

Treball final de grau

Estudi: Grau en Tecnologies Industrials

Títol: Anàlisi de la forma de la punta del sonotrode en la tecnologia d'emmotllament per ultrasons

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Albert Rissech Sureda

Director/tutor: Inés Ferrer Real

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria de Processos de Fabricació

Convocatòria (mes/any): Juny 2015

ÍNDIX

MEMÒRIA	1
1. Introducció	2
1.1 Antecedents.....	2
1.2 Objecte	3
1.3 Abast	3
1.4 Requeriments sonotrode.....	3
2. La tecnologia	5
2.1 Descripció del procés	5
2.2 Sonorus 1G	7
3. Procediment de desenvolupament d'un sonotrode escalonat	11
3.1 Fase 1: Mètodes analítics	12
3.1.1 ZVEI Handbook [1]	14
3.1.2 Nanu [2].....	14
3.2 Fase 2: Simulacions amb mètodes d'elements finits (FEM)	15
3.3 Fase 3: Fabricació i anàlisi dimensional.....	18
3.4 Fase 4: Ajustament de freqüència de vibració	21
4. Disseny de les puntes del sonotrode	23
4.1 Sonotrode 1	23
4.2 Sonotrode 2.....	24
4.3 Sonotrode 3.....	24
4.4 Sonotrode 4.....	25
5. Resultats.....	27
5.1 Fase 1: Mètodes analítics	27
5.1.1 ZVEI Handbook [1]	27
5.1.2 Nanu [2].....	29
5.2 Fase 2: Simulacions amb mètodes d'elements finits (FEM)	30
5.2.1 Sonotrode 1	31
5.2.2 Sonotrode 2.....	34
5.2.3 Sonotrode 3.....	36
5.2.4 Sonotrode 4.....	39
5.3 Fase 3: Fabricació i anàlisi dimensional.....	41
5.4 Fase 4: Ajustament de freqüència de vibració	45
5.4.1 Sonotrode 1	46

5.4.2	Sonotrode 2.....	47
5.4.3	Sonotrode 3.....	49
5.4.4	Sonotrode 4.....	50
6.	Experimentació i proves.....	53
6.1	Sonotrode 1.....	54
6.2	Sonotrode 2.....	55
6.3	Sonotrode 3.....	57
6.4	Sonotrode 4.....	58
7.	Resum estudi de costos.....	60
8.	Conclusions i treballs futurs.....	61
8.1	Conclusions.....	61
8.2	Treballs futurs.....	62
9.	Bibliografia.....	63
	ANNEXOS.....	64
	ANNEX A. Plànols.....	65
	ANNEX B. Recull Fotogràfic.....	71
B.1	Imatges sonotrodes fabricats.....	71
B.2	Imatges anàlisi dimensional.....	72
B.3	Imatges ajustament de freqüència de vibració.....	74
	ANNEX C. Estudi de costos.....	76
C.1	Introducció.....	76
C.2	Despesa dels materials i equipaments.....	77
C.3	Despesa de mà d'obra.....	78
C.4	Costos indirectes.....	79
C.5	Total de la despesa.....	80

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1: Disseny d'un sonotrode amb les corresponents seccions i cotes.....	4
Figura 2: Secció d'entrada d'un sonotrode amb el corresponent requeriments.....	4
Figura 3: Tercera fase del procés d'emmotllament per ultrasons (Font: GREP).....	6
Figura 4: Procés d'emmotllament per ultrasons [3].....	7
Figura 5: Màquina Sonorus 1G.....	7
Figura 6: Esquema i funcionament el capçal ultrasònic (Font: GREP).....	10

Figura 7: Esquema procediment de desenvolupament d'un sonotrode escalonat	11
Figura 8: Esquema sonotrode escalonat.....	13
Figura 9: Aplicació del mètode gràfic ZVEI Handbook [1] per trobar L_1 i L_2	14
Figura 10: Evolució del disseny preliminar per adaptar-lo al nostre cas	16
Figura 11: Sonotrodes mallats per a les mateixes regions de diferents dimensions....	17
Figura 12: Dependència de la freqüència en funció de L_2 i D_2 [3].....	18
Figura 13: Màquina de medició per coordenades Mitutoyo Crysta Apex 544	19
Figura 14: Imatge de la interfase de la màquina de medició per coordenades	20
Figura 15: Perfil obtingut en format IGS	20
Figura 16: Muntatge analitzador de transductors TRZ	21
Figura 17: Gràfica resultants d'un anàlisi dels modes de vibració	22
Figura 18: Disseny punta Sonotrode 1	24
Figura 19: Disseny punta Sonotrode 2.....	24
Figura 20: Disseny punta Sonotrode 3.....	25
Figura 21: Disseny punta Sonotrode 4.....	25
Figura 22: Aplicació del mètode ZVEI Handbook [1]	28
Figura 23: Dimensionat mallat per al Sonotrode 1	31
Figura 24: Representació visual dels modes de vibració del Sonotrode 1	32
Figura 25: Disseny Sonotrode 1.....	33
Figura 26: Dimensionat mallat per al Sonotrode 2	34
Figura 27: Representació visual dels modes de vibració del Sonotrode 2.....	35
Figura 28: Disseny Sonotrode 2.....	36
Figura 29: Dimensionat mallat per al Sonotrode 3	36
Figura 30: Representació visual dels modes de vibració del Sonotrode 3.....	38
Figura 31: Disseny Sonotrode 3.....	38
Figura 32: Dimensionat mallat per al Sonotrode 4	39
Figura 33: Representació visual dels modes de vibració del Sonotrode 4.....	40
Figura 34: Disseny Sonotrode 4.....	41
Figura 35: Sonotrodes fabricats a l'empresa externa	42
Figura 36: Perfil sonotrode obtingut de l'anàlisi dimensional	43
Figura 37: Perfil sonotrode revolucionat a CAD	43
Figura 38: Sonotrode mallat per a la simulació FEM.....	44
Figura 39: Representació visual dels modes de vibració del sonotrode fabricat.....	45
Figura 40: Gràfica ajustament freqüència vibració Sonotrode 1	47
Figura 41: Representació gràfica últim anàlisi freqüència Sonotrode 1	47
Figura 42: Gràfica ajustament freqüència vibració Sonotrode 2	48
Figura 43: Representació gràfica últim anàlisi freqüència Sonotrode 2	49
Figura 44: Gràfica ajustament freqüència vibració Sonotrode 3	50
Figura 45: Representació gràfica últim anàlisi freqüència Sonotrode 3	50
Figura 46: Gràfica ajustament freqüència vibració Sonotrode 4	51
Figura 47: Representació gràfica últim anàlisi freqüència Sonotrode 4	52
Figura 48: Muntatge de l'experiment realitzat.....	54
Figura 49: Imatge extreta de l'experiment per al Sonotrode 1	55
Figura 50: Imatge 1 extreta de l'experiment per al Sonotrode 2	56
Figura 51: Imatge 2 extreta de l'experiment per al Sonotrode 2	56
Figura 52: Imatge 1 extreta de l'experiment per al Sonotrode 3	57

Figura 53: Imatge 2 estreta de l'experiment per al Sonotrode 3	58
Figura 54: Imatge estreta de l'experiment per al Sonotrode 4	58
Figura 55: Dos exemples dels sonotrodes fabricats	71
Figura 56: Vista de la secció 1 del sonotrode fabricat	71
Figura 57: Vista de la secció 2 del sonotrode fabricat	72
Figura 58: Imatge 1 de l'anàlisi dimensional del sonotrode fabricat.....	72
Figura 59: Imatge 2 de l'anàlisi dimensional del sonotrode fabricat.....	73
Figura 60: Imatge de tot l'equipament durant l'anàlisi dimensional.....	73
Figura 61: Imatge 1 de l'ajustament al torn manual.....	74
Figura 62: Imatge 2 de l'ajustament al torn manual.....	75

ÍNDEX DE TAULES

Taula 1: Velocitat del so en diferents materials [1]	13
Taula 2: Superfície de contacte de les diferents puntes dels sonotrodes	26
Taula 3: Dades necessàries per aplicar els mètodes analítics	27
Taula 4: Àrees i velocitat del so en el material del sonotrode a fabricar	28
Taula 5: Resultats ZVEI Handbook [1] per a una freqüència de 20.000Hz.....	28
Taula 6: Resultats ZVEI Handbook [1] per a una freqüència de 30.000Hz.....	29
Taula 7: Dades inicials i valors dels termes λ i k_u	29
Taula 8: Resultats Nanu [2].....	30
Taula 9: Comparació resultats mètodes analítics.....	30
Taula 10: Dimensions finals del disseny del Sonotrode 1	32
Taula 11: Freqüències dels modes per als diferents mallats del Sonotrode 1	32
Taula 12: Dimensions finals del disseny del Sonotrode 2	34
Taula 13: Freqüències dels modes per als diferents mallats del Sonotrode 2	35
Taula 14: Dimensions finals del disseny del Sonotrode 3	37
Taula 15: Freqüències dels modes per als diferents mallats del Sonotrode 3	37
Taula 16: Dimensions finals del disseny del Sonotrode 4	39
Taula 17: Freqüències dels modes per als diferents mallats del Sonotrode 4	40
Taula 18: Resultats anàlisi dimensional	42
Taula 19: Freqüències de vibració dels modes del sonotrode fabricat	44
Taula 20: Ajustament freqüència vibració Sonotrode 1	46
Taula 21: Ajustament freqüència vibració Sonotrode 2	48
Taula 22: Ajustament freqüència vibració Sonotrode 3	49
Taula 23: Ajustament freqüència vibració Sonotrode 4	51
Taula 24: Cost total del material i equipaments del present projecte.....	77
Taula 25: Cost total de la mà d'obra del present projecte	78
Taula 26: Costos indirectes del present projecte.....	79

MEMÒRIA

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

Actualment la tecnologia més utilitzada per a la fabricació de peces de plàstic de dimensions reduïdes és el procés d'emmotllament per microinjecció. Aquesta tecnologia, tot i ser la més habitual, té els seus inconvenients, com són la falta de precisió en la dosificació del material i l'elevat volum de les massalotes.

Per tal de millorar el procés de fabricació de micropeces de plàstic, els últims anys s'ha desenvolupat una nova tecnologia dels ultrasons que ja és industrialment utilitzada per algunes aplicacions com la soldadura o el tall amb diferents materials. El projecte d'aquest nou procés de fabricació s'ha desenvolupat a l'empresa Ultrason SL adjunta al Centre Tecnològic ASCAMM de Cerdanyola del Vallès i ha suposat un concepte totalment revolucionari en la producció de peces a escala mini i micro

Aquesta nova tecnologia d'emmotllament utilitza els ultrasons per fondre el material plàstic que es troba a la càmera de plastificació i alhora genera la pressió necessària per què el material ompli la cavitat del motlle. El fet de fondre el material a través dels ultrasons disminueix la possibilitat de degradació del material durant l'etapa de fusió d'aquest. Per tant, consisteix en un procés capaç d'omplir cavitats molt petites del motlle sense necessitat d'aplicar grans valors de pressió, en comparació al procés de microinjecció convencional. A més, el temps de fabricació és molt més reduït, ja que es poden produir peces en pocs segons. Un altre avantatge respecte els altres processos és que s'aconsegueix reduir el volum de les massalotes, i per tant reduir el material malbaratat.

Es tracta doncs d'una tecnologia molt recent amb un gran ventall de possibilitats en l'àmbit de la producció de peces a escala micro i mini, la qual es troba en investigació i desenvolupament. Degut al fet que és una tecnologia tant nova encara no s'han pogut fer innovacions, per aquest fet sorgeix el present treball, que consisteix en l'estudi de l'efecte de diferents dissenys de la punta del sonotrode en el procés de fabricació de peces, ja que fins a aquest moment el procés només s'ha dut a terme amb sonotrodes de punta plana.

1.2 Objecte

Com s'ha dit, aquesta nova tecnologia es troba en investigació i desenvolupament, per aquest fet l'objectiu principal d'aquest treball és analitzar com la geometria de l'eina que fon el material plàstic, anomenada sonotrode, pot afectar al procés de fabricació per ultrasons (USM). Concretament analitzarem l'efecte de diferents formes de les puntes del sonotrode.

En aquest projecte s'estudiaran quatre formes de puntes de sonotrode i les tasques que es duran a terme per a cada forma seran les següents:

- Dissenyar i simular el sonotrode amb la punta determinada
- Fabricar i ajustar la geometria per tal que vibri dins la freqüència del generador.
- Analitzar el comportament de cada sonotrode

Per altra banda, els sonotrodes obtinguts hauran de complir amb uns requeriments imposats inicialment.

1.3 Abast

La realització d'aquest treball engloba el coneixement de la tecnologia mitjançant la investigació en documents i articles tècnics, el disseny i la fabricació de sonotrodes amb quatre formes de la punta diferents i, finalment, l'anàlisi dels resultats obtinguts amb els diferents sonotrodes.

1.4 Requeriments sonotrode

Els sonotrodes que es fabricaran tenen uns requeriments necessaris pel bon funcionament del procés en la màquina, els quals es defineixen a continuació.

- ✓ Freqüència de vibració de 30.000Hz degut a que la freqüència de vibració del sonotrode ha de coincidir amb la de vibració del generador de la màquina
- ✓ Vibració completament lineal per part del sonotrode per tal que tota l'energia es transmeti en la mateixa direcció
- ✓ Diàmetre d'entrada (D_1) de 20mm
- ✓ Diàmetre de sortida (D_2) de 8mm
- ✓ Radi (R) de 13,5mm entre les dos seccions

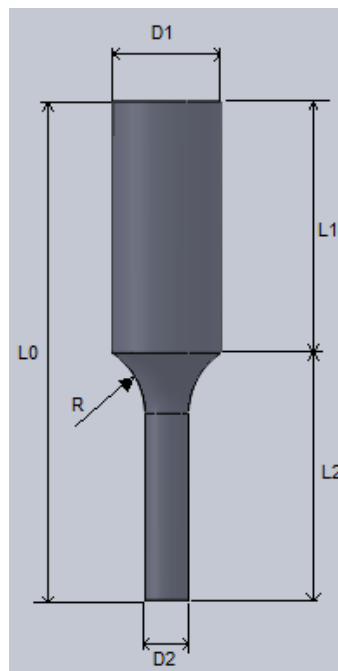


Figura 1: Disseny d'un sonotrode amb les corresponents seccions i cotes

- ✓ Forat a la cara superior de la secció 1 per tal de poder unir el sonotrode amb el booster. Les característiques són les següents:
 - 15mm de profunditat
 - Roscat Whitworth de 3/8" de 13mm de profunditat
- ✓ Ranures laterals a la secció 1 per tal de poder fixar amb una clau el sonotrode a la màquina. Les característiques són les següents:
 - 1mm de profunditat
 - 11,5mm d'alçada
 - A 12,2mm de la cara superior
- ✓ Xamfrà de 0,5x45° a l'aresta superior

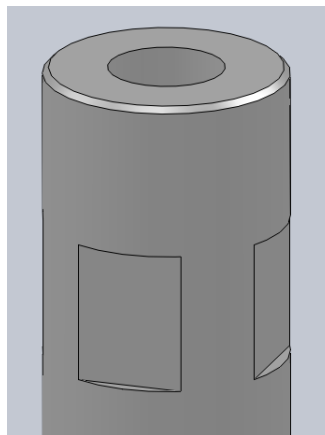


Figura 2: Secció d'entrada d'un sonotrode amb el corresponent requeriments

2. LA TECNOLOGIA

2.1 Descripció del procés

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

Primera fase

S'inicia quan el motlle ha estat prèviament tancat. A partir d'aquí el material sòlid en forma de pellet o de pols entra de manera automatitzada o manual dins de la cambra de plastificació.

Segona fase

Un cop tot el material es troba dins de la cambra de plastificació, aquesta fase s'inicia. La unitat ultrasònica comença el moviment vertical de baixada i justament quan entra en contacte amb el material dins la cambra de plastificació s'inicia el període de temps en què genera els ultrasons, ja que el contacte entre el sonotrode i el material produeix una força de resistència contrària al moviment del sonotrode que, quan aquesta força supera un valor predeterminat, genera l'ordre d'inici dels ultrasons.

Tercera fase

En aquesta fase es produeix la plastificació del material que consta de tres subfases. La plastificació del material dins del motlle representa un dels aspectes innovadors d'aquesta tecnologia. En la primera subfase el material comença a fondre i flueix entre les partícules del material que encara estan en estat sòlid però sense entrar encara en la cavitat del motlle. En la segona subfase el procés de plastificació es completa i el material comença a omplir la cavitat del motlle. En la tercera i última subfase el material penetra dins la cavitat del motlle fins que s'acaba el temps d'ultrasons o bé fins que el sonotrode ha arribat a la posició final.

A la Figura 3 es poden observar les diverses subfases de la tercera fase. Les imatges A, B i C corresponen a la primera subfase, la imatge D correspon a la segona; i la imatge E correspon a la última subfase.

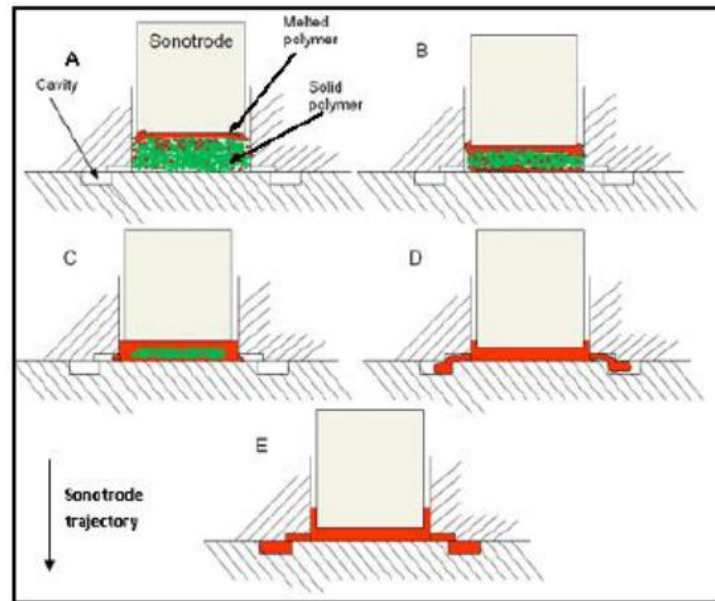


Figura 3: Tercera fase del procés d'emmotllament per ultrasons (Font: GREP)

Quarta fase

En aquesta fase s'inicia quan el capçal ultrasònic ha arribat al final del recorregut, i és quan es produeix la pressió de refredament, que serà constant durant tot el temps en què ha estat programat.

Cinquena fase

Finalment, el capçal de la unitat generadora d'ultrasons retorna a la seva posició inicial, el motlle s'obre i entra en acció el sistema d'extracció de la peça. Aquest sistema forma part també de la cambra de plastificació i consta d'una barra que es mou en sentit perpendicular al pla de partició del motlle de manera que quan el procés ha finalitzat i el motlle s'ha obert, la barra extractora puja des de la seva posició inicial fins a elevar la massalota de la peça facilitant així la seva extracció.

Per tant, aquestes cinc fases del procés d'emmotllament per ultrasons es podrien resumir de la següent manera:

- Entrada del material dins de la cambra de plastificació
- Inici del moviment de la unitat ultrasònica i inici del temps de vibració
- Procés de plastificació del material i entrada del material al motlle
- Refredament i compactació del material al motlle
- Retorn de la unitat ultrasònica al punt inicial, obertura del motlle i extracció de la peça acabada

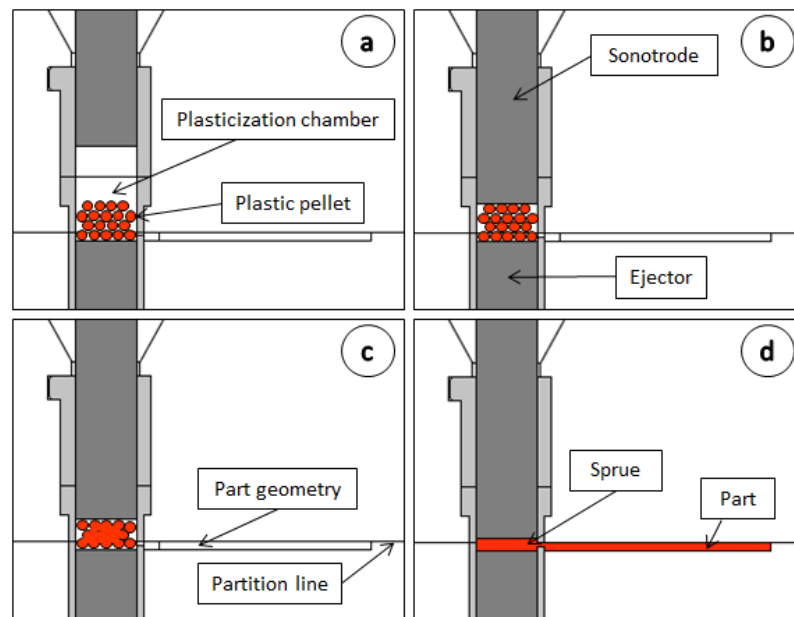


Figura 4: Procés d'emotllament per ultrasons [3]

2.2 Sonorus 1G

La màquina que es disposa per a dur a terme el procés explicat anteriorment és la Sonorus 1G, una màquina desenvolupada per l'empresa Ultrason S.L. de Cerdanyola de Vallès.

A la Figura 5 es poden veure les diferents parts de què consta la màquina.

