

CAMPANES



Marc Pitarch Casadó
Música i matemàtiques

Índex

Introducció	Pàg. 3
Història	Pàg. 4
Materials i fabricació	Pàg. 5
El so, to pur	Pàg. 6
Qualitats del so, els parcials harmònics	Pàg. 7
Com ens arriba el so d'una campana?	Pàg. 9
L'afinament de la campana	Pàg.12
Com produeixen les campanes el seu so?	Pàg.12
Parcials para les campanes típiques	Pàg.14
Més enlla del afinament en “verdadera-harmonia”	Pàg.16
El “pitch” (timbre) de les campanes	Pàg. 17
El “pitch” virtual i la “strike note”	Pàg. 18
Efectes practics del “pitch” virtual	Pàg. 19
Freqüències de la “strike note	Pàg. 19
Petit experiment	Pàg. 21
Doblets en campanes	Pàg. 23
Durada del so de la campana	Pàg. 24
El treball de Perrin, de Charnley i DePont	Pàg. 29
Modes vibratoris d'una campana	Pàg. 29
Comparació de l'anàlisi amb una gravació	Pàg. 36
Origen físic dels parcials	Pàg. 38
Perfil al llarg del temps dels parcials	Pàg. 39
Conclusions de l'anàlisi	Pàg. 41
Campanes de tercera major	Pàg. 42
Bibliografia	Pàg. 45

Introducció

El primer que voldria fer és explicar una mica els temes que es tractarà en aquest treball, abans de entrar en la part més matemàtica m'agradaria incloure una petita introducció sobre el món de les campanes, una mica d'història, materials, i un petit resum de com es retransmet el so i com “funcionen” les coses (tot i que algunes coses potser siguin redundants amb el que hem fet a classe).

Però primer de tot i per començar m'agradaria posar un parell de simples definicions extretes del diccionari sobre el terme campana:

Campana: 1 1 Instrument de percussió, de metall, en forma de vas rodó, d'amplària creixent devers la boca, que va suspès boca avall i sona quan les parets són percutides per un batall a l'interior o per un martell a l'exterior.

[Diccionari de la llengua catalana]



“La **campana** es un instrumento musical de percusión en forma de copa invertida, por lo general metálica aunque puede ser de madera, cerámica u otros materiales, que suena cuando se golpea con un badajo o con un martillo. El badajo debe ser accionado (tañido) desde el interior de la campana. También puede golpearse por el extremo inferior externo con un martillo que se maneja, de forma manual o mecánica. Está clasificada dentro de los idiófonos (instrumentos en los que el sonido se produce por la vibración del material del que estan hechos)”

[Microsoft Encarta].

Història

Les campanes ja eren conegudes abans de l'any 2000 a.C. en Xina, Egipte, l'Índia, Grècia, Roma, etc. Des dels primers temps es varen utilitzar s per a la comunicació, com objectes rituals i com amulets màgics protectors. El seu ús en les esglésies es va estendre per Europa entre els segles VI al XI.

A Europa les campanes van arribar a través de Bizancio i les primeres notícies sobre elles procedeixen de la província italiana de Campania, d'aquí ve el seu nom. La primera aparició en els temples cristians d'Europa occidental data del segle IX.

En el segle XVII, Jacob Van Eijck, el carillonneur holandès, va descobrir que els parcials (freqüències excitades) de una campana podien ser excitats individualment.

Els germans Francois i Pieter Hemony utilitzaren barres afinades per a mesurar els parcials d'una campana durant la seva afinació. Moltes de las campanes més afinades dels Països Baixos d'avui en dia foren afinades pels germans Hemony.

Degut a la importància estratègica dels seus metalls constitutius (bronze), las campanes van pagar un preu molt car en temps de guerra. La Segona Guerra Mundial no va ser ninguna excepció. El exercit alemany va treure moltes campanes històriques dels campanars en els Països Baixos, França, Polònia i en altres països, inclòs a la mateixa Alemanya. De les que no foren destruïdes després de la guerra, moltes foren estudiades en laboratoris. Els resultats de molts d'aquests estudis foren divulgats per E. W. Van Heuven. La publicació de les seves tesis en 1949 va tenir un interès renovat en la acústica de les campanes, especialment en Alemanya y els Països Baixos. Les mesures acústiques es van fer més precises amb la introducció de la utilització d'equips electrònics desenvolupats en els anys 50. Les fundicions en Anglaterra i en els Països Baixos foren abrumades amb ordres de substituir las campanes destruïdes durant la segona Guerra Mundial, i la fundició de la campana va prospera.

Encara que en teoria es possible moletejar una campana para que soni amb els parcials harmònics desitjats, no es pràctic. Cada un d'ells té el seu propi patró de vibració. El increment del grossor i de la elasticitat del material del que estan fetes les campanes, provoca l'augment de la freqüència de vibració. Mentre que els increments del diàmetre i de la densitat, la disminueixen. Fent menys grossa la campana en el lloc particular canviarà la freqüència dels parcials amb quantitats variants. Per tant, l'afinador de la campana ha de saber exactament les freqüències que canviarà amb la disminució de l'espessor en cada localització.

Materials i fabricació

Les bones campanes estan fetes d'una aleació de bronze que sol constar de quatre parts de coure i una d'estany. Altres components tendeixen a produir un so d'inferior qualitat. El to de la campana depèn també de les seves proporcions d'altura, amplària, grossor i forma. És una complicada mescla d'harmònics, cada un produït per la vibració de diferents parts de l'instrument. Si la afinació d'aquestes parts és inexacta se produeixen dissonàncies quan la campana es toca en conjunt.

Para la fundició d'una campana es construeix un nucli de fang segons el tamany i forma del seu interior. S'aixeca per damunt un armaço de fang i altres materials. La superfície interior d'aquest es correspon amb l'exterior de la campana projectada. Llavors es llença el metall fos (colada) en l'espai entre el nucli i l'armaço. Quan s'ha refredat s'obri el motlle i l'exterior s'allisa i es poleix. La superfície interior es lima per aconseguir el grossor necessari per a la correcta producció dels parcials harmònics.

El so, to pur

El so consisteix en una vibració de l'aire que es propaga en forma de ones de pressió. Quan apareix una pertorbació (vibració d'un objecte) es produeix la variació de la pressió P de l'aire respecte a la pressió d'equilibri (o pressió atmosfèrica), P_0 . Podem pensar que el so es conseqüència de l'aparició d'una pressió incremental que varia en el temps:

$$\text{Presión incremental} = P - P_0 \quad (1.1)$$

Normalment la pressió incremental es molt menor en magnitud que la pressió atmosfèrica, sent aquesta de l'orde de 10^5 Pa (N/m^2).

La pressió incremental corresponent a sons audibles està en el rang $[20 \times 10^{-6}, 20]$ Pa, que es molt menor que la pressió atmosfèrica.

Degut a que el rang de pressió sonora es extraordinàriament ampli, és convenient utilitzar una escala logarítmica per expressar els seus valors. Així, es defineix el nivell de pressió sonora (NPS) com:

$$\text{NPS} = 20 \log_{10} \frac{P_{ef}}{P_{ref}} \text{ (dB)} \quad (1.2)$$

On P_{ef} es el valor eficaç de la pressió sonora y P_{ref} es la pressió de referència, que val 20×10^{-6} Pa. S'ha escollit aquest valor perquè coincideix amb l'umbral d'audició normal para 1 kHz, que implica que un so es pugui percebre quan $\text{NPS} > 0$ dB

Un cas molt important es dona quan les pertorbacions es repeteixen cada cert temps T , es a dir, amb una freqüència $f = 1/T$. En aquest cas, auditivament percebrem la sensació d'un **to**. La pertorbació periòdica mes simple es la sinusoidal:

$$p(t) = P_{\text{máx}} \text{sen}(2\pi f t) \quad (1.3)$$

El so resultant es denomina **to pur**. Tot so pot considerar-se com format per la superposició de tons purs de diverses freqüències.

Quan un so és periòdic de freqüència f , les freqüències dels tons purs que el constitueixen són múltiples de f , y es denominen sons harmònics. Aquest important resultat es coneix com **Teorema de Fourier**, y pot expressar-se matemàticament com:

$$p(t) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \text{sen}(2\pi n f t + \varphi_n) \quad (1.4)$$

On P_n es l'amplitud i φ_n es la fase de cada harmònic

Qualitats del so, els parcials harmònics

Atenent a les qualitats del so, aquest es pot descriure especificant tres característiques: el **to**, la **intensitat** i el **timbre**. Aquestes es corresponen amb les característiques físiques: freqüència, amplitud y composició harmònica o forma d'ona (parcials).

L'amplitud d'una ona de so és el desplaçament màxim respecte a la posició de equilibri. Com mes gran és l'amplitud de l'ona, mes intensament colpegen les molècules el timpà y mes fort es el so percebut. Per tant, la intensitat ens permet parlar de sons forts o dèbils.

El timbre esta definit como la qualitat del so que diferencia als del mateix to i depèn de la forma i naturalesa dels elements que entren en vibració . Per exemple, si es toca una mateixa nota en un violí, un piano i un diapasó, amb la mateixa intensitat en els tres casos, els sons són idèntics en freqüència y amplitud, però molt diferents en timbre. I la definició de to i parcials es veurà a continuació.

A nosaltres el que ens interessa es poder caracteritzar un so, llavors hem d'estudiar la seva resposta en el domini de la freqüència (el seu espectre). Per entendre el concepte de freqüència com to s'ha de saber que un to d'un instrument musical no és una freqüència única, sinó que es un conjunt de freqüències múltiples d'un to fonamental (f_0).

Aquestes freqüències reben el nom de parcials harmònics, es a dir $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$, etc. Quan sentim un to percebem totes les freqüències amb les que està caracteritzat

Si un espectre sols te parcials harmònics es diu que es un espectre harmònic, si no, es diu que és inharmònic.

La freqüència fonamental es el factor físic que mes influeix en la percepció de l'altura d'un so. La percepció de l'altura és logarítmica, així assignem la mateixa nota a freqüències que són duples de l'altra. Aquest fet fa que en la música les altures s'organitzen per **octaves**, que es com es denomina a la distancia entre dues notes del mateix nom les freqüències de les quals són el doble una de l'altra. Per distingir freqüències diferents d'una mateixa nota se les acompanya d'un subíndex que ens indica la octava a la qual pertany. Així, DO₃ indica 'el DO de la tercera octava'. La freqüència del LA₄, es el doble de la del LA₃ i la d'aquesta última es el doble de la del LA₂, pero percebem la mateixa distancia en altura entre elles.

En la música occidental una octava es divideix en 12 notes (semitons) y aquest es el nombre de notes que hi ha des de el LA₂ a LA₃. Mentre que en termes de freqüències des de LA₂ a LA₃ hi ha 220Hz i des de LA₃ a LA₄ hi ha 440Hz. Mentre que un semitò es cada una de las 12 notes en les que es divideix una octava, el to equival a un interval en altura de dos semitons.

Una octava te 12 semitons però sols hi ha 7 noms de notes diferents (DO, RE, MI, FA, SOL, LA, SI). La raó es perquè entre algunes d'aquestes notes consecutives hi ha un semitò, mentre que en la resta dels casos hi ha un to complet. Per això apareixen les alteracions: SOSTINGUT (#) y BEMOLL (b).

Les distàncies entre notes reben el nom d'interval. Si es medeixen en altura, es fa mitjançant el nombre de semitons que hi ha d'una a l'altra. Si es medeix en freqüència, es defineix com la fracció entre les freqüències de la nota aguda i la greu que se estan comparant.

Al medir en intervals el nom de dit interval indica l'ordre de la nota respecte a la mes baixa de les dues notes comparades. La distancia en semitons indica el nombre de semitons que hi ha que pujar o baixar l'altura per anar d'una nota a l'altra. La relació de freqüències expressa la proporció existent entre las freqüències de la nota alta i la de la baixa. Per comprendre aquests termes es mostra la taula següent; en la que es pot comparar les distancies entre semitons amb la seva relació de freqüències, el nom del interval al que pertanyen i a mode d'exemple dos notes que es troben en dits intervals, partint d'una nota DO.

nombre del intervalo	distancia en semitonos	relación de frecs.	ejemplo notas
segunda	2	9 / 8	DO – RE
tercera	4	5 / 4	DO – MI
cuarta	5	4 / 3	DO – FA
quinta	7	3 / 2	DO – SOL
sexta	9	5 / 3	DO – LA
séptima	11	15 / 8	DO – SI
octava	12	2 / 1	DO _N – DO _{N+1}
tercera menor	3	6 / 5	MI – SOL
sexta menor	8	8 / 5	MI _N – DO _{N+1}

I si medim en freqüència, mentre l'altura creix en progressió aritmètica amb raó + 1 semitò, la freqüència ho fa en progressió geomètrica amb una raó de $2^{1/12}$ (=1.059463). Per altra banda, per tenir més precisió en la localització de microtons, es defineixen els **cents** com la divisió de la octava en 1200 altures equidistants. Per calcular quant augmenta la freqüència d'una nota quant s'augmenta en un cent, hem de multiplicar la altura per $2^{1/1200}$ (=1.000578).

Com ens arriba el so de la campana?

Per a comprendre millor el procés mitjançant el qual les vibracions de l'aire es transformen en una informació anomenada 'so', amb sentit i significat per nosaltres (i pels altres animals amb oïda), farem un recorregut similar al que segueixen aquestes vibracions. Estudiarem l'orella, que és on les vibracions de l'aire es transformen en patrons d'impulsos elèctrics que porten codificada informació sobre freqüència i intensitat del so. .

LA ORELLA

Distingim en la orel·la 3 parts: oïda externa, oïda mitjana, i oïda interna.

Oïda externa

La formen el pavelló auditiu i el canal auditiu extern.

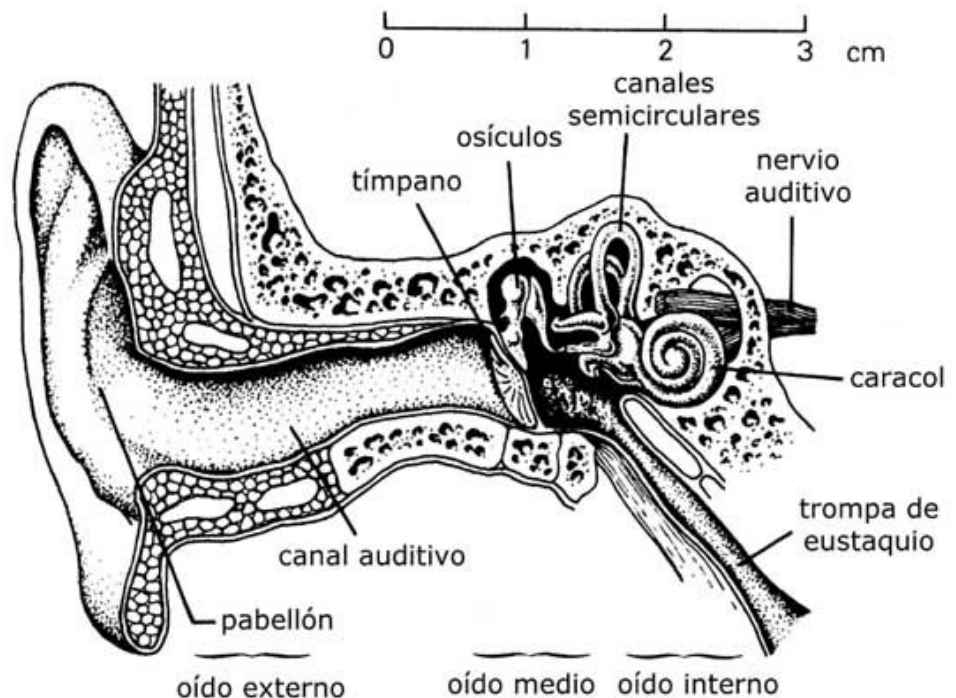
El pavelló auditiu és un cartílag que sobresurt del cap amb la funció de captar les variacions de pressió de l'aire que donen lloc al so. En el pavelló auditiu hi trobem una sèrie de repliegaments irregulars que juguen un paper important a l'hora de localitzar la procedència dels sons. El canal auditiu extern és un conducte de 2.5 centímetres que comunica el món exterior amb les parts internes de l'orella, alhora que les protegeix contra agressions estranyes i canvis bruscos d'humitat i temperatura. Té una freqüència de ressonància d'uns 2.5-3.5 kHz.

