

Según la clasificación del Museo, le corresponde el número 124 y está construido de madera de sabino (ahuehuete).

El tallado de este teponaztli, de aspecto completamente arcaico, representa, por su vista superior, una figura humana que abraza con piernas y brazos el cuerpo del instrumento, llegando las manos hasta las incisiones longitudinales, por su parte media. La técnica de la ejecución del tallado, su simplicidad y convencionalismo, revelan claramente que se trata de un arte primitivo, razón por la cual pensamos que tal vez este ejemplar sea el más antiguo de todos los que se conocen en nuestros museos y los del extranjero.

Para poderlo medir y examinar tuvimos que quitarle un "tejamanil" que, a manera de tapa, cerraba, por la parte inferior, la caja acústica del instrumento. Produce un intervalo aproximadamente de $\frac{1}{4}$ de tono, con las notas reales LA 5 y SOL sostenido $5 + \frac{1}{4}$ de tono aproximado. El cupo total de su caja acústica es de 15.3662 litros; las longitudes de sus lengüetas valen 220 y 223 milímetros y las superficies de sus secciones de empotramiento 1940 y 2170 milímetros cuadrados, a izquierda y derecha respectivamente (véase lám. 10).

3.—TEPONAZTLI DEL MUSEO MICHOACANO

Durante el mismo mes de diciembre y por galantería del Sr. ingeniero Luis Estrada Madrid, la Academia de Música Mexicana obtuvo fotografías y medidas directas del instrumental precortesiano existente en el Museo Michoacano de la ciudad de Morelia. Un solo ejemplar de teponaztli posee este museo. Sus datos son los siguientes:

Carece de talla y posee buenos sonidos y muy buena sonoridad. Su conservación puede calificarse de buena y se le ve representado en la parte inferior de la lám. núm. 10 y en la fotografía núm. 34. Según la clasificación del Museo le corresponde el núm. 122 del Departamento de Arqueología. Procede del Pueblo de Charo, Mich. y es de madera de nogal o mezquite. No fué posible determinar con precisión los sonidos que produce; las longitudes de sus lengüetas valen 232 y 235 milímetros, siendo su cupo total de 6.0824 litros.

CAPITULO VI

TEORIA ACUSTICA DEL TEPONAZTLI

No existe, que nosotros sepamos, una teoría acústica respecto al teponaztli. Por primera vez se expone en este estudio un ensayo para justificar el funcionamiento acústico y musical de este singular instrumento que fué usado con fines musicales por nuestros aborígenes.

Nuestro ensayo se basa y justifica en las dimensiones y datos que nos ha entregado el estudio de los 14 teponaztlis que se conservan actualmente

en el Museo Nacional de Arqueología, Historia y Etnografía y cuyos resultados consignamos en las columnas del Cuadro que se anexa en la lám. VIII. Es claro que las conclusiones teóricas que sentamos se apoyan sobre esos mismos datos, ya sea que se juzgue de los instrumentos en sus dimensiones y proporciones reales, o que éstas se estimen como un resultado que la práctica dió a los constructores aborígenes para poder cumplir con las leyes naturales que gobiernan la producción acústica del sonido, y cuyas leyes, que manejaron empírica y prácticamente, pues de otro modo no se explica la construcción de flautas, teponaztlis y ocarinas, desconocieron en la forma generalizada —ya hecha técnica— en que la física contemporánea las expone.

Antes de entrar en materia y con objeto de justificar los procedimientos de medición que hemos empleado en este trabajo, seanos permitido exponer, con toda reserva, el método que, según nuestro parecer, fué seguido por nuestros aborígenes para la construcción de sus teponaztlis.