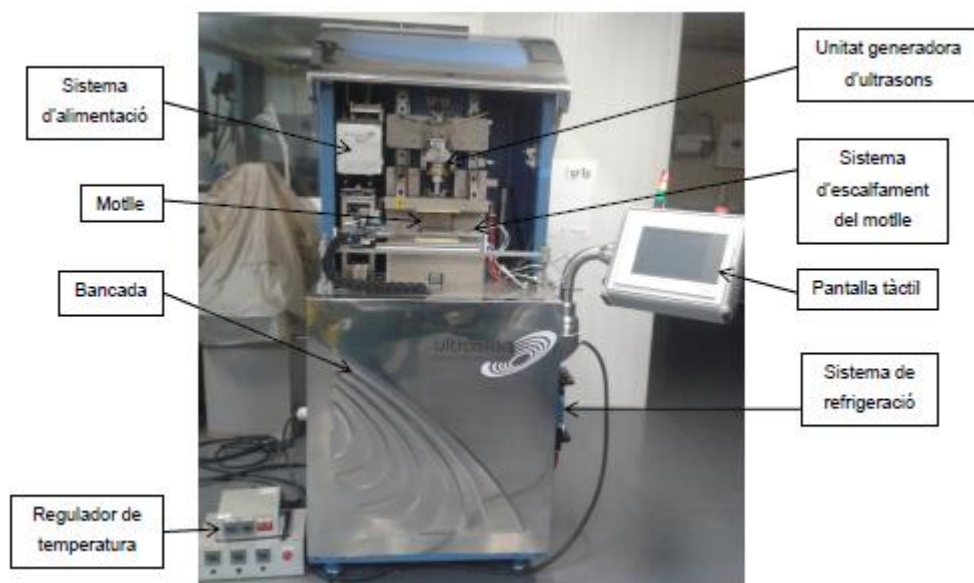


Figura 5: Màquina Sonorus 1G

- Sistema d'alimentació: consisteix en un dispensador de material el qual proporciona el número exacte de pellets per a cada cicle d'emmotllament. Es basa en un canal vibratori que alinea els pellets i els fa passar per un dispositiu làser que detecta el numero exacte proporcionat i quan arriba a la quantitat necessària, la vibració s'atura i deixa de omplir la cambra de plastificació.
- Unitat generadora d'ultrasons: és l'encarregada de convertir l'energia elèctrica en energia mecànica de vibració. Està formada pel transductor, el booster i el sonotrode.
- Zona del motlle: és on s'hi troba el motlle, el sistema d'extracció de les peces acabades i les plaques aïllants.
- Sistema d'escalfament del motlle: aquest sistema consta de quatre resistències que s'introdueixen dins del motlle per tal de mantenir-lo a una temperatura suficient elevada com per a que el material no solidifiqui abans d'haver acabat el procés d'emmotllament i per tant eviti l'entrada de més material a la cavitat del motlle. A més, es disposa d'un termoparell que recull les dades de temperatura del motlle que serveixen per al funcionament del regulador de temperatura que permet augmentar o disminuir la temperatura de les resistències.
- Sistema regulador de temperatura: és el sistema encarregat de controlar la temperatura del motlle, el qual està connectat a les resistències que escalfen el motlle i al termoparell que mesura la temperatura real del motlle. Per tant, en funció de la temperatura real i de la què volem assolir, augmenta o disminueix la intensitat de les resistències.
- Bancada: inclou els elements de suport de la zona del motlle, els sistemes de control de moviment de les parts mòbils de la màquina i la unitat generadora dels ultrasons
- Sistema de refrigeració: la màquina disposa d'un sistema de refrigeració hidràulic que pot funcionar tant amb aigua com oli.

- Pantalla tàctil: a través d'aquesta pantalla es pot programar tots els paràmetres del procés d'emmotllament.

Un cop explicades les parts principals de la màquina ens centrarem en la part més interessant per dur a terme aquest projecte, el capçal ultrasònic.

El capçal ultrasònic o també anomenat unitat generadora d'ultrasons, tal i com s'ha dit està formada per tres parts, el transductor, el booster i finalment el sonotrode, el qual tot aquest projecte està basat. Tal i com es pot veure a la Figura 6 els tres elements es troben units per l'ordre esmentat.

- Transductor: és l'encarregat de transformar l'energia elèctrica que rep del generador en energia mecànica en forma de vibracions. Aquest element està fabricat d'unes capes de material ceràmic com el quars, la turmalina o el sulfat de liti, separades per petits plats mecànics units entre ells per una elevada pressió. S'utilitzen aquests materials ceràmics ja que presenten efecte piezoelèctric de manera natural, al aplicar una tensió alterna al transductor es produeix un camp elèctric en el material ceràmic el qual pateix un canvi en el seu gruix. Aquesta variació del gruix es tradueix en una ona de pressió variant en el temps que quan es reflecteix en el final de la massa metàl·lica del transductor es transforma en una ona de propagació, generant un moviment de vibració que es pot programar per a què entri en ressonància.
- Booster: és l'element que es col·loca a continuació del transductor i la seva funció és amplificar o atenuar l'amplitud de vibració que prové del convertidor. Aquest element és opcional, ja que si no es necessita ni amplificar ni atenuar l'amplitud no s'utilitza i es col·loca el sonotrode directament. Si el guany del booster és superior a 1 aquest actua com a amplificador i si és inferior a 1 actua com a atenuador.
- Sonotrode: és l'element encarregat de transferir l'energia mecànica de vibració al material que es troba a la cambra de plastificació. També és el que s'encarrega d'aplicar la pressió necessària al material per a què aquests flueixi fins a emplenar tota la cavitat del motlle. Degut a la seva geometria, el sonotrode actua com a amplificador de l'amplitud de vibració provinent del booster o transductor, ja que normalment la secció d'entrada de la vibració és major que la secció de sortida. Els sonotrodes estan fabricats d'aliatges

d'alumini o de titani, ja que presenten una bona transmissió de l'energia ultrasònica i una baixa atenuació, a més estan dissenyats per tal que vibrin a una freqüència propera als 30kHz, i obtenir així l'energia necessària en el punt de contacte amb el material per poder dur a terme la fusió d'aquest.

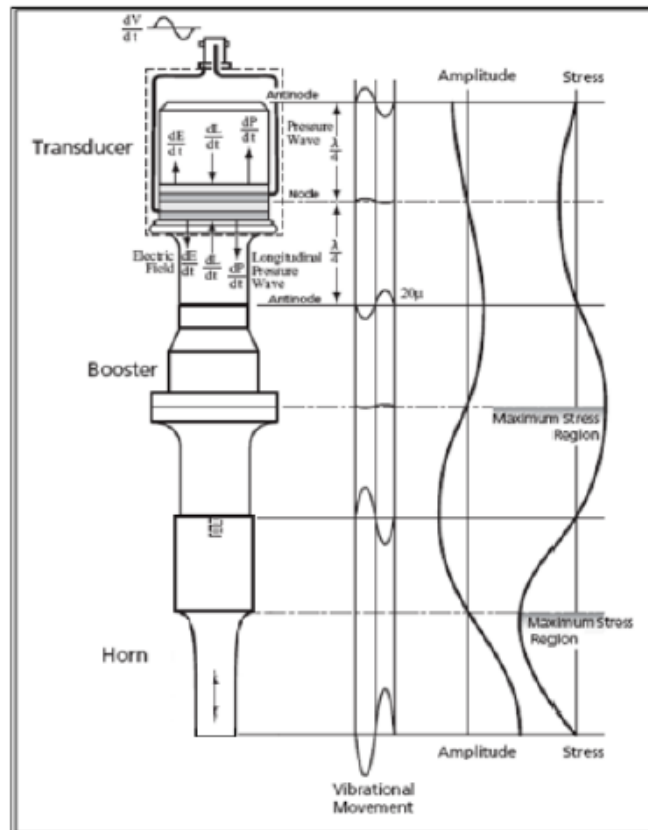


Figura 6: Esquema i funcionament el capçal ultrasònic (Font: GREP)

3. PROCEDIMENT DE DESENVOLUPAMENT D'UN SONOTRODE ESCALONAT

El procediment que es duu a terme per a l'obtenció d'un sonotrode escalonat està estructurat en quatre fases que es poden observar a la Figura 7.

- Fase 1: Mètodes analítics. La primera fase consisteix en l'obtenció d'un disseny preliminar a base d'aplicar uns mètodes analítics.
- Fase 2: Simulacions amb mètodes d'elements finits (FEM). A la segona fase s'obté el sonotrode amb el disseny preliminar en CAD per realitzar les simulacions FEM per tal d'arribar al disseny final.
- Fase 3: Fabricació i anàlisi dimensional. A la tercera fase es fabrica la peça amb el torn i es realitza un anàlisi dimensional i una segona simulació FEM.
- Fase 4: Ajustament de freqüència de vibració. A l'última fase es comprova que el sonotrode vibri a la freqüència desitjada amb el vibròmetre i si així és, s'obté el sonotrode final.

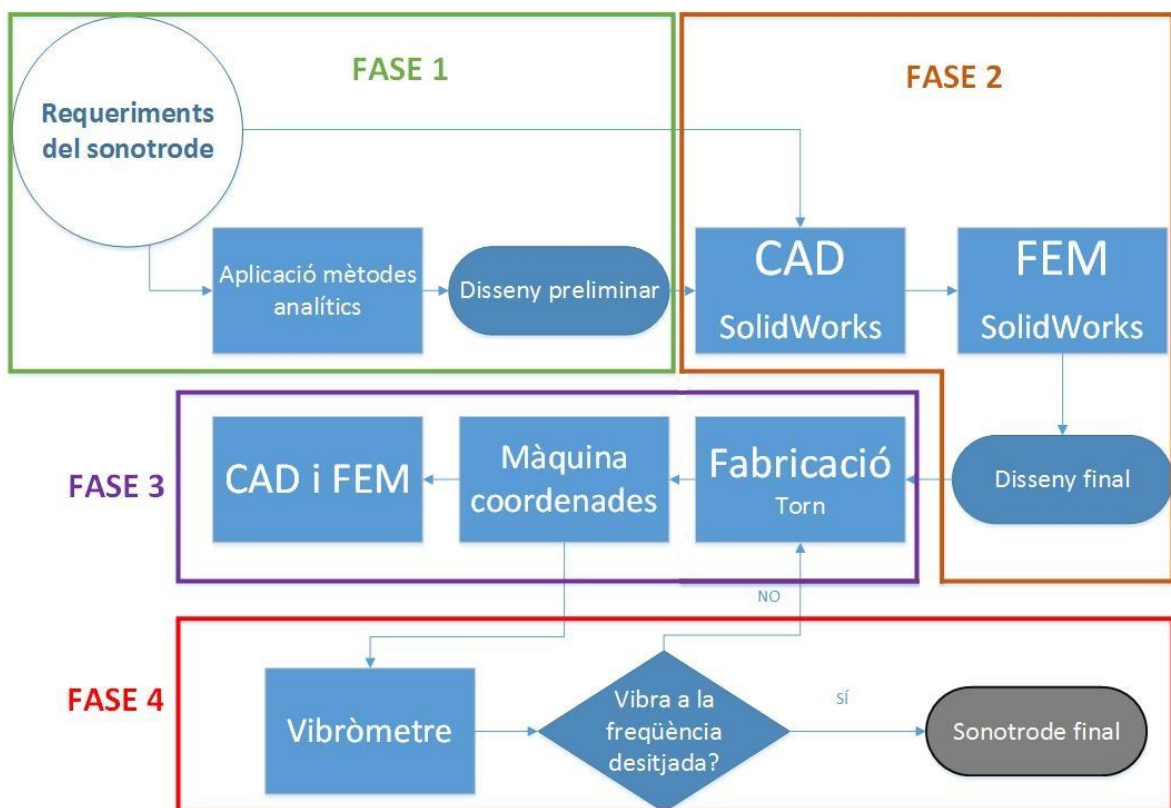


Figura 7: Esquema procediment de desenvolupament d'un sonotrode escalonat

A continuació s'expliquen les quatre fases detalladament.

3.1 Fase 1: Mètodes analítics

L'obtenció del disseny preliminar es desenvoluparà a través de l'aplicació de dos mètodes d'anàlisi, extrets de "ZVEI Handbook" [1] i "Nanu"[2]. Aquests dos mètodes són necessaris per indicar quina haurà de ser la geometria del sonotrode per tal d'aconseguir una vibració completament lineal amb els requeriments imposats. El primer dels mètodes és un mètode gràfic, mentre que el segon és un mètode numèric.

Abans de començar amb el disseny s'ha de tenir clar quins són els requeriments de la màquina. Tal i com hem dit, el sonotrode ha de vibrar a una freqüència que coincideixi amb la freqüència de funcionament del generador. A més a més, per obtenir un bon funcionament amb la màquina el diàmetre superior del sonotrode ha de ser de 20mm, i el diàmetre inferior ha de ser de 8mm. Segons "ZVEI Handbook"[1], pels sonotrodes escalonats la relació entre les dos àrees ens indica el guany d'amplitud. En la següent fórmula, ξ_1 i ξ_2 indiquen les amplituds màximes de vibració del sonotrode a l'entrada i a la sortida.

$$K_t = \frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$$

Per altre banda, un factor que també s'ha de tenir en compte alhora d'aplicar els mètodes analítics és el material utilitzat, ja que cada material té una velocitat del so diferent. En el cas dels sonotrodes fabricats amb aliatges de titani, la velocitat del so és de 4.900 m/s amb una variació de 100 m/s, i en el cas dels aluminis la velocitat del so és de 5.100 m/s amb una variació de 200 m/s.

Material	Sound velocity $v_0 \left(\frac{m}{s} \right)$	Variations $\left(\frac{m}{s} \right)$
Titanium alloy TiAlV64	4900	± 100
Aluminium alloys AlCuMg2 AlCuMGPb	5100 5000	± 100 ± 100
Aluminium	5100	± 200
Monel annealed and quenched	4350	± 150
1550 steel (RT 11) tempered	5250	± 50
Ferrotitanite WFN hardened	6950	± 150

Taula 1: Velocitat del so en diferents materials [1]

A la Figura 8 es pot veure la forma que tenen els sonotrodes escalonats. El subíndex 1 indica les dimensions de la secció d'entrada, la qual va subjectada a la màquina a través del booster i el transductor, i el subíndex 2 indica les dimensions de la secció de sortida. Com que D_1 i D_2 venen definits per la geometria de la màquina, els dos paràmetres que s'hauran de dissenyar per tal que el sonotrode vibri a la freqüència desitjada són L_1 i L_2 .

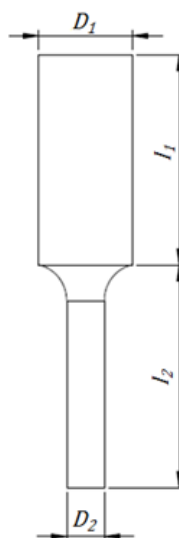


Figura 8: Esquema sonotrode escalonat

A continuació s'expliquen els dos mètodes per tal de trobar L_1 i L_2 .

3.1.1 ZVEI Handbook [1]

Tal i com s'ha dit abans, aquest mètode es soluciona gràficament. En funció del material utilitzat, la velocitat del so i l'àrea de la secció en el material obtenim la distància de la mateixa secció.

Com es pot veure a la Figura 9, a les abscisses s'hi troben les àrees de les seccions en centímetres quadrats, mentre que a les ordenades hi trobem a la dreta la velocitat del so en el material i a l'esquerra les longituds buscades. Relacionant l'àrea de la secció amb la velocitat de so del material s'acaba trobant la longitud de la secció estudiada.

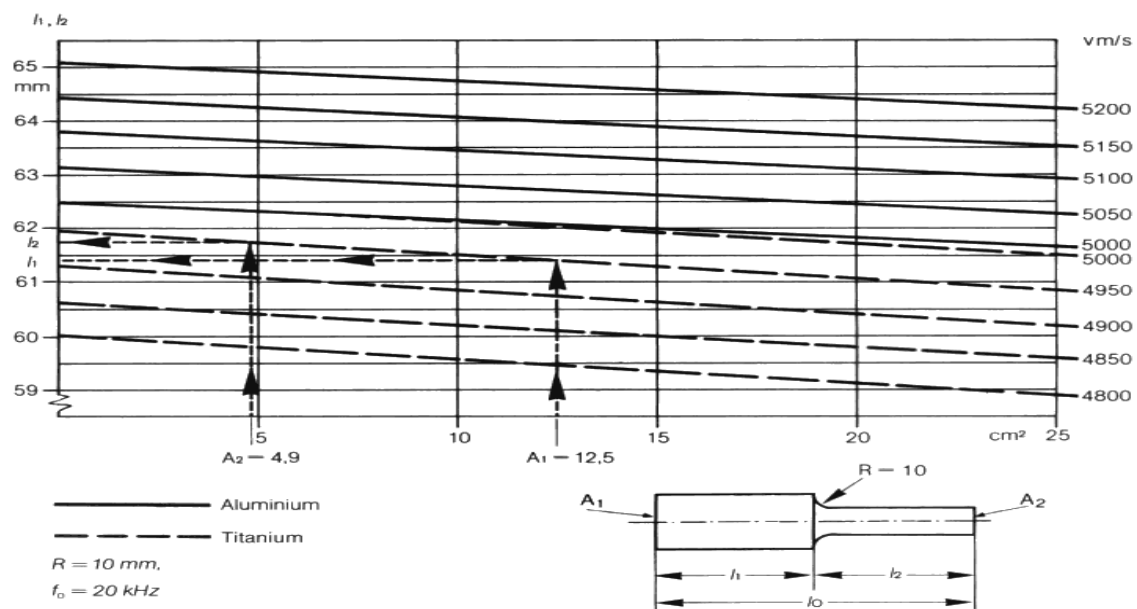


Figura 9: Aplicació del mètode gràfic ZVEI Handbook [1] per trobar L₁ i L₂

El gràfic que es disposa és per una freqüència de vibració de 20 kHz. Degut a que la freqüència que es necessita és de 30 kHz i no es disposa del seu gràfic, s'haurà de realitzar una aproximació per tal de trobar els resultats a la freqüència desitjada.

3.1.2 Nanu [2]

Segons aquest mètode, la distància del sonotrode que garanteix el mode vibracional a la freqüència desitjada ve determinada per la següent equació:

$$l_0 = l_1 + l_2 = k_1 \frac{v}{4 \cdot f} + k_2 \frac{v}{4 \cdot f}$$

On v és la velocitat del so en el material, f és la freqüència de vibració del sonotrode i, k_1 i k_2 són coeficients que depenen de les seccions transversals del sonotrode.

Per tal de calcular les distàncies del sonotrode, Nanu simplifica l'anterior equació en la següent:

$$l_1 = \frac{1.5}{k_u}$$

$$l_2 = \frac{1.6}{k_u}$$

On:

$$k_u = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Per tant, la longitud de cada secció es troba aplicant la següent fórmula.

$$l_0 = l_1 + l_2 = \frac{1.5}{k_u} + \frac{1.6}{k_u} = \frac{1.5 \cdot v}{2\pi \cdot f} + \frac{1.6 \cdot v}{2\pi \cdot f}$$

3.2 Fase 2: Simulacions amb mètodes d'elements finits (FEM)

Un cop obtingut el disseny preliminar s'ha de realitzar el dibuix a CAD amb les dimensions trobades en els mètodes anteriors. Degut a que en els mètodes analítics no es poden tenir en compte tots els requeriments inicials, com són els forats, ranures i xamfrans, s'aplicaran directament a la peça dibuixada a CAD. A la Figura 10 es poden veure les imatges del sonotrode escalonat amb el disseny preliminar i el mateix sonotrode amb els canvis corresponents als requeriments restants. Aquests canvis són l'aplicació del material, el forat i rosca superior, les ranures laterals i el xamfrà.

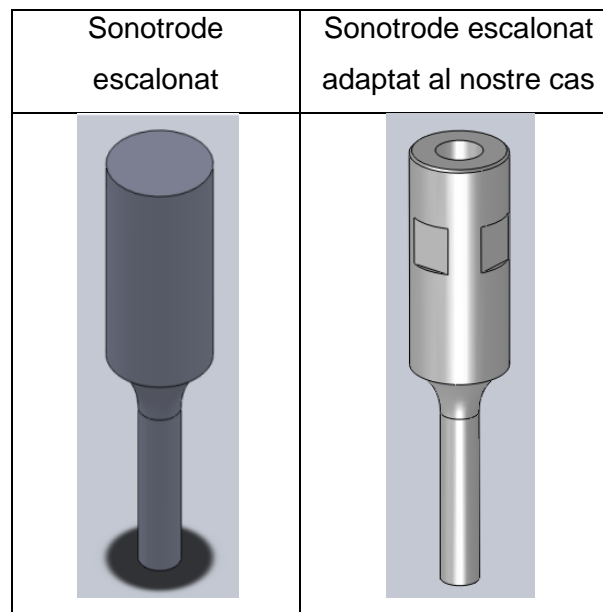


Figura 10: Evolució del disseny preliminar per adaptar-lo al nostre cas

Un cop aplicats aquests canvis es procedeix a realitzar la primera simulació amb un mètode d'elements finits gràcies al complement Simulation del programa SolidWorks. Aquestes simulacions consisteixen en trobar els modes de vibració més pròxims a una freqüència desitjada, que en el nostre cas serà la de vibració del generador que és de 30.000Hz. De modes de vibració n'hi ha un gran nombre, però no tots vibren linealment. Per tant, s'haurà de simular i modificar la geometria de la peça per a que tinguem un mode de vibració lineal entre 29.750Hz i 30.250Hz.. Un altre aspecte a tenir en compte és que entre aquestes freqüències no hi hagi més d'un mode de vibració, ja que la màquina per dur a terme el procés pot generar vibracions dins d'aquest interval i per tant no provoqui una vibració en un mode que no és el desitjat.

Com totes les simulacions d'elements finits, els resultats que s'obtenen són aproximacions que depenen de paràmetres per a que siguin més exactes o menys. En aquest cas, per a simular el sonotrode es crearà un mallat de regions triangulars, tal i com podem veure a la Figura 11. Com més petites són aquestes regions més exactes són els resultats finals, per tant es simularà la mateixa peça per diferents dimensions que ens permetran veure com varien els resultats en funció de la mida de les regions triangulars.