En conjunt l'oïda externa fa d'amplificador de les freqüències mitjanes (entre 1.5 kHz i 7 kHz), precisament la banda en la que predomina la major part de l'energia crítica dels estímuls verbals i musicals.

Oïda intermitja

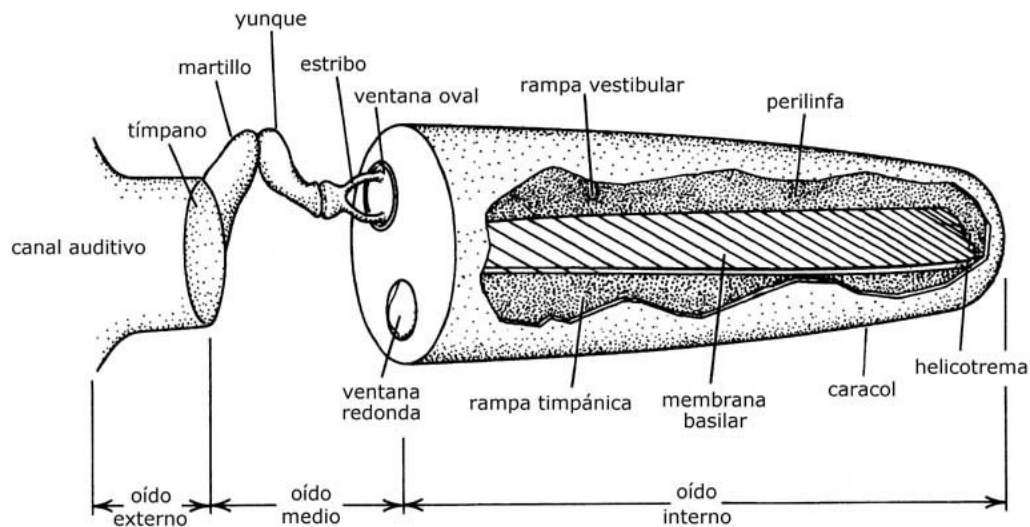
La formen el timpà, que és una membrana cartilaginosa, i una cadena de petits ossos o "ossicles" anomenats martell, enclusa, i estrep (en català i llatí respectivament, martell/malleus, enclusa/incus, estrep/stapes).

La membrana timpànica té forma cònica i està feta de fibres flexibles que li permeten vibrar quan li arriben ones sonores i transmetre la vibració als ossicles. El timpà, quan s'estimula amb vibracions de gran intensitat (a partir de 90 dB -el soroll d'un carrer amb tràfic-) es tensa per mitjà de l'anomenat "reflexe acústic". L'actuació del "reflex



acústic” origina una atenuació de les freqüències més greus del so, la qual cosa l’hem de entendre com un mecanisme de millora de l’audició, ja que amb un alt nivell d’intensitat sonora els greus tendeixen a emascarar les freqüències mitjanes i agudes.

La vibració del timpà es propaga pel martell, l’enclusa, i l’estrep, i al final d’aquesta cadena d’ossicles la força de la vibració ha augmentat uns 30 dBs respecte a l’exercida sobre el timpà. Això es fa necessari perquè a l’orella interna el primer mitjà en el que es transmetrà la vibració sonora és líquid i ofereix molta resistència al moviment (tècnicament diem que l’orella interna té molta “impedància”). O sigui, que la funció de l’orella mitjana es compensar les diferències d’impedància entre el mitjà aeri on es propaga inicialment la vibració, i el mitjà líquid en el que es propagarà a l’orella interna. Abans, però d’entrar en l’orella interna, ens desviarem a la trompa d’Eustaquí, que és un conducte que, des de la part de darrera del timpà, uneix la orella mitjana amb la cavitat nasal. La seva funció és la d’equilibrar la pressió que l’aire exerceix sobre la membrana timpànica per tal que l’equilibri d’impedàncies que comentàvem abans es mantingui (podem observar com quan canviem ràpidament d’altitud, o entrem en un túnel -i per tant sofrim variacions brusques de pressió- la nostra audició es deteriora momentàniament... fins que obrim la boca o ens empassem saliva i sentim el “pop!” que torna a obrir les nostres orelles!).



Oïda interna

L'oïda interna consta, principalment, de la còclea o cargol, que és un òrgan en forma de closca de cargol ple de líquid (endolimfa). Si desenrotllem la còclea observem que és com un tub de 2 'pisos' connectats en un extrem per una obertura (l'helicotrema), mentre que per l'altre hi ha dues membranes: la finestra oval i la finestra rodona. La separació entre els 2 'pisos' està ocupada per la part més important de la còclea: l'òrgan de Corti. L'òrgan de Corti consisteix bàsicament en una sèrie de cèl·lules ciliars (amb terminacions que semblen cabells) que, disposades a sobre de la membrana basilar la cobreixen d'una de punta a punta de la còclea. D'aquestes cèl·lules ciliars parteixen les 15000 fibres que formen cadascun dels dos nervis auditius. Quan l'estrep vibra i colpeja la finestra oval, es produeix una ona de pressió en el líquid de la còclea. Segons la freqüència del so que estigui arribant, el fluid es mourà amb un determinat patró d'oscil·lació, que també farà moure la membrana basilar. En el punt on el desplaçament en sentit vertical de la membrana sigui més gran, les cèl·lules ciliars seran excitades, i enviaran impulsos cap el nervi auditiu. Aquests impulsos porten codificada de dues

maneres la informació sobre la freqüència del so: segons les cèl·lules excitades (punt d'excitació), i segons la taxa o periodicitat amb la que s'envien els impulsos (freqüència)

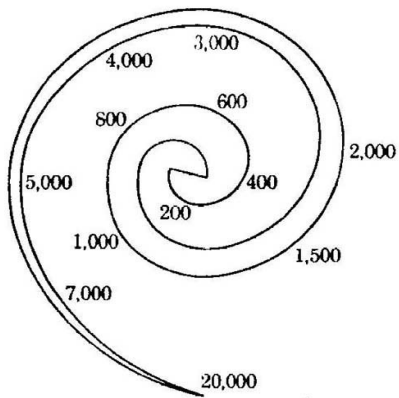


Figura 2. Localització dels detectors de freqüència a la còclea

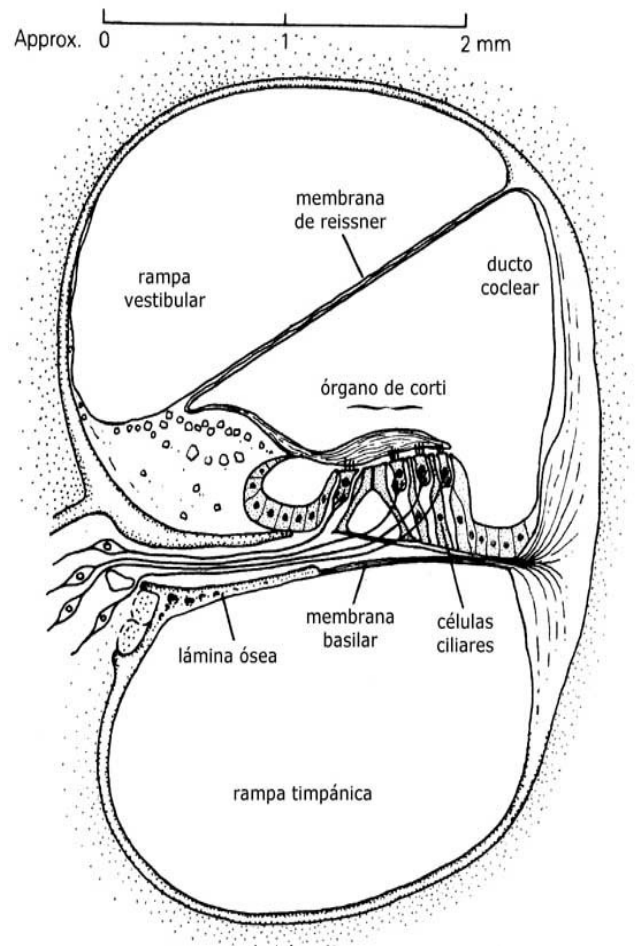
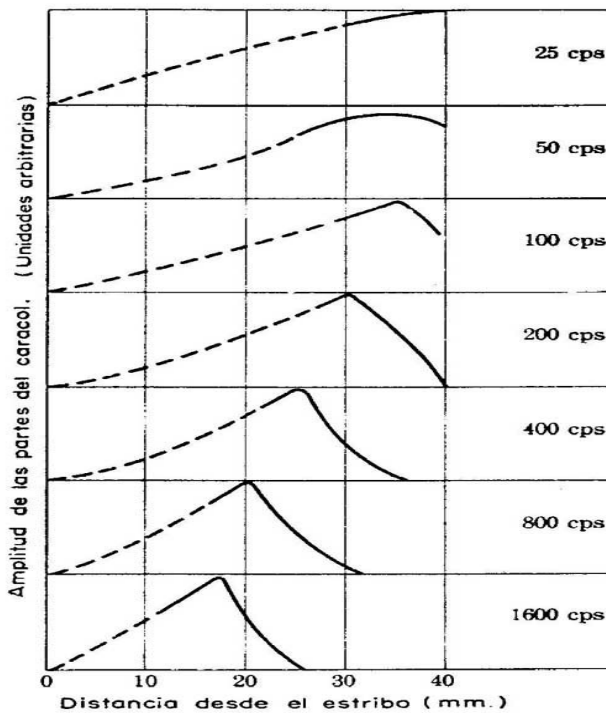


Figura 3 (dreta). Secció transversal de la còclea i detall de l'òrgan de Corti.

Figura 4 (esquerra). Diferents freqüències (cps=cicles per segon=Hz) incideixen en diferents llocs de la còclea (aquí es presenta estirada longitudinalment. L'emascarament s'origina aquí.

Afinament d'una campana

Recordem que una campana és un instrument musical de percussió i nota determinada. El so de la campana l'origina la vibració de la seva massa, produïda per l'energia de l'impacte del batall o martell. Acceptant que la campana és, a més d'una peça de bronze, un instrument musical, cal que el seu so sigui el desitjat i el produït pel resultat de diverses notes harmòniques entre si. Aquest és un dels factors bàsics per la seva qualitat. La dosificació i intensitat d'aquestes notes conformen el timbre d'un instrument, d'una veu... d'una campana.

L'afinament de la campana

L'afinament consisteix a retirar material de la seva superfície interior i d'uns llocs concrets. Aquesta intervenció en el repartiment de la massa és un procés de la seva distribució racional per fer coincidir els diferents modes de vibració amb determinats harmònics de l'escala musical. De la precisió d'aquesta intervenció dependrà la seva qualitat global i definitiva. Cal destacar que per aquesta operació, calen mitjans tècnics (diapasons, torns...) i una gran experiència, tota vegada que l'operació a la inversa (afegir material) no és practicable.

Com produeixen les campanes el seu so?

Com produeix una campana el seu so es un tema complex però interessant. Aquí ens restringirem a les campanes de perfil "occidental" típic, i no entrarem a analitzar les campanes del est que puguin tenir una forma molt diversa. Les campanes occidentals generalment son colpejades per un batall de ferro en un punt en el interior, prop del fons, o per un martell de ferro en un punt equivalent en l'exterior. Aquest impacte fa vibrar la campana d'un nombre divers de maneres o modes. Cada mode pot tenir un divers espectre de freqüències, d'intensitat, "attack" i temps de davallada, i es pot caracteritzar pels punts o els nodes "immòbils", ambdós al voltant del contorn, i verticalment dalt de la campana.

En instruments amb cordes vibrants o columnes que vibren amb aire (pianos, guitarres, flautes, trompetes, òrgans etc.) les freqüències dels varis modes o la vibració son relacionades aproximadament per quocients aritmètics simples. Això significa que els varis modes de vibració estan "en consonància". També, el so es sosté mes o menys, cosa que facilita el seu estudi. Tan en les campanes, com en gongs i tambors, la forma única significa que les varies freqüències de la vibració no estan relacionades automàticament en quocients simples. Per altra banda, el impacte de la pesada "xapaleta" i la decaiguda ràpida de alguns dels parcials significa que la mesura i la investigació no son fàcils en el cas de les campanes.

Les campanes occidentals assumiren algo semblant a la seva actual forma fa aproximadament 1000 anys. Des de llavors, els fonedors de campanes han procurat produir una forma "millor" a traves d'un procés d'experimentació i desenvolupament. Les formes reals utilitzades son un compromís entre la qualitat de so o el timbre de la campana (que son influenciats per la seva forma o perfil), facilitat del bastidor, i altres característiques tals com el pes i les dimensions bàsiques. La historia de la millora dels sons de la campana inclou períodes de progrés (per exemple, Hemony en el s.XVII,

varis fonedors anglesos en els finals del segle XIX/ principis del s.XX, y al vigèsim segle com a resultat de la investigació detallada). En altres moments de la història, quan els factors econòmics i de la producció han resultat propicis, el progrés s'ha estancat e inclús ha invertit. Inclús avui, no hi ha una fórmula para el perfil de una campana que garantitze els millors resultats para tots els propòsits.

Una campana que vibra produeix moltes freqüències del so, cada una produïda per un dels diversos modes vibratoris de la campana. Un cop s'ha fabricat una campana, les freqüències parcials són “templades” traient metall en els anells anulars, generalment del interior. De fet, generalment no es possible temprar un sol parcial en una campana. L'habilitat dels fonedors és necessària per posar exactament en consonància els parcials entre ells mateixos, i la campana en consonància amb les altres, perquè treure el metall a partir d'un lloc dintre de la campana afecta a més d'una parcial, segons va explicar Lehr en els seus treballs.

La base per aconseguir temprar en “verdadera-harmònia” segons el descrit per Canon Simpson en els seus papers, és que els cinc parcials més baixos (Hum “ronquit”, prime, tierce, quint i el nominal) es tenen que relacionar com intervals musicals simples. Aquest era un redescobriment del coneixement obtingut pels fonedors de campanes anomenat “la regla del pulgar”. Hemony, que va treballar en el s.XVII, podia medir i afinar els parcials a dintre de 3 cents i aconseguir afinaments similars als principis de “verdadera-harmònia”. Algunes campanes continentals a partir del s.XIX són ja “verdadero-harmòniques”. No obstant, en el Regne Unit fins el final del s.XIX la tònica era produir campanes que no seguien el concepte de “verdadera-harmonia” (sinó del “vell estil”). Las tècniques de la mesura de la freqüència desenvolupades per Rayleigh i Helmholtz varen permetre que la base del afinament “verdadero-harmònic” s'entengués correctament. Els Taylors, degut les seves visites al continent i una sèrie de experiments, van ser els primers fonedors britànics en adoptar la pràctica continental de afinar en “verdadera-harmònia” i deixa el “vell estil”.

Encara que el so de la campana pot contenir molts parcials, la impressió total en la oïda molts cops pot ser la de un sol “to” (pitch). Aquesta freqüència (strike-note (nota de cop)) no apareix sovint en la llista de parcials. Tot seguit veurem que determina el “to” d'una campana

Las freqüències dels parcials són determinats generalment amb diapasons, un generador de freqüència o discos estroboscòpics – avui en dia, s'utilitza un analitzador de espectre de la freqüència àudio,. Wavanal proporciona una manera fàcil para que qualsevol persona amb un PC multimèdia pugui realitzar les investigacions per ell mateix.

