



**Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL FINAL DE GRAU

TÍTOL: OPTIMITZACIÓ ALIATGES Al-Si-Cu MICROALIATS

AUTORS: FERRIOL MAS, MIQUEL NADAL; TORANDELL ORTEGA, MARTA

DATA: JUNY, 2018

COGNOMS: FERRIOL MAS **NOM: MIQUEL NADAL**
TITULACIÓ: ENGINYERIA MECÀNICA
PLA: 2013
DIRECTOR: ENRIC MARTÍN FUENTES
CODIRECTOR: MARIA TERESA BAILE PUIG
DEPARTAMENT: ENGINYERIA DE MATERIALS

COGNOMS: TORANDELL ORTEGA **NOM: MARTA**
TITULACIÓ: ENGINYERIA MECÀNICA
PLA: 2013
DIRECTOR: ENRIC MARTÍN FUENTES
CODIRECTOR: MARIA TERESA BAILE PUIG
DEPARTAMENT: ENGINYERIA DE MATERIALS



QUALIFICACIÓ DEL TFG

TRIBUNAL

PRESIDENT

SECRETARI

VOCAL

Picas Barrachina, Josep Muniategui Puig, Teodoro Salvado Cabre, Nativitat

DATA DE LECTURA: 12/07/2018

Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals: Sí No

RESUM

L'objectiu principal d'aquest treball és fer-ne un estudi dels diferents elements d'aliatge afegits al AISi9Cu3, també designat com EN AC 46500. Aquests elements són el Zn, Mg, Cr, Zr i el refinant de gra TiB que s'afegeixen en petites quantitats. La intenció es millorar les propietats mecàniques del material base. Es realitzen distintes colades d'aquests microaliatges, dels quals es vol saber quin és el pic de duresa més alt en un temps de maduració més curt després de realitzar-li un tractament T6. Aquest tractament tèrmic té una posta en solució de 515°C durant 6h seguit d'un tremp amb aigua i posteriorment una maduració artificial a 170°C durant vuit intervals de temps diferents. Aquests paràmetres venen definits per resultats obtinguts en estudis previs.

Per comprovar l'efectivitat del T6 s'han analitzat les dureses i s'han realitzat micrografies. Amb les mostres de les dureses s'ha pogut determinar que l'aliatge AISi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr presenta un major pic de duresa en menys temps que la resta de les colades.

Amb aquest aliatge s'ha realitzat una colada major per fer un assaig de tracció i comparar la resistència a tracció de l'aliatge modificat amb l'aliatge base. L'assaig no ha sigut satisfactori degut a les impureses (òxids i porositats) de les provetes sorgides durant la fabricació. No obstant, s'ha pogut comprovar un lleuger augment de la resistència a la tracció en l'aliatge modificat.

Paraules clau (màxim 10):

Aliatges d'alumini	Coure	Silici	Tractaments tèrmics
Microaliatge	Propietats mecàniques		

ABSTRACT

The main objective of this work is to realize a study of the different alloy elements added to AlSi9Cu3, also designated as EN AC 46500. These elements are Zn, Mg, Cr, Zr and the grain refiner TiB which are added in small amounts. The intention is to improve the mechanical properties of the base material. Different casts are made of these micro-alloys, which are intended to know what is the highest peak strength in a shorter aging time after performing a T6 treatment. This heat treatment has a temperature solution of 515 ° C for 6 hours followed by a quench with water and then an artificial aging at 170 ° C for eight different time intervals. These parameters are defined by results obtained in previous studies.

To verify the effectiveness of the T6, the hardness has been analyzed and micrographs have been performed. With the samples of the hardness it has been possible to determine that the alloy AlSi9Cu3 + 3% Zn + 2% Mg + 0.2% Cr + 0.2% Zr presents a greater peak of hardness in less time than the rest of the casts

With this alloy, a larger leakage has been performed to perform a tensile test and compare the tensile strength of the modified alloy with the base alloy. The test has not been satisfactory due to the impurities (oxides and porosities) of the test tubes produced during manufacture. However, it has been possible to check a slight increase in the tensile strength in the modified alloy.

Keywords (10 maximum):

Aluminum Alloys	Copper	Silicon	Heat treatments
Microalloy	Mechanical properties		

APORTACIÓ INDIVIDUAL AL GRUP

L'aportació no ha estat en cap moment individual ja que s'ha treballat en tot moment conjuntament des de l'inici. Tant la part experimental al laboratori com la recerca d'informació i l'anàlisi de resultats s'ha duit a terme pels dos membres del grup equitativament, ja que s'ha treballat sempre alhora.

No obstant, en algun cas, les responsabilitats tant a la hora de redactar la memòria com a la part experimental s'han dividit per tal d'optimitzar el temps. En Miquel Nadal Ferriol s'ha responsabilitzat principalment del treball en Excel (composicions de colades, gràfiques i taules a analitzar) i de la fosa de les colades. Na Marta Torandell s'ha responsabilitzat de la preparació de la provetes i l'organització i presentació de la memòria.

La resta de responsabilitats s'han gestionat alhora de manera equitativa.

AGRAÏMENTS

Volem agrair al departament de Ciències dels Materials per l'ajuda oferta, en especial als nostres tutors Maite Baile Puig i Enric Martín Fuentes per la seva implicació, suport, assessorament durant tot el projecte i transmetre'ns els seus coneixements. També agrair als serveis tècnics de la EPSEVG per la gran ajuda que ens ha suposat la seva eficiència solucionant els problemes de la maquinaria que hem fet servir durant l'experimentació.

D'altre banda, volem donar les gràcies a les empreses BOSTLAN S.A. i ALEASTUR per facilitar les lligues mare que s'han fet servir en aquest estudi.

Índex

1.INTRODUCCIÓ	12
2.ESTAT DE L'ART	13
2.1 Introducció a l'alumini.....	13
2.2 Obtenció de l'alumini	13
2.3 Propietats de l'alumini	14
2.4 Aliatges d'alumini	15
2.4.1 Nomenclatura aluminis	16
2.5 AlSi9Cu3.....	17
2.5.1 Diagrames de fases:	17
2.5.3 Efecte dels elements d'aliatge:	19
2.6 Tractaments tèrmics	21
2.6.1 Posta en solució i maduració artificial.....	21
2.6.2. Sistemes tractables tèrmicament.....	23
3. PROCÉS EXPERIMENTAL	25
3.1 Composició del material base	25
3.2 Preparació de les diferents colades	26
3.2.1 Anàlisi de resultats anteriors.....	26
3.2.2 Colades a realitzar	26
3.2.3 Càlcul de les diferents colades	28
3.2.4 Preparació de les colades	30
3.2.5 Fosa de les colades.....	31
3.2.6 Preparació de les provetes	32
3.2.7 Tractament tèrmic.....	32
3.2.8 Dureses.....	33
3.2.9 Tracció	34
3.2.10 Metal·lografia	34
4. RESULTATS.....	36
4.1 Resultats duresa Brinell, HB	36
4.1.1 Resultats duresa HB, AlSi9Cu3	36
4.1.2 Resultats duresa HB colada 1: AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	37
4.1.3 Resultats duresa HB colada 2: AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,1% Cr + 0,1% Zr	38
4.1.4 Resultats duresa HB colada 3: AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	39

4.1.5 Resultats duresa HB colada 4: AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr + 1% TiB	40
4.2 Resultats metal·logràfics.	42
4.2.1 Imatges microscopi òptic AlSi9Cu3	42
4.2.2 Colada 1: AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,2 Cr + 0,2 Zr	43
4.2.3 Colada 2 (AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,1% Cr + 0,1% Zr)	45
4.2.4 Colada 3: AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	48
4.2.5 Colada 4: AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr + 1% TiB.....	50
4.2.6 Anàlisi metal·logràfic quantitatiu	53
4.3 Resultats anàlisis composició química.	54
5. ANÀLISIS DE RESULTATS DE DURESES	55
6. RESULTATS ASSAJOS DE TRACCIÓ	58
6.1 Resultats primera colada AlSi9Cu3	59
6.2 Resultats segona colada AlSi9Cu3 + 3%Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	60
6.3 Comparativa resultats primera i segona colada.....	60
7. CONCLUSIONS	62
8. PRESSUPOST	63
9. BIBLIOGRAFIA	64

Índex de Figures

Figura 2 1. Designació dels aliatges de foneria segons EN AC 1706	16
Figura 2.2. Diagrama de fases Al-Si	18
Figura 2.3. Diagrama de fases Al-Cu	29
Figura 2.4. Corba de maduració	23
Figura 3.1. SPECTROMAXx	25
Figura 3.2. Anàlisi química AlSi9Cu3	25
Figura 3.3. Serra alternativa	30
Figura 3.4. Tronçadora	30
Figura 3.5. Bascula	30
Figura 3.6. Forn de resistències	31
Figura 3.7. Forn de resistències	31
Figura 3.8. Obtenció de provetes per l'assaig de dureses	32
Figura 3.9. Probeta de tracció	32
Figura 3.10. Durometre	33
Figura 3.11. Zwik Z100	34
Figura 3.12. LaboPress-3	35
Figura 3.13. Màquina polidora	35
Figura 3.14. Microscopi Epiphot 200	35
Figura 4.1. Progressió dureses AlSi9Cu3	36
Figura 4.2. Progressió dureses HB AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	37
Figura 4.3. Progressió dureses HB AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,1% Cr + 0,1% Zr	38
Figura 4.4. Progressió dureses HB AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	39
Figura 4.5. Progressió dureses HB AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr + 1% TiB	40
Figura 4.6. Comparació de les dureses de les diferents colades	41
Figura 4.7. Comparació dels pics de duresa de les diferents colades	41
Figura 4.8. Micrografia AlSi9Cu3 abans del tremp	42

Figura 4.9. Micrografia AlSi9Cu3 abans del tremp.	42
Figura 4.10. Micrografia AlSi9Cu3 després del tremp	43
Figura 4.11. Colada 1A x50, abans del tremp	43
Figura 4.12. Colada 10 x50, després del tremp	44
Figura 4.13. Colada 1A x200, abans del tremp	44
Figura 4.14. Colada 10 x200, després del tremp	45
Figura 4.15. Colada 2A x50 , abans del tremp	46
Figura 4.16. Colada 20 x50, després del tremp	46
Figura 4.17. Colada 2A x200, abans del tremp	47
Figura 4.18. Colada 20 x200, després del tremp	47
Figura 4.19. Colada 3A x50, abans del tremp	48
Figura 4.20. Colada 30 x50, després del tremp	49
Figura 4.21. Colada 3A x200, abans del tremp	49
Figura 4.22. Colada 30 x200, després del tremp	50
Figura 4.23. Colada 4A x50, abans del tremp	51
Figura 4.24. Colada 40 x50, després del tremp	51
Figura 4.25. Colada 4A x200, abans del tremp	52
Figura 4.26. Colada 40 x200, després del tremp	52
Figura 5.1. Evolució de la duresa amb un 1%Zn i 1%Mg i l'addició de Cr i de Zr	51
Figura 5.2. Evolució de la duresa amb un 3%Zn i 2%Mg i l'addició de Cr i de Zr i TiB	56
Figura 5.3. Evolució de les dureses de totes les colades	57
Figura 6.1 Comparació de la resistència a tracció de l'aliatge base i l'aliatge amb additius	59
6.2. Comparació de la resistència a tracció de l'aliatge AlSi9Cu3	59
6.3. Resultats assaig tracció AlSi9Cu3 + 3%Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	60
6.4. Comparativa resultats assaig tracció	61

Índex taules

Taula 2.1. Propietats de l'alumini comparat amb altres metalls lleugers i pesats	15
Taula 2.2. Classificació dels aliatges d'alumini de fosa segons EN 1706	16
Taula 2.3. Propietats AlSi9Cu3	17
Taula 3.1. Composició normalitzada AlSi9Cu3	26
Taula 3.2. Composició dels lingots/% en pes	27
Taula 3.3. Composició de la colada 1	28
Taula 3.4. Composició de la colada 2	28
Taula 3.5. Composició de la colada 3	28
Taula 3.6. Composició de la colada 4	29
Taula 3.7. Composició de la colada 1	29
Taula 3.8. Composició de la colada 2	29
Taula 4.1. Duresa HB AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	37
Taula 4.2. Duresa HB AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,1% Cr + 0,1% Zr	38
Taula 4.3. Dureses HB AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	39
Taula 4.4. Dureses HB AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr + 1% TiB	40
Taula 4.5. Resultats metal·logràfics	53
Taula 4.6. Composició química colada 1/% en pes	54
Taula 4.7. Composició química colada 2 /% en pes	54
Taula 4.8. Composició química colada 3 /% en pes	54
Taula 4.9. Composició química colada 4 /% en pes	54
Taula 6.1. Resultats assaig de tracció	58
Taula 8.1. Pressupost	63

1. INTRODUCCIÓ

L'objectiu principal d'aquest projecte és analitzar l'efecte que provoca l'adició de nous elements d'aliatge en l'AlSi9Cu3 en les seves propietats mecàniques i quan se li realitza un tractament tèrmic. Aquest treball és una continuació d'estudis previs, tots amb la intenció de poder arribar a obtenir un aliatge lleuger amb les millors propietats mecàniques possibles. Això suposaria un avenç important dins la indústria de l'automoció.

S'ha partit dels millors resultats obtinguts en el projecte *New Aluminium-Silicon-Copper Microalloyed alloys [1]*, a partir del qual s'han realitzat una sèrie de colades.

A les colades realitzades en aquest projecte s'ha estudiat la influència en petites quantitats dels elements d'aliatge: Zr i Cr com a inhibidors del creixement de gra, Zn i Mg com a elements enduridors amb tractaments tèrmics i l'afinant de gra TiB. Les colades s'han sotmès a un tractament tèrmic de tremp i maduració artificial i posteriorment s'ha estudiat la seva efectivitat mitjançant un anàlisi de dureses. L'objectiu és avaluar el temps de maduració òptim segons el percentatge de cada element agregat.

L'eficiència del tractament tèrmic també s'ha analitzat mitjançant una anàlisi metal·logràfica per comparar la microestructura abans i després del tremp i poder comprovar si la posta en solució i l'addició dels diferents elements ha estat o no efectiva.

Per completar l'estudi, a l'aliatge que ha presentat millors resultats de duresa se li ha practicat un assaig de tracció per comparar les propietats mecàniques amb l'aliatge base. S'ha realitzat en mostres abans i després d'exposar-les al tractament tèrmic T6.

2. ESTAT DE L'ART

2.1 Introducció a l'alumini

L'alumini és el tercer element més abundant de la terra amb una presència del 8% en l'escorça terrestre després de l'oxigen i el silici. L'alumini és un metall que fa relativament poc que s'utilitza degut a la dificultat que presentava poder aïllar-lo, i no va ser fins al 1827 quant Friedrich Wöhler va aconseguir aïllar-lo completament. Això va fer que fins a principis del segle XX no fos un material gaire emprat en la indústria.

L'aparició de tres importants desenvolupaments industrials, i la necessitat d'unes característiques mecàniques exigents com són les de l'alumini i els seus aliatges, beneficiaren enormement el creixement de la producció i l'ús del nou metall. El primer va ser l'aparició dels primers vehicles propulsats per motors de combustió interna en els que l'alumini tindria un paper important gràcies a les seves propietats. El segon va ser l'electrificació que va provocar la necessitat de grans quantitats de metalls conductors lleugers per al transport de l'energia elèctrica des de els generadors. I per últim al cap d'unes quantes dècades, els Germans Wright van donar llum a la indústria aeronàutica que va generar juntament amb el desenvolupament de la indústria de l'alumini, peces estructuralment fiables, fortes i resistents a fractura.

Els primers usos comercials de l'alumini varen ser objectes innovadors com marcs de miralls o safates, als que s'hi varen afegir els estris de cuina. Amb el temps s'ha incrementat la diversitat d'aplicacions de l'alumini en la mida en que pràcticament tots els aspectes de la vida moderna es veuen directe o indirectament afectats per el seu ús [2][3].

2.2 Obtenció de l'alumini

L'alumini s'obté de la bauxita, la forma mineral en què es troba en la naturalesa, per mitjà del procés Bayer. Per separar els àtoms d'alumini que és troben en la bauxita s'utilitzen corrents elèctrics elevats a causa de la gran quantitat d'energia química que emmagatzema l'alumini pur ($54 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). En aquest procés la bauxita és lixivada amb sosa càustica (NaOH) per produir l'aluminat de sodi soluble (NaAlO_2). La solució es un aluminat que es descompon produint $\text{Al}(\text{OH})_3$. A continuació s'introdueix el compost a un forn on, a través d'un procés de calcinació, s'obté òxid d'alumini (Al_2O_3), que, mitjançant electròlisi i l'addició de criolita, permet obtenir l'alumini metàl·lic [3][4][5].

2.3 Propietats de l'alumini

L'alumini i els seus aliatges estan entre els materials més extensament utilitzats industrialment ja que és molt versàtil. El gran ús d'aquests es deu en gran mesura a les qualitats com ara una baixa densitat ($2,7 \text{ kg/m}^3$, aproximadament un terç de l'acer $7,83 \text{ kg/m}^3$) una resistència mecànica acceptable, una molt bona resistència a la corrosió, una bona conductivitat elèctrica i tèrmica, capacitat d'aliar-se amb una gran quantitat d'elements, i sobretot, a la bona relació que manté la seva resistència mecànica amb la seva densitat (*Taula 2.1*). Aquesta darrera propietat fa que sigui molt útil en aplicacions estructurals i actualment pot arribar a comparar-se amb les estructures d'acer (material més utilitzat per aquestes aplicacions). També és molt utilitzat en l'enginyeria de transport (automoció i aeronàutica) on es necessiten components lleugers amb una bona resistència. Això té un impacte en el medi ambient, ja que si es substitueixen altres materials més pesants per alumini es disminueix el pes dels vehicles i també el consum de combustible i les emissions de CO_2 .

L'únic material que es pot comparar actualment a nivell de propietats mecàniques-pes amb l'alumini és el titani però el gran inconvenient d'aquest és el seu elevat preu degut a que les reserves són més escasses i també a la gran dificultat que presenta reciclar el titani.

També s'ha de destacar l'excel·lent resistència a la corrosió deguda a la protectora pel·lícula d'òxid que es forma sobre la superfície quan entra en contacte amb l'aire i que no permet una oxidació addicional. Si aquesta pel·lícula d'òxid es desprengués o és ratllés automàticament es tornaria a formar una capa igual a l'anterior impedit que es pogués oxidar la peça. Aquesta fina capa és incolora i no es pot apreciar a simple vista.

Una de les propietats que també cal destacar és la seva facilitat per al reciclatge ja que permet ser reutilitzat de manera gairebé immediata. Per la qual cosa, a l'alumini, un cop extret del mineral no se li hauran de realitzar costosos processos per tornar a ser utilitzat i n'hi haurà prou en retirar els òxids formats a la superfície que el contaminen. Aquest òxid representa un petit percentatge per tant es podrà reutilitzar la majoria del material [4][6].

Taula 2.1. Propietats de l'alumini comparat amb altres metalls lleugers i pesats [1][7]

PROPIETAT	UNITATS	VALOR					
		METALLS LLEUGERS			METALLS PESATS		
		Alumini	Titani	Magnesi	Coure	Ferro	Zinc
Densitat	/kg·m ⁻³	2,69	4,5	1,7	8,96	7,87	7,13
Mòdul d'elasticitat	/GPa	66,6	116	45	150	200	85
Resistència a tracció	/MPa	160-200	552	185-232	210	540	137
Temperatura de fusió	/°C	660,2	1650	650	1083	1535	420
Conductivitat elèctrica	%IACS	64	4	38	100	17,5	28
Conductivitat tèrmica	/W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	235	21,9	146	387	71	113
Estructura cristal·lina		CCC	HC/CC	HC	CCC	CC (T<911 °C) CCC (911°C<T<1392°C) CC (1392°C<T)	HC

2.4 Aliatges d'alumini

Actualment els aliatges d'alumini són molt utilitzats en la indústria ja que les propietats dels elements d'aliatge combinades amb la bona densitat de l'alumini fan que es puguin reduir el pes millorant les propietats mecàniques de l'aliatge, imprescindible en la indústria del transport i de l'aeronàutica, ja que amb un mitjà de transport més lleuger es disminueixen les emissions de CO₂.

Tot i que l'alumini pur té un molt bon conjunt de propietats, aquestes contínuament s'intenten millorar per tal d'aconseguir un metall que sigui òptim per a cada situació. L'alumini pur es combinarà amb altres metalls per tal d'aconseguir aliatges, o microaliatges, depenent de les concentracions dels elements aliats. Com per exemple quan l'alumini s'alia amb silici per tal de que es pugui conformar per conquilla per gravetat.

