

Treball de Fi de Grau

Grau en enginyeria en tecnologies industrials

**Estudi de la macro i micro porositat en peces
d'alumini fabricades per emmotllament**

MEMÒRIA

Autor: Daniel Albareda Lax
Director: Dr. Antonio Manuel Mateo Garcia
Convocatòria: Juny 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

La porositat és un defecte que presenten tots els aliatges d'alumini. Ja que l'ús d'alumini està experimentant un gran creixement a nivell mundial, és important conèixer els efectes d'aquests defectes a les propietats del material. La problemàtica que es presenta en una empresa que col·labora amb el grup CIEFMA, on peces d'alumini formades mitjançant un procés d'emotllament es trencaven quan el client en feia ús, ens ofereix l'oportunitat d'estudiar la relació que té la porositat que presenten aquestes peces amb les seves propietats mecàniques.

El marc teòric del projecte compren la informació bàsica sobre l'aliatge d'alumini-silici que és l'utilitzat per l'empresa. També conté informació sobre diferents processos de fosa utilitzats per fabricar peces d'alumini. I per últim informació sobre el fenomen subjecte d'estudi, els diferents tipus que hi ha i els factors que influeixen en la quantitat de porositat que es presenta als aliatges d'alumini-silici.

A l'apartat de metodologia experimental s'expliquen detalladament els procediments que s'han dut a terme: assaig de flexió a 4 punts, assaig de microdureza Vickers, preparació de les mostres per dur a terme un observat metal·logràfic, observació mitjançant diferents tècniques de microscòpia i les mesures de porositat que s'han pres.

S'exposen els resultats i es fa una discussió d'aquests resultats basant-se en la informació teòrica que s'ha adquirit prèviament. S'analitza detingudament una proveta de cada lot.

Per últim, s'extreuen les conclusions de la realització del projecte posant èmfasis en la relació que té la porositat amb la resistència a fractura de les peces industrials.

Sumari

Resum.....	3
Sumari	4
Llistat de figures	7
Llistat de taules.....	9
1. Introducció.....	10
2. Marc teòric	11
2.1. Alumini.....	11
2.2. Aliatges d'alumini.....	12
2.3. Aliatges Alumini-Silici	14
2.3.1. Diagrama de fases de l'alumini-silici	15
2.4. Efectes de la microestructura a les propietats mecàniques	16
2.4.1. Fases intermetàl·liques	16
2.4.2. Espaiat dels braços de dendrites	17
2.4.3. Refinament de gra.....	17
2.4.4. Modificació de l'eutèctic de l'Al-Si	18
2.4.5. Exemples de microestructura Al-Si	18
2.5. Processos de fosa de l'alumini	22
2.5.1. Injecció a pressió.....	22
2.5.2. Motlle permanent per gravetat	23
2.5.3. Motlles de sorra.....	25
2.5.4. Taula comparativa dels diferents mètodes	27
2.6. Porositat	28
2.6.1. Diferències entre macroporositat i microporositat.....	28
2.6.2. Tipus de microporositat.....	29
2.6.3. Formació de porositat per gas	30
2.6.4. Formació de porositat per contracció.....	31
2.6.5. Factors que influencien la formació de microporositat.....	31
3. Metodologia experimental	35
3.1. Introducció	35
3.2. Anàlisis previs.....	37
3.2.1. Lot:138465 SXH16M8B58NP1HQ.....	37
3.2.2. Lot 151715 STF-ST80	37
3.3. Assaig de flexió a quatre punts	38
3.3.1. Primer muntatge.....	39
3.3.2. Segon muntatge.....	40
3.3.3. Muntatge final.....	41
3.4. Preparació de les mostres per observat metal·logràfic	41

3.4.1.	Tallat de la proveta	41
3.4.2.	Inserir la mostra en baquelita	42
3.4.3.	Polit de la mostra	43
3.5.	Microscòpia	44
3.5.1.	Microscòpia òptica	44
3.5.2.	Microscòpia SEM	45
3.5.3.	Microscòpia FIB-SEM	45
3.6.	Mesura de la porositat	46
3.7.	Assaig de duresa Vickers	47
4.	Resultats	49
4.1.	Assaig de flexió a 4 punts	49
4.2.	Assajos de duresa	51
4.3.	Caracterització microestructural	51
4.3.1.	PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona de la base)	52
4.3.2.	PEÇA D Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona propera a la ruptura)	53
4.3.3.	PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1	54
4.3.4.	PEÇA B Lot 142001 STF-STS80	55
4.3.5.	PEÇA A Lot 151715 STF-STS80	56
4.3.6.	Comparació de la microestructura mitjançant microscòpia FIB-SEM	57
4.4.	Anàlisi de la porositat	59
4.4.1.	Quantitat de porositat	59
4.4.2.	Anàlisi dels pors de cada proveta	60
4.4.3.	Relació de la porositat amb la resistència a flexió	63
4.4.4.	Relació de la porositat amb la resistència a flexió	64
4.5.	Imatges de la fractura	65
4.5.1.	PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ	65
4.5.2.	PEÇA D Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ	66
4.5.3.	PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1	66
4.5.4.	PEÇA B Lot 142001 STF-STS80	67
4.5.5.	PEÇA A Lot 151715 STF-STS80	68
5.	Conclusions	69
5.1.	Treballs futurs	69
6.	Pressupost	70
6.1.	Materials	70
6.2.	Maquinària	70
6.3.	Personal	71
6.4.	Total	72
7.	Impacte ambiental	73
7.1.	Emissions de CO ₂	73
Agraïments	75	

Bibliografia 76

Llistat de figures

Fig. 2.1. Evolució de la producció d'alumini [2].....	11
Fig. 2.2. Designació aliatges d'alumini [4].....	12
Fig. 2.3. Diagrama de fases Al-Si [7].....	15
Fig. 2.4. Influència del refredament a l'espai entre dendrites [11].....	17
Fig. 2.5. Microestructura final aliatges Al-Si [13].....	19
Fig. 2.6. Microestructures. Hipoeutèctica, eutèctica, hipereutèctica [14].....	19
Fig. 2.7. Variació de la microestructura a l'afegir modificadors [9].....	20
Fig. 2.8. Comparació de la microestructura, a diferents velocitats de solidificació [11].....	21
Fig. 2.9. Màquina d'injecció a pressió [15].....	23
Fig. 2.10. Motlle permanent per gravetat [15].....	24
Fig. 2.11. Procés d'emmotllament en motlles de sorra.....	26
Fig. 2.12. Diferència de microporositat [18].....	29
Fig. 2.13. Representació en 2D d'un por 3D [18].....	30
Fig. 2.14. Diferències de l'alimentació interdendrítica [19].....	33
Fig. 3.1. Provetes en el seu estat inicial.....	35
Fig. 3.2. Peces d'extracció de les provetes: 1) Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona de la base), 2) Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona propera a la ruptura), 3) Lot 149691 S8M9AS4P136NP1, 4) Lot 142001 i 151715 STF-STS80.....	36
Fig. 3.3. Esquema d'assaig de flexió a 4 punts [21].....	39
Fig. 3.4. Muntatge de l'assaig.....	39
Fig. 3.5. Primer muntatge.....	40
Fig. 3.6. Provetes deformatades que no van trencar.....	40
Fig. 3.7. Muntatge final.....	41
Fig. 3.8. Tronçadora amb pantalla de protecció (esquerra) i Tronçadora amb la pantalla oberta (dreta).....	42
Fig. 3.9. Paràmetres per muntar la baquelita.....	43
Fig. 3.10. Procediment de polit ordenat d'esquerra a dreta.....	44
Fig. 3.11. SEM Phenom XL.....	45
Fig. 3.12. Microscopi Neon 40.....	46
Fig. 3.13. Primera mesura de porositat.....	47
Fig. 3.14. Segona mesura de porositat.....	47
Fig. 3.15. Aparell utilitzat per mesurar la duresa.....	48
Fig. 4.1. Microestructura PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona de la base).....	52
Fig. 4.2. Microestructura PEÇA D Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona propera a la ruptura).....	53
Fig. 4.3. Microestructura PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1.....	54
Fig. 4.4. Microestructura PEÇA B Lot 142001 STF-STS80.....	55

Fig. 4.5. PEÇA A Lot 151715 STF-STS80	56
Fig. 4.6. Microestructura analitzada PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ....	57
Fig. 4.7. 1a imatge FIB PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1	58
Fig. 4.8. 2a Imatge FIB PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1	59
Fig. 4.9. Imatges de la porositat de la PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ.	61
Fig. 4.10. Imatges de la porositat de la PEÇA D Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ	61
Fig. 4.11. Imatges de la porositat de la PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1	62
Fig. 4.12. Imatges de la porositat de la PEÇA B Lot 142001 STF-STS80.....	62
Fig. 4.13. Imatges de la porositat de la PEÇA A Lot 151715 STF-STS80.....	63
Fig. 4.14. Relació de la porositat amb la resistència a flexió	63
Fig. 4.15. Relació de la porositat amb la duresa.....	64
Fig. 4.16. Imatges fractura PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ.....	65
Fig. 4.17. Imatges fractura PEÇA D Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ	66
Fig. 4.18. Imatges fractura PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1	67
Fig. 4.19. 1es Imatges fractura PEÇA B Lot 142001 STF-STS80	67
Fig. 4.20. 2es Imatges fractura PEÇA B Lot 142001 STF-STS80	68
Fig. 4.21. Imatges fractura PEÇA A Lot 151715 STF-STS80.....	68

Llistat de taules

Taula 1: Comparativa mètodes de fosa [11].....	27
Taula 2: Composició Lot:138465 SXH16M8B58NP1HQ.....	37
Taula 3: Composició Lot 151715 STF-STS80.....	38
Taula 4: Resultats assaig de flexió 4 punts	49
Taula 5: Resultats de duresa.....	51
Taula 6: Composició química analitzada amb FIB de la PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ.....	58
Taula 7: Resultats de porositat.....	60
Taula 8: Pressupost material utilitzat.....	70
Taula 9: Pressupost maquinària utilitzada.....	71
Taula 10: Pressupost personal.....	71
Taula 11: Pressupost total.....	72
Taula 12: Consum màquines utilitzades.....	74

1. Introducció

Una empresa que col·labora amb el grup de recerca CIEFMA-UPC treballa amb dispositius d'alumini que compleixen la funció de fer connexions elèctriques de manera segura i fiable. Tenen la problemàtica que una part de les peces que es fabriquen es trenquen quan estan en funcionament; s'observa que gran part d'aquestes peces tenen porositat visible a simple vista i per tant es busca donar una resposta a aquest problema. Per això, s'han extret provetes de diverses per analitzar les causes de la porositat i la seva influència en la fallada en servei de les peces.

Per tant la primera part del projecte consistirà en dur a terme una recerca sobre els aliatges d'alumini, les seves propietats i la porositat. Aquesta informació ha de servir com a base introductòria als aliatges d'alumini, com varien les propietats mecàniques segons les característiques que tingui el material i les característiques que tenen els diferents defectes de porositat, com afecten al material i com es formen.

El segon pas consistirà en realitzar els procediments necessaris per poder analitzar els efectes de la porositat a les propietats mecàniques de les peces. Per tant, es duran a terme assajos per determinar diferents característiques mecàniques de les provetes enviades i posteriorment es realitzarà l'observació mitjançant diferents tècniques analítiques de les provetes.

Per últim, es buscarà relacionar la porositat amb les propietats mecàniques del material i tractar d'establir un criteri que permeti definir quins dels lots de peces fabricades són de bona qualitat i quins són de mala qualitat.

2. Marc teòric

2.1. Alumini

Avui en dia, l'alumini és un dels metalls més utilitzats al món industrial. El metall s'extreu d'un mineral anomenat bauxita, el tercer element més comú de l'escorça terrestre. Mitjançant el procés anomenat Bayer el mineral es transforma en alumina i després mitjanant electròlisi es transforma en alumini.

El que fa aquest material tant atractiu és la combinació de propietats que té, sobretot la seva baixa densitat, uns 2700 kg/m^3 , un punt de fusió molt baix i una alta resistència a la corrosió. També cal destacar que és un bon material conductor tant d'electricitat com de calor. Afegir també que gràcies als aliatges que es poden fer amb aquest metall es poden millorar les seves propietats mecàniques.

Una altra dada d'interès és que l'alumini és un material no ferromagnètic, propietat important a la indústria elèctrica. També, un dels factors que es té en compte a l'hora de seleccionar l'alumini per produir una peça és la facilitat que té per a ser treballat, ja que pot ser colat per qualsevol mètode de fosa o bé mecanitzant-lo. [1]

Al cas subjecte d'estudi l'empresa amb la que es col·labora fa servir l'aliatge d'alumini-silici per a fabricar els seus components. I l'obtenció de la peça es fa mitjançant una fosa en motlle metàl·lic.

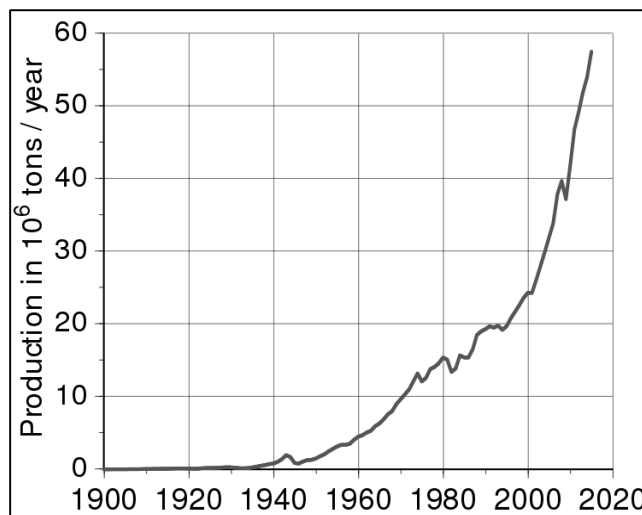


Fig. 2.1. Evolució de la producció d'alumini [2]

2.2. Aliatges d'alumini

Com s'ha dit anteriorment l'objectiu dels aliatges d'alumini és millorar les propietats mecàniques com la duresa i la resistència, ja que l'alumini en estat pur és un metall tou i amb una resistència a tracció baixa. Tot i això aliar l'alumini farà que el metall resultant perdi resistència a la corrosió respecte a l'alumini pur. [3]

A la majoria de països s'utilitzen sistemes numèrics de quatre dígit per identificar els aliatges d'alumini. El primer dígit indica el grup de l'aliatge, el segon dígit indica les modificacions realitzades sobre l'aliatge original i els dos últims identifiquen l'aliatge d'alumini o indiquen la puresa que té. A continuació es mostra una taula amb les diferents designacions dels aliatges d'alumini. [4]

Aluminum alloy designation systems.

Alloy type ^a	Four-digit designation
Wrought alloys	
99.00% (min) aluminum	1XXX
Copper	2XXX
Manganese	3XXX
Silicon	4XXX
Magnesium	5XXX
Magnesium and silicon	6XXX
Zinc	7XXX
Others	8XXX
Casting alloys	
99.00% (min) aluminum	1XX · X
Copper	2XX · X
Silicon with added copper and/or magnesium	3XX · X
Silicon	4XX · X
Magnesium	5XX · X
Zinc	7XX · X
Tin	8XX · X
Others	9XX · X

Fig. 2.2. Designació aliatges d'alumini [4]

Es detallaran els efectes d'aliar alguns metalls que es consideren més importants pel projecte amb l'alumini:[5]

- **Coure:** L'aliatge rep una substancial millora en la duresa i la resistència a tracció després d'haver estat colat i tractat tèrmicament. Els aliatges que contenen des d' un 4% fins a un 5,5% de coure responen millor a tractaments tèrmics i mostren un augment relatiu de les propietats de fosa. També cal afegir que el coure normalment redueix la resistència a la corrosió de l'aliatge , redueix la resistència de trencament

en calent i augmenta el potencial de contracció interdendrítica.

- **Ferro:** Augmenta la resistència al trencament en calent i disminueix la tendència del material fos a enganxar-se al motlle en els processos de fosa a pressió. L'augment del contingut de ferro en l'aliatge també ve acompanyat d'un decreixement de la ductilitat. És el causant de l'aparició de fases intermetàl·liques, les més comuns FeAl_3 , FeMnAl_6 i αAlFeSi . Aquestes fases són responsables d'un augment de la resistència a elevada temperatura, però també de la fragilitat que té la microestructura.
- **Magnesi:** El magnesi és la base del desenvolupament de la duresa i la resistència dels aliatges d'alumini-silici tractats tèrmicament i normalment s'utilitza amb altres elements com el coure, níquel... Normalment els aliatges alumini-silici que tenen uns valors alts de duresa han de tenir un rang de composició de magnesi entre 0,07 i 0,4%. Els aliatges alumini-magnesi s'utilitzen en aplicacions on es vol tenir un acabat superficial brillant, amb bona resistència a la corrosió i bona resposta als atacs químics.
- **Manganès:** Normalment es considera una impuresa que apareix en foneria per gravetat i es mira de que tingui nivells de concentració baixos. És un element important si s'ha de sotmetre l'aliatge a processos d'enduriment, sinó no ofereix beneficis significatius a l'aliatge.
- **Silici:** L'efecte més important d'aliar silici amb alumini es basa en la millora de les propietats de fosa. El silici millora la col·labilitat, la resistència en calent i l'alimentació de l'aliatge al motlle. És l'element que més utilitzat per aliar amb l'alumini en processos de foneria. Els aliatges comercials fins a un rang de composició de silici fins al 30%. L'augment de la quantitat de silici utilitzat millora la fluïdesa per emplenar parets més fines i per reproduir detalls més complicats del motlle. Per aquesta i altres raons és important escollir bé el contingut de silici que ha de tenir l'aliatge, ja que sinó es produeix un bon refredament de la peça hi poden aparèixer defectes com la porositat causada per la mala contracció. Per processos de refredament lent com el cas dels motlles de sorra, ceràmica, cera es recomana una quantitat de silici d'entre el 5 i el 7%, per processos que utilitzen un motlle permanent es recomana un percentatge que va del 7 al 9% i per processos de injecció a pressió es recomana una quantitat del 8 al 12%.
- **Sodi:** El sodi modifica els aliatges d'alumini-silici eutèctics. En absència de fòsfor concentracions de 0,01% són efectives. El sodi té un efecte de refinament de la fase primària del silici en l'eutèctic. També cal dir que el sodi augmenta les tensions

superficials i pot fer augmentar el contingut d'hidrogen, per tant un ús desmesurat d'aquest element pot provocar defectes en foneria per gravetat.

- **Titani:** És un element que s'utilitza en aliatges de fosa d'alumini per refinar l'estructura del gra.

En el cas estudiat s'aprofundirà en els aliatges alumini-silici ja que és el tipus d'aliatge que fa servir l'empresa per obtenir les peces.

2.3. Aliatges Alumini-Silici

L'aliatge alumini-silici, és el que té com a denominació 4xx.x, presenta molt bones qualitats en estat líquid com la col·labilitat, capacitat de ser treballats per fosa i resistència a la corrosió. També és important que l'aliatge resultant tindrà una densitat molt baixa amb unes propietats mecàniques bastant bones, amb un rang de valors d'entre 50-400 MPa de resistència a tracció. La ductilitat de l'aliatge va en funció de les concentracions d'impureses i de la microestructura que presenti. La resistència a tracció, la ductilitat i la seva capacitat de fosa poden ser millorades quan es tracta d'un aliatge alumini-silici hipoeutèctic. Aquestes millores es poden aconseguir en continguts més baixos de silici mitjançant una adició controlada de sodi i/o estronci. [6]

Quan s'afegeix coure l'aliatge passa a denominar-se 3xx.x i formen el tipus d'aliatges anomenats alumini-silici-coure. Aquesta combinació és una de les més usades ja que el silici contribueix en la millora de les propietats a l'hora de treballar amb la fosa i el coure aporta una millora de les propietats mecàniques. Els aliatges amb menys d'un 5,6% de coure es poden tractar tèrmicament però per fer aquest tipus de tractaments és recomanable utilitzar manganès. També es coneixen com a 3xx.x els aliatges alumini-silici-manganès. S'utilitzen perquè les propietats que s'aconsegueixen després d'un tractament tèrmic són molt bones, tot i que les propietats mecàniques inicials no siguin tant bones com als aliatges alumini-silici-coure.