Parcials per a les campanes típiques

Els intervals teòrics para els cinc parcials més baixos estan com s'indica tot seguit. Els intervals entre els diversos parcials es donen en cents respecte al nominal.

Parcial	Interval	Interval en cents
Hum	Dues octaves baix del nominal	-2400
Prima	Una octava baix del nominal	-1200
Tierce	Una tercera menor sobre la prima	-900
Quint	Una quinta perfecta sobre la prima	-500
Nominal	-	0

Per donar un exemple sobre l'afinació de les campanes i com són afinades, comparem els parcials de dues campanes (Taylor-1980 i Mears 1859) afinades de maneres diferents.

Taylor		Mears		
Freq.	Cents	Freq.	Cents	Nom
292.8	-2400	176.6	-2232	Hum
586.1	-1199	322.0	-1192	Prima
693.0	-909	390.2	-859	Tierce
882.1	-491	519.8	-363	Quint
1171.4	0	640.9	0	Nominal
1560.4	496	839.6	468	-
-	-	867.8	525	-
-	-	882.0	553	-
1764.2	709	949.0	680	Superquint
1949.7	882	-	-	-
-	-	1097.4	931	-
2158.6	1058	-	-	-
-	-	1264.2	1176	-
2441.4	1271	1302.4	1228	Nominal de la octava
2619.2	1393	1585.6	1568	-
3184.6	1731	1690.9	1680	-
3403.6	1847	-	-	-

-	-	2110.2	2063	-
3982.3	2118	-	-	-
4130.1	2182	-	-	-
-	-	2486.3	2347	-
-	-	2552.2	2392	-
4815.6	2447	2604.6	2427	-
5300.6	2614	-	-	-
-	-	2984.0	2663	-
-	-	3009.5	2678	-
-	-	3380.0	2879	-

Mentre que la discrepància màxima dels valors teòrics para la campana de Taylor es de 9 cents, que està dintre de la tolerància d'afinament normal per a una campana d'església (aprox. 10 cents). La campana de Mears demostra com era el "vell estil"; on el hum es sostingut (en aquest cas a dures penes prop de 1.5 semitons), una prima que està propera, un tierce que es mes agut que una tercera menor, i un quint que esta una mica fora del teòric. Finalment, observa els molts parcials para ambdues campanes. Una oïda musical pot sentir probablement varis dels cinc parcials més baixos d'una campana, especialment el hum, tierce i la prima que molt sovint duren una estona (alguns segons) després de colpejar la campana.

Gravacions de les dues campanes:



Arxiu: Taylorlr.wav



Arxiu: Mearslr.wav

Mode	Names of partials	Note name	Ratio to prime (or strike note)		
			Ideal (just)	Equal temperament	Bell in Fig. 21.4
(2,0)	Hum	D ₄	0.500	0.500	0.500
(2,1 [♯])	Prime, fundamental	D ₅	1.000	1.000	1.000
(3,1)	Tierce, minor third	F ₅	1.200	1.189	1.183
(3,1 [♯])	Quint, fifth	A ₅	1.500	1.498	1.506
(4,1)	Nominal, octave	D ₆	2.000	2.000	2.000
(4,1 [♯])	Major third, deciem	F ₆	2.500	2.520	2.514
(2,2)	Fourth, undeciem	C ₆	2.667	2.670	2.662
(5,1)	Twelfth, duodeciem	A ₆	3.000	2.997	3.011
(6,1)	Upper octave, double octave	D ₇	4.000	4.000	4.166
(7,1)	Upper fourth, undeciem	G ₇	5.333	5.339	5.433
(8,1)	Upper sixth	B ₇	6.667	6.727	6.796
(9,1)	Triple octave	D ₈	8.000	8.000	8.215

* Rossing and Perrin, 1987.

Noms i freqüències relatives dels parcials importants d'una campana afinada

Més enlla del afinament en “verdadera-harmònia”

A part de la qualitat o el timbre d’una campana i de les freqüències dels cinc parcials més baixos. El afinament dels altres parcials, i les intensitats dels parcials, poden tenir un efecte crític en la qualitat d’una campana. Hi ha dos punts pertanyents al desenvolupament històric del afinament de la campana que m’agradaria nombrar:.

En primer lloc, les tècniques de la mesura de la freqüència disponibles a finals del s.XIX (que encara son usades actualment en l’afinament d’algunes campanes) són solament pràctiques para els parcials que duren per un temps considerable (varius segons) després de que s’hagi fet sonar la campana. Els parcials amb una vida curta seran difícils de medir, tot i que un analitzador d’espectre (Wavanal) amb un ús curós pot fer-ho. Els parcials de breu durada, d’alta freqüència poden afectar perceptiblement el so d’una campana.

En segon lloc, Simpson va assumir basant-se en la seva experiència que una campana sona en consonància amb ella mateixa si les freqüències parcials es relacionen com intervals simples - octaves, quintes, terceres etc. Això no te perquè ser així. Mentre tals intervals simples tocats en un instrument musical sonen harmoniosos, i intervals com segones, o quartes augmentades, o sèptimes sonen discordants.

Helmholtz fou el primer en mostrar que l’harmonia d’un interval depèn en els parcials superiors dels tons que interfereixen. Cada pàrcial de la campana és un to pur i no té parcials superiors a interferir. Els intervals entre tons que podrien sonar desagradables tocats com a notes de piano no “desentonen” si els tons son purs.

Aquí va un exemple sobre això mateix. Ambos arxius de so són de dos tons augmentats una quarta – generalment conegut per ser un interval discordant. El primer conte solament els dos tons purs, el segon tons amb una estructura harmònica rica. Jutgeu vosaltres mateixos



Arxiu tritons purs tritonspurs.wav



Arxiu tritons amb harmònics tritonsambharmonics.wav

El “Pitch” (timbre) de les campanes

Les campanes són instruments musicals, i s’assigna una nota sobre una escala musical que les identifiqui, i que s’utilitza per a jutjar si una campana està “en consonància” amb altres en un carilló. Quan se’ns demana la nota que està tocant una campana d’església, la majoria de la gent escull una nota una octava per baix del parcial nominal de la campana. Molt sovint això no coincideix amb cap parcial de la campana, tot i que per casualitat coincideix que es la mateixa nota que la prima, si la prima s’afina una octava baix del nominal. El primer en observar aquest efecte en un context científic fou Rayleigh en el seu article de 1890 però fins fa poc temps no s’ha explicat.

Arribats a aquest punt es convenient una definició formal del “pitch”, per ajudar a la discussió i al mesurament. **El “pitch” d’un so es pot definir com la freqüència d’un to pur que no soni ni més alt ni més baix que el so.** El “pitch” és un artefacte del sistema d’audició humà i la percepció del “pitch” té complexitats inesperades. Inclús amb un to pur, el “pitch” depèn lleument de la intensitat del so que estem escoltant. Els sons amb freqüències parcials múltiples, especialment si no es relacionen harmònicament, es poden sentir de dues maneres diferents per diversos oients diferents, o pel mateix oient segons diverses circumstàncies. Si el “pitch” percebut per l’oient correspon a una freqüència propera a una parcial, s’anomena “pitch”.espectral Aquest tipus de audició és comú si el so consta d’un parcial dominant, o si l’oient és un músic entrenat, o si l’oient es concentra en l’estructura parcial del so. No obstant, el “pitch” que sentim no és (freqüentment) el d’un parcial constitutiu, sinó que és una síntesis del nombre de parcials. Aquest efecte, anomenat “pitch” virtual, és molt important - és el mode més comú que percebem al “pitch”.

Quan els parcials en un so estan harmònicament relacionats, però amb el primer membre de la sèrie desaparegut (per exemple, un so amb parcials en 500Hz, 750Hz, 1000Hz, 1250Hz etc.) un “pitch” virtual es pot escoltar en 250Hz - el fonamental que falta-. Quan els parcials no estan exactament en harmonia, el “pitch” virtual encara es sent quasi en el mateix lloc, però la freqüència exacta resulta ser determinada absolutament d’una manera complicada a partir de les freqüències dels parcials individuals. Encara no es coneix ninguna regla per determinar on es troba exactament el “pitch” virtual. El “pitch” virtual s’ha investigat extensament, i s’ha demostrat que no es pot explicar d’una manera simple tal com la diferencia dels tons, però sí que podríem dir que és d’alguna manera un efecte secundari del mecanisme d’audició humà. No hi ha dubte que la “strike note” d’una campana es un “pitch” virtual, com serà explicat després. Els efectes virtuals del “pitch” dominant enmascaren molt sovint els “pitches” espectrals - per exemple, en les campanes la “nota de cop” és sobre una octava per davall del nominal tot i que el tierce, sols una tercera menor per davall, sigui molt fort.

Les freqüències dels parcials presents en els sons es poden medir amb instruments científics, els analitzadors d’espectre o el Wavanal. Els “pitches” no es poden medir amb els instruments, ells existeixen solament en la nostra percepció del so. Únicament un oient humà pot dir-nos el “pitch” d’un so- i diversos oients no forçosament coincidiran en la seva opinió sobre la percepció d’aquest “pitch”.

El “pitch” virtual i la “strike note”

Una bona descripció dels efectes virtuals del “pitch” i una certa investigació recent la podem trobar en els articles de Julyan Cartwright. Els articles de Meyer i Klaes, Artes, i Shouten i t'Hart apliquen els principis virtuals del “pitch” en el cas de les campanes. No obstant, la primera prova concloent de que la “nota de cop” és un efecte virtual del “pitch” fou donada per alguns experiments de Terhardt i Seewann a principis dels anys 80. En el seu article, comparen els resultats de tests d'escolta que es realitzaren en 137 campanes amb un algoritme per determinar el “pitch” basat en la teoria del “pitch” virtual. La correspondència és bona, tot i que Terhardt i Seewan conclouen que mesures acurades (mes o menys de 15 cents) del pitch no són possibles amb els seus mètodes.

En un article publicat poc després del treball de Terhardt, Eggen i Houtsma divulgaren algunes mesures cuidadoses sobre l'efecte que proporciona l'afinament dels parcials d'una campana en el “pitch” d'aquesta. Els seus resultats demostren que el pitch d'una campana, o la “nota de cop” d'una campana es determinada sobretot pel nominal, el superquint i la octava nominal, i solsament en un grau molt petit per els altres parcials més baixos (hum, prime, tierce i quint). El nominal, el superquint i la octava nominal són el segon, tercer, i el quart membres d'una sèrie harmònica aproximada basada en la “strike note” (que falta). Els seus resultats demostren que para un nominal donat, com més agudes siguin els parcials superiors, el “pitch” serà més agut, i com més greus siguin les parcials superiors, el pitch més greu serà. (Aquest resultat només és correcte per a campanes normals. Para les campanes petites, el “pitch” es determinat pel hum. Mentre que per a les campanes grans el pitch es determinat pels parcials més amunt que el nominal)

Era universalment assumit entre els fabricants i afinadors de campanes que la “strike note” d'una campana és una octava per baix del nominal. Admetre que la “strike note” es pot veure afectada per els altres parcials era contraintuitiu. Per provar que aquest és el cas, dintre d'un article recent sobre les “strike notes”, es va donar dos exemples extrets del repic de campanes en el Regne Unit on, qualsevol persona amb oïda musical, podia sentir que “la nota de cop” provenia clarament de la meitat del nominal . L'efecte és absolutament comú un cop que un aprèn a escoltar-lo. .

Una pregunta que encara no s'ha respòs és per què ha de ser el nominal, el superquint, i l'octava nominal, més que qualsevol altre dels parcials, qui determinen la “strike note”. La resposta consta de dos components. Primer, els tres parcials s'aproximen a una sèrie harmònica en les campanes de tamany normal. No obstant, altres conjunts de parcials en una campana també s'aproximen a una sèrie harmònica. L' explicació de la importància del nominal respon al fet que l'oïda no respon de la mateixa manera als parcials de diferents freqüències. Les freqüències emmarcades dintre d'una gama de 500Hz a 1500Hz son accentuades per la construcció física del so que fa la oïda humana, per tant els parcials que estan en aquesta gama tenen preferència per la determinació del “pitch”. Els diagrames espectrals de campanes amb la intensitat de cada freqüència dibuixats per les corbes de Fletcher-Munson ens mostren immediatament quins parcials contribueixen majoritàriament al “pitch”

Efectes pràctics del “pitch” virtual

Si totes les campanes tinguessin el nominal, el superquint, l'octava nominal, etc. .espaïat entre els mateixos quocients, els efectes virtuals del “pitch” serien solsment de interès acadèmic. El “pitch” de totes les campanes serien retocats de lloc de manera igual i totes les campanes estarien en consonància les unes amb les altres, de manera que els seus nominals estaran en consonància. L'única ocasió en que notariem l'efecte virtual del “pitch” seria quan les campanes sonessin conjuntament amb altres instruments musicals; cosa no molt habitual.

Però assumir l'igual espaïament dels parcials superiors dista una mica de la realitat. Campanes de diversos fonadors, del mateix fonador en diverses dates, i particularment, de un sol fonador en diversos llocs del “peal”, poden tenir diversos intervals entre els parcials superiors. En “peals” de vuit o més és molt comú per a les campanes més petites que siguin motllejades a perfils diversos. Això fa que s'aproximen els parcials superiors i fa que les campanes més petites sonin proporcionalment més “planes”. El primer lloc on vaig trobar els efectes virtuals del pitch, molt abans de poder-lo explicar, va ser en vells “peals” de campanes que havien estat “re-afinats” per tenir els nominals “correctes”, aquestes molt sovint tenien tiples que sonaven “plans”. De fet, els “peals” de vuit campanes del s.XIX (o anteriors) comunment tenen els nominals “aplanats” per compensar la seva agudesas del pitch virtual; això s'anomena “stretch tuning” (afinament estirat)

Un cop que el principi d'afinar en “verdadera-harmònia” va ser establert en les fundicions britàniques, la pràctica del “stretch tuning” finalitza. No obstant, als principis dels anys 50 la fundició Taylor comença a utilitzar el “stretch tuning” altre cop. També les campanes de Whitechapel de mitjans del s.XX.

Freqüències de les “strike notes”

El exemple més llamatiu del “pitch” virtual es el “cop secundari” de les campanes grans. La freqüència molt més baixa dels diferents parcials porta un conjunt diferent a la zona de èmfasis, que tal i com hem explicat abans es troba entre freqüències de 500Hz a 1500Hz. Això permet que una sèrie distinta i més alta de parcials creï una “pitch” virtual, sovint una tercera major o una quarta sobre la “nota de cop” derivada del nominal. La forma en que es realitza la fundició i el perfil de les campanes en el UK sembla produir un cop secundari una quarta per sobre de la “strike note” primària derivada del nominal. Alguns fonadors continentals produeixen campanes amb un cop secundari una tercera major per sobre (d'aquestes campanes parlarem al final del treball), que fa que sonin de manera molt més agradable . Com exemple pràctic, el Big Ben té el nominal al voltant de 335Hz que en la notació musical seria una E + 27 cents. Realment, la nota dominant que sentim en aquesta campana és un cop secundari que ronda els 440Hz, és a dir, una A, basada en un parcial sobre la octava nominal amb una freqüència de 883Hz.

Un altre exemple, escoltem aquesta gravació de [Great Bede](#) en Downside Abbey (Taylor, 1900). Aquí hi han dos strike notes separades una quarta; [strike note greu](#) i [strike note aguda](#). Aquesta campana no té res inusual en la seva estructura de parcials.

