

Treball final de màster

Estudi: Màster en Enginyeria Industrial

Títol: Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la caixa de ressonància de la guitarra

Document: Memòria i Annexes

Alumne: Pol Hospital i Brugué

Tutor: Dani Trias

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria Mecànica

Convocatòria: Juny del 2018

Agraïments

M'agradaria expressar els meus agraïments a l'empresa de guitarres *Camps* per haver proporcionat el prototip de guitarra i la informació necessària per a la realització de l'estudi. També a l'Antonio Guerra i l'Isabel Bagudanch, del grup de recerca GREP, per passar el prototip de la guitarra per la màquina de mesura de coordenades del grup. A en Joan Toledo, per haver proporcionat les dades de l'estudi de l'excitació de la guitarra i a en Xin Fang, per fer el disseny 3D del mànec. Per últim, però no menys important, un especial agraïment a en Dani Trias, no només per haver-me tutoritzat el treball sinó també per haver-me permès barrejar dos mons tant importants a la meua vida com són l'enginyeria i la guitarra clàssica.

Taula de continguts

1.	Proposta	1
1.1	Origen del projecte	1
1.2	Motivació	1
1.3	Requeriments previs	1
2.	Introducció	2
2.1	Objectius del projecte	3
2.2	Abast del projecte	3
3.	Estat de l'art.....	5
4.	Marc de treball de la literatura.....	8
5.	Teoria de la vibració	10
6.	Disseny utilitzat de la guitarra Camps	14
6.1	Disseny geomètric	14
6.1.1	Plat harmònic.....	14
6.1.2	Plat inferior	16
6.1.3	Laterals de la caixa.....	16
6.1.4	Mànec.....	17
6.2	Materials de disseny	18
7.	Disseny 3D	19
8.	Configuració de la simulació	22
8.1	Configuració dels materials.....	22
8.2	Configuració del mallat	26
8.2.1	Mallat de les peces de fusta	26
8.2.2	Mallat de les xapes	27
8.3	Condicions de contorn	29
9.	Anàlisi Modal	30
9.1	Característiques de la simulació	30
9.2	Anàlisi Modal del model original.....	30
9.3	Modificació del material	32
9.4	Modificació de la Tapa Superior.....	33
9.5	Modificació de les Barres Harmòniques.....	33
9.5.1	Modificació de les dimensions de les Barres Harmòniques.....	33
9.5.1.1	Modificació de la base y de les Barres Harmòniques.....	34
9.5.1.2	Modificació de l'altura z de les Barres Harmòniques.....	34
9.5.2	Modificació de la posició de les Barres Harmòniques	35
9.5.3	Modificació de la forma de les Barres Harmòniques	35
10.	Discussió dels resultats.....	36
10.1	Resultats de la modificació dels materials.....	37
10.2	Resultats de la modificació de la Tapa Superior.....	37

10. 3	Resultats de la modificació de les barres Harmòniques	40
10.3.1	Resultats de la modificació d'una dimensió de les Barres Harmòniques	40
10.3.1.1	Modificació de la base y de les Barres Harmòniques.....	40
10.3.1.2	Modificació de l'altura z de les Barres Harmòniques.....	43
10.3.2	Resultats de la modificació de la posició de les Barres Harmòniques	45
10.3.3	Resultats de la modificació de la forma de les Barres Harmòniques	46
10. 4	Comparació amb la literatura	48
11.	Pressupost de l'estudi	50
12.	Conclusions	51
13.	Relació de documents.....	53
14.	Bibliografia	54
Annex A	Resultats de les simulacions	56
Annex A.A	Canvi de Materials.....	56
Annex A.B	Canvi de gruix de la Tapa Superior	57
Annex A.C	Canvi de dimensions de la base y de les Barres Harmòniques	64
Annex A.D	Canvi d'angle de les Barres Harmòniques	79
Annex A.E	Canvi de forma de les Barres Harmòniques	90
Annex B	Plànols del Plat Harmònic i les seves peces.....	91
Annex B.A	Plat Harmònic.....	91
Annex B.B	Barra Harmònica 1	92
Annex B.C	Barra Harmònica 2.....	93
Annex B.D	Barra Harmònica 3.....	94
Annex B.E	Barra Harmònica Transversal.....	95
Annex B.F	Barra Inferior	96
Annex B.G	Barra Superior	97
Annex B.H	Rectangle.....	98

1. Proposta

1.1 Origen del projecte

El present projecte és un estudi que neix de l'oportunitat d'unir dos mons que, tot i haver estat ambdós presents a la meua vida, mai hagués pensat que s'acabarien ajuntant: la guitarra clàssica i l'enginyeria.

La guitarra clàssica és un instrument que, des dels 5 anys, ha format part de la meua vida: durant la meua infantesa i adolescència em vaig esforçar per aprendre-la a tocar i, actualment, en gaudeixo pels escenaris i transmetent els meus humils coneixements a les noves generacions com a professor.

L'estudi de l'enginyeria ha estat gran part de la meua dedicació durant els meus últims 6 anys amb l'objectiu de poder utilitzar aquests coneixements per la meua vida professional.

1.2 Motivació

La fabricació de la guitarra clàssica sempre ha estat associada a l'àmbit artesanal, amb coneixements de transmissió generacionals, sovint amb idees preconcebudes o mites de dubtosa credibilitat. La poca industrialització d'aquest sector està directament relacionada amb els escassos estudis tècnics sobre el disseny de la guitarra i la millora del seu so. S'han realitzat algunes publicacions acadèmiques (sobretot en els darrers 15 anys) però es desconeix que les conclusions aportades hagin motivat cap canvi en el disseny o el procés de fabricació aplicat pels luthiers.

La motivació de l'estudi és ampliar el camp de coneixement tècnic del disseny de la guitarra podent aportar certs marcs de treball pràctics per el disseny de la guitarra clàssica amb la finalitat que puguin ser aplicats. També, es vol demostrar si algunes de les idees preconcebudes pels luthiers són, o no, certes.

1.3 Requeriments previs

El present estudi no és un estudi tècnic convencional ja que per comprendre'l en la seva totalitat cal tenir una petita base musical i de l'estructura, les parts i el funcionament de la guitarra clàssica. Encara que s'hagi intentat escriure un treball que sigui comprensible per a gent inexperta en música pot ser que en algun moment es pugui trobar que li manca algun coneixement que s'hagi donat per sabut.

2. Introducció

La guitarra clàssica representa un sistema de vibració complex [1]. Una de les parts més importants de la guitarra és la seva caixa de ressonància, que vibra a la freqüència pròpia transmesa per les cordes i fa audible el seu so [2]. Per poder amplificar els sons, ha de tenir un gruix prou fi com per vibrar quan se sotmeti a les forces de les cordes però ha de tenir una rigidesa suficient com per resistir els cicles de tensions que aquestes creen [3]. És per aquest motiu que les tapes de la caixa de ressonància es reforcen amb barres distribuïdes segons un patró concret [4]. El patró més comú actualment va ser originalment desenvolupat pel famós luthier espanyol Antonio Torres Jurado (1817-1892) i consta principalment de 2 barres transversals a l'altura de la boca (o forat de la caixa de ressonància) i 9 barres harmòniques distribuïdes simètricament respecte l'eix longitudinal de la caixa de ressonància en forma de ventall. La Figura 1 mostra una guitarra original del luthier, la qual, a més a més, té una tercera barra transversal i 4 barres harmòniques més al voltant de la boca.



Figura 1 | Patró de les barres en la caixa de ressonància de la guitarra ideat per Antonio Torres Jurado. Font: <https://www.pinterest.es/pin/572731277605434443/>

És conegut que petits canvis en la fabricació artesanal poden provocar grans canvis en el so de l'instrument resultant [5]. Aquests coneixements s'han transmès entre generacions de luthiers basats en l'experiència però els estudis realitzats en aquesta branca de coneixement han estat insuficients per poder concloure amb un disseny de la caixa de ressonància òptim. A més, aquests coneixements sovint venen acompanyats d'idees preconcebudes o mites no provats com, per exemple, que el simple acte de polir les barres harmòniques de la guitarra en millora el seu so.

No obstant això, i sobretot amb el desenvolupament de tecnologies computacionals com la que facilita el càlcul pel mètode dels elements finits, ha permès que des dels anys 2.000 es pogués començar a avançar en el coneixement d'aquest camp [6].

2.1 Objectius del projecte

L'objecte d'aquest estudi és determinar quins paràmetres, d'entre aquells que es poden modificar en el disseny d'una caixa de ressonància de la guitarra, tenen un major efecte en la qualitat del seu so, establir un marc de treball per a la modificació d'aquests paràmetres i comparar els resultats obtinguts amb la informació extreta de la literatura.

2.2 Abast del projecte

Primer de tot, es realitza una cerca bibliogràfica sobre l'estat de l'art de l'estudi tècnic de la guitarra (Apartat 3) per poder extreure'n un marc de treball que relacioni diferents aspectes de disseny amb els seu comportament vibracional (Apartat 4). Per concloure amb la part teòrica, es defineix què és una mode de vibració i la freqüència natural, quin és el comportament vibracional de la guitarra i es determina que la freqüència del mode fonamental és un aspecte a tenir en compte en els anàlisis modals (Apartat 5).

Seguidament, es descriu el disseny del prototip utilitzat actualment per la casa banyolina de guitarres artesanes *Camps* (Apartat 6). A partir del disseny *Camps* s'obté una base CAD del Plat Harmònic fent passar el prototip ofert per l'empresa per la màquina de mesura de coordenades *Mitutoyo Crysta Apex 544* del grup de recerca GREP de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona. De la base CAD es construeix el model 3D utilitzant el software *SolidWorks 2016* (Apartat 7). Un cop obtingut el model 3D de la guitarra, emprant el software *Ansys Workbench 17.1*, es configura la simulació de l'anàlisi modal (Apartat 8) utilitzant el Mètode dels Elements Finites (FEM).

A continuació, es marquen quins paràmetres de disseny es modifiquen i quins aspectes de l'anàlisi modal són rellevants en cada cas (Aparat 9). Les modificacions dels paràmetres de disseny estudiades són:

- El tipus de material que conforma la guitarra.
- El gruix de la Tapa Superior.
- La mida de les Barres Harmòniques.
- El grau d'inclinació de les Barres Harmòniques distribuïdes en forma de ventall a la tapa de la caixa.
- La forma de les Barres Harmòniques.

Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

A partir dels resultats dels anàlisis modals, en les afectacions més significatives, es dissenyen diferents marcs de treball, i es comparen les respostes de les simulacions amb el marc de treball extret de literatura (Apartat 10).

Per últim, es realitza un pressupost del cost del present estudi (Apartat 11) i es descriuen les conclusions a les quals s'ha arribat (Apartat 12).

3. Estat de l'art

A diferència del violí, que ha estat un gran tema d'estudi [7] i actualment el seu disseny està ben establert [4], la guitarra és el reflex dels coneixements artesanals traspassats entre generacions de luthiers. Tot i això, a partir dels anys 2.000 s'han anat realitzat diferents recerques i les seves conclusions poden ser de gran ajuda pel present estudi.

Elejabarrieta et al. (2.000) [5] fan un estudi sobre el comportament de la part superior de la caixa de ressonància sota condicions de contorn lliures al llarg de les diferents etapes de la seva construcció utilitzant la tècnica de l'anàlisi modal per Funció de Resposta de la Freqüència (FRF). Les conclusions a les quals arriba són que la pèrdua de gruix de la caixa de ressonància disminueix les freqüències d'aparició dels diferents modes de vibració. També, el fet d'afegir les barres transversals i les barres harmòniques fa que les freqüències d'aparició d'aquests tornin a augmentar.

El mateix grup de treball [8] realitza un estudi sobre el comportament de la part superior de la caixa de ressonància sota les condicions de contorn pròpies d'una guitarra acabada al llarg de les diferents etapes de la seva construcció utilitzant la tècnica de l'anàlisi modal pel Mètode dels Elements Finites (FEM). En aquest cas, i comparant-ho amb [5], s'arriba a les conclusions que certes tendències són oposades. A més, també es demostra com la caixa de ressonància està fortament influenciada per les barres transversals però no per la forma d'aquestes. A part, l'evolució dels modes durant l'addició de les barres harmòniques mostra com aquests es podrien agrupar en dos conjunts considerant el seu caràcter vibracional (modes longitudinals i modes transversals). Certs modes no són sensibles a les barres harmòniques.

Seguint en aquesta línia de recerca, *Elejabarrieta et al. (2.002)* [9] realitza un estudi sobre el comportament de les tapes inferior i superior de la guitarra tenint en compte l'aire que hi ha dins de la caixa utilitzant el Mètode dels Elements Finites (FEM). L'aire a dins de la cavitat afecta substancialment els patrons de vibració ja que obliga a les dues tapes a moure's a la vegada en certes freqüències (sense tenir en compte l'aire això no passa ja que aquestes es poden moure independentment perquè no hi ha un mitjà elàstic que interaccioni entre elles). Les freqüències naturals dels modes disminueixen (ja que l'aire actua com una massa addicional) i la influència de l'aire és major en freqüències baixes.

Torres i Boullosa (2.009) [10] estudien l'efecte de la incorporació del pont a la caixa de ressonància. La presència del pont en el sistema amb condicions de contorn lliures varia significativament la resposta estructural. A altes freqüències la resposta es veu afectada pel pont tant perquè aquest es deforma com perquè imposa zones nodals.

Pizzigoni i Rossing (2.010) [11] descriuen que en altres freqüències les cordes fan vibrar el pont, que, al seu temps, provoca la vibració del plat superior de la caixa de ressonància. En freqüències baixes, les cordes fan vibrar directament el plat superior de la caixa (el pont no actua com a transmissor, sinó que es comporta com un element més del plat superior). Aquest excita el plat posterior de la guitarra a través de la cavitat d'aire i les parts laterals de la caixa de ressonància.

Meinel i Jansson (1.991) [12] comproven la importància del braç dins el conjunt de la guitarra. Conclou que el braç també vibra en els modes propis de la guitarra. En alguns d'ells la vibració de la tapa superior de la caixa és dominant, però en alguns altres la caixa i el braç vibren com una sola barra (sobretot en moviments de flexió) i la influència del braç esdevé important. Encara que, en general, la caixa de ressonància sigui més important que el braç, si es vol obtenir una guitarra d'alta qualitat no es poden negligir les propietats d'aquest. Es recomana que sigui rígid, lleuger i amb un baix esmorteïment intern. El braç s'ha de fixar bé al plat superior de la caixa de ressonància ja que les seves grans vibracions poden provocar importants pèrdues d'energia vibracional.

Russel (1.998) [7] explica que una de les raons per les quals la guitarra té una resposta modal tan complexa és el número de freqüències de les cordes per sota els 600 Hz. Hi ha 15 modes i diversos d'ells quasi tenen la mateixa freqüència. També conclou que la resposta de les cordes és el component dominant en referència al so de la guitarra. Tot i això, els efectes de la flexibilitat de la caixa de ressonància combinats amb la interacció acústica en el cos de la guitarra són subtils, però crítics.

Curtu et al. (2.009) [3] comparen els comportaments de guitarres amb 4 tipus de distribució diferents de les barres transversals i les barres harmòniques. A una freqüència similar les estructures responen de manera diferent. Subratlla que un dels criteris acústics relacionats amb la qualitat de la guitarra és que aquesta sigui capaç de ressonar en un ampli rang d'harmònics i que asseguri un filtre desigual dels tons.

Skrodzka et al. (2.011) [4] comparen el comportament d'un plat de guitarra amb les barres transversals i les barres harmòniques col·locades amb el model tradicional de *Torres* amb un model alternatiu asimètric. Conclou que les barres no afecten les formes de vibració dels 3 primers modes però sí les seves freqüències.

Ezcurra (1.996) [6] deixa de fixar-se en la geometria de la tapa de la guitarra per passar a observar la influència de les variacions dels diferents paràmetres dels materials amb els quals ha estat fabricada. Arriba a la conclusió que els paràmetres amb més influència són els mòduls de Young (longitudinal i transversal), que la

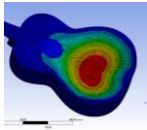
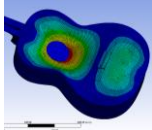
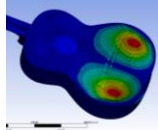
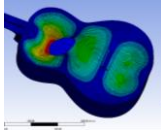
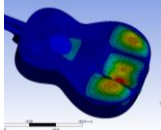
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

densitat altera els valors de les freqüències (però no els modes de vibració) i que el mòdul de cisallament G_{LR} també afecta. La resta de mòduls de cisallament i el coeficient de Poisson no alteren els resultats dels anàlisis significativament.

Lemens et al. (2.014) [13] expliquen que els instruments de corda fets de fusta milloren el seu so al llarg del temps i tocant-los. Intenta demostrar com certs processos artificials de maduració de la fusta afecten el to de la guitarra però conclou que els canvis observats són anecdòtics o negligibles.

A fi d'anomenar els modes de vibració simple varis autors utilitzen la mateixa tipologia de nomenclatura ([4], [5], [8] i [9]). Els modes s'anomenen com a (m, n) , sent m el nombre de nodes seguint l'eix transversal y i n el nombre de nodes seguint l'eix longitudinal x . La Taula 1 mostra diferents exemples del mètode de nomenclatura exposat. Al llarg del treball s'utilitza aquesta nomenclatura per a referir-se als diferents modes de vibració simples.

Taula 1 | Exemples de la nomenclatura utilitzada per anomenar els modes de vibració simples

Nomenclatura	(1, 1)	(1, 2)	(2, 1)	(1, 3)	(3, 1)
Mode					

4. Marc de treball de la literatura

És essencial pel correcte desenvolupament del present estudi tenir clar, segons la bibliografia, com afecten els diferents aspectes del disseny de la guitarra a la seva qualitat.

És per això que es diferencien 5 aspectes de disseny diferents, els qual són:

- Les barres transversals del plat superior de la caixa
- Les barres harmòniques del plat superior de la caixa
- El pont
- El braç
- El material de fabricació

Per dir en què afecten els diferents aspectes de disseny acabats d'esmentar es posa el focus en:

- La freqüència modal: o sigui, a quina freqüència apareix cada mode de vibració.
- Els modes de vibració: de quina manera vibra la guitarra.

Es triat aquests dos fenòmens pel fet que ambdós són observables utilitzant el Mètode dels Elements Finites (FEM).

D'aquesta manera es realitza un marc de treball, on es pot predir de quina manera afecta cada aspecte escollit del disseny de la guitarra a les freqüències modals i als modes de vibració i, posteriorment, es pugui comparar amb els resultats trobats experimentalment utilitzant el Mètode dels Elements Finites (FEM). La Taula 2 és el resum del marc de treball trobat a la literatura.

Taula 2 | Marc de treball de com afecta cada aspecte del disseny de la guitarra a les freqüències modals i als modes de vibració trobat a la literatura

Aspecte de disseny	Afectació	Referència
Les barres transversals		
Freqüència Modal	Augmenten amb la col·locació de les barres. La forma de les barres no afecta a la caixa de ressonància.	[5] [8]
Modes de vibració	Els 3 primers modes no es veuen afectats per les barres. La forma de les barres no afecta a la caixa de ressonància.	[4] [8]
Les Barres Harmòniques		
Freqüència Modal	Augmenten amb la col·locació de les barres harmòniques.	[5]
Modes	Certs modes són insensibles a les barres harmòniques. Els 3 primers modes no es veuen afectats per les barres harmòniques.	[8] [4]
El pont		
Modes de vibració	Els fa variar significativament. A altes freqüències imposa zones nodals. En altes freqüències el pont fa vibrar el plat superior. En baixes freqüències el pont es comporta com una part més del plat superior.	[10] [11]
El braç		
Modes de vibració	En els moviments de flexió la guitarra es comporta com una sola barra i el braç esdevé important.	[12]
El material		
Freqüència Modal	Es veu afectada pel Mòdul de Young longitudinals i transversals. Es veu afectada per la densitat. Es veu afectada pel mòdul de cisallament longitudinal-radial (G_{LR}).	[6] [6] [6]
Modes de vibració	Es veu afectada pel Mòdul de Young longitudinals i transversals. Es veu afectada pel mòdul de cisallament longitudinal-radial (G_{LR}).	[6] [6]

Si al comparar els comportaments trobats al realitzar la simulació amb els de l'afectació de les freqüències modals i els modes de vibració descrits per la literatura coincideixen, es podrà donar per fet que els resultats trobats per la simulació són significatius. Per tant, es donarà per vàlid el model 3D utilitzat.

5. Teoria de la vibració

Un mode normal és la freqüència a la qual una estructura deformable oscil·la al ser pertorbada. Per a cada estructura hi ha un conjunt de modes normals, també anomenats freqüències naturals. La guitarra no n'és cap excepció.

La freqüència del mode fonamental en elements elàstics d'un grau de llibertat és:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

On k és la rigidesa del conjunt i m és la seva massa.

La guitarra és un sistema complex on hi intervenen diferents peces amb diferents propietats i col·locades de manera diferent respecte els eixos. Tot i això, pel bé de la simplicitat, es posa especial atenció al plat harmònic de la caixa de ressonància degut a la seva importància en la tasca de transmissió del so, el qual es considera com un únic element elàstic d'un grau de llibertat semblant al model d'una biga fixada (Figura 2). La força d'excitació és provocada per la tensió periòdica de les cordes (a la freqüència de la nota tocada) i conduïda pel Pont. Per tant, la seva rigidesa k és proporcional a el Mòdul de Young E i al seu moment d'inèrcia I [14].

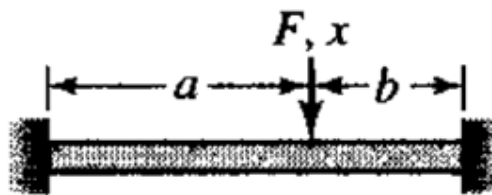


Figura 2 | Simplificació del Plat Harmònic de la caixa de ressonància una biga fixada. Font: [14]

Joan Toledo Freixas, a [15], va dissenyar un equip de baix cost capaç d'emetre vibracions en un punt de la caixa de ressonància i, al mateix temps, mesurar la seva resposta en diferents punts de la guitarra utilitzant sensors. La Figura 3 mostra la resposta obtinguda amb el model de guitarra M16 dissenyat per Camps.

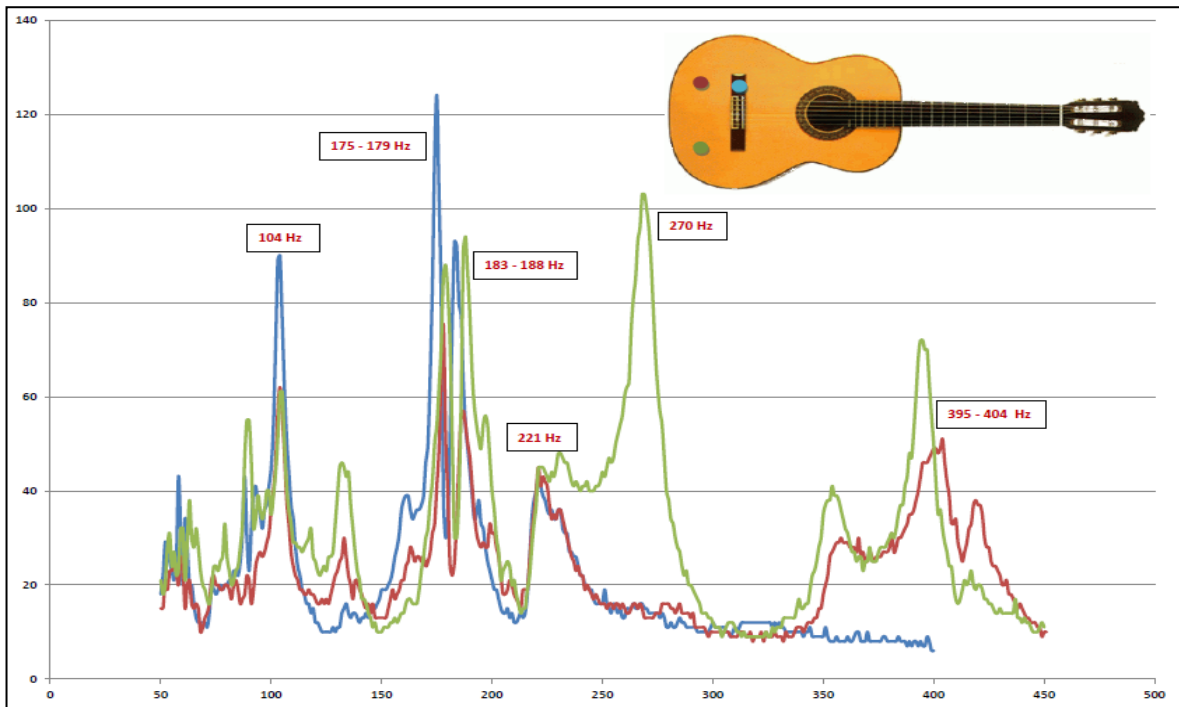


Figura 3 | Resposta de l'Anàlisi Modal del model M16 dissenyat per *Camps*. Font: [15]

Es pot observar a la Figura 3 com el primer gran pic de vibració on coincideixen les respostes dels sensors col·locats al pont i a la tapa superior és a 104Hz. Per tant, es conclou que és en aquesta freqüència on es troba el mode de vibració fonamental (1, 1).

D'altra banda, el professor Daniel Trias ha efectuat dos procediments experimentals més utilitzant el mateix model de guitarra *Camps*:

1. Espectre de potència o densitat espectral. Consisteix en gravar el so de diferents notes tocades amb la guitarra. Tot seguit, aquest senyal es tracta de tal manera que se'n pugui obtenir una funció matemàtica que defineixi com es distribueix la potència del so sobre les diferents freqüències de les quals està format.

La Figura 4 mostra l'espectre de potència de la mitjana de 10 senyals obtinguts en tocar la primera corda de la guitarra: el Mi agut. La freqüència d'aquest Mi és de 329,6 Hz i, efectivament, és on resulta haver-hi un pic més alt en el gràfic. Els següents pics són harmònics de la nota Mi i, per tant, coincidents amb una freqüència múltiple de 329,6. Tot i això, el primer pic de l'espectre també és molt rellevant, i apareix a la freqüència de 104Hz. Per tant, tot porta a pensar, que ha estat induït pel mode de vibració fonamental, que coincideix amb aquesta freqüència.

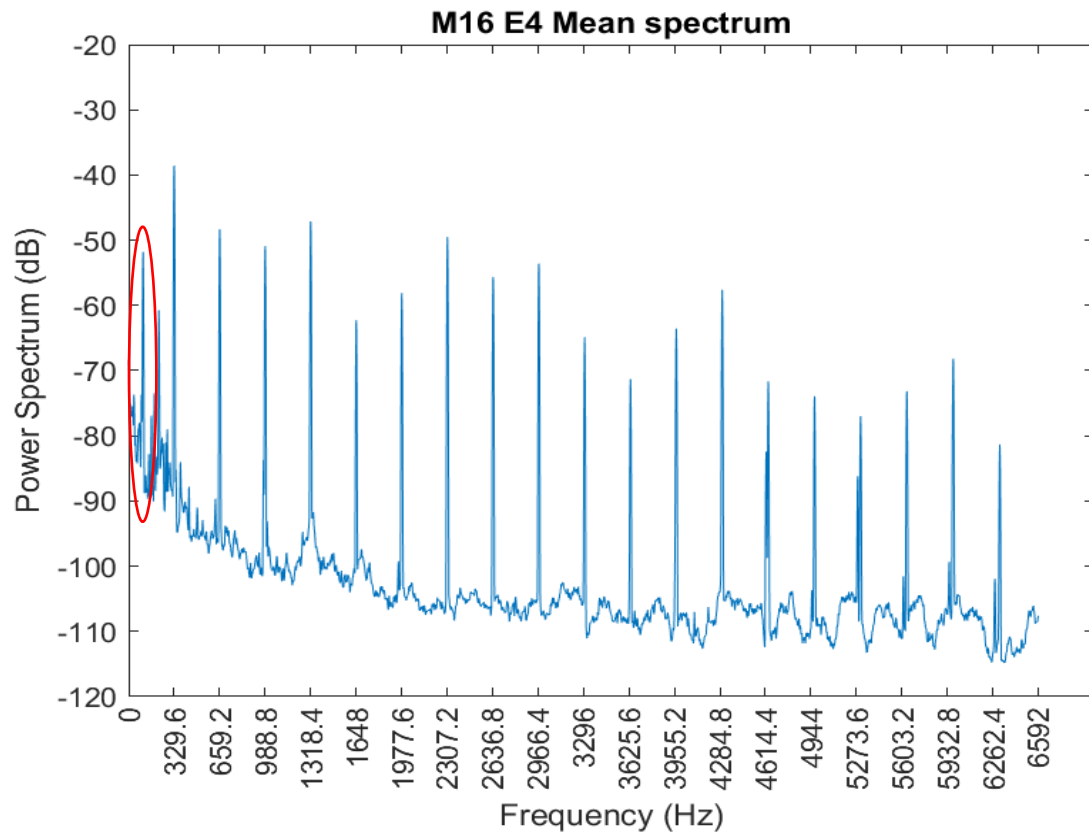


Figura 4 | Resultat de l'espectre de potència de la primera corda de la guitarra en el model M16 de Camps. Font: Dani Trias

2. Espectrograma. Consisteix en gravar el so de diferents notes tocades amb la guitarra. Tot seguit, aquest senyal es tracta de tal manera que se'n pugui obtenir una representació de l'espectre del senyal en el domini temporal. Al final, s'ha de poder interpretar en un gràfic en dues dimensions on la potència i el contingut freqüencial del senyal vagin variant al llarg del temps.

La Figura 5 mostra l'espectrograma de la mitjana de 10 senyals obtinguts en tocar la primera corda de la guitarra: el Mi agut. La freqüència d'aquest Mi és de 329,6 Hz i, efectivament, el so d'aquesta freqüència és el que apareix amb més força i el que perdura més al llarg del temps. Els següents pics són harmònics de la nota Mi i, per tant, coincidents amb una freqüència múltiple de 329,6 Hz, però amb una presència menor i també una menor prolongació al llarg del temps. Tot i això, a la part inferior del gràfic, s'hi pot observar, amb una gran força però poca duració, la rellevància de la vibració induïda pel mode fonamental a la freqüència de 104Hz.

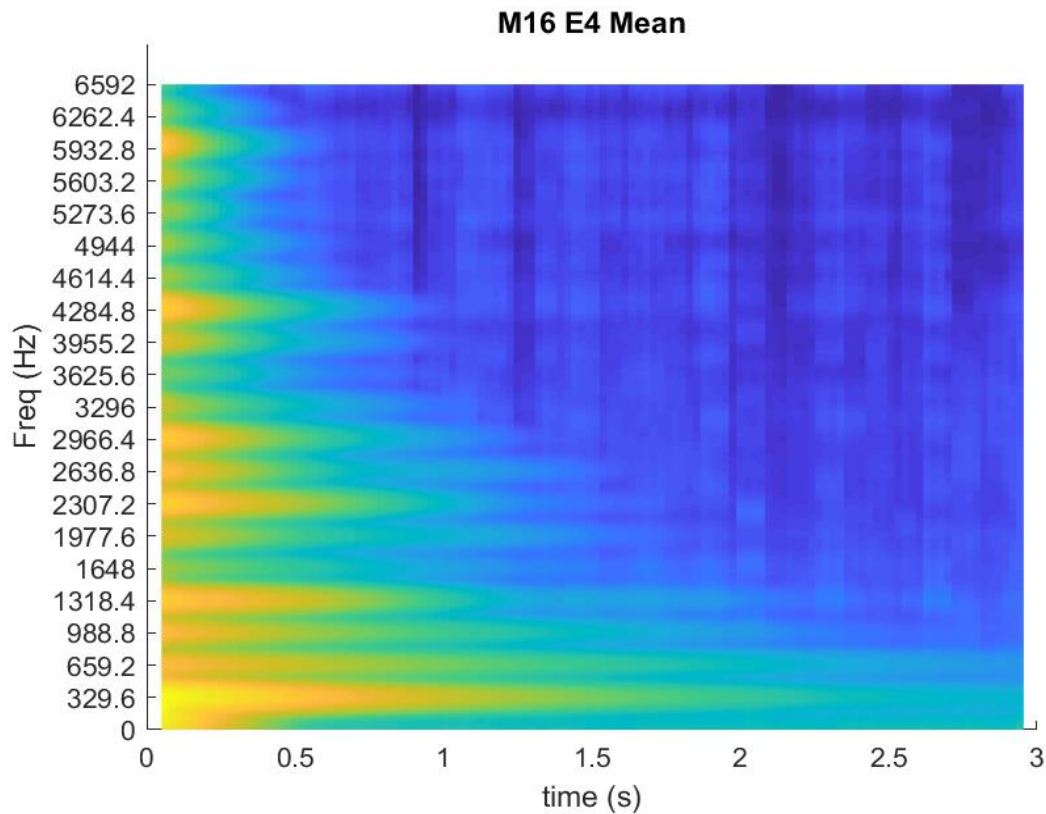


Figura 5 | Resultat de l'espectrograma de la primera corda de guitarra en el model M16 de Camps. Font: Dani Trias

La guitarra, al ser un instrument afinat a partir del La agut a 440Hz tal com marca l'*Organització Internacional d'Estandardització (ISO 16:1975)* [16], tindria un so més natural si la freqüència induïda pel mode de vibració fonamental, el qual apareix quan es toca qualsevol nota, coincideix amb un harmònic de la nota utilitzada per afinar-la. Per tant, una de les propostes per millorar la qualitat de la guitarra és aconseguir que el mode de vibració fonamental (1, 1) aparegui als 110Hz, freqüència del La greu.

Així doncs, sabent que un dels objectius del present estudi és poder controlar la freqüència del mode fonamental de vibració, cal modificar la massa i el moment d'inèrcia del conjunt de la guitarra (o, precisant, del plat harmònic) de tal manera que es pugui interpretar com afecten aquetes variacions a l'aparició del mode fonamental (1, 1).

6. Disseny utilitzat de la guitarra Camps

L'empresa de guitarres artesanes Camps utilitza, per a la construcció de guitarres clàssiques no amplifícades, un sol tipus de disseny. La distinció entre les diferents gammes de qualitat que ofereixen rau en la delicadesa i cura dels detalls constructius i, sobretot, en la qualitat dels materials (tractant-se bàsicament de fustes) utilitzats per a la seva construcció.

6.1 Disseny geomètric

El disseny de la guitarra clàssica utilitzada per Camps es divideix en 4 grans peces:

- El plat harmònic
- La tapa inferior
- Laterals de la caixa o cèrcols
- El mànec

Aquestes 4 grans peces, a la vegada, es poden descompondre en peces més petites, les quals es descriuen en els següents apartats.

6.1.1 Plat harmònic

El plat harmònic de la guitarra consta d'una xapa anomenada tapa superior, que té un forat (que popularment es coneix com a boca), a la qual s'hi adhireixen diferents barres i el pont.

Té 2 barres transversals, una a la part superior del forat i una a la part inferior. Referenciades com a *BS* i *BI* (Figura 6) ocasionalment a partir d'ara. Als laterals del forat hi ha dos barres harmòniques rectangulars, anomenats Rectangle 1 i Rectangle 2 (Figura 6).

A la part inferior de la tapa hi ha 5 barres harmòniques longitudinals, col·locades en forma de ventall de manera simètrica respecte l'eix longitudinal de la guitarra. Aquestes barres harmòniques es referencien ocasionalment en aquest estudi com a *BH 1, 2 i 3* (Figura 6). A més, també hi ha una barra harmònica transversal que passa per sobre de les longitudinals, anomenada ocasionalment *BH T* (Figura 6).

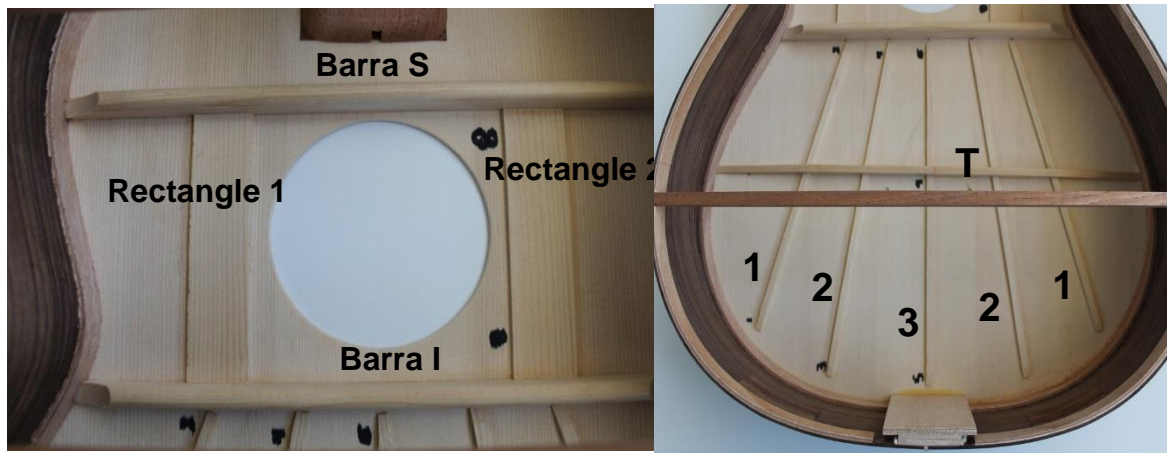


Figura 6 | Nomenclatura de les diferents parts del plat superior del disseny de la guitarra Camps. Font: Pròpia

Cal remarcar que en el disseny de les guitarres Camps la *BH T* es col·loca a una altura superior que la del disseny original d'Antonio Torres, el qual consta de dues petites barres al final de les barres harmòniques longitudinals, tal com es pot observar a la Figura 7.



