

Automatització i disseny d'un sistema d'agitació per ultrasons i una conquilla per la caracterització del metall colat

Miquel Sintés Juanico

Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
Avda. Víctor Balaguer 1. 08800 Vilanova i la Geltrú..

Resum. El projecte consisteix en la modificació de la funció d'una fresadora de control numèric per utilitzar-la com agitador controlat d'ultra-sons per metalls lleugers, juntament amb un forn d'inducció i posterior disseny d'un motlle per caracteritzar metall colat. S'ha analitzat la necessitat i s'han dissenyat els prototips que millor s'hi adapten. Es fa una selecció de materials restrictiva per determinar el millor material en cada cas, seguit d'una anàlisi d'esforços per comprovar que aquest disseny és correcte segons límits imposats de tensions màximes i fletxes màximes, aquesta anàlisi es fa utilitzant un programa de simulació. Finalment es realitzen els plànols i es construeix el prototip, acabant el procés amb la validació al laboratori. La segona part del projecte ha estat el disseny i simulació d'una conquilla per a la caracterització de metalls lleugers que es puguin fondre i agitar en la fresadora modificada.

Abstract. The project involves modifying the function of a CNC milling machine to use it as an ultra-sound controlled mixer to use it for light metals, with an induction furnace and the design of a mold to characterize light materials by casting. The procedure followed was to analyze the need and design prototypes that best suit the needs. Subsequently, a selection of restrictive materials is done to determine the best material in each case. An analysis is done by using a simulation program to verify if the prototype is well designed according to the limits imposed: maximum stresses and maximum deflection. Finally, plans are made and sent to get the prototype build. The project ends with the validation of it in the laboratory. The second part of the project was the design and simulation of a mold for the characterization of light metals that can be melted and stir in the modified CNC milling machine.

1. Introducció

El projecte té com a finalitat el disseny i dimensionat d'un sistema que permeti l'ancoratge d'un sonotrode i un forn d'inducció, per tal de facilitar l'agitació amb ultra-sons de metall líquid. Es fa servir com a punt de partida el moviment vertical d'una fresadora de control numèric i un sistema per poder muntar el forn d'inducció. Per altra banda també es fa el disseny d'una conquilla per utilitzar-la en la caracterització dels metalls lleugers que es poden fondre en el forn d'inducció.

La primera part del projecte consisteix en analitzar la zona sobre la que es treballarà. En aquest cas la base que es té per començar amb el disseny és la fresadora de control numèric del laboratori. Un cop pre-dissenyada aquesta i els diferents components que intervenen en el projecte ja es pot procedir posant les restriccions de la col·locació d'aquestes peces i analitzar com han de quedar sobre la fresadora.

Es dissenya un suport del forn d'inducció, permetent subjectar-lo correctament tenint en

compte les seves dimensions. Dins aquest apartat es decideix el material que s'utilitzarà mitjançant l'eina de selecció CES Edupack [1]. Finalment s'apliquen els esforços que ha d'aguantar, es realitza la simulació i s'interpreten els resultats. Un cop validats els resultats es fan els plànols per poder fer el prototip, muntar-lo i comprovar que el funcionament d'aquest és correcte.

La part del disseny dels suport del sonotrode és més complexa, en ser la geometria del mateix molt específica i no poder utilitzar tants elements normalitzats. Després del disseny es segueix el mateix procediment que el cas anterior, es selecciona el material que millor s'adapti als esforços que s'han d'aguantar, i finalment es fa la simulació. Un cop s'obtenen els resultats de la simulació s'analitzen i es decideix si el disseny és correcte. Finalment es fan els plànols i s'envien per poder tenir el prototip, muntar-lo a la fresadora de control numèric i comprovar que suporta el sonotrode i les vibracions que aquest produeix en funcionament.

La darrera part del projecte consisteix en el disseny d'una conquilla que s'utilitzarà per a l'obtenció de

provetes per a la caracterització d'aliatges lleugers, principalment aliatges d'alumini. Les característiques que es volen poder analitzar són les tensions que aguanta el material, un anàlisi de desgast i un anàlisi de colabilitat. El disseny s'analitza manualment per poder així comparar els resultats amb l'anàlisi que fa el programa de simulació d'ompliment de motlles.

