

I
NK6404.5
R35
[19-]

I00643

METALES



I00643

Restauración de campanas

0251

251

RESTAURACION DE CAMPANAS ANTIGUAS: EL ESTUDIO DE UN CASO

G. RAMOS*, M.C. CASTRO*, I. CIMADEVILLA*, C. GONZALEZ-TIRADO*,
V.M. CASTAÑO°

* E.N.C.R.M. Ex-Convento de Churubusco, Xicotencatl y General Anaya,
México, D.F. C.P.04120

°Instituto de Física, UNAM, A.P. 20-364, México, D.F., C.P. 01000

RESUMEN

Una campana del pueblo de Santuario Mapethé, Hidalgo, fué restaurada utilizando técnicas de soldadura. El trabajo incluyó la caracterización acústica de la campana antes y después de la soldadura, así como el análisis de la composición de la aleación original empleada, con el propósito de utilizar un material lo más similar posible al original para su restauración. Se discuten las ventajas y desventajas del método.

INTRODUCCION

La iglesia del pueblo de Santuario Mapethé, municipio de Cardonal, Hidalgo data de los siglos XVII y XVIII. Su campanario alberga actualmente seis campanas, una de las cuales se encontraba rota por lo que se trasladó al Taller de Conservación de Metales de la Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía, para su restauración.

Pese a que se carece de información para ubicarla temporal y espacialmente, en el Estado de Hidalgo existe tradición en el trabajo de los metales, habiendo lugares que se dedican a la manufactura de campanas, por lo que es muy posible que la campana en cuestión provenga del mismo estado.

La técnica de manufactura para campanas es muy variable. Se han hecho piezas de hierro, bronce, latón, cobre, etc. sin embargo, la preferencia es realizarlas en bronce, aleación cobre-estaño.

Los fabricantes de campanas se enfrentan a varios problemas para lograr una mezcla que proporcione el tono óptimo, resistencia adecuada y costo accesible. La aleación ideal es 78% cobre y 22% estaño(1), sin embargo, encontramos campanas que contienen plomo, zinc, hierro, manganeso, níquel, así como partículas de arena y otras impurezas.

También existen dificultades en el momento de la fundición, ya sea por que ésta se lleve a cabo al aire libre, o bien debido a que no se encuentran bien sellados los moldes. Todo ello provoca alteraciones en el comportamiento del metal que traen como consecuencia deformaciones y roturas las cuales impiden que las ondas sonoras se propaguen por todo el cuerpo de la campana produciendo sonidos de poca brillantez.

Una campana es una placa vibrante que se mueve simultáneamente en dos modos de vibración:

a) Meridianos nodales: las vibraciones van de la parte superior a la parte inferior de la campana.

b) Círculos nodales: las vibraciones viajan al rededor de la campana.

Estos modos de vibración producen diferentes frecuencias llamadas parciales.

OK-251

Al hacer sonar una campana rota los dos modos de vibración se interrumpen en las grietas. Esto causa una pérdida de resonancia y calidad tonal. (1-3)

La campana objeto de la investigación presentaba dos grandes grietas en el labio inferior del cuerpo (Tabla I), como se aprecia esquemáticamente en la figura 1. Las dimensiones de la campana se sumarizan en la Tabla II.

Al plantear la restauración de un bien cultural, deben considerarse las distintas instancias inherentes a él: estética, histórica, funcional y tecnológica entre otras. La relación de equilibrio entre éstas, dará la pauta para su restauración integral. Las grietas que presenta la campana de Santuario Mapethé son una manifestación de su historia y de la tecnología con que fué creada, no obstante, si se toma en cuenta que el objeto regresará a ocupar su lugar como campana en uso, entonces las grietas afectan no solo a su aspecto estético, sino que anulan su función original.

Un proceso común para la reparación de campanas rotas es el fundirlas y vaciarlas en moldes nuevos. Con esta técnica se pierde la originalidad de la obra. Otro proceso para rellenar grietas es la utilización de pastas hechas a base de resinas sintéticas y cargas. Este tratamiento mejora el aspecto estético de la campana pero no recupera su función ya que las ondas sonoras no se transmiten de manera adecuada a través de este material diferente al original. Por tal motivo, e necesario conocer la composición de la aleación de la campana con el propósito de recurrir a materiales similares con un comportamiento acústico parecido.