Un aliatge és un material producte de mesclar dos o més elements amb l'objectiu de millorar o combinar les seves propietats. Denominem microaliatge a qualsevol aliatge en el qual la concentració de l'element afegit no superi un 0,15%, aproximadament.

Aquest procés té com a objectiu o bé millorar alguna propietat mecànica directament per la formació de precipitats que dificulten el moviment de dislocacions, o bé afavorir interaccions entre partícules, com per exemple, amb addicions de TiB que produeix un afinament de gra [8].

Pel que fa als aliatges d'alumini hi ha una gran varietat d'elements a afegir per tal de canviar les propietats del metall, com es veurà al punt 2.5.3 *Efecte dels elements d'aliatge*. Cal recordar que

en afegir elements d'aliatge en percentatges considerables (majors d'un 1%) les propietats mecàniques del conjunt variaran proporcionalment depenent de la quantitat d'element aliat.

En canvi, per als microaliatges, els percentatges dels elements aliats seran menors al 0.15%, les propietats canvien d'una forma no proporcional [9].

En general, els microaliatges s'empren com un complement pels aliatges base per tal d'aprofundir en les propietats mecàniques o químiques subministrades per l'aliatge o bé per afegir-ne de noves [10].

2.4.1 Nomenclatura aluminis

En aquest treball s'utilitza la norma UNE EN 1706 (Euronorm) per designar els aliatges d'alumini per fosa (Taula 2.2). L'aliatge utilitzat durant el treball (Al-9%Si-3%Cu) es designa com EN AC 46500 (Figura 2.1). Durant aquest treball ens referirem a l'aliatge com AlSi9Cu3, que és la seva designació simbòlica [11].

Taula 2.2. Classificació dels aliatges d'alumini de fosa segons EN 1706

Designació EN AC	Principal elements d'aliatge	Principals compostos que hi apareixen (intermetàl·lics i precipitats)
1XXX0	Alumini (% Al > 99%)	-
2XXX0	Coure	CuAl ₂
3XXX0	Silici + Magnesi o Coure	Mg ₂ Si
4XXX0	Silici	-
5XXX0	Magnesi	Al ₃ Mg ₂
7XXX0	Zenc	MgZn ₂
8XXX0	Estany	Sn ₃ Al ₂
9XXX0	Altres elements	Depèn de l'element d'aliatge

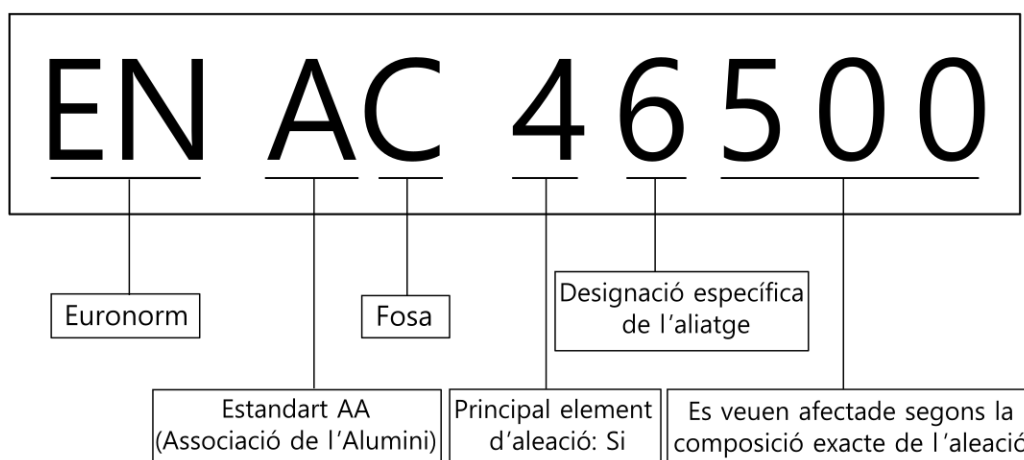


Figura 2.2. Designació dels aliatges de foneria segons EN AC 1706

2.5 AlSi9Cu3

El material base utilitzat en aquest projecte és l'aliatge d'alumini AlSi9Cu3. L'aliatge d'alumini AlSi9Cu3, també té la designació EN AC 46500 (estàndard europeu) i als Estats Units es designa com A380.

Els aliatges Al-Si són els aliatges lleugers de fosa més estesos i ara constitueixen el 90% dels aliatges d'alumini utilitzats en el sector de l'automoció. Entre els processos industrials per produir components d'aliatges d'alumini la fosa d'alta pressió és la tecnologia més utilitzada. El seu èxit es deu principalment a la combinació d'excel·lents característiques físiques i químiques, ja esmentades anteriorment, amb una tensió específica alta, excel·lent emmotllament i contracció de baix volum durant la solidificació. [12]

L'aliatge AlSi9Cu3 conté una quantitat relativament gran de coure, que proporciona bones propietats mecàniques i de processament. El desavantatge principal de grans quantitats de coure és una resistència a la corrosió baixa. Una petita presència de magnesi condueix a la formació del compost Mg_2Si , que millora encara més les propietats mecàniques de l'aliatge. S'utilitza principalment per a la producció de peces complexes de fosa, amb parets fines que estan exposades a càrregues dinàmiques. També s'utilitza per a fosa de motlles, per a peces de màquines i motors, capçals de cilindres, peces de motors elèctrics, coixinets... [13].

Les seves propietats es apareixen a la *Taula 2.3*.

Taula 2.3. Propietats AlSi9Cu3 [7]

Propietats del AlSi9Cu3	
Punt de fusió (<i>liquidus</i>)	625°C
Punt de fusió (<i>solidus</i>)	575°C
Densitat	3,0 g·cm ⁻³
Conductivitat tèrmica	109 W·(K·m) ⁻¹
Conductivitat elèctrica	7,5 μΩ ·cm ² ·cm ⁻¹
Resistència a la tracció	170 N·mm ⁻²
Límit elàstic	100 N·mm ⁻²
Allargament a fractura	1%

2.5.1 Diagrames de fases:

En la *Figura 2.2* es mostra el diagrama de fases Al-Si que ha estat utilitzat per a determinar la temperatura de fusió de l'aliatge. S'ha tingut en compte que la temperatura havia d'estar per sobre de la línia *liquidus* a una concentració del 9% de Silici i també que amb l'adició dels elements d'aliatge aquesta temperatura pot augmentar lleugerament.

En aquest cas el diagrama de fases de l'Al-Si és fins a un 100% de Silici en pes. En general els aliatges d'Al-Si es troben entre un 5-20%.

EL punt eutèctic es troba a una temperatura de 577°C i correspon a una concentració del 12,2% de Si.

El silici augmenta la duresa de l'alumini i la resistència a la corrosió, també facilita l'emmotllament. Els aliatges Al-Si són molt dúctils i resistents al xoc. Tenen un baix coeficient de dilatació i bones conductivitats tèrmica i elèctrica, però són difícils de mecanitzar per la naturalesa abrasiva del silici. Aquests aliatges s'utilitzen per a fosa de peces amb formes complicades [14][15].

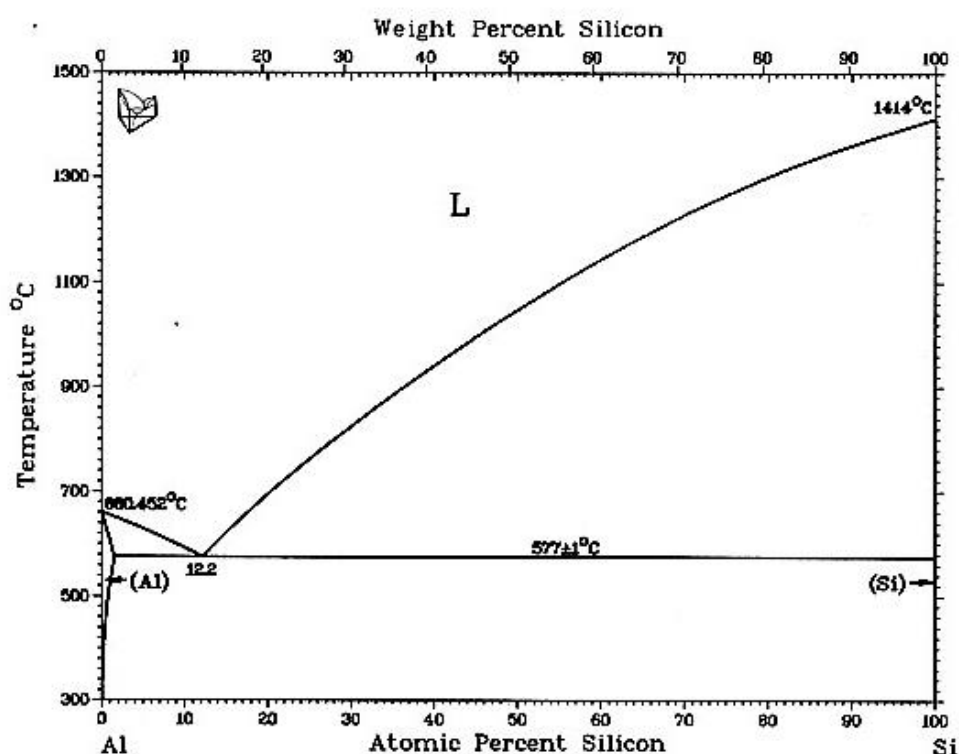


Figura 2.2. Diagrama de fases Al-Si [14]

En la Figura 2.3 es pot veure el diagrama d'Al-Cu en aquest cas el diagrama s'utilitzarà per a determinar la temperatura a la que es realitzaran els tractaments tèrmics. A diferència de l'Al-Si que no és tractable tèrmicament donat que no presenta enduriment per precipitació, l'Al-Cu sí que presenta aquest tipus d'enduriment. El que es buscarà en aquest diagrama és una temperatura que estigui per sobre de la línia solvus amb una concentració del 3% a la qual s'escalfarà el material per després refredar-lo ràpidament (veure punt 2.6 Tractaments tèrmics).

Aquest diagrama de fases d'alumini-coure és fins a un 70% de coure en pes. Aquest percentatge és molt més elevat al que s'utilitza en els aliatges d'alumini-coure que en general no superen el 15% en pes, ja que a partir d'aquest percentatge es formen compostos intermetàl·lics que fan que l'aliatge torni més fràgil.

El punt eutèctic es troba a una temperatura de 547°C i correspon a una concentració del 33% de coure.

El coure aporta un augment de la resistència a tracció i la duresa de l'alumini sense que aquest perdi la seva maquinabilitat i lleugeresa. A més els aliatges que contenen entre un 3% i un 6% de coure, com és aquest cas, tenen una resposta més efectiva a tractaments tèrmics. Les addicions de coure redueixen la resistència a l'esquerdament en calent però dificulten l'emmotllament en peces de fosa. Aquests aliatges tenen una bona resistència tèrmica, però també una disminució de la resistència a la corrosió [14][15].

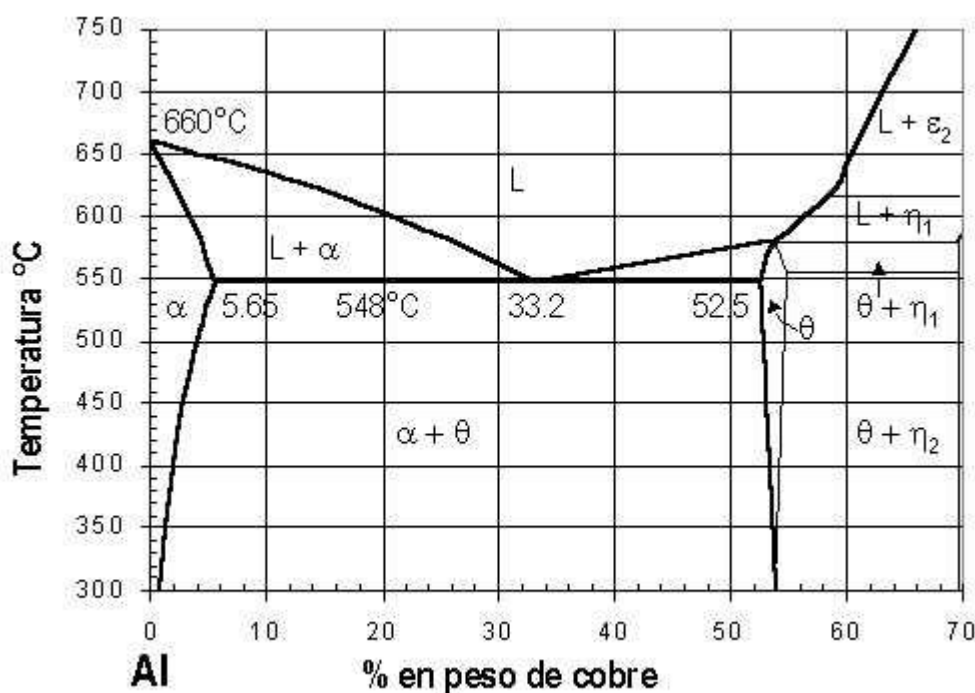


Figura 2.3. Diagrama de fases Al-Cu [14]

2.5.3 Efecte dels elements d'aliatge:

Refinants de gra

Els refinants de gra s'utilitzen per reduir la mida dels grans de l'aliatge. Es poden emprar elements com el bor, tant en solitari com barrejat amb titani; el crom, a causa de la seva capacitat de nucleació, o bé el molibdè o el niobi a causa de l'aparició de la reacció peritèctica en el diagrama de fases. El zirconi provoca l'aparició d'intermetàl·lics AlZr que també impedeixen el creixement de gra.

A la fosa d'alumini s'afegeix Ti-B com a afinant de gra. Nombrosos nuclis heterogenis es dispersen per la massa fosa que al refredar-se nucleen el sòlid. A l'afegir aquests afinants de gra es dissolen dins la matriu d'alumini i depenent del tipus d'element addicionant s'alliberen diferents partícules intermetàl·liques (TiAl₃, TiB₂ o AlB₂, ...) [8].

Els aliatges d'alumini i silici són actualment els aliatges de fosa en base d'alumini més importants deguts al bon emmotllament. La presència d'alumini promou la formació de creixement columnar de gra per aconseguir una microestructura equiaxial final, el refinament de gra es practica comunament en aquests aliatges.

Elements d'aliatge

- Silici: el silici és el principal element d'aliatge; aporta gran fluïdesa a l'aliatge i alta resistència a l'esquerdament en calent, el que provoca un bon emmotllament i soldabilitat. La expansió tèrmica i la solidificació es notablement reduïda gràcies al silici. Al mateix temps millora la resistència a l'oxidació i al desgast. No obstant, afegir un excés de silici a l'aliatge pot produir una zona esgotada en els límits de gra, lo que provocarà que aquest aliatge sigui susceptible a la corrosió intergranular. Per augmentar l'enduriment per maduració es poden utilitzar aliatges de silici del grup 6000 [16][17].
- Magnesi: el magnesi s'utilitza per millorar la resistència a la corrosió i principalment per millorar les propietats per tractament tèrmic. En els aliatges d'Al-Si millora la duresa i la resistència degut a la formació del compost Mg_2Si . En els aliatges Al_4CuMg precipita el compost Al_2CuMg que provoca l'enduriment per precipitació. Amb una maduració artificial aconseguim un increment tant del límit elàstic com de la resistència a tracció, disminuint la ductilitat, mentre que amb una maduració natural mantenim una bona ductilitat incrementant en menor grau la resistència [16][17].
- Coure: principalment el coure s'afegeix en els aliatges d'alumini per augmentar la resistència i la resistència a la fatiga i també per afavorir el tractament tèrmic. Per altre part, el coure disminueix la resistència a la corrosió la qual cosa es pot evitar afegint-hi magnesi [16][17].
- Zircon: microaliatges de zirconi: en aquest cas, el zirconi en petites concentracions (0.1-0.3%) fa la funció d'un intermetàl·lic que impedeix el creixement de gra i la recristal·lització en els tractaments tèrmics. A més quan s'afegeix a composicions amb zinc i magnesi (a més de l'alumini base) també permet augmentar la temperatura de recristal·lització, per tal que el seu efecte d'inhibidor del creixement de gra sigui més eficaç [16][17].
- Zinc: el zinc incrementa la resistència mecànica quan està associat amb el magnesi, però disminueix la tenacitat i la resistència a la corrosió quan es troba sota una tensió. També augmenta la resistència a canvi de reduir la ductilitat [16][17].

2.6 Tractaments tèrmics

Per seguir augmentant la resistència i la duresa de l'alumini un cop aliat, ja sigui de forja o de fosa, se'ls hi aplica un tractament tèrmic per endurir-ho per precipitació. És un procés industrial que sotmet de manera controlada el material a temperatures elevades durant un cert temps i velocitat de refredament.

Cada un dels tractaments tèrmics proveeixen a l'aliatge de les característiques necessàries per exercir la seva funció final. A continuació es presenten els diferents tractaments [18]:

T Tractat tèrmicament per produir tremp estable

T1 Refredament des d'una temperatura elevada, provocant un procés de maduració

T2 Tremp (només productes de fosa)

T3 Tractament de posta en solució, treball en fred

T4 Tractament de posta en solució, maduració natural

T5 Refredament des d'una temperatura elevada en el procés de conformat i maduració artificial (tractament tèrmic de precipitació)

T6 Posta en solució, maduració artificial

T7 Posta en solució, estabilització

T8 Posta en solució, treball en fred, maduració artificial

T9 Posta en solució, maduració artificial, treball en fred

T10 Refredament des d'una temperatura elevada, maduració artificial, treball en fred

2.6.1 Posta en solució i maduració artificial

El tractament tèrmic que s'aplicarà en aquest projecte és el T6. Aquest consisteix en elevar la temperatura fins a un punt on es tingui completament soluble a l'element d'aliatge, després d'un cert temps d'homogeneïtzació, es baixa la temperatura ràpidament per mantenir-lo en solució i, finalment, es porta a una temperatura a la qual s'aconsegueix el fenomen de maduració, que no és altra cosa que la precipitació controlada dels precedents de la fase θ . Aquestes partícules precipitades actuen com obstacles que s'oposen al moviment de dislocació, i per lo tant, fan més fort l'aliatge sotmès al tractament tèrmic.

Per tant, els tres estats en què s'ha de posar atenció en un tractament tèrmic en aliatges d'alumini són: solubilització, refredament ràpid i maduració, que serveixen per augmentar la resistència mecànica en l'aliatge per mitjà d'un enduriment per precipitació. A continuació s'explica cada procediment [6][18][19][22]:

Posta en solució

El principal propòsit es dissoldre per complet amb la màxima concentració els elements aliats. S'ha de tenir en compte no escalfar l'aliatge per sobre la línia de *solidus* produint el que es coneix com cremat, això conduiria a una fusió dels components eutèctics en els límits de gra, amb un resultat no desitjat tant en ductilitat com en altres propietats mecàniques. Pel contrari, si la temperatura no es suficientment elevada, no s'arribarà a tenir una solubilització completa dels elements. Si l'aliatge es refredes des de la temperatura de posta en solució fins a una temperatura inferior, en condicions d'equilibri la fase α tendeix a precipitar partícules de l'intermetàl·lic θ , les quals no contribueixen a l'enduriment a causa del gruix i l'escassa quantitat de precipitats per unitat de volum. Es per això que es requereix de tractaments posteriors per aconseguir les característiques òptimes.

El temps per a que es realitzi per complet el tractament de posta en solució varia depenent de la microestructura i de les dimensions de la peça. En aquest temps, les fases precipitades en el límit de gra s'han de difondre cap a l'interior del gra. Aquesta difusió és més ràpida si la mida del gra és més petita.

Refredament ràpid o tremp

Es tracta de refredar de manera ràpida el material des de la temperatura de solubilització fins a la temperatura ambient amb l'objectiu de mantenir l'estructura de solució completa amb el màxim d'elements enduridors. S'obté una solució sòlida metaestable sobresaturada de solut amb aquets àtoms col·locats de manera aleatòria en els nusos de la xarxa cúbica. Aquest procediment esta intrínsecament relacionat amb el tractament posterior de maduració. L'aigua freda o a temperatura ambient és un mitjà molt útil ja que es poden obtenir velocitats de refredament molt altes. No obstant, el refredament ràpid pot produir esforços interns de compressió a la superfície i inestabilitat elàstica. Aquesta velocitat es pot reduir refredant l'aliatge amb aigua calenta o aire fred, però s'ha de tenir cura de no reduir excessivament aquesta velocitat, ja que poden precipitar elements d'aliatge sobre les fronteres de gra donant indesitjables resultats (sobremaduració localitzada, pèrdua de la resistència de la corrosió a les fronteres de gra i inclús una inadequada resposta al tractament de maduració). L'òptim és mantenir un balanç entre el ràpid refredament i la minimització de esforços residuals.