No obstant, la strike note més baixa (basada en el nominal) quasi està fora de la finestra de freqüències suggerida anteriorment, i l'orella ens proporciona un segon “fonamental perdut” basat en un parcial fort situat una quarta sobre el nominal. La llista completa de freqüències parcials més baixes de Great Bede en hertz es 102.5 (hum), 205.5 (prima), 246 (tierce), 306 (quint), 349.5, 409.5 (nominal), 539, 609, 672.5, i 836 (octava nominal), i les dos “strike notes” son 204.8 (meitat del nominal) y 269.5 (meitat de 539). Per un anàlisis detallat de campanes amb “cop secundari” suggerim veure les descripcions de [Great Paul](#)

Arxius associats:



Grtbede.wav



Bede1.wav



Bede2.wav

En l'altre extrem, en campanes molt petites, per exemple les que s'utilitzen en carillons, l'oïda selecciona el hum (I.e. aproximadament dues octaves per baix del nominal) com la “strike note”. Aquí adjuntem una campana petita del carilló: [Carillón](#) i aquí el seu [strike pitch](#). La llista completa de freqüències parcials més baixes de esta campana es 839.5 (hum), 1683.0 (prima), 2008.5 (tierce), 3376.5 (nominal), y 5029.5 (superquint) i el strike pitch es 839.5 Hz. La caiguda del strike pitch de la meitat del nominal al hum en campanes petites causa algunes dificultats als dissenyadors de carillons en decidir quin serà el punt de trencament.



Carillon.wav



carillon2.wav

Els dos arxius respectivament són:

Petit experiment

Anem a fer un simple experiment per veure com la nota de cop d'una campana és generada per la presència de varis parcials.

Ara veurem com sorgeix la percepció del “pitch” de la campana. Ho podrem escoltar nosaltres mateixos..

Resumint, el que sentirem serà:

- 1) La “strike note” de la majoria de les campanes és una octava per baix del nominal (mes degut a raons de l'orella humana que a raons de la campana)
- 2) És necessari que la campana tingui tierce y/o hum audibles para que la “strike note” aparegui, però la freqüència d'aquests parcials més baixos no afecta el “pitch” de la nota de cop.

En aquest experiment, un conjunt de matisos d'una campana “harmònica no-verdadera” (campana Mears) s'utilitzen para crear un nombre de sons “com de campana”. La diferència entre els sons és que alguns matisos s'han omès de la mescla. Tots els matisos exclouen la prima - de manera que no hi hagi parcial en/ o prop del “pitch” esperat de la nota de cop – tot i així però el “strike pitch” es pot escoltar clarament en alguns dels casos. També es proporciona un arxiu de so que conté sols el “strike pitch” amb propòsit de poder comparar. Els detalls dels arxius amb els matisos i el so estan en la taula següent. Que aparegui * en una caixa indica que el parcial és present en el arxiu de so. Els resultats de l'autor (és a dir, si una nota de cop és evident) es donen en l'última fila de la taula. Recordem que la teva opinió pot discrepar de la de l'autor.

freq.	Parcial	file1	file2	file3	file4	file5	file6	file7	file8	file9	file10	file11	cop
176.6	Hum	*					*	*	*	*	*	*	
390.2	Tierce	*	*					*	*	*	*		
640.9	Nominal	*	*	*					*	*	*	*	
949.0	Superquint	*	*	*	*					*	*	*	
1302.4	Oct nom	*	*	*	*	*					*	*	
1690.9		*	*	*	*	*						*	
2110.2		*	*	*	*	*						*	
2604.6		*	*	*	*	*						*	
3380.0		*	*	*	*	*						*	
320.5	strike												*
¿strike note?		sí	sí	no	No	No	no	no	sí	sí	sí	Potser	

Algunes instruccions per realitzar l'experiment. Escolteu la strike note per a familiaritzar l'oïda amb el “pitch” que es detectarà, i després jugueu en varis arxius de so per decidir si sona el “strike pitch”. Un altra manera de conduir l'experiment és escoltar cada arxiu i ràpidament, sense pensar en els parcials que apareixen i aquestes coses, canta la altura que acabes de escoltar, i després compara amb el “strike”. Aquest

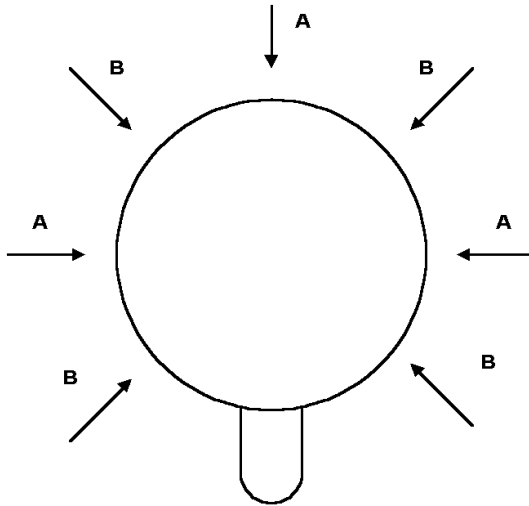
segon mètode potser és més objectiu si deixes passar una estona entre cada assaig per permetre oblidar quin “pitch” esperes escoltar.

L' anàlisis dels arxius de so amb un analitzador d'espectre com el Wavanal t'ha de convence de que ningun d'ells (excepte l'arxiu strike) conte un parcial en 320.5 Hz.

Els resultats del autor en la taula anteriorment dita indiquen que, para que una “strike note” amb una freqüència de la meitat del nominal sigui escoltada, el nominal ha de ser present, i el tierce o el hum, preferiblement ambdós. (De fet la prima també ajuda a una part de la producció de la “strike note”, però la varem ometre del experiment para assegurar-se de que ningun parcial físic existís a una freqüència rellevant.) Els parcials més alts agreguen claredat al so però no afecten al “pitch” que sentim. El nominal defineix el “strike pitch”, apareixent com el primer harmònic del “fonamental perdut”. Tot i això, els parcials més baixos (el hum i el tierce) són necessaris “per conduir l'oïda avall” per esperar un fonamental més baix.

Doblets en campanes

Les campanes poden no ser simètriques sobre el seu eix vertical. Això dona lloc al fenomen de doblets. Un doblet és un mode de vibració que sona a dos freqüències (generalment properes) en compte d'una. La demostració més fàcil d'això es pot fer utilitzant solament una taça i una cullereta..



Una taça no és simètrica – té una ança en un costat. Si piquem la vora de la taça en els punts marcats amb una A en el diagrama, produïrem una nota de cop més baixa que si piquem en els marcats amb una B. Això es deu a que un dels modes principals de vibració de la taça, que té 4 nodes (punts immòbils) al voltant de la vora, i 4 antinodes (on la vora vibra endintre i afora radialment). Quan l'ança està en un antinode, augmenta la massa que vibra, i per tant baixa la freqüència. Si piquem a altres punts intermitjos entre el 'A' i el 'B' les dues notes es senten juntes.

Si es senten dos tons purs relativament propers en freqüència , es senten batecs - fluctuacions regulars en la intensitat. El nombre de fluctuacions per segon es igual a la diferència de les freqüències entre els dos tons. Per exemple, el següent arxiu de so conte dos tons amb freqüències 440 Hz y 445 Hz – heu de sentir una fluctuació cinc cops per segon.



[Batecs](#) Batecs.wav

Si una campana no és redona, és altament inversemblant que la “xapaleta” estigui pican en el punt A o el punt B en el diagrama de dalt. Per tant, ambdues freqüències de so parcial poden sonar, i si el parcial és un dels importants, els batecs es podran sentir, i donaran un so com medieval a la campana. Aquí adjuntem dos versions d'una campana, una amb parcials purs i una altra amb doblets en el prime i el nominal:



[Parcials purs](#) Parcials purs.wav



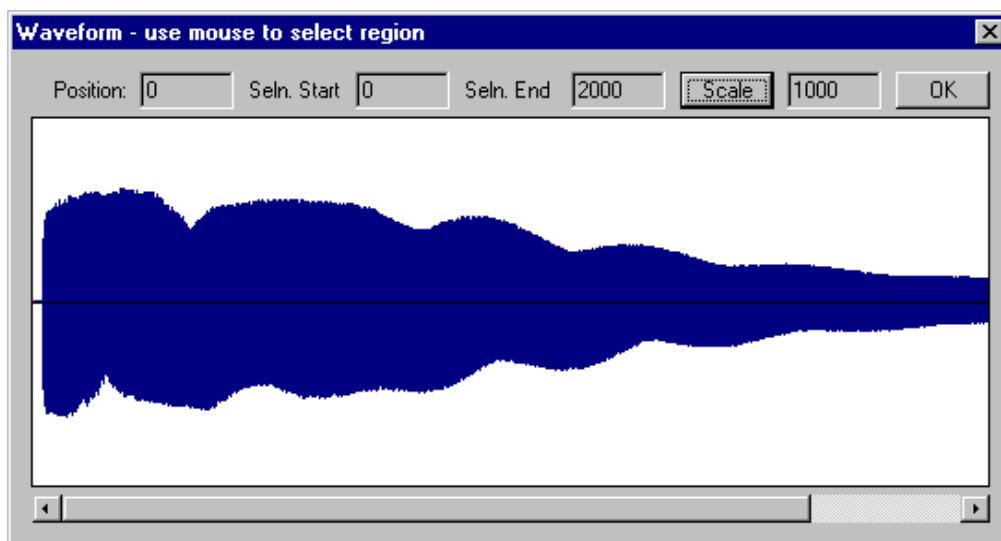
[Prima i nominal doblats](#)

Doblets.prime.nominal.wav

Crear una campana perfectament redona, sense doblats significatius, requereix una habilitat considerable del fonedor i del afinador.

Durada del so de la campana

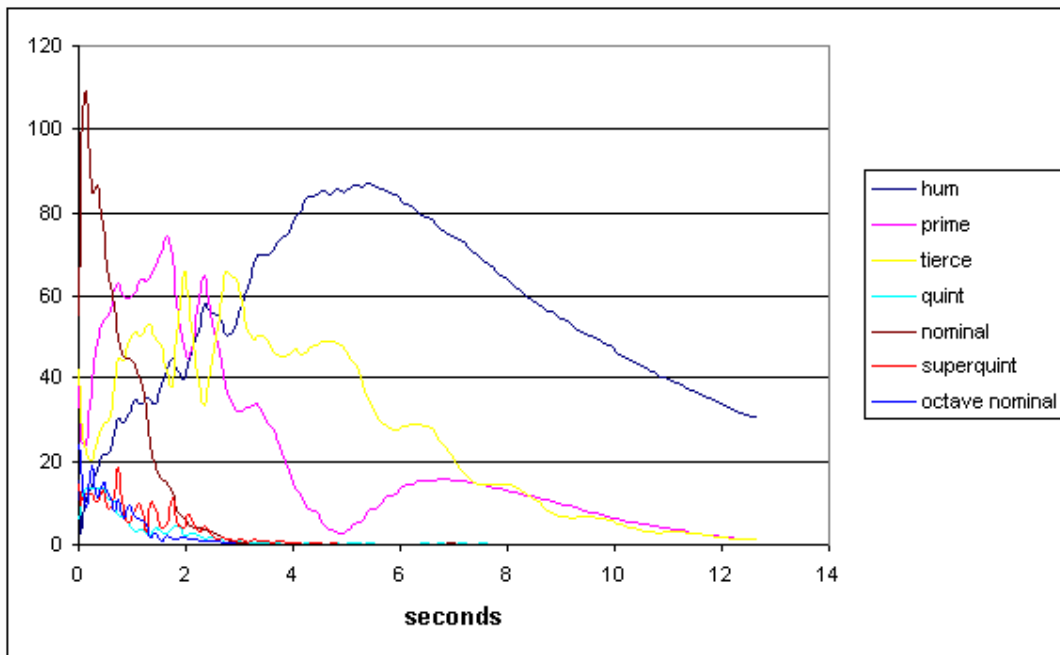
El so que una inicialment produeix una campana és ruidós, i decau al cap d'un temps. Aquí està la [campana](#) utilitzada per Perrin y Charnley en la seva investigació. La campana era picada de manera apacible pel batall i després se li permetia vibrar lliurement.



Arxiu: Campana.wav

Aquí es mostren aproximadament 12 segons de so. La ondulació és causada pels doblats.

Apart dels batecs produïts pels doblats, el so decau constantment des del màxim fins el silenci. Però quan mirem la variació en un cert període de temps dels parcials de manera individual, un quadre totalment nou emergeix. En el següent gràfic estan les amplituds de alguns dels parcials principals d'aquesta gravació traçada contra el temps.



Els parcials demostren comportaments marcadament diferents. El hum comença amb intensitat reduïda, i té un pic variu segons abans de començar a baixar un altre cop. El prime comença a una alta amplitud, baixa una mica, es torna aixecar i baixa lluny i lentament, amb alguns daltabaixos en la forma. Aquest parcial es un doblet, amb un espaïament d'un Hz. El tierce demostra un perfil similar al prime, però decau un poc més lent. El nominal cau de manera extremadament ràpida des d'una intensitat alta inicial. El anàlisis dels altres parcials es més dur de considerar degut a la seva intensitat més reduïda, però traçat a una escala diferent demostraria altres diferències de comportament.

Quan un batall colpeja una campana l'efecte és dramàtic e immediat. Molts modes de vibració s'estimulen, alguns d'ells molt breument. L'energia passa entre els diferents modes de vibració, alguns augmenten l'amplitud, altres la disminueixen. Després d'una estona, la campana s'acomoda a un mode de vibració més aposentat amb parcials que moren mes lluny i mes lentament. L'efecte és similar a llançar una pedra dintre d'un toll - una esquixada gran, seguida per l'ondulació que es mante en la superfície de l'aigua per una estona. El so d'una campana es pot dividir en "l'esquixada", la irrupció principal forta i sonora mentre el batall colpeja i poc després, i la "cua", mentre la intensitat dels parcials baixa lentament a zero.

No hi ha millor manera de mostrar-ho que jugant amb el so d'una campana invertit- tal com mostraren en el seu temps en un programa de radio Albert Hughes, el programa era sobre la fabrica - fundició de campanes de Whitechapel. Aquí està el arxiu [taylor.wav](#) al revés. El so de la campana creix lentament, sonant més i més brillant (causat perquè l'amplitud dels parcials de alta freqüència augmenten) fins que acaba en una breu raspat..