Figura 7 | Detall de les diferències entre el disseny de les barres harmòniques de la guitarra Camps i el disseny original d'Antonio Torres Jurado. Font: Pròpia / <https://www.pinterest.es/pin/572731277605434443/>

A l'altra cara del plat harmònic hi ha una barra transversal anomenada pont. El pont s'utilitza per subjectar un dels extrems de les cordes. Les dimensions més importants de les peces que componen el plat harmònic es descriuen a la Taula 3.

Taula 3 | Valors de les dimensions més rellevants dels diferents paràmetres de disseny del plat harmònic

	BH 1	BH 2	BH 3	BH T	Rectangles	Plat D
Gruix [mm]	5	5	5	5.2	25	2.2
Altura [mm]	3.25	3.25	3.25	11.25	2.7	

6.1.2 Plat inferior

El plat inferior de la guitarra consta de la xapa anomenada tapa inferior i de 3 barres transversals, anomenades ocasionalment a partir d'ara *B1*, *B2* i *B3*, tal com es mostra a la Figura 8.

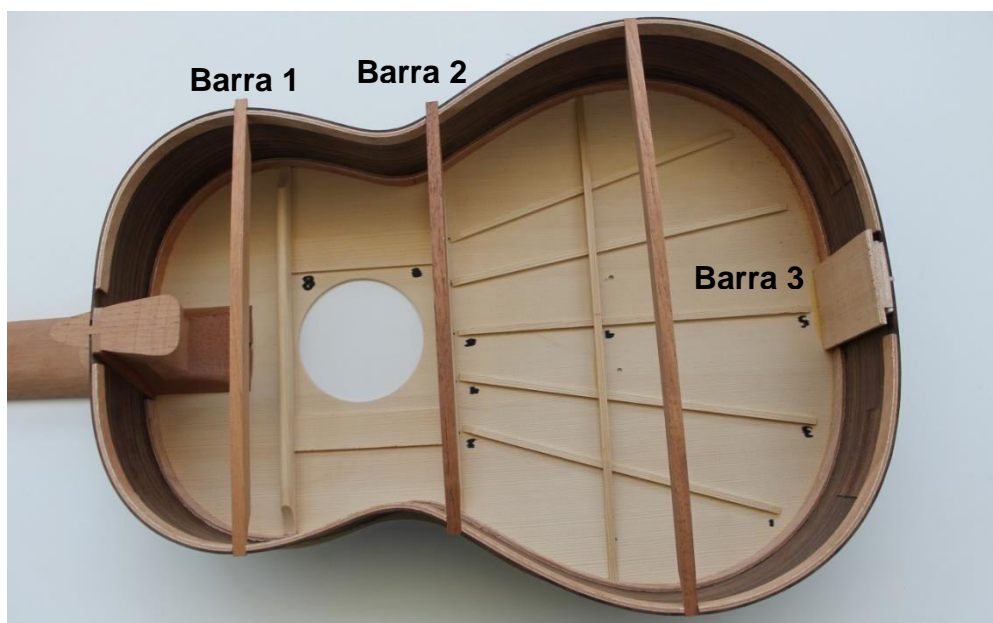


Figura 8 | Nomenclatura de les barres transversals del plat inferior de la guitarra. Font: Pròpia

6.1.3 Laterals de la caixa

Els cercols acaben de compondre, juntament amb les tapes superior i inferior, la caixa de ressonància. Consta d'una xapa fina, de 2 mil·límetres de gruix, més un reforç, de 2 mil·límetres de gruix, superior i inferior just tocant les tapes. En un extrem s'encaixa amb el mànec i a l'altre hi ha un reforç, el qual també va de tapa a tapa. Els detalls acabats de descriure es poden observar perfectament a la Figura 9.



Figura 9 | Detalls de les diferents parts que componen els laterals de la caixa de ressonància de la guitarra. Font: Pròpia

6.1.4 M ànec

El mànec de la guitarra es divideix en 3 parts diferenciades: el claviller, el braç i la barra metàl·lica. El claviller (a l'extrem del mànec) subjecta un extrem de les cordes i, a través d'uns mecanismes de vis sens fi, possibilita l'afinació de cada una d'elles.

El braç uneix la caixa amb el claviller i entra dins la caixa de ressonància, on s'acobra i s'encaixa amb els plats superior i inferior i els cèrcols. És necessari que aquest extrem del braç sigui consistent per a que pugui aguantar el braç mecànic generat per la tensió de les cordes i les mans del músic al tocar la guitarra. A més, al llarg del braç, hi ha una ranura per a la col·locació d'una la barra metàl·lica (ambdós detalls es poden apreciar a la Figura 10). Sobre el braç de la guitarra s'hi posa el diapasó, amb els trasts, els quals possibiliten el so de les diferents notes musicals.



Figura 10 | Detall de les parts que componen el mànec de la guitarra. Font: Pròpia

La barra metàl·lica es col·loca al llarg de l'eix longitudinal del braç per ajudar al mànec a suportar el braç mecànic sense patir greus deformacions.

6. 2 Materials de disseny

Tal com s'ha remarcat a l'Apartat 6, l'element crític del disseny que, en el cas de les guitarres Camps classifica les guitarres clàssiques en una gamma de qualitat o una altra, són els materials amb els quals ha estat construïda.

La Taula 4 conté els materials utilitzats per la construcció d'una guitarra de gamma baixa i una guitarra de gamma alta peça a peça.

Taula 4 | Materials utilitzats per la construcció de les guitarres Camps de gamma baixa i de gamma alta peça a peça

Part de la guitarra	Gamma Baixa	Gamma Alta
Tapa harmònica	Pi Oregon	Pi Avet
Barres harmòniques	Pi Avet	Pi Avet
Rectangles	Pi Avet	Pi Avet
Barres Superior i Inferior	Pi Avet	Pi Avet
Pont	Sapel·li	Palissandre
Tapa inferior	Sapel·li	Palissandre
Barres 1, 2 i 3	Cedre	Cedre
Cèrcols	Sapel·li	Palissandre
Mànec	Cedre	Cedre
Diapasó	Banús	Banús

7. Disseny 3D

Amb l'objectiu d'estudiar el comportament de la guitarra en ser excitada a diferents freqüències es reproduceix, en un model 3D, el prototip de guitarra clàssica ofert per l'empresa de guitarres Camps.

Per dimensionar tots els components del plat harmònic, s'utilitza la màquina de mesura de coordenades *Mitutoyo Crysta Apex 544* del grup de recerca del GREP de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona, amb les següents característiques:

- Correcció en temps real de la temperatura en l'interval de 16°C a 26°C
- Rang de mesura 505x405x405mm
- Resolució 0.1µm
- Precisió 1.7µm
- Consum d'aire de 50l/min
- Velocitat màxima de 520mm/s



Figura 11 | Màquina de mesura de coordenades *Mitutoyo Crysta Apex 544* amb la qual s'ha mesurat les dimensions de la caixa de ressonància del prototip. Font:

<https://www.machiningindanville.com/dimensional-metrology-lab/>

Aquesta màquina, utilitzant un palpador, ressegueix la tapa superior per obtenir un perfil dels components del plat harmònic en format *.SLDPRT*, el qual es pot obrir amb el software CAD *Solidworks*. El perfil obtingut del model utilitzat es mostra a la Figura 12.

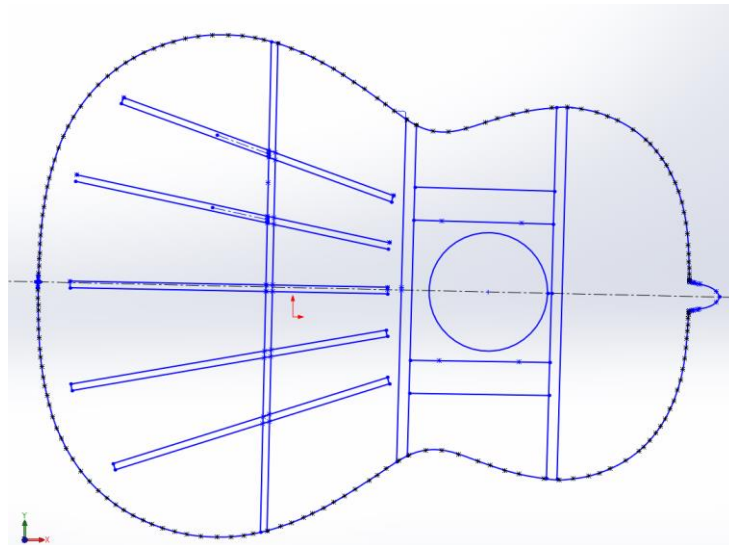


Figura 12 | Perfil obtingut del model amb la màquina de mesura de coordenades en el software *Solidworks*. Font: Pròpia

A partir del perfil obtingut i, amb l'ajuda d'un peu de rei, es mesuren les cotes de les dimensions de les peces de la tapa superior que manquen per poder fer l'assemblatge del plat harmònic. Per configurar el pont s'utilitzen les dimensions d'una guitarra *Camps* diferent a la del prototip proporcionat per l'empresa ja que l'ofert per l'empresa no en té.

La tapa inferior i els laterals s'obtenen a partir del perfil de la tapa obtinguda amb la màquina de mesura de coordenades. Les barres 1, 2 i 3 es mesuren íntegrament amb el peu de rei.

En busca de la simplicitat (tenint en compte que el mànec és un element poc rellevant en la vibració de la caixa de ressonància de la guitarra), per la configuració del mànec s'utilitza un model trobat a internet, modificat perquè encaixi amb la resta del disseny i fent la ranura de les mateixes dimensions que el model *Camps* perquè hi càpiga la barra metàl·lica. La modificació ha estat realitzada per l'estudiant Xin Fang.

La Figura 13 mostra el resultat de la modelització 3D del model *Camps* utilitzant el software CAD *Solidworks* i el compara amb el model original. Els plànols del conjunt i detall de peces que forma el plat harmònic (sense el pont) es presenten a l'Annex B.



Figura 13 | Resultat de la modelització 3D del model Camps utilitzant el software CAD *Solidworks*. Font: Pròpia

8. Configuració de la simulació

Per a realitzar la simulació que aporta els resultats de l'anàlisi modal s'utilitza el software *Ansys Workbench 17.1*. Amb aquest objectiu, primerament s'importa la geometria dissenyada amb el programa CAD *Solidworks* permetent la configuració paramètrica de les cotes més crítiques, segons la literatura (Apartat 4). Les peces amb cotes amb la possibilitat de ser modificades paramètricament són:

- Les barres harmòniques
- La tapa superior
- Els rectangles
- El pont

La possibilitat de poder posar una P dins els requadres que defineixen cada cota és la demostració que el software permet realitzar l'estudi parametritzant els valors de les dimensions escollides, tal com mostra la Figura 14.

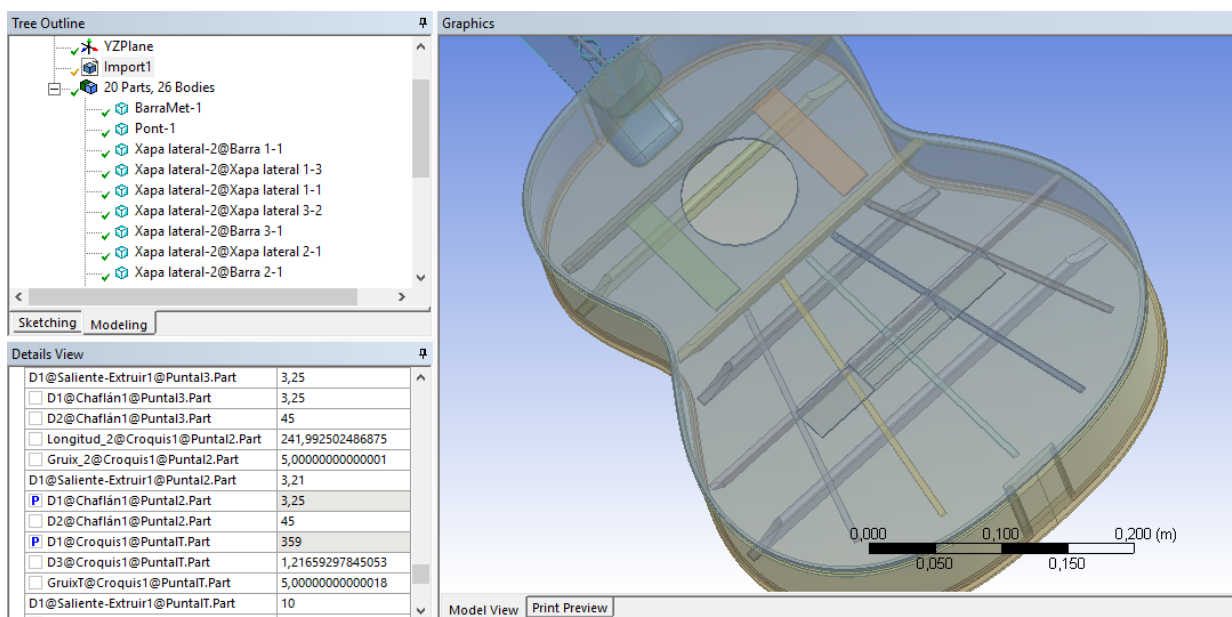


Figura 14 | Possibilitat de parametrització dels valors de les dimensions escollides. Font: Pròpia

8.1 Configuració dels materials

Els materials escollits per a cada part de la guitarra són els descrits a la Taula 4 de l'Apartat 6. 2 referits a una guitarra Camps de gamma alta. La guitarra és un instrument fet de fusta i, tal com sostenen [17] i [18] la fusta és un material ortotròpic, la qual cosa significa que les seves propietats elàstiques varien seguint la direcció de cadascun dels seus eixos. En el cas de la fusta es compta amb 3 eixos ortogonals entre

si, el longitudinal (referenciat com a X), el transversal (referenciat com a Y) i el radial (referenciat com a Z). Tal com es pot observar a la Figura 15, els llistons de fusta es tallen de tal manera que les fibres segueixin l'eix longitudinal. Les diferents parts de la guitarra no en són cap excepció. Per tant, al imputar un material a cada peça es té en compte que les seves propietats variïn seguint els eixos longitudinals, transversals i radials locals de cadascuna d'elles.

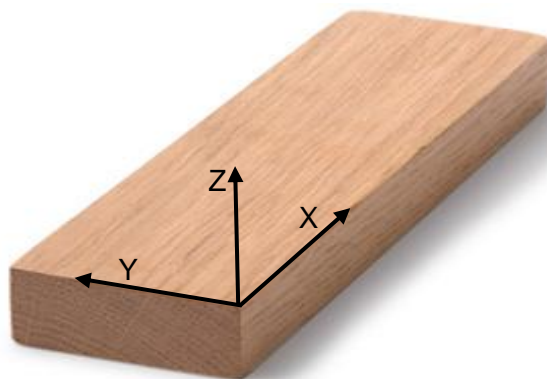


Figura 15 | Demostració gràfica dels diferents eixos d'un llistó de fusta. Font: <http://www.ljtopwood.com/es/listones/>

Els tipus de propietats necessàries per definir una fusta concreta per a poder realitzar l'anàlisi modal correctament són:

- Propietats físiques:
 - La densitat
- Propietats lineals elàstiques:
 - Elasticitat ortotròpica
 - Mòdul de Young en les direccions X, Y i Z
 - Coeficient de Poisson XY, YZ i XZ
 - Mòdul de cisallament XY, YZ i XZ

Els valors de les propietats físiques de les fustes del Pi Avet i el Cedre utilitzats per a l'estudi es mostren a la Taula 5 i a la Taula 6 respectivament, trobats a partir de les fonts [17] i [18]. Tots els valors s'han escollit en condicions de temperatura ambient i contingut humit del 12%.

Taula 5 | Valors de les propietats físiques i elàstiques de les fustes del Pi Avet

Densitat [kg/m ³]	Mòdul de Young X [MPa]	Mòdul de Young Y [MPa]	Mòdul de Young Z [MPa]	Coeficient de Poisson XY	Coeficient de Poisson YZ	Coeficient de Poisson XZ	Mòdul de Cisallament XY [MPa]	Mòdul de Cisallament YZ [MPa]	Mòdul de Cisallament XZ [MPa]
530	9790	381.81	998.58	0.332	0.336	0.341	567.82	58.74	685.3

Taula 6 | Valors de les propietats físiques i elàstiques de les fustes del Cedre

Densitat [kg/m ³]	Mòdul de Young X [MPa]	Mòdul de Young Y [MPa]	Mòdul de Young Z [MPa]	Coefficient de Poisson XY	Coefficient de Poisson YZ	Coefficient de Poisson XZ	Mòdul de Cisallament XY [MPa]	Mòdul de Cisallament YZ [MPa]	Mòdul de Cisallament XZ [MPa]
320	6050	490.05	1107.2	0.340	0.345	0.337	1131.4	90.75	1270.5

En el cas de la fusta de Palissandre (fusta tova), no es disposa de suficient informació sobre les seves propietats elàstiques ortotròpiques. Com a solució d'aquest problema, [17] proposa tractar les propietats elàstiques de la fusta del Palissandre com a isotròpiques utilitzant les úniques dades de les quals disposa:

- Densitat de 750 kg/m³
- Mòdul de Young de 12300 MPa
- Coeficient de Poisson de 0.330

El mòdul de cisallament, en materials isotròpics es pot trobar a partir de:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2)$$

On G és el Mòdul de Cisallament, E és el Mòdul de Young i ν és el coeficient de Poisson. D'aquesta manera s'obté un Mòdul de Cisallament de la fusta del Palissandre de 4624 MPa.

La utilització d'aquest mètode assumeix que totes les direccions de la fusta es comportin de la mateixa manera, la qual cosa, tal com es comprova a la Taula 5, és bastant allunyada de la realitat. És per aquest motiu que s'intenta un altre mètode per trobar les propietats elàstiques ortotròpiques restants a partir dels valors amb què es compta.

Aquest mètode segueix les diferents assumpcions:

- El Mòdul de Young de 12300 MPa és el de la fusta del Palissandre en la direcció X (longitudinal).
- El Coeficient de Poisson de 0.330 és el de la fusta del Palissandre entre les direccions XY (longitudinal i transversal).

Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

- Les proporcions entre el Mòdul de Young X i els Mòduls de Young Y i Z són la mitjana entre aquestes mateixes proporcions en les fustes toves de les quals se'n té informació en [18].
- Les proporcions entre el Coeficient de Poisson XY i els Coeficients de Poisson YZ i XZ són la mitjana entre aquestes mateixes proporcions en les fustes toves de les quals se'n té informació en [18].
- Les proporcions entre el Mòdul de Young X i els Mòduls de Cisallament XY, YZ i XZ són la mitjana entre aquestes mateixes proporcions en les fustes toves de les quals se'n té informació en [18].

Les proporcions mitjanes trobades de les diferents propietats ortotròpiques en les fustes toves a partir del Mòdul de Young E_X i el Coeficient de Poisson ν_{XY} s'ordenen a la Taula 7.

Taula 7 | Proporcions mitjanes de les deferents propietats ortotròpiques en les fustes toves a partir del Mòdul de Young E_X i el Coeficient de Poisson ν_{XY}

E_Y/E_X	E_Z/E_X	ν_{YZ}/ν_{XY}	ν_{XZ}/ν_{XY}	G_{XY}/E_X	G_{YZ}/E_X	G_{XZ}/E_X
0.05721053	0.09626316	0.9793698	0.9825305	0.07705263	0.00931579	0.08242105

Multiplicant les propietats elàstiques de la fusta del Palissandre per les proporcions descrites a la Taula 7 es troben les aproximacions de la resta de les propietats elàstiques ortotròpiques de la fusta desitjades. La Taula 8 les mostra.

Taula 8 | Valors de les propietats elàstiques ortotròpiques utilitzats per la fusta del Palissandre

Mòdul de Young X [MPa]	Mòdul de Young Y [MPa]	Mòdul de Young Z [MPa]	Coeficient de Poisson XY	Coeficient de Poisson YZ	Coeficient de Poisson XZ	Mòdul de Cisallament XY [MPa]	Mòdul de Cisallament YZ [MPa]	Mòdul de Cisallament XZ [MPa]
12300	703.69	1184.04	0.33	0.323	0.324	947.75	114.58	1013.78

Per últim, es considera que la barra metàl·lica del mànec és d'acer. Els valors de les seves propietats físiques i elàstiques (isotròpiques) s'obtenen de la pròpia biblioteca de materials del software *Ansys*. Aquestes propietats es mostren a la Taula 9.

Taula 9 | Propietats físiques i elàstiques de l'acer

Densitat [kg/m ³]	Mòdul de Young [MPa]	Coefficient de Poisson	Mòdul de Cisallament [MPa]
7850	200000	0.300	76923

8.2 Configuració del mallat

Amb l'objectiu de realitzar un mallat que aporti un resultat el més fidel possible a la realitat es divideixen les diferents parts de la guitarra en dos grups segons la seva naturalesa:

- Peces de fusta
 - Màneg
 - Barres del plat harmònic
 - Barres de la tapa inferior
- Xapes
 - Tapa superior
 - Tapa inferior
 - Cèrcols
 - Pont

Encara que el pont sigui una peça de fusta, al ser l'única peça a sobre el plat harmònic es malla com si fos xapa, com si del mateix plat harmònic es tractés.

8.2.1 Mallat de les peces de fusta

Es tracten amb especial atenció les parts del claviller i el braç del màneg degut a la seva complexitat geomètrica, a les quals es realitza un amidament específic. Ambdós tenen un mallat de 8mm entre nodes i amb forma de tetraedre (Figura 16). Amb aquesta mida i tipus de prisma el mallat s'adapta correctament a la difícil geometria dels dos cossos.

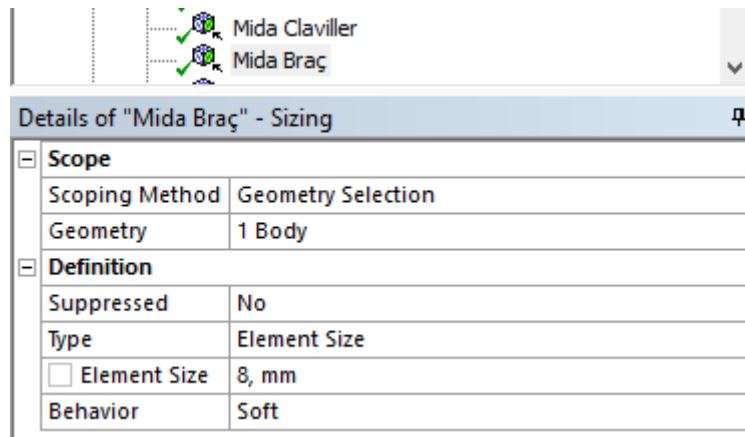


Figura 16 | Configuració del mallat especial específicament pel claviller i el braç de la guitarra.

Font: Pròpia

Les demás peces de fusta de la guitarra (barres de la tapes superior i inferior) es mallen per defecte tal com el software creu que s'ha de realitzar. Aquesta llicència es permet degut a la simplicitat geomètrica de les barres. El resultat final del mallat de les peces de fusta es mostra a la Figura 17.

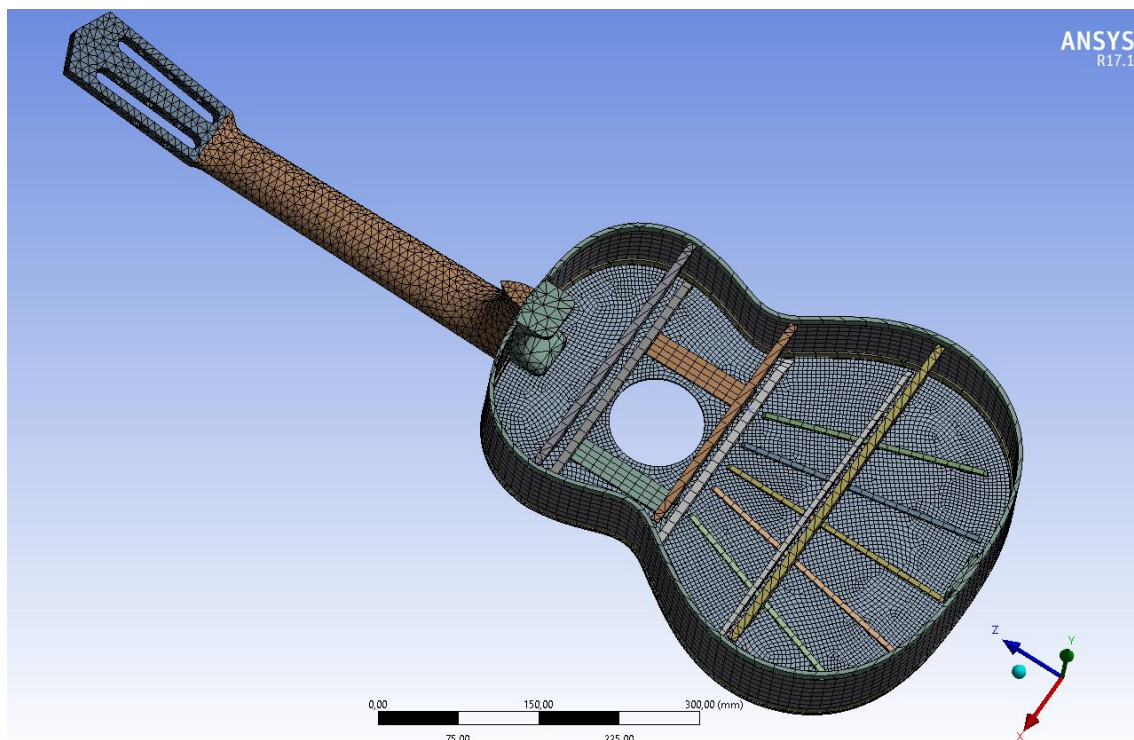


Figura 17 | Mallat resultant de les peces de fusta. Font: Pròpia

8.2.2 Mallat de les xapes

Les tapes superior, inferior i els cercols, al ser xapes de fusta, s'intenta que la malla tingui, en la mesura que sigui possible, forma de prisma quadrilàter. En el cas de la tapa superior, al ser l'element més important en la conducció de la vibració de la

Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

guitarra, té una mida de nodes de 4mm. Pels cèrcols s'ha realitzat un amidament específic del mallat de 10mm entre nodes i per la tapa inferior, de menor importància, un mallat de 15mm entre nodes. El pont té un amidament especial de mallat de 5mm entre nodes degut a la seva complexa geometria. La Figura 18 mostra la configuració del mallat requerida pels elements esmentats.

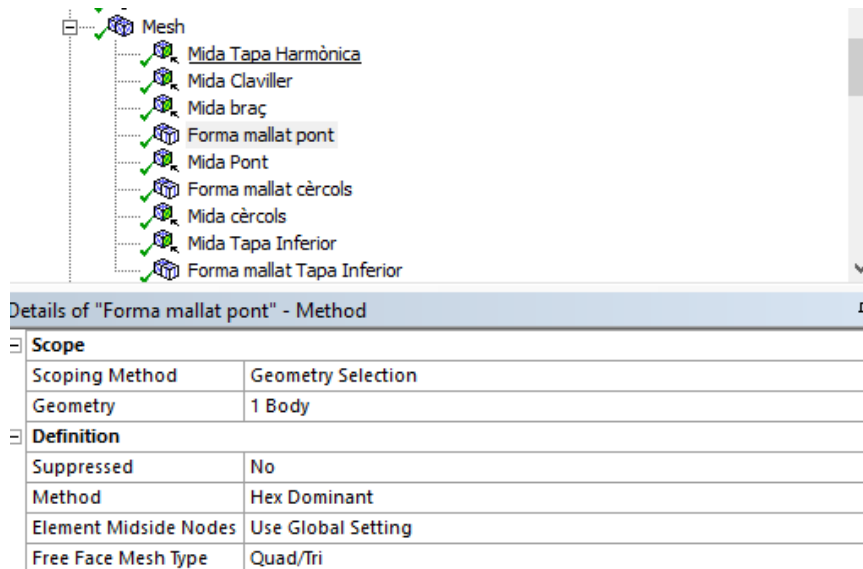


Figura 18 | Configuració del mallat especial per les tapes superior, inferior, els cèrcols i el pont.

Font: Pròpia

Normalment, amb el software *Ansys*, s'utilitza el format *Shell* per simular el comportament d'elements amb les característiques d'una xapa. En el present cas, com que el comportament de les tapes en l'eix del seu gruix és poc rellevant, pel bé de la simplicitat no s'ha utilitzat aquest format en la configuració del mallat de les xapes. El resultat final del mallat de les tapes superior, inferior i els cèrcols es pot observar a la Figura 19.

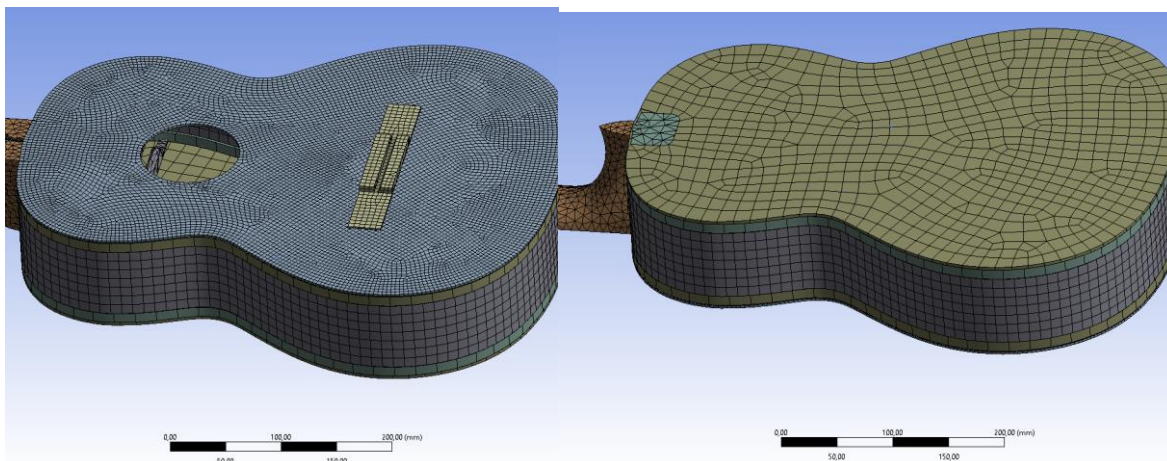


Figura 19 | Resultat final del mallat de les tapes superior, inferior i els cèrcols. Font: Pròpia

8.3 Condicions de contorn

La posició ortodoxa emprada per als guitarristes a l'hora de tocar la guitarra clàssica és: assegut, amb la part enfonsada de la caixa de ressonància recolzada a la cama esquerra, la qual està elevada per un aparell anomenat peu, tal com mostra la Figura 20. La tapa inferior de la guitarra toca, en gran part, la panxa del guitarrista.



Figura 20 | Posició ortodoxa emprada a l'hora de tocar la guitarra clàssica. Font: <http://artistaspoblanos.com/musica/juan-gaspar/>

Per tant, la guitarra no està sota unes condicions de llibertat. Les condicions de contorn més semblants a la realitat en el moment de tocar la guitarra és la de considerar la tapa inferior de la guitarra com si fos un suport fix. En conseqüència, la Figura 21 mostra com es configura al programa de simulació.

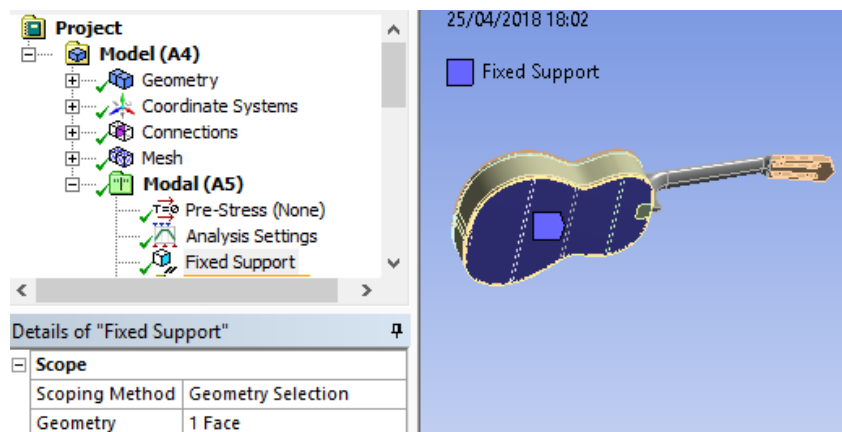


Figura 21 | Configuració de les condicions de contorn utilitzades. Font: Pròpia

9. Anàlisi Modal

Un cop configurada la simulació amb les condicions de material, de mallat i de contorn exposades a l'Apartat 8 es pot realitzar l'anàlisi modal del disseny original de la guitarra utilitzat per *Camps*. Els resultats de la simulació de la guitarra original seran utilitzats de base per a poder comparar les respostes de les diferents modificacions i extreure'n conclusions.

A partir de la informació que es troba a la bibliografia (Apartat 3), del marc de treball de la literatura (Apartat 4) i de la teoria de la vibració (Apartat 5) es decideix fixar l'anàlisi modal en la variació de dos components bàsics de la guitarra: les barres harmòniques i el plat superior. En el cas de les barres harmòniques es decideix variar les dimensions, la seva orientació i la seva forma, per veure de quina manera afecten al comportament modal. En el cas de la tapa superior es decideix observar com afecta la variació del gruix de la xapa al seu comportament.

Per tal de trobar la forma dels modes de vibració i les seves freqüències i comparar-los amb els resultats del disseny de la guitarra original és necessari realitzar cada simulació una a una. La necessitat d'observar les formes que adquireixen els diferents modes impossibilita l'ús del format de la simulació paramètrica.

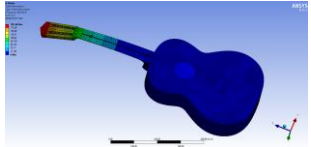
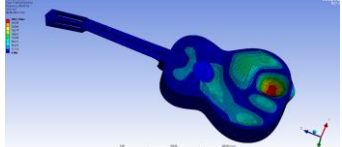
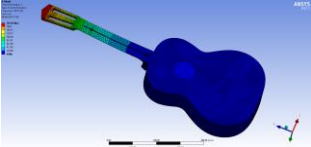
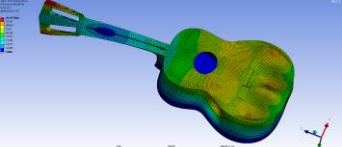
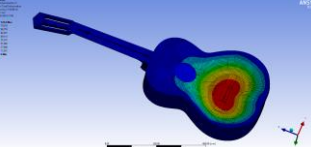
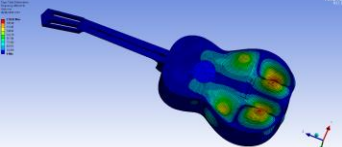
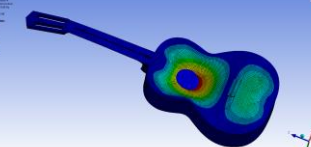
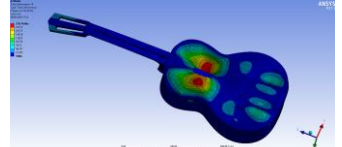
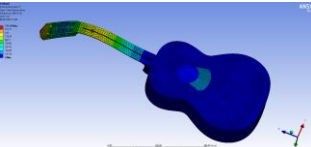
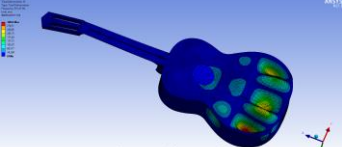
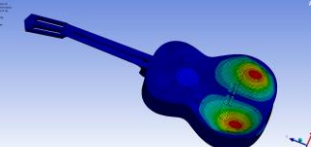
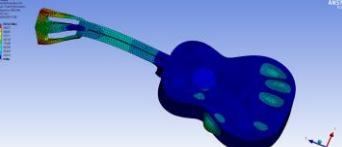
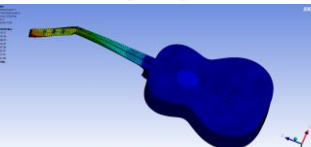
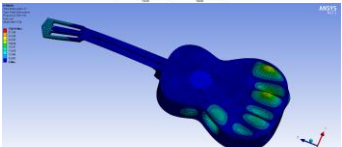
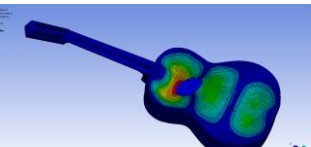
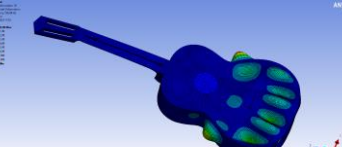
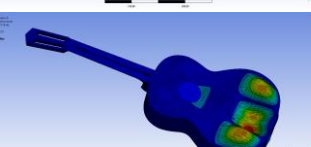
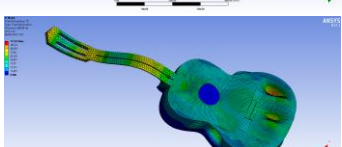
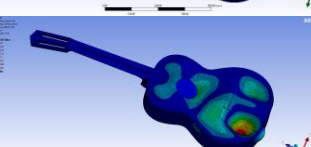
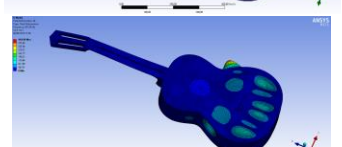
9.1 Característiques de la simulació

La nota més aguda (o sigui, d'una freqüència superior) que es pot tocar amb una guitarra clàssica és un Si de 987,767Hz. Tot i això, resulten escasses les partitures que usin notes més agudes o iguals al Mi de 659,25 Hz. A més, en aquesta línia, la majoria d'estudis observats a la bibliografia ([7], [8], [9], [10] i [19]), pels anàlisis modals, utilitzen un rang de freqüència de fins a 600Hz degut a la complexitat de mesura dels modes experimentalment a partir d'aquesta freqüència. Per tot això, encara que es puguin obtenir harmònics a freqüències més elevades, es conclou configurar la simulació per no arribar a un rang de freqüències superior al Mi de 659,25Hz en els diferents anàlisis modals.