Maduració

La maduració, ja sigui artificial o natural és el darrer pas del tractament, el qual consisteix en mantenir la mostra a certa temperatura durant un temps per a que precipitin els elements d'aliatge. Es pot donar maduració natural si precipiten a temperatura ambient, no obstant el tractament T6 es caracteritza per finalitzar amb una maduració artificial, al qual se li ha d'eleva la temperatura (entre un 15%-25% de la diferència entre la temperatura ambient i la temperatura de posta en solució) durant un cert temps. Quan la solució sòlida sobresaturada s'envelleix a una temperatura relativament baixa, es disposa d'una petita quantitat d'energia d'activació i es formen agrupacions d'àtoms segregats coneguts com zones GP (Guiner Preston). En el cas de l'aliatge Al-Cu de la *Figura 2.3*, les zones seran enriquides amb precedents de la fase θ en una matriu α . El procés de maduració es presenta generalment amb una corba generada a partir de mostres de dureses del metall tractat a temps de maduració progressius (*Figura 2.4*). Aquesta corba és una gràfica de resistència amb el temps de maduració a una

temperatura particular. Segons el temps d'exposició varia proporcionalment la mida dels precipitats, és a dir, a major temps els precipitats creixen, amb lo qual l'aliatge es torna més resistent, més dur i menys dúctil.

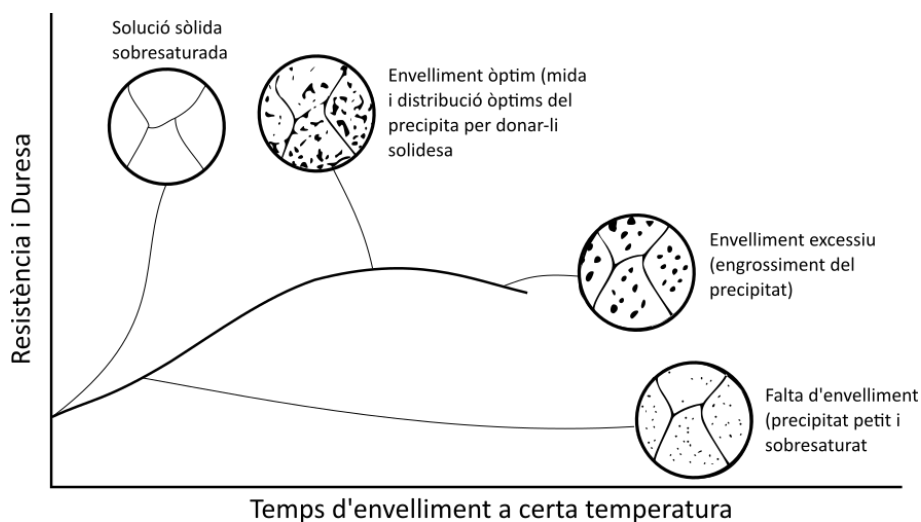


Figura 2.4. Corba de maduració [22]

2.6.2. Sistemes tractables tèrmicament

La majoria dels sistemes d'aliatge que admeten enduriment per precipitació contenen combinacions de magnesi amb un o més elements, coure, silici i zinc. Aquestes combinacions corresponen a les sèries 2XXX0 Coure, la sèrie 3XXX0 Silici + Magnesi o Coure i la sèrie 7XXX0 Zenc [3] :

- Sistema alumini - coure: augmenten la resistència per mitjà de Al_2Cu . Contenen entre un 4% i 5% de coure, usualment amb impureses de ferro i silici i petites quantitats de magnesi. Són tractables tèrmicament i es poden aconseguir forces i ductilitats força altes.

No obstant, aquests aliatges no són gaire bons per emmotllar-se. Principalment es fonen en motlles d'arena, si es volen emmotllar en motlles metàl·lics cal afegir silici ja que fa créixer la fluïdesa però en redueix la ductilitat.

Els aliatges Al-Cu que contenen entre 7% i 8% de coure tenen l'avantatge de que són menys sensibles a les impureses. Els que contenen entre un 9% i 11% són bons resistent a altes temperatures i al desgast.

- Alumini – coure o magnesi - silici: augmenten la resistència per mitjà de Mg_2Si . És l'aliatge més comú. En aquest cas el coure contribueix en la resistència i el silici incrementa l'emmotllament.

Els aliatges que contenen més d'un 3% o 4% de coure són tractables tèrmicament. No obstant els tractaments tèrmics es realitzen amb aquells aliatges que contenen magnesi. Si l'aliatge conté un al percentatge de silici (>10%) té poca expansió tèrmica.

- Alumini-zinc: augmenten la resistència per mitjà de $MgZn_2$. Aquests aliatges tenen propietats de tracció de moderades a bones en la fosa. Amb un recuit es desenvolupa una bona estabilitat dimensional. Els aliatges tenen bon mecanitzat (i resistència a la corrosió, tot i tenir certa susceptibilitat a la corrosió sota tensió). Generalment no es recomanen per a servei a temperatures elevades. Les propietats de tracció d'aquests aliatges es desenvolupen a temperatura ambient durant les primeres setmanes després de la fosa, a causa del enduriment per precipitació. L'emmotllament d'aliatges d'Al-Zn-Mg és pobre i es requereix un control acurat de les condicions de solidificació per produir peces sòlides sense defectes. Es requereixen gradients de temperatura de moderats a forts per assegurar una alimentació adequada per evitar defectes de contracció.

Els aliatges que no presenten precipitacions durant el tractament tèrmic es descriuen com no tractables tèrmicament. Els aliatges binaris d'alumini i silici no presenten aquest tipus de precipitacions, per tant no es poden tractar tèrmicament [19].

3. PROCÉS EXPERIMENTAL

3.1 Composició del material base

El material base utilitzat durant tot l'estudi és l'AlSi9Cu3 o EN AC 46500 amb les característiques presentades al punt 2.5 *AlSi9Cu3*. S'ha obtingut dels lingots facilitats per l'escola i l'estudi de la seva composició s'ha obtingut d'anàlisis realitzats en treballs anteriors mitjançant l'espectrògraf, SPECTROMAXx (Figures 3.1 i 3.2) [1].



Figura 3.1 SPECTROMAXx

Program: Al-20-F		120696/06		16/03/2017 12:49:34				
Comment: Al/Si,Al/SiMg-alloy				Elements: Concentration				
Single spark(s)								
Sample No: 1		Quality: HYDRO 3049-4/3-03						
Sample Id: Control Colada - Al 93 - 1								
No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	10.33	0.92	2.32	0.152	0.261	0.013	0.039	0.98
No	Ti	Be	Bi	Ca	Cd	Co	Na	P
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.030	0.0001	<0.0000	0.0020	0.0010	<0.0000	0.0002	<0.0000
No	Pb	Sn	Sr	V	Zr	Al		
	%	%	%	%	%	%		
1	0.121	0.027	0.0002	0.0047	0.0038	84.8		

Figura 3.2 Anàlisi química AlSi9Cu3. [1]

Per tal d'assegurar que el material és vàlid s'ha comparat amb els paràmetres homologats per la norma UNE-EN1706 [11].

Taula 3.1. Composició normalitzada de l'aliatge AlSi9Cu3 [11]

Element	Fe	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Cu	Pb	Mg	Zn	Sn	Altres	-
Rang %	Max 1,3	8- 11	Max 0,55	Max 0,55	Max 0,15	Max 0,25	2-4	Max 0,35	0.05- 0,55	Max 1,2	Max 0,15	0.05- 0,25	Al, la resta

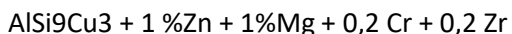
Com es pot observar, tots els valors obtinguts estan dintre dels marges per tant podem considerar el material com vàlid per l'experimentació i per tant seguir amb el lingot facilitat.

3.2 Preparació de les diferents colades

3.2.1 Anàlisi de resultats anteriors

Donat que aquest projecte es tracta de la continuació d'estudis previs, el primer que s'ha fet es revisar les dades obtingudes anteriorment.

En el projecte *New Aluminium-Silicon-Copper microalloyed alloys* [1] es va arribar a la conclusió que l'addició de Cr i Zr en baixes quantitats, juntament amb Zn i Mg, proporcionava a l'AlSi9Cu3 una millora significativa de la duresa en un temps de maduració de 3 hores. Dita colada té la següent composició:



Per començar aquest projecte el que es va decidir va ser repetir aquesta colada per tal de comprovar els resultats de duresa abans i després del tractament tèrmic.

3.2.2 Colades a realitzar

Colades per a l'estudi de tremp i maduració artificial

Amb l'objectiu d'observar l'efecte que tenen els diferents elements d'aliatge en l'AlSi9Cu3 s'han realitzat una sèrie de colades de 300 g a una temperatura de 670 °C durant 40 min.

Els elements d'aliatge utilitzats tenen diferents funcions, el Cr i el Zr són inhibidors del creixement de gra, el Mg i el Zn són enduridors per tractament tèrmic per precipitació i el TiB és un afinant de gra.

Com ja s'ha mencionat anteriorment s'ha repetit la colada amb millors resultats dels treballs previs, on es troba major duresa amb poca quantitat de Cr i Zr, es per això que en la segona colada s'ha reduït la quantitat de Cr i Zr a un 0,1% per observar l'efecte que té.

En la tercera colada s'ha augmentat el percentatge de Zn i Mg ja que en el projecte *Nous aliatges d'alumini microaliat* [20] es va realitzar aquesta colada però sense les addicions de Cr i Zr, l'objectiu d'aquesta colada és veure l'efecte conjunt de més quantitat de Zn i Mg amb les quantitats que s'havien obtingut millors resultats de Cr i Zr.

- 1.- AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,2 Cr + 0,2 Zr
- 2.- AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,1% Cr + 0,1% Zr
- 3.- AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr

S'ha decidit afegir TiB a la colada de la que s'han obtinguts millors resultats (colada 1).

- 4.- AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr +1%TiB

Colades per determinar les propietats mecàniques

Amb la colada de la que s'ha obtingut millors resultats de duresa conjuntament amb el material base pur s'han realitzat colades més grans per tal de poder realitzar les anàlisis de tracció. S'han realitzat dues colades de 3 kg a una temperatura de 640°C durant 1 hora i amb l'adició de Coveral de l'empresa FOSECO que evita l'oxidació:

- 1.- AlSi9Cu3
- 2.- AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr

Per a properes colades es recomana afegir els elements d'aliatge en trossos petits quan el material base ja esta fos, ja que si s'afegeix tot alhora els elements d'aliatge suren i es barregen amb la capa d'òxid degut a que tenen temperatures diferents de fusió i diferents densitats.

Composició de les lligues mare

Per poder realitzar les colades el CDAL ens ha facilitat unes lligues mare amb la composició que s'indica a la *Taula 3.2*.

Taula 3.2 Composició dels lingots /% en pes

LINGOTS	Alumini	Silici	Coure	Crom	Magnesi	Zirconi	Zinc	Ti	B
Al-9%Si-3%Cu	98,76	10,33	2,32	0	0,26	0	0,98	0	0
Mg-6%Al	6	94	0	0	0	0	0	0	0
Al-20%Cr	80	0	0	20	0	0	0	0	0
Al-10%Zr	90	0	0	0	0	10	0	0	0
ZAMAC	4,85	0	0	0	0,04	0	95,15	0	0
Al-5%Ti-1%B	94	0	0	0	0	0	0	5	1

3.2.3 Càlcul de les diferents colades

Per tal d'obtenir la composició final de cada colada s'ha utilitzat el software Excel per realitzar una sèrie de taules amb la composició de cada lingot. Amb aquestes taules i una sèrie de càlculs s'han pogut obtenir els grams de cada lingot que s'havien d'afegir per realitzar 300g de colada (*Taules 3.3 a 3.8*).

Colades per a l'estudi de tremp i maduració artificial

Colada 1

Taula 3.3. Composició de la colada 1

300g de AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,2%Cr + 0,2%Zr					
Mescla final	g de AlSi9Cu3	g de Zn	g de Mg	g de Cr	g de Zr
	292,8	3	3	0,6	0,6
Quantitat de cada lliga mare	g de AlSi9Cu3	g ZAMAC	g Mg-6%Al	g Al-20%Cr	g Al-10%Zr
	288,43	0	2,39	3	6

Colada 2

Taula 3.4. Composició de la colada 2

300g de AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,1% Cr + 0,1% Zr					
Mescla final	g de AlSi9Cu3	g de Zn	g de Mg	g de Cr	g de Zr
	293,4	3	3	0,3	0,3
Quantitat de cada lliga mare	g de AlSi9Cu3	g ZAMAC	g Mg-6%Al	g Al-20%Cr	g Al-10%Zr
	292,98	0	2,37	1,5	3

Colada 3

Taula 3.5. Composició de la colada 3

300g de AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr					
Mescla final	g de AlSi9Cu3	g de Zn	g de Mg	g de Cr	g de Zr
	283,80	9	6	0,6	0,6
Quantitat de cada lliga mare	g de AlSi9Cu3	g ZAMAC	g Mg-6%Al	g Al-20%Cr	g Al-10%Zr
	278,19	6,59	5,60	3	6

Colada 4

Taula 3.6. Composició de la colada 4

300g de ALSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr + 1% TiB						
Mescla final	g de ALSi9Cu3	g de Zn	g de Mg	g de Cr	g de Zr	g de TiB
	280,80	9	6	0,6	0,6	3
Quantitat de cada lliga mare	g de ALSi9Cu3	g ZAMAC	g Mg-6%Al	g Al-20%Cr	g Al-10%Zr	g de TiB
	276,60	6,60	5,61	3	6	1,67

Colades per a determinar les propietats mecàniques.

Colada 1

Taula 3.7. Composició de la colada 1

3 kg de ALSi9Cu3					
Mescla final	g de ALSi9Cu3	g de Zn	g de Mg	g de Cr	g de Zr
	3000	0	0	0	0
Quantitat de cada lliga mare	g de ALSi9Cu3	g ZAMAC	g Mg-6%Al	g Al-20%Cr	g Al-10%Zr
	3000	0	0	0	0

Colada 2

Taula 3.8. Composició de la colada 2

3 kg de ALSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr					
Mescla final	g de ALSi9Cu3	g de Zn	g de Mg	g de Cr	g de Zr
	2838,0	90	60	6	6
Quantitat de cada lliga mare	g de ALSi9Cu3	g ZAMAC	g Mg-6%Al	g Al-20%Cr	g Al-10%Zr
	2788,04	65,87	56,06	30	60

3.2.4 Preparació de les colades

Un cop s'ha calculat la quantitat de cada lingot que es necessita per a cada colada es procedeix a tallar els lingots i a pesar les quantitats exactes.

Per a poder tallar els lingots grans s'ha utilitzat la serra alternativa (Figura 3.3) . Un cop s'han obtingut porcions més petites que s'han pogut introduir dins la tronçadora (Figura 3.4), eina que permet tallar les lligues mare amb un pes més ajustat, si es vol aconseguir més precisió es pot fer-ne ús de les llimes. Finalment cada porció es pesava a la bascula per verificar el pes (Figura 3.5).



Figura 3.3. Serra alternativa



Figura 3.4. Tronçadora

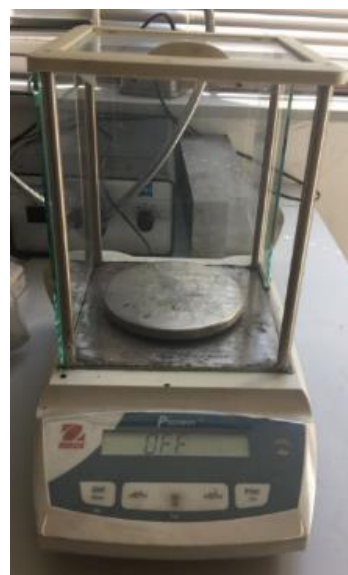


Figura 3.5. Bascula

3.2.5 Fosa de les colades

Fosa de les colades per a l'estudi de tremp i maduració artificial

El forn de resistències utilitzat en la part experimental d'aquest projecte ha estat el forn de mufla Hobersal Serie HS 12PR/300 (Figura 3.6). Aquest forn utilitza resistències de Kanthal per tal d'escalfar l'interior, aconseguint una temperatura màxima de 1200°C. És capaç d'arribar a la temperatura desitjada amb una desviació $\pm 2^\circ\text{C}$ i una homogeneïtat de $\pm 5\%$.

Un cop tenim tot el material tallat s'introdueix dins un gresol i aquest a la vegada dins el forn. Com a mesura de seguretat s'ha col·locat una palangana d'acer per protegir les resistències de possibles incidències i també s'ha utilitzat equipament de protecció.

La temperatura a la qual s'ha posat el forn és de 640°C que esta per sobre de la temperatura *liquidus* d'aquest aliatge (625°C) durant aproximadament 40 min.



Figura 3.6. Forn de resistències

Fosa de les colades per a determinar les propietats mecàniques.

Per realitzar l'assaig de tracció es precisa de més quantitat de material i per tant d'un forn amb unes dimensions mes grans. S'ha utilitzat el forn de fusió de resistències ISEC-60 Berco – Ripoché (Figura 3.7) amb unes propietats molt similars al presentat anteriorment. Les colades s'han fos a 680°C aproximadament 1 hora.



Figura 3.7. Forn de fusió de resistències

3.2.6 Preparació de les provetes

Provetes per a l'estudi de tremp i de maduració artificial

Quan es refreda la colada es rebutja la base i la capa superficial perquè conté massa òxids (Figura 3.8). Per obtenir un format òptim per estudiar el material se'n fan provetes d'aproximadament 2 cm x 2 cm. S'empra la tronçadora per tal de fer-ne talls precisos i paral·lels, ja que per a prendre mostres de dureses es necessari que les cares siguin paral·leles.

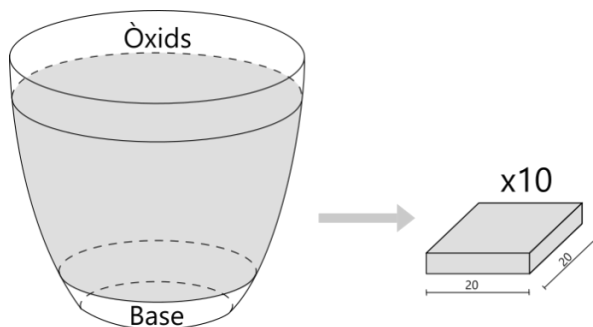


Figura 3.8. Obtenció de provetes per l'assaig de dureses

Provetes per a determinar les propietats mecàniques.

L'aliatge fos s'introdueix al motlle prèviament escalfat per millorar el procés d'emmotllament (evitant òxids i porositats). Les provetes obtingudes tenen una longitud total de 21cm; la part central mesura 9 cm de llarg i 1,25 cm de diàmetre; els extrems tenen una longitud de 4,5 cm cada un i un diàmetre de 1,8 cm (Figura 3.9).

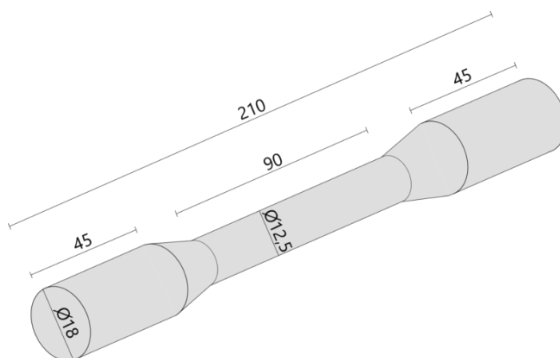


Figura 3.9. Proveta de tracció

3.2.7 Tractament tèrmic

Un cop obtingudes les provetes, s'han sotmès a un tractament tèrmic T6. És a dir, un tremp en aigua i una maduració artificial.

Les provetes s'han escalfat en un forn de resistències a una temperatura de 515°C (per sota de la temperatura eutèctica de l'Al-Cu, sistema que com s'ha esmentat abans dona les propietats

del tractament tèrmic) durant 6 hores, seguidament s'han refredat en aigua per aconseguir mantenir en solució sòlida els elements d'aliatge que formen els intermetàl·lics enduridors.

Un cop s'ha fet el tremp, se'ls fa una maduració artificial al forn HOBERSAL Drying Oven per a que precipitin les fases enduridores. Aquest procés consisteix en mantenir l'aliatge a una temperatura constant de 170°C. S'extrauran mostres cada 0,5h, 1h, 2h, 3h, 4h, 6h, 8h i 12h.

Tant la temperatura i el temps de posta en solució com la temperatura de maduració ve donada per un estudi previ, que va determinar quines eren les condicions òptimes per realitzar el tractament T6 i aconseguir el màxim enduriment [21].

Tractament tèrmic per a l'estudi de tremp i maduració artificial

Es sotmeten a aquest tractament totes les mostres excepte dues provetes. La primera que servirà com a mostra en blanc i una segona proveta a la que únicament se li aplica el tremp sense maduració.