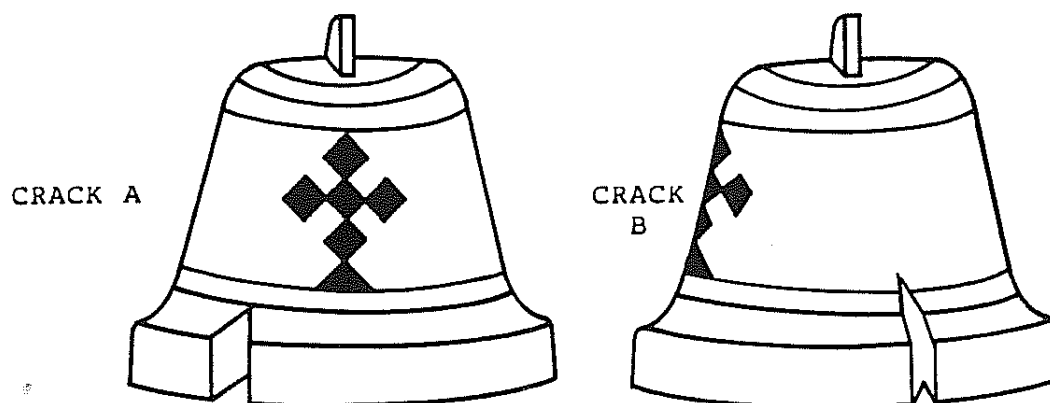


FIGURA 1. Esquema de la Campana y localización de las grietas.

TABLA I			
GRIETA	LARGO	ANCHO	PROFUNDIDAD
A	9 cm	0.4 cm	2 cm
B	10.9 cm	0.8 cm	2.3 cm

TABLA II	
Longitud total	49.5 cm
Longitud (cuerpo sonoro)	28.5 cm
Diámetro superior interno	16.5 cm
Diámetro superior externo	17.5 cm
Diámetro inferior interno	34.5 cm
Diámetro inferior externo	38.5 cm
Peso total	35 kg
Peso del badajo	0.6 kg

EXPERIMENTO.

a) Caracterización de los materiales.

Se utilizó Difracción de rayos X para determinar la composición de la aleación empleada en la construcción de la campana. Se tomaron muestras de las zonas de ambas roturas las cuales se pulverizaron y se analizaron en un equipo SIEMENS D-5000 en el cual se pueden realizar análisis cuantitativos.

b) Estudios acústicos.

Se obtuvo un espectro sonoro de la campana, antes y después de la soldadura, utilizando el siguiente equipo:

- Grabadora digital BRUEL & KJAER 7400.
- Analizador de espectros de alta resolución (dos canales) B & K 2034
- Micrófonos B & K 2807 y 4165.
- Calibrador para micrófonos.
- Cintas de audio DENON R-60DT.
- Cassette B & K QR 1009.

Las frecuencias grabadas se encuentran en el rango de 0-12 kHz (4 y 5).

c) Soldadura.

Se utilizó el siguiente procedimiento para soldar las grietas:

- 1) Se barrenó un orificio 1 cm. arriba del extremo superior de la grieta para evitar que continuaran creciendo.
- 2) Se hizo un chaflán en forma de X para permitir la entrada del metal de aporte.
- 3) Se construyó un horno de tabique de cerámica compacta refractaria para obtener un calentamiento homogéneo sobre la campana.
- 4) La campana se calentó a 400 °C utilizando carbón y sopletes de gasolina.
- 5) La soldadura se llevó a cabo utilizando un equipo de oxiacetileno. La presión en el tanque de oxígeno fué de 10 lb/cm² y en el tanque de acetileno de 5 lb/cm². La temperatura de la flama es aproximadamente de 3000 °C. Se utilizó una boquilla de 6 mm (No. 20).

6) Se utilizó como material de aporte una aleación de 95% cobre y 5% estaño.

7) El acabado se logró utilizando un rehilete de hoja circular de carburo de silicio, un mototool industrial, limas para metal, a manera de preservar la forma original de la campana.

d) Acabados.

