Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE FI DE CARRERA

TÍTOL: ESTUDI DELS PARÀMETRES D'EXTRUSIÓ EN PECES EXTRUÏDES EN ESTAT SEMISÒLID AMB ALIATGE CONVENCIONAL A357.

AUTOR: Iniesta Santacana, Aitor

TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica Industrial, Especialitat Mecànica.

DIRECTOR: Campillo Betbesé, Manel

DEPARTAMENT: Ciència dels materials i enginyeria metal·lúrgica

DATA: 27/06/2011

Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals: × Sí No

PROJECTE FI DE CARRERA

RESUM (màxim 50 línies)

Aquest projecte té com ha finalitat veure el comportament de la microestructura i de les propietats bàsiques en peces thixoextruïdes a partir d'un aliatge alumini de foneria. En el present projecte s'ha utilitzat el A357.0, provinent de colada per gravetat. En un aliatge de foneria amb una estructura totalment dendrítica, realitzar un procés d'extrusió en fred seria totalment inviable, ja que la força necessària per realitzar el procés de conformació seria massa elevada. La solució pot ser la conformació en estat semisòlid: la thixoextrusió. En estat semisòlid la resistència que oposa el lingot en el pas per la matriu és menor i permet realitzar el procés amb premses convencionals. Aquest procés també comporta avantatges davant l'extrusió en calent, tals com disminució de forces de fregament, augment de la vida útil de la matriu (menor xoc tèrmic) i augment de la fluïdesa del material. L'aliatge A357.0 és idoni per a processos de conformació en estat semisòlid degut a la seva gran àrea d'estat semisòlid en el diagrama d'equilibri que possibilita treballar amb un ampli rang de temperatures. En el procés de thixoextrusió es treballa amb un alt rang de fracció sòlida per a no tenir problemes de discontinuïtats de flux ($0,7<f_s<1$). En el cas del present projecte s'ha treballat amb dues temperatures 560ºC i 570ºC, amb uns valors de fracció sòlida de 0.96 i 0.87 respectivament. Un altre factor important que té la utilització d'un aliatge provinent de colada per gravetat en el procés de thixoextrusió és la reducció de costos, ja que s'elimina el procés previ de globulització del lingot emprat en la majoria de processos de SSM. El món de l'automoció s'espera que sigui la principal aplicació dels components obtinguts per aquest mètode, especialment en el cotxe elèctric, ja que aquest es caracteritzarà per la utilització de peces de gran lleugera i alhora amb bones propietats mecàniques.

Paraules clau (màxim 10):

Semisòlid	**Thixoextrusió**	**A357.0**	**Exxtrusió**
Alumini			

Resum

Aquest projecte té com ha finalitat veure el comportament de la microestructura i de les propietats bàsiques en peces thixoextruïdes a partir d'un aliatge alumini de foneria. En el present projecte s'ha utilitzat el A357.0, provinent de colada per gravetat. En un aliatge de foneria amb una estructura totalment dendrítica, realitzar un procés d'extrusió en fred seria totalment inviable, ja que la força necessària per realitzar el procés de conformació seria massa elevada. La solució pot ser la conformació en estat semisòlid: la thixoextrusió. En estat semisòlid la resistència que oposa el lingot en el pas per la matriu és menor i permet realitzar el procés amb premses convencionals. Aquest procés també comporta avantatges davant l'extrusió en calent, tals com disminució de forces de fregament, augment de la vida útil de la matriu (menor xoc tèrmic) i augment de la fluïdesa del material. L'aliatge A357.0 és idoni per a processos de conformació en estat semisòlid degut a la seva gran àrea d'estat semisòlid en el diagrama d'equilibri que possibilita treballar amb un ampli rang de temperatures. En el procés de thixoextrusió es treballa amb un alt rang de fracció sòlida per a no tenir problemes de discontinuïtats de flux ($0,7<f_s<1$). En el cas del present projecte s'ha treballat amb dues temperatures 560ºC i 570ºC, amb uns valors de fracció sòlida de 0.96 i 0.87 respectivament. Un altre factor important que té la utilització d'un aliatge provinent de colada per gravetat en el procés de thixoextrusió és la reducció de costos, ja que s'elimina el procés previ de globulització del lingot emprat en la majoria de processos de SSM. El món de l'automoció s'espera que sigui la principal aplicació dels components obtinguts per aquest mètode, especialment en el cotxe elèctric, ja que aquest es caracteritzarà per la utilització de peces de gran lleugera i alhora amb bones propietats mecàniques.

RESUM

ÍNDEX

1. GLOSSARI.....Pàg. 6

2. INTRODUCCIÓ. .....Pàg. 7
2.1. Objectius del projecte.....Pàg. 8
2.2. Motivació.....Pàg. 8

3. ESTAT DE L'ART.....Pàg. 9
3.1. L'Alumini.....Pàg. 9
3.1.1. Propietats del alumini.....Pàg. 9
3.1.1.1. Propietats físiques.....Pàg. 9
3.1.1.2. Propietats químiques.....Pàg. 9
3.1.1.3. Propietats mecàniques.....Pàg. 10
3.1.2. Aliatges d'alumini.....Pàg. 10
3.1.2.1. Elements d'aliatge.....Pàg. 10
3.1.2.2. Aliatges de forja.....Pàg. 11
3.1.2.3. Aliatges d'emmotllament.....Pàg. 12
3.1.2.3.1. Aliatge A357.0.....Pàg. 13
3.2. Conformació en estat semisòlid (SSM).....Pàg. 14
3.2.1. Introducció.....Pàg. 14
3.2.2. Obtenció de lingots amb creixement no-dendrític.....Pàg. 16
3.2.2.1. Processament des del líquid.....Pàg. 17
3.2.2.2. Processament des del sòlid.....Pàg. 18
3.2.3. Tècniques de conformació en estat semisòlid.....Pàg. 18
3.2.3.1. Injecció.....Pàg. 19
3.2.3.1.1. Thixocasting.....Pàg. 19
3.2.3.1.2. New Rheocasting (NRC).....Pàg. 20
3.2.3.1.3. Sub Liquidus Casting (SLC).....Pàg. 22
3.2.3.1.4. Semi-Solid Rheocasting (SSR).....Pàg. 23
3.2.3.2. Forja.....Pàg. 24
3.2.3.2.1. Thixoforging.....Pàg. 24
3.3. Extrusió.....Pàg. 25
3.3.1. Introducció.....Pàg. 25
3.3.2. El procés d'extrusió.....Pàg. 26
3.3.2.1. Tipus d'extrusió.....Pàg. 27
3.3.2.1.1. Extrusió directe.....Pàg. 27
3.3.2.1.2. Extrusió Indirecte.....Pàg. 27
3.3.2.1.3. Extrusió hidrostàtica.....Pàg. 28
3.3.3. Extrusió en calent.....Pàg. 29
3.3.4. Extrusió en fred.....Pàg. 30

3.3.5. Thixoextrusió....Pàg. 31
3.3.5.1. Càlcul de fracció de fase sòlida en el procés de thixoextrusió .Pàg. 32
3.3.5.2. Deformabilitat ....Pàg. 33
3.3.5.3. Forces d'extrusió ....Pàg. 34
3.3.5.4. Defectes d'extrusió....Pàg. 36

4. PROCEDIMENT EXPERIMENTAL ....Pàg. 37
4.1. Introducció ....Pàg. 37
4.2. Material utilitzat per la fabricació del component ....Pàg. 37
4.3. Procés de thixoextrusió ....Pàg. 38
4.3.1. Peces obtingudes....Pàg. 40
4.3.1.1. Peça nº1....Pàg. 40
4.3.1.2. Peça nº4....Pàg. 41
4.3.1.3. Peça nº11....Pàg. 41
4.3.1.4. Comparació entre les peces nº1,4 i 11 ....Pàg. 42
4.4. Preparació de mostres metal·logràfiques ....Pàg. 43
4.4.1. Tallat de peces ....Pàg. 43
4.4.2. Embotició ....Pàg. 44
4.4.3. Desbast i polit de provetes ....Pàg. 45
4.5. Observació de la microestructura ....Pàg. 46
4.6. Assaig de duresa Vickers ....Pàg. 47
5. RESULTATS EXPERIMENTALS....Pàg. 50
5.1. Assaigs de duresa Vickers....Pàg. 50
5.2. Efecte dels paràmetres d'extrusió en la duresa Vickers....Pàg. 51
5.2.1. Lingot A357 provinent de colada per gravetat ....Pàg. 51
5.2.2. Resultats de duresa peça nº1 ....Pàg. 51
5.2.3. Resultats de duresa peça nº4 ....Pàg. 59
5.2.4. Resultats de duresa peça nº11....Pàg. 66
5.3. Efecte dels paràmetres d'extrusió en la microestructura ....Pàg. 73
5.3.1. Nomenclatura utilitzada en les micrografies ....Pàg. 73
5.3.2. Micrografies Lingot A357 provinent de colada per gravetat ....Pàg. 74
5.3.3. Micrografies A357 escalfat a 570ºC ....Pàg. 75
5.3.4. Micrografies A357 escalfat a 560ºC....Pàg. 76
5.3.5. Micrografies de la peça thixoextruida nº1 ....Pàg. 78
5.3.6. Micrografies de la peça thixoextruida nº4 ....Pàg. 80
5.3.7. Micrografies de la peça thixoextruida nº11....Pàg. 82
5.4. Discontinuitats de flux ....Pàg. 84
5.4.1. Peça thixoextruida nº1 ....Pàg. 84
5.4.2. Peça thixoextruida nº4 ....Pàg. 85
5.4.3. Peça thixoextruida nº11....Pàg. 86

6. CONCLUSIONS....Pàg. 87
7. PERSPECTIVES....Pàg. 89

8. GESTIÓ MEDIAMBIENTAL.....Pàg. 91
9. PRESSUPOST.....Pàg. 93
10. AGRAÏMENTS..... Pàg. 95
11. BIBLIOGRAFIA.....Pàg. 97
12. ÍNDEX DE TAULES I GRÀFICS.....Pàg. 99

1. Glossari

SSM	Semi-Solid Metallurgy
SSTT	Semi-Solid Thermal Transformation
MHD	Magneto Hidrodinàmic Stirring
NRC	New Rheocasting
SLC	Sub Liquidus Casting
SSR	Semi-Solid Rheocasting

2. Introducció

Actualment, en aquests temps de crisi, la competitivitat a nivell industrial cada cop té més importància en els sectors com els de l'automoció o l'aeronàutica per exemple. La total globalització d'aquests mercats implica estar constantment en desenvolupament, ja que les necessitats de millora constants són el dia a dia de totes les empreses d'aquests sectors si volen ser competitives.

Per aquests motius, en els últims anys la investigació de components principalment d'alumini conformats en estat semisòlid ha estat molt present en el món de l'automoció i l'aeronàutica. Amb aquests processos es guanya en molts aspectes com pot ser la millora de les propietats mecàniques, reducció del defectes de fabricació i dels costos del procés.

Aquests avantatges juntament amb els aspectes positius del alumini en si, com la seva baixa densitat i l'alta resistència a la corrosió, fan que sigui molt interessant l'estudi d'aquests processos com alternativa dels tradicionals acers en moltes parts de l'estructura d'automòbils, naus, etc, disminuint el pes del vehicle aconseguim reduir el consum dels vehicles i per tant disminuïm les emissions contaminants dels mateixos.

Actualment, la investigació en la conformació en estat semisòlid s'ha concentrat en processos en els quals el principal objectiu era l'eficiència energètica del procés mantenint les prestacions del processos de SSM "convencionals". Aquests motius porten a la thixoextrusió a ser un dels processos de conformació en estat semisòlid amb més possibilitats i més interessant en el mon dels aliatges lleugers.

2.1 Objectius del projecte

El principal objectiu del present projecte és aconseguir utilitzar aliatges d'alumini de foneria per fer extrusions, per exemple l'aliatge A357.0, mitjançant la conformació en estat semisòlid, la thixoextrusió.

El propòsit és trobar l'efecte que tenen els paràmetres d'extrusió com la temperatura, la velocitat d'extrusió i/o la pressió d'extrusió, sobre les provetes thixoextruïdes i veure la influencia que tenen aquests sobre la microestructura de les peces obtingudes.

2.2 Motivació Personal

Durant els anys de carrera, he aprés tota mena de conceptes relacionats en el camp dels materials, trobo que és un dels tres pilars bàsics juntament amb el disseny i el càlcul que conformen la carrera d'enginyeria tècnica industrial mecànica.

El total coneixement dels materials alhora d'elaborar qualsevol disseny estructural és bàsic pel bon funcionament del producte.

Un fet que em va portar a l'elaboració d'aquest projecte va ser l'oportunitat de treballar conjuntament amb el Centre de Disseny d'Aliatges Lleugers i Tractaments de Superfície (CDAL). El CDAL és un centre de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) dedicat a la investigació aplicada i la transferència de tecnologia.

Resumidament va començar així el meu interès cap el món dels materials metàl·lics i em va ajudar a optar per elaborar el projecte final de carrera en aquest camp de l'enginyeria mecànica.

3. Estat de l'art

3.1 L'Alumini

L'alumini és un dels elements més utilitzats en el món de l'enginyeria. És l'element metàl·lic més abundant de l'escorça terrestre (8.13%). La seva principal virtut és la lleugeresa que el fa aplicable a tota l'industria del transport, automoció, aeronàutica i aeroespacial [1].

L'alumini en estat pur té una baixa resistència mecànica, per augmentar-la hi han varies vies ja sigui per mitjà d'elements d'aliatge o per treball en fred (acritud). No obstant aquests processos disminueixen la seva resistència a la corrosió.

3.1.1 Propietats del alumini

L'estructura cristal·lina de l'alumini és cúbica centrada en les cares (FCC), que implica una bona ductilitat a fins tot a temperatura ambient. Cal destacar també la seva autoprotecció contra la corrosió, ja que l'alumini amb contacte amb l'oxigen genera de manera natural una capa d'òxid no porosa i impermeable que el protegeix [1-2].

L'alumini no és tòxic i té una aplicació també molt important en el camp dels envasos alimentaris, un clar exemple és les llaunes de refresc.

3.1.1.1 Propietats físiques

L'alumini té un baix punt de fusió 660ºC, per tant és necessita molt poca energia per portar-lo a estat líquid, en contra, no pot ser utilitzat en tasques d'alta temperatura. Una baixa densitat 2,7 $g \cdot cm^{-3}$ que el fan imprescindible per la industria de l'automoció, ja que en comparació al ferro és 3 vegades més lleuger (7.9 $g \cdot cm^{-3}$) [3].

3.1.1.2 Propietats químiques

Com s'ha dit anteriorment l'estructura cristal·lina és FCC, fàcilment deformable. Negativament l'alumini no té transformacions de fase en estat sòlid a diferencia dels acers. És un excel·lent conductor elèctric (64 %IACS) i tèrmic 238 $W \cdot mK^{-1}$ només superat pel coure [3].

3.1.1.3 Propietats mecàniques

L'alumini té poca rigidesa E=70GPa i baixa resistència σ =80MPa, en comparació amb els acers, l'alumini és tres vegades inferior en rigidesa i resistència. Tot i que ho compensa amb una baixa densitat i una gran mal·leabilitat, aquests dos punts i la seva alta resistència a la corrosió fan que sigui un important metall des del punt de vista més enginyeril. Ja que com es descriurà a continuació l'alumini juntament amb alguns elements concrets d'aliatge pot millorar la seva resistència mecànica conservant la seva lleugeresa, mal·leabilitat i d'aquesta manera sent un excel·lent material en el món de l'enginyeria [3].

3.1.2 Aliatges d'alumini

Els aliatges d'alumini és poden classificar en dos grans grups, els aliatges de fundició i els aliatges de forja. Els aliatges de forja i fundició a més es poden subdividir en una altra important classificació com és si són tractables tèrmicament (enduribles per precipitació) o no tractables tèrmicament [4].

3.1.2.1 Elements d'aliatge

Els aliatges d'alumini estan formats majoritàriament per una sèrie d'elements que es poden classificar segons el tipus de millora que aporten a l'alumini. Aquests s'engloben en dos grups:

Elements d'aliatge que milloren la de resistència mecànica

Coure (Cu): Millora la resistència mecànica. Possibilita els tractaments tèrmics. Disminueix resistència a la corrosió[4].

Zinc (Zn): Possibilita els tractaments tèrmics i millora la resistència mecànica. Millora la resistència a la corrosió sota tensió. Disminueix la tenacitat a causa de l'augment de la rigidesa[4].

Magnesi (Mg): Presenta una excel·lent resistència a la corrosió. Té una bona soldabilitat. En combinació amb el silici, possibilita els tractaments i millora la resistència mecànica [4].

Elements d'aliatge que milloren la ductilitat i tenacitat. [4]

Silici (Si): Augmenta la col·labilitat i la resistència a la corrosió. Presenta bona resistència al desgast [4].

Manganès (Mn): Presenta bona forjabilitat.

3.1.2.2 Aliatges de forja

Els aliatges de forja estan subdividits per dos grups, aliatges que poden rebre tractament tèrmic i els que no en poden rebre tractament tèrmic.

Aliatges no tractables tèrmicament: Les sèries que conformen aquest grup són les 1xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx i 8xxx (Taula 3.1). L'enduriment d'aquest aliatges són per solució sòlida dels elements que conformen l'aliatge. Són aliatges que contenen elements molt solubles i milloren la resistència mecànica per solució sòlida i deformació [5].

Aliatges tractables tèrmicament: Les sèries que conformen aquest grup són les 2xxx, 6xxx i 7xxx, (Taula 3.1). Aquest tipus d'aliatges contenen elements que poden romandre en solució sòlida a altes temperatures i precipitar a baixes temperatures formant compostos coherents amb l'alumini. Aquests precipitats coherents endureixen els material a causa del bloqueig de dislocacions que ofereixen. Segons el seu tamany, forma i distribució donaran millors propietats mecàniques a l'aliatge. Amb el tractament tèrmic s'obté per mitjà de l'envelliment la millora de la resistència mecànica [5].

Taula 3.1 Principals aliatges de forja**:**

Element majoritari d'aliatge	**Sèrie**
Alumini 99%	1xxx
Coure	2xxx
Manganès	3xxx
Silici	4xxx
Magnesi	5xxx
Magnesi i Silici	6xxx
Zinc i Magnesi	7xxx
Altres elements	8xxx
Series no usuals	9xxx

3.1.2.3 Aliatges d'emmotllament

Els aliatges d'emmotllament es caracteritzen per la seva excel·lent col·labilitat i fluïdesa. Tenen bona resistència a la corrosió i també una gran ductilitat. Tenen una bona resistència mecànica però és inferior a les dels aliatges de forja.

L'element més utilitzat i majoritari dels aliatges d'emmotllament és sens dubte el silici. Aquest element com s'ha dit anteriorment, dóna una excel·lent col·labilitat i fluïdesa a l'alumini en un interval del (5%-12%). Aquestes característiques permeten l'obtenció de peces d'alumini en qualsevol tipus de motlle.

La classificació d'aliatges d'alumini d'emmotllament, on es classifica l'aliatge segons l'element majoritari. A la taula 3.2 es poden veure els principals aliatges d'emmotllament [4].

Taula 3.2 Principal d'aliatges d'emmotllament**:**

Element majoritari d'aliatge	**Sèrie**
Alumini 99%	1xx.x
Coure	2xx.x
Silici amb Cu i/o Mg	3xx.x
Silici	4xx.x
Magnesi	5xx.x
Zinc	7xx.x
Estany	8xx.x
Altres elements	9xx.x
Series no usuals	6xx.x

3.1.2.3.1 Aliatge A357.0

L'aliatge A357.0 forma part de la sèrie 3xx.x, són aliatges Alumini-Silici amb Magnesi (Taula 3.3). Aquest es caracteritza per ser un aliatge tractable tèrmicament, amb una excel·lent col·labilitat i amb una gran resistència mecànica.

Les principals formes de conformació de peces són per mitjà de la fundició a pressió i de processos en estat semisòlid.

Una de les aplicacions d'aquest aliatge són la parts crítiques de les aeronaus i altres usos en l'automoció on es necessiti una combinació de soldabilitat i col·labilitat amb una bona resistència i duresa.

Taula 3.3. Composició química teórica de l'aliatge A357.0 en % en pes. [6]

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
Base	6.50-7.50	0.20 màx	0.20 màx	0.10 màx	0.40-0.70	0.10 màx	0.20

Taula 3.4 Composició química experimental de l'aliatge A357.0 en % en pes. [7]

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
Base	6.760	0.143	0.001	0.005	0.481	<0.001	0.123

3.2 Conformació per estat semisòlid

3.2.1 Introducció

La conformació de materials en estat semisòlid es pot considerar com un procés intermedi entre la conformació per moldeig i per forja. En el camp de l'alumini, la conformació d'aliatges en estat semisòlid és un procés híbrid que incorpora elements de diverses tècniques de conformat. Les raons bàsiques del seu ús és la llibertat en el disseny del motlle, la velocitat de producció i millors propietats mecàniques respecte a la forja i sobretot a la injecció. Es poden arribar a obtenir peces amb parets d'1 mm d'espessor [8].

Un gran avantatge d'aquesta tècnica és la possibilitat d'obtenir components nous amb un nombre de defectes inferior i amb un cost menor. Això es deu a la coexistència d'una fase líquida i una altra fase sòlida esferoïdal [8].

El procés d'obtenció de materials en estat semisòlid és relativament nou. A l'any 1972 es descobreix accidentalment els principis de la conformació en estat semisòlid. S'observa que un material a una temperatura que el manté en estat semisòlid (40% líquid), la viscositat d'aquest decreix amb la velocitat de deformació, depenent de les condicions d'agitació del material. La viscositat augmenta amb el increment de la fase sòlida i disminueix amb la esferoiditització. L'estructura que resulta està formada per partícules globulars disperses en una matriu de líquid proper a la composició eutèctica [8].

L'estudi va consistir en l'ús d'un viscosímetre de tipus Couette i un aliatge Sn-15% Pb. El viscosímetre en qüestió consta de dos cilindres concèntrics. El cilindre exterior efectua un moviment rotacional que pot anar de 0'4 a 1000 rpm [9]. L'aliatge s'aboca en estat líquid en l'espai que hi ha entre els dos cilindres. El cilindre exterior gira i genera forces de cisalla. Posteriorment, es deixa refredar. Es va estudiar la viscositat de l'aliatge en funció de la quantitat de sòlid i en funció de la velocitat d'agitació. Aquest experiment va portar a la conclusió que la viscositat del material disminueix en augmentar les forces de cisalla aplicades sobre aquest (relacionada amb la velocitat d'agitació), que és atribuïda a l'estructura globular aconseguida durant l'experiment. Alhora, es va demostrar que la viscositat augmenta en incrementar la fracció de sòlid [8].

Posteriorment, es va dur a terme un estudi més concret que va concloure que la viscositat del material depenia també de la velocitat de refredament. És a dir, per a baixes velocitats de refredament i altes velocitats d'agitació disminueixen la viscositat. Encara que també es va observar que amb altes velocitats inicials s'obtenen viscositats menors.

No obstant això, fins a 1990 no es pren consciència del veritable potencial d'aquestes propietats. El comportament semisòlid permet treballar amb un lingot que manté la seva forma i, a més, si se li apliquen forces de cisalla, es deforma. Es pot comparar el seu comportament amb greixos animals, per exemple.

L'ús directe d'un aliatge sotmès a velocitats de cisalla per obtenir una peça o un lingot es diu Rheocasting. En existir una reversibilitat de les propietats, el lingot es pot tornar a escalfar fins a una temperatura adequada per tornar a recuperar-les.

Per aquesta raó, un aliatge solidificat pot escalfar-se fins a l'estat semisòlid i conformar-se mitjançant forja. A això se li denomina Thixoforging.

A més, també pot reescalfar-se i conformar-se mitjançant injecció (Figura. 3.1**)**. Això se li denomina Thixocasting [10].

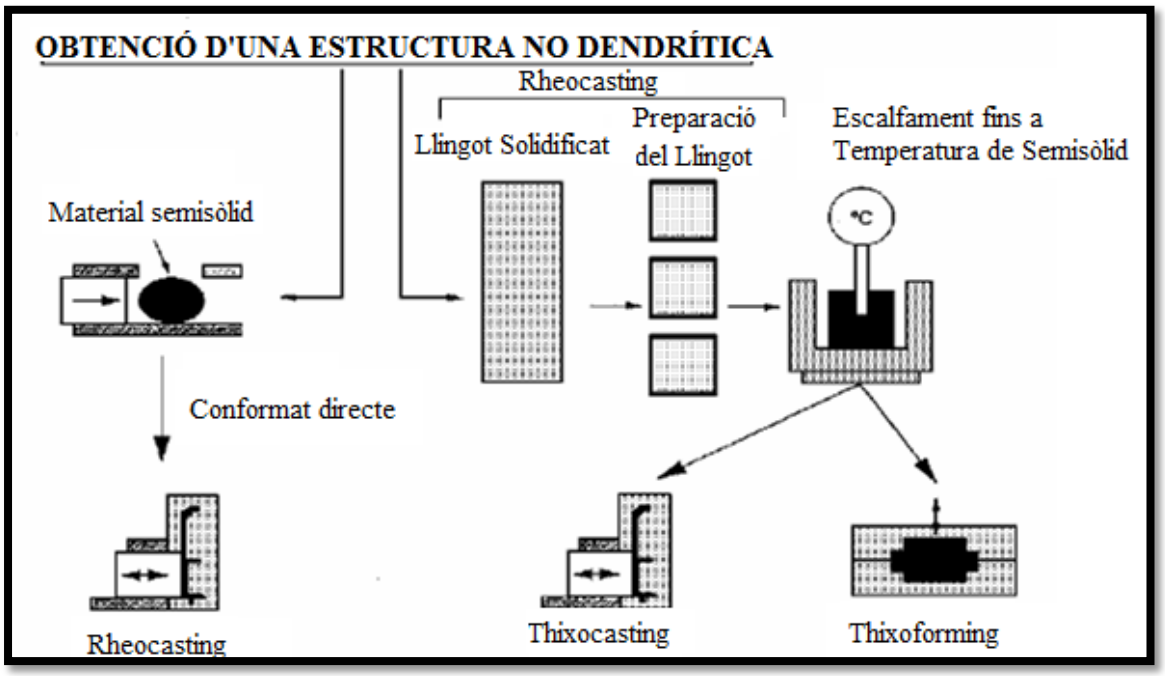


Figura 3.1 Esquema dels processos de Thixoforming [8]

3.2.2 Obtenció de lingots amb creixement no-dendrític

Per a l'obtenció de lingots amb creixement no dendrític existeixen diversos processos d'obtenció del mateix, aquests processos es basen en quatre mètodes:

El primer mètode consisteix en l'agitació mecànica, electromagnètica, o mitjançant ones supersòniques durant la solidificació. El problema de les ones supersòniques és el creixement no desitjat del gra [8].

El segon mètode es basa en la refusió parcial d'aliatges deformats o obtinguts per *spray compaction*. El principal problema d'aquest mètode és l'alt cost que suposa i que a més en el reescalfament per la refusió dels aliatges s'obté una grandària de gra considerablement gran [8].

El tercer mètode es centra en un refredament molt controlat, a mesura que solidifica. El que provoca una gran pujada de costos a causa de la tecnologia de control de temperatura, com per exemple Sub-Liquidus Casting (SLC) [8].

El quart mètode consisteix en l'aplicació d'una deformació en fred del material convencional i en aquest en l'escalfament per assolir l'estat semisòlid recristal·litza, i posteriorment se'l pot conformar per un procés de forja en estat semisòlid.

També es poden obtenir estructures globulars utilitzant una sèrie d'additius. Afegint materials globulitzants i afinadors de grà en el caldo (Ti-B) podem obtenir aquestes estructures no dendrítiques sense necessitat d'aplicar esforços per donar lloc a la nucleació[8].

Per a l'obtenció del lingot amb un creixement no dendrític tenim dos camins, partint del líquid o partint del sòlid.

3.2.2.1 Processament des del líquid

Partint de l'obtenció de lingots a partir de l'agitació del líquid es pot parlar de tres processos principalment:

El primer procés consisteix en l'agitació mecànica del líquid a mesura que es va refredant. És convenien que l'atmosfera en la qual es treballi sigui inerta o fins i tot es treballi al buit, d'aquesta manera reduirem notablement aire atrapat en la solidificació, sobretot s'ha de tenir en compte amb aliatges de magnesi.

En el segon procés entra en ús la maquina de rheofusió contínua. El principal avantatge d'aquest mètode és que l'elevada velocitat de refredament permet obtenir una grandària de gra fi.

El tercer mètode sorgeix com a alternativa al procés d'agitació mecànica. Aquest es caracteritza per sofrir una agitació electromagnètica energètica de la fosa en el procés de solidificació. Permet tractar aliatges d'alt punt de fusió. Ja que l'únic contacte directe que existeix és entre líquid i recipient.

El mètode més conegut d'agitació electromagnètica és el MHD (magneto hidrodinàmic Stirring). S'aconsegueix una gran cisalla mitjançant un camp de rotació electromagnètic en un motlle. El líquid ha estat prèviament filtrat i desgasificat per reduir la seva contaminació. Aquesta agitació es centra en el fons del recipient el que ens produirà una microestructura de gra fi, uniformement distribuït. La transmissió de calor a través de les parets del motlle del líquid es controla gràcies a una "carcassa d'aigua" externa que produeix una adequada refrigeració, disminuint la fatiga tèrmica del motlle. D'aquesta manera es produiran lingots de forma contínua d'alumini-silici adequats per thixoforging [8].

3.2.2.2 Processament des del sòlid

El mètode més usual en parlar de processament del sòlid és Straid Induced Melt Activated (SIMA). Partint de la colada contínua, aquesta s'extrueix en calent. Just després se li aplica un procés de deformació en fred, creant moltes dislocacions, la qual cosa provoca que l'estructura dendrítica passa a ser a globular quan reescalfem la peça fins a la temperatura de recristal·lització El temps que ha de romandre en aquesta temperatura serà el suficient perquè tota l'estructura sigui uniformement globular. Aquest escalfament implica que la mida de grà serà gran, aquest és el principal inconvenient d'aquest mètode, amb la qual cosa només s'usa amb diàmetres petits[8].

Un altre procés similar és el Semi-Solid Thermal Transformation (SSTT) que solament amb l'escalfament de l'estructura dendrítica fins a l'interval de la fase alfa+líquid (zona semisòlida), jugant amb el temps en que la peça està en aquesta isoterma, es pot aconseguir mitjançant la maduració de Oswald, que els grans creixin i siguin esferoïdals. Afegint additius afinants de grà com per exemple el Bor o el Titani, ajudaran a la nucleació en el procés de recristal·lització obtenim grans globalitzats més fins [8].

3.2.3 Tècniques de conformació en estat semisòlid

El Thixoforming consisteix a donar-li forma a una peça quan el material es troba en estat pastós. Si es realitza mitjançant màquines d'injecció es denomina Thixocasting. Si, en comptes de per injecció, es dóna forma al material amb una matriu es denomina Thixoforging. Tal i com es mostra en la Figura 3.2.

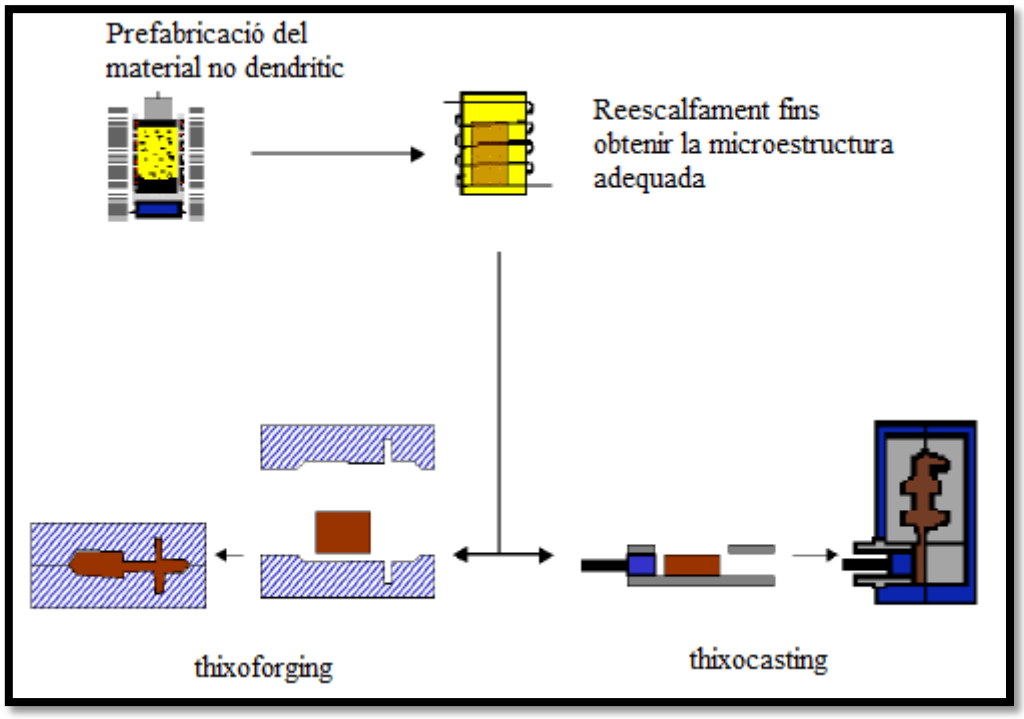


Figura 3.2 Esquema del procés thixoforging envers thixocasting [8]

3.2.3.1 Injecció

3.2.3.1.1 Thixocasting

El thixocasting es realitza amb lingots de Rheocasting, que s'escalfen fins a la temperatura de semisòlid, sota control de computadora. Posteriorment són transportats per un autòmat per a la seva injecció i la seva posterior extracció.