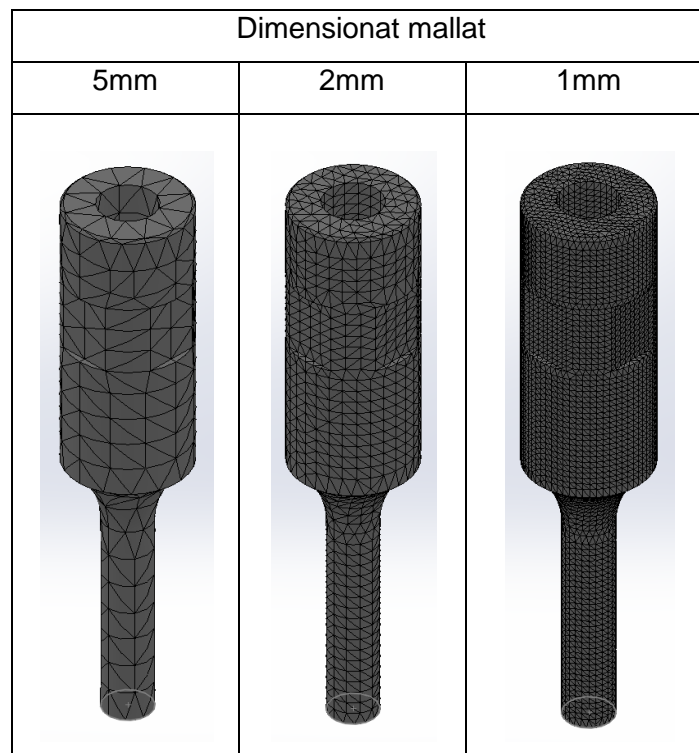


Figura 11: Sonotrodes mallats per a les mateixes regions de diferents dimensions

Per regir-nos com es modificarà el sonotrode per tal d'ajustar la freqüència de vibració de tots els modes, i per tant el mode de vibració lineal, es farà seguint uns coneixements anterior que es resumeixen a la Figura 12 extreta del document "Stepped sonotrode design for ultrasonic molding" [3], on es pot observar com al reduir la distància L_2 , per tant s'extreu material, la freqüència augmenta. El mateix passa amb el diàmetre, si el diàmetre es redueix, com que també s'està extraient material, la freqüència augmenta.

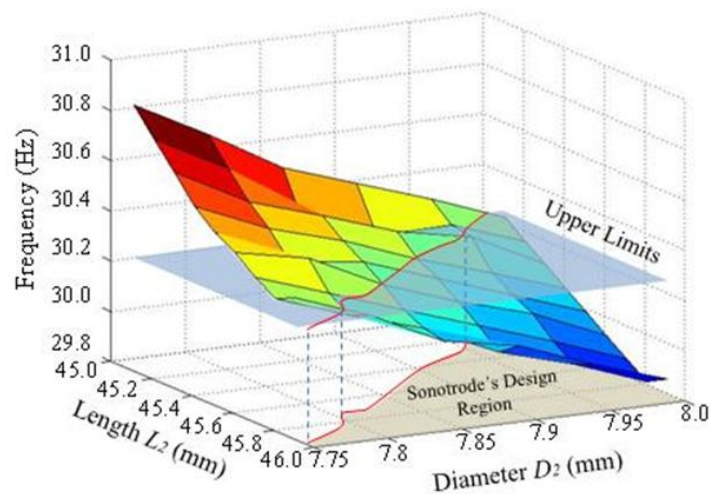


Figura 12: Dependència de la freqüència en funció de L_2 i D_2 [3]

Tal i com s'ha dit, el diàmetre de la secció d'entrada del sonotrode s'ha definit prèviament pel correcte funcionament de la màquina, igual que el de la secció de sortida, per aquest fet només s'haurà de modificar les distàncies de les dos seccions.

Per evitar una possible errada, es dissenyarà el sonotrode per a què la freqüència del mode de vibració lineal sigui inferior a 30.000Hz, així un cop fabricat es podrà escurçar la distància L_2 amb el torn i per tant fer augmentar la freqüència en un cas que no ens trobem dins del interval de vibració desitjat.

3.3 Fase 3: Fabricació i anàlisi dimensional

Un cop s'obté els resultats desitjats de les simulacions FEM, es realitzarà el plànol del sonotrode per tal de poder-lo fabricar. Les toleràncies que s'aplicaran a les cotes del sonotrode s'extrauran d'antics plànols d'altres sonotrodes.

Per tant, la tercera fase s'inicia amb la fabricació del sonotrode amb el torn. S'ha de tenir molta cura en complir les cotes i toleràncies esmentades per tal que el sonotrode sigui completament simètric, ja que si no és així la vibració desitjada no es complirà.

Un cop fabricat es procedeix a verificar les dimensions del sonotrode amb la màquina de medició per coordenades, la MMC Mitutoyo Crysta Apex 544 (Figura 13), la qual ens donarà les dimensions exactes del nostre sonotrode. Ens serà útil per tal de realitzar una última simulació FEM amb el SolidWorks i per tant comprovar si les dimensions reals són vàlides per obtenir una vibració lineal dins del interval de vibració desitjat.



Figura 13: Màquina de medició per coordenades Mitutoyo Crysta Apex 544

Aquesta màquina de coordenades està connectada a un ordinador a través d'un software i treballa palpant amb un sensor controlat per un *joystick* la superfície de la peça a mesurar.

En el nostre cas es mesuraran els diàmetres de les dos seccions i a més es farà una lectura del perfil. Per trobar els diàmetres el palpador localitza tres punts de la mateixa secció circular i per realitzar la lectura del perfil la màquina troba un conjunt de punts en línia recta separats una distància determinada que és escollida per l'usuari, com menor és aquesta distància més precisa és la lectura, llavors aquests punts són ajuntats tots i s'uneixen per traçar el perfil del sonotrode, tal i com es pot veure a la Figura 14. A més a més, els resultats es poden extreure en un arxiu Excel, i pel que fa el perfil es pot obtenir en un arxiu IGS que utilitzarem per dibuixar la peça real a CAD.

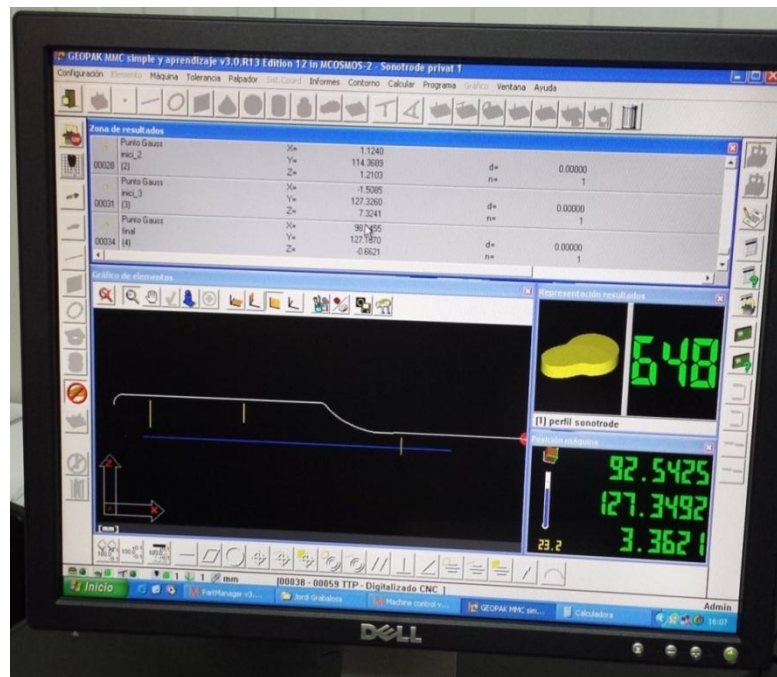


Figura 14: Imatge de la interfase de la màquina de medició per coordenades

A la Figura 15 es pot observar un dels resultats obtinguts d'un perfil de sonotrode amb la màquina de mesura per coordenades.

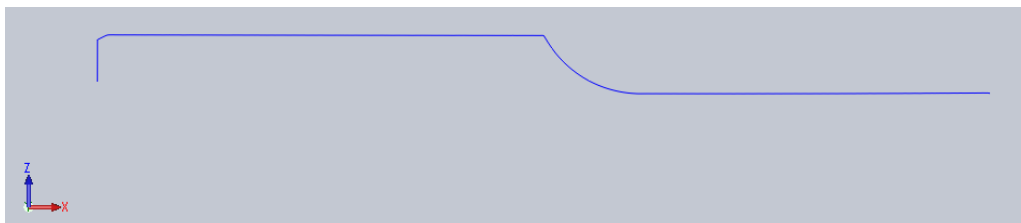


Figura 15: Perfil obtingut en format IGS

Un cop s'obté el perfil del sonotrode fabricat, s'ha de revolucionar en torn del seu eix principal i afegir-li els canvis en la geometria que no s'han tingut en compte en la mesura, com són el forat superior i les ranures laterals. Amb aquests canvis s'obté el sonotrode representat en CAD amb les mides reals i per tant està a punt per realitzar-se una última simulació FEM i comprovar si amb les dimensions obtingudes la vibració es troba dins del interval desitjat.

Si el resultat de la simulació FEM fos desfavorable, es procediria igualment a la següent fase per comprovar realment si vibra dins del interval desitjat, ja que tal i com

indica el seu nom, són simulacions i per tant podria ser que hi hagués alguna petita variació que ens fes canviar els resultats.

3.4 Fase 4: Ajustament de freqüència de vibració

L'última fase del procés de fabricació d'un sonotrode escalonat consisteix en fer vibrar el sonotrode fabricat unit al booster i el transductor de la màquina Sonorus 1G amb l'ajuda de l'analitzador de transductors TRZ. Aquest procés ens serveix per comprovar si realment el sonotrode vibra dins del rang desitjat i en un cas que no vibri fer els conseqüents ajustatges a la geometria per tal que vibri correctament.

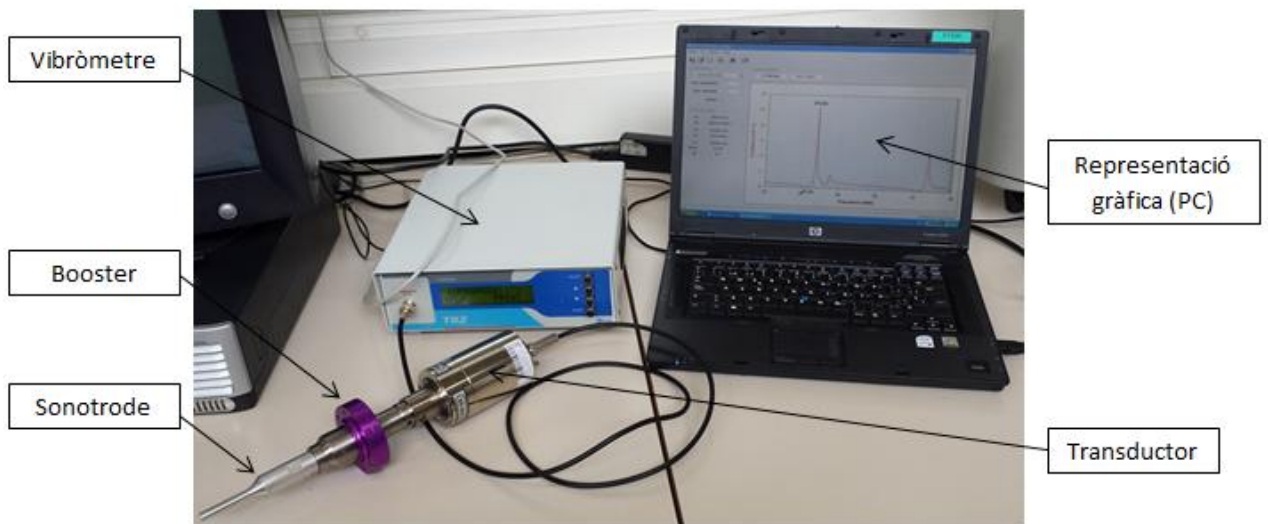


Figura 16: Muntatge analitzador de transductors TRZ

Aquest aparell (Figura 16) funciona connectat a un ordinador i mesura el mòdul de la impedància en funció de la freqüència aplicant un senyal. La freqüència del senyal varia dins d'un rang d'interès introduït per l'usuari, prenent valors discrets al llarg d'un determinat nombre de punts. Després de la digitalització, un algoritme de software integrat detecta les freqüències dels modes de vibració del rang estudiat.

A la Figura 17 es pot observar com a les abscisses de la gràfica s'hi indica la freqüència i en les ordenades la impedància en Ohms.

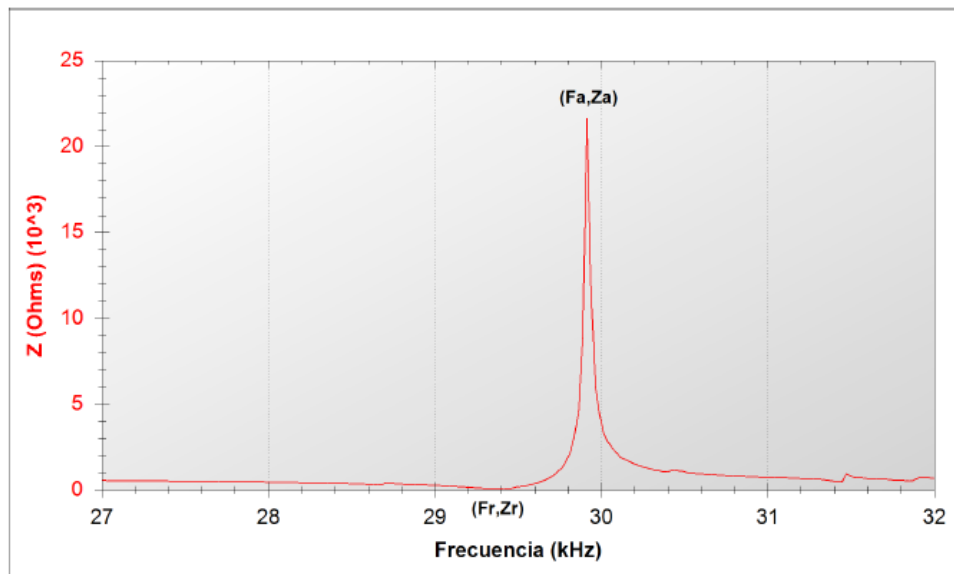


Figura 17: Gràfica resultants d'un anàlisi dels modes de vibració

El procediment que es seguirà alhora de fer l'ajustatge al sonotrode és el següent. Primer de tot s'ha de fer el primer anàlisi i extreure'n la primera gràfica; degut a que fabriquem el sonotrode més llarg de lo normal per evitar possibles errades, la primera freqüència de vibració ens donarà més baixa de lo desitjat. Per tant, s'anirà escurçant la punta de la secció de sortida del sonotrode amb el torn i alhora anirem realitzant lectures amb el vibròmetre fins aproximar la freqüència de vibració lineal als 30.000Hz. Primer s'extraurà de mil·límetre en mil·límetre, però quan els valors de freqüència siguin propers als de la freqüència desitjada haurem de tenir molta cura i fer passades més petites per tal de no passar-se i evitar que la freqüència augmenti més del desitjat.

4. DISSENY DE LES PUNTES DEL SONOTRODE

En aquest projecte s'han dissenyat quatre sonotrodes que es diferencien entre ells per la forma de les seves puntes. Els diferents dissenys de les puntes dels sonotrodes seran els següents.

- Sonotrode 1: Punta plana
- Sonotrode 2: Punta cònica amb un angle de 25°
- Sonotrode 3: Punta cònica amb un angle de 40°
- Sonotrode 4: Multi puntes

El material escollit per fabricar els sonotrodes és l'alumini 7075, conegut comercialment com "Zicral". És una aliatge d'alumini amb zinc i la seva composició és de 5,1-6% de zinc, 2,1-2,9% de magnesi, 1,2-2% de coure i petits percentatges de silici, ferro, manganès, crom, titani i altres metalls. L'alumini, conjuntament amb el titani, són molt bons conductor de l'energia ultrasònica però s'ha decidit fabricar-lo d'alumini degut a que el cost del material i de fabricació és més reduït en comparació al titani.

4.1 Sonotrode 1

S'ha decidit realitzar un sonotrode amb la punta plana perquè és amb la forma que es treballa actualment amb aquesta nova tecnologia amb la diferència que el nostre sonotrode estarà fabricat d'alumini en lloc de titani.

Ens serà útil per comparar els resultats obtinguts amb les altres formes de punta, i per tant arribar a una conclusió final, si amb els nous dissenys de punta s'obtenen resultats més satisfactoris o no.

A la Figura 18 es pot veure la forma de la punta del sonotrode 1.

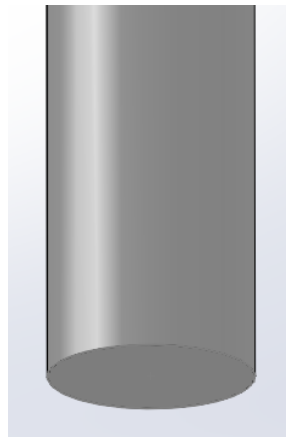


Figura 18: Disseny punta Sonotrode 1

4.2 Sonotrode 2

El segon sonotrode té una punta cònica amb un angle de conicitat de 25° i una profunditat de 4mm per tal d'obtenir una punta de dos superfícies de contacte amb el material a fondre (pellets). Com es pot veure a la Figura 19 la superfície plana tindrà un comportament semblant com la del sonotrode 1, però la superfície cònica lateral tindrà un comportament diferent degut a la seva inclinació.

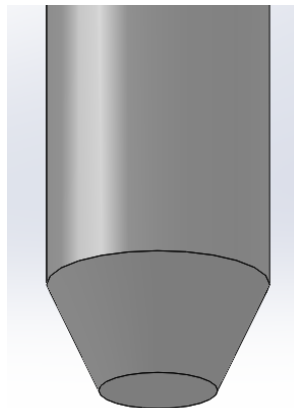


Figura 19: Disseny punta Sonotrode 2

4.3 Sonotrode 3

El sonotrode 3 també és un sonotrode amb la punta cònica però amb la diferència que l'angle de conicitat és de 40° i amb la mateixa profunditat de 4mm. A major angle de conicitat s'obté una punta més punxeguda i per tant la superfície plana és menor.

S'ha decidit dissenyar aquesta punta per tal de veure si disminuint aquesta superfície plana i per tant que la gran major part dels pellets es concentrin a la superfície cònica lateral obtenim resultats diferents.

A la Figura 20 es pot veure el resultat del disseny de la punta del sonotrode 3.

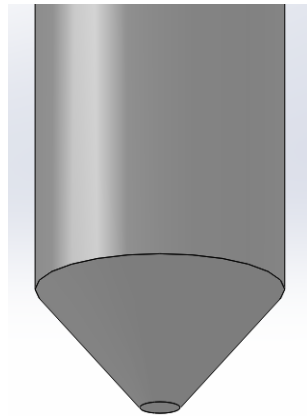


Figura 20: Disseny punta Sonotrode 3

4.4 Sonotrode 4

El quart sonotrode és el més diferent i innovador, s'ha decidit dissenyar una punta amb quatre piràmides simètriques entre elles de 2mm de profunditat. Amb aquest disseny s'intenta obtenir un major nombre de superfícies de contacte amb el material a fondre i per tant diferents direccions.

A la Figura 21 es pot veure la forma de la punta del sonotrode 4

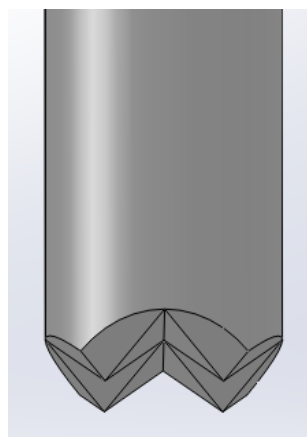


Figura 21: Disseny punta Sonotrode 4

Un aspecte que es pot tenir en compte entre els quatre sonotrodes diferents és la superfície de contacte que obtenim amb les diferents puntes. Aquest fet pot ser un factor a tenir en compte ja que en augmentar la superfície de contacte implica major quantitat de pellets en contacte amb el sonotrode, i possiblement es transmetrà major energia al material, tot i que la forma i inclinació d'aquesta superfície pot ser un inconvenient. A la Taula 2 s'hi poden trobar els valors de les superfícies de cada sonotrode, que han estat calculats amb l'ajuda del SolidWorks.

El primer sonotrode només té una superfície ja que és el pla i per tant només té una superfície circular com a àrea de contacte, però el segon i el tercer sonotrodes tenen dos àrees, la del cercle de la punta i la del con; finalment, l'últim sonotrode té quatre superfícies de contacte per cada una de les quatre puntes que conté. Es pot veure com la punta que té més superfície és la del segon sonotrode, ja que al tenir la conicitat petita la superfície lateral augmenta, en canvi la superfície del sonotrode cònic de 40° és inferior. També es pot veure com el sonotrode pla és el que té menys superfície, ja que només té una única cara de contacte.

	Sonotrode 1	Sonotrode 2	Sonotrode 3	Sonotrode 4
Àrea diferents superfícies (mm ²)	50,27 (circular)	85,06 (con)	76,17 (con)	3,22 x4
		14,32 (circular)	1,30 (circular)	3,22 x4
				5,66 x4
				5,66 x4
Total (mm ²)	50,27	99,38	77,47	71,04

Taula 2: Superfície de contacte de les diferents puntes dels sonotrodes

5. RESULTATS

Els resultats per a cada fase explicada a l'apartat 3. Procediment de desenvolupament d'un sonotrode escalonat i de cada un dels quatre sonotrode es troben a continuació.

5.1 Fase 1: Mètodes analítics

Aquesta fase només s'aplicarà una vegada i serà útil per als quatre sonotrodes que es fabricaran, ja que la forma de la punta no es pot tenir en compte alhora d'aplicar els mètodes que s'aplicaran a continuació.

Per tal de poder aplicar els mètodes analítics s'ha definit el material, les propietats d'aquest, la freqüència de vibració i els diàmetres de les seccions d'entrada i sortida.

Material	Alumini 7075
Velocitat del so en el material (m/s)	5.100
Mòdul elàstic (N/m²)	7,2·10 ¹⁰
Densitat (Kg/m³)	2.800
Coefficient de Poisson	0,33
Freqüència requerida (Hz)	30.000
Diàmetre entrada [D₁] (cm)	2
Diàmetre sortida [D₂] (cm)	0,8

Taula 3: Dades necessàries per aplicar els mètodes analítics

Si es relaciona l'àrea d'entrada i la de sortida obtenim el guany d'amplitud del nostre sonotrode tal i com s'indica a ZVEI Handbook [1].

$$K_t = \frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 = \left(\frac{2}{0,8}\right)^2 = 6,25$$

Un cop es tenen totes les dades necessàries procedim a calcular els valors de L₁ i L₂ per cada un dels mètodes comentats.