Finalment es treuen les conclusions del projecte segons el que s'ha observat en cada cas.

2. Mètode experimental

La primer part del projecte que s'ha analitzat ha sigut la fresadora i com es muntaran a sobre el forn d'inducció i el sonotrode (Fig 1).

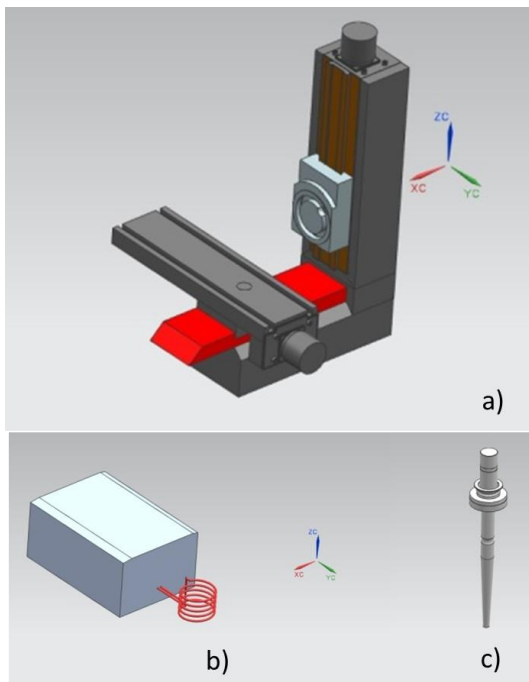


Fig. 1 Elements que s'han d'unir: a) fresadora, b) bobina del forn d'inducció i c) sonotrode.

El primer que s'ha analitzat és com subjectar el forn, perquè la fresadora consta de dues guies en forma de "T" invertida que tenien com a funció ajudar a subjectar les peces que havien de ser mecanitzades. Utilitzant aquestes guies s'han anat pensat diferents mètodes d'ancoratge per muntar un suport que aguanti les tensions i flecti poc quan se li posi el forn a sobre.

El primer disseny (**Fig. 2**) està format per dos perfils rectangulars amb unes dimensions de 40 mm x 20 mm x 2 mm, perquè té la àrea allunyada de la fibra neutre. Això representa un moment d'inèrcia polar elevat, per tant menys flexió utilitzant menys

material. Aquest suport anirà subjectat a la fresadora de control numèric utilitzant femelles en forma de "T" invertida, volanderes gruixudes i perns allen per evitar augmentar l'alçada del forn, perquè això afectarà després al suport del sonotrode.

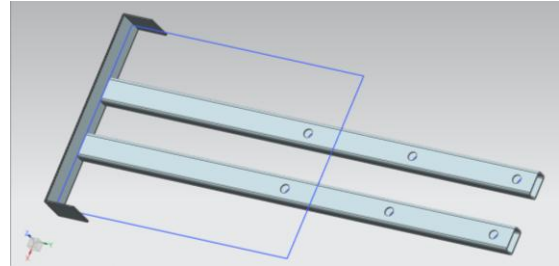


Fig. 2 Disseny final del suport

Un cop fet el disseny s'ha d'analitzar quin és el millor material per fer aquest suport, sempre tenint en compte les necessitats. Per fer la selecció s'ha utilitzat el CES EduPack, un programa amb una base de dades que conté poc menys de 3 000 materials. Utilitzant les eines d'aquest programa s'ha anat fent una tria dels materials més adients.

Per realitzar la recerca s'utilitza el nivell 2, que és un nivell intermig, conté grups de materials que compleixen les característiques desitjades, i després, dins aquest grup s'ha d'escollir.

Els límits de recerca són, un mòdul de Young de més de 100 GPa, això limita a que sigui un metall rígid i deformi poc en aplicar esforços considerables. El segon filtre és que els materials han de ser fàcils de mecanitzar, perquè els dos perfils s'han de tallar a la mida desitjada i se li han de fer els forats per passar els perns que uniran el suport amb la fresadora, i també ha de ser fàcilment soldable. Finalment dins la elecció de materials queden 6 grups, que s'han posat en una gràfica del preu respecte el mòdul de Young (**Fig 3**).

