

Q TESIS
MAY
19000000



UNIVERSIDAD DE SEVILLA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE SEVILLA
NEGOCIADO DE TESIS

Queda registrado este Título de Doctor al
folio 130 número 210 del libro
correspondiente.

Sevilla, **03 OCT. 2000**

El Jefe del Negociado

**COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE ESPACIOS
CUBIERTOS CON ESTRUCTURAS TEXTILES**

FLAVIO MAYA SIMÕES

Sevilla, 2.000

R.34831



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
ARQUITECTURA**

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS I

**COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE ESPACIOS
CUBIERTOS CON ESTRUCTURAS TEXTILES**

Tesis que presenta el Arquitecto
Flavio Maya Simões
para optar al grado de Doctor
Arquitecto.

Sevilla, 4 de septiembre de 2000.

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
ARQUITECTURA**

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS I