5.1.1 ZVEI Handbook [1]

Per aplicar aquest mètode gràfic són necessàries les àrees de les dos seccions i la velocitat del so en el material utilitzat. Un cop es tenen les dades trobem les

dimensions per a una freqüència de 20.000 Hz, ja que és la única gràfica que disposem per a calcular L_1 i L_2 .

Àrea secció entrada [A_1] (cm^2)	3,142
Àrea secció sortida [A_2] (cm^2)	0,503
Velocitat del so en el material (m/s)	5.100

Taula 4: Àrees i velocitat del so en el material del sonotrode a fabricar

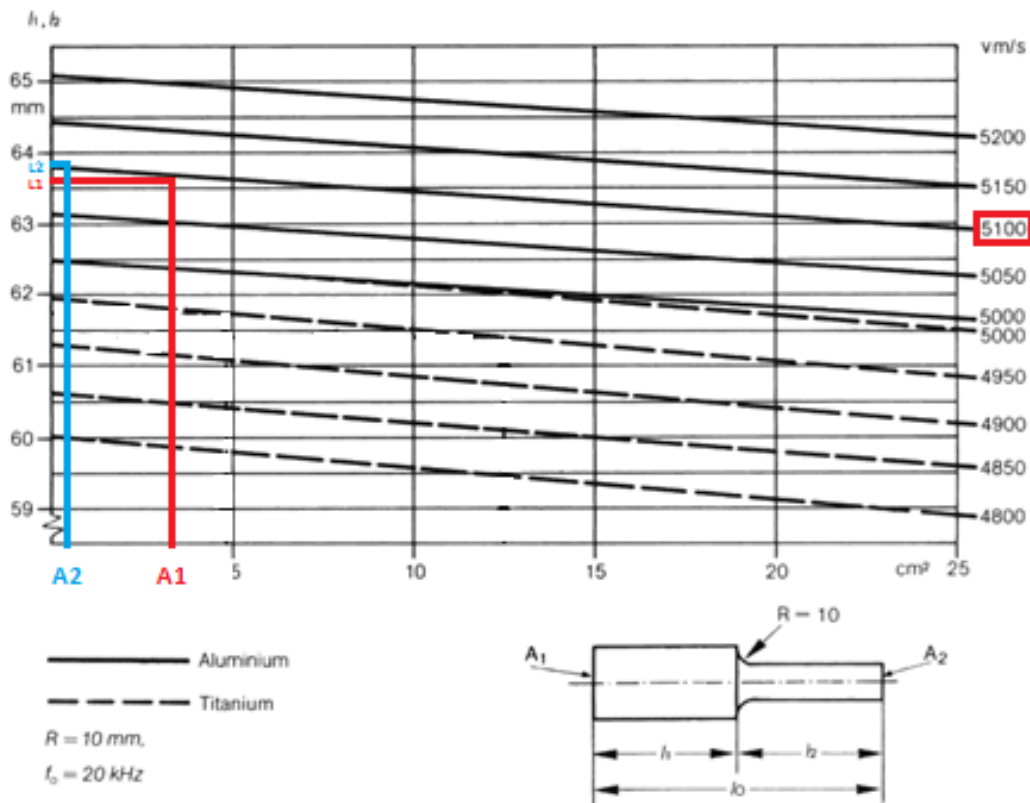


Figura 22: Aplicació del mètode ZVEI Handbook [1]

Els resultats obtinguts per a una freqüència de 20.000 Hz es troben a la Taula 5.

Per a una freqüència de 20.000Hz	
L_1 (mm)	63,55
L_2 (mm)	63,80

Taula 5: Resultats ZVEI Handbook [1] per a una freqüència de 20.000Hz

Com que la longitud del sonotrode és inversament proporcional a la freqüència que vibra tal i com ens indica la Figura 12 extreta del document "Stepped sonotrode design

for ultrasonic molding" [3] apliquem una regla de tres inversa i trobem les distàncies per una freqüència de 30.000 Hz.

A la Taula 6 es poden observar els resultats obtinguts.

Per a una freqüència de 30.000Hz	
L ₁ (mm)	42,37
L ₂ (mm)	42,53
L ₀ (mm)	84,90

Taula 6: Resultats ZVEI Handbook [1] per a una freqüència de 30.000Hz

5.1.2 Nanu [2]

Tal i com s'havia explicat, aquest mètode numèric troba les distàncies de les dos seccions a través de la següent expressió.

$$l_0 = l_1 + l_2 = \frac{1.5}{k_u} + \frac{1.6}{k_u}$$

On:

$$k_u = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

A través de la velocitat del so en el material i la freqüència requerida es troben els termes lambda i k_u, i els resultats es poden veure a la Taula 7.

v Velocitat del so en el material (m/s)	5.100
f Freqüència requerida (Hz)	30.000
λ	0,17
k_u	36,9599

Taula 7: Dades inicials i valors dels termes λ i k_u

Finalment, els valors obtinguts per aquest mètode de L1 i L2 s'observen a la Taula 8.

	Metres	Mil·límetres
L ₁ (mm)	0,040585	40,585
L ₂ (mm)	0,043290	43,290
L ₀ (mm)	0,083875	83,875

Taula 8: Resultats Nanu [2]

5.2 Fase 2: Simulacions amb mètodes d'elements finits (FEM)

Un cop s'obtenen els dos resultats dels mètodes d'anàlisi es poden començar les simulacions d'elements finits per tal de comprovar si el sonotrode amb les dimensions trobades vibra a la freqüència desitjada, en un cas d'obtenir una freqüència diferent a la desitjada s'haurà de modificar lleugerament la geometria del sonotrode.

Abans de simular s'ha d'escollir un dels dos resultats dels mètodes anteriors, aquest resultat es poden veure a la Taula 9.

	ZVEI	Nanu
L ₁ (mm)	42,37	40,585
L ₂ (mm)	42,53	43,290
L ₀ (mm)	84,90	83,875

Taula 9: Comparació resultats mètodes analítics

A simple vista es pot observar com hi ha diferències entre els dos mètodes. Per obtenir els resultats pel mètode ZVEI Handbook [1] s'ha hagut de realitzar aproximacions gràfiques i una regla de tres inversa per trobar la distància a la nostre freqüència ja que només es disposava del gràfic per una freqüència de 20kHz, per tant, es considera que els resultats del mètode Nanu [2] són més exactes i seran els que es faran servir per a realitzar el disseny en CAD i posteriorment les simulacions FEM que ens permetran comprovar si el nostre sonotrode vibra a 30.000 Hz.

Per tal de simplificar la fabricació i l'ajustatge dels quatre sonotrodes s'ha decidit dissenyar els quatre sonotrodes amb el mateix dimensionat pel que fa a la secció d'entrada. Per tant, l'únic que els diferenciarà serà la distància L₂ i el disseny de la punta.

El procediment que es seguirà per obtenir els resultats d'aquestes simulacions serà dibuixar els quatre sonotrodes a CAD amb les dimensions que ens indica el mètode Nanu i amb la punta que els hi correspon a cada un. Tal i com s'havia dit, se'ls hi hauran d'afegir els requeriments que no s'han pogut tenir en compte alhora d'aplicar els mètodes analítics, com són les ranures laterals, el xamfrà i el forat amb rosca superior. Llavors, un cop dibuixats ja es podran dur a terme les simulacions d'elements finits per tal d'ajustar les dimensions per a què el mode de vibració lineal es trobi justament per sota de 30.000Hz.

A continuació s'expliquen els resultats obtinguts de les simulacions d'elements finits pels quatre sonotrodes.

5.2.1 Sonotrode 1

Les simulacions s'han realitzat amb tres dimensionats del mallat tal i com es pot veure a la Figura 23.

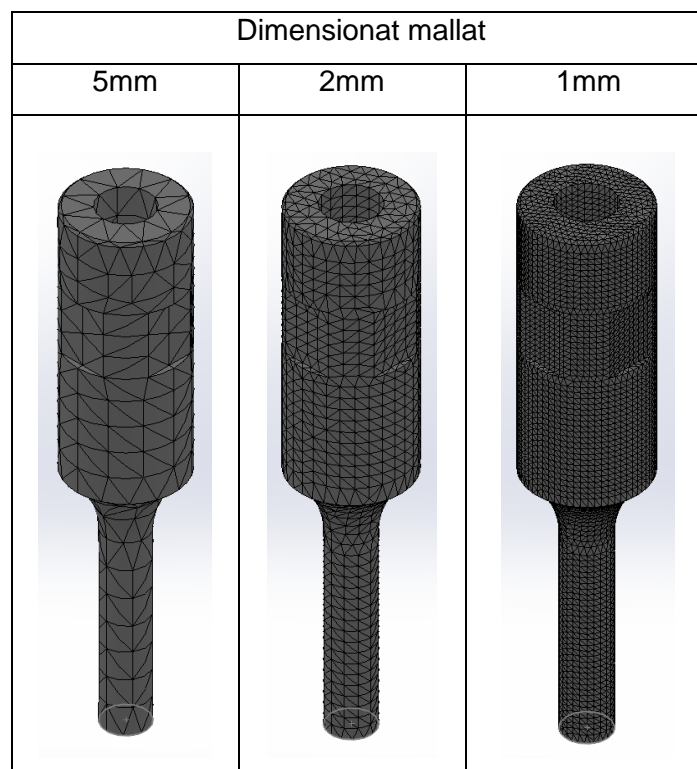


Figura 23: Dimensionat mallat per al Sonotrode 1

Després de realitzar diverses modificacions i simulacions, els resultats dimensionals obtinguts pel primer sonotrode es poden trobar a la Taula 10.

Dimensions Sonotrode 1	
L ₁ (mm)	46,6
L ₂ (mm)	45,8
L ₀ (mm)	92,4

Taula 10: Dimensions finals del disseny del Sonotrode 1

A la Taula 11 s'hi poden observar els resultats numèrics de les freqüències dels modes de vibració, i a la Figura 24 s'hi troben els resultats en imatges dels modes analitzats.

Modes	Dimensionat mallat		
	5mm	2mm	1mm
1	18417	19173	19379
2	27807	27851	27872
3	27823	27852	27872
4	29902	29885	29884
5	31065	31302	31355

Taula 11: Freqüències dels modes per als diferents mallats del Sonotrode 1

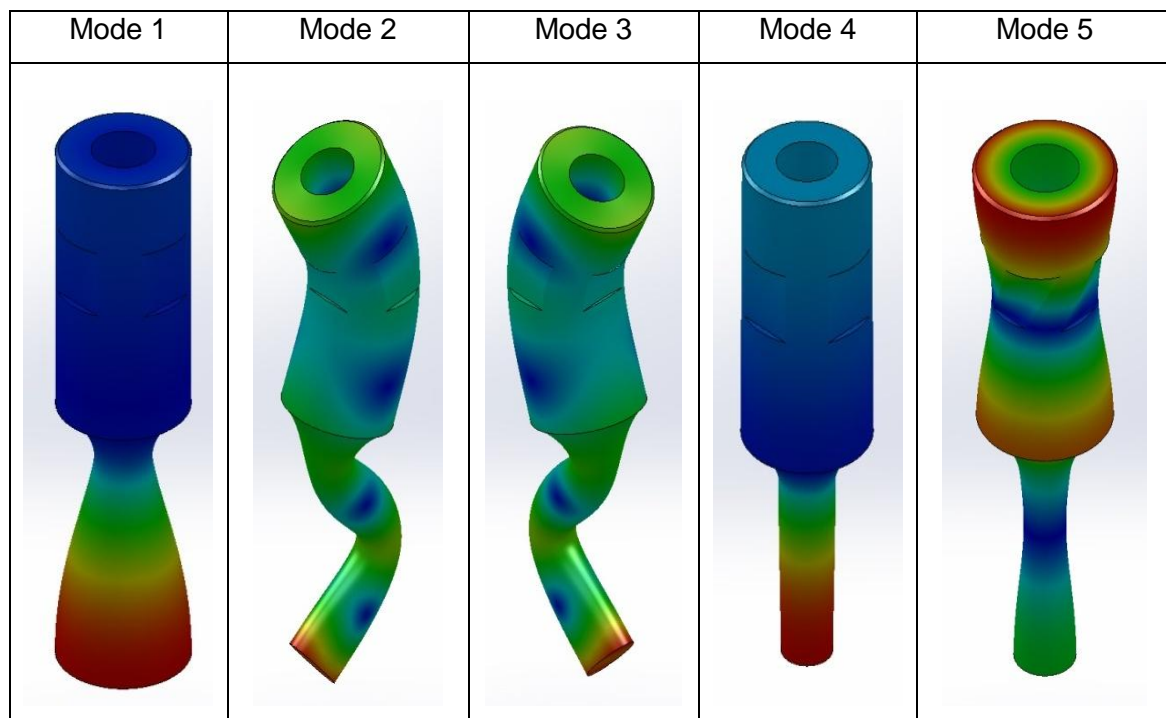


Figura 24: Representació visual dels modes de vibració del Sonotrode 1

Es pot observar com el mode de vibració lineal és el quart, ja que el sonotrode corresponent al quart mode de la Figura 24 no pateix cap deformació que no sigui la lineal i a més la freqüència de vibració és de 29.884Hz, un valor que es troba dins del rang desitjat. Un altre aspecte a tenir en compte és el fet de no tenir més d'un mode de vibració dins del rang desitjat de freqüència, fet que podem veure com es compleix.

A continuació a la Figura 25 es pot observar el sonotrode obtingut i el plànol de la mateixa peça el trobem a l'Annex A Plànols com a Sonotrode 1.

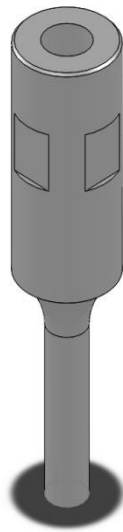


Figura 25: Disseny Sonotrode 1

5.2.2 Sonotrode 2

Per al segon sonotrode també s'han realitzat les simulacions amb tres dimensionats del mallat tal i com es pot veure a la Figura 26.

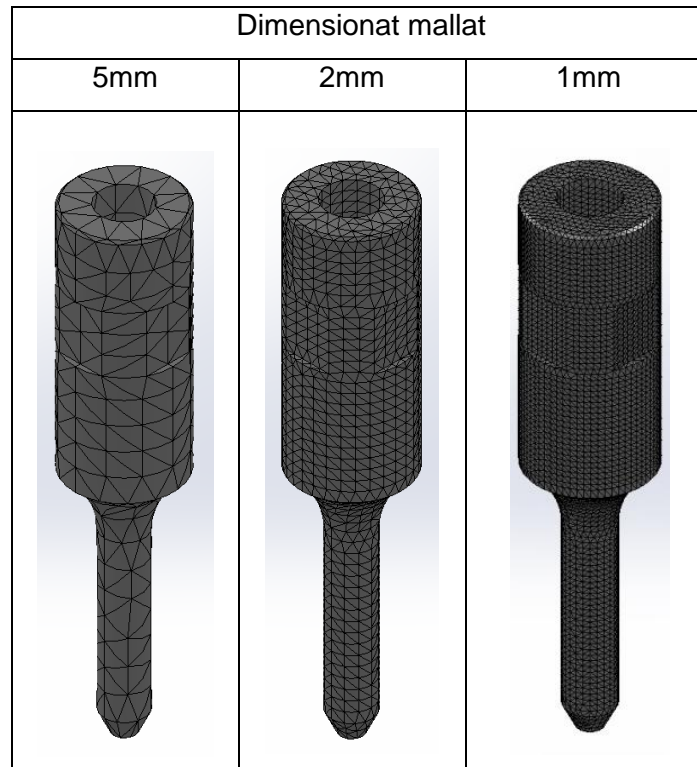


Figura 26: Dimensionat mallat per al Sonotrode 2

Després de realitzar diverses modificacions i simulacions, els resultats dimensionals obtinguts pel sonotrode cònic de 25° es poden trobar a la Taula 12.

Dimensions Sonotrode 2	
L ₁ (mm)	46,6
L ₂ (mm)	47,3
L ₀ (mm)	93,9

Taula 12: Dimensions finals del disseny del Sonotrode 2

A la Taula 13 s'hi poden observar els resultats numèrics de les freqüències dels modes de vibració, i a la Figura 27 s'hi troben els resultats en imatges dels modes analitzats. El mode que ens garanteix un bon funcionament per la màquina és el quart, ja que té una vibració completament lineal i la freqüència es troba dins del rang desitjat.

Modes	Dimensionat mallat		
	5mm	2mm	1mm
1	18909	19586	19806
2	27789	27828	27848
3	27794	27829	27848
4	29972	29954	29954
5	31086	31328	31378

Taula 13: Freqüències dels modes per als diferents mallats del Sonotrode 2

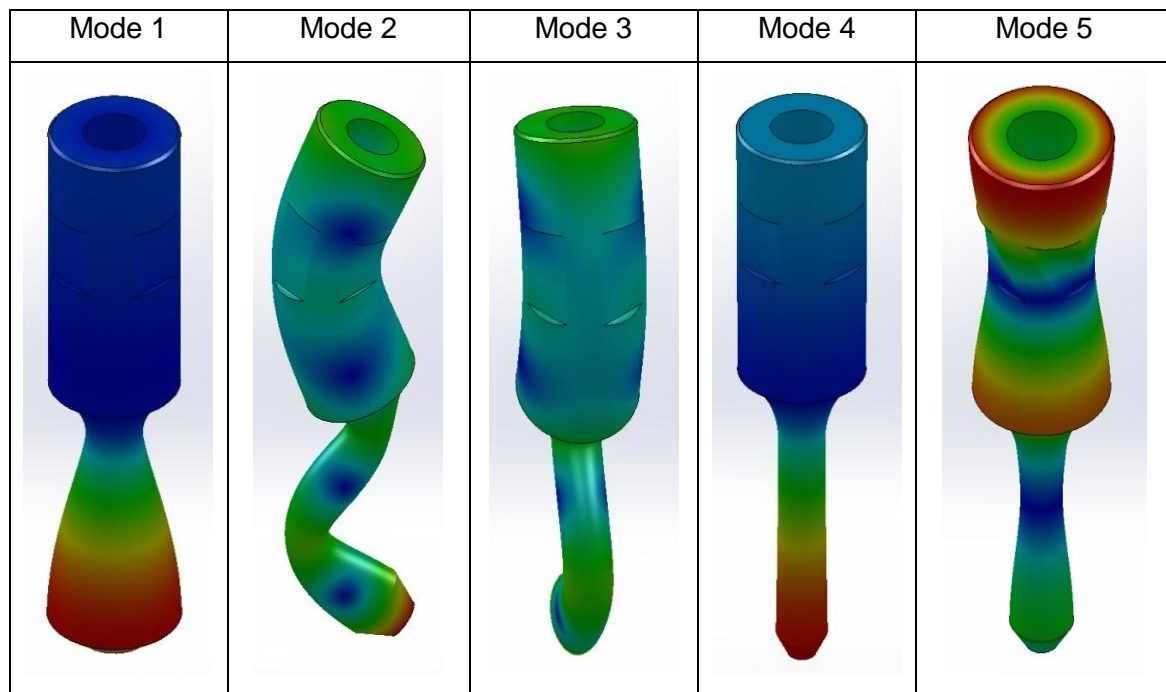


Figura 27: Representació visual dels modes de vibració del Sonotrode 2

A continuació a la Figura 28 es pot observar el sonotrode obtingut i el plànol de la mateixa peça el trobem a l'Annex A Plànols com a Sonotrode 2.

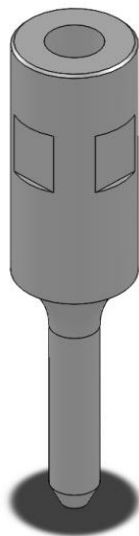


Figura 28: Disseny Sonotrode 2

5.2.3 Sonotrode 3

Per al tercer sonotrode també s'han realitzat les simulacions amb tres dimensionats del mallat tal i com es pot veure a la Figura 29.

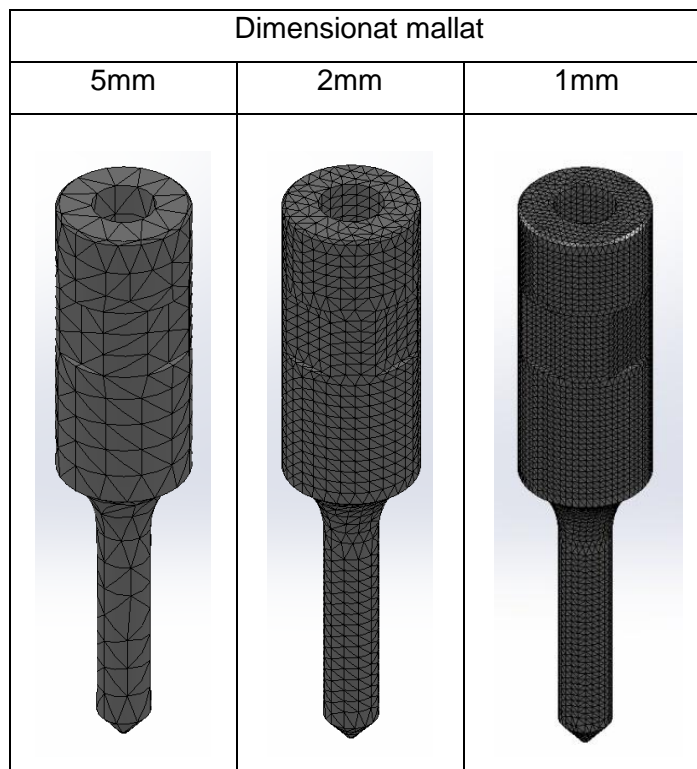


Figura 29: Dimensionat mallat per al Sonotrode 3

Després de realitzar diverses modificacions i simulacions, els resultats dimensionals obtinguts pel tercer sonotrode es poden trobar a la Taula 14.

Dimensions Sonotrode 3	
L ₁ (mm)	46,6
L ₂ (mm)	48,1
L ₀ (mm)	94,7

Taula 14: Dimensions finals del disseny del Sonotrode 3

A la Taula 15 s'hi poden observar els resultats numèrics de les freqüències dels modes de vibració, i a la Figura 30 s'hi troben els resultats en imatges dels modes analitzats. El mode que ens garanteix un bon funcionament per la màquina és el quart, ja que té una vibració completament lineal i la freqüència es troba dins del rang desitjat.