2.3.1. Diagrama de fases de l'alumini-silici

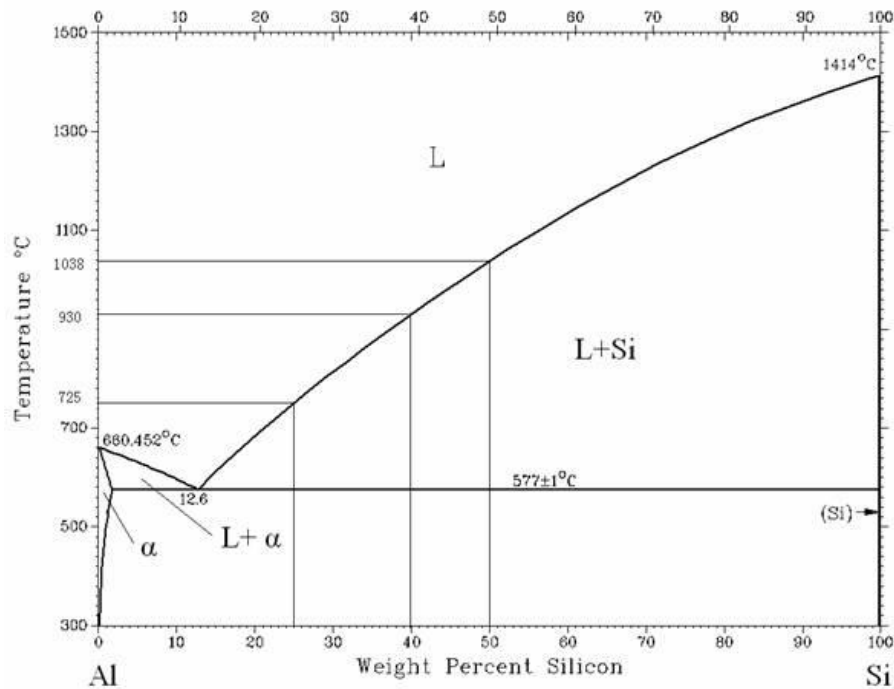


Fig. 2.3. Diagrama de fases Al-Si [7]

Els diagrames d'estat d'alumini-silici són sistemes binaris simples amb una solubilitat del silici en alumini limitada. Només hi ha una única reacció invariant en aquest diagrama, que és la següent:



El punt de fusió de l'alumini es troba als 660,45°C i el punt de fusió del silici està situat a 1414°C. La reacció eutèctica es produeix al punt que té un 12,6% en pes de Si i a la temperatura de 577°C. Aquest punt és modificable quan s'afegeixen additius com el sodi o l'estronci. El punt de màxima solubilitat de silici a la temperatura eutèctica es produeix amb un 1,65% de percentatge en pes de silici. [8]

Per tant, podem dividir els aliatges d'alumini en tres grups segons el seu percentatge en pes de silici.

1. **Hipoeutèctic:** <12% de silici en pes
2. **Eutèctic:** de 12 a 13% de silici en pes
3. **Hipereutèctic:** >13% de silici en pes

2.4. Efectes de la microestructura a les propietats mecàniques

Les característiques de la microestructura estan definides per la composició química i per les condicions de solidificació. Les característiques microestructurals, a part dels defectes, que més influeixen en les propietats són les següents: [9]

- Mida, forma i distribució de les fases intermetàl·liques.
- Espaiat entre braços dendrítics.
- Mida i forma del gra.
- Modificacions eutèctiques i refinament de la fase primària.

2.4.1. Fases intermetàl·liques

Controlar la concentració d'elements i els ratis estequiomètrics és important per controlar els efectes de la microestructura en les propietats. La velocitat de solidificació i el temps de refredament un cop ha solidificat són factors clau per tenir una mida i distribució uniformes d'intermetàl·lics. Velocitats de solidificació baixes provoquen gruixos d'intermetàl·lics i concentracions de segones fases a les fronteres dels grans.[9]

Les formacions de fases són reaccions controlades per difusió, reacció que es produeix just quan es troben els reactius, per tant quan més ràpidament es produeix el refredament es produirà més retenció de sòlid i més bona dispersió de partícules més petites. [9]

Per exemple el paper del ferro, que en alguns casos es considera una impuresa provinent de la bauxita i és un dels elements aliants, contribueix a la fragilitat de la microestructura amb les seves agulles de forma acicular i allargades. Pot actuar com a concentrador d'esforços i generador d'esquerdes, i per tant, disminuir la ductilitat de l'aliatge. Com que el ferro té molt poca solubilitat en sòlid amb l'alumini tendeix a combinar-se amb altres elements per formar fases d'intermetàl·lics. En absència de silici les fases que forma són: Al_3Fe i Al_6Fe_2 , quan hi ha silici forma les següents Al_8Fe_2Si i Al_5FeSi . [10]

Com s'ha dit, normalment el ferro es considera una impuresa en la majoria dels casos i per tant es convenient evitar-lo perquè redueix la ductilitat de la peça. És per això que moltes vegades s'agreguen elements com: Cr, Co, Mg, Ni... És possible reconèixer-lo ja que se situa

amb el silici eutèctic i té forma de làmines primes i disperses juntament amb les agulles de silici.[10]

2.4.2. Espaiat dels braços de dendrites

Com en la majoria de processos on es treballa amb metall líquid, la solidificació es produeix mitjançant la formació de dendrites des de l'estat líquid. Hi ha tres tipus de mesures utilitzades per descriure el refinament de la dendrita:

- La distància entre dendrites secundàries
- La distància entre les línies centrals de dendrites adjacents
- La mida de les estructures que formen la dendrita

Quan menys espaiat entre dendrites i quan més petites siguin les estructures que formen les dendrites millor seran les propietats mecàniques resultants. Per controlar la distància entre dendrites és necessari modificar les velocitats de refredaments.[9]

Casting processes	Cooling rate, °C/s	Dendrite-arm spacing, mm
Plaster, dry sand	0.05-0.2	0.1-1
Green sand, shell	0.1-0.5	0.05-0.5
Permanent mold	0.3-1	0.03-0.07
Die	50-500	0.005-0.015
Continuous	0.5-2	0.03-0.07

Fig. 2.4. Influència del refredament a l'espai entre dendrites [11]

2.4.3. Refinament de gra

Grans fins i amb els eixos axials iguals formen les microestructures dels materials que tenen la millor combinació de resistència i ductilitat, s'aconsegueix maximitzant l'àrea del límit superficial de gra i cal distribuir els components per tot el límit del gra. En canvi, les estructures de grans en forma de columna gruixuda i ploma o les estructures de doble columna que es formen quan es produeixen alts gradients de temperatura en continguts d'aliatge baixos tenen unes propietats mecàniques pitjors. El tipus i la forma del gra formats són funció de la composició de l'aliatge, la velocitat de solidificació, i la concentració de grans de nucleació efectius.

Augmentar la velocitat de solidificació redueix la mida del gra. Però la velocitat de solidificació en motlles de geometria complexa és molt variable i per tant és complicat obtenir un bon grau de refinament de gra mitjançant processos de fona per gravetat. Per això és necessari afegir adicions abans d'emotllar per obtenir el refinament de gra desitjat.

Doncs, és possible fer que un aliatge d'alumini solidifiqui de la manera desitjada, amb els eixos axials iguals i amb una bona estructura, mitjançant l'ús d'un refinador de gra adequat. Els més utilitzats són el titani i l'ús de titani amb bor. [9]

2.4.4. Modificació de l'eutèctic de l'Al-Si

Les propietats dels aliatges d'alumini-silici hipoeutèctics poden ser alterades mitjançant el que s'anomena com la modificació de l'eutèctic. Una estructura més fina i fibrosa es pot obtenir mitjançant un augment de la velocitat de solidificació i afegint modificadors químics. Algun d'aquests agents químics són el calci, el sodi, l'estronci i l'antimoni, aquests elements són capaços de modificar la microestructura durant la solidificació del líquid. [9]

Per tant, l'objectiu d'afegir elements modificants a aquests aliatges és modificar-ne la microestructura, ja que com a resultat s'obté una estructura eutèctica més fibrosa o bé una estructura laminar fina. Un altre dels efectes microestructurals és la supressió del creixement dels cristalls de silici a l'eutèctic o equilibrar la velocitat de creixement de la matriu de silici. Com a resultat d'aquestes modificacions els aliatges presenten resistències i ductilitats superiors quan es comparen a aliatges que no han estat modificats. Les millores de les propietats també depenen de com interacciona afegir aquests modificadors amb la porositat. [12]

Actualment, el sodi es considera el modificador més potent, però els seus efectes són transitoris a causa de l'oxidació i la pèrdua de la pressió de vapor. L'estronci és menys transitori però les modificacions que pot produir són menys efectives quan se sotmet a velocitats baixes de solidificació. El calci és un modificador poc potent i molt poc utilitzat. L'antimoni té un efecte sostingut però provoca una estructura laminar fina en comptes d'una estructura eutèctica fibrosa.

L'adició de sodi metàl·lic a l'alumini fos crea turbulències que poden provocar l'augment del nivell d'hidrogen i oxigen. L'ús de sals com el NaCl i NaF per modificar l'eutèctic també comporta el risc de formació d'òxids i l'augment del contingut d'hidrogen dissolt. L'ús excessiu de sodi, més d'un 0,01% del pes, incrementa els problemes que poden sorgir com per exemple una disminució de la colabilitat i també un augment de les tensions superficials.[9]

2.4.5. Exemples de microestructura Al-Si

A continuació es mostra una imatge amb la microestructura que haurien de presentar teòricament els diferents aliatges.

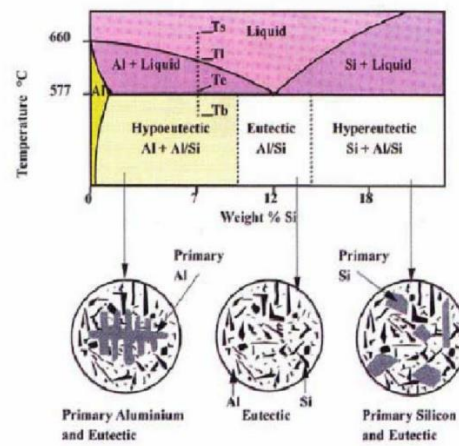
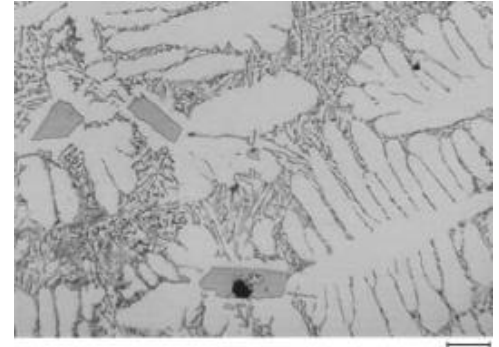


Fig. 2.5. Microestructura final aliatges Al-Si [13]

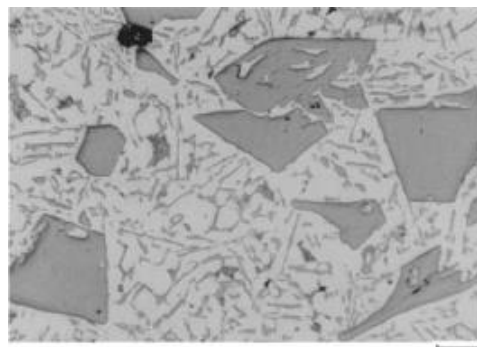
Les següents imatges corresponen a microestructures típiques d'aliatges d'alumini comercials:



(a)



(b)



(c)

Fig. 2.6. Microestructures. Hipoeutèctica, eutèctica, hipereutèctica [14]

Com es pot veure, la típica microestructura de l'eutèctic o a prop de l'eutèctic consisteix en agulles de silici aciculars dispersades per la matriu d'alumini.

- Imatge a: microestructura d'alumini-silici hipoeutèctic (5,7% Si), les zones de color blanc són les compostes per la fase α d'alumini i les agulles són majoritàriament de silici.
- Imatge b: microestructura d'alumini-silici eutèctica (11,9% Si), s'aprecien algunes dendrites d'alumini, silici primari (són aquestes àrees poligonals) i també àrees amb eutèctics.
- Imatge c: microestructura d'alumini-silici hipoeutèctic (15% Si), es veuen grans zones de silici primari i algunes agulles de silici.

La Fig. 2.7 mostra com canvia l'estructura a l'afegir elements modificadors de l'eutèctic. Es pot apreciar com la microestructura va evolucionant, a la primera imatge (a) no hi ha cap modificador i l'última imatge (f) correspon a una mostra correctament modificada. Com es pot veure les agulles de silici inicials es converteixen i cada cop es van fent més fibroses.

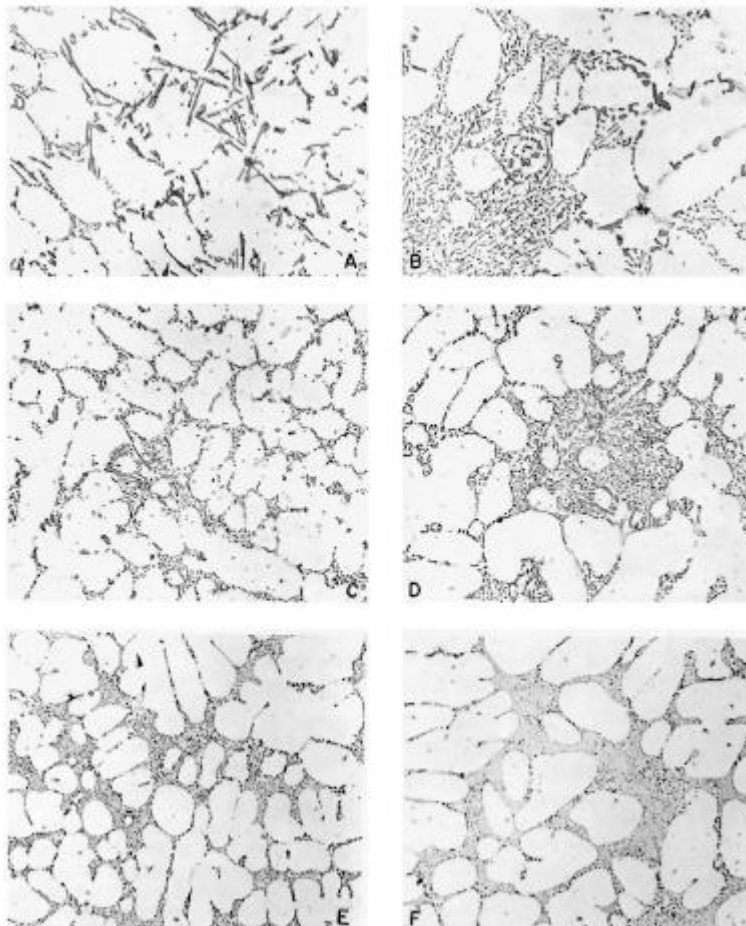


Fig. 2.7. Variació de la microestructura a l'afegir modificadors [9]

Per últim destacar també les diferències que pateix la microestructura quan l'aliatge se sotmet a diferents velocitats de solidificació. Les imatges següents mostren les microestructures de l'A443.0 quan l'aliatge està sotmès a diferents processos de fosa, també una petita taula a sota de cada fotografia amb algunes de les propietats mecàniques. D'esquerra a dreta els mètodes estan ordenats de menor velocitat de solidificació fins a velocitats més grans. Veiem com les propietats mecàniques milloren quan les velocitats de solidificació són més elevades, això és degut a que les partícules de color fosc (silici) van disminuint de mida quan s'augmenta la velocitat de solidificació.

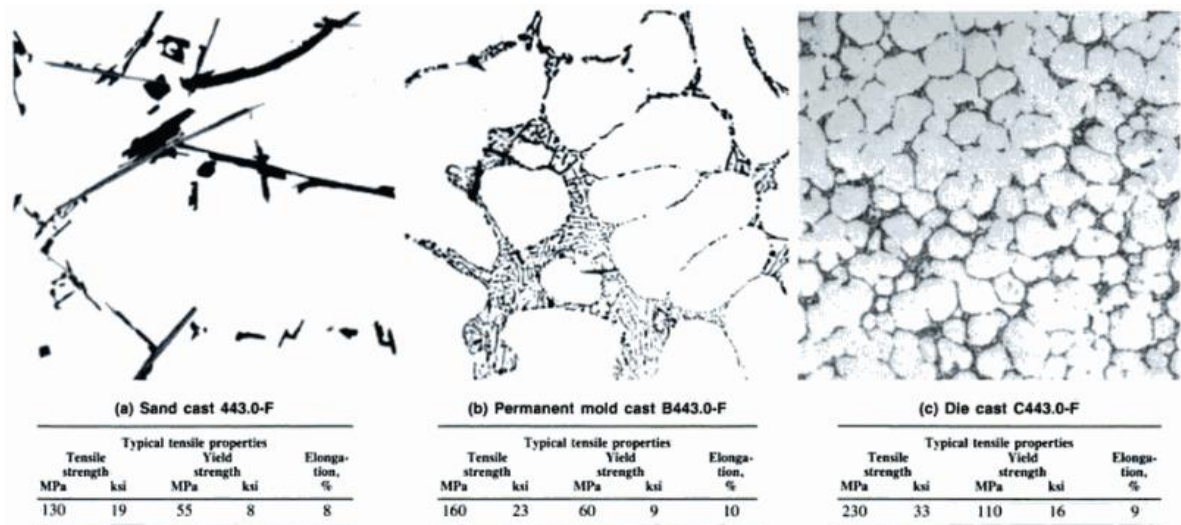


Fig. 2.8. Comparació de la microestructura, a diferents velocitats de solidificació [11]

2.5. Processos de fosa de l'alumini

Són molts els factors que influencien a l'hora d'escollir un procés de fosa per produir una peça. Els més importants són els següents:[5]

- Característiques per emmotllar: col·labilitat, resistència a la fissura en calent i minimitzar les contraccions al solidificar.
- Característiques de disseny: gruix de la paret, passos interns del líquid i geometria.
- Requeriments mecànics de la peça que s'ha de fer.
- Propietats físiques específiques: conductivitat tèrmica i elèctrica, gravetat específica, canvis de volum.
- Necessitats del procés general: postprocessat de la peça, acabat superficial...
- Cost del procés

A continuació s'exposaran alguns dels procediments més utilitzats.

2.5.1. Injecció a pressió

Els aliatges d'alumini són els més utilitzats quan es fa servir aquest mètode. Aquest mètode s'adapta molt bé quan s'han de fer produccions en sèrie de peces que es consideren petites. És per això que és usual que les peces que pesin al voltant dels 5 kg es produeixen per injecció a pressió, però peces que pesin més de 50 kg només es produeixen quan el pagament de la maquinària es pot assumir.

Gràcies a la injecció a pressió és possible mantenir unes toleràncies baixes i un bon acabat superficial. El mètode es basa en injectar un metall líquid en un motlle de metall. La injecció ràpida i la gran velocitat de solidificació (al fer servir motlles de metall) a alta pressió, es combinen per produir una densa i fina estructura de gra, això proporciona unes bones propietats mecàniques. Però l'alta velocitat a la que entra el líquid pot produir que quedi aire atrapat i contraccions del líquid indesitjades, per tant porositat.[11]

Procés d'injecció a pressió

- 1. Col·locació dels motlles:** El primer pas és preparar els motlles, normalment estarà dividit en dues meitats. Cada motlle ha d'esser netejat i lubricat per facilitar l'ejecció del líquid. No fa falta lubricar després de cada cicle, però si cada 2 o 3 cicles. Un cop netejats és necessari ajuntar el motlle, col·locar-lo i assegurar-lo, s'ha d'aplicar la força suficient per assegurar que no es mourà mentre s'injecta el metall.
- 2. Injecció del metall:** El metall fos que es manté a certa temperatura al forn, es transfereix a la cambra des d'on s'injectarà al motlle. Un cop transferit s'injecta al motlle a gran pressió (7 – 138 MPa). Aquesta pressió mantindrà el metall dins el motlle

mentre solidifica. El temps d'injecció és molt curt per evitar que hi hagi solidificacions que obstrueixin l'entrada de líquid.

3. **Refredament:** El metall que entra dins el motlle es començarà a refredar i solidificar. Quan entri tot el metall dins el motlle i hagi solidificat ja estarà definida la forma de la peça i no es podrà obrir fins que no s'hagi refredat. El temps de refredament dependrà del material, la complexitat de la geometria i les parets del motlle.
4. **Ejecció:** Un cop refredat s'obren els motlles i un mecanisme empeny la peça. En aquest procés s'ha de vigilar que la peça no s'enganxi al motlle.
5. **Retallat:** Com que la peça s'enganxa al motlle s'ha de retallar perquè es desenganxi bé a més també s'ha de treure qualsevol material sobrant de la peça.