9.2 Anàlisi Modal del model original

Es configura el model original per obtenir els 20 primers modes de freqüència de la guitarra amb els objectius de, primer, saber a quina freqüència arriba el 20^e mode i, segon, marcar una base amb la qual poder comparar les posteriors simulacions, tant de les freqüències de vibració de cada mode com de les formes que aquests adquireixen. Els resultats de l'anàlisi modal es mostren a la Taula 10.

Taula 10 | Resultats de l'anàlisi model del disseny original de guitarres *Camps*

Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Modes	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,216		11	452,45	
2	103,77		12	463,99	
3	138,46		13	492,22	
4	235,84		14	531,44	
5	266,13		15	551,37	
6	292,71		16	563,6	
7	319,24		17	574,11	
8	322,05		18	583,66	
9	431,18		19	605,65	
10	449,51		20	615,95	

Observant els resultats de la Taula 10 queda palès que, a mesura que augmenta la freqüència de vibració, els modes adquireixen formes cada vegada més complexes. Els primers tres modes de vibració que afecten la caixa de ressonància són:

- (1, 1)
- (1, 2)
- (2, 1)

A mesura que va augmentant la freqüència passa a ser molt difícil poder descriure la forma dels modes a la caixa de ressonància amb aquest tipus de nomenclatura.

Com que el 20^è mode de vibració sorgeix a una freqüència de 615,95Hz es decideix sempre extreure com a resultat els 20 primers modes de vibració de cada modificació que es faci, assumint que, aquestes, faran variar la freqüència de l'últim mode podent superar els 659,25Hz o no arribar als 600Hz, ambdós en casos molt excepcionals.

9. 3 Modificació del material

Un dels aspectes que fa variar el preu d'una guitarra és el material del qual està composta. El model utilitzat com a original del qual es realitza l'anàlisi modal s'ha dissenyat a partir dels materials especificats per *Camps* com a gamma alta, tal com s'explica a l'Apartat 6. 2.

Es proposa canviar les propietats dels materials utilitzats en el model original per les dels materials especificats a la Taula 4 específics d'una guitarra de gamma baixa. Així doncs, el pont, els cercols i la tapa inferior passaran a ser de Sapel-li i la tapa superior passarà a ser de Pi Oregon.

En el cas de les fustes tant de Sapel-li com de Pi Oregon (fustes toves), no existeix suficient informació sobre les seves propietats elàstiques ortotròpiques. Per tant, es realitza el procediment exposat a l'Apartat 8. 1 per trobar tots els components necessaris per definir les fustes ortotròpicament. Al només trobar la densitat i el Mòdul de Young del Sapel-li [20] i del Pi Oregon [21], el coeficient de Poisson de les dues fustes s'ha calculat utilitzant la mitjana del coeficient de Poisson de totes les fustes toves de les quals sí que se'n tenen dades a [18], el qual té un valor de 0,352. Els valors de les propietats utilitzades pel Pi Oregon es troben a la Taula 11 i les del Sapel-li a la Taula 12.

Taula 11 | Valors de les propietats elàstiques utilitzats pels materials Pi Oregon

Densitat [kg/m ³]	Mòdul de Young X [MPa]	Mòdul de Young Y [MPa]	Mòdul de Young Z [MPa]	Coefficient de Poisson XY	Coefficient de Poisson YZ	Coefficient de Poisson XZ	Mòdul de Cisallament XY [MPa]	Mòdul de Cisallament YZ [MPa]	Mòdul de Cisallament XZ [MPa]
610	9.380	536,63	902,95	0,352	0,345	0,346	722,75	87,38	773,11

Taula 12 | Valors de les propietats elàstiques utilitzats pels materials Sapel-li

Densitat [kg/m ³]	Mòdul de Young X [MPa]	Mòdul de Young Y [MPa]	Mòdul de Young Z [MPa]	Coefficient de Poisson XY	Coefficient de Poisson YZ	Coefficient de Poisson XZ	Mòdul de Cisallament XY [MPa]	Mòdul de Cisallament YZ [MPa]	Mòdul de Cisallament XZ [MPa]
670	12.040	688,81	1.159,01	0,352	0,345	0,346	992,71	112,16	992,35

9. 4 Modificació de la Tapa Superior

La tapa superior de la guitarra és la que transmet la vibració de les cordes a la resta de la guitarra. La seva forma ha estat molt definida al llarg dels anys, per tant, és poc susceptible de rebre modificacions. Tot i així, hi ha una dimensió que pot ser motiu de discussió: el seu gruix.

Es proposa variar el gruix de la tapa superior des de 0,5mm fins a 3,5mm en intervals de 0,5mm, i, posteriorment, fer-ne l'anàlisi modal, trobar els 20 primers modes de vibració, les seves freqüències i comparar-los amb els resultats del disseny de la guitarra original, on el gruix de la Tapa Superior és de 2,2mm.

9. 5 Modificació de les Barres Harmòniques

Es decideix modificar les barres harmòniques de diferents maneres degut a que són una peça clau de l'estructura de la caixa de ressonància. Es proposa l'estudi de la modificació de:

- Les dimensions (base y i altura z)
- La seva posició (el seu grau d'inclinació respecte l'eix de la guitarra)
- La seva forma (forma triangular)

L'explicació detallada de les diferents modificacions es realitza en els Apartats 9.5.1, 9.5.1.2 i 9.5.3.

9.5.1 Modificació de les dimensions de les Barres Harmòniques

Les barres harmòniques col·locades simètricament en forma de ventall respecte l'eix longitudinal de la guitarra tenen forma rectangular, amb una base y de 5mm, una altura

Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

z de 3,25mm i diferents longituds x (eixos exposats la Figura 15) depenent de si es tracta de la barra harmònica 1, 2 o 3 (Annex B.B, Annex B.C i Annex B.D).

Aquestes barres harmòniques passen a través de la barra harmònica transversal a partir d'uns forats. Aquests forats també han d'anar variant de mida per fer que les Barres Harmòniques longitudinals hi puguin seguir passant.

9.5.1.1 Modificació de la base y de les Barres Harmòniques

Es proposa fer variar la base de les Barres Harmòniques (inclosa la transversal) des d'1mm fina a 15mm i, amb ella, la base dels forats de la barra transversal tal com mostra la Taula 13. Posteriorment, fer l'anàlisi modal, trobar els 20 primers modes de vibració i les seves freqüències i comparar-los amb els resultats del disseny de la guitarra original.

Taula 13 | Dimensions de la base de les Barres Harmòniques i de la base dels forats de la Barra Harmònica Transversal

Base BH [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Base Forat [mm]	2,5	3,3	4,5	5,5	6,5	7,8	8,2	9,8	11	12,5	13,8	15	16,3	17,5	18,8

9.5.1.2 Modificació de l'altura z de les Barres Harmòniques

Es proposa fer variar l'altura de les barres harmòniques (sense incloure la transversal) des de 2mm fina a 4mm tal com mostra la Taula 14. Cal modificar l'altura dels forats de la barra transversal perquè tinguin les mateixes dimensions que les barres longitudinals amb l'objectiu de que aquestes la puguin travessar sense cap mena d'obstacle.

Taula 14 | Dimensions de l'altura de les Barres Harmòniques rectangulars

Altura z [mm]	2	2,5	3	3,25	3,5	4
---------------	---	-----	---	------	-----	---

Aquesta modificació té un interès exclusiu per observar el comportament del mode de vibració fonamental. Per tant, no es consideren ni les formes ni les freqüències d'aparició dels següents modes de vibració.

9.5.2 Modificació de la posició de les Barres Harmòniques

Les Barres Harmòniques s'encolen a la tapa superior de la guitarra de tal manera que la seva forma recorda la d'un ventall on les barres harmòniques 1 i 2, en el disseny original, tenen un angle respecte l'eix longitudinal de la guitarra (i de la barra harmònica 3) de $18,71^\circ$ i $10,89^\circ$ respectivament.

Per observar les conseqüències que la posició de les Barres Harmòniques té en els modes de vibració i les seves freqüències es proposa variar de 0° fins a 20° l'angle de les Barres Harmòniques 1 i 2 respecte l'eix longitudinal de la guitarra de manera simultània i fer la simulació de l'anàlisi modal en intervals de 2° .

9.5.3 Modificació de la forma de les Barres Harmòniques

La majoria de les guitarres tenen les barres harmòniques amb forma rectangular i les guitarres *Camps* no en són cap excepció. Tot i això, la gamma de major qualitat de guitarres *Camps* utilitza barres harmòniques amb forma triangular.

Es proposa canviar la forma rectangular amb una base y de 5mm i una altura z de 3,25mm de les barres harmòniques del disseny original de la guitarra per la forma rectangular amb una base y de 5mm i una altura z de 3,25mm. D'aquesta manera s'observen les conseqüències que la forma de les barres harmòniques té en els modes de vibració i les seves freqüències. A més, també es proposa l'anàlisi modal per comprovar quin efecte té la variació de l'altura z per les altures proposades a la Taula 15.

Taula 15 | Dimensions de l'altura de les Barres Harmòniques triangulars

Altura z [mm]	2	2,5	3	3,25	3,5	4	5
-----------------	---	-----	---	------	-----	---	---

10. Discussió dels resultats

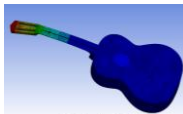
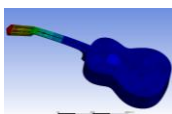
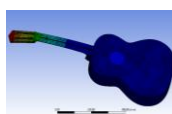
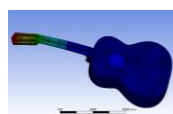
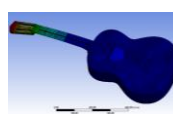
Els resultats de les diferents simulacions dels anàlisis modals (tots degudament tabulats a l'Annex A) mostren diferents tendències, alguna comuna a totes les modificacions i d'altres d'individuals per a cada tipus de variació del disseny, de les quals se'n poden arribar a extrapolar algunes conclusions. Les tendències comunes a totes les simulacions es presenten a continuació.

Les modificacions de qualsevol aspecte de disseny que no compregui al mànec de la guitarra fa que, tant els modes de vibració en els quals el mànec tingui un clar protagonisme com les freqüències en les quals apareixen, es vegi pràcticament inalterat.

La Taula 16 mostra, com a exemple, la forma i la freqüència del primer mode de vibració que afecta principalment al mànec de la guitarra quan, a la caixa de ressonància, se li ha aplicat les modificacions més extremes possibles al disseny de:

- El gruix de la tapa superior
- La mida de les barres harmòniques
- L'angle de posició de les barres harmòniques
- La forma de les barres harmòniques

Taula 16 | Forma i freqüència del mateix mode de vibració, el qual afecta principalment al mànec de la guitarra, al aplicar diferents variacions al disseny de la caixa de ressonància

Variació	<i>TS</i> 3,5mm	<i>BH</i> 1mm	<i>BH</i> 15mm	Angle <i>BH</i> 0°	<i>BH</i> Triangulars
Freqüència [Hz]	50,577	50,21	50,227	50,211	55,476
Mode					

Es pot observar a la Taula 16 com la freqüència d'aparició del mode resta pràcticament invariable en tots els casos excepte en el cas de les barres harmòniques triangulars. Tot i això, aquesta variació (la més alta trobada) és molt menor a les que es veuen sotmesos els modes en els quals la protagonista principal és la caixa de ressonància.

És per això, que els modes de vibració del mànec no es consideren en els resultats de les diferents modificacions, ja que les seves variacions són menyspreables.

10. 1 Resultats de la modificació dels materials

Els resultats de canviar els materials de la guitarra de gamma alta pels de gamma baixa, tabulats a l'Annex A.A, mostren dues clares tendències:

1. El Pi Oregon i el Sapel-li, al tenir uns Mòdul de Young X (9.380 MPa i 12.040 MPa, respectivament) molt semblants però una mica inferiors als del Pi Avet i el Palissandre (9.790 MPa i 12.300 MPa, respectivament), fan que, al canviar el material de la tapa Superior i els cercols els modes de vibració on aquestes parts són protagonistes apareguin a una freqüència molt semblant, però lleugerament inferior.

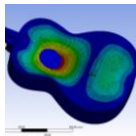
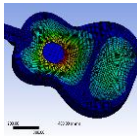
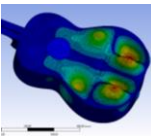
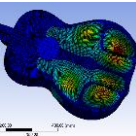
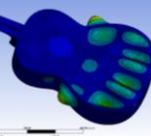
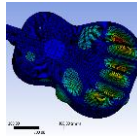
La Taula 17 mostra l'exemple de diferents modes de vibració on la tapa superior té un paper protagonista i en compara les freqüències d'aparició.

Taula 17 | Variació de la freqüència d'aparició dels modes on la Tapa Superior té un paper protagonista al canviar els materials de la guitarra de gamma alta per els de gamma baixa

Gamma	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa
Mode	(1, 1)	(1, 1)	(2, 1)	(2, 1)	(1, 3)	(1, 3)
Freqüència [Hz]	138,46	137,11	292,71	288,19	322,05	315,47

2. Els modes de vibració apareixen pel mateix ordre i amb formes molt semblants, tal com mostra la Taula 18, on es comparen les formes de diferents modes.

Taula 18 | Variació de les formes dels modes de vibració canviant els materials de la guitarra de gamma alta pels de gamma baixa

Gamma	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa
Mode						

Dels resultats de l'estudi d'aquesta modificació de disseny no es pot extreure com a conclusió que els materials utilitzats amb les guitarres de gamma baixa tinguin un efecte qualitatiu visible a través de l'anàlisi modal realitzat. Tot i això, d'aquest estudi, es pot concloure que materials amb un Mòdul de Young inferior fan que la freqüència de vibració disminueixi.

10. 2 Resultats de la modificació de la Tapa Superior

Els resultats de fer variar el gruix de la tapa superior des de 0,5mm fina a 3,5mm, tabulats a l'Annex A.B, mostren dues clares tendències:

Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

1. A mesura que es va afegint més gruix a la xapa els modes de freqüència referents a la caixa de ressonància apareixen a una freqüència més elevada. La Taula 19 mostra el clar exemple del primer mode referit a la caixa, el fonamental (1, 1), i del mode (1, 3).

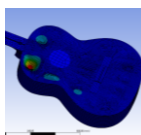
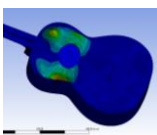
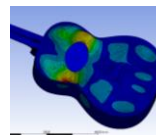
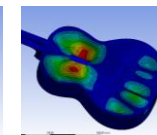
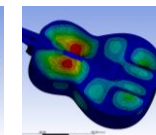
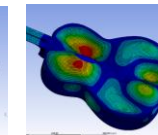
Taula 19 | Variació de la freqüència d'aparició dels modes de vibració (1, 1) i (1,3) al augmentar el gruix de la Tapa Superior

Variació	TS 0,5mm	TS 2mm	TS 3,5mm	TS 1mm	TS 2mm	TS 3,5mm
Mode	(1, 1)	(1, 1)	(1, 1)	(1, 3)	(1, 3)	(1, 3)
Freqüència [Hz]	87,777	135,46	148,56	272,33	309,46	395,2

S'observa clarament a la Taula 19 com a mesura que el gruix de la tapa superior va augmentant també ho fa la seva freqüència. L'augment de la freqüència és molt acusat.

2. A mesura que es va afegint més gruix a la xapa els modes de vibració referents a la caixa de ressonància apareixen d'una manera més "definida". La Taula 20 mostra l'exemple de com es va definint el mode (2, 3) a mesura que augmenta el gruix del Plat Superior.

Taula 20 | Variació de la "definició" d'un mode de vibració a mesura que es va augmentant el gruix de la Tapa Superior

Variació	TS 0,5mm	TS 1mm	TS 1,5mm	TS 2mm	TS 2,5mm	TS 3,5mm
Mode						

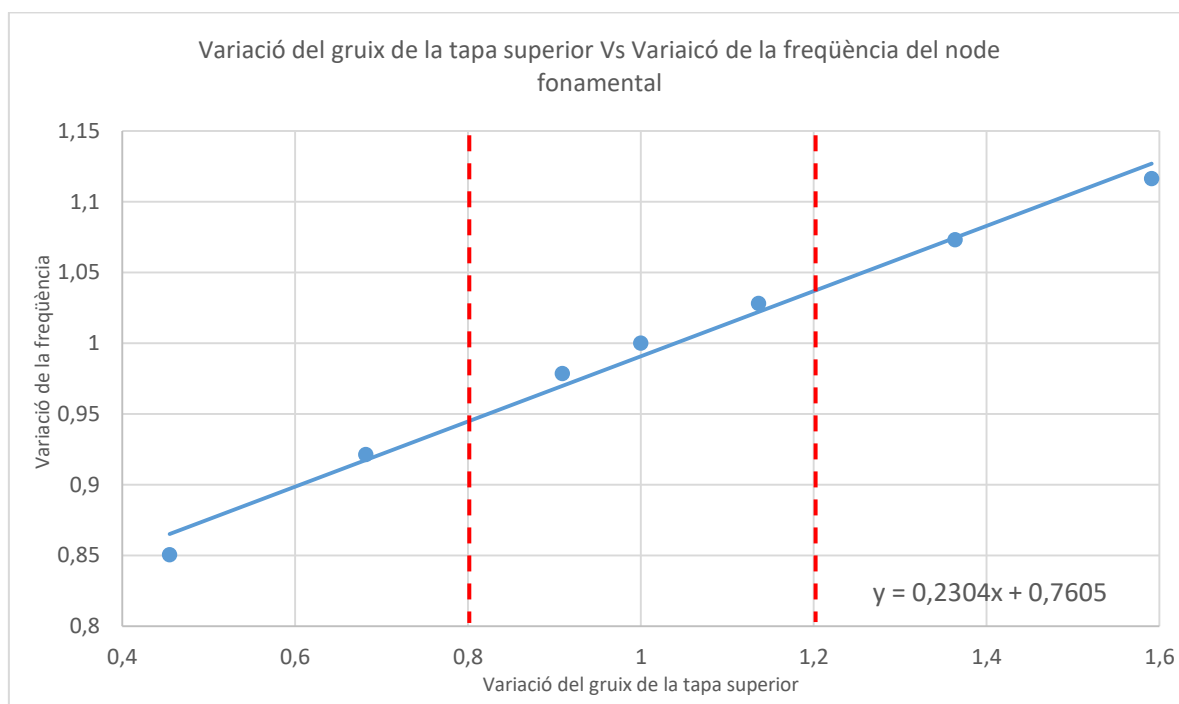
Posant el focus sobre el mode de vibració fonamental (1, 1) es pot arribar a obtenir la Taula 21, on es veu la relació de la freqüència d'aparició del mode fonamental amb el gruix de la Tapa Superior. Posteriorment, aquests valors es normalitzen (posant com a referència el gruix original de 2,2mm i la freqüència original de 138,46Hz) per no haver de dependre de valors absoluts, sinó de percentatges.

Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Taula 21 | Variació de la freqüència d'aparició del mode fonamental (1, 1) en relació al gruix de la Tapa Superior

Variació del Gruix	TS 0,5mm	TS 1mm	TS 1,5mm	TS 2mm	TS 2,5mm	TS 3mm	TS 3,5mm
Freqüència [Hz]	87,777	117,73	127,55	135,46	142,33	148,56	154,54
Variació Gruix Normal	22,72%	45,45%	68,18%	90,9%	113,64%	136,36%	159,1%
Variació Freqüència Normal	63,4%	85,03%	92,13%	97,84%	102,8%	107,3%	111,62%

A partir de les dades de la Taula 21 es pot realitzar un gràfic normalitzat que relacioni experimentalment la variació del gruix de la tapa superior amb la variació de la freqüència d'aparició del mode fonamental. La Figura 22 representa la variació del gruix de la tapa superior relacionada amb la variació de la freqüència d'aquest mode. D'aquesta manera es podria determinar quina variació s'obtidria de la freqüència del mode (1, 1) variant un gruix de la xapa superior determinat.

**Figura 22** | Representació Variació del gruix de la tapa superior vs variació de la freqüència del mode fonamental (1, 1)

No tenint en compte el gruix de 0,5mm, els resultats mostren un comportament lineal de la variació de la freqüència del mode fonamental respecte la variació del gruix de la

tapa superior. A la Figura 22 s'exposa la regressió lineal resultant, la qual consta d'un coeficient de determinació R^2 de 0,988 i, per tant, es pot acceptar.

Els casos on el gruix de la guitarra és molt petit (1mm i segurament 1,5mm) són casos totalment teòrics ja que la xapa no aguantaria els esforços de fatiga provocats per la tensió de les cordes i es trencaria. De la mateixa manera, un plat superior igual o major a 3mm de gruix podria provocar una rigidesa a la caixa de ressonància no desitjada.

És per aquest motiu que es decideix fixar un rang de treball, delimitat per dues línies vermelles a la Figura 22, entre una reducció de fins al 80% del gruix original i un augment que arriba fins al 120% del gruix original. És dins d'aquest rang on la realitat podrà ser més fidel als resultats donats per la gràfica.

10. 3 Resultats de la modificació de les barres Harmòniques

Els resultats de les diferents simulacions dels anàlisis modals dels dissenys de guitarra on es modificaven les barres harmòniques mostren diferents tendències segons l'aspecte modificat. Aquestes tendències s'exposen als apartats 10.3.1, 10.3.2 i 10.3.3.

10.3.1 Resultats de la modificació d'una dimensió de les Barres Harmòniques

Els resultats de la modificació de la base y de les barres harmòniques es presenta a l'Apartat 10.3.1.1 i els resultats de la modificació de l'altura z de les Barres Harmòniques s'exposa a l'Apartat 10.3.1.2.

10.3.1.1 Modificació de la base y de les Barres Harmòniques

Els resultats de fer variar el la base y de les barres harmòniques (inclosa la barra harmònica transversal) des de 1mm fina a 15mm, tabulats a l'Annex A.C, mostren dues clares tendències molt semblants als de la variació del gruix de la tapa superior (Apartat 10. 2):

1. A mesura que es va afegint més gruix a les barres harmòniques els modes de freqüència referents a la caixa de ressonància apareixen a una freqüència més elevada. La Taula 22 mostra l'exemple del primer mode referit a la caixa, el fonamental (1, 1), i del mode (1, 3).

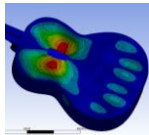
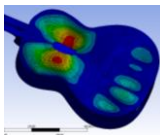
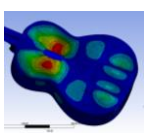
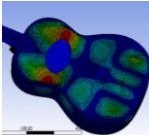
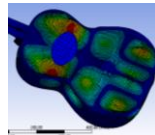
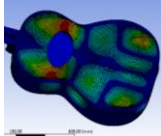
Taula 22 | Variació de la freqüència d'aparició dels modes de vibració (1, 1) i (1,3) al augmentar la base y de les barres harmòniques

Variació	BH 1mm	BH 7mm	BH 15mm	BH 1mm	BH 7mm	BH 15mm
Mode	(1, 1)	(1, 1)	(1, 1)	(1, 3)	(1, 3)	(1, 3)
Freqüència [Hz]	114,96	141,97	144,11	304,08	325,04	329,66

S'observa clarament a la Taula 22 com a mesura que la base y de les barres harmòniques augmenta també ho fa la seva freqüència. Aquest augment al principi, quan les barres són molt primes, és molt acusat, però l'augment es va reduint fins a estancar-se. Aquest variació de la freqüència, també, és menys pronunciada que la que es produeix modificant el gruix de la Tapa Superior.

2. A mesura que es va afegint més base y a les barres harmòniques els modes de vibració referents a la caixa de ressonància apareixen d'una manera més "definida", tal com passa amb la tapa superior. La Taula 23 mostra l'exemple de com es va definint el mode (2, 3) a mesura que augmenta la base y de les Barres Harmòniques.

Taula 23 | Variació de la "definició" d'un mode de vibració a mesura que es va augmentant la base y de les barres harmòniques

Variació	BH 1mm	BH 3mm	BH 6mm	BH 9mm	BH 11m	BH 14mm
Mode						

Posant el focus sobre el mode de vibració fonamental (1, 1) es pot arribar a obtenir la Taula 24, on es veu la relació de la freqüència d'aparició del mode fonamental amb la base y de les barres harmòniques. Posteriorment, aquests valors es normalitzen (posant com a referència la base original de 5mm i la freqüència original de 138,46Hz) per no haver de dependre de valors absoluts, sinó de percentatges.

Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Taula 24 | Variació de la freqüència d'aparició del mode fonamental (1, 1) en relació a la base y de les barres harmòniques

Variació del Gruix	BH 1mm	BH 3mm	BH 6mm	BH 8mm	BH 10mm	BH 13mm	BH 15mm
Freqüència [Hz]	114,96	130,25	140,24	143,44	145,85	144,96	144,11
Variació Gruix Normal	20%	60%	120%	143,44%	200%	260%	300%
Variació Freqüència Normal	83,03%	94,07%	101,29%	103,6%	105,34%	104,69%	104,08%

A partir de les dades de la Taula 24 es pot realitzar un gràfic normalitzat que relacioni experimentalment la variació de la base y de les barres harmòniques amb la variació de la freqüència d'aparició del mode fonamental. La Figura 23 representa la variació de la base relacionada amb la variació de la freqüència d'aquest mode. D'aquesta manera es podria determinar quina variació s'obtidria de la freqüència del mode (1, 1) variant un gruix de les barres harmòniques determinat.

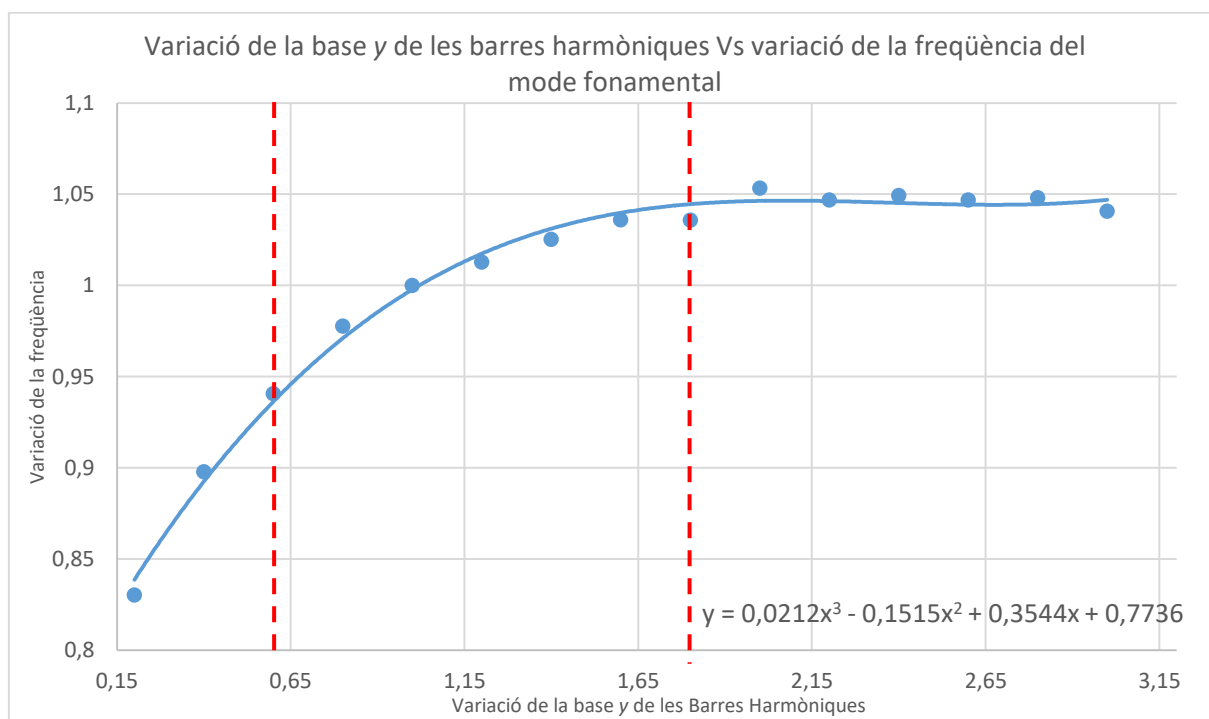


Figura 23 | Representació variació de la base y de les barres harmòniques vs variació de la freqüència del mode fonamental (1, 1)

Els casos on el gruix de la guitarra és 1mm o 2mm són casos totalment teòrics ja que, sent les barres harmòniques part estructural activa del plat harmònic, la tapa superior no aguantaria els esforços de fatiga provocats per la tensió de les cordes i es

trencaria. També, els casos on les barres harmòniques són superiors a 10mm es descarten perquè podrien provocar una rigidesa a la caixa de ressonància no desitjada.

Tanmateix, la variació de les dimensions de les barres harmòniques per a obtenir la freqüència del mode de vibració fonamental desitjada resulta idònia ja que la modificació del seu disseny no afecta el disseny de cap altre component de la guitarra sempre i quan aquesta variació de les barres harmòniques permeti al plat harmònic poder suportar els esforços de fatiga provocats per la tensió de les cordes. És per això que, dins de la regressió polinòmica de tercer ordre (que es pot observar en el propi gràfic) la qual consta d'un coeficient de determinació R^2 de 0,9927, es proposa un rang de treball, delimitat per dues línies vermelles a la Figura 23, entre una reducció de fins al 60% de la base original i un augment que arriba fins al 200% de la base original. Es descarten augments de la base superiors ja que s'ha comprovat que la diferència de la freqüència resultant és mínima.

10.3.1.2 Modificació de l'altura z de les Barres Harmòniques

En el cas que de la variació de l'altura z de les barres harmòniques es posa el focus sobre el mode de vibració fonamental (1, 1). A partir de les simulacions es pot arribar a obtenir la Taula 25, on es veu la relació de la freqüència d'aparició del mode fonamental amb l'altura z de les Barres Harmòniques. Posteriorment, aquests valors es normalitzen (posant com a referència l'altura original de 3,25mm i la freqüència original de 138,46Hz) per no haver de dependre de valors absoluts, sinó de percentatges.

Taula 25 | Variació de la freqüència d'aparició del mode fonamental (1, 1) en relació a l'altura de les Barres Harmòniques

Variació de l'Altura	BH 2mm	BH 2,5mm	BH 3mm	BH 3,25mm	BH 3,5mm	BH 4mm
Freqüència [Hz]	133,42	135,41	137,28	138,46	139,58	141,89
Variació Altura Normal	61,54%	76,92%	92,31%	100%	107,69%	123,08%
Variació Freqüència Normal	96,36%	97,80%	99,15%	100%	100,81	102,48%

L'augment de freqüència del mode fonamental a mesura que s'augmenta l'altura de les barres harmòniques és prou gran com per considerar-lo significatiu.

Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

A partir de les dades de la Taula 25 es realitza un gràfic normalitzat que relaciona experimentalment la variació de l'altura z de les barres harmòniques amb la variació de la freqüència d'aparició del mode fonamental. La Figura 24 representa la variació de la base relacionada amb la variació de la freqüència d'aquest mode. D'aquesta manera es podria determinar quina variació s'obtindria de la freqüència del mode (1, 1) variant una altura de les Barres Harmòniques determinada.

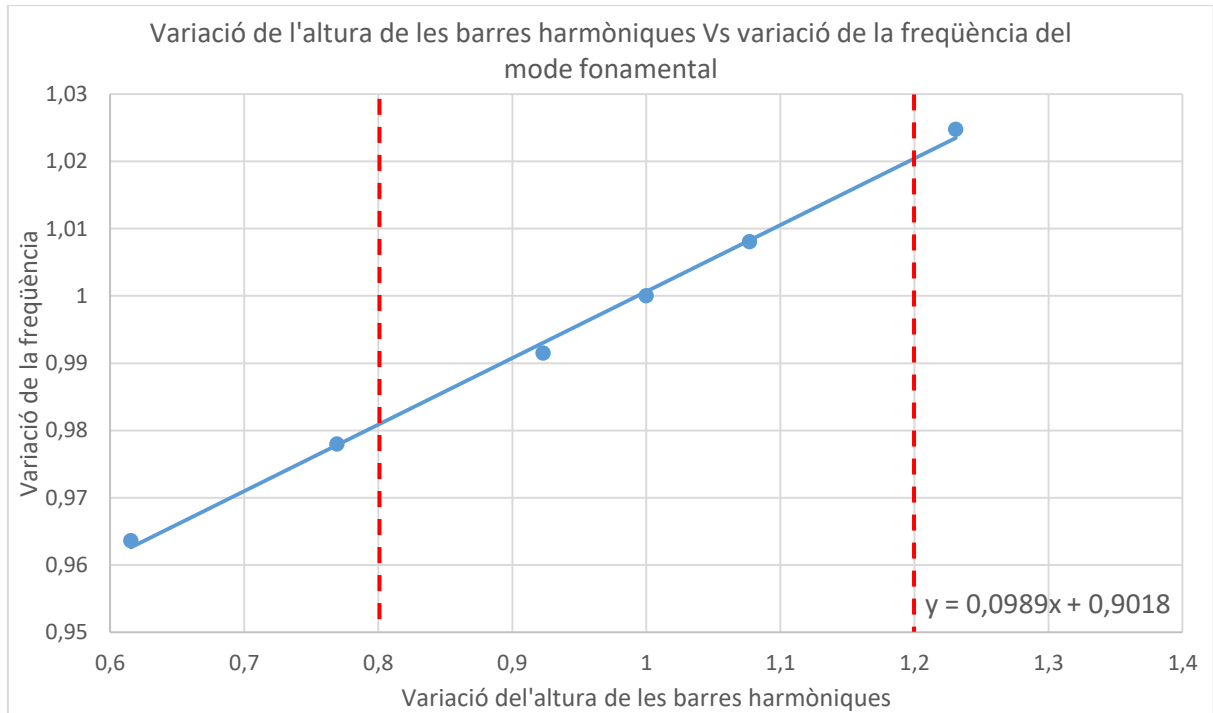


Figura 24 | Representació variació de l'altura z de les barres harmòniques vs variació de la freqüència del mode fonamental (1, 1)

De la Figura 24 se'n conclou que la variació de l'altura z de les barres harmòniques amb l'objectiu d'obtenir la freqüència del mode fonamental desitjada és una possibilitat a tenir en compte sempre i quan la variació de la freqüència buscada sigui petita (augmentant un 20% l'altura s'augmenta un 2% la freqüència). Al mateix gràfic s'hi exposa la regressió lineal resultant, la qual consta d'un coeficient de determinació R^2 de 0,9976 i, per tant, es pot acceptar. Les línies vermelles proposen un rang de treball entre una reducció de fins al 80% de l'altura original i un augment que arriba fins al 120% de l'altura original. L'augment de l'altura de les barres provoca un augment de la freqüència superior que l'augment de la seva base. Per tant, per petites variacions, afegint menys massa es pot aconseguir el mateix resultat, sempre dins dels rangs de treball indicats.