D'aquesta manera s'elimina el procés de fusió, evitant contaminació atmosfèrica. La temperatura de treball és inferior a la línia líquidus. Al treballar a temperatures inferiors obtenim molts avantatges com és la disminució de defectes com a impureses i escòries. Al tenir un gradient de temperatures inferior la vida útil del motlle augmenta al no haver-hi contraccions ni xocs tèrmics.

Aquest procés té com a principal inconvenient l'alt cost del lingot de Rheocasting i del forn d'inducció per el reescalfament del lingot. També tenim restriccions en la composició de l'aliatge.

La microestructura de l'aliatge conformat per Thixocasting consisteix en glòbuls de fase α, envoltats d'un eutèctic molt fi. A l'interior dels grans α es distingeixen illes de eutèctic de dos tipus: unes amb aparença molt similar al eutèctic que envolta la fase alfa i altres formades per un eutèctic encara més fi (Figura 3.3).

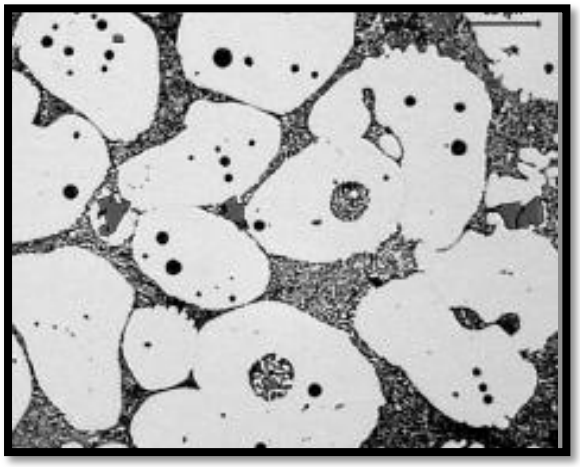


Figura 3.3 Microestructura d'un aliatge conformat per Thixocasting [8]

3.2.3.1.2 New Rheocasting (NRC)

Aquest procés va ser molt important en la producció de components en la industria actual. Ja que a diferència del thixocasting aquest procés no té la necessitat de comprar lingots fora del procés. Aquest fet provoca una millor competitivitat ja que s'aprofita també tot el material sobrant per fer un reciclatge "in situ".

El material, en estat líquid, es passa a un gresol on mitjançant una refrigeració per fluxos d'aire uniformement distribuïts es refreda de manera controlada. La estructura globular s'aconsegueix en aquest procés mitjançant un exhaustiu control de la temperatura (Figura 3.4). Quan s'arriba a la temperatura del interval semisòlid, el material es solidifica. Posteriorment, un forn d'inducció escalfa i homogeneïtza tota la peça a temperatura de conformat (estat semisòlid). Aquest material pastos s'injecta en el motlle (Figura 3.5).

L'omplerta del motlle es fa verticalment de avall cap amunt y molt lentament (de 1-5m·s^{-1} a l'atac) per evitar retenir aire atrapat.

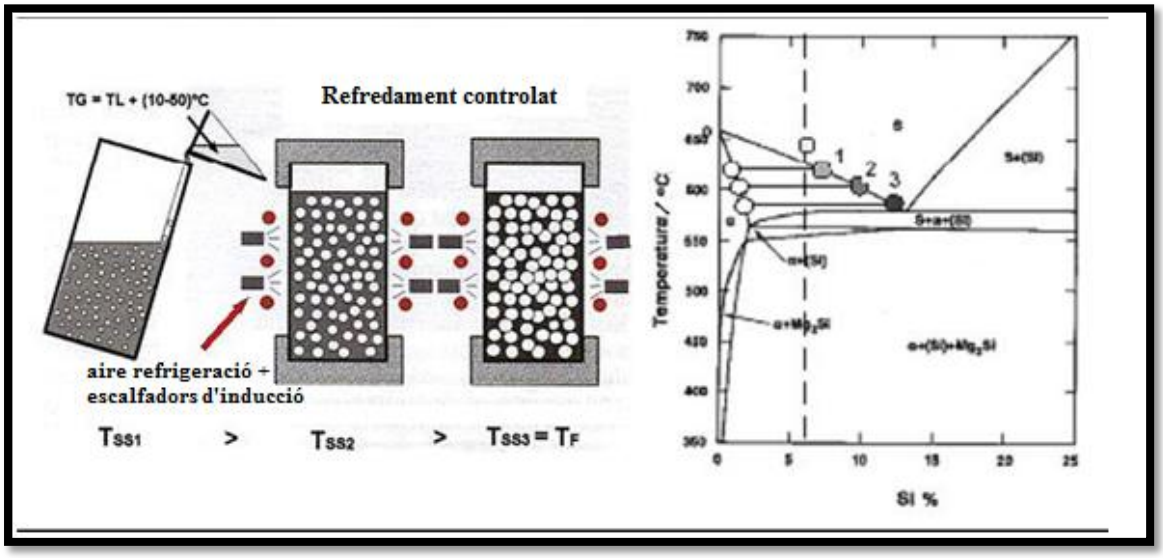


Figura 3.4 Procés del control de temperatura per aconseguir l'estructura no dendrítica [8].

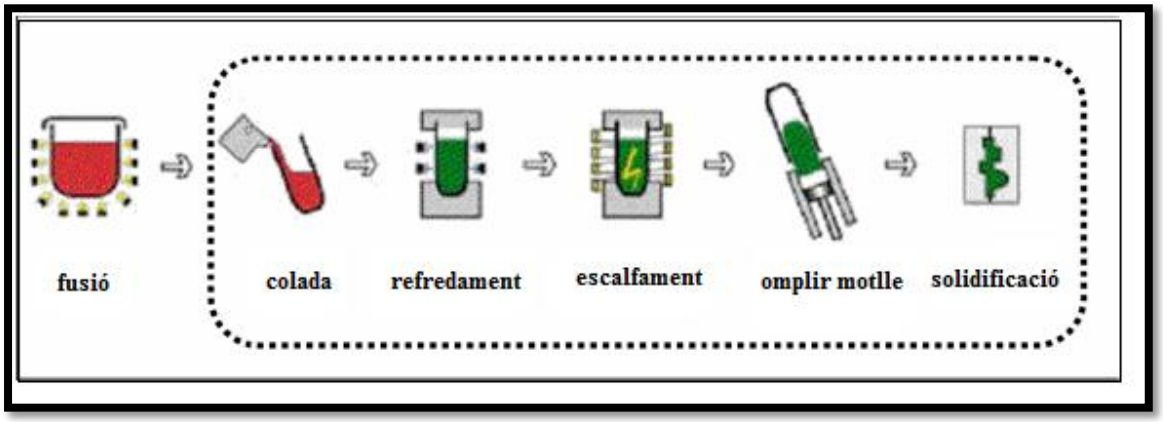


Figura 3.5 Procés Rheocasting des de la fusió del liquido fins la injecció. [8]

3.2.3.1.3 Sub Liquidus Casting (SLC)

El procés Sub Liquidus Casting (SLC) es va desenvolupar als Estats Units l'any 2001.

El material entra directament a la màquina després de sortir del forn de fusió. El material en estat líquid s'introdueix al contenidor de la màquina. Mitjançant afinants de grà com Bor i Titani i mitjançant un rigorós control de temperatures com en el NRC, obtenim el material amb estructura globular en estat semisòlid. Aquest serà injectat per la màquina en el motlle a una temperatura dins del interval d'estat semisòlid [11].

La màquina utilitza un pistó d'injecció de baix recorregut y gran diàmetre. Aquestes característiques ens ajudaran a obtenir una major productivitat i un control més acurat de les temperatures i dels temps refredament . També es redueix la velocitat d'injecció de material per tal de reduir la porositat de la peça (Figura 3.6).

Amb aquests mètodes aconseguim unes bones propietats mecàniques amb microestructures de grans globulars del ordre de 75 a 25 micres.

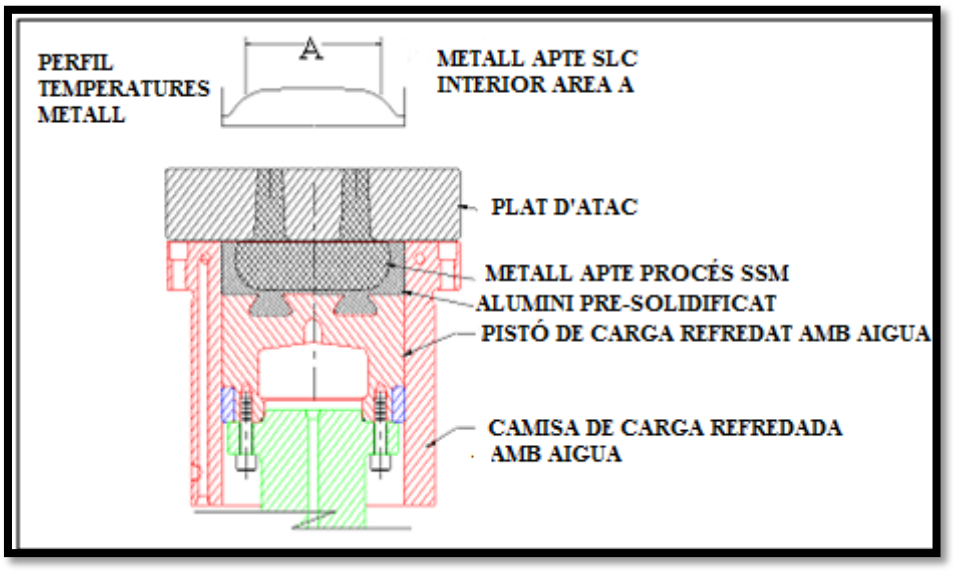


Figura 3.6 Procés Sub Liquidus Casting. [8]

3.2.3.1.4 Semi-Solid Rheocasting (SSR)

El mètode de Semi-Solid Rheocasting (SSR) es pot descriure en tres etapes principals:

- Pas 1: L'alumini en estat líquid es manté per sobre de la temperatura de fusió (líquidus).
- Pas 2: Una barra de refrigeració de grafit s'introdueix en el caldo i el refreda agitant-se a una temperatura inferior a la líquidus. La barra es manté en el caldo durant intervals de temps molt curts, i la velocitat d'agitació no ha de superar les 60 rpm. La part més crítica del procés està en l'obtenció del primer 1% en volum de fracció sòlida no dendrítica i és necessari un curós control de la velocitat de refredament durant l'agitació.
- Pas 3: Després del període d'agitació s'extreu la barra de grafit deixant un caldo que conté baixes proporcions de fracció sòlida (<20%) i s'introdueix en la màquina d'injecció (Figura 3.17) [11-12].

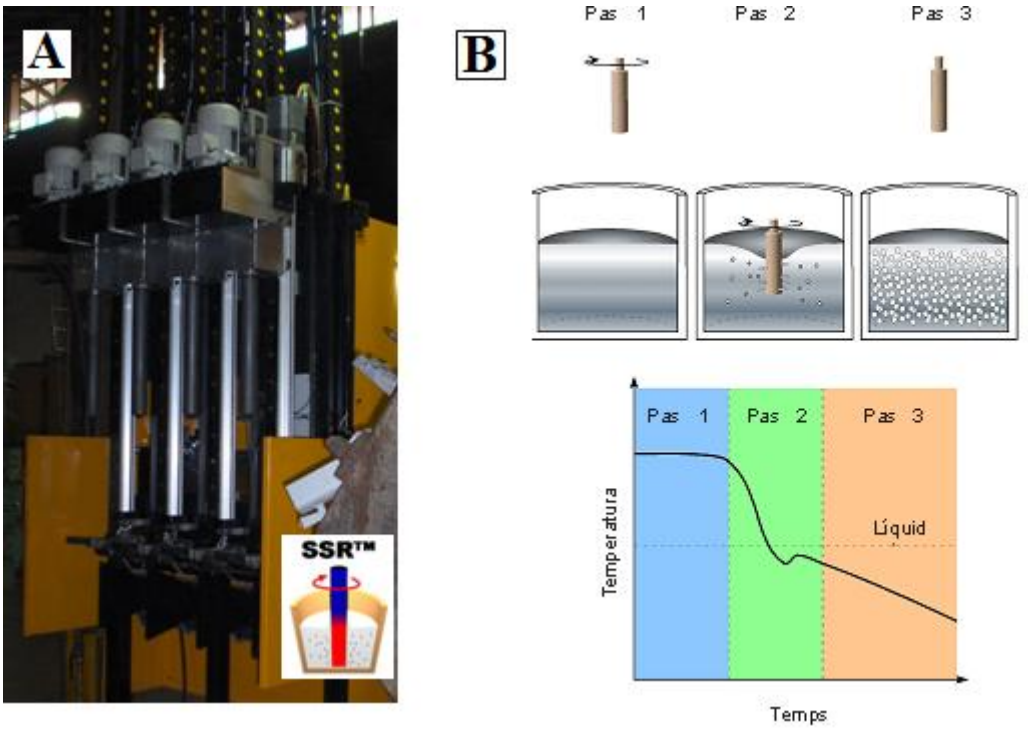


Figura 3.7 **A)** Estació IDRA per SSR. **B)** Esquema del procés SSR.[11]

3.2.3.2 Forja

3.2.3.2.1 Thixoforging:

Els lingots utilitzats pel Thixoforging han sigut preparats per tenir ja una estructura globular. Aquests es reescalfen per aconseguir l'estat semisòlid i se sotmeten a pressions des de 10 a 100 MPa, la qual cosa impedeix l'existència de porositats, fissures, etc. S'utilitzen aliatges de les sèries 2xxx, 6xxx i 7xxx. [8].

Es pot reduir l'oxidació del material mitjançant Thixoforging en càmera al buit o Thixoforging en atmosfera controlada.

També s'han dissenyat màquines que permeten injectar perfils d'aliatge parcialment fos dins de matrius tancades. El disseny incorpora una càmera calenta que permet la fusió parcial de l'aliatge. S'utilitza per obtenir condicions òptimes en la producció (Figura 3.8).

El principal avantatge del Thixoforging davant el Thixocasting és la utilització d'aliatges amb un elevat punt de fusió.

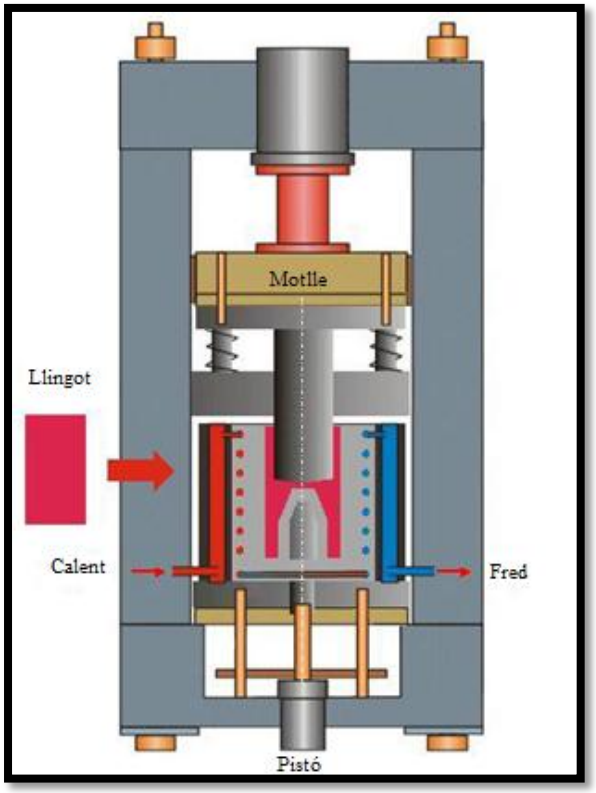


Figura 3.8 Procés de Thixoforging. [8]

3.3 Extrusió

3.3.1 Introducció

Els productes extruïts representen més del 50% del mercat europeu de productes d'alumini; d'aquest percentatge, el sector de l'edificació n'utilitza la major part [13].

L'alumini extruït es fa servir en els sistemes de perfils de finestres i portes en edificis residencials i comercials, en estructures d'habitatges i edificis prefabricats, en materials per a teulades i revestiments exteriors, façanes de locals comercials, etc. A més, l'alumini extruït s'usa també en el transport de càrregues, en fuselatges d'avions, vehicles de carretera i ferrocarrils, i per a aplicacions marines.

El terme "extrusió" sol aplicar-se tant al procés com al producte obtingut quan un lingot cilíndric calent d'alumini passa a través d'una matriu amb la forma adequada (extrusió directa) (Figura 3.9). El perfil resultant pot utilitzar-se en trams llargs, o es pot tallar per fer-se servir en estructures, vehicles o components. L'extrusió també s'utilitza com a matèria primera per a barres mecanitzades, productes de forja o d'extrusió en fred [13].

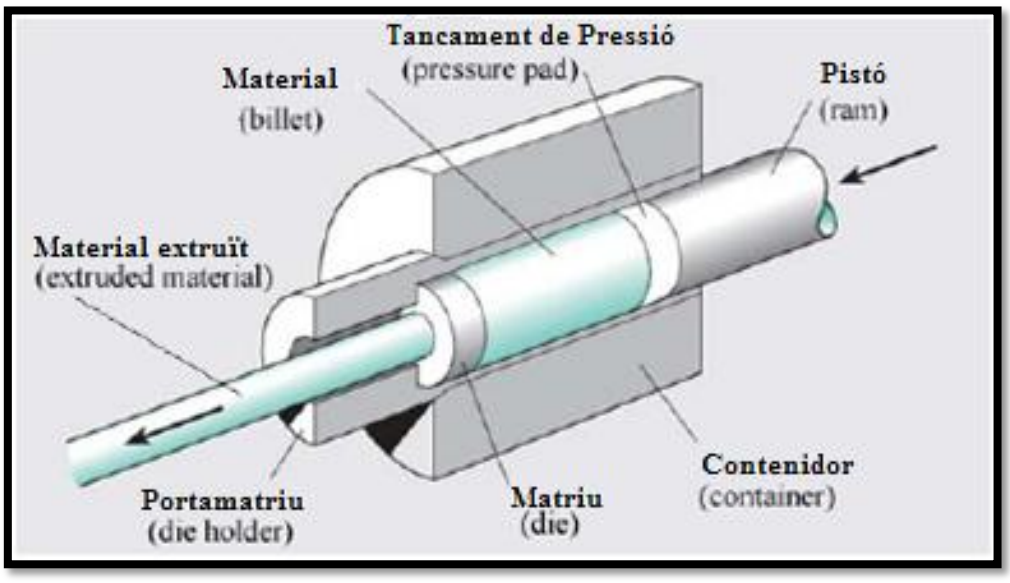


Figura 3.9 Esquema del procés d'extrusió [13].

3.3.2 El procés d'extrusió

Un lingot calent s'allotja dins d'un contenidor calent, normalment entre 450 ºC i 500 ºC. En aquestes temperatures, la tensió de flux dels aliatges d'alumini és molt baixa, i aplicant pressió per mitjà d'un pistó hidràulic el metall flueix a través d'una matriu d'acer situada en l'altre extrem del contenidor. Aquest procés dóna, com a resultat, un perfil la secció transversal del qual ve definida per la forma de la matriu [13].

Tots els aliatges d'alumini poden ser extruïts, però alguns són menys adequades que altres, ja que exigeixen pressions més grans i permeten només velocitats baixes d'extrusió. El terme "extrusionabilitat" s'utilitza per englobar tots aquests temes, amb l'alumini pur en un costat de l'escala, i els forts aliatges d'Alumini-Zinc-Magnesi-Cobre en l'altre. Els aliatges formats per Alumini-Magnesi-Silici ocupen la major part del mercat de l'extrusió.

Aquest grup d'aliatges té una molt bona combinació de propietats, tant des del punt de vista de la producció, com del seu ús, i han estat objecte d'una gran quantitat de projectes de I+D en nombrosos països. Com a resultats s'han obtingut un conjunt de materials, amb una resistència entre 150 MPa i 350 MPa, i tots amb bona duresa. Aquest grup d'aliatges es poden extrusionar amb facilitat, poden arribar a altes velocitats d'extrusió, fins a 100 metres per minut, amb un bon acabat de superfície, aptitud pel anoditzat i una complexitat màxima del perfil transversal amb un mínim espessor de paret. La potència de les premses varia des de 200 tones fins a 20.000 tones, encara que la majoria estan en el rang comprès entre 1.000 tones i 3.000 tones [13] .

La facilitat amb que els aliatges d'alumini poden ser extruïts en formes complexes fa permetre al dissenyador "posar el metall just on fa falta", un requisit important quan es parla d'una material relativament car. És més, aquesta flexibilitat en el disseny fa que sigui fàcil, en molts casos, superar el fet que l'alumini i els seus aliatges només tenen un terç del mòdul elàstic de l'acer. Atès que la rigidesa depèn no només del mòdul elàstic sinó també de la geometria del perfil, és possible, augmentant 1,5 vegades el grossor d'una biga de alumini respecte a la d'acer que pretén reemplaçar, obtenir la mateixa rigidesa de l'acer amb la meitat de pes.

3.3.2.1 Tipus d'extrusió

3.3.2.1.1 Extrusió directe:

L'extrusió directe és el procés d'extrusió més utilitzat i més comú. Aquest treballa col·locant el material en un contenidor reforçat i a través d'un pistó apliquem força al material per obligar-lo a passar a través de la matriu col·locada a l'altre extrem del contenidor per donar-li la forma de la matriu. El desavantatge més gran es la pressió extra que tenim que fer per vèncer la fricció del contenidor **(Figura 3.10)**.

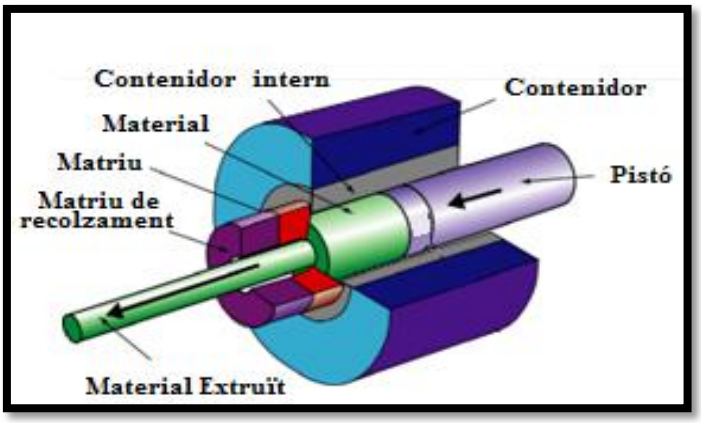


Figura 3.10 Esquema del procés d'extrusió directe [14].

3.3.2.1.2 Extrusió indirecte:

L'extrusió indirecte es desenvolupa a partir del principal problema que té l'extrusió directe, que és l'energia perduda en forma de calor que es produeix amb la fregament del material a deformar i el contenidor. En aquest procés s'obté una reducció del 25% d'aquesta força de fregament. Això s'aconsegueix eliminant el moviment relatiu entre material i el contenidor, ja que tenim la matriu i el pistó en l'extrem contrari que en l'extrusió directa. Per tant, fent penetrar el pistó sobre l'alumini, aquest flueix a en l'única direcció de sortida que és la oposada al moviment del pistó a través de la matriu (Figura 3.13). En l'extrusió indirecte podem obtenir perfils massissos i perfils buits tal i com es veu en l'esquema de la Figura 3.11 i la Figura 3.12 respectivament.

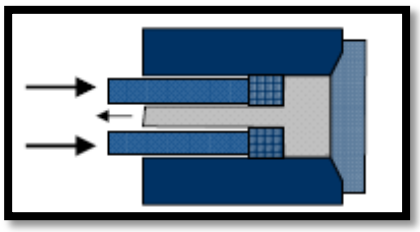


Figura 3.11 Extrusió indirecte (massís)[14]

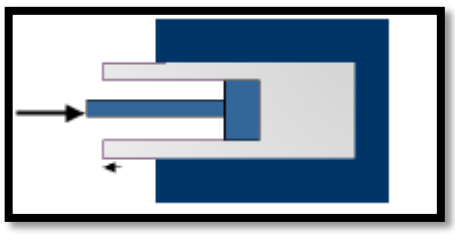


Figura 3.12 Extrusió indirecte (buit). [14]

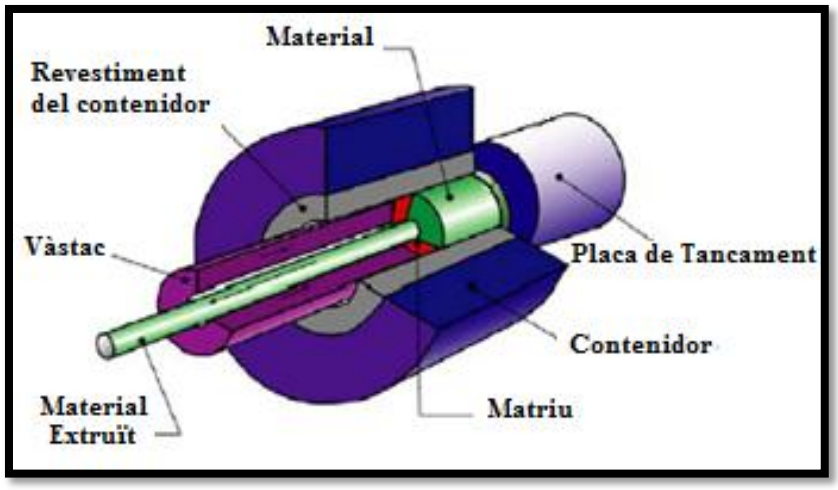


Figura 3.13 Esquema del procés d'extrusió indirecte [14].

3.3.2.1.3 Extrusió hidrostàtica:

L'extrusió hidrostàtica és caracteritza perquè el lingot està rodejat completament per un líquid a alta pressió. Aquest procés es pot utilitzar en fred o calent però sempre tenint en compte la viscositat i les característiques del fluid en aquella temperatura. El pistó és l'encarregat de pressuritzar el fluid, aquesta elevada pressió del fluid obliga al lingot a passar a través de la matriu obtenint d'aquesta manera la forma desitjada (Figura 3.14).

La principal virtut d'aquest procés comporta que no hi hagi pressió entre el contenidor i el material, reduint notablement la força d'extrusió. En contra, el contenidor té que aguantar les grans pressions que comporta aguantar un líquid altament pressuritzat.

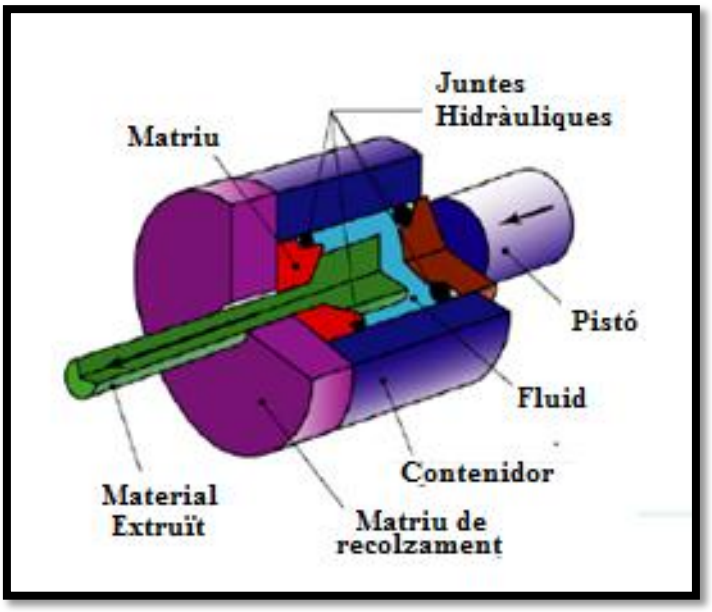


Figura 3.14 Esquema del procés d'extrusió hidrostàtica [14].

3.3.3 Extrusió en calent

La extrusió en calent es desenvolupa principalment per tal de reduir els esforços del material quan es sotmet a passar a través de la matriu. Al augmentar la temperatura augmenta la deformabilitat i es disminueix notablement el treball i la força necessària per fer passar el material per la matriu. La majoria de les extrusions en calent es realitzant en premses hidràuliques horitzontals amb un rang de força de 250 a 12000 tones [15] .

La energia del procés destinada a l'escalfament del material en un rang de temperatures determinat (Taula 3.5) i el cost de la maquinària seguit del creixement de grà a causa de la recristal·lització del material són el principals inconvenients d'aquest procés [15] .

La temperatura en procés d'extrusió en calent ha de ser superior a la temperatura de recristal·lització del material. D'aquesta manera les dislocacions causades en el procés ajudaran a la nucleació, formant una matriu de grans equiaxials. La temperatura de recristal·lització normalment és el 40% de la temperatura de fusió del material. En el cas de l'aliatge utilitzat en el present projecte, A357, al tenir una temperatura de fusió de 613ºC la temperatura d'extrusió hauria de ser superior 250ºC (temperatura de recristal·lització) [16].

Taula 3.5. Rang de temperatures del principals materials metàl·lics en el procés d'extrusió en calent [16].

Material	Temperatura (Cº)
Magnesi	350-450
Alumini	350-500
Coure	600-1100
Titani	700-1200
Acer	1200-1300

3.3.4 Extrusió en fred

La extrusió en fred es realitza a una temperatura inferior a la temperatura de recristal·lització, ja que d'aquesta manera és manté l'alt estat de tensió intern causat pel procés d'extrusió en fred. En el cas del aliatge emprat en el present projecte, A357, el rang de temperatura adequat seria inferior a 250ºC (temperatura de recristal·lització).

Els avantatges de l'extrusió en fred davant l'extrusió en calent és la major resistència mecànica del material degut a l'acritud, la falta d'oxidació, un millor acabat superficial i un grau de tolerància més petit.

Negativament es necessita més força del pistó per fer fluir el material i també es creen propietats direccionals degut a l'acritud.

Els elements metàl·lics més comuns per treballar en l'extrusió en fred són el plom, l'estany, l'alumini, el coure, el titani i l'acer.

Un exemples d'extrusió en fred són els cilindres d'amortiguació, els pistons i els tubs plegables [17].

3.3.5 Thixoextrusió

Actualment, el desenvolupament i la investigació de noves tècniques de conformat es dirigeixen principalment al conformat en estat semisòlid (SSM). Concretament, el present projecte estudia l'evolució de l'aliatge A357 amb diferents paràmetres d'extrusió. Aquest aliatge és de foneria. Per tant les novetats del projecte són l'extrusió d'un aliatge de fosa i en estat semisòlid. Per extrudir un aliatge de fosa és essencial fer-ho en estat semisòlid. L'estructura dendrítica d'un aliatge de fosa dificultaria un procés d'extrusió convencional [18].

El procés de thixoextrusió té certs avantatges davant del procés d'extrusió en calent. Tals com una menor pressió d'extrusió, reducció de les forces de fricció, major fluïdesa del material i augment de la vida útil del motlle i de la premsa [7].

Al igual que qualsevol procés de thixoforming, el mètode de thixoextrusió es composa en tres parts, obtenció del material, reescalfament i formació de la peça per extrusió [18] .

Hi ha diferents mètodes per arribar a l'estructura més convenient (estructura globular no dendrítica) abans de fer l'extrusió, mètodes com els descrits a l'apartat 3.2. Tot i que en el cas de les peces (A357.0) d'estudi del present projecte, provenen de colada per gravetat. Al tenir una refusió parcial s'espera que part de l'estructura sigui globular en el procés d'extrusió. Aquest aspecte és molt semblant en el que trobem en el procés *recrystallization and partial melting* (RAP), en el qual la refusió parcial juntament amb una deformació provoquen l'estat globular [18] .

L'aliatge s'escalfa a una temperatura entre 560 i 570ºC en el cas de les peces del present projecte, per poder obtenir una regió sòlida envoltada d'una líquida. Aquest procés necessita una alta fracció sòlida ($0,7<f_s<1$) en comparació en altres processos de SSM. Posteriorment el pistó aplica un esforç determinat per poder fer passar el material en aquest estat a través de la matriu i obtenir-ne així la forma desitjada. (Figura 3.15) [7-19].