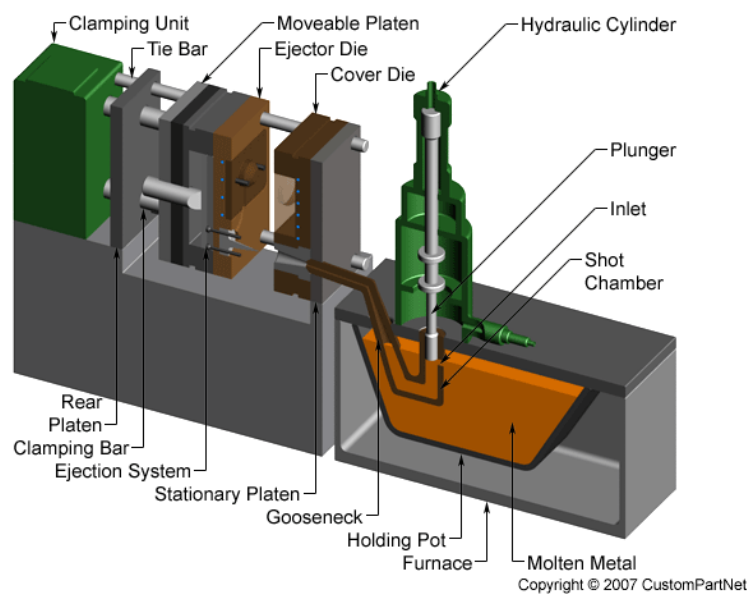


Fig. 2.9. Màquina d'injecció a pressió [15]

2.5.2. Motlle permanent per gravetat

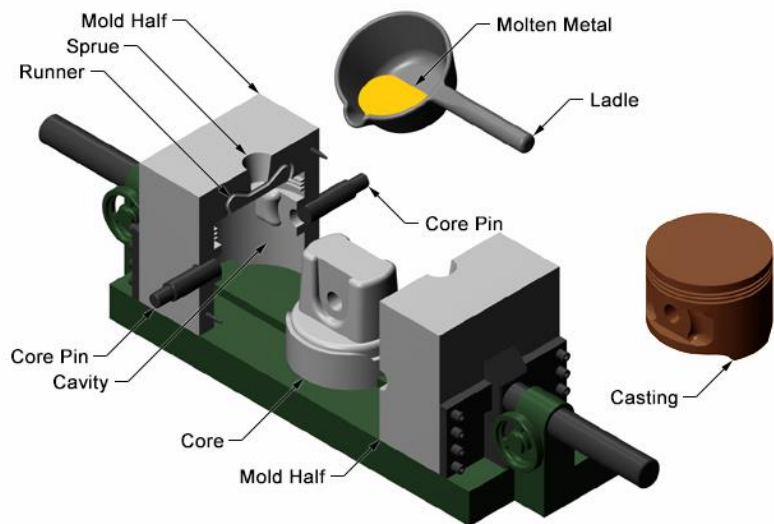
Igual que en el cas de la injecció a pressió, aquest tipus de producció també s'adapta molt bé per a produccions on s'han de fer moltes peces. Les peces produïdes per motlle permanent normalment són més grans que les peces produïdes per injecció a pressió. Tot i això el pes màxim de les peces és d'uns 10 kg, però com en el cas anterior es podran produir peces més gran si el pagament del procés està justificat.

Tant l'acabat superficial com les toleràncies obtingudes quan es fa servir aquest mètode són menors que fent servir injecció a pressió, tot i així s'obtenen valors bons. Es poden utilitzar peces interiors per obtenir les geometries a l'interior del motlle, en aquest cas s'anomenarà procés amb motlle semi-permanent. Com que s'utilitza la força de la gravetat per alimentar el motlle la velocitat d'injecció és baixa però la velocitat de solidificació elevada perquè els

motlles utilitzats són de metall. És per això que se solen obtenir unes bones propietats mecàniques.[11]

Procés d'emmotllament per gravetat

1. **Preparació dels motlles:** Els motlles s'han d'escalfar fins a una temperatura de 150°C fins a 260°C per permetre una millor fluïdesa del metall i reduir els possibles defectes que es poden produir. Després s'aplica una capa ceràmica al motlle per facilitar l'extracció de la peça i per allargar la vida útil del motlle.
2. **Assemblatge dels motlles:** El motlle ha d'estar constituït almenys per dues parts, les dues meitats del motlles i si fos necessari alguna peça addicional per fer geometries més complexes. Aquestes peces normalment estan fetes de ferro o acer, però també s'utilitzen peces de sorra d'un sol ús. Per tant, en aquest pas el que es fa és col·locar les peces interiors i ajuntar les dues meitats dels motlles.
3. **Abocament del líquid:** El metall fos és abocat a una velocitat lenta des del cullerot fins a l'abeurador des d'on s'alimentarà el motlle.
4. **Refredament:** El metall es refreda i solidifica dins del motlle.
5. **Obertura del motlle:** Un cop el metall ha solidificat, les dues meitats del motlle s'obren i s'extreu la peça.
6. **Retallat:** s'ha de retallar el metall sobrant de l'abeurador, a més també s'ha de treure qualsevol material sobrant de la peça com podria ser el de les cavitats dissenyades per evitar que falti material.



Copyright © 2008 CustomPartNet

Fig. 2.10. Motlle permanent per gravetat [15]

2.5.3. Motlles de sorra

Als motlles de sorra convencionals, el motlle es forma endurint sorra al voltant d'un model de la peça mitjançant un element que uneix la sorra. Després se n'extreu el model i es fa servir la sorra com a motlle. Finalment, es trenca el motlle de sorra. El gran avantatge d'aquesta mètode és la versatilitat que té, ja que permet una gran varietat d'aliatges, geometries de peça i dimensions de la peça, també que és el mètode més barat quan s'han de realitzar poques peces iguals. Però els problemes que té són els següents, un acabat superficial dolent si es compara amb els mètodes anteriors i també unes toleràncies més dolentes que els altres mètodes. Pel que fa a les propietats mecàniques de la peça també seran més dolentes ja que la velocitat de solidificació serà inferior.[11]

Procés d'emmotllament en motlles de sorra

1. **Conformació del motlle:** El primer pas es crear el motlle de sorra. Per a un procés en sèrie aquest pas del procés s'ha de fer per cada peça que es vol produir. Es produeix un motlle per cada meitat de la peça, la sorra es col·loca al voltant del model de la peça. Després s'extreu el model de dins del motlle de sorra i si és necessari s'introdueixen els elements interiors al motlle per a les peces que ho requereixin. Sovint s'aplica lubricant per a facilitar la introducció del metall a l'interior del motlle i també per millorar l'acabat superficial.
2. **Col·locació dels motlles:** El segon pas és ajuntar els motlles, s'ha de fer correctament per evitar pèrdues del material.
3. **Abocament del líquid:** Mentre el metall es manté a certa temperatura al forn. Un cop s'han col·locat els motlles s'abocarà el metall necessari per omplir totes les cavitats de l'interior del motlle.
4. **Refredament:** El metall es començarà a refredar i solidificar quan entri dins el motlle. La majoria de defectes que es poden produir quan es fa servir aquest mètode apareixen quan la peça solidifica. Si alguna part del metall es refreda massa ràpid apareixeran defectes de contracció, esquerdes i seccions de la peça final incompletes. Per prevenir aquests defectes s'ha de dissenyar un bon motlle.
5. **Treure el motlle:** Un cop la peça ha solidificat el motlle de sorra es pot treure i extreure la peça. Normalment aquest pas es produeix mitjançant màquines vibratòries. Un cop extret el motlle la peça contindrà sorra que s'haurà de treure mitjançant la propulsió d'un líquid a pressió.
6. **Retallat:** s'ha de retallar el metall sobrant de l'abeurador, a més també s'ha de treure qualsevol material sobrant de la peça com podria ser el de les cavitats dissenyades per evitar que falti material. [15]

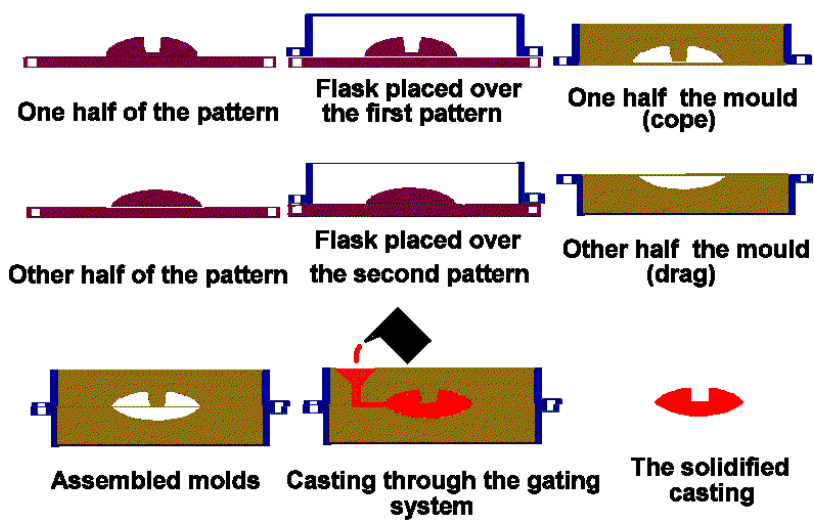


Fig. 2.11. Procés d'emmotlament en motlles de sorra

2.5.4. Taula comparativa dels diferents mètodes

Factor	Motlle de sorra	Motlle Permanent	Injecció a pressió
<i>Cost</i>	Cost baix per produccions de poques peces	Per produccions en sèrie, el més baix	Alt
<i>Entrada de material</i>	El més baix	Normalment 11kg/h, es pot elevar	Normalment 4,5 kg/h, fins a 45 kg/h
<i>Mida de la peça</i>	El més gran possible	Limitada per la màquina	Limitada per la màquina
<i>Toleràncies</i>	Dolentes, 100mm/m	Bastant bones, 10mm/m	Bones, 4mm/m
<i>Acabat superficial</i>	Dolent	Bastant bo	Molt bo
<i>Contingut de porositat</i>	El més baix	Es pot aconseguir poca porositat si es fa bé	Pot aparèixer porositat
<i>Velocitat de refredament</i>	Mitjana	Mitjana-Alta	Molt alta
<i>Mida de gra</i>	Gran	Fi	Molt fi
<i>Resistència a tracció</i>	La més baixa	Bona	La més alta
<i>Altres</i>	Molt versàtil, diferents geometries, mides...	-	Excel·lent per produir molt ràpid

Taula 1: Comparativa mètodes de fosa [11]

2.6. Porositat

La porositat és una mesura dels espais buits que conté un material, normalment s'expressa com un percentatge. Normalment, la porositat és un defecte que afecta a les propietats mecàniques del material. Es calcula com:

$$P = \frac{V_0}{V_T} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

- V_0 és el volum d'espai buit
- V_T és el volum total

2.6.1. Diferències entre macroporositat i microporositat

S'ha d'identificar que hi ha dos tipus diferents d'aquests defectes que es relacionen amb propietats mecàniques del material. La microporositat, es refereix a aquelles cavitats d'escala micromètrica, generalment s'observa amb l'ajuda del microscopi. La mida de cada un dels defectes individualment oscil·la entre 10 fins a 300 micres, els més grans poden ser vistos en una superfície polida. La microporositat normalment es troba entre les dendrites i està distribuïda al llarg de tota la peça. En general, el tant per cent de volum de la microporositat està dins del rang de 0,1% fins a 3%. Per últim, afegir que als aliatges d'alumini-silici conformats mitjançant fosa, la microporositat està causada per l'expulsió de l'hidrogen a causa d'una baixada dràstica de la solubilitat que tenia l'hidrogen en líquid respecte del sòlid, i/o la contracció de volum juntament amb una alimentació interdendrítica pobre durant la solidificació de la zona amb defectes.

La macroporositat apareix en zones on hi ha gradients de temperatura molt baixos o bé negatius, causats per la falta d'alimentació del metall. En comptes d'haver d'utilitzar-se el microscopi com en el cas de la microporositat, la macroporositat sempre apareix amb unes mides de l'ordre de mil·límetres i es pot veure a simple vista.

Com es pot veure, aquests defectes comporten una falta de material en la zona on es produeixen. Poden ser distingits per la seva aparença a ull nu, utilitzant el microscopi i/o amb imatges radiogràfiques.[17]

2.6.2. Tipus de microporositat

Hi ha tres tipus de microporositat als aliatges d'alumini: la porositat formada per la mala alliberació de gasos, la porositat que es forma per la mala contracció del líquid i la combinació de les dues anteriors. Les diferències de forma que tenen és un dels factors que s'utilitza per identificar cada tipus. Els pors formats únicament per la mala alliberació de gasos són de forma esfèrica i tenen els límits suavitzats, a causa del fenomen que produeix la seva aparició, el gas atrapat durant la solidificació. En canvi, els pors formats degut a la contracció del líquid tenen una forma irregular perquè es formen entre els braços de les dendrites ja que la causa de la seva formació és la contracció del líquid combinada amb una mala alimentació. La forma dels pors formats per una combinació dels dos fenòmens anteriors és una mica més complexa i és una barreja entre els pors esfèrics i la irregularitat, aquesta combinació es presenta majoritàriament en aliatges d'alumini-silici. A la imatge següent: a l'esquerra es mostra porositat causada per una mala contracció i a la dreta un por causat pels gasos atrapats.

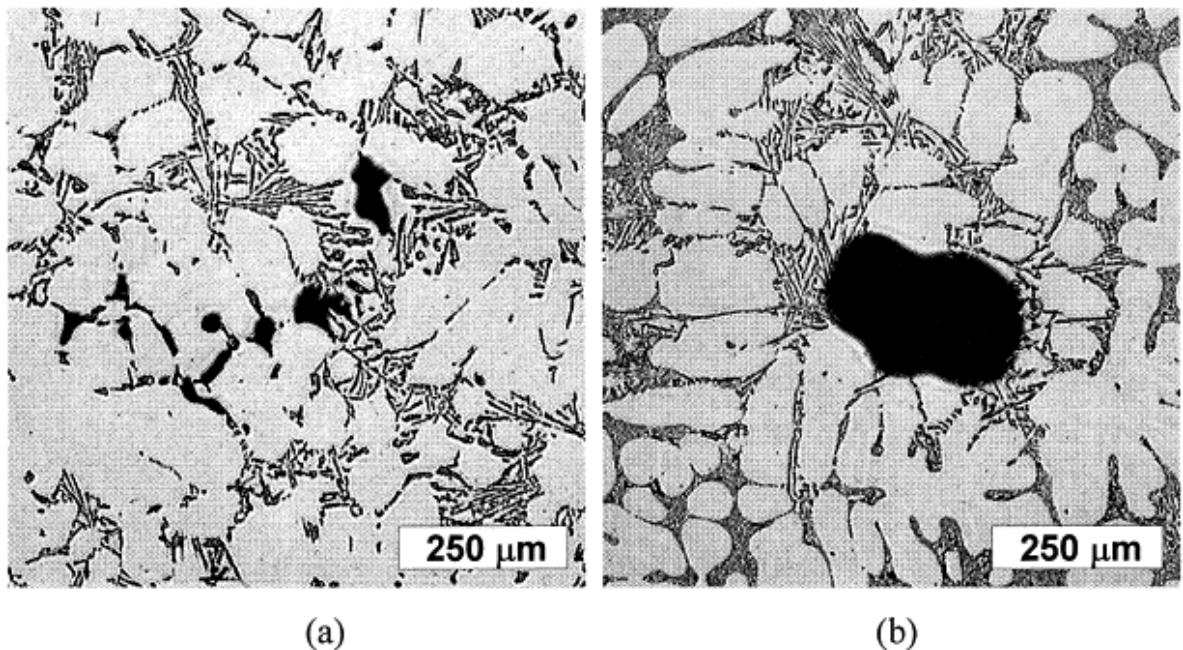


Fig. 2.12. Diferència de microporositat [18]

Hi ha una consideració important a tenir en compte, és difícil quantificar la porositat en representacions en dues dimensions ja que la porositat és un defecte tridimensional. Això és especialment significatiu en porositats formades per mala contracció i/o mala alimentació, un sol por d'aquestes característiques en una imatge en dues dimensions es veurà representat per un grup de pors. Això és degut als 'braços' que presenta el por en qüestió. Els pors formats per gas, en canvi, no tenen aquests braços ja que solen ser de forma esfèrica i tenen els eixos axials iguals, és per això que normalment es presenten com a una entitat singular. La imatge següent mostra com s'adapta un defecte en tres dimensions en la representació del pla en

dues dimensions. [18]

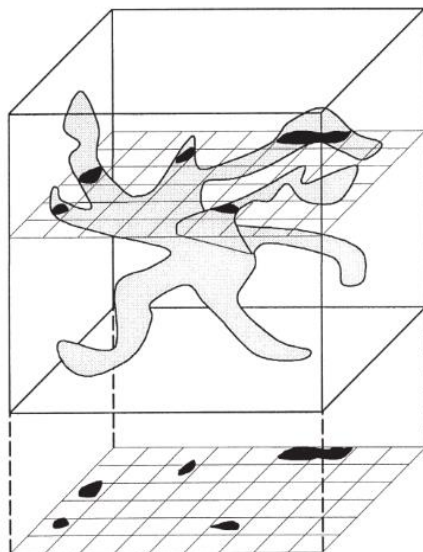
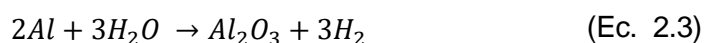


Fig. 2.13. Representació en 2D d'un por 3D [18]

2.6.3. Formació de porositat per gas

El líquid que conté alumini reacciona amb el vapor d'aigua que es troba a l'atmosfera per formar òxid d'alumini i hidrogen en estat gasós segons la reacció següent:



Llavors l'hidrogen en estat gasós que s'ha format en part s'escapa a l'atmosfera i l'altra part es dissol en el líquid d'alumini per dissociació de les molècules d'hidrogen a la superfície de l'aliatge fos segons la reacció següent:



Per tant la porositat causada pel gas sorgeix durant la solidificació del líquid a causa de la gran diferència de solubilitat de l'hidrogen en líquid respecte a la solubilitat en sòlid de l'alumini (aproximadament 0,9ml/100g en líquid i 0,03ml/100g en sòlid). Quan el metall es va solidificant, el sòlid rebutja l'hidrogen cap a la fase líquida, que es converteix en una zona enriquida de gas. Finalment, el líquid arriba a un estat de sobresaturació, i les bombolles d'hidrogen gas que es formen poden quedar atrapades al sòlid perquè no les pot expulsar a la fase líquida. L'àrea al voltant de cada bombolla no conté hidrogen i per això no es poden formar noves bombolles a prop. La distància de difusió de l'hidrogen determina aquesta àrea d'influència que té cada bombolla. Per tant, els pors formats per gas es troben distribuïts per tota l'àrea de l'aliatge tot i que es poden trobar concentracions grans depenent de les condicions de solidificació. [18]

2.6.4. Formació de porositat per contracció

La solidificació de l'alumini pur ve acompanyada per un 7% de contracció del volum degut a la diferència de densitat entre la fase líquida i la fase sòlida. Els aliatges més comuns d'alumini tenen una contracció del volum que es troba en un rang del 5 al 6%.

Quan les regions de l'aliatge es van refredant, aquesta contracció del volum es compensa agafant líquid de les àrees properes, un procés conegut com a alimentació. Normalment aquesta alimentació es produeix per petits canals interdendrítics. A mesura que el líquid va solidificant la capacitat d'aquestes àrees veïnes d'alimentar la zona que s'està contraient és menor ja que els canals interdendrítics es van reduint. Per això quan aquests canals s'han solidificat completament, algunes àrees queden aïllades de la possibilitat d'alimentar-se de nou metall. En aquest punt quan aquestes àrees ja no poden aconseguir més líquid, si es produeix una contracció es crearan tensions dins el líquid, i es podran produir buits per alliberar aquestes tensions. Aquests buits poden continuar creixent si es produeixen més contraccions de material, es per això que els pors causats per aquests defectes estan compostos per braços llargs i irregulars. A aquest tipus de defectes normalment se'ls denomina com a "rebeguts". [18]

2.6.5. Factors que influencien la formació de microporositat

2.6.5.1. Tipus d'aliatge

La composició de l'aliatge, concretament els elements amb més presència com per exemple el silici i el coure, tenen un fort efecte en la formació de dendrites α -Al, Al-Si eutèctic i Al-Si-Cu eutèctic durant la solidificació. Això comporta un impacte a la quantitat de microporositat que presenta la peça final.

Normalment els aliatges amb menys contingut de silici i amb un contingut més alt de coure tenen una porositat més alta. Això és degut a que els aliatges amb menys silici formen un percentatge més gran de dendrites primàries α -Al que suposen una resistència més gran a l'alimentació. Mentre que la naturalesa del coure també provoca un augment de la resistència. Per això en aquest tipus d'aliatges és habitual veure-hi més porositat causada per contraccions del líquid.[19]

2.6.5.2. Gradient tèrmic ($^{\circ}\text{C}/\text{mm}$)

El gradient de temperatures està considerat normalment com un paràmetre típic que mesura l'eficiència de l'alimentació per predir la formació de microporositat. El gradient tèrmic és la mesura de la diferència de temperatures entre diferents zones del líquid, per tant és molt habitual trobar gradients de temperatures en zones properes al motlle. La porositat disminueix quan s'augmenta el gradient de temperatura, això és degut a que un gradient alt fa més

estretes les zones on s'estan formant dendrites i això afavoreix l'alimentació de metall. [19]

2.6.5.3. Velocitat de refredament ($^{\circ}\text{C/s}$)

Normalment, a una velocitat de refredament més alta, més baixa és la quantitat de porositat present a la peça. Augmentar la velocitat de refredament redueix la distància entre els braços dendrítics, escurça la llargada dels canals interdendrítics i augmenta el nombre de canals per on pot fluir el líquid. Es per això que és més fàcil alimentar les zones que necessiten més líquid per evitar la contracció. A més, una velocitat de refredament alta disminueix el temps que l'hidrogen es pot col·locar a espais interdendrítics, però també fa que hi hagi d'haver una millor evacuació de gasos al motlle perquè hauran de sortir més ràpidament.[19]

2.6.5.4. Temps de solidificació local (s)

El temps de solidificació local és el temps des del principi de la solidificació fins al final de la solidificació de l'eutèctic, es determina restant el temps del liquidus del temps del solidus (final eutèctic). Amb un augment del temps local de solidificació, el contingut de porositat augmenta. Els efectes d'un temps local de solidificació petits a la formació de microporositat són semblants als efectes d'augmentar la velocitat de refredament.[19]

2.6.5.5. Velocitat del front de solidificació (mm/s)

La velocitat del solidus és un paràmetre important a l'hora de predir la formació de microporositat. Una velocitat més gran del front, implica que amb un temps menor s'ha de compensar la contracció del líquid. Per tant, és té menys temps perquè l'alimentació interdendrítica compensi aquesta contracció, per això la quantitat de microporositat creix. [19]

2.6.5.6. Condicions de fosa Contingut d'hidrogen fos (ml/100g Al)

Està clar que és un factor important ja que del contingut d'hidrogen se'n deriva la formació de microporositat per gas. És conegut que els seus efectes en la porositat sorgeixen quan el nivell d'hidrogen sobrepassa un valor límit. Per sota d'aquest valor la major part de la porositat es forma a causa de la contracció del material, mentre que per sobre d'aquest valor la major part de la porositat es formarà a causa del gas. Aquest valor límit varia en funció de l'aliatge i de les condicions de solidificació i pot variar de 0,1 fins a 0,2 ml H_2 /100g Al. Està comprovat que el contingut de porositat causada per gas és proporcional al nivell d'hidrogen.[19]

2.6.5.7. Modificació de l'eutèctic

La modificació de l'eutèctic tendeix a augmentar la porositat que es forma al material. L'augment de la porositat relacionada amb l'adició de modificadors és més gran quan més modificador s'afegeix. Això vol dir que s'ha d'utilitzar la mínima quantitat possible perquè ens

produeixi els efectes desitjats, ja que en algun cas modificar l'eutèctic pot no suposar cap millora per les propietats si els efectes de la porositat són majors que els efectes de modificar la microestructura. [20]

Modificació amb sodi

És complicat calcular els efectes de l'adició de sodi a l'aliatge d'alumini-silici ja que poden variar amb les diferents composicions per cada aliatge. Però l'augment de la porositat es pot relacionar amb els següents factors:[20]

- Un augment del contingut de H_2 al líquid de la mescla.
- Un augment de les dues següents: la inclusió d'hidrogen a la mescla i un augment de l'hidrogen absorbit pels òxids.
- Una reducció de la tensió superficial del líquid que afavorirà la nucleació i el creixement de la porositat formada per gas.
- Un augment de la quantitat d'hidrogen que pot absorbir el metall.
- Una reducció de l'alimentació interdendrítica: canviant la interacció entre la fase líquida i sòlida, augmentant la llargada de les dendrites que s'estan formant i/o augmentant la viscositat del líquid.