Ya cortado el tronco o rama de árbol, en las debidas proporciones, puesto a secar y despojado de su corteza, se procedía a construir la caja acústica valiéndose de hachas de cobre y navajas de obsidiana, desbastando la madera cuidadosamente, (exámítese, por ejemplo, la caja del teponaztli que hemos llamado de "palo de rosa") hasta dejar, con un espesor aproximado al definitivo, la zona superior en que deben quedar construídas las lengüetas formando un solo cuerpo con el teponaztli. En estas condiciones, y señalado el lugar de las lengüetas, se hacían en él varias perforaciones con agujas de cobre, probablemente calentadas al rojo, atravesando la zona de las lengüetas en los puntos principales de las tres incisiones de que ya se habló en la descripción del instrumento; corroboran esta opinión las huellas perfectamente visibles que la perforación de las agujas dejó en todos y cada uno de los 14 ejemplares examinados, pudiéndose citar como ejemplo clarísimo el teponaztli de Macuilxochitl, en el que se ven 14 huellas de perforaciones de aguja, distribuídas simétricamente: 4 en las extremidades de los dos empotramientos (véase fig. 2: a, b, c, d); 2 en la incisión transversal (e, f) y 8 más (g) distribuídas con simetría en ambos lados de los tercios de las dos lengüetas. Hechas las perforaciones con las agujas, se hacían las incisiones "aserrando" la madera por medio de un cordel, probablemente de ixtle torcido, que, pasando por la perforación (e, por ejemplo) subía y bajaba tirando de él alternativamente por sus puntas, hasta unir una perforación con otra, como lo prueban las huellas de las extremidades de los empotramientos, principalmente en los teponaztlis que hemos llamado del "Cuauhtli-Ocelotl" y de los "Rostros Mutilados". Después, ya construídas las lengüetas, se adelgazaban éstas haciendo variar su sección de empotramiento y su volumen hasta llegar, a juicio del oído, a establecer el intervalo deseado. La decoración y el tallado del teponaztli, cuando existen, se hacían probablemente con posterioridad a las operaciones descritas.

1020005536

Como se comprende, usando esta técnica de construcción (hachas, agujas de cobre y cordel de ixtle), no es posible hacer variar la longitud, la sección de empotramiento y el volumen de las lengüetas, con la precisión que exigen las leyes teóricas; debemos, pues, en todos los casos, dar un margen de tolerancia a la comparación entre los resultados que exige la teoría y aquellos que entrega la realidad.

En esa virtud, para medir las longitudes de las diversas partes de los teponaztlis que se estudian, hemos aproximado hasta el medio milímetro, pues una mayor aproximación sería inútil e irrisoria, tomando en cuenta los procedimientos de construcción de nuestros aborígenes, ya descritos.

Respecto a la determinación de los sonidos e intervalos, nos hemos valido de un diapason móvil, graduado por medios tonos temperados, aproximando hasta el octavo de tono temperado; de suerte que en las condiciones más desfavorables (longitud de la lengüeta más corta = 97 milímetros) el error de medida en longitud es de más o menos 5 milímetros y el error acústico que se pueda cometer, cuando se calcule un intervalo musical en función de las longitudes de dos lengüetas, será como máximo: $\frac{97 + 0.5}{97 - 0.5} = \frac{97.5}{96.5} = 1.0103$ que es ligeramente menor que el octavo de tono temperado (1.0145), que nos hemos fijado como aproximación máxima en la determinación de los sonidos e intervalos. Así, pues, los errores de cálculo que se cometan en este estudio, comparando longitudes e intervalos musicales, son del mismo orden de magnitud.

La teoría acústica del teponaztli, según nuestro parecer, radica en resolver los problemas del "cupo de aire" o caja acústica y los correspondientes a las lengüetas vibradoras. Dividiremos, pues, nuestro estudio, en dos partes: A.—Caja Acústica y B.—Lengüetas.