Modes	Dimensionat mallat		
	5mm	2mm	1mm
1	18842	19497	19679
2	27774	27813	27831
3	27784	27814	27831
4	29916	29893	29892
5	31074	31314	31364

Taula 15: Freqüències dels modes per als diferents mallats del Sonotrode 3

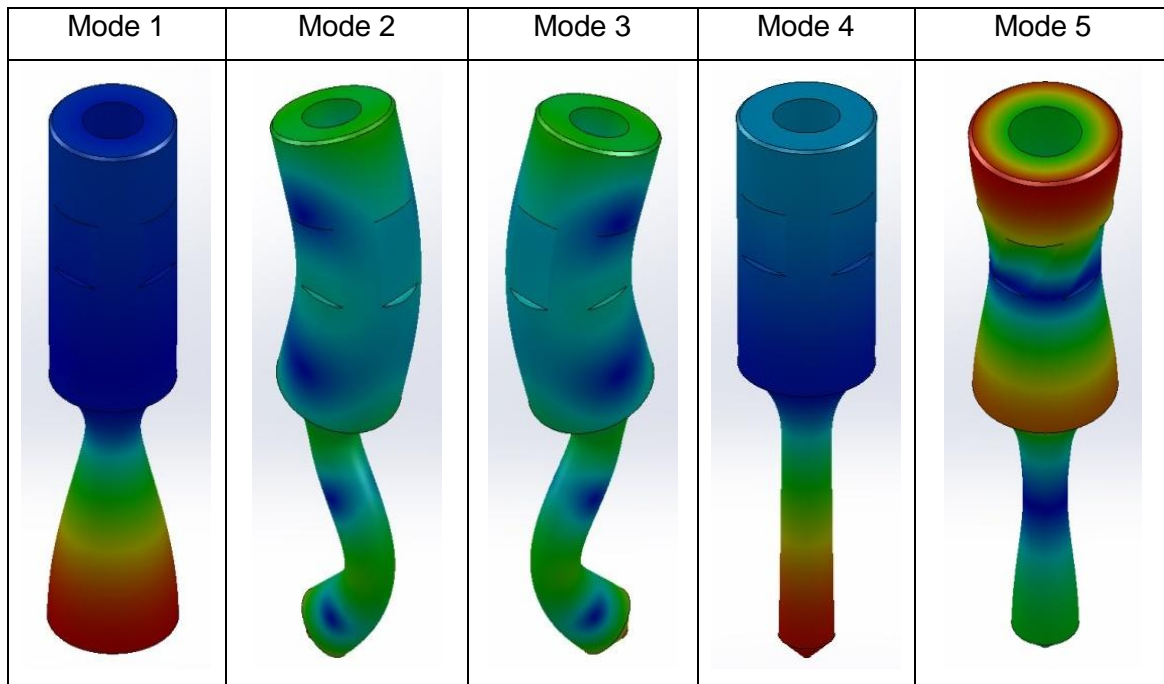


Figura 30: Representació visual dels modes de vibració del Sonotrode 3

A continuació a la Figura 31 es pot observar el sonotrode obtingut i el plànol de la mateixa peça el trobem a l'Annex A Plànols com a Sonotrode 3.

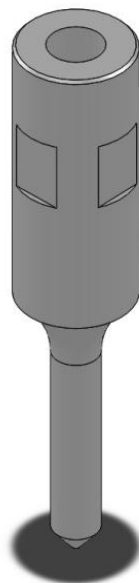


Figura 31: Disseny Sonotrode 3

5.2.4 Sonotrode 4

Les simulacions s'han realitzat amb tres dimensionats del mallat tal i com es pot veure a la Figura 32.

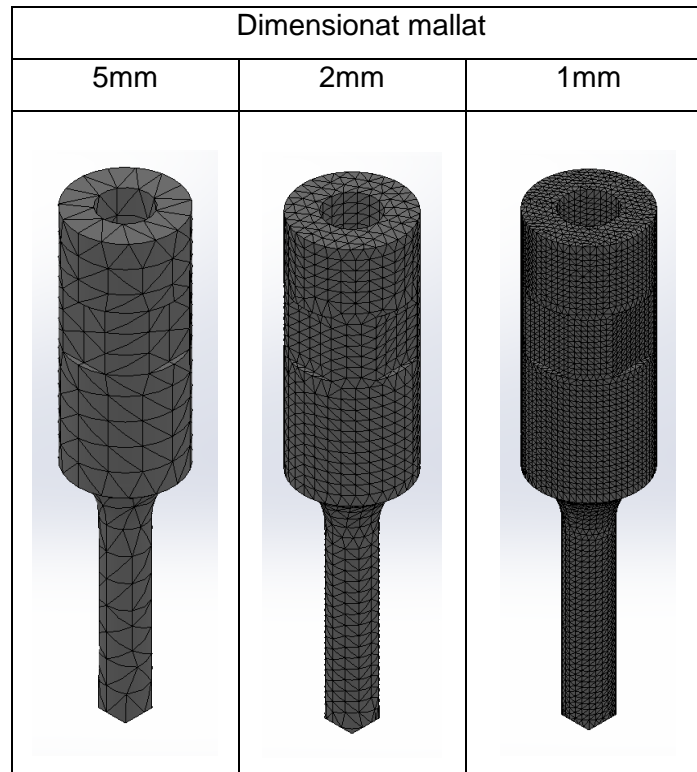


Figura 32: Dimensionat mallat per al Sonotrode 4

Després de realitzar diverses modificacions i simulacions, els resultats dimensionals obtinguts pel primer sonotrode es poden trobar a la Taula 16.

Dimensions Sonotrode 4	
L_1 (mm)	46,6
L_2 (mm)	46,3
L_0 (mm)	92,9

Taula 16: Dimensions finals del disseny del Sonotrode 4

A la Taula 17 s'hi poden observar els resultats numèrics de les freqüències dels modes de vibració, i a la Figura 33 s'hi troben els resultats en imatges dels modes analitzats. El mode que ens garanteix un bon funcionament per la màquina és el quart, ja que té una vibració completament lineal i la freqüència es troba dins del rang desitjat.

Modes	Dimensionat mallat		
	5mm	2mm	1mm
1	18629	19148	19336
2	28037	28089	28106
3	28050	28090	28106
4	29986	29953	29952
5	31143	31426	31473

Taula 17: Freqüències dels modes per als diferents mallats del Sonotrode 4

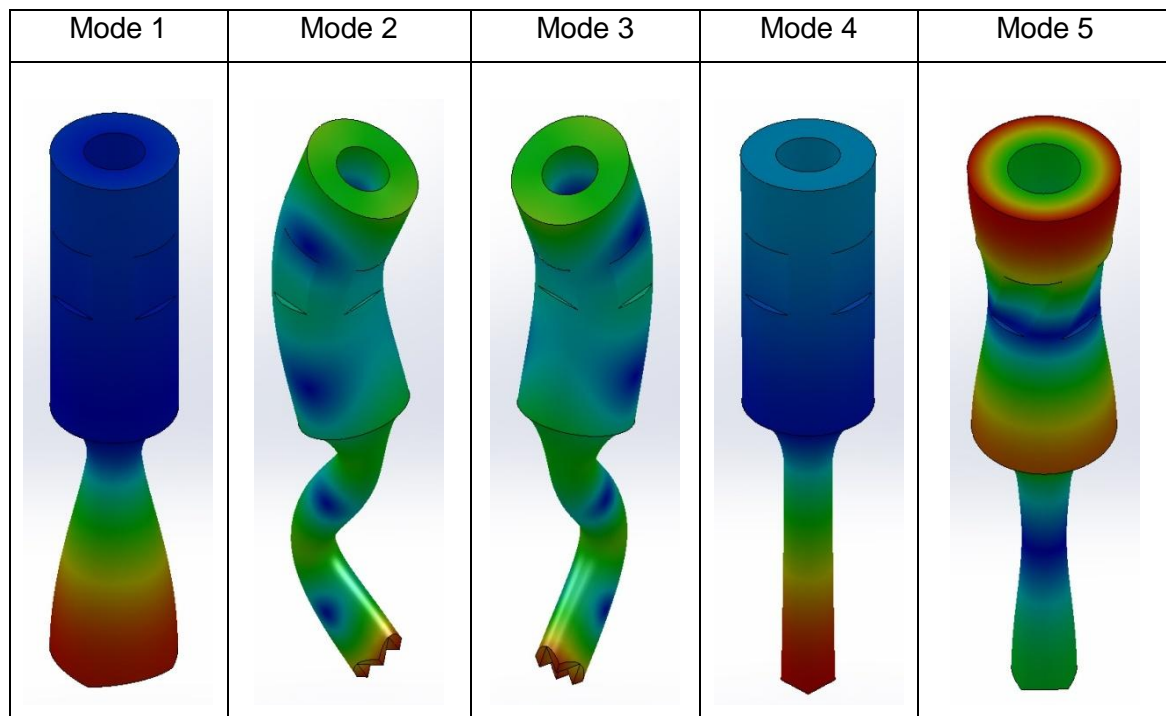


Figura 33: Representació visual dels modes de vibració del Sonotrode 4

A continuació a la Figura 34 es pot observar el sonotrode obtingut i el plànol de la mateixa peça el trobem a l'Annex A Plànols com a Sonotrode 4.

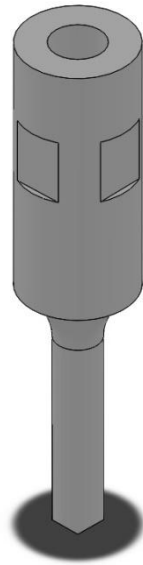


Figura 34: Disseny Sonotrode 4

5.3 Fase 3: Fabricació i anàlisi dimensional

Inicialment, l'objectiu del projecte era que la fabricació dels sonotrodes es dugués a terme al taller de la Universitat de Girona amb el torn de control numèric Okuma, però després de la realització d'unes proves preliminars a la fabricació del primer sonotrode el torn es va avariar. Degut a aquest fet la fabricació dels sonotrodes s'ha dut a terme a una empresa externa.

Per tal de reduir el cost de fabricació després d'aquest imprevist es va seguir una estratègia concreta. Es va encarregar la fabricació de cinc sonotrodes completament iguals amb la punta completament plana i amb la longitud total suficientment elevada per garantir que la freqüència de vibració lineal es trobés per sota de 30kHz, així llavors se'ls hi donarà la forma desitjada a la punta de cada sonotrode a través del torn manual del taller de la Universitat de Girona. Es va encarregar un sonotrode de més per si un dels quatre anteriors no funciona o s'espalla al moment de l'ajustatge.

El plànol dels sonotrodes encarregats a l'empresa externa es troba adjunt a l'apartat l'Annex A Plànols com a Sonotrode fabricació.

A la Figura 35 es poden observar els cinc sonotrodes un cop fabricats. A l'Annex B. Recull fotogràfic es poden observar més imatges dels sonotrodes fabricats.



Figura 35: Sonotrodes fabricats a l'empresa externa

Un cop s'han obtingut els sonotrodes s'ha realitzat un anàlisi dimensional de dos d'ells, escollits aleatòriament, per tal de verificar les dimensions i realitzar una última simulació d'elements finits (Veure imatges de l'anàlisi dimensional a l'Annex B. Recull fotogràfic).

Com que els resultats dels dos anàlisi dimensionals són exactament iguals, només es mostraran els resultats d'un d'ells dos.

Les principals dades que s'extreuen es poden veure a la Taula 18 que són el diàmetre D_1 i D_2 , i la longitud total L_0 . Si comparem els resultats obtinguts amb les cotes i les seves toleràncies que es demanaven als plànol del sonotrode encarregat podem veure que es compleixen totes menys la del diàmetre D_1 , que té un valor de 20,0461mm i segons la seva tolerància el valor màxim que podia prendre era de 20mm. Aquest error es pot donar per una mala mesura alhora de realitzar l'anàlisi dimensional o un error de fabricació; de totes maneres el procés s'ha tirat endavant ja que aquesta variació no afectarà en gran magnitud els resultats finals.

D_1 (mm)	20,0461
D_2 (mm)	7,9963
L_0 (mm)	99,654

Taula 18: Resultats anàlisi dimensional

A la Figura 36 es pot veure el perfil extret de l'anàlisi dimensional. A continuació ha sigut revolucionat amb el SolidWorks i se l'hi ha afegit el forat superior i les ranures laterals, ja que no s'han tingut en compte alhora de realitzar l'anàlisi dimensional. A la Figura 37 es pot veure el resultat obtingut a punt per a realitzar l'última simulació.

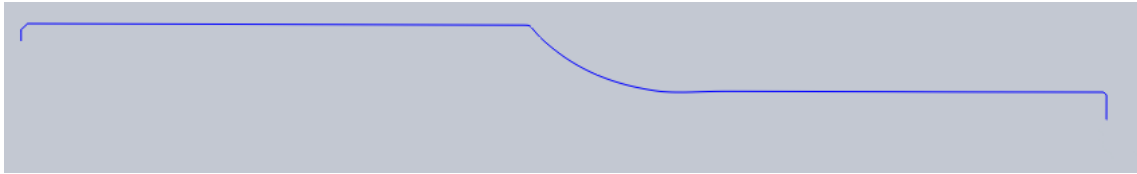


Figura 36: Perfil sonotrode obtingut de l'anàlisi dimensional

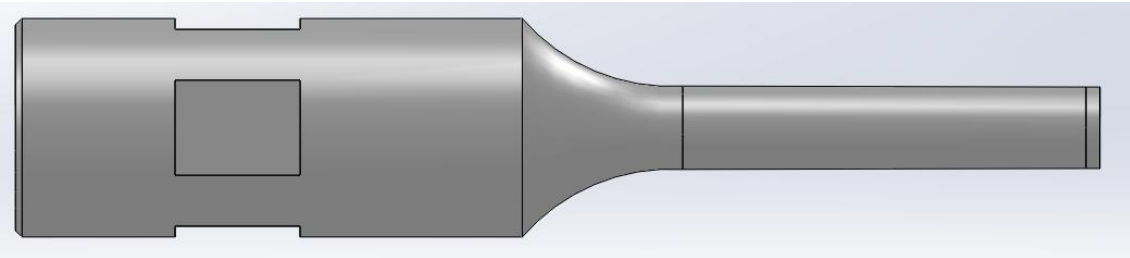


Figura 37: Perfil sonotrode revolucionat a CAD

Pel que fa la simulació d'elements finits, aquesta vegada s'ha decidit realitzar-la només per a un mallat triangular de 2mm, tal i com es pot veure a la Figura 38. Els resultats obtinguts per les simulacions d'elements finits es poden observar a la Taula 19, i a la Figura 39 s'hi troben els resultats en imatges dels modes analitzats.

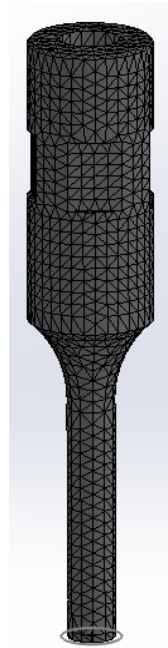


Figura 38: Sonotrode mallat per a la simulació FEM

Modes	Dimensionat mallat
	2mm
1	25.214
2	25.215
3	26.949
4	30.583
5	37.280

Taula 19: Freqüències de vibració dels modes del sonotrode fabricat

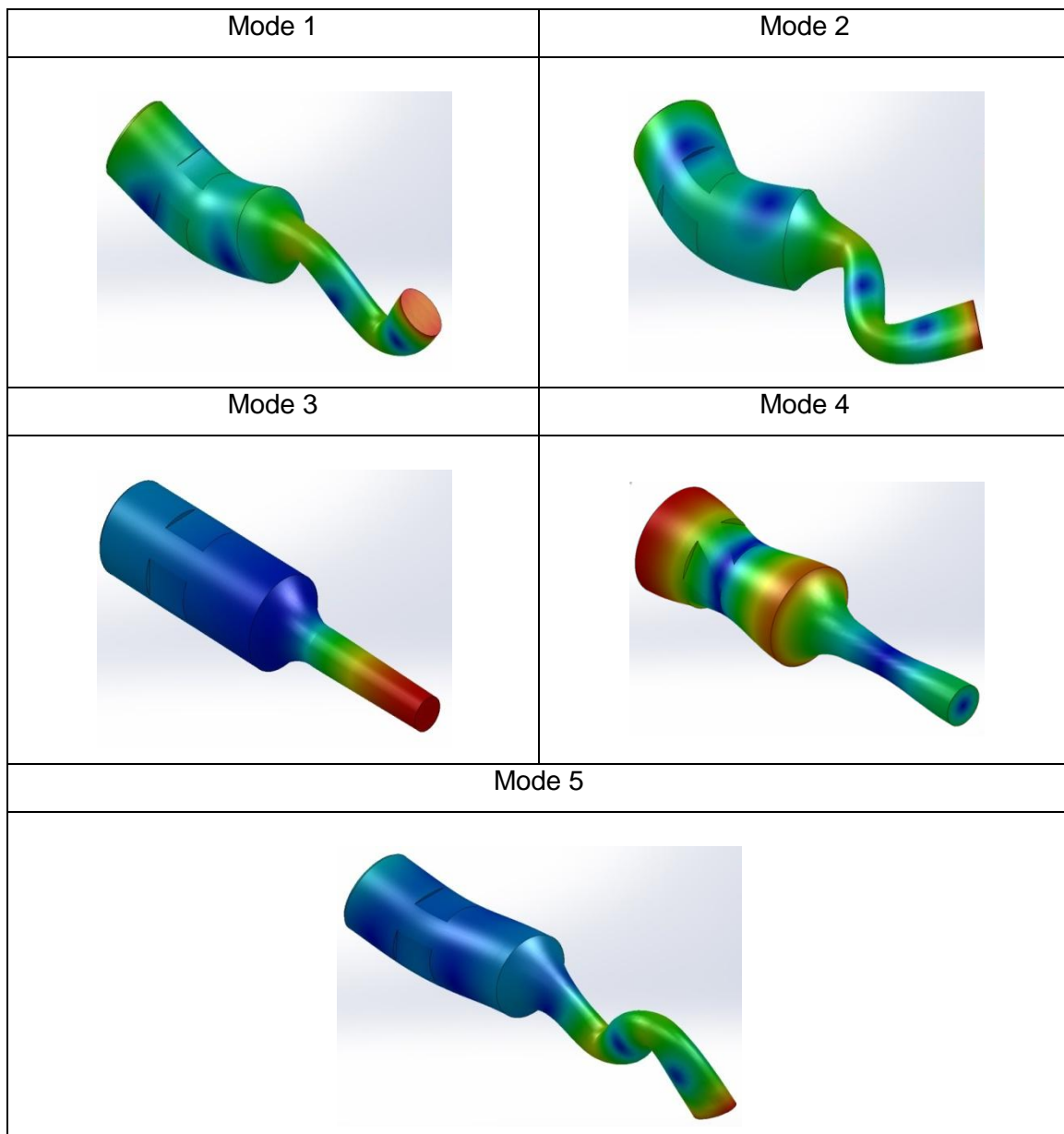


Figura 39: Representació visual dels modes de vibració del sonotrode fabricat

Tal i com es pot observar als resultats, el tercer mode és el de vibració lineal, el qual vibra a una freqüència de 26.949Hz, una freqüència suficientment menor als 30.000Hz per tal que a la següent fase es pugui donar forma a les puntes de cada sonotrode i extreure el material necessari per a què la vibració es trobi dins del rang desitjat.

5.4 Fase 4: Ajustament de freqüència de vibració

El procediment seguit en aquesta quarta i última fase ha sigut realitzar un primer anàlisi de vibració per al sonotrode, a continuació s'ha portat per primera vegada al

torn manual per tal de donar la forma desitjada a la punta i realitzar un altre anàlisi per comprovar a quina freqüència es troba el mode de vibració lineal. A partir d'aquí s'ha seguit eliminant material amb el torn tot mantenint la forma de la punta i realitzant els anàlisis de vibració fins a aconseguir que el mode de vibració es trobi dins del rang de vibració desitjat (Veure imatges de l'ajustament a l'Annex B. Recull fotogràfic).

Als següents apartats es poden observar els resultats per a cada sonotrode. Les gràfiques que s'hi troben representen com la freqüència de vibració augmenta a mesura que s'extreu material, per aquest fet representem la freqüència de vibració en funció de la longitud total del sonotrode, L_0 .

5.4.1 Sonotrode 1

S'ha finalitzat l'ajustament amb una longitud total L_0 de 92,8mm i una vibració completament lineal de 29.921,9 (Taula 20).

L_0 (mm)	Freqüència (Hz)
99,68	28238,9
98,45	28815,7
98,25	28869,4
97,7	28952,0
96,7	29215,4
96,3	29336,9
95,4	29475,0
94,5	29720,8
93,5	29848,1
93	29914,8
92,8	29921,9

Taula 20: Ajustament freqüència vibració Sonotrode 1

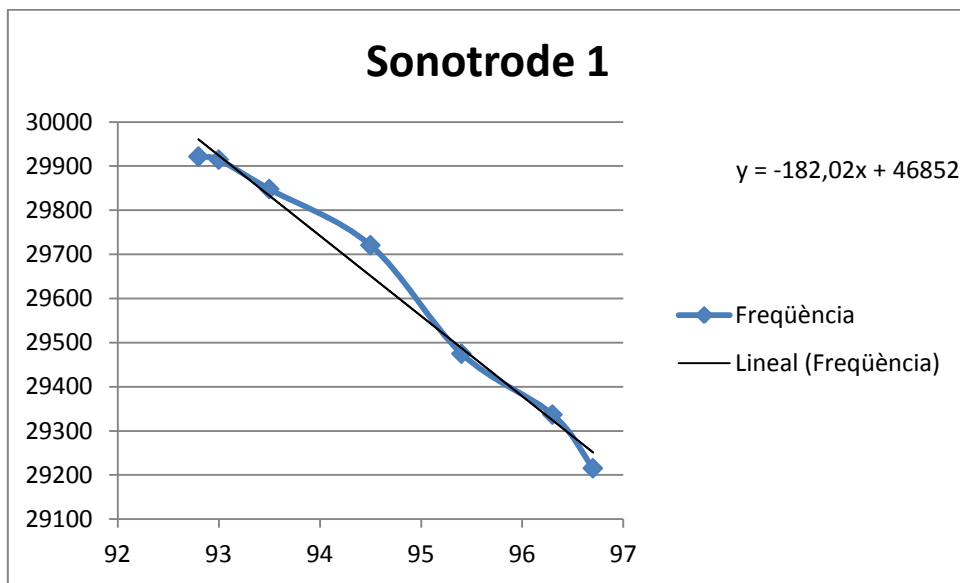


Figura 40: Gràfica ajustament freqüència vibració Sonotrode 1

A la Figura 41 es pot veure el resultat obtingut per l'últim anàlisi de vibració.