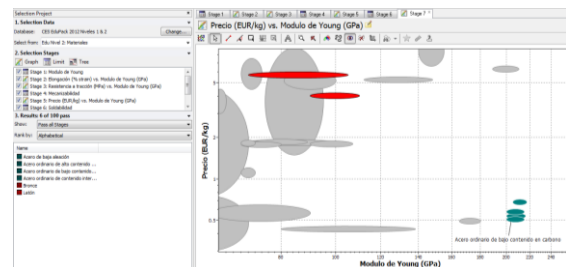


Fig. 3 Mapa de materials per a seleccionar el millor per a fer el suport.

S'ha escollit un acer amb baix contingut de carboni, perquè té un preu baix i un alt mòdul de Young.

Una de les altres característiques importants és que el metall pugui treballar a temperatures de fins a 500°C, perquè el forn d'inducció s'escalfa considerablement, i tot i tenir ceràmica aïllant al mig, una part del calor passa al suport. S'ha escollit, entre tots els acers amb baix contingut de carboni, l'AISI 1015, perquè supera el que s'exigeix en els apartats de selecció anteriorment mencionats.

El procediment continua amb la simulació utilitzant el mòdul d'elements finits de Siemens NX8, on s'ha seguit el procediment habitual de tota simulació.

El primer pas és el de crear una malla que uneixi tots els components del suport. Seguidament s'aplica el material que s'ha obtingut de la selecció de materials. Finalment s'apliquen les restriccions i les forces sobre el suport, fent que s'assemblin el màxim possible a la realitat, per obtenir uns resultats més realistes.

Quan ja s'ha fet la simulació s'han d'analitzar els resultats, perquè es tracta de resultats gràfics, que s'han d'interpretar. Els dos apartats més importants a analitzar són les tensions internes del prototip un cop se li aplica el pes del forn d'inducció, que pesa 162,7 N, i sabent que les restriccions són les sis volanderes que es posen com a nodes sense desplaçament. L'altre valor que s'ha d'analitzar és la deformació màxima que experimenta, perquè un producte podria treballar dins una tensió de seguretat, però que flectés massa i deixés el sonotrode desalineat amb el centre de la bobina.

Els valors obtinguts de fletxa màxima és de 0,23 mm, un valor correcte, que no afectarà al funcionament del forn d'inducció. L'altre valor que s'ha analitzat és la tensió de Von Mises, donat que és més restrictiva que el límit elàstic. Aquesta anàlisi ens dona una concentració de tensions en el forat, amb una tensió màxima de 22 MPa (**Fig. 4**). S'ha fet servir un coeficient de seguretat de més de 10, per evitar una major flexió, perquè la posició de la biga és la més favorable a flectar, i per això s'ha considerat, com a criteri de disseny, que aquests valors han d'estar sobre-dimensionats.

La realització del disseny del suport del sonotrode (**Fig. 5**) [2] ha estat més complexa, degut a que és més difícil trobar peces de dimensions estàndard.

Per dissenyar aquest suport s'ha tingut en compte l'ancoratge de la eina-motor de la fresadora, per aprofitar al màxim el sistema i no haver de dissenyar un nou sistema. Finalment l'ancoratge ha consistit en fer quatre forats a la planxa vertical i

utilitzar els pernys de cap quadrat que encaixen en la zona de subjecció.

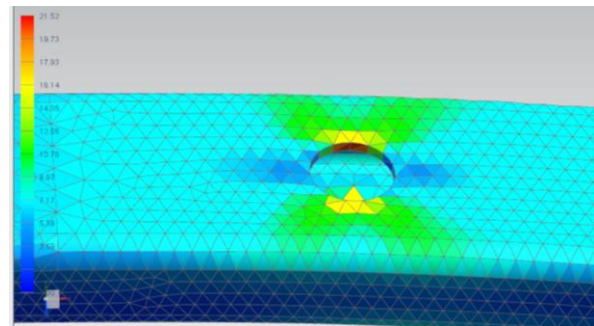


Fig. 4 Zona on hi ha una concentració de tensions.

La part més complicada ha estat el disseny de la part que subjecta el sonotrode, perquè ha de tenir molta precisió, i després unir-la amb la planxa vertical que va subjectada a la fresadora. Finalment es dissenya una anella a la que se li solden quatre ales que posteriorment es foraden per poder passar-hi els cargols. Una d'aquestes ales ha de ser més llarga que les altres i serà la que ajuntarà l'anell amb la planxa vertical, per tant, aquesta serà més gruixuda que la resta. Finalment es talla l'anell en dues parts, per poder entrar el sonotrode i subjectar-lo. Aquest tall treu material, això permet que la subjecció sigui millor i no hi hagi un excés de material que impedeixi una bona subjecció.