Tractament tèrmic per a determinar les propietats mecàniques

Per aquest estudi també es retiren dues provetes que serviran com a mostra en blanc, la resta es sotmetrà al tractament T6.

3.2.8 Dureses

Per veure com afecta el tremp i la maduració artificial a l'aliatge tractat s'ha fet un estudi de dureses. Aquest estudi s'ha fet mitjançant el duròmetre RC-MP de la casa Metrocom (*Figura 3.10*). És segueix la norma ASTM E10-96 equivalent a la norma UNE-EN ISO6506-1 que indica que la carrega aplicada en l'estudi ha de ser de 62,5 kp durant 30 segons. La punta del penetrador té una diàmetre de 2,5 mm.



Figura 3.10. Durometre

3.2.9 Tracció

L'assaig de tracció s'ha realitzat mitjançant la màquina Zwick Z100 (*Figura 3.11*), consta d'un equip electromecànic universal, que permet l'assaig de compressió, tracció i flexió.

La força màxima de tracció/compressió és de 100kN. Les velocitats de deformacions poden anar des de $0,001 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ la mínima, fins a $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. La norma és EN 10002-1 que ens indica que la velocitat de deformació utilitzada serà $2,5\cdot 10^{-3}\text{s}^{-1}$.

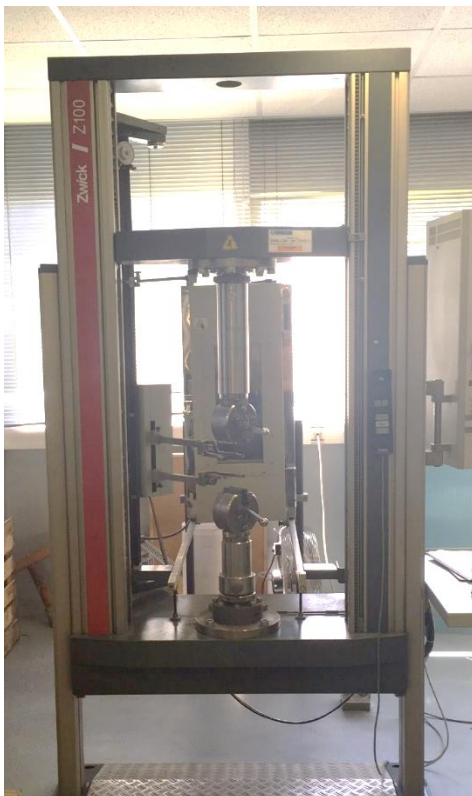


Figura 3.11. Zwick Z100

3.2.10 Metal·lografia

S'estudien els canvis d'estructura entre les mostres preses abans del tractament tèrmic i després del tractament tèrmic, per veure les concentracions de silici i la quantitat d'intermetàl·lics. També s'observen la mida de les dendrites i l'arrodoniment del gra.

Per dur a terme aquesta operació prèviament s'han hagut de muntar les mostres de l'aliatge en provetes de resina. S'ha utilitzat la màquina LaboPress-3 de la marca Struers (*Figura 3.12*)

Un cop es tenen les mostres en provetes de resina s'ha de polir la superfície amb una polidora (*Figura 3.13*) i blanquejar la superfície amb col·loides de SiO_2 , això farà que la posterior imatge obtinguda amb el microscopi sigui més nítida.

Les mostres sense tractament tèrmic estan designades amb la inicial A i a les que se'ls hi ha realitzat un tremp amb el dígit 0.

Després del procés de preparació de les provetes ja es pot observar el canvi estructural en el microscopi Epiphot 200 (*Figura 3.14*). Es pren una primera imatge a x200 augments per fer-ne l'estudi amb el programa PC-Image del percentatge de silici i la circularitat del gra. També amb l'escala es veu la mida de la dendrita. Una segona imatge es presa a x50 augments per comparar millor el canvi estructural entre la mostra A i la 0.



Figura 3.12. LaboPress-3



Figura 3.13. Màquina polidora



Figura 3.14. Microscopi Epiphot 200

4. RESULTATS

Aquest treball té com a principal objectiu realitzar l'estudi dels resultats dels assajos de duresa i de tracció, així com també les anàlisis de composició química i de microscòpia òptica.

4.1 Resultats duresa Brinell, HB

En els gràfics que és veuran a continuació s'observa la progressió de la duresa en funció del temps de maduració a 170°C de cada mostra, així com també el resultat de duresa de la posta en solució i de la mostra després del tremp.

4.1.1 Resultats duresa HB, AlSi9Cu3

Els resultats de duresa del AlSi9Cu3 s'han obtingut del projecte anterior [7] i es poden observar a la *Figura 4.1*. A continuació es comparen els resultats de les progressions de dureses de cada colada amb el material base.

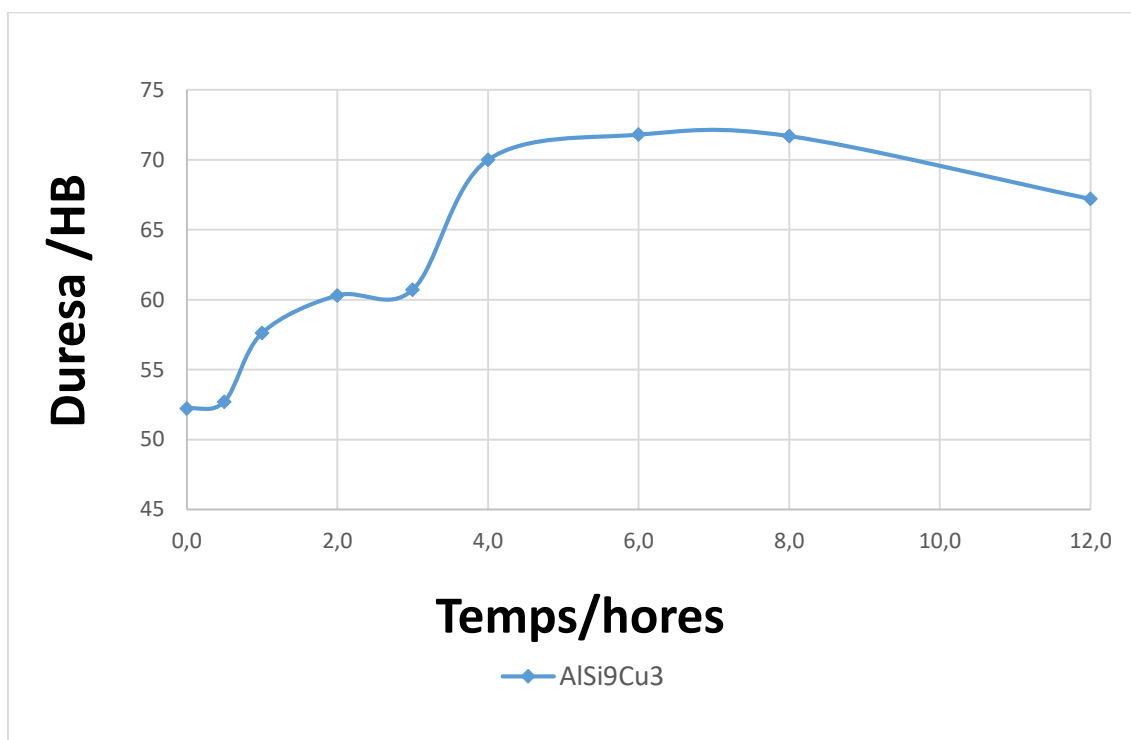


Figura 4.1. Progressió dureses AlSi9Cu3

4.1.2 Resultats duresa HB colada 1: AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr

Taula 4.1 Duresa HB AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr

AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,2 Cr + 0,2 Zr (Duresa HB 2,5 65,5)							
PROVETA	TEMPS MADURACIÓ	1	2	3	4	5	DURESA MITJANA
1A	Posta en solució	58,8	60	55,5	57,1	56,5	57,58
10	Tremp	71	64	67,1	69,8	66,5	67,68
11	0,5h	59,8	61,2	66,5	65,6	66,6	63,94
12	1h	77,9	78,3	82,6	73	84	79,16
13	2h	101	103	101	106	108	103,8
14	3h	94,6	100	99,1	99,1	95,8	97,72
15	4h	96,7	108	103	101	105	102,74
16	6h	109	110	102	106	106	106,6
17	8h	85,9	94	93,6	84,3	88,5	89,26
18	12h	104	75,8	96,4	81	77	86,84

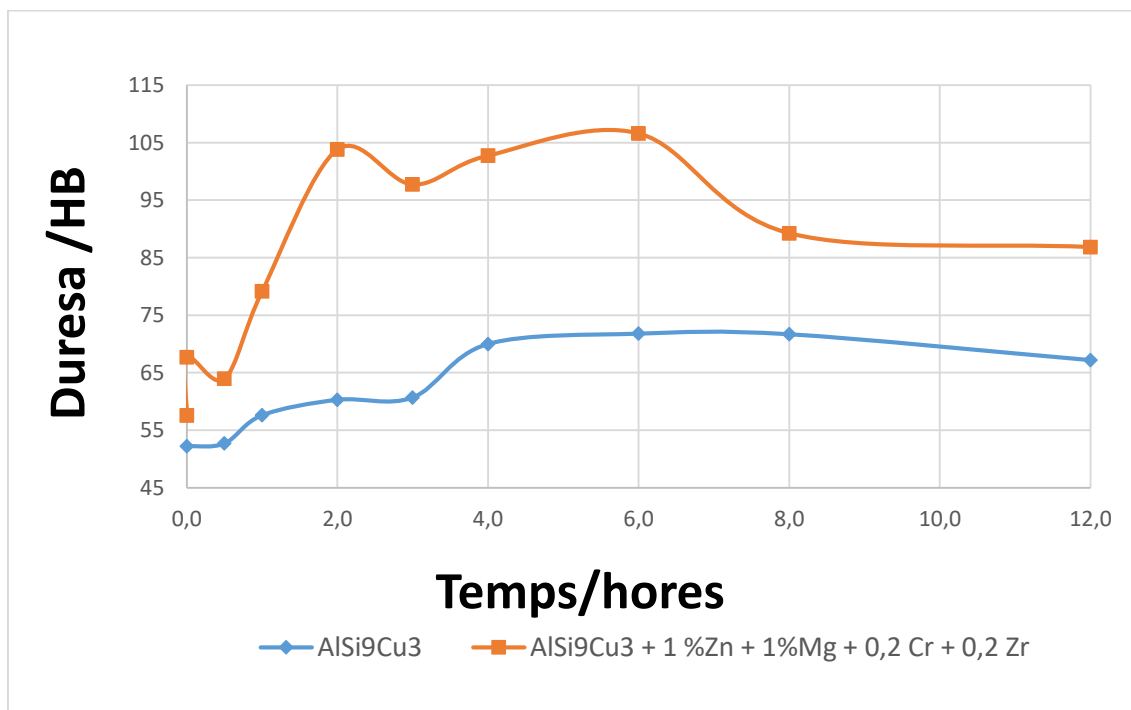


Figura 4.2. Progressió dureses HB AlSi9Cu3+ + 1 %Zn + 1%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr

4.1.3 Resultats duresa HB colada 2: AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,1% Cr + 0,1% Zr

Taula 4.2 Duresa HB AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,1% Cr + 0,1% Zr

AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,1% Cr + 0,1% Zr (Duresa HB 2,5 65,5)							
PROVETA	TEMPS MADURACIÓ	1	2	3	4	5	DURESA MITJANA
2A	Posta en solució	72,2	71,7	68,9	75,4	70,3	71,7
20	Tremp	66,7	71,2	75,2	72,4	73,2	71,74
21	0,5h	80,2	77,4	77,2	82,4	78,8	79,2
22	1h	80,6	81,6	86,8	82,6	88,3	83,98
23	2h	86,5	94	84,6	88,5	92,4	89,2
24	3h	94,4	93,4	108	101	94,6	98,28
25	4h	97,3	98,5	99,4	101	97,3	98,7
26	6h	85	93,2	92,2	87,4	83,4	88,24
27	8h	106	109	106	111	108	108
28	12h	99,7	103	104	97,7	96,4	100,16

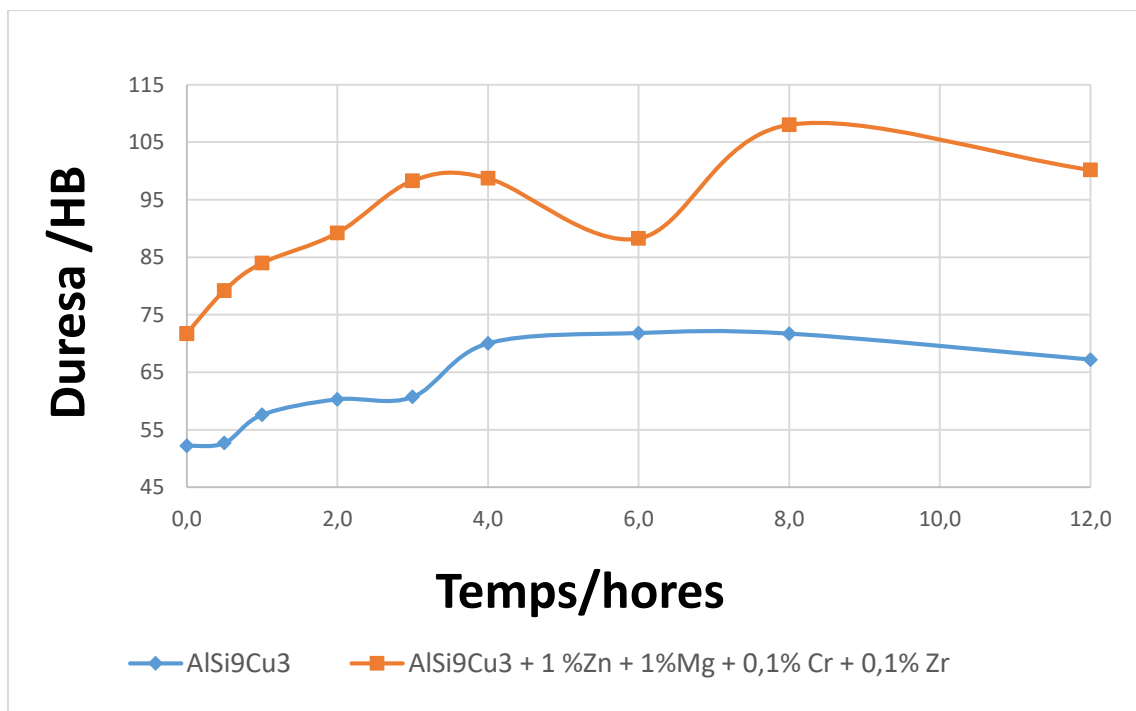


Figura 4.3. Progressió dureses HB AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,1% Cr + 0,1% Zr

4.1.4 Resultats duresa HB colada 3: AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr

Taula 4.3 Dureses HB AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr

AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr (Duresa HB 2,5 65,5)							
PROVETA	TEMPS MADURACIÓ	1	2	3	4	5	DURESA MITJANA
3A	Posta en solució	73,8	76,4	73,2	81	76	76,08
30	Tremp	99,1	87,5	90,7	96,7	91	93
31	0,5h	92,8	78,2	86,5	80	81,8	83,86
32	1h	83,2	79,6	94,9	86,2	82,6	85,3
33	2h	83,4	87,7	84,6	80,8	88	84,9
34	3h	109	104	107	114	110	108,8
35	4h	114	119	113	111	116	114,6
36	6h	110	116	110	108	110	110,8
37	8h	102	103	108	103	96,4	102,48
38	12h	100	104	105	97,9	111	103,58

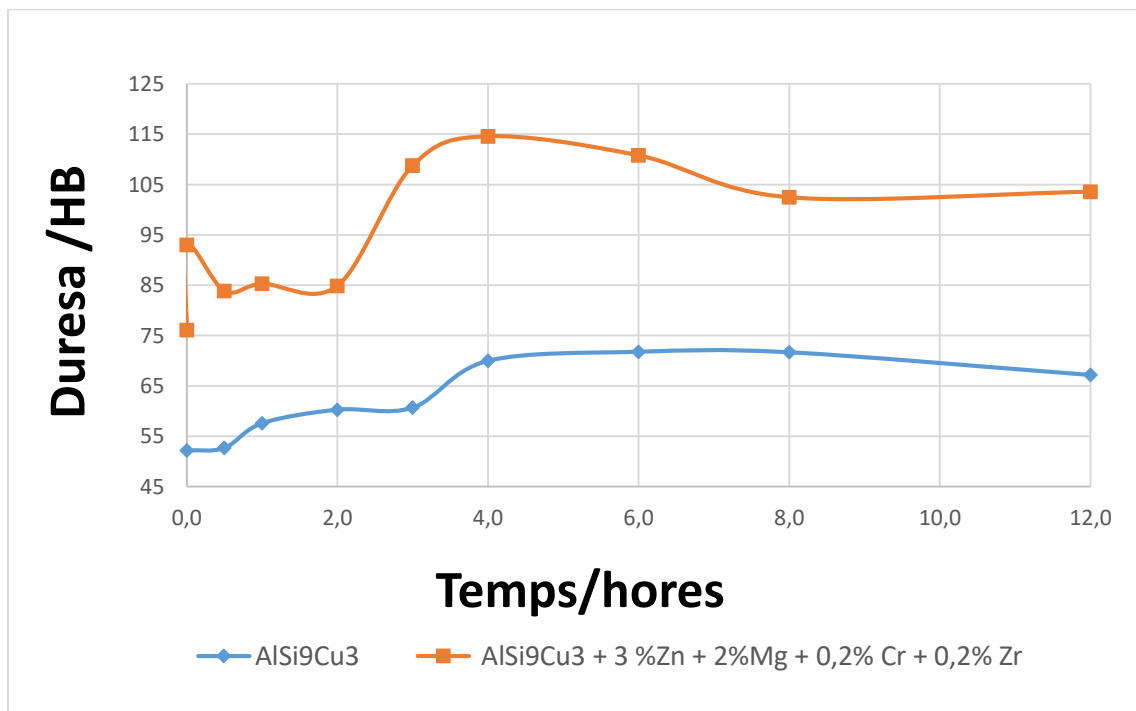


Figura 4.4. Progressió dureses HB AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr

4.1.5 Resultats duresa HB colada 4: AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr + 1% TiB

Taula 4.4 Dureses HB AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr + 1% TiB

AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr + 1%TiB (Duresa HB 2,5 65,5)							
PROVETA	TEMPS MADURACIÓ	1	2	3	4	5	DURESA MITJANA
4A	Posta en solució	81,6	86,8	78	81,8	83,2	82,28
40	Tremp	72,6	71,3	67,2	66,5	73,4	70,2
41	0,5h	86,2	84,6	91,8	92,4	84,4	87,88
42	1h	106	102	97,6	102	94,2	100,36
43	2h	99,1	94,6	97,6	108	101	100,06
44	3h	120	115	93,6	91,3	91,6	102,3
45	4h	127	99,4	100	113	112	110,28
46	6h	93	84	102	99,7	95,5	94,84
47	8h	118	119	98,8	109	103	109,56
48	12h	103	106	102	106	109	105,2

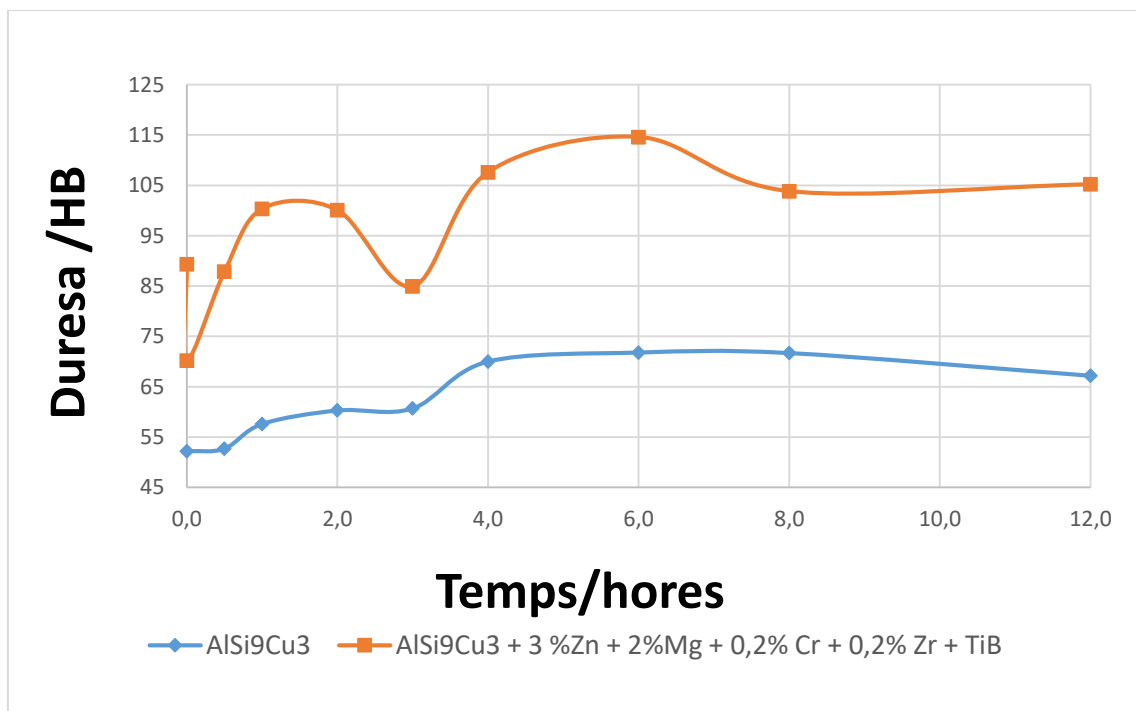


Figura 4.5. Progressió dureses HB AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr + 1% TiB

A la figura 4.6 es representen les dureses preses de cada colada. Els punts són dispersos a causa de ser un procés de laboratori, no estacionari, tot i que indica una manca de homogeneïtat es pot observar un tendència ascendent en les dureses.