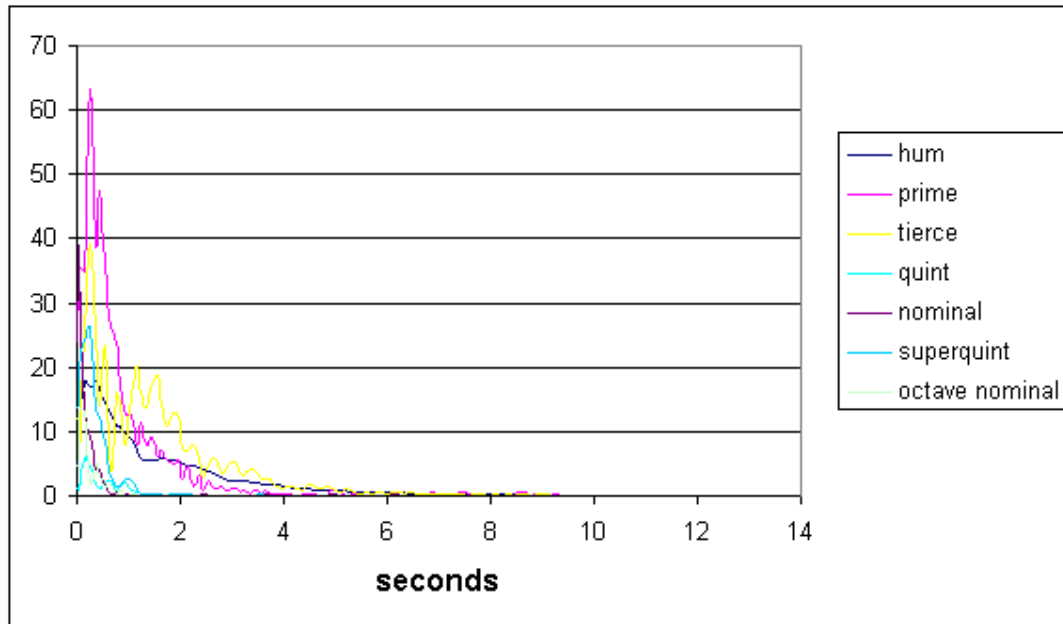


[Taylor al revés](#) [taylorreves.wav](#)

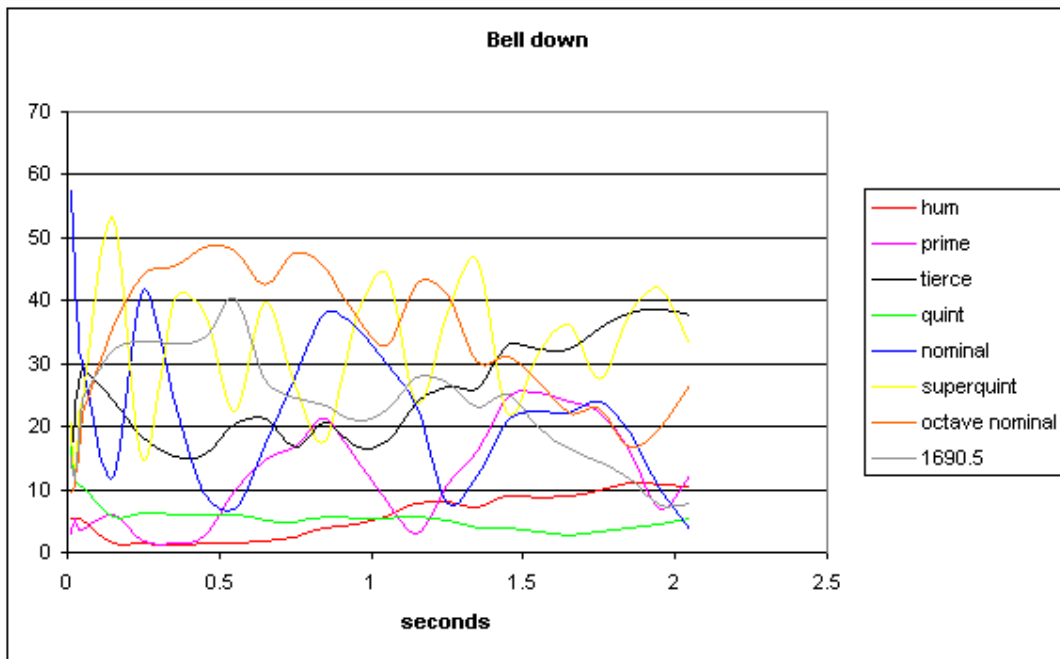
El moment en el qual els parcials decauen és diferent per a cada campana. Els fonadors suggereixen que les campanes sense tallar o virginals, i les campanes amb una composició metàl·lica pobre, tindran parcials que decaiguin més ràpidament, produint un so més mort. Aquí està una [campana de la fundició de York](#), moletejada prop del 1500. Nota com tots els parcials moren ràpidament, donant un so molt més sec comparat amb la campana anterior.



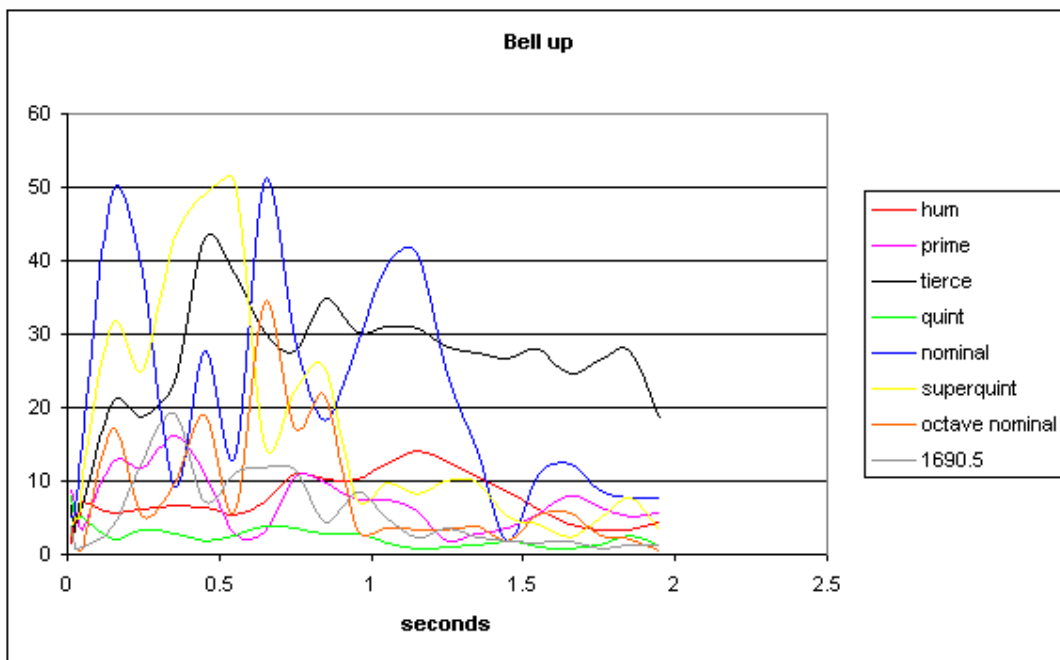
Arxiu: York.wav



Quan la campana dona voltes completes, el batall colpeja la campana de manera dura, i pot rebotar més d'un cop, i després romandre contra la campana, reduint certes vibracions. Els diagrames davall mostren algunes amplituds d'algunes parcials claus a través del temps, ambdues colpejades quan estan avall, i ha sonat un cercle complet. Desafortunadament, la campana té dobles en alguns parcials, que oscil·len endalt i avall de manera uniforme, que igual sonarien encara que el batall hagués colpejat un sol cop. Aquí està la campana que ha repicat quan està avall



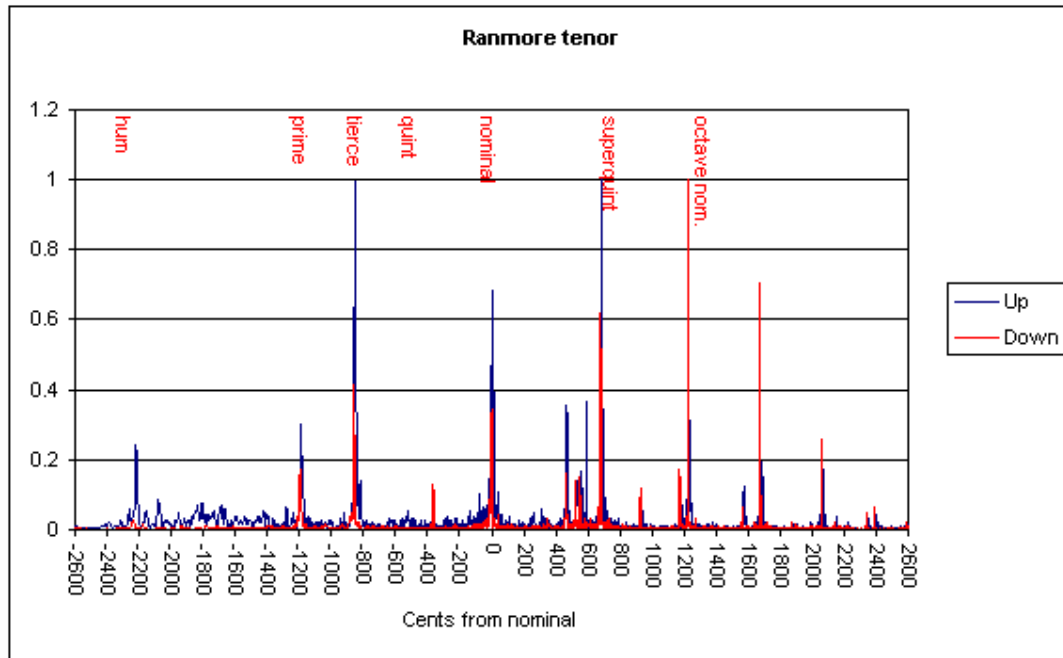
i aquí quan està a dalt:



El temps de creixement inicial més lent dels parcials en el segon diagrama és degut a la que la gravació es presa dintre de l'habitació de so en compte del compartiment de la campana. Degut als doblats, no és realment possible veure com el batall rebota - encara que un es pot imaginar-se que els múltiples pics en el nominal en el segon diagrama poden ser indicatius. Està clar que després d'un segon aproximadament o així, la vibració de la campana en el segon cas està sent esmorteïda pel batall, encara que el tierce sembla ser el parcial que es manté més bé. Comparant els dos gràfics, és

tranquilitzador que el mateix conjunt de parcials sembli ser l'important en ambos cassos - el nominal, el superquint, el tierce, la octava nominal etc. L'octava nominal és menys prominent quan la campana està a dalt, no és clar si això es degut al esmortiment del batall o que el so a través de dos pisos no està clar.

Aquí hi és un diagrama de l'intensitat i de la posició dels parcials en els dos cassos - cap amunt i cap avall. La mesura va ser presa sobre un segon després.



Aquí es pot veure la prominència creixent del tierce i del superquint i la prominència reduïda dels parcials de l'octava nominals i més alts poden ser observades.

El treball de Perrin, de Charnley i de DePont

La investigació de principis del anys 80 de Perrin, Charnley i DePont publicada en el seu treball “Normal Modes of the Modern English Church Bell” pot ser l’examen més detallat mai fet a una sola campana. En el seu treball es pot llegir:

Les mesures experimentals de las freqüències i els patrons nodals de tots els parcials de una campana d'església anglesa de bona qualitat de 214kg fins prop dels 9KHz han estat realitzats. Emparellant aquests resultats amb els de càlculs d'elements finits, una comprensió dels mecanismes físics que generen els varis parcials ha estat lograda. Això ha fet possible la producció, per primer cop, d'un esquema de classificació per als parcials amb una base física ferma, i ha donat un considerable nou impuls en el disseny de les campanes d'església. Particularment, ara està clar com és de crucial per a la producció del timbre característic de la campana el prop que l'anell gros estigui de la vora de la campana.

La campana que es va utilitzar per realitzar tot el treball era una de un “peal” fabricat pels Taylors i destinat a l'església de St Margaret's Church, Leigh on Sea, Essexl. Però aquesta mai fou entregada, i un dels moments més emocionants d'aquesta investigació va ser el descobriment de la campana, que es trobava encara penjant en el marc de ferro descrit en el seu article, en el museu en la fundació de Loughborough. Els Taylors, molt amablement, permeteren que gravés la campana. La comparació entre els resultat de Perrin i Charnley i el so real realitzat per la campana han estat aclarats.

Perrin i altres identificaren 134 modes de la vibració, molts dels quals eren doblats donant dos cops molts parcials. Cada mode de vibració va ser identificat comparant els resultats experimentals amb una simulació d'ordinador de l'estructura de la campana. Això va permetre que cada mode de la vibració fora caracteritzat com hem descrit més endavant. Tot i així, havia dos àrees no divulgades per Perrin i altres en el seu document - la variació de l'amplitud de cada parcial en el temps, i les forces parcials reals estimulades pel batall quan aquest colpeja la campana. Ambos són de gran importància. Es realitzà un exemple tocant una campana primer en el seu “soundbow”, i després en la cintura. El so és absolutament diferent; els conjunts de parcials prominents en los dos casos són diferents. Grützmacher i altres donaren exemples de la diferència en el so degut a diversos materials del batall.

Modes vibratoris de una campana

L'esquema de la classificació ideat per Perrin i altres és comprensiu - las campanes vibren de maneres diverses. Els modes foren classificats usant el número de cercles nodals (I.e. anells immòbils en el mateix pla que el soundbow), meridians nodals (I.e. línies immòbils que van de l'arc a la corona) i si la campana respirava (si el metall es mou avant i darrera de la base del batall) o torçava (el metall està a una distancia constant del peu del batall). Els tipus bàsics de vibració i la notació que per a ells utilitzaren en el seu article son els següents:

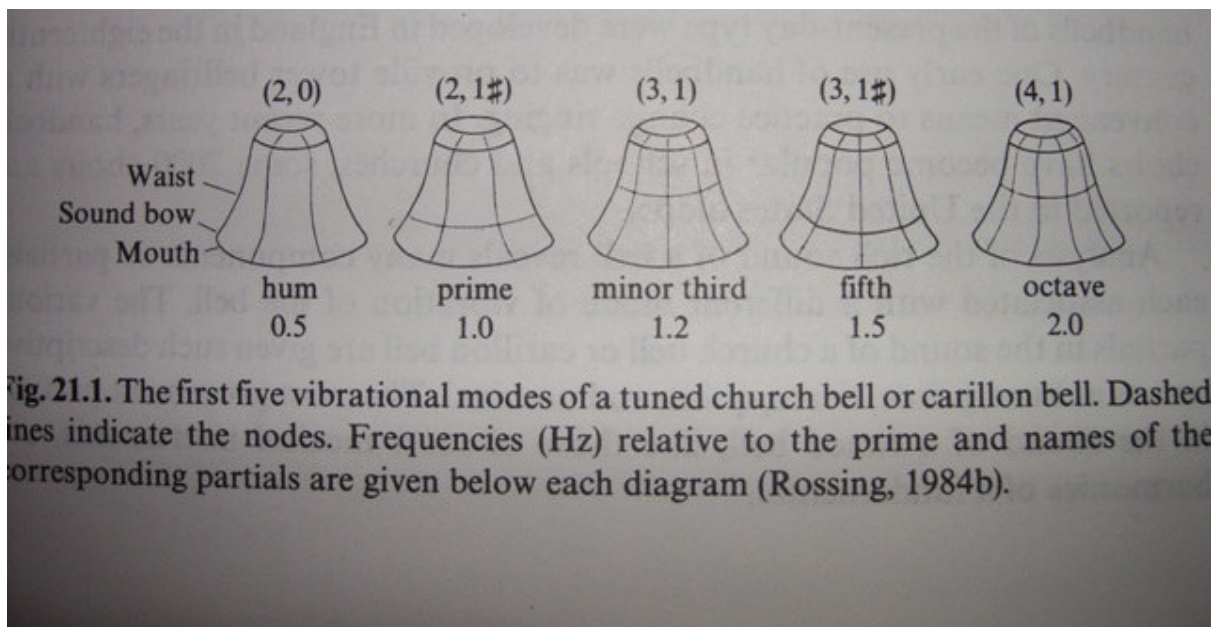
- Vora - inextensible, amb la vora movent-se (rim-inextensible, with rim moving.) En aquests els modes, el soundbow de la campana torcen en un óval (o forma similar amb més nodes) – es denotat com a RIR

- Vora - axial (rim-axial), amb el soundbow torcent-se al voltant del eix de la campana – denotat com RA
- Shell driven, amb la vora en descans però la cintura en moviment – denotat amb $R=n$, on n és el número de cercles nodals
- Altres, de una naturalesa més complicada.

Perrin també va utilitzar un paràmetre “m” per classificar parcials on $2m$ és el número de nodes axials. Tots els 134 modes de vibració foren posats en aquest esquema de classificació.