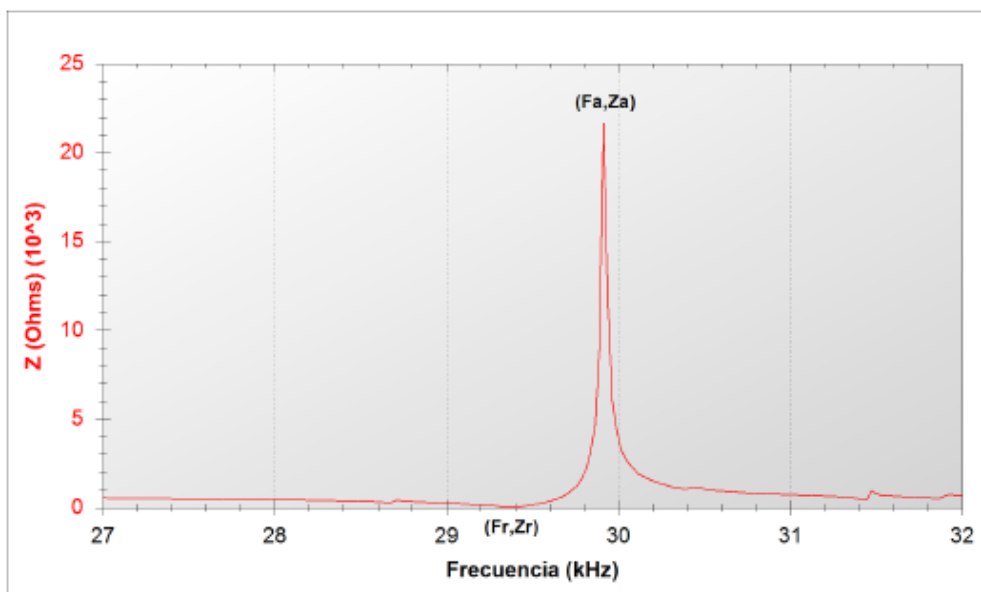


Figura 41: Representació gràfica últim anàlisi freqüència Sonotrode 1

5.4.2 Sonotrode 2

S'ha finalitzat l'ajustament amb una longitud total L_0 de 94,4mm i una vibració completament lineal de 29.921,1 Hz (Taula 21).

L_0 (mm)	Freqüència (Hz)
99,68	28264,0
97,8	29338,0
96,8	29525,2
95,8	29728,2
94,4	29921,1

Taula 21: Ajustament freqüència vibració Sonotrode 2

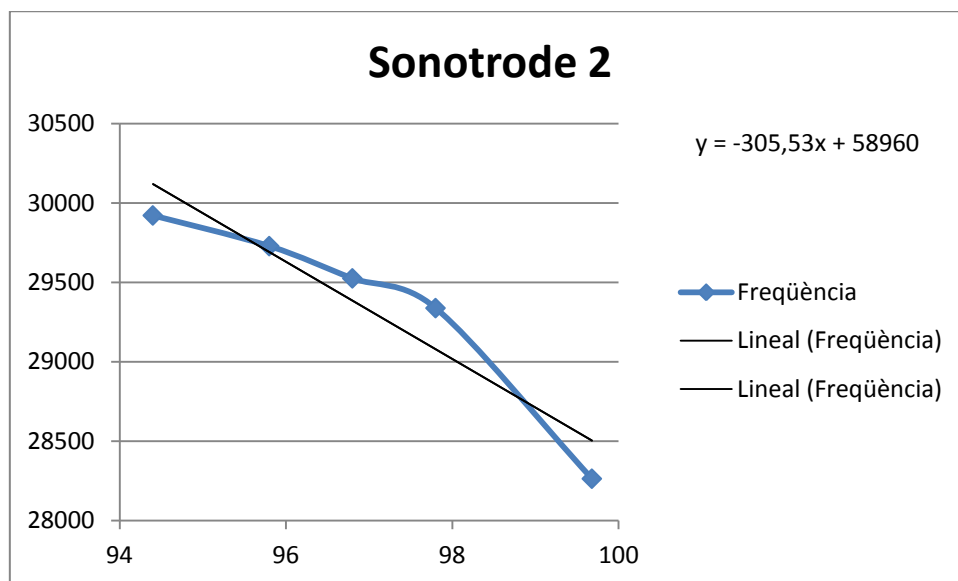


Figura 42: Gràfica ajustament freqüència vibració Sonotrode 2

A la Figura 43 es pot veure el resultat obtingut per l'últim anàlisi de vibració.

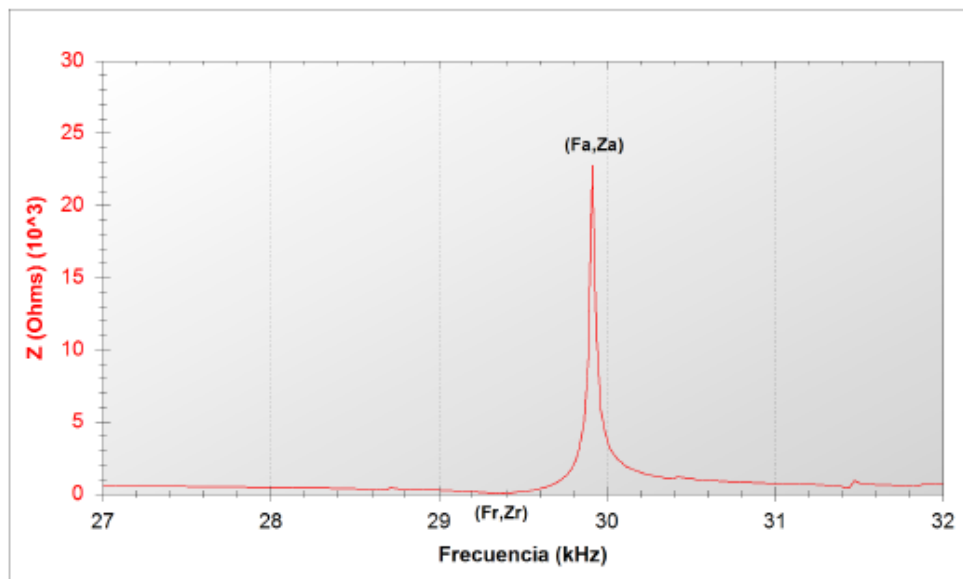


Figura 43: Representació gràfica últim anàlisi freqüència Sonotrode 2

5.4.3 Sonotrode 3

S'ha finalitzat l'ajustament amb una longitud total L_0 de 94,6mm i una vibració completament lineal de 29.971,0 Hz (Taula 22).

L_0 (mm)	Freqüència (Hz)
99,68	28387,8
96,2	29669,6
94,9	29887,5
94,6	29971,0

Taula 22: Ajustament freqüència vibració Sonotrode 3

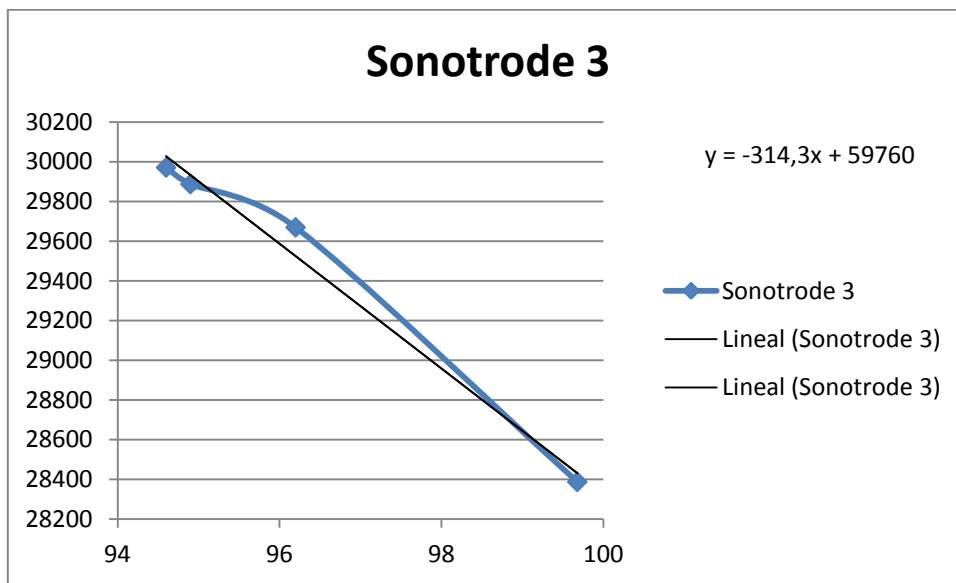


Figura 44: Gràfica ajustament freqüència vibració Sonotrode 3

A la Figura 45 es pot veure el resultat obtingut per l'últim anàlisi de vibració.

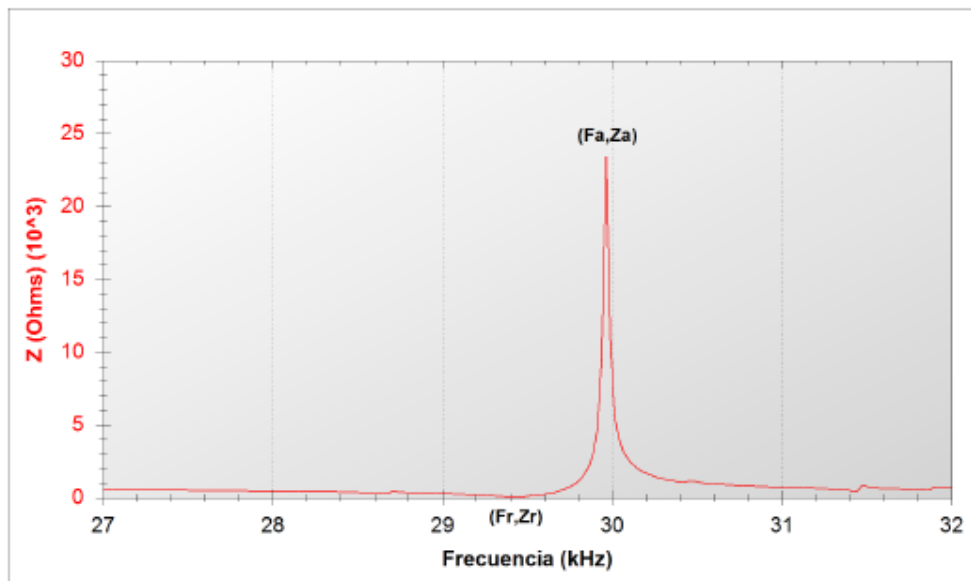


Figura 45: Representació gràfica últim anàlisi freqüència Sonotrode 3

5.4.4 Sonotrode 4

S'ha finalitzat l'ajustament amb una longitud total L_0 de 94,6mm i una vibració completament lineal de 29.918,1 Hz (Taula 23).

L_0 (mm)	Freqüència (Hz)
99,68	28311,3
95,6	29743,8
94,6	29918,1

Taula 23: Ajustament freqüència vibració Sonotrode 4

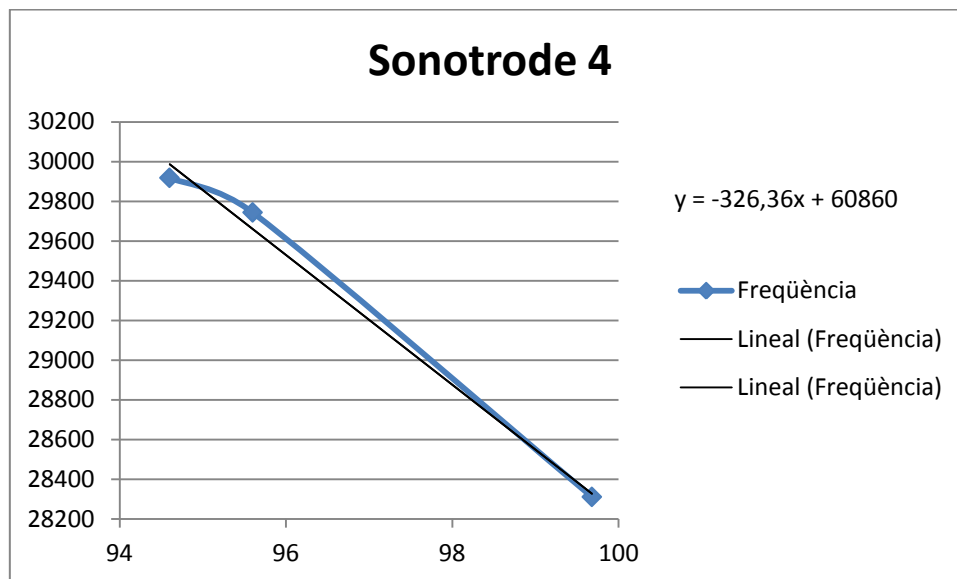


Figura 46: Gràfica ajustament freqüència vibració Sonotrode 4

A la Figura 47 es pot veure el resultat obtingut per l'últim anàlisi de vibració.

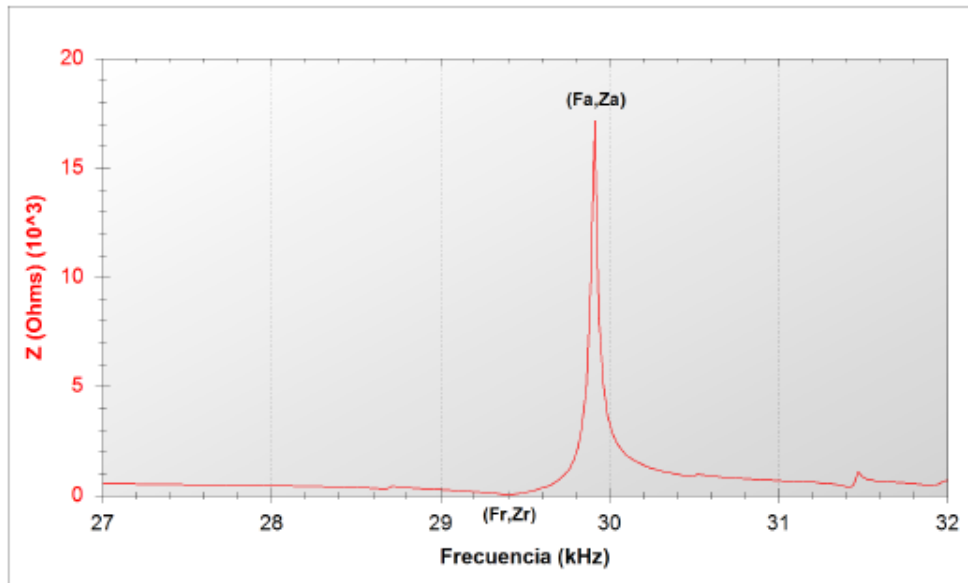


Figura 47: Representació gràfica últim anàlisi freqüència Sonotrode 4

6. EXPERIMENTACIÓ I PROVES

S'ha decidit realitzar unes proves un cop s'obtenen els quatre sonotrodes ajustats. Aquestes proves seran útils primer per comprovar si realment els sonotrodes funcionen a la màquina Sonorus 1G i posteriorment per intentar extreure alguna conclusió sobre el comportament dels quatre sonotrodes, i per tant poder-los comparar entre ells.

Per tant, primer s'ha comprovat els sonotrodes a la Sonorus 1G, de la qual es pot afirmar que tots quatre han estat correctament fabricats i ajustats, ja que tots ells funcionen correctament amb la màquina i serien capaços de realitzar un cicle per a produir una micro peça de plàstic.

Un cop comprovat el correcte funcionament dels sonotrodes, es realitzarà un experiment per a tots ells, tal i com s'ha dit serà útil per comparar el comportament de les quatre formes de punta diferents. L'experiment consisteix en introduir la punta del sonotrode en un recipient amb aigua al mateix moment que aquest sonotrode es troba connectat a la màquina. A continuació s'activa la vibració del sonotrode i s'extreuen imatges del comportament de les bombolles que es crearan a la punta d'aquest. Amb les imatges de cada sonotrode es podrà comparar la quantitat de bombolles, la direcció d'aquestes i si es crea alguna turbulència o similar. A la Figura 48 es pot observar el muntatge per a realitzar l'experiment comentat. Tal i com es pot veure, s'ha utilitzat una peça de tela de color amb una llum de fons per tal de poder observar les bombolles creades amb major claredat. La càmera utilitzada per a captar les imatges és una GoPro Hero 3.

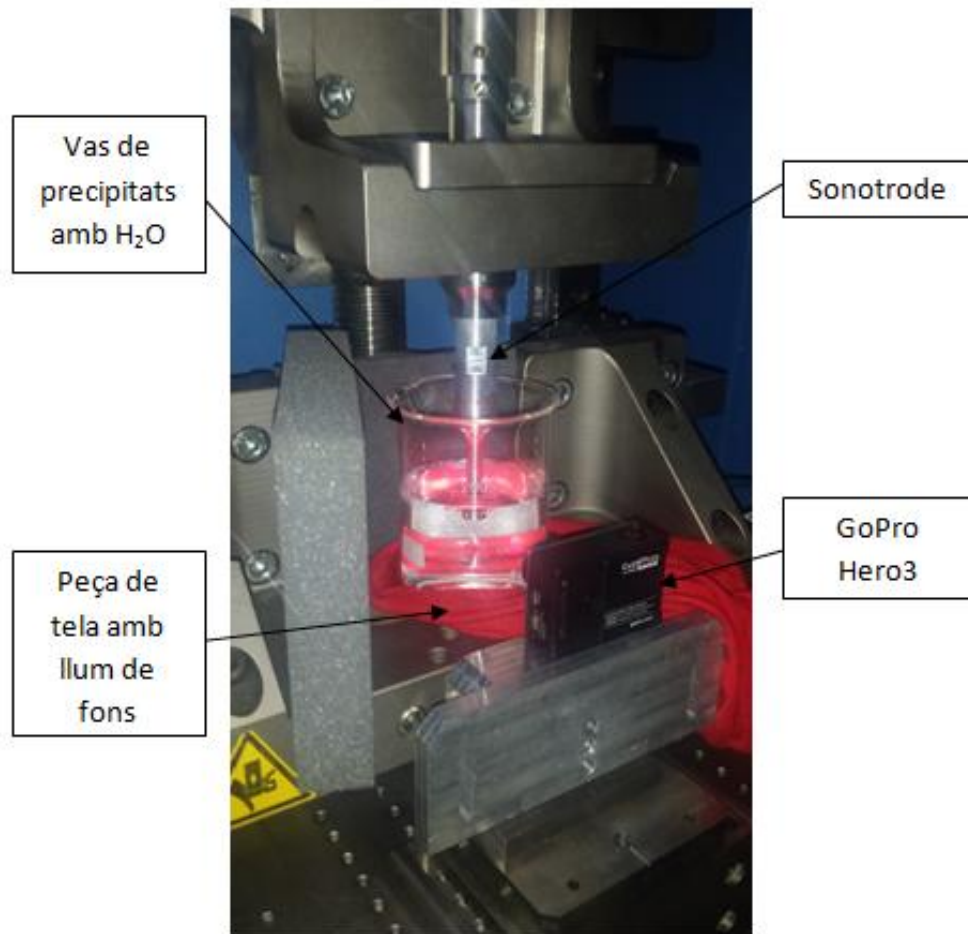


Figura 48: Muntatge de l'experiment realitzat

A continuació s'exposen els resultats i les imatges obtingudes per a cada sonotrode.

6.1 Sonotrode 1

Tal i com es pot observar a la Figura 49, les bombolles creades per la vibració del Sonotrode 1 es concentren al centre de la superfície circular i la direcció d'aquestes és completament vertical cap al fons del vas de precipitats, tot i que es pot observar com a mida que es van desplaçant a la profunditat es van dissolen entre l'aigua del recipient. A més a més, s'ha pogut observar que aquest comportament es manté per igual durant tot el temps de vibració del sonotrode.



Figura 49: Imatge extreta de l'experiment per al Sonotrode 1

6.2 Sonotrode 2

Pel que fa els resultats obtinguts del Sonotrode 2 a la Figura 50 es pot observar com la majoria de bombolles es focalitzen al centre de la superfície circular però la seva direcció no és del tot vertical, sinó que pateix una desviació. En les imatges que s'han capturat s'ha pogut observar com aquesta desviació que presenten les bombolles respecte la vertical no és sempre cap al mateix costat, sinó que va rotant.

Un altre aspecte a tenir en compte que apareix als resultats d'aquest sonotrode de punta cònica és el que es pot contemplar a la Figura 51. Tal i com es pot veure, just al costat de la superfície cònica apareix una turbulència en forma de bombolles que es desplaça perpendicularment a la superfície d'origen.