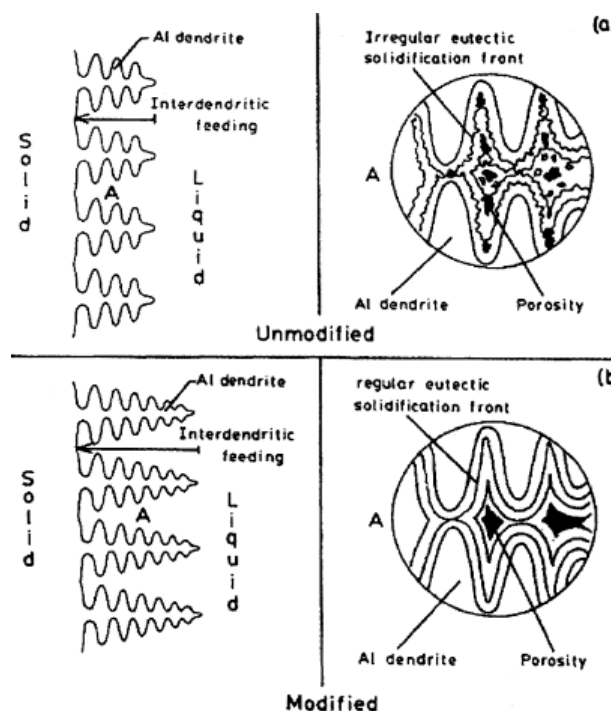


Fig. 2.14. Diferències de l'alimentació interdendrítica [19]

2.6.5.8. Neteja del material

El contingut d'òxid al líquid és un factor important que influeix directament a la formació de bombolles d'hidrogen. El nivell de porositat augmenta quan els aliatges tenen òxid ja que es

formen bombolles d'hidrogen més fàcilment.[19]

2.6.5.9. Refinament de gra

Una mida fina del gra tendeix a reduir la quantitat de porositat, també redueix la mida de la porositat aparent. Això passa perquè la pressió de l'hidrogen gasós no és suficientment alta perquè es formin pors fins a l'últim 5-10 % de solidificació. Per això els pors s'han d'encavir als espais que queden entre els grans d'alumini primari.

3. Metodologia experimental

3.1. Introducció

L'empresa col·laboradora va enviar quinze provetes provinents de cinc lots diferents. Algunes de les provetes provenien de peces que presentaven porositat visible a simple vista i s'havien trencat quan un client les feia servir. Les provetes tenien una secció rectangular d'aproximadament 5mm x 10mm i uns 70 mm de longitud.



Fig. 3.1. Probeta en el seu estat inicial

Per tant, les provetes rebudes es poden distribuir en cinc grups diferents que seran els lots d'on provenen.

➤ **Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona de la base)**

Aquest lot conté quatre provetes que van ordenades de la A a la D. Les mostres provenen d'un tipus de peça que es trencava quan el client en feia ús, concretament de la zona de la base de la peça i presentava porositat aparent.

➤ **Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona propera a la ruptura)**

Aquest lot, com l'anterior, també conté quatre mostres ordenades de A a D. En aquest cas les provetes venen del mateix tipus de peça que en el cas anterior, també es trencava al client i presenta porositat visible, però la proveta prové d'una zona de la peça propera a on es va produir la ruptura.

➤ **Lot 149691 S8M9AS4P136NP1**

Pel que fa a aquest lot també contenia quatre provetes ordenades de la lletra E a la H. En aquest cas la peça no s'havia trencat i no presentava porositat a simple vista.

➤ **Lot 142001 STF-STS80**

Aquest lot contenia dues provetes anomenades amb les lletres A i B. Les mostres provenen d'un tipus de peça que es va trencar quan el client en feia ús i a la peça si podia apreciar porositat a simple vista.

➤ **Lot 151715 STF-STS80**

En aquest lot només hi havia una proveta ja que inicialment era de dues però una d'elles es va perdre abans d'arribar. Les provetes provenen del mateix tipus de peça que en el cas anterior però es tracta de peces de nova producció, a priori la peça no presentava porositat aparent.

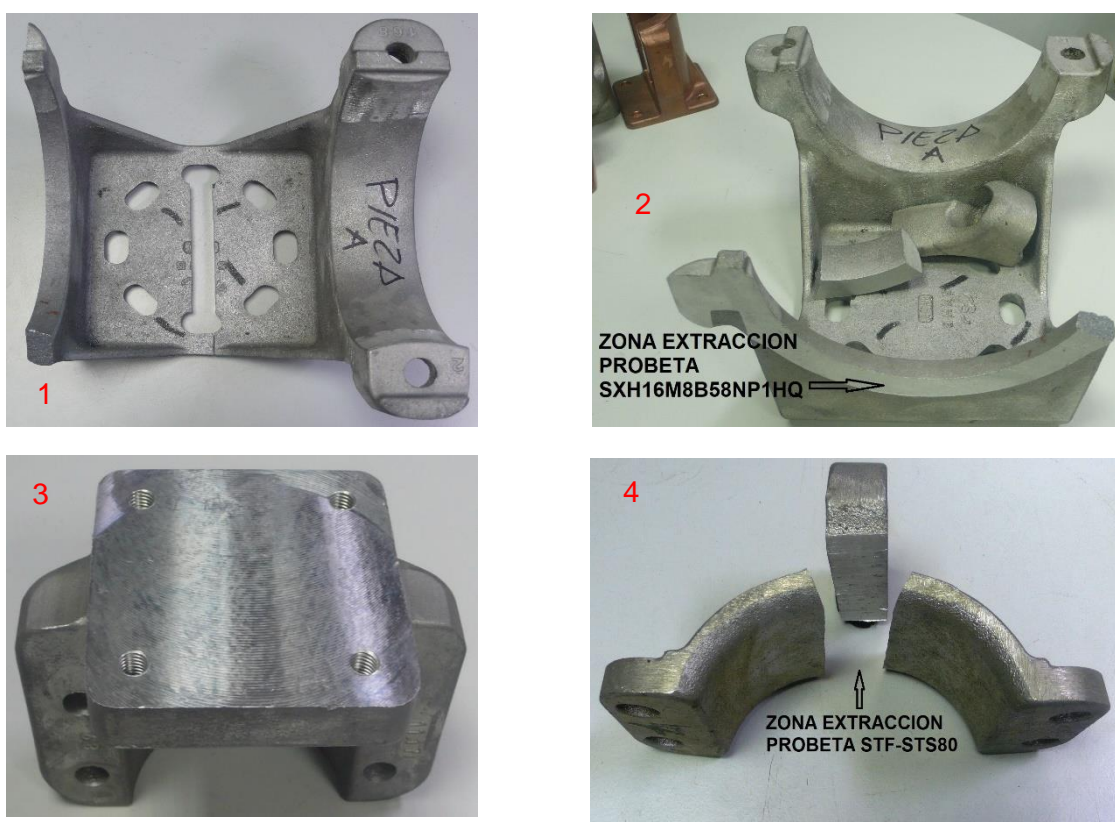


Fig. 3.2. Peces d'extracció de les provetes: 1) Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona de la base), 2) Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona propera a la ruptura), 3) Lot 149691 S8M9AS4P136NP1, 4) Lot 142001 i 151715 STF-STS80

3.2. Anàlisis previs

Algunes de les peces ja havien estat analitzades per una empresa externa. Aquestes anàlisis s'hauran de tenir en compte a l'hora de mostrar els resultats dels estudis que es realitzaran, sobretot pel que fa a la composició química que hauria de ser semblant per a totes les peces. Les anàlisis que es van realitzar externament són les següents: composició de la mostra mitjançant mètodes químics, assaig de tracció i assaig de duresa Brinell.

3.2.1. Lot:138465 SXH16M8B58NP1HQ

Aquesta va ser una de les dues peces que van ser assajades per l'empresa externa. Es van fer tres mesures de duresa Brinell i es van obtenir els següents resultats: 88-89-92, el resultat obtingut a l'assaig de tracció és d'una tensió de ruptura de 168 MPa la proveta va trencar directament sense apreciar-se deformació per tant era fràgil. La composició química que es va obtenir és la següent:

Element	% en
Alumini (Al)	91,6
Silici (Si)	7,7
Ferro (Fe)	0,18
Coure (Cu)	0,032
Manganès(Mn)	0,063
Magnesi (Mg)	0,25
Crom (Cr)	<0,01
Zinc (Zn)	0,024
Plom (Pb)	<0,01
Estany (Sn)	<0,01
Titani (Ti)	0,096

Taula 2: Composició Lot:138465 SXH16M8B58NP1HQ

3.2.2. Lot 151715 STF-STS80

Pel que fa a les anàlisis realitzades en aquesta peça, es tracta d'una peça de nova producció, s'han obtingut uns resultats de duresa Brinell de 100-102-100. En aquest cas, la proveta va deformar abans de ser trencada i presenta una tensió de deformació de 199 MPa, la tensió de ruptura que va presentar la proveta és de 224 MPa. La composició química resultant de les anàlisis és la següent:

Element	% en
Alumini (Al)	92,3
Silici (Si)	7
Ferro (Fe)	0,18
Coure (Cu)	0,017
Manganès(Mn)	<0,01
Magnesi (Mg)	0,27
Crom (Cr)	<0,01
Níquel (Ni)	0,049
Zinc (Zn)	0,014
Plom (Pb)	<0,01
Estany (Sn)	0,012
Titani (Ti)	0,12

Taula 3: Composició Lot 151715 STF-ST580

3.3. Assaig de flexió a quatre punts

Un cop es van rebre totes les provetes, es va comprovar la forma que tenien i analitzats els resultats de les anàlisis prèvies, es va decidir realitzar una anàlisis de flexió a quatre punts per a cada proveta degut a la geometria que presentaven les provetes i per determinar els valors de la càrrega de fallada a flexió de cada una. Per poder relacionar-se els resultats amb la porositat que presentaven les provetes.

L'objectiu principal d'aquest assaig serà determinar les càrregues de fallada de cada proveta. A part d'això aquest tipus d'assajos també s'utilitza per determinar el mòdul de Young dels materials però en aquest cas no es calcularà. És un assaig molt semblant a l'assaig de flexió de tres punts però amb la diferència que el tros de la proveta sotmès a les màximes tensions és més gran. El muntatge hauria de tenir la següent forma:

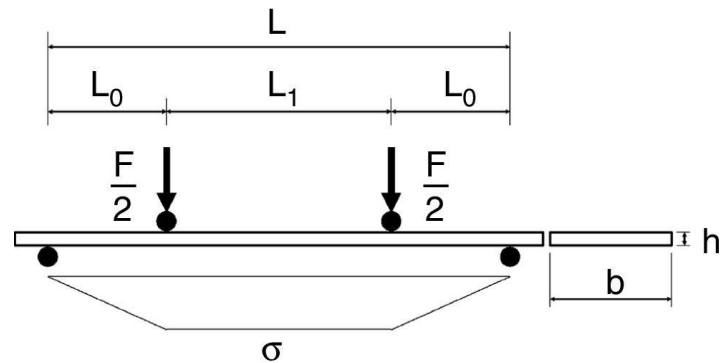


Fig. 3.3. Esquema d'assaig de flexió a 4 punts [21]

Mitjançant la fórmula següent, considerant la força màxima que s'ha obtingut, s'obté la tensió de ruptura de cada proveta:

$$\sigma = \frac{3 * F * L_0}{b * h^2} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Els assajos es van realitzar als laboratoris de la EEBE, amb l'ajuda del tècnic de laboratori, tot i així van sorgir imprevistos durant l'assaig ja que algunes de les provetes van aguantar més càrrega de la prevista. Abans de realitzar els assajos es va mesurar la secció de cada proveta mitjançant un peu de rei.

El muntatge de l'assaig requereix d'una premsa que exerceixi la força necessària per trencar la peça i enregistri el valor màxim. També faran falta dues peces: una d'elles realitzarà la funció de suport, tindrà la distància entre els suports de la proveta més grans, i l'altre serà l'encarregada de transmetre la força de la premsa cap a la proveta subjecte d'estudi.

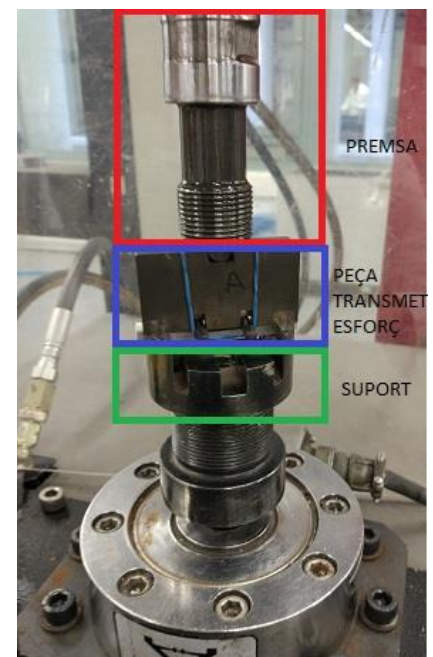


Fig. 3.4. Muntatge de l'assaig

3.3.1. Primer muntatge

El primer assaig que es va dur a terme va ser amb una màquina de la marca Instron de dimensions petites i que podia aplicar una força màxima de 10000 N, la velocitat d'augment de la càrrega aplicada escollida va ser de 100 N/s. Les dimensions del muntatge, segons l'esquema anterior, són les següents: $L = 40 \text{ mm}$ i $L_0 = 10 \text{ mm}$. Es va considerar que les condicions eren correctes per poder assajar totes les provetes i es va prosseguir amb l'assaig.

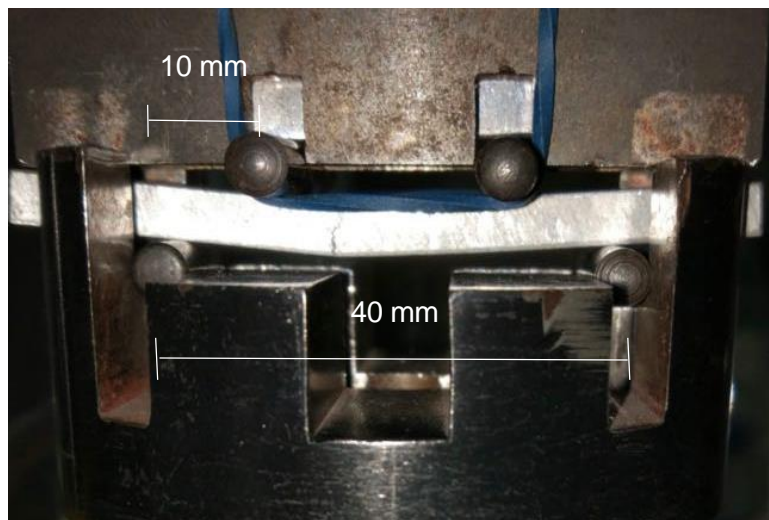


Fig. 3.5. Primer muntatge

Amb aquest muntatge es va aconseguir assajar una proveta correctament, ja que la segona proveta que es va assajar, pertanyent al Lot 149691 S8M9AS4P136NP1, va arribar al límit de la màquina sense trencar-se, la proveta es va anar deformant mostrant així la seva ductilitat. La tercera proveta, pertanyent al mateix lot que l'anterior, també es va deformar fins a arribar al límit de càrrega de la màquina sense arribar-se a trencar. A continuació es mostren imatges de les provetes que no es van trencar després de ser assajades.



Fig. 3.6. Provetes deformades que no van trencar

3.3.2. Segon muntatge

Degut als problemes que van sorgir al primer muntatge es va decidir canviar de màquina, la màquina també era de la marca Instron però de dimensions més grans i amb un límit de força aplicada de 20000 N, la velocitat d'augment de la càrrega aplicada escollida va ser de 100 N/s. El problema a l'utilitzar aquesta màquina era que el muntatge anterior no servia, ja que les peces del muntatge eren de dimensions diferents, i per tant era necessari elaborar-ne un de nou amb peces més complicades de fixar. Les dimensions finals del muntatge van ser les següents: $L = 53 \text{ mm}$ i $L_0 = 16,5 \text{ mm}$.

Amb aquestes condicions només es va poder assajar una proveta.

3.3.3. Muntatge final

Un cop es va assajar la primera proveta, el muntatge es va moure i es va decidir deixar-lo com havia quedat per evitar problemes, simplement es van prendre les mesures de la nova geometria i es va seguir fent els assajos amb la mateixa maquinària. Les mesures del muntatge final són les següents: $L = 62 \text{ mm}$ i $L_0 = 19 \text{ mm}$.



Fig. 3.7. Muntatge final

Amb aquestes condicions es van dur a terme la resta dels assajos necessaris, excepte les provetes que no havien trencat anteriorment que es va decidir deixar-les en l'estat en que es trobaven.

3.4. Preparació de les mostres per observat metal·logràfic

Un cop estudiats els resultats de l'assaig de flexió es va decidir estudiar cinc de les quinze provetes, una per cada lot, ja que les propietats obtingudes entre elles eren molt semblants i es va considerar oportú no estudiar totes les provetes.

3.4.1. Tallat de la proveta

El procediment s'ha dut a terme a l'ETSEIB utilitzant la següent tronçadora.

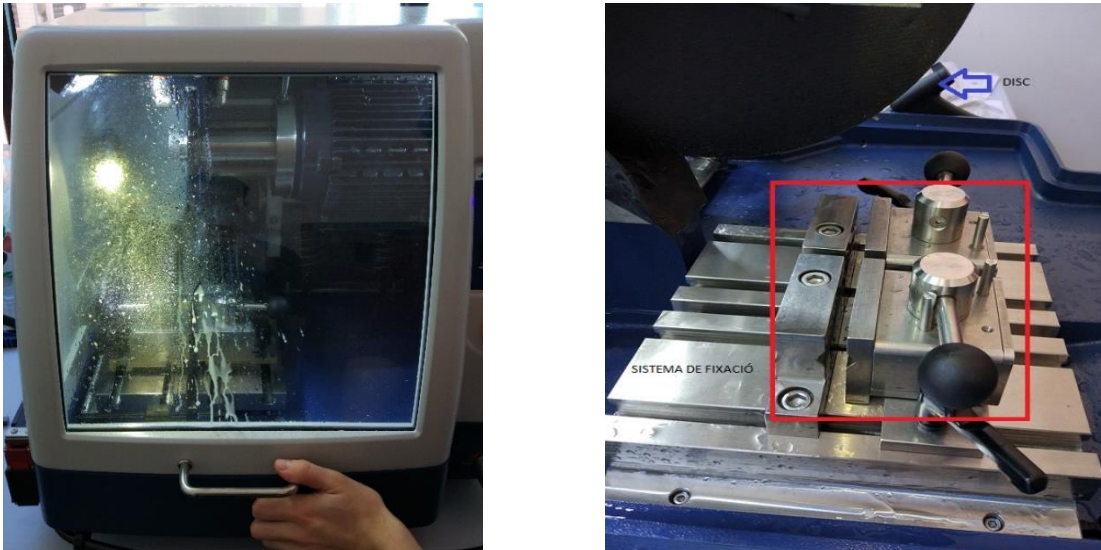


Fig. 3.8. Tronçadora amb pantalla de protecció (esquerra) i Tronçadora amb la pantalla oberta (dreta)

El procediment per tallar la proveta és molt senzill: es fixa la proveta, se situa el disc de tall sobre la proveta per comprovar si s'està tallant correctament, en cas afirmatiu, es baixa el protector, s'engega el líquid lubricant i el disc i es fa baixar fins a la proveta per fer el tall .