Los carbonatos y cloruros que conformaban la pátina original de la campana desaparecieron debido a las altas temperaturas alcanzadas durante el proceso de soldadura. Con el propósito de homogeneizar el color de la campana y proporcionarle una pátina agradable y estable se aplicó una solución de Sulfuro de amonio 1:3 en agua destilada sobre la superficie de la campana la cual previamente se calentó con pistola de aire caliente a una temperatura de 300 °C. Con esto se obtuvo una película protectora homogénea de sulfato de cobre.

RESULTADOS Y DISCUSION.

La figura 2 muestra el difractograma de rayos X de la zona de las grietas. Se puede observar que sorprendentemente la campana esta hecha principalmente de cobre, un escaso porcentaje de estaño y un porcentaje de plomo más alto del recomendado para la fabricación de campanas. Debido a esto las propiedades mecánicas de la campana se ven mermadas ya que la inclusión de plomo en la aleación da por resultado una mayor porosidad y la baja concentración de estaño reduce la resistencia mecánica del objeto. (Ver figura 3)

Help Zoom Match File Clear Back Null K a2 Peaks Smoo. Comp. WFile -> ?

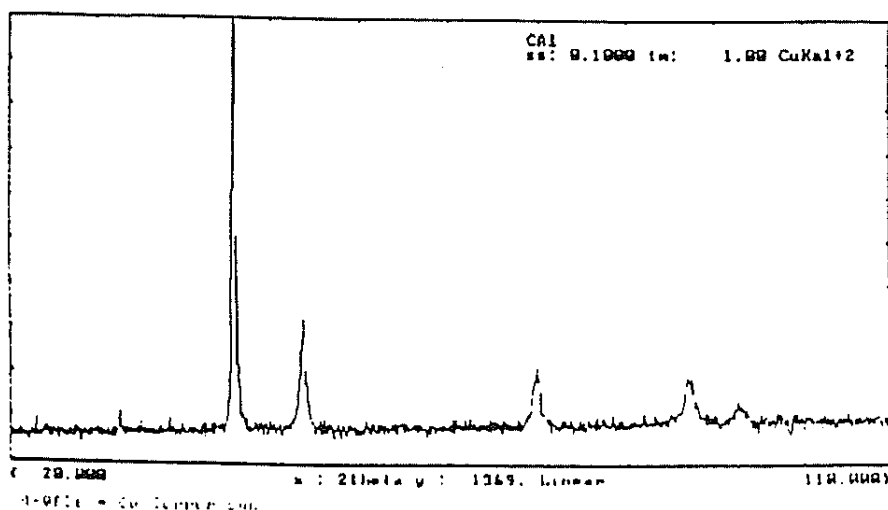


FIGURA 2. Difractograma de rayos X de las muestras metálicas tomadas de la zona de las grietas de la campana.



FIGURA 3. Fotografía de detalle de las muestras del metal constitutivo de la campana. Nótese la porosidad causada por el exceso de plomo.

Con base en los resultados obtenidos, se eligió un material de aporte lo más parecido posible al original.

La figura 4 muestra el espectro acústico de la campana grabado en una cámara anecoica para evitar la presencia de armónicos ajenos a los de la campana. Se pueden observar en la gráfica varios rasgos notables: primero, que la nota fundamental, marcada por una línea vertical, se conserva; segundo, que el rango de baja frecuencia es básicamente el mismo mientras que a frecuencias más altas se puede apreciar una recuperación en la campana soldada comparada con el sonido original. Esta observación tiene sentido si se recuerda que los modos correspondientes a las altas frecuencias en una campana se localizan precisamente en el labio (1), esto es, en donde se localizaban originalmente las grietas.