D'altra banda, aquest resultat qüestiona els luthiers i aficionats a les guitarres clàssiques artesanes que afirmen que polint les barres harmòniques (disminuint-ne molt lleugerament la seva altura) es modifica el so de la guitarra.

10.3.2 Resultats de la modificació de la posició de les Barres Harmòniques

Els resultats de fer variar l'angle de posició de les barres harmòniques (inclosa la barra harmònica transversal) respecte l'eix longitudinal de la guitarra des de 0° fins a 20° , tabulats a l'Annex A.D, mostren dues clares tendències:

1. L'angle de col·locació de les barres harmòniques és pràcticament indiferent per la freqüència a la qual els modes de vibració apareixen. La Taula 26 mostra l'exemple del primer mode referit a la caixa, el fonamental (1, 1), i del mode (1, 3).

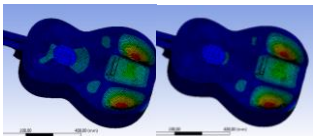
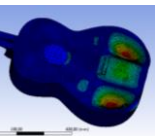
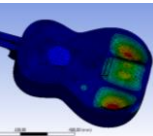
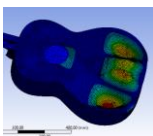
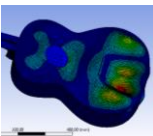
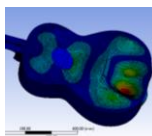
Taula 26 | Variació de la freqüència d'aparició dels modes de vibració (1, 1) i (1,3) al augmentar l'angle de posició de les Barres Harmòniques respecte l'eix longitudinal de la guitarra

Angle	0°	10°	20°	0°	10°	20°
Mode	(1, 1)	(1, 1)	(1, 1)	(1, 3)	(1, 3)	(1, 3)
Freqüència [Hz]	135,51	136,98	136,88	317,5	321,57	317,49

Es pot observar a la Taula 26 com a mesura que l'angle de les barres harmòniques la seva freqüència resta quasi inalterada. És l'única modificació del disseny, de les escollides, que no afecta la freqüència d'aparició dels modes de freqüència.

2. A mesura que es va variant l'angle de col·locació de les barres harmòniques els modes de vibració referents a la caixa de ressonància amb formes induïdes per les barres harmòniques també varien. La Taula 27 mostra l'exemple de com la forma del mode (3, 1) es va inclinant a mesura que augmenta l'angle de col·locació de les barres harmòniques va augmentant.

Taula 27 | Inclinió de la forma del mode de vibració (3, 1) a mesura que es va inclinant l'angle de posició de les Barres Harmòniques

Angle	0°	4°	8°	12°	16°	20°
Mode						

Dels resultats de les simulacions de la modificació de la posició de les Barres Harmòniques es pot afirmar que la seva col·locació no pot ser usada per a obtenir la freqüència del mode de vibració fonamental desitjada. Tot i així, es podria arribar a utilitzar aquesta variació del disseny per a obtenir, en certs modes de vibració (els referents a la caixa de ressonància amb formes induïdes per les barres harmòniques), una petita variació de la forma d'aquests modes.

10.3.3 Resultats de la modificació de la forma de les Barres Harmòniques

Els resultats de modificar la forma de les barres harmòniques a unes barres triangulars de base 5mm i altura 3,25mm, tabulats a l'Annex A.E, mostren dues tendències:

1. Clara disminució de la freqüència d'aparició dels mateixos modes de vibració. La Taula 28 mostra l'exemple del primer mode referit a la caixa, el fonamental (1, 1), i del mode (1, 3).

Taula 28 | Variació de la freqüència d'aparició dels modes de vibració (1, 1) i (1,3) al canviar la forma de les Barres Harmòniques a triangulars

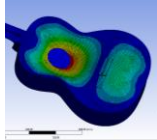
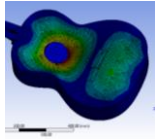
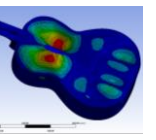
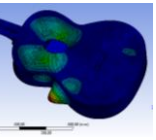
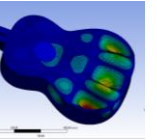
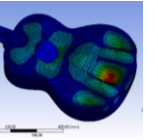
Forma	Rectangular	Triangular	Rectangular	Triangular
Mode	(1, 1)	(1, 1)	(1, 3)	(1, 3)
Freqüència [Hz]	138,46	129,25	322,05	305,91

Es pot observar a la Taula 28 com, encara que les barres tinguin la mateixa base i la mateixa altura, la pèrdua de massa i del moment d'inèrcia, fa que la freqüència dels modes de vibració de les barres amb forma triangular apareguin abans.

2. La variació de la forma de les barres no esdevé una important modificació en la forma que adquireixen els 5 primers modes de vibració on la caixa de ressonància hi té un paper principal. La Taula 29 mostra l'exemple de comparació dels segons modes de vibració (els quals són calcats), el novè mode de vibració (on hi ha diferències substancials) i el desè mode de per part de la guitarra original comparat amb el tretzè de la guitarra amb la modificació del disseny (ja que són el mateix mode, però amb certes diferències).

Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Taula 29 | Comparació dels mateixos modes de vibració entre la guitarra original i la guitarra amb la forma de les Barres Harmòniques modificada

Nº mode	2	2	9	9	10	13
Forma BH	Rectangle	Triangle	Rectangle	Triangle	Rectangle	Triangle
Mode						

Posant el focus sobre el mode de vibració fonamental (1, 1) deixant inalterada (a 5mm) la base de la forma triangular de les barres harmòniques i modificant la seva altura es pot arribar a obtenir la Taula 30, on es veu la relació de la freqüència d'aparició del mode fonamental amb la seva altura. Posteriorment, aquests valors es normalitzen (posant com a referència l'altura usada de 3,25mm i la freqüència de 121,45Hz) per no haver de dependre de valors absoluts, sinó de percentatges.

Taula 30 | Variació de la freqüència d'aparició del mode fonamental (1, 1) en relació a l'altura de les Barres Harmòniques triangulars

Variació de l'Altura	BH 2mm	BH 2,5mm	BH 3mm	BH 3,25mm	BH 3,5mm	BH 4mm	BH 5mm
Freqüència [Hz]	122,4	121,93	121,59	121,45	121,38	121,08	119,59
Variació Altura Normal	61,54%	76,92%	92,31%	100%	107,69%	123,08%	153,85%
Variació Freqüència Normal	100,78%	100,4%	100,12%	100%	99,94%	99,7%	98,47%

A partir de les dades de la Taula 30 no es pot arribar a la conclusió que l'augment de l'altura de les barres harmòniques triangulars tingui una efecte significatiu en l'aparició del mode de vibració fonamental. Així doncs, no es pot establir una clara relació entre l'augment de l'altura z de les barres harmòniques triangulars i l'aparició del mode fonamental ni de la disminució de les freqüències dels modes de vibració respecte les barres rectangulars. Per tant, no es veu justificació per a l'ús de barres harmòniques triangulars per controlar la freqüència d'aparició del mode de vibració fonamental.

10. 4 Comparació amb la literatura

A l'Apartat 4 es forma un marc de treball sobre quines afectacions provoquen els diferents aspectes de disseny a la freqüència modal i als modes de vibració de la guitarra clàssica segons la informació trobada a la literatura. Un cop obtinguts els resultats de la part experimental de l'estudi es poden comparar les afirmacions extretes de la literatura. Degut a la no modificació d'aspectes dels quals el marc de treball de la literatura en fa menció aquests es descarten a l'hora de fer-ne la comparació:

- Les barres transversals: pel present estudi no prova com afecta el seu canvi de forma ni el fet de prescindir d'ells.
- El pont: no s'ha provat l'afectació de prescindir-ne en un Anàlisi Modal ja que no és possible tocar la guitarra sense pont.
- El material: tot i realitzar-se l'experiment de canviar el material de certes peces de la guitarra per observar el comportament de d'una guitarra formada per materials de gamma baixa segons *Camps*, no s'han realitzat suficients canvis de material com per poder comparar els resultats obtinguts amb les afirmacions fetes respecte a aquest aspecte en el marc de treball de la literatura.

La Taula 31 mostra la comparació de les afirmacions extretes de la literatura amb els resultats obtinguts de les diferents simulacions sobre com afecten els canvis de les barres harmòniques i el braç de la guitarra a la freqüència modal i als modes de vibració. Es pot observar com totes les afirmacions fetes es corroboren amb els resultats extrets de les simulacions.

- Les barres harmòniques augmenten les freqüències d'aparició dels mode de vibració. Aquesta afirmació queda demostrada en els experiments on s'han modificat les dimensions de les barres. Al disminuir les dimensions les freqüències d'aparició també disminueixen.
Les formes tant modes de vibració on el braç és protagonista com els quatre primers modes de vibració del plat harmònic resten inalterables a qualsevol modificació.
- Les formes en els quals el braç és protagonista dels modes de vibració són moviments de flexió on la guitarra es comporta com una sola barra.

Taula 31 | Comparació dels resultats experimentals amb les conclusions extretes de la literatura

Aspecte de disseny	Afectació segons la literatura	Resultat experimental
Barres Harmòniques		
Freqüència Modal	Augmenten amb la col·locació de les barres harmòniques.	✓
Modes de vibració	Certs modes són insensibles les barres harmòniques.	✓
	Els 3 primers modes no es veuen afectats per les barres harmòniques.	✓
El braç		
Modes de vibració	En els moviments de flexió la guitarra es comporta com una sola barra i el braç esdevé important.	✓

11. Pressupost de l'estudi

Tal com mostra la Taula 32, el present estudi té un cost associat de quinze mil vuit-cents noranta-nou euros amb quaranta-quatre cèntims (15.899,44 €) sense IVA.

Taula 32 | Pressupost total de la realització del present estudi

Concepte	Cost unitari	Quantitat	Cost Total
Hores treballades	35 €/h	325 h	11.375,00 €
Llicència software <i>Solidworks 2016</i>	6.600 €/any	150 dies	2.719,78 €
Llicència software <i>Ansys Workbench 17.1</i>	6.500 €/any	100 dies	1.785,71 €
Llicència software <i>Microsoft Office 2013</i>	69 €/any	100 dies	18,95 €
TOTAL			15.899,44€

12. Conclusions

El principal objectiu del present estudi ha estat oferir un marc de treball útil per al disseny d'una guitarra clàssica que ofereixi un so de major qualitat basat en els resultats de diferents anàlisis modals amb un model 3D. En el mateix sentit, s'ha creat un altre marc de treball basat en la literatura i s'ha comparat els diferents aspectes estudiats en les simulacions amb els resultats experimentals.

La revisió de la literatura constata que el disseny de la guitarra des d'un punt de vista tècnic, a diferència del violí, és un camp força inexplorat. S'han trobat molt poques directrius específiques sobre l'afectació de la modificació de qualsevol paràmetre de disseny a la qualitat del seu so.

S'ha establert com a un dels principals factors en la qualitat del so d'una guitarra la freqüència de vibració del mode fonamental. Aconseguir que aquesta freqüència coincideixi amb la de l'armònic de la nota La, a 110Hz, ha passat a ser un dels objectius.

En paral·lel, utilitzant un prototip de guitarra de l'empresa de guitarres clàssiques *Camps*, s'ha dissenyat un model 3D, s'ha buscat a la literatura les propietats dels materials que la componen i s'han estipulat els diferents criteris per a les modificacions del disseny i els posteriors anàlisis modals.

Tal com la literatura remarcava, trobar les propietats ortotròpiques de les diferents fustes ha resultat una tasca difícil. Per algunes fustes ha estat impossible trobar-ne totes les propietats. Així doncs, s'ha estipulat un mètode per a la deducció de les propietats mancants. En gran part, es fa responsable a la diferència entre els valors de les propietats utilitzades i les reals al contrast entre la freqüència del mode fonamental trobat utilitzant l'equip de vibració i el de la simulació.

S'han realitzat diferents anàlisis modals modificant-ne els materials, el gruix de la tapa superior i la mida, la posició i la forma de les barres harmòniques. De totes aquestes modificacions s'han pogut establir marcs de treball que relacionin el disseny de la guitarra amb l'aparició del mode fonamental en 3 d'elles:

- El gruix de la tapa superior: per a grans modificacions de la freqüència del mode fonamental de l'ordre del $\pm 5\%$. Amb aquest mètode es podria intentar aconseguir canvis més significatius, però els resultats, al allunyar-se del rang de treball establert, podrien diferir dels esperats.

- La base y de les barres harmòniques: per a modificacions mitjanes de la freqüència del mode fonamental no superiors al $\pm 5\%$. No és recomanable usar aquest mètode per a canvis superiors als del rang especificat.
- L'altura z de les barres harmòniques: per a petites modificacions de la freqüència del mode fonamental, de l'ordre del $\pm 2\%$. No és recomanable usar aquest mètode per a canvis superiors als del rang especificat.

Els resultats de les modificacions restants han estat o dubtosos o irrellevants.

La comparació de les afirmacions extrems de la literatura amb els resultats de les simulacions és positiva ja que tots els aspectes on la comparació ha estat possible són coincidents.

13. Relació de documents

El present estudi consta d'un sol document, el qual es divideix en Memòria i Annexes.

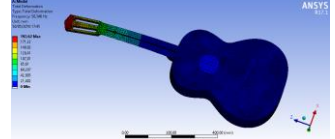
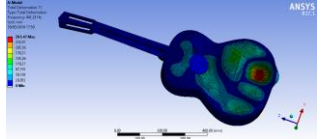
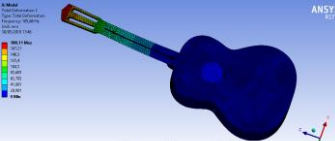
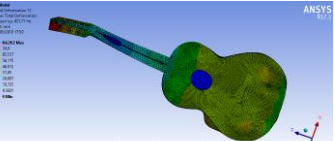
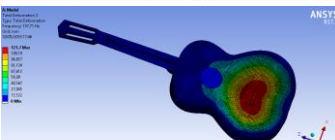
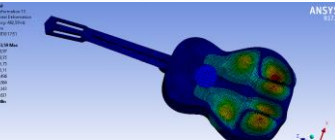
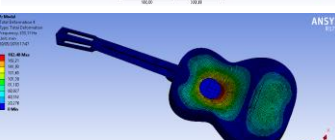
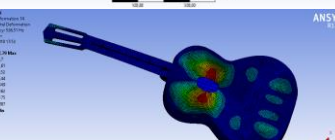
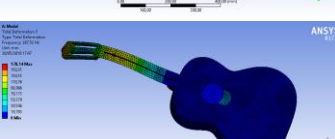
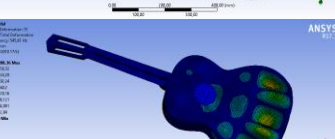
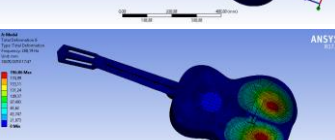
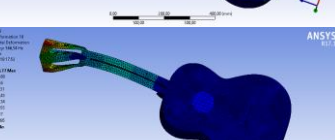
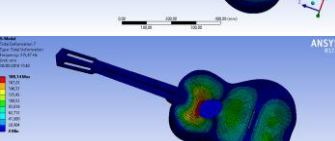
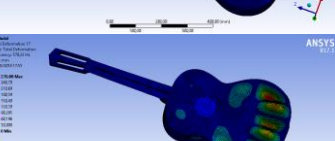
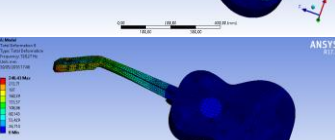
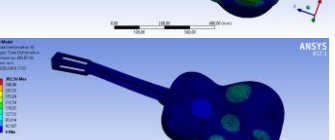
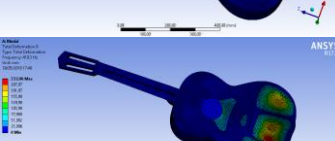
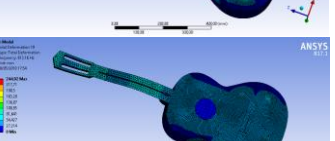
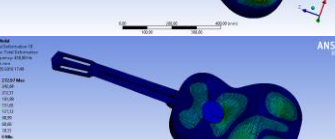
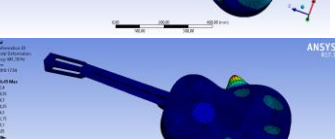
14. Bibliografia

- [1] R. R. Boullosa, «Vibration measurements in the classical guitar», *Appl. Acoust.*, vol. 63, núm. 3, p. 311-322, 2002.
- [2] B. Pizzigoni, *Rolf Bader: Computational mechanics of the classical guitar*, vol. 45, núm. 6. 2010.
- [3] I. Curtu, M. Stanciu, N. Cretu, i I. Rosca, «Modal Analysis of Different Types of Classical Guitar Bodies», ... *Acoust. Music Theory ...*, núm. March, p. 30-35, 2009.
- [4] E. Skrodzka, A. Łapa, B. B. J. Linde, i E. Rosenfeld, «Modal parameters of two incomplete and complete guitars differing in the bracing pattern of the soundboard», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 130, núm. 4, p. 2186-2194, 2011.
- [5] M. Elejabarrieta, a Ezcurra, i C. Santamaria, «Evolution of the vibrational behavior of a guitar soundboard along successive construction phases by means of the modal analysis technique», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 108, núm. 1, p. 369-78, 2000.
- [6] A. Ezcurra, «Influence of the material constants on the low frequency modes of a free guitar plate», *J. Sound Vib.*, vol. 194, núm. 4, p. 640-644, 1996.
- [7] D. Russell, «Modal Analysis of an Acoustic Folk Guitar», *Science (80-)*, núm. February, p. 1-4, 1998.
- [8] M. J. Elejabarrieta, A. Ezcurra, i C. Santamaría, «Vibrational behaviour of the guitar soundboard analysed by the finite element method», *Acta Acust. united with Acust.*, vol. 87, núm. 1, p. 128-136, 2001.
- [9] M. J. Elejabarrieta, A. Ezcurra, i C. Santamaría, «Coupled modes of the resonance box of the guitar», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 111, núm. 5, p. 2283, 2002.
- [10] J. A. Torres i R. R. Boullosa, «Influence of the bridge on the vibrations of the top plate of a classical guitar», *Appl. Acoust.*, vol. 70, núm. 11-12, p. 1371-1377, 2009.
- [11] B. Pizzigoni i T. D. Rossing, *The science of string instruments*, vol. 45, núm. 6. 2010.
- [12] E. V. (KTH C. S. Meinel, E. and Jansson, «On the influence of the neck on the guitar body vibrations», *Stl-Qpsr*, vol. 32, núm. 4, p. 011-018, 1991.

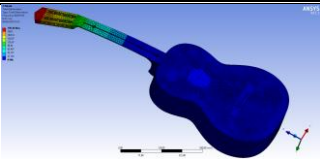
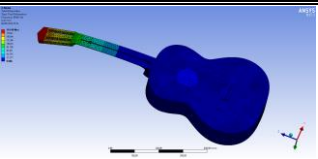
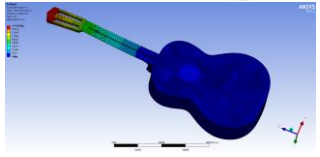
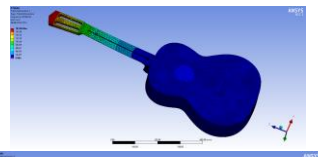
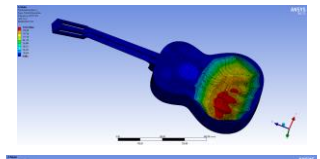
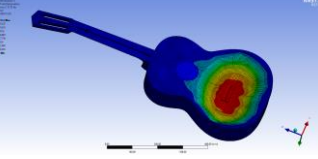
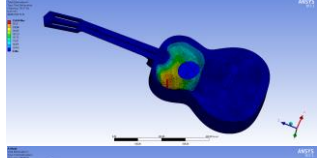
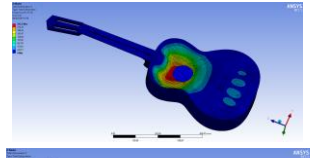
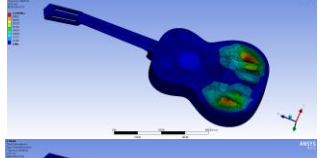
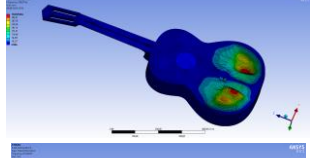
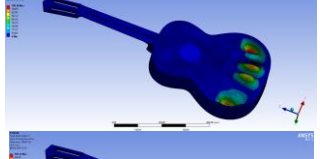
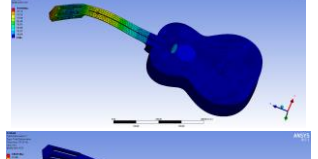
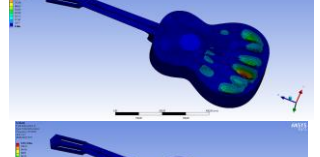
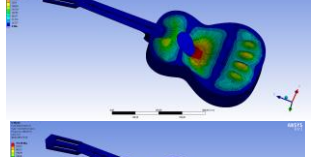
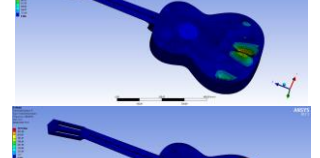
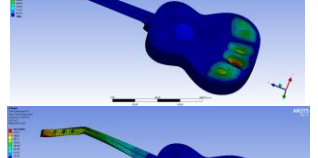
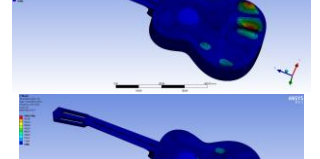
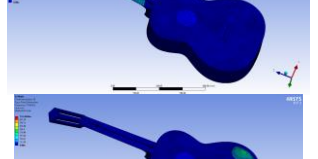
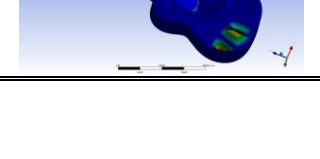
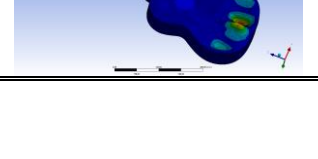
- [13] B. M. C. Lemens, J. K. Adis, D. M. C. Lemens, E. P. Ollak, P. C. Lark, i J. R. G. Roves, «Effect of Vibration Treatment on Guitar Tone : A Comparative Study», *Savart J.*, p. 1-9, 2014.
- [14] B. Balakumar, M. Edward B, i M. Edward B, *Vibrations*. 2009.
- [15] J. T. Freixas, «Disseny i construcció d'un equip de mesura de freqüències de vibració per a guitarres», 2017.
- [16] ISO/TC 43 Acoustics, «ISO 16:1975». p. 1.
- [17] P. Bielski i M. Kujawa, «Nonlinear modelling in time domain numerical analysis of stringed instrument dynamics», *AIP Conf. Proc.*, vol. 1822, 2017.
- [18] D. W. Green Winandy, J. E. and Kretschmann, D. E., «Mechanical properties of wood», *Wood Handb.*, p. 4-45, 1999.
- [19] J. A. Torres i R. Ruiz Boullosa, «Identificación a simple vista de patrones de vibración de una tapa de guitarra», *Acústica*, 2008.
- [20] Eric Meier, «The Wood Database», 2018. [En línia]. Disponible a: <http://www.wood-database.com/sapele/>.
- [21] Eric Meier, «The Wood Database», 2018. [En línia]. Disponible a: <http://www.wood-database.com/oregon-ash/>.

Annex A Resultats de les simulacions

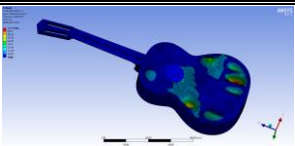
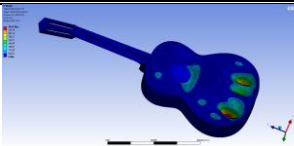
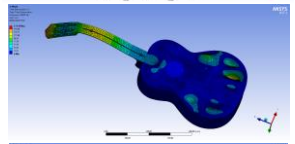
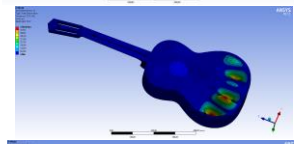
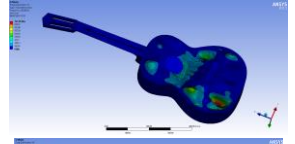
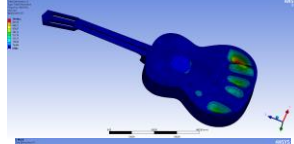
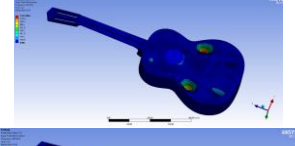
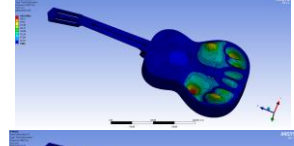
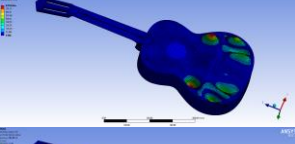
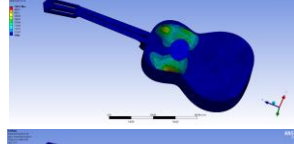
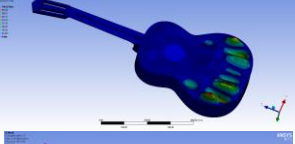
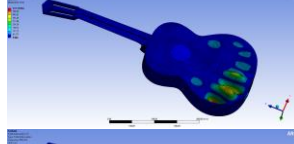
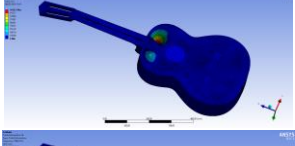
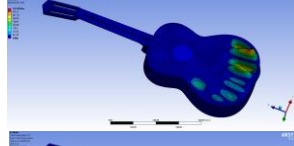
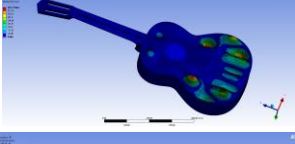
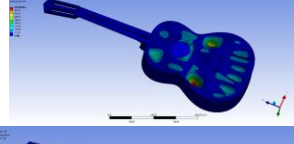
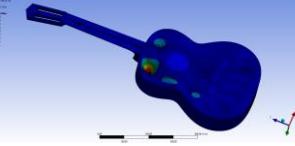
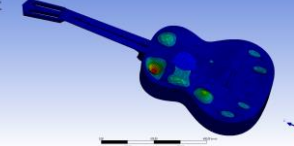
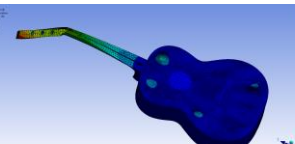
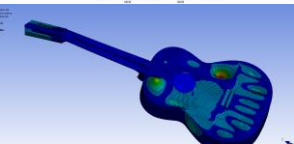
Annex A.A Canvi de Materials

Tipus			Gamma Baixa		
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Modes	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,346		11	441,25	
2	105,66		12	547,71	
3	137,11		13	482,59	
4	233,11		14	526,51	
5	267,52		15	545,61	
6	288,19		16	566,54	
7	315,47		17	578,22	
8	320,27		18	603,65	
9	419,3		19	613,16	
10	438,88		20	641,18	

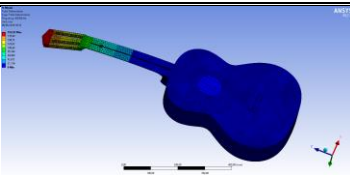
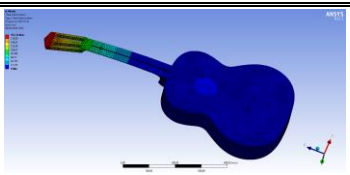
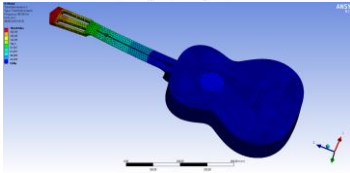
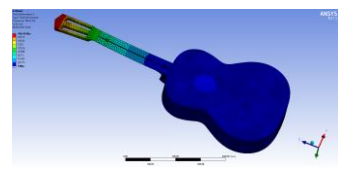
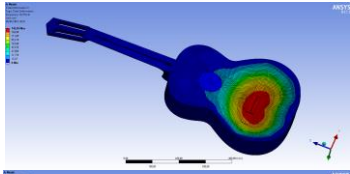
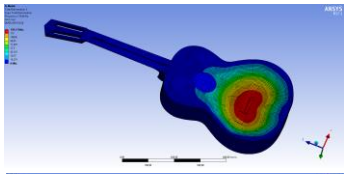
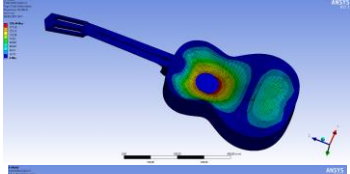
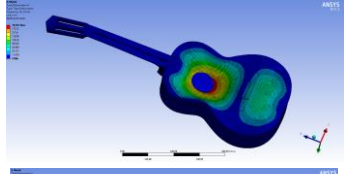
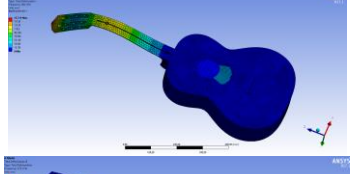
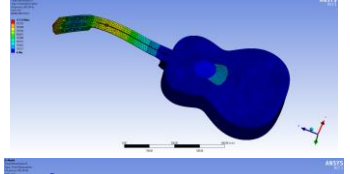
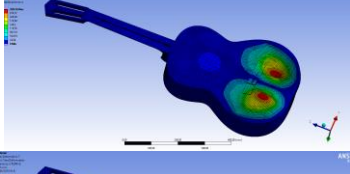
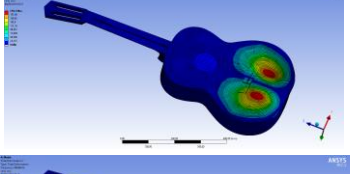
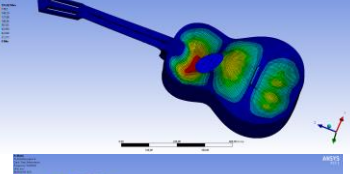
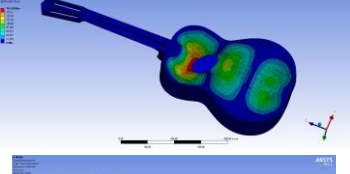
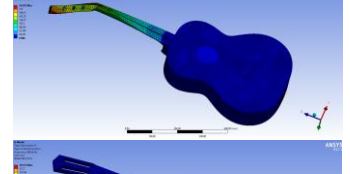
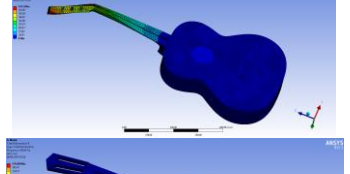
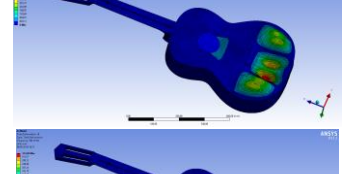
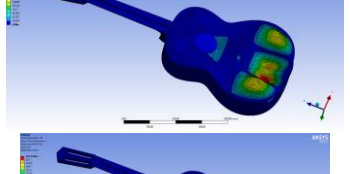
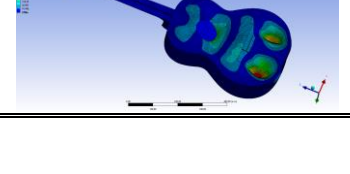
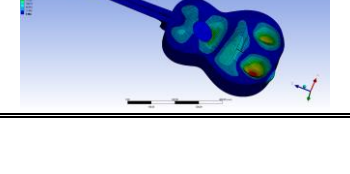
Annex A.B Canvi de gruix de la Tapa Superior

Gruix [mm]	0,5	1		
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
1	48,591		49,425	
2	84,222		93,366	
3	87,777		117,73	
4	135,17		211,73	
5	166,08		250,07	
6	203,84		257,49	
7	208,67		272,33	
8	211,39		308,33	
9	228,84		313,92	
10	237,23		317,68	

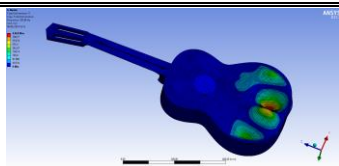
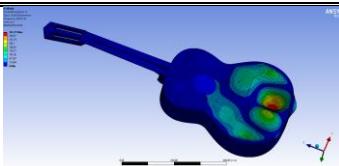
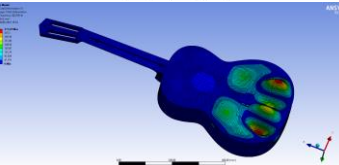
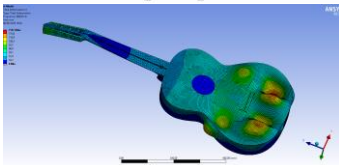
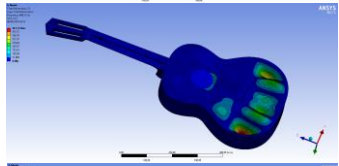
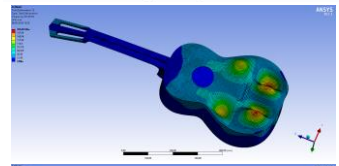
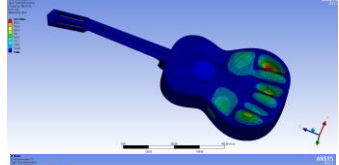
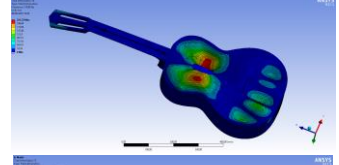
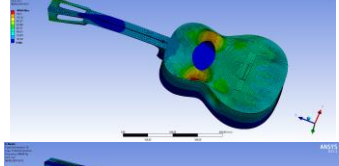
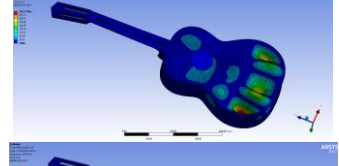
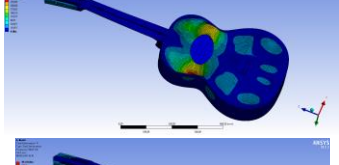
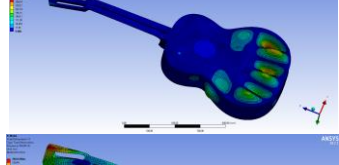
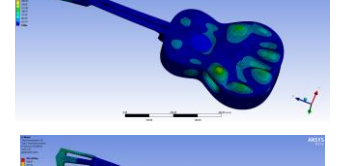
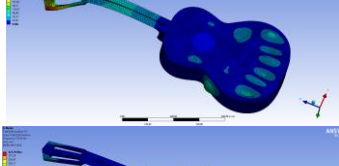
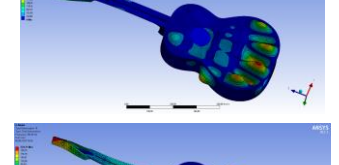
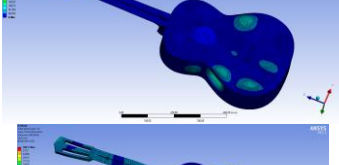
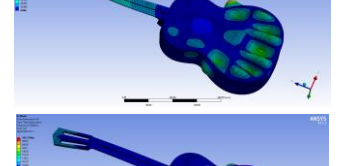
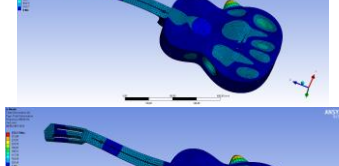
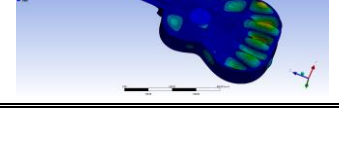
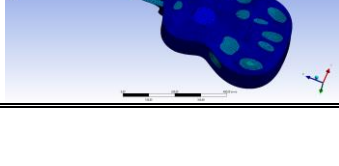
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	0,5		1	
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
11	245,56		330,52	
12	249,05		337,13	
13	253,66		343,59	
14	275,9		383,37	
15	287,9		446,7	
16	294,08		456,13	
17	297,13		459,5	
18	298,82		462,48	
19	305,52		459,57	
20	310,21		502,41	