Es va decidir fer dos talls a la proveta, el primer tall se situa a una distància aproximada d'un centímetre de la fractura i l'objectiu d'estudiar aquesta part es poder veure la zona de la fractura amb un instrument d'observació de precisió. Posteriorment es realitza un altre tall situat a una distància també aproximada d'un centímetre amb l'objectiu d'estudiar la microestructura que presenta la proveta a zones properes de la fractura.

3.4.2. Inserir la mostra en baquelita

Aquest procediment es va fer al laboratori de l'ETSEIB utilitzant una màquina Simplimet 4000 de la marca Buehler.

El tall que s'ha fet anteriorment amb l'objectiu d'estudiar la microestructura s'ha d'inserir dins de baquelita per fer més còmode els procediments posteriors. En el nostre cas s'ha utilitzat baquelita no conductora. El procediment és molt simple, es col·loca el tros de la proveta, que gràcies als talls que s'ha fet anteriorment té les cares paral·leles, s'emplena la màquina amb la baquelita necessària, aproximadament unes dues cullerades, i s'estableixen els paràmetres de pressió, temps d'escalfament i temps de refredament segons el tipus de baquelita que s'ha introduït. Els paràmetres introduïts són els que es mostren a la següent imatge.



Fig. 3.9. Paràmetres per muntar la baquelita

3.4.3. Polit de la mostra

Aquesta part de la preparació es va realitzar als laboratoris de l'EEBE, amb la màquina Struers automàtica que permet treballar en totes les mostres a la vegada i per tant fa la feina molt més còmode. La màquina està formada bàsicament per dues parts: el capçal que és on se situen les mostres, i també el disc que és on se situen els papers de polir. Aquestes dues parts tenen rotacions pròpies i poden rotar de forma complementària (amb el mateix sentit) i de forma no complementària, també es pot triar la força que es vol aplicar a les mostres per apretar-les contra el disc.

El procés de polit és bastant complex ja que pot variar en funció del material que s'està polint i no hi ha un procediment exacte estipulat. L'objectiu de polir les mostres és obtenir un acabat superficial "mirall" que permeti observar la microestructura de la mostra correctament sense veure-hi ratllades. En el nostre cas el procediment seguit, es va basar en prova i error on s'observava si la mostra reduïa el nombre de ratllades o augmentava. Finalment, el procediment que es va seguir va ser el següent:

- 1r pas: El primer pas consisteix en fer un desbast de la mostra per obtenir una superfície plana i uniforme. En el nostre cas, es va utilitzar paper, de la marca Buehler, P320 format per SiC, aplicant una força de 15 N, a 150 revolucions per minut i amb la rotació de les mostres i el disc complementàries. Les mostres van estar sotmeses a aquestes condicions durant 5 minuts i es va utilitzar aigua com a lubricant.

- 2n pas: El següent pas consisteix en polir la peça per obtenir un acabat superficial sense rallades. Per fer-ho, es va fer servir una tela de polir Struers MD Nap on s'aplicava de forma periòdica suspensió de diamant de $3\mu\text{m}$. La força aplicada era de 15 N, la velocitat del disc i capçal era de 150 revolucions per minut i la rotació complementària. El procediment consistia en cicles de 3 minuts on s'anava revisant si les mostres presentaven menys rallades.
- 3r pas: L'últim pas consisteix en l'acabat superficial final. En aquest pas també es va utilitzar una tela de polir Struers MD Nap on es va aplicar la suspensió amb silica col·loïdal. Per fer-ho es van aplicar els mateixos paràmetres que en el pas anterior però en aquest cas es va aplicar una mica de lubricant format per etanol.



Fig. 3.10. Procediment de polit ordenat d'esquerra a dreta

3.5. Microscòpia

3.5.1. Microscòpia òptica

Un cop les mostres estaven polides es va procedir a prendre imatges de la microestructura. Les imatges es van prendre utilitzant el microscopi òptic que hi ha al laboratori de l'ETSEIB, és el model Axio Vert.A1 de la marca ZEISS, un microscopi òptic invertit. Aquest tipus de microscopis funcionen mitjançant un feix de llum que es projecta a través d'una lent convexa fins que arriba a l'objectiu, gràcies a la càmera que porta incorporada es poden prendre imatges del que s'està observant.

Es van prendre dos tipus d'imatge: unes amb la lluminositat ajustada per diferenciar la microestructura i les altres amb la lluminositat augmentada per diferenciar la porositat. Es van prendre suficients imatges per poder cobrir tota l'àrea de cada mostra, un total de 12 fotografies de cada tipus per proveta.

3.5.2. Microscòpia SEM

El SEM, microscopi electrònic d'escombrat, fa servir una tècnica molt diferent. No fa servir un feix de llum per capturar imatges, en canvi, utilitza un feix d'electrons que fan un escombrat de tota la superfície que s'està analitzant. La superfície retorna una quantitat de partícules que són captades i analitzades per detectors que permeten construir imatges en tres dimensions. Aquest tipus de microscopi pot arribar a uns augments de 20x-900kx. Aquesta tècnica proporciona uns resultats molt superiors a la resolució que pot oferir qualsevol tipus de microscopi òptic. [22]

Aquest tipus de microscopi s'ha utilitzat per observar la fractura de forma més precisa. El muntatge és senzill: es col·loquen els trossos de fractura que es volen observar en una plantilla, sempre amb els guants posats per contaminar la mostra el mínim possible, i s'introdueix la plantilla dins del microscopi. El microscopi que es va utilitzar està situat a l'EEBE i és el model Phenom XL.



Fig. 3.11. SEM Phenom XL

3.5.3. Microscòpia FIB-SEM

El microscopi d'ions focalitzats és un microscopi que permet caracteritzar i analitzar els materials a una escala nano mètrica. Es un tipus de microscopi que moltes vegades es combina amb un SEM per formar dues columnes una formada per ions focalitzats i l'altre formada per electrons. [23]

En el nostre cas es va utilitzar aquest equipament per poder caracteritzar dues de les provetes

on s'apreciava una diferència en la microestructura. Es tracta d'un procés bastant complex ja que la baquelita no era conductora. El procés el va realitzar el tècnic de laboratori, primer es va enganxar una tira de material conductor a la mostra ja que la baquelita no era conductora i es recobreix la mostra amb carboni. Després es carrega el patró de l'alumini pur, guardat al buit, al microscopi per poder-lo comparar després amb les dues mostres que es volen analitzar. Es va utilitzar el model de microscopi de l'EEBE NEON 40 marca ZEISS.



Fig. 3.12. Microscopi Neon 40

3.6. Mesura de la porositat

Les mesures de porositat es van fer mitjançant el software ImageJ que permet calcular el percentatge de les àrees fosques d'una imatge, per tant es va aplicar aquest procediment a les 12 imatges amb la lluminositat augmentada de cada proveta i després es va fer la mitjana. El procediment seguit amb el programa és el següent:

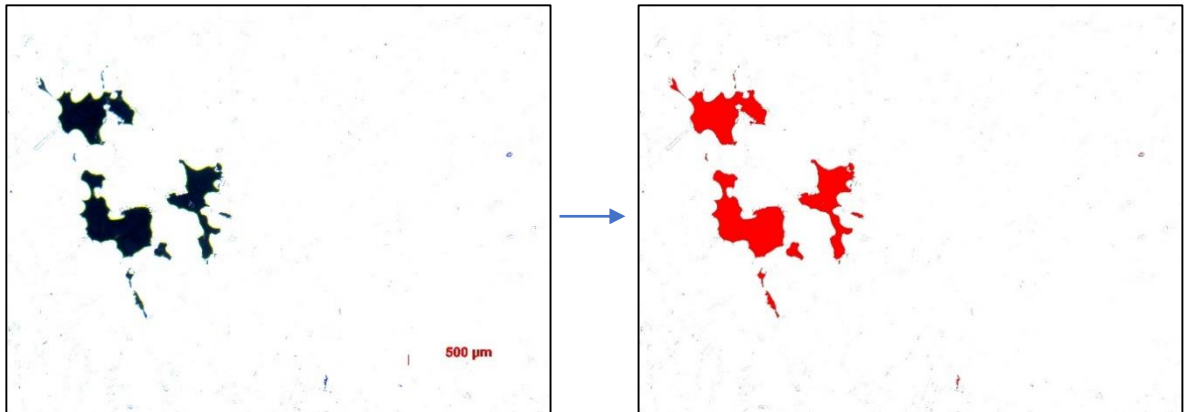


Fig. 3.13. Primera mesura de porositat

Després de fer les mesures de totes les provetes es va veure que els valors que s'obtenia no eren gaire elevats i potser no reflectien la realitat amb gaire exactitud. Tal com s'ha explicat a l'apartat 2.6.2 es va considerar que la porositat causada per la contracció del líquid al solidificar-se no es podia apreciar en una imatge 2D, ja que moltes vegades només es pot veure els "braços del por", per tant es va prendre la decisió de fer una segona mesura de la porositat on s'ajuntaven els pors propers i que tinguessin forma no circular ja que els pors circulars són els causats per la mala alliberació de gasos i tenen una presència aïllada.

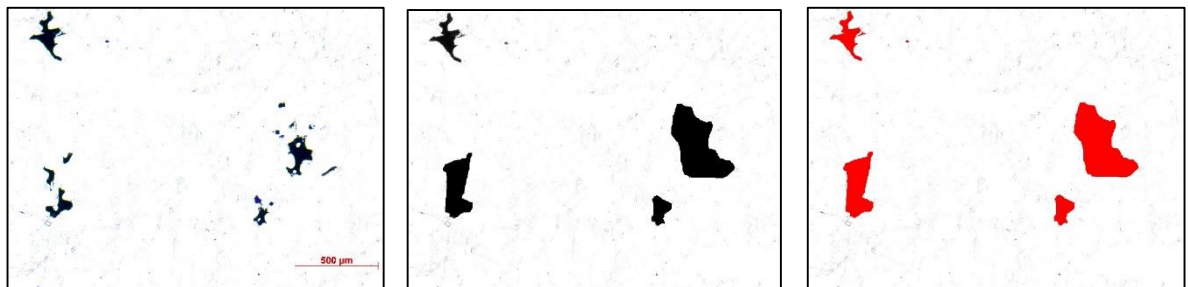


Fig. 3.14. Segona mesura de porositat

3.7. Assaig de duresa Vickers

Un cop obtingudes les imatges necessàries amb les mostres polides es van dur a terme assajos de microduresa Vickers. Aquest assaig s'utilitza per determinar la duresa del material mitjançant una penetració d'un indentador de diamant de forma piramidal a la mostra objecte d'anàlisis, per mesurar la deformació plàstica que produeix. Les cares de la piràmide de l'indentador han de formar entre elles un angle de 136°. Després mitjançant la fórmula següent s'obté la duresa Vickers del material.

$$HV = \frac{1,8554 * F}{d^2} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

On F és la força en quiloponds i d és la mitjana de les diagonals del rombe que deixa en el material.

Els assajos es van dur a terme al laboratori de l'EEBE amb el microduròmetre de la marca EmcoTEST. Es van dur a terme cinc tests per cada mostra. El procediment consisteix en anar augmentant la càrrega fins que s'obté una forma de la marca que deixa l'indentador a la mostra d'aproximadament un quadrat. Un cop es té la càrrega necessària per fer la indentació correctament se situa la mostra al lloc on es vulgui realitzar la indentació, s'ha de vigilar que estigui almenys a una distància equivalent de cinc perforacions de la perforació més propera, després es canvia la lent per l'indentador i s'aplica la càrrega. Finalment, la màquina ja calcula la duresa equivalent per la perforació realitzada, si és necessari s'ajusten els valors de les diagonals i dóna el valor.

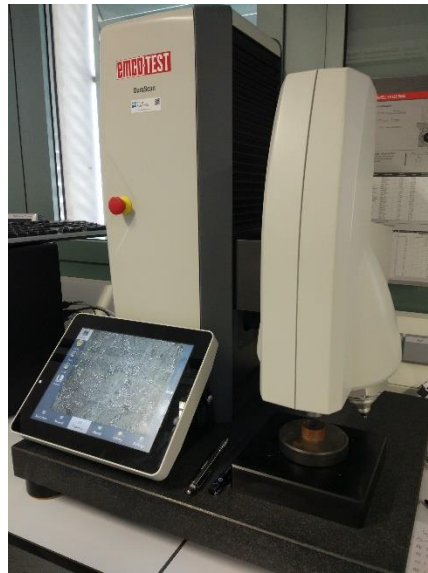


Fig. 3.15. Aparell utilitzat per mesurar la duresa

4. Resultats

4.1. Assaig de flexió a 4 punts

A continuació es mostra una taula amb els resultats obtinguts al fer l'assaig de flexió.

Lot	Peça	Càrrega (N)	σ fallada 4 punts (MPa)
138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona de la base)	A	1250	225,1
	B	1079	242,4
	C	1363	251,9
	D	2571	293,6
138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona propera a la ruptura)	A	1063	248,6
	B	1280	284,7
	C	1378	269
	D	895,5	190,5
149691 S8M9AS4P136NP1	E	2680	564,7
	F	Límit	-
	G	Límit	-
	H	Límit	-
142001 STF-STS80	A	1656	352,4
	B	744	156,8
151715 STF-STS80	A	2687	594,6

Taula 4: Resultats assaig de flexió 4 punts

Durant l'assaig es va apreciar que les provetes del lot 149691 S8M9AS4P136NP1 presentaven ductilitat, ja que abans de trencar patien grans deformacions.

Les provetes que estan marcades de color gris van ser les seleccionades per analitzar més profundament. Es va seleccionar aquestes provetes perquè eren les que oferien pitjor rendiment de cada lot, de totes maneres el comportament de les mostres d'un mateix lot és bastant similar. Com a resum s'ha calculat la mitjana i la desviació típica de cada lot:

- Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona de la base): mitjana 253 MPa i desviació típica de 29 MPa.
- Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona propera a la ruptura): mitjana 248 MPa i desviació típica de 41 MPa.
- Lot 149691 S8M9AS4P136NP1: tres de les quatre provetes van superar el límit de la màquina i l'única proveta que va trencar va oferir molt bon rendiment.
- Lot 142001 STF-STS80: mitjana 255 MPa i una desviació típica 138 MPa, en aquest lot s'aprecia un comportament diferent entre les provetes que segurament es deu a que només es tenen dues provetes. Una d'elles té un comportament mecànic molt dolent mentre que l'altre té un comportament acceptable.
- Lot 151715 STF-STS80: aquest lot només presentava una proveta amb un comportament molt bo.

Per tant se seguirà estudiant les provetes seleccionades després de veure els resultats de l'assaig. Com es pot apreciar es podria diferenciar entre dos grups, les provetes amb una resistència superior als 500 MPa que corresponen a peces que no s'han trencat al client mentre que l'altre grup el formarien les provetes amb una resistència inferior als 300 MPa que corresponen a provetes que presentaven macro porositat visible a ull nu i que es van trencar mentre se'n feia ús.

4.2. Assajos de duresa

Els resultats de duresa obtinguts es mostren a la següent taula. La taula mostra la mitjana i la desviació típica de les indentacions que s'han realitzat a cada proveta.

Proveta	Duresa mitjana	Desviació típica
<i>PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ</i>	102	3,7
<i>PEÇA D Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ</i>	89	1
<i>PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1</i>	90	1,2
<i>PEÇA B Lot 142001 STF-STS80</i>	99,6	2,3
<i>PEÇA A Lot 151715 STF-STS80</i>	106,6	1,5

Taula 5: Resultats de duresa

Aquests resultats s'assimilen als resultats de les anàlisis prèvies comentades a l'apartat 3.2.

4.3. Caracterització microestructural

En aquest apartat es mostraran fotografies de la microestructura de cadascuna de les provetes seleccionades. Es discutirà els efectes d'aquesta microestructura en les propietats mecàniques de la peça i també les possibles diferències microestructurals entre les provetes.

4.3.1. PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona de la base)

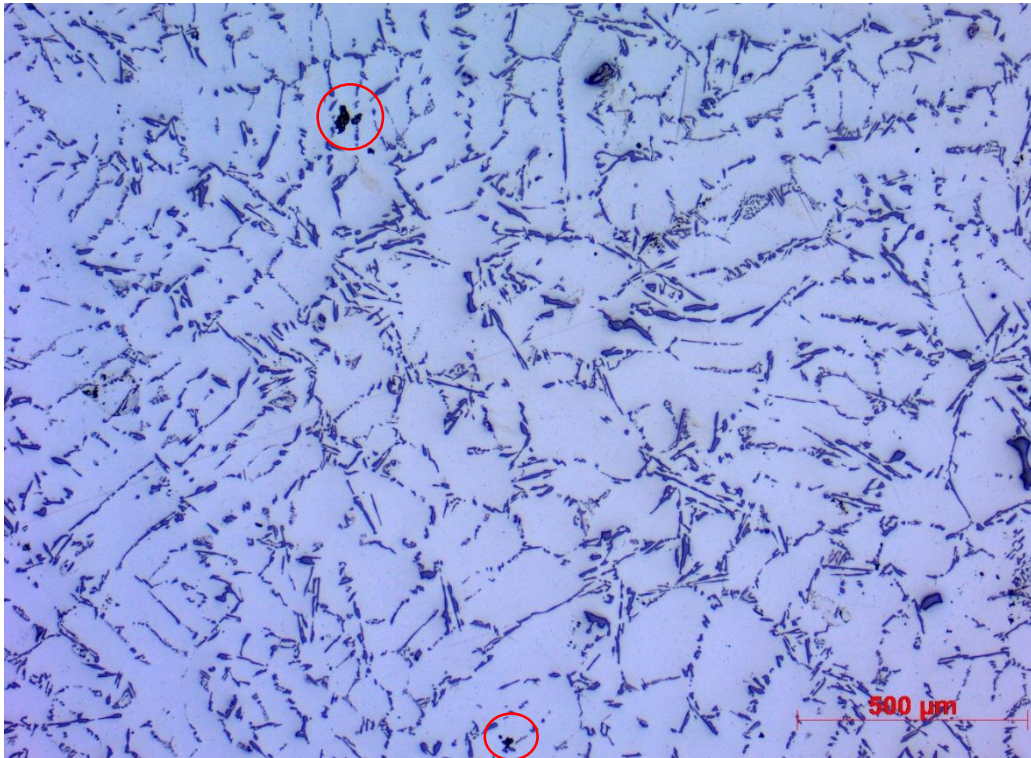


Fig. 4.1. Microestructura PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona de la base)

Com es pot apreciar es tracta d'una microestructura d'un aliatge d'alumini-silici hipoeutèctic ja que es pot apreciar l'alumini primari de color blanc i les agulles de silici amb forma acicular que pertanyen a la fase eutèctica, es pot veure que no hi ha cap estructura de silici primari.

Tot i que, les agulles dels precipitats estan disperses per la matriu de manera uniforme la geometria i la mida que presenten no és la més convenient, ja que aquesta forma allargada que presenten les agulles pot actuar com a generador d'esforços i d'iniciador de fractura, com a resultat disminuir la ductilitat del material.

També es pot apreciar porositat, encerclada en vermell, i caldrà estudiar si hi ha alguna fase intermetàl·lica present a la microestructura que pugui afectar a les propietats.

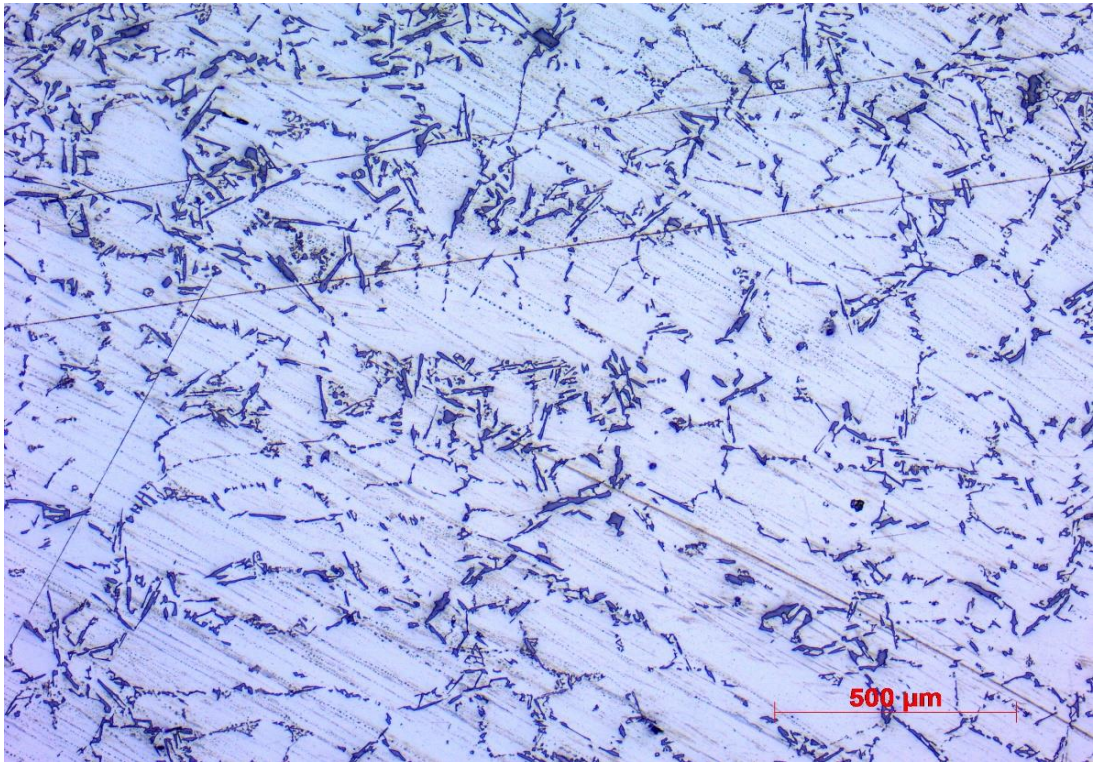
4.3.2. PEÇA D Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona propera a la ruptura)

Fig. 4.2. Microestructura PEÇA D Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona propera a la ruptura)

Aquesta microestructura és molt semblant a l'anterior perquè pertanyen al mateix tipus de peça i per tant les condicions amb les que s'ha elaborat la peça són les mateixes. La microestructura presenta les mateixes característiques que l'anterior proveta, la matriu de color blanc d'alumini i les agulles aciculars de silici que es formen a l'eutèctic.