Si ens centrem en els pics de duresa de cada colada (Figura 4.7) es pot demostrar la tendència ascendent deguda a l'adició dels diferents elements d'aliatge. Es comprova que amb l'adició de 3%Zn i 2%Mg augmenta notablement la duresa.

No s'han obtingut els resultats esperats amb l'addició de TiB tot i que si hagi fet la funció de refinant de gra.

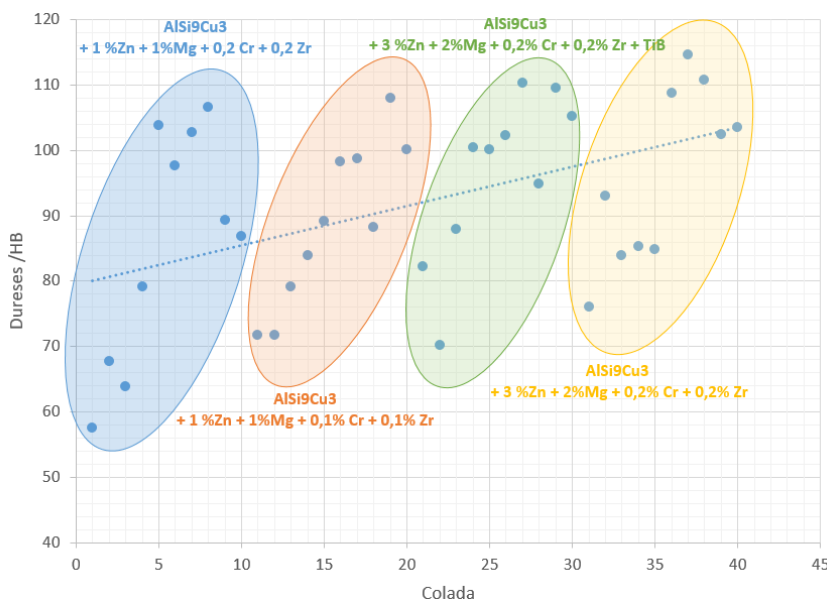
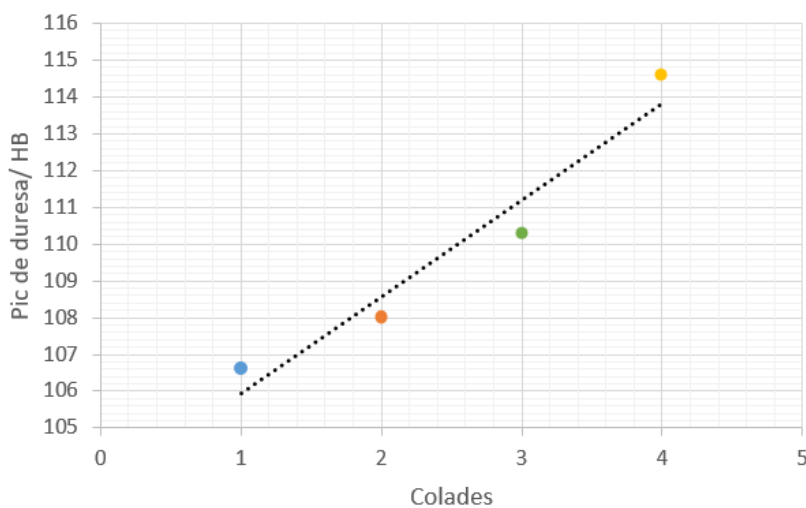


Figura 4.6. Comparació de les dureses de les diferents colades



- AlSi9Cu3 + 1%Zn + 1%Mg + 0,2 Cr + 0,2 Zr
- AlSi9Cu3 + 1%Zn + 1%Mg + 0,1 Cr + 0,1 Zr
- AlSi9Cu3 + 3%Zn + 2%Mg + 0,2 Cr + 0,2 Zr + TiB
- AlSi9Cu3 + 3%Zn + 2%Mg + 0,2 Cr + 0,2 Zr

Figura 4.7. Comparació dels pics de duresa de les diferents colades

4.2 Resultats metal·logràfics.

4.2.1 Imatges microscopi òptic AlSi9Cu3

Per poder comparar l'evolució de la microestructura en afegir els diferents elements, s'ha analitzat la microestructura del material base per tenir un punt de referència. Les micrografies d'AlSi9Cu3 han estat obtingudes del treball *New Aluminium-Silicon-Copper Microalloyed alloys* [1].

A continuació, es mostren les diferents micrografies del material base en diferents fases del procés de tractament tèrmic. Abans del tremp és pot apreciar la forma acicular del silici (Figura 4.8) i a menys augments és pot veure el silici envoltant les dendrites de fase α (Figura 4.9). Després del tremp és veu una disminució de les agulles de silici i s'aprecia una direccionalitat més clara (Figura 4.10).

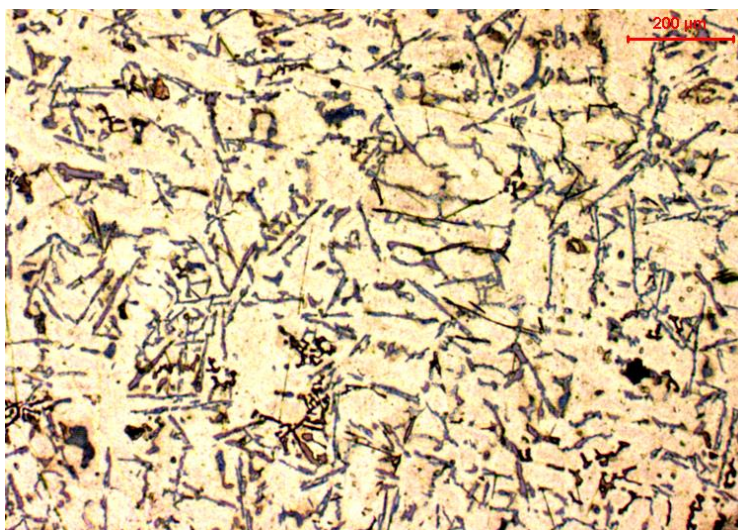


Figura 4.8. Micrografia AlSi9Cu3 abans del tremp

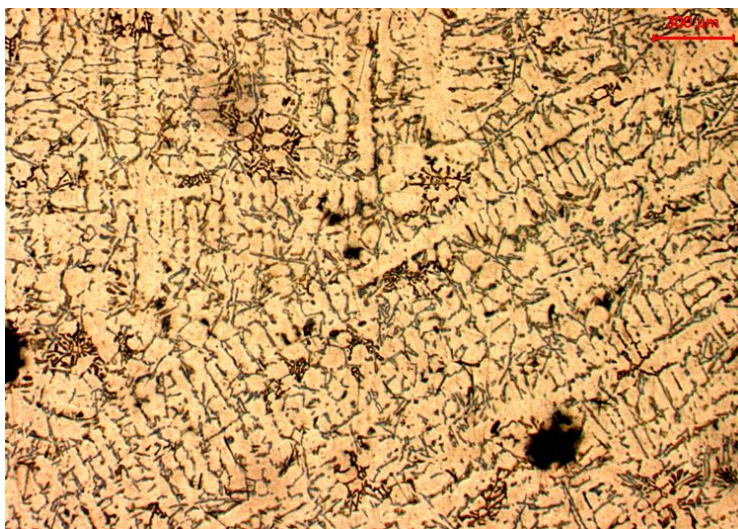


Figura 4.9. Micrografia AlSi9Cu3 abans del tremp.

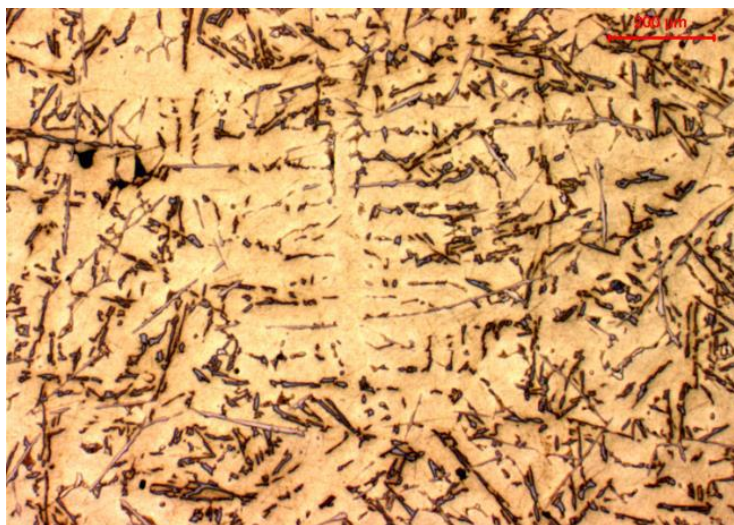


Figura 4.10. Micrografia AlSi9Cu3 després del tremp

4.2.2 Colada 1: AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,2 Cr + 0,2 Zr

Es pot apreciar com abans del tremp (Figura 4.11) el silici, de forma acicular, s'agrupa al voltant de les dendrites de la fase α, d'estructura dendrítica, mentre que després del tremp (Figura 4.12) el silici està més dispers, mantenint la forma d'agulles.

A més augments (Figura 4.13) és pot apreciar abans de realitzar el tremp la presència de compostos intermetàl·lics del tipus CuAl_2 i AlFeMgSi , compostos que després del tremp (Figura 4.14) ja no es poden apreciar.

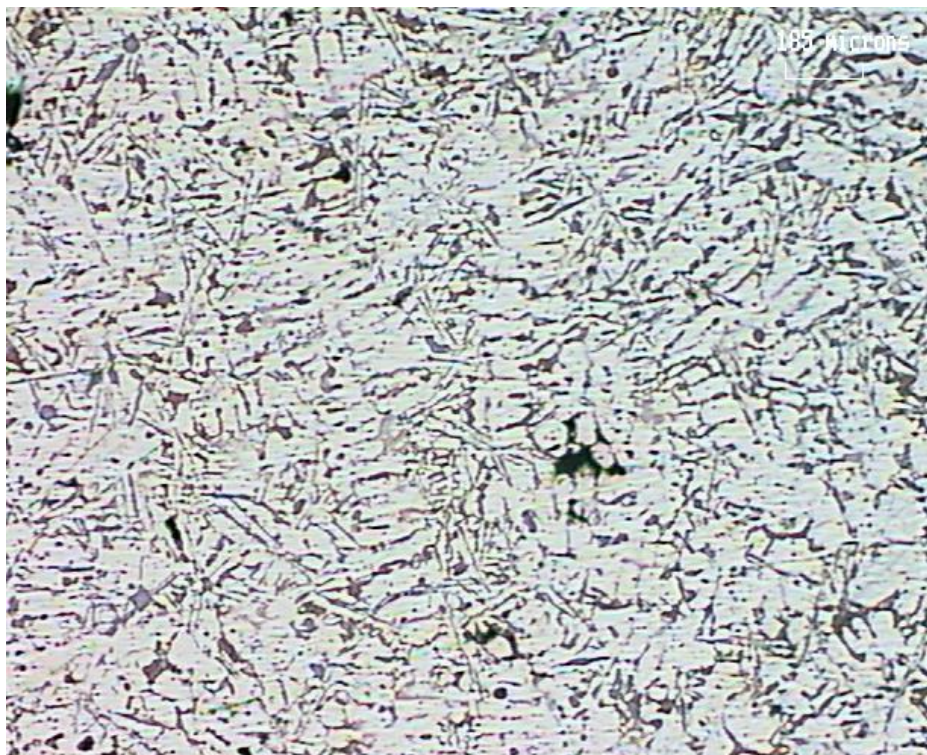


Figura 4.11. Colada 1A x50, abans del tremp

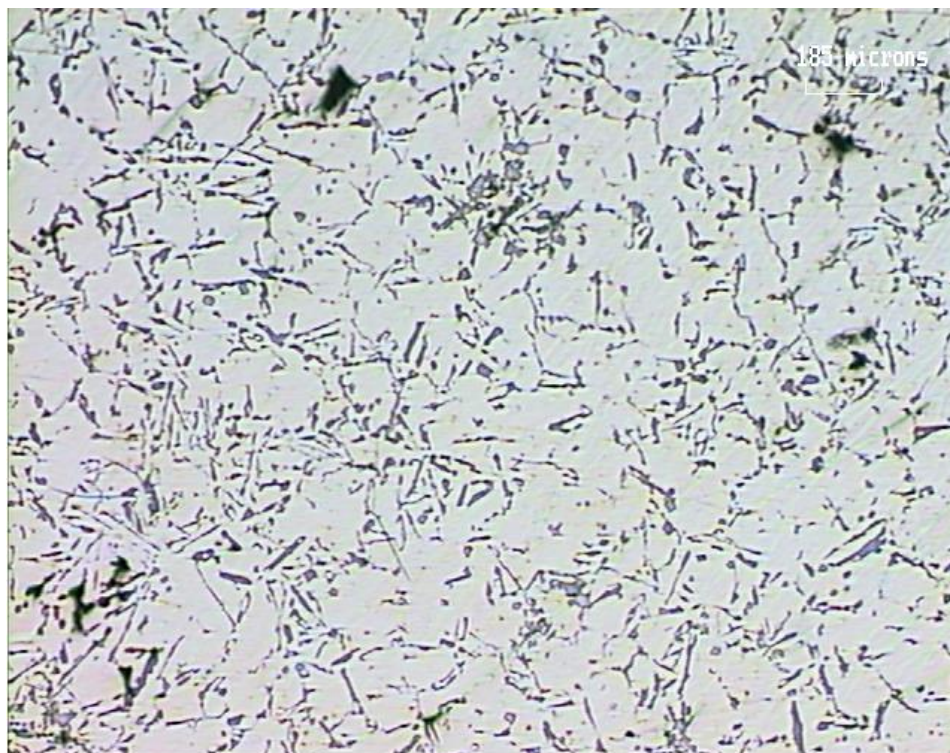


Figura 4.12. Colada 10 x50, després del tremp

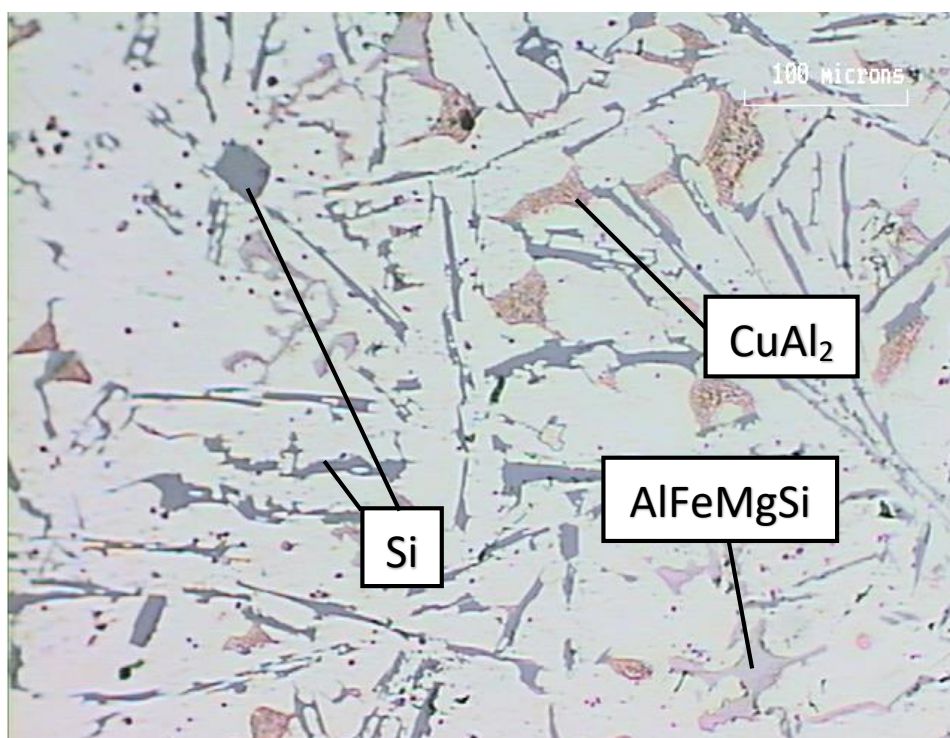


Figura 4.13. Colada 1A x200, abans del tremp



Figura 4.14. Colada 10 x200, després del tremp

4.2.3 Colada 2 (AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,1% Cr + 0,1% Zr)

La colada 2 revela una microestructura similar a la de la colada 1 (Figura 4.15), mantenint-se en aquest cas l'estructura dendrítica després del tremp (Figura 4.16), però les dendrites són més petites. Abans del tremp es pot observar la presència de l'intermetàl·lic Mg_2Si (en negre), també presents en menys quantitat després del tremp, però no de $CuAl_2$, el qual desapareix després del tremp (Figures 4.17 i 4.18). Les agulles de silici eutèctic semblen haver-se trencat parcialment, amb un lleuger arrodoniment addicional.