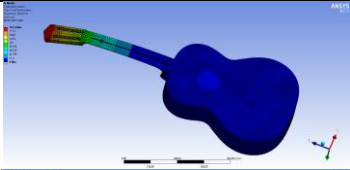
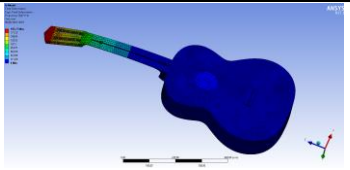
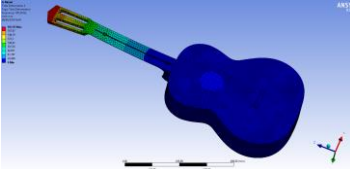
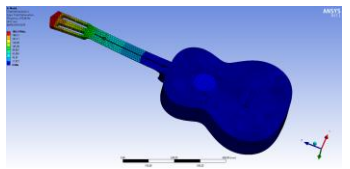
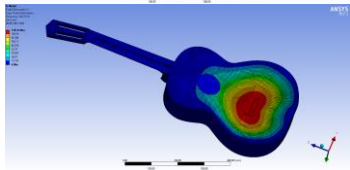
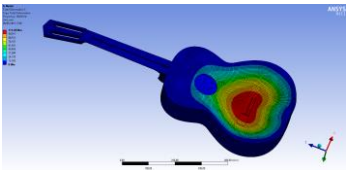
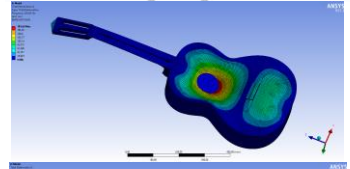
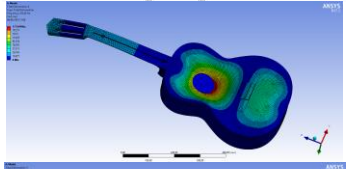
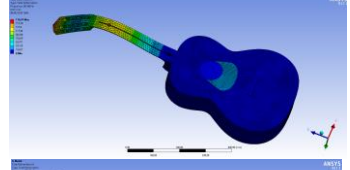
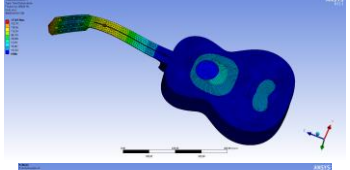
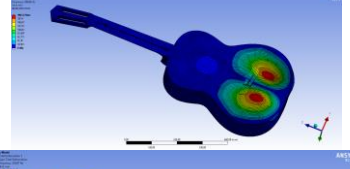
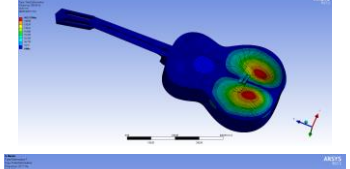
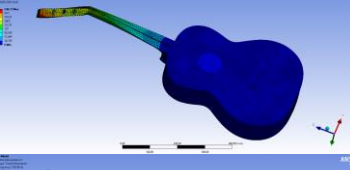
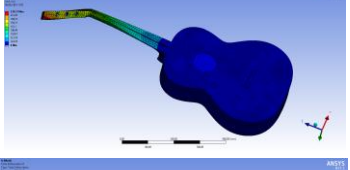
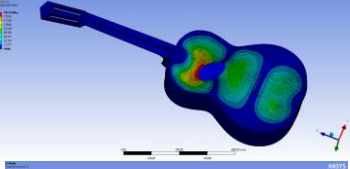
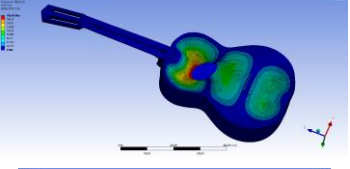
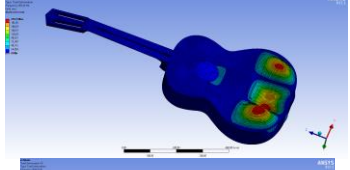
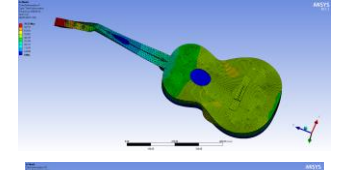
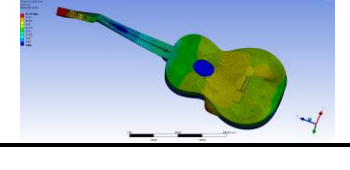
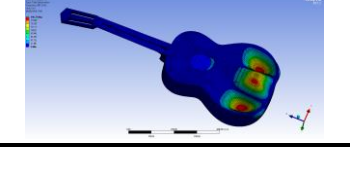
Estudi paramètric de la resposta freqüència de la guitarra

Gruix [mm]	1,5		2	
Modes	Frequència [Hz]	Mode	Frequència [Hz]	Mode
1	49,856		50,131	
2	98,792		102,57	
3	127,55		135,46	
4	222,48		231,72	
5	262,1		265,14	
6	273,1		287,29	
7	279,99		309,46	
8	316,58		318,61	
9	368,56		414,92	
10	385,79		432,07	

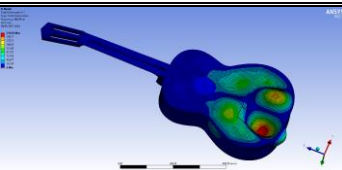
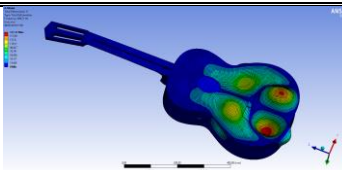
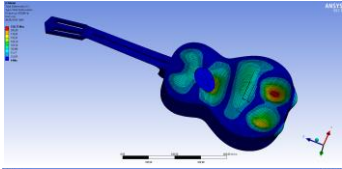
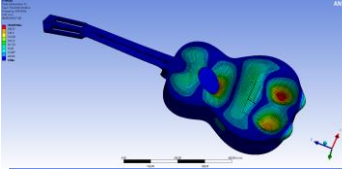
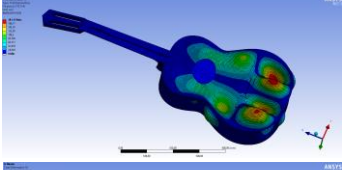
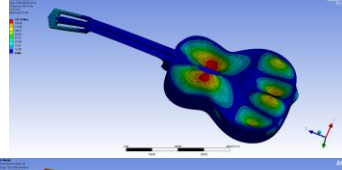
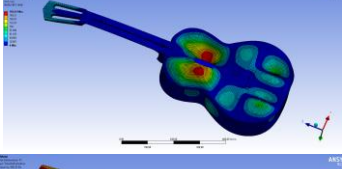
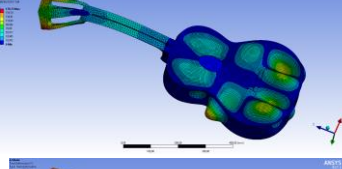
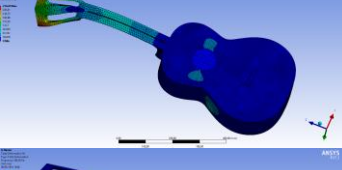
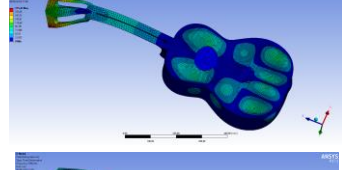
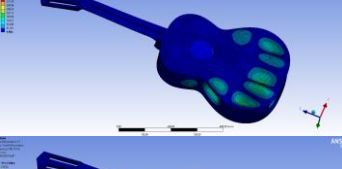
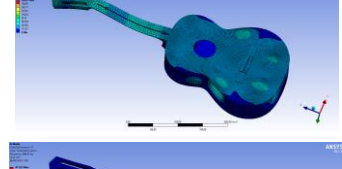
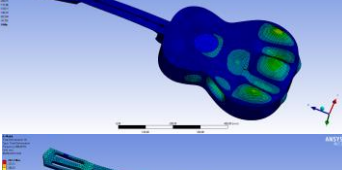
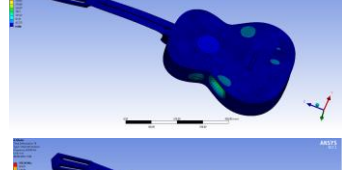
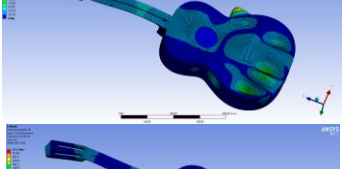
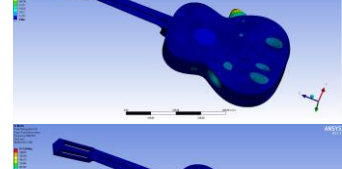
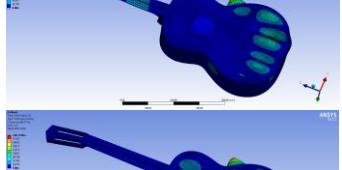
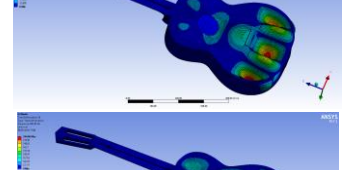
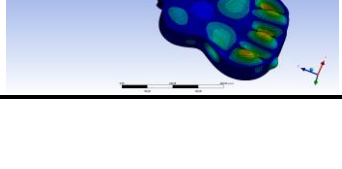
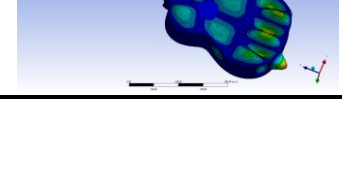
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	1,5	2		
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
11	393,04		437,5	
12	423,59		468,05	
13	446,13		477,58	
14	462,92		519,98	
15	487,47		524,81	
16	498,44		547,9	
17	549,27		563,05	
18	555,69		573,52	
19	561,85		602,04	
20	579,66		608,92	

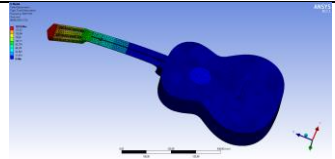
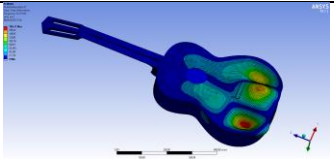
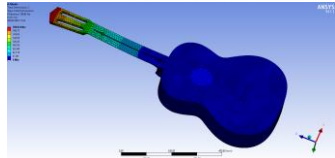
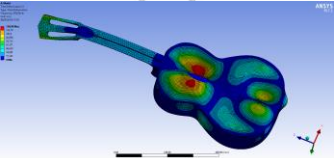
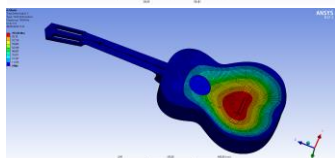
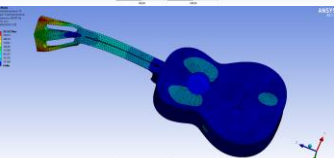
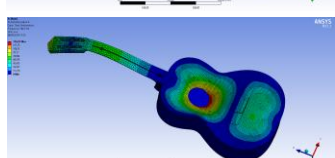
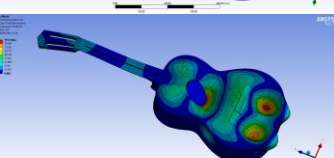
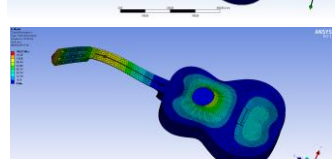
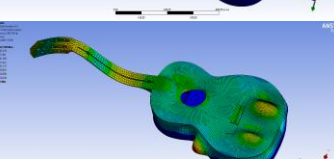
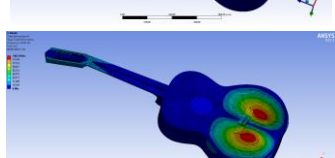
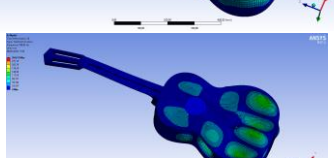
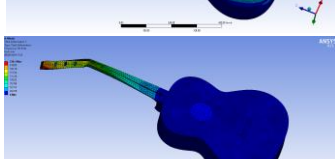
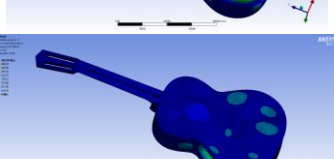
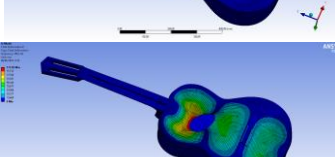
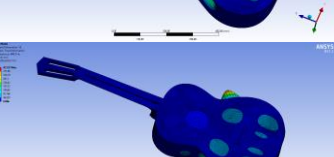
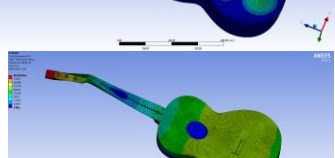
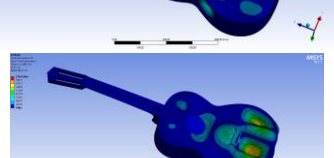
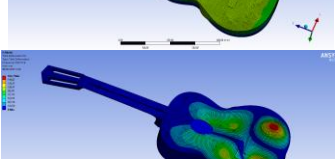
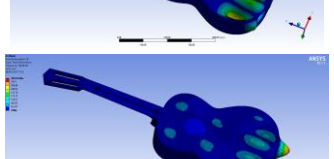
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	2,5		3	
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,325		50,471	
2	105,34		107,46	
3	142,33		148,56	
4	241,63		252,65	
5	267,46		269,63	
6	300,04		305,92	
7	320,07		321,11	
8	338,76		368,22	
9	453,32		438,82	
10	454,33		487,12	

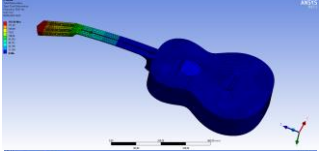
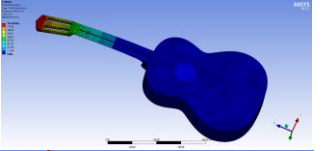
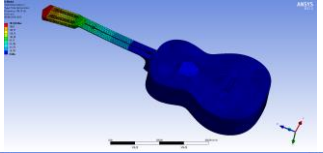
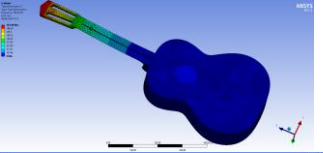
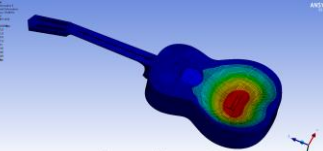
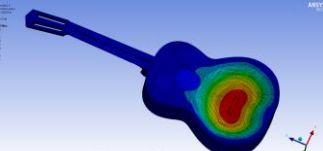
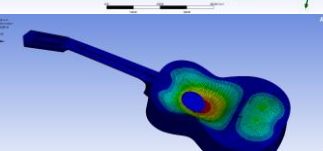
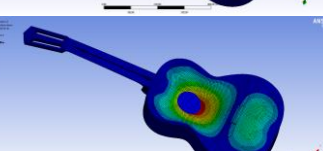
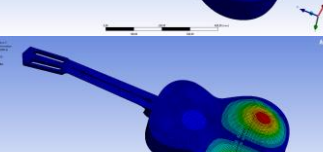
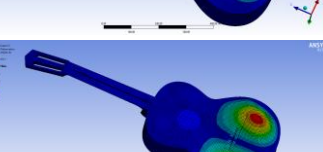
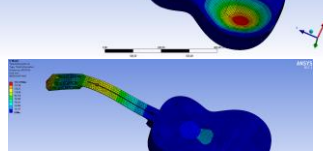
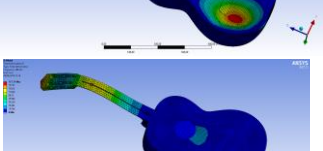
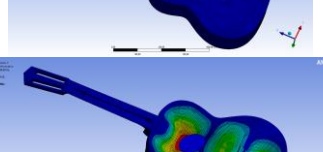
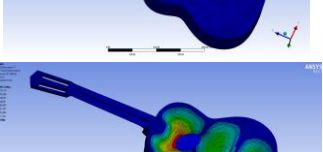
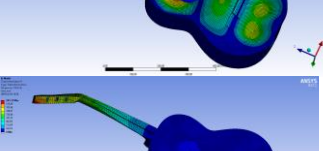
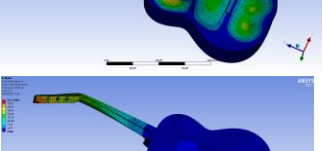
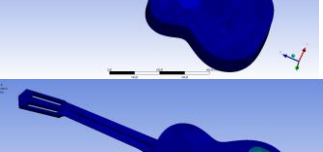
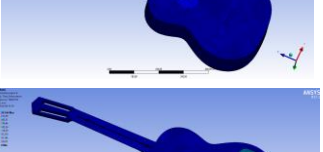
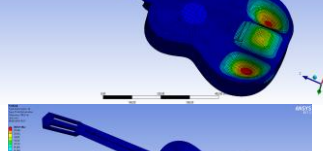
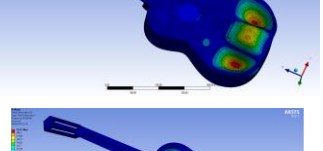
Estudi paramètric de la resposta freqüència de la guitarra

Gruix [mm]	2,5		3	
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
11	468,99		494,71	
12	478,08		524,76	
13	515,7		543,75	
14	540,47		563,73	
15	565,25		568,15	
16	582,92		599,8	
17	593,73		604,45	
18	604,48		629,49	
19	611,01		648,4	
20	641,51		693,99	

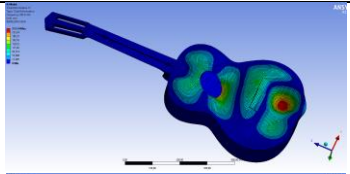
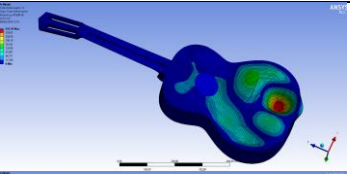
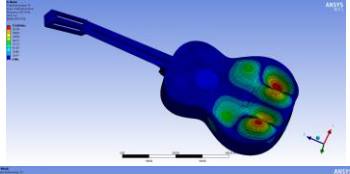
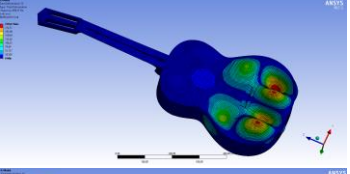
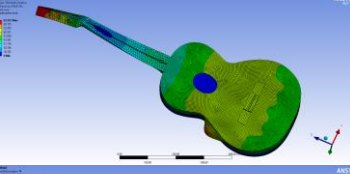
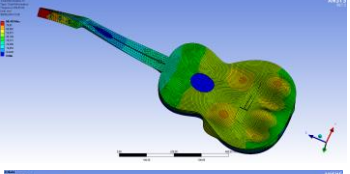
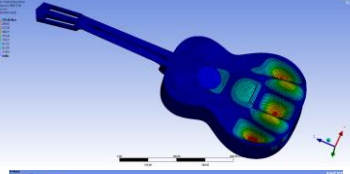
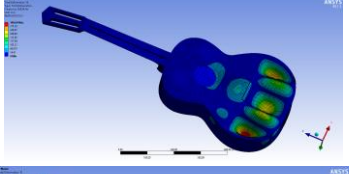
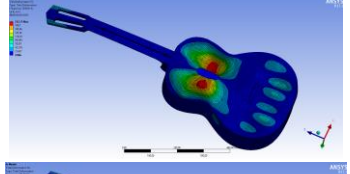
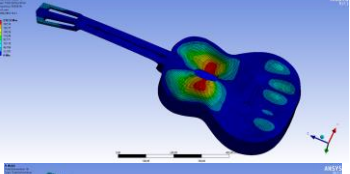
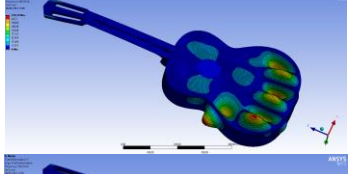
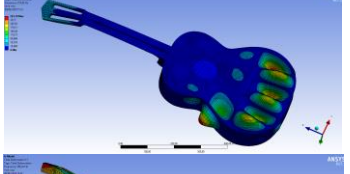
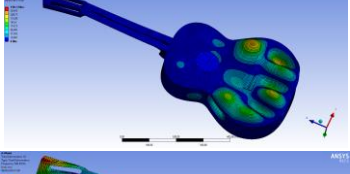
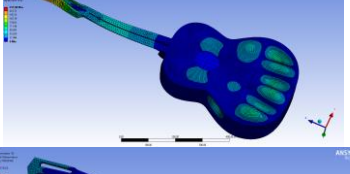
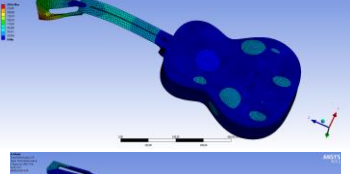
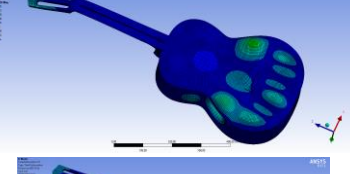
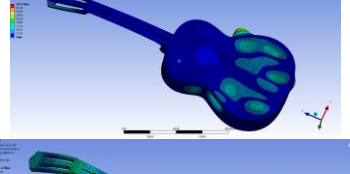
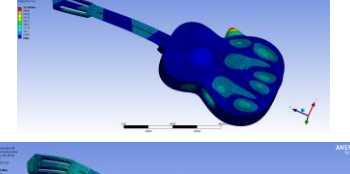
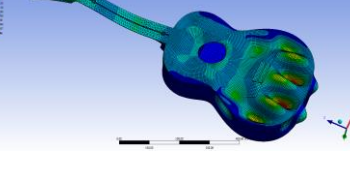
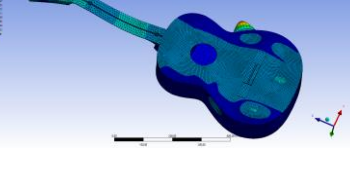
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]			3,5		
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Modes	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,577		11	517,57	
2	108,65		12	558,58	
3	154,54		13	567,07	
4	262,5		14	570,95	
5	272,82		15	597,39	
6	314,87		16	599,92	
7	321,6		17	617,86	
8	395,2		18	644,3	
9	424,42		19	696,1	
10	516,31		20	724,46	

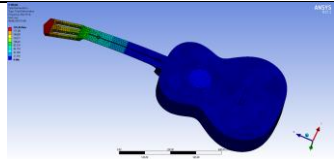
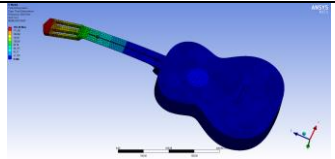
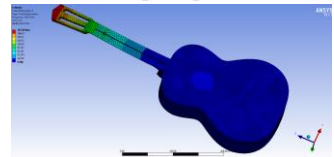
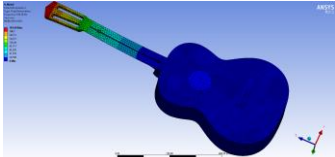
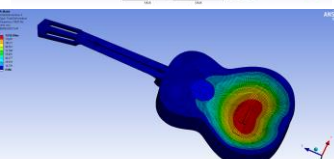
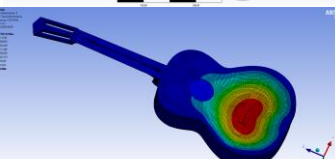
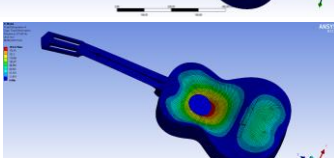
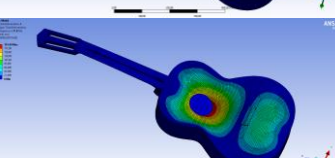
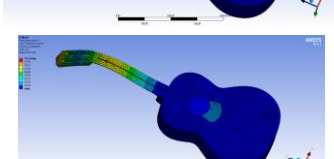
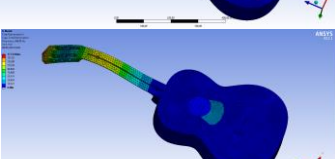
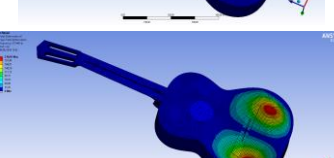
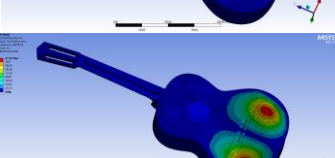
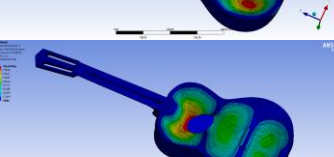
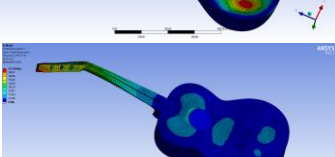
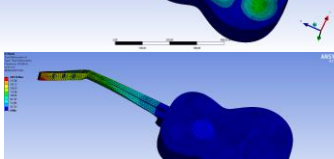
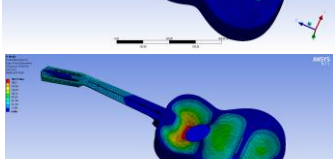
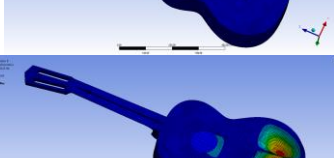
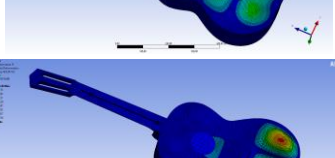
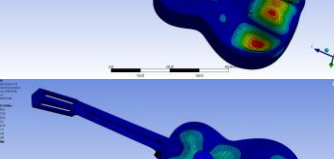
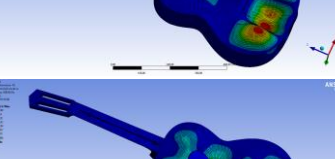
Annex A.C Canvi de dimensions de la base y de les Barres Harmòniques

Gruix [mm]	Forat 2,5		Forat 3,3	
	1	2	1	2
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,21		50,211	
2	103,75		103,74	
3	114,9		124,33	
4	226,06		229,33	
5	228,99		256,62	
6	265,93		266	
7	304,08		311,94	
8	319,3		319,25	
9	368,12		394,01	
10	394,3		414,59	

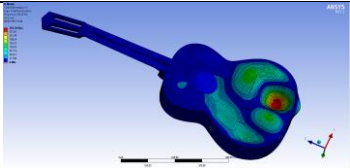
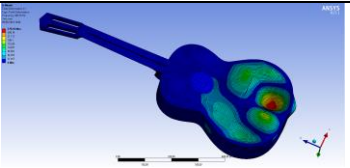
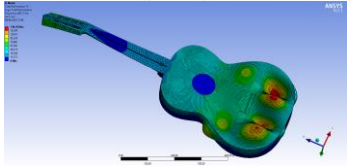
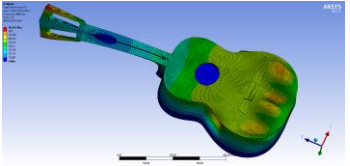
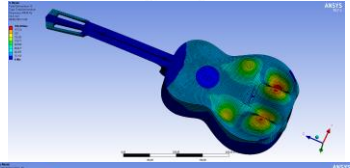
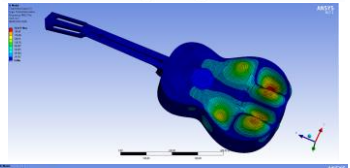
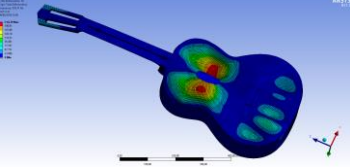
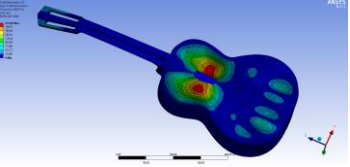
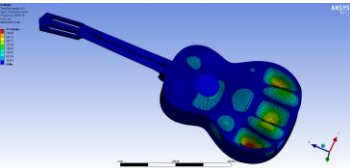
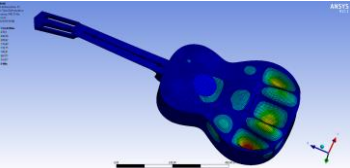
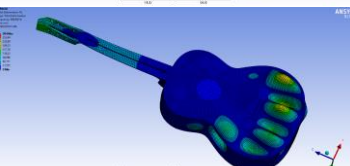
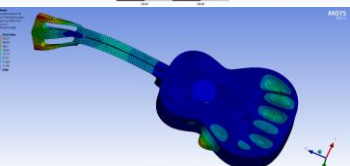
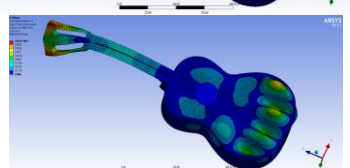
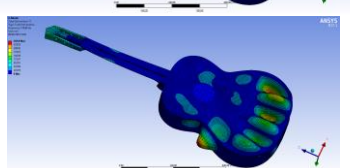
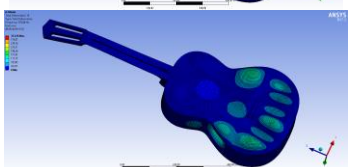
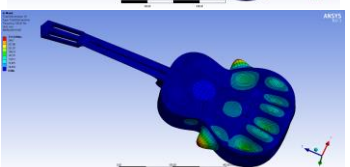
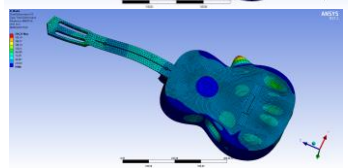
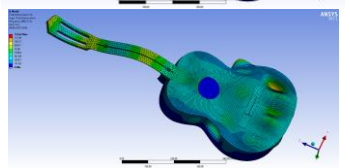
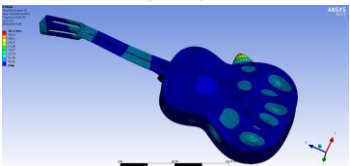
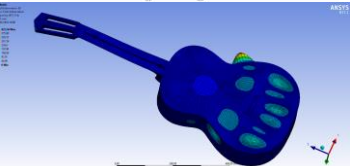
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	Forat 2,5		Forat 3,3	
	1	2	1	2
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
11	397,31		418,04	
12	437,74		458,15	
13	474,32		472,55	
14	494,73		520,24	
15	528,83		529,56	
16	545,97		555,03	
17	554,33		565,41	
18	565,58		570,39	
19	595,17		603,72	
20	609,8		611,59	

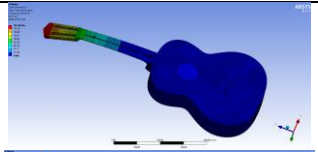
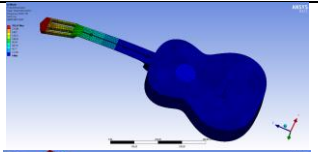
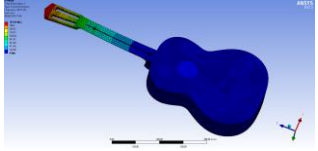
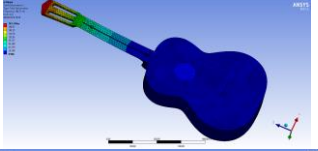
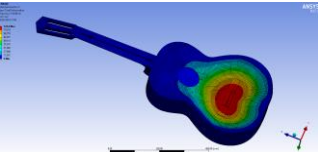
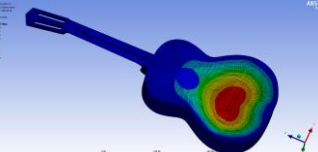
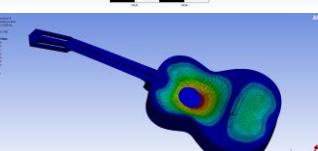
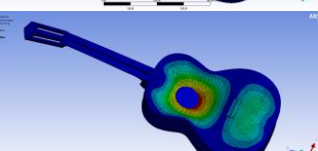
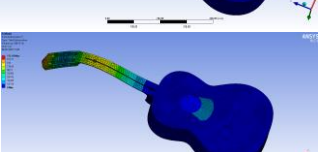
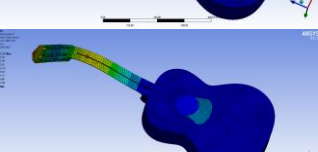
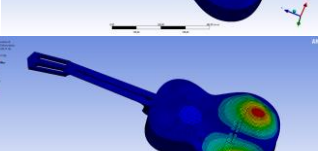
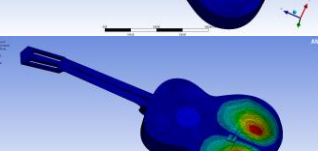
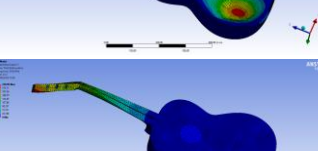
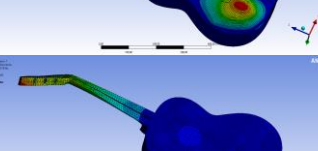
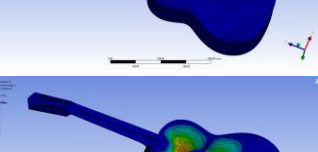
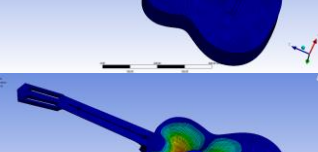
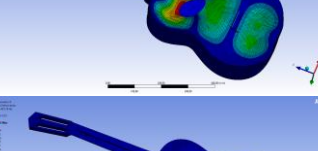
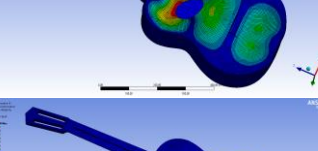
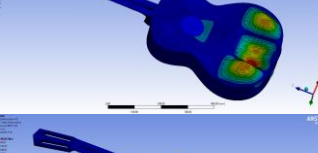
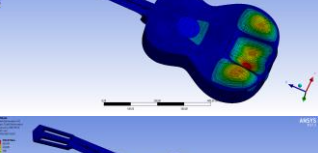
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	Forat 4,5		Forat 5,5	
	3	4	3	4
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,213		50,214	
2	103,75		103,76	
3	130,25		135,39	
4	231,63		234,08	
5	266,06		266,06	
6	273,46		288,58	
7	315,96		319,17	
8	319,28		319,87	
9	410,22		422,91	
10	428,74		440,84	

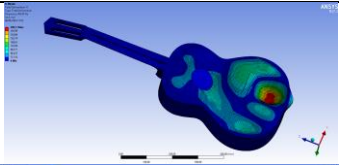
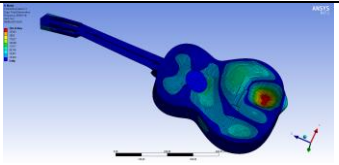
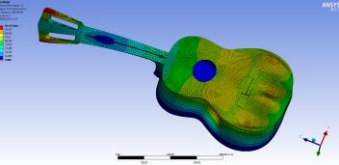
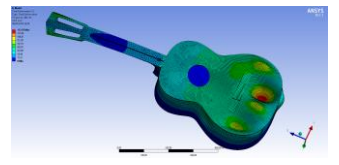
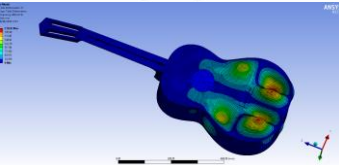
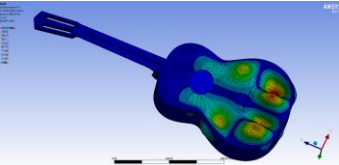
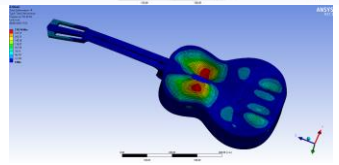
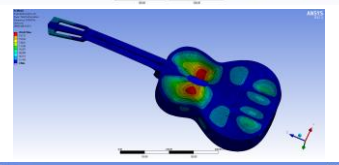
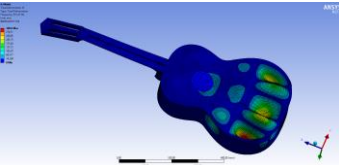
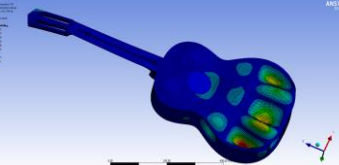
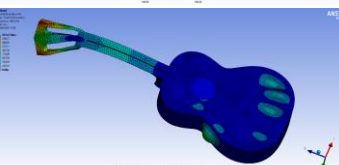
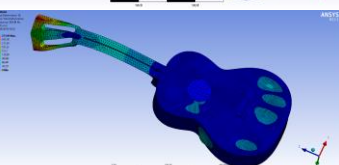
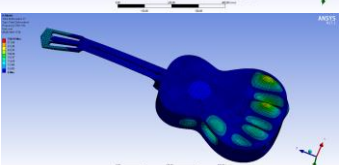
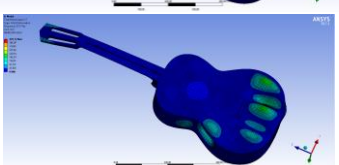
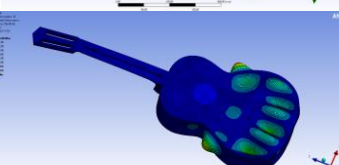
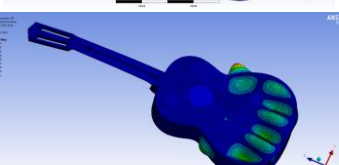
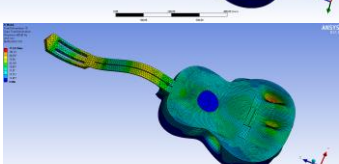
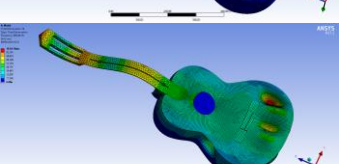
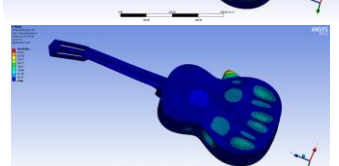
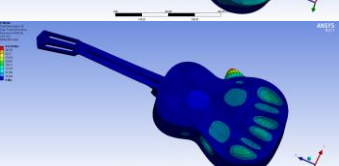
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	Forat 4,5		Forat 5,5	
	3	4	3	4
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
11	433,07		445,91	
12	467,15		466,2	
13	474,95		485,27	
14	528,71		530,87	
15	534,55		545,15	
16	560,94		563,23	
17	566,77		570,69	
18	576,66		581,47	
19	606,03		606,37	
20	612,9		615,1	