A.—CAJA ACUSTICA

El cupo de la caja acústica de cada teponaztli se valuó aplicando la fórmula prismoidal a cada volumen que corresponde a una lengüeta, a partir del eje de la sección transversal; para ello se determinaron las superficies correspondientes a las respectivas secciones transversales sobre las láminas que se acompañan y por medio del planímetro, citado al principio de este estudio. Los resultados obtenidos se consignan en las tres columnas del Cuadro de la lám. VIII en la parte que corresponde a la "CAJA ACUSTICA".

Respecto a la determinación de los sonidos de cada lengüeta, conviene advertir que al sonarlas, por medio de los bolillos, ya sea piano o fuerte, el sonido que produce una sola no es el mismo si se golpea cerca de su extremo libre, o a inmediaciones de su empotramiento, sino que es más alto a medida que nos acercamos a este último; lo que demuestra que varía según la

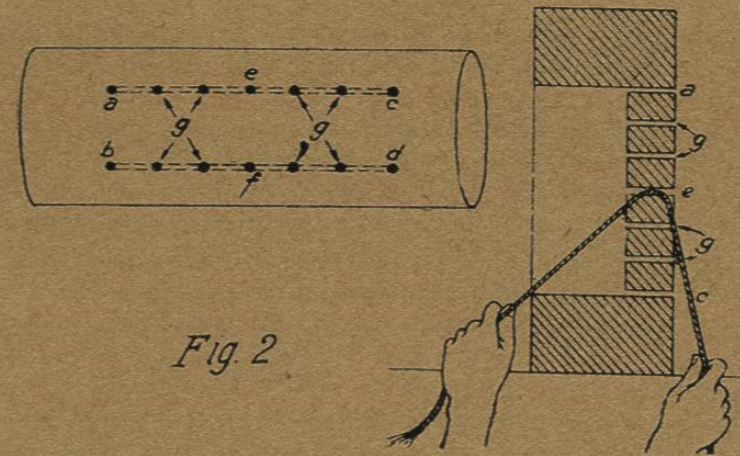


Fig. 2

(o) Fundamental del resonador, (♫) armónicos del fundamental, (♩) sonidos de las lengüetas

Fig. 3

longitud de lengüeta que se elija para dar el golpe. Esta variación llega en algunos casos hasta la tercera menor, es decir, que entre los sonidos de la lengüeta golpeada inmediatamente al empotramiento, e inmediatamente al extremo libre, puede apreciarse el intervalo citado. El fenómeno descrito está de acuerdo con la ley fundamental de las cuerdas, tubos y vergas y a priori podemos afirmar que la frecuencia está en razón inversa de la longitud de las lengüetas.

Por esa razón—y después de numerosas experiencias—, para fijar el verdadero sonido que a cada lengüeta corresponde, tuvimos que aceptar precisamente aquel que refuerza la caja acústica del instrumento, que es el que se oye con más fuerza, claridad y precisión; y esta sola circunstancia pone de manifiesto, con toda claridad, lo importante que es, para la teoría y para la práctica, el estudio de la caja acústica, que funciona como resonador. Según las experiencias que con cada uno de los teponaztlis tuvimos ocasión de hacer, las mejores condiciones en que la caja acústica desempeña su máximo papel de resonador, es decir, cuando se escuchan con más fuerza, claridad y precisión los sonidos de cada lengüeta, tienen lugar:

- 1.—Cuando se golpean las lengüetas a un quinto de su longitud, aproximadamente, contando a partir del extremo libre; y
- 2.—Cuando el teponaztli reposa sobre la tapa superior de un cajón vacío o cuando funciona, apoyado por sus cabezales y con la caja acústica libre.⁽⁶⁾

Estas dos condiciones de máximo aprovechamiento acústico se cumplían en la práctica por los ejecutantes precortesianos. La primera, porque las huellas del uso de los bolillos, en la mayor parte de los ejemplares que examinamos, demuestran que el golpe se daba aproximadamente en el quinto de la longitud de la lengüeta, siendo de advertir que sólo por excepción se usaba una misma lengüeta para obtener dos sonidos distintos, como en el caso del teponaztli que hemos llamado de "Tercera Mayor", cuya sección longitudinal (véase lámina VI) muestra claramente las huellas de los dos lugares golpeados. Y la segunda condición también se cumplía en los tres casos, ya descritos, que se empleaban para ejecutar en el teponaztli: en el primero, porque la rosca de tule trenzado tapaba parcialmente la caja acústica, dejando una lámina de aire entre el instrumento y la tierra, que puede considerarse como "sorda" a la transmisión de las vibraciones sonoras; y en el segundo y tercero, porque su disposición es la que indicamos como la más adecuada.