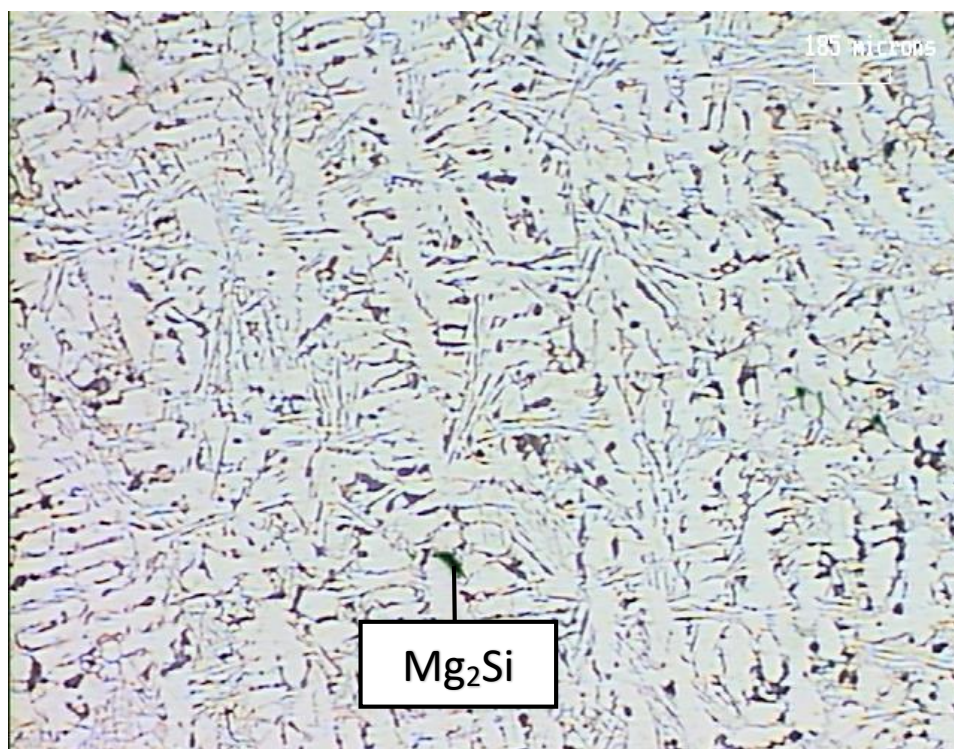


Figura 4.15 Colada 2A x50, abans del tremp

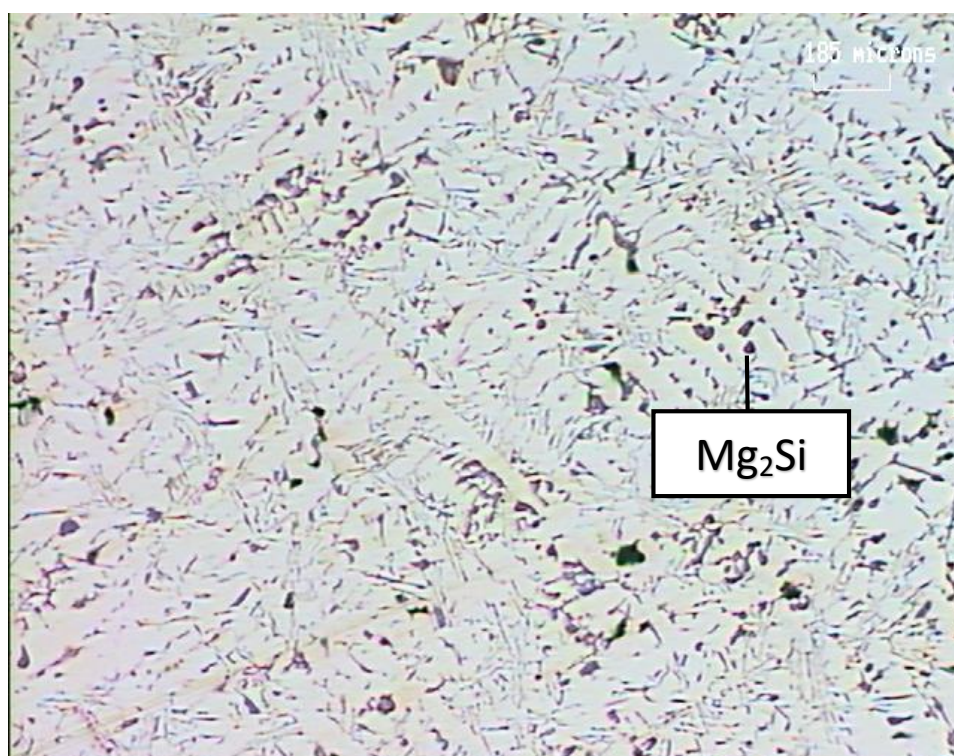


Figura 4.16 Colada 20 x50, després del tremp

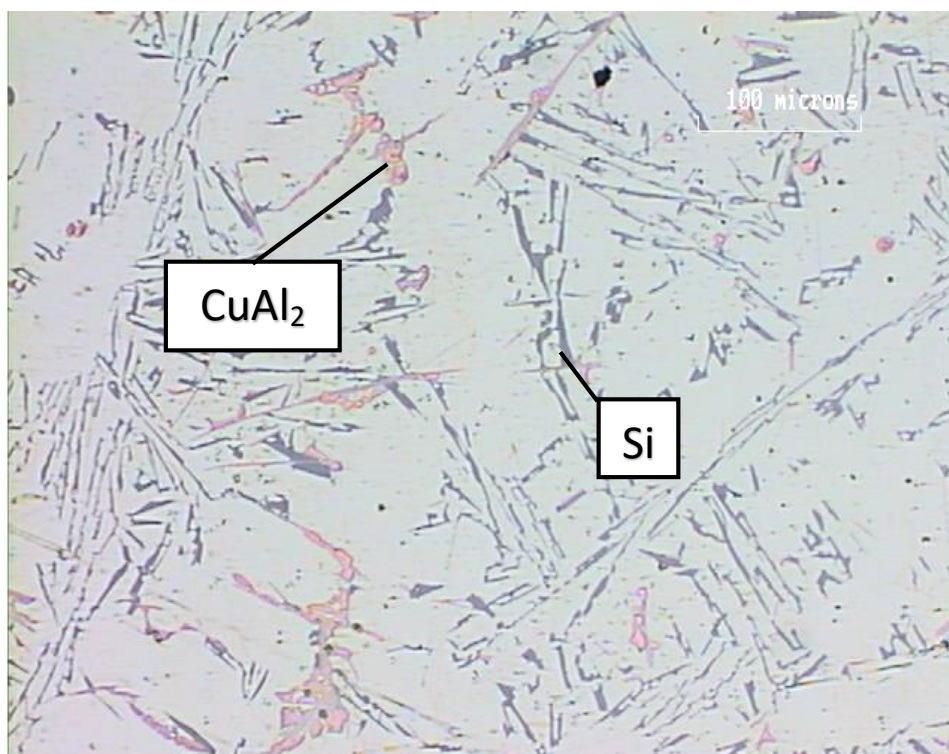


Figura 4.17 Colada 2A x200, abans del tremp

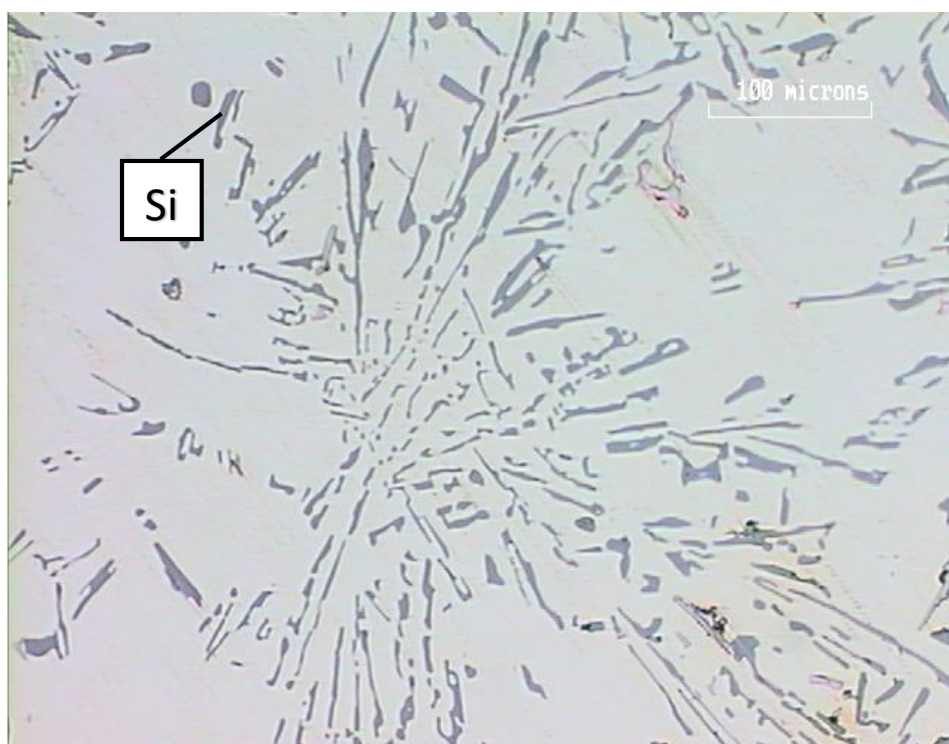


Figura 4.18 Colada 20 x200, després del tremp

4.2.4 Colada 3: AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr

Amb un increment del Zn i del Mg les dendrites de la fase α es mostren millor delimitades abans del tremp (*Figura 4.19*), també s'observa Mg_2Si (en negre). Després del tremp la fase α sembla haver crescut lleugerament i l'intermetàl·lic Mg_2Si no apareix tan abundant (*Figura 4.20*).

El silici eutèctic es troba més concentrat i en mida més petita, perdent la forma d'agulles. En tots els casos es detecta la presència de l'intermetàl·lic $CuAl_2$ abans del tremp (*Figura 4.16*).

A més augments (*Figures 4.21 i 4.22*) trobem la presència de l'intermetàl·lic $AlFeMgSi$ abans i després del tremp.

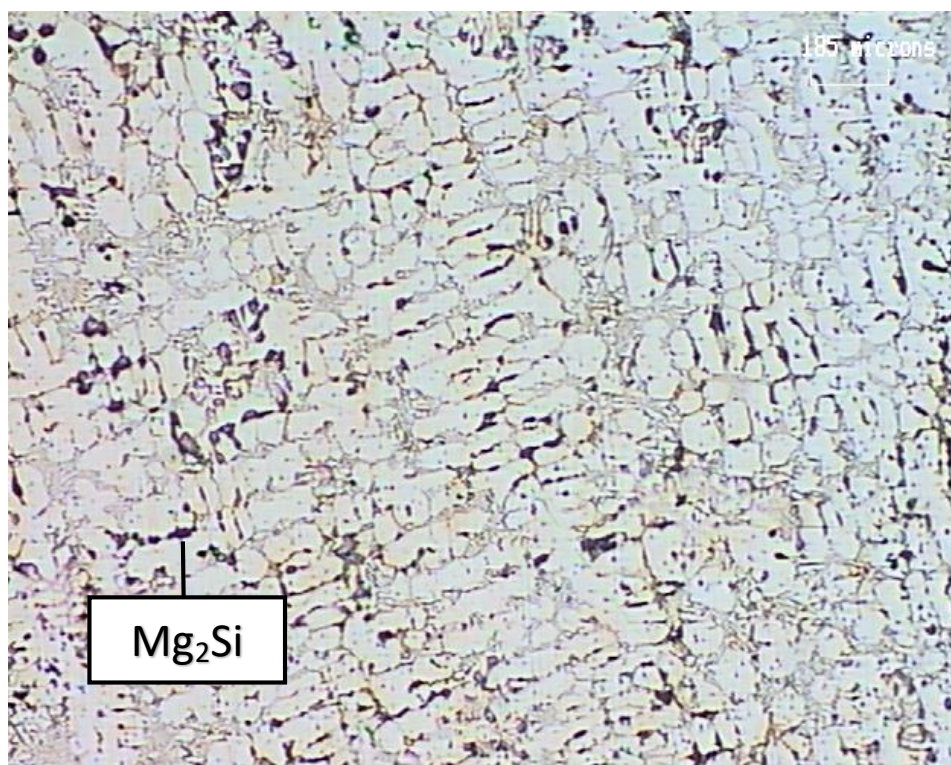


Figura 4.19 Colada 3A x50, abans del tremp

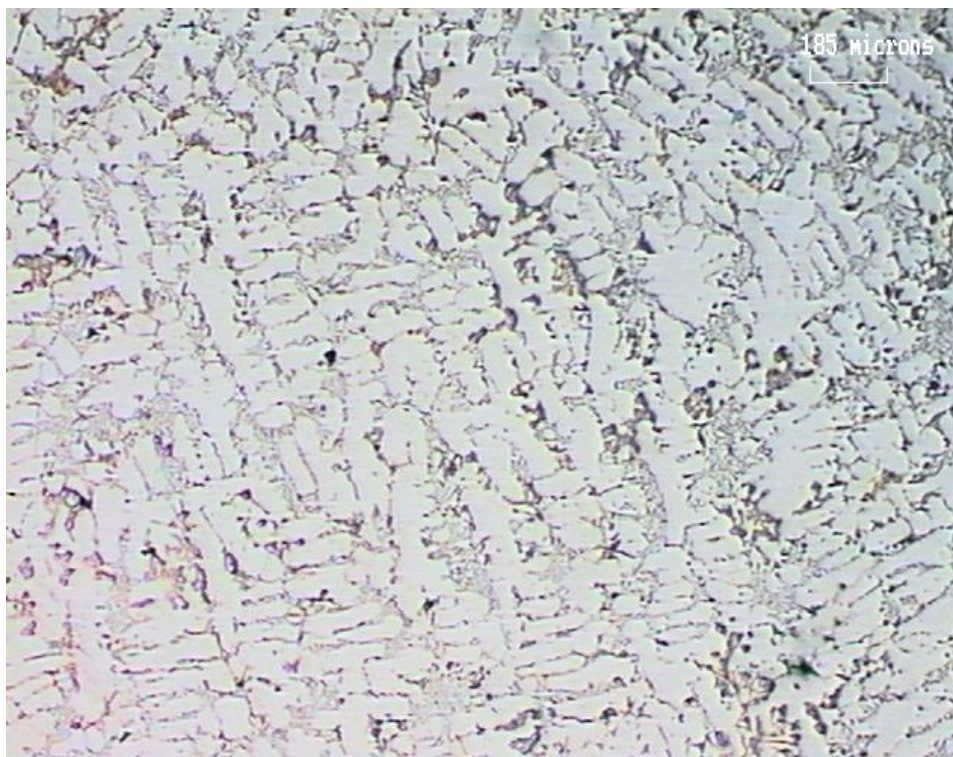


Figura 4.20 Colada 30 x50, després del tremp

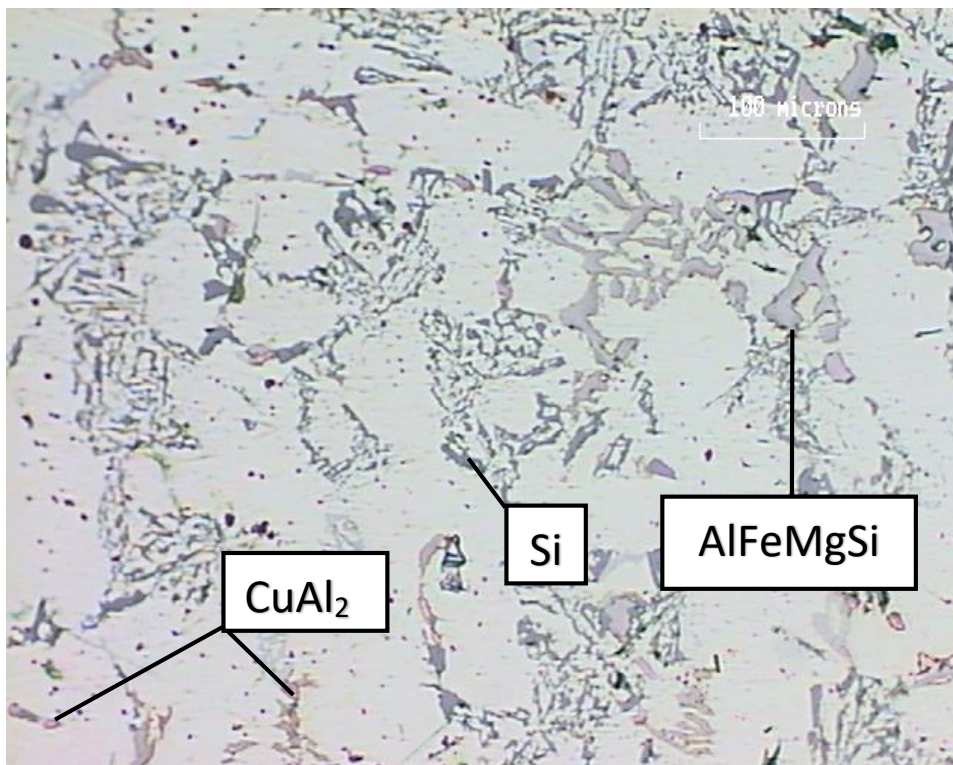


Figura 4.21 Colada 3A x200, abans del tremp

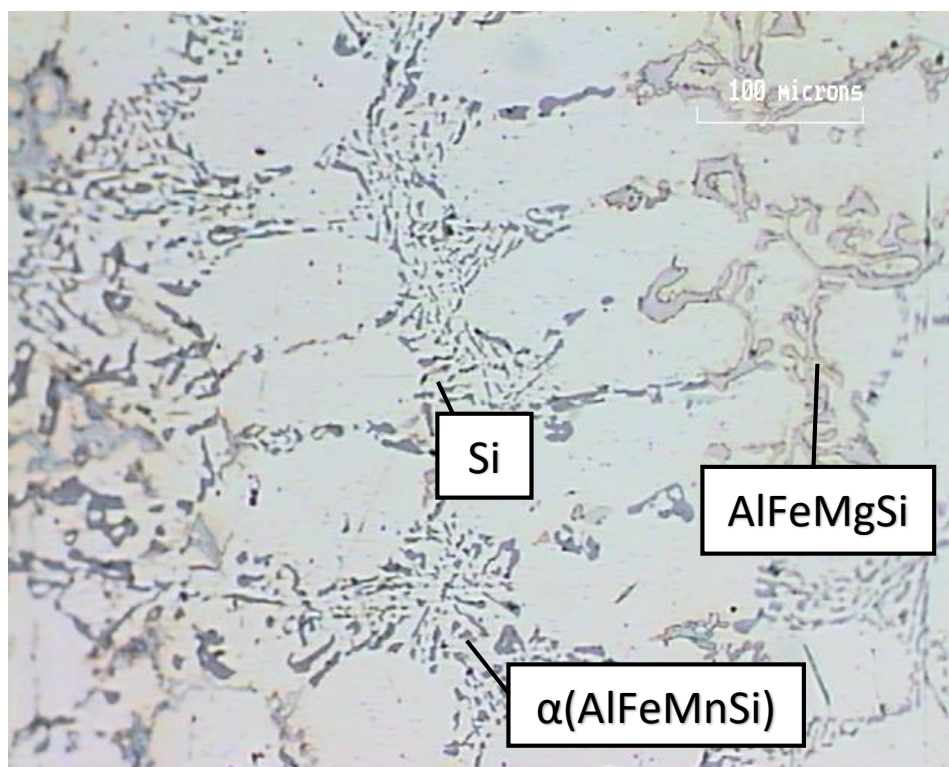


Figura 4.22 Colada 30 x200, després del tremp

4.2.5 Colada 4: $\text{AlSi9Cu3} + 3\% \text{Zn} + 2\% \text{Mg} + 0,2\% \text{Cr} + 0,2\% \text{Zr} + 1\% \text{TiB}$

A aquesta colada se li ha afegit lliga mare de AlTiB . L'efecte del TiB com afinant de gra es veu reflectit en la forma que adopta el silici (Figura 4.23).

Es pot comprovar una posta en solució efectiva ja que si es compara la Figura 4.23 amb la Figura 4.24 es veu com després del tremp hi ha menys intermetàlics de Mg_2Si (negre).

A x200 augments es veuen intermetàlics de CuAl_2 (Figura 4.25) que desapareixen després del tremp (Figura 4.26) i es conserven els intermetàlics AlFeMgSi .

Com a totes les colades, també s'observa una fragmentació de les agulles de silici eutèctic després del tremp.