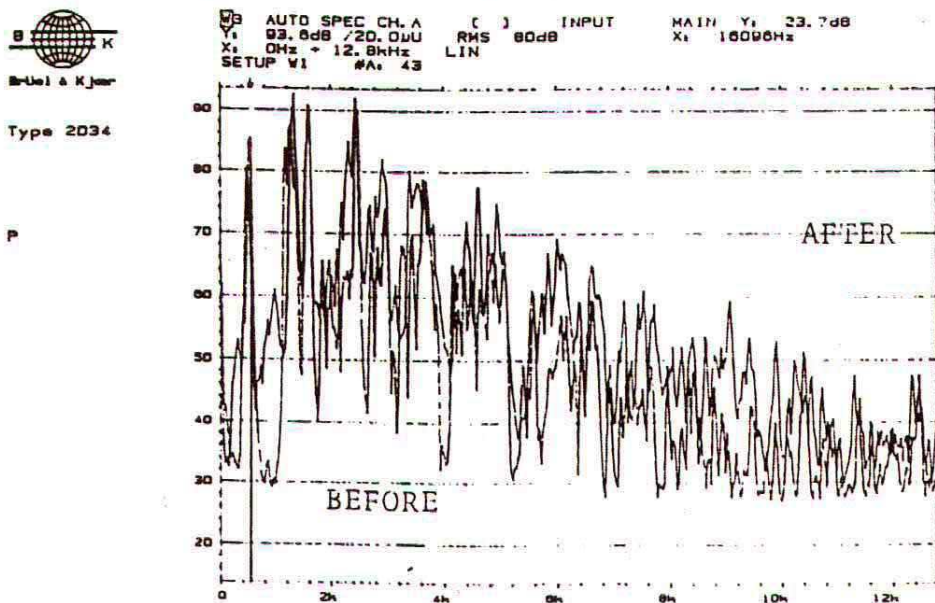


FIGURA 4. Espectro acústico del sonido de la campana antes y después de la soldadura.

Para probar la conveniencia de la soldadura como un método para restaurar la calidad tonal de campanas rotas, se produjeron artificialmente dos grietas en una campana de bronce nueva de menor tamaño, en posiciones que correspondían a la ubicación de las grietas en la campana de Santuario, Mapethé. Previamente se midió el sonido de la campana con un afinador sencillo dando por resultado DO 3-30 cents. Posteriormente se realizó otra medición del sonido de la campana rota obteniéndose DO 1-30 cents. Con este afinador no es posible medir armónicos, pero se observó que en la campana rota ya no había resonancia. Una vez soldada se obtuvo un valor de DO 3+50 cents; al eliminar el excedente de material de aporte se logró afinar la campana a su sonido original. Se observó también una recuperación de la resonancia.

En el caso de la campana de Santuario, Mapethé, no fué posible registrar el sonido original de la campana por razones obvias, por lo tanto no podemos estar seguros de que el sonido de la campana soldada sea igual a su sonido original, sin embargo, fué notoria la recuperación de la calidad sonora.

CONCLUSION.

El experimento llevado a cabo, demuestra que mediante una adecuada elección de el material de aporte para la soldadura y preservando la geometría original de la campana, se puede lograr una recuperación acústica satisfactoria. De cualquier manera es necesario realizar más experimentos en esta misma línea para desarrollar la técnica a niveles más prácticos y seguros. Esta técnica logra recuperar la función original de la obra, conservando íntegramente su instancia histórica y alterando mínimamente la instancia estética en lo que respecta al color de la pátina original de la campana.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen el apoyo técnico proporcionado por el Dr. Ricardo Ruíz y la Dra. Rosa Lima.

REFERENCIAS.

1. S. LEVARIE y E. LEVY, *Tone*, Greenwood Press, Wesport (1980).
2. H.F. OLSON, *Musical Engineering*, McGraw-Hill, New York (1952).
3. I. JOHNSTON, *Measured Tones*, Adam Hilger, New York (1982).
4. N.H. FLETCHER y T.D. ROSSING, *The Physics of Musical Instruments*, Springer-Verlag, New York (1991).
5. A.H. BENADE, *Fundamentals of Musical Acoustics*, Dover, New York (1990).

La investigación titulada RESTORATION OF ANTIQUE CHURCH BELLS: A CASE STUDY, fue aceptada en Materials Research Society Proceeding Series (1992) y aparecerá publicada en "Materials Issues in Art and Archaeology III" - Editor: Pamela B. Vandiver.

RESTORATION OF ANTIQUE CHURCH BELLS: A CASE STUDY

G. RAMOS*, M.C. CASTRO*, I. AMADEVILLA*, C. GONZALEZ-TIRADO*
and V.M. CASTAÑO#

*E.N.C.R.M., Xicotencatl y Gral. Anaya, México, D.F., MEXICO
#Instituto de Física, U.N.A.M., A.P. 20-364, México, D.F., MEXICO

ABSTRACT

A 17th century bell, from Santuario-Mapethe (Mexico) was restored by using welding techniques. The work included the acoustical characterization of the bell before and after the actual welding as well as the analysis of the composition of the alloy originally employed, so a material as similar as possible to the original would be employed for the restoration. The advantages and disadvantages of the methods are discussed.