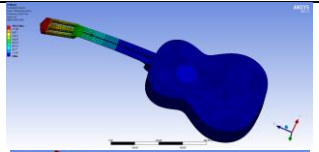
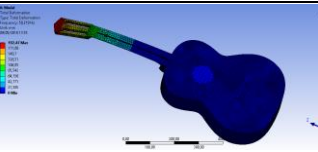
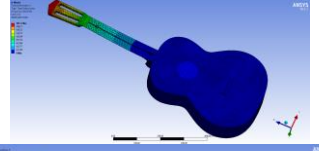
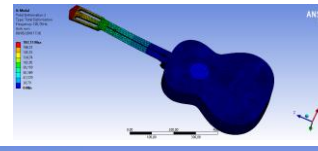
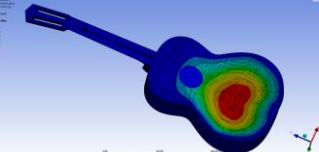
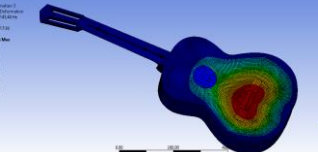
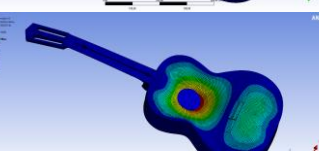
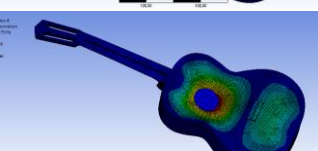
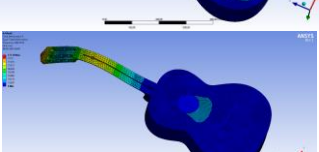
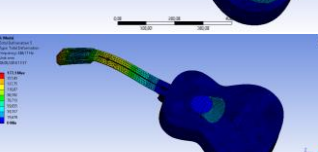
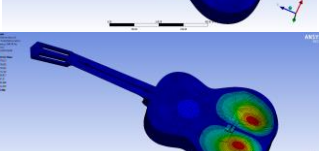
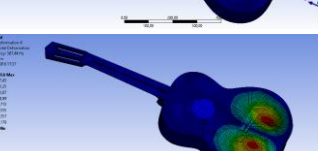
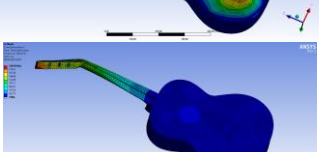
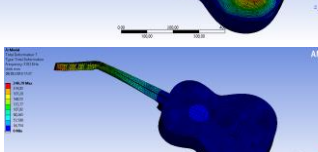
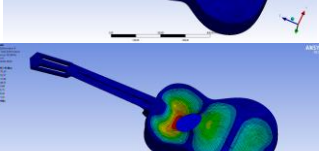
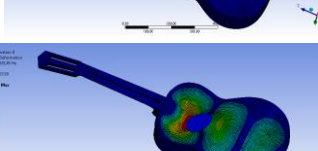
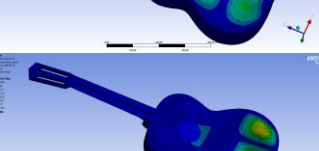
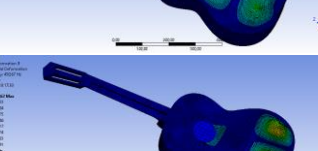
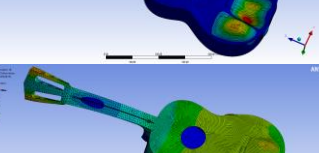
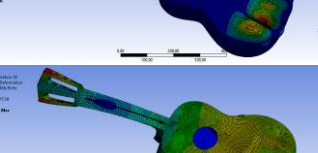
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	Forat 6,5		Forat 7,8	
	5	6	5	6
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,216		50,217	
2	103,77		103,77	
3	138,46		140,24	
4	235,84		237,15	
5	266,13		266,15	
6	292,71		301,43	
7	319,24		319,19	
8	322,05		322,87	
9	431,18		437,63	
10	449,51		456,79	

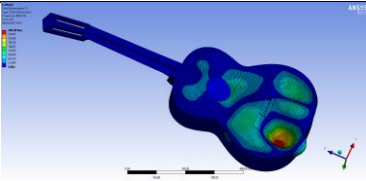
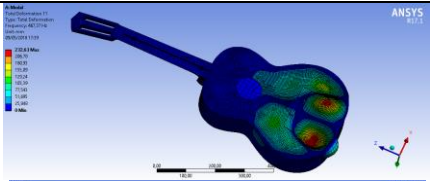
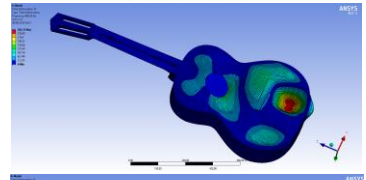
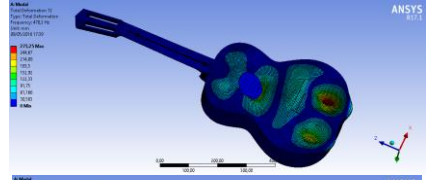
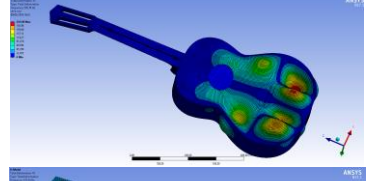
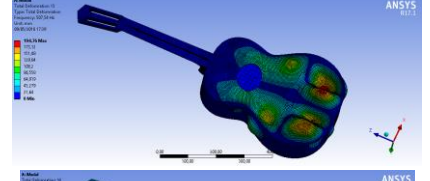
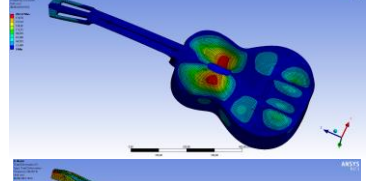
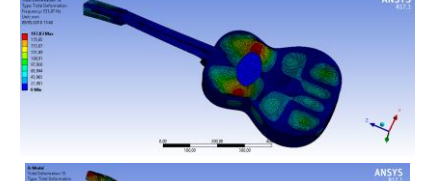
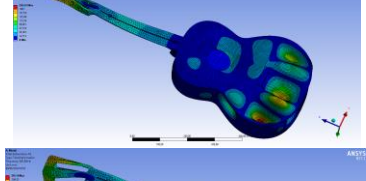
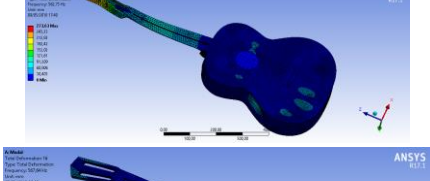
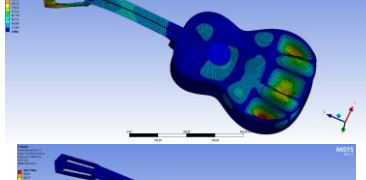
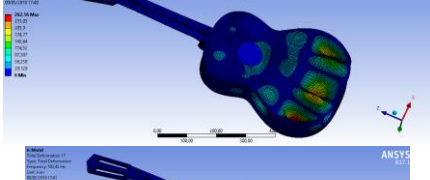
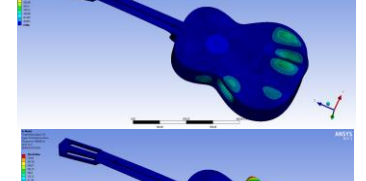
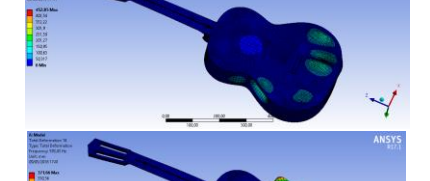
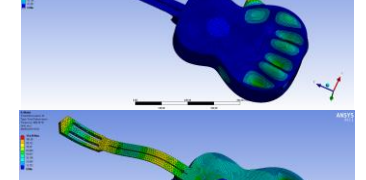
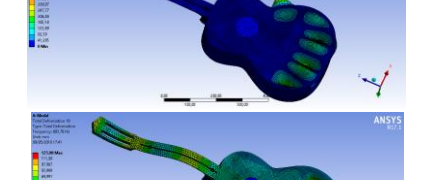
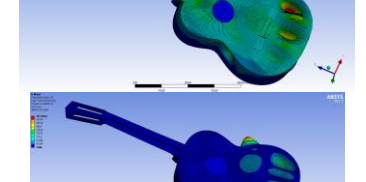
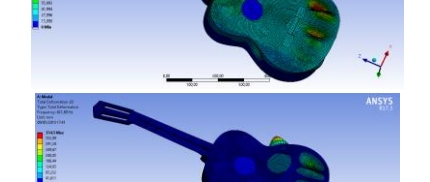
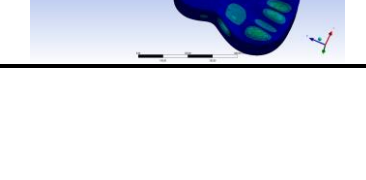
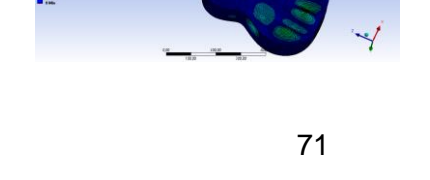
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	Forat 6,5		Forat 7,8	
	5	6	5	6
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
11	452,45		459,61	
12	463,99		462	
13	492,22		499,25	
14	531,44		529,83	
15	551,37		557,79	
16	563,6		563,44	
17	574,11		577,7	
18	583,66		587,14	
19	605,65		605,04	
20	615,95		618,87	

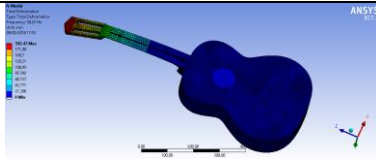
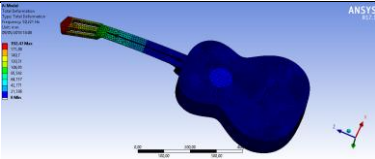
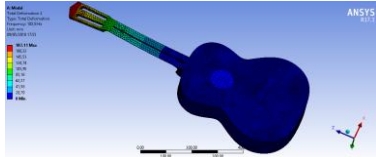
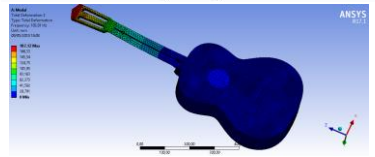
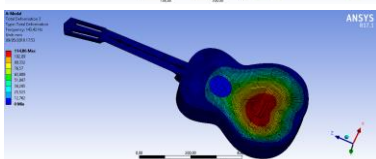
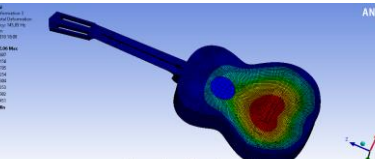
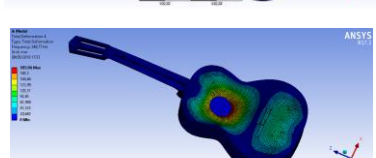
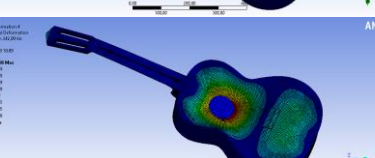
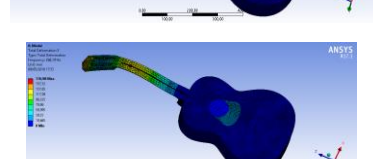
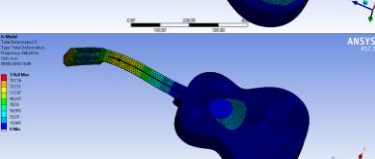
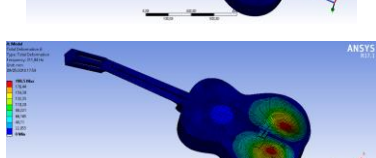
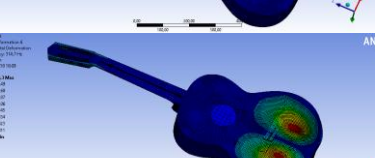
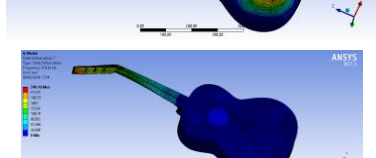
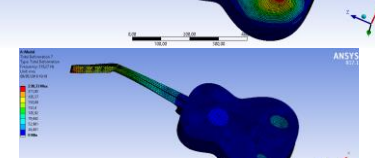
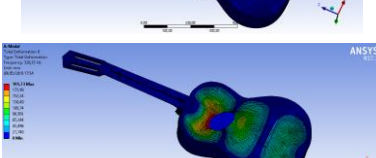
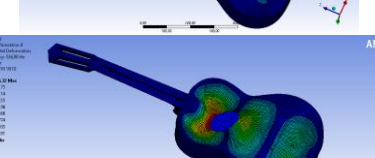
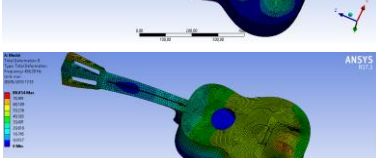
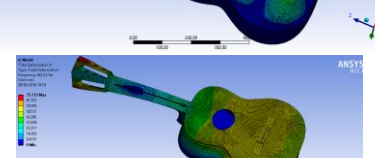
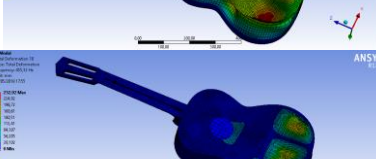
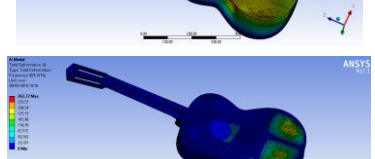
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	Forat 8,2		Forat 9,8	
	7	8	7	8
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,218		50,219	
2	103,78		103,78	
3	141,97		143,44	
4	238,81		239,75	
5	266,18		266,17	
6	304,74		307,44	
7	319,22		319,18	
8	325,04		325,45	
9	445,83		450,67	
10	458,98		456,76	

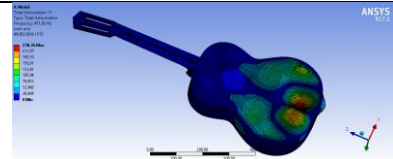
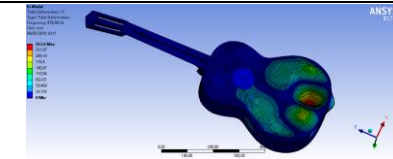
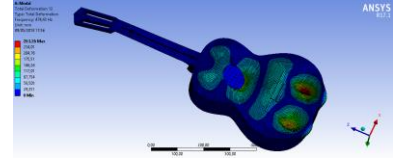
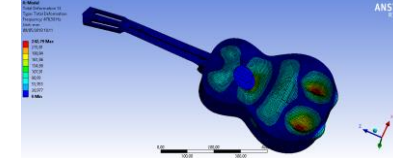
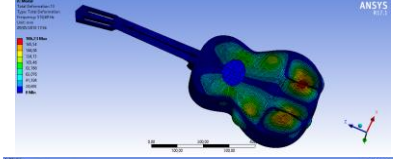
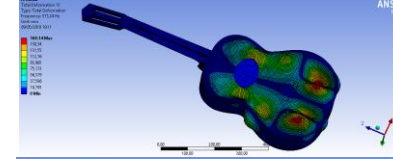
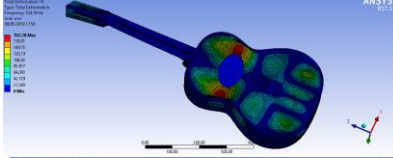
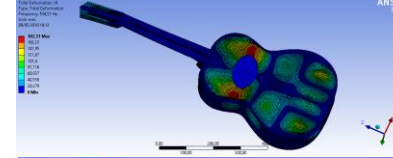
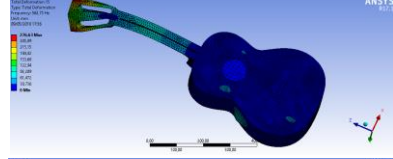
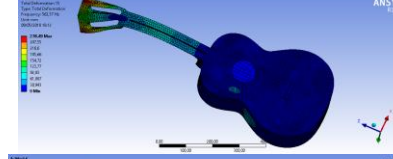
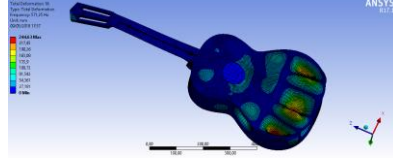
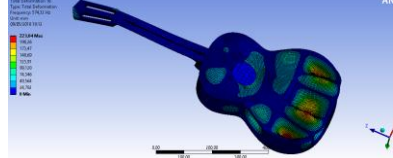
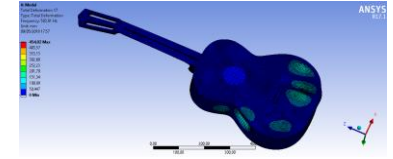
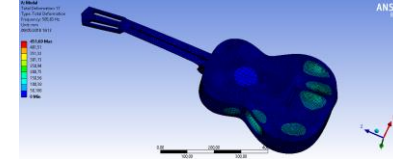
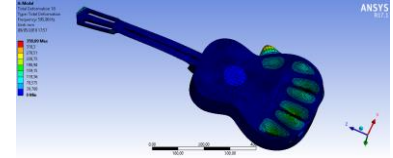
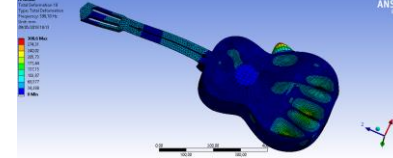
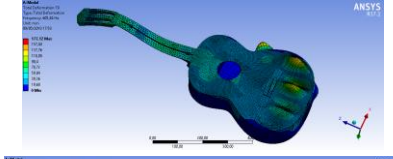
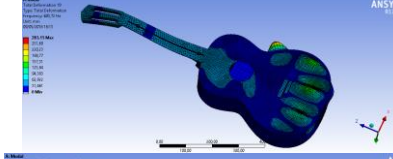
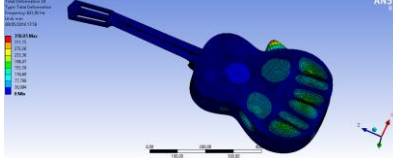
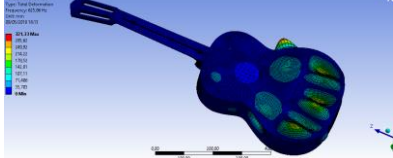
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	Forat 8,2		Forat 9,8	
	7	8	7	8
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
11	463,6		467,37	
12	465,56		470,2	
13	503,74		507,54	
14	533,34		533,07	
15	562,45		562,75	
16	563,94		567,64	
17	580,47		582,43	
18	590,66		593,43	
19	604,38		603,76	
20	620,44		621,69	

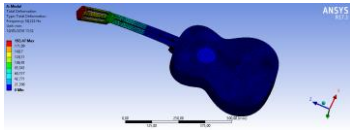
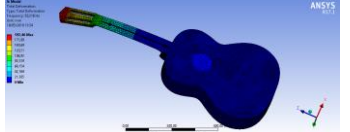
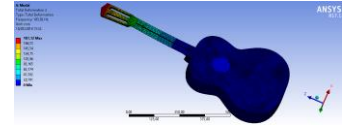
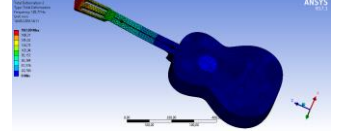
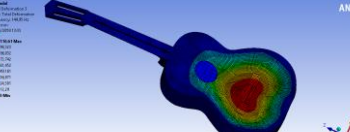
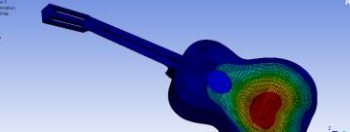
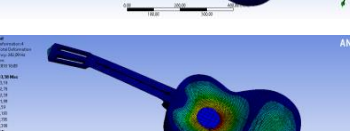
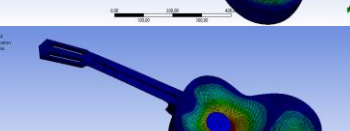
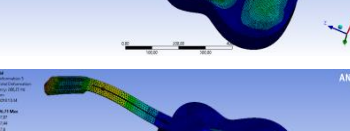
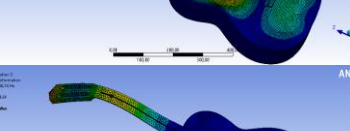
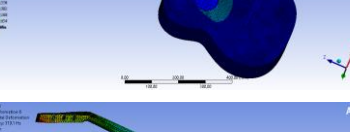
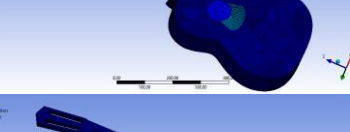
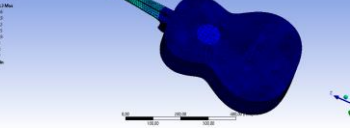
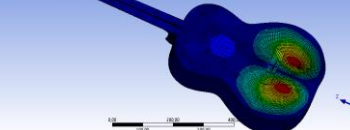
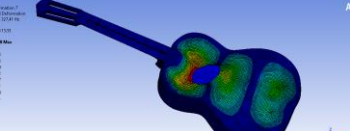
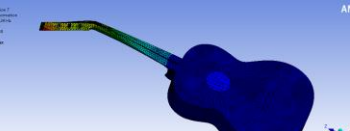
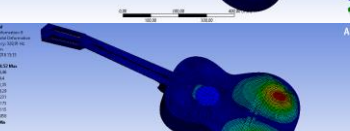
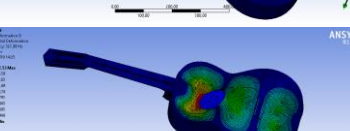
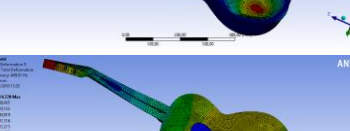
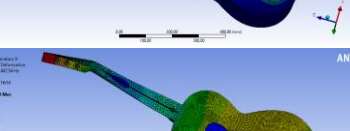
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	Forat 11		Forat 12,5	
	9	10	9	10
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,22		50,221	
2	103,8		103,81	
3	143,42		145,85	
4	240,77		242,09	
5	266,19		266,24	
6	311,84		314,7	
7	319,22		319,27	
8	326,25		326,88	
9	454,39		452,12	
10	455,32		459,14	

Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	Forat 11		Forat 12,5	
	9	10	9	10
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
11	471,83		476,46	
12	474,43		478,58	
13	510,69		513,24	
14	534,16		534,53	
15	562,73		562,57	
16	571,25		574,32	
17	583,81		585,63	
18	595,98		598,18	
19	603,44		503,72	
20	623,92		625,86	

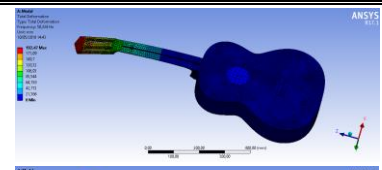
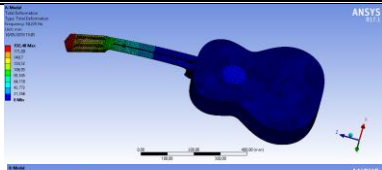
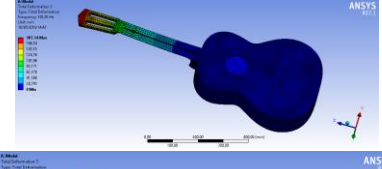
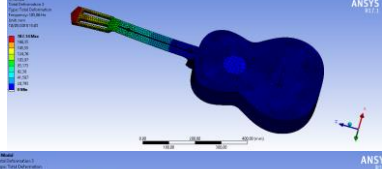
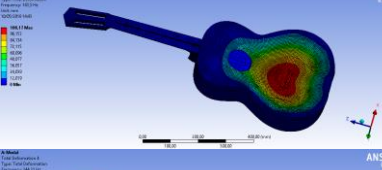
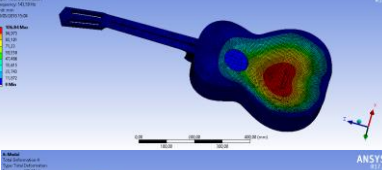
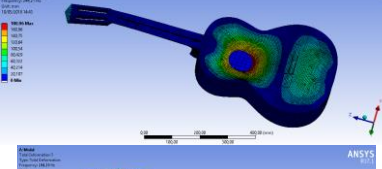
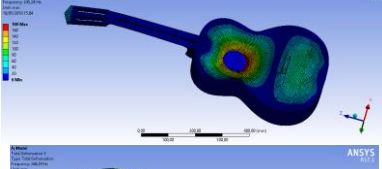
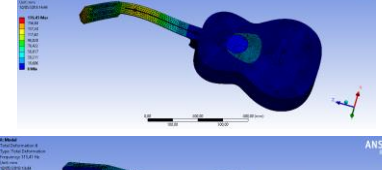
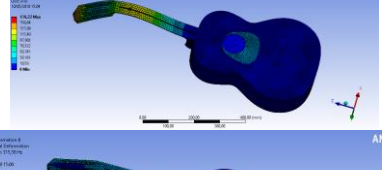
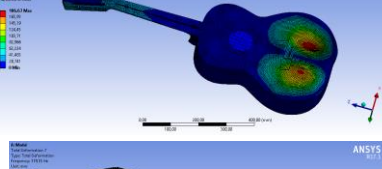
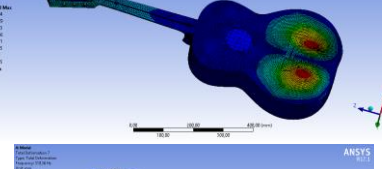
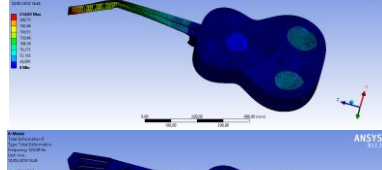
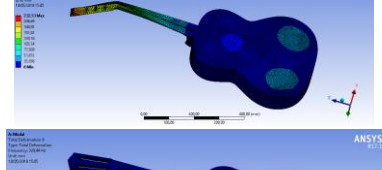
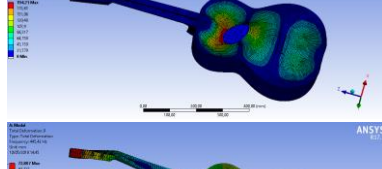
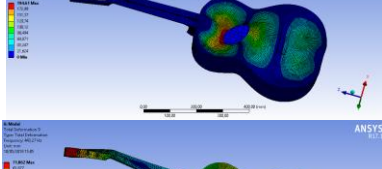
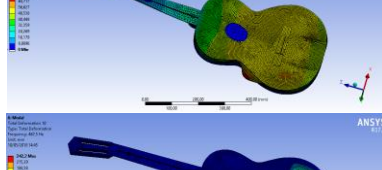
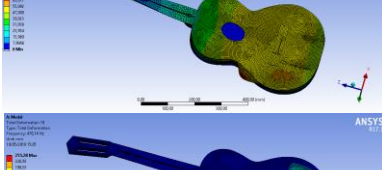
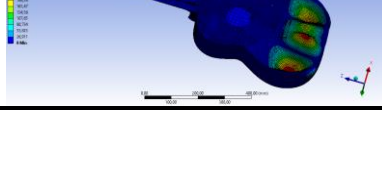
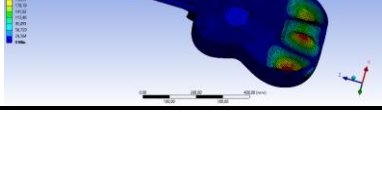
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	Forat 13,8		Forat 15	
	11	12	11	12
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,222		50,216	
2	103,82		103,77	
3	144,95		145,3	
4	242,73		243,46	
5	266,25		266,14	
6	319,1		315,08	
7	327,41		319,24	
8	328,91		327,51	
9	449,81		447,54	
10	461,71		463,45	

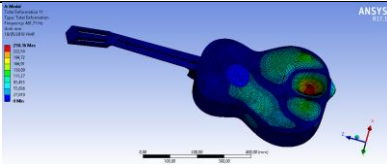
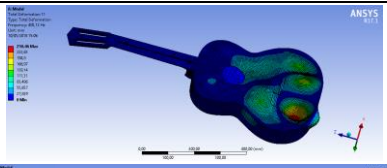
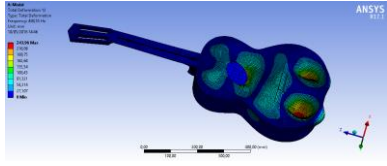
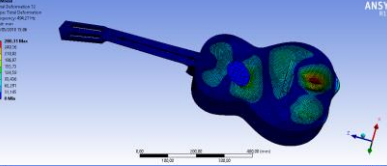
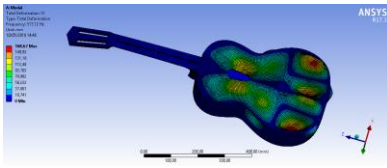
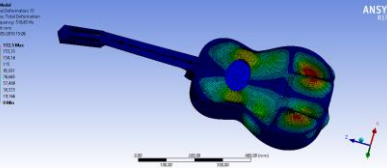
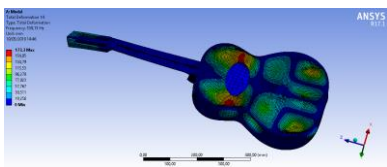
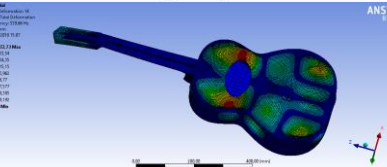
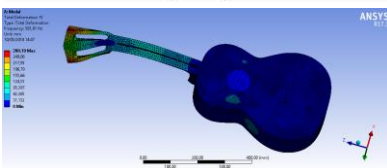
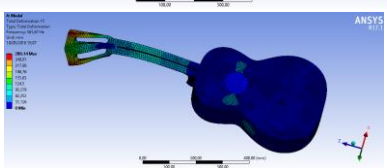
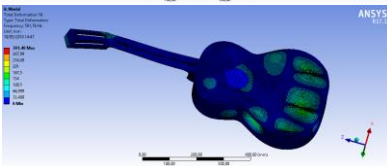
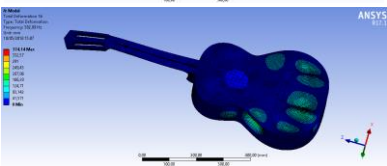
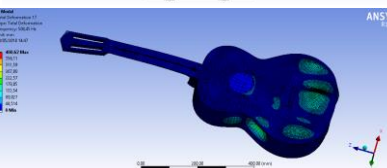
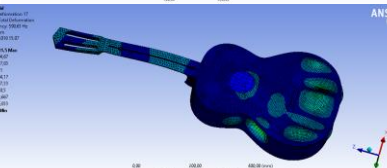
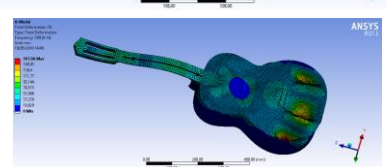
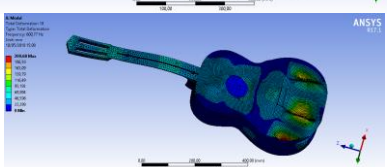
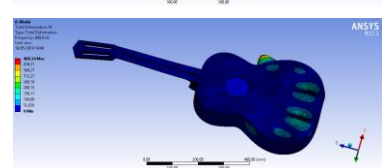
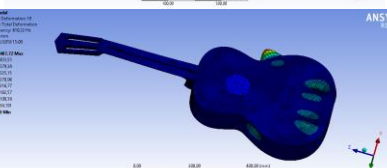
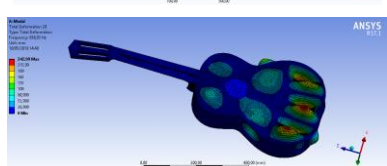
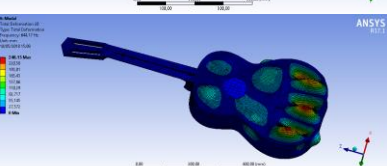
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	Forat 13,8		Forat 15	
	11	12	11	12
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
11	480,24		477,87	
12	481,45		484,82	
13	516,7		514,9	
14	538,32		536,07	
15	562,29		562,01	
16	576,71		578,66	
17	586,77		586,93	
18	598,97		598,95	
19	605,1		606,24	
20	629,32		630,4	

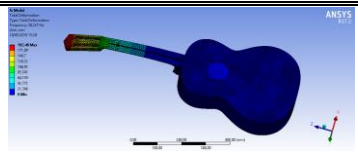
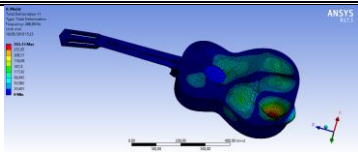
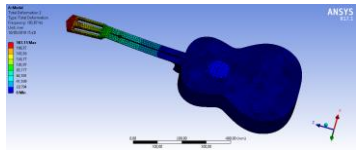
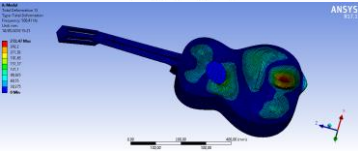
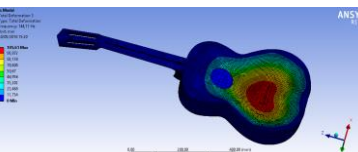
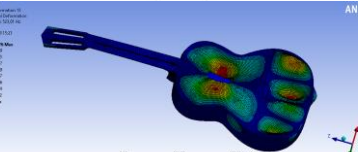
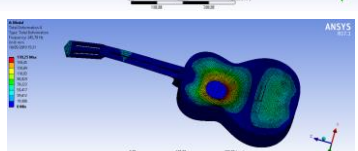
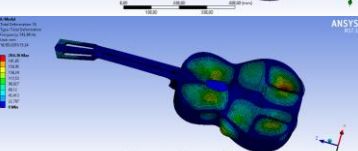
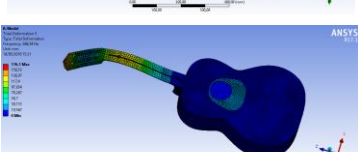
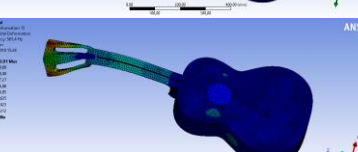
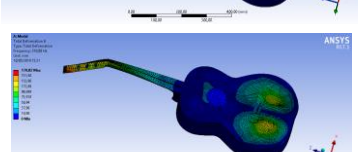
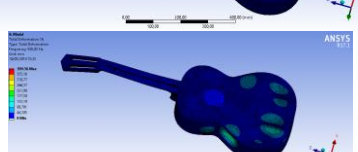
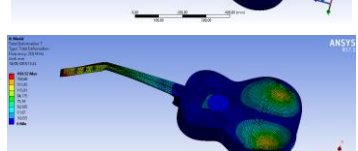
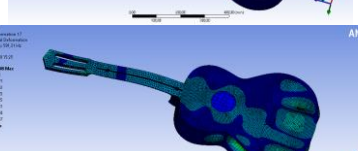
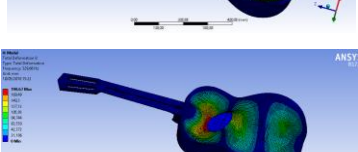
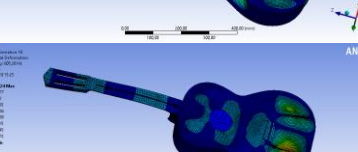
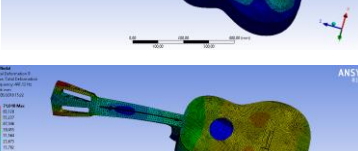
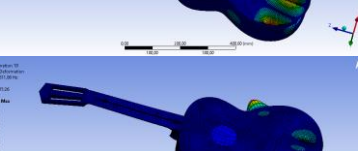
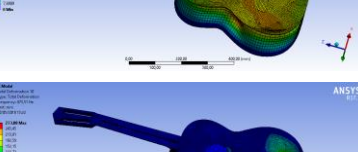
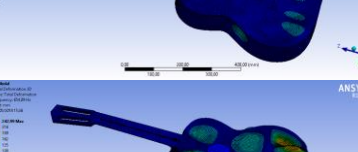
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	Forat 16,3		Forat 17,5	
	13	14	13	14
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,224		50,225	
2	103,85		103,86	
3	144,96		143,59	
4	244,21		245,24	
5	266,28		266,29	
6	315,41		315,58	
7	319,35		319,36	
8	328,49		329,44	
9	445,42		443,27	
10	467,5		470,14	