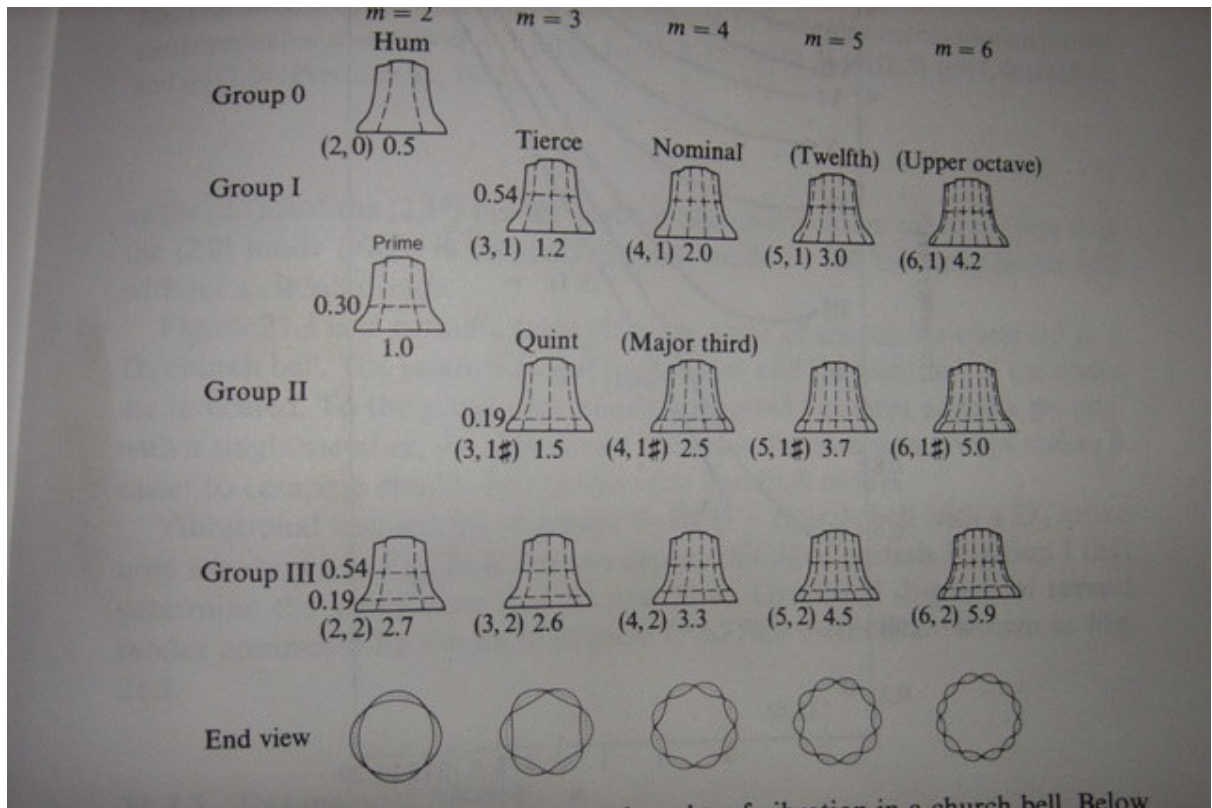
Abans de passar al següent apartat, degut que considero que és un tema important, m’agradaria incedir una mica més en aquest tema, ampliant amb el material trobat al “The physics of musical instruments” de Fletcher i Rossing.

Allí podem trobar el dibuix següent amb els 5 primers modes d’una campana d’església. Les línies indiquen la localització dels nodes. Els nombres (m,n) denoten el nombre complet de meridians nodals i el nombre de cercles nodals respectivament. Notem que hi ha dos modes amb $m=3$ i $n=1$, un amb el cercle nodal a la cintura i l’altre amb el node prop del soundbow. Per tant el llibre segueix el suggeriment de Tyzeer i altres de notar un dels dos com $(3,1\#)$ en la figura. El nombre de baix és la freqüència modal respecte el prime.



El llibre ens cita, tal com anàvem veient, l’ estudi de Perrin en el 1983 dels modes de vibració comparats amb els teòrics obtinguts amb un mètode d’elements finits per generar els 134 primers. El llibre també ens diu que modes com el $(2,0)$, el $(3,1)$ i el $(4,1)$ es classifiquen com “ring driven” ja que, en un veïnat del sounbow, tenen moltes de les característiques que exhibiria una campana amb el soundbow rígid si aquesta fos capaç de vibrar en els seus distints modes radials inextensibles com un sistema independent. Aquí es refereixen a aquest modes com modes del grup I, tal com va suggerir Lehr en (1965). Aquest son mol excitats pel batall, i aquests radien molts dels parcials més forts del so de la campana. El segona família que consideren aquí,

designada com el grup II, inclou el (2,1#), (3,1#) i el (4,1#) i superiors. Aquests aquí són classificats com “shell-driven” modes, i les altres famílies amb n=2,3,4.. són referides com els grups III, IV,V...



Taula periòdica del modes inextensibles de vibració d'una campana d'esgésia. Al costat de cada dibuix estan les freqüències modals relatives al prime per una campana D5 (que és essencialment la mateixa freqüència que la “strike note” en campanes de bona qualitat). Baix a l'esquerra, (m,n) ens dona el nombre de meridians nodals, 2m, i cercles nodals, n. (Rossing & Perrin)

Aquestes són caracteritzades per un cercle nodal prop la boca. Com els “ring-driven” modes, aquest són inextensibles en el sentit que un cercle neutral en cada pla normal respecte l'eix vertical roman sense estirar-se. Això significa que les components radials i tangencials del moviment, u i v respectivament, són relacionades per:

$$u \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0$$

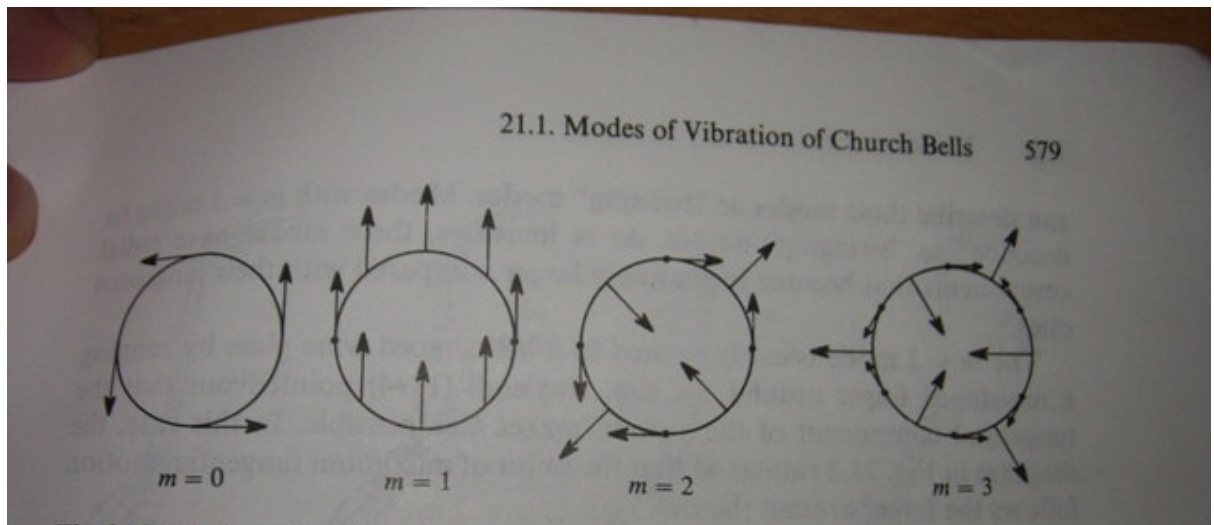
On θ es l'angle polar en el pla que ens interessa. Per tant podem escriure:

$$u = \sin m \theta$$

$$v = \cos m \theta$$

El moviment de la campana per m=0,1,2 i 3 és il·lustrat en la figura següent. Per m=0 el moviment es purament tangencial, i podem escriure aquest modes com “twisting”

modes (modes torçats). Els modes amb la $m=1$ en aquest llibre són anomenats “swinging” modes (modes balancejats). A mesura que la m creix, aquest modes obtenen una component radial molt gran comparada amb la component tangencial.



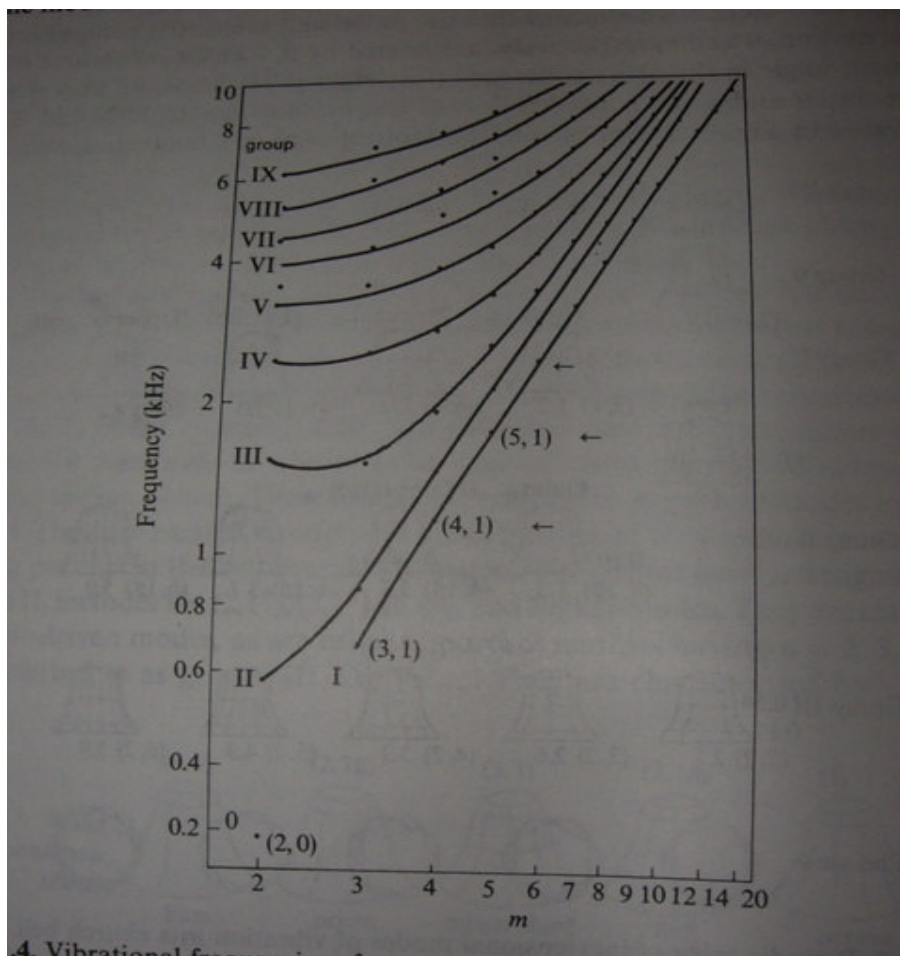
Moviment de la campana per als modes inextensible de m petita. Modes amb $m=0$ i $m=1$ requereixen un o més cercles nodals ($n>0$)

El mode $m=2$ es fàcilment excitable en una campana en forma de copa de vi corrent un dit humit per la vora. Rayleigh va puntualitzar que la component tangencial del moviment ho fa possible. En aquest cas, el diagrama de la figura anterior rota de manera que el punt de màxim moviment tangencial segueix el dit per la vora.

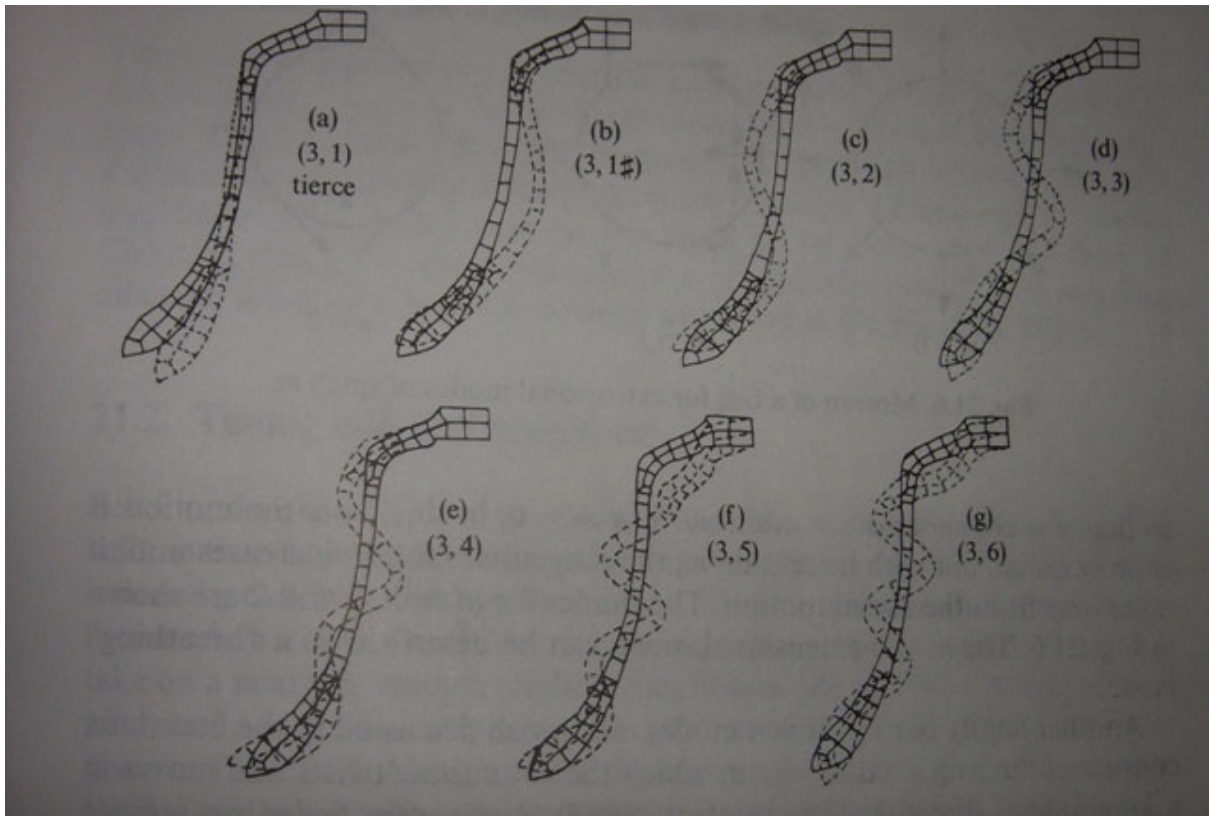
El mode $(2,1\#)$ comporta una discussió més llarga. El seu node circular en una campana D5 d'església va ser observat a 16cm sobre la boca, comparat amb els 29cm del mode $(3,1)$ (de tiercie o la tercera menor) i les 10cm en el mode $(3,1\#)$ (el quint o la quinta). Per tant, en el que ens concerneix a posicions de cercles nodals, el mode entona més en el grup II que en el grup I, però esta col·locat amb el $(2,1)$ i el $(2,1\#)$ en la classificació. Notem que el mode $(2,0)$ (hum) és l'únic mode normal em les campanes d'església modernes que no te un node circular.

En una de les figures anteriors ja podíem observar alguns modes en una campana D5.on les freqüències modals i la localització del nodes es indicada. Els grups suggerits anteriorment s'ha inclòs el grup 0, amb un únic element, el $(2,0)$.

Adjunto també un gràfic que he trobat al llibre amb les freqüències de vibració del grups 0 – IX en una campana d'església amb “nota de cop” D5 i un dibuix en que es mostren diferents modes generats usant el càlcul d'elements finits.