4.3.3. PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1

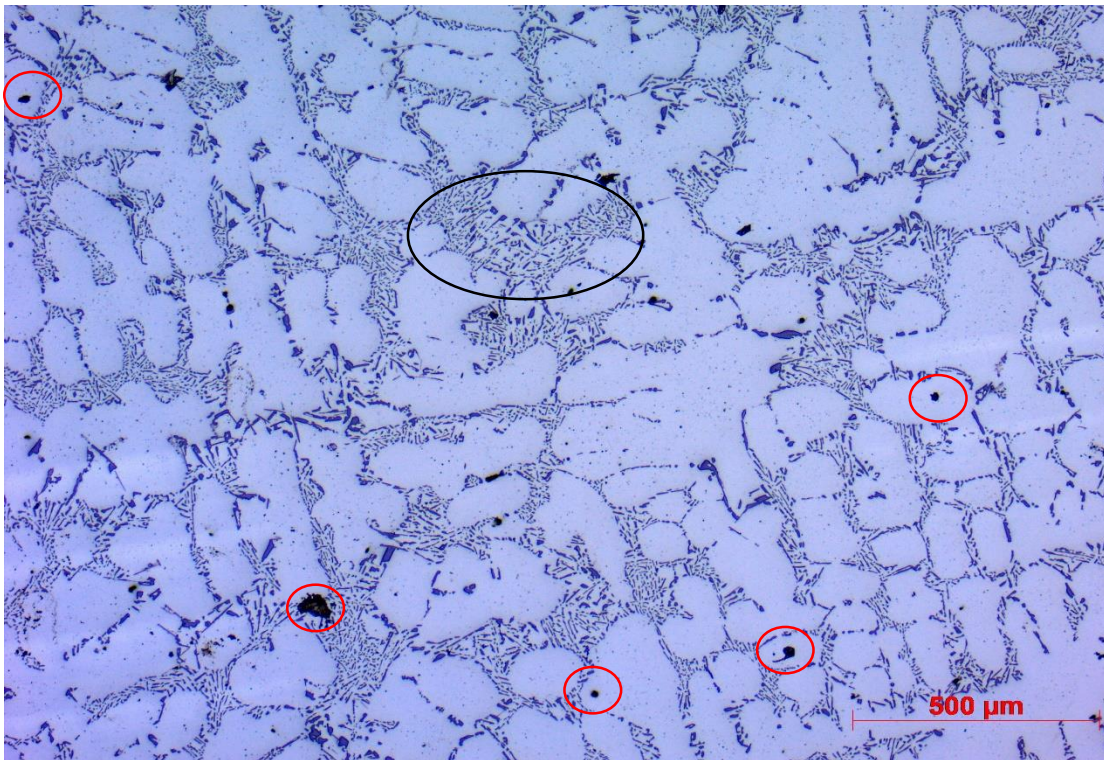


Fig. 4.3. Microestructura PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1

En aquest cas la proveta també presenta una microestructura hipoeutèctica, ja que no s'hi troben geometries de silici primari, però és lleugerament diferent a les dues microestructures anteriors. També es pot distingir la matriu d'alumini de color blanc i les fases de silici eutèctic de color gris.

Però la diferència entre les fases de silici entre les microestructures anteriors i aquesta és notable. Com es pot veure, encerclat de color negre, hi trobem una de les fases formades per silici, però en aquest cas no està formada per agulles allargades sinó que són més petites i més fines. Amb aquesta modificació s'aconsegueix una millora de les propietats mecàniques de la peça i es correspon amb els assajos realitzats, ja que les provetes que també formaven part d'aquest lot eren dúctils i presentaven límits de trencament alts.

Un altre dels fets a destacar és la presència de porositat de forma esfèrica que presenta la microestructura, encerclada amb vermell, provocada pels gasos atrapats durant la solidificació. Aquest fet juntament amb la forma que presenta el silici eutèctic fa pensar que s'ha afegit més modificador de l'eutèctic en aquest lot que en els dos anteriors i com ha resultat s'han obtingut millors resultats mecànics.

4.3.4. PEÇA B Lot 142001 STF-ST580

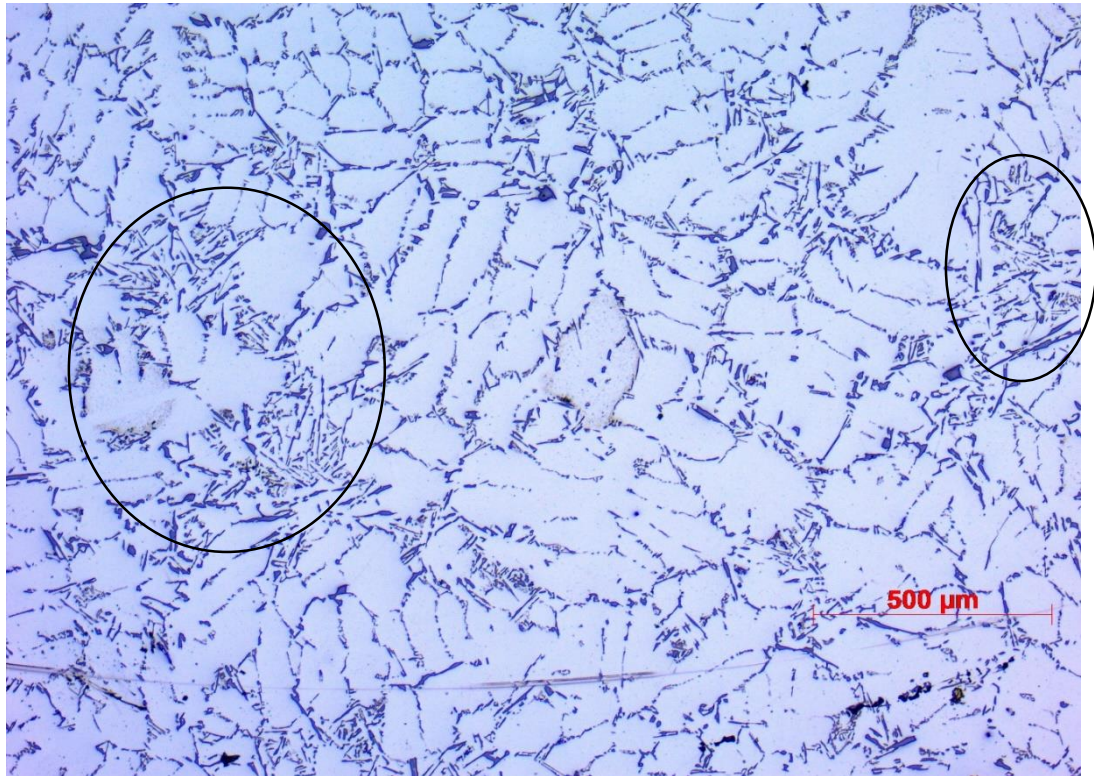


Fig. 4.4. Microestructura PEÇA B Lot 142001 STF-ST580

Aquesta proveta presenta una microestructura molt semblant a les dues primeres provetes, la microestructura està formada per la matriu blanca d'alumini i per les agulles aciculars i allargades de silici. També es pot veure una distribució bastant uniforme de les agulles respecte de la matriu d'alumini, excepte en algunes zones, encerclades de color negre, on hi ha més concentració de silici i sembla que les fases de silici s'hagin modificat.

4.3.5. PEÇA A Lot 151715 STF-STS80

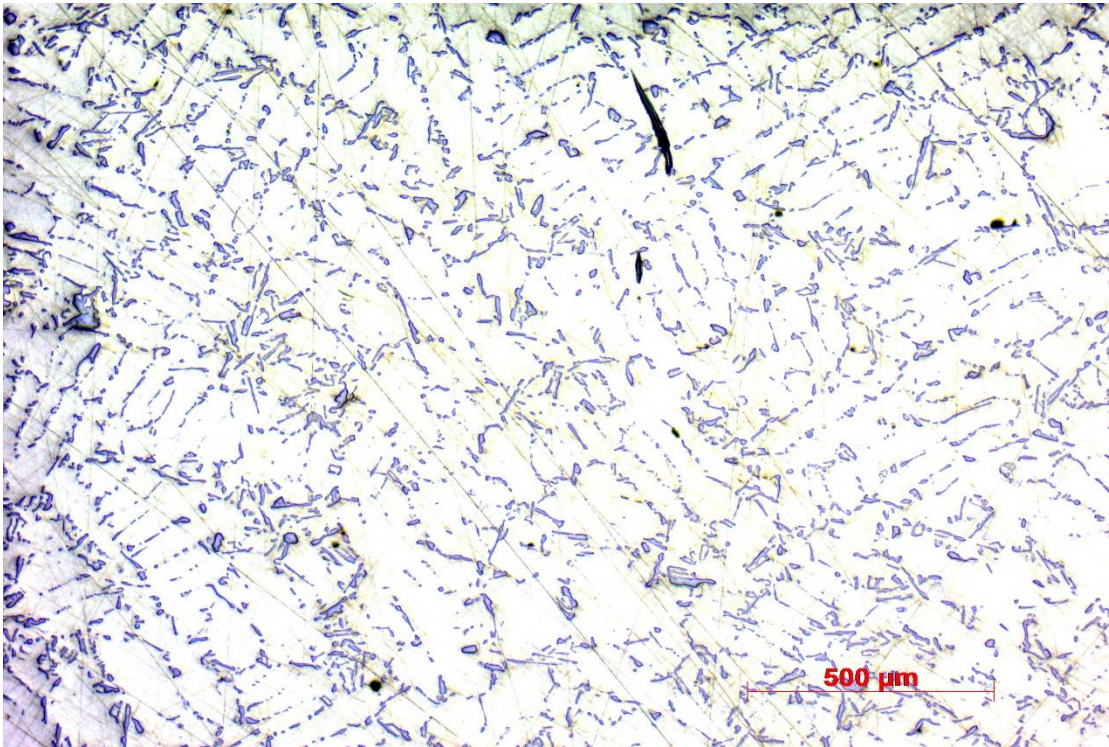


Fig. 4.5. PEÇA A Lot 151715 STF-STS80

Tot i que el color és lleugerament diferent no és un tret diferencial ja que això es deu al procés de polit.

La microestructura és semblant a l'anterior i a les dues primeres provetes analitzades amb l'alumini de color blanc i la fase de silici eutèctic de color gris. En aquest cas però la distribució de les fases de silici sembla més uniforme i més ben repartida, no es produeixen tantes concentracions de silici. A priori com més uniforme sigui el repartiment de les fases de silici millors propietats tindrà el material.

Tot i així farà falta avaluar si la petita diferència entre les microestructures el que marca la diferència de prestacions entre la proveta anterior i aquesta o si es tracta d'algun altre factor, com per exemple la quantitat de porositat que presenta la proveta.

4.3.6. Comparació de la microestructura mitjançant microscòpia FIB-SEM

Tal i com s'ha comentat quatre de les cinc provetes analitzades tenen una microestructura molt semblant i l'altra proveta diferent. Per tant, s'ha analitzat més precisament una proveta de cada grup per saber el contingut de les dues peces seleccionades i les fases intermetàl·liques que presenten. S'ha seleccionat per analitzar les següents provetes:

4.3.6.1. PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ (Zona de la base)

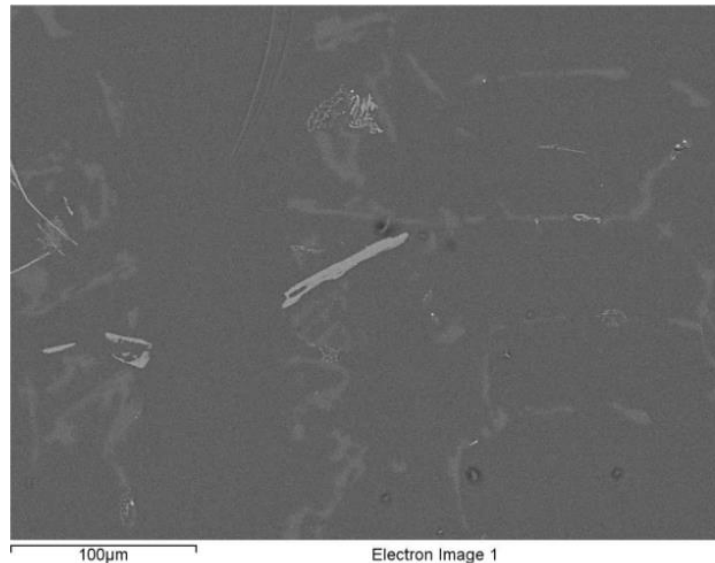


Fig. 4.6. Microestructura analitzada PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ

S'ha analitzat aquesta imatge de la microestructura de la peça A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ. S'ha vist que a més a més de les agulles formades per silici alguns dels precipitats estaven formats per ferro, que és una impuresa i s'hauria de mirar d'evitar. A la imatge la zona de color gris està formada per alumini, les agulles de color blanc més intens estan formades majoritàriament per ferro i les agulles de color blanc menys intens són de silici. Per tant que el ferro sigui capaç de formar precipitats en forma d'agulla és un fet que s'hauria de mirar d'evitar si es volen millorar les propietats mecàniques mitjançant l'adició d'altres elements.

També s'ha fet un anàlisi de la composició química d'aquesta imatge i s'ha obtingut el següent resultat.

<i>Element</i>	<i>% en pes atòmic</i>
<i>Alumini</i>	85,47
<i>Silici</i>	13,5
<i>Oxigen</i>	0,86
<i>Titani</i>	0,08
<i>Ferro</i>	0,07
<i>Manganès</i>	0,03

Taula 6: Composició química analitzada amb FIB de la PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ

Sorprenen aquests resultats ja que són relativament diferents a les anàlisis previs, apartat 3.2, que s'havien realitzat a les provetes abans d'arribar a l'ETSEIB. Tot i així són més fiables els resultats dels anàlisis previs ja que s'havien fet mitjançant mètodes químics, en canvi aquests resultats depenen del tros de mostra seleccionat. També sorprèn el contingut d'oxigen de la mostra però es creu que és degut a l'oxidació que ha patit la proveta durant el pas del temps.

4.3.6.2. PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1

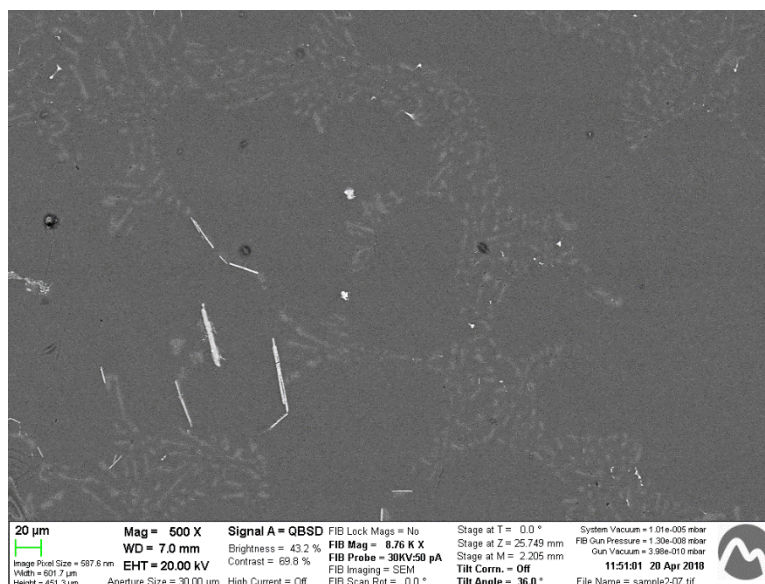


Fig. 4.7. 1a imatge FIB PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1

Com en la proveta anterior a la imatge també s'observa com hi apareixen agulles formades per ferro. Per tant la diferència més gran que s'observa entre aquesta microestructura i l'anterior és la mida de les partícules formades per silici que en aquest cas són més petites, aquesta forma de les agulles de silici proporcionarà millor ductilitat a la peça i un límit de trencament més alt.

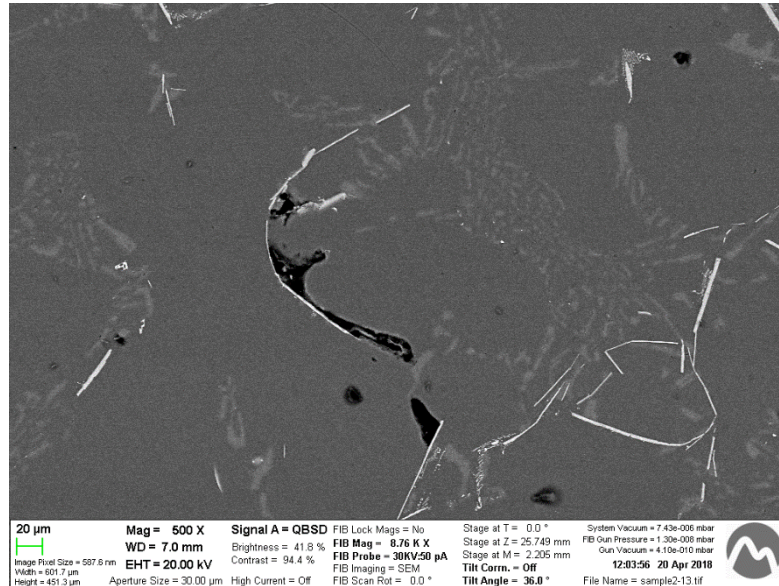


Fig. 4.8. 2a Imatge FIB PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1

La imatge anterior mostra un por que s'ha observat a la proveta envoltat de traces de ferro, aquest fet porta a pensar que l'existència del ferro ha provocat la formació d'aquest por bloquejant l'alimentació de material a la zona on s'ha format el por.

4.4. Anàlisi de la porositat

4.4.1. Quantitat de porositat

La primera dada que es presenta és la quantitat de porositat en tant per cent respecte l'àrea total que té cada proveta mitjançant els dos mètodes utilitzats a l'apartat 3.6. La taula següent mostra la mitjana resultant d'anitzar les 12 imatges de cada proveta.

Proveta	Pors sense agrupar	Pors agrupats
PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ	0,84 %	2,98 %
PEÇA D Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ	2,41 %	6 %
PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1	0,65 %	1,42 %
PEÇA B Lot 142001 STF-STS80	1,5 %	3,5 %
PEÇA A Lot 151715 STF-STS80	1,25 %	1,84 %

Taula 7: Resultats de porositat

A més a més de la quantitat de porositat que conté cada proveta, d'aquesta taula també se'n pot extreure un altra conclusió. Veiem com la diferència entre els dos tipus de mesura de les provetes és més elevada en algunes provetes que en altres. Com es pot comprovar a les provetes provinents dels Lots 138465/138464 i 142001 la diferència entre una mesura i l'altre sempre supera el 2% , aquest fet indica que la quantitat de porositat provocada per la contracció del líquid al solidificar-se és més elevada que en els altres dos casos, ja que els pors que s'agrupen corresponen a aquest tipus de defectes.

4.4.2. Anàlisis dels pors de cada proveta

4.4.2.1. PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ

Com s'ha comentat a l'apartat anterior la superfície d'aquesta proveta presenta molts defectes porosos que reben el nom de "rebeguts". Aquest tipus de defectes és pitjor per la forma que té, ja que presenten formes abruptes en comptes de la forma esfèrica que presenta la porositat formada pel gas atrapat perquè és una zona on es poden acumular els esforços i per tant és una zona on es poden iniciar fractures.

També s'ha buscat el defecte amb una mida més gran, en aquest cas el por resultant és un por amb una mida de punta a punta de 727 µm.