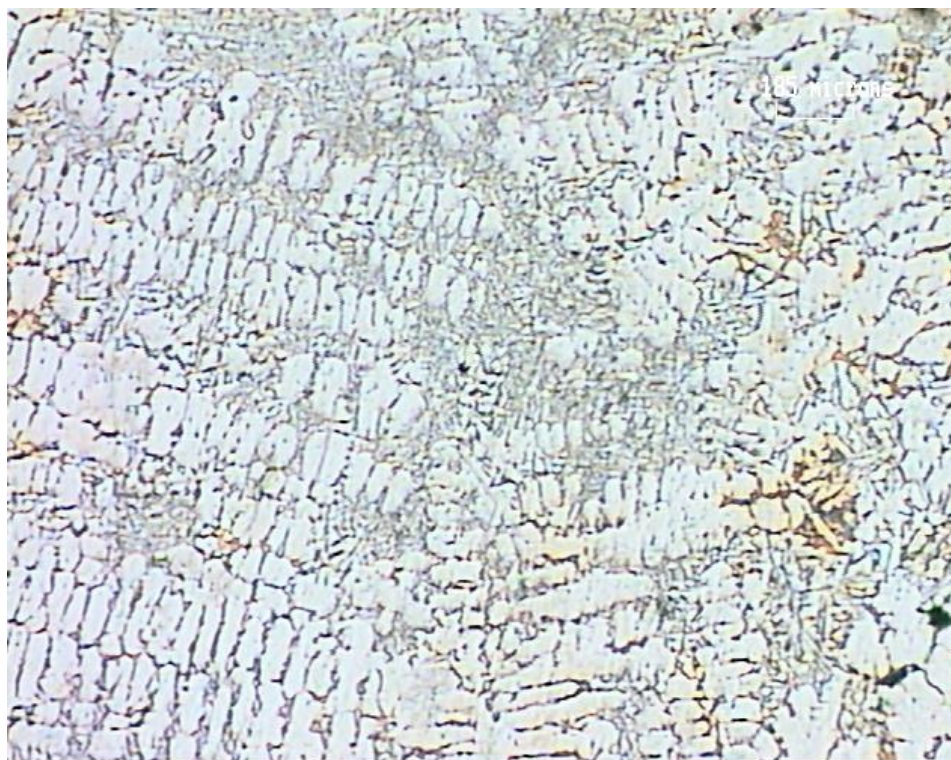


Figura 4.23 Colada 4A x50, abans del tremp

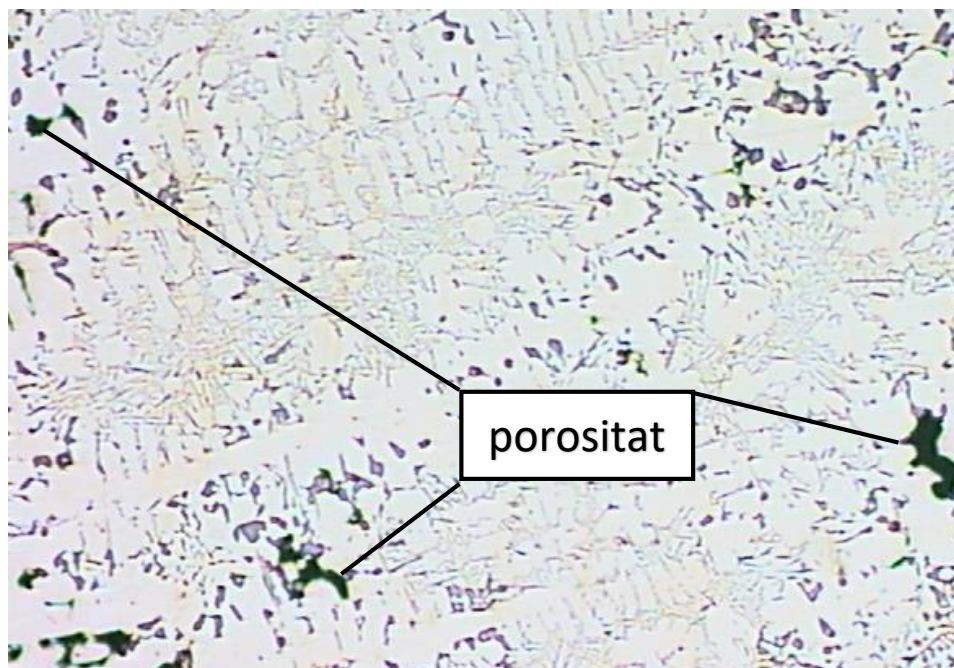


Figura 4.24 Colada 40 x50, després del tremp

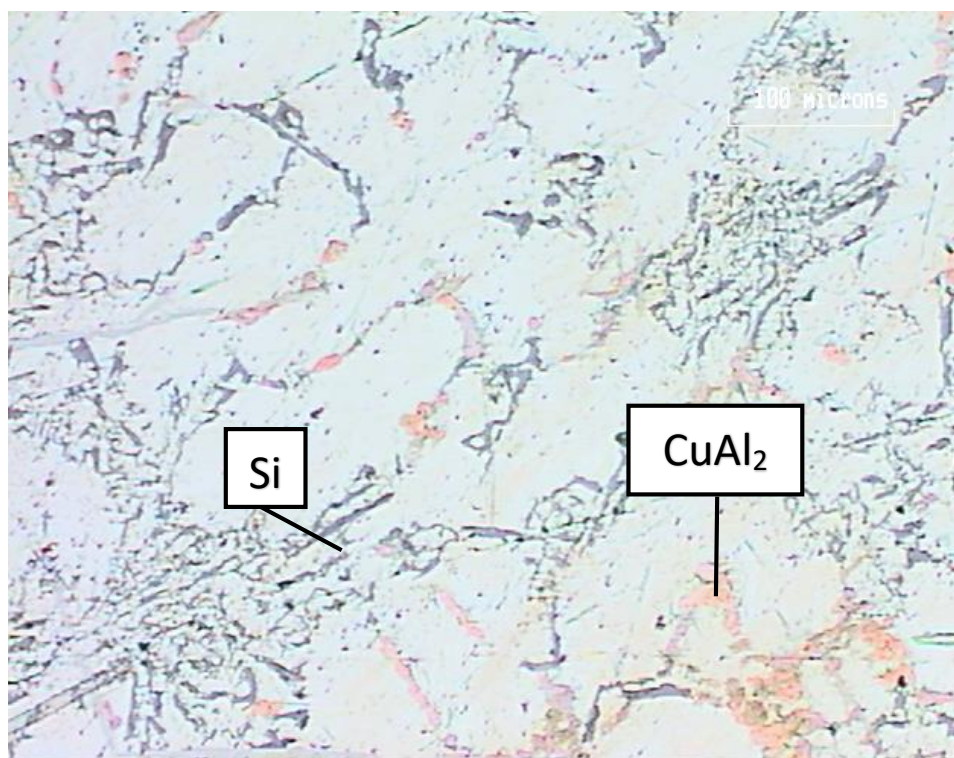


Figura 4.25 Colada 4A x200, abans del tremp

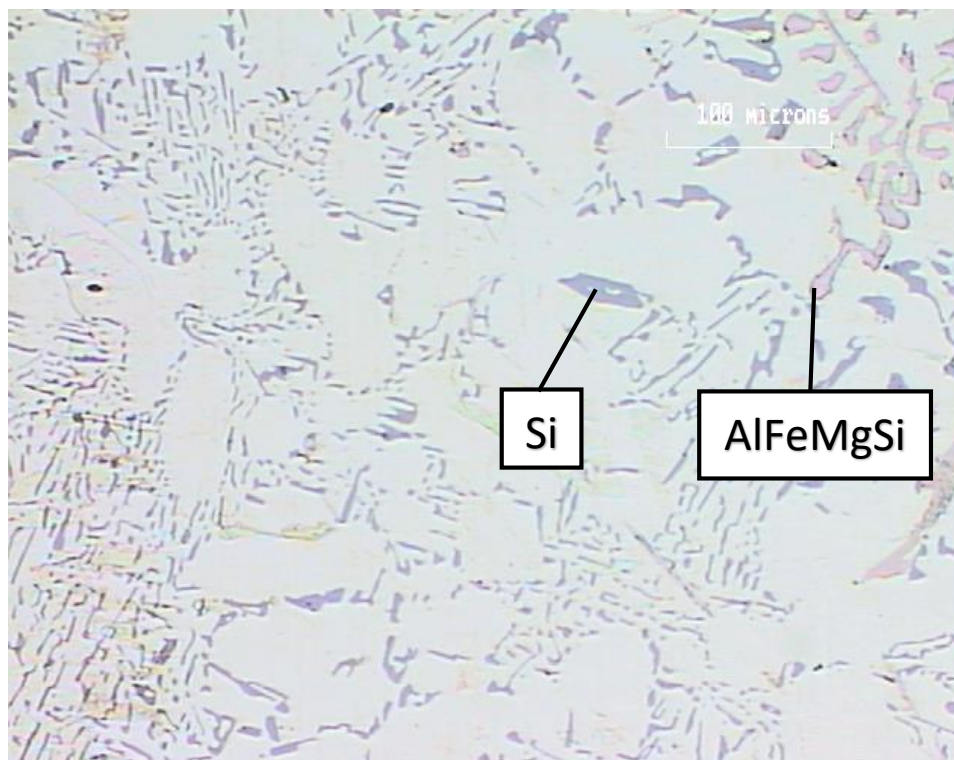


Figura 4.26 Colada 40 x200, després del tremp

4.2.6 Anàlisi metal·logràfic quantitatiu

Els resultats obtinguts sobre la presència del silici amb el Software Pc-Images es presenten a la *Taula 4.5*.

Taula 4.5. Resultats metal·logràfics

COLADA	Tractament tèrmic	Àrea / μm^2	Perímetre / μm	Circularitat	Longitud / μm
1.- AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,2 Cr + 0,2 Zr	NO	214,1	96,0	0,37	38,1
1.- AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,2 Cr + 0,2 Zr	TREMP	110,2	55,9	0,46	22,6
2.- AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,1% Cr + 0,1% Zr	NO	256,7	108,3	0,34	36,4
2.- AlSi9Cu3 + 1 %Zn + 1%Mg + 0,1% Cr + 0,1% Zr	TREMP	74,3	42,8	0,58	18,4
3.- AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	NO	87,0	96,7	0,12	33,6
3.- AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	TREMP	75,2	39,7	0,60	16,6
4.- AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr + 1%TiB	NO	258,4	85,5	0,42	25,2
4.- AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr + 1%TiB	TREMP	95,4	76,8	0,21	24,0

El paràmetre de circularitat ve definit pel propi software d'anàlisi d'imatges per la següent fórmula:

$$\frac{4 \cdot \text{àrea}}{\text{perímetre}^2}$$

Un valor resultant més proper a 0 implica una menor circularitat.

4.3 Resultats anàlisis composició química.

A continuació es poden observar els resultats de la composició química de cada colada realitzats amb l'espectrògraf, SPECTROMAXx (Taulas 4.6 a 4.9).

Taula 4.6. Composició química colada 1 /% en pes

COLADA 1												
Fe	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Cu	Pb	Mg	Zn	Sn	Zr	Al
0,78	10,61	0,28	0,062	0,044	0,032	3,1	0,12	0,17	1,46	0,0188	0,0074	La resta

Taula 4.7. Composició química colada 2/% en pes

COLADA 2												
Fe	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Cu	Pb	Mg	Zn	Sn	Zr	Al
0,79	10,24	0,173	0,061	0,026	0,026	2,7	0,21	0,21	1,48	0,0244	0,0062	La resta

Taula 4.8. Composició química colada 3/% en pes

COLADA 3												
Fe	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Cu	Pb	Mg	Zn	Sn	Zr	Al
0,64	10,09	0,142	0,046	0,027	0,033	2,3	0,19	0,16	3,89	0,0156	0,029	La resta

Tabla 4.9. Composició química colada 4/% en pes

COLADA 4												
Fe	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Cu	Pb	Mg	Zn	Sn	Zr	Al
0,81	9,82	0,247	0,056	0,049	0,037	2,5	0,16	0,38	1,86	0,021	0,021	La resta

5. ANÀLISIS DE RESULTATS DE DURESES

A continuació és comparen els resultats de duresa obtinguts en les diferents colades juntament amb alguns resultats obtinguts de treballs anteriors [7][20].

La primera colada realitzada $\text{AlSi9Cu3} + 1\% \text{Zn} + 1\% \text{Mg} + 0,2\% \text{Cr} + 0,2\% \text{Zr}$ havia obtingut els millors resultats de duresa del treball anterior. Les addicions en petits percentatges de Cr i Zr incrementen notablement la duresa de l'aliatge.

És pot observar (*Figura 5.1*) que els màxims de duresa assolits són equivalents per als aliatges $\text{AlSi9Cu3} + 1\% \text{Zn} + 1\% \text{Mg} + 0,1\% \text{Cr} + 0,1\% \text{Zr}$ i $\text{AlSi9Cu3} + 1\% \text{Zn} + 1\% \text{Mg} + 0,2\% \text{Cr} + 0,2\% \text{Zr}$, sent més satisfactori aquest darrer aliatge en assolir-se el pic de duresa màxim en un temps inferior. A nivell industrial, fins i tot el temps òptim de duresa seria per a aquest mateix aliatge, però per a un temps de maduració de 2 hores.

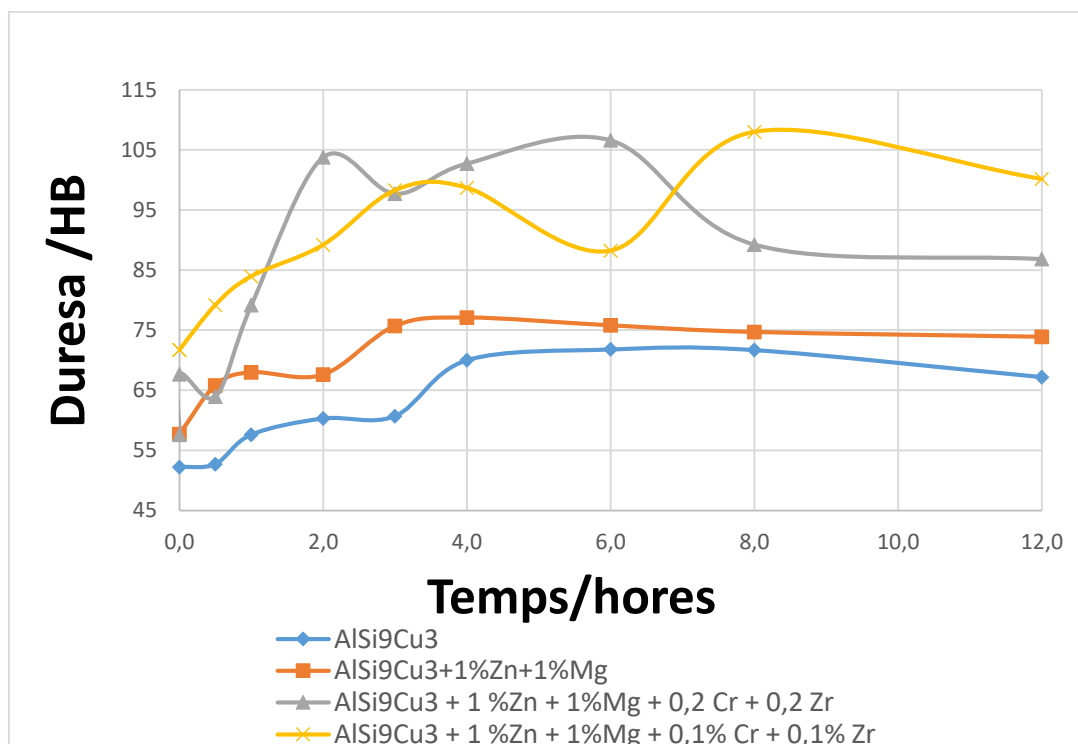


Figura 5.1. Evolució de la duresa amb un 1%Zn i 1%Mg i l'addició de Cr i de Zr

L'augment de la quantitat de Zn i Mg va demostrar en projectes anteriors un augment de duresa. És pot veure (*Figura 5.2*) com l'addició de Cr i Zr en baixes quantitats juntament amb les més altes quantitats de Zn i Mg incrementa els resultats de duresa.

En base als resultats anteriors s'han afegit a la millor colada més quantitats de Zn i Mg i TiB.

Malgrat s'hagi addicionat el refinant de gra TiB no s'han obtingut els resultats esperats d'increment de duresa encara que si que es poden apreciar el seu efecte en les micrografies. La

colada $\text{AlSi9Cu3} + 3\% \text{Zn} + 2\% \text{Mg} + 0,2\% \text{Cr} + 0,2\% \text{Zr}$ ha donat un major pic de duresa en un menor temps de maduració artificial.

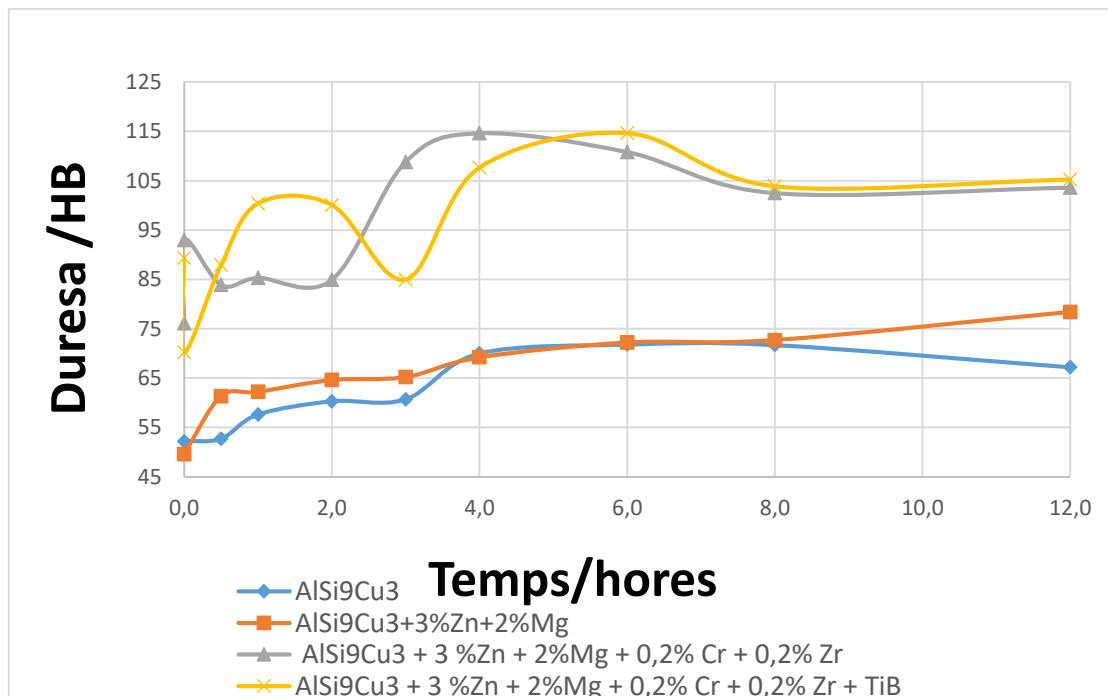


Figura 5.2. Evolució de la duresa amb un 3%Zn i 2%Mg i l'addició de Cr i de Zr i TiB

A la Figura 5.3 es pot observar la evolució de totes les colades. La primera colada ($\text{AlSi9Cu3} + 1\% \text{Zn} + 1\% \text{Mg} + 0,2\% \text{Cr} + 0,2\% \text{Zr}$) de verificació s'ha utilitzat com a referència per realitzar la resta de colades. En aquesta colada es va observar que amb baixes quantitats de Cr i Zr s'obtenia un pic de duresa de 110 HB amb només 4 hores per la qual cosa es va realitzar la segona colada ($\text{AlSi9Cu3} + 1\% \text{Zn} + 1\% \text{Mg} + 0,1\% \text{Cr} + 0,1\% \text{Zr}$) disminuint encara més aquesta concentració de Cr i Zr, però els resultats obtinguts determinen que es produeix una lleugera disminució de la duresa màxima obtinguda que a més es produeix a les 8 hores de maduració, aspecte que no interessa a l'àmbit industrial.

D'estudis previs també es va extreure que augmentant la quantitat de Zn i Mg també es produïa un augment de la duresa, per el qual la tercera colada ($\text{AlSi9Cu3} + 3\% \text{Zn} + 2\% \text{Mg} + 0,2\% \text{Cr} + 0,2\% \text{Zr}$) es va realitzar augmentat la quantitat de Zn i Mg i mantenint el percentatge Cr i Zr que havien donat millors resultats. Es pot observar que aquesta colada ha donat els millors resultats de duresa i en un temps de 4 hores de maduració. Donat que la tercera colada va donar els millors resultats es va decidir fer la quarta colada afegint TiB a aquesta colada ($\text{AlSi9Cu3} + 3\% \text{Zn} + 2\% \text{Mg} + 0,2\% \text{Cr} + 0,2\% \text{Zr} + 1\% \text{TiB}$), la influència d'aquest afinant de gra va fer que disminuís lleugerament el pic de duresa tot i que també tenia lloc en les 4 hores de maduració artificial.

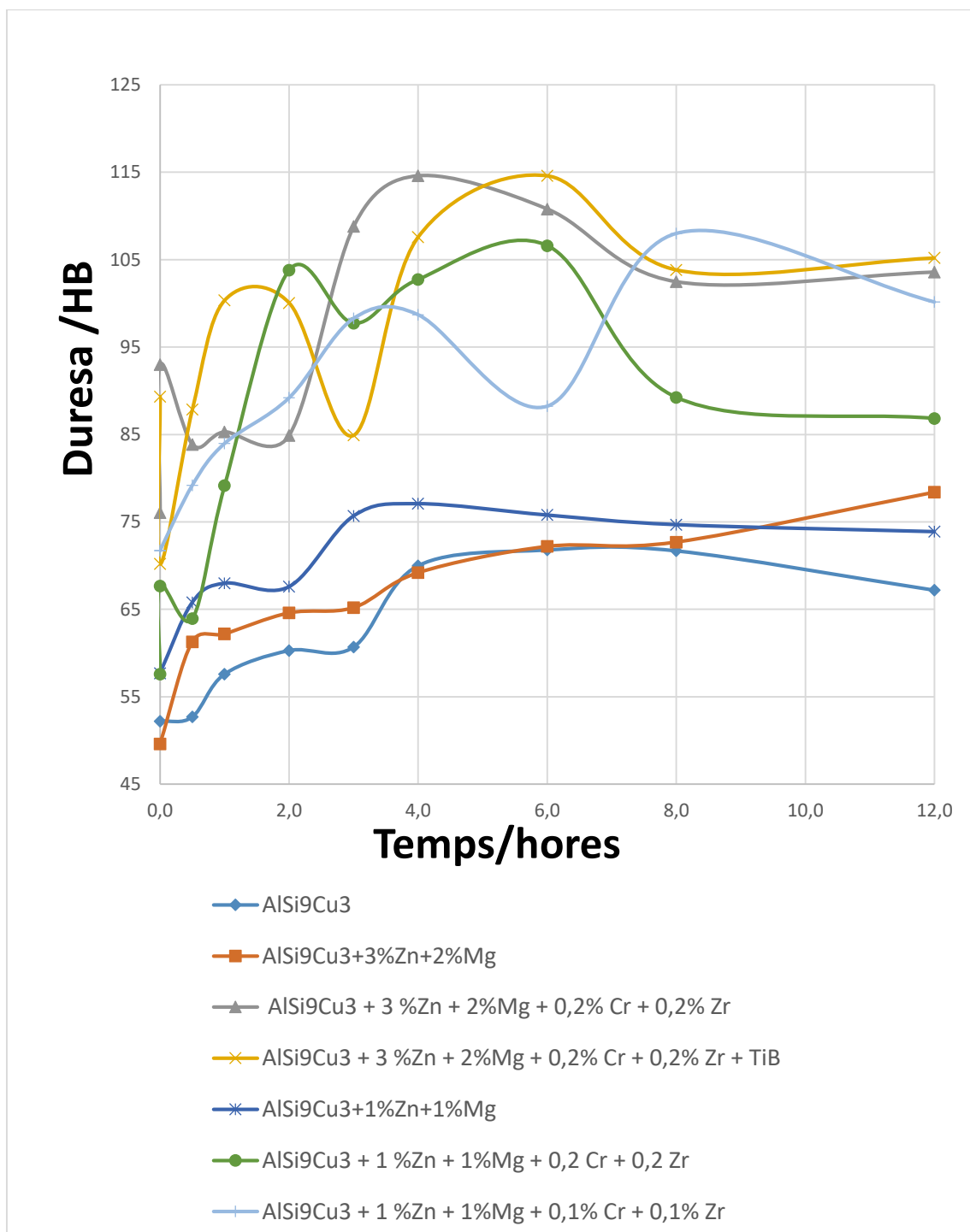


Figura 5.3. Evolució de les dureses de totes les colades

6. RESULTATS ASSAJOS DE TRACCIÓ

Els resultats obtinguts a partir d' l'assaig de tracció es poden consultar a la *Taula 6.1*. Quan no es dona el límit elàstic ($R_{p0,2}$) és degut a que la proveta va trencar a una deformació inferior al 0,2%. En general, un trencament prematur està associat a la presència d'òxid a la superfície de fractura (defecte de fabricació).