Frequència vibracional dels grups 0- IX d'una campana amb nota de cop D5. Les fletxes denoten els 3 parcials en el grup I que determinen la nota de cop



Formes modals predites amb el càlcul d'elements finits per als modes inextensibles amb $m=3$: (a) (3,1), (b) (3,1#), (c) (3,2), (d) (3,3), (e) (3,4), (f) (3,5) i (g) (3,6). (Perrin i altres, 1983)

Després el llibre parla del modes extensionals. (els que s'estira el metall). Aquí els moviments radial i tangencial són relacionats per per:

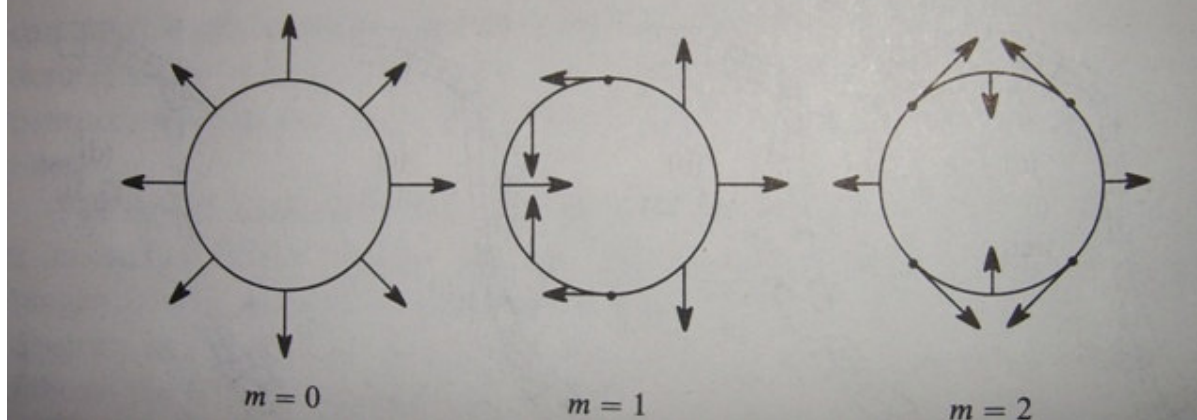
$$v \frac{\partial u}{\partial \theta} = 0$$

Per tant;

$$u = \cos m\theta$$

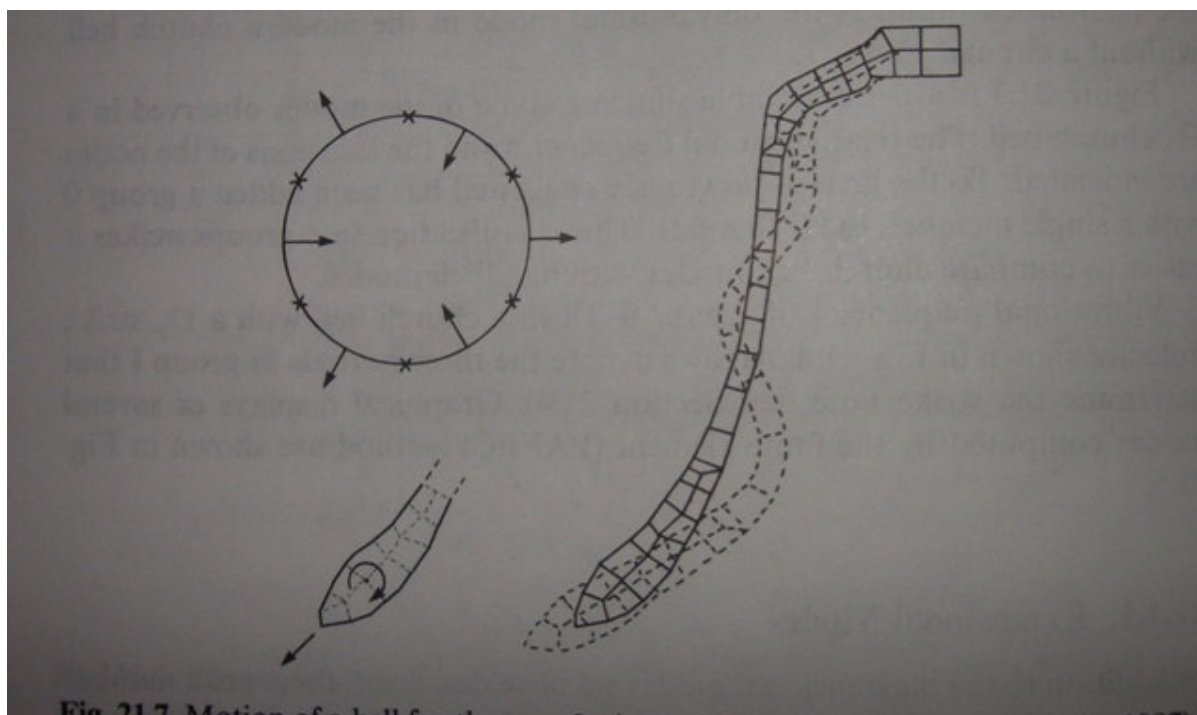
$$v = m \sin m\theta$$

En el cas $m=0$, el moviment es completament radial, però al incrementar la m , el moviment tangencial augmenta fins que s'apodera de la component radial del moviment. Aquí us mostrem els modes $m=0, 1$ i 2 . El mode $m=0$ l'anomena "breathing mode".



Moviment de la campana per als modes extensibles amb m petita

Finalment parla d'una família de “ring-driven” modes, són aquells en que la soundbow gira i es mou en la direcció longitudinal. Aquí podem veure un diagrama basat en el càlcul d'elements finits en el cas $m=3$



Moviment per una campana per la $m=3$, “ring axial” mode

Comparació de l'anàlisi amb una gravació

La taula de baix llista els parcials de Perrin fins els 4 kHz. Al costat estan els resultats reals de l'anàlisi d'una gravació, presa de manera que el batall colpeja la soundbow, i després permetent que la campana vibre amb llibertat. Els parcials sobre 4 kHz s'ometen perquè la seva intensitat en la gravació és mol baixa.

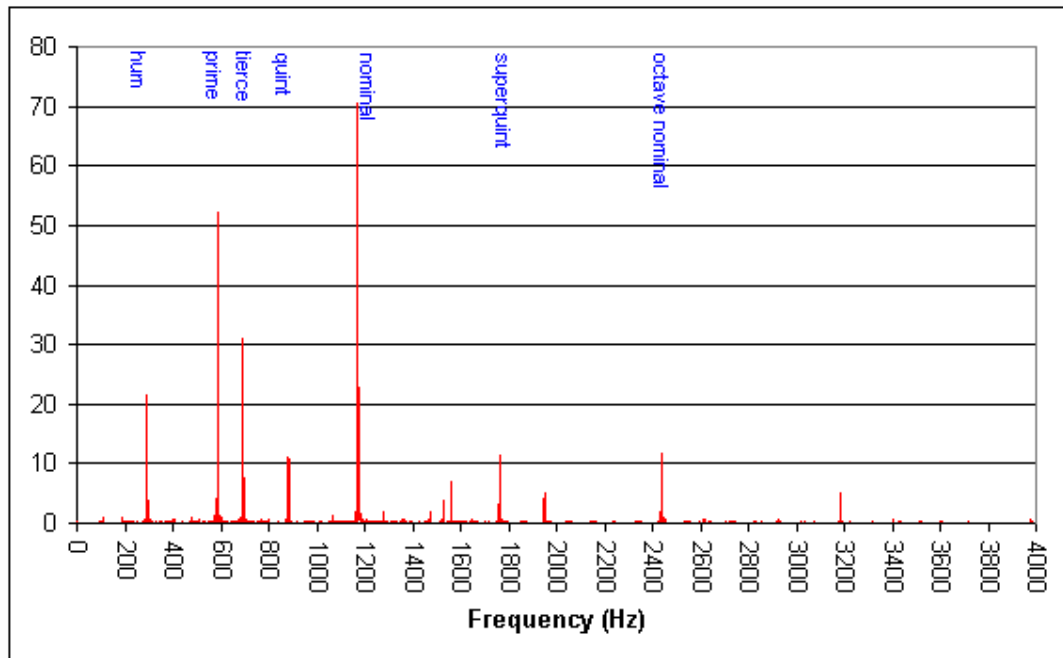
Perrin cita les freqüències per un doblet donant la freqüència més alta del par, junt amb la separació. Els doblets propers són difícils de distingir, i solsment les àmplies fractures es donen en els resultats obtinguts. Això és particularment cert pel nominal; la freqüència més alta del par es tan dèbil comparada amb el seu soci més baix que no podria ser observada. Observa que la freqüència nominal mesurada (1171.39 Hz) correspon exactament amb la més baixa de les dues freqüències de Perrin ($1172 - 0.6 = 1171.4$ Hz) – per tant no es va fer correcció ninguna para la velocitat del enregistrador.

Són donades les posicions dels cercles nodals (I.e. les posicions mesurades cap dalt del soundbow, on la campana està en repòs para aquest mode de vibració) mesurades per Perrin i altres. Les xifres es donen en cm. - la campana mesura 70'2cm d'altura.

Resultat de Perrin i altres					Mesuraments en la gravació			Parcial	
P&C no.	Freq.	Split	Classe	Cercles nodals	Cents	Freq.	Split	Amp (1s)	Nom
1	292.72	0	RIR	None	-2402	292.77		20.5	Hum
2	585.92	0	R=1,2m=4	16	-1200	586.13		48.4	Prime
3	692.94	0	RIR	29	-910	693.02		32.5	Tierce
4	882.53	0.32	R=1,2m=6	10	-491	882.53	0.5	10.1	Quint
5	1172.0	0.6	RIR	29	0	1171.39	see above	69.8	nominal
6	1199.7	0	R=1,2m=2	13, 41, 66	40				
						1278.2		1.87	
7	1393.8	-	Other	16, 38, 54	300				
8	1470.1	-	Other	21	392				
9	1472.8	0.3	R=1,2m=8	10	396	1472.55		1.81	
10	1525.6	0	R=2,2m=6	11, 26	456	1526.9		3.24	
11	1559.8	0.6	R=2,2m=4	10, 28	495	1560.44	0.7	6.75	
12	1619.8	13.1	RA	11	560				
13	1764.3	3.2	RIR	29, 57	708	1764.16	3.1	10.5	superquint
14	1776.2	-	R=1,2m=0	11, 54	720	1775.6		0.62	
15	1948.9	0	R=2,2m=8	11, 29	880	1949.58		4.11	
16	2040.3	0	R=2,2m=2	9, 26, 47, 58, 64	960				
17	2146.8	1.2	R=1,2m=10	9, 60	1048				
18	2155.9	-	R=2,2m=0	3, 41, 59	1055				

					1200	2342.80		4.14	
19	2441.2	4.3	RIR	15, 53	1270	2441.22	4.2	11.4	octave nom.
20	2443.0	4	Other	52	1272				
21	2485.7	0	R=3,2m=4	7, 21, 38, 66	1302				
22	2540.3	2.7	RA	8, 39, 53, 64	1339				
23	2550.4	4.6	R=3,2m=6	8, 21, 37	1346				
24	2617.8	1.5	R=2,2m=10	9, 32, 63	1391	2617.84	1.3	0.71	
25	2718.1	1.5	Other	37, 55	1456				
26	2804.5	-	R=3,2m=0	8, 20, 50, 55	1511				
27	2832.5	3.9	R=3,2m=8	9, 22, 37, 66, 72	1528				
28	2858.5	0.3	R=3,2m=2	4, 20, 36, 51, 56 63, 66, 68	1544				
29	2921.6	0.9	R=1,2m=12	9	1581				
30	3028.2	-	R=4,2m=0	8, 20, 35, 42, 63	1643				
31	3172.2	-	Other	5, 18, 32, 54, 63	1724				
32	3183.1	7.1	RIR	31, 54	1730	3184.60		3.88	
33	3233.5	8.3	R=4,2m=4	7, 20, 30, 44	1757				
34	3369.6	4.6	R=4,2m=2	6, 19, 30, 42, 59	1828				
35	3376.8	0	R=3,2m=10	9, 24, 38, 62	1832				
36	3403.5	0.5	RA	8, 29, 39, 57, 62	1846				
37	3433.4	2.1	R=2,2m=12	9, 32	1861				
38	3514.7	2.6	R=5,2m=4	8, 12, 30, 40, 54	1901	3514.40		0.94	
39	3607.1	3.5	R=4,2m=6	8, 18, 30, 40, 56	1946				
40	3678.5	-	Other	13, 46	1980				
41	3698.1	-	R=5,2m=0	6, 17, 28, 40, 55, 64	1989				
42	3797.6	2	R=1,2m=14	10, 59	2035				
43	3867.0	3.5	R=4,2m=8	8, 18, 30, 41	2067				
44	3934.8	19.4	R=5,2m=2	4, 17, 29, 39, 49, 59	2097				
45	3982.0	3.6	RIR	27	2117	3982.30	4.1	0.49	

Aquí està el gràfic de la intensitat dels parcials envers la freqüència, pres sobre 1 segon i fins els 4Hhz.



Origen físic dels parcials

Una exploració ràpida de la llista demostra que tots els parcials de RIR estan presents, i són generalment més forts que els altres. Això té una explicació mecànica molt simple. Quan el batall primer colpeja el soundbow, deforma el lloc on el batall impacta. Per tant els “driven shell” parcials, I.e. en els quals el soundbow està en moviment, seran prominents. Aquest punt sembla obvi – i també va ser constatat realment via prova de assaig i error en tentatives de reproduir exactament el so d’una campana.

El següent punt digne d’analitzar és que no hi ha modes de tipus RA audibles. En aquests modes de vibració, la campana torça axialment, i la superfície de la campana no té ningun moviment apreciable al llarg de la línia entre la campana i l’oient. En conseqüència, l’energia transmesa pel moviment de la campana cap a l’oient és probablement mínima. (De fet, una certa energia d’aquestes freqüències pot detectar-se amb un anàlisi molt acurat).

Els parcials audibles restants són tots els “shell driven” – la vora de la campana és immòbil i la cintura vibra. Una llista dels modes audibles és la següent:

- $R=1 \ 2m=0$; $R=1 \ 2m=4$; $R=1 \ 2m=6$; $R=1 \ 2m=8$;
- $R=2 \ 2m=4$; $R=2 \ 2m=6$; $R=2 \ 2m=8$; $R=2 \ 2m=10$
- $R=5 \ 2m=4$.

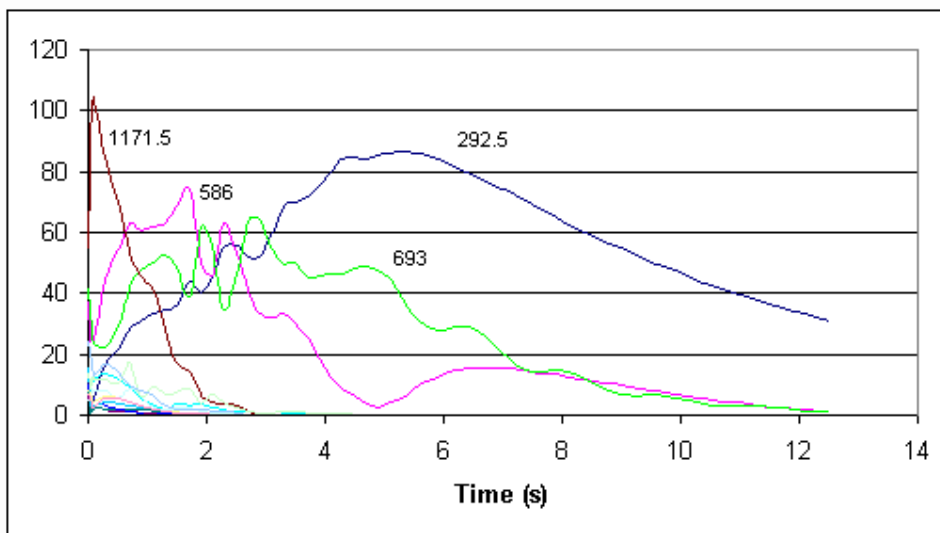
Apart del $R=2 \quad 2m=0$ que falta i $R=5 \quad 2m=4$ adicional, aquests són els modes “més simples”, i.e. aquells amb el menor nombre de nodes radials i axials.