Tenint en compte la sensibilitat de la fracció líquida, quan es fa l'extrusió en vertical tal i com s'ha fet en aquest estudi, la força de la gravetat específica pot comportar al trencament de la peça. Per això, és vital que tenir un control de temperatura i un control de refrigeració dissenyat al punt de sortida de la matriu fins que el producte a solidificat totalment [18].

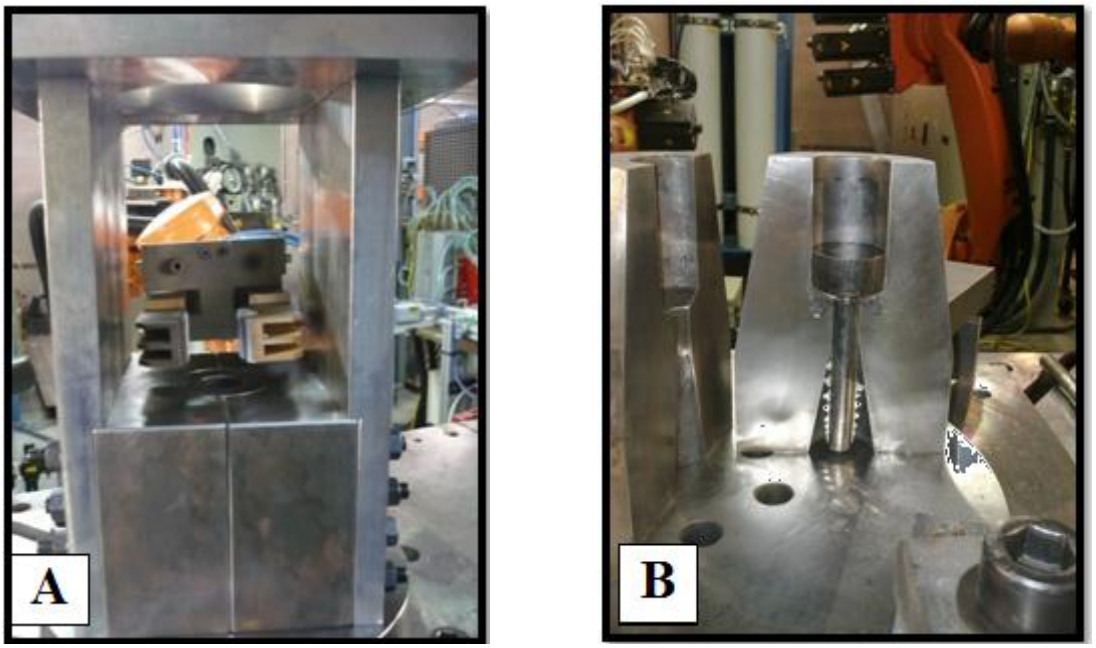


Figura 3.15 A) Contenidor i matriu tancada. **B)** Matriu oberta [14].

3.3.5.1 Càlcul de fracció de fase sòlida en el procés de thixoextrusió.

Mitjançant el diagrama d'equilibri Al-Si-Mg s'ha realitzat el càlcul de l'evolució del percentatge de fase sòlida, del lingot d'A357.0, en el procés d'escalfament previ a la l'extrusió.

Distribuint les dades obtingudes en el càlcul s'ha pogut elaborar el gràfic de la Figura 3.16 on s'observa l'evolució de la fracció sòlida en el refredament de l'aliatge A357.0 des de estat líquid fins a estat sòlid.

De color verd s'ha marcat la fracció sòlida per les dues temperatures en les quals s'ha realitzat el procés de thixoextrusió en el present projecte, a 560ºC tenim una fracció sòlida de 0.96 i a 570ºC la fracció sòlida és de 0.87.

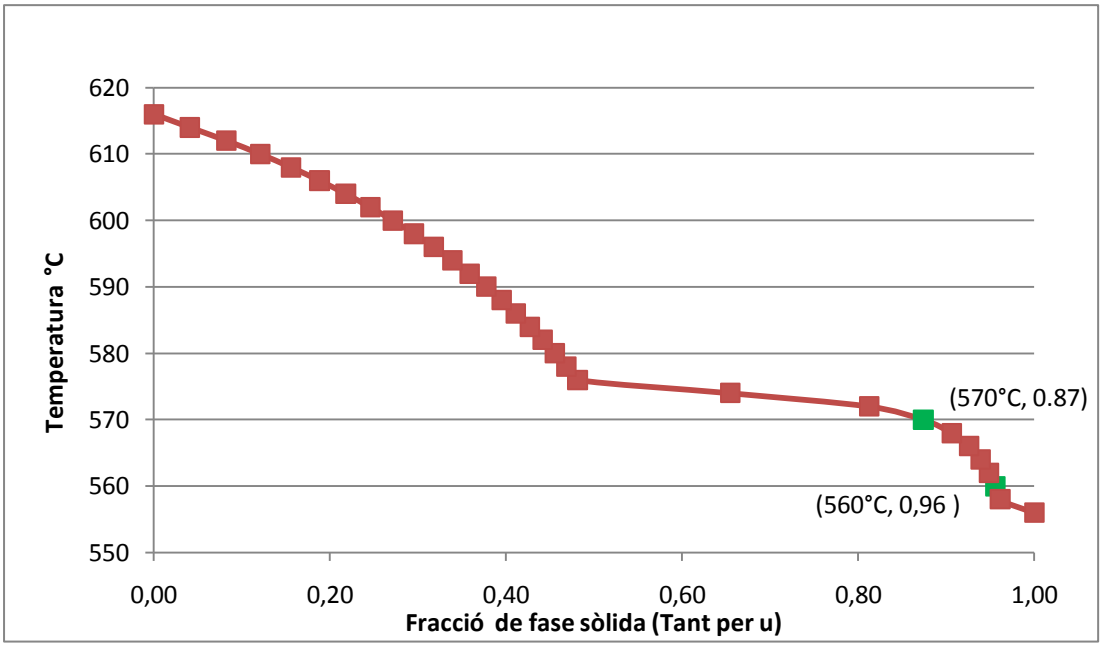


Figura 3.16. Evolució de la fracció de líquid a sòlid en funció de la temperatura.

3.3.5.2 Deformabilitat

En el disseny de la matriu i en el dimensionat de les peces a produir s'ha de tenir en compte el grau de deformitat màxim que podem aplicar al material en el qualsevol procés i tipus d'extrusió. Per tant, mitjançant els paràmetres de deformabilitat descrits a continuació podrem optimitzar encara més tot el procés per obtenir una millor competitivitat en la indústria.

El principal factor a tenir en compte és la reducció de secció màxima que podem obtenir en l'extrusió (Figura 3.17).

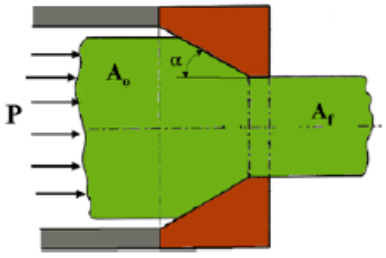


Figura 3.17 Reducció per pas en el procés d'extrusió [14].

La deformació ideal serà:

$\varepsilon = \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right) = \ln\left(\frac{L_o}{L_f}\right) = lnR$ on R= relació d'extrusió.

Si tota la força aplicada es convertís en treball de deformació:

$$p = \sigma_{0.2} \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)$$

Si el material fos perfectament plàstic la condició del límit de deformació serà:

$$\sigma_d = \sigma_{0.2} \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right) = \sigma_{0.2} \rightarrow \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right) = 1 \rightarrow \frac{A_o}{A_f} = e$$

Per tant la màxima reducció de la secció serà:

$$\frac{A_o - A_f}{A_o} = 1 - \frac{1}{e} = 0{,}633 \rightarrow 63{,}3\%$$

3.3.5.3 Forces d'extrusió

Un dels paràmetres més importants en qualsevol procés d'extrusió és la força necessària que s'ha aplicar al lingot perquè aquest redueixi la secció al passar per la matriu.

La força d'extrusió per a seccions circulars (cas del present estudi) es calcula segons la següent equació:

$$F = A_o k \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)$$ on k =constant d'extrusió.

Aquesta constant depèn del material i de la temperatura de procés. Figura 3.18

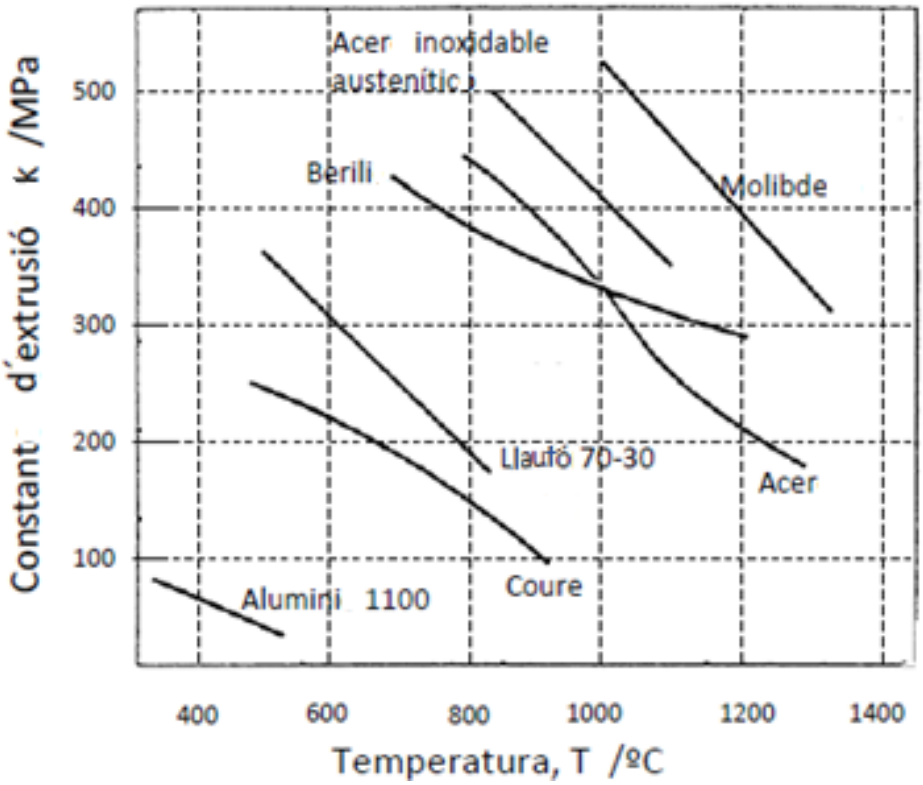


Figura 3.18. Constants d'extrusió d'alguns elements metàl·lics en funció de la temperatura [14].

En el cas de que el perfil extruït sigui de secció no circular, l'equació anterior:

$F = A_o k \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)$ quedarà modificada amb la introducció d'un factor de forma, K_x.

$$K_x = 0{,}98 + 0{,}02\left(\frac{C_x}{C_o}\right)^{2{,}25}$$

On: Cx= perímetre de la secció extrudia no circular.

Co = perímetre del cercle circumscrit. Figura 3.19.

Figura 3.19. Exemple de cercle circumscrit en una secció d'extrusió [14].

3.3.5.4 Defectes

Els principals defectes que es poden tenir en el procés de thixoextrusió són els següents:

- **Esquerdes superficials**: Les causes que comporten aquest defecte venen relaciones per una velocitat d'extrusió elevada, un excés de fricció o una temperatura incorrecta.

- **Defectes del procés:** Podem tenir flux de material que arrastra òxids i impureses de la superfície cap el centre de la peça. La principal causa d'aquest defecte és una elevada fricció o un refredament irregular.

- **Esquerdes Internes:** Les esquerdes internes, o també anomenat defecte Chevron es produeixen per les diferencies en els estats tensionals en diferents zones de la peça. Figura 3.20A.

- **Segregació del líquid:** Una solidificació heterogènia de la fracció líquida del material, comporta unes concentracions desiguals dels elements que conformen el aliatge. Per tant en la matriu d'α es trobaran eutèctics formats per diferents concentracions d'elements.

- **Microxuclets:** Les contraccions de la fracció líquida al solidificar-se, zona eutèctica, poden causar microxuclets. Figura 3.20B.

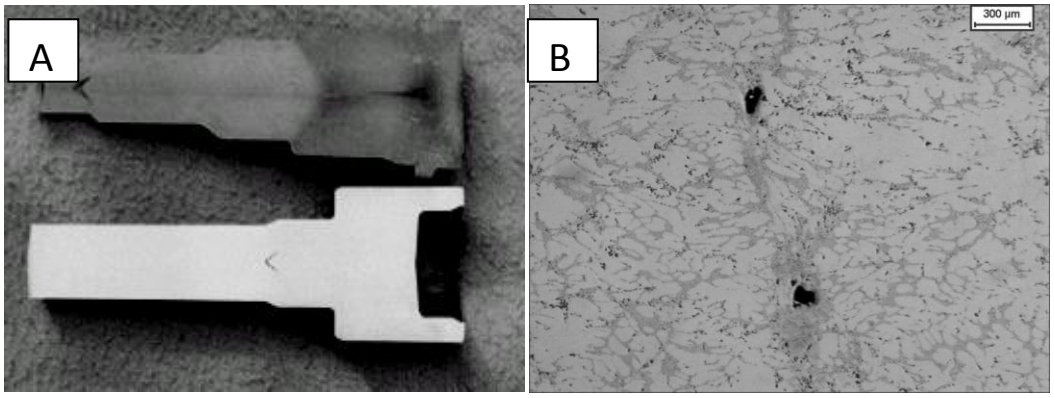


Figura 3.20. **A)** Imatge del defecte Chevron [14]. **B)** Microxuclets en zona eutèctica.

4. Procediment Experimental

4.1 Introducció

Aquest apartat descriurà tot el procés experimental del projecte, s'explicarà detalladament tot el procés que s'ha dut a terme per conformar les peces mitjançant la tècnica de la thixoextrusió. També es detallarà el procés de preparació de les mostres metal·logràfiques i dels assaigs de duresa.

Tots el processos experimentals, excepte el conformat de les peces, han sigut realitzats en els laboratoris del Centre de Disseny d'Aliatges Lleugers i Tractaments de Superfícies (CDAL) de Vilanova i la Geltrú.

4.2 Material utilitzat per la fabricació del component

Per realitzar el procés de conformació en estat semisòlid, mitjançant la tècnica de thixoextrusió, s'han necessitat lingots d'alumini A357.0 (Figura 4.1) provinents de colada per gravetat. La seva composició química experimental es mostra a la Taula 4.1.

Taula 4.1. Composició química experimental de l'aliatge A357.0 en % en pes. [7]

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sn
Base	6.76	0.143	0.001	0.005	0.481	<0.001	0.123	0.002

Figura 4.1 Lingot d'Alumini A357.0 [14]

El lingot d'alumini (Figura 4.1), es mecanitzarà de manera que obtindrem un sèrie de cilindres de la seva part central de Ø30x45 mm (Figura 4.2). Aquests cilindres són el material base utilitzat en el procés de thixoextrusió.

Figura 4.2 Lingot preparat pel procés de thixoextrusió. Ø30x45 mm. [14]

4.3 Procés de thixoextrusió

El procés de thixoextrusió és l'única part del projecte que s'ha realitzat fora del CDAL. Per qüestions alienes, el CDAL no disposa dels suficients recursos per poder realitzar el procés de thixoextrusió.

Per això, el procés s'ha desenvolupat a Bèlgica, en les instal·lacions de la Universitat de Liege col·laboradora amb el CDAL.

Pel procés de thixoextrusió s'ha utilitzat una Premsa AP&T de 500 Tn (Figura 4.3A) i una matriu feta en acer X38CrMoV5 (Figura 4.3C).

El procés s'inicia quan el braç robòtic col·loca el lingotet en un contenidor cilíndric on és escalfat per mitjà de la inducció a una temperatura entre 560ºC i 570ºC (Figura 4.3B). Arribada a la temperatura desitjada aquest és portat a la Premsa AP&T de 500Tn, ràpidament baixa el pistó i aplica la força necessària per fer-lo passar a través de la matriu per obtenir el component desitjat. (Figura 4.3C)

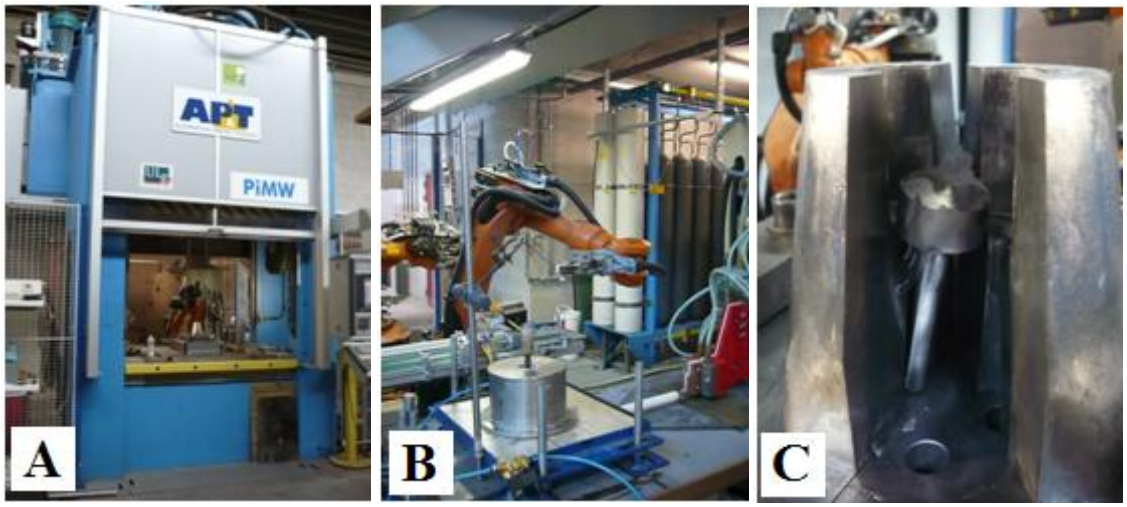


Figura 4.3. A) Premsa AP&T **B)** Zona d'inducció **C)** Matriu oberta amb peça. [14]

A la Figura 4.4 podem veure el procés, d'una manera esquemàtica, en el qual la premsa AP&T de 500 Tn conforma el components del present projecte.

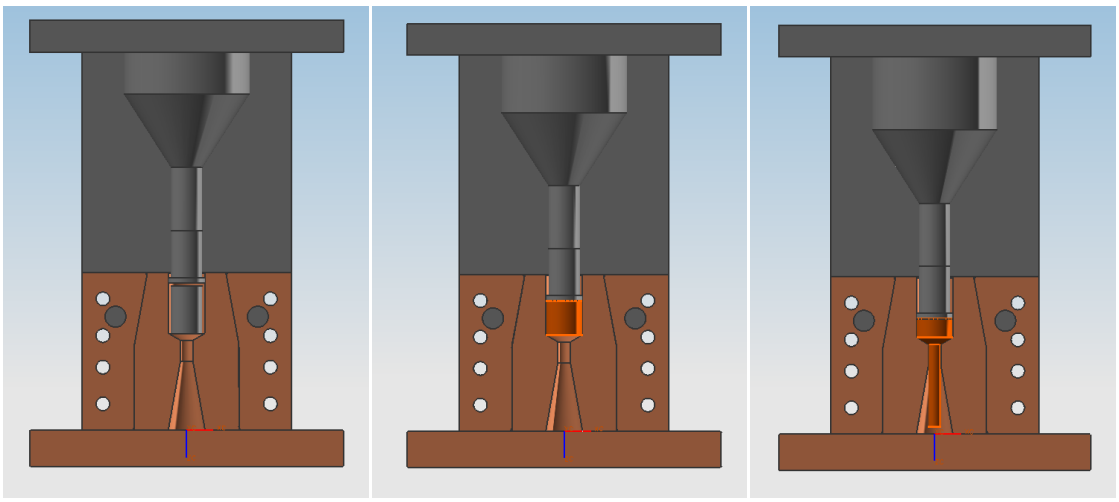


Figura 4.4 Esquema del procés de thixoextrusió [14].

Un cop acabat el procés de thixoextrusió, tenim peces com la de la Figura 4.5. Aquestes tenen un diàmetre de la secció A_o de 35mm i la reducció pel pas de la matriu ens dona un diàmetre de la secció A_f de 12mm. Mitjançant la teoria descrita al apartat 3.3.5.1 *Deformabilitat.* S'ha calculat el percentatge d'estricció:

$$Estricció\ (\%) = \frac{A_o - A_f}{A_o} \cdot 100 = \frac{17{,}5^2\pi - 6^2\pi}{17{,}5^2\pi} \cdot 100 = 88{,}24\%$$

Figura 4.5 Peça obtinguda en el procés de thixoextrusió (cotes en mm) . [14]

4.3.1 Peces obtingudes

S'han conformat un total de 12 peces, de les quals s'han tingut en compte per estudiar pel present projecte un total de 3. En aquest apartat es mostren el paràmetres de conformació de cada peça (Taules 4.2, 4.3 i 4.4) com també les gràfiques de conformació (Pressió extrusió envers desplaçament), (Figures 4.5, 4.6 i 4.7).

4.3.1.1 Peça nº1

Taula 4.2 Paràmetres d'extrusió peça nº1.

Test	Peça	Massa (g)	Temperatura (Cº)	Vel. de pistó (mm/min)	Vel. de pistó (mm/s)	Vel. de Extrusió. (m/min)	Càrrega (kN)	Pressió (MPa)
6C	1	83,45	570	500	8	4	530	551

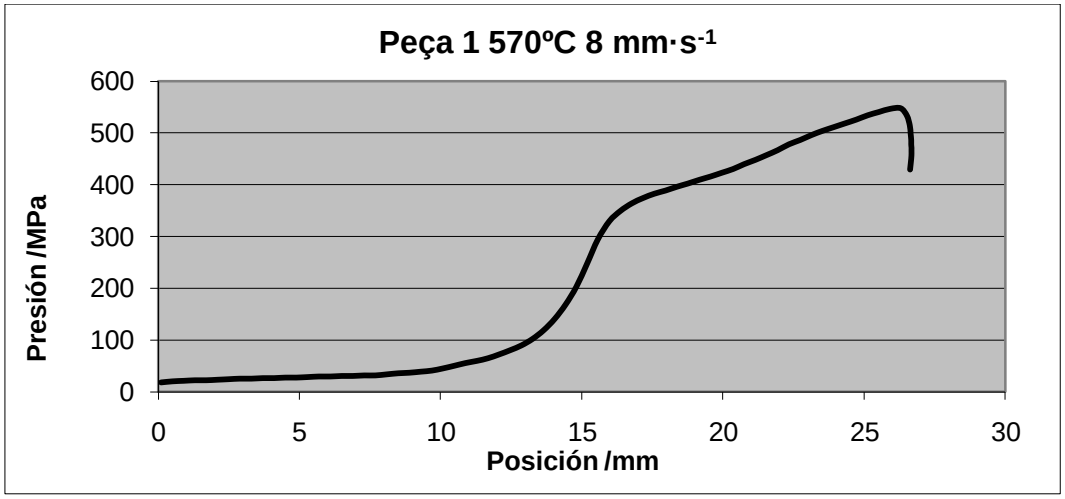


Figura 4.6 Gràfic peça nº1. de la relació pressió d'extrusió envers desplaçament del pistó.

4.3.1.2 Peça nº4

Taula 4.3 Paràmetres d'extrusió peça nº4.

Test	Peça	Massa (g)	Temperatura (Cº)	Vel. de pistó (mm/min)	Vel. de pistó (mm/s)	Vel. de Extrusió. (m/min)	Càrrega (kN)	Pressió (MPa)
9C	4	83,91	570	1500	25	13	310	322

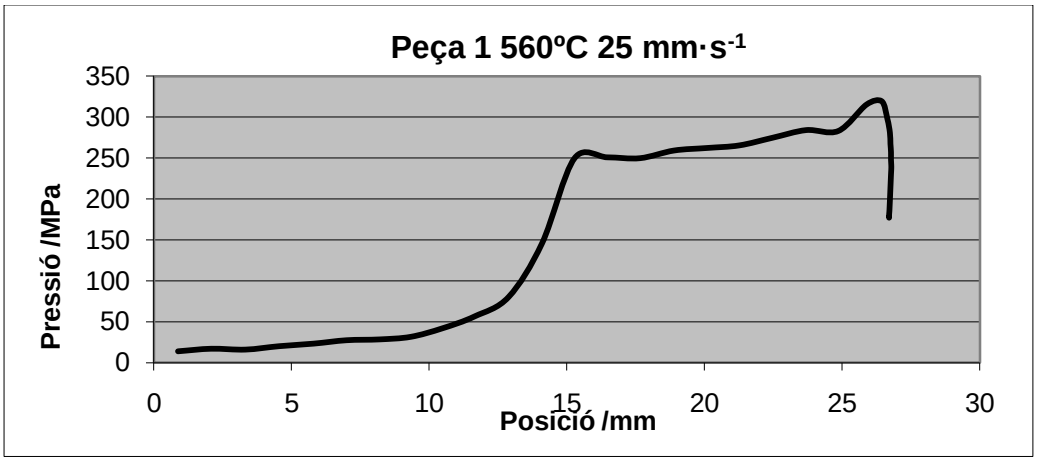


Figura 4.7 Gràfic Peça nº4. de la relació de la pressió d'extrusió envers desplaçament del pistó.

4.3.1.3 Peça nº11

Taula 4.4 Paràmetres d'extrusió peça nº11.

Test	Peça	Massa (g)	Temperatura (Cº)	Vel. de pistó (mm/min)	Vel. de pistó (mm/s)	Vel. de Extrusió. (m/min)	Càrrega (kN)	Pressió (MPa)
4C	11	81,96	560	5000	192	98	210	221

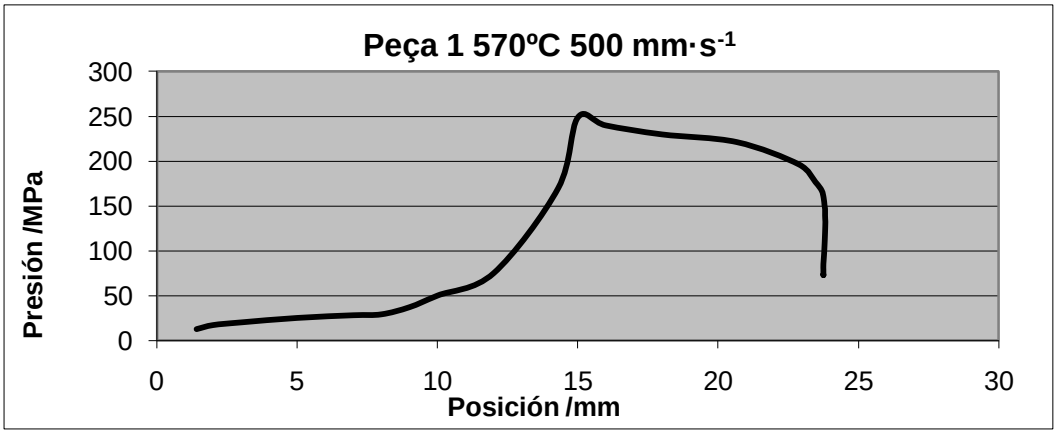


Figura 4.8 Gràfic peça nº1. de la relació pressió d'extrusió envers desplaçament del pistó.

4.3.1.2 Comparació entre les peces nº1, 4 i 11

Per realitzar un procés de thixoextrusió s'han de definir una sèrie de paràmetres, la variació dels quals afectaran les propietats mecàniques de les peces obtingudes. Aquests paràmetres són la velocitat de pistó que va lligada a la velocitat d'extrusió, la càrrega màxima i la temperatura (Taula 4.5). La temperatura és un factor molt important, ja que ens defineix la quantitat de fase sòlida que tindrà el material alhora de ser extruït. La variació de la fase sòlida implicarà una variació en la viscositat del material fent variar la pressió d'extrusió necessària per a la conformació.

Taula 4.5 Paràmetres d'extrusió peces nº1,4 i 11.

Test	Peça	Massa (g)	Temperatura (Cº)	Vel. de pistó (mm/min)	Vel. de pistó (mm/s)	Vel. de Extrusió. (m/min)	Càrrega (kN)	Pressió (MPa)
6C	1	83,45	570	500	8	4	530	551
9C	4	83,91	570	1500	25	13	310	322
4C	11	81,96	560	11500	192	98	210	221

En la Figura 4.9 es pot observar gràficament l'evolució del desplaçament de pistó envers la pressió d'extrusió exercida. Es pot observar que el desplaçament total del pistó és de 25 mm respecte la seva posició inicial. Durant els primers 10 mm, en les tres peces, s'observa una relació de linealitat de la pressió d'extrusió envers el desplaçament, això és degut a que en aquest tram hi ha el primer contacte entre la premsa i el lingotet, aquest rep una deformació que li provoca un augment de 5mm en el seu diàmetre (estat inicial Ø30mm (Figura 4.2) estat final Ø35mm (Figura 4.5)). A partir d'aquesta posició és on realment el material passa per la zona d'estricció de la matriu i on de manera exponencial assolirà el valor màxim de pressió d'extrusió. Un cop assolit, la pressió es manté constant fins arribar als 25 mm on finalitza el procés.

Cal destacar que durant els primers 15 mm d'extrusió el comportament de les tres peces es pràcticament idèntic.

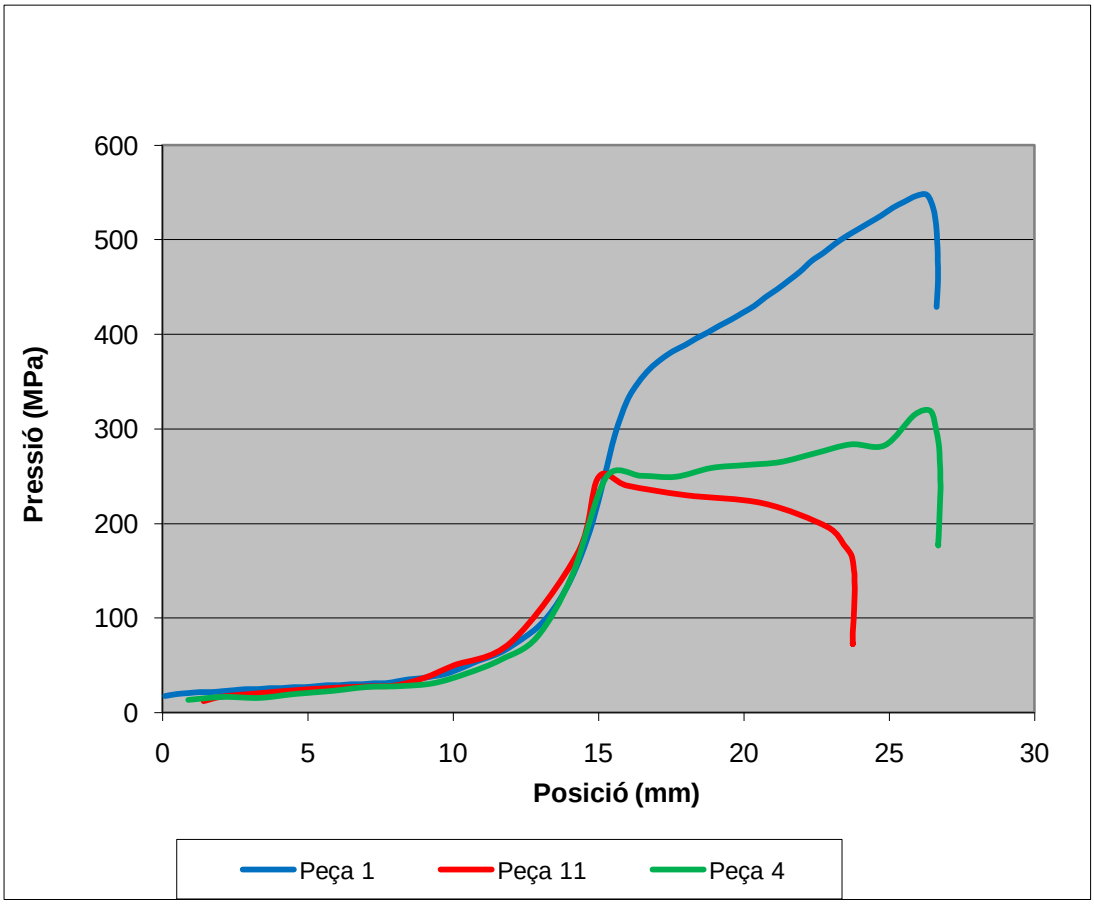


Figura 4.9 Gràfic comparatiu peces nº1, 4 i 11. de la relació pressió d'extrusió envers desplaçament del pistó.

4.4 Preparació de mostres metal·logràfiques

Per l'obtenció de provetes metal·logràfiques a partir de les mostres obtingudes per thixoextrusió de l'aliatge A357.0 s'ha seguit una metodologia sistemàtica que podem dividir en quatre senzills passos com són el tallat de peces, l'embotició, el desbast i el polit.

4.4.1 Tallat de peces

Primer s'han tallat les peces per les zones d'interès mitjançant un tronçadora Struers. Tallarem la peça longitudinalment i després farem tres seccions de la mateixa longitud per poder-les embotir correctament (Figura 4.10).

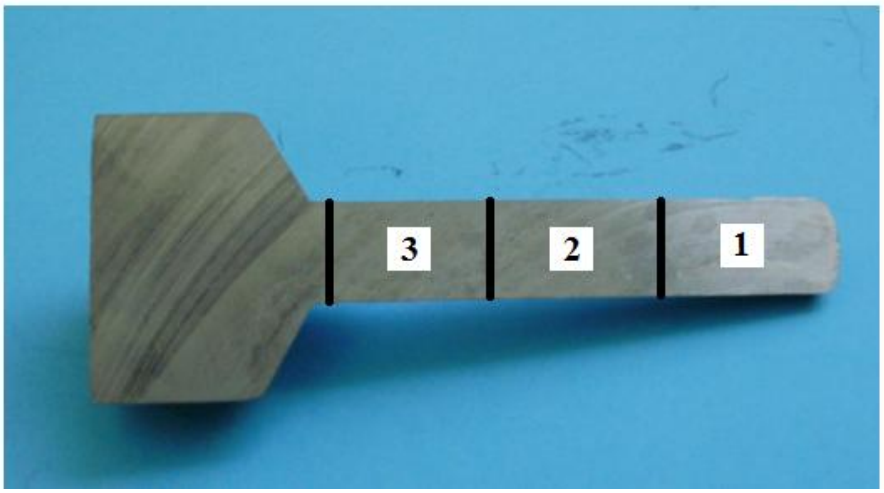


Figura 4.10 Peça tallada longitudinalment amb les marques pels talls transversals. [14]

4.4.2 Embotició

Un cop seccionada la peça, es procedeix al muntatge de provetes mitjançant una premsa d'embotició Struers. Aquesta emboteix les mostres mitjançant una resina de polièster termoendurible.

Es prepararà l'embotidora segons el paràmetres que ens dona el fabricant de la resina en la Taula 4.6:

Taula 4.6.: Paràmetres del procés d'embotició.

Resina	T(°C)	$T_{escalfament}$(min)	$T_{refredament}$(min)	Pressió (KN)
Multi-Fast negra	150	7	3	20

Una vegada finalitzat el temps de refredament, ja podem retirar les provetes correctament embotides (**Figura 4.11**).

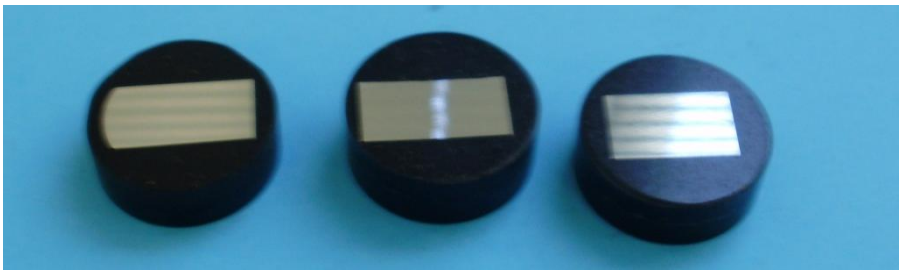


Figura 4.11. Conjunt de 3 provetes embotides. [14]

Abans de avançar en el procés i començar el desbast i el polit, les provetes es marcaran per la part inferior per tenir-les identificades en tot moment.

4.4.3 Desbast i polit de provetes

Per a la correcta observació de les mostres anteriorment embotides, han de passar un rigorós procés de desbast i polit. Aquest es durà a terme amb polidores.

El procés de desbast i sobretot el de polit és molt important per a la correcta observació microscòpica. Ja que si la proveta no està correctament polida es tindran complicacions a l'hora d'observar les microestructures.

El procés esta format per dues etapes la de desbast i polit, en les que es van utilitzant diferents plats de desbastar i polir, diferents abrasius i diferents lubricants.

En el procés de desbast s'utilitza com abrasiu paper de SiC de diferents granulometries (#220, #500, #800, #1200 i #4000). Com a lubricant s'utilitza aigua. El temps de desbast de cada paper és de 10 minuts a 300 rpm i amb una força de 15N.

Posteriorment es passa al procés de polit resumit en la taula 4.7.

Taula 4.7: Procés de polit.

	Al_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
Superfície	Pany Vellut	Pany Vellut	MD-Chem
Abrasiu	Al_2O_3	Al_2O_3	OP-U
Mida de grà	1 µm	0,3 µm	0,04 µm
Lubricant	Aigua destil·lada	Aigua destil·lada	No
r.p.m	150	150	150
Força (N)	5	5	5
Temps (min)	4	4	2

Si la proveta ha quedat ratllada passarem a repetir el procés a partir de paper de carbur de silici #4000 per tal de desbastar aquestes petites ratllades i tornar-la a polir.

Una vegada acabat el procés la proveta, per tal de protegir-la de la humitat, serà guardada en els assecadors de provetes .

4.5 Observació de la microestructura

S'ha dut a terme una observació microestructural de les provetes muntades. Aquest procediment s'ha realitzat amb l'ajut d'un microscopi òptic Leica model MEF4M (Figura 4.12), situat al laboratori d'anàlisis metal·logràfic de les instal·lacions del CDAL.
Aquest microscopi està equipats amb augments entre 25x i 1000x el que ens dona una visió global i molt acurada de les provetes a estudiar.

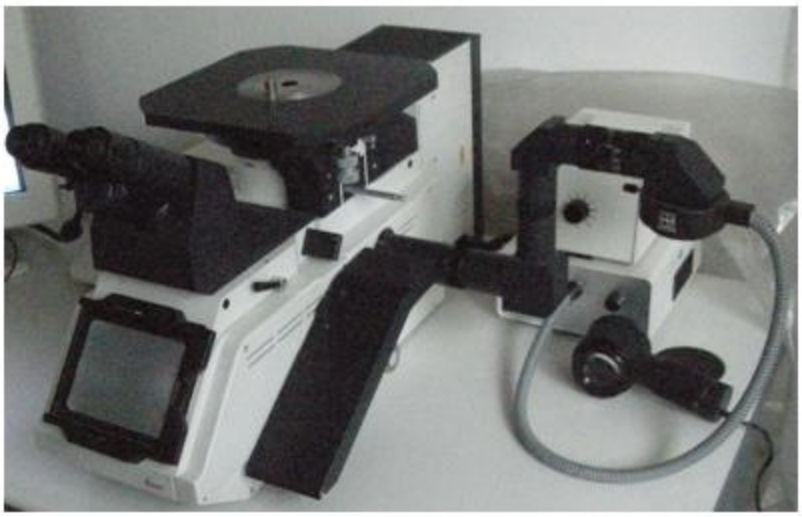


Figura 4.12 Microscopi òptic Leica. [14]

4.6 Assaigs de duresa Vickers

L'assaig de duresa Vickers s'ha realitzat segons la normativa ASTM E92-82(2003) e2 (equivalent a la norma UNE- EN ISO 6507-1 (2005)). Les provetes per aquest assaig són les que s'han preparat en el apartat *4.4.*

S'ha utilitzat un microduròmete Duramin 1. Tal i com es pot veure en la Figura 4.13.

Figura 4.13. Microduròmetre Duramin 1. [14]

L'assaig de duresa es diferencia del assaigs de dureses en que es pot fer l'anàlisi en punts microscòpics i per tant, permet estudiar propietats d'una determinada fase. D'aquesta forma podem analitzar els punts que ens interessi estudiar, en el cas del projecte s'han fet els assaigs de duresa en la fase α del material.

Els paràmetres de l'assaig de duresa Vickers que hem programat al microduròmetre Duramin 1, estan resumits a la Taula 4.9.

Taula 4.8.: Paràmetres del assaig de duresa Vickers.

Duròmetre	Símbol de duresa	Objectiu	Temps d'aplicació de la càrrega (s)	Càrrega Nominal F (mN)
Duramin 1	HV0,01	40x	15	98,12

En les medicions de duresa Vickers es fa penetrar un indentador de diamant en forma de piràmide de quatre cares amb un angle determinat (α = 136º) en el vèrtex. La utilització d'una piràmide de diamant té com avantatge que les empremtes resultants són molt perfilades i fàcils de mesurar (Figura 4.14) [20] .

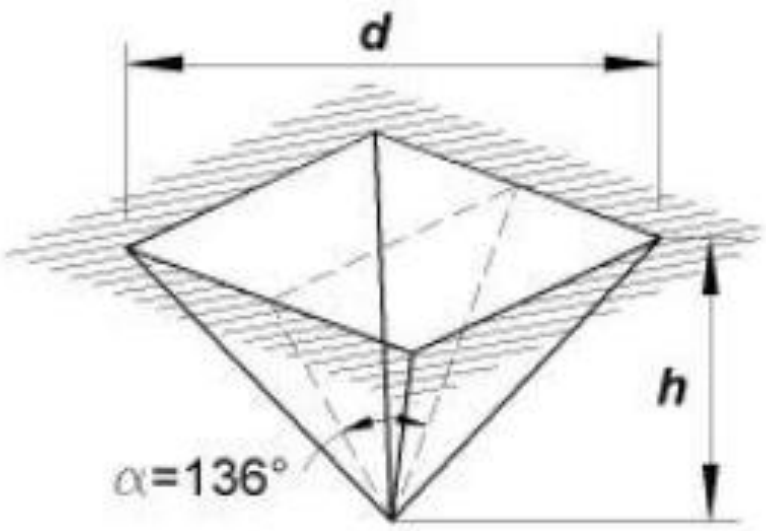


Figura 4.14 Impremta piramidal de duresa Vickers [20].

El duròmetre aplicarà la càrrega que s'ha considerat durant un temps predeterminat. Un cop retiri l'indentador podrem veure l'empremta amb l'ajuda d'un objectiu en aquest cas de 40 X (Figura 4.15).

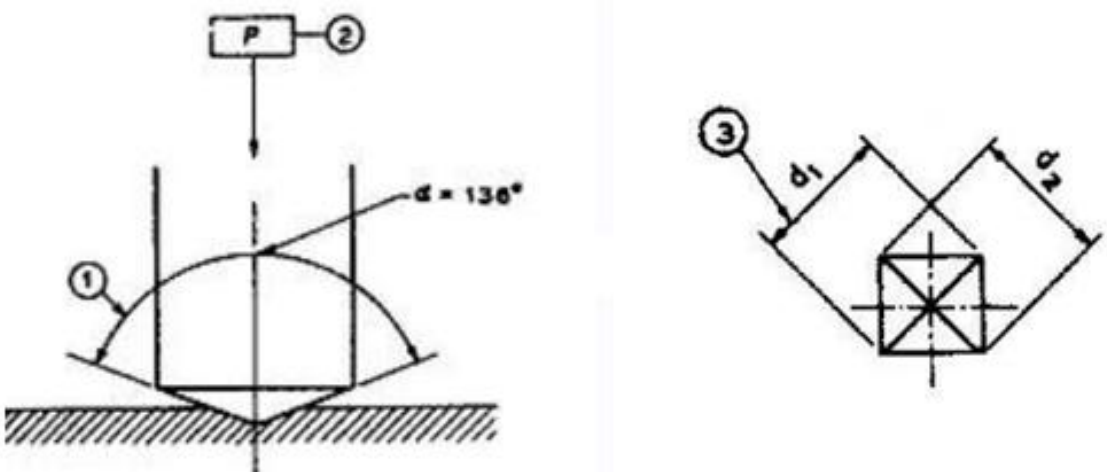


Figura 4.15 Impremta piramidal de duresa Vickers

Mesurant les diagonals d_1 i d_2 de l'empremta de la mostra (Figura 4.15). Podrem obtenir el valor de la duresa Vickers de les provetes ha estudiar, aplicant la fórmula següent:

$$HV = 1{,}8544\frac{P}{d^2}$$

On: **P** és el la càrrega aplicada (kg)

d és la mitjana aritmètica de les diagonals d_1 i d_2 (mm). [20]

5. Resultats experimentals

En aquest apartat, es veurà l'efecte que han tingut els diferents paràmetres d'extrusió en les provetes estudiades. Per veure l'efecte que han tingut sobre les mostres estudiades, s'ha realitzat un estudi de la microestructura d'aquestes i també una sèrie d'assaigs de duresa Vickers.

5.1 Assaigs de duresa Vickers

Les indentacions s'han efectuat sobre la fase α, han estat un total de 15 per proveta el que fan un total de 45 indentacions per peça (Figura 3.1). Aquestes s'han realitzat en les zones de més interès de les provetes, les quals serveixen per veure l'evolució de la duresa des del centre de la peça cap a la perifèria i com han evolucionat segons la longitud d'extrusió (dreta a esquerra).

A la Figura 5.1 es pot observar l'esquema i la nomenclatura que s'ha utilitzat per determinar les 45 indentacions que ha rebut cada peça a estudi.

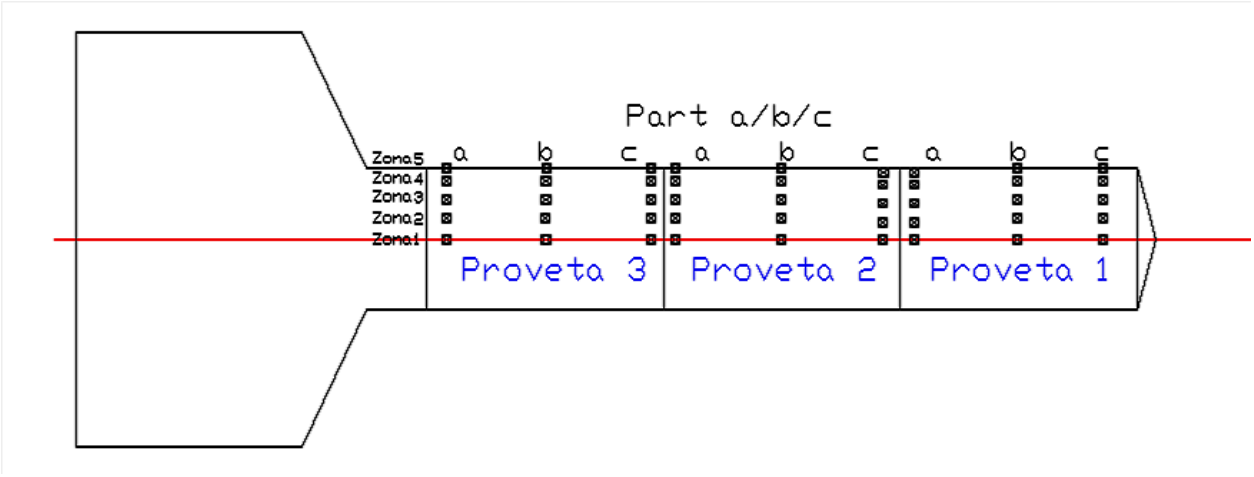


Figura 5.1 Esquema de localització i nomenclatura dels assaigs de duresa en les peces.

5.2 Efecte dels paràmetres d'extrusió en la duresa Vickers

Una vegada vista la nomenclatura i la sistemàtica que s'ha utilitzat per realitzar els assaigs de duresa Vickers (HV), a continuació, es mostren els resultats que s'han obtingut dels respectius assaigs.

5.2.1 Lingot A357 provinent de colada per gravetat

Els valors de la Taula 5.1 mostren el valors de duresa obtinguts en l'assaig de duresa d'un lingot d'aliatge A357 convencional..

Taula 5.1. Dureses A357 provinent de colada per gravetat (HV).

	Assaig nº1	**Assaig nº2**	**Assaig nº3**	**Mitjana**	**Desviació**
Duresa Vickers	81	76	77	**78**	**2**

5.2.2 Resultats de duresa Peça nº1

La peça nº1 ha sigut conformada per thixoextrusió amb els paràmetres representats en la Taula 5.2:

Taula 5.2 Paràmetres d'extrusió peça nº1.

Test	**Peça**	**Massa (g)**	**Temp. (ºC)**	**Vel. de pistó ($mm \cdot min^{-1}$)**	**Vel. de pistó ($mm \cdot s^{-1}$)**	**Vel. d'Extrusió. ($m \cdot min^{-1}$)**	**Càrrega (kN)**	**Pressió (MPa)**
6C	1	83,45	570	500	8	4	530	551

S'ha realitzat l'assaig Vickers seguint el procediment i la nomenclatura descrita a l'apartat 5.1. Els valors de la Taula 5.3 corresponen a les dureses obtingudes en la proveta nº1 de la peça nº1.

Taula 5.3 Dureses de la peça nº1 proveta 1. (HV)

	Part A	Part B	Part C	Mitjana	Desviació estàndard
Zona 1 (Centre)	79	87	90	**85**	**7**
Zona 2	88	104	92	**95**	**8**
Zona 3	87	98	88	**91**	**6**
Zona 4	87	90	90	**89**	**2**
Zona 5 (Perifèria)	93	88	102	**95**	**7**
Mitjana	**87**	**93**	**92**		
Desviació estàndard	**5**	**7**	**5**		

Per contrastar d'una manera més visual les dades obtingudes en els diferents assaigs de duresa és representaran de manera gràfica els resultats obtinguts en la Taula 5.3. La Figura 5.2 mostra l'evolució que tenen les dureses en la longitud d'extrusió i també l'evolució de les dureses obtingudes des del centre (Zona 1) fins a la perifèria (Zona 5) (Figura 5.3).

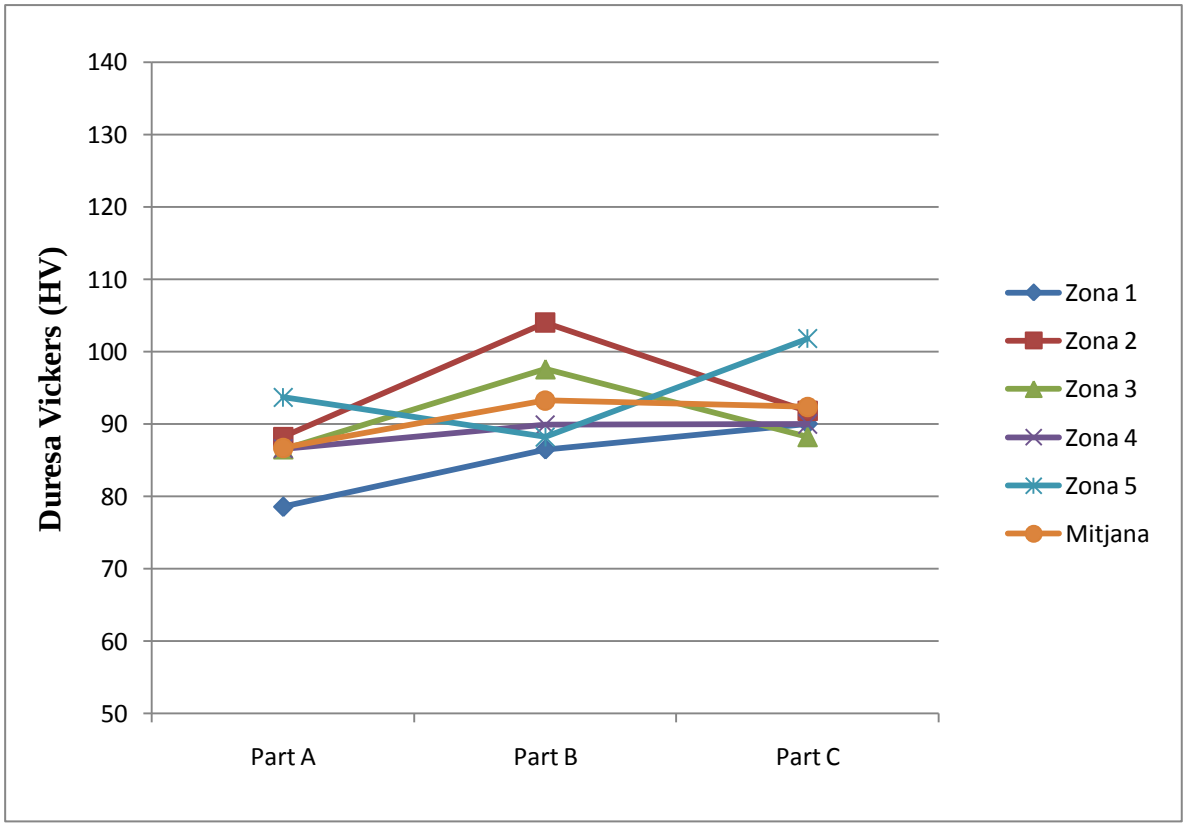


Figura 5.2 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº1 proveta nº1.

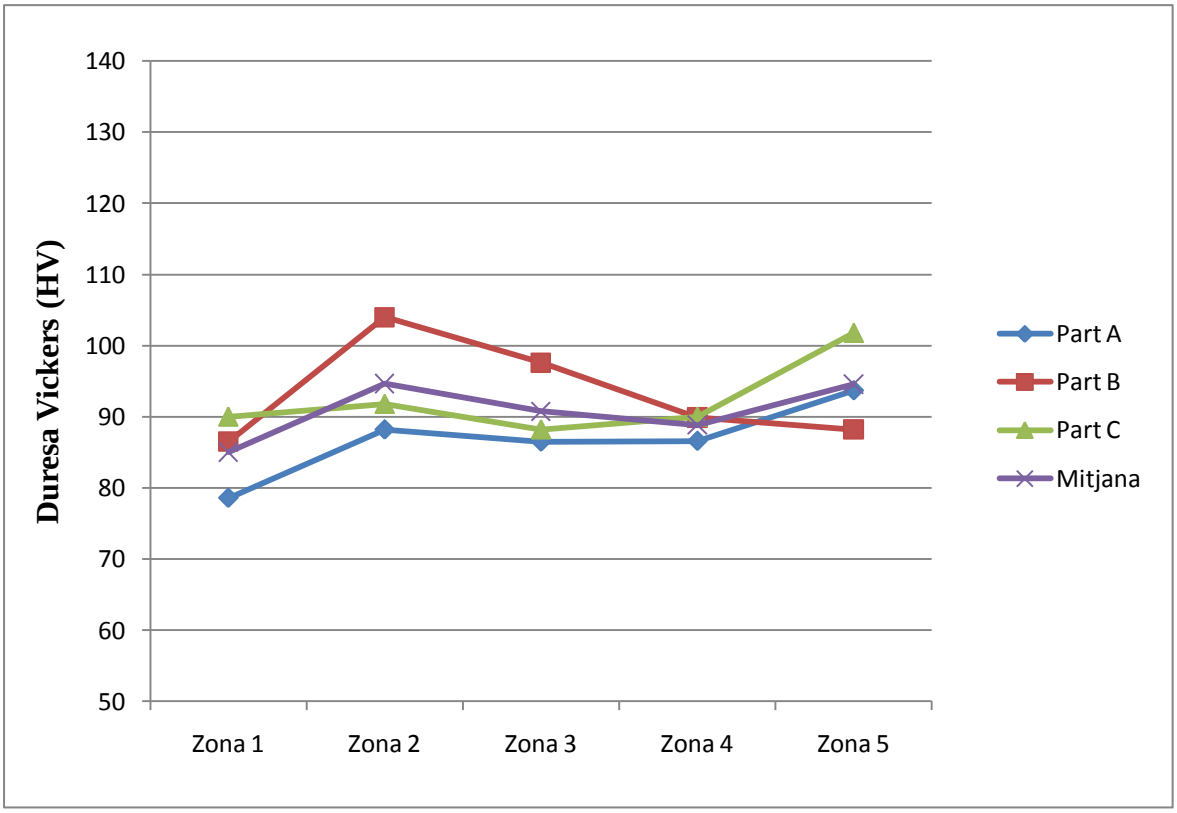


Figura 5.3 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº1 proveta nº1.

Es pot observar que l'evolució de dureses en funció de la longitud d'extrusió es manté pràcticament constant, tanmateix es pot observar un petit augment de duresa en el primer tram ja que la mitjana en el tram A és de **87 HV** i en el següent tram B ha augmentat a **93 HV**, l'evolució del tram B cap al tram C s'ha mantingut pràcticament igual **92 HV**.

Per tant, observant l'horitzontalitat del valor mig de la duresa en la Figura 5.2, es pot concloure que aquesta no ha tingut quasi disminució tal i com s'havia previst.

Pel que fa a l'evolució de la duresa des del centre cap a la perifèria aquesta ha tingut un petit augment des del centre (Zona 1) que és **85 HV** fins a la perifèria (Zona 5) que ha arribat fins a **95 HV** (Figura 5.3).

Els valors de la **Taula 5.4** corresponen a les dureses obtingudes en la proveta nº2 de la peça 1.

Taula 5.4 Dureses de la peça nº1 proveta 2. (HV)

	Part A	Part B	Part C	Mitjana	Desviació estàndard
Zona 1 (Centre)	100	100	98	**99**	**1**
Zona 2	106	111	106	**108**	**3**
Zona 3	111	100	104	**105**	**6**
Zona 4	102	102	102	**102**	**0**
Zona 5 (Perifèria)	98	102	104	**101**	**3**
Mitjana	**103**	**103**	**103**		
Desviació estàndard	**5**	**5**	**3**		

Es representarà l'evolució que tenen les dureses en la longitud d'extrusió (Figura 5.4) i també l'evolució de les dureses obtingudes des del centre (Zona 1) fins la perifèria (Zona 5) (Figura 5.5).

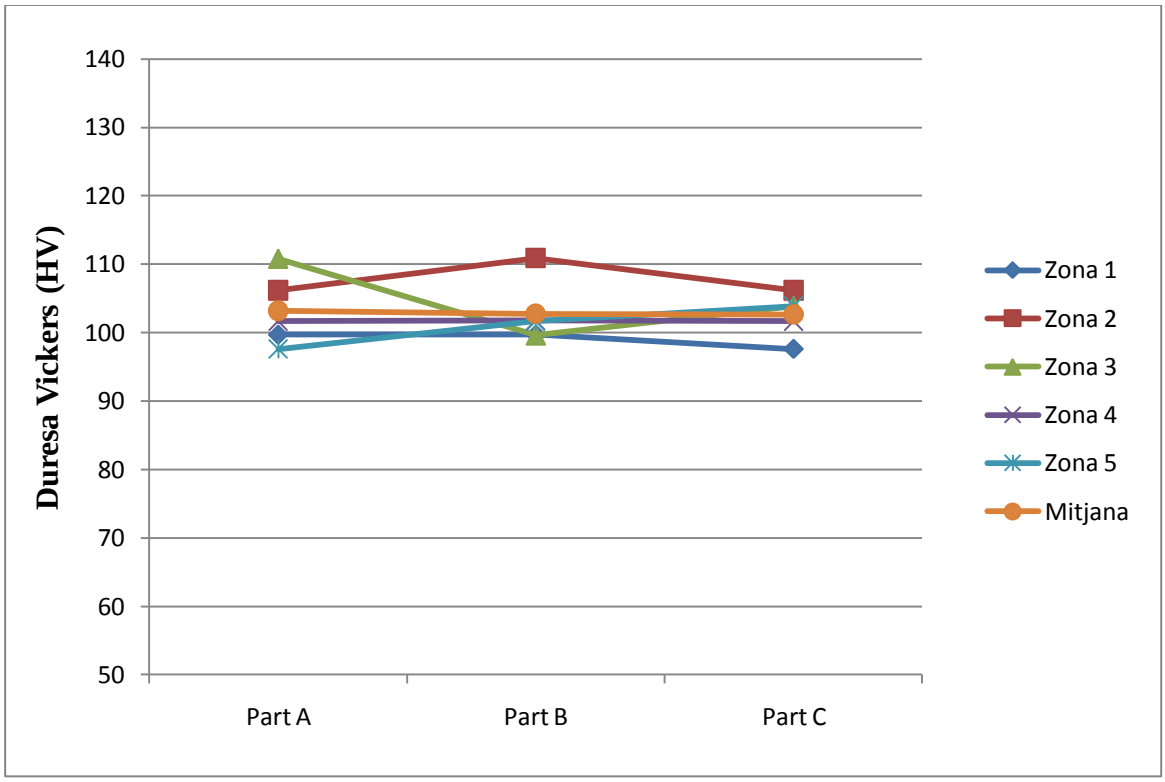


Figura 5.4 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº1 proveta nº2.

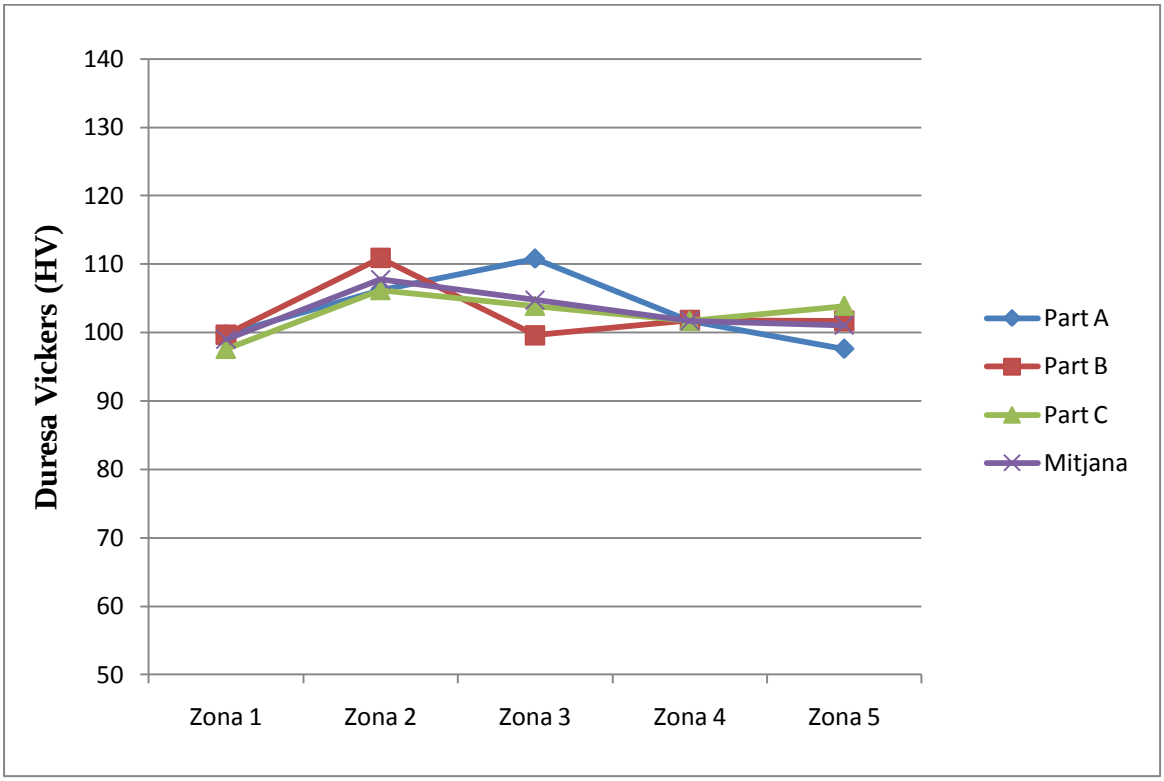


Figura 5.5 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº1 proveta nº2.

En aquest cas es pot observar que l'evolució de dureses en funció de la longitud d'extrusió es manté totalment constant, les mitjanes de cada tram de A cap a C són **103 HV**, **103 HV** i **103 HV** respectivament (Figura 5.4).

En comparació amb la proveta 1 les dureses en aquesta part han augmentat tal i com s'esperava ja que el grau de deformació en la proveta 2 ha sigut superior. Concretament si s'observen les mitjanes de la proveta 1, els valors de duresa oscil·len des de **87 HV** fins a **94 HV**, en canvi l'augment de la deformació en aquesta s'ha manifestat amb un augment de la duresa amb un valor mitjà de **103 HV** (Figures 5.2 i 5.4).

Pel que fa a l'evolució de la duresa des del centre cap a la perifèria aquesta ha sigut constant, per tant es pot afirmar que la peça en el tram 2 ha estat deformada molt uniformement tant longitudinalment com transversalment (Figures 5.4 i 5.5).

Els valors de la **Taula 5.5** corresponen a les dureses obtingudes en la proveta nº3 de la peça 1.

Taula 5.5 Dureses de la peça nº1 proveta 3. (HV)

	Part A	Part B	Part C	Mitjana	Desviació estàndard
Zona 1 (Centre)	100	100	104	**101**	**3**
Zona 2	116	96	109	**107**	**10**
Zona 3	102	116	104	**107**	**8**
Zona 4	106	106	106	**106**	**0**
Zona 5 (Perifèria)	104	109	96	**103**	**7**
Mitjana	**105**	**105**	**104**		
Desviació estàndard	**6**	**8**	**5**		

Es representarà l'evolució que tenen les dureses en la longitud d'extrusió (Figura 5.6) i també l'evolució de les dureses obtingudes des del centre (Zona 1) fins la perifèria (Zona 5) (Figura 5.7).

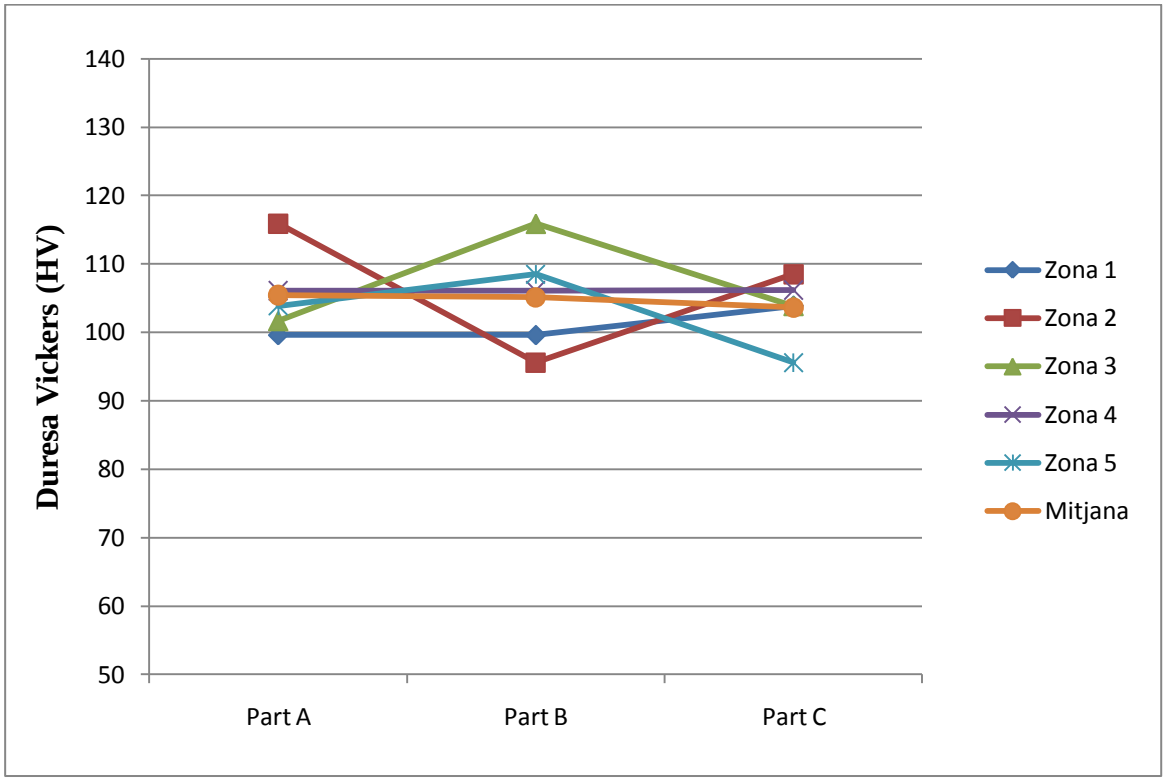


Figura 5.6 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº1 proveta nº3.

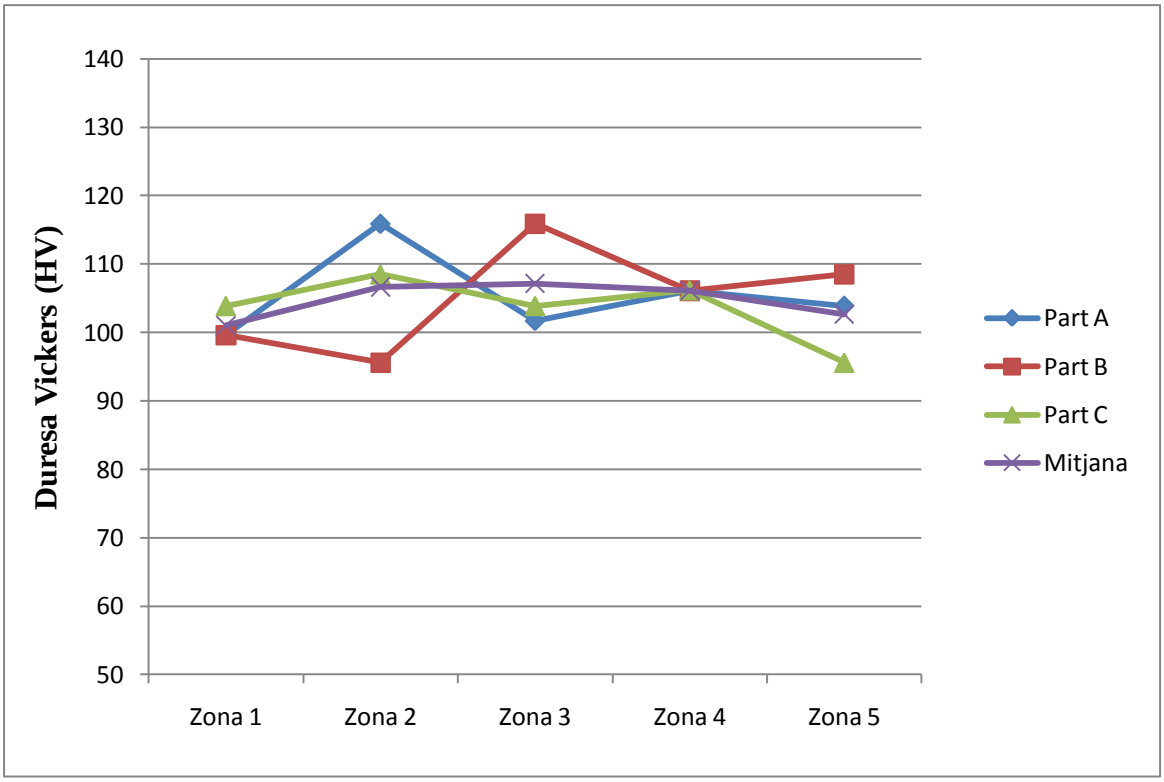


Figura 5.7 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº1 proveta nº3.

Tal i com s'ha esmentat en la mostra 1-2, la proveta 1-3 mostra també un comportament molt constant en l'evolució de la duresa longitudinalment, com es pot apreciar en la Figura 5.5, la mitjana de les dureses en l'evolució del sentit d'extrusió és totalment constant.

El mateix passa amb l'evolució de la duresa des del centre cap a la perifèria, els valors són constants també (Figura 5.7).

Per tant com en tota la peça en general, el tram 3 mostra un comportament molt homogeni de la deformació que ha sofert en procés d'extrusió.

Finalment, s'ha representant gràficament l'evolució que ha tingut la duresa en el centre i en la perifèria al llarg de la peça nº1 (Figura 5.8).

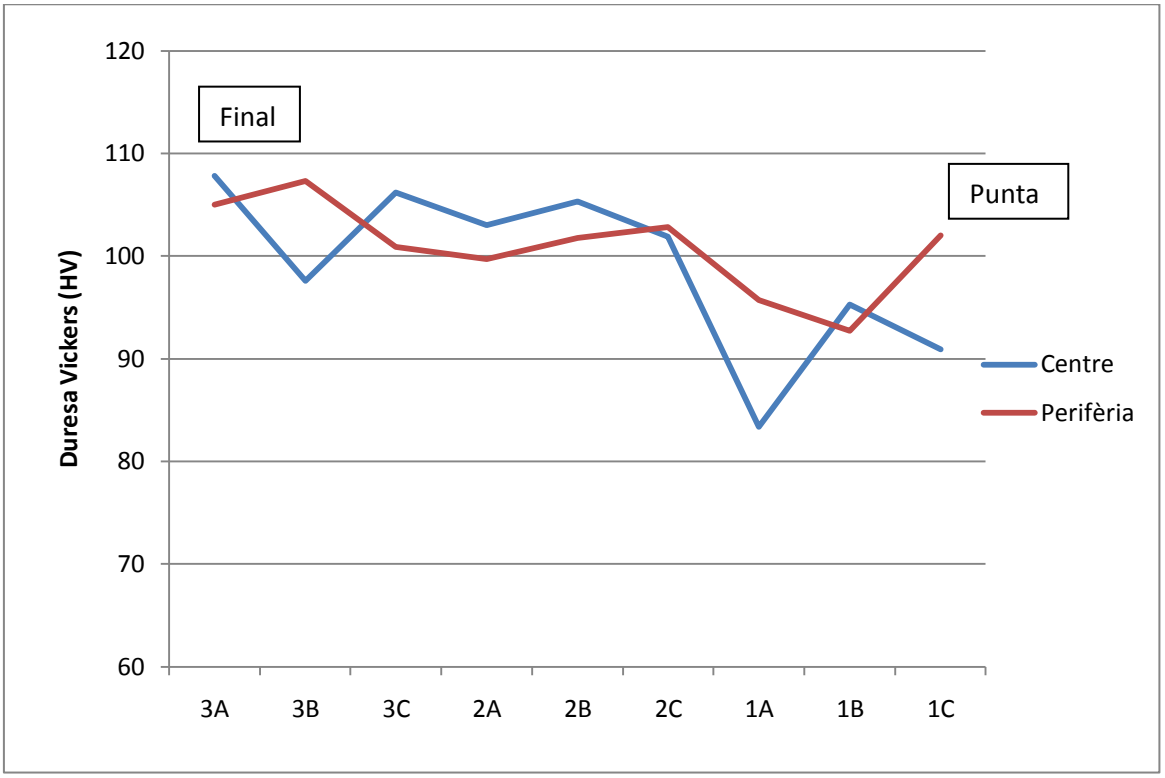


Figura 5.8 Evolució de la duresa mitjana en la longitud total de la peça 1.

Veient el gràfic de la Figura 5.8, podem dir que tal i com s'esperava la duresa disminueix a mesura que avança l'extrusió, arribant-se a estabilitzar-se (Trams 2 i 3), ja que és aquí on la deformació és més gran i ja estable.

En el tram 1 és on destaquen aquestes irregularitats, que en un posterior anàlisis metal·logràfic desenvolupant en el apartat *5.4 Discontinuïtats de flux* (Figura 5.35) s'ha determinat que son atribuïdes a una discontinuïtat de flux en el procés de thixoextrusió.

També es pot considerar que l'evolució en el centre de la proveta ha sigut més constant, uniforme i representativa que en la perifèria on té un perfil més irregular.

5.2.3 Resultats de duresa Peça nº4

La peça nº1 ha sigut conformada per thixoextrusió amb els paràmetres representats en la Taula 5.6:

Taula 5.6 Paràmetres d'extrusió peça nº4.

Test	Peça	Massa (g)	Temp. (ºC)	Vel. de pistó ($mm \cdot min^{-1}$)	Vel. de pistó ($mm \cdot s^{-1}$)	Vel. d'Extrusió. ($m \cdot min^{-1}$)	Càrrega (kN)	Pressió (MPa)
9C	4	83,91	570	1500	25	13	310	322

Els valors de la Taula 5.7 corresponen a les dureses obtingudes en la proveta nº1 de la peça nº4.

Taula 5.7 Dureses de la peça nº4 proveta 1. (HV)

	Part A	Part B	Part C	Mitjana	Desviació estàndard
Zona 1 (Centre)	94	92	90	**92**	**2**
Zona 2	106	113	92	**104**	**11**
Zona 3	104	100	96	**100**	**4**
Zona 4	109	116	96	**107**	**10**
Zona 5 (Perifèria)	102	100	96	**99**	**3**
Mitjana	**103**	**104**	**94**		
Desviació estàndard	**6**	**10**	**3**		

Per contrastar d'una manera més visual les dades obtingudes en els diferents assaigs de duresa és representaran de manera gràfica els resultats obtinguts en la Taula 5.7.

Es representarà l'evolució que tenen les dureses en la longitud d'extrusió (Figura 5.9) i també l'evolució de les dureses obtingudes des del centre (Zona 1) fins a la perifèria (Zona 5) (Figura 5.10).

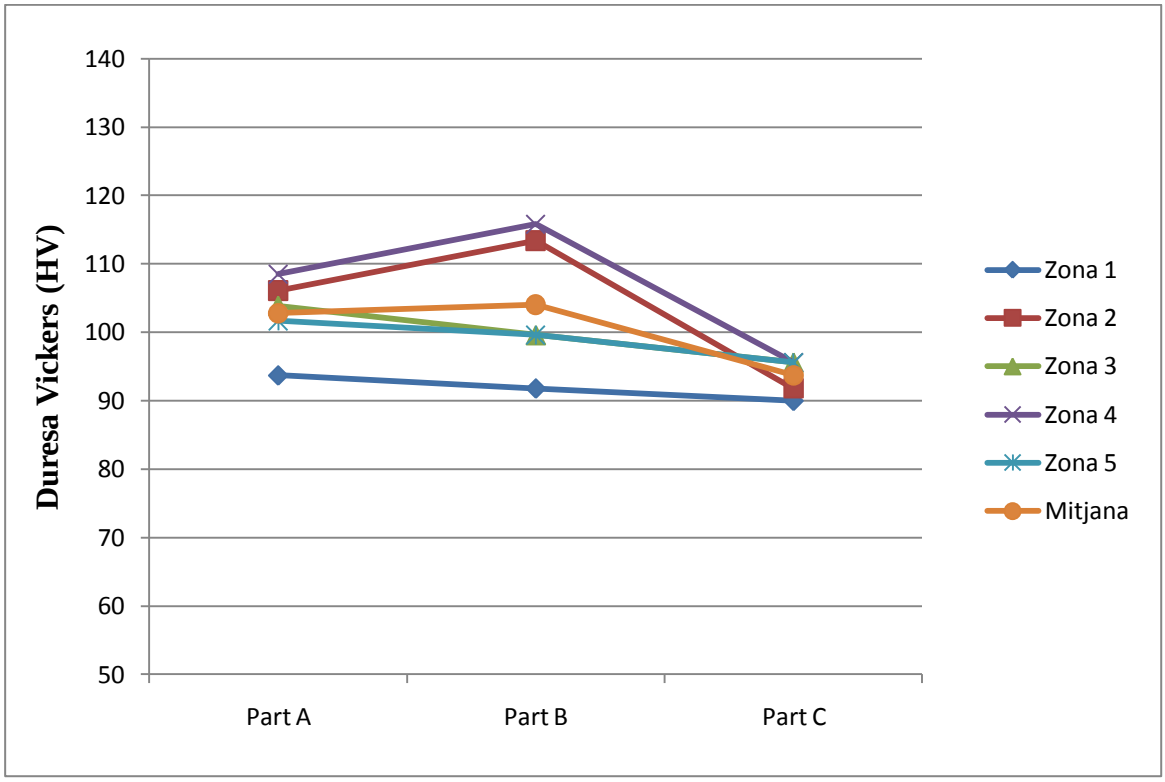


Figura 5.9 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº4 proveta nº1.

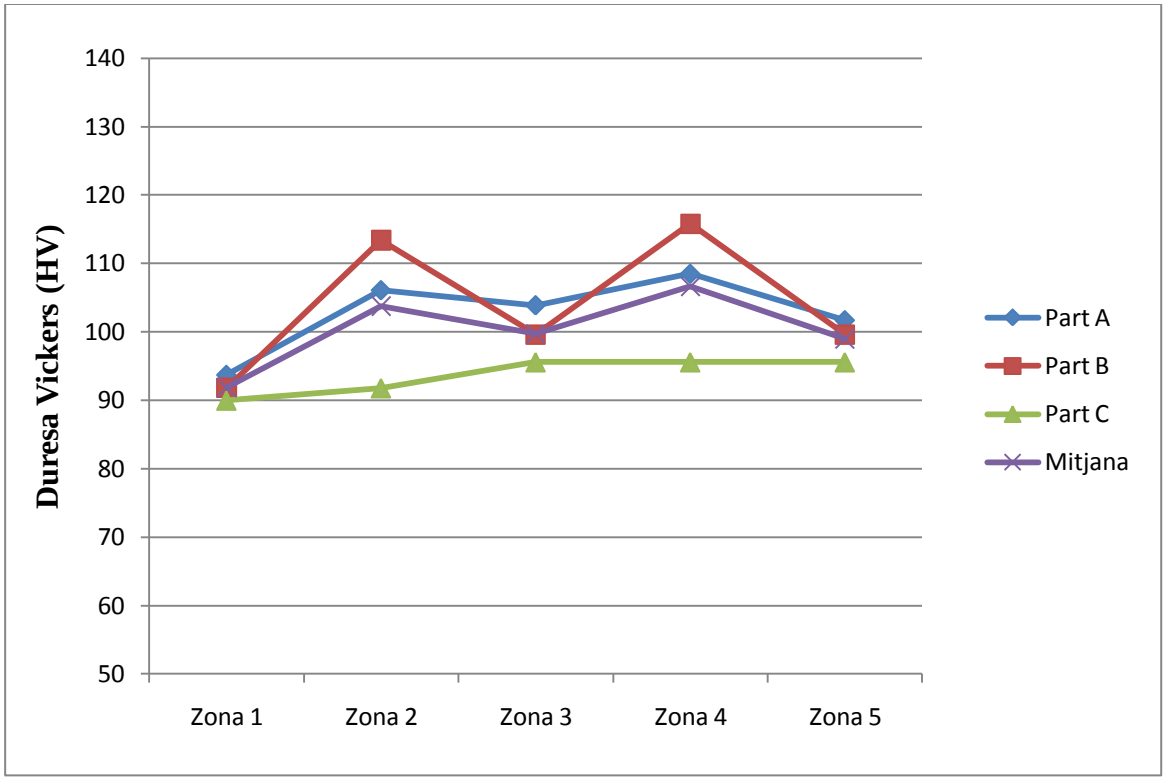


Figura 5.10 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº4 proveta nº1.

En la Figura 5.9, es pot observar que l'evolució de dureses en funció de la longitud d'extrusió creix a mesura que avança l'extrusió. I que la tendència creixement de la duresa es realitza en el pas del tram C cap el tram B on és passa d'una duresa mitjana de **94 HV** a **104 HV**.

Pel que fa a l'evolució de la duresa des del centre cap a la perifèria aquesta ha tingut un cert augment (Zona 1 **92 HV**) (Zona 5 **99 HV**) (Figura 5.10).

Es pot veure que amb els paràmetres d'extrusió que s'han utilitzat per a la conformació de la peça 4 s'obté un diferencia de duresa longitudinalment més gran que en el cas de la peça 1 en el mateix tram.

Els valors de la Taula 5.8 corresponen a les dureses obtingudes en la proveta nº2 de la peça.

Taula 5.8 Dureses de la peça nº4 proveta 2. (HV)

	Part A	**Part B**	**Part C**	**Mitjana**	**Desviació estàndard**
Zona 1 (Centre)	119	109	96	**108**	**12**
Zona 2	102	119	88	**103**	**15**
Zona 3	116	109	98	**107**	**9**
Zona 4	104	111	104	**106**	**4**
Zona 5 (Perifèria)	104	104	94	**101**	**6**
Mitjana	**109**	**110**	**96**		
Desviació estàndard	**8**	**5**	**6**		

A continuació es representarà l'evolució que tenen les dureses en la longitud d'extrusió (Figura 5.11) i també l'evolució de les dureses obtingudes des del centre (Zona 1) fins la perifèria (Zona 5) (Figura 5.12).

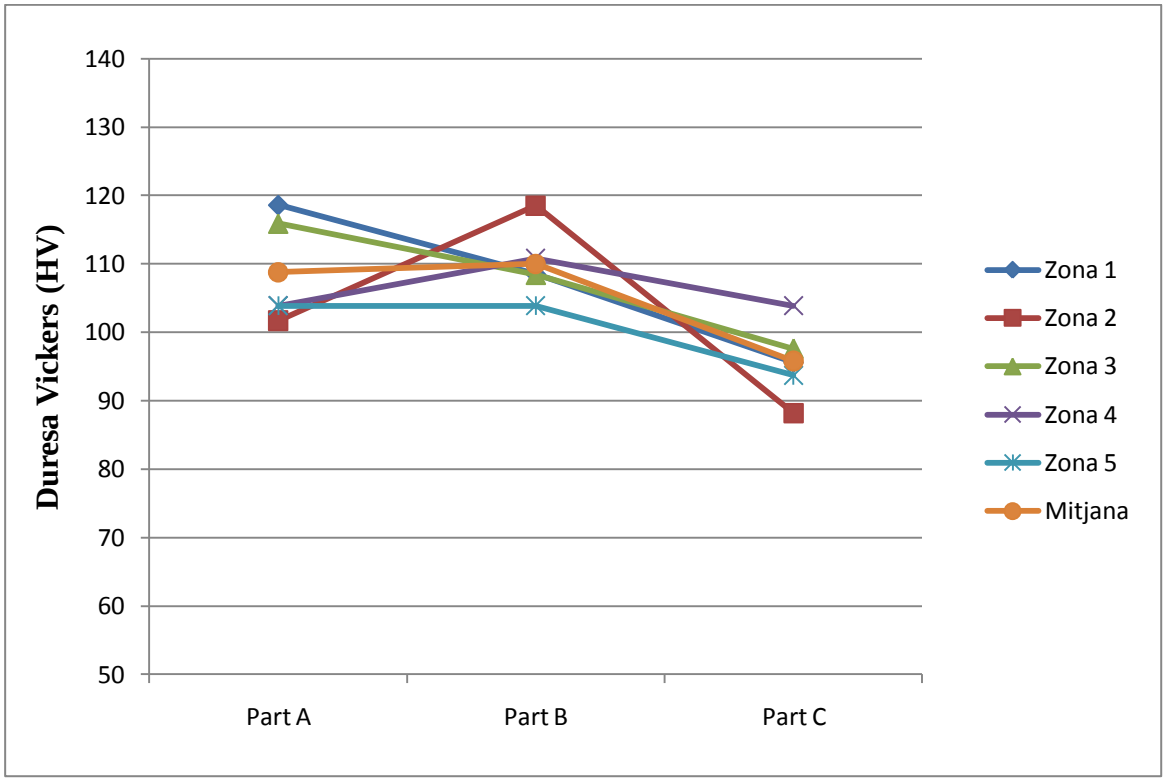


Figura 5.11 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº4 proveta nº2.

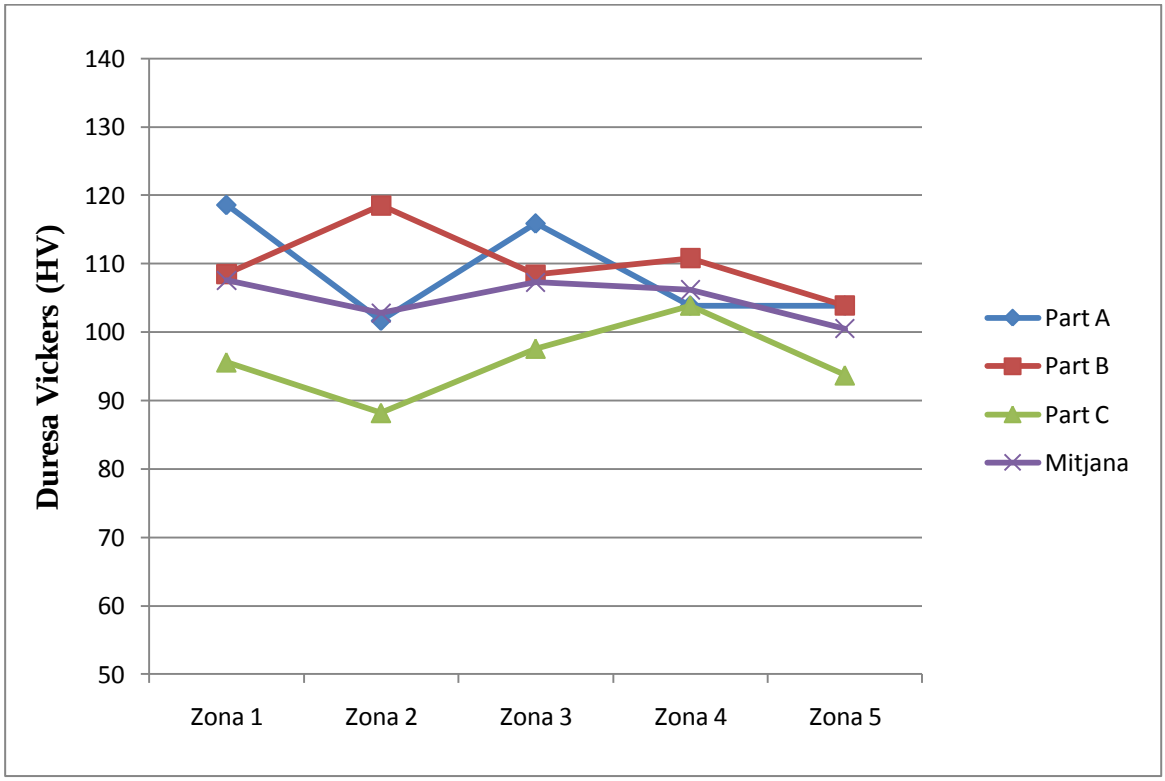


Figura 5.12 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº4 proveta nº2.

En la Figura 5.11, es pot observar que l'evolució de les dureses en funció de la longitud d'extrusió creix considerablement a mesura que avança l'extrusió. Tal i com ha passat en el cas del tram 1, que la tendència de creixement de la duresa es realitza en el pas del tram C cap al tram B on és passa d'una duresa mitjana de **96 HV** a **110 HV**.

Pel que fa a la variació de duresa transversal es pot apreciar que la mitjana de la duresa es manté constant en el recorregut de la zona 1 fins la zona 5 (Figura 5.12).

Els valors de la Taula 5.9 corresponen a les dureses obtingudes en la proveta nº3 de la peça.

Taula 5.9 Dureses de la peça nº4 proveta 3. (HV)

	Part A	**Part B**	**Part C**	**Mitjana**	**Desviació estàndard**
Zona 1 (Centre)	106	109	100	**105**	**5**
Zona 2	113	113	102	**109**	**7**
Zona 3	102	98	102	**100**	**2**
Zona 4	102	113	102	**106**	**7**
Zona 5 (Perifèria)	119	104	113	**112**	**7**
Mitjana	**108**	**107**	**104**		
Desviació estàndard	**7**	**7**	**5**		

Seguidament es representarà l'evolució que tenen les dureses en la longitud d'extrusió (Figura 5.13) i també l'evolució de les dureses obtingudes des del centre (Zona 1) fins a la perifèria (Zona 5) (Figura 5.14).

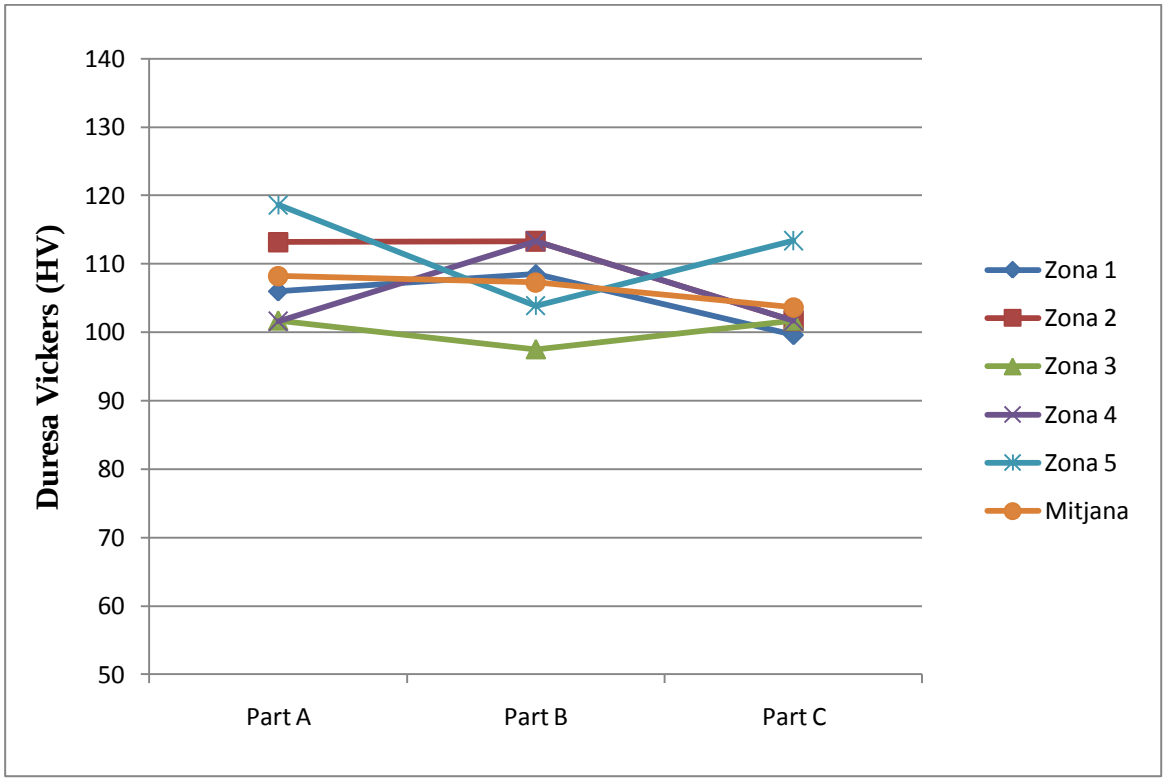


Figura 5.13 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº4 proveta nº3.

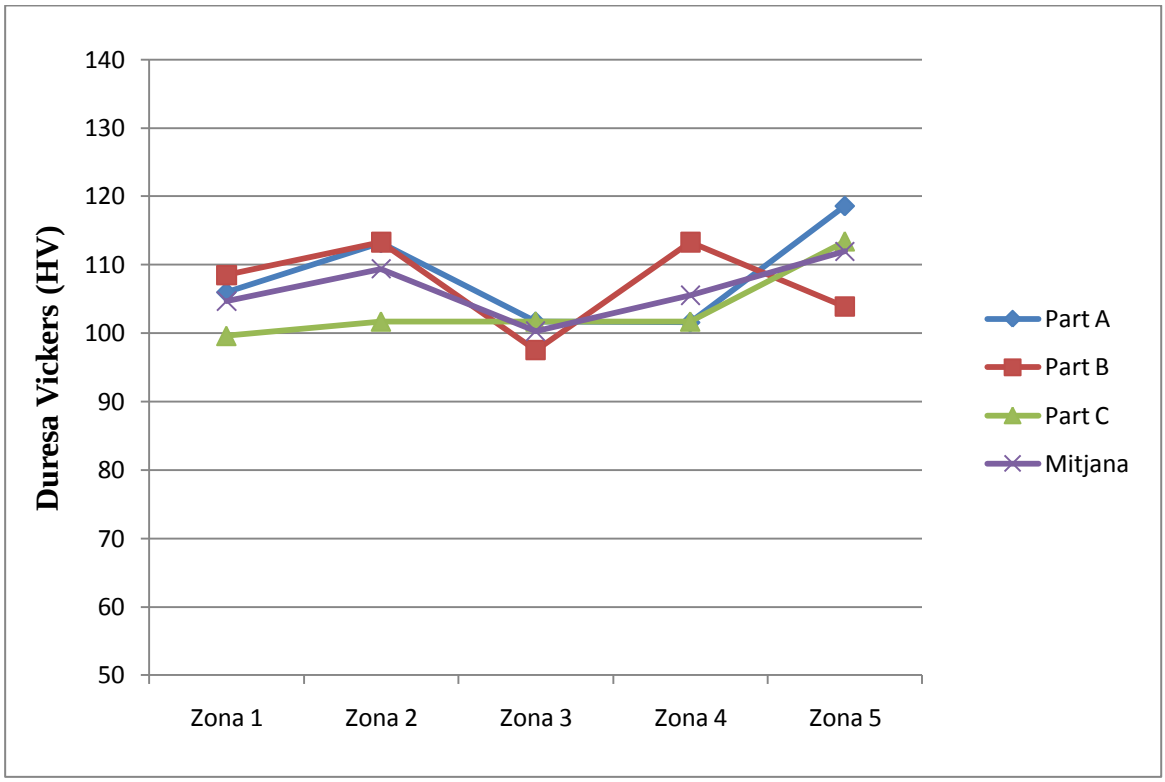


Figura 5.14 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº4 proveta nº3.

En la Figura 5.13, es pot observar que l'evolució de dureses en funció de la longitud d'extrusió és constant a mesura que avança l'extrusió, on es passa d'una duresa mitjana de **107 HV** a **104 HV**.

Pel que fa a la variació de duresa des del centre cap a la perifèria, es pot apreciar que la mitjana de la duresa augmenta considerablement en el recorregut de la zona 1 (**105 HV**) fins la zona 5 on tenim un valor de duresa mig de **112 HV** (Figura 5.14).

Per acabar, s'ha representat gràficament l'evolució que ha tingut la duresa en el centre i en la perifèria al llarg de la peça nº4 (Figura 5.15).

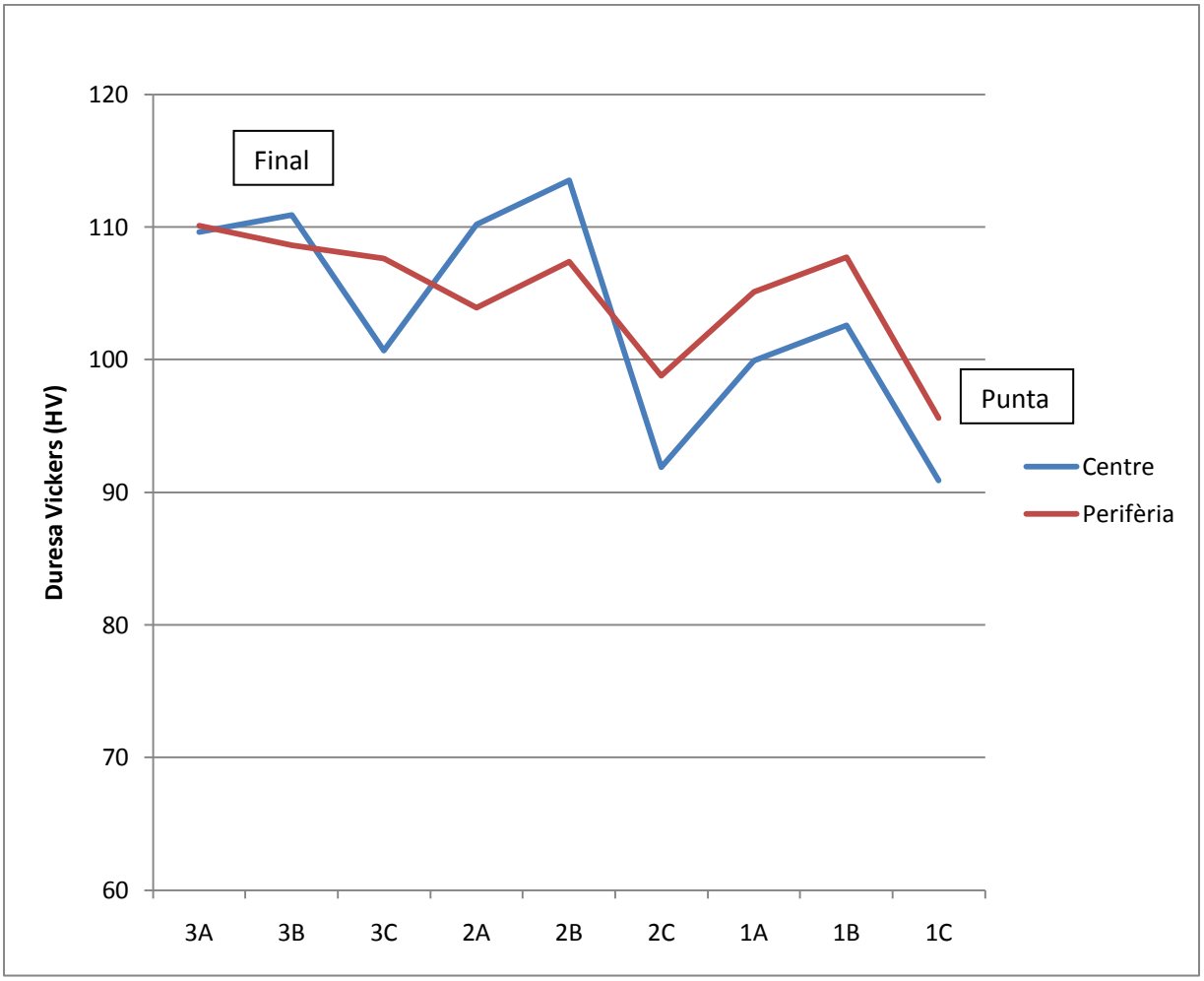


Figura 5.15 Evolució de la duresa mitjana en la longitud total de la peça 4.

Tal i com s'ha dit en l'anàlisi de la peça 1, observant el gràfic de la Figura 5.15, es pot concloure que tal i com s'esperava, la duresa augmenta a mesura que avança l'extrusió. Cal dir però, que l'evolució de la duresa es força més irregular que en el cas de la peça nº1. Ja

que al augmentar la velocitat d'extrusió augmenta la possibilitat de patir discontinuïtats de flux. Aquestes causen irregularitats en la distribució del eutèctic en la microestructura de les peces Tal i com es pot veure en les micrografies de l'apartat *5.4 Discontinuïtats de flux* Figura 5.36. Aquest defecte provoca variacions de la duresa fora de les esperades degut a les deformacions en el procés d'extrusió.

5.2.4 Resultats de duresa Peça nº11

La peça nº1 ha sigut conformada per thixoextrusió amb els paràmetres representats en la Taula 5.10:

Taula 5.10 Paràmetres d'extrusió peça nº11.

Test	Peça	Massa (g)	Temp. (ºC)	Vel. de pistó ($mm \cdot min^{-1}$)	Vel. de pistó ($mm \cdot s^{-1}$)	Vel. d'Extrusió. ($m \cdot min^{-1}$)	Càrrega (kN)	Pressió (MPa)
4C	11	81,96	560	11500	192	98	210	221

Els valors de la Taula 5.11 corresponen a les dureses obtingudes en la proveta nº1 de la peça nº11.

Taula 5.11 Dureses de la peça nº11 proveta 1. (HV)

	Part A	Part B	Part C	Mitjana	Desviació estàndard
Zona 1 (Centre)	68	73	80	**74**	**6**
Zona 2	67	73	80	**74**	**7**
Zona 3	77	82	77	**79**	**3**
Zona 4	73	76	79	**76**	**3**
Zona 5 (Perifèria)	73	80	83	**79**	**5**
Mitjana	**72**	**77**	**80**		
Desviació estàndard	**4**	**4**	**2**		

Per contrastar d'una manera més visual les dades obtingudes en els diferents assaigs de duresa es representaran de manera gràfica els resultats obtinguts en la Taula 5.11.

Es representarà l'evolució que tenen les dureses en la longitud d'extrusió (Figura 5.16) i també l'evolució de les dureses obtingudes des del centre (Zona 1) fins a la perifèria (Zona 5) (Figura 5.17).

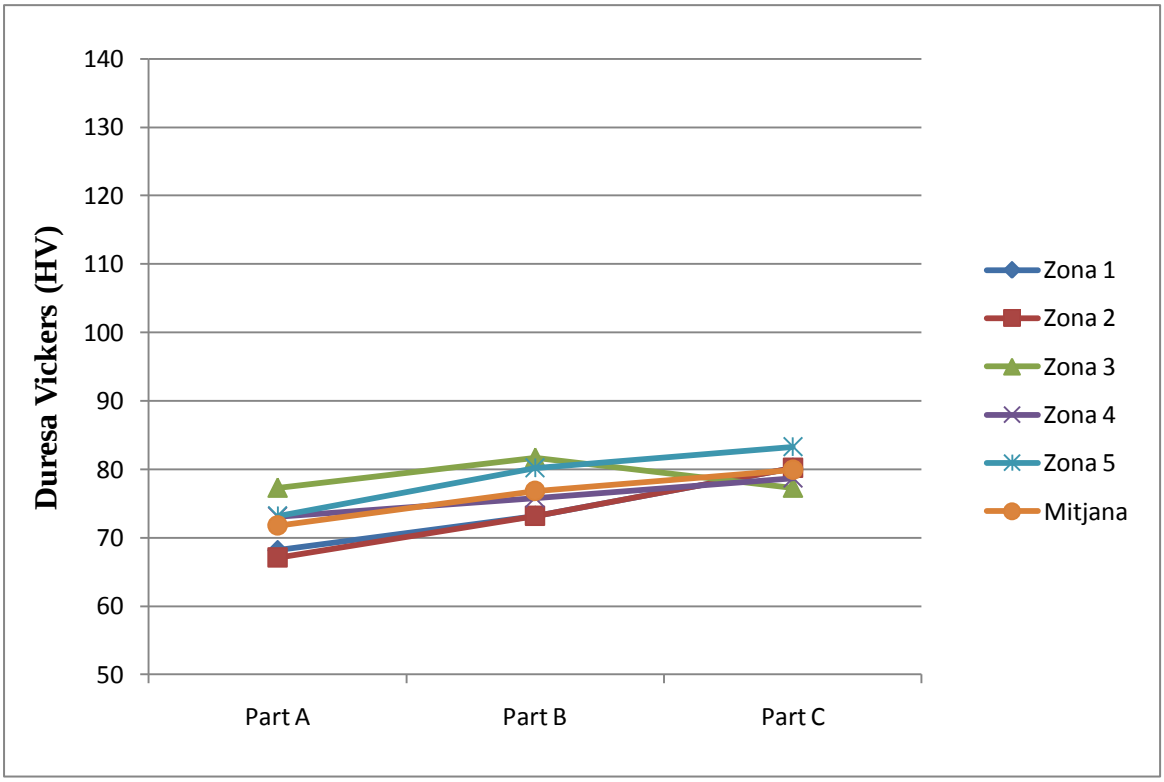


Figura 5.16 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº11 proveta nº1.

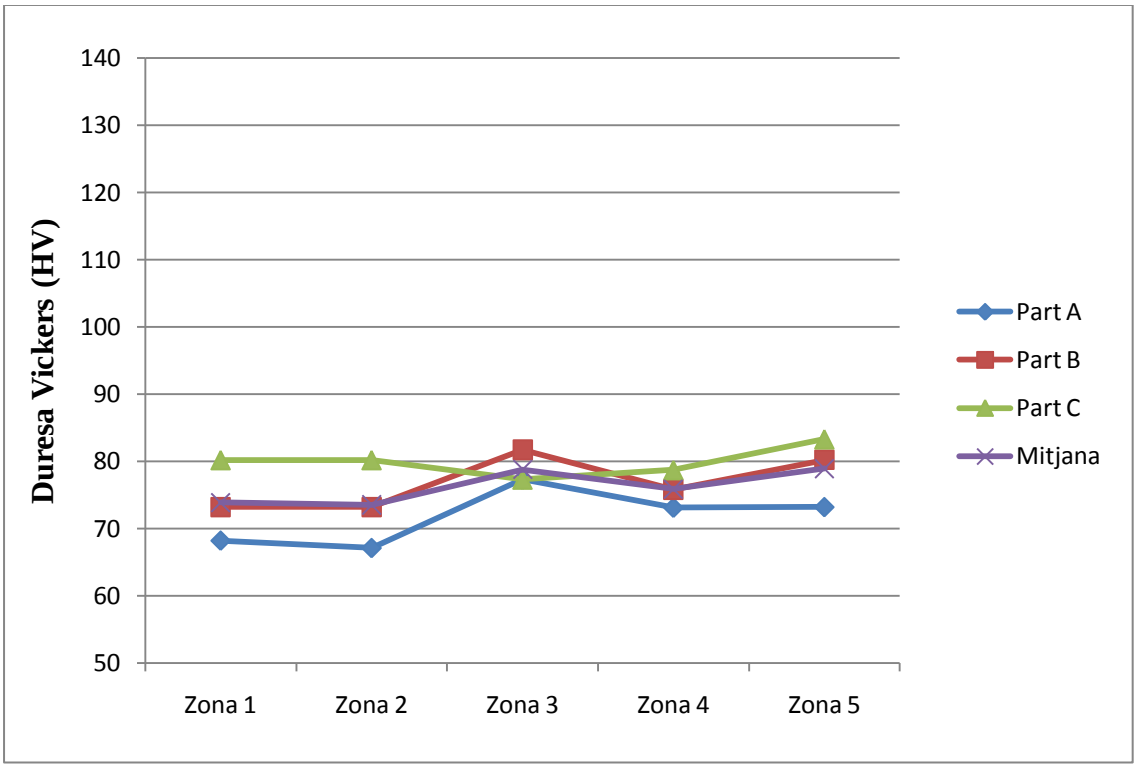


Figura 5.17 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº11 proveta nº1

Es pot observar en la Figura 5.16, que hi ha una petita disminució en el valor de la duresa en la direcció de la longitud d'extrusió, aquest fet indica que pràcticament no hi ha hagut deformació, un altre camí que porta a la mateixa conclusió és el baix valor de la duresa en aquesta part de la proveta, aquesta oscil·la entre 70 HV i 80HV.

Observant la Figura 5.17, es veu que l'evolució de la duresa es força constant, es pot confirmar la hipòtesis anterior i afirmar que es manté constant al no haver-hi pràcticament deformació en la proveta 11-1.

Els valors de la Taula 5.12 corresponen a les dureses obtingudes en la proveta nº2 de la peça.

Taula 5.12 Dureses de la peça nº11 proveta 2. (HV)

	Part A	**Part B**	**Part C**	**Mitjana**	**Desviació estàndard**
Zona 1 (Centre)	98	94	96	**96**	**2**
Zona 2	98	104	106	**103**	**4**
Zona 3	92	94	102	**96**	**5**
Zona 4	92	106	100	**99**	**7**
Zona 5 (Perifèria)	98	82	88	**89**	**8**
Mitjana	**95**	**96**	**98**		
Desviació estàndard	**3**	**10**	**7**		

A continuació es representarà l'evolució que tenen les dureses en la longitud d'extrusió (Figura 5.18) i també l'evolució de les dureses obtingudes des del centre (Zona 1) fins a la perifèria (Zona 5) (Figura 5.19).

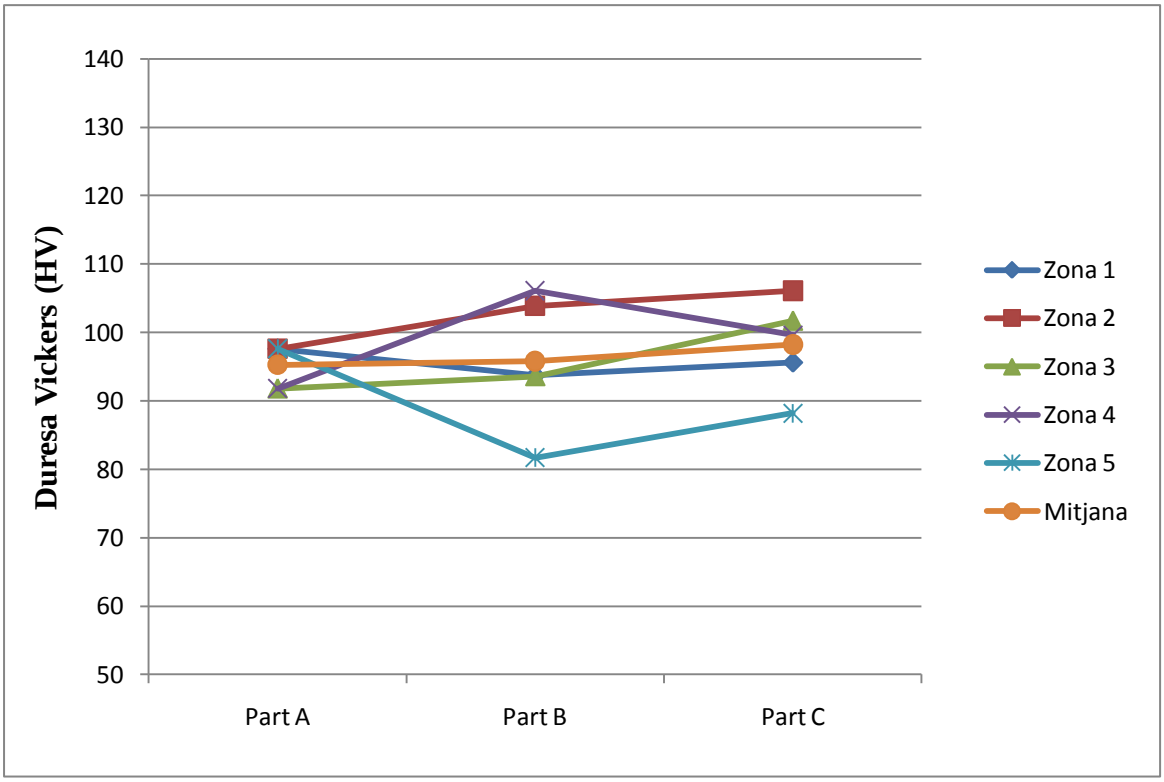


Figura 5.18 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº11 proveta nº2.

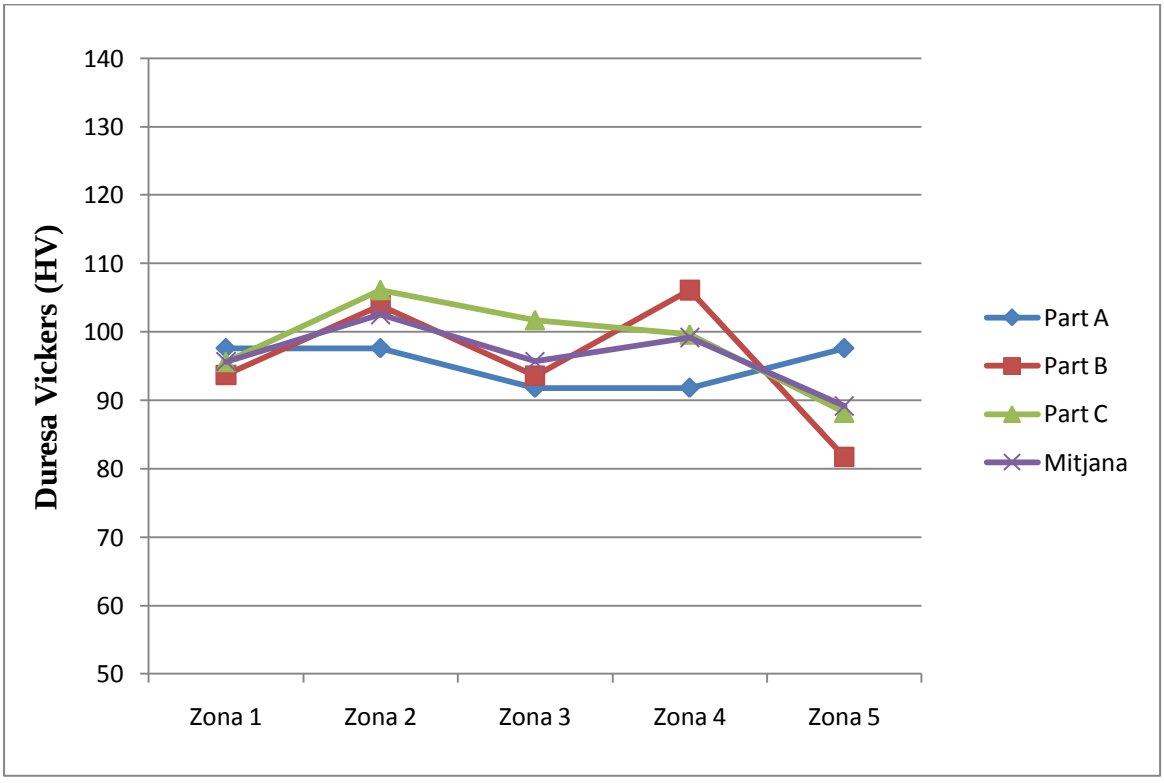


Figura 5.19 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº11 proveta nº2.

Es pot apreciar que hi ha hagut una augment de la duresa respecte la proveta 11-1, ja que en la Figura 5.18 es veu que els valors tot i ser constants oscil·len al voltant dels 95 HV. Per tant, hi ha hagut una disminució uniforme de la duresa en tota la proveta. També es manté constant transversalment tal i com es pot veure representat en la Figura 5.19.

Els valors de la Taula 5.13 corresponen a les dureses obtingudes en la proveta nº3 de la peça.

Taula 5.13 Dureses de la peça nº11 proveta 3. (HV)

	Part A	**Part B**	**Part C**	**Mitjana**	**Desviació estàndard**
Zona 1 (Centre)	92	100	82	**91**	**9**
Zona 2	88	79	98	**88**	**9**
Zona 3	87	90	87	**88**	**2**
Zona 4	96	90	83	**90**	**6**
Zona 5 (Perifèria)	92	85	87	**88**	**4**
Mitjana	**91**	**89**	**87**		
Desviació estàndard	**3**	**8**	**6**		

A continuació es representarà l'evolució que tenen les dureses en la longitud d'extrusió (Figura 5.20) i també l'evolució de les dureses obtingudes des del centre (Zona 1) fins a la perifèria (Zona 5) (Figura 5.21).

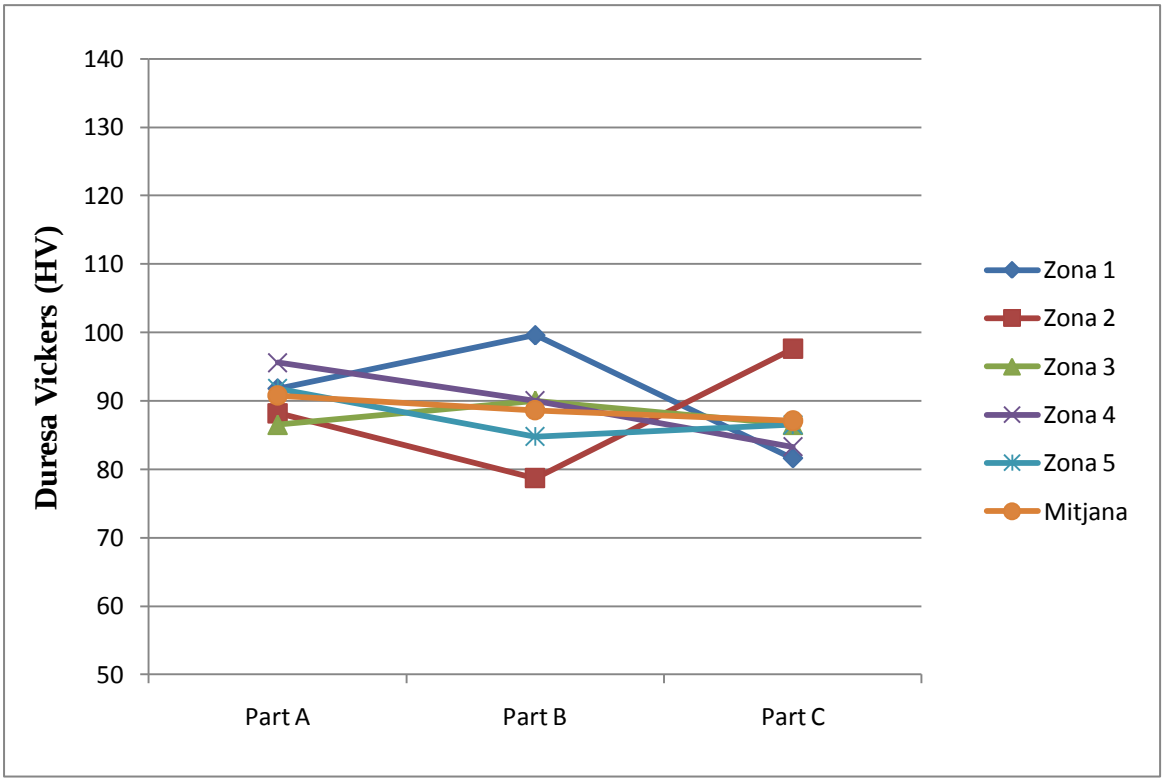


Figura 5.20 Evolució de la duresa longitudinal en la direcció d'extrusió, peça nº11 proveta nº3.

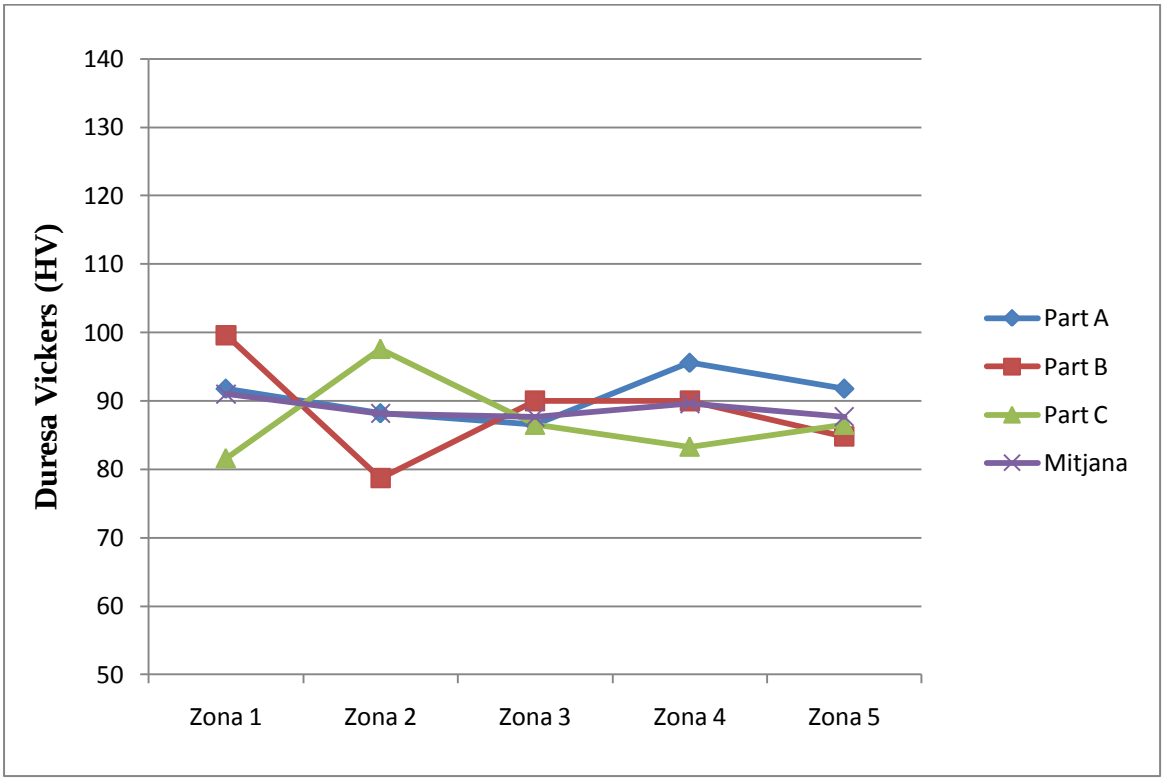


Figura 5.21 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº11 proveta nº3.

En la Figura 5.20, es pot apreciar que la duresa creix sensiblement a mesura que avança l'extrusió.

L'evolució de la duresa des del centre cap a la perifèria és pràcticament constant, tal i com s'observa en els valors mitjans de la Figura 5.21.

Finalment, s'ha representat gràficament l'evolució que ha tingut la duresa en el centre i en la perifèria al llarg de la peça nº11 (Figura 5.22).

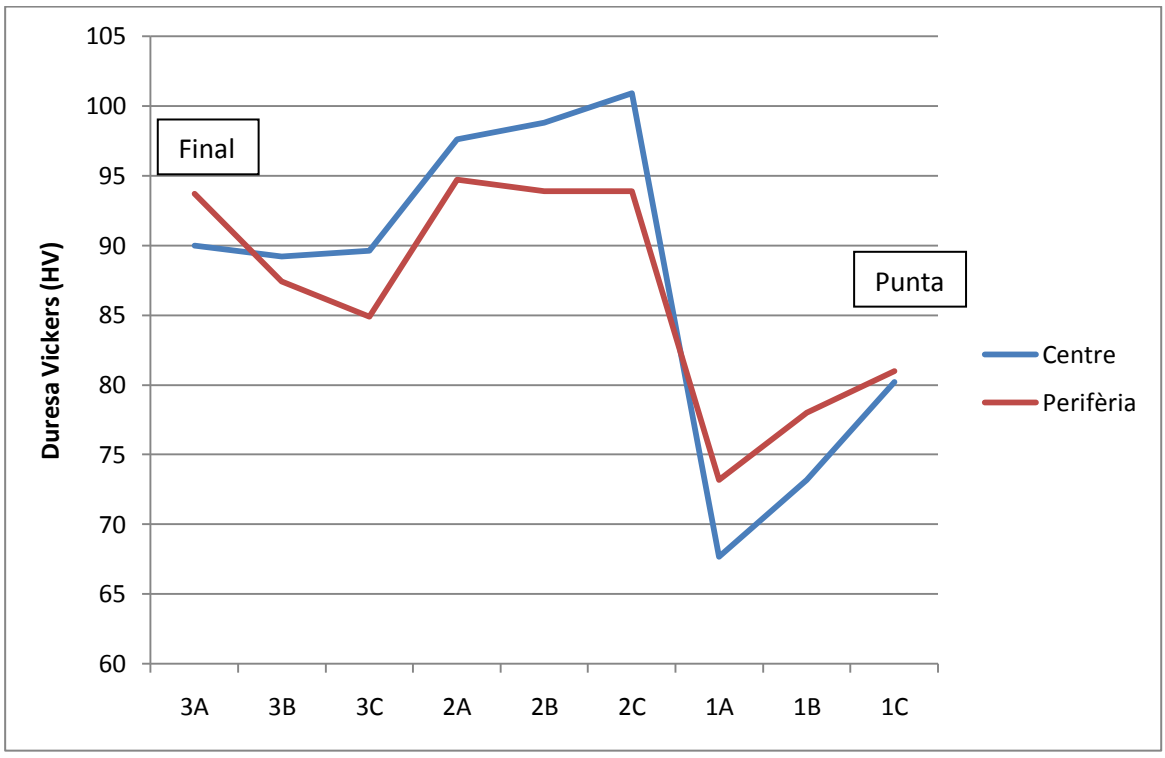


Figura 5.22 Evolució de la duresa mitjana en la longitud total de la peça 11.

Observant el gràfic de la Figura 5.22, es pot afirmar que hi ha hagut un descens molt considerable en el valor de la duresa tant en la zona perifèrica com en la zona central a la fi del tram 1, abans de passar al tram 2.

L'evolució a partir del tram 2 comença a tenir un perfil força irregular, sobretot en la zona perifèrica. Es pot atribuir aquest fet a la gran velocitat d'extrusió, la qual provoca que el risc de patir discontinuïtats de flux tal sigui molt més elevat. Tal i com es pot veure en les micrografies de l'apartat *5.4 Discontinuïtats de flux* Figura 5.38.

Finalment, veient la Figura 5.23 s'observa la disminució de la duresa en funció de la velocitat de pistó. Per l'elaboració del gràfic s'ha agafat la mitjana de les provetes nº3, ja que és en aquestes on es manifesta totalment l'estructura de la thixoextrusió.

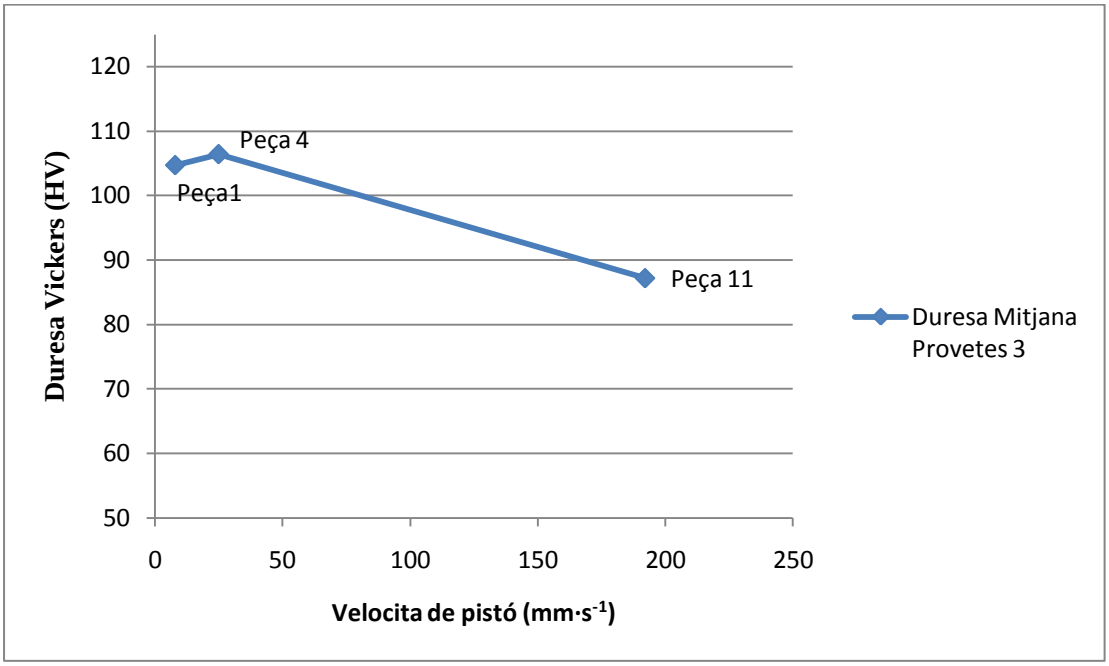


Figura 5.23 Evolució de la duresa en funció de la velocitat d'extrusió.

5.3 Efecte dels paràmetres d'extrusió en la microestructura

En aquest apartat es mostra l'efecte que han tingut els paràmetres d'extrusió en la microestructura de les peces d'assaig. L'objectiu es veure quina deformació ha sofert la microestructura de les peces i veure com ha evolucionat aquesta en la perifèria respecte el centre.

5.3.1 Nomenclatura utilitzada en les micrografies

Les micrografies representades segueixen un model d'acord amb el croquis de la Figura 5.24. Cal destacar que l'estudi de la microestructura de les peces thixoextruïdes s'ha focalitzat en les provetes nº3 de les peces d'estudi, ja que és en aquesta part de la peça on s'aconsegueix entrar en regim. També s'observarà l'evolució de la deformació des de la part A (Perifèria) cap a la part B (Centre).

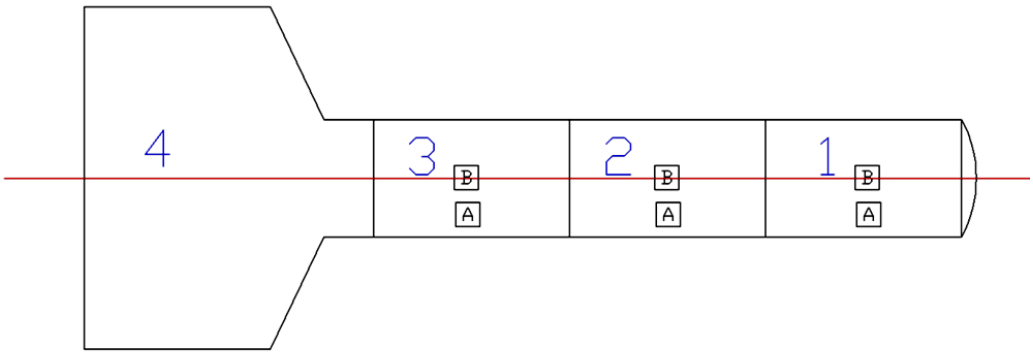


Figura 5.24 Esquema i nomenclatura de les micrografies estudiades.

5.3.2 Micrografies Lingot A357 provinent de colada per gravetat

En la Figura 5.25 es pot veure la microestructura del aliatge A357 en estat brut de colada, prèvia al procés de thixoextrusió.

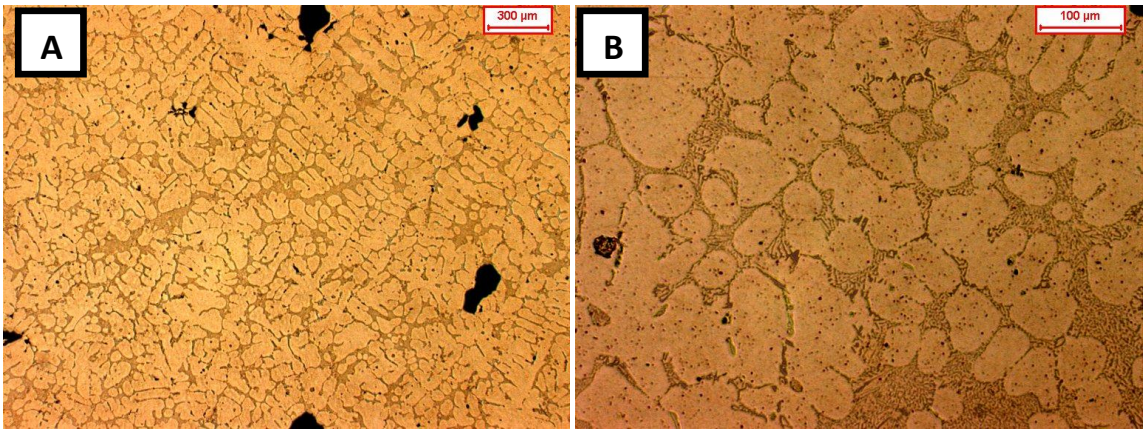


Figura 5.25 Micrografies d'A357 brut de colada a A) 25X. B) 100X.

Segons la Figura 5.25 A, es pot observar que l'estructura és dendrítica, també cal destacar el predomini de la fase α davant del poc eutèctic que les rodeja. Es pot veure una gran porositat, cal dir però, que una vegada finalitzat el procés de thixoextrusió no hi trobem porositat en el posterior anàlisi microestructural.

En la Figura 5.25 B al tenir més augments, es pot veure que l'eutèctic és poc groller i es pot observar el predomini de la fase α sobre la matriu d'eutèctic.

5.3.3 Micrografies A357 escalfat a 570 ºC

Per veure l'evolució que ha tingut la microestructura en el procés d'escalfament, s'ha estudiat la microestructura de la proveta nº4. Aquesta no ha passat per la zona d'estricció de la matriu però ha sofert una deformació degut al pistó. Ja que el diàmetre inicial previ al procés de thixoextrusió era de 30mm i un cop finalitzat el procés el diàmetre és de 35mm. En la Figura 5.26 es veu la part central escalfada a 570ºC.

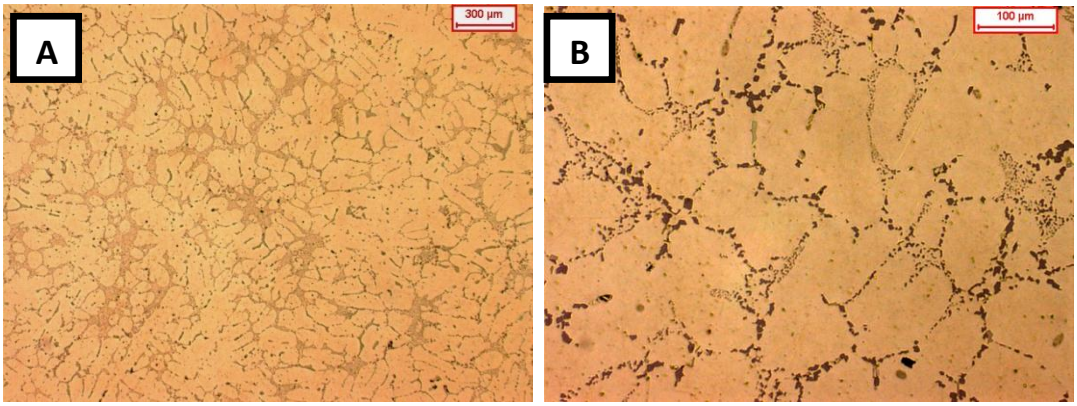


Figura 5.26 Micrografies d'A357 de la zona central del lingot escalfat a 570ºC a A) 25X. B) 100X.

En la Figura 5.27 es veu la part de la perifèria escalfada a 570ºC.

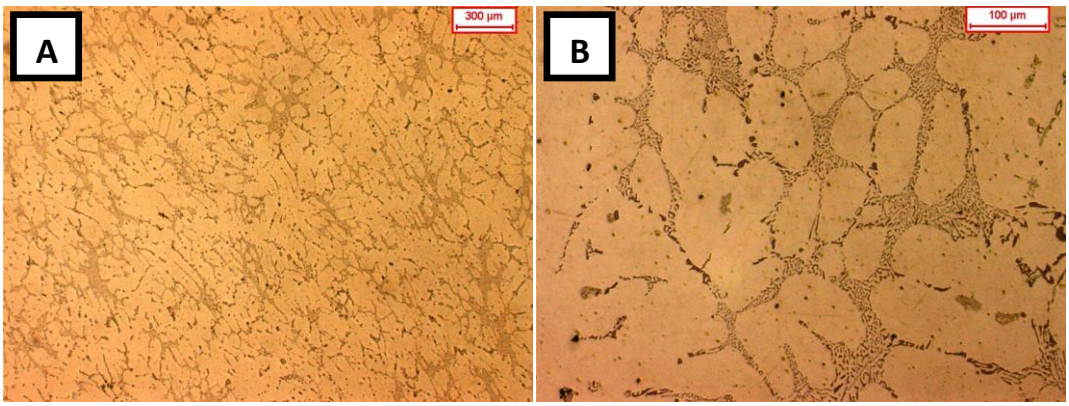


Figura 5.27 Micrografies d'A357 de la zona perifèrica del lingot escalfat a 570ºC a A) 25X. B) 100X.

Les mostres pertanyents a les micrografies de les Figures 5.26 i 5.27 tot i que han sofert un procés de escalfament, al comparar-les les micrografies de la Figura 5.25 es pot apreciar que no hi hagut un creixement de grà. Això succeeix perquè l'escalfament del lingot a 570ºC s'ha realitzat amb un forn d'inducció, gràcies al qual es poden sotmetre els lingots a escalfaments molt ràpids i uniformes que fan que el grà no tingui temps de créixer.

També es poden veure petites diferències entre la zona perifèrica i la zona central, aquestes es poden apreciar sobretot en les micrografies 5.26 A i 5.27 A, en elles es veu que en la part perifèrica de lingot les dendrites estan més deformades i aplanades a causa de la fricció que hi hagut entre el lingot i les parets del motlle.

5.3.4 Micrografies A357 escalfat a 560ºC

En la Figura 5.28 es veu la part central d'un lingot escalfat a 560ºC.

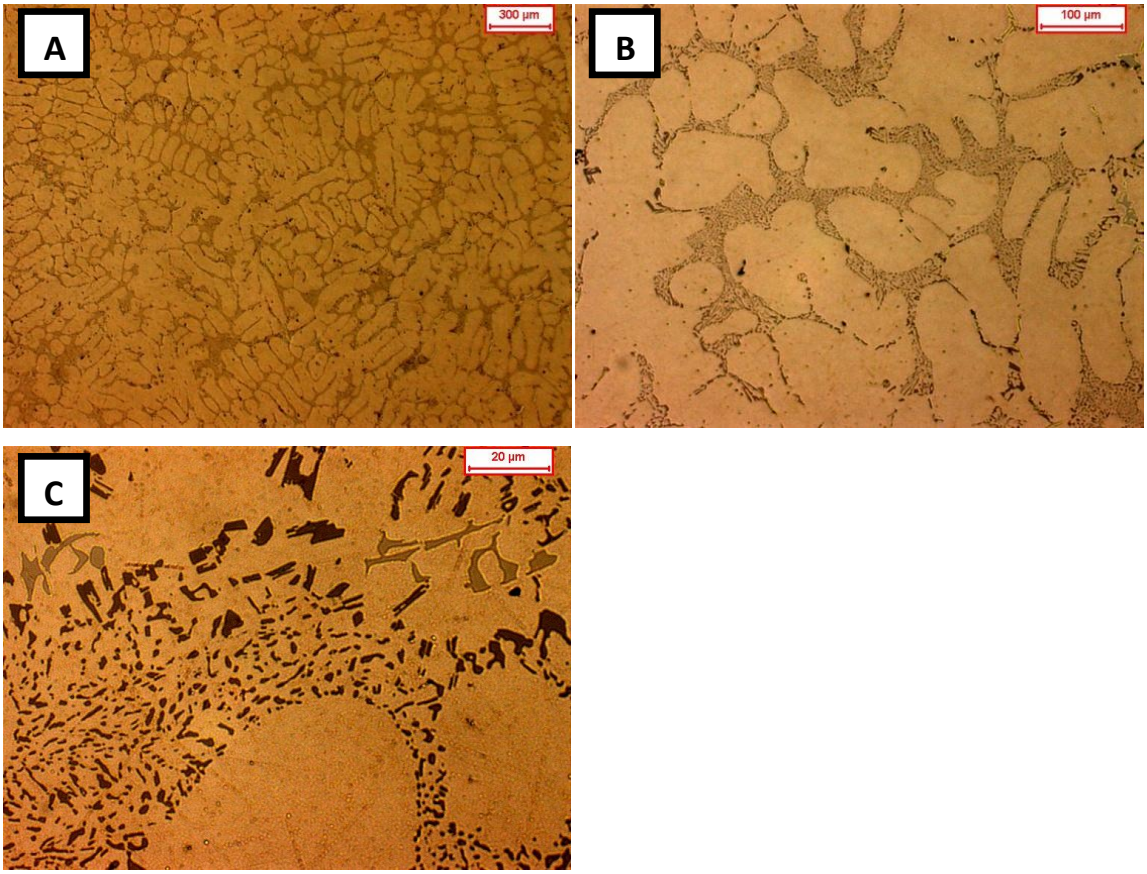


Figura 5.28 Micrografies d'A357 de la zona central del lingot escalfat a 560ºC a A) 25X. B) 100X. C) 500X.

En la Figura 5.29 es veu la part perifèrica d'un lingot escalfat a 560ºC.

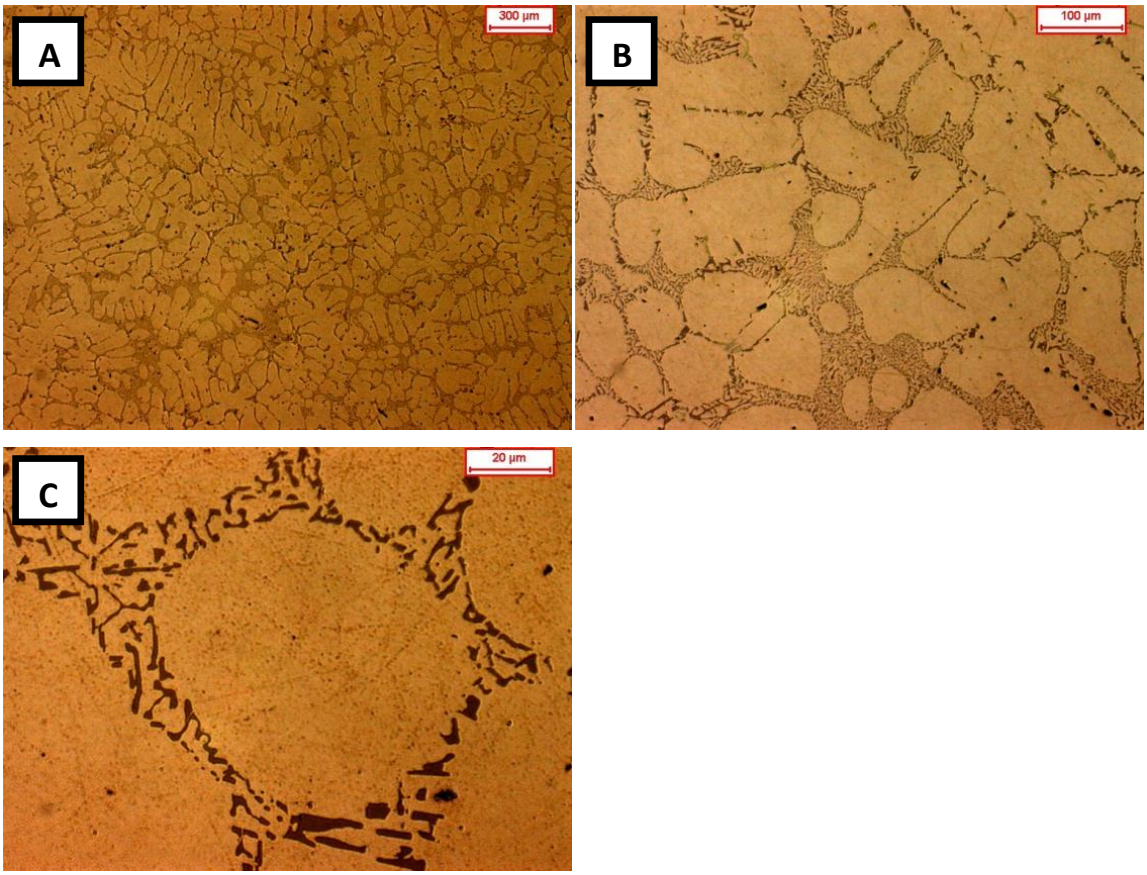


Figura 5.29 Micrografies d'A357 de la zona perifèrica del lingot escalfat a 560ºC a A) 25X. B) 100X. C) 500X.

Tal i com s'ha dit anteriorment, les mostres pertanyents a les micrografies de les Figures 5.28 i 5.29 tot i que han sofert un procés de escalfament, al comparar-les les micrografies de la Figura 5.25 es pot apreciar que no hi hagut un creixement de gra. Això succeeix perquè l'escalfament del lingot a 560ºC també s'ha realitzat amb un forn d'inducció.

Comparant les microestructures dels lingots escalfats a 570ºC i 560ºC previs al procés d'extrusió s'observa que no hi ha cap diferència visible. Tenen una estructura pràcticament idèntica, ja sigui en el tipus de formació dendrítica com en la forma i en la distribució del eutèctic que les envolta (Figures 5.26A i 5.28A).

5.3.5 Micrografies de la Peça Thixoextruida nº1

Tal com s'ha dit anteriorment, l'estudi metal·logràfic s'ha centrat en l'estudi de la part més deformada pel procés de thixoextrusió, les provetes nº 3.

Taula 5.14 Paràmetres d'extrusió peça nº1

Test	Peça	Massa (g)	Temp. (ºC)	Vel. de pistó ($mm \cdot min^{-1}$)	Vel. de pistó ($mm \cdot s^{-1}$)	Vel. d'Extrusió. ($m \cdot min^{-1}$)	Càrrega (kN)	Pressió (MPa)
6C	1	83,45	570	500	8	4	530	551

La Figura 5.30 mostra les micrografies a diferents augments de la zona perifèrica (Part A), de la proveta nº3 de la peça 1.

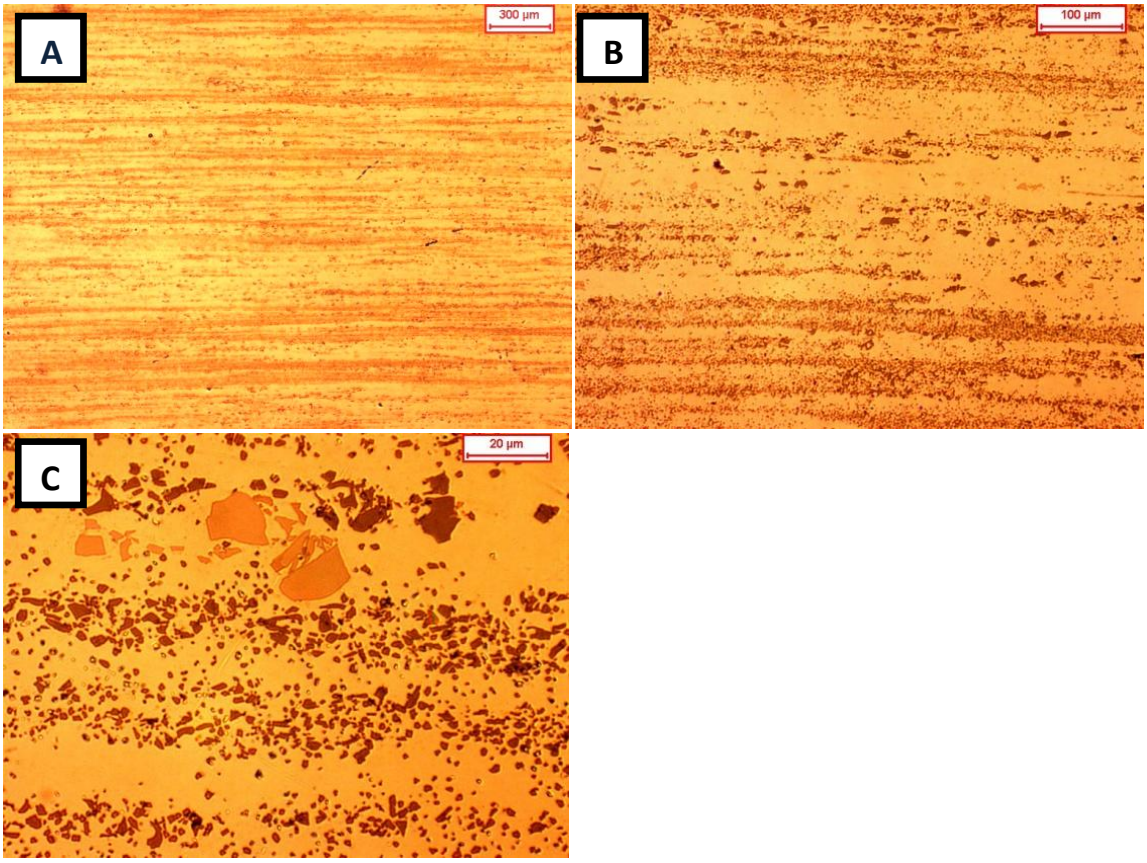


Figura 5.30 Micrografies de la Peça nº1 proveta nº3 part A (perifèria) a A) 25X. B) 100X. C) 500X.

La Figura 5.31 mostra les micrografies de la proveta nº3 de la peça nº1 de la zona central (part B) de la peça.

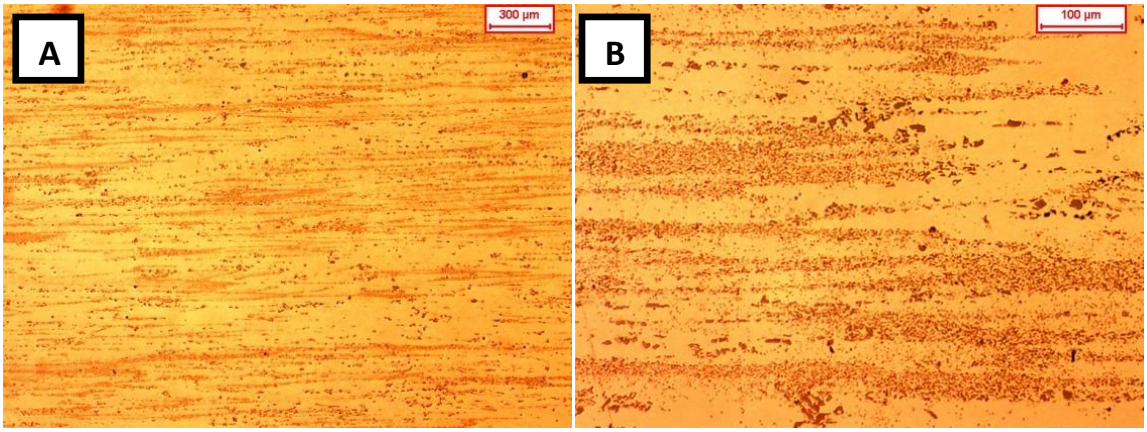


Figura 5.31 Micrografia de la Peça nº1 proveta nº3 part B (centre) a A) 25X. B) 100X.

En aquestes micrografies es veu molt clarament la deformació soferta en el procés de thixoextrusió, ja no s'observa la estructura tan clarament dendrítica que es veia representada en les micrografies prèvies al procés d'extrusió. L'eutèctic ha quedat orientat en la direcció de l'extrusió (Figura 5.30A) i la fase α totalment deformada s'observa en formes el·líptiques en el centre de la proveta (Figura 5.31).

També es pot veure alguna diferència entre la deformació soferta en la zona perifèrica respecte la zona central, si s'observa la Figura 5.31 es poden veure grans d'α en forma el·líptica (d'origen globular), que indiquen que la deformació ha sigut més feble en el centre.

5.3.6 Micrografies de la Peça Thixoextruida nº4

Taula 5.15 Paràmetres d'extrusió peça nº4

Test	Peça	Massa (g)	Temp. (ºC)	Vel. de pistó ($mm \cdot min^{-1}$)	Vel. de pistó ($mm \cdot s^{-1}$)	Vel. d'Extrusió. ($m \cdot min^{-1}$)	Càrrega (kN)	Pressió (MPa)
9C	4	83,91	570	1500	25	13	310	322

La Figura 5.32 mostra les micrografies de la proveta nº3 de la peça nº4 a diferents augments, ambdues micrografies són de la zona perifèrica (part A).

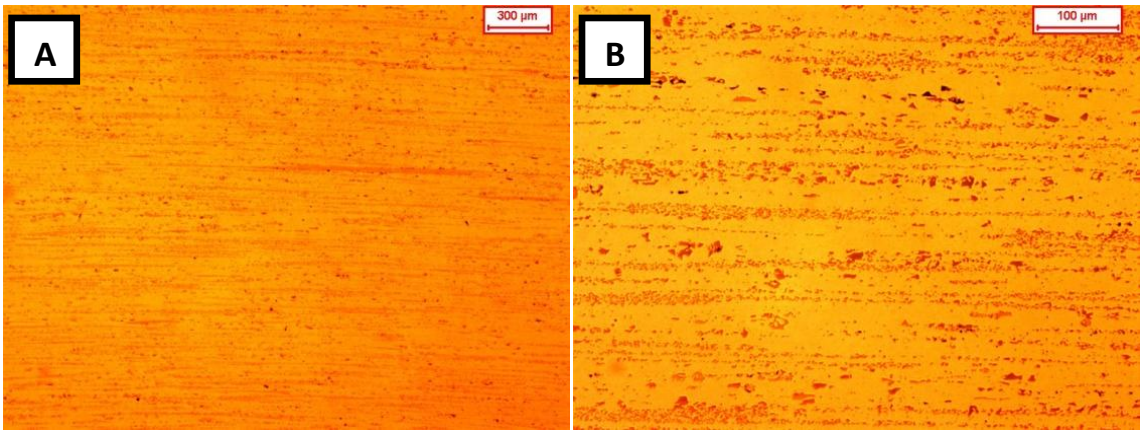


Figura 5.32 Micrografia Peça nº4 proveta nº3 part A (perifèria) a A) 25X. B) 100X.

La Figura 5.33 mostra les micrografies de la proveta nº3 de la peça nº4 de la zona central (part B) de la peça.

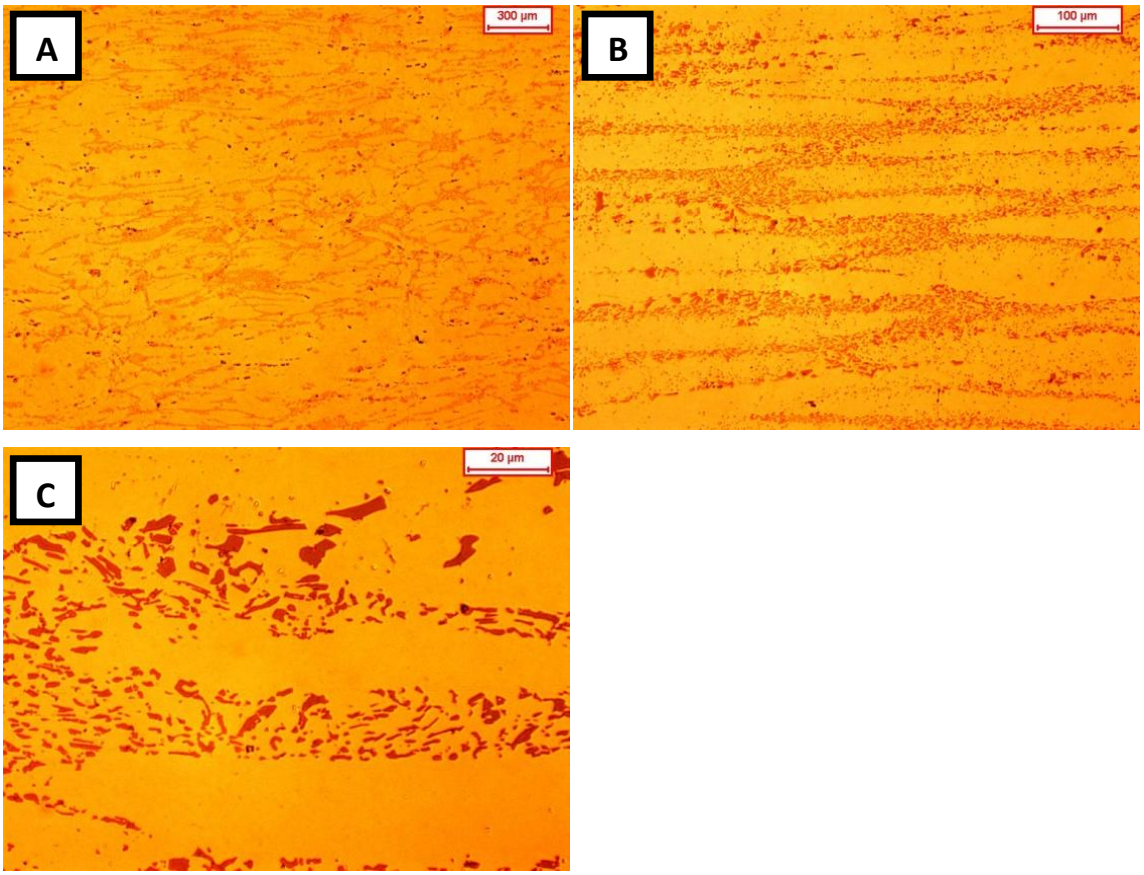


Figura 5.33 Micrografies de la Peça nº4 de la proveta nº3 part B (centre) a A) 25X. B) 100X. C) 500X.

En la peça 4 hi hagut un augment de la velocitat de pistó, això implica que el procés d'extrusió ha necessitat menys càrrega. Per tant, la deformació teòricament tindria que ser més baixa, principalment en el centre de la proveta (Zona B), i tal com es veu en les Figura 5.33 A i B, a més, podem veure que hi ha hagut una deformació molt menor en comparació amb la peça 1 (Figura 5.30A). La part perifèrica segueix mostrant però, un nivell més alt de deformació, degut a la fricció sotmesa entre aquesta zona de la peça i la matriu en el moment de l'extrusió.

En les Figures 5.32 i 5.33, s'observa una estructura més o menys globular d'α a la part central en contra de la perifèria totalment deformada. A més augments com s'ha vist anteriorment, s'observa que l'eutèctic mostra més uniformitat i finor a la part central. Pel que fa als grans d'α, en la zona central sobretot, tenen origen globular.

5.3.7 Micrografies de la Peça Thixoextruida nº11

Taula 5.16 Paràmetres d'extrusió peça nº11

Test	Peça	Massa (g)	Temp. (ºC)	Vel. de pistó ($mm \cdot min^{-1}$)	Vel. de pistó ($mm \cdot s^{-1}$)	Vel. d'Extrusió. ($m \cdot min^{-1}$)	Càrrega (kN)	Pressió (MPa)
4C	11	81,96	560	11500	192	98	210	221

La Figura 5.34 mostra les micrografies de la proveta nº3 de la peça nº11 a diferents augments, ambdues micrografies són de la zona perifèrica (Part A).

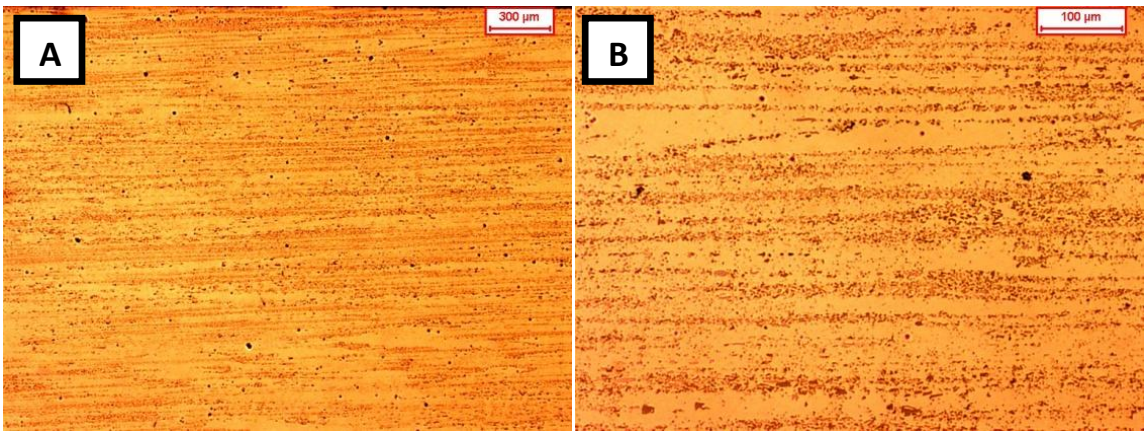


Figura 5.34 Micrografies de la Peça nº11 de la proveta nº3 part A (perifèria) a A) 25X. B) 100X.

La Figura 5.35 mostra les micrografies de la proveta nº3 de la peça nº11 de la zona central (part B) de la peça.

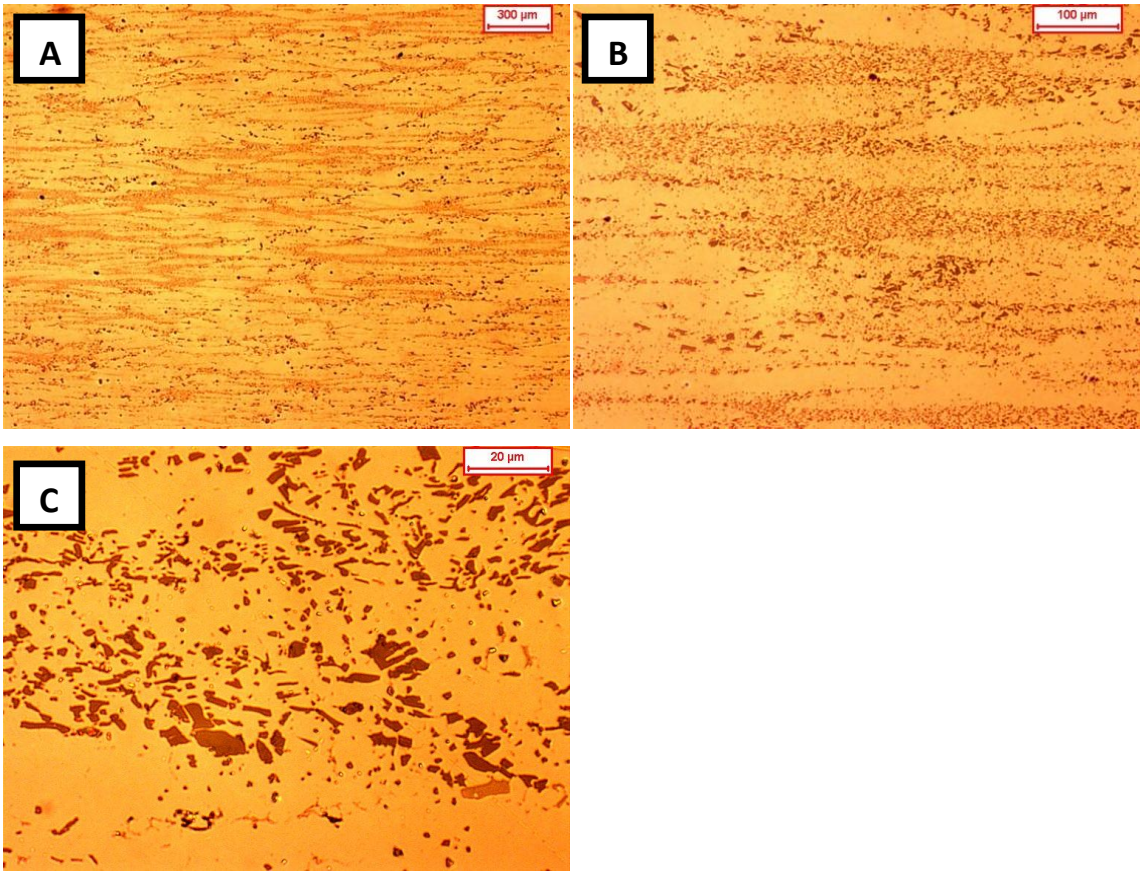


Figura 5.35 Micrografies de la Peça nº11 de la proveta nº3 part B (centre) a A) 25X. B) 100X. C) 500X.

La proveta nº11 s'ha conformat amb una gran velocitat d'extrusió. Això provoca que hi hagi un descens de la càrrega i per tant que la deformació sigui inferior. Si s'observa la Figura 5.34 es pot arribar a veure els grans d'α amb tendència globular en la zona perifèrica. En la zona central s'observa ja d'una manera molt més clara aquest grans d'α en forma el·líptica (Figura 5.35A i B). L'eutèctic sembla més uniforme també que les altres dues peces.

5.4 Discontinuïtats de flux

En l'apartat 5.2, el qual fa referència a l'evolució dels valors de duresa Vickers de les provetes, es van trobar una sèrie d'irregularitats bastant notòries pel que fa alguns valors de duresa en algunes zones de les diferents provetes.

Per això es va optar per estudiar minuciosament aquestes zones, per poder trobar algun defecte que expliqués aquest comportament en les zones. Si s'observen els gràfics que representen l'evolució de la duresa mitjana longitudinal de les peces (Figures 5.8, 5.15 i 5.22) es pot veure que hi ha unes davallades del valor de la duresa en el pas del Tram 2 cap el Tram 1. Concretament aquestes s'han concentrat en el pas de 2C cap a 1A.

Una primera hipòtesis va ser la de buscar, mitjançant un anàlisis metal·logràfic, en aquestes zones de les peces discontinuïtats de flux en el procés de thixoextrusió que poguessin explicar aquestes irregularitats en el valors de duresa. Una elevada (no adequada) velocitat d'extrusió és la causa principal que provoca aquest defecte en la conformació.

5.4.1 Peça Thixoextruida nº1

Analitzant la zona afectada de la peça nº1 no s'observa grans problemes de discontinuïtat de flux. Es pot veure però una petita zona sense eutèctic en la Figura 5.36A per la presencia d'una dendrita molt gran. La velocitat relativament baixa provoca que la viscositat del flux no disminueixi i d'aquesta manera minimitzar les turbulències que poden causar talls o discontinuïtats en el flux.

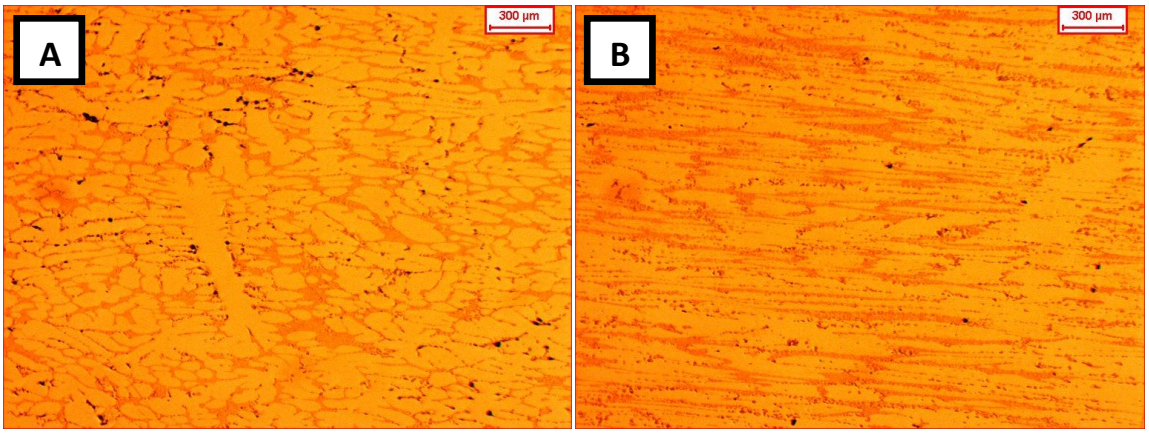
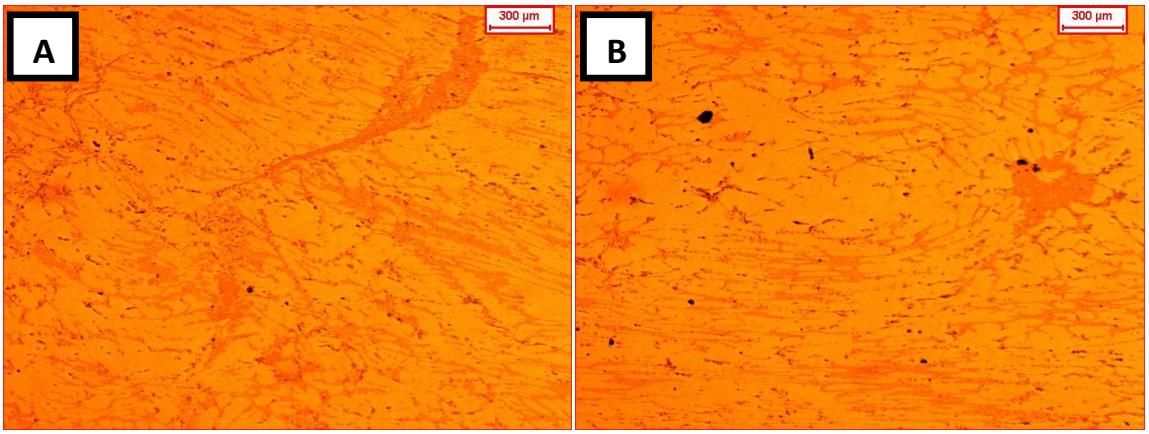


Figura 5.36 Micrografies de la Peça nº1 A) Proveta nº1 part A (perifèria) 25X i B) Proveta nº2 part B (centre) 25X.

5.4.2 Peça Thixoextruida nº4

L'anàlisi de la zona afectada de la peça nº4 mostra clars símptomes de discontinuïtats de flux en les micrografies de la Figura 5.37. Al conformar-se amb una velocitat més elevada ha sofert unes discontinuïtats de flux mes representatives, ja que l'augment de la velocitat provoca una disminució en la viscositat del caldo, facilitant el risc de discontinuïtats de flux. També cal destacar que en la Figura 5.37 B i D s'observa que en les zones d'acumulació d'eutèctic es troben xuclets d'una mida important, deguts a la contracció de l'eutèctic en la solidificació.



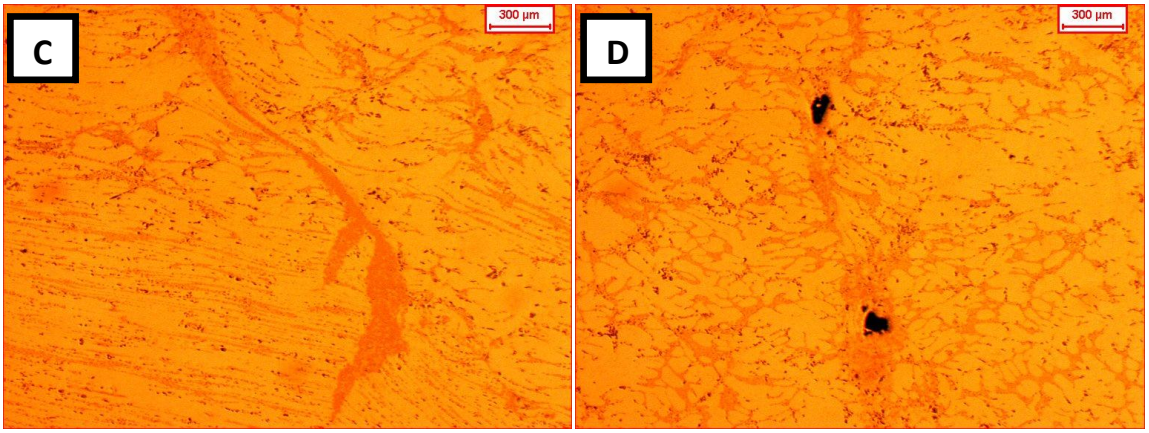


Figura 5.37 Micrografies de la Peça nº11 A) Proveta nº1 part A (perifèria) 25X, B) Part 1 Zona B 25X, C) Part 2 Zona A 25X i D) Part 2 Zona A 25X.

5.4.3 Peça Thixoextruida nº11

L'anàlisi de la zona afectada de la peca nº11 no mostra tants problemes com els de la peça nº4 tot i tenir una velocitat molt més elevada. Aquest fet es pot atribuir a que la peça nº11 s'ha conformat a una temperatura menys elevada (560ºC), el que provoca que hi hagi menys fase líquida en el procés de thixoextrusió i per tenir un caldo més viscós, així no presenta tants problemes de discontinuïtat. Tot i que si s'observa la Figura 5.38A es poden veure microxuclets concentrats en les fronteres de grà on predomina l'eutèctic.

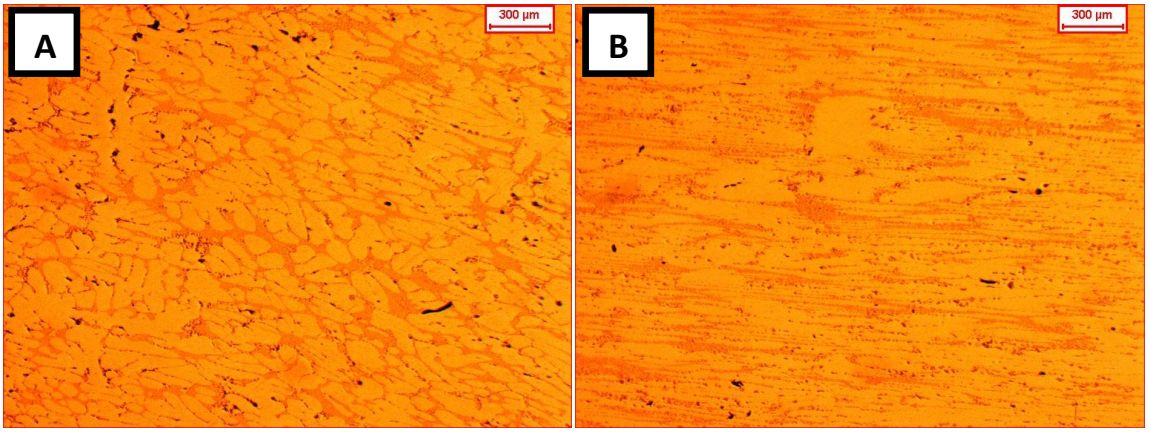


Figura 5.38 Micrografies de la Peça nº11 A) Proveta nº1 part A (perifèria) 25X i B) Proveta nº2 part A (perifèria) 25X.

6. Conclusions.

- Les peces estudiades en el present projecte conformades en una temperatura de 570ºC amb una velocitat de pistó de 8 mm/s i 25mm/s mostren l'estructura pròpia de la thixoextrusió a 45 mm del inici de la extrusió. Les peces conformades a 560ºC amb una velocitat de pistó de 192 mm/s mostren també l'estructura pròpia de la thixoextrusió a 45 mm del inici de la extrusió.

- S'observa que l'estabilització del procés de thixoextrusió s'aconsegueix a partir dels 45 mm de material extrusionat.

- Tot i que hi hagut un elevat escalfament en el procés de conformació, no hi hagut un creixement de grà degut a la rapidesa i homogeneïtat de l'escalfament per inducció.

- La deformació sempre és més gran a la perifèria de les peces degut a la fricció existent entre el material i la matriu en el procés d'extrusió.

- En les zones centrals de les provetes es troba la microestructura amb tendència més globular , degut al ràpid escalfament per inducció.

- L'eutèctic sempre està orientat en la direcció de l'extrusió tant en les zones amb grans esferoïdals com en les zones on el grà es troba completament deformat.

- En la zona perifèrica s'observa més quantitat d'eutèctic però amb un repartiment més irregular i groller. Això es deu a que durant el procés de thixoextrusió la fase líquida té tendència ha anar cap a la perifèria, degut a la pressió exercida per la fase sòlida (fase α) sense tenir temps a una reordenació.

- Les peces conformades amb una velocitat de pistó més elevada mostren menys deformació en la part central de la proveta. La perifèria però, manté sempre un alt nivell de deformació tant en peces amb alta o baixa velocitat de pistó. Això és degut a la fricció entre el material i la matriu.

- Una velocitat de pistó massa elevada provoca discontinuïtats en el flux. Per a thixoextrusions realitzades a 570ºC la velocitat de pistó ha de ser menor a 25 mm/s i per a thixoextrusions realitzades a 560ºC la velocitat d'extrusió ha de ser menor de 192 mm/s. La thixoextrusió a 560ºC afavoreix a la reducció de problemes de discontinuïtat de flux al haver-hi més fracció sòlida (0.96) en el procés de conformació, podent augmentar un ordre de magnitud les velocitats de pistó.

- Les discontinuïtats de flux causen irregularitats en la distribució de l'eutèctic, zones amb acumulació d'eutèctic i zones molt pobres d'eutèctic provocant dispersions dels valors de duresa.

- En les zones d'acumulació d'eutèctic s'han trobat grans xuclets degut a l'alt nivell de contracció que pateix la fase líquida en la solidificació.

7. Perspectives.

Aquest projecte és una petita part dels possibles estudis de futur que poden optimitzar el conformat de peces per thixoextrusió. Durant la seva realització s'ha observat tot un conjunt de noves possibilitats d'estudi descrites en els següents punts:

- Estudi de propietats de mecàniques, tals com la ductilitat i la resistència a la tracció.
- Estudi dels compostos intermetàl·lics formats en el procés.
- Aplicació de tractaments tèrmics per veure quin efecte tenen sobre les peces thixoextruïdes.
- Fer estudis de recristal·lització per poder observar el grau de deformació aplicat i la mida real dels grans.
- Aplicació d'un sistema d'escalfament en la matriu que permetés variar i controlar la temperatura en la zona de l'estricció.
- Aplicació de recobriments resistents al desgast i a la temperatura, a les matrius.
- Thixoextrusió d'altres aliatges d'alumini de foneria més econòmics, com ara el EN AC-46500, per exemple.
- Thixoextrusió d'altres materials com acers, aliatges de magnesis, etc.

8. Gestió Mediambiental

Aquest projecte està directament relacionat amb la cura del medi ambient. No només per la importància que té treballar amb un metall altament reciclable i no contaminant com és l'alumini, sinó perquè en l'elaboració del projecte s'ha aconseguit produir peces thixoextruïdes partint d'un aliatge convencional. Aquest fet provoca una gran estalvi energètic i econòmic, ja que s'elimina tot el procés de produir lingots previs amb estructura globular per altres tècniques de SSM.

En l'elaboració del projecte sempre s'ha intentat minimitzar al màxim el material utilitzat. Per exemple, en el procés de preparació de les mostres metal·logràfiques s'ha treballat sempre de manera molt eficient, tallant les peces en la mida mínima requerida, utilitzant la quantitat justa d'abrasius i utilitzant la polidora amb la màxima quantitat de peces alhora i el temps adequat. En aquests processos s'han creat diversos residus com ara els abrasius i el encenalls del mecanitzat, els abrasius són reciclats segons la normativa ISO 14000 i els encenalls són portats per una empresa externa que s'encarrega del seu reciclatge futur.

Durant l'elaboració del projecte no s'ha imprès pràcticament cap document, ja que en tot moment s'ha treballat en documents virtuals via correu electrònic.

Per tant el impacte ambiental que ha tingut el projecte ha sigut mínim en tots els aspectes.

9. Pressupost

Concepte	Cost Màquina €/h	Cost Tècnic €/h	Temps Màquina h	Temps Tècnic h	Cost Total €
Documentació	-	39	-	20	780
Preparació de les mostres metal·logràfiques*	90	39	25	25	4485
Microscopia óptica	35	39	10	10	1465
Assaigs de dureses	35	39	12	12	1584
Redacció del Projecte	-	39	-	180	7020
Subtotal					15334 €
IVA 18%					2760,12 €
TOTAL					**18094,12** €

* El concepte "Preparació de les mostres metal·logràfiques" inclou el tallat de provetes el polit i l'embotició.

10. Agraïments

La realització d'aquest projecte no hagués estat possible sense la col·laboració d'un conjunt de persones les quals des d' aquí vull donar-hi les gràcies per tota l'ajuda, facilitats i suport que m'han donat durant tot el procés de realització.

En primer lloc agrair a tots els membres del Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica per la seva col·laboració ja sigui de manera directa o indirecta:

- Sr. Manel Campillo Betsebé.
- Dra. Maite Baile.
- Sr. Sergi Menargues Muñoz.
- Dr. Antoni Forn Alonso
- Sra. Eulàlia Nogués Boada
- Sr. Miquel Punset Fusté

També agrair als meus companys de Universitat per donar-me un cop de mà sempre que l'he necessitat. Als amics i família per donar-me suport i ànims en els moments difícils. Donar també un especial agraïment als meus pares per tot el suport i ànims donats des del primer dia.

Per últim, donar les gràcies a l'Empresa Robert Bosch España Castellet i en especial al meu tutor de pràctiques, Sr. Martínez, per donar-me totes les facilitats per combinar l'elaboració del projecte amb la realització de les pràctiques d'Empresa.

11. Bibliografia

[1] W. D. CALLISTER, Jr. "Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales". Ed. Reverté, S.A. (1995).

[2]W. F. SMITH "Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales". Ed. McGraw Hill. (1993).

[3] C. REBOLLERO, R. ROSIQUE JIMÉNEZ, J. "Ciencia de materiales". Ediciones Pirámide (1987).

[4] DAVIS J.R., "Aluminium and aluminium alloys". ASM International Handbook Committee (1993).

[5] D.G ALTENPOHL, "Technology, applications, and environment of Aluminum Association Minerals" Metals & Material Society, (1998).

[6] MATERIAL PROPERY DATA (WEB ONLINE) [http://www.matweb.com/index]

[7] A.FORN, G.VANEETVELD, J.C.PIERRET, S.MENARGUES, M.T. BAILE, M.CAMPILLO, A.RASSILI "Thixoextrusion of A357 aluminium alloy" TNMSC (2010)

[8] M.T.BAILE, "Estudio de la conformación de componentes de Aluminio-Silicio en estado semisólido". Tesis Doctoral. (2005)

[9] M.C FLEMINGS., "Rheology and structure of some aluminium base composites, Proceedings of 2nd Int. Conf. on semi-solid alloys and composites" Ed S.B. Brown and M.C. Flemings, TMS, Massachusetts (USA), (1992).

[10] J.VALER, J. M. RODRIGUEZ, J. J. URCOLA, "Strength an toughness of semi-solid processed hypereutectic Al-Si alloys", Scripta Materialia, (1996).

[11] M.C. FLEMINGS, MARTINEZ-AYERS R.A., A.M. FIGUEREDO, J.A. YURKO, US Patent. Nº 20020096231 [SSRTM], 2002.

[12] M. CAMPILLO, M. T. BAILE, E. MARTÍN, A. FORN. "Aplicación de tratamientos T5 y T6 a la aleación de aluminio L-2630 conformada por SSR". XI Congreso de Tratamientos Térmicos y de Superficies (TRATERMAT) (2008).

[13] K. P.YOUNG, D. E.TYLE, H. P.CHESKIS, W. G.WATSON, U.S. Patent Nº 4.482.012, (1984).

[14] Material subministrat pel Centre de Disseny d'Aliatges Lleugers i Tractaments de Superfície (CDAL).

[15] E. J.OBERG, F. D. HORTON, L. HOLBROOK H. H. RYFFEL, "Machinery's Handbook" (26ª edición), New York: Industrial Press Inc. (2000).

[16] Associación Nacional de Extruidores de Perfiles de Aluminio. ANEXPA.

[17] T. DROZDA, C.WICK, R. BAKERJIAN, R.F. VEILLEUX, L. PETRO, "Tool and manufacturing engineers handbook: Forming."

[18] F.RIKHTEGAR, M. KETABCHI. "Investigation of mechanical properties of 7075 Al alloy formed by forward thixoextrusion process". Material and Desing (2010).

[19] S.K. Kim, Y.Y. Yoon, H.H. Jo. "*Novel thixoextrusion process for Al wrought alloys". Journal of Materials Processing Technology* (2007) 187-188. 354-357.

[20] G. Calle Trujillo, *"Guía de laboratorio, Ensayo Dureza Vickers"* UTP

12. Índex de taules i gràfics

Taula 3.1 Principals aliatges de forja ..... Pàg. 12

Taula 3.2 Principal d'aliatges d'emmotllament: ..... Pàg. 13

Taula 3.3. Composició química teórica de l'aliatge A357.0 en % en pes..... Pàg. 13

Taula 3.4 Composició química experimental de l'aliatge A357.0 en % en pes. ..... Pàg. 13

Taula 3.5. Rang de temperatures del principals materials metàl·lics en el procés d'extrusió en calent ..... Pàg. 30

Taula 4.1. Composició química experimental de l'aliatge A357.0 en % en pes. ..... Pàg. 37

Taula 4.2 Paràmetres d'extrusió peça nº1. ..... Pàg. 40

Taula 4.3 Paràmetres d'extrusió peça nº4. ..... Pàg. 41

Taula 4.4 Paràmetres d'extrusió peça nº11. ..... Pàg. 41

Taula 4.5 Paràmetres d'extrusió peces nº1,4 i 11. ..... Pàg. 42

Taula 4.6.: Paràmetres del procés d'embotició. ..... Pàg. 44

Taula 4.7: Procés de polit. ..... Pàg. 46

Taula 4.8.: Paràmetres del assaig de duresa Vickers. ..... Pàg. 48

Taula 5.1. Dureses A357 provinent de colada per gravetat (HV). ..... Pàg. 51

Taula 5.2 Paràmetres d'extrusió peça nº1. ..... Pàg. 51

Taula 5.3 Dureses de la peça nº1 proveta 1. (HV) ..... Pàg. 52

Taula 5.4 Dureses de la peça nº1 proveta 2. (HV) ..... Pàg. 54

Taula 5.5 Dureses de la peça nº1 proveta 3. (HV) ..... Pàg. 56

Taula 5.6 Paràmetres d'extrusió peça nº4. ..... Pàg. 59

Taula 5.7 Dureses de la peça nº4 proveta 1. (HV) ..... Pàg. 59

Taula 5.8 Dureses de la peça nº4 proveta 2. (HV) .....Pàg. 61

Taula 5.9 Dureses de la peça nº4 proveta 3. (HV) .....Pàg. 63

Taula 5.10 Paràmetres d'extrusió peça nº11. .....Pàg. 66

Taula 5.11 Dureses de la peça nº11 proveta 1. (HV) .....Pàg. 66

Taula 5.12 Dureses de la peça nº11 proveta 2. (HV)..... Pàg. 68

Taula 5.13 Dureses de la peça nº11 proveta 3. (HV) .....Pàg. 70

Taula 5.14 Paràmetres d'extrusió peça nº1 .....Pàg. 78

Taula 5.15 Paràmetres d'extrusió peça nº4 .....Pàg. 80

Taula 5.16 Paràmetres d'extrusió peça nº11 .....Pàg. 82

Figura 3.1 Esquema dels processos de Thixoforming..... Pàg. 15

Figura 3.2 Esquema del procés thixoforging envers thixocasting ..... Pàg. 19

Figura 3.3 Microestructura d'un aliatge conformat per Thixocasting .....Pàg. 20

Figura 3.4 Procés del control de temperatura per aconseguir l'estructura no dendrítica ....Pàg. 21

Figura 3.5 Procés Rheocasting des de la fusió del liquido fins la injecció. .....Pàg. 21

Figura 3.6 Procés Sub Liquidus Casting. .....Pàg. 22

Figura 3.7 A) Estació IDRA per SSR. B) Esquema del procés SSR. .....Pàg. 23

Figura 3.8 Procés de Thixoforging. .....Pàg. 24

Figura 3.9 Esquema del procés d'extrusió. .....Pàg. 25

Figura 3.10 Esquema del procés d'extrusió directe. .....Pàg. 27

Figura 3.11 Extrusió indirecte (massís). .....Pàg. 28

Figura 3.12 Extrusió indirecte (buit). ..... Pàg. 28

Figura 3.13 Esquema del procés d'extrusió indirecte. ..... Pàg. 28

Figura 3.14 Esquema del procés d'extrusió hidrostàtica. ..... Pàg. 29

Figura 3.15 A) Contenidor i matriu tancada. B) Matriu oberta. ..... Pàg. 32

Figura 3.16. Evolució de la fracció d'estat líquid a estat sòlid en funció de la temperatura. . ..... Pàg. 33

Figura 3.17 Reducció per pas en el procés d'extrusió. ..... Pàg. 33

Figura 3.18. Constants d'extrusió d'alguns elements metàl·lics en funció de la temperatura ..... Pàg. 35

Figura 3.19. Exemple de cercle circumscrit en una secció d'extrusió. ..... Pàg. 35

Figura 3.20. A) Imatge del defecte Chevron B) Microxuclets en zona eutèctica. ... Pàg. 36

Figura 4.1 Lingot d'Alumini A357.0 ..... Pàg. 37

Figura 4.2 Lingot preparat pel procés de thixoextrusió. Ø30x45 mm. ..... Pàg. 38

Figura 4.3. A) Premsa AP&T B) Zona d'inducció C) Matriu oberta amb peça. ..... Pàg. 39

Figura 4.4 Esquema del procés de thixoextrusió. ..... Pàg. 39

Figura 4.5 Peça obtinguda en el procés de thixoextrusió (cotes en mm)..... Pàg. 40

Figura 4.6 Gràfic peça nº1. de la relació pressió d'extrusió envers desplaçament del pistó **..** **.....** Pàg. 40

Figura 4.7 Gràfic Peça nº4. de la relació de la pressió d'extrusió envers desplaçament del pistó**. .....** Pàg. 41

Figura 4.8 Gràfic peça nº1. de la relació pressió d'extrusió envers desplaçament del pistó**...** **.....** Pàg. 41

Figura 4.9 Gràfic comparatiu peces nº1, 4 i 11. de la relació pressió d'extrusió envers desplaçament del pistó**.** ..... Pàg. 43

Figura 4.10 Peça tallada longitudinalment amb les marques pels talls transversals. Pàg. 44

Figura 4.11. Conjunt de 3 provetes embotides. .....Pàg. 45

Figura 4.12 Microscopi òptic Leica. .....Pàg. 47

Figura 4.13. Microduròmetre Duramin 1. .....Pàg. 47

Figura 4.14 Impremta piramidal de duresa Vickers .....Pàg. 48

Figura 4.15 Impremta piramidal de duresa Vickers 49

Figura 5.1 Esquema de localització i nomenclatura dels assaigs de duresa en les peces. Pàg. 50

Figura 5.2 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº1 proveta nº1. .....Pàg. 52

Figura 5.3 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº1 proveta nº1. ....Pàg. 53

Figura 5.4 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº1 proveta nº2. .....Pàg. 54

Figura 5.5 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº1 proveta nº2. ....Pàg. 55

Figura 5.6 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº1 proveta nº3. 56

Figura 5.7 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº1 proveta nº3. ....Pàg. 57

Figura 5.8 Evolució de la duresa mitjana en la longitud total de la peça 1. .....Pàg. 58

Figura 5.9 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº4 proveta nº1. .....Pàg. 60

Figura 5.10 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº4 proveta nº1. .....Pàg. 60

Figura 5.11 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº4 proveta nº2. .....Pàg. 62

Figura 5.12 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº4 proveta nº2. .....Pàg. 62

Figura 5.13 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº4 proveta nº3. ..... Pàg. 64

Figura 5.14 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº4 proveta nº3. ..... Pàg. 64

Figura 5.15 Evolució de la duresa mitjana en la longitud total de la peça 4. ..... Pàg. 65

Figura 5.16 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº11 proveta nº1. ..... Pàg. 67

Figura 5.17 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº11 proveta nº1... ..... Pàg. 67

Figura 5.18 Evolució de la duresa longitudinalment en la direcció d'extrusió, peça nº11 proveta nº2. ..... Pàg. 69

Figura 5.19 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº11 proveta nº2... ..... Pàg. 69

Figura 5.20 Evolució de la duresa longitudinal en la direcció d'extrusió, peça nº11 proveta nº3. ..... Pàg. 71

Figura 5.21 Evolució de la duresa des del centre fins a la perifèria, peça nº11 proveta nº3... ..... Pàg. 71

Figura 5.22 Evolució de la duresa mitjana en la longitud total de la peça 11. ..... Pàg. 72

Figura 5.23 Evolució de la duresa en funció de la velocitat d'extrusió. ..... Pàg. 73

Figura 5.24 Esquema i nomenclatura de les micrografies estudiades. ..... Pàg. 74

Figura 5.25 Micrografies d'A357 brut de colada a A) 25X. B) 100X. ..... Pàg. 74

Figura 5.26 Micrografies d'A357 de la zona central del lingot escalfat a 570ºC a A) 25X. B) 100X. ..... Pàg. 75

Figura 5.27 Micrografies d'A357 de la zona perifèrica del lingot escalfat a 570ºC a A) 25X. B) 100X. ..... Pàg. 75

Figura 5.28 Micrografies d'A357 de la zona central del lingot escalfat a 560ºC a A) 25X. B) 100X. C) 500X. ..... Pàg. 76

Figura 5.29 Micrografies d'A357 de la zona perifèrica del lingot escalfat a 560ºC a A) 25X. B) 100X. C) 500X. .....Pàg. 77

Figura 5.30 Micrografies de la Peça nº1 proveta nº3 part A (perifèria) a A) 25X. B) 100X. C) 500X. .....Pàg. 78

Figura 5.31 Micrografia de la Peça nº1 proveta nº3 part B (centre) a A) 25X. B) 100X. ....Pàg. 79

Figura 5.32 Micrografia Peça nº4 proveta nº3 part A (perifèria) a A) 25X. B) 100X. ....Pàg. 80

Figura 5.33 Micrografies de la Peça nº4 de la proveta nº3 part B (centre) a A) 25X. B) 100X. C) 500X. .....Pàg. 81

Figura 5.34 Micrografies de la Peça nº11 de la proveta nº3 part A (perifèria) a A) 25X. B) 100X. .....Pàg. 82

Figura 5.35 Micrografies de la Peça nº11 de la proveta nº3 part B (centre) a A) 25X. B) 100X. C) 500X. .....Pàg. 83

Figura 5.36 Micrografies de la Peça nº1 A) Proveta nº1 part A (perifèria) 25X i B) Proveta nº2 part B (centre) 25X. .....Pàg. 84

Figura 5.37 Micrografies de la Peça nº11 A) Proveta nº1 part A (perifèria) 25X, B) Part 1 Zona B 25X, C) Part 2 Zona A 25X i D) Part 2 Zona A 25X. .....Pàg. 85

Figura 5.38 Micrografies de la Peça nº11 A) Proveta nº1 part A (perifèria) 25X i B) Proveta nº2 part A (perifèria) 25X. .....Pàg. 86