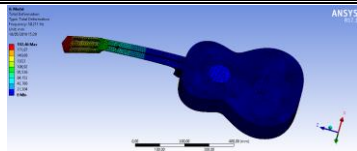
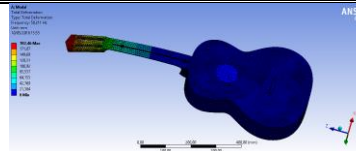
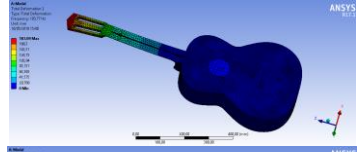
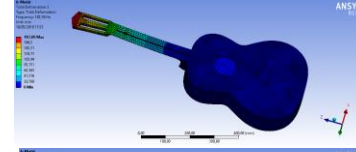
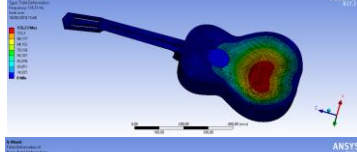
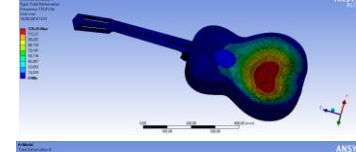
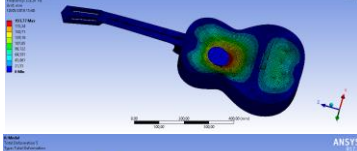
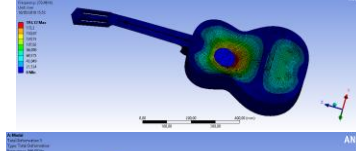
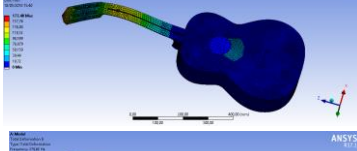
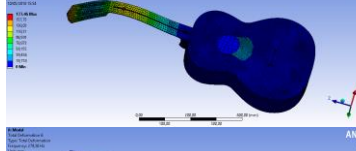
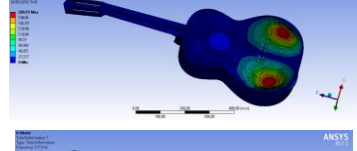
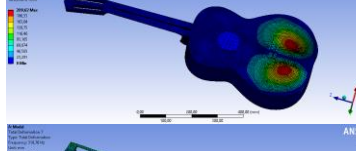
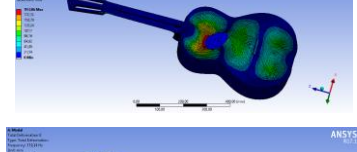
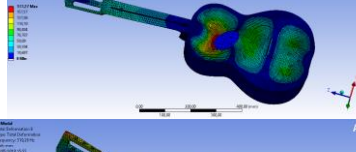
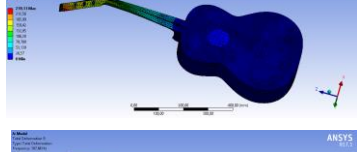
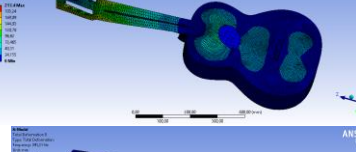
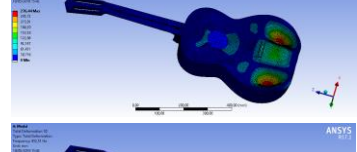
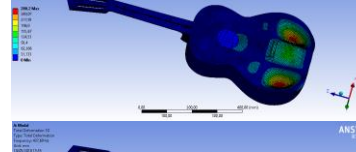
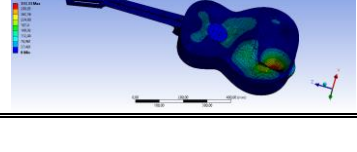
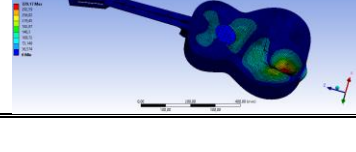
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]	Forat 16,3		Forat 17,5	
	13	14	13	14
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
11	481,71		485,12	
12	488,55		494,27	
13	517,12		518,63	
14	538,15		539,66	
15	561,81		561,67	
16	581,76		582,89	
17	588,45		590,63	
18	599,82		600,77	
19	608,8		610,22	
20	636,83		644,17	

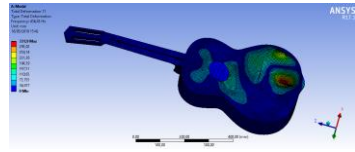
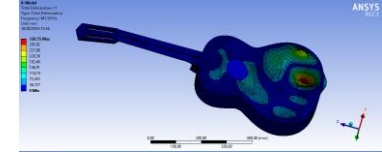
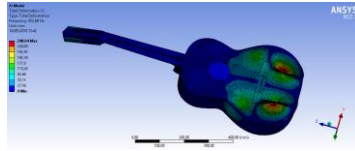
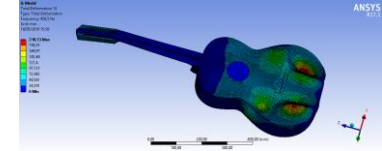
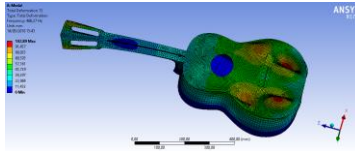
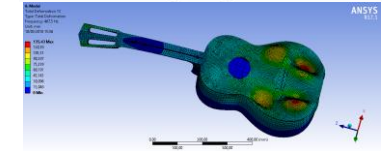
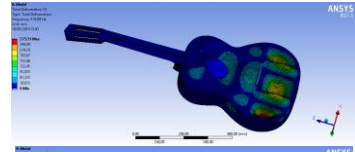
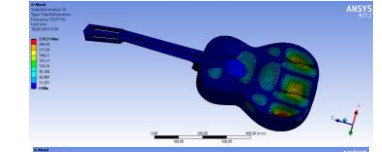
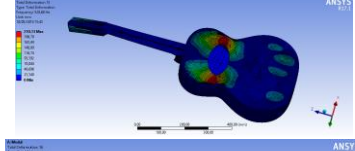
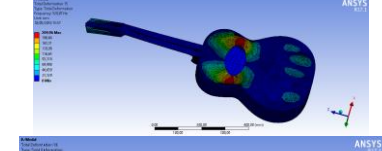
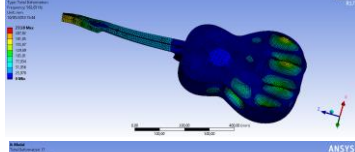
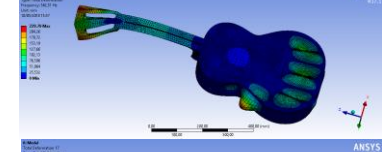
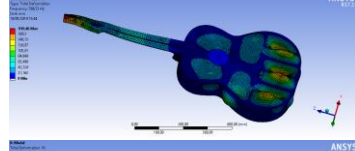
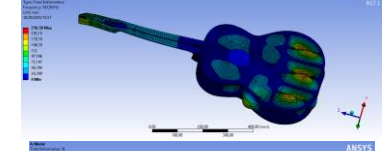
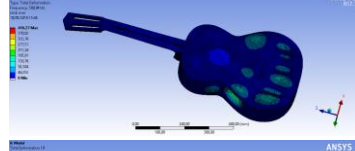
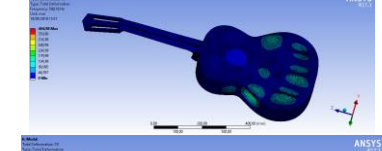
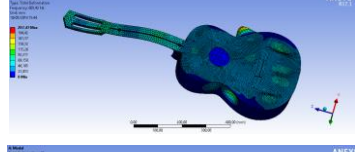
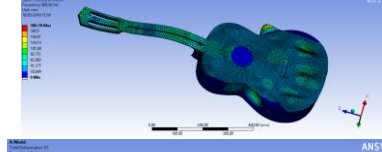
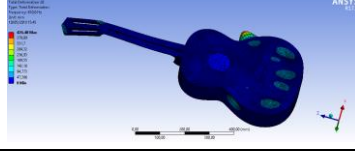
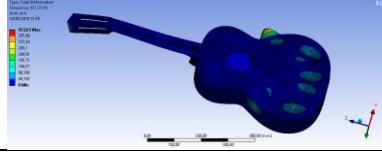
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Gruix [mm]		Forat 18,8			
		15			
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Modes	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,227		11	486,88	
2	103,87		12	500,41	
3	144,11		13	523,01	
4	245,78		14	542,64	
5	266,34		15	561,4	
6	318,08		16	585,03	
7	320,14		17	591,31	
8	329,66		18	605,28	
9	441,12		19	611,88	
10	473,51		20	654,09	

Annex A.D Canvi d'angle de les Barres Harmòniques

Angle [°]	0	2		
Modes	Frequència [Hz]	Mode	Frequència [Hz]	Mode
1	50,211		50,211	
2	103,77		103,76	
3	135,51		135,41	
4	232,91		233,46	
5	266,07		266,07	
6	274,62		279,36	
7	317,5		318,79	
8	319,24		319,28	
9	387,66		393,21	
10	432,51		437,69	

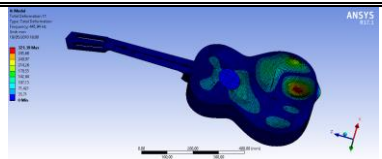
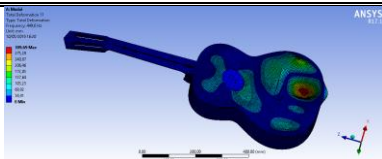
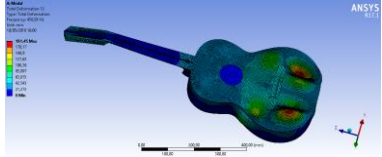
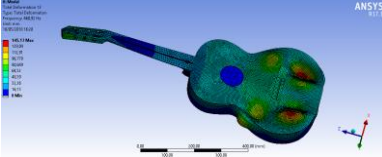
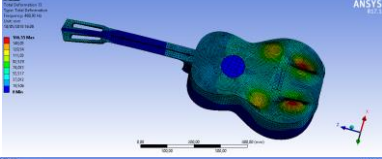
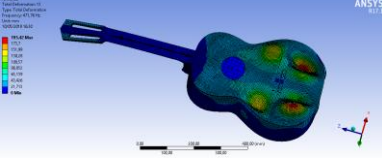
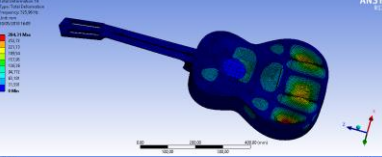
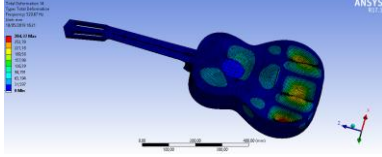
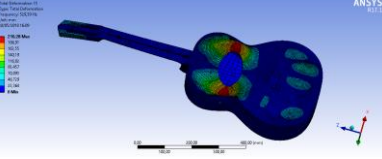
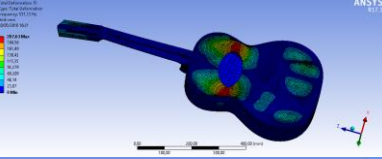
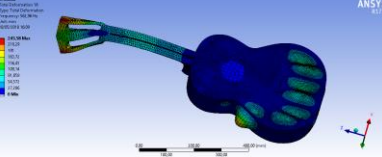
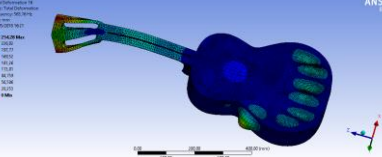
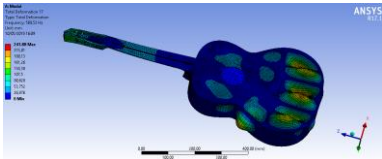
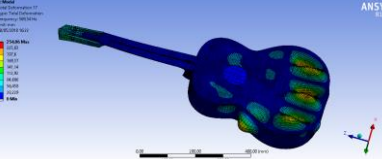
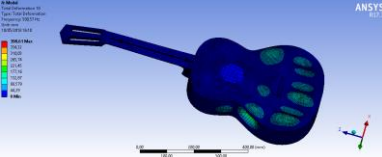
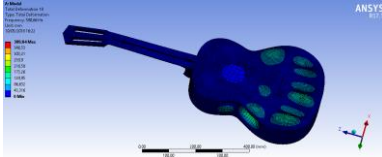
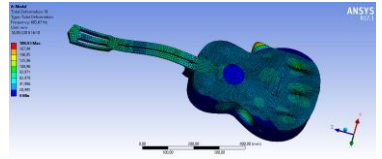
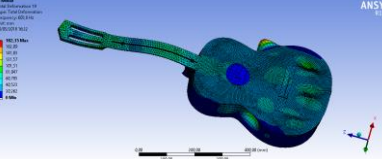
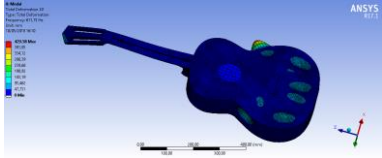
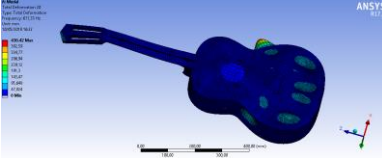
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Angle [°]		0		2	
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode	
11	436,45		441,58		
12	452,68		546,5		
13	466,27		467,5		
14	519,89		522,57		
15	528,68		529,07		
16	562,03		562,51		
17	566,53		567,49		
18	580,04		580,16		
19	603,42		603,63		
20	610,6		611,23		

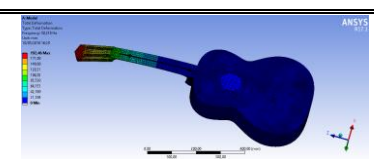
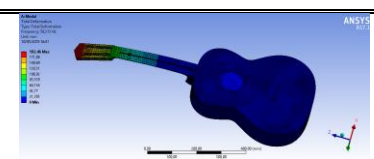
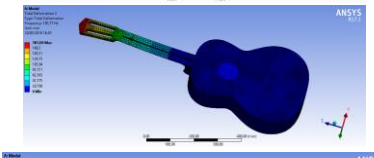
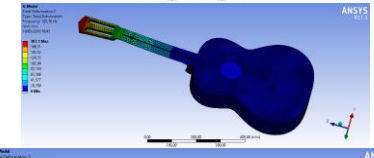
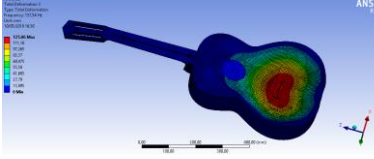
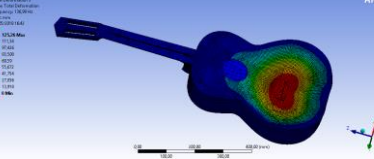
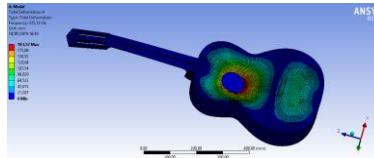
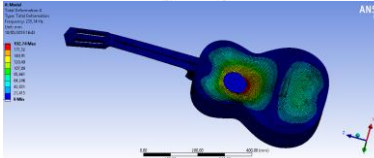
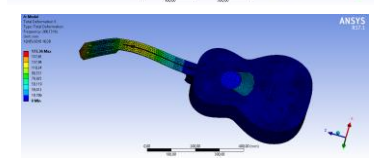
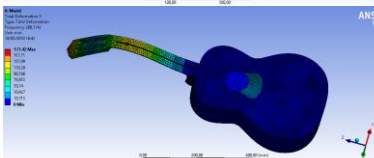
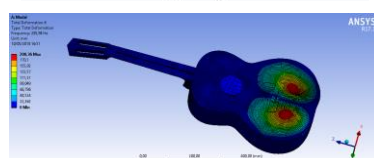
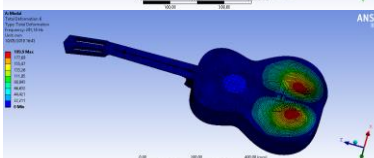
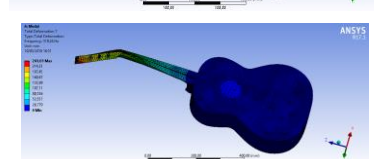
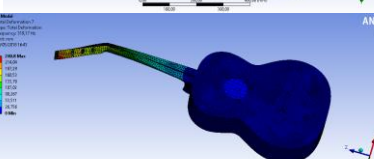
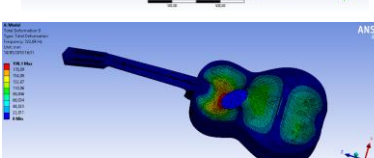
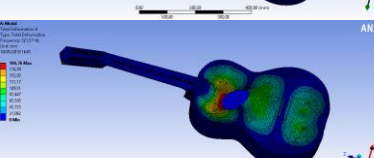
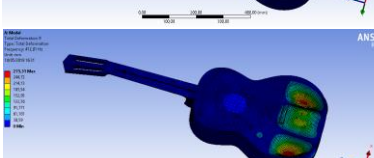
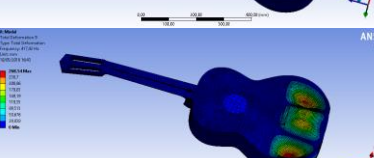
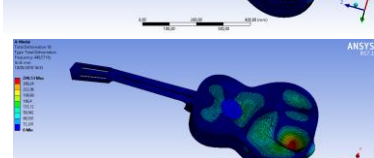
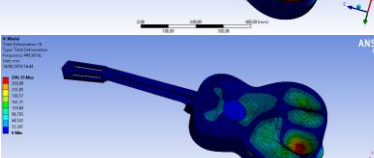
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Angle [°]		4		6	
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode	
1	50,211		50,212		
2	103,76		103,76		
3	136,71		137,2		
4	234,06		234,92		
5	266,09		266,11		
6	280,57		283,37		
7	319,2		319,18		
8	320,13		322,11		
9	399,45		405,51		
10	441,86		445,98		

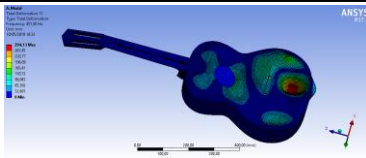
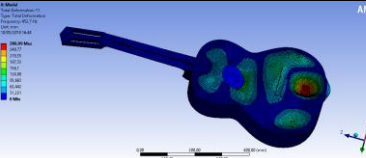
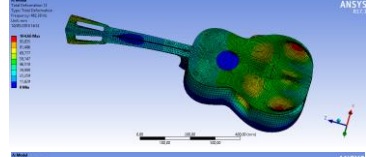
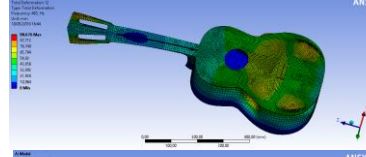
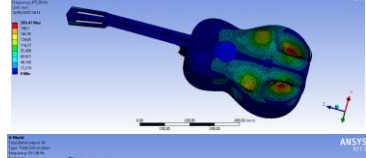
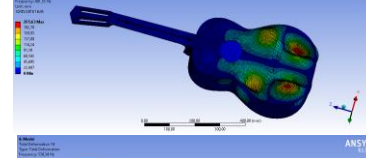
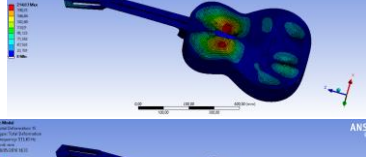
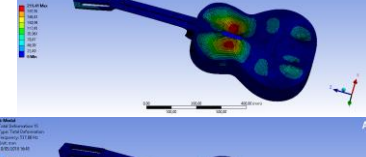
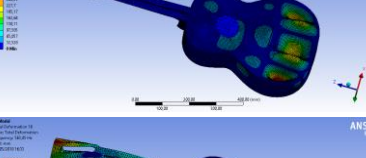
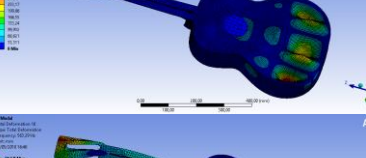
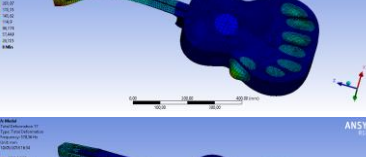
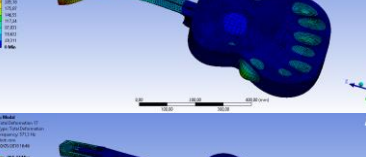
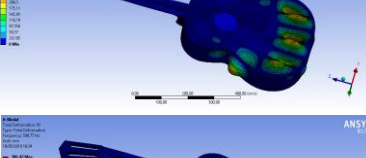
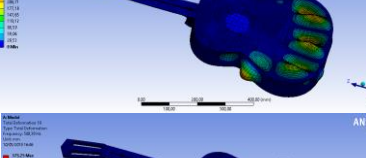
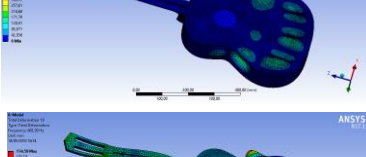
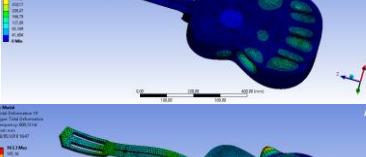
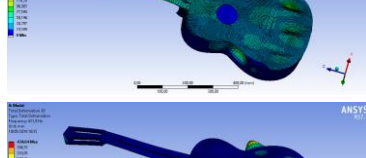
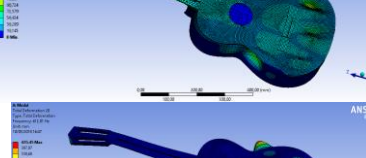
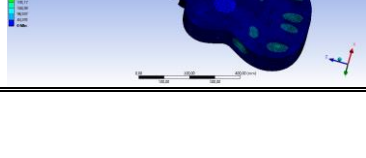
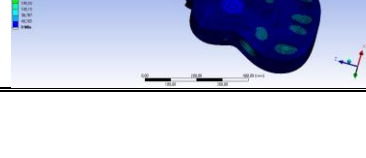
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Angle [°]	4	6		
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
11	445,94		449,6	
12	458,93		460,92	
13	468,92		471,76	
14	525,96		529,67	
15	529,39		531,13	
16	562,96		563,16	
17	568,52		569,54	
18	580,57		580,66	
19	603,67		603,8	
20	611,15		611,33	

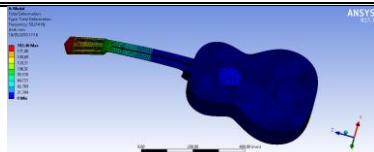
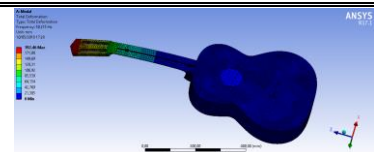
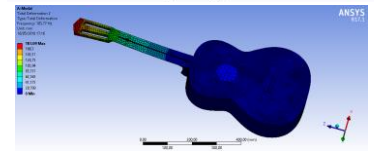
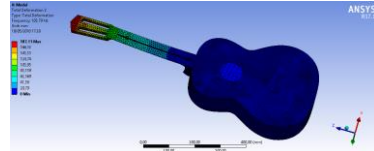
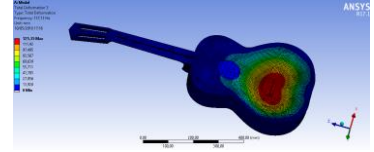
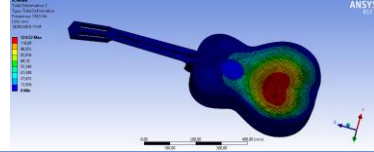
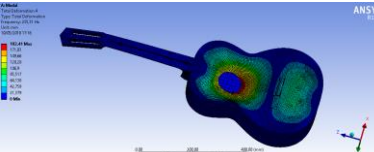
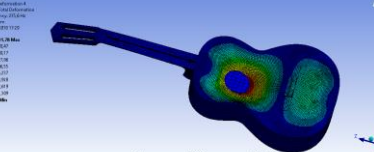
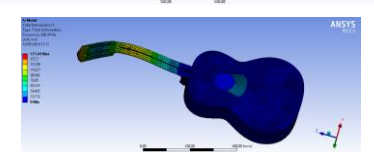
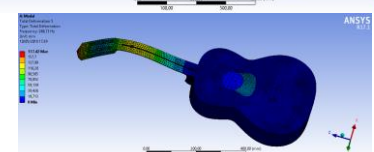
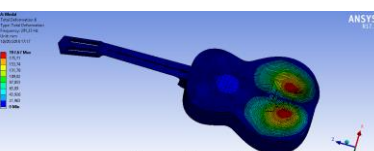
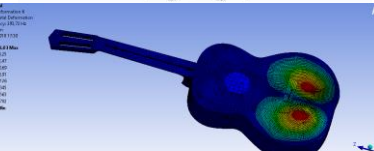
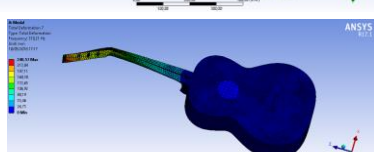
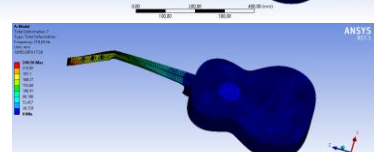
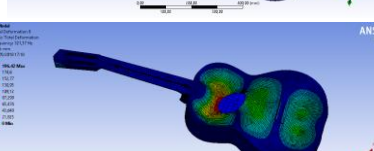
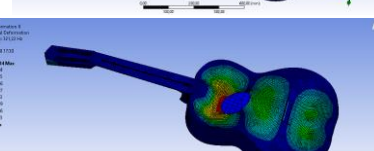
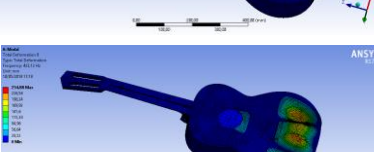
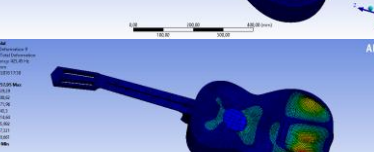
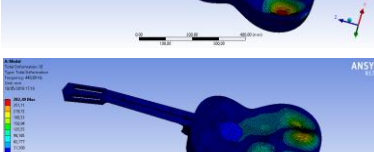
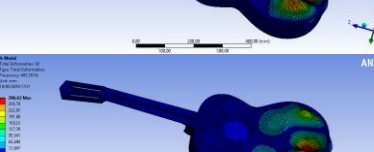
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Angle [°]		10		
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,214		50,213	
2	103,77		103,76	
3	137,54		136,98	
4	235,32		235,14	
5	266,13		266,1	
6	285,94		291,14	
7	319,24		319,17	
8	322,64		321,57	
9	412,01		417,42	
10	448,57		449,36	

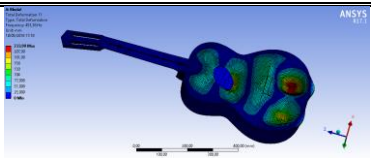
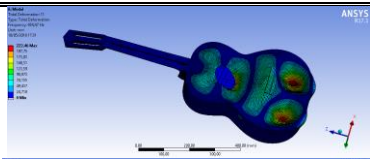
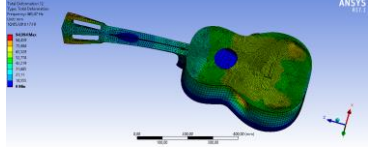
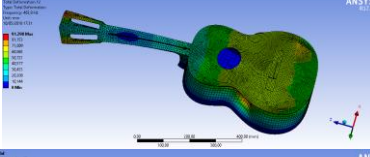
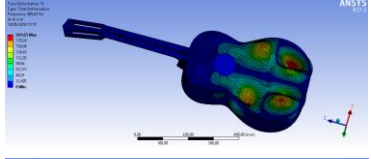
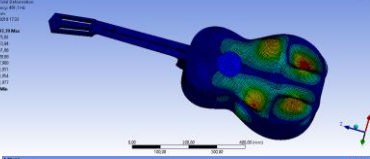
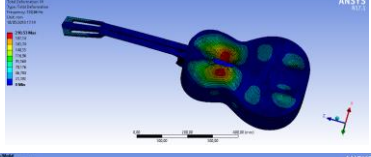
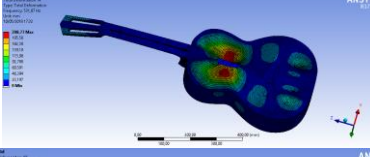
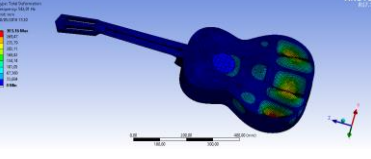
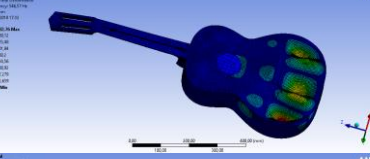
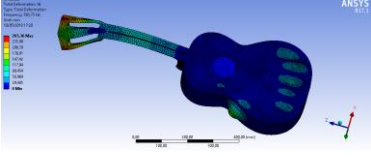
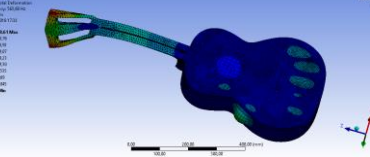
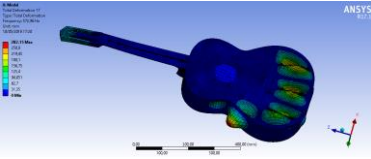
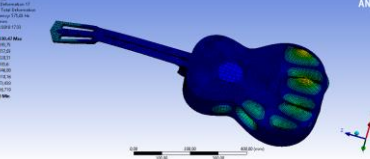
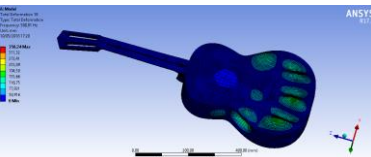
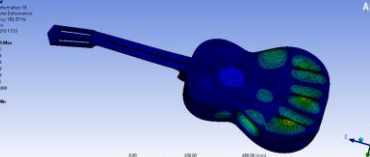
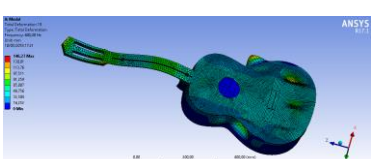
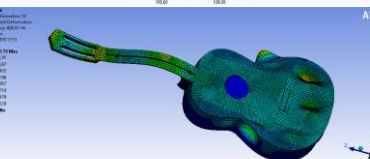
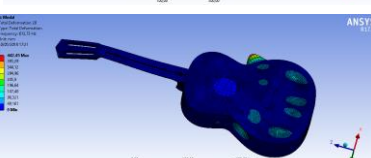
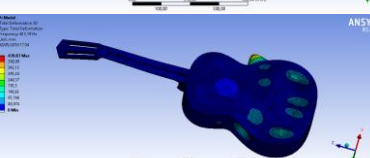
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Angle [°]		10		
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
11	541,85		452,7	
12	462,26		463	
13	475,99		481,55	
14	531,36		530,34	
15	533,63		537,66	
16	563,45		563,29	
17	570,36		571,3	
18	580,77		580,39	
19	603,99		604,13	
20	611,8		612,01	

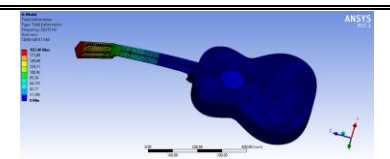
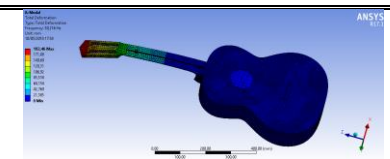
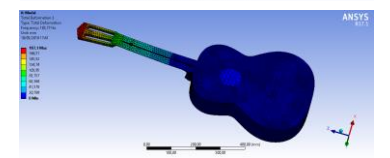
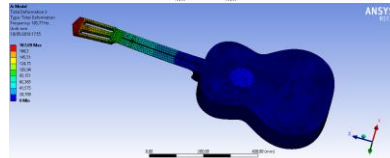
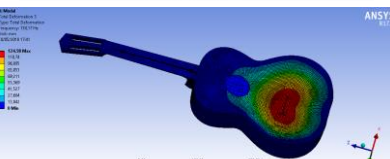
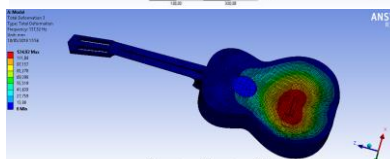
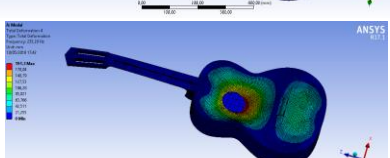
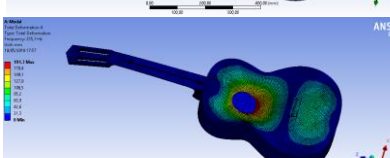
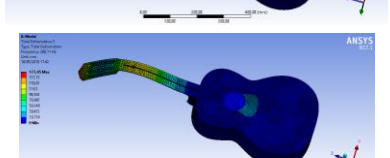
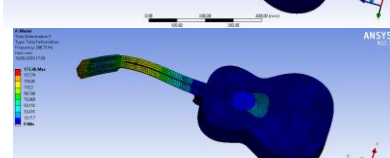
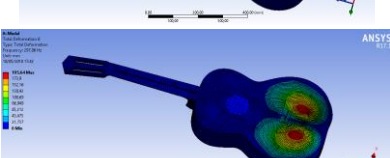
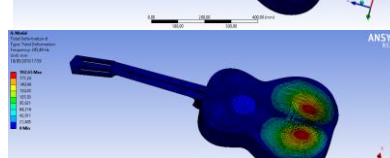
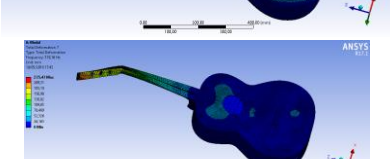
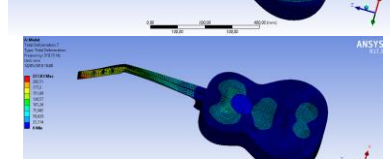
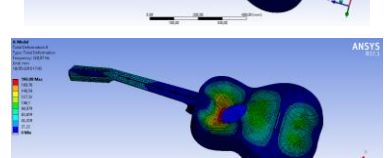
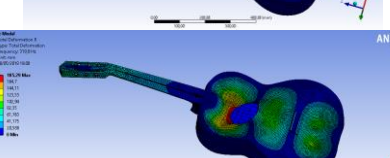
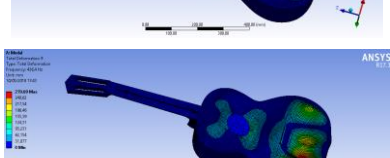
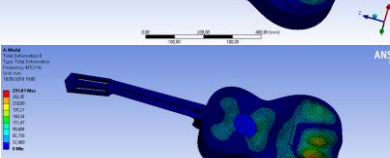
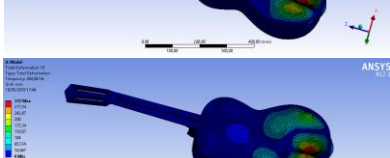
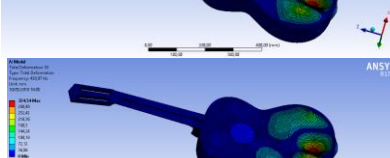
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Angle [°]		12		14
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,214		50,215	
2	103,77		103,79	
3	137,13		138,5	
4	235,31		235,6	
5	266,14		266,13	
6	291,23		293,72	
7	319,21		319,24	
8	321,37		321,22	
9	422,12		425,45	
10	448,69		447,38	