Un altre efecte - no particularment sensible amb la campana anterior però bastant comú i d'interès - és que els modes de vibració que tenen un cercle nodal proper del punt de cop del batall són molt sovint de intensitat reduïda. Això és perquè un anell de metall en el cercle nodal és immòbil, i el mode de vibració no es pot estimular directament pel batall, encara que pot començar a vibrar via la transferència de l'energia dels altres modes. El parcial més notable amb aquesta qualitat és el quint, que és de manera sovint inaudible en una campana en la qual el batall doni el cop en el lloc correcte del soundbow.

Es notable que les campanes verdadero - harmòniques modernes tals com aquesta tenen molts pocs parcials audibles sobre l'octava nominal. Altres campanes són molt més riques en parcials

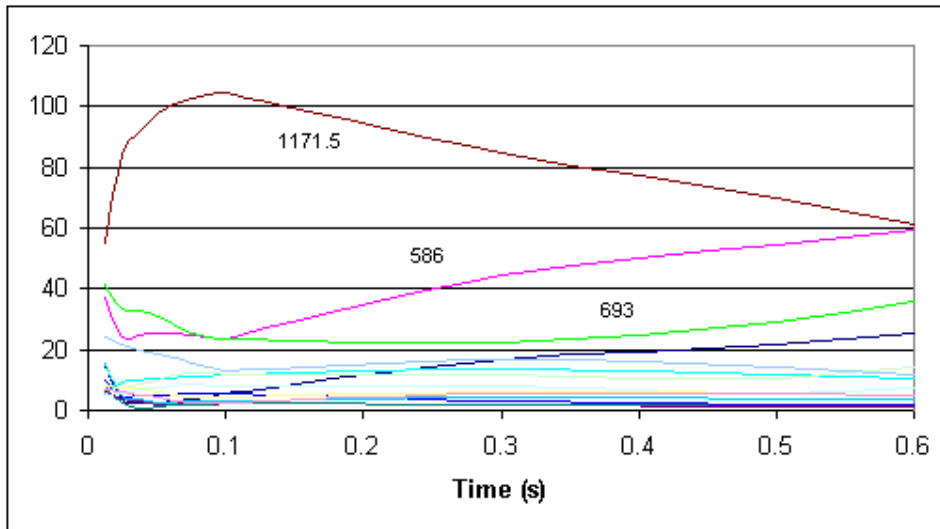
Perfil al llarg del temps dels parcials

El primer gràfic avall demostra la variació en un cert plaç de tots els parcials enumerats anteriorment:

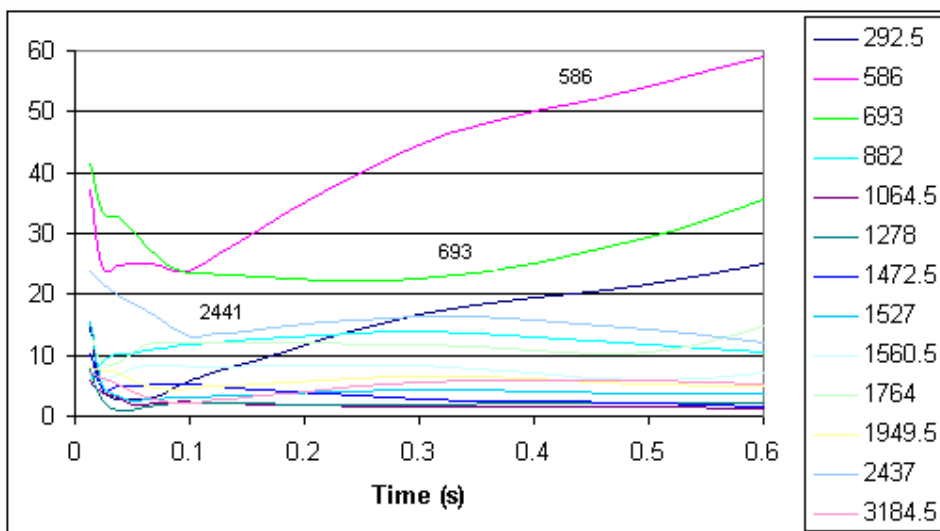


Els parcials més prominents; 292.77 Hz (Hum), 586.13 Hz (prima), 693.02 (tierce) i 1171,5 (nominal).són etiquetades. El hum comença a una intensitat reduïda, creix i decau un altre cop. El nominal sembla ser el més gran al principi decau a gran velocitat. El tierce i el prime comencen primer amb sonoritat moderada, cauen, creixen i cauen un altre cop. La oscil·lació es deguda als doblets - es generalment possible estimar la separació dels doblets d'un gràfic com aquest mirant la freqüència dels batecs .

El gràfic següent mostra la mateixa informació sobre un temps base més curt – el primer mig segon:



Un altre cop etiquetem els parcials prominents. Està clar, un altre cop, que el nominal domina de principis. No obstant, la força del nominal, del prime i del tierce enmascaren el comportament dels parcials més alts. Per tant, el gràfic següent veurem el mateix període de manera ampliada i ometem el nominal:



És clar que el més interessant succeeix en els primers 50 o 100 ms. Els parcials es poden dividir en dos grups: els que comencen a una intensitat més alta i baixen (en els primers 100 ms) i els que comencen a una intensitat més reduïda i pugen. En ordre decreixent de freqüència al inici, les freqüències són: 2441, 1764, 1526 y 292. Tots són parcials de tipus RIR. És realment molt difícil determinar l'amplitud dels parcials en els milisegons inicials, degut al límit físic fonamental. Si es realitza una transformació usant una mostra de so de la longitud t , la millor discriminació de freqüència realitzable és $1/T$. Per lo tant, sobre els 25 ms (la mostra més curta utilitzada per produir el gràfic anterior) la discriminació mínima és 40 Hz – insuficient per distingir entre els parcials de 1764 y 1776 Hz. No podrem mai decidir únicament amb l'anàlisi dels parcials quins són els primers a sonar – per descobrir això tindrem que procedir a la inferència.

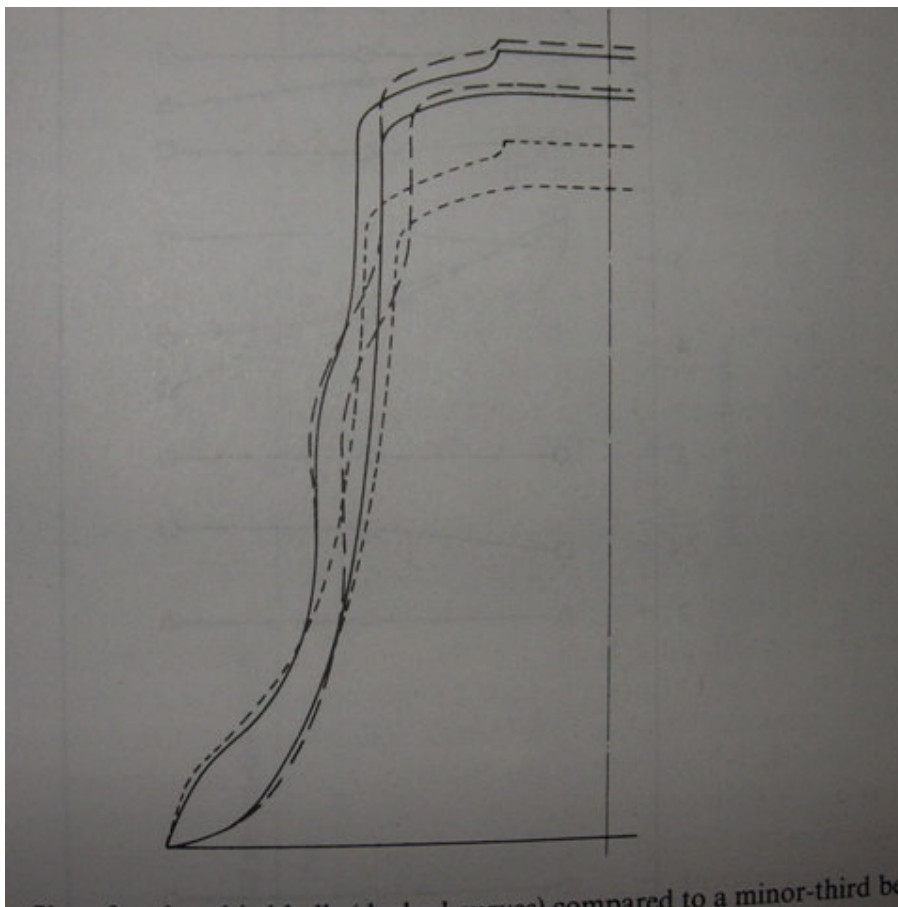
Conclusiones del análisis

Quan el batall colpeja la campana, solament certs parcials sonen- sobre tots els del tipus RIR. A mesura que passa el temps, l'energia s'intercanvia entre els parcials d'una manera complexa. L'explosió inicial dels parcials és molt curta - sobre 100ms para esta gravació de so. D'acord amb les observacions d'aquesta gravació, els parcials més importants de la amplitud durant els primers 100ms estan per ordre decreixent: 1171.4 (nominal), 693.02 (tierce), 586.13 (prima), 2441.22 (octava nominal), 1764.16 (superquint), 1526.9, y 292.77 (hum). Que no és l'orde de importància que l'afinament verdadero - harmònic assigna.

Si la teoria anterior sobre l'origen de la "strike note" és correcta, és plausible que la seqüència dels parcials de tipus "rim" del nominal cap amunt (I.e. 1171.39, 1764.16, 2441.22, 3184.60 y 3982.30) juntes formen la sèrie que crea la sensació de la "strike note", fent que l'orella completi amb el "fonamental perdut" una octava per davall del nominal. Un suposaria que aquestes freqüències de certa manera determinarien la qualitat o el timbre de la "strike note" - pero solament un d'ells, el nominal, s'afina convencionalment.

Campanes de tercera major

Per finalitzar, m'agradaria comentar l'aparició d'un nou tipus de campana, dissenyada al Royal Eijsbouts Belfoundry en Holanda. La campana reemplaça la parcial dominant de tercera menor per una parcial de tercera major, això canvia el caràcter tonal de la campana de menor a major. Això requereix un disseny completament nou.

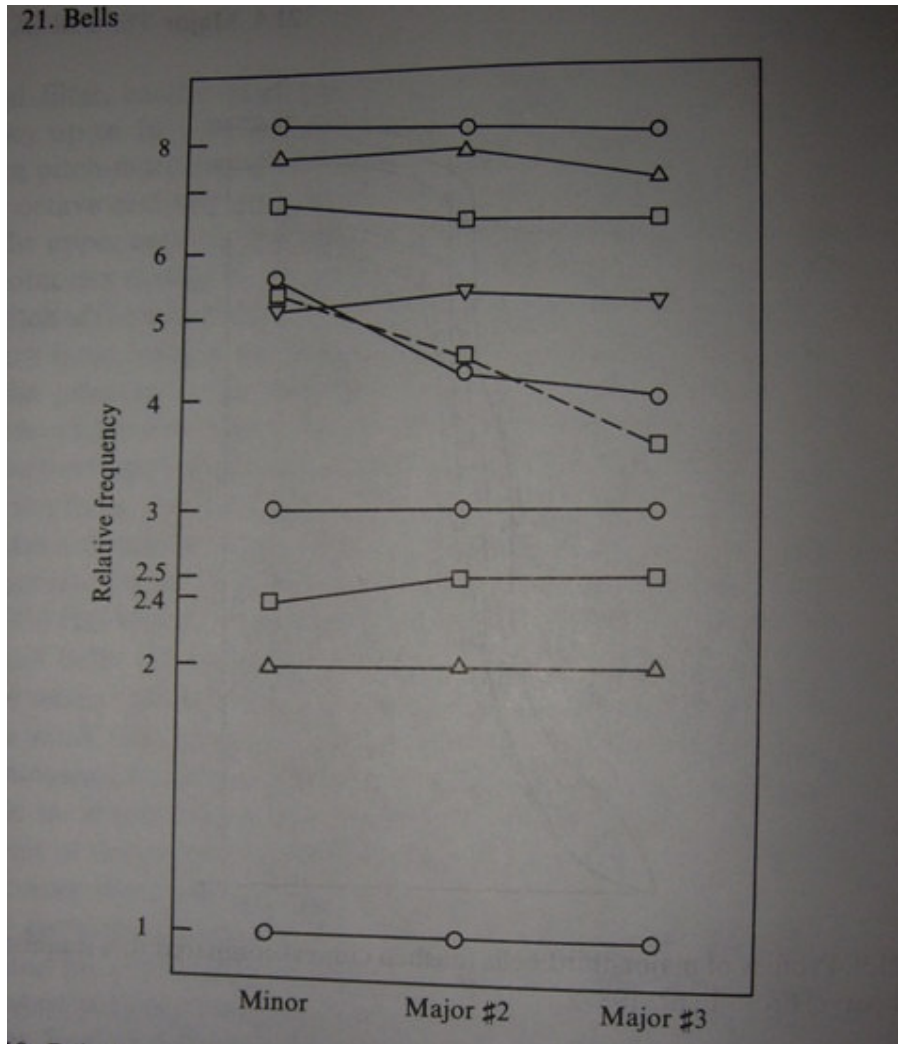


Comparació del perfil de les campanes de tercera major (línies discontinúes) amb la campana de tercera menor (línia contínua) (Lehr, 1987)

La idea d'una campana amb un parcial de tercera major no és nova. Durant anys, alguns carillers han sentit que una composició en clau major, especialment si inclou cors amb moltes notes, podria sonar millor amb un caràcter major. Algunes autoritats en la matèria havien suggerit una tercera neutral, un mig camí entre una tercera major i una menor. Els intents previs per realitzar aquesta campana no havien acabat amb èxit. No obstant, amb el canvi del disseny de la campana per pujar la tercera es canvia també els altres parcials harmònics.

El nou disseny de campana evoluciona en part gràcies a l'ús d'una tècnica per l'optimització estructural basada en la utilització de mètodes d'elements finits en ordinadors en el Technical University in Eindhoven (Schoofs i altres, 1987). Aquesta tècnica permet a un dissenyador practicar canvis en el disseny d'una estructura existent, i després computa els canvis resultants en els modes vibracionals.

Basats amb els resultats d'aquest procediment, André Lehr i alguns col·legues van dissenyar dos campanes completament diferents, ambdues amb parcials de tercera major. La primera campana, 1985, té una decaiguda dels parcials més ràpida, mentre que la segona té un temps de devallada més llarg, més proper al de les campanes tradicionals de tercera menor. Les freqüències dels 8 primers parcials en les dues campanes són comparades amb una campana tradicional de tercera menor. Noteu la gran diferència entre els parcials 7 i 8, els dos pertanyen al grup III



Freqüències relatives dels vuit primers parcials en les dues campanes de tercera major comparades amb la campana tradicional de tercera menor. Noteu que els parcials hum, prime, fifth i l'octava romanen iguals



Campanes de tercera major

Bibliografia

- **<http://www.hibberts.co.uk/>** Pàgina web molt completa i repleta de material sobre campanes
- **The physics of musical instruments**, *Neville H.Fletcher & Thomas D.Rossing*
- **Music: a mathematical offering**, *Dave Benson*
- **Apunts de l'assignatura**
- **<http://www.campaners.com/>**