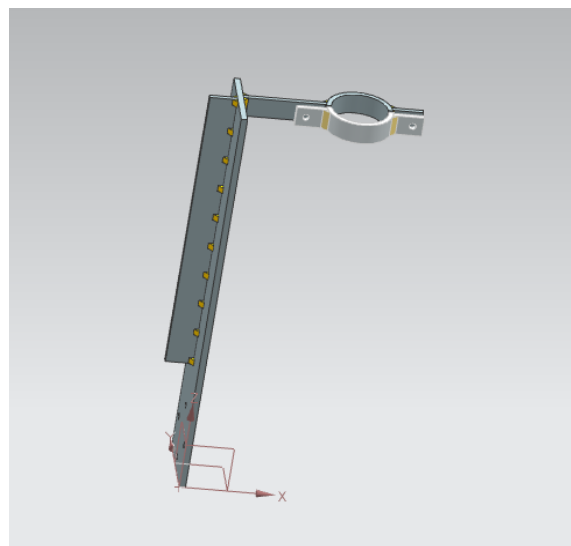


Fig. 5 Suport del sonotrode.

La darrera part del disseny consisteix en donar rigidesa al suport, perquè si només fos una planxa vertical la flexió d'aquesta seria important. Per augmentar aquesta rigidesa el que es fa és, com s'ha mencionat abans, augmentar la inèrcia polar, això s'aconsegueix posant un nervi a la part posterior, reduint així la flexió del suport i

augmentant la precisió del disseny perquè el sonotrode es desviarà menys.

L'apartat de selecció de materials és molt similar a l'apartat anterior, tot i que en aquest cas es treballa dins el nivell 3, això implica treballar dins una base de dades amb quasi 3 000 materials, sobre els que s'ha de decidir quin és el millor per fer el suport.

Les restriccions imposades són similars a les anteriors, afegint, en aquest cas, que el material ha de tenir una bona resistència a la fatiga, perquè ha d'aguantar vibracions, amb aquesta propietat es pot determinar, pràcticament que el suport treballi amb vibracions que permetin la vida infinita del material. Això és el que es busca en aquest cas, perquè no està previst desmuntar el suport, sinó utilitzar-lo indefinidament.

Es manté el mòdul de Young per sobre dels 100 GPa, que el material sigui fàcil de mecanitzar i soldable, en aquest cas és més important que l'anterior perquè hi ha moltes més soldadures degut a que s'ha realitzat un disseny que seria molt costós tenir una única peça, degut a la geometria d'aquesta.

Finalment es defineix com a millor material per fer el suport del sonotrode l'acer AISI 3140 normalitzat. Es tracta d'un acer amb baix contingut d'elements aliats que tot i no ser el que té el mòdul de Young més elevat és molt barat (Fig.6), i també té una gran resistència a la fatiga.

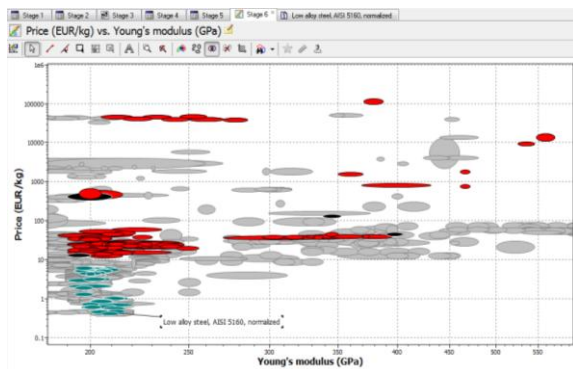


Fig. 6 Relació dels preus i el mòdul de Young dels materials que han passat la selecció.

Quan ja es té el material només queda aplicar-lo a la peça dins el programa de simulació i igual que el suport del forn, definir una malla suficientment petita com perquè els resultats s'acostin als resultats reals però que permeti que el processador de càlculs sigui ràpid.