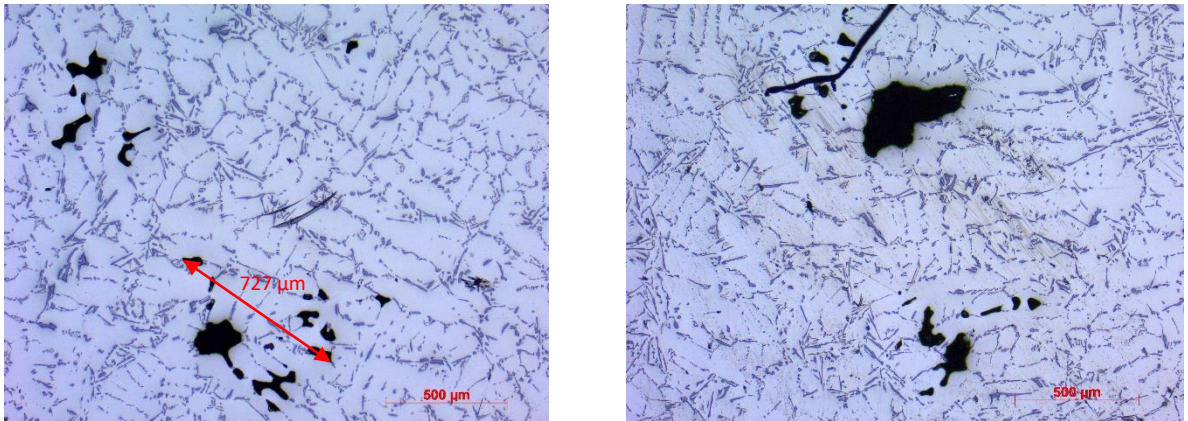


Fig. 4.9. Imatges de la porositat de la PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ

4.4.2.2. PEÇA D Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ

Igual que en el cas anterior la majoria de defectes que presentava la peça estan formats per la falta de material quan es contrau al solidificar-se. S'ha buscat el defecte més gran i s'ha vist que era un por amb una mida de 1124 µm, es podria considerar que el por és més gran si també es té en compte que els defectes inferiors formen part del por. De totes maneres es pot veure perfectament la magnitud d'aquests defectes.

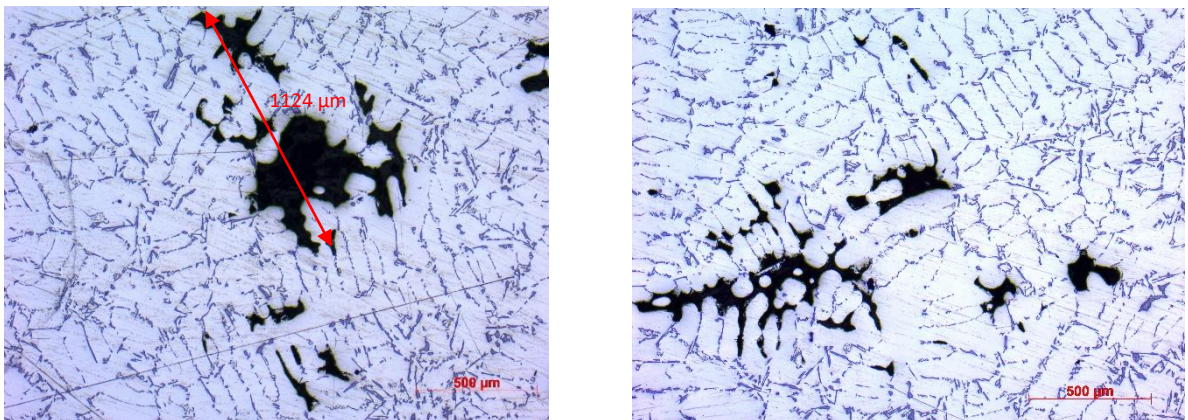


Fig. 4.10. Imatges de la porositat de la PEÇA D Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ

4.4.2.3. PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1

Aquesta proveta també presenta defectes causats per la contracció però en menor mesura que les dues anteriors. Per tant aquesta proveta la majoria de defectes porosos que conté són causats per l'atrapament dels gasos, ja que són de mida menor i tenen forma esfèrica. En aquest cas el por més gran té una mida de 600 μm però presenta una forma lleugerament diferent als defectes que s'han mostrat anteriorment. Com es veu a la imatge també s'aprecien altres defectes amb forma esfèrica distribuïts per la superfície.

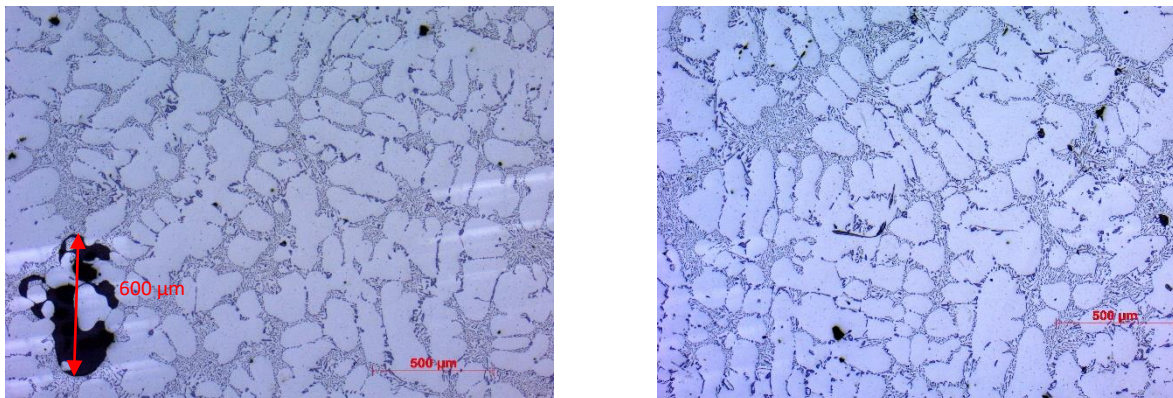


Fig. 4.11. Imatges de la porositat de la PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1

4.4.2.4. PEÇA B Lot 142001 STF-STS80

En aquest cas la proveta també presenta molts defectes causats per la falta de material quan solidifica la peça dins el motlle. En aquest el defecte més gran observat té una distància de punta a punta de 1015 μm .

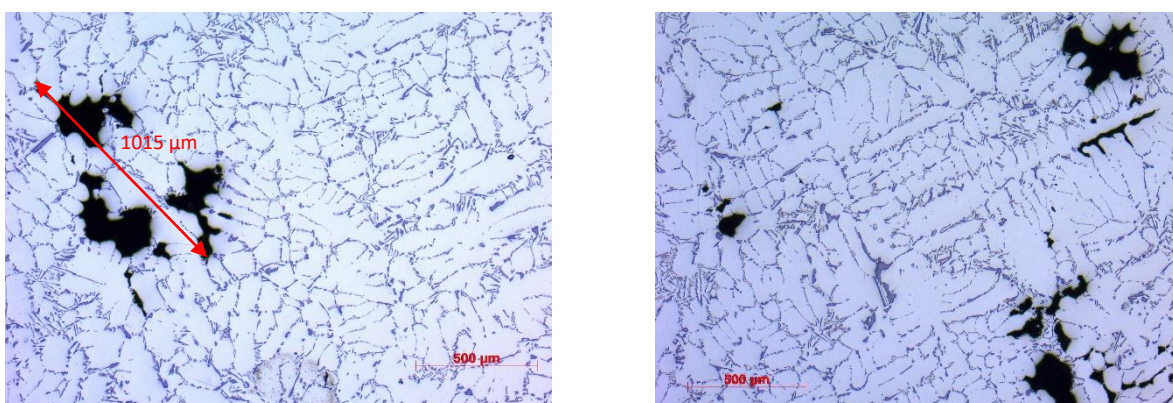


Fig. 4.12. Imatges de la porositat de la PEÇA B Lot 142001 STF-STS80

4.4.2.5. PEÇA A Lot 151715 STF-STS80

Aquesta proveta com l'anterior també presenta porositat que causada per la falta de material i també porositat causada per la mala dispersió dels gasos, però la diferència entre aquesta i l'anterior proveta, com s'ha vist a l'apartat 4.4.1, és la quantitat de defectes que presenta. El por més gran té una mida de 724 μm .

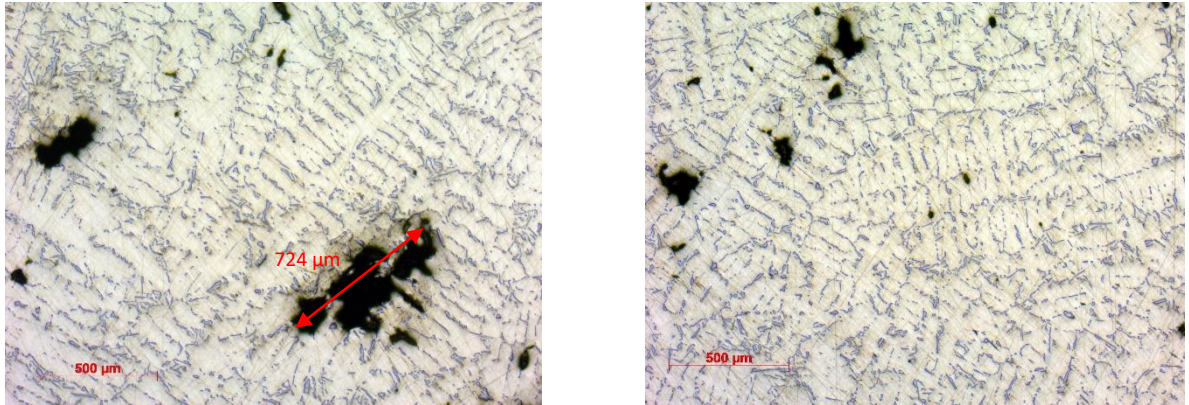


Fig. 4.13. Imatges de la porositat de la PEÇA A Lot 151715 STF-STS80

4.4.3. Relació de la porositat amb la resistència a flexió

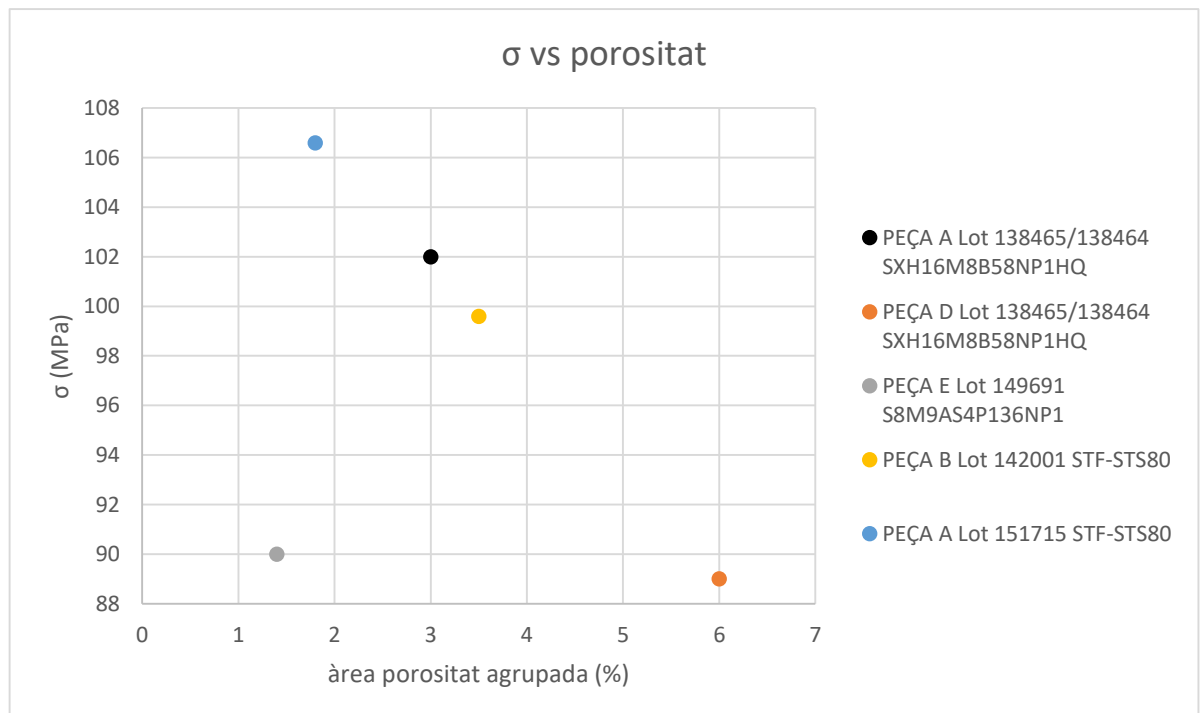


Fig. 4.14. Relació de la porositat amb la resistència a flexió

Com es pot comprovar hi ha una relació clara entre la porositat i la resistència a flexió de les provetes. Es pot veure que a partir d'un valor de porositat del 3% la resistència a flexió de les provetes disminueix dràsticament. Per tant, les conseqüències negatives que aporta la porositat són clares i és per això que s'ha de mirar d'evitar en els aliatges d'alumini.

4.4.4. Relació de la porositat amb la resistència a flexió

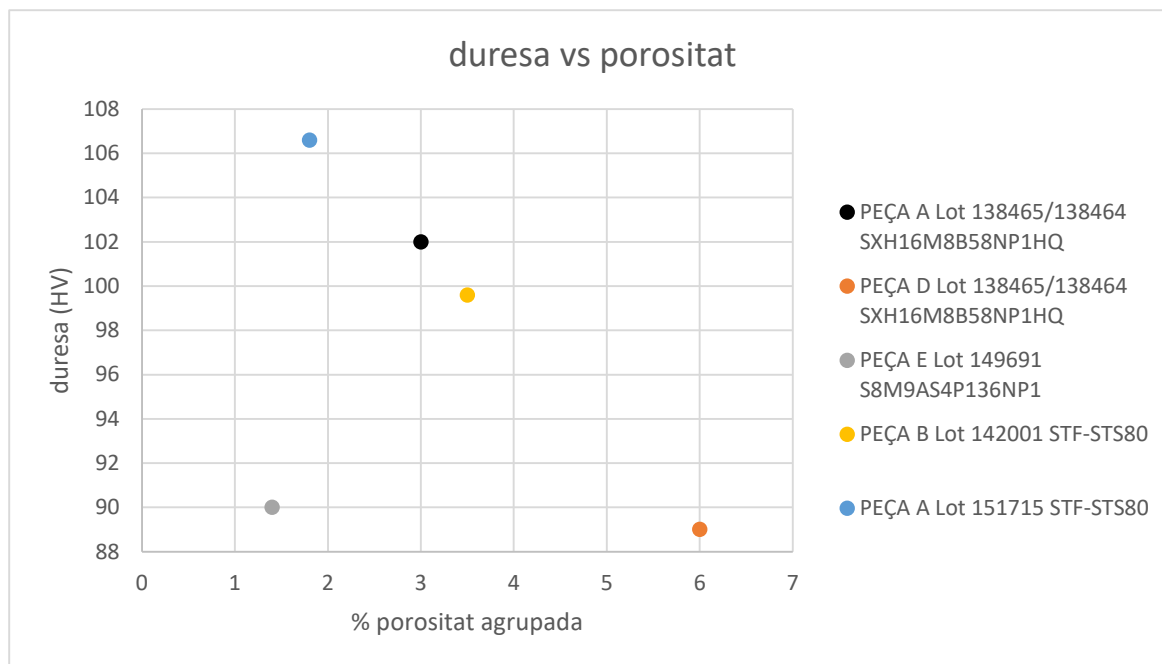


Fig. 4.15. Relació de la porositat amb la duresa

El cas de la duresa és diferent perquè com es pot comprovar la proveta que presenta menys porositat també presenta de les pitjors prestacions de duresa. Això és degut a la diferència entre les microestructures de les provetes, com s'ha comentat a l'apartat 514.3, les microestructures de les altres provetes són bastant semblants i la microestructura d'aquesta proveta és diferent. Per tant la baixa duresa de la peça E del lot 149691 es deu a la seva microestructura.

Pel que fa a les altres provetes que tenen una microestructura semblant si que es pot apreciar com a mesura que augmenta la porositat disminueix la duresa.

4.5. Imatges de la fractura

4.5.1. PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ

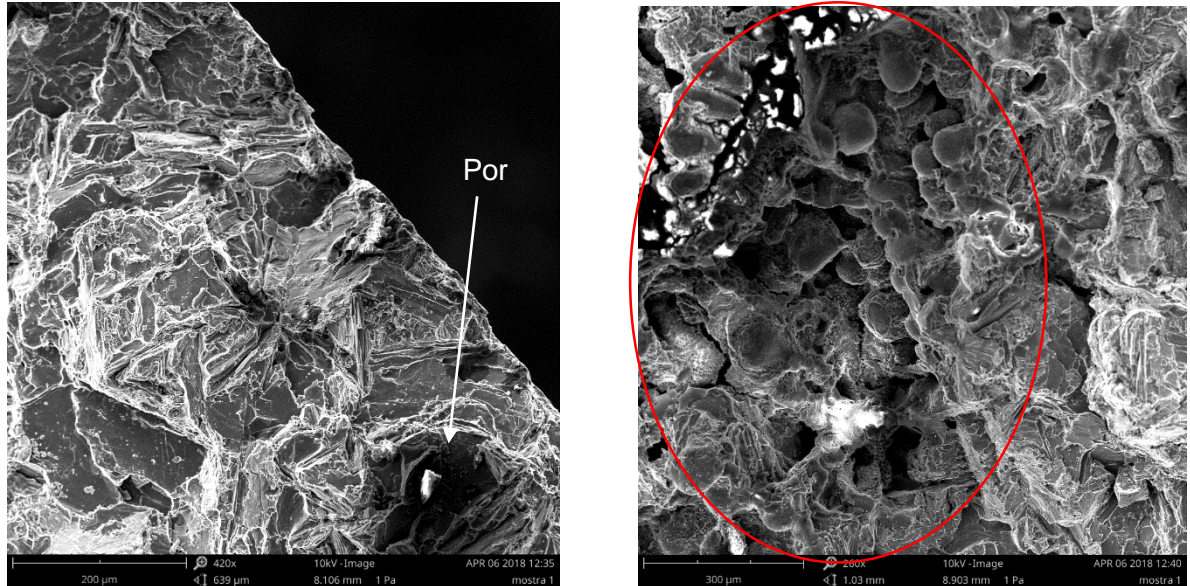


Fig. 4.16. Imatges fractura PEÇA A Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ

La imatge de l'esquerra correspon al lateral de la proveta per on es va iniciar la fractura, on estaven situades les fibres que treballen a tracció durant l'assaig de flexió. La imatge es va prendre a 420 augments. Tal i com es pot apreciar presenta alguns defectes de porositat de mida petita i de forma esfèrica que corresponen a porositat que es produeix a causa de l'atrapament de gasos. També es poden veure zones on el líquid sí que ha solidificat correctament.

En canvi, la imatge de la dreta correspon al centre de la peça. La imatge es va prendre a 250 augments. Aquesta imatge presenta un defecte que ocupa casi la totalitat de la imatge, correspon a un defecte produït durant la contracció del material quan solidifica. Aquestes formes esfèriques que es veuen són dendrites que no s'han acabat de solidificar correctament a causa de la falta de material i propicien aquest tipus de defectes que són perjudicials per les propietats mecàniques de la peça.

4.5.2. PEÇA D Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ

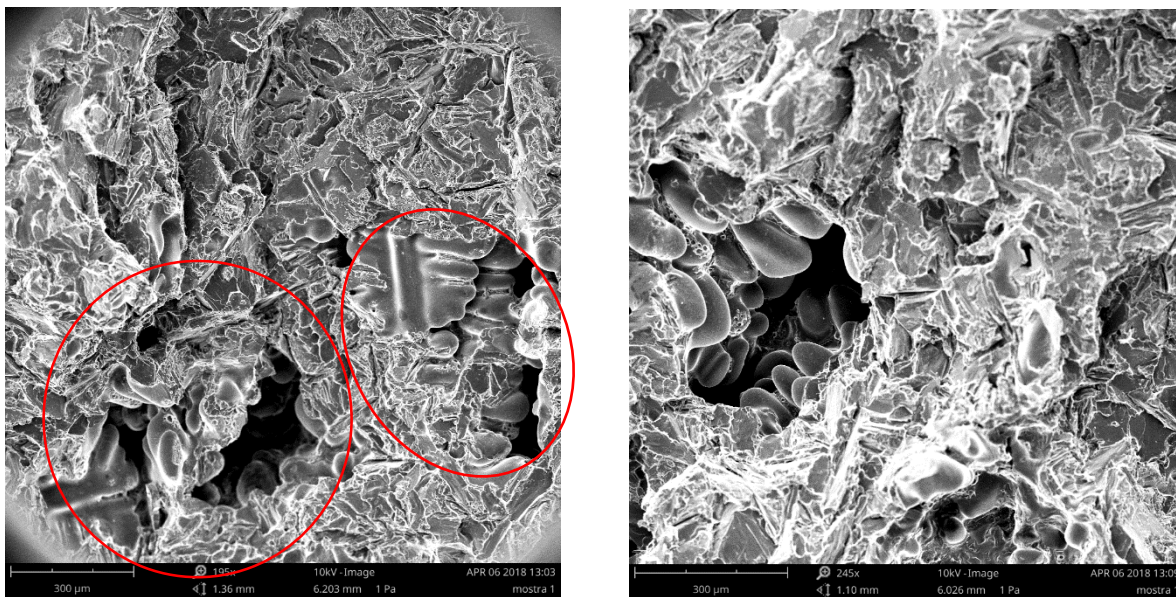


Fig. 4.17. Imatges fractura PEÇA D Lot 138465/138464 SXH16M8B58NP1HQ

Les imatges corresponen al centre de la proveta fracturada. Com es pot comprovar igual que en la proveta anterior la zona de la fractura hi ha zones que presenten bona solidificació però estan envoltades per nombrosos també deguts a la falta de líquid quan es produeix la contracció al solidificar la peça. A la imatge de la dreta s'ha intentat veure l'interior d'un dels defectes i s'ha comprovat que el por hi ha nombroses formes esfèriques que són dendrites que no s'han acabat d'unir durant la solidificació. Per tant, estaríem davant d'una peça de mala qualitat.