INTRODUCTION

Perhaps one of the most interesting members of the percussion musical instruments, at least from a physicist's point of view, is the bell. In principle, it can be thought as a simple metal sheet bent around its middle part; but the geometry and the materials used to construct it play a key role on the musical performance of the bell. As for the first aspect, that is, the geometry of the bell, several references explaining the relevance of parameters such as the thickness distribution along the bell, can be found in the literature (1-3). The Materials Science point of view, however, has not been so carefully studied in the recent past by the experts, in spite of some interesting reports on the matter dating from the 16th century (4). Some of the available data, for instance, establish the alloy 78% Cu - 22% Sn as the standard composition for constructing antique bells (3-5), fact to be taken into consideration when reconstructing those instruments. It is also interesting to notice that some of the available literature in this field seem to rely on textual information (4,5) rather than on actual analytical measurements of the composition, structure, etc. Accordingly, the aim here is to add a few more scientific basis to some of the traditional methods (4,5) by employing modern techniques such as X-Ray analysis and acoustical studies (6,7). Thus, in

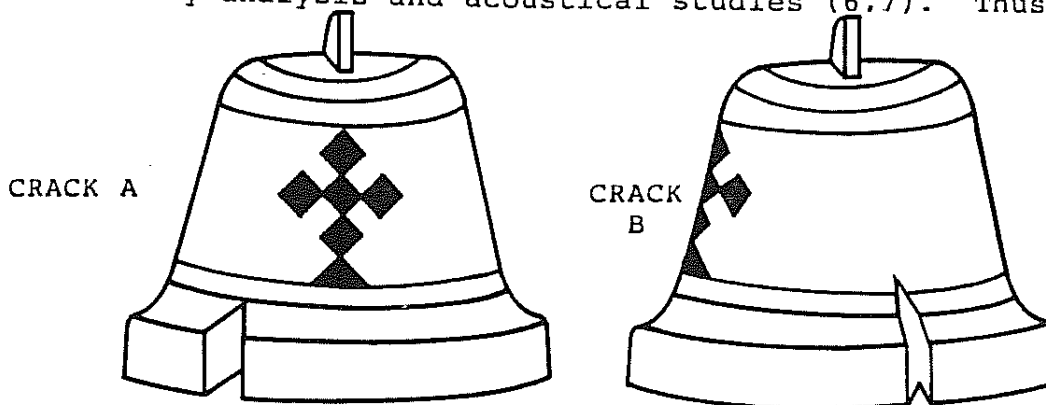


FIGURE 1.- DRAWING OF THE BELL AND THE CRACKS

this present work, a bell from a 17th century church, located in the town of Santuario-Mapethe, municipality of Cardonal, State of Hidalgo, at about one hour to the northeast of Mexico City, was restored by a welding process. The bell presented two big cracks in the lower lip of the body, as shown schematically in Figure 1. The dimensions of the bell are summarized in Table I, and Table II contains a description of the two cracks depicted in Figure 1.

TABLE I

total length	49.5 cm
length of sonorous body	28.5 cm
inner upper diameter	16.5 cm
outer upper diameter	17.5 cm
inner lower diameter	34.5 cm
outer lower diameter	38.5 cm
total weight	35 kg
clappers weight	.6 kg

TABLE II

CRACK	LENGTH	WIDTH	DEPTH
A	9 cm	0.4 cm	2 cm
B	10.9cm	0.8 cm	2.3cm

EXPERIMENTAL

a) Materials characterization. X-Ray diffractometry was used to determine the composition of the alloy employed in constructing the bell. Small samples from the area of the two cracks were powdered and analyzed in a Siemens D-5000 equipment, which allows quantitative analysis.

b) Acoustics studies. The sound spectrum of the bell; before and after the welding, was carried out with the following equipment:

- Digital recorder Bruel and Kjaer 7400
- High resolution spectra analyzer (2 channels) Bruel and Kjaer 2034
- Microphones Bruel and Kjaer 2807 and 4165
- Microphone gauge
- Audio tapes Denone R-60DT
- Cassette Bruel and Kjaer QR 1009

The recorded frequencies were in the range 0-12 kHz (6-7).

c) Welding. The following procedure was used to heal cracks A and B (Figure 1) on the bell:

- 1.-A hole was drilled 1 cm above the tip of the cracks to prevent them from growing further.
- 2.-A chamfer with a "X" shape was made to facilitate the

access to the welding material.