La part final és definir com a nodes sense moviment tots aquells que estaran subjectats per les volanderes, perquè no es podran desplaçar, i definir la força que farà el sonotrode quan estigui muntat, just a sobre de la superfície del mig anell que està connectat a la planxa vertical.

Un cop finalitzada la simulació el que queda és analitzar els resultats visuals que facilita el programa.

Igual que en el cas anterior s'han analitzat la deformació màxima, que no supera els 0,3 mm, aconseguint una precisió molt bona amb el muntatge del prototip. Finalment s'analitzen les tensions que aguantarà el suport i la zona més crítica, i es veu que no supera els 18 MPa (Fig.7). Això és bo, perquè aquesta zona, a més d'aguantar les tensions normals està sotmesa a esforços de vibracions que la peça ha d'aguantar sense trencar.

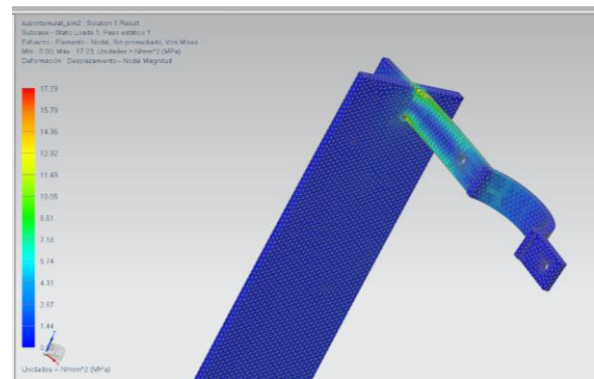


Fig. 7 Tensions de Von Misses.

La disposició final dels dos suports és la que es pot veure a la Fig 8.

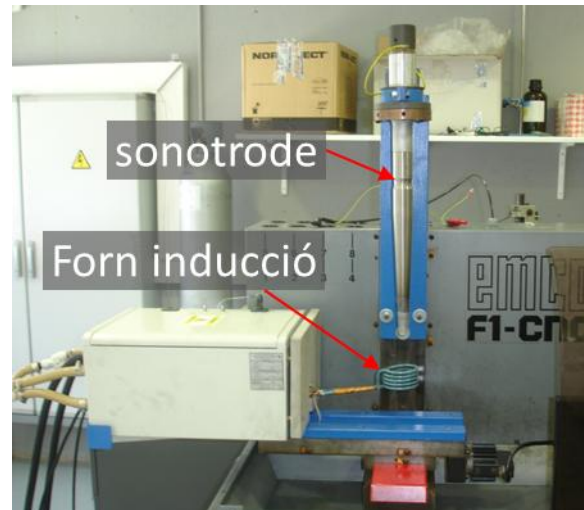


Fig. 8 Disposició final del suport real.

El darrer apartat del projecte consisteix en el disseny i comprovació d'una conquilla per la caracterització de diferents propietats dels materials: proveta de tracció, proveta de tribologia i proveta de colabilitat (**Fig 9**). El disseny inclou la possibilitat d'obtenir un únic tipus de proveta a cada colada.

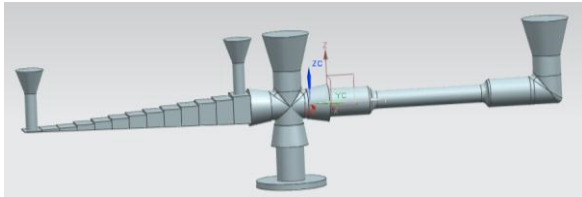


Fig. 9 Negatiu a partir del que es farà el motlle.

En aquests moments es tractarà d'un motlle del que s'extraurà una peça cada cop. Perquè el disseny de cada motlle s'ha fet seguint el volum de material que es pot posar dins el grisol més gran que es pot escalfar al forn d'inducció actualment, i col·locant taps per evitar que el metall pugui anar a cap altre cavitat.

Per fer la primera proveta s'ha analitzat la quantitat de material que pot anar al grisol, que són 111 111 mm³. I a partir d'aquí, seguint la normativa ASTM [3], s'ha dissenyat la proveta a tracció, tenint en compte les mesures de la norma i que el volum de les massalotes ha de ser igual o superior al volum de material de la peça, per evitar que es puguin crear xuclets.