4.5.3. PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1

A les imatges de la fractura, pertanyen al centre de la proveta fracturada, d'aquesta proveta trobem una diferència clara amb les dues provetes anteriors, ja que en aquestes imatges no s'hi troben defectes. Les zones de color més fosc no són defectes sinó són productes del relleu de la pròpia fractura.

A la imatge de la dreta s'han incrementat els augments per observar la fractura de més a prop, es pot comprovar que en aquest cas el líquid ha solidificat correctament sense formar grans defectes. Per tant, es pot concloure que la peça és de bona qualitat.

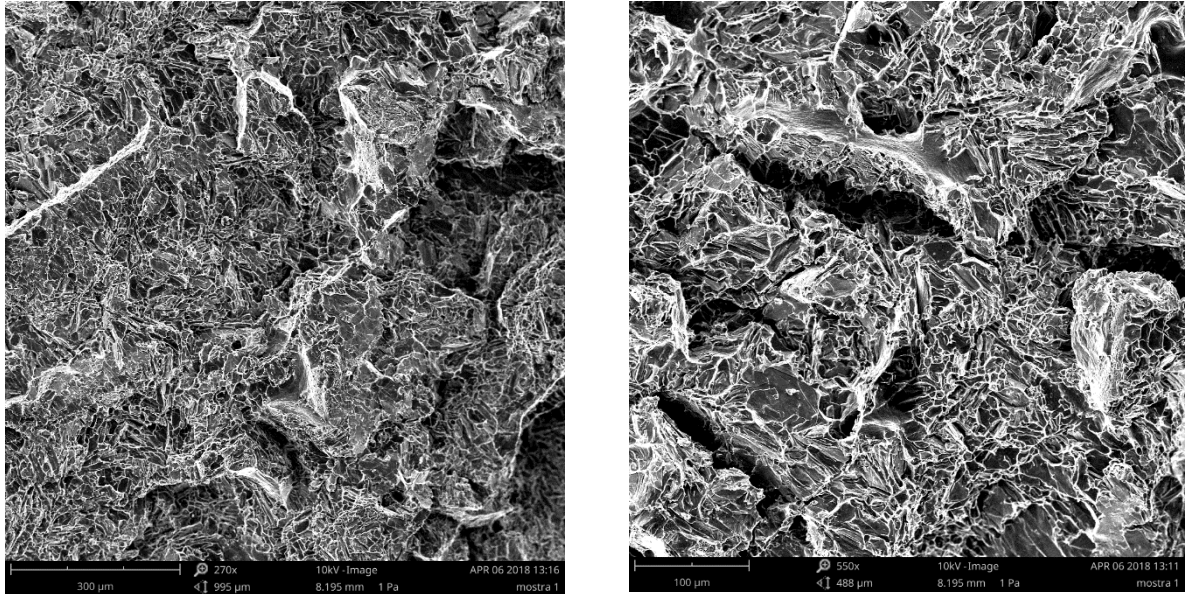


Fig. 4.18. Imatges fractura PEÇA E Lot 149691 S8M9AS4P136NP1

4.5.4. PEÇA B Lot 142001 STF-ST580

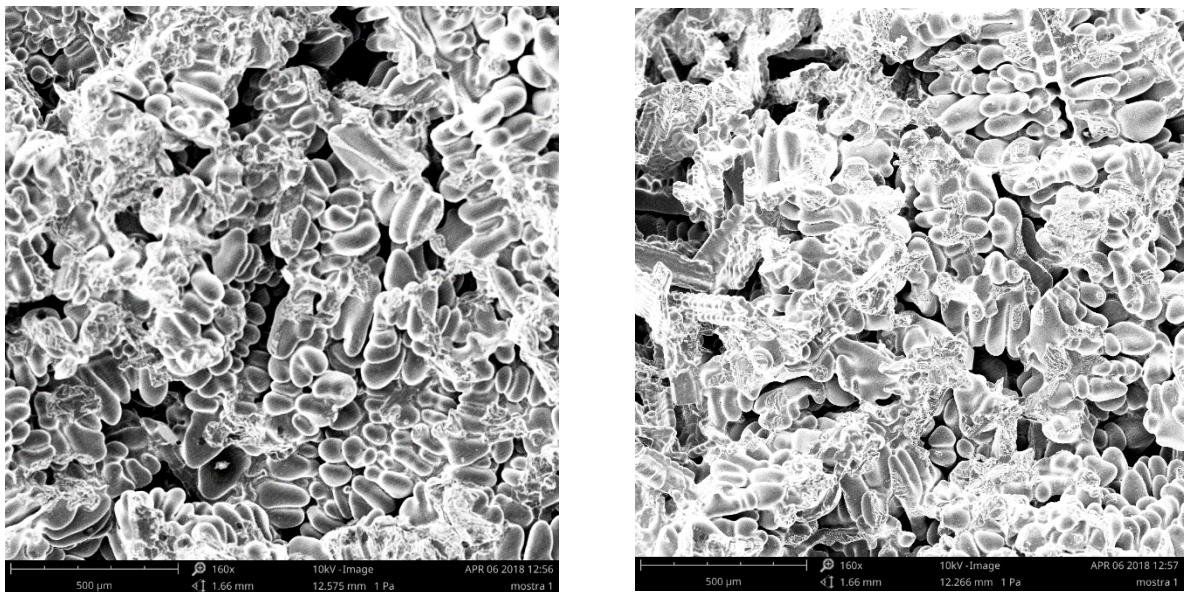
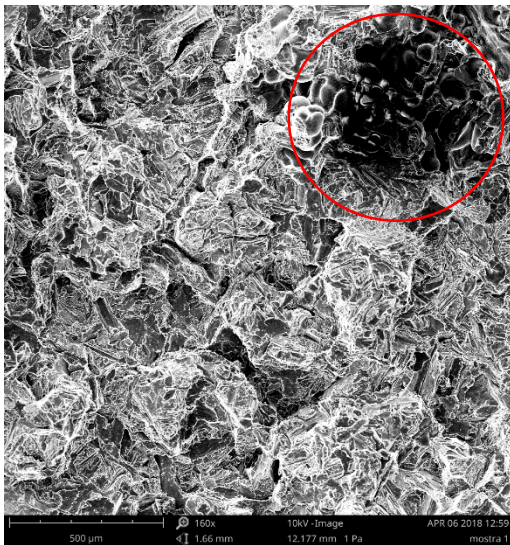


Fig. 4.19. 1es Imatges fractura PEÇA B Lot 142001 STF-ST580

Les imatges s'han pres amb 160 augments. S'han obtingut uns resultats sorprenents ja que la majoria de zones de la fractura presentaven material que havia solidificat incorrectament i per tant presentarà molts defectes de contracció, com es pot veure totes aquestes geometries arrodonides són dendrites que no han acabat de solidificar bé.



Aquesta imatge representa de les poques zones que han solidificat correctament però tot i així aquestes zones també contenen defectes, tal i com es veu a la imatge.

Per tant aquesta peça conté zones de molt mala qualitat ja que hi ha parts del material que no han solidificat correctament.

Fig. 4.20. 2es Imatges fractura PEÇA B Lot 142001 STF-ST80

4.5.5. PEÇA A Lot 151715 STF-ST80

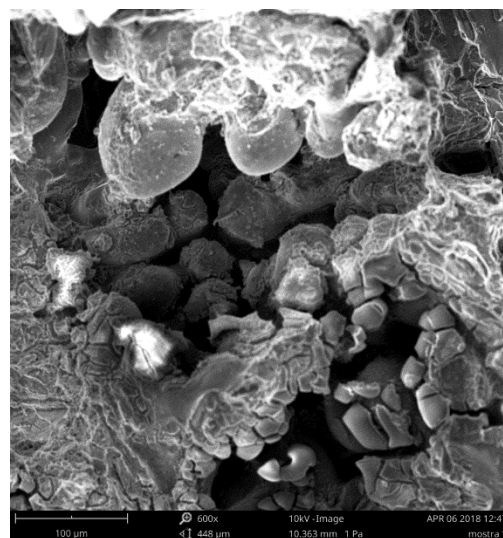
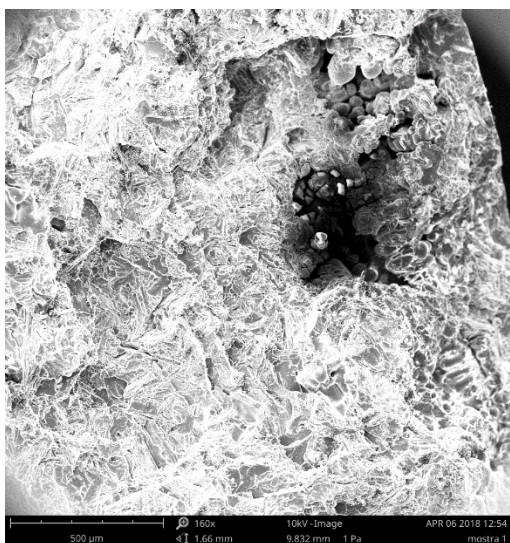


Fig. 4.21. Imatges fractura PEÇA A Lot 151715 STF-ST80

La imatge esquerra mostra la zona per on va començar la fractura, en aquest cas si troba material que ha solidificat correctament però hi ha un defecte a prop de la zona d'inici de la ruptura. A la imatges de la dreta es mostra l'interior d'aquest defecte i es veu que correspon a un por causat per la contracció del líquid al solidificar-se, que podria ser el causant de l'inici de la fractura.

5. Conclusions

Com a resultat del projecte se'n poden extreure les següents conclusions:

- En les provetes on s'apreciava un alt contingut de defectes porosos, gran part d'aquests defectes estaven associats a la falta de material quan es produeix la contracció del material líquid al solidificar-se, tal com s'ha pogut veure a les imatges de la fractura i de microscòpia òptica. Aquests defectes es designen habitualment com a "rebeguts".
- La quantitat de porositat present és un factor molt important i afecta greument al límit de fallada de la peça. Quan la porositat supera el 3% la resistència a fractura de la peça es veu disminuïda dràsticament.
- La microestructura és un factor important per millorar la ductilitat de la peça. Com s'ha pogut comprovar l'única proveta on les agulles de silici no són allargades i de forma acicular, sinó que són de mida més petita i sembla que s'ha aconseguit una modificació de l'eutèctic adequada, és l'única que presenta ductilitat.
- El ferro és una impuresa present en els aliatges d'alumini que pot fer la peça més fràgil i empitjorar-ne el límit elàstic quan es presenta en forma d'agulles a la microestructura. Malgrat el baix contingut de ferro a les peces estudiades, s'han pogut detectar algunes d'aquestes agulles.

5.1. Treballs futurs

Un cop s'ha vist que la porositat és un factor important que disminueix considerablement les propietats mecàniques de les peces, serà necessari establir algun sistema per simular la porositat que s'obtindrà al fabricar les peces per emmotllament. És per això que mitjançant els paràmetres que es poden controlar durant el procés de fosa: temperatura, quantitat de modificador de l'eutèctic afegida, geometria del motlle, composició de l'aliatge... s'ha de buscar establir un model de predicció de la porositat de les peces que es fabricaran.

Actualment hi ha diferents models de predicció de la porositat però és complicat fer un model general per a totes les peces ja que un dels paràmetres que afecta a la porositat també és la geometria dels motlles. Per això es proposa que per millorar la qualitat de les peces s'elabori un model de predicció de porositat per a cada una de les peces que fabrica l'empresa.

6. Pressupost

S'ha realitzat un pressupost on s'ha estimat el cost dels materials utilitzats, les hores d'utilització de la maquinària i les hores dedicades per cada professional.

6.1. Materials

Pel que fa als materials s'ha tingut en compte el preu dels materials utilitzats pel procés del polit de les mostres, ja que les mostres ja van ser enviades per l'empresa i per tant no s'han de tenir en compte en el pressupost.

Material	Preu	Quantitat	Total
Baquelita no conductora	60 €/Kg	0,1 Kg	6 €
Papers de desgast	5 €/u	2 unitats	10 €
Teles de polir	30 €/u	2 unitats	60 €
Suspensió de diamant 3µm	122,5 €/L	0,15 L	18,4 €
Silica col·loidal	45 €/L	0,03 L	1,4 €
Lubricant	10 €/L	0,06 L	0,6 €
		Suma	96,4€

Taula 8: Pressupost material utilitzat

6.2. Maquinària

En quant al cost de la maquinària s'ha estimat el cost d'usar les màquines necessàries per fer els assajos mecànics, les màquines necessàries per preparar les provetes per microscòpia i per últim les màquines d'observació de la mostra.

Màquina	Preu	Quantitat d'hores	Total
Tronçadora	10 €/h	1,5	15 €
“Embaquelitadora”	10 €/h	2	20 €
Polidora automàtica	15 €/h	15	225 €
Micro duròmetre	10 €/h	3	30 €
Màquina de flexió	15 €/h	4	60 €
Microscopi òptic	25 €/h	4	100 €
SEM	150 €/h	2	300 €
FIB	150 €/h	2	300 €
Suma			1050 €

Taula 9: Pressupost maquinària utilitzada

6.3. Personal

Per calcular el cost del personal s'ha estimat el nombre d'hores que hi ha dedicat cada professional a la consecució del projecte. Aquestes hores comprenen les tasques de treball autònom, formació, redacció del projecte, realització de tasques experimentals.

Concepte	Preu	Quantitat d'hores	Total
Enginyer junior	25 €/h	300	7500 €
Personal tècnic	50 €/h	30	1500 €
Cap del projecte	60 €/h	20	1200 €
Suma			10200 €

Taula 10: Pressupost personal

6.4. Total

El cost total del projecte és:

Concepte	Total
Cost material	96,4 €
Cost maquinària	1050 €
Cost personal	10200 €
Suma	11346,4 €

Taula 11: Pressupost total

7. Impacte ambiental

L'efecte ambiental més important es produeix en la utilització de les màquines usades per dur a terme la metodologia experimental: microscopis, duròmetre, polidora...

També és important tenir en compte les emissions de CO₂ que es produeixen a l'enviar les mostres des de l'empresa fins a l'EEBE.

Cal afegir els productes químics que s'han utilitzat per preparar les mostres per l'observació microscòpica, com per exemple el lubricant, la pasta de diamant... Aquests químics no es poden reciclar i són contaminants per això és important tenir-los en compte en l'impacte ambiental total del projecte. Normalment aquests elements queden impregnats a les teles de polir que es netegen amb aigua. És important no abocar l'aigua pel desaigna sinó que és necessari fer-hi un tractament previ.

El procés de producció de l'alumini és un procés molt contaminant. Comença en l'extracció de la bauxita, l'extracció es fa en grans extraccions de terreny on s'elimina tota la vegetació existent. Després per dur a terme el procés de transformació de la bauxita en alumini es necessiten grans quantitats d'energia. Per últim, al procés de fosa també es consumeix energia i s'alliberen gasos a l'atmosfera com el CO₂, SO₂ i altres gasos causants de l'efecte hivernacle. [26]Es per això que es necessari reciclar l'alumini, que és un material amb una capacitat de reciclatge molt alta.

7.1. Emissions de CO₂

S'han estimat les emissions de CO₂ per poder fer la realització d'aquest projecte.

El transport de les peces correspon a un viatge de 45 Km. S'ha considerat que el transport s'ha dut a terme amb una furgoneta de repartiment que té unes emissions de CO₂ de 200 g per cada km recorregut.[24] En total unes emissions de 9 kg de CO₂.

Pel que fa al consum elèctric s'estimen els següents consums:

Màquina	Consum (kW)	Quantitat d'hores	Total (kWh)
Tronçadora	2	1,5	3
“Embaquelitadora”	0,25	2	0,5
Polidora automàtica	1	15	15
Micro duròmetre	0,2	3	0,6
Màquina de flexió	1	4	4
Microscopi òptic	0,25	4	1
SEM	1	2	2
FIB	1,5	2	3
Suma			29,1

Taula 12: Consum màquines utilitzades

Cada kWh equival a 392 g de CO₂ [25]. Per tant fent una simple multiplicació s'obté que les emissions de CO₂ causades per l'ús de la maquinària és de 11,41 kg CO₂.

Per tant les emissions totals són de 20,41 kg de CO₂.

Agraïments

Agraeixo al grup CIEFMA que m'ha proporcionat el material necessari per poder dur a terme aquest projecte. Agrair especialment al meu tutor Antonio Mateo per ajudar-me durant els procediments experimentals i proporcionar-me diverses fonts d'informació útils per entendre la base teòrica del projecte. També agrair l'ajuda i la paciència de Fernando Garcia, Jose Fernando Valera, Trifon Trifonov i Harsha Varthan.

Bibliografia

- [1] Aluminio. <https://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio>. (Consulta 25/05/2018)
- [2] Tendència de la producció mundial d'alumini. https://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio#/media/File:Aluminium_world_production_trend.svg (Consulta 25/05/2018)
- [3] Aleaciones de aluminio. https://es.wikipedia.org/wiki/Aleaciones_de_aluminio. (Consulta 25/05/2018)
- [4] E. Maffia. “Estructura y propiedades de las aleaciones: aluminio y sus aleaciones”. Apunts de l'assignatura . “Estructura y propiedades de las aleaciones” UNLP (2013)
- [5] J. Kauffman; E. Rooy. “Aluminum alloy castings. Properties, processes and Applications”. ASM. Pg 14-21. (2004)
- [6] L. Mondolfo. “Aluminum alloys. Structure and properties”. Butterworth & Co. Pg 368-372 (1976)
- [7] http://www.al-mg.com/en/products_al50si.html
- [8] G. Vander Voort; J. Asensio-Lopez. “The Al-Si Phase Diagram”. Buehler, volume 5 Issue 1. (2009)
- [9] J. Kauffman; E. Rooy. “Aluminum alloy castings. Properties, processes and Applications”. ASM. Pg 39-46. (2004)
- [10] J. Taylor. “The Effect of Iron in Al-Si Casting Alloys”. 35th Australian Foundry Institute National Conference (2004)
- [11] J. Davis. “Aluminum and aluminum alloys”. ASM. Pg 97-100. (1993)
- [12] S. Hegde; K. N. Prabhu. “Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys”. Springer Science+Business Media. (2008)
- [13] M. Asmael. “Lost foam casting of LM6-Al-Si cast alloy”. Thesis degree of Master of Engineering. Universiti Teknologi Malaysia (2009)
- [14] D. M. Stefanescu; R. Ruxanda. “Solidification structures of aluminum alloys”. ASM Handbook vol. 9 Pg 107-115. (2004)
- [15] Processos de fosa. <http://www.custompartnet.com/process-selector> (Consulta

- 28/05/2018)
- [16] Machine working principle.
https://en.wikipedia.org/wiki/Sand_casting#/media/File:Haandform-e.png (Consulta 28/05/2018)
- [17] F. Chiesa; P. Regimbal. "*Distinguishing Microporosity From Macroshrinkage When Modeling Solidification of A356 Castings*". AFS Transactions, vol1.1 09 Pg 347-357 (2001)
- [18] J.P. Anson; J.E. Gruzleski. "*The Quantitative Discrimination between Shrinkage and Gas Microporosity in Cast Aluminum Alloys Using Spatial Data Analysis*". Elsevier Science Inc. (1999)
- [19] L. Shang. "*Prediction of microporosity in aluminum silicon castings using criteria funcions*". Thesis degree of Master of Engineering. McGill University, Montreal, (2004)
- [20] D. Emadi; J. E. Gruzleski; J.M. Toguri. "*The Effect of Na and Sr Modification on Surface Tension and Volumetric Shrinkage A356 Alloy and Their Influence on Porosity of Formation*". Metallurgical transactions B, vol 24 B. ASM (1993)
- [21] A. Ramos; M. Muñoz-Calvente; P. Fernández; A. Fernández Canteli; M. J. Lamela. "*Análisis probabilístico de elementos de vidriorecocido mediante una distribución triparamétrica Weibull*". ELSEVIER. (2015)
- [22] SEM. https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_electr%C3%B3nico_de_barrido (Consulta 09/06/2018)
- [23] FIB. https://es.wikipedia.org/wiki/Focused_Ion_Beam (Consulta 09/06/2018)
- [24] Nueva daily.
https://www.iveco.com/Spain/Documents/Configurator/Brochure/Dailyvan_ES.pdf (Consulta 18/06/2018)
- [25] Factor de emisión asociado a la energía eléctrica: el mix eléctrico.
http://canviclimatic.gencat.cat/es/reduex_emissions/com-calculer-emissions-de-geh/factors_demissio_associats_a_lenergia/ (Consulta 18/06/2018)
- [26] Como afecta la contaminación del aluminio al medio ambiente.
<https://www.enbuenasmanos.com/contaminacion-del-aluminio> (Consulta 19/06/2018)