3.-A compact ceramic (brick) furnace was specifically built to obtain a homogeneous heating of the bell (Figure 2).

FIGURE 2.- PHOTOGRAPH OF THE FURNACE

- 4.-The well was heated at 400°C by using coal and a gas torch.
- 5.-The actual welding was carried out by using an oxyacetylene equipment. The pressure of the oxygen was of 10 p/cm^2 and the pressure of the acetylene of 5 p/cm^2 . The temperature of the flame is of around 3000°C . A 6 mm burner (number 20) was utilized in each case.
- 6.-A commercial soldering alloy with the composition 95% Cu, 5% Sn was used in every crack.
- 7.-The finish was accomplished through a circular silex carbide blade grinder, an industrial moto-tool and metal files, to preserve as well as possible the original shape.

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 3 shows a typical X-Ray diffractogram from the area of the cracks. From the analysis of the peaks one can observe that, surprisingly, the bell is made basically of copper and not of the expected Cu-Sn alloy, since no reflections corresponding to that alloy were found. This was also corroborated by atomic absorption analysis. This result is extremely relevant to choose the welding material.

The above finding also explains the poor mechanical strength of the bell and the presence of the cracks, for the recommended alloy (78% Cu-22% Sn) provides much better

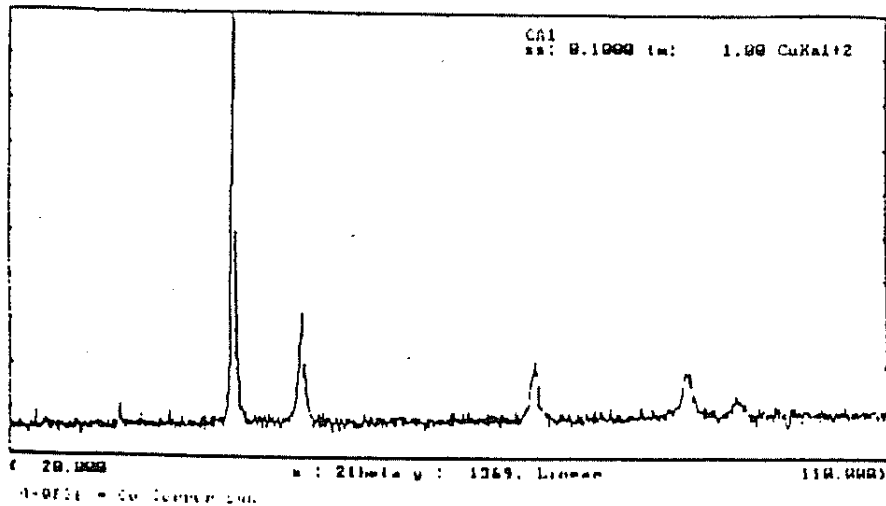


FIGURE 3.- X-RAY DIFFRACTOGRAM OF THE BELL SHOWING ONLY Cu PEAKS

properties, including acoustical performance, as we shall see. We must point out that welding of bells has been reported as early as the 16th century (4). That antique method is in principle similar to what we have described here, the main difference being, besides the obvious lack of analytical resources to identify the alloy and the soldering material, the use of a mould of the inside of the bell, where it is cracked, which is a method suitable for thicker cracks. In any event, it is remarkable the pertinence of that traditional method.