El nº de proveta indica l'ordre en que es van colar, relacionat amb la temperatura del motlle (més fred al principi) i per tant la qualitat de la proveta.

Taula 6.1. Resultats assaig de tracció

Nº proveta	Composició	Tractament	Mòdul elàstic, E /GPa	Límit elàstic, $R_{p0,2}$ /MPa	Resistència a tracció, R_m /MPa	Allargament, A / %
1	AlSi9Cu3	T6	69,5	150,7	201,2	0,7
2	AlSi9Cu3	NO	93,8	238,9	284,9	0,34
3	AlSi9Cu3	T6	72,6	124,2	181,7	0,9
4	AlSi9Cu3	NO	80,2	-	223,6	<0,2
5	AlSi9Cu3	T6	87,9	164,9	171,9	0,2
1	AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	NO	78,2	221,9	250,5	0,77
2	AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	T6	53,2	118,6	147,7	0,5
3	AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	NO	71,1	-	293,0	<0,2
4	AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	T6	69,9	-	269,7	<0,2
5	AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	T6	78,3	-	180,9	<0,2
6	AlSi9Cu3 + 3 %Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr	T6	84,2	-	308,5	<0,2

Es pot apreciar com, malgrat no s'ha assolit un gran increment de resistència de forma absoluta, si hi ha una tendència a aquest increment amb els elements d'addició (Figura 6.1). La gran quantitat de defectes observats, deguts al procés de fabricació, fa que aquests resultats de tracció no hagin estat representatius de la resistència que es pot assolir.

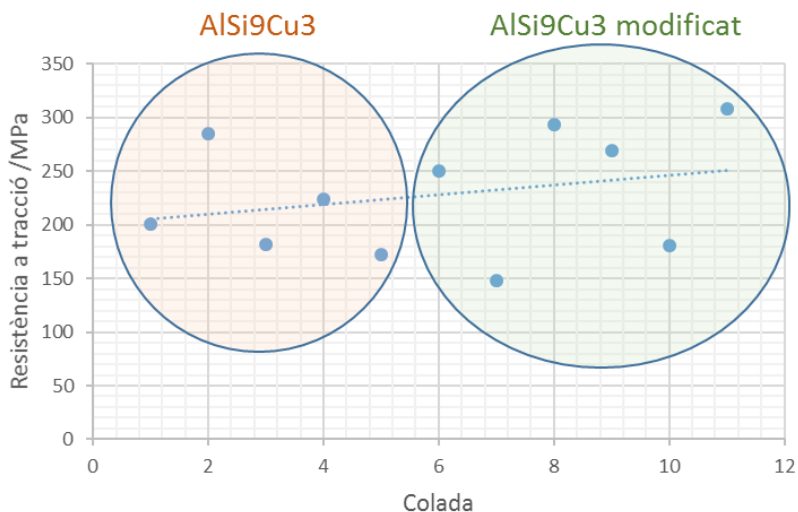


Figura 6.1. Comparació de la resistència a tracció de l'aliatge base i l'aliatge amb additius

6.1 Resultats primera colada AlSi9Cu3

La comparativa de la resistència a tracció de les diferents provetes d'AlSi9Cu3 (Figura 6.2) permet veure com ha augmentat la resistència a tracció al mateix temps que s'ha mantingut el percentatge d'allargament després d'aplicar el tractament T6.

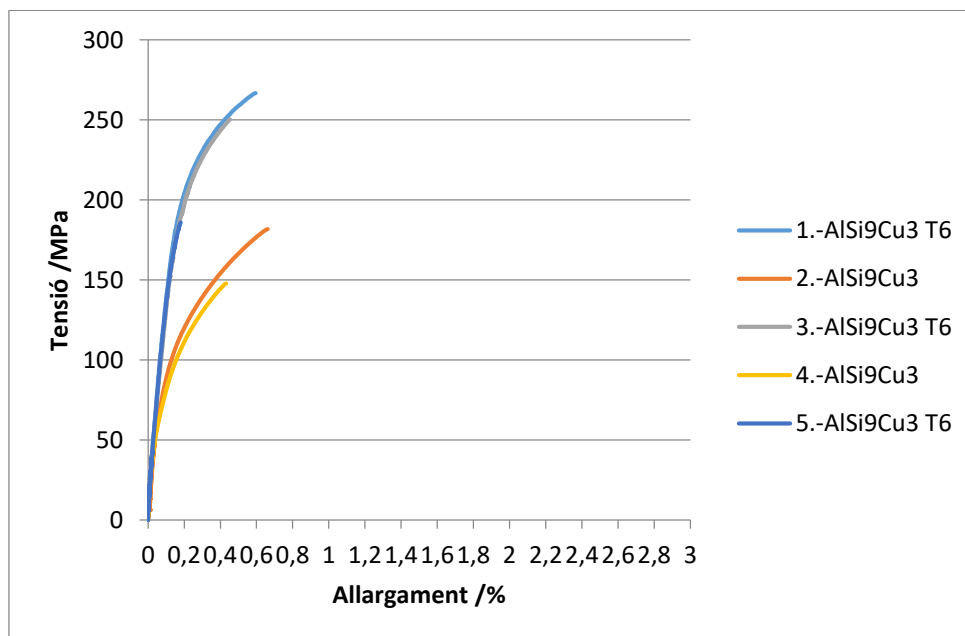


Figura 6.2. Comparació de la resistència a tracció de l'aliatge AlSi9Cu3

6.2 Resultats segona colada AlSi9Cu3 + 3%Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr

En aquest cas la comparativa de la resistència a tracció de les provetes amb l'addició dels diferents elements d'aliatge amb els que s'han obtingut millors resultats de duresa (*Figura 6.3*) ens deixa apreciar l'increment de la tensió última a tracció juntament amb un decrement de l'allargament després del tremp. Això significa que l'aliatge s'ha tornat més fràgil.

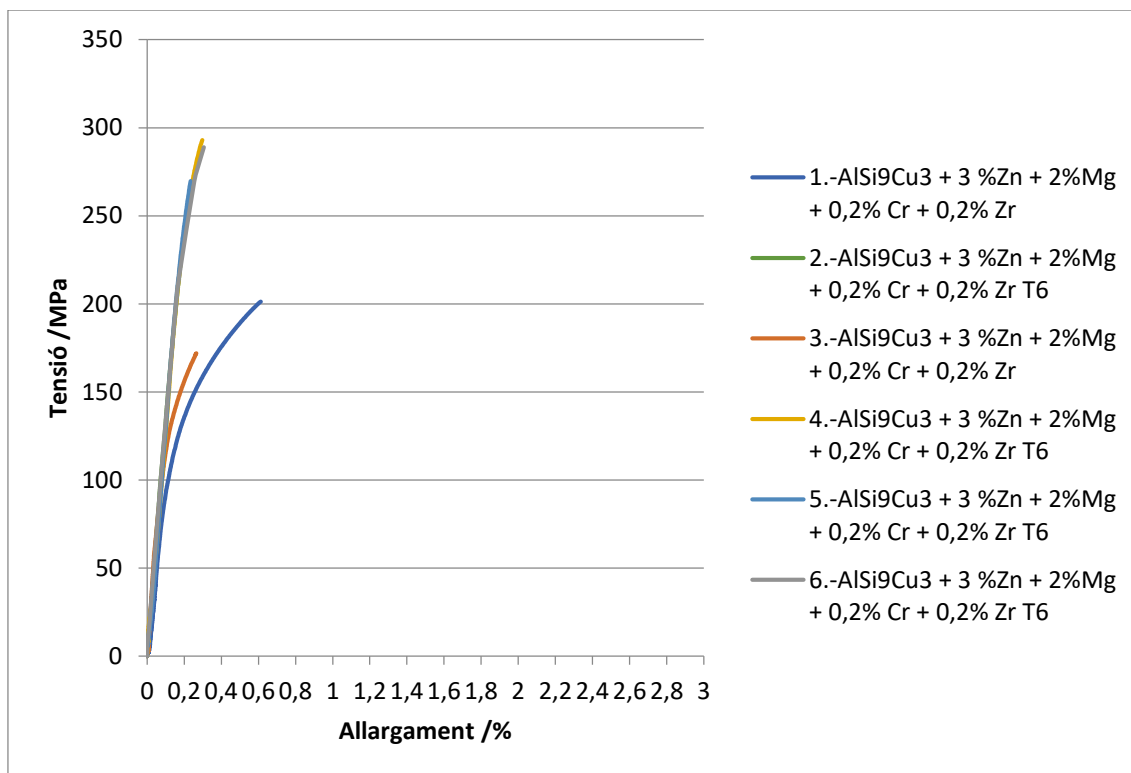


Figura 6.3. Resultats assaig tracció AlSi9Cu3 + 3%Zn + 2%Mg + 0,2% Cr + 0,2% Zr

6.3 Comparativa resultats primera i segona colada

Finalment la comparativa entre totes les colades (*Figura 6.4*) permet afirmar que l'aliatge modificat després d'aplicar-li el tractament tèrmic presenta un augment de 24 MPa (un 8%) de la tensió de tracció en els valors màxims envers al material base tractat tèrmicament.

Els valors de la comparativa entre els dos materials sense tractament tèrmic també mostren un lleuger increment de la tensió màxima en les provetes de AlSi9Cu3 amb additius.

Els resultats de l'estudi de tracció no són òptims degut a que és varen poder extreure 5 provetes de la primera colada i 6 de la segona de les quals les algunes d'elles varen tenir la fractura fora dels límits establerts per a l'assaig, el que provoca que no siguin vàlides. A més en les fractures és podia apreciar a simple vista la presència d'òxid.

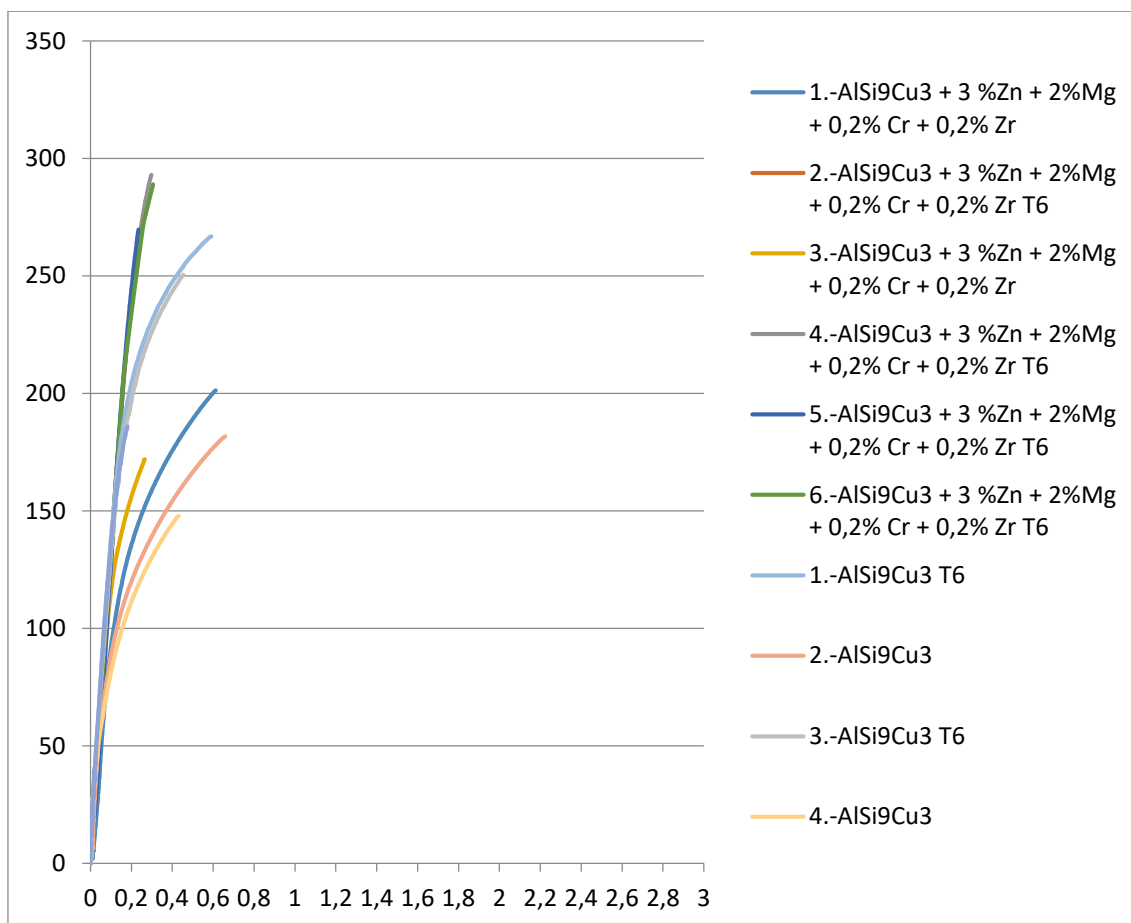


Figura 6.4. Comparativa resultats assaig tracció

7. CONCLUSIONS

Un cop finalitzada l'experimentació i després d'haver considerat els resultats es pot concloure que:

- Es pot observar com després del tremp, a totes les colades realitzades, les agulles de Si apareixen parcialment fragmentades.
- L'intermetàlic CuAl_2 , present en totes les colades es dissol completament després del tremp. Els paràmetres establerts de posta en solució sí són efectius per aquest tipus d'intermetàlic.
- Amb l'addició de 3%Zn i 2%Mg apareix un nou intermetàlic no present en les colades amb 1%Zn i 1%Mg. El Mg possibilita l'aparició de l'intermetàlic AlFeMgSi .
- S'ha conegut que la resta d'intermetàlics presents, al marge del CuAl_2 , no es dissolen completament després del tremp. Això indica una ineficiència de la posta en solució. Es recomana fer una anàlisi més exhaustiva per determinar els paràmetres òptims de posta en solució, determinats fins ara únicament per a l'aliatge AlSi9Cu3 .
- Comparant els resultats de l'estudi de dureses de les diferents colades realitzades es pot concloure que la combinació d'elements que ha resultat endurir més amb un menor temps de maduració és: $\text{AlSi9Cu3} + 3\% \text{Zn} + 2\% \text{Mg} + 0,2\% \text{Cr} + 0,2\% \text{Zr}$.
- L'assaig de tracció no ha sigut satisfactori a causa dels defectes de la proveta originats durant el procés de fabricació. Aquestes presentaven porositats i òxids, que han provocat una ruptura abans d'arribar al seu límit elàstic o una ruptura en els capçals en la majoria dels casos. Igualment, s'ha observat un petit increment en la resistència de tracció amb l'aliatge modificat.

8. PRESSUPOST

Taula 8.1 Pressupost

		Cost unitari	Quantitat	TOTAL /€	TOTAL /€
MATERIAL	Alumini	2,1 €/kg	8 kg	16,80	
	Metal·lografia	229 €/3 provetes	10 provetes	764,00	
	Anàlisi de dureses	69,52 €/3 provetes	80 provetes	1854,00	
	Assaig de tracció	257,40 €/ 3 provetes	11 provetes	944,00	
	Tractament tèrmic	16 €/h	240 h	3840,00	
	Total Material				
PERSONAL	Estat de l'art	6 €/h	230 h	1380,00	
	Aprenentatge funcionament equips	6 €/h	250 h	1500,00	
	Hora d'enginyer	35€/h	980 h	34300,00	
	Total personal				
TOTAL COST					44600,00
IVA (21%)					9366,00
TOTAL COST PROJECTE					53966,00

9. BIBLIOGRAFIA

- [1]. A. Schlesier i J. Font. (2018) *New Aluminium-Silicon-Copper Microalloyed alloys*. TFG, UPC 2018.
- [2]. Donald R. Askeland. *La Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. 3a edició. Universitat de Missouri-Rolla: Editorial Iberoamèrica.
- [3]. J.R.Davis & Associates. *Aluminum and Aluminum alloys*. ASM Specialty Handbook. The Materials Information Society, pp 93 i 291.
- [4]. S. Caballero, Q.B.F. Hened. (2003) *Aluminio: el metal más utilizado del siglo 21. Usos y derivados*. Enfasis.
- [5]. Metallurgist. <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/proceso-extraccion-aluminio/> (15/04/18)
- [6]. J.L. Cabazos García. (1998) *Tratamiento térmico de una aleación de aluminio 6063*. Capítol 3 Universitat Autònoma de Nueva León. Grau de Doctorat en Enginyeria de Materials. Pp.14
- [7]. E. Martín. (2007) *Efecto de la microestructura en las propiedades de materiales compuestos base aluminio*. Tesi Doctoral, UPC.
- [8]. P. S. Mohanty and J. E. Gruzleski. *Grain refinement mechanisms of hypoeutectic Al-Si alloys*. Department of mining and metallurgical engineering, Mcgill University, Montreal, Canada, H3A 2A7.
- [9]. L. F. Mondolfo. (1976) *Aluminiu Alloys: Structure Properties*. Butterworth. Pp. 12, 24, 147, 435-437.
- [10]. F. Sanchette, Tran-Hu-Loi, C. Franz. (1993) *Deposition of metastable aluminium-chromium alloys by r.f. magnetron sputtering from mixed-powder targets*. Surface and Coatings Technology, Volum 57. pp179-182.
- [11]. Espanya. EURONORM UNE-EN1706:2011. *Aluminio y aleaciones de aluminio. Piezas moldeadas. Composición química y características mecánicas*. AENOR
- [12]. Composició homologada del Al-Si9-Cu3, SteelNumber: European Steel and Alloy Grades/Numbers.
- [13]. Molfisa S.A., Moldes y Fundición Inyectada. Propietats de l'aliatge Al-9Si-Cu3 (18/03/2018).
- [14]. J.L. Chavez. (2014) *Diagramas de fases de Aleaciones de Aluminio*. ITESI
- [15]. B. J. Castro Wilches. (2014) *Diagramas de fases de las Aleaciones del Alumini*. Universidad Agraria de Colombia.
- [16]. Yongyi Peng, Shu Li, Ying Deng, Hua Zhou, Guofu Xu, Zhimin Yin, (2016) *Synergetic effects of Sc and Zr microalloying and heat treatment on mechanical properties and exfoliation corrosion behavior of Al-Mg-Mn alloys*. Materials Science & Engineering A 666 pp.61–71.
- [17]. D.P. Bishop, R. Cahoon, M. C. Chaturvedi, G.J. Kipouros, W.F. Caley. (2000) *On enhancing the mechanical properties of aluminum P/M alloys*. Materials Science and Engineering: A, Vol. 290. Pp 16-24.
- [18]. *Efecto de los tratamientos térmicos en las aleaciones aluminio-silicio*. <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6045/07Mtbp07de29.pdf;sequence=7> (12/04/2018)
- [19]. David Fresno (2007). *Optimización de los Tratamientos Térmicos T5 y T6 para una Aleación A356 Conformada por SLC*. TFG, UPC.

- [20]. J. Font, A. Cortina. (2017) *Nous aliatges d'alumini microaliat*. TFG, UPC.
- [21]. M. Campillo, M.T. Baile, E. Martín, A. Forn. (2010) *Aplicación de tratamientos T6 y T5 a la aleación L-2630 conformada por SSR*. Centro de Diseño de Aleaciones Ligeras y Tratamientos de Superficies, UPC.
- [22]. William F. Smith, J. Hashemi (2004) *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*. Cuarta edición. Mc Graw Hill. Pp 406