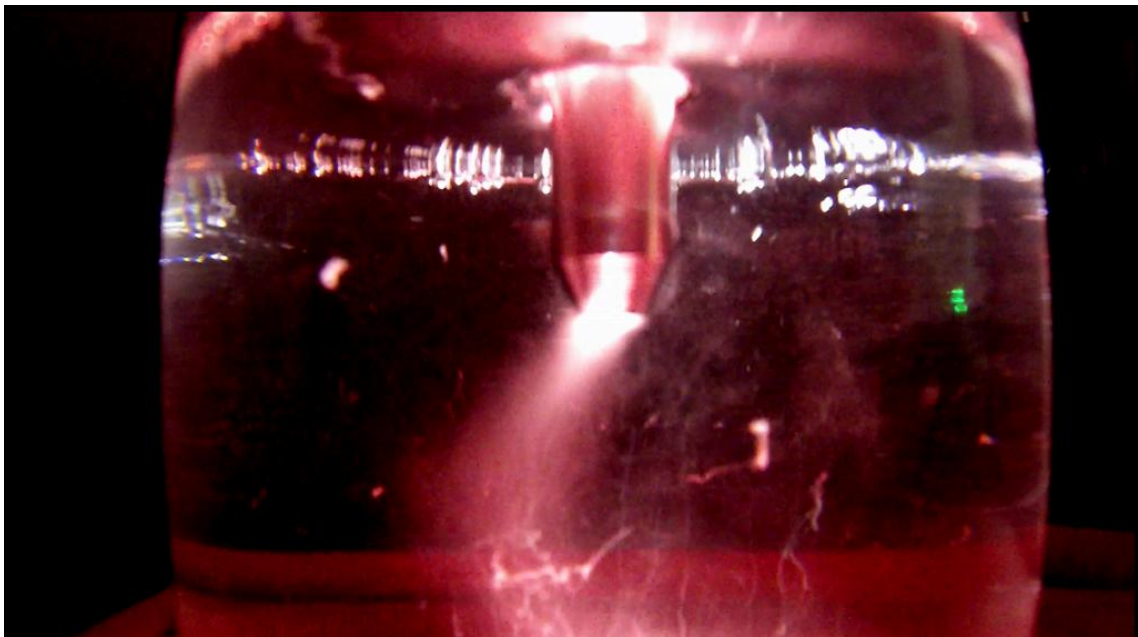


Figura 50: Imatge 1 extreta de l'experiment per al Sonotrode 2



Figura 51: Imatge 2 extreta de l'experiment per al Sonotrode 2

6.3 Sonotrode 3

A la Figura 52 es pot observar com les bombolles creades per la vibració del Sonotrode 3 tampoc segueixen una trajectòria vertical, sinó que surten amb una desviació respecte l'eix vertical, i com en el cas anterior també van rotant i variant la direcció. A més, es pot veure com les bombolles no es troben tant concentrades en la punta del sonotrode sinó que es creen per igual en la superfície cònica i plana, per aquest fet les bombolles es veuen més disperses en l'aigua.



Figura 52: Imatge 1 extreta de l'experiment per al Sonotrode 3

A la Figura 53 es pot observar com en aquest cas també es creen les turbulències que es desplacen perpendicularment a la superfície cònica.

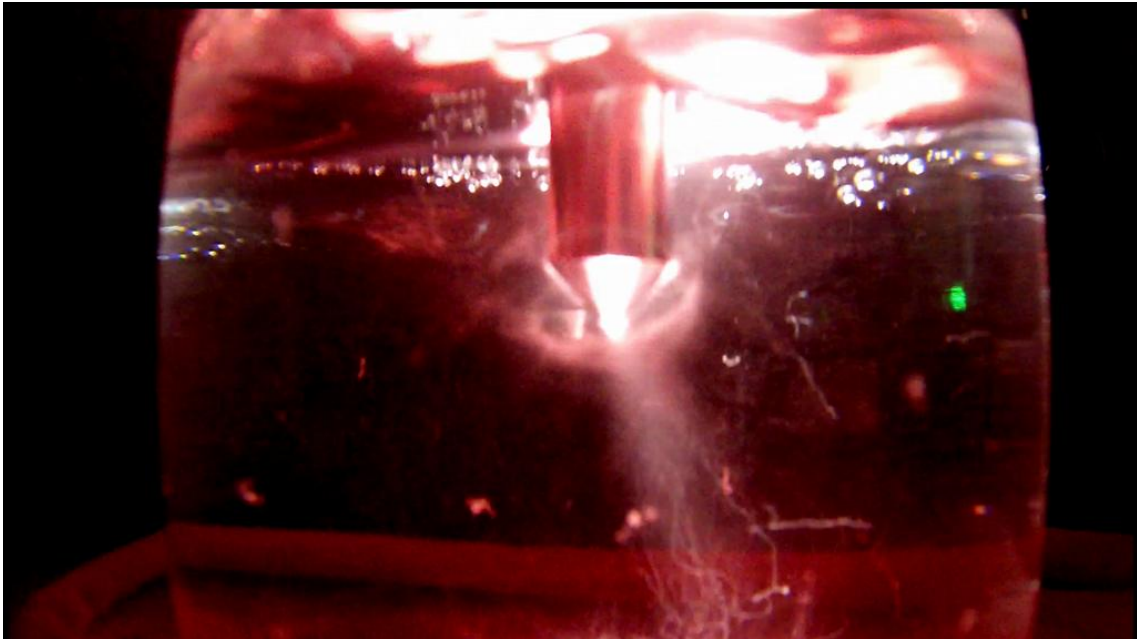


Figura 53: Imatge 2 extreta de l'experiment per al Sonotrode 3

6.4 Sonotrode 4

A la Figura 54 es pot observar el comportament del Sonotrode 4 en l'experiment realitzat. Es pot observar com les bombolles surten des de tota la superfície de la punta del sonotrode i la direcció que segueixen és lineal.



Figura 54: Imatge extreta de l'experiment per al Sonotrode 4

Si es comparen els resultats entre els mateixos sonotrodes es poden arribar a diverses conclusions. La primera i més clara és la presència de les turbulències ens els sonotrodes de punta cònica. Aquest fet apareix a causa de la superfície cònica, la qual també crea certes bombolles però que tenen diferent direcció respecta les que es creen a la superfície circular i creen aquestes turbulències que es poden apreciar a les Figures 51 i 53.

Seguidament, es compara el comportament del primer sonotrode amb el quart. Tots dos casos creen bombolles amb una direcció completament vertical, però si comparem la Figura 49 amb la Figura 54 podem observar com les bombolles creades pel Sonotrode 4 estan més disperses en l'aigua i les creades pel Sonotrode 1 es troben més focalitzades en un punt, sobretot just a on es creen. Aquest fet podria ser produït perquè el quart sonotrode té quatre puntes amb diferents superfícies i les bombolles que es creen surten en diferents direccions, les quals xoquen entre elles i es dissolen entre l'aigua. En canvi, pel primer sonotrode totes les bombolles surten amb la mateixa direcció i no xoquen tant entre elles i per tant es concentren més.

Finalment, es compara els resultats obtinguts pels dos sonotrodes cònics. Tal i com es pot observar, la quantitat de bombolles formades sembla major al sonotrode amb la conicitat menor (Sonotrode 2) o pot ser degut a l'efecte que les bombolles es troben més focalitzades en un sol punt, que és la superfície circular de la punta. Al Sonotrode 3 veiem que al tenir una superfície circular tant petita les bombolles formades en aquesta superfície són mínimes, i per tant, s'observen més bombolles formades en la superfície cònica. Un altre factor a comparar, és l'angle de desviació respecte a la vertical, del qual podem observar com pel Sonotrode 2 les bombolles surten amb una desviació més gran. I pel que fa les turbulències creades a la superfície lateral, podem dir que pel sonotrode amb major conicitat (Sonotrode 3) les turbulències són majors, fet que es produeix possiblement perquè la hipotenusa que forma la superfície cònica és major en el cas del Sonotrode 3 que del Sonotrode 4.

7. RESUM ESTUDI DE COSTOS

El total del resum de l'estudi de costos per a l'anàlisi de la forma de la punta del sonotrode en la tecnologia d'emmotllament per ultrasons ascendeix a un total de 12.696,20 € (DOTZE MIL SIS-CENTS NORANTA-SIS AMB VINT CÈNTIMS). El detall del pressupost es pot veure a l'Annex C. Estudi de Costos.

8. CONCLUSIONS I TREBALLS FUTURS

8.1 Conclusions

El treball final de grau "Anàlisi de la forma de la punta del sonotrode en la tecnologia d'emmotllament per ultrasons" ha permès arribar a unes conclusions que s'exposen en aquest apartat. Primerament fer referència a que tots els objectius plantejats inicialment s'han pogut complir en excepció de la fabricació dels sonotrodes. La intenció inicial era dur a terme tota la fabricació amb el torn de control numèric Okuma però degut a una averia del torn en unes proves preliminars es va decidir fabricar els sonotrodes a una empresa externa i realitzar els ajustaments amb el torn manual Pinacho.

Pel que fa a les conclusions extretes de cada fase de la obtenció dels sonotrodes es pot dir que es valora positivament el fet d'escollir els dos mètodes analítics, així s'ha pogut comprovar que els dos resultats obtinguts anaven ben encarats de cara a obtenir el disseny preliminar correcte.

També, un cop finalitzat el projecte es pot afirmar que la decisió de dissenyar els quatre sonotrodes iguals pel que fa la secció 1 ha estat del tot correcte. Aquest fet ha facilitat a la hora de realitzar les simulacions i els ajustatges, i més després de l'imprevist de la fabricació, així ha permès encarregar la fabricació de cinc sonotrodes completament iguals a l'empresa externa, abaratint el cost de fabricació.

D'altra banda, realitzar l'anàlisi dimensional de només dos dels cinc sonotrodes fabricats a més de comprovar que les dimensions dels sonotrodes eren les que es demanaven a les cotes dels plànols va servir per estalviar feina i temps, ja que es va poder comprovar com els dos sonotrodes eren completament iguals i per tant, els tres restants també ho eren. Aquest temps que es va estalviar es va poder dedicar en l'ajustatge del sonotrode, activitat que exigia més cura i dedicació.

Pel que fa la metodologia seguida per a realitzar l'ajustatge del sonotrode, es pot dir que és la correcte, ja que com s'ha pogut comprovar un cop ajustats, tots quatre sonotrodes han funcionat correctament a la màquina, per tant s'ha ajustat el mode de vibració on es desitjava.

Finalment, les imatges obtingudes en l'experimentació realitzada són prou clares com per extreure'n les conclusions necessàries ja que s'ha pogut observar com el

comportament de les bombolles és completament diferent per als quatre sonotrodes fabricats.

A continuació es plantegen un seguit de mesures o treballs a realitzar per tal de continuar o obtenir més informació de l'anàlisi realitzat. Aquest conjunt de conclusions es resumeixen en forma de treballs futurs al següent apartat.

8.2 Treballs futurs

Per continuar l'estudi sobre el comportament de la forma de la punta del sonotrode en la tecnologia d'emmotllament per ultrasons es plantegen un seguit de treballs futurs que caldria desenvolupar.

En primer lloc s'hauria de provar de fabricar peces a la màquina Sonorus 1G amb els quatre sonotrodes fabricats. La idea seria realitzar provetes idèntiques per tal de comparar amb quin disseny de punta s'obtenen millors resultats. Per als quatre casos s'hauria d'analitzar i comparar tant la temperatura en que es fon el material, la capacitat d'ompliment del motllo sota les mateixes condicions de treball i la porositat, la precisió dimensional i els acabats superficials de les peces obtingudes.

D'altra banda també es podria fabricar els mateixos sonotrodes però utilitzant el titani com a material, tot i l'elevat cost del material i de fabricació. Llavors, es compararia els resultats obtinguts amb alumini i titani i es podria observar si un dels dos materials afavoreix la fabricació de peces utilitzant la tecnologia dels ultrasons.

Per descomptat en un altre treball es podria proposar nous dissenys de punta que puguin aportar diferents resultats dels que s'han obtingut en el present projecte. També es podria mirar de canviar la geometria del sonotrode, adaptant aquests canvis a la màquina. Aquest canvis podrien ser el radi de curvatura que tenim entre les dos seccions del sonotrode, el diàmetre de sortida de la secció 2, entre d'altres.

Finalment, també hi ha altres camps en el procés d'emmotllament per ultrasons en què cal treballar, com pot ser la millora del disseny estructural de la màquina o la optimització dels seus elements.

9. BIBLIOGRAFIA

Bibliografia referenciada

[1] ZVEI – German Electrical Manufacturers Association. Sonotrode design and manufacturing instructions. <http://www.powerultrasonics.com/content/sonotrode-design-and-manufacturing-instructions-zvei-handbook>

[2] SERGIU NANU, A. Study on ultrasonic stepped horn geometry design and FEM simulation. Nonconventional Technologies Review – No. 4/2011

[3] GRABALOSA, J. , FERRER, I. , MARTÍNEZ-ROMERO, O. , ELIAS-ZÚÑIGA, A. , PLANTÁ, X. , RIVILLAS, F. Stepped sonotrode design for ultrasonic molding. Department of Mechanical Engineering and Industrial Construction, University of Girona, Spain.

Bibliografia documentada

Ultrason. Consultat el 17 de març de 2015, a
<http://www.ultrason.com/>

Gizmag, Consultat el 17 de març de 2015, a
<http://www.gizmag.com/ultrason-sonorous-1g-ultrasonic-molding-machine/32104/>

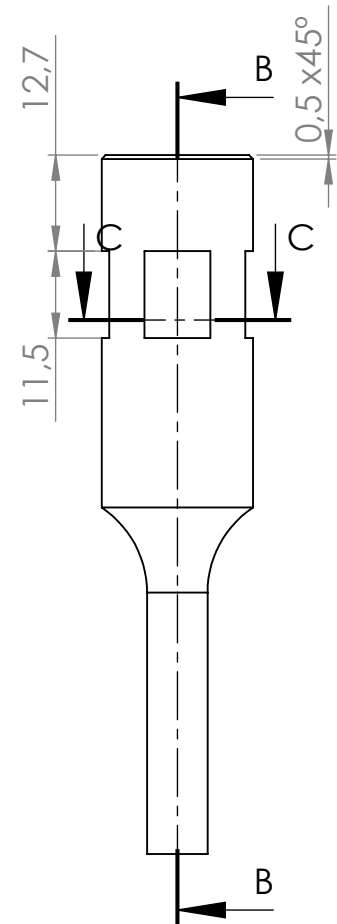
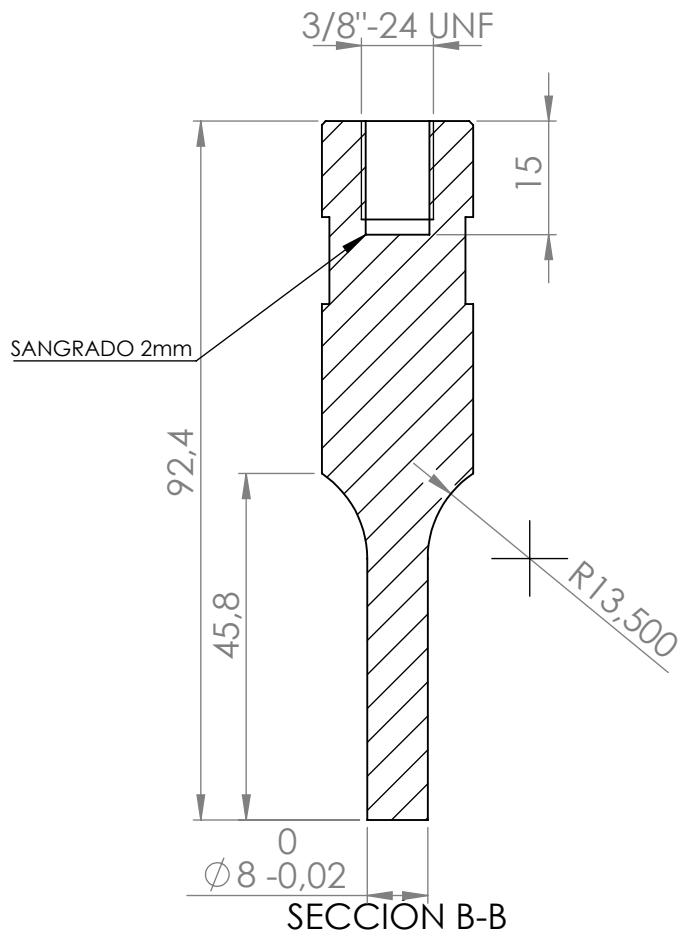
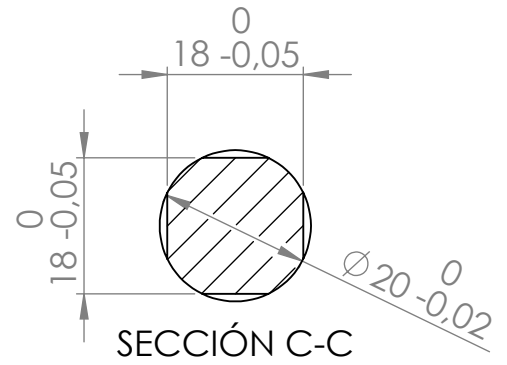
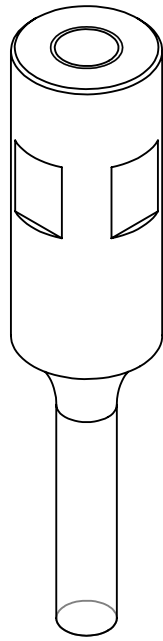
Wikipedia, Consultat el 17 de març de 2015, a
<http://en.wikipedia.org/wiki/Sonotrode>

PCP Audio, Consultat el 28 de maig de 2015, a
http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/amortiguamiento/amortiguamiento.html#FORZADAS

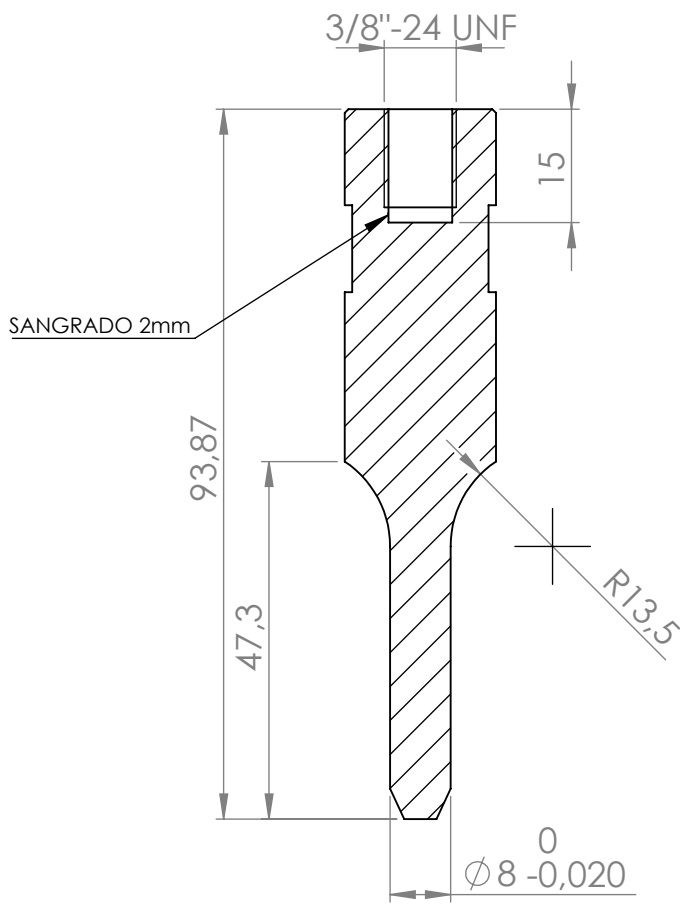
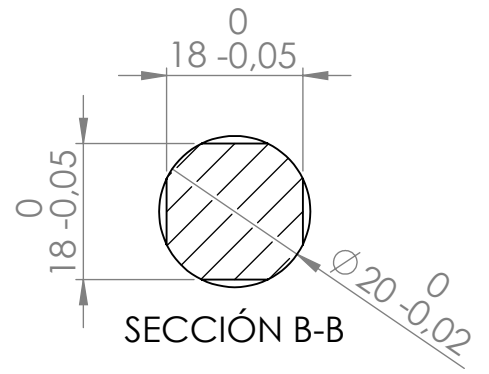
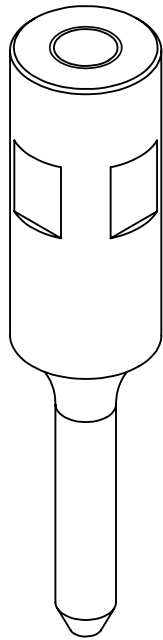
ATCP Ingeniería Física, Consultat el 28 de maig de 2015, a
<http://www.atcp.com.br/es/productos/piezo-ultrasonido/analizador-trasductores.html>

ANNEXOS

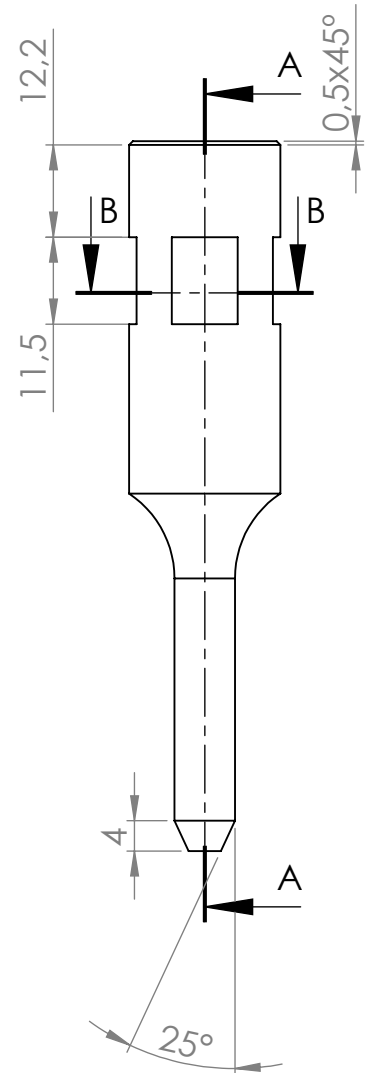
ANNEX A. PLÀNOLS



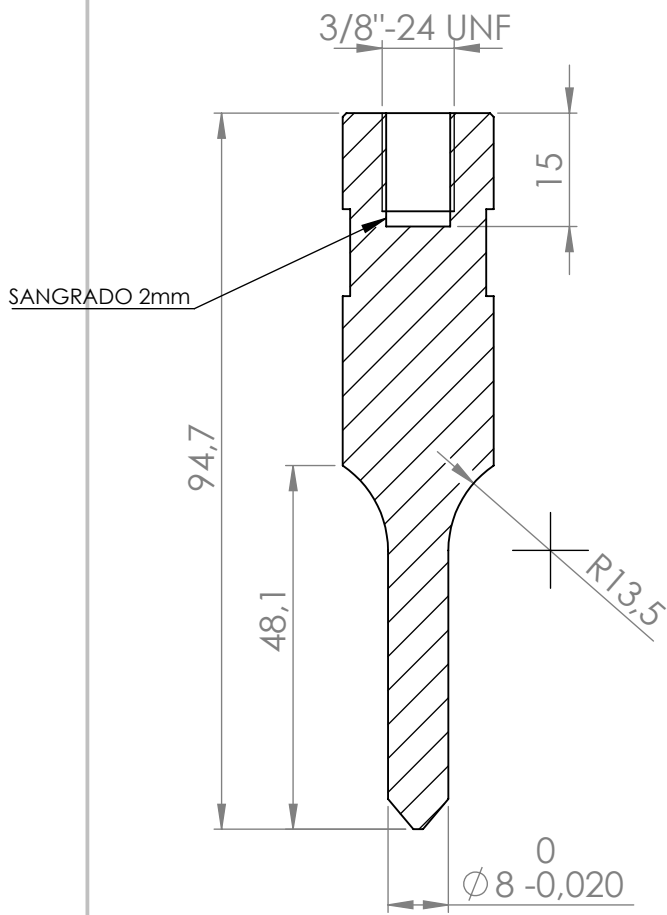
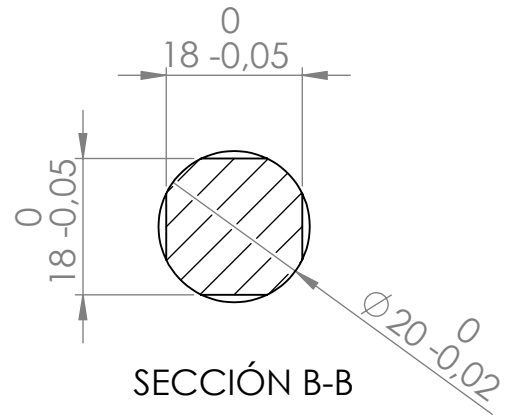
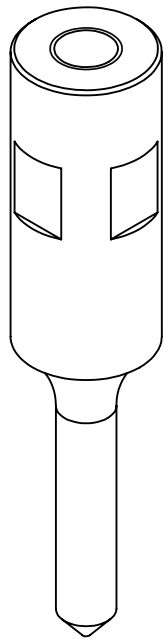
<i>Treball Final de Grau</i>	<i>Dibuixat</i>	<i>Albert</i>	<i>Rissech</i>	<i>GREP</i>	
	<i>Comprovat</i>				
Escala 1:1	Sonotrode 1				Enginyeria en Tecnologies Industrials