En teoría, la caja acústica del teponaztli es un resonador; sólo que en la práctica este resonador, con respecto a la fuente sonora, presenta una disposición especialísima.

Toda fuente sonora —cualquiera que sea el procedimiento que se siga

(6) De ahí la importancia que tiene el estudio del teponaztli de Xico, que precisamente se encuentra en las condiciones del punto 2 y que desgraciadamente, como ya dijimos, no hemos tenido ocasión de examinar.

para engendrar el sonido—, crea una *onda estacionaria*, es decir, “un movimiento complejo del aire que, sin contradicción, puede no suministrar una *onda progresiva*”⁽⁷⁾. Si suponemos que esté localizado el movimiento del aire en una zona esférica de la fuente sonora y le acercamos un resonador apropiado, la onda, casi estacionaria, se transforma en progresiva, es decir, que el “sonido se refuerza a lo lejos, no por aumento de la energía de la fuente sonora, sino por transformación de su modo de empleo: en lugar de permanecer cerca de la fuente sonora, transformándose lentamente en calor, la onda se desprende de la fuente sonora...”

En general, dos son las condiciones fundamentales que implica el empleo de un resonador: A.—Que su cupo de aire sea precisamente el apropiado para reforzar el sonido de la fuente sonora; y B.—Que su orificio de recepción esté colocado dentro de la *zona estacionaria*.

Suponiendo que se cumpla con la primera condición, en los aparatos de experimentación y en los instrumentos musicales que conocemos se procura que el orificio del resonador esté colocado lo más cerca posible de la fuente sonora y, claro está, dentro de la zona de la onda estacionaria; ahora bien, en el caso del teponaztli —y esta es su característica especialísima—, la *fente sonora* (lengüeta) está colocada precisamente en el plano que limita al orificio del resonador (caja acústica), es decir, que en este instrumento, mejor que en ningún otro, se realiza el ideal teórico de los resonadores.

Como la frecuencia de un sonido es independiente de la forma que tenga el resonador, la teoría (Bouasse) entrega la siguiente relación para un orificio cualquiera:

$$N = \frac{V}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{S}{U}}} \sqrt{\frac{V}{u}}$$

En la que:

N = número de vibraciones del resonador.

V = velocidad del sonido.

S = sección del orificio del resonador.

U = volumen del resonador.

Para V = 340 mts. = 34000 cm. se tiene:

$$N = 5750 \sqrt{\frac{\sqrt{S}}{U}}$$

Ahora bien, según las experiencias de Sondhauss (Bouasse. Obra citada, pág. 414), que son las que más se asimilan al caso del teponaztli, (orificio rectangular) la relación establecida por la teoría responde a la fórmula práctica:

$$N = 5240 \sqrt{\frac{\sqrt{S}}{U}} \quad (1)$$

(7) H. Bouasse. “Tuyaux et Résonateurs”. Cap. XI. Págs. 403 y siguientes.

que será la que nosotros utilicemos para el cálculo del número de vibraciones del sonido fundamental del resonador en el caso de los teponaztlis que se estudian.

1.—TEPONAZTLI DE TLAXCALA

De los datos tomados directamente y de los calculados que obran en el Cuadro de la lámina VIII y en el dibujo de la lámina 1, se tiene:

Volumen del resonador = U = 1.640 dm. cubs. = 1640.00 cm. cubs.