Un cop calculades totes les parts de la proveta, es fa l'estudi de velocitats del fluid quan s'ompli el motlle, utilitzant el principi de Bernoulli. Després s'analitza que el temps de solidificació de la proveta és inferior al temps de solidificació de les massalotes, utilitzant a l'expressió (1) [4].

$$K_{mas} \left(\frac{V_{mas}}{A_{mas}} \right)^2 > K_{peça} \left(\frac{V_{peça}}{A_{peça}} \right)^2 \quad (1)$$

Demostrat analíticament que primer solidifica la peça i després les massalotes, es fa la simulació amb el ProCAST, per comprovar si el temps d'ompliment, les velocitats i la solidificació de la peça són correctes (**Fig. 10**).

La segona cavitat és la proveta que s'utilitzarà per fer la prova de "Pin on disc", que es col·locarà al tribòmetre per determinar el desgast i el coeficient de fregament.

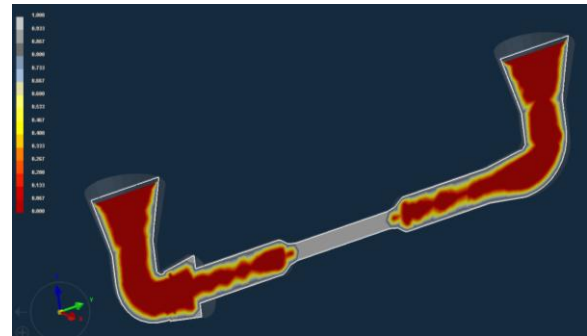


Fig. 10 Solidificació de la proveta.

Com en el cas anterior s'han analitzat les propietats del motlle traient primer els volums i calculant que el temps de solidificació de la zona sobre la que es farà la caracterització quedi sense porositat, utilitzant l'expressió (1).

Un cop fets tots els càlculs es simula, i s'analitzen el temps d'ompliment, els temps de solidificació i les velocitats del fluid.

La proveta de colabilitat consisteix en una proveta amb graons [5], que passa de més a menys altura, per determinar quina quantitat de motlle s'omplirà, perquè cada cop que es redueix secció el fluid triga menys en solidificar i això fa que pugui passar que no s'ompli tot el motlle, determinant així l'amplada límit.

Utilitzant les mateixes fórmules que en els casos anteriors s'han analitzat les velocitats d'ompliment i els temps relatius de solidificació (1) per demostrar que la massalota és la darrera part que solidifica.

3 Conclusions

1. Els estudis de tensions han permet dissenyar un suport de sonotrode i la fabricació del prototip.
2. El mòdul de simulació NX Nastran ha permès determinar les tensions de Von Mises i la fletxa màximes que aguantaran els suports, sota l'aplicació d'esforços estàtics.
3. Els programes de disseny i simulació s'adapten a les necessitats de càlculs, donant resultats correctes que s'acosten als resultats reals, validant així estructures complexes que poden ser molt costoses de calcular manualment.

4. Sota l'aplicació d'esforços estàtics els valors màxims de tensions de Von Mises i la fletxa que aguantaran els suports són de 22 MPa i 0,3 mm, valors obtinguts amb el mòdul de simulació NX-Nastran.
5. El programa CES EduPack permet una selecció àgil i eficient del material més adient per cada aplicació.
6. Les simulacions fetes amb el programa de simulació per elements finits ProCast han permès validar el disseny i dimensionat de la conquilla. Així com l'ompliment de la cavitat i la solidificació.

4 Bibliografia

- [1] Bordonaba, A. Diseño de prácticas con el software CES EduPack para la docencia de Procesos de Fabricación en Grado. Proyecto final de carrera, UPC, departament Ciència de los materiales e Ingeniería Metalúrgica. 2012.
- [2] Picas, P. Tractament amb ultrasons per obtenir microestructures globulars (no dendrítiques) en l'aliatge d'alumini A356, projecte final de carrera, UPC, Departament de Ciència dels materials i enginyeria metalúrgica, 2012
- [3] American Society for Testing Materials. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]*, E 8M – 04, Estats Units d'Amèrica, ASTM 2005.
- [4] GmbH, F. S. (1971). *Moderne Druckgussfertigung*. Berlín: Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona
- [5] Sabatino, M. Fluidity Of Aluminium Foundry Alloys, Tesis Doctoral, Norwegian University of Science and Technology, 2005.