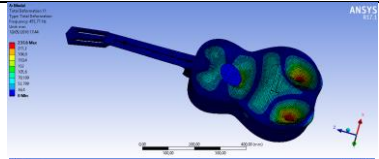
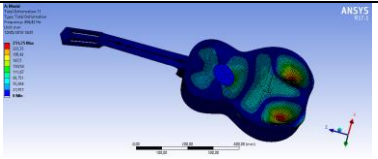
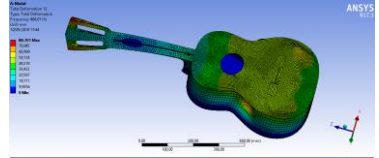
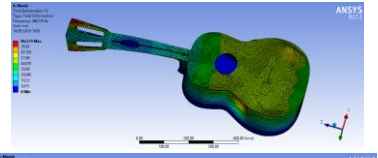
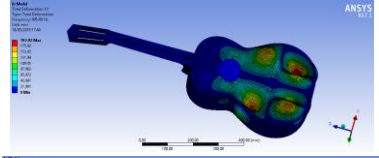
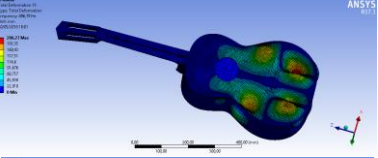
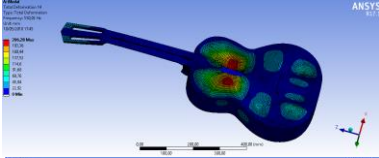
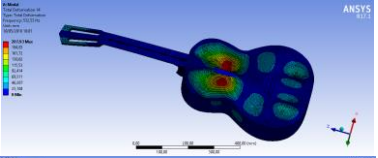
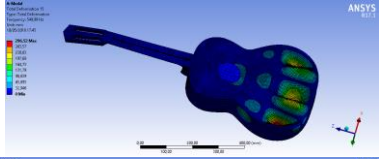
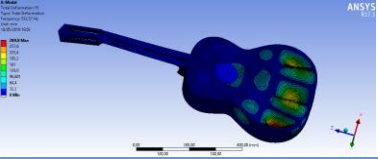
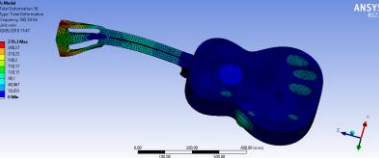
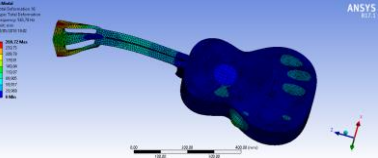
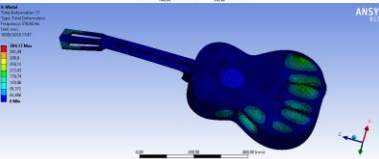
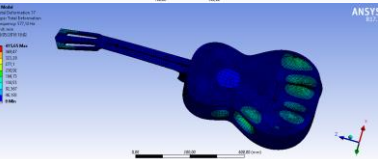
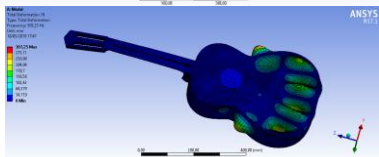
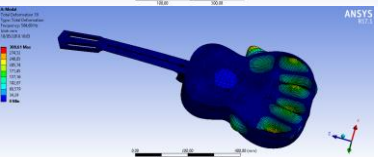
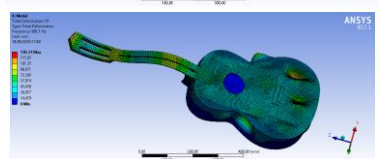
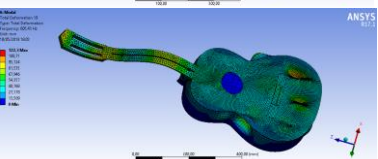
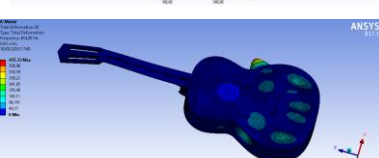
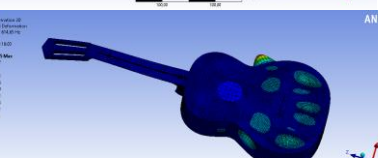
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Angle [°]		12		14
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
11	453,38		454,47	
12	463,47		463,8	
13	485,67		491,1	
14	530,66		531,07	
15	542,01		546,57	
16	563,73		563,68	
17	572,96		575,02	
18	580,81		582,07	
19	604,48		604,81	
20	612,72		613,19	

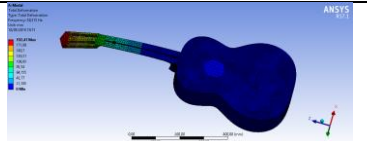
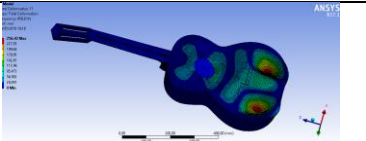
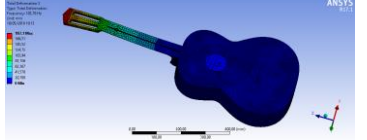
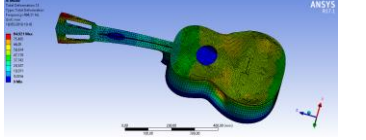
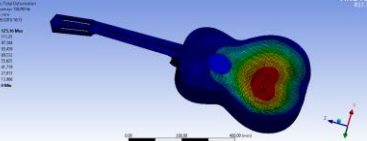
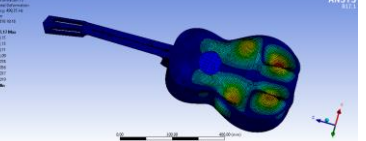
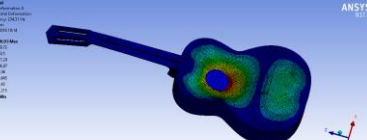
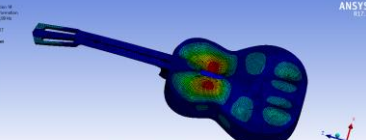
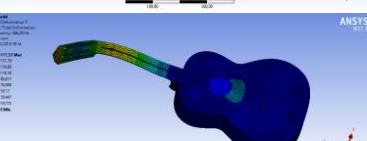
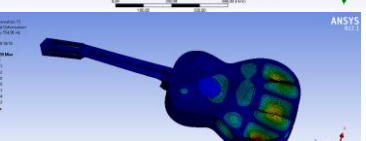
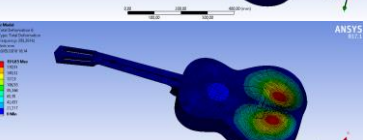
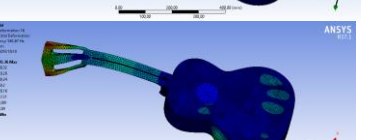
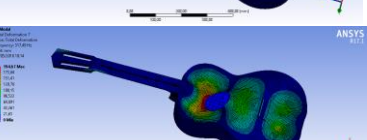
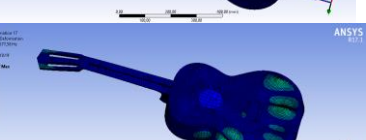
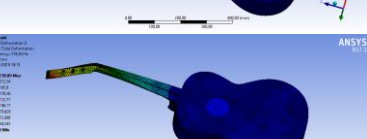
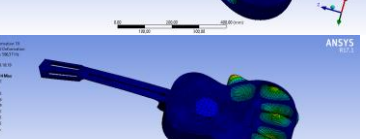
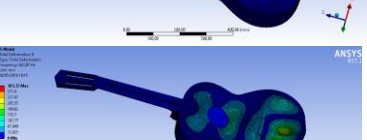
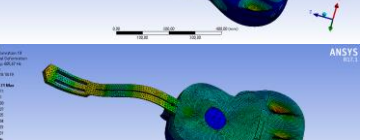
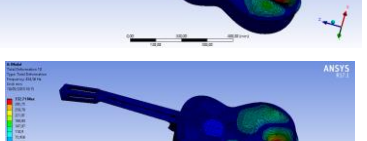
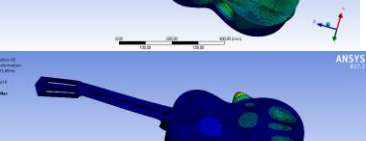
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Angle [°]	16		18	
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,215		50,216	
2	103,77		103,77	
3	138,17		137,52	
4	235,29		235,1	
5	266,11		266,13	
6	297,06		293,49	
7	319,16		319,15	
8	320,07		319,8	
9	426,4		425,3	
10	444,06		438,97	

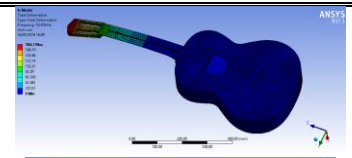
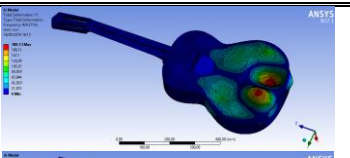
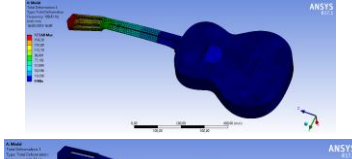
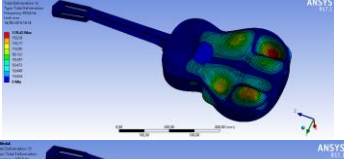
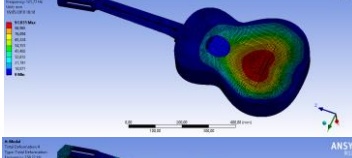
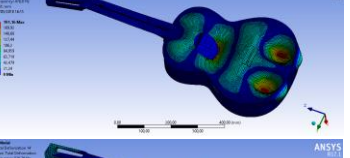
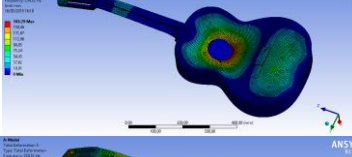
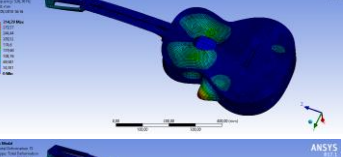
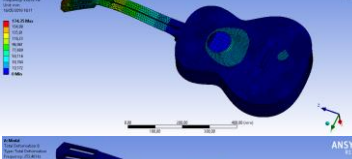
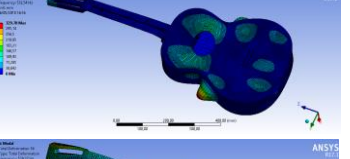
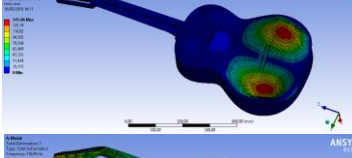
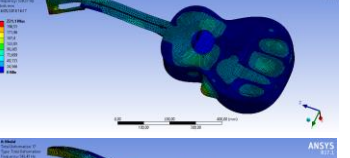
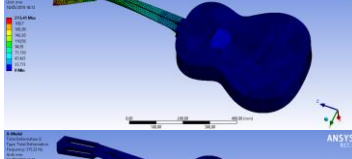
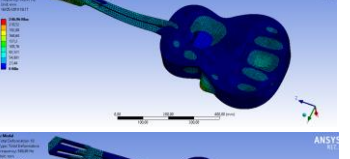
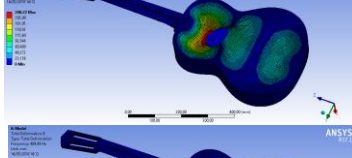
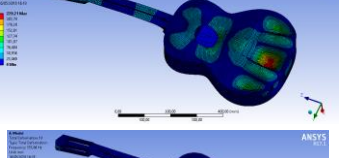
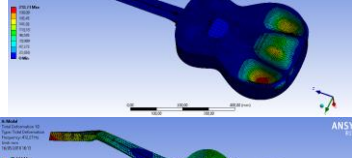
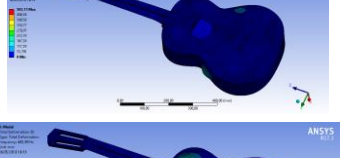
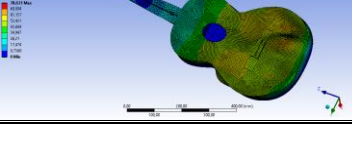
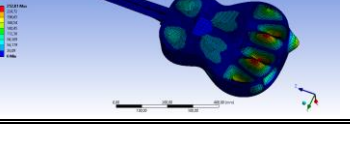
Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

Angle [°]	16		18	
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Freqüència [Hz]	Mode
11	455,77		456,42	
12	464,01		464,19	
13	495,48		496,79	
14	530,02		532,53	
15	549,99		552,57	
16	563,54		563,78	
17	576,46		577,12	
18	583,23		584,69	
19	605,1		605,43	
20	614,05		614,65	

Estudi paramètric de la resposta freqüencial de la guitarra

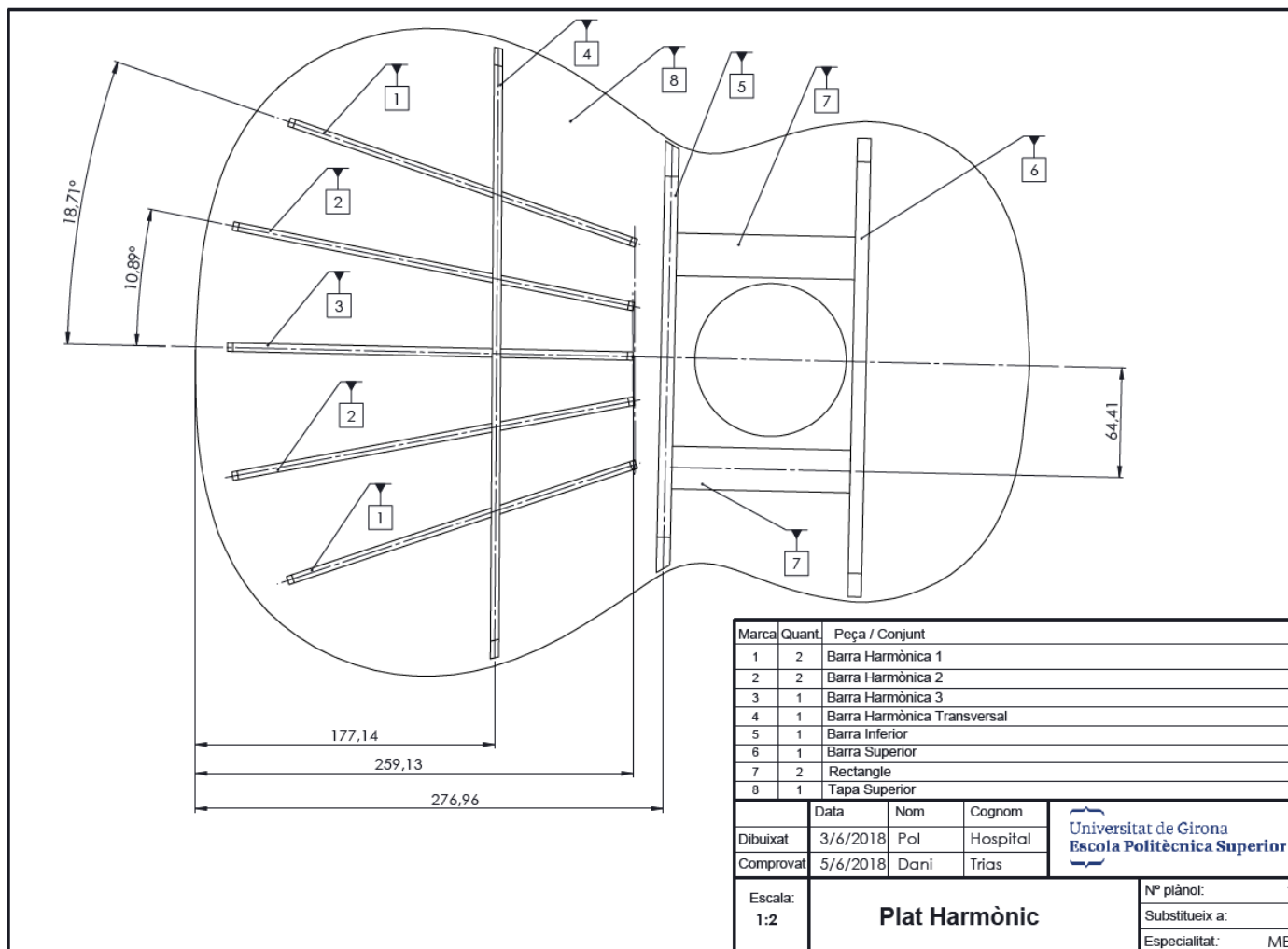
Angle [°]			20		
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Modes	Freqüència [Hz]	Mode
1	50,215		11	456,6	
2	103,78		12	464,31	
3	136,88		13	498,35	
4	234,31		14	529,89	
5	266,08		15	554,95	
6	292,28		16	563,67	
7	317,49		17	577,58	
8	319,26		18	586,57	
9	423,07		19	605,67	
10	434,36		20	615,89	

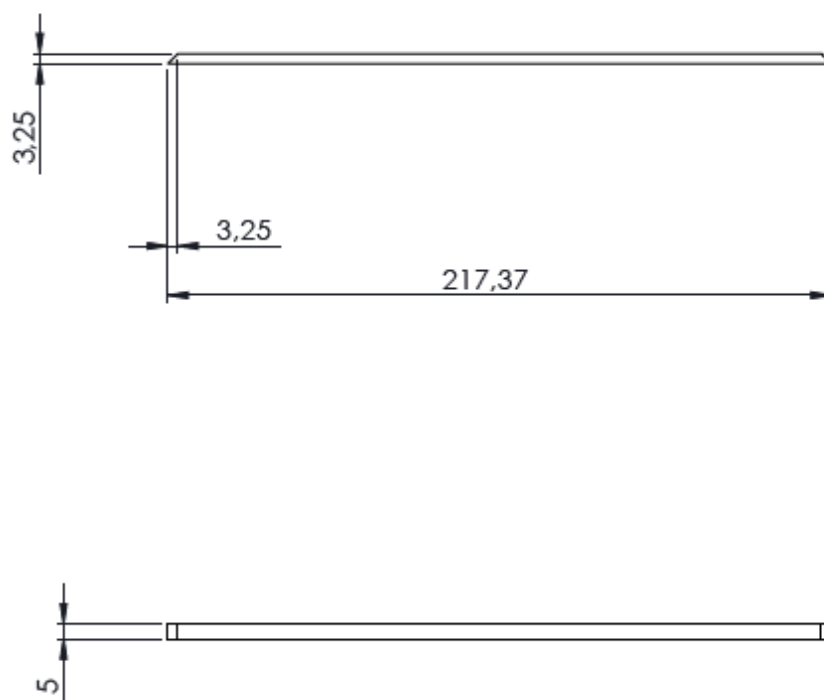
Annex A.E Canvi de forma de les Barres Harmòniques

Gruix [mm]		3,5			
Modes	Freqüència [Hz]	Mode	Modes	Freqüència [Hz]	Mode
1	55,476		11	424,27	
2	100,43		12	458,6	
3	121,45		13	478,8	
4	234,22		14	526,76	
5	250,52		15	532,54	
6	253,45		16	539,37	
7	310,92		17	542,45	
8	315,22		18	548,65	
9	404,49		19	555,86	
10	412,27		20	645,89	

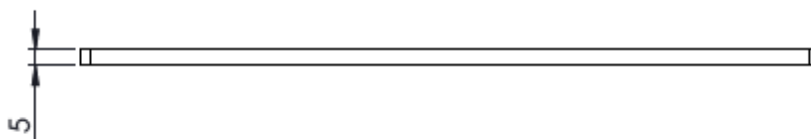
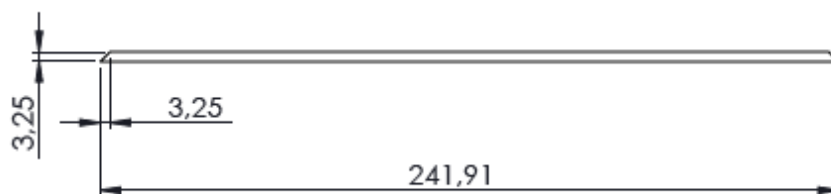
Annex B Plànols del Plat Harmònic i les seves peces


Annex B.A Plat Harmònic

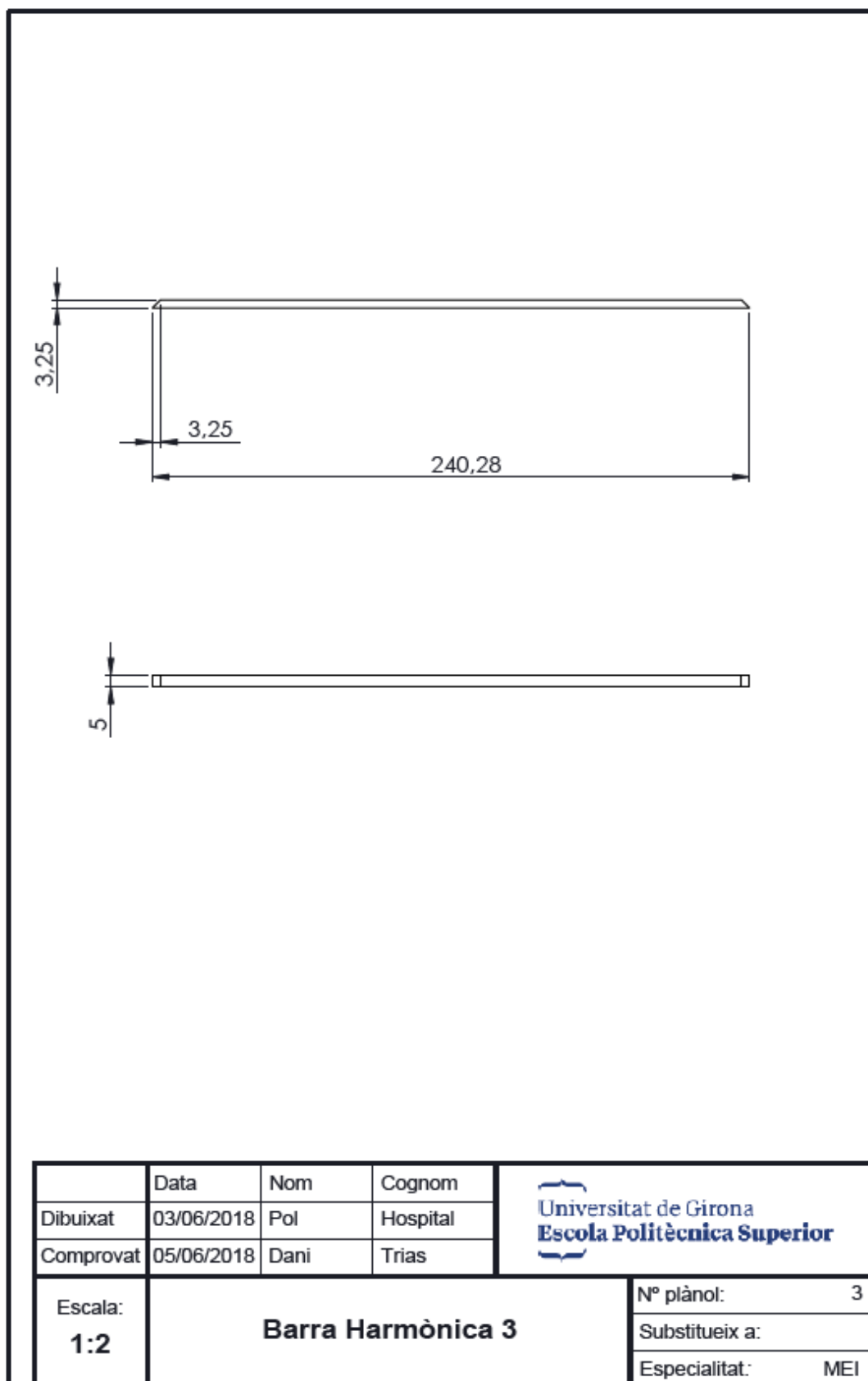


Annex B.B Barra Harmònica 1

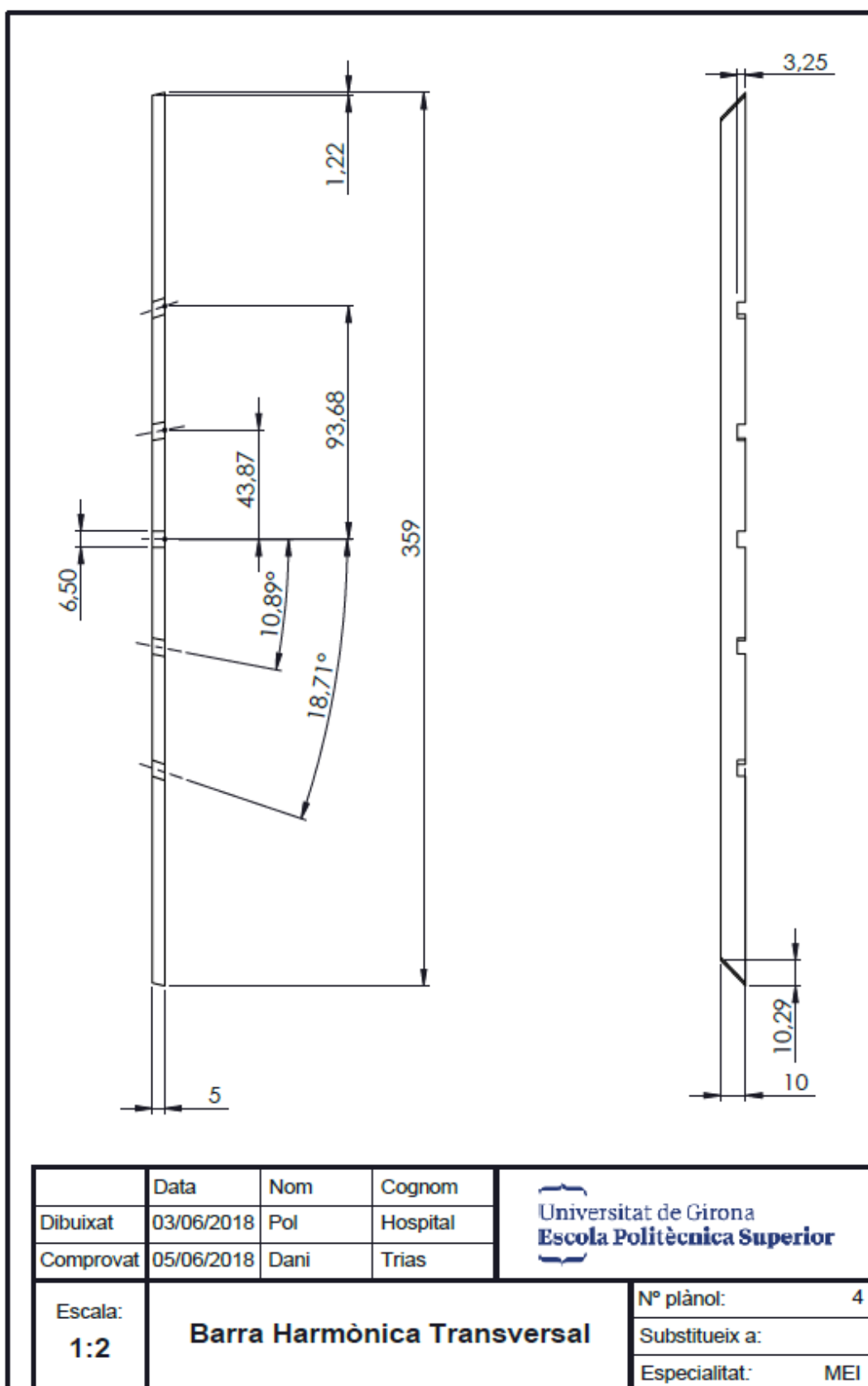
	Data	Nom	Cognom	
Dibuixat	03/06/2018	Pol	Hospital	
Comprovat	05/06/2018	Dani	Trias	
Escala: 1:2	Barra Harmònica 1			N° plànol: 1 Substitueix a: Especialitat: MEI

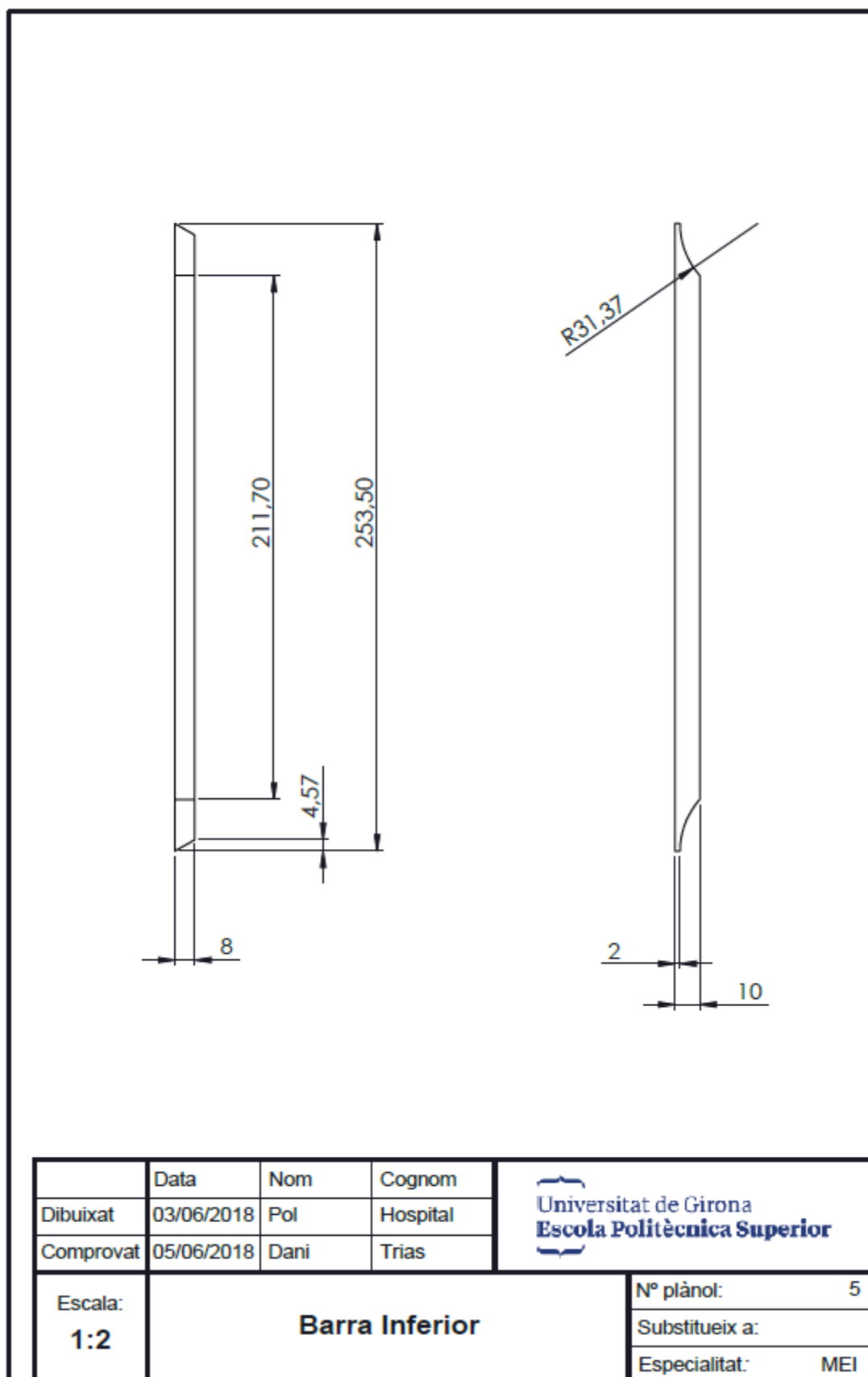
Annex B.C Barra Harmònica 2

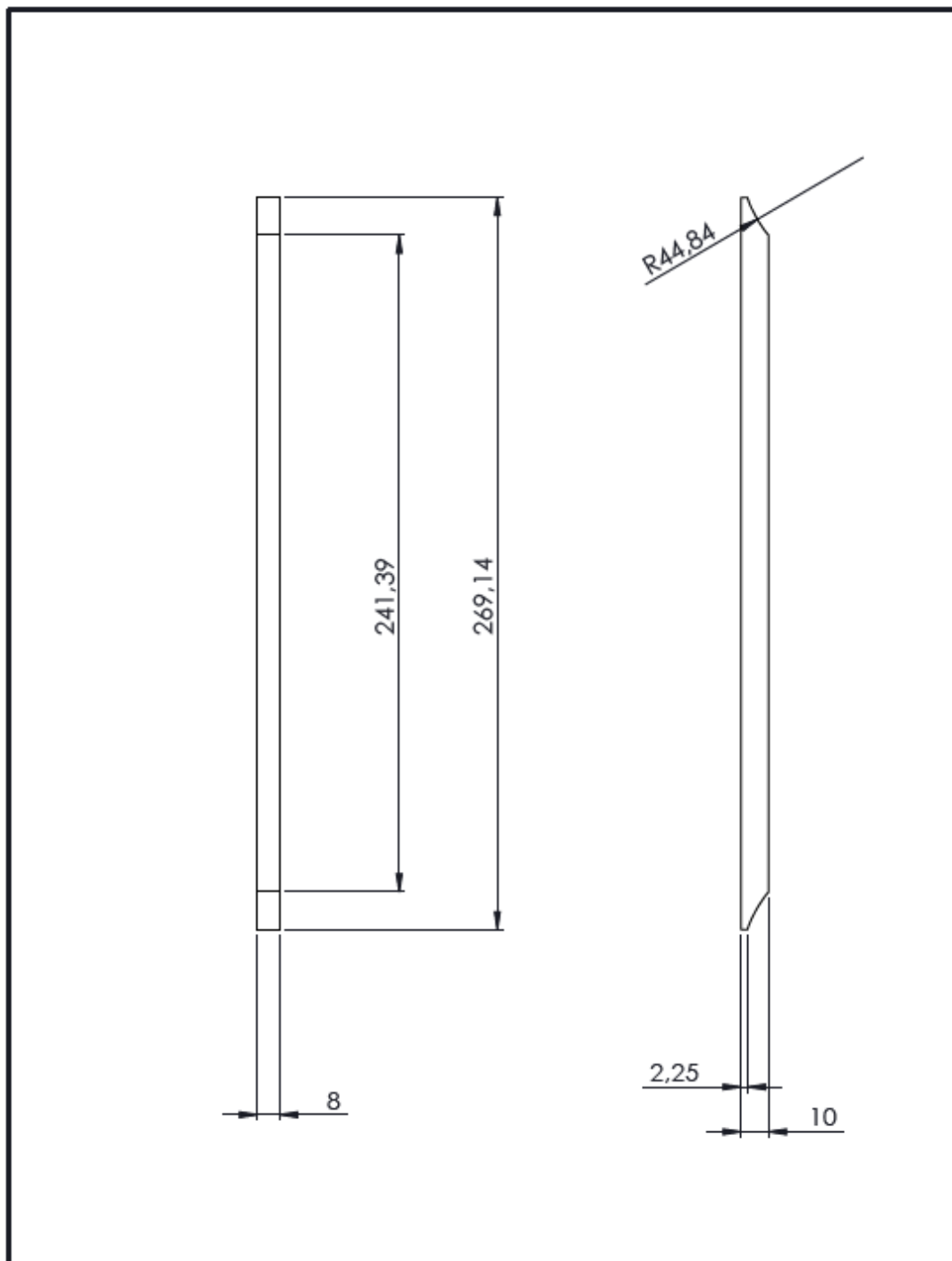
	Data	Nom	Cognom	
Dibuixat	03/06/2018	Pol	Hospital	
Comprovat	05/06/2018	Dani	Trias	
Escala: 1:2	Barra Harmònica 2			N° plànol: 2 Substitueix a: Especialitat: MEI

Annex B.D Barra Harmònica 3

Annex B.E Barra Harmònica Transversal

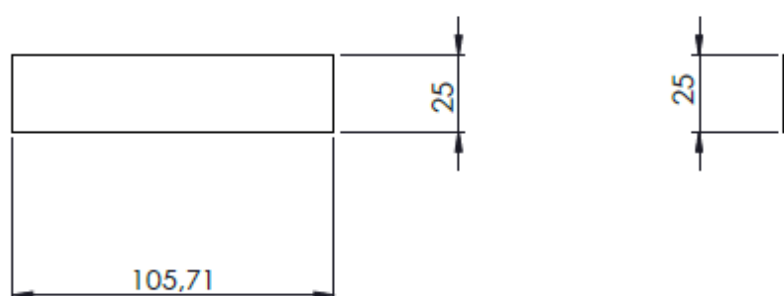



Annex B.F Barra Inferior

Annex B.G Barra Superior

	Data	Nom	Cognom	
Dibuixat	03/06/2018	Pol	Hospital	
Comprovat	05/06/2018	Dani	Trias	
Escala: 1:2	Barra Superior			Nº plànol: 6
				Substitueix a:
				Especialitat: MEI

Annex B.H Rectangle



	Data	Nom	Cognom	
Dibuixat	03/06/2018	Pol	Hospital	
Comprovat	05/06/2018	Dani	Trias	
Escala: 1:2	Rectangle			N° plànol: 7 Substitueix a: Especialitat: MEI