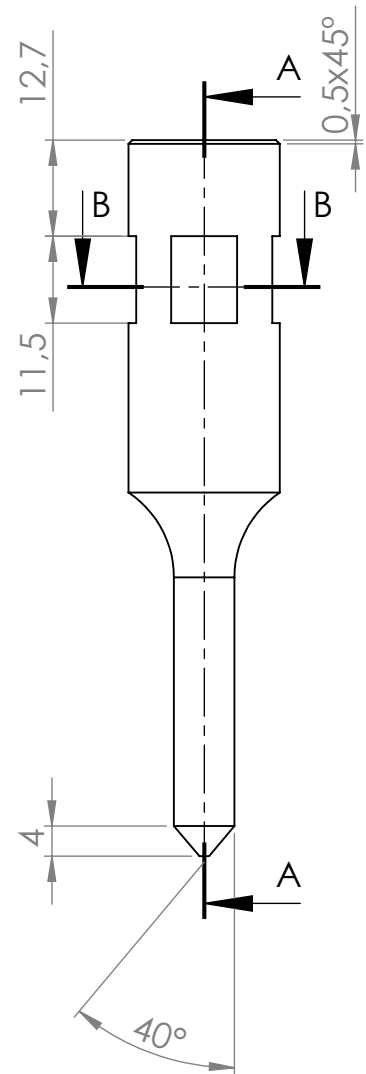
SECCIÓN A-A



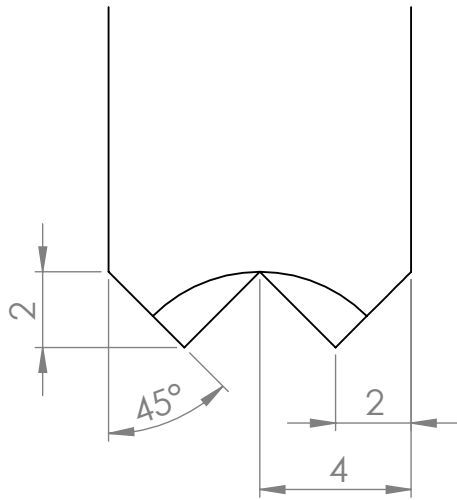
T treball Final de Grau		Dibuixat	Albert	Rissech	GREP	 UdG Escola Politècnica Superior
		Comprovat				
Escala	Sonotrode 2					Enginyeria en Tecnologies Industrials
1:1						



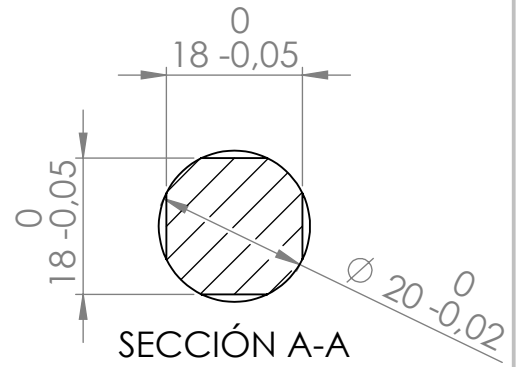
SECCIÓN A-A



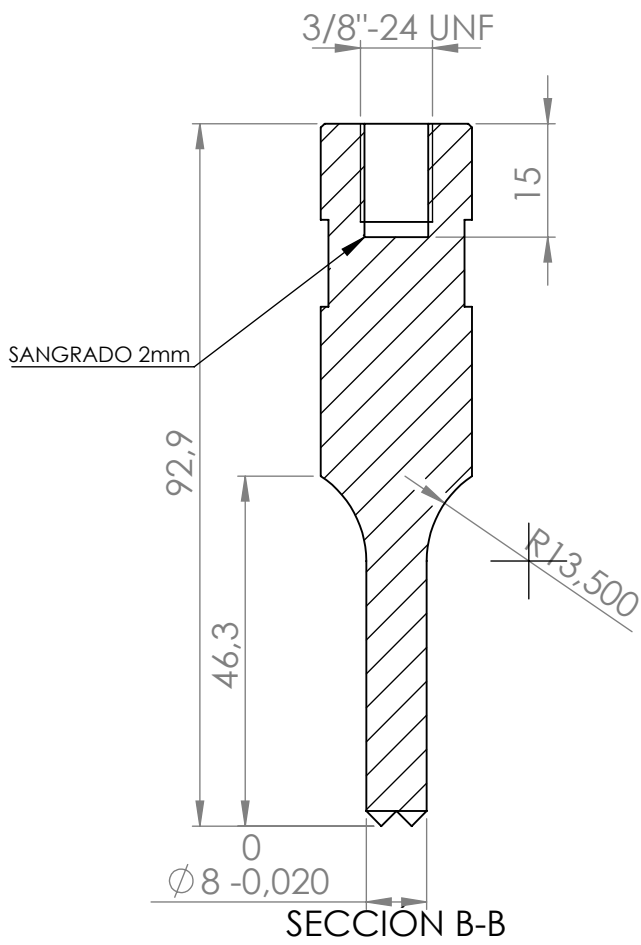
Treball Final de Grau		<i>Dibuixat</i> <i>Comprovat</i>	<i>Albert</i>	<i>Rissech</i>	<i>GREP</i>	 Enginyeria en Tecnologies Industrials
Escala 1:1	Sonotrode 3					



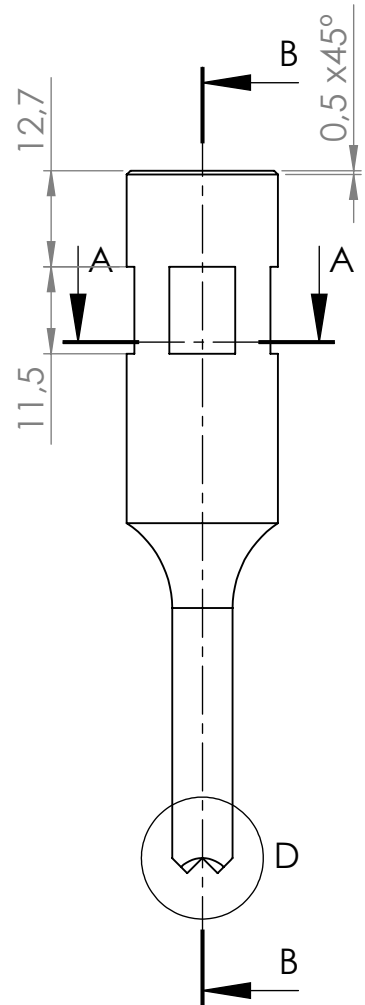
DETALLE D
ESCALA 5 : 1



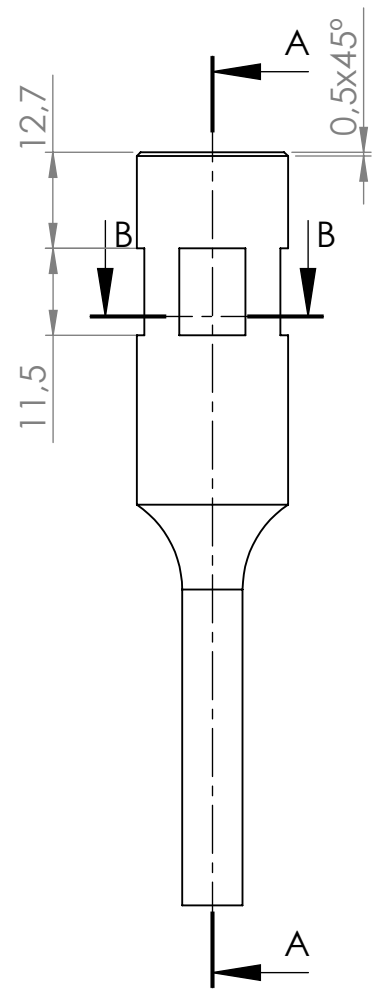
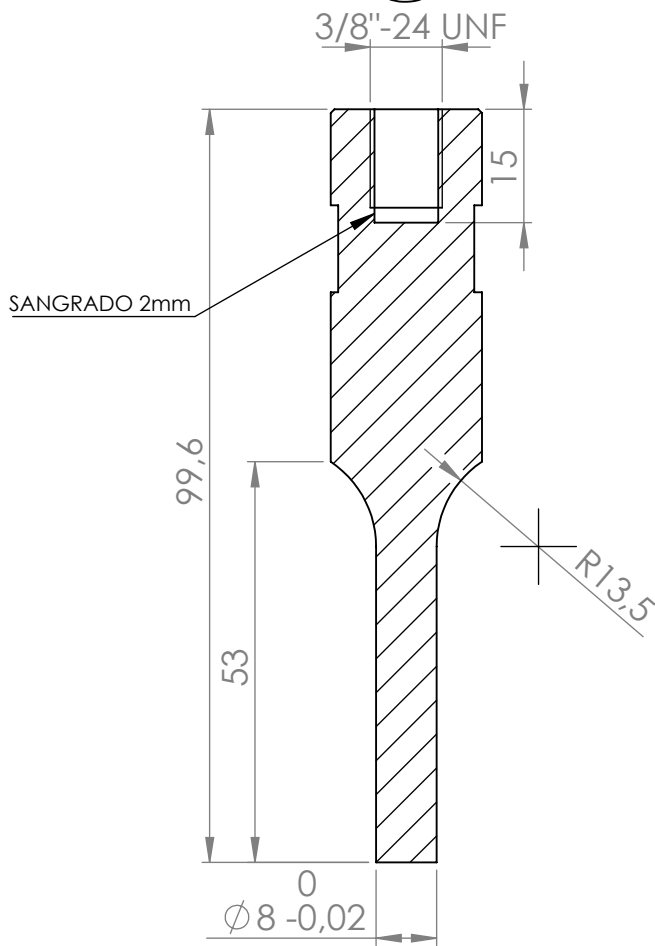
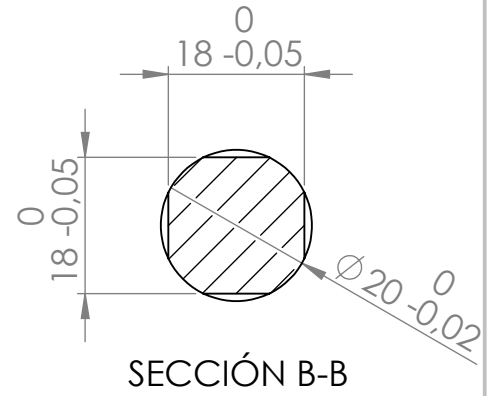
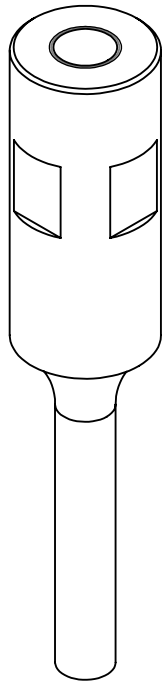
SECCIÓN A-A




SECCIÓN B-B



Treball Final de Grau	Dibuixat	Albert	Rissech	GREP	
	Comprovat				
Escala 1:1	Sonotrode 4				Enginyeria en Tecnologies Industrials



Treball Final de Grau		<i>Dibuixat</i>	<i>Albert</i>	<i>Rissech</i>	<i>GREP</i>	
		<i>Comprovat</i>				
Escala 1:1	Sonotrode fabricat					Enginyeria en Tecnologies Industrials

ANNEX B. RECULL FOTOGRÀFIC

B.1 IMATGES SONOTRODES FABRICATS



Figura 55: Dos exemples dels sonotrodes fabricats

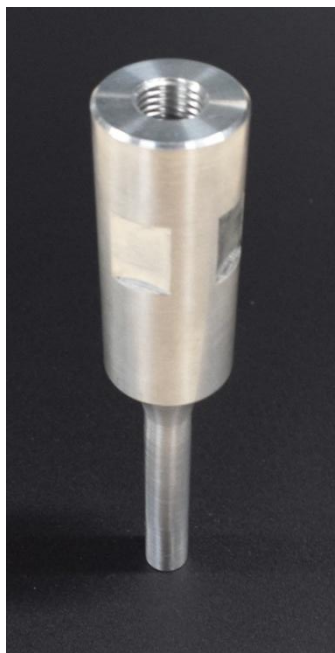


Figura 56: Vista de la secció 1 del sonotrode fabricat



Figura 57: Vista de la secció 2 del sonotrode fabricat

B.2 IMATGES ANÀLISI DIMENSIONAL



Figura 58: Imatge 1 de l'anàlisi dimensional del sonotrode fabricat



Figura 59: Imatge 2 de l'anàlisi dimensional del sonotrode fabricat

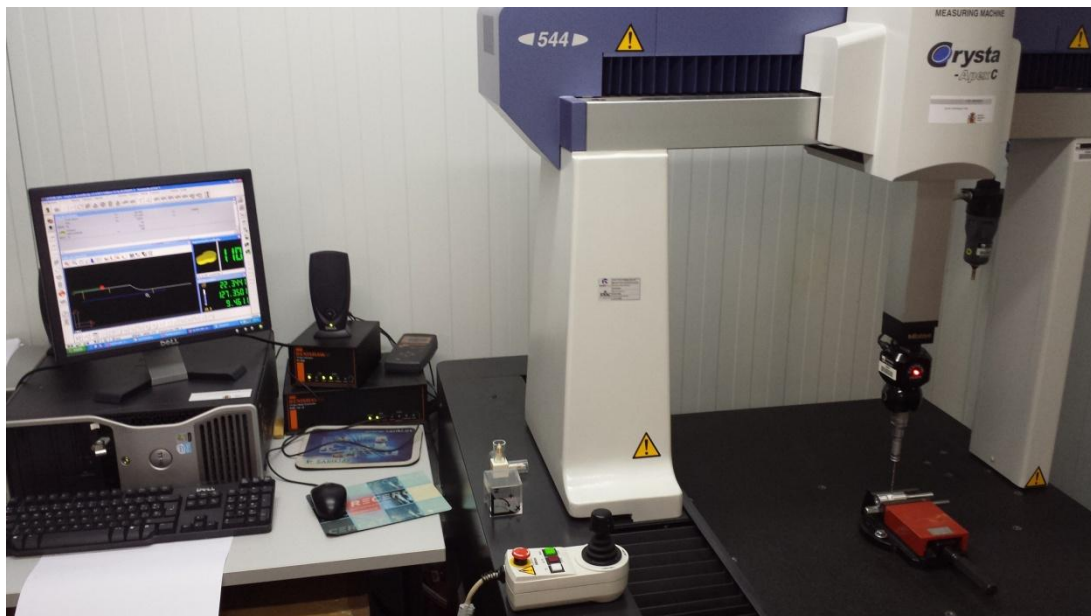


Figura 60: Imatge de tot l'equipament durant l'anàlisi dimensional

B.3 IMATGES AJUSTAMENT DE FREQUÈNCIA DE VIBRACIÓ

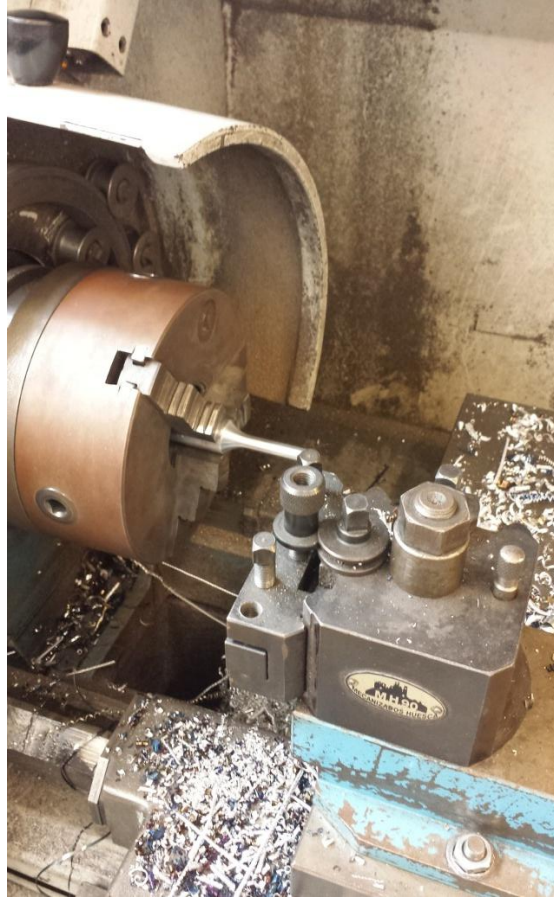


Figura 61: Imatge 1 de l'ajustament al torn manual



Figura 62: Imatge 2 de l'ajustament al torn manual

ANNEX C. ESTUDI DE COSTOS

C.1 INTRODUCCIÓ

En aquest annex es detallen les despeses que ha suposat l'anàlisi de la forma de la punta del sonotrode en la tecnologia d'emmotllament per ultrasons.

Cal indicar que aquest estudi no es tracta d'un pressupost, ja que no és una petició de preu d'un client o institució, sinó d'una feina ja realitzada, per tant és una despesa.

Aquesta despesa l'hem dividit en tres parts. La primer part consisteix en el cost del material i equipaments utilitzats en la realització del projecte. La segona part inclou la quantitat i la despesa de mà d'obra, la qual correspon a les hores dedicades a la recerca d'informació, a la preparació d'aparells utilitzats, la realització dels experiments, l'anàlisi de resultats obtinguts i a la redacció del document final. Finalment, els costos de la tercera i última part pertanyen als costos indirectes.

C.2 DESPESA DELS MATERIALS I EQUIPAMENTS

La despesa del material i equipaments utilitzats per a la realització d'aquest projecte final de grau es presenta a la Taula 24.

El cost total d'aquest apartat ascendeix a 1.235 €.

Descripció del material	Quantitat	Preu unitari (€/u)	Subtotal (€)
Barra d'Alumini 7075 de 6m i Ø30mm	1,00	240,00	240,00
Fabricació sonotrode	5,00	85,00	425,00
Màquina coordenades MMC Mitutoyo Crysta Apex 544 (hores)	3,00	40,00	120,00
Analitzador de transductors TRZ (hores)	5,00	60,00	300,00
Torn manual Pinacho (hores)	5,00	30,00	150,00
		PREU TOTAL	1.235,00

Taula 24: Cost total del material i equipaments del present projecte

C.3 DESPESA DE MÀ D'OBRA

En la Taula 25 es mostren les hores dedicades per a cada activitat necessària per a la realització d'aquest projecte amb el preu unitari de cadascuna, el qual va en funció del grau de dificultat de la tasca.

El cost total de mà d'obra ascendeix a 9.710 €.

Mà d'obra	Quantitat (h)	Preu unitari (€/u)	Subtotal (€)
Recopilació d'informació	35,00	12,00	420,00
Realització simulacions d'elements finits	125,00	35,00	4.375,00
Mesures a màquina de coordenades	5,00	40,00	200,00
Ajustatge sonotrode (Vibròmetre + torn)	15,00	45,00	675,00
Anàlisi dels resultats	60,00	30,00	1.800,00
Redacció del projecte	100,00	20,00	2.000,00
Reunions de projecte	20,00	12,00	240,00
		PREU TOTAL	9.710,00

Taula 25: Cost total de la mà d'obra del present projecte

C.4 COSTOS INDIRECTES

Es tenen en compte uns costos indirectes del 16% sobre el total del cost del projecte. Aquests costos indirectes venen derivats del consum d'electricitat i aigua, lloguer de tallers, etc. Tal i com s'observa a la Taula 26, aquests costos ascendeixen a 1.751,20€.

Descripció	Quantitat (€)	Percentatge aplicat (%)	Subtotal (€)
Costos indirectes	10.945,00	16,00%	1.751,20

Taula 26: Costos indirectes del present projecte

C.5 TOTAL DE LA DESPESA

Considerant el muntant referent al cost del material utilitzat al llarg de tot aquest projecte, i també el que fa referència a la mà d'obra per a la realització de les tasques principals del projecte Anàlisi de la forma de la punta del sonotrode en la tecnologia d'emmotllament per ultrasons, el total de l'estudi de costos és de 12.696,20 € (DOTZE MIL SIS-CENTS NORANTA-SIS AMB VINT CÈNTIMS).

Girona, 12 de juny de 2015

Albert Rissech Sureda