Figure 4 shows the acoustical spectra of the bell recorded in an anechoic chamber to avoid the presence of

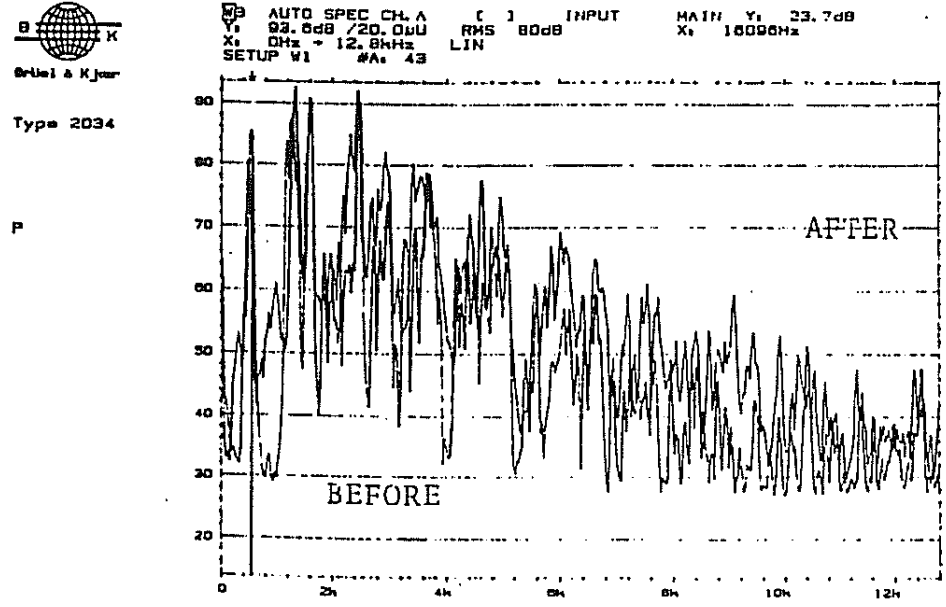


FIGURE 4.- ACOUSTIC SPECTRA OF THE BELL BEFORE AND AFTER WELDING

spurious harmonics. One can notice several features from these plots: first, that the fundamental note, marked by a vertical line, is preserved; second, that the low frequency range is basically the same, whereas at higher frequencies one can observe a recovery in the welded bell as compared to the original. This observations make more sense if one remembers that the modes corresponding to higher frequencies in a bell, are located precisely in the lip (3), that is, where the cracks were originally located.

In order to test the convenience of welding as a method for restoring the tonal qualities of damaged bell, we artificially produced two cracks in another similar bell, at equivalent positions as in the reconstructed one. The acoustical spectra were obtained in both the untouched bell and in the welded one, obtaining basically the same behavior. The details of the procedure will be reported separately. In our present case, however, one cannot be sure of how close the sound of the welded bell is to the original 17th century bell.

Finally, as one could expect, chlorides and carbonates of various kinds were found forming a film and the patina of the bell, and were eliminated during the analysis and the welding. To homogenize the color and general aspect of the bell, an artificial patina procedure was performed. This was achieved through the action of ammonium sulfide, which acts as a sort of "colorant" agent for copper and its alloys, by forming a homogeneous protective film of copper sulfate. The ammonium sulfide solution was prepared with distilled water (1:3) and applied to the previously cleaned surface at 300 °C.

CONCLUSION

Welding seems to be an adequate technique for reconstructing some antique percussion instruments such as bells because its simplicity, low cost and scarcity of research on alternative methods. The experiments carried out in our laboratories show good evidence of good acoustical recovery by an appropriate choosing of the welding materials and procedures. In any case, more work in this direction has to be performed to bring the technique to sophisticated levels. Finally, one important point that remains to be clarified is that of the temperature distribution in the bell during the heat treatment. This could probably be done through the analysis of color changes in the metal during the heating and weldings procedures.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are indebted to Mr. Ricardo Ruíz and to Mrs. Rosa M. Lima for their technical support in various ways. Thanks are due to Dr. Pamela Vandiver and Ms. Martha Goodway for drawing our attention to references 4 and 5.

REFERENCES

- 1.-H.F. Olson, Musical Engineering, McGraw-Hill, New York (1952).
- 2.-I. Johnston, Measured Tones, Adam Hilger, New York (1989).
- 3.-S. Levaire and E. Levy, Tone, Greenwood Press, Westport (1980).
- 4.-Biringuccio, The Pirotechnia, Book VI, Chapter 15, translated by M. Gnudi and C.S. Smith, Basic Books, New York (1959).
- 5.-R.W.M. Clouston, Studies in Conservation 2, 170 (1956).
- 6.-N.H. Fletcher and T.D. Rossing, The Physics of Musical Instruments, Springer Verlag, New York (1991).
- 7.-A.H. Benade, Fundamentals of Musical Acoustics, Dover, New York (1990).