Superficie del orificio = S = 6.1 x 30.6 = 186.66 cm. cuds.

Designado por n y n' al número de vibraciones de las lengüetas izquierda y derecha, respectivamente, tendremos, tomando como base el LA 5 de 870 vibraciones:

Sonido de la lengüeta izquierda = SOL 5 + ¼ de tono;

n = 775 x 1.0293 = 797.71 vibs.

Sonido de la lengüeta derecha = SI bemol 5 + ¼ de tono.

n' = 797.71 x 1.1892 = 948.64 vibs.

Sustituyendo en la fórmula (1) la frecuencia del resonador será:

$$N = 5240 \times \sqrt{\frac{\sqrt{186.66}}{1640.00}} = 477.88 \text{ vibs.}$$

Y los intervalos entre los sonidos de las lengüetas y el que produce el resonador valen:

n/N = 797.71 ÷ 477.88 = Una sexta mayor ligeramente más alta en 1/64 de tono temperado.

n'/N = 948.64 ÷ 477.88 = 1.9851 = 1 octava baja en 1/16 de tono temp.

Como se ve, las respectivas diferencias se encuentran dentro del límite de la tolerancia que nos hemos fijado (1/8 de tono temperado) y podemos y debemos considerar que, teórica y prácticamente, *el resonador refuerza a la octava* (armónico 2) *al sonido alto, que produce la lengüeta derecha y a la sexta mayor al sonido bajo, que entrega la lengüeta izquierda.*

Los resultados entre la teoría y la realidad pueden calificarse de perfectos; y pasma la exactitud alcanzada por el constructor aborigen de este teponaztli, que solamente pudo emplear la técnica de construcción ya descrita.

Si representamos por una “redonda” el sonido fundamental del resonador, por “corcheas” los primeros armónicos que genera y por “negras”, en trémolo, los sonidos que producen las lengüetas, el funcionamiento acústico y musical de este instrumento se representa con toda claridad en el ejemplo 1 de la Fig. 3.

Aplicando la misma secuela de cálculo para los otros 13 teponaztlis, tendremos:

2.—TEPONAZTLI DE MALINALCO

$$U = 10151.10 \text{ cm. cubs.}$$

$$S = 47.00 \times 8.00 = 376.00 \text{ cm. cuads.}$$

$$LA 4 + \frac{1}{4}; n = 435 \times 1.0293 = 447.74 \text{ vibs.}$$

$$MI 5 + \frac{1}{4}; n' = 447.74 \times 1.4983 = 671.61 \text{ vibs.}$$

$$N = 52.40 \times \sqrt{\frac{376.00}{10151.10}} = 228.99 \text{ vibs.}$$

$$n/N = 447.74 \div 228.99 = 1.9553 = 1 \text{ Octava baja en } 3/16 \text{ de tono.}$$

$$n'/N = 671.61 \div 228.99 = 2.9329 = 1 \text{ Octava más 1 Quinta baja en } 3/16 \text{ de tono temp. (1.4664).}$$

Como se ve, la discrepancia de los $3/16$ es mayor en $1/16$ que la tolerancia aceptada ($1/8$). Sin embargo, el instrumento puede considerarse como perfecto, porque sus notas, aumentadas en $1/4$ de tono, al sonarlo nos parecieron ligeramente más altas, pero sin llegar a los $3/8$; y en estas condiciones, el numerador de las últimas fracciones aumenta y al discrepancia entre la teoría y la práctica queda dentro de los límites asignados.

Es importante hacer notar que el resonador de este teponaztli responde a las mejores condiciones acústicas, pues su fundamental refuerza a la octava (armónico 2) al sonido grave de su lengüeta izquierda y a la dozava (armónico 3) al sonido alto de su lengüeta derecha, como puede verse en el ejemplo 2 de la Fig. 3.

3.—TEPONAZTLI DE CABEZA DE CIPACTLI (MEXICO)

$$U = 10843.20 \text{ cm. cubs.}$$

$$S = 45.00 \times 9.20 = 414.00 \text{ cm. cuads.}$$

$$LA 5 + \frac{1}{8}; n = 870 \times 1.01454 = 882.65 \text{ vibs.}$$

$$RE 5 + \frac{1}{8}; n' = 882.65 \times \frac{2}{3} = 588.43$$

$$N = 5240 \times \sqrt{\frac{414.00}{10843.20}} = 226.89 \text{ vibs.}$$

$$n/N = 882.65 \div 226.89 = 3.8902 = 2 \text{ Octavas bajas (1.9451) en } \frac{1}{4} \text{ de tono ligeramente alto.}$$

$$n'/N = 588.43 \div 226.89 = 2.5934 = 1 \text{ octava más 1 cuarta baja (1.2967) en } \frac{1}{4} \text{ de tono ligeramente alto.}$$

La discrepancia es el doble de la tolerancia. El resonador refuerza a la doble octava (arm. 4) al sonido alto del teponaztli, mientras que el sonido bajo es un armónico alejado de la serie ascendente, abatido en varias octa-

vas. Por otra parte y considerando la serie descendente, el sonido bajo es el armónico 3 (descendente) reforzado a la octava. Véase el ejemplo 3 de la Fig. 3.

4.—TEPONAZTLI DE MACUILXOCHITL

$$U = 14301.00 \text{ cm. cubs.}$$

$$S = 55.80 \times 9.40 = 524.52 \text{ cm. cuads.}$$

$$N = 5240 \times \sqrt{\frac{524.52}{14301.00}} = 209.60 \text{ vibs.}$$

Las notas que escuchamos en este teponaztli fueron LA $5 + 1/16$ y SOL $5 - 1/8$, es decir, que su intervalo es de 1 tono $+ 3/16$. En los estudios emprendidos por la Academia de Música Mexicana respecto al instrumental precortesiano, esta es la primera ocasión que nos encontramos con un intervalo que se separa tanto de lo normal, pero debemos advertir que la conservación de este instrumento, que desde el punto de vista arqueológico hemos calificado de "regular", es apenas aceptable desde el que se refiere a sus sonidos, debido, probablemente, a las rajaduras que se notan en sus cabezales y en el cuerpo de su caja. En esa virtud y tomando en cuenta su procedencia netamente azteca, consideramos que su intervalo primitivo fué de segunda mayor:

$$LA 5 - \frac{1}{8}; n = 435 \times 1.97132 = 857.52$$

$$SOL 5 - \frac{1}{8}; n' = 387.50 \times 1.97132 = 763.88$$

$$n/N = 857.52 \div 209.60 = 3.6444 = 2 \text{ octavas más (1.0269) } \frac{1}{4} \text{ de tono ligeramente bajo.}$$

$$n'/N = 763.88 \div 209.60 = 3.6444 = 2 \text{ octavas menos (1.8222) 1 tono más } \frac{1}{4} \text{ de tono ligeramente alto.}$$

La discrepancia es el doble de la tolerancia. El resonador refuerza teóricamente a la doble octava (arm. 4) al sonido más alto del instrumento, como puede verse en el ejemplo 4 de la fig. 3.

5.—TEPONAZTLI DE CABEZA DE CIPACTLI. NÚM. 7

$$U = 5431.60 \text{ cm. cubs.}$$

$$S = 41.00 \times 6.90 = 282.90 \text{ cm. cuads.}$$

$$SOL 5; n = 775.00.$$

$$SI bemol 5; n' = 775 \times 1.1892 = 921.63.$$

$$N = 5240 \times \sqrt{\frac{282.90}{5431.60}} = 291.34 \text{ vibs.}$$

$$n/N = 775.00 \div 291.34 = 2.6601 = 1 \text{ octava más (1.3300) 1 cuarta ligeramente baja.}$$