anteriors proves. Durant la Fase 1 en alguns casos la peça acabada s'ha quedat adherida a la part

inferior del motlle, dificultant la seva extracció i provocant que sigui necessària l'ajuda de diverses eines per aconseguir desemmotllar la peça que malmeten la superfície del motlle.

Tot seguit s'analitza l'efecte de la velocitat de baixada del sonotrode sobre la peça final, així com també si existeixen unes velocitats mínima i màxima de treball emprant les condicions d'assecatge dels pellets i de temps d'ultrasons més favorables resultants de l'anàlisi dels experiments de la FASE 1. Així es programa la màquina de manera que quan el sonotrode arriba a la posició on entra en contacte amb el material, aquest iniciï una trajectòria amb velocitat de baixada constant. D'aquesta manera es processen cinc provetes per a diferents valors de velocitat del sonotrode des de 5mm/s fins a 17mm/s (Taula 3.1). En aquesta última, s'observa un moviment anòmal en la trajectòria de baixada del sonotrode, i per tant, es desestima seguir augmentant la velocitat. La quantitat de material injectada en cada cicle de moldeig és pesada de la mateixa manera que en l'anterior fase de l'experimentació; i el temps de refredament es mantindrà igualment constant a 5 segons. També es treballa sense temperatura en el motlle.

FASE 3. Estudi de rampa de velocitats.

Els experiments d'aquesta fase tenen com a objectiu estudiar l'efecte sobre la peça final de la variació de la velocitat del sonotrode, és a dir, es pretén comprovar si el fet d'augmentar o disminuir la velocitat del sonotrode al llarg del moviment genera diferències en la peça final. Per això s'empren diferents rampes de velocitats del sonotrode a partir del punt en què aquest troba material, utilitzant també les condicions d'assecatge dels pellets i de temps d'ultrasons més favorables resultants de l'anàlisi dels experiments de la FASE 1. La quantitat de material injectada en cada cicle d'emmotllament és pesada de la mateixa manera que en les fases anteriors de l'experimentació; i el temps de refredament es mantindrà igualment constant a 5 segons. També es treballarà sense temperatura en el motlle.

Primer s'utilitzen unes rampes de velocitat poc accentuades de 6, 5 i 3mm/s com a últimes velocitats de baixada del sonotrode en la rampa descendent; i de 3, 5 i 6mm/s en la rampa ascendent. Seguidament es realitzen dos experiments més amb unes rampes més accentuades, de 10, 10, 8 i 2mm/s la rampa descendent, i 4, 4, 6 i 10mm/s la rampa ascendent. El resum dels paràmetres de procés per a les diferents fases es mostra a la Taula 3.1.

	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Q (mg)	299,7	299,7	299,7
UST (s)	1-5	3	3
SV (mm/s)	3	5-17	6,5,3 i 3,5,6 10 10 8,2 i 4, 4, 6, 10
SP (mm)	20, 15, 10, 5, 4, 1	20, 15, 10, 5, 4, 1	20, 15, 10, 5, 4, 1 20, 15, 10, 5, 2, 1
CT (s)	5	5	5
MT (°C)	-	-	-
AV (%)	100	100	100
NT (u)	5	5	5 10
DP	no/si	si	si

Taula 3.1. Paràmetres de procés per a les diferents fases de l'experimentació inicial.

3.1.1.2. Verificació de l'estudi preliminar

Per comprovar que els resultats obtinguts l'estudi preliminar són representatius de les peces que s'obtenen amb els diferents paràmetres es repeteixen alguns dels experiments. Es pretén validar les conclusions dels resultats que s'han obtingut en cada una de les tres fases anteriors.

Per a la validació dels resultats de la fase 1 de l'experimentació inicial amb polipropilè es realitzen dos proves. Es repeteixen els experiments tres i vuit segons Taula 3.2 per tal de veure les diferències entre la utilització de pellets humits i assecats a tres segons de temps d'ultrasons.

La comprovació dels resultats de la fase 2 de l'experimentació es realitza mitjançant la reproducció dels experiments onze i quinze segons la Taula 3.2 per veure els efectes de treballar amb una velocitat de baixada lenta de 5 mm/s i una velocitat elevada de 13 mm/s. S'utilitza la velocitat màxima de 13 mm/s perquè del procés d'experimentació inicial es detecta un funcionament anòmal a velocitats superiors a 13 mm/s. I per comprovar els efectes de la utilització de rampes de velocitats de la fase 3, es reproduïxen de nou els experiments vint i vint-i-un de la Taula 3.2 de l'apartat Estudi preliminar amb la diferència que en aquest cas es processen només cinc peces per a cada experiment. S'utilitzen aquestes dues rampes perquè al ser més accentuades que les dues restants a la fase 3

s'obtenen resultats que diferencien millor els efectes de treballar amb rampes ascendents o descendents.

3.1.2. Experimentació amb el motlle a 35°C.

Com s'ha comentat abans, alguns materials plàstics requereixen de temperatura en el motlle a causa de la seva elevada temperatura de fusió. És a dir, les característiques tèrmiques i mecàniques d'alguns materials plàstics provoquen que durant l'emplenat del material fos dins el motlle, el primer front de solidificació es produeixi abans que el material hagi omplert la cavitat completament. Això vol dir que el material se solidifica en un punt intermedi del motlle fent que no entri més material a la cavitat. Quan aquest fenomen succeeix en aquesta nova tecnologia d'emmotllament per ultrasons, el sonotrode troba una resistència contrària al seu moviment de baixada al no ser possible l'entrada de més material dins el motlle. Aquesta força de resistència provoca l'aturada del procés i, per tant, s'obtenen peces incompletes.

Una de les solucions a aquest problema és escalfar el motlle a través de resistències que s'introdueixen a l'interior de les dues meitats del motlle. La temperatura que es vol en el motlle es pot controlar a partir d'un regulador de temperatura que aplica major o menor intensitat a les resistències en funció de la temperatura desitjada i la que presenta el motlle que es mesura amb un termoparell connectat al regulador.

En aquesta experimentació amb temperatura es pretén estudiar si es repeteixen de nou els resultats obtinguts en l'estudi preliminar amb el motlle a temperatura ambient. El polipropilè es tracta d'un material plàstic que requereix d'una temperatura en el motlle entre 7 i 38°C com indica la fitxa tècnica del material proporcionada pel proveïdor, de manera que s'opta per una temperatura de 35°C per a dur a terme aquest experiment. Es repeteixen de nou els experiments de la Fase 1 de l'estudi preliminar en què s'estudia el temps d'ultrasons mínim per obtenir peça, en aquest cas utilitzant directament pellets assecats. També s'analitza l'efecte de treballar amb diferents valors de velocitats constants i amb rampes reproduint de nou alguns dels experiments de les fases 2 i 3 de l'estudi preliminar.

Així doncs la relació de tots els experiments d'aquest projecte amb els paràmetres de procés que s'utilitzen en cada un d'ells es mostra a la Taula 3.2.

3.1.3. Quadre d'experiments

			Paràmetres de procés							
			Número d'experiment	NT (u)	UST (s)	SV (mm/s)	CT (s)	MT (°C)	DP (si/no)	AV (%)
Experimentació amb el motlle a temperatura ambient	Estudi preliminar	Fase 1	1	5	1	3	5	no	no	100
			2	5	2	3	5	no	no	100
			3	5	3	3	5	no	no	100
			4	5	4	3	5	no	no	100
			5	5	5	3	5	no	no	100
			6	5	1	3	5	no	si	100
			7	5	2	3	5	no	si	100
			8	5	3	3	5	no	si	100
			9	5	4	3	5	no	si	100
			10	5	5	3	5	no	si	100
	Fase 2	11	5	3	5	5	no	si	100	
		12	5	3	7	5	no	si	100	
		13	5	3	9	5	no	si	100	
		14	5	3	11	5	no	si	100	
		15	5	3	13	5	no	si	100	
		16	5	3	15	5	no	si	100	
		17	5	3	17	5	no	si	100	
	Fase 3	18	10	3	6, 5, 3	5	no	si	100	
		19	10	3	3, 5, 6	5	no	si	100	
		20	10	3	10, 10, 8, 2	5	no	si	100	
		21	10	3	4, 4, 6, 10	5	no	si	100	
Verificació de l'estudi preliminar	22	5	3	3	5	no	no	100		
	23	5	3	3	5	no	si	100		
	24	5	3	5	5	no	si	100		
	27	5	3	13	5	no	si	100		
	28	5	3	10, 10, 8, 2	5	no	si	100		
	29	5	3	4, 4, 6, 10	5	no	si	100		
	Experimentació amb el motlle a 35°C	30	5	1	3	5	35	si	100	
31		5	2	3	5	35	si	100		
32		5	3	3	5	35	si	100		
33		5	4	3	5	35	si	100		
34		5	5	3	5	35	si	100		
35		5	3	5	5	35	si	100		
36		5	3	7	5	35	si	100		
37		5	3	9	5	35	si	100		
38		5	3	11	5	35	si	100		
39		5	3	10, 10, 8, 2	5	35	si	100		
40		5	3	4, 4, 6, 10	5	35	si	100		

Taula 3.2. Quadre d'experiments.

3.1.4. Material

El material utilitzat en l'experimentació del present projecte és polipropilè (PP) en forma de pellet. El proveïdor és Lyondellbasell i la referència del producte és Hifax EP 3080. Es tracta d'un copolímer termoplàstic semicristal·lí que s'obté de la polimerització del propilè. Les seves principals característiques extretes de la fitxa tècnica del proveïdor són les següents:

- Densitat: 0,9g/cm³
- Índex de fluïdesa: 7,5g/10min
- Esforç de tracció al trencament: 13MPa
- Deformació per tracció al trencament: >100%
- Mòdul de flexió: 900MPa
- Temperatura de reblaniment (punt de vicat): 130°C
- Temperatura de fusió: 173°C
- Resistència a l'impacte (23°C): sense trencament
- Temperatura del motlle per a emmotllament: 7-38°C.
- Assecatge dels pellets 2h a 90°C.

3.2. Anàlisi

Les peces obtingudes per diferents processos d'emmotllament es poden sotmetre a un ampli ventall d'assajos per conèixer la qualitat i característiques del producte processat. D'una banda existeixen els assajos mecànics que comprenen els de tracció, compressió flexió, de resiliència, de llarga durada, etc. Es tracta d'un conjunt de proves de tipus destructiu en què després de la seva realització les peces queden fracturades. També existeixen assajos tèrmics amb gran importància entre els materials termoplàstics a causa de la relació entre les seves propietats i la temperatura. Els més utilitzats gràcies a la seva rapidesa i senzillesa són la mesura de l'Índex de fluïdesa i la Temperatura de reblaniment (punt de Vicat), però també s'utilitzen altres assaigs com la Calorimetria de rastreig diferencial (D.S.C.), l'Anàlisi termogravimètric (T.G.A) i l'Anàlisi dinàmic-mecano-tèrmic (D.M.T.A).

També existeixen els assaigs de comportament al foc molt necessaris per a certes aplicacions que requereixen de tests i proves de seguretat dels productes i la seva certificació quant a inflamabilitat. Alguns dels assaigs més importants són la mesura del Temps d'autoextinció, l'Índex d'oxigen, la inflamabilitat per radiació i l'assaig de fil calent.

Pel que fa als controls òptics, cal dir que són molt útils per a aquells materials plàstics amb qualitats de transparència, brillantor i coloració, com és el cas del polipropilè. Els controls òptics més emprats són el de coordenades colorimètriques prèvies i posteriors al procés de degradació, el control de brillantor, el de la transparència i l'assaig de l'índex de refracció. A més, l'extensa utilització dels materials plàstics en aplicacions elèctriques ha donat importància en els assajos elèctrics com el control de la resistivitat superficial, control de la constant dielèctrica i factor de pèrdua, resistència a l'arc elèctric i el control de resistència antiestàtica. També existeixen altres tipus d'assajos particulars com el de toxicitat, permeabilitat o els no destructius com la termografia, l'assaig de líquids penetrants o la tomografia de raigs X.

També són molt usats els controls de producte final com l'examen visual, el control dimensional o l'anàlisi qualitatiu, que permeten detectar defectes en les peces processades com bombolles, degradació zonal a més de proporcionar informació sobre les retraccions i l'estructura interna entre altres.

En aquest treball ens centrem en els controls de producte final de manera que es duran a terme quatre tipus d'inspecció de peça acabada que s'expliquen a continuació amb l'equipament disponible que es detalla a 0:

- Obtenció de peça

Consisteix en analitzar l'emplenat del motlle. En aquest cas es classifiquen les peces obtingudes en tres nivells mitjançant una inspecció visual. Així es defineixen com a nivell 0 aquelles que el material no ha començat a entrar a la cavitat del motlle. El nivell 0.5 correspon a aquelles peces catalogades com a incompletes ja que el material ha entrat a la cavitat del motlle però no ha arribat fins al final d'aquesta. I les de nivell 1 corresponen a aquelles peces en què s'ha omplert la cavitat del motlle en la seva totalitat i es defineixen com a peces completes.

La classificació de les peces segons els nivells d'obtenció de peces es fa per a totes les experimentacions.

- Porositat de les peces

L'estudi de la porositat de les peces consisteix l'observació de la tipologia de porus existents en les peces processades. En aquest cas es realitza una observació de les peces processades al microscopi disponible al taller del Grep. Donat que es detecta una ampla variació de la porositat al llarg de la peça, es decideix diferenciar tres parts de la peça com es mostra a la Figura 3.1, inici, mig i fi i es classifica el tipus de porositat segons set categories en cada una de les parts en què hagi arribat material segons la Taula 3.3. Aquelles parts de les peces on no hagi arribat material no hi haurà classificació. La classificació de les parts de les peces segons els nivells de porositat es fa per a totes les experimentacions.

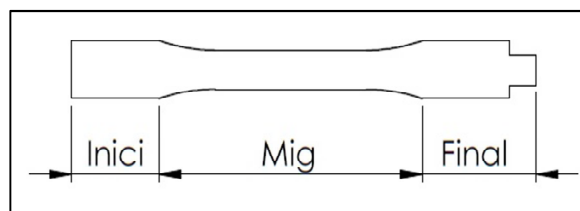


Figura 3.1. Parts de la peça.

Categoria	Descripció
1	Molts porus petits
2	Pocs porus petits
3	Molts porus mitjans
4	Pocs porus mitjans
5	Molts porus grans
6	Pocs porus grans
7	No presenta porositat

Taula 3.3. Classificació de la porositat.

- Pes de les peces

Consisteix en analitzar el pes final de les peces processades i comparar aquest valor amb el pes teòric. Es pesen les peces catalogades com a completes segons l'apartat 3.1.4 quedant exclosa la part de la massalota i part del material del canal d'entrada del material al motlle fins a la marca que queda a causa del canal del termoparell.

Per al càlcul del pes teòric de les peces es realitza una mesura del contorn del motlle i del seu gruix amb la màquina de mesura per coordenades Mitutoyo Crysta ApexC 544. Les dimensions del motlle no s'obtenen del disseny amb el software CAD perquè durant l'experimentació es malmet la superfície del motlle de manera que es mecanitza de nou el motlle augmentant així les seves dimensions reals respecte el dibuix CAD. Les dades del contorn del motlle obtingudes es tracten amb el programa de dibuix gràfic SolidWorks per obtenir el volum real del motlle. Aquest pren un valor de $145,79\text{mm}^3$. Com que la densitat del polipropilè amb el que treballem és de $0,9\text{g/cm}^3$, el pes de les peces teòric ha de ser de $131,21\text{mg}$.

La comparació del pes de les peces obtingudes en les diferents condicions de treball es realitza per a totes les fases de l'experimentació; però l'anàlisi d'aquest amb el pes teòric que haurien de tenir es realitza només a partir de la fase 2, perquè el procés de determinació del volum del motlle es produeix després del treball de mecanitzat previ a la segona fase de l'experimentació, de manera que no es coneix el volum exacte del motlle durant la primera fase i per tant, els valors dels pesos de les peces no es poden comparar

amb cap valor teòric. Aquesta comparació també es realitza en les proves de validació de l'experimentació inicial amb polipropilè.

- Dimensions de les peces

Es mesuren les dimensions de les peces obtingudes al microscopi disponible al taller. Es fan mesures en tres seccions de les peces com es mostra a la Figura 3.2: inici, mig i fi, tant l'amplada com el gruix.

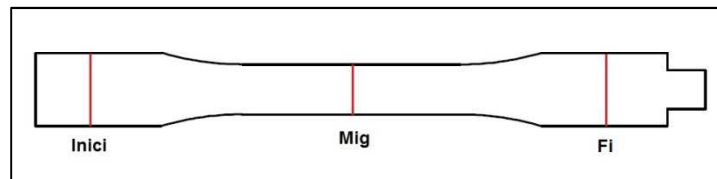


Figura 3.2. Seccions de mesura de les dimensions de les peces.

També es prenen mesures de les dimensions exactes de la cavitat del motlle, per determinar d'aquesta manera quines són les mides teòriques que haurien de tenir les peces i poder fer un anàlisi del percentatge d'emplenament de la cavitat del motlle. La mesura de les dimensions d'amplada del motlle es realitza amb el microscopi disponible al taller; i el gruix del motlle es mesura amb la màquina de mesura per coordenades Mitutoyo Crysta ApexC 544. Els resultats obtinguts es mostren a la Taula 3.4.

Secció	Amplada (μm)	Gruix (μm)
Inici	3912,3	1295
Mig	2717,0	1295
Fi	3974,3	1295

Taula 3.4. Dimensions del motlle en diferents seccions.

La diferència entre la mida de la peça final i la mida del motlle també és conseqüència de la contracció del material durant el refredament de la peça, però aquests paràmetres de refredament es mantenen constants per a totes les experimentacions, de manera que aquesta diferència de tamany es podrà considerar un efecte de la variació de la resta de paràmetres de procés. L'estudi de les dimensions de les peces es realitza a partir de la fase 3 de l'experimentació inicial amb polipropilè perquè es tracta d'un estudi més específic d'anàlisi de qualitat del procés enfront dels estudis d'obtenció de peça o de porositat que es tracten d'anàlisis més generals. També es realitza aquest estudi per a les proves de verificació de l'experimentació inicial.

3.3. Elaboració del Procediment de caracterització de procés.

L'experimentació i l'anàlisi dels resultats obtinguts dels apartats anteriors són la base per elaborar una metodologia que permeti ajustar els paràmetres de procés per tal de complir amb uns requeriments de qualitat prèviament determinats (porositat, pes, dimensions, etc). Així doncs aquesta secció consta de diversos objectius. El primer tracta d'identificar clarament les fases a seguir per tal comprovar l'efecte dels diferents paràmetres sobre les peces processades. El segon consisteix en establir quins criteris de qualitat són importants per obtenir els resultats que es consideren acceptables. En tercer lloc també té com a objectiu estudiar la manera com els resultats de cada fase poden condicionar les següents; i finalment l'últim objectiu consisteix en establir de forma explícita quin tipus de resultats es poden obtenir d'aplicar la metodologia en la seva totalitat.

El procediment de caracterització de procés és bàsic per l'avanç en el coneixement de la tecnologia d'emmotllament per ultrasons ja que es tracta d'una nova tecnologia amb poca base de recerca quant a caracterització de procés. Es tracta d'un procés amb paràmetres de procés nous respecte altres mètodes d'emmotllament a més d'un processat de plàstic complex que cal estudiar per comprendre millor l'efecte de tots els paràmetres sobre les peces i poder així aplicar les mesures de millora de procés adequades.

4. RESULTATS

4.1. Resultats de l'experimentació

Els resultats de l'experimentació, en la seva totalitat, es mostren a l'Annex A, i s'hi inclouen els paràmetres de procés utilitzats per a cada experiment així com també els resultats dels anàlisis de les peces processades. No obstant, a la Taula 4.1 es mostra la relació de les taules de l'Annex A amb els paràmetres de procés que es controlen en cada experiment i els anàlisis sobre les peces processades que s'efectuen.

Taula de l'Annex A	Etapas d'experimentació	Paràmetres de procés	Anàlisi de resultats
A.1	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Estudi preliminar, Fase 1	Q, DP, MT, SV, SP, UST, CT	Emplenament del motlle, porositat, pes
A.2	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Estudi preliminar, Fase 2	Q, DP, MT, SV, SP, UST, CT	Emplenament del motlle, porositat, pes
0	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Estudi preliminar, Fase 3	Q, DP, MT, SV, SP, UST, CT	Emplenament del motlle, porositat, pes, dimensions
A.4	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Verificació de l'estudi preliminar	Q, DP, MT, SV, SP, UST, CT	Emplenament del motlle, porositat, pes, dimensions
A.5	Experimentació amb el motlle a 35°C	Q, DP, MT, SV, SP, UST, CT	Emplenament del motlle, porositat, pes, dimensions

Taula 4.1. Resum del contingut de l'Annex A. Taula de resultats.

En l'Annex B es mostren les imatges obtingudes de l'anàlisi de la porositat de les peces processades. Tot i que s'han generat imatges per a cada una de les peces en les diferents parts, en aquest projecte només es mostren les més representatives de les diferents etapes de l'experimentació a causa de la gran quantitat d'imatges existents. La descripció de cada una de les fotografies es mostra a la Taula 4.2.

Nº imatge a l'Annex B	Etapa d'experimentació	Descripció
1	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Estudi preliminar, Fase 1	Pellets humits, 1s UST
2	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Estudi preliminar, Fase 1	Pellets assecats, 1s UST
3, 4, 5	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Estudi preliminar, Fase 1	Pellets humits, 3s UST
6, 7, 8	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Estudi preliminar, Fase 1	Pellets assecats, 3s UST
9, 10, 11, 12	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Estudi preliminar, Fase 2	5 mm/s SV
13, 14, 15, 16	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Estudi preliminar, Fase 2	17mm/s SV
17, 18, 19	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Estudi preliminar, Fase 3	10, 10, 8, 2mm/s SV
20, 21, 22, 23	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Estudi preliminar, Fase 3	4,4, 6, 10 mm/s SV
24, 25, 26, 27	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Verificació de l'estudi preliminar	Pellets humits, 3s UST
28, 29, 30, 31	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Verificació de l'estudi preliminar	Pellets assecats, 3s UST
32, 33, 34, 35	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Verificació de l'estudi preliminar	5mm/s SV
36, 37, 38, 39	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Verificació de l'estudi preliminar	13mm/s SV
40, 41, 42, 43	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Verificació de l'estudi preliminar	10, 10, 8, 2mm/s SV
44, 45, 46, 47	Experimentació amb el motlle a temperatura ambient, Verificació de l'estudi preliminar	4, 4, 6, 10mm/s SV
48, 49, 50, 51	Experimentació amb el motlle a 35°C	3s UST
52, 53, 54, 55	Experimentació amb el motlle a 35°C	5mm/s SV
56, 57, 58, 59	Experimentació amb el motlle a 35°C	13mm/s SV
60, 61, 62	Experimentació amb el motlle a 35°C	10, 10, 8, 2mm/s SV
63, 64, 65, 66	Experimentació amb el motlle a 35°C	4, 4, 6, 10mm/s SV

Taula 4.2. Resum del contingut de l'Annex B. Recull fotogràfic.

4.2. Anàlisi de resultats de l'experimentació

4.2.1. Experimentació amb el motlle a temperatura ambient.

4.2.1.1. Estudi preliminar

Fase 1. Assecatge dels pellets i temps d'ultrasons.

S'observa que no hi ha molta diferència en quant a la obtenció de peça per als pellets humits i els pellets assecats. Només en una peça s'ha omplert parcialment la cavitat del motlle amb els pellets assecats amb dos segons de temps d'ultrasons i en canvi amb els pellets humits no. A la Figura 4.1 es pot veure el nombre de peces obtingudes per als diferents temps d'ultrasons amb pellets humits i pellets assecats.

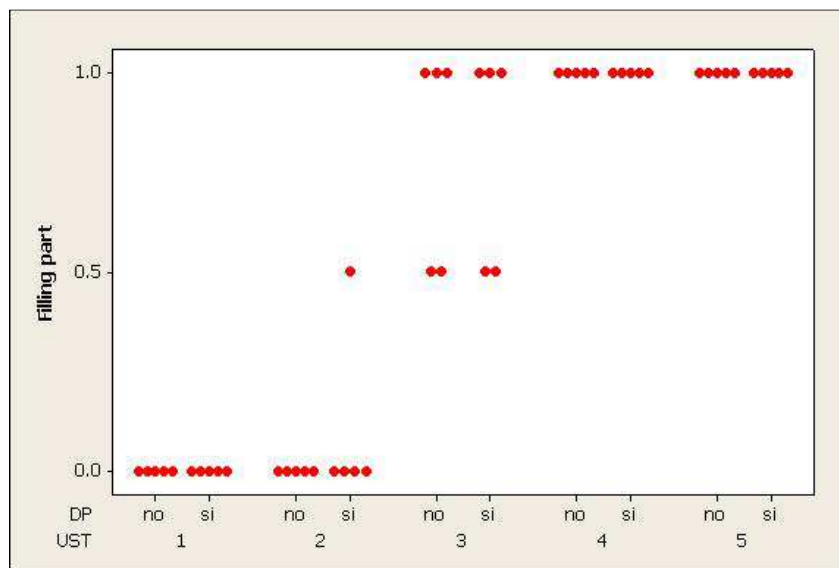
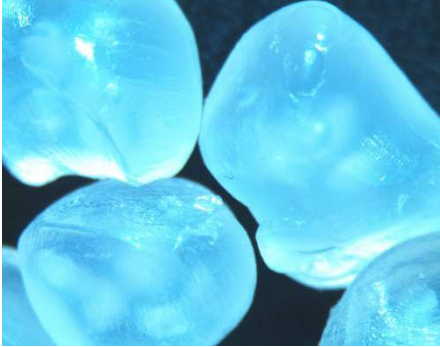


Figura 4.1. Peces obtingudes amb pellets humits i assecats per diferents temps d'ultrasons.

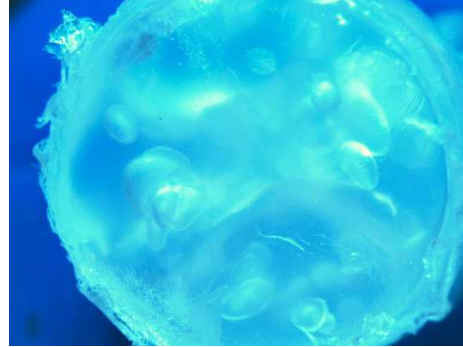
S'arriba a la conclusió que amb tres segons de temps d'ultrasò es poden obtenir peces complertes i que s'hauran de variar altres variables de procés per tenir una major efectivitat amb aquest temps.

Tot i que no s'obtenen peces amb baixos temps d'ultrasons en diferents condicions d'assecatge, es veuen algunes diferències entre les mostres obtingudes amb pellets assecats o humits. Per a un segon els pellets assecats comencen a fondre i a soldar-se

entre si mentre que els pellets humits amb prou feines es fonen. Aquest efecte es pot veure a la Imatge B.3 i la Imatge B.3 de Annex B i també a la Imatge 4.1 i Imatge 4.2 . Amb dos segons no és tan evident la diferència però també es veu una major fusió dels pellets secs que dels humits.



Imatge 4.1. Pellets humits sense fondre amb un segon de temps d'ultrasons.



Imatge 4.2. Pellets assecats soldats amb un segon de temps d'ultrasons.

La porositat en diferents parts de la proveta (inici, mig i final) es pot observar a la Figura 4.2 on es mostren el nombre de peces per a cada tipus de porositat segons la classificació descrita a la Taula 3.3.

Pel que fa a la porositat, aquesta es pot començar a observar a partir de tres segons de temps d'ultrasò que és quan comencen a sortir peces totalment complertes. S'observen diferències entre les peces obtingudes a partir de pellets humits i les obtingudes a partir de pellets assecats en tres segons, sobretot en les parts inicials i centrals, on s'observa menys porositat en les peces processades amb pellets assecats. També es pot veure que la distribució de la porositat al llarg de la proveta no és uniforme. La porositat s'intensifica a l'inici de la proveta i a la part central amb un tamany de porus majoritàriament petit i mitjà, mentre que a la part final s'elimina la porositat o bé existeixen algunes bombolles de tamany mitjà. Aquest efecte podria ser conseqüència de la velocitat d'ultrasò amb la que es treballa. Això es pot comprovar amb el posterior anàlisi que es realitzarà amb els experiments del divuitè al vint-i-unè. Per a quatre i cinc segons de temps d'ultrasò la diferència de porositat no és tan clara. A la Imatge 4.3 es pot observar un exemple de la distribució de la porositat al llarg de la proveta.

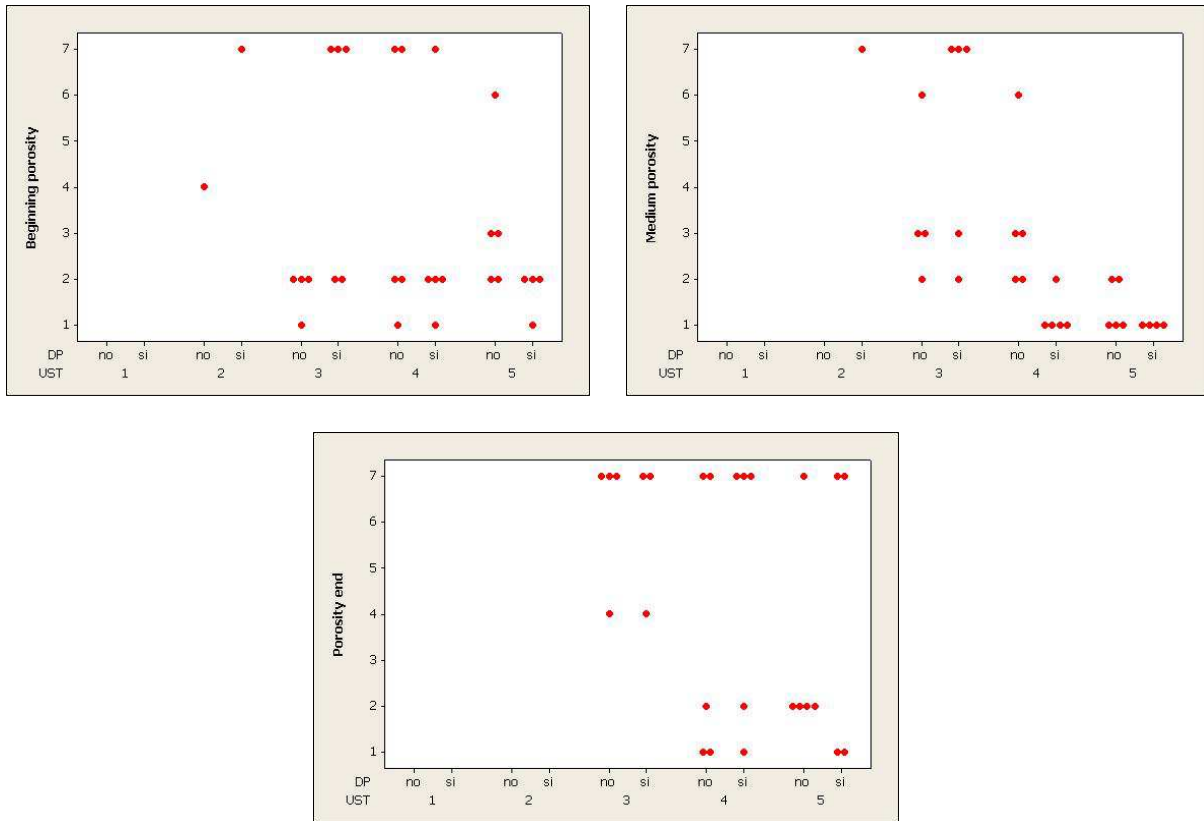
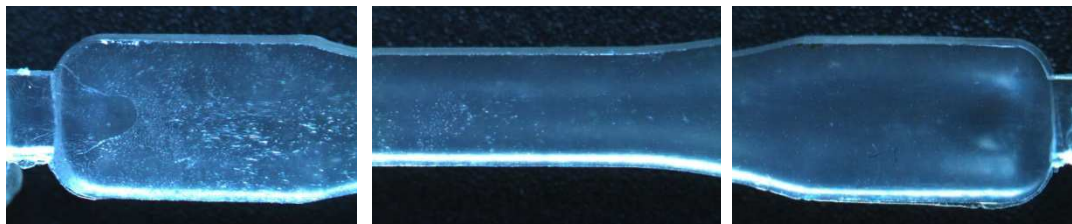


Figura 4.2. Porositat de les provetes en la part de l'inici, mig i fi.



Imatge 4.3. Porositat de la peça a la part de l'inici, mig i fi.

Així s'arriba a la conclusió que l'assecatge dels pellets és un factor important en la porositat de la peça final, de manera que en les posteriors experimentacions s'utilitzaran sempre pellets assecats en unes condicions de dues hores en un forn a 90°C com indica la fitxa tècnica del material proporcionada pel proveïdor.

A més en la realització de la primera fase de les provetes es disposa d'un termoparell que indica la temperatura del material en un punt proper a l'entrada d'aquest dins la cavitat.

A la Figura 4.3 s'observa una comparativa de la temperatura màxima assolida en processos amb pellets secs i humits per diferents temps d'ultrasò.

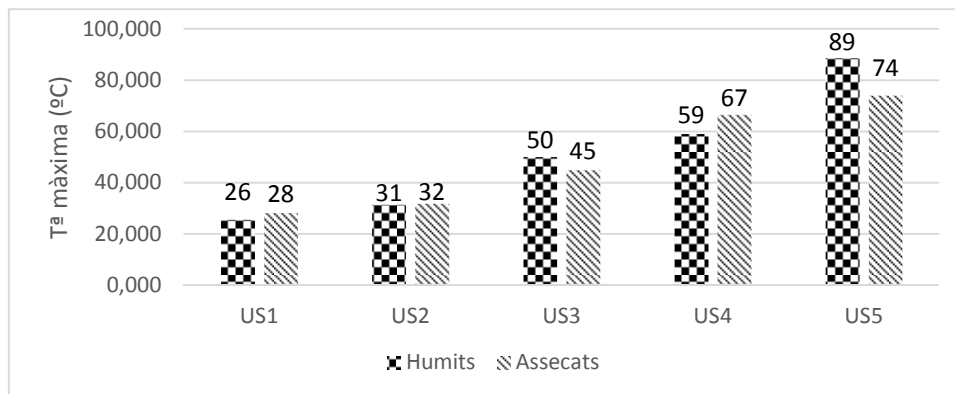


Figura 4.3. Temperatura màxima del material dins el motlle en el punt de contacte amb el termoparell al canal d'entrada.

Es realitza també l'estudi del pes de les peces obtingudes, amb la hipòtesi que aquest ha de tenir relació amb el tipus de porositat present en les peces. El pes de les peces obtingudes per als experiments del primer al desè es mostra a la Figura 4.4.

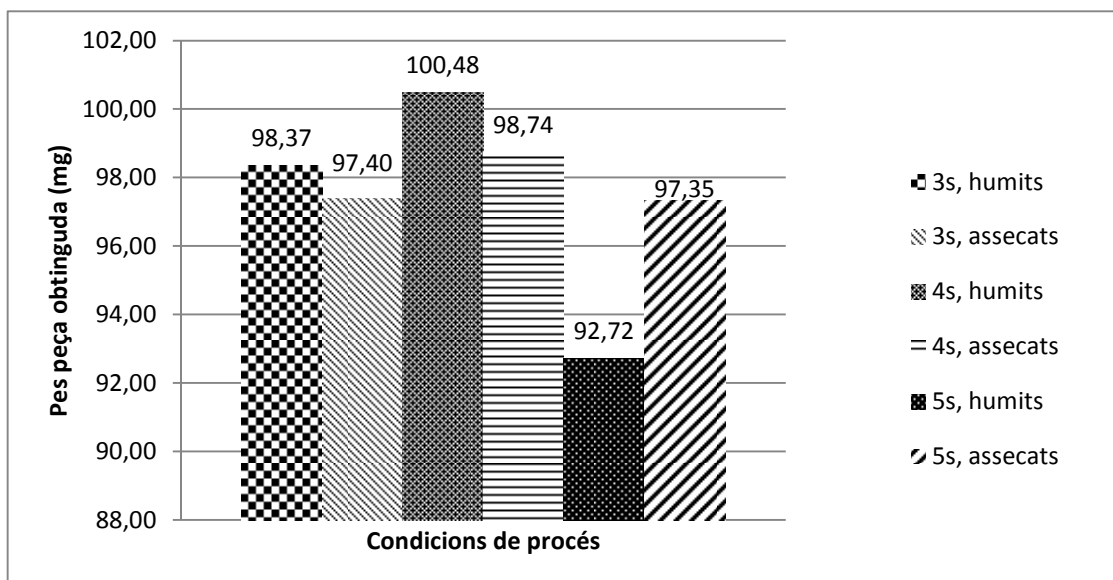


Figura 4.4. Pes de les peces obtingudes per a diferents temps d'ultrasons amb pellets humits i pellets assecats.

La Figura 4.4 no inclou les provetes realitzades amb un i dos segons de temps d'ultrasons perquè en cap dels casos es va obtenir peça completa. Per a tres i quatre temps d'ultrasons es veu com el pes de les peces és major treballant amb pellets humits, mentre

que si es treballa amb pellets assecats el pes final disminueix. Això és conseqüència de la presència d'humitat en els pellets, de manera que si no s'assequen abans de processar-los, al tenir major densitat l'aigua que el polipropilè, les peces obtingudes pesen més amb pellets humits que assecats. En canvi, per a cinc segons de temps d'ultrasons passa el contrari. El pes de les peces és major amb pellets assecats que humits. Això pot ser perquè amb aquests temps, com es pot veure a la Figura 4.3, la temperatura màxima en un punt concret del motlle és superior que si es treballa amb tres i quatre segons, arribant gairebé a la temperatura d'ebullició de l'aigua. És possible que el material arribi a aquesta temperatura en algun altre punt del motlle, i que la humitat en forma de vapor s'escapi pels canals dels termoparells, produint el mateix efecte d'assecatge dels pellets al forn però amb més eficàcia, de manera que el pes final de la peça és menor.

Fase 2. Estudi de velocitat constant.

En les experimentacions de la fase en què es varia el paràmetre de velocitat de baixada del sonotrode el nombre de peces obtingudes segons la velocitat del sonotrode es mostra a la Figura 4.5.

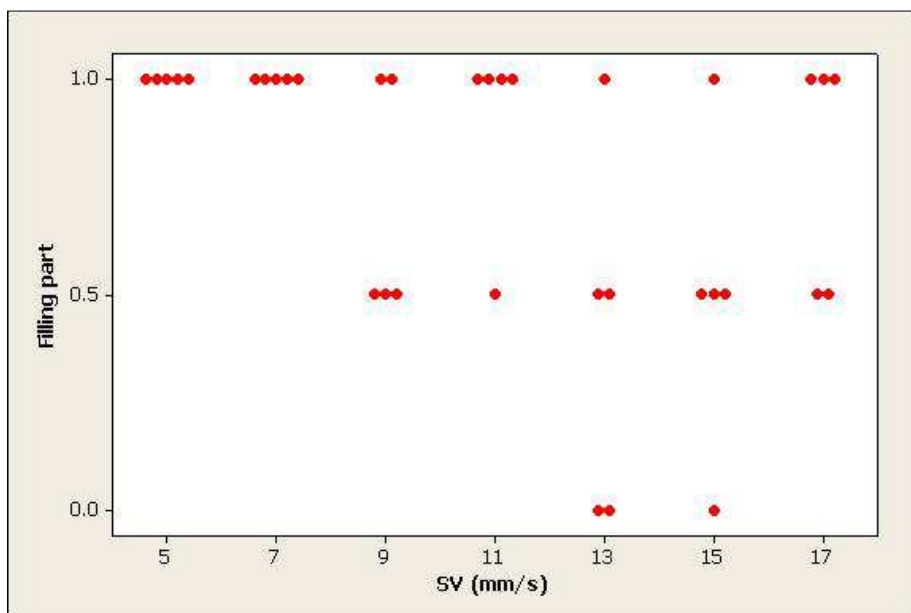


Figura 4.5. Peces obtingudes per a diferents valors de velocitat de baixada del sonotrode.

Com es pot veure les velocitats amb major èxit de peça completa són 5 i 7 mm/s, ja que són les úniques velocitats amb un èxit total d'obtenció de peça. A més, a partir de 11mm/s es produeix un moviment anòmal del sonotrode: aquest s'atura un moment en la seva trajectòria i a continuació reprèn el moviment fins a acabar el cicle. Les peces obtingudes en aquestes velocitats presenten dues parts ben diferenciades: la més pròxima a l'entrada de material en la que es veu molta porositat i irregularitat en el material, i la regió més pròxima al final de peça on s'observa menys porositat.

A la Figura 4.6 es mostra la distribució de la porositat en les diverses parts de la peça (inici, mig i final) quan s'utilitzen diversos temps d'ultrasons.

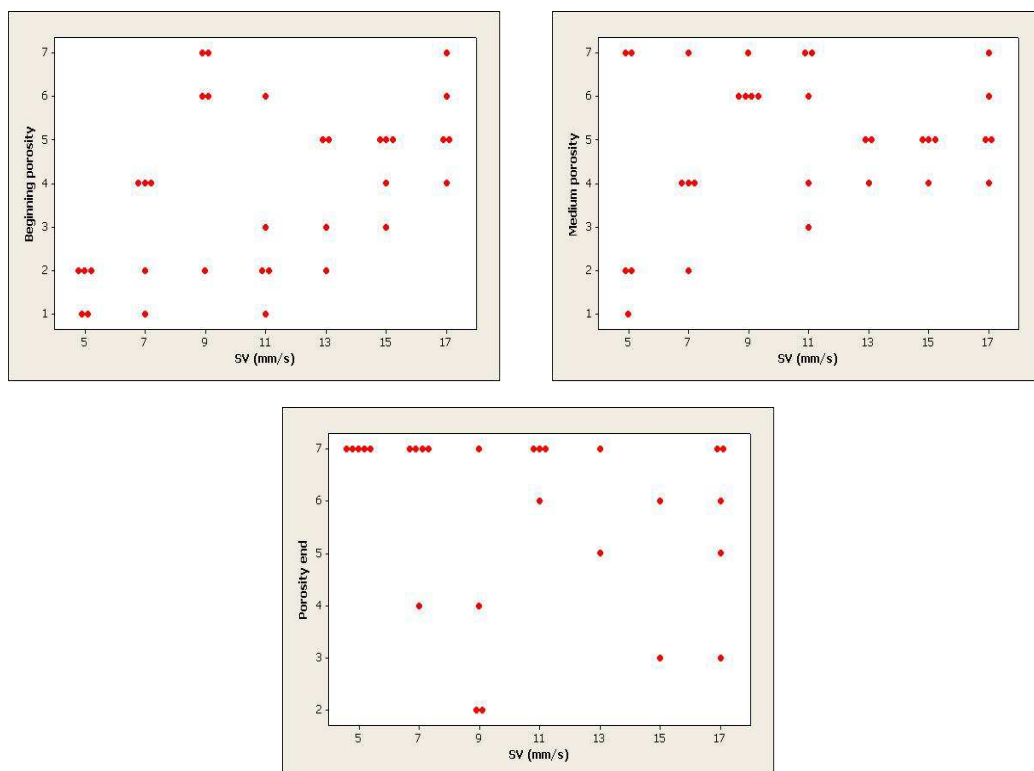


Figura 4.6. Porositat de les peces a la part de l'inici, mig i fi per a diferents velocitats.

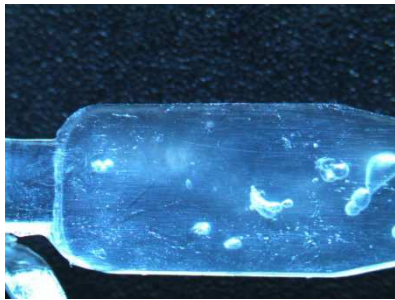
S'observa una tendència d'augment del tamany dels porus a mesura que augmenta la velocitat (Imatges 4.4, 4.5, 4.6 i 4.7). També es pot veure que a velocitats baixes fins a 7mm/s hi ha una reducció important de la porositat al final de la peça respecte les parts inicial i central; mentre que a partir de 7mm/s hi ha més varietat de porositat en les peces obtingudes de manera que no es pot deduir una tendència clara de la porositat a aquestes velocitats.



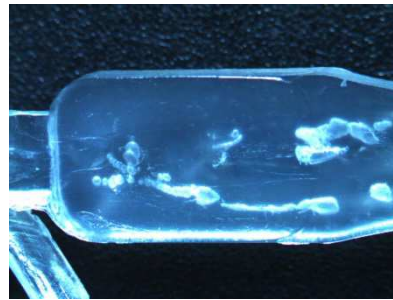
Imatge 4.4. Porositat a l'inici amb 5mm/s.



Imatge 4.5. Porositat a l'inici amb 7mm/s.



Imatge 4.6. Porositat a l'inici amb 13mm/s.



Imatge 4.7. Porositat a l'inici amb 15mm/s.

Es fa l'estudi del pes de les peces per als experiments variant la velocitat de baixada del sonotrode i s'arriba als resultats de la Figura 4.7.

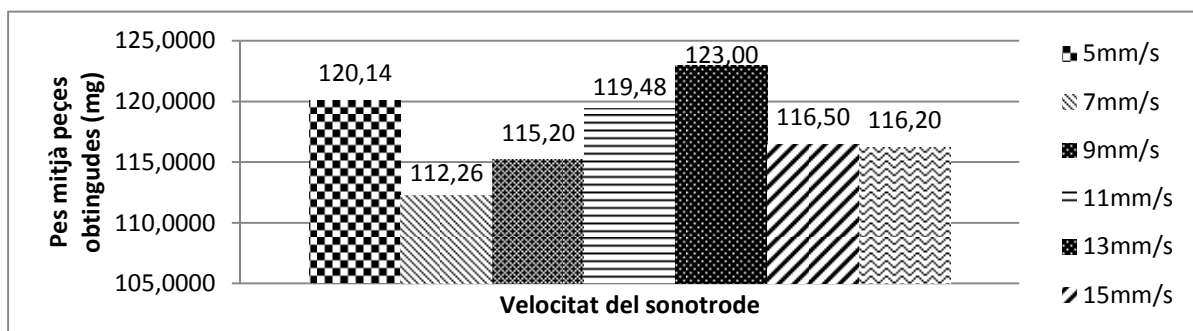


Figura 4.7. Pes de les peces obtingudes per a diferents velocitats de baixada del sonotrode.

Com es pot comprovar el pes de les peces obtingudes en aquests experiments respecte la fase anterior és superior. Això és degut a que s'ha mecanitzat de nou el motlle perquè la superfície estava malmesa a causa de rallades provocades durant l'extracció de les peces. En mecanitzar de nou el motlle les dimensions han augmentat provocant un augment així del pes de les peces que s'obtenen.

A la Figura 4.7 és difícil observar una tendència de pes mitjà amb la velocitat de baixada del sonotrode ja que aquest és molt irregular i en algunes velocitats com 13mm/s i 15mm/s només s'ha obtingut una sola peça completa de manera que les mostres utilitzades en fer l'estudi són poc representatives. Pel que fa al percentatge del pes de les peces respecte el total teòric aquest es pot veure a la Figura 4.8 i era d'esperar que seguís el mateix patró que la Figura 4.7 ja que el pes de les peces obtingudes manté una relació lineal amb el percentatge respecte el pes teòric.

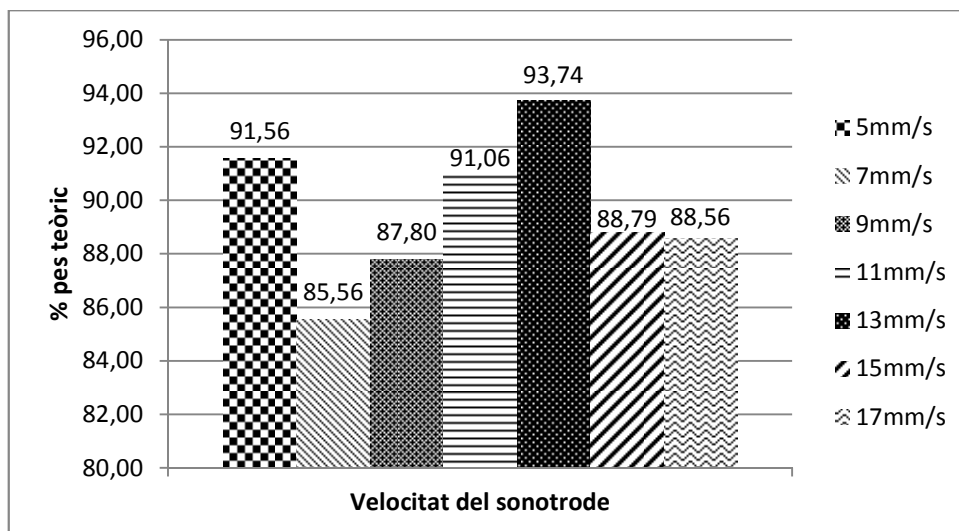


Figura 4.8. Percentatge respecte el pes teòric de les peces

Cal destacar que els percentatges respecte el pes teòric de les peces prenen valors baixos amb un màxim del 93,74% i un mínim del 85,56%. Les velocitats més favorables són les de 5, 11 i 13mm/s, però tenint en compte els anteriors estudis d'obtenció de peça i porositat destaquen els mals resultats a velocitats elevades a partir de 11mm/s, es descarten aquestes últimes dues velocitats com a condicions favorables de procés.

A més, també veiem que el percentatge mínim de pes correspon a la velocitat de 7mm/s, de manera que tot i que es tracta d'una velocitat amb èxit total d'obtenció de peça i poca porositat, aquesta velocitat tampoc resulta favorable per al procés

Fase 3. Estudi de rampa de velocitat.

En el últims experiments es comprova els efectes d'utilitzar una velocitat de baixada del sonotrode variable durant el procés. La posició del sonotrode per a cada una de les rampes de velocitat al llarg del temps d'ultrasons es mostra en la Figura 4.9.

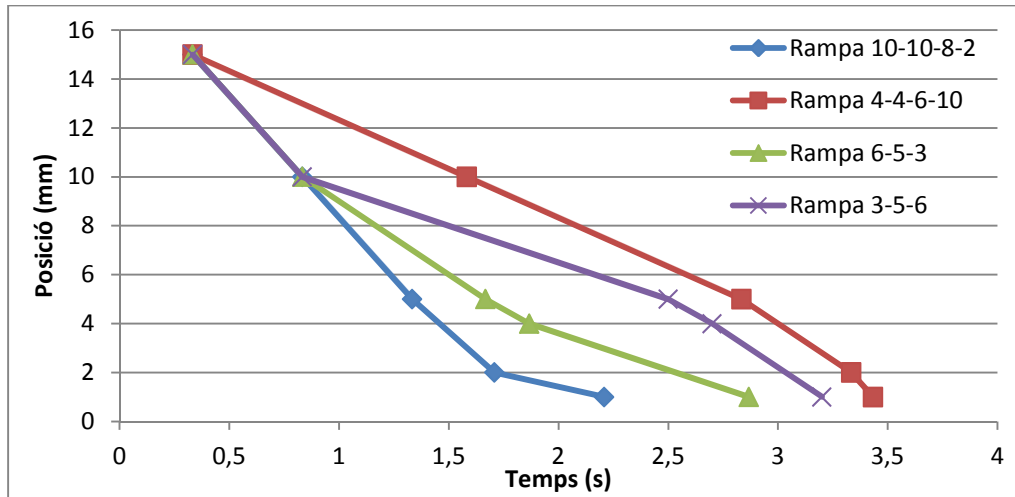


Figura 4.9. Posició del sonotrode durant el temps d'ultrasons.

El nombre de peces obtingudes per a cada una de les rampes de velocitats utilitzades es mostra a la Figura 4.10.

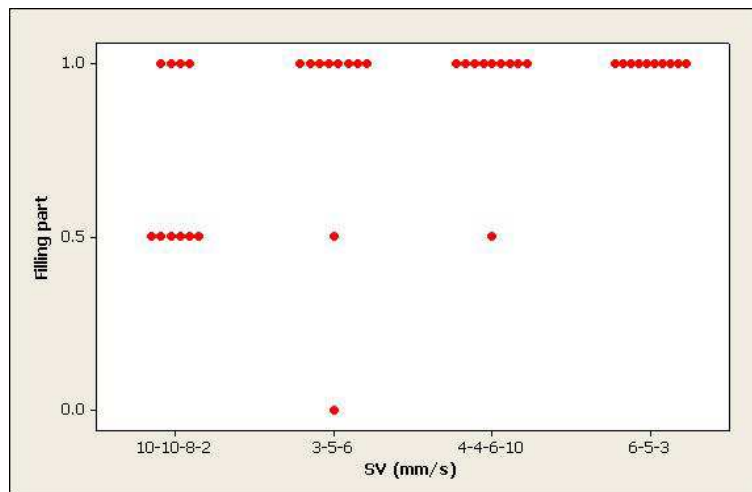


Figura 4.10. Peces obtingudes per a cada rampa de velocitats.

S'observa que les millors condicions pel que fa a obtenció de peça són la utilització de una rampa descendent de 6, 5 i 3mm/s, i una ascendent de 4, 4, 6 i 10mm/s, de manera

que per comprovar les diferències entre la utilització d'aquestes dues s'estudia la porositat de les peces com es mostra a la Figura 4.11. Si s'utilitzen les altres dues rampes de velocitat apareixen peces incompletes, i fins i tot a la rampa de 3, 5 i 6mm/s apareix un cas en què ni tan sols es comença a omplir la cavitat del motlle. Aquest últim correspon a un cas aïllat, ja que ni tan sols s'han començat a fondre els pellets, i es poden menystenir els seus resultats obtinguts.

Com es pot veure la part inicial de la peça és on es presenten majoritàriament porus de més petit tamany, mentre que a la part central apareix molta més diversitat en el tamany dels porus i al final n'hi ha poca i de major grandària. A la part inicial veiem que hi ha molt poca diferència entre les rampes utilitzades en els experiments amb les rampes poc accentuades; en ambdós casos apareixen porus de tamany petit i mitjà en percentatges prou similars. Mentre que amb la rampa descendent de 10, 10, 8 i 2mm/s el tamany dels porus és major i apareix una proveta sense porositat. I amb la rampa de 4, 4, 6 i 10mm/s hi ha dos probes sense porositat, i la resta presenten bombolles petites en més o menys quantitat (Imatges 4.8, 4.9, 4.10 i 4.11).

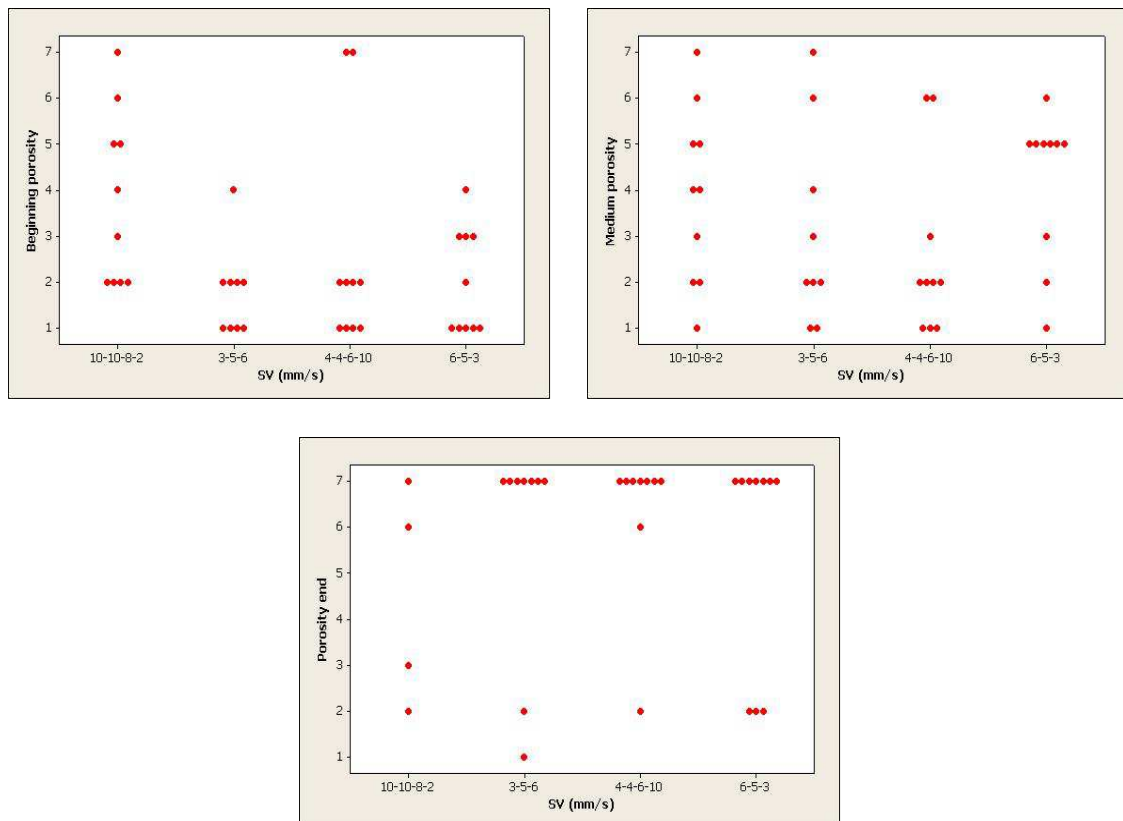
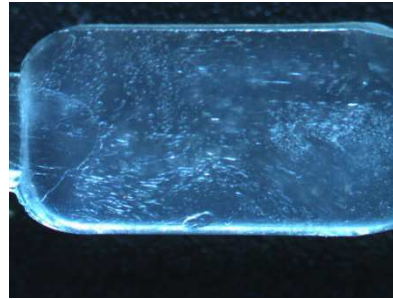


Figura 4.11. Porositat de les peces a la part de l'inici, mig i fi per a diferents rampes de velocitat.



Imatge 4.8. Porositat a l'inici amb 6, 5 i 3mm/s.



Imatge 4.9. Porositat a l'inici amb 3, 5 i 6mm/s.



Imatge 4.10. Porositat a l'inici amb 10, 10, 8 i 2mm/s.



Imatge 4.11. Porositat a l'inici amb 4, 4, 6 i 10mm/s.

A la part central de les peces, com ja s'ha dit, és on es presenta més diversitat de porositat en cada una de les rampes, i és difícil destacar diferències entre les diferents rampes de velocitats. En canvi, a la part final de la peça, es veu amb claredat els mals resultat obtinguts amb la rampa descendent de 10, 10, 8 i 2mm/s, ja que en més de la meitat de les proves realitzades el material no ha arribat a omplir la cavitat del motlle en la seva totalitat. La resta de rampes utilitzades presenten un elevat percentatge de provetes sense porositat (70% cadascuna d'elles) i les que tenen porositat és de tamany sobretot petit.

Així doncs es conclou que els dos tipus de rampes amb millor resultat pel que fa a obtenció de peça i a porositat són la rampa descendent de 6, 5 i 3mm/s, i la rampa ascendent de 4, 4, 6 i 10mm/s.

En canvi es pot arribar a conclusions més contundents quan fem l'estudi del pes utilitzant rampes de velocitat. Els resultats obtinguts es mostren a la Figura 4.12.

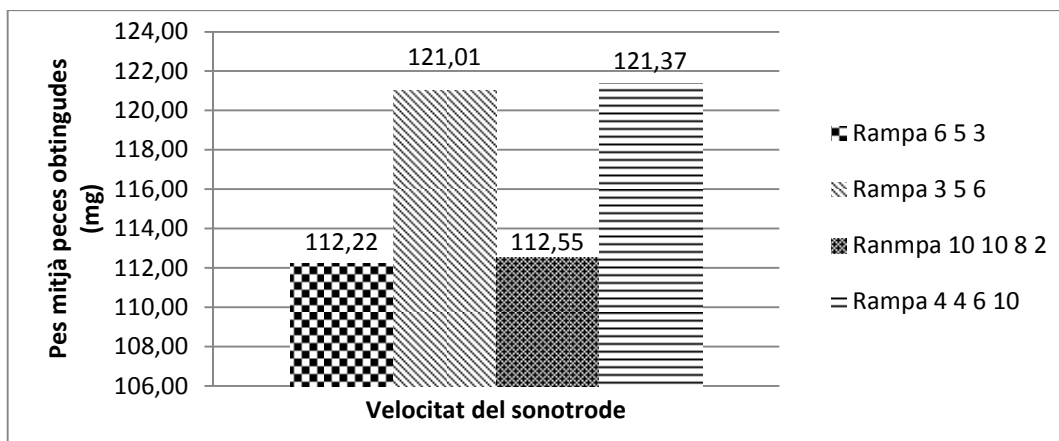


Figura 4.12. Pes mitjà de les peces obtingudes a partir de diferents rampes de velocitats.

S'observa un clar augment del pes mitjà de les peces quan s'utilitzen rampes de velocitat ascendent; és a dir, començant amb una velocitat baixa i augmentant-la amb el moviment del sonotrode. S'estudia també el pes de les peces obtingudes respecte el pes teòric, obtenint el resultats que es mostren a la Figura 4.13.

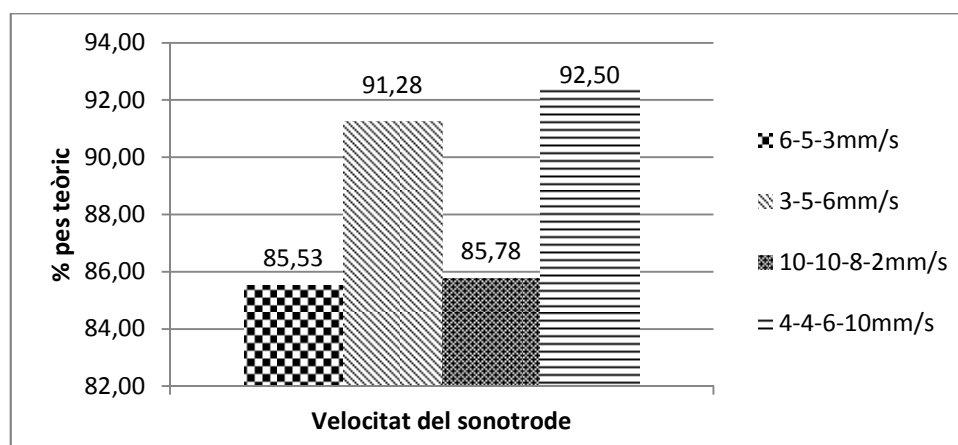


Figura 4.13. Percentatge del pes teòric de les peces.

Com era d'esperar els percentatges respecte el pes teòric segueixen també el mateix patró que en la Figura 4.12 on es mostra el pes de les peces. Així doncs, s'obtenen millors resultats amb rampes ascendents.

També es duu a terme l'estudi de les dimensions de les peces obtingudes. Dels resultats de les mesures en els diferents punts de les provetes s'obtenen els percentatges d'emplenament de l'amplada de la cavitat del motlle com es mostra a la Figura 4.14.

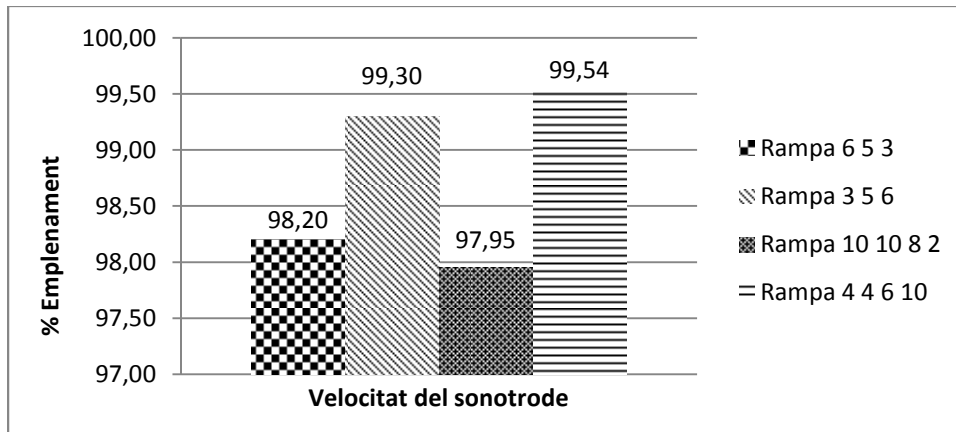


Figura 4.14. Percentatge d'emplenament de l'amplada de la cavitat del motlle.

Com es pot observar el percentatge d'emplenament de la cavitat del motlle és superior quan s'utilitzen rampes de velocitats ascendents envers rampes de velocitats descendents. La diferència entre els dos tipus de rampa no és molt elevada (la màxima és de 1,59%), i si s'analitzen només els resultats de la rampa ascendent s'observa que el percentatge d'emplenament és major per a la rampa més accentuada de 4, 4, 6 i 10mm/s.

També es pot observar a la Figura 4.15 que la variació de les mesures realitzades és més petita amb la rampa ascendent de 4, 4, 6 i 10mm/s.

Així doncs, com també s'havia conclòs en l'estudi de la porositat i el pes de la peça final es pot dir que s'obtenen millors resultats amb una rampa de velocitat ascendent i en particular amb la rampa més accentuada de 4, 4, 6 i 10mm/s.

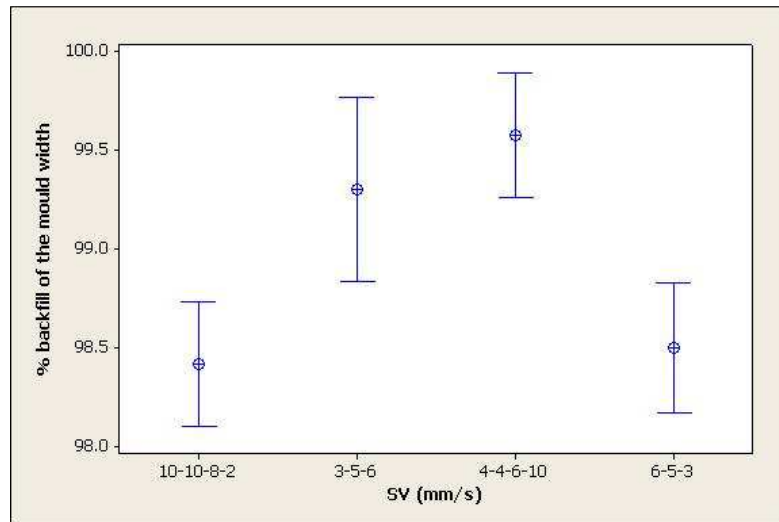


Figura 4.15. Variància del percentatge d'emplenament de l'amplada de la cavitat del motlle.

A més de comprovar l'amplada de la peça respecte l'amplada del motlle també es fa l'estudi del gruix de la peça comparat amb el del motlle. El percentatge d'emplenament del gruix de la cavitat del motlle es mostra a la Figura 4.16.

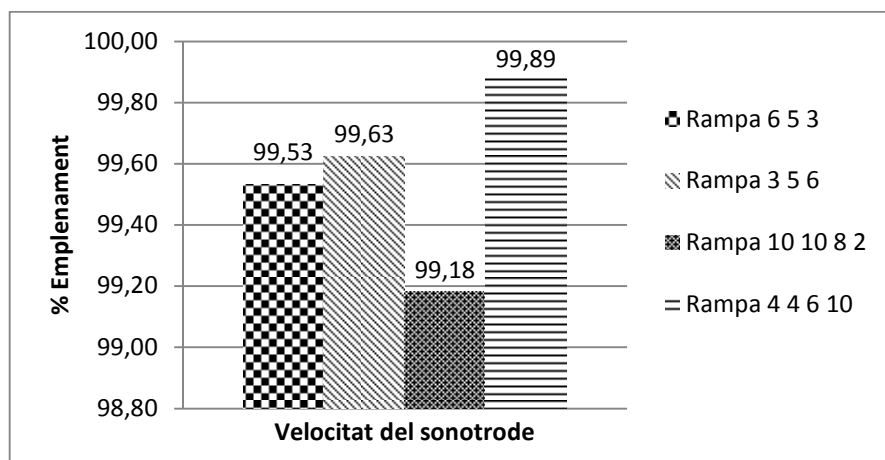


Figura 4.16. Percentatge d'emplenament del gruix de la cavitat del motlle.

No es detecta molta diferència, ja que tots els valors són superiors al 99% d'emplenament i es pot considerar que en tots els casos s'obtenen bons resultats.

A més, com es pot veure a la Figura 4.17, la variació de la mida del gruix és poc diferent d'unes condicions a les altres, però sí que s'observa major variació en les rampes menys accentuades.

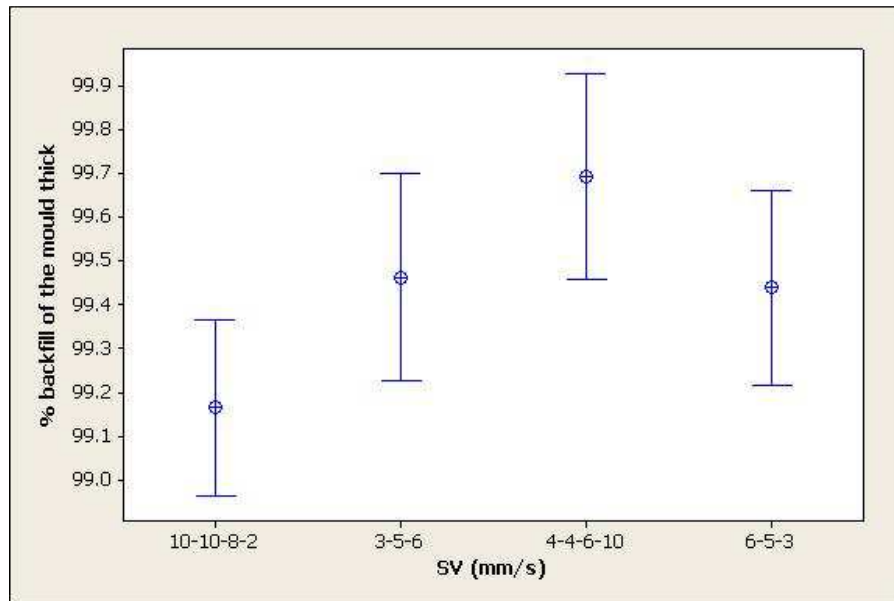


Figura 4.17. Percentatge d'emplenament del gruix de la cavitat de motlle.

La conclusió de l'estudi de la mida de la peça final obtinguda és que pel que fa a l'amplada sí que hi ha diferències significatives favor de la utilització de la rampa ascendent de 4, 4, 6 i 10mm/s com també s'havia conclòs en l'estudi del pes de les peces obtingudes. En canvi, pel que fa al gruix de la peça, les diferències observades en les peces no són gaire importants, ja que en tots els casos el gruix de la peça és gairebé constant i idèntic al gruix del motlle.

Discussió de resultats

Després de l'experimentació inicial amb polipropilè s'arriba a unes conclusions quant a paràmetres de procés més favorables per l'obtenció de peces amb millor qualitat pel que fa a nivell de porositat, pes i dimensions.

- En primer lloc es destaca la millora del procés quan es treballa a partir de pellets assecats, ja que es redueix la porositat en aquestes condicions i també disminueix el pes de les peces gràcies a l'absència d'humitat. A més, es determina el temps d'ultrasons a partir del qual s'aconsegueix un èxit total quant a obtenció de peces que és de tres segons.
- Pel que fa a la influència de la velocitat de baixada del sonotrode es poden veure diferències entre la utilització d'una velocitat constant o una rampa de velocitats. De la segona fase de l'experimentació es conclou que és millor

treballar amb velocitats baixes de 5 o 7mm/s per obtenir peces completes. A més, el fet de treballar amb aquestes velocitats lentes és també més favorable ja que aquesta augmenta amb la velocitat. I pel que fa al pes de les peces, els percentatges respecte el pes teòric més elevats es donen a unes velocitats de 5, 11 i 13mm/s. En conclusió, es descarten com a òptimes les velocitats de 11 i 13mm/s perquè a aquestes velocitats es produeix un funcionament anòmal de la màquina i els nivells de porositat són elevats. També es descarta la velocitat de 7mm/s perquè malgrat té un èxit d'obtenció de peça elevat, el percentatge de pes respecte el teòric és el més baix en aquesta fase.

- De la tercera fase de l'experimentació, les millors rampes de velocitats utilitzades són les de 6, 5 i 3mm/s i 4, 4, 6 i 10mm/s, perquè tenen major d'èxit d'obtenció de peça, també presenten nivells més baixos de porositat i l'estudi del pes és més favorable. També tenen els millors percentatges d'emplenament tant de l'amplada com del gruix de la cavitat del motlle. Entre les dues rampes hi ha poca diferència, però en tots els estudis és favorable a la rampa ascendent de 4, 4, 6 i 10mm/s. El seu percentatge respecte el pes teòric és superior en un 1,22%, l'emplenament de l'amplada del motlle és major en un 0,24% i la variància d'aquest percentatge és més reduïda.

Així doncs, dels resultats obtinguts en l'experimentació inicial queda demostrat que l'assecatge és un factor important en la qualitat final de les peces, i que pel que fa a la velocitat és millor treballar amb una rampa de velocitat ascendent com la de 4, 4, 6 i 10, perquè tot i que els resultats amb una velocitat constant de 5mm/s són semblants, però amb la rampa els resultats són millors. La porositat en ambdós casos és molt similar, però amb la rampa s'aconsegueixen dues peces sense porositat a l'inici mentre que amb la velocitat constant no. El percentatge respecte el pes teòric amb la rampa de velocitat és d'un 92,50% mentre que per a la velocitat constant de 5mm/s és del 91,56%.

4.2.1.2. Verificació de l'estudi preliminar.

En la verificació dels resultats de la fase 1, com ja s'havia vist anteriorment, s'obtenen els mateixos resultats quant a obtenció de peça utilitzant pellets humits i pellets assecats. La diferència respecte les proves realitzades anteriorment és que en aquest cas s'han obtingut peces completes per a totes les provetes, mentre que en l'anterior experimentació s'han obtingut tres peces completes, i dues d'incompletes. Es pot veure el nombre de peces obtingudes a la Figura 4.18:

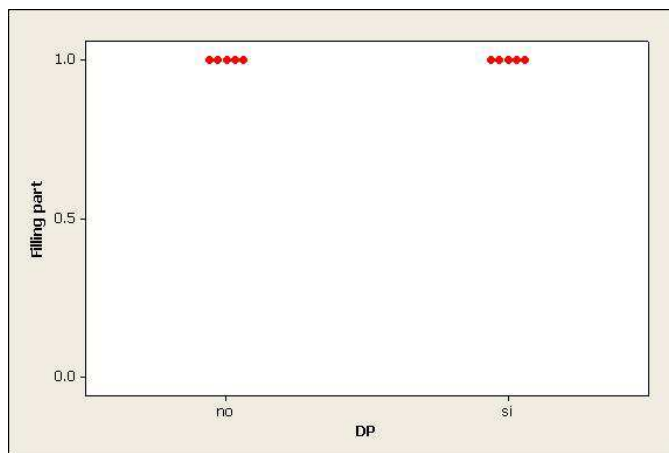


Figura 4.18. Peces obtingudes amb pellets humits i pellets assecats amb tres segons de temps d'ultrasons.

Pel que fa a la porositat aquesta es pot observar a la Figura 4.19, on es mostra el tipus de porositat segons la Taula 3.3 en les diferents regions de la peça: inici, mig i fi.

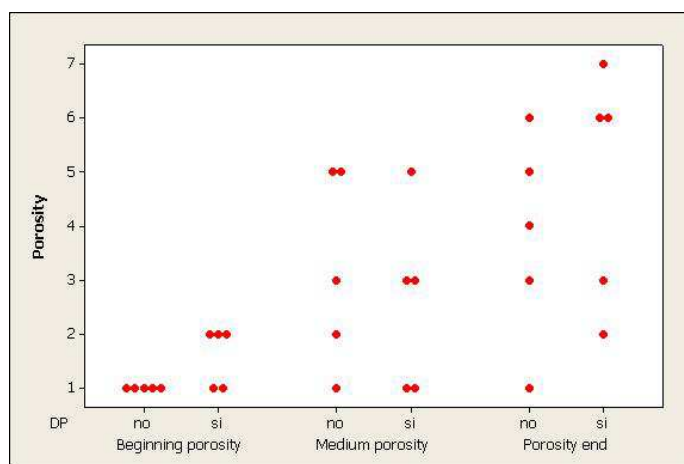
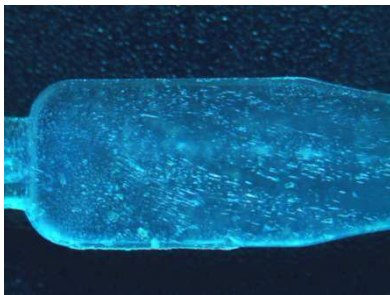


Figura 4.19. Porositat de les provetes a la part inicial, mig i final.

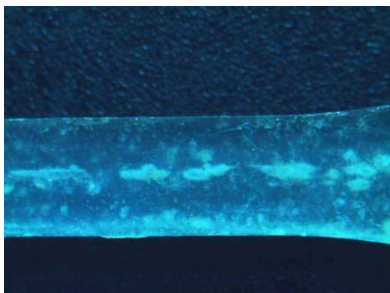
Com ja s'ha vist en la primera realització d'aquests experiments, la porositat es redueix amb l'assecatge dels pellets quan es treballa amb tres segons de temps d'ultrasons. En aquesta verificació a la part inicial apareixen tres provetes amb menys quantitat de porus petits utilitzant pellets assecats, mentre que si s'empren pellets humits la porositat és en tots casos amb més intensitat. A la part del mig de les provetes no hi ha molta diferència pel que fa a l'assecatge dels pellets; i a la part final sí que s'observa que hi ha més porositat de tamany mitjà o gran a les peces processades a partir de pellets humits. Aquests resultats es poden veure a les Imatges 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 i 4.17 que es mostren a continuació:



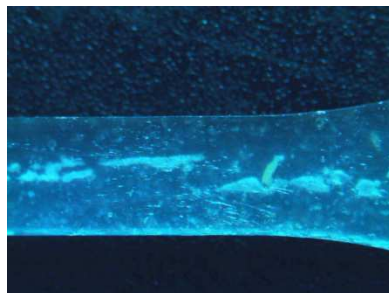
Imatge 4.12. Porositat a l'inici amb pellets humits.



Imatge 4.13. Porositat a l'inici amb pellets assecats.



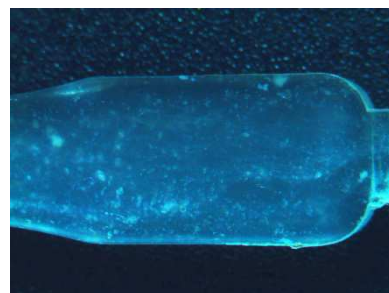
Imatge 4.14. Porositat al mig amb pellets humits.



Imatge 4.15. Porositat al mig amb pellets assecats.



Imatge 4.14. Porositat al final amb pellets humits.



Imatge 4.14. Porositat al final amb pellets assecats.

Pel que fa al pes mitjà de les peces obtingudes a partir de pellets humits i pellets assecats, a la Figura 4.20 es veu que les peces obtingudes pesen més quan es treballa amb pellets assecats. Aquests resultats es contradiuen amb les primeres experimentacions, en què el pes era major quan es treballa amb pellets humits a causa de l'existència d'aigua que és de major densitat que el polipropilè.

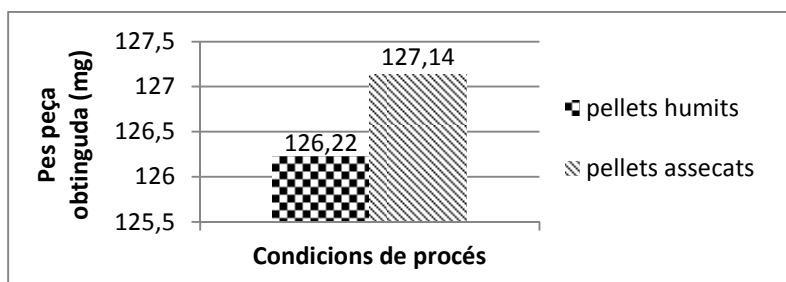


Figura 4.20. Pes mitjà de les peces obtingudes amb tres segons de temps d'ultrasons a partir de pellets humits i pellets assecats.

El fet que unes peces pesin més que les altres pot tenir la causa en el tamany d'aquestes, per això s'estudia el percentatge d'emplenament de la cavitat del motlle com es mostra a la Figura 4.21.

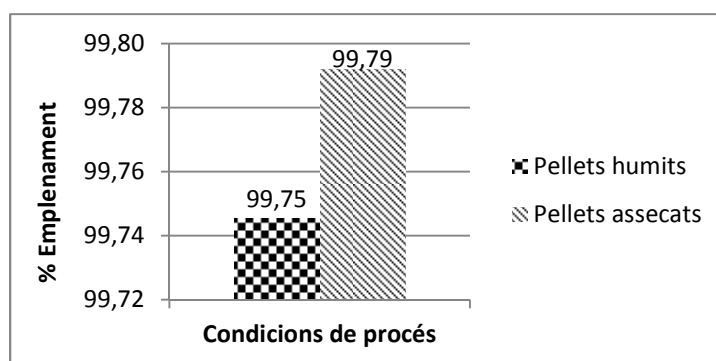


Figura 4.21. Percentatge d'emplenament de l'amplada de la cavitat del motlle.

El percentatge d'ompliment de l'amplada de la cavitat del motlle es molt similar quan s'utilitzen pellets humits i assecats, de manera que s'assumeix que no hi ha diferència en els resultats obtinguts en aquestes dues condicions. Pel que fa al percentatge d'ompliment del gruix del motlle, aquest es pot veure a la Figura 4.22.

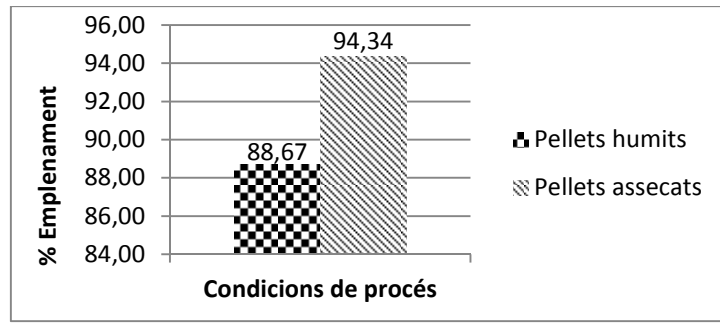


Figura 4.22. Percentatge d'emplenament del gruix de la cavitat del motlle.

Els percentatges d'emplenament de les peces, quant a amplada i gruix, varien més quan es parteix de pellets humits. És a dir, quan s'utilitzen pellets humits el percentatge d'emplenament de les peces és més variant d'una peça a l'altra que si s'utilitzen pellets assecats. Això es reflexa a la Figura 4.23 i la Figura 4.24.

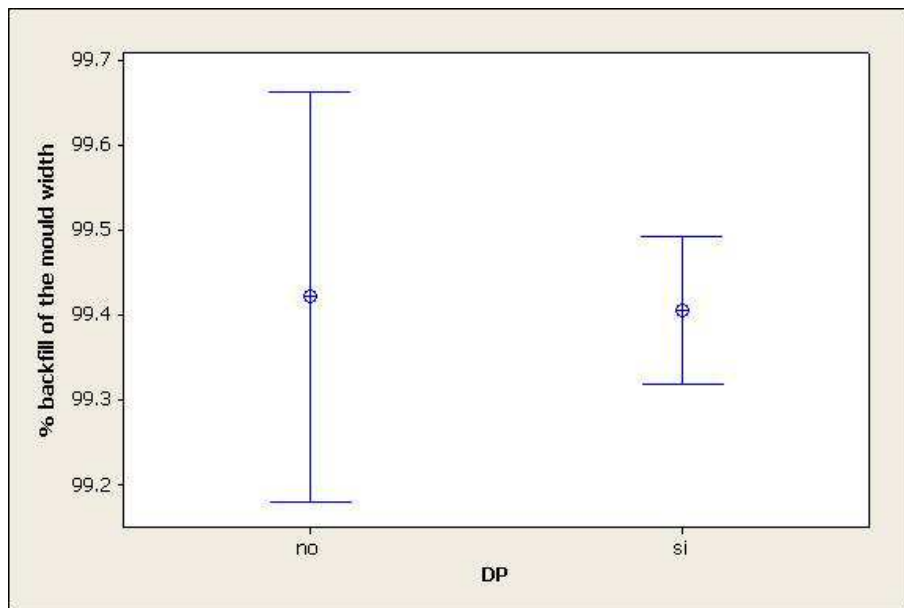


Figura 4.23. Interval de percentatge d'emplenament de l'amplada de la cavitat del motlle.

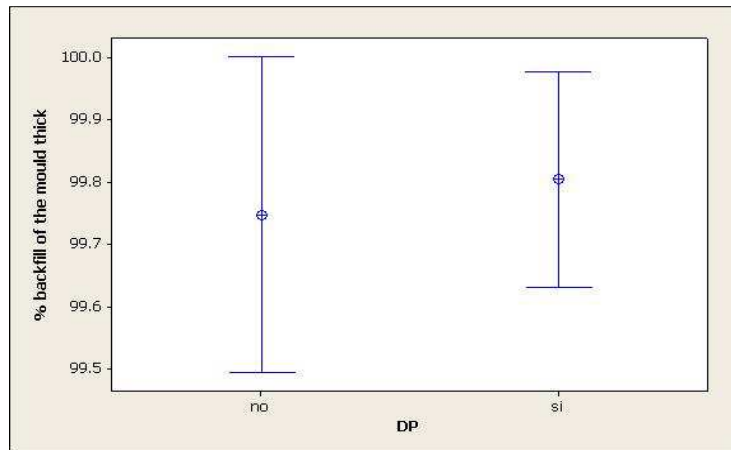


Figura 4.24. Interval de percentatge d'emplenament del gruix de la cavitat del motlle.

La conclusió és, doncs, que s'obtenen millor resultats quan es parteix de pellets assecats. El nombre de peces completes obtingudes és el mateix per a les dues condicions d'assecatge, però tant pel que fa a la porositat de les peces obtingues com el seu pes i el percentatge d'emplenament de les peces els resultats obtinguts són millors per als pellets assecats.

En els dos següents experiments es treballa amb 5mm/s i 13mm/s respectivament com s'ha explicat a per tal de comprovar que a velocitats elevades s'obtenen pitjors condicions de les peces finals. A més, també en relació a la velocitat, es fan dos experiments més utilitzant les rampes de velocitat de 10, 10, 8 i 2 mm/s; i 4, 4, 6 i 10mm/s. Pel que fa al nombre de peces obtingudes, aquestes es mostren a la Figura 4.25.

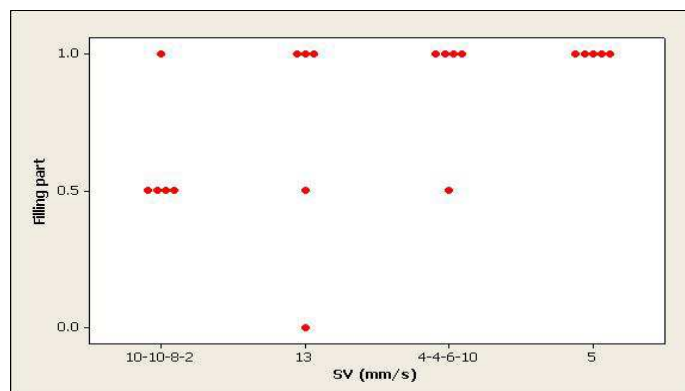


Figura 4.25. Peces obtingudes per a diferents velocitats de baixada del sonotrode.

Com es pot constatar, a velocitats baixes com 5 mm/s s'obtenen totes les peces completes, mentre que a velocitats altes com 13 mm/s només s'obtenen tres peces completes, una incompleta i una en què ni tan sols el material ha començat a omplir el motlle. La diferència de resultats per a diverses condicions és major encara quan s'utilitzen les dues rampes de velocitats descrites anteriorment. Amb la rampa descendent, només s'aconsegueix una sola peça completa, mentre que les altres quatre mostres el material no arriba a omplir tota la cavitat del motlle. En canvi, amb la rampa ascendent s'obtenen peces completes excepte en un cas, on s'obté una peça incompleta. En aquest sentit doncs, pel que fa a la obtenció de peces, es comproven els resultats obtinguts en els estudis anteriors en què s'afirma que és millor treballar amb velocitats de baixada del sonotrode petites, o bé utilitzar una rampa de velocitats ascendent.

Pel que fa a la porositat de les peces, aquesta es pot observar a la Figura 4.26.

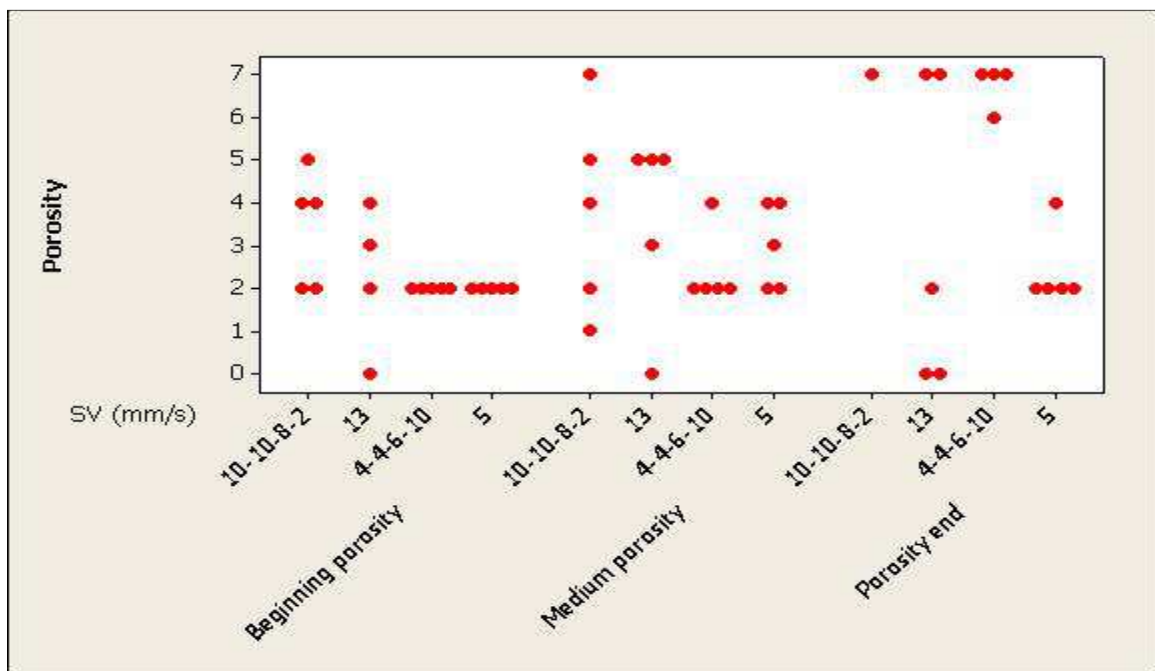


Figura 4.26. Porositat de les peces a la part inicial, mig i final.

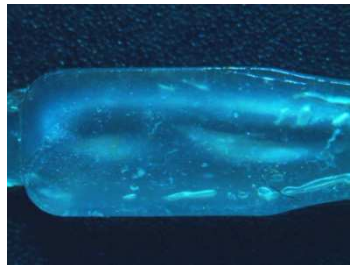
Pel que fa a la porositat, es veu una millora important per a les peces processades amb una velocitat de 5mm/s respecte les processades a 13mm/s. A la part inicial, a velocitat baixa es veuen només pocs porus petits, mentre que amb la velocitat més elevada la tipologia de porus és molt més diversa. A la part central, amb 5mm/s hi ha porus de tamany petit i mitjà en poca quantitat, mentre que a 13mm/s també són de tamany mitjà i gran. A la

part final, en canvi, la porositat és menor amb 13mm/s ja que apareixen dos provetes sense porus, però també cal destacar que en dos dels experiments el material no ha arribat al final de la cavitat. Per això, pel que fa a la porositat es pot dir que l'augment de la velocitat de baixada del sonotrode augmenta el tamany i la quantitat de porus a les provetes, obtenint així unes peces en pitjors condicions que les que resulten de la producció a velocitats més baixes.

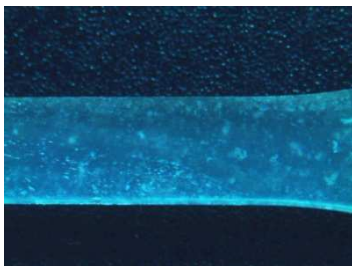
Pel que fa a les rampes de velocitat, amb la rampa ascendent s'obtenen pocs porus de tamany petit, mentre que amb la rampa descendent també es presenten porus de major tamany. A la part central, amb la rampa descendent hi ha una gran varietat de porus i amb l'altra rampa les bombolles són majoritàriament petites. I per la part final de les peces en ambdós casos pràcticament no hi ha porositat. Algunes d'aquestes conclusions es poden veure a les Imatges 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 i 4.23.



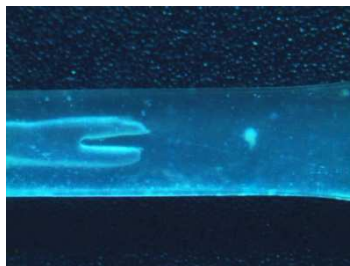
Imatge 4.18. Porositat a l'inici amb 5mm/s.



Imatge 4.19. Porositat a l'inici amb 13mm/s.



Imatge 4.20. Porositat al mig amb 13mm/s.



Imatge 4.21. Porositat al mig amb 13mm/s.



Imatge 4.22. Porositat a l'inici amb 10, 10, 8 i 2mm/s.



Imatge 4.23. Porositat a l'inici amb 4, 4, 6, i 10mm/s.

Quant al pes de les peces obtingudes, a la es pot veure a la Figura 4.27 que el pes de les provetes és major quan es s'utilitza una velocitat baixa del sonotrode, o bé quan s'empra la rampa de velocitats ascendent, amb molt poca diferència entre aquests dos valors. En canvi, per a les dos condicions de treball restants, el pes de les peces és gairebé un 10% menor amb molt poca diferència també entre aquests dos valors. Per això el percentatge respecte el pes total teòric que haurien de tenir les peces és major també quan es treballa amb 5mm/s i amb rampa de velocitat ascendent com es pot comprovar a la Figura 4.28. El pes de les peces obtingudes té relació amb la porositat d'aquestes, en tant que com més porus i de major tamany siguin aquests, es redueix el pes mitjà de les peces. Per això, quan es treballa a velocitats baixes o rampes ascendents, apareixen menys porus o bé són de tamany reduït, i el pes de les peces obtingudes augmenta.

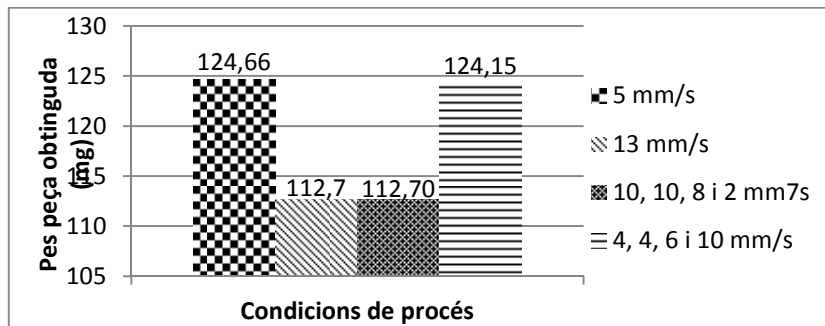


Figura 4.27. Pes mitjà de les peces obtingudes a partir de diferents velocitats del sonotrode.

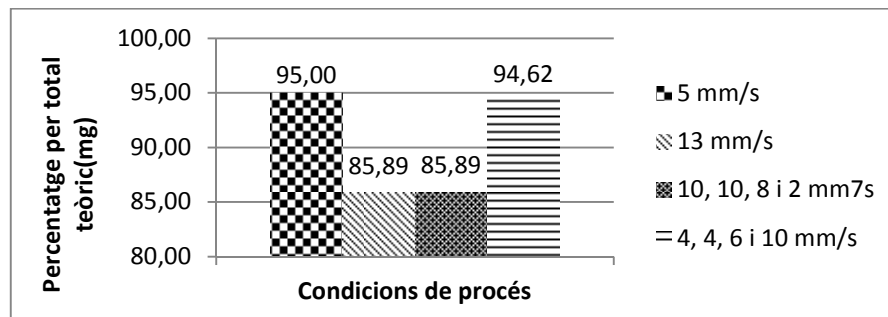


Figura 4.28. Percentatge del pes total teòric de les peces.

Pel que fa al tamany de l'amplada de les peces obtingudes, aquest es mostra a la Figura 4.29. S'observa que l'emplenament de l'amplada de la cavitat del motlle també és superior amb una velocitat de 5mm/s i la rampa de 4, 4, 6 i 10mm/s, a més la variància d'aquest percentatge per a les diferents provetes processades també és més petita en aquestes condicions com es pot veure a la la Figura 4.30.

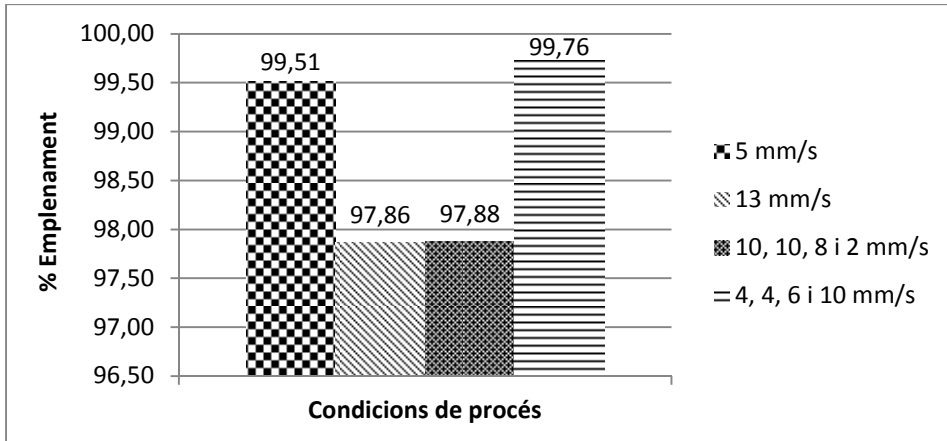


Figura 4.29. Percentatge d'emplenament de l'amplada de la cavitat del motlle.

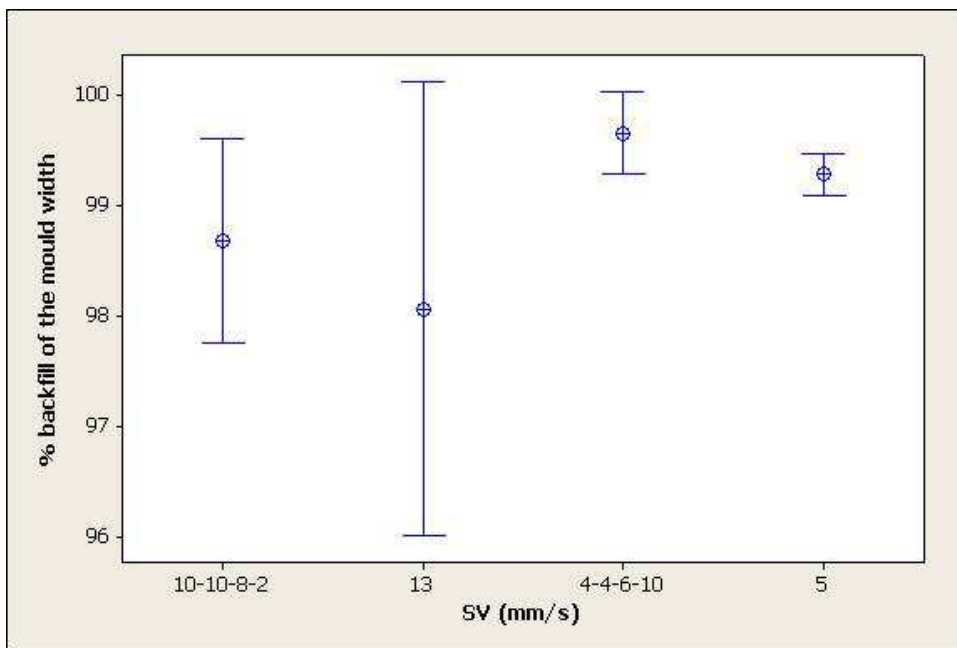


Figura 4.30. Variància del percentatge d'emplenament de l'amplada de la cavitat del motlle.

Pel que fa a l'ompliment del gruix del motlle, com es pot veure a la Figura 4.31, els percentatges són molt similars per a les diferents condicions de procés, i són gairebé del 100% de manera que es pot dir que no hi ha diferències evidents que permetin identificar unes condicions òptimes.

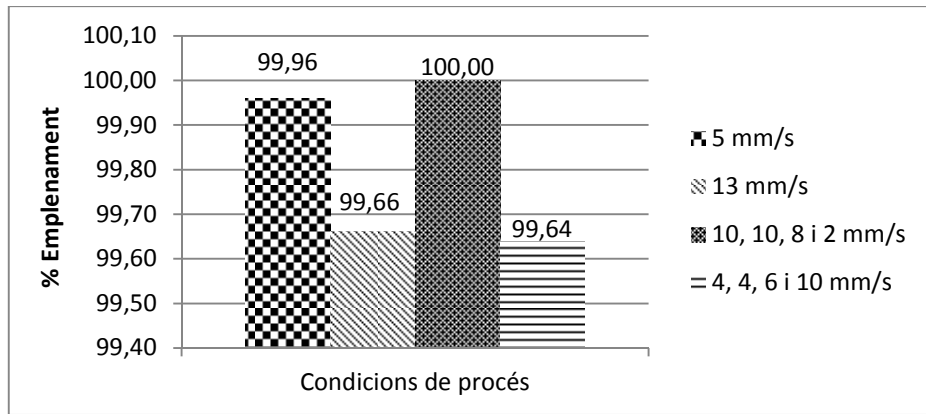


Figura 4.31. Percentatge d'ompliment del gruix de la cavitat del motlle.

A més, la variància del percentatge d'ompliment per a les diferents peces és molt petita per a totes les condicions, excepte en la de 13mm/s que arriba a més del 2% i que supera el 100% de l'ompliment del gruix del motlle a causa d'errors en les mesures.

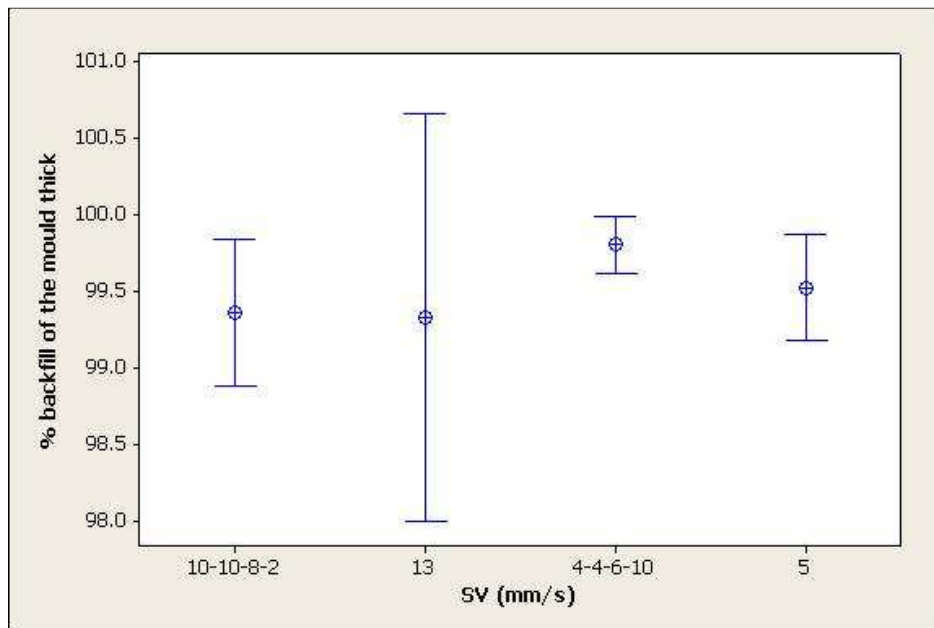


Figura 4.32. Variància del percentatge d'ompliment del gruix de la cavitat del motlle.

4.2.2. Experimentació amb el motlle a 35°C.

En la verificació dels experiments en la fase 1, el nombre de peces obtingudes per als diferents temps d'ultrasons amb una temperatura del motlle de 35°C es mostra a la Figura 4.33.

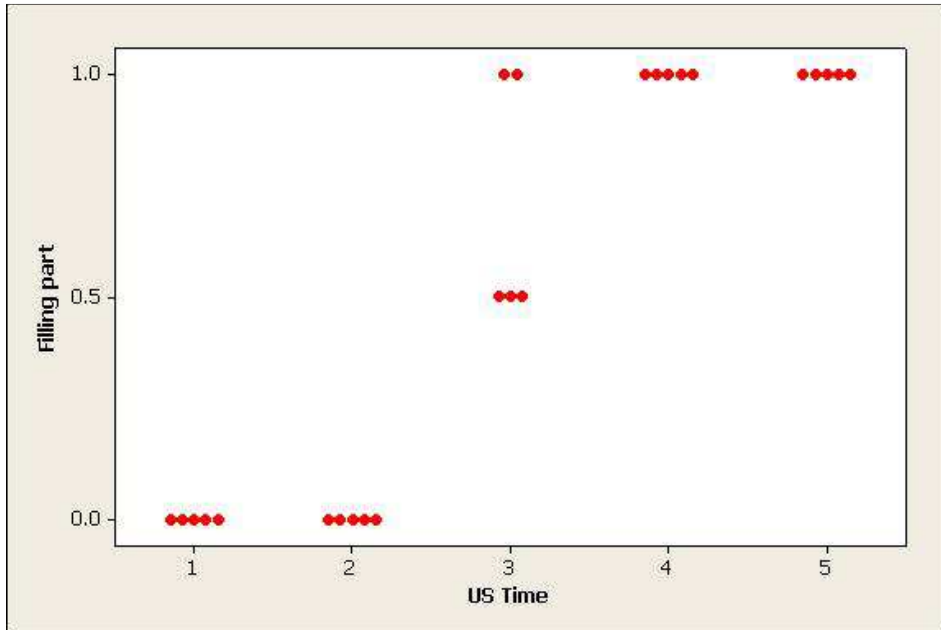


Figura 4.33. Peces obtingudes per a diferents temps d'ultrasons.

De la mateixa manera que en l'experimentació inicial, no es comença a obtenir peces completes fins a tres segons d'ultrasons; i hi ha un èxit total d'obtenció de peça amb quatre i cinc segons de temps d'ultrasons. Per tant, novament es considera un temps de tres segons com al mínim que es necessita per obtenir peça completa.

Quant a la porositat present a les peces obtingudes, aquesta està representada a la Figura 4.34 en les diferents parts de les provetes.

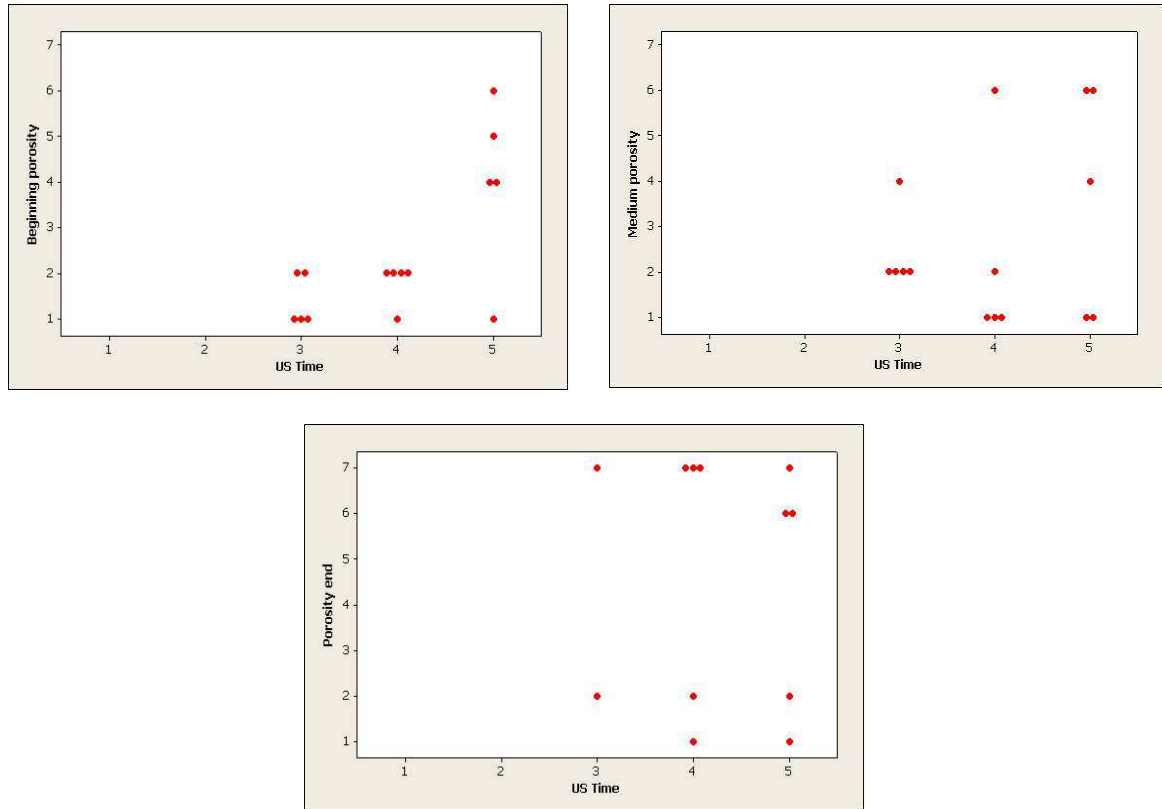
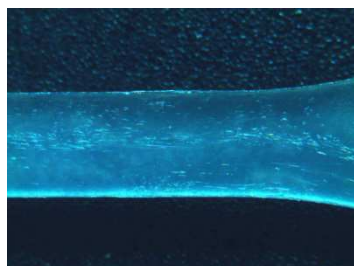
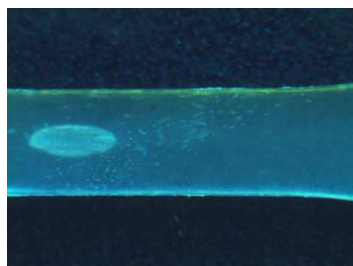


Figura 4.34. Porositat de les provetes en les parts de l'inici, mig i fi.

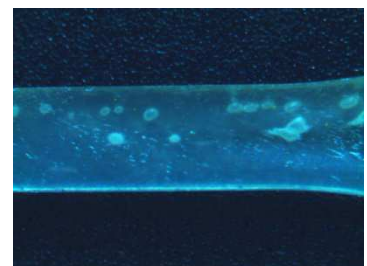
S'observa que es repeteixen els mateixos patrons que els resultants de l'experimentació inicial sense temperatura en el motlle. A la part inicial de la peça s'observen molts porus de tamany petit per a tres segons de temps d'ultrasons, i es van reduint en la part central a més d'aparèixer porositat de tamany mitjà, i finalment en les peces completes es pot dir que gairebé no hi ha porus. Per a quatre segons de temps d'ultrasons, en aquest cas sí que es pot veure un augment del tamany dels porus al llarg de la proveta que no es veia a l'experimentació inicial. En canvi, per a cinc segons de temps d'ultrasons segueix sense observar-se una tendència clara per a les diferents parts de les peces. L'efecte de la porositat es pot veure a les imatges 4.24, 4.25 i 4.26.



Imatge 4.24. Porositat al mig amb 3s UST.



Imatge 4.25. Porositat al mig amb 4s UST.



Imatge 4.26. Porositat al mig amb 5s UST.

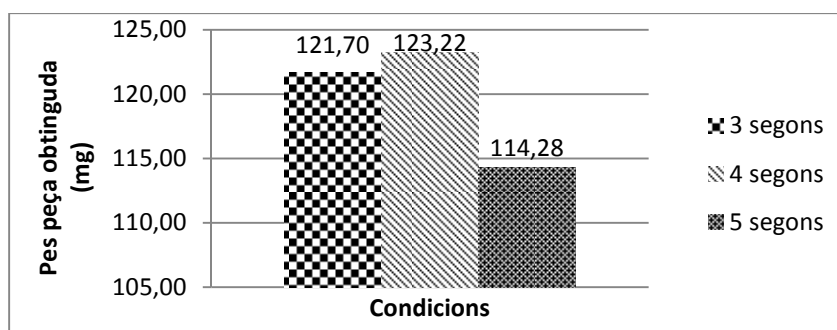


Figura 4.35. Pes de les peces obtingudes per a diferents temps d'ultrasons.

De la mateixa manera que en la fase inicial, el pes de les peces obtingudes augmenta per a quatre segons de temps d'ultrasons i es redueix amb cinc segons. La diferència es que en les anteriors experimentacions la diferència del pes de les peces obtingudes a partir de quatre segons respecte les altres dues condicions està al voltant de l'1,4%, mentre que en aquest cas, la diferència de pes entre les peces obtingudes amb quatre i cinc segons és del 7,25%. Així doncs el percentatge del pes respecte el teòric és el que es mostra a la Figura 4.35 i segueix les mateixes pautes que la Figura 4.35.

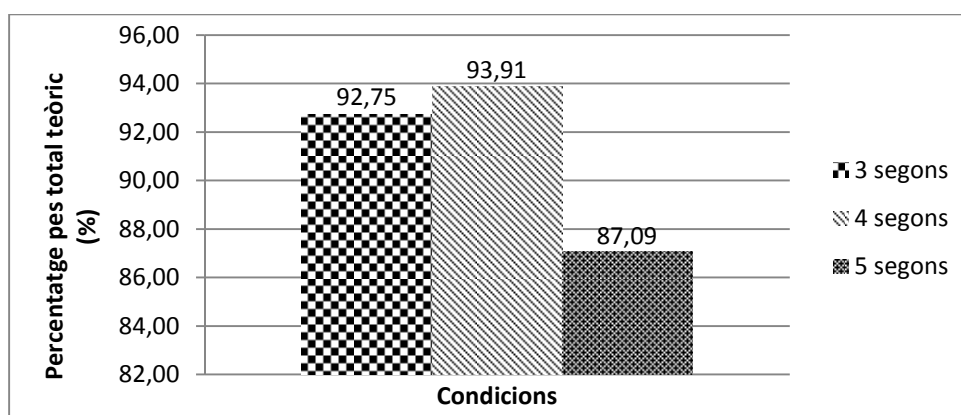


Figura 4.36. Percentatge respecte el pes teòric de les peces.

Pel que fa al percentatge d'ompliment de l'amplada de la cavitat del motlle, aquest es pot veure a la Figura 4.37.

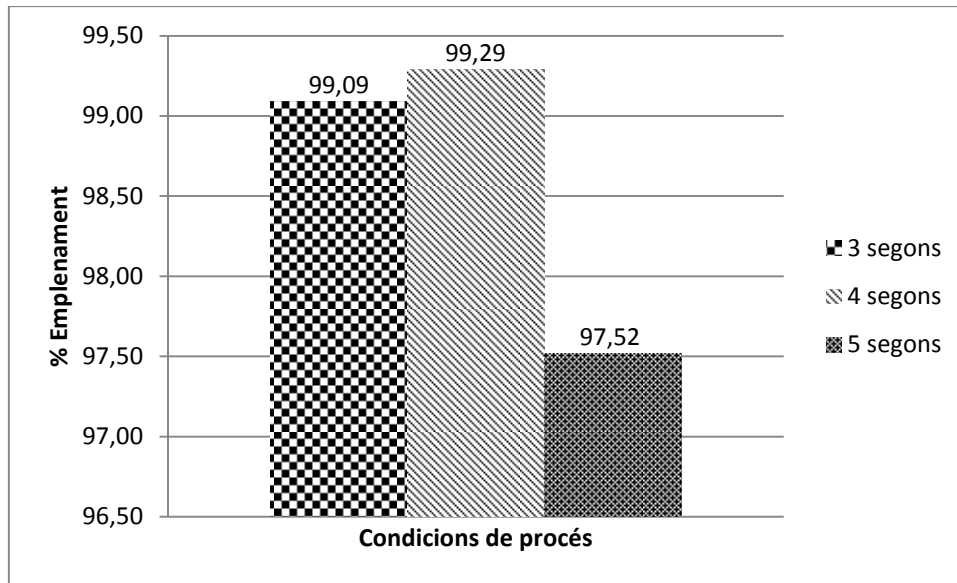


Figura 4.37. Percentatge d'emplenament de l'amplada de la cavitat del motlle per a diferents temps d'ultrasons.

De l'anterior figura es pot observar que gairebé no hi ha diferència quant a emplenament de l'amplada del motlle per a tres i quatre segons de temps d'ultrasons, ja que en ambdós casos pren un valor superior al 99% amb una diferència de només un 0,2%. En canvi, per a cinc segons de temps d'ultrasons el percentatge disminueix considerablement perquè hi ha una diferència màxima respecte les altres dues condicions de 1,57%. El fet que el material no hagi emplenat la cavitat en la seva totalitat explica el fet que el pes de les peces sigui considerablement inferior com s'ha comentat en l'anterior estudi. A més, si mirem la Figura 4.38 es pot veure que malgrat la diferència d'emplenament és poc significativa per a tres i quatre segons, la variància de les mostres és considerablement superior per a quatre segons; i encara més per a cinc segons, tot i que cal tenir en compte que per a tres segons només tenim dues peces completes per a fer la comparativa.

Per això, pel que fa al percentatge d'emplenament de l'amplada de la cavitat del motlle es pot determinar que les millors condicions de treball són amb tres segons, tot i que amb quatre s'obtenen resultats molt similars.

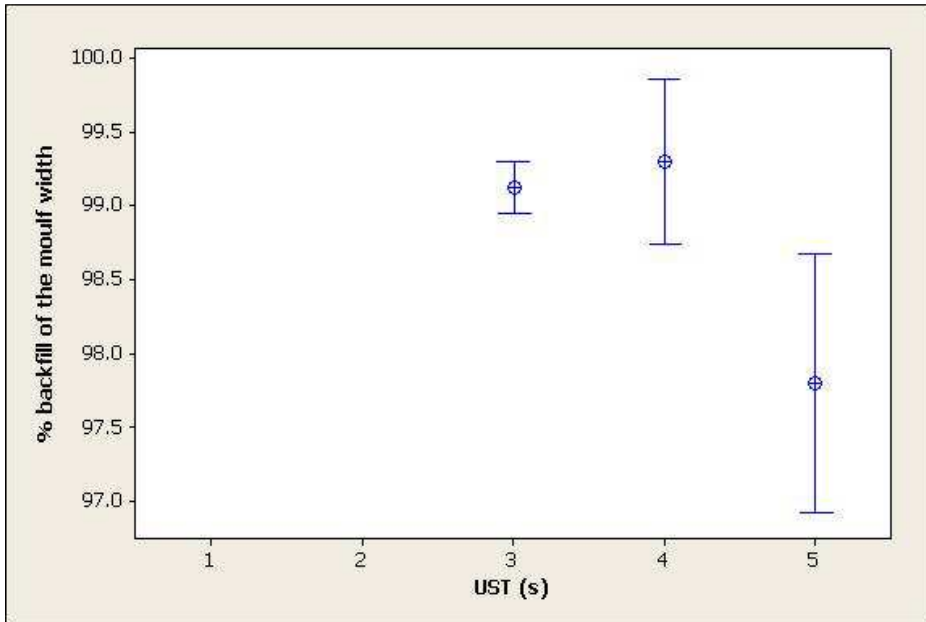


Figura 4.38. Variància del percentatge d'emplenament de l'amplada de la cavitat del motlle.

I quant a percentatge d'emplenament del gruix de la cavitat del motlle, a la Figura 4.39 que els valors són molt similars entre sí, amb una màxima diferència d'un 0,54%, i tots ells al voltant del 99%.

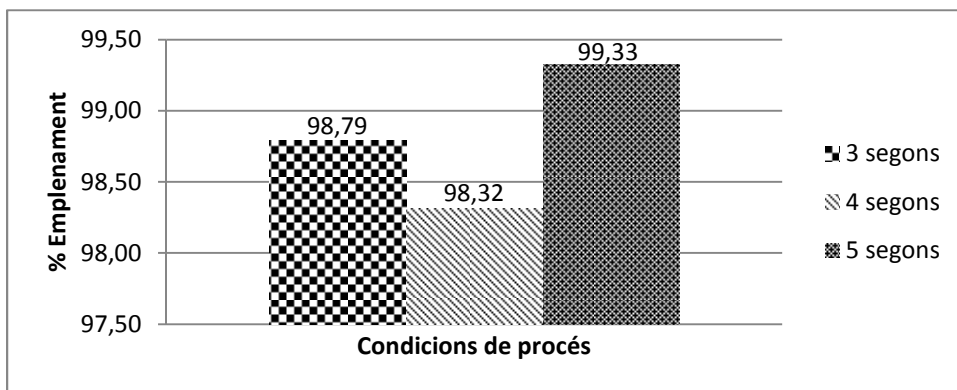


Figura 4.39. Percentatge d'emplenament del gruix de la cavitat del motlle.

Sí que es veuen majors diferències quan es compara la variància del percentatge d'emplenament del gruix de la cavitat del motlle com es mostra a la figura Figura 4.40. Es veu com la dispersió de les dades és molt superior per a tres segons, i que va disminuint amb quatre i cinc segons.

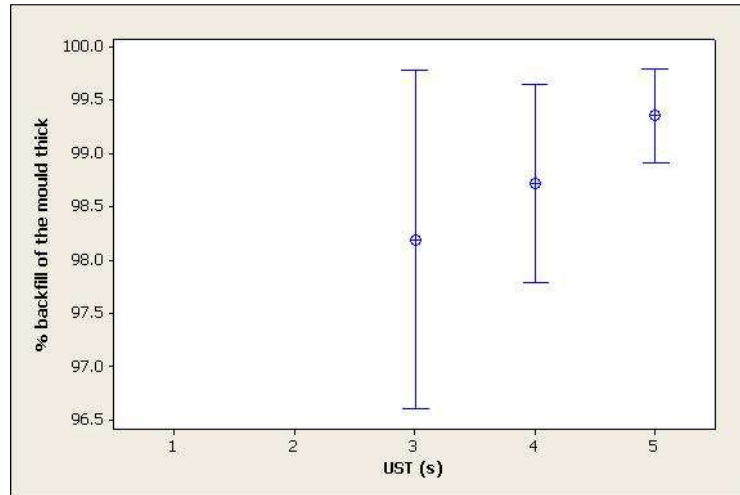


Figura 4.40. Variància del percentatge d'emplenament del gruix de la cavitat del motlle.

En les experimentacions següents, en les que s'estudia de nou l'efecte de la velocitat del sonotrode, el nombre de peces obtingudes es mostra a la Figura 4.41.

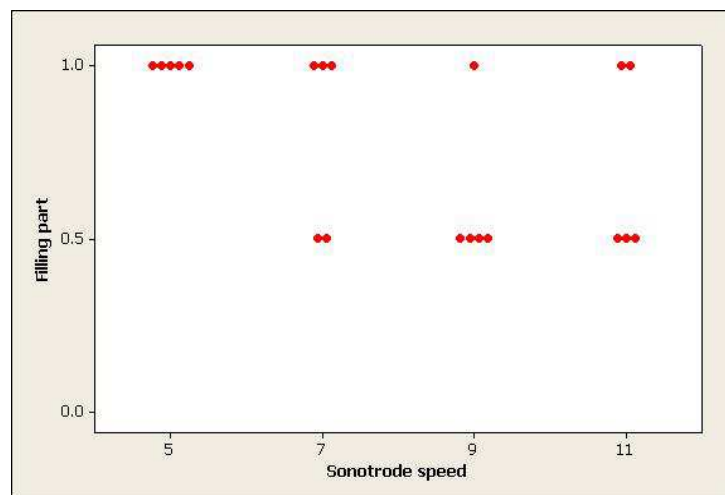


Figura 4.41. Peces obtingudes per a diferents valors de velocitat de baixada del sonotrode.

En aquest cas, només s'aconsegueix èxit total en obtenció de peça a una velocitat de 5 mm/s, mentre que en l'experimentació inicial també s'aconseguia per a un velocitat de 7mm/s. D'aquesta manera es dona doncs també que és millor treballar a velocitats lentes perquè quan més augmenta aquesta, menys peces completes s'obtenen.

La porositat de les peces obtingudes es mostra a la Figura 4.42. Amb una velocitat de 5 mm/s se segueix la tendència de porositat petita i abundant a la part inicial, i a mesura

que s'arriba al final aquesta disminueix. Per a la resta de velocitats utilitzades, la tipologia dels porus és més variada a les parts inicial i central, i disminueix cap a la part final de les peces. Aquest comportament és el mateix que l'obtingut en l'experimentació inicial excepte per a 7 mm/s, en què inicialment presentava un comportament similar a la velocitat de 5 mm/s. Es pot veure les diferències de porositat a l'inici de les provetes a les imatges

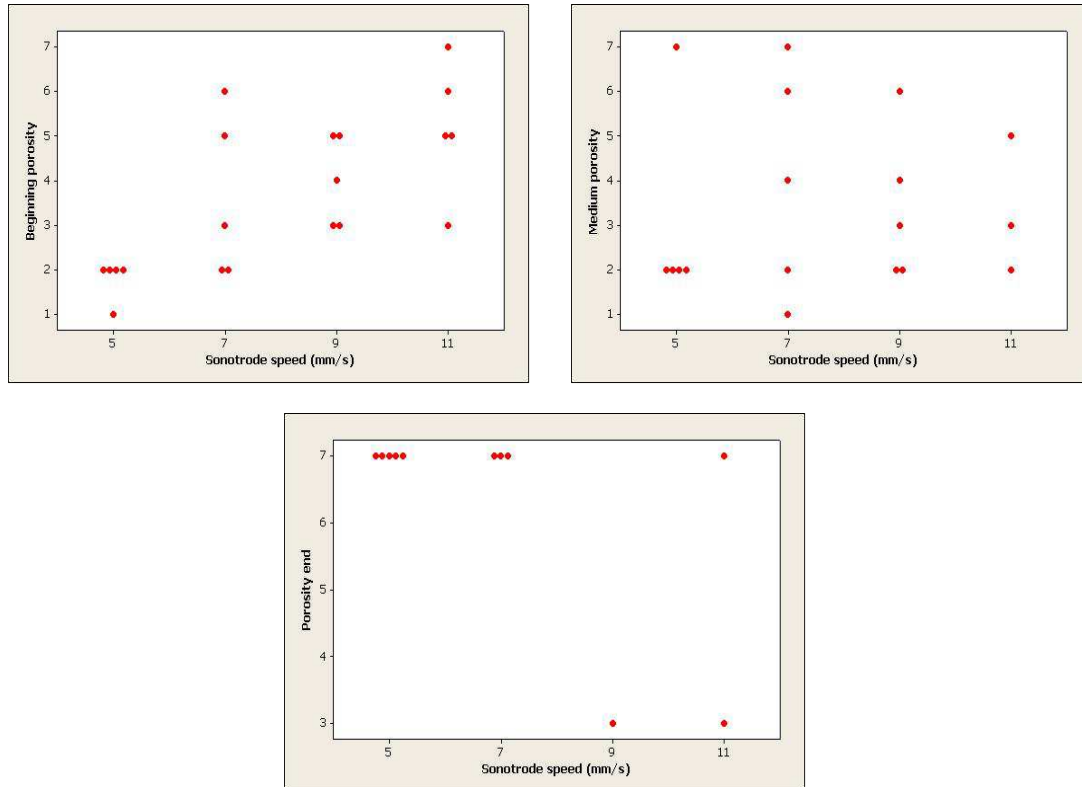


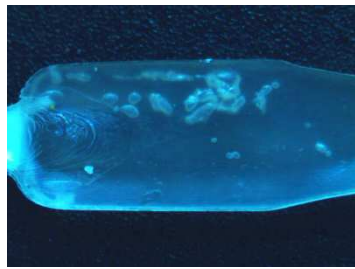
Figura 4.42. Porositat de les provetes en les parts de l'inici, mig i fi.



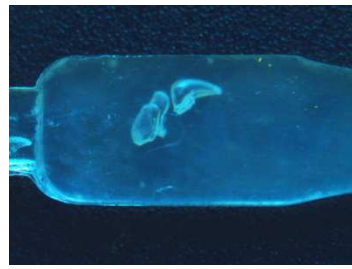
Imatge 4.27. Porositat a l'inici per a 5mm/s.



Imatge 4.28. Porositat a l'inici per a 7mm/s.



Imatge 4.29. Porositat a l'inici per a 9mm/s.



Imatge 4.30. Porositat a l'inici per a 11mm/s.

Pel que fa al pes de les peces, aquest es mostra a la Figura 4.43.

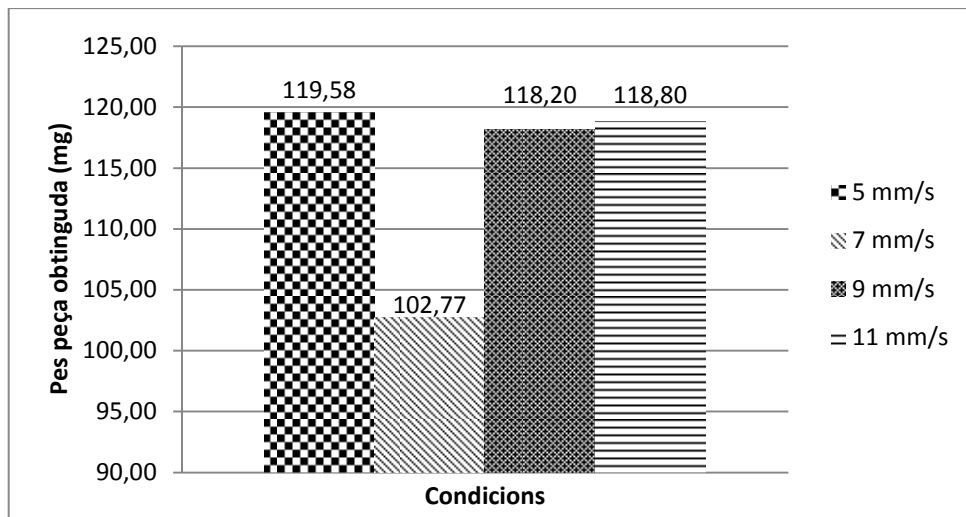


Figura 4.43. Pes de les peces obtingudes per a diferents velocitats de baixada del sonotrode.

De la mateixa manera que en l'experimentació inicial, es detecta una disminució considerable del pes de les peces obtingudes a una velocitat de 7 mm/s. Tot i així, és difícil trobar una tendència clara de pes de les peces per a les diferents velocitats de baixada del sonotrode, ja que per a la resta de velocitats gairebé no hi ha diferència entre els diferents valors de pes. S'arriba a la mateixa conclusió quan es compara aquest pes amb el teòric com es mostra a la Figura 4.44.

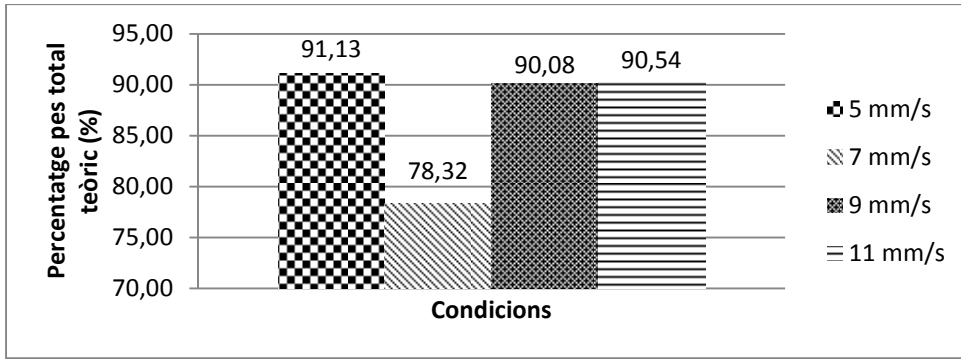


Figura 4.44. Percentatge respecte el pes teòric de les peces.

Pel que fa a l'estudi de les dimensions de les peces, el percentatge d'ompliment de l'amplada i del gruix de la cavitat del motlle es mostra a la Figura 4.45 i a la Figura 4.46 respectivament.

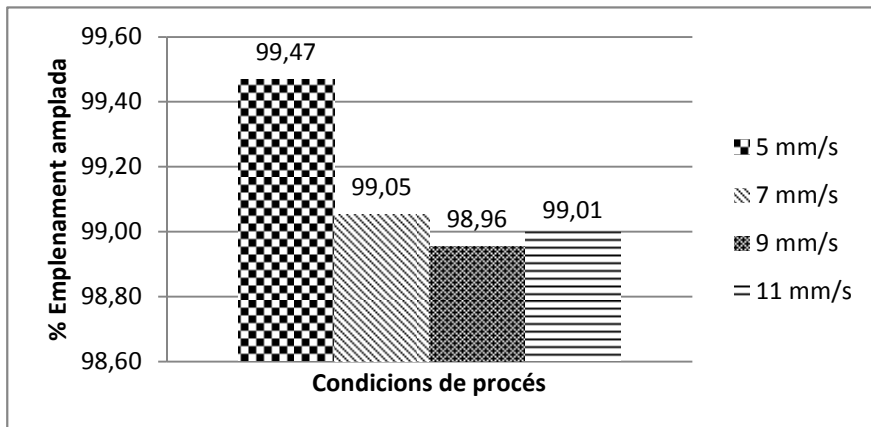


Figura 4.45. Percentatge d'emplenament de l'amplada de la cavitat del motlle.

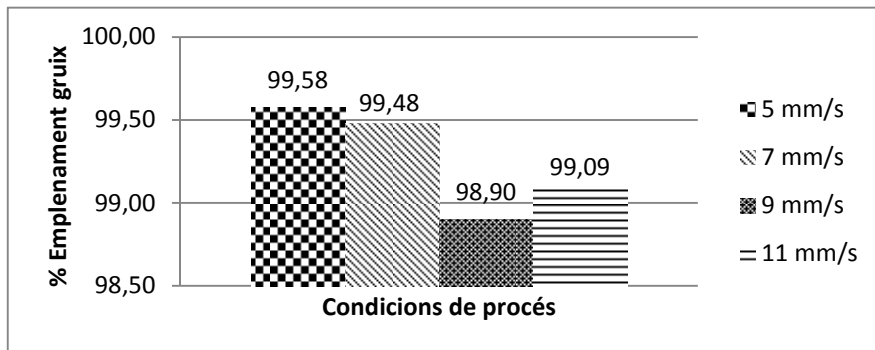


Figura 4.46. Percentatge d'emplenament del gruix de la cavitat del motlle.

Pel que fa a les dimensions de les peces es pot dir que no hi ha diferències entre les diferents condicions de procés ja que els valors són molt similars entre ells. Les màximes diferències de dimensions en l'amplada i el gruix de les peces són de 0,51% i 0,68% respectivament. En canvi, si es comprova la variància d'aquests percentatges es pot veure com sí que existeixen diferències importants entre les diferents velocitats de treball com es pot veure a les figures Figura 4.47 i Figura 4.48. Quant a l'emplenament de l'amplada, la variància amb una velocitat de 5mm/s és molt inferior que amb la resta de velocitats; en canvi, pel que fa a l'emplenament del gruix, la variància també és mes petita però la diferència amb la resta de velocitats no és tan important.

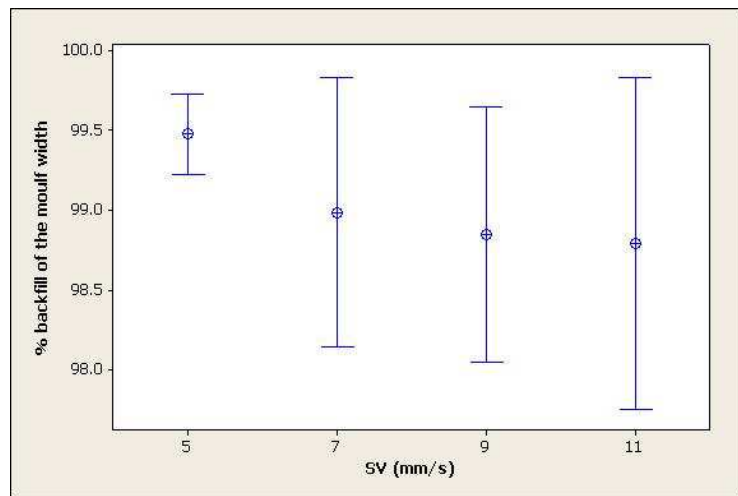


Figura 4.47. Variància del percentatge d'emplenament de l'amplada de la cavitat del motlle.

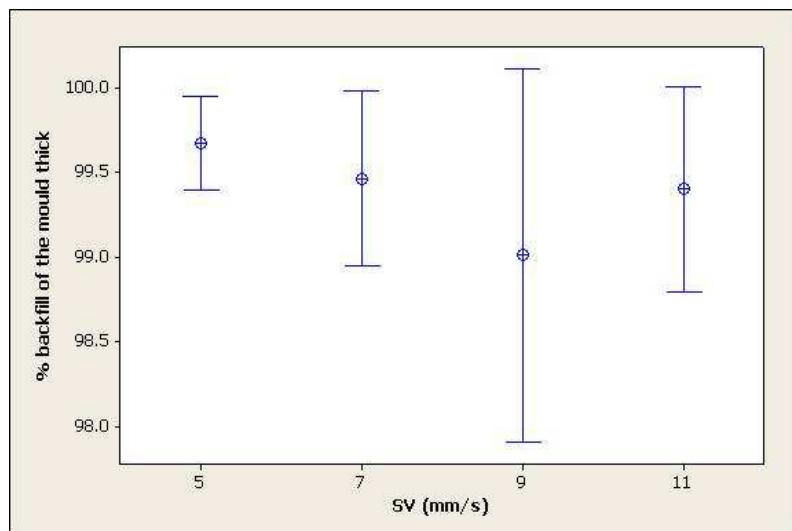


Figura 4.48. Variància del percentatge d'emplenament del gruix de la cavitat del motlle.

Quant a l'emplenament de l'amplada, la variància amb una velocitat de 5mm/s és molt inferior que amb la resta de velocitats; en canvi, pel que fa a l'emplenament del gruix, la variància també és més petita però la diferència amb la resta de velocitats no és tan important. Així doncs, en la verificació de l'experimentació inicial amb temperatura en el motlle s'arriba a la mateixa conclusió que és millor treballar a velocitats baixes de fins a 5 mm/s o fins i tot 7 mm/s.

A continuació es realitzen de nou els experiments trenta-nou i quaranta de la Taula 3.2, per comprovar l'efecte de la utilització de rampes de velocitat quan s'aplica temperatura al motlle. El nombre de peces obtingudes per a les diferents condicions de procés són les que es mostren a la Figura 4.49.

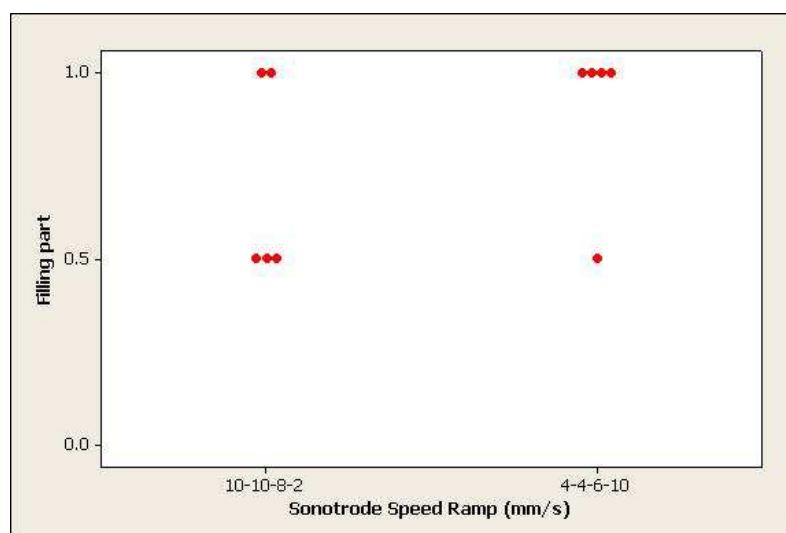


Figura 4.49. Nombre de peces obtingudes per a diferents rampes de velocitat.

De la mateixa manera que en l' experimentació sense temperatura, s'obté un major percentatge d'èxit d'obtenció de peça amb la rampa ascendent. Mentre només s'aconsegueix un 40% de peces completes amb rampa descendent, el percentatge d'èxit amb rampa ascendent és del 80%; valors molt similars als percentatges de l'experimentació sense temperatura.

Pel que fa a la porositat aquesta es mostra a la Figura 4.50.

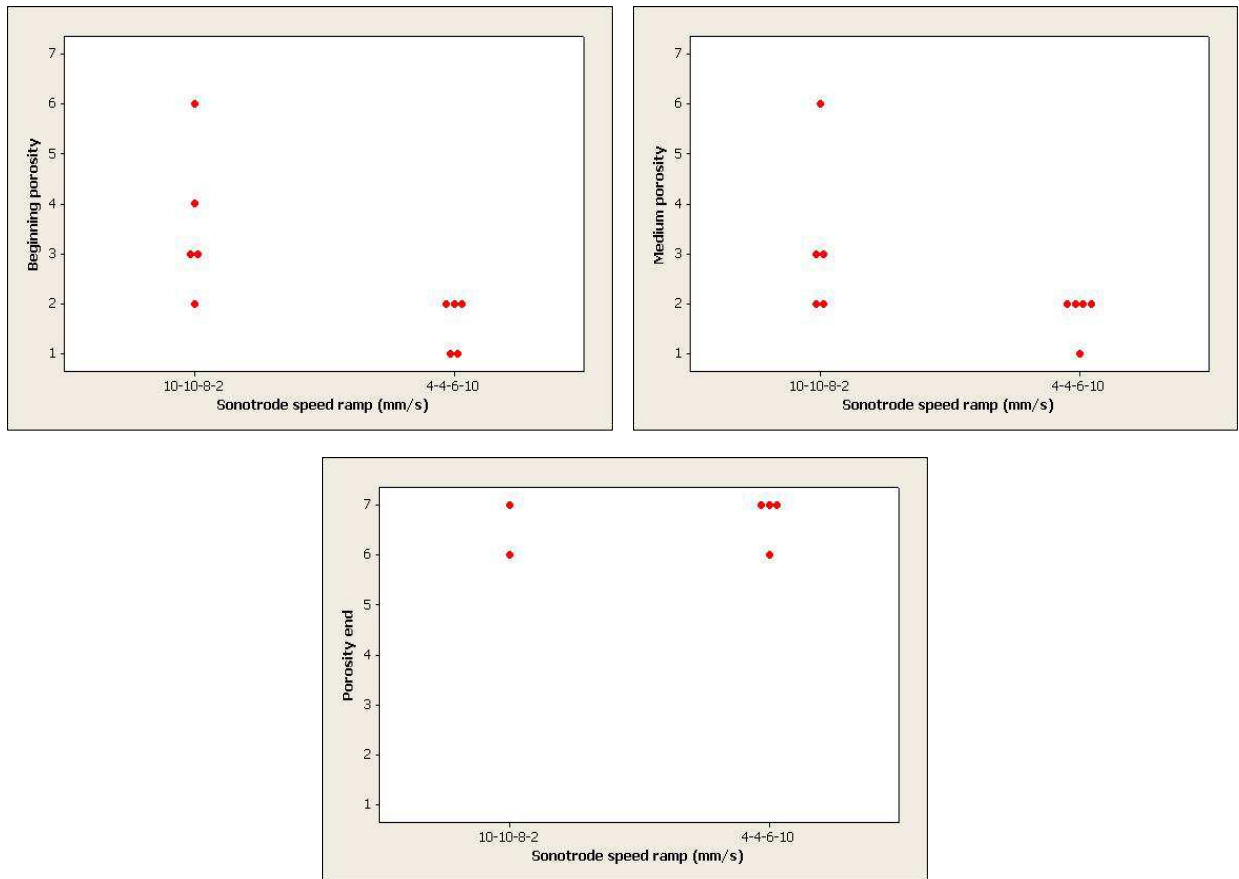
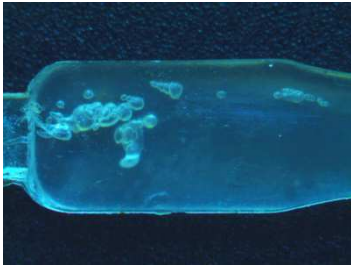


Figura 4.50. Porositat de les peces a la part de l'inici, mig i final.

Com es pot observar, tant a la part inicial com a la del mig, les peces processades amb la rampa descendent presenten major varietat de porus: tant petits com mitjans, mentre que amb la rampa ascendent tots són de tamany petit amb més o menys intensitat. A la part final de les peces no s'observa molta diferència entre les dues condicions de procés ja que en ambdós casos apareix una proveta amb porus grans i la resta sense.

Els resultats obtinguts en la part inicial coincideixen amb els obtinguts en l'experimentació inicial sense temperatura en el motlle. En la part central, però, en la primera experimentació s'obté més varietat de porus amb la rampa ascendent que en els últims experiments. I en la part final de les peces, en l'experimentació inicial s'observa majoritàriament porositat del tipus sis i set com en els últims experiments, però també apareixen algunes provetes amb porositat petita i mitjana. En general es pot concloure que es verifiquen les tendències de porositat en les peces quan s'afegeix la variable de procés de temperatura en el motlle.



Imatge 4.31. Porositat a l'inici amb 10, 10, 8 i 2mm/s.



Imatge 4.32. Porositat a l'inici amb 4, 4, 6 i 10mm/s.

Pel que fa al pes de les peces processades, aquest es pot observar a la Figura 4.51.

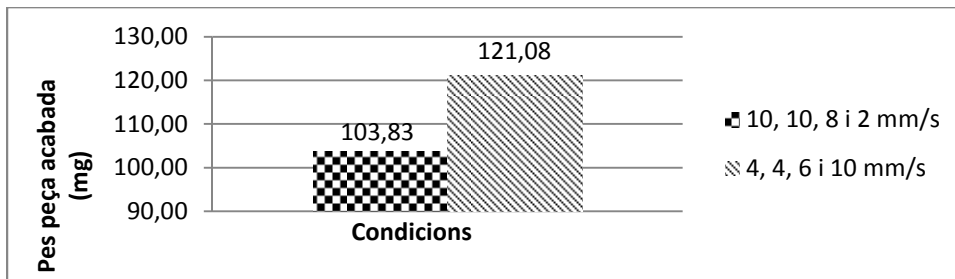


Figura 4.51. Pes de les peces obtingudes per a diferents rampes de velocitat.

A diferència de la primera verificació de la fase 3 amb temperatura en el motlle, en aquesta rèplica sí s'obtenen resultats semblants a l'experimentació inicial. El pes de les peces obtingudes amb rampa ascendent és major que les processades amb rampa descendent. A més, aquests són resultats més fiables ja que s'han aconseguit un major nombre de peces completes per a cada una de les rampes.

El percentatge respecte el pes teòric de les peces es mostra a la Figura 4.52.

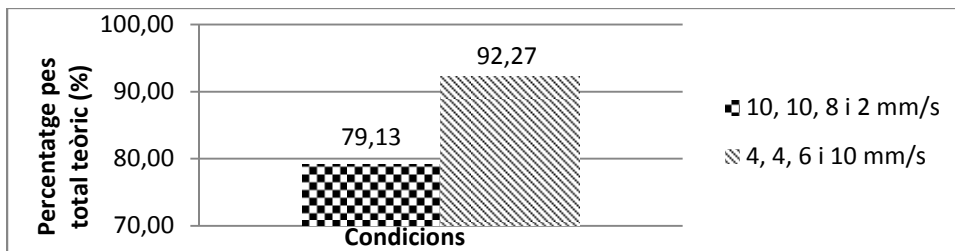


Figura 4.52. Percentatge del pes teòric de les peces.

Com és lògic el percentatge del pes teòric segueix la mateixa tendència que el pes de les peces. Si es compara aquests percentatges amb els de l'experimentació inicial, es pot veure que per a la rampa ascendent els valors són molt similars: 92,27% en l'experimentació a 35°C enfront del 92,50% de l'experimentació sense temperatura. En canvi, els percentatges per a la rampa descendent són del 79,13% i del 85,78% respectivament. És a dir, es detecta una major variació del percentatge quan es tracta de la rampa descendent.

En l'estudi de les dimensions de les peces, els resultats es mostren a la Figura 4.53 i a la Figura 4.54.

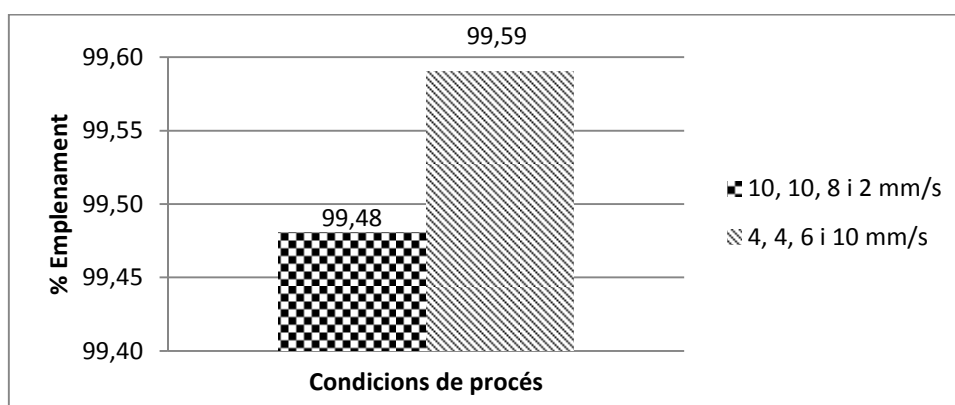


Figura 4.53. Percentatge d'emplenament de l'amplada de la cavitat del motlle.

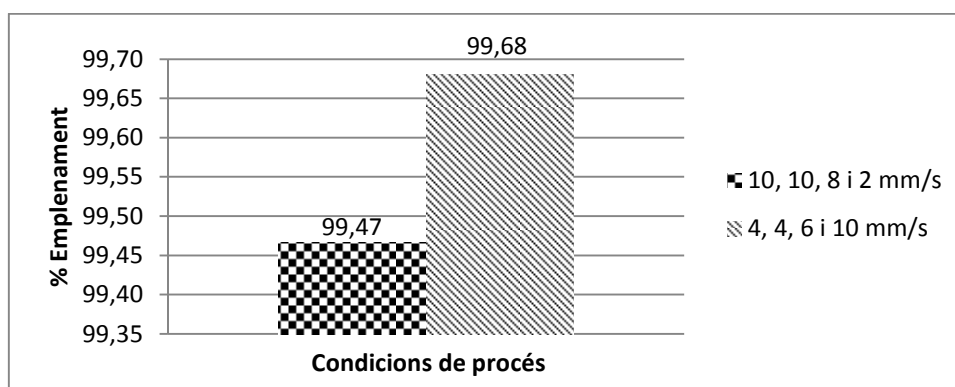


Figura 4.54. Percentatge d'emplenament del gruix del motlle.

Així com en l'experimentació inicial la diferència del percentatge d'ompliment de l'amplada per a les dues condicions de procés és d'un 1,59%, en aquestes últimes

experimentacions és tan sols d'un 0,11%, i en ambdues condicions de procés el percentatge d'ompliment és superior al 99%. Pel que fa al gruix de la peça, la diferència és molt petita tant en l'experimentació sense temperatura com a 35°C.

Així doncs en aquesta experimentació es pot comprovar l'efecte de la porositat en les provetes, ja que amb unes dimensions de les peces obtingudes que es poden considerar iguals per a les dues condicions de procés, el pes de les peces és considerablement superior amb rampa ascendent. Això és conseqüència d'un major tamany dels porus en les peces processades amb rampa descendent com s'ha explicat anteriorment a partir de la Figura 4.50.

4.3. Procediment de caracterització de procés.

La metodologia resultant de l'experimentació es mostra de forma detallada en el diagrama de l'Annex C. S'estructura en tres fases clarament diferenciades adoptant els mateixos passos que en l'Experimentació preliminar. En el diagrama es mostra clarament quines són aquestes fases, els objectius de cada una i les seves entrades i sortides corresponents.

En aquest diagrama l'inici i el final es troba indicat amb un marc. Les tres fases estan representades amb un rectangle, i signifiquen el conjunt d'operacions que es realitzen a cada una. Els paràmetres de procés que s'utilitzen en cada fase es representen amb un triangle cap amunt aquells que són fixes, i amb un triangle cap avall aquells que són variables. Els rombes representen els objectius que es volen aconseguir a cada una de les fases i amb un hexàgon se simbolitzen les sortides físiques de cada una de les fases: les peces processades. Amb un trapezi invertit es representa la inspecció de les peces obtingudes, és a dir, quins anàlisis es realitzen per a cada una de les fases segons els que s'indiquen al capítol **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**; i amb una el·lipse s'indiquen els criteris de qualitat que s'aplicaran als resultats dels anàlisis i que permetran prendre unes decisions que es representen amb un cilindre. A més també apareixen els mapes de procés resultants de cada una de les fases amb el símbol de documentació, i les conclusions es representen amb una placa. A continuació s'explica amb més detall cada una de les fases. La primera fase es troba representada a la Figura 4.55.

Al tractar-se del començament del diagrama s'inicia la seqüència amb el símbol de l'inici. A continuació apareixen els dos objectius que es pretén assolir i que corresponen als de la primera fase de l'Estudi preliminar: 1) estudiar la influència de l'assecatge dels pellets i 2) determinar el temps d'ultrasons mínim necessari per a obtenir peces completes.

Per això es duu a terme la primera de les operacions (FASE 1) a partir d'uns paràmetres fixes (quantitat de material, velocitat del sonotrode, posició del sonotrode, amplitud de vibració, nombre de pellets i temps de refredament) i d'uns paràmetres variables (temps d'ultrasons, assecatge dels pellets i temperatura del motlle). A diferència de l'experimentació realitzada durant l'estudi preliminar, en la primera fase la temperatura del motlle és un paràmetre fixe, i l'efecte de la variació d'aquest paràmetre s'estudia per separat en la posterior verificació amb el motlle a 35°C. Això és possible perquè el material amb el que es treballa, PP, no requereix temperatura en el motlle per obtenir peces completes, de manera que en la primera fase es poden obtenir peces només amb l'augment del temps

d'ultrasons. En canvi, amb altres materials com pot ser la polièter-èter-cetona (PEEK), a la fitxa tècnica s'especifica una certa temperatura del motlle, de manera que aquest paràmetre esdevé necessari per als objectius de la primera fase juntament amb el temps d'ultrasons, ja que sense una combinació d'aquests no és possible obtenir peces completes.

Com a resultat de la operació Fase 1 s'obtenen unes peces, que són analitzades amb diferents estudis (obtenció de peça, porositat i pes). Les conclusions de l'anàlisi juntament amb els criteris de qualitat que requereixi l'àmbit d'aplicació de les peces permeten prendre unes decisions respecte l'assecatge dels pellets, el temps d'ultrasons i la temperatura del motlle.

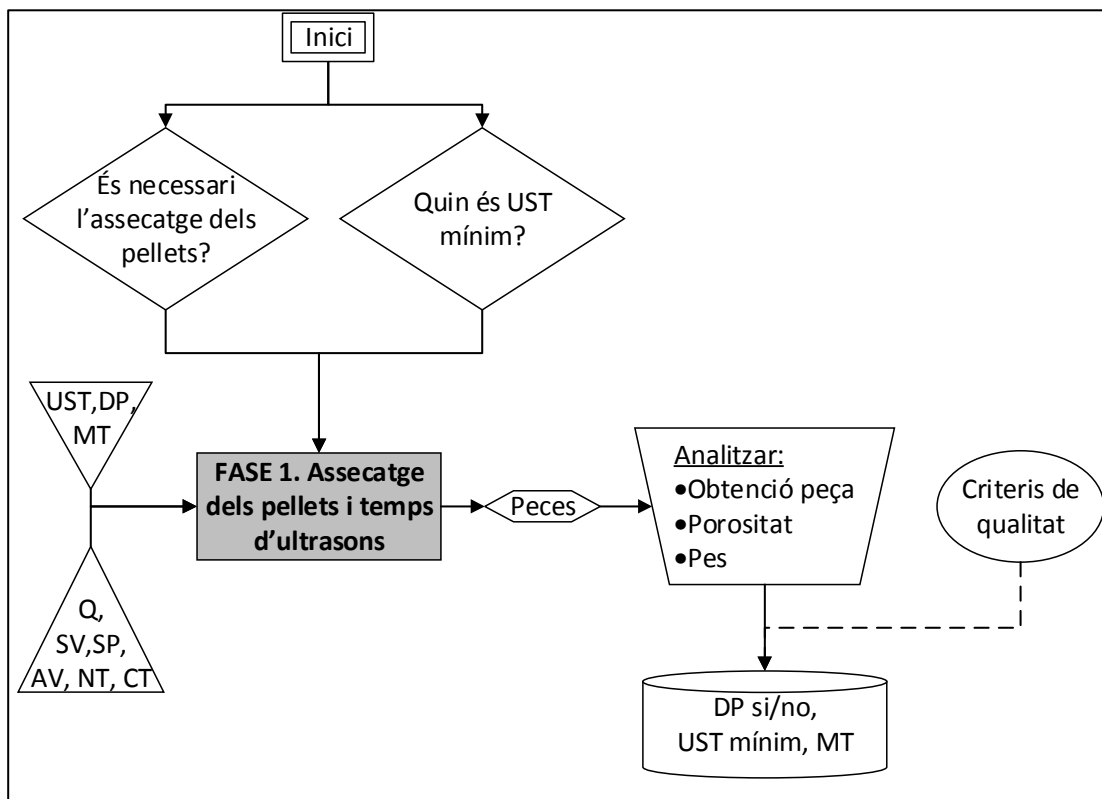


Figura 4.55. Diagrama de procés de la Fase 1.

A partir d'aquí comença la segona fase que es pot veure a la Figura 4.56. L'objectiu d'aquesta fase consisteix en estudiar quin és l'efecte de la velocitat del sonotrode quan aquesta és constant en la seva trajectòria. Per això només hi ha un paràmetre variable que és la velocitat del sonotrode, i la resta de variables romanen fixes. Per a establir les condicions de temps d'ultrasons, assecatge dels pellets i temperatura del motlle es tindran en compte les decisions resultats de la fase 1. Com a resultat de la segona fase s'obtenen

unes peces processades que se sotmeten també a l'anàlisi d'obtenció de peça, porositat i pes, a partir del qual es generen uns mapes de procés que relacionen l'obtenció de peça i el pes en funció de la velocitat del sonotrode.

Finalment, amb els mapes de procés i uns criteris de qualitat es pren la decisió de determinar una velocitat del sonotrode constant adequada.

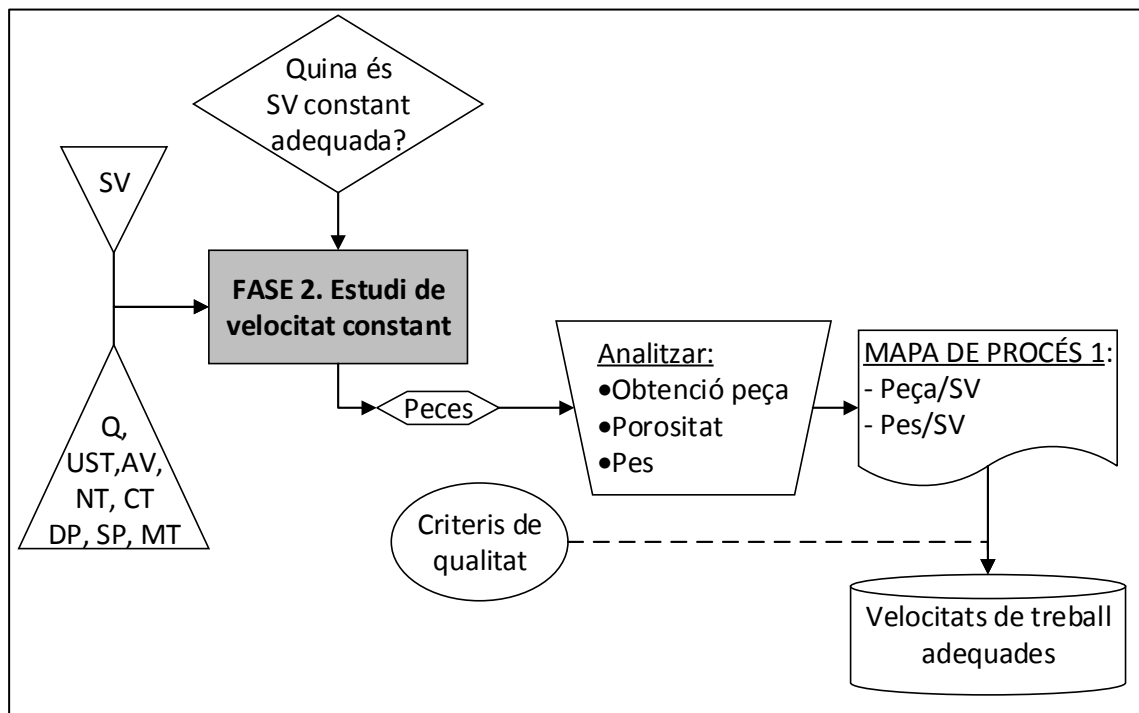


Figura 4.56. Diagrama de procés per a la Fase 2.

La tercera operació que apareix al diagrama és la Fase 3. Cal destacar que malgrat en l'Estudi preliminar es realitza després de la Fase 2, aquestes dues són operacions que es tracten paral·lel a partir de la fase 1. El fet que aquestes dues fases es realitzin en paral·lel és perquè s'obtenen bons resultats quan es treballa amb velocitats com també amb rampes de velocitat; de manera que cap de les dues fases serveix per descartar un camí i seguir per l'altre. La part del diagrama de la tercera fase es mostra a la Figura 4.57.

En aquesta fase l'objectiu és estudiar l'efecte de la velocitat del sonotrode quan aquesta no és constant al llarg de la seva trajectòria, és a dir, amb rampes de velocitats. El paràmetre d'entrada variable és doncs la velocitat del sonotrode, essent la resta paràmetres

fixes. De la mateixa manera que en la segona fase, les condicions d'assecatge dels pellets, temps d'ultrasons i temperatura del motlle es determinen de les decisions resultants de la Fase 1. Com a resultat s'obtenen unes peces processades que se sotmeten a l'anàlisi d'obtenció de pesa, de la porositat, del pes i de les dimensions. A partir d'aquí es genera una documentació en forma de mapa de procés que relaciona l'obtenció de peça, el pes i les dimensions en funció de la rampa de velocitats utilitzada. Aquests mapes de procés, juntament amb uns criteris de qualitat, permeten prendre unes decisions quant a quin tipus de rampa és més adequada.

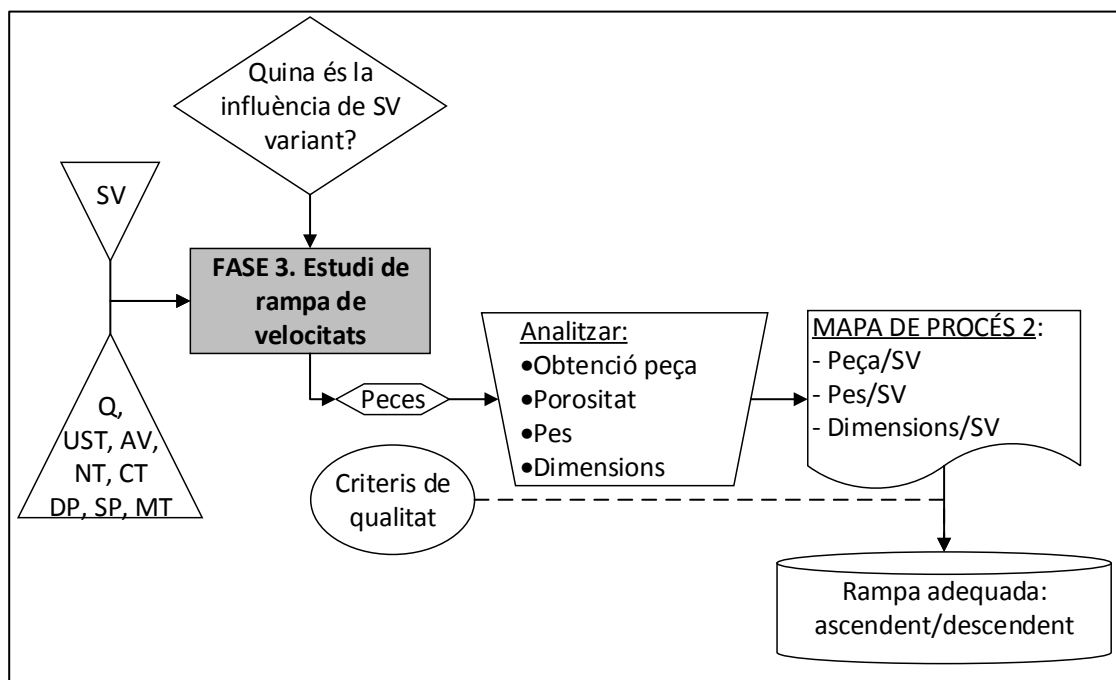


Figura 4.57. Diagrama de procés de la Fase 3.

Finalment, amb les decisions adoptades resultants de les fases 2 i 3 s'arriba a unes conclusions que permeten ajustar les els paràmetres de procés per tal d'obtenir unes peces que s'adeqüin als criteris de qualitat requerits.

Dos exemples de mapa de procés que es poden obtenir per a la Fase 2 i la Fase 3 es mostren a la Figura 4.59 i Figura 4.58 respectivament. En ambdós casos els valors per a tres segons de temps d'ultrasons s'obtenen de l'experimentació, mentre que per quatre i cinc segons els valors del pes i del percentatge d'emplenament de l'amplada s'han estimat.

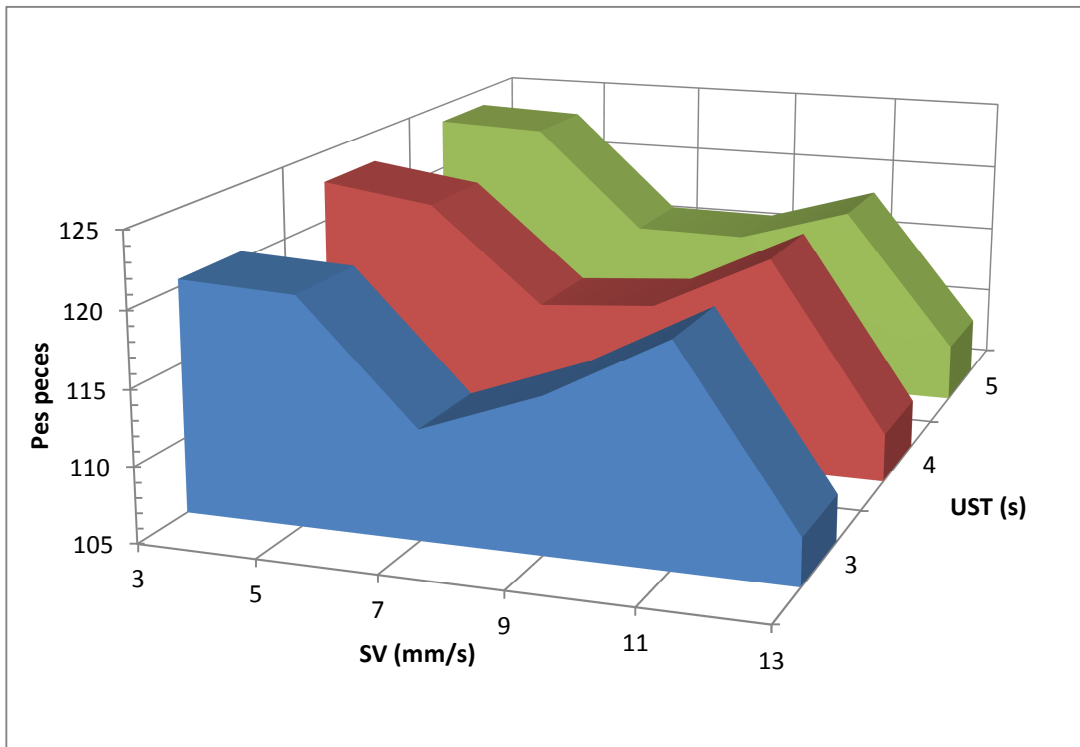


Figura 4.59. Mapa de procés 1.

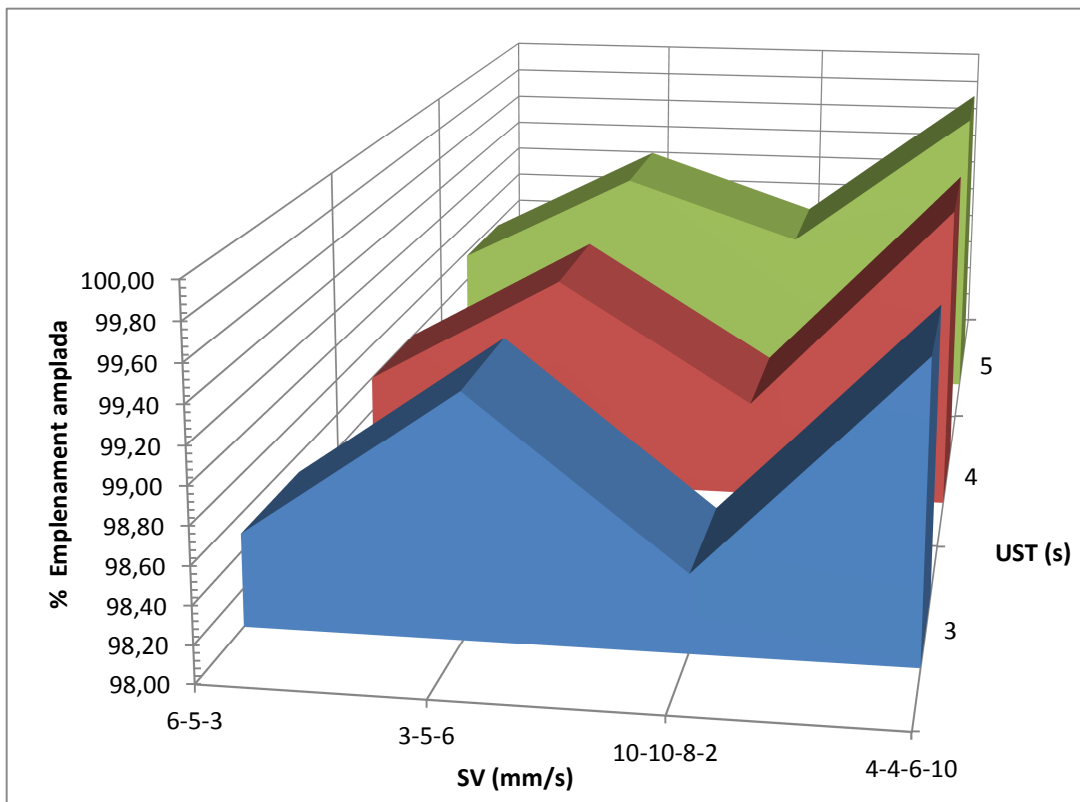


Figura 4.58. Mapa de procés 2.

5. RESUM DEL PRESSUPOST

El total del resum del pressupost per a la modelització dels paràmetres del procés d'emmotllament per ultrasons ascendeix a un total de 6066,65 € (Sis mil seixanta-sis euros amb seixanta-cinc cèntims). El detall del pressupost es pot veure a l'Annex E.

6. CONCLUSIONS I TREBALLS FUTURS

6.1. Conclusions

En aquest apartat es resumeixen les principals conclusions obtingudes en el present projecte. En primer lloc s'han identificat quins són els paràmetres de procés que es poden controlar en el procés d'emmotllament per ultrasons i que tenen més influència en la qualitat de la peça final. Aquests paràmetres són el temps d'ultrasons, la velocitat del sonotrode i la temperatura del motlle; a més de l'assecatge dels pellets. Variant els valors d'aquests paràmetres s'ha realitzat una àmplia experimentació i una posterior anàlisi en què s'ha aconseguit determinar quins condicions propicien una millor qualitat de la peça.

Pel que fa a l'assecatge de pellets s'arriba a la conclusió a partir de l'estudi de la porositat que les peces obtingudes a partir de pellets assecats presenten menys porositat i de tamany més reduït que aquelles obtingudes a partir de pellets humits. A més el procés de fusió del material requereix menys temps d'ultrasons quan es treballa amb pellets assecats.

Quant a temps d'ultrasons s'ha observat que existeix un temps d'ultrasons mínim a partir del qual s'obtenen peces completes i que en la realització d'aquest projecte és de tres segons, tant amb el motlle a temperatura ambient com a 35°C. El percentatge de peces completes amb aquest temps d'ultrasons, però, s'ha vist que pot augmentar si es canvia la velocitat. És a dir, s'ha comprovat que quan es treballa amb velocitats constants lentes de fins a 5mm/s o bé amb rampes de velocitat ascendent com pot ser 4,4,6 i 10mm/s, el percentatge de peces obtingudes augmenta i també milloren els resultats d'altres estudis com l'anàlisi del pes i les dimensions del producte acabat.

A més també s'ha comprovat que se segueixen les tendències de porositat, pes i dimensions quan es realitzen els mateixos experiments inicials aplicant temperatura en el motlle.

D'aquesta manera s'ha pogut elaborar una metodologia que permet generar diferents mapes de procés que relacionen diverses característiques de les peces obtingudes per a diferents paràmetres de procés, de manera que si s'apliquen uns criteris de qualitat es poden determinar quins són els paràmetres de procés adequats.

6.2. Treballs futurs

El present projecte suposa un primer pas en la caracterització del procés d'emmotllament per ultrasons, ja que com s'ha dit, es tracta d'una tecnologia molt nova amb un ampli ventall de línies d'investigació que cal explorar.

El primer pas a seguir després de la realització d'aquest projecte consisteix en repetir l'experimentació amb polipropilè ampliant el nombre de proves per a cada una de les fases de manera que la metodologia pugui quedar validada seguint el diagrama de procés resultant.

A partir d'aquí també caldria aplicar aquesta metodologia per a altres polímers per tal de comprovar que aquesta metodologia sigui vàlida per a materials amb diferents característiques. En concret, es pretén treballar amb PEEK perquè es tracta d'un material biocompatible molt utilitzat en aplicacions mèdiques. A més el PEEK és un dels polímers que requereix temperatura en el motlle per a realitzar l'emmotllament de manera que és un material molt indicat per fer una bona comprovació de l'efecte de la temperatura del motlle sobre les peces processades.

A més també és interessant ampliar l'anàlisi que es fa a les peces processades per tenir més informació de la qualitat de les peces que s'obtenen. Malgrat l'estudi d'aquest projecte no té com a objectiu obtenir peces amb un certs requeriments de qualitat quant a propietats mecàniques, tèrmiques o de degradació de material sí que són característiques importants en moltes peces d'àmbit industrial de manera que els diagrames de procés resultants d'aquests estudis poden ser molt útils per a certes aplicacions.

Finalment, també hi ha altres camps en el procés d'emmotllament per ultrasons en què cal treballar a més de les característiques de procés com poden ser la millora del disseny estructural de la màquina, optimització dels seus elements, adaptació per a poder realitzar múltiples emmotllaments en una mateixa operació, etc.

7. RELACIÓ DELS DOCUMENTS

Aquest projecte es compon dels següents documents:

- Document 1. Memòria i Annexos
- Document 2. CD

ANNEXOS

ANNEX A. TAULA DE RESULTATS

A.1. Resultats de la Fase 1 de l'Estudi preliminar de l'Experimentació amb el motlle a temperatura ambient.

Nº experiment	Q (g)	DP (si/no)	MT (°C)	SV (mm/s)	SP (mm)	UST (s)	CT (s)	Filling cavity	Porosity			Pes peça acabada (g)
									Beginning	Medium	End	
1	0,3191	no	no	3	10,5,4,1	1	5	0	0	0	0	0,0000
2	0,3172	no	no	3	10,5,4,1	1	5	0	0	0	0	0,0000
3	0,3122	no	no	3	10,5,4,1	1	5	0	0	0	0	0,0000
4	0,3003	no	no	3	10,5,4,1	1	5	0	0	0	0	0,0000
5	0,0000	no	no	3	10,5,4,1	1	5	0	0	0	0	0,0000
6	0,2972	no	no	3	10,5,4,1	2	5	0	0	0	0	0,0000
7	0,3107	no	no	3	10,5,4,1	2	5	0	0	0	0	0,0000
8	0,2933	no	no	3	10,5,4,1	2	5	0	4	0	0	0,0000
9	0,3207	no	no	3	10,5,4,1	2	5	0	0	0	0	0,0000
10	0,3147	no	no	3	10,5,4,1	2	5	0	0	0	0	0,0000
11	0,3179	no	no	3	10,5,4,1	3	5	0,5	0	0	0	0,0000
12	0,3077	no	no	3	10,5,4,1	3	5	0,5	1	3	4	0,0608
13	0,3055	no	no	3	10,5,4,1	3	5	1	2	2	7	0,0975
14	0,3033	no	no	3	10,5,4,1	3	5	1	2	6	7	0,0984
15	0,3161	no	no	3	10,5,4,1	3	5	1	2	3	7	0,0992
16	0,3134	no	no	3	10,5,4,1	4	5	1	2	3	2	0,1003
17	0,3116	no	no	3	10,5,4,1	4	5	1	2	3	7	0,0996
18	0,3181	no	no	3	10,5,4,1	4	5	1	1	6	7	0,1020
19	0,3160	no	no	3	10,5,4,1	4	5	1	7	2	1	0,1006
20	0,3170	no	no	3	10,5,4,1	4	5	1	7	2	1	0,0999
21	0,3102	no	no	3	10,5,4,1	5	5	1	6	1	7	0,0940
22	0,2981	no	no	3	10,5,4,1	5	5	1	3	1	2	0,0934
23	0,3008	no	no	3	10,5,4,1	5	5	1	2	1	2	0,0916

Nº experiment	Q (g)	DP (si/no)	MT (°C)	SV (mm/s)	SP (mm)	UST (s)	CT (s)	Peça (si/no)	Porosity			Pes peça acabada (g)
									Beginning	Medium	End	
24	0,3047	no	no	3	10,5,4,1	5	5	1	3	2	2	0,0930
25	0,2949	no	no	3	10,5,4,1	5	5	1	2	2	2	0,0916
26	0,3079	si	no	3	10,5,4,1	1	5	0	0	0	0	0,0000
27	0,3069	si	no	3	10,5,4,1	1	5	0	0	0	0	0,0000
28	0,3058	si	no	3	10,5,4,1	1	5	0	0	0	0	0,0000
29	0,3147	si	no	3	10,5,4,1	1	5	0	0	0	0	0,0000
30	0,2956	si	no	3	10,5,4,1	1	5	0	0	0	0	0,0000
31	0,3179	si	no	3	10,5,4,1	2	5	0,5	7	7	0	0,0457
32	0,2983	si	no	3	10,5,4,1	2	5	0	0	0	0	0,0000
33	0,3041	si	no	3	10,5,4,1	2	5	0	0	0	0	0,0000
34	0,3187	si	no	3	10,5,4,1	2	5	0	0	0	0	0,0000
35	0,3099	si	no	3	10,5,4,1	2	5	0	0	0	0	0,0000
36	0,3151	si	no	3	10,5,4,1	3	5	1	7	7	7	0,0976
37	0,3107	si	no	3	10,5,4,1	3	5	1	7	7	7	0,0977
38	0,3090	si	no	3	10,5,4,1	3	5	0,5	2	2	0	0,0751
39	0,3131	si	no	3	10,5,4,1	3	5	0,5	7	7	0	0,0788
40	0,3160	si	no	3	10,5,4,1	3	5	1	2	3	4	0,0969
41	0,3106	si	no	3	10,5,4,1	4	5	1	1	1	7	0,0977
42	0,3077	si	no	3	10,5,4,1	4	5	1	2	1	7	0,0983
43	0,3044	si	no	3	10,5,4,1	4	5	1	7	1	1	0,0990
44	0,2991	si	no	3	10,5,4,1	4	5	1	2	2	2	0,0991
45	0,306	si	no	3	10,5,4,1	4	5	1	2	1	7	0,0996
46	0,3048	si	no	3	10,5,4,1	5	5	1	2	1	7	0,0987
47	0,3058	si	no	3	10,5,4,1	5	5	1	2	1	1	0,0993
48	0,3073	si	no	3	10,5,4,1	5	5	1	2	1	1	0,1004
49	0,2954	si	no	3	10,5,4,1	5	5	1	0	0	0	0,0000
50	0,3091	si	no	3	10,5,4,1	5	5	1	1	1	7	0,0910

A.2. Resultats de la Fase 2 de l'Estudi preliminar de l'Experimentació amb el motlle a temperatura ambient.

Nº experiment	Q (g)	DP (si/no)	MT (°C)	SV (mm/s)	SP (mm)	UST (s)	CT (s)	Filling cavity	Porosity			Pes peça acabada (g)
									Beginning	Medium	End	
51	0,306	si	no	5	10,5,4,1	3	5	1	1	0,1153	7	0,1153
52	0,3075	si	no	5	10,5,4,1	3	5	1	2	0,1224	7	0,1224
53	0,3027	si	no	5	10,5,4,1	3	5	1	2	0,1220	7	0,1220
54	0,3059	si	no	5	10,5,4,1	3	5	1	1	0,1218	7	0,1218
55	0,3082	si	no	5	10,5,4,1	3	5	1	2	0,1192	7	0,1192
56	0,2966	si	no	7	10,5,4,1	3	5	1	2	0,1133	7	0,1133
57	0,3143	si	no	7	10,5,4,1	3	5	1	4	0,1115	4	0,1115
58	0,3009	si	no	7	10,5,4,1	3	5	1	1	0,1149	7	0,1149
59	0,2972	si	no	7	10,5,4,1	3	5	1	4	0,1113	7	0,1113
60	0,2947	si	no	7	10,5,4,1	3	5	1	4	0,1103	7	0,1103
61	0,3143	si	no	9	10,5,4,1	3	5	1	7	0,1116	4	0,1116
62	0,2965	si	no	9	10,5,4,1	3	5	0,5	6	0,1006	2	0,1006
63	0,315	si	no	9	10,5,4,1	3	5	0,5	2	0,0842	2	0,0842
64	0,3148	si	no	9	10,5,4,1	3	5	0,5	7	0,0814	0	0,0814
65	0,3103	si	no	9	10,5,4,1	3	5	1	6	0,1188	7	0,1188
66	0,3136	si	no	11	10,5,4,1	3	5	1	1	0,1252	7	0,1252
67	0,3051	si	no	11	10,5,4,1	3	5	1	2	0,1206	7	0,1206
68	0,2989	si	no	11	10,5,4,1	3	5	1	6	0,1144	7	0,1144
69	0,3009	si	no	11	10,5,4,1	3	5	0,5	3	0,0369	0	0,0369
70	0,3021	si	no	11	10,5,4,1	3	5	1	2	0,1177	6	0,1177
71	0,3022	si	no	13	10,5,4,1	3	5	0	0	0,0127	0	0,0127
72	0,3119	si	no	13	10,5,4,1	3	5	0,5	5	0,1034	5	0,1034
73	0,3112	si	no	13	10,5,4,1	3	5	0,5	5	0,0932	0	0,0932
74	0,3136	si	no	13	10,5,4,1	3	5	1	2	0,1230	7	0,1230
75	0,3023	si	no	13	10,5,4,1	3	5	0	3	0,0234	0	0,0234
76	0,3035	si	no	15	10,5,4,1	3	5	0	3	0	0	0,0101

Nº experiment	Q (g)	DP (si/no)	MT (°C)	SV (mm/s)	SP (mm)	UST (s)	CT (s)	Filling cavity	Porosity			Pes peça acabada
									Beginning	Medium	End	
77	0,3111	si	no	15	10,5,4,1	3	5	1	5	5	6	0,1165
78	0,3075	si	no	15	10,5,4,1	3	5	0,5	5	5	0	0,0621
79	0,3115	si	no	15	10,5,4,1	3	5	0,5	4	4	0	0,0825
80	0,3076	si	no	15	10,5,4,1	3	5	0,5	5	5	3	0,0996
81	0,3135	si	no	17	10,5,4,1	3	5	1	7	4	7	0,1190
82	0,2993	si	no	17	10,5,4,1	3	5	1	6	7	7	0,1121
83	0,3076	si	no	17	10,5,4,1	3	5	1	4	6	6	0,1175
84	0,2971	si	no	17	10,5,4,1	3	5	0,5	5	5	3	0,0956
85	0,2947	si	no	17	10,5,4,1	3	5	0,5	5	5	5	0,1069

A.3. Resultats de la Fase 3 de l'Estudi preliminar de l'Experimentació amb el motlle a temperatura ambient.

Nº	Q (g)	DP (si/no)	MT (°C)	SV (mm/s)	SP (mm)	UST (s)	CT (s)	Filling cavity	Porosity			Pes peça acabada (g)	Width (µm)			Thick (µm)		
									Beginning	Medium	End		Beginning	Medium	End	Beginning	Medium	End
86	0,301	si	no	6-5-3	10-5-4-1	3	5	1	1	1	7	0,1222	3886	2726	3912	1284	1301	1292
87	0,317	si	no	6-5-3	10-5-4-1	3	5	1	1	2	7	0,1203	3877	2717	3886	1284	1284	1284
88	0,3059	si	no	6-5-3	10-5-4-1	3	5	1	3	5	7	0,1097	3825	2708	3904	1292	1284	1284
89	0,3018	si	no	6-5-3	10-5-4-1	3	5	1	2	5	7	0,1109	3886	2699	3912	1292	1284	1292
90	0,3132	si	no	6-5-3	10-5-4-1	3	5	1	3	5	2	0,1090	3763	2717	3904	1284	1275	1301
91	0,3127	si	no	6-5-3	10-5-4-1	3	5	1	3	3	7	0,1102	3807	2690	3877	1284	1275	1301
92	0,3032	si	no	6-5-3	10-5-4-1	3	5	1	1	5	7	0,1090	3825	2717	3895	1284	1284	1292
93	0,3002	si	no	6-5-3	10-5-4-1	3	5	1	1	6	2	0,1105	3825	2690	3895	1284	1284	1275
94	0,315	si	no	6-5-3	10-5-4-1	3	5	1	4	5	7	0,1095	3745	2717	3904	1292	1301	1292
95	0,2967	si	no	6-5-3	10-5-4-1	3	5	1	1	5	2	0,1109	3825	2690	3895	1301	1301	1292
96	0,3054	si	no	3-5-6	10-5-4-1	3	5	1	1	2	7	0,1189	3877	2708	3956	1284	1284	1284
97	0,3021	si	no	3-5-6	10-5-4-1	3	5	1	2	7	7	0,1241	3912	2805	3948	1301	1284	1295
98	0,3044	si	no	3-5-6	10-5-4-1	3	5	0,5	4	3	1	0,1049	3789	2708	3851	1292	1292	1292
99	0,311	si	no	3-5-6	10-5-4-1	3	5	0	0	0	0	0,0000	-	-	-	-	-	-
100	0,3047	si	no	3-5-6	10-5-4-1	3	5	1	1	2	2	0,1239	3895	2726	3921	1301	1328	1301
101	0,3181	si	no	3-5-6	10-5-4-1	3	5	1	1	1	7	0,1219	3886	2752	3930	1284	1284	1284
102	0,3001	si	no	3-5-6	10-5-4-1	3	5	1	1	2	7	0,1235	3886	2761	3939	1284	1284	1292
103	0,315	si	no	3-5-6	10-5-4-1	3	5	1	2	1	7	0,1170	3886	2743	3956	1284	1284	1301
104	0,3036	si	no	3-5-6	10-5-4-1	3	5	1	2	6	7	0,1224	3904	2743	3956	1292	1292	1266
105	0,2966	si	no	3-5-6	10-5-4-1	3	5	1	2	4	7	0,1164	3851	2708	3930	1284	1292	1292
106	0,3257	si	no	10-10-8-2	10-5-4-1	3	5	0,5	2	5	0	0,0827	3842	2673	3886	1284	1284	1284
107	0,3272	si	no	10-10-8-2	10-5-4-1	3	5	0,5	7	4	0	0,0639	3816	2655	-	1301	1284	-
108	0,3215	si	no	10-10-8-2	10-5-4-1	3	5	1	5	7	7	0,1106	3877	2717	3904	1275	1284	1284
109	0,3375	si	no	10-10-8-2	10-5-4-1	3	5	1	2	3	3	0,1149	3825	2708	3895	1292	1275	1284
110	0,3158	si	no	10-10-8-2	10-5-4-1	3	5	1	2	2	2	0,1141	3869	2717	3816	1284	1266	1301

Nº	Q (g)	DP (si/no)	MT (°C)	SV (mm/s)	SP (mm)	UST (s)	CT (s)	Filling cavity	Porosity			Pes peça acabada	Width (µm)			Thick (µm)		
									Beginning	Medium	End		Beginning	Medium	End	Beginning	Medium	End
111	0,327	si	no	10-10-8-2	10-5-2-1	3	5	0,5	4	2	0	0,1056	3851	2690	3851	1293	1284	1266
112	0,3198	si	no	10-10-8-2	10-5-2-1	3	5	1	6	4	6	0,1106	3842	2673	3886	1284	1284	1284
113	0,3235	si	no	10-10-8-2	10-5-2-1	3	5	0,5	5	5	0	0,0972	3860	2699	3842	1284	1284	-
114	0,312	si	no	10-10-8-2	10-5-2-1	3	5	0,5	2	6	0	0,0711	3842	2690	-	1284	1275	-
115	0,3304	si	no	10-10-8-2	10-5-2-1	3	5	0,5	3	1	0	0,0755	3860	2699	-	1284	1301	-
116	0,327	si	no	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	2	1	7	0,1206	3904	2743	3939	1301	1301	1301
117	0,3172	si	no	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	1	1	7	0,1197	3886	2734	3939	1301	1292	1292
118	0,3148	si	no	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	2	6	7	0,1245	3921	2752	3956	1292	1292	1292
119	0,3273	si	no	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	1	2	7	0,1218	3921	2752	3974	1301	1292	1292
120	0,3244	si	no	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	2	2	2	0,1182	3904	2726	3956	1301	1292	1284
121	0,3164	si	no	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	1	1	7	0,1251	3912	2743	3956	1301	1292	1292
122	0,313	si	no	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	0,5	7	3	0	0,0858	3933	2699	-	1266	1301	-
123	0,3186	si	no	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	7	2	7	0,1217	3904	2752	3948	1301	1292	1292
124	0,3213	si	no	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	1	6	7	0,1223	3904	2743	3948	1292	1301	1275
125	0,3298	si	no	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	2	2	6	0,1184	3869	2717	3895	1292	1292	1292

A.4. Resultats de la Verificació de l'Estudi preliminar de l'Experimentació amb el motlle a temperatura ambient.

Nº	Q (g)	DP (si/no)	MT (°C)	SV (mm/s)	SP (mm)	UST (s)	CT (s)	Filling cavity	Porosity			Pes peça acabada (g)	Width (µm)			Thick (µm)		
									Beginning	Medium	End		Beginning	Medium	End	Beginning	Medium	End
126	0,3087	no	no	3	10-5-4-1	3	5	1	1	5	4	0,1244	3886	2752	3930	1292	1275	1301
127	0,3206	no	no	3	10-5-4-1	3	5	1	1	3	3	0,1285	3912	2787	3921	1292	1301	1292
128	0,3102	no	no	3	10-5-4-1	3	5	1	1	5	5	0,1278	3921	2770	3930	1301	1292	1292
129	0,3079	no	no	3	10-5-4-1	3	5	1	1	1	1	0,1225	3930	2752	3869	1292	1301	1301
130	0,3046	no	no	3	10-5-4-1	3	5	1	1	2	6	0,1279	3921	2761	3904	1301	1284	1301
131	0,3043	si	no	3	10-5-4-1	3	5	1	2	1	6	0,1263	3904	2778	3904	1292	1301	1292
132	0,3093	si	no	3	10-5-4-1	3	5	1	2	5	2	0,1249	3912	2770	3904	1292	1284	1292
133	0,3108	si	no	3	10-5-4-1	3	5	1	1	3	6	0,1278	3912	2770	3895	1301	1292	1301
134	0,3041	si	no	3	10-5-4-1	3	5	1	1	3	7	0,1295	3921	2778	3912	1292	1301	1292
135	0,3161	si	no	3	10-5-4-1	3	5	1	2	1	3	0,1272	3912	2770	3912	1301	1292	1292
136	0,3173	si	no	5	10-5-4-1	3	5	1	2	2	2	0,1241	3877	2770	3948	1292	1284	1284
137	0,3262	si	no	5	10-5-4-1	3	5	1	2	3	2	0,1250	3886	2752	3904	1284	1275	1292
138	0,3222	si	no	5	10-5-4-1	3	5	1	2	4	2	0,1260	3886	2761	3895	1284	1292	1301
139	0,2650	si	no	5	10-5-4-1	3	5	1	2	4	4	0,1225	3886	2752	3912	1292	1292	1310
140	0,3198	si	no	5	10-5-4-1	3	5	1	2	2	2	0,1257	3912	2770	3904	1292	1284	1301
141	0,3260	si	no	13	10-5-4-1	3	5	1	4	3	2	0,1107	3754	2646	3781	1301	1284	1328
142	0,3221	si	no	13	10-5-4-1	3	5	0,5	3	5	-	0,0659	3877	2655	-	1266	1275	-
143	0,3117	si	no	13	10-5-4-1	3	5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
144	0,3298	si	no	13	10-5-4-1	3	5	1	2	5	7	0,1119	3877	2743	3869	1301	1301	1328
145	0,3179	si	no	13	10-5-4-1	3	5	1	5	5	7	0,1155	3869	2770	3886	1275	1310	1310
146	0,3324	si	no	10-10-8-2	10-5-2-1	3	5	1	2	7	7	0,1127	3860	2726	3833	1275	1284	1319
147	0,3225	si	no	10-10-8-2	10-5-2-1	3	5	0,5	4	4	-	0,0908	3825	2761	-	1301	1275	-
148	0,3105	si	no	10-10-8-2	10-5-2-1	3	5	0,5	5	2	-	0,0620	3826	2644	-	1301	1266	-
149	0,3044	si	no	10-10-8-2	10-5-2-1	3	5	0,5	4	5	-	0,0927	3886	2699	-	1284	1301	-
150	0,3027	si	no	10-10-8-2	10-5-2-1	3	5	0,5	2	1	-	0,0722	3869	2708	-	1301	1292	-

Nº	Q (g)	DP (si/no)	MT (°C)	SV (mm/s)	SP (mm)	UST (s)	CT (s)	Filling cavity	Porosity			Pes peça acabada	Width (µm)			Thick (µm)		
									Beginning	Medium	End		Beginning	Medium	End	Beginning	Medium	End
151	0,3249	si	no	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	2	2	7	0,1269	3948	2805	3983	1310	1284	1292
152	0,3240	si	no	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	2	2	7	0,1248	3921	2976	3930	1301	1292	1301
153	0,3111	si	no	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	2	2	6	0,1186	3877	2743	3939	1301	1310	1292
154	0,3097	si	no	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	0,5	2	4	-	0,0987	3860	2717	-	1301	1292	-
155	0,3231	si	no	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	2	2	7	0,1263	3895	2787	3983	1292	1284	1301

A.5. Resultats de la Verificació amb el motlle a 35°C.

Nº	Q (g)	DP (si/no)	MT (°C)	SV (mm/s)	SP (mm)	UST (s)	CT (s)	Filling cavity	Porosity			Pes peça acabada (g)	Width (µm)			Thick (µm)		
									Beginning	Medium	End		Beginning	Medium	End	Beginning	Medium	End
156	0,3100	si	35	3	10-5-4-1	1	5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
157	0,3101	si	35	3	10-5-4-1	1	5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
158	0,3139	si	35	3	10-5-4-1	1	5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
159	0,3092	si	35	3	10-5-4-1	1	5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
160	0,3076	si	35	3	10-5-4-1	1	5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
161	0,3120	si	35	3	10-5-4-1	2	5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
162	0,3079	si	35	3	10-5-4-1	2	5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
163	0,3172	si	35	3	10-5-4-1	2	5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
164	0,3193	si	35	3	10-5-4-1	2	5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
165	0,3195	si	35	3	10-5-4-1	2	5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
166	0,3147	si	35	3	10-5-4-1	3	5	1	2	2	2	0,1197	3833	2734	3965	1310	1292	1292
167	0,3048	si	35	3	10-5-4-1	3	5	0,5	1	2	-	0,1028	3851	2736	-	1266	1240	-
168	0,3066	si	35	3	10-5-4-1	3	5	0,5	1	2	-	0,0979	3833	2726	-	1292	1240	-
169	0,2993	si	35	3	10-5-4-1	3	5	0,5	1	4	-	0,1040	3851	2717	-	1275	1248	-
170	0,3139	si	35	3	10-5-4-1	3	5	1	2	2	7	0,1237	3860	2752	3904	1301	1266	1292
171	0,3174	si	35	3	10-5-4-1	4	5	1	2	1	7	0,1249	3912	2770	3930	1292	1249	1275
172	0,3176	si	35	3	10-5-4-1	4	5	1	2	1	1	0,1226	3851	2743	3886	1292	1284	1284
173	0,3131	si	35	3	10-5-4-1	4	5	1	2	6	7	0,1223	3912	2761	3921	1292	1257	1310
174	0,3194	si	35	3	10-5-4-1	4	5	1	2	2	7	0,1203	3886	2822	3965	1301	1205	1301
175	0,3128	si	35	3	10-5-4-1	4	5	1	1	1	2	0,1260	3851	2752	3904	1301	1275	1292
176	0,2998	si	35	3	10-5-4-1	5	5	1	4	4	7	0,1256	3825	2726	3904	1301	1275	1292
177	0,3247	si	35	3	10-5-4-1	5	5	1	4	1	2	0,1103	3789	2690	3877	1284	1266	1292
178	0,3275	si	35	3	10-5-4-1	5	5		5	6	6	0,1149	3763	2638	3851	1284	1284	1284
179	0,3052	si	35	3	10-5-4-1	5	5	1	1	1	1	0,1096	3825	2682	3842	1292	1292	1301
180	0,3275	si	35	3	10-5-4-1	5	5	1	6	6	6	0,1110	3754	2708	3921	1310	1275	1310

Nº	Q (g)	si si	MT (°C)	SV (mm/s)	SP (mm)	UST (s)	CT (s)	Filling cavity	Porosity			Pes peça acabada (g)	Width (µm)			Thick (µm)		
									Beginning	Medium	End		Beginni ng	Mediu m	End	Beginni ng	Mediu m	End
181	0,3289	si	35	5	10-5-4-1	3	5	1	2	7	7	0,1079	3877	2787	3939	1310	1292	1292
182	0,3058	si	35	5	10-5-4-1	3	5	1	2	2	7	0,1235	3886	2779	3956	1292	1275	1292
183	0,3087	si	35	5	10-5-4-1	3	5	1	2	2	7	0,1225	3869	2770	3921	1292	1284	1292
184	0,3245	si	35	5	10-5-4-1	3	5	1	2	2	7	0,1212	3860	2761	3992	1292	1292	1292
185	0,3052	si	35	5	10-5-4-1	3	5	1	1	2	7	0,1228	3869	2770	3956	1301	1292	1292
186	0,3231	si	35	7	10-5-4-1	3	5	1	6	6	7	0,1208	3816	2752	3851	1292	1284	1284
187	0,3158	si	35	7	10-5-4-1	3	5	0,5	5	7	-	0,1088	3825	2690	-	1319	1292	-
188	0,3291	si	35	7	10-5-4-1	3	5	1	2	2	7	0,0939	3869	2767	3965	1310	1284	1292
189	0,3178	si	35	7	10-5-4-1	3	5	0,5	3	4	-	0,1150	3851	2752	-	1284	1275	-
190	0,3285	si	35	7	10-5-4-1	3	5	1	2	1	7	0,0936	3869	2778	3974	1284	1301	1292
191	0,3158	si	35	9	10-5-4-1	3	5	0,5	4	2	-	0,1179	3877	2717	-	1301	1266	-
192	0,3264	si	35	9	10-5-4-1	3	5	0,5	5	4	-	0,1056	3860	2682	-	1292	1292	-
193	0,3108	si	35	9	10-5-4-1	3	5	1	3	3	3	0,1182	3860	2778	3939	1301	1275	1292
194	0,3072	si	35	9	10-5-4-1	3	5	0,5	3	2	-	0,0975	3745	2752	-	1310	1231	-
195	0,3174	si	35	9	10-5-4-1	3	5	0,5	5	6	-	0,0972	3825	2752	-	1292	1284	-
196	0,3227	si	35	11	10-5-4-1	3	5	1	5	2	7	0,1245	3939	2761	3974	1284	1292	1275
197	0,3288	si	35	11	10-5-4-1	3	5	1	5	5	3	0,1131	3842	2717	3877	1284	1284	1275
198	0,3135	si	35	11	10-5-4-1	3	5	0,5	6	-	-	0,0469	3825	-	-	1301	-	-
199	0,3253	si	35	11	10-5-4-1	3	5	0,5	3	-	-	0,0637	3851	-	-	1293	-	-
200	0,3192	si	35	11	10-5-4-1	3	5	0,5	5	3	-	0,0641	3860	2708	-	1292	1275	-
201	0,3299	si	35	10-10-8-2	10-5-2-1	3	5	0,5	3	3	-	0,0852	3886	2726	-	1292	1257	-
202	0,3119	si	35	10-10-8-2	10-5-2-1	3	5	1	6	6	7	0,1117	3892	2761	3992	1301	1284	1284
203	0,3246	si	35	10-10-8-2	10-5-2-1	3	5	0,5	3	3	-	0,0863	3869	2690	-	1310	1248	-
204	0,3068	si	35	10-10-8-2	10-5-2-1	3	5	0,5	4	2	-	0,0887	3877	2717	-	1284	1284	-
205	0,3086	si	35	10-10-8-2	10-5-2-1	3	5	1	2	2	6	0,1146	3816	2805	3992	1328	1292	1275
206	0,3197	si	35	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	2	2	7	0,1219	3912	2787	3974	1292	1310	1301
207	0,3277	si	35	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	1	2	7	0,1232	3921	2805	3992	1301	1284	1284
208	0,3256	si	35	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	1	1	6	0,1153	3869	2761	3948	1284	1275	1266

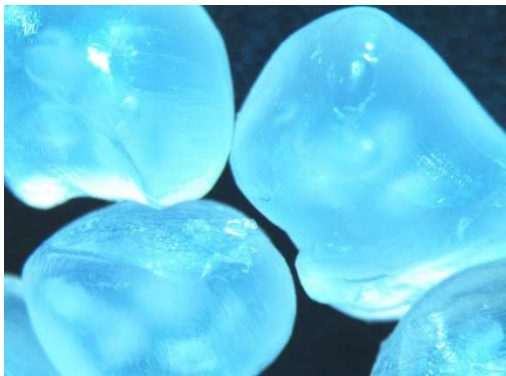
Nº	Q (g)	DP (si/no)	MT (°C)	SV (mm/s)	SP (mm)	UST (s)	CT (s)	Filling cavity	Porosity			Pes peça acabada (g)	Width (µm)			Thick (µm)		
									Beginning	Medium	End		Beginning	Medium	End	Beginning	Medium	End
209	0,3236	si	35	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	0,5	2	2	-	0,1072	3860	2743	-	1292	1292	-
210	0,3206	si	35	4-4-6-10	10-5-2-1	3	5	1	2	2	7	0,1239	3912	2805	3930	1301	1292	1301

ANNEX B. RECULL FOTOGRÀFIC

B.1. Experimentació amb el motlle a temperatura ambient.

B.1.1. Estudi preliminar

B.1.1.1. Fase 1



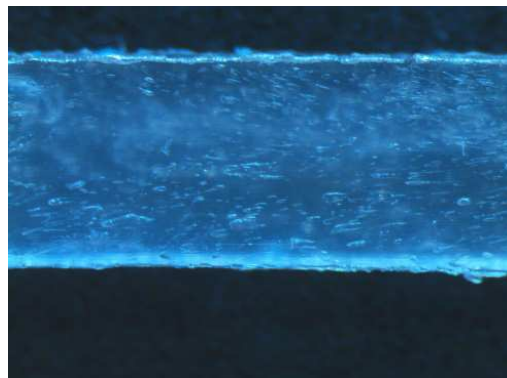
Imatge B.3



Imatge B.3



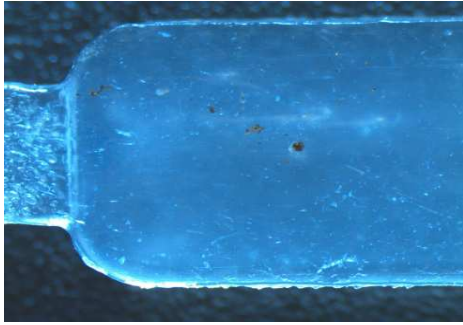
Imatge B.3



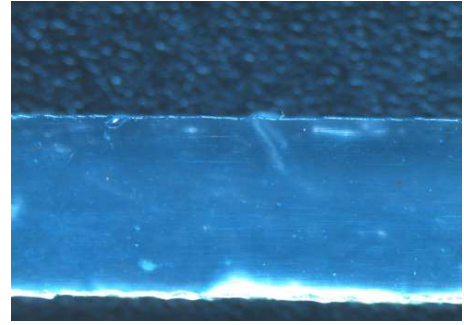
Imatge B.4



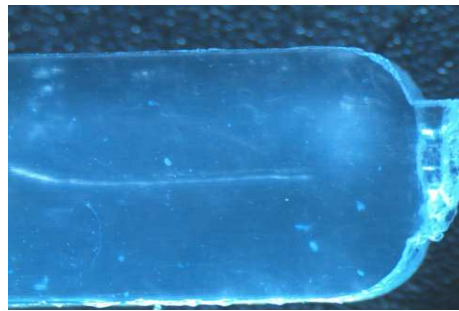
Imatge B.5



Imatge B.6

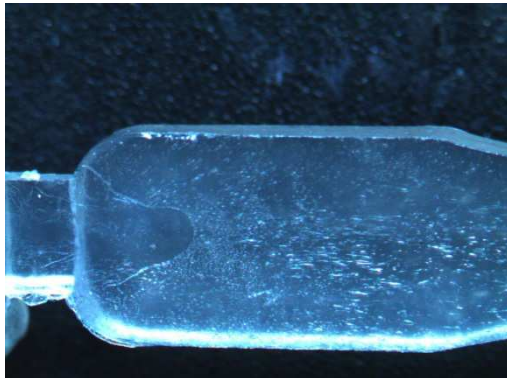


Imatge B.7

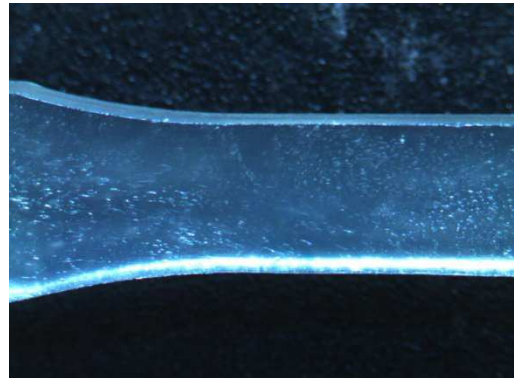


Imatge B.8

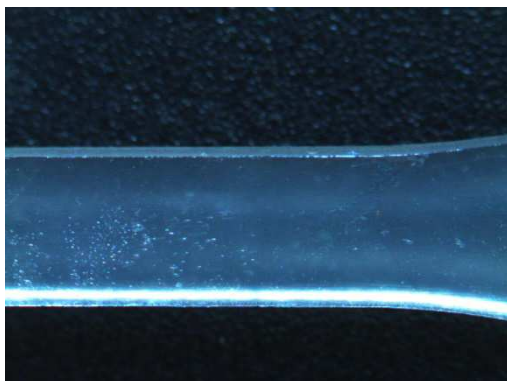
B.1.1.2. Fase 2



Imatge B.9



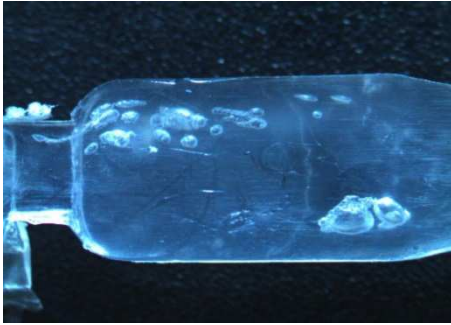
Imatge B.10



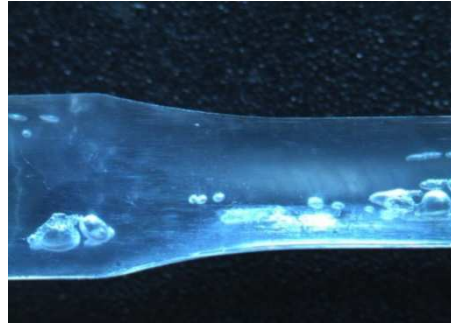
Imatge B.11



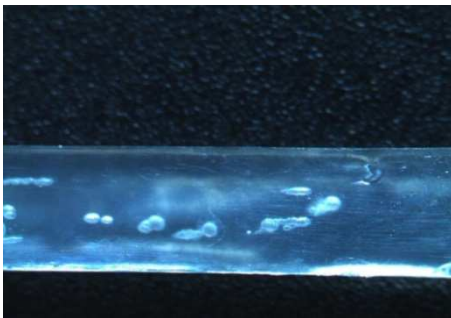
Imatge B.12



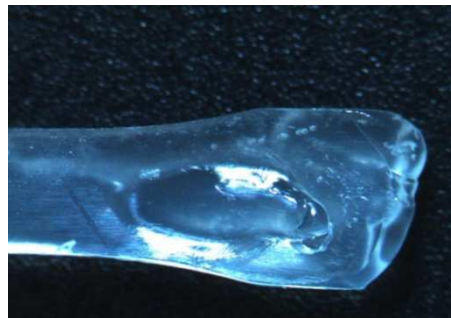
Imatge B.13



Imatge B.14



Imatge B.15

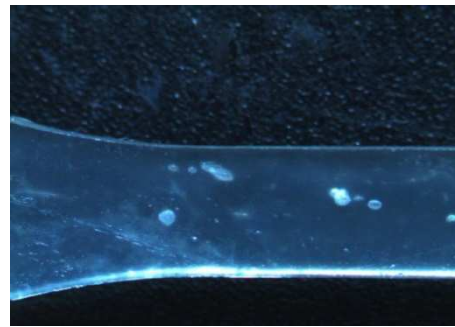


Imatge B.16

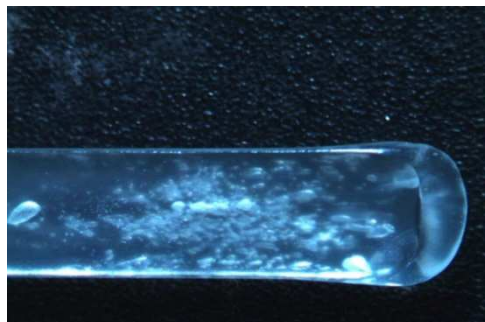
B.1.1.3. Fase 3



Imatge B.17



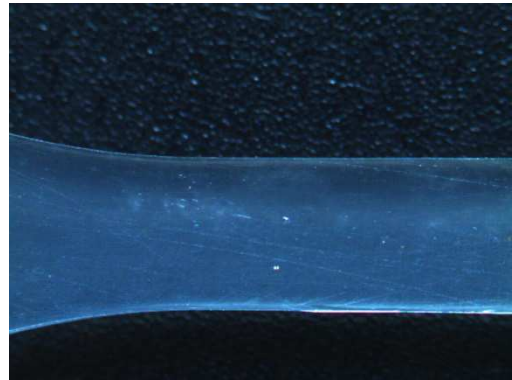
Imatge B.18



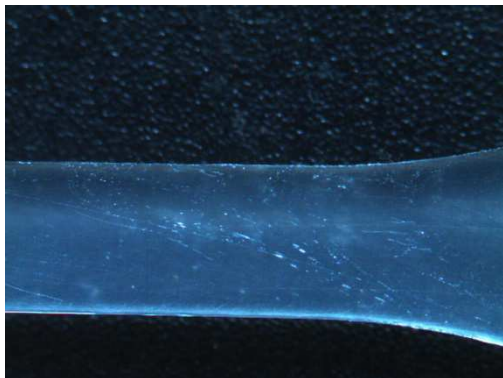
Imatge B.19



Imatge B.20



Imatge B.21



Imatge B.22

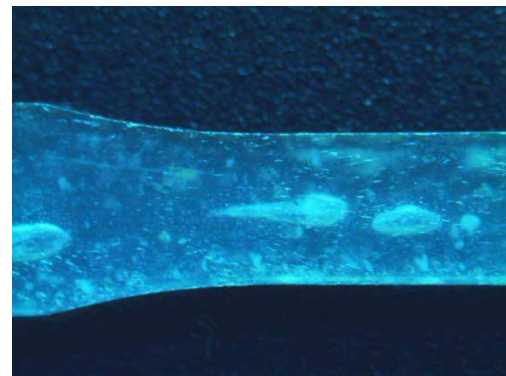


Imatge B.23

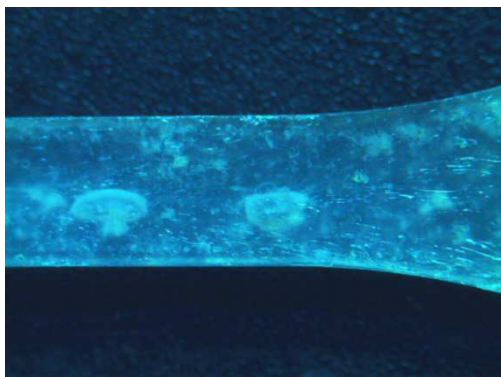
B.1.2. Verificació de l'estudi preliminar



Imatge B.24



Imatge B.25



Imatge B.26



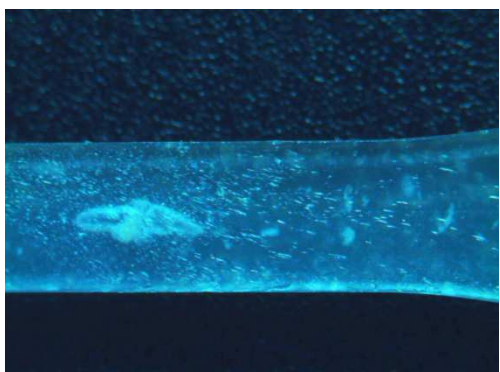
Imatge B.27



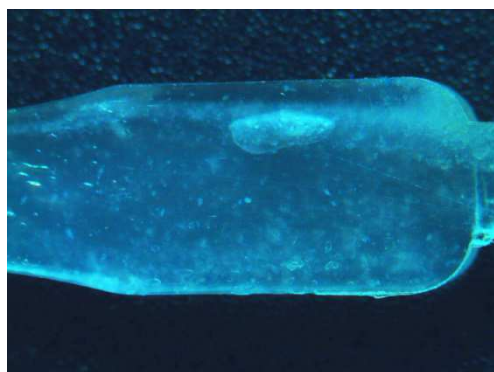
Imatge B.28



Imatge B.29



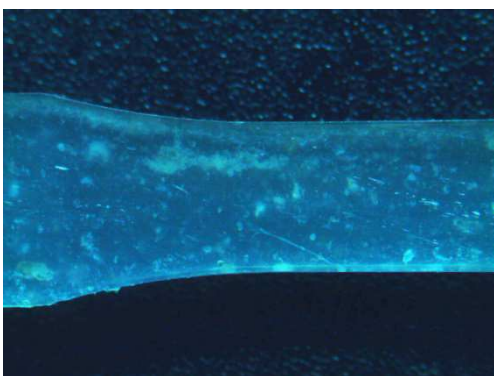
Imatge B.30



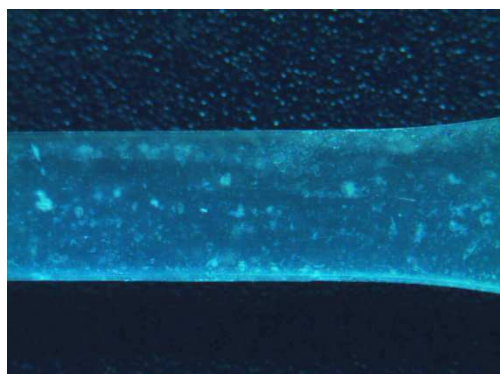
Imatge B.31



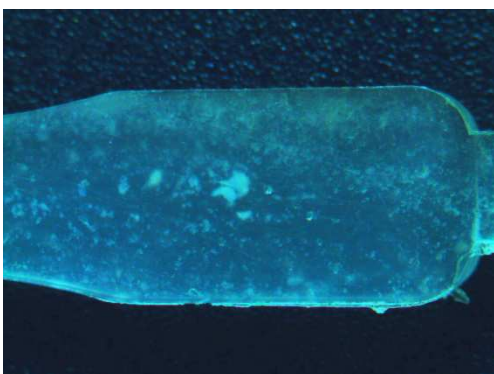
Imatge B.32



Imatge B.33



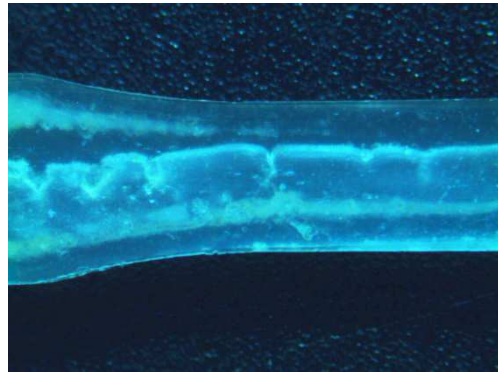
Imatge B.34



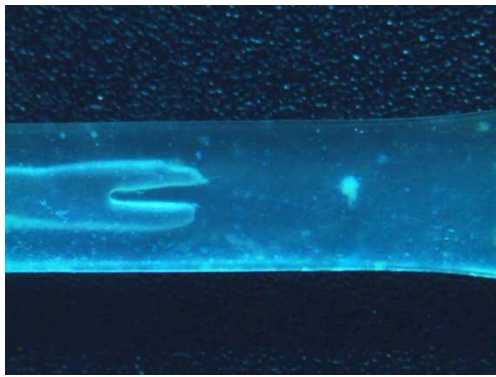
Imatge B.35



Imatge B.36



Imatge B.37



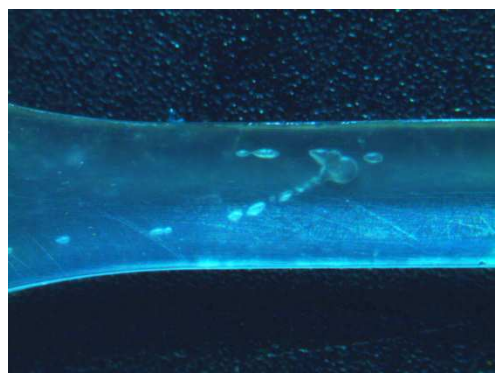
Imatge B.38



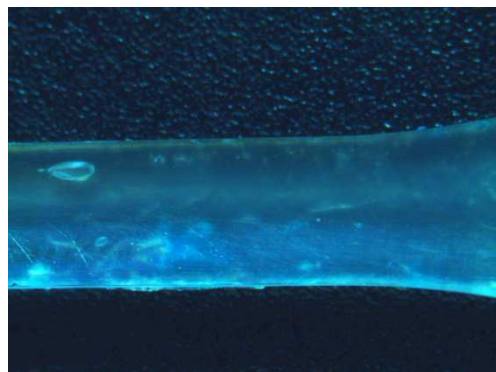
Imatge B.39



Imatge B.40



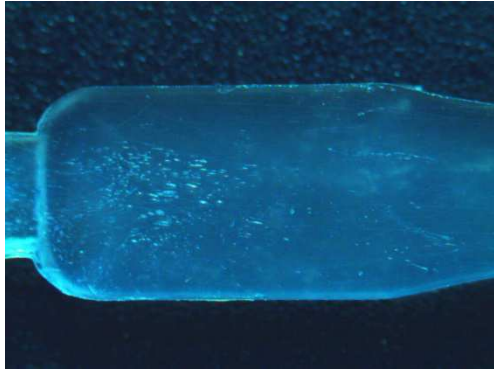
Imatge B.41



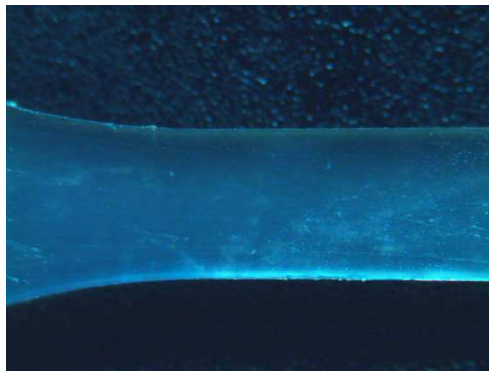
Imatge B.42



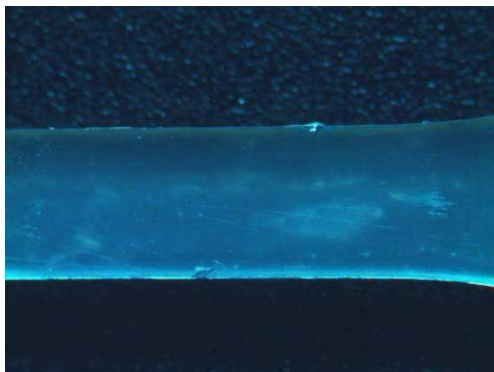
Imatge B.43



Imatge B.44



Imatge B.45

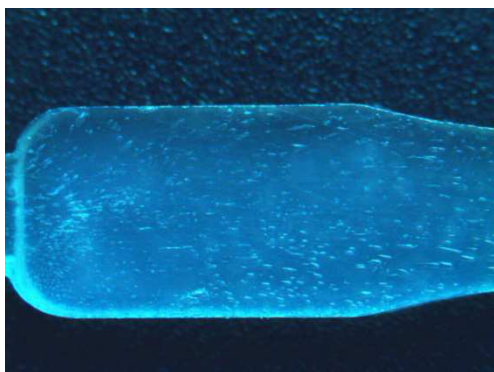


Imatge B.46

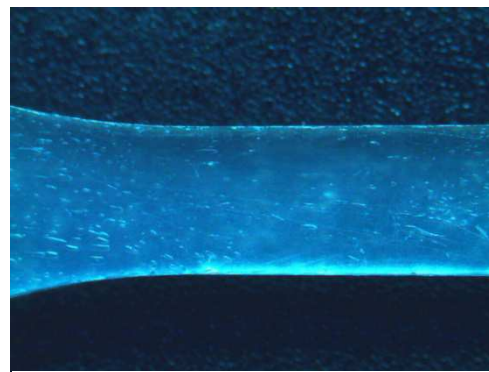


Imatge B.47

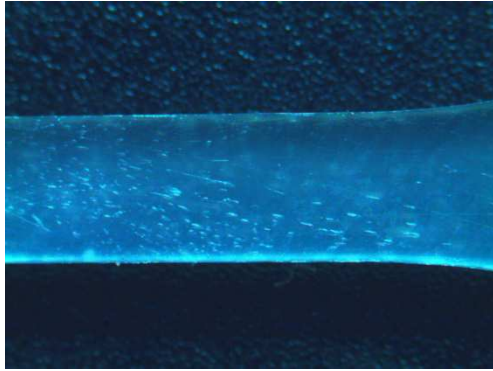
B.2. Experimentació amb el motlle a 35°C.



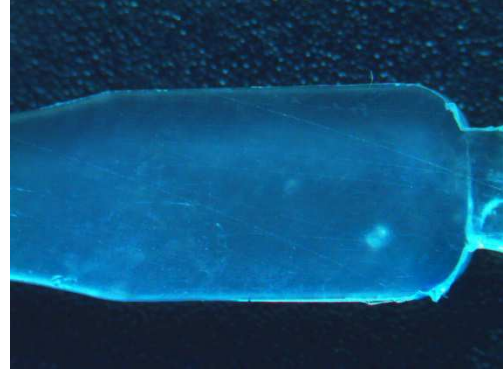
Imatge B.48



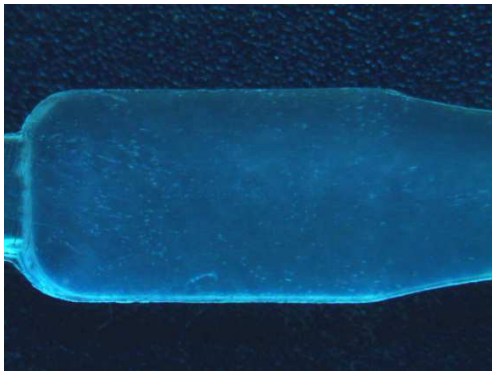
Imatge B.49



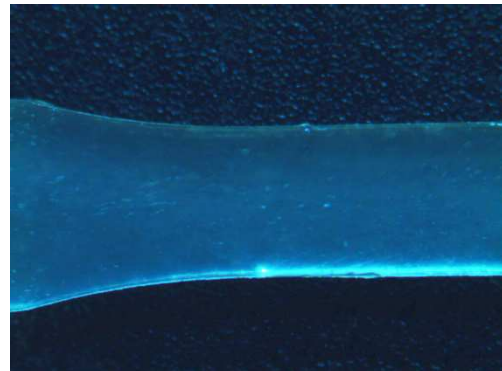
Imatge B.50



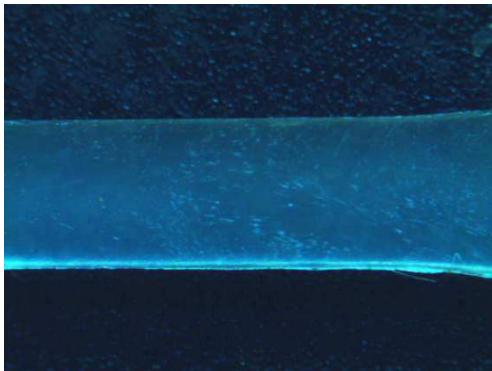
Imatge B.51



Imatge B.52



Imatge B.53



Imatge B.54



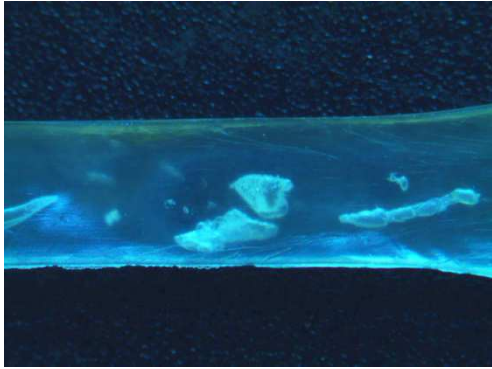
Imatge B.55



Imatge B.56



Imatge B.57



Imatge B.58



Imatge B.59



Imatge B.60



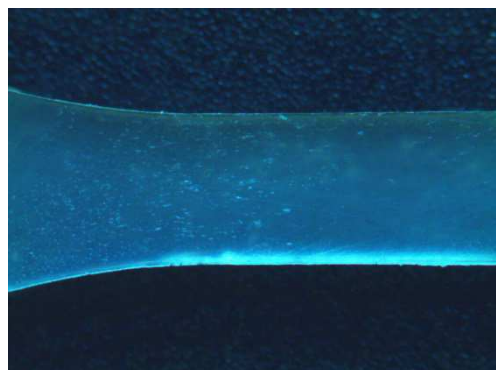
Imatge B.61



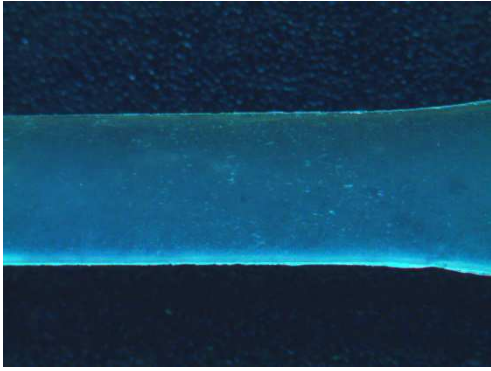
Imatge B.62



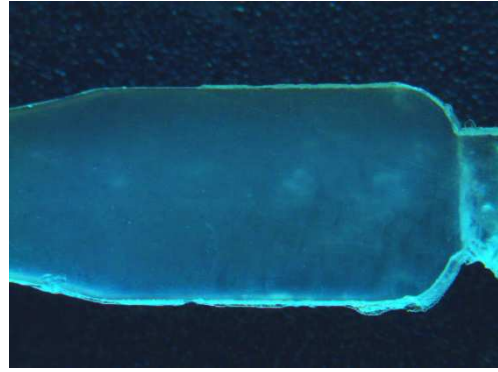
Imatge B.63



Imatge B.64

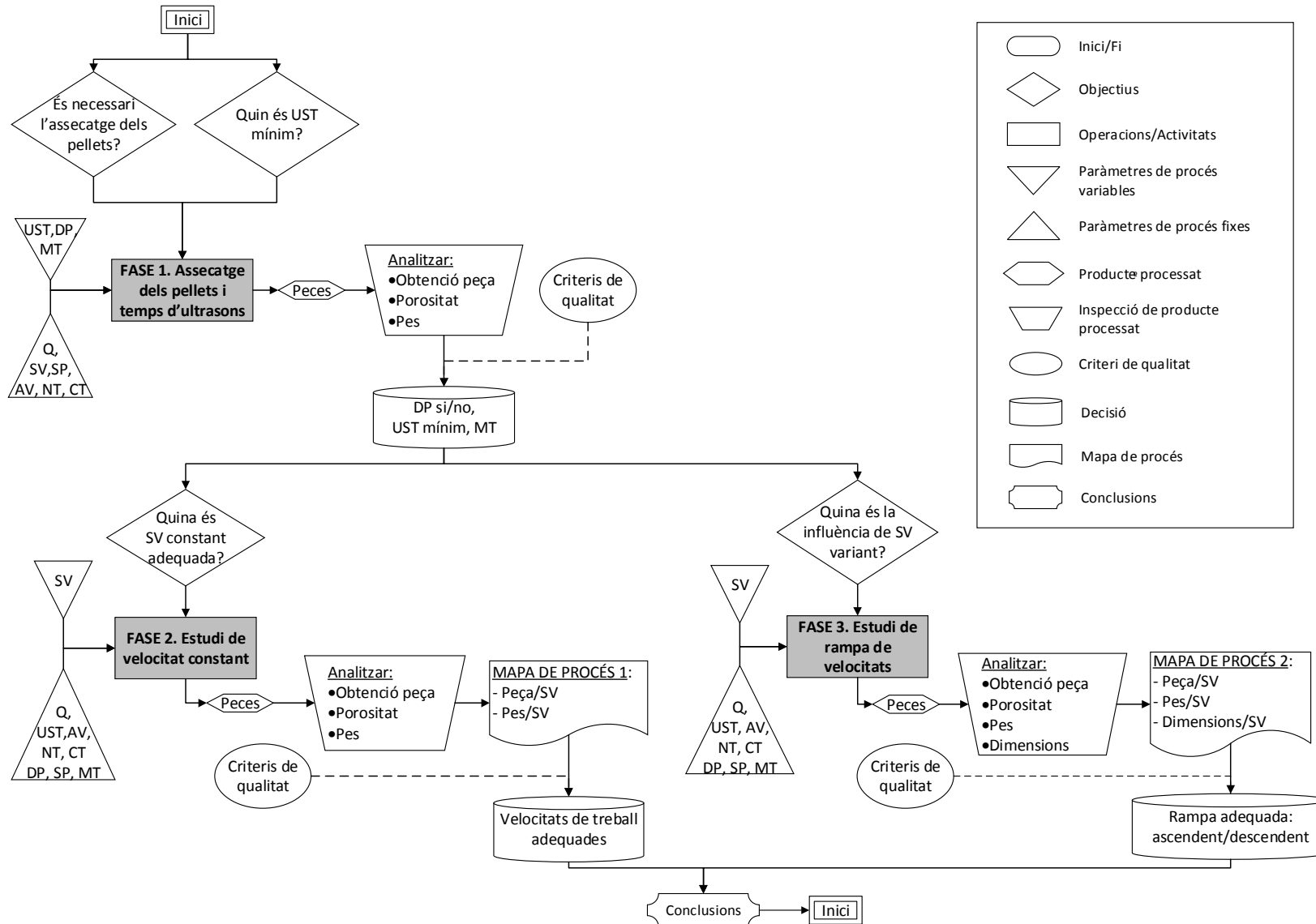


Imatge B.65



Imatge B.66

ANNEX C. DIAGRAMA DE PROCÉS



ANNEX D. EQUIPAMENT UTILITZAT**D.1. Màquina de mesura de coordenades Mitutoyo Crysta Apex 544.**

Aquesta màquina de mesura de coordenades es caracteritza per una estructura avançada per a alta exactitud i alta velocitat, a més d'un cost reduït i el fàcil maneig gràcies amb joystick per a l'eficiència de mesura. Les característiques tècniques més rellevants són:

- Correcció en temps real de la temperatura en l'interval de 16°C a 26°C.
- Rang de mesura 505x405x405mm.
- Resolució 0,1µm.
- Precisió 1,7µm.
- Consum d'aire de 50L/min.
- Màxima velocitat 520mm/s.

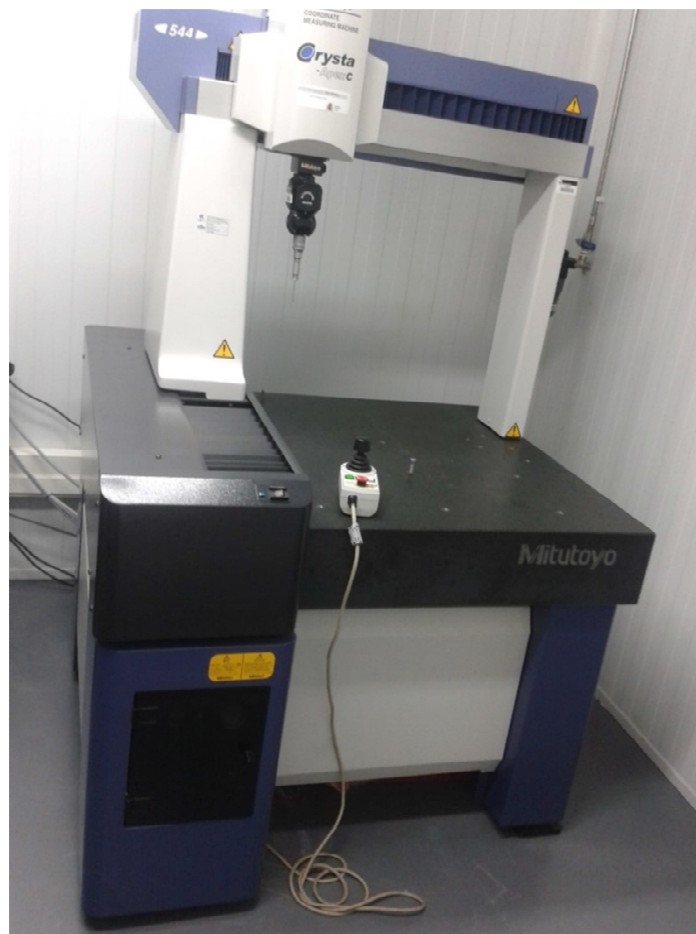


Figura D.1. Màquina de mesura de coordenades Mitutoyo Crysta Apex C544

D.2. Estereomicroscopi Nikon SMZ-745T

Es tracta d'un microscopi estèreo que resulta una molt bona solució per començar a treballar a nivell bàsic, ja que ofereix una distància de treball i una capacitat i rang de zoom ampli, a més de disposar d'un fototub de muntura C. Les característiques tècniques més rellevants són:

- Sistema òptic Greenough.
- Augment total entre 3,35 i 300x.
- Tub vertical amb lent d'augment 0,55x.
- Rang de zoom entre 0,67 i 5x.
- Relació de zoom 7,5:1.
- Distància de treball 115mm.



Figura D.2. Estereomicroscopi Nikon SMZ-745T

ANNEX E. PRESSUPOST

MATERIAL	Quantitat (g)	Preu unitari (€/g)	Preu total (€)
Pellets de polipropilè	70	0,005	0,35

MÀ D'OBRA	Hores (h)	Preu unitari (€/h)	Preu total (€)
Recopilació d'informació	15	6	90
Aprenentatge funcionament màquina	10	6	60
Experimentació SONORUS 1G	75	25	1875
Microscopi	75	10	750
Tractament de dades	25	12	300
Anàlisi de resultats	150	12	1800
Redacció del projecte	50	8	400

Material	0,35
Mà d'obra	5275,00
Suma	5275,35

Costos indirectes (15%)	791,30
-------------------------	--------

COST TOTAL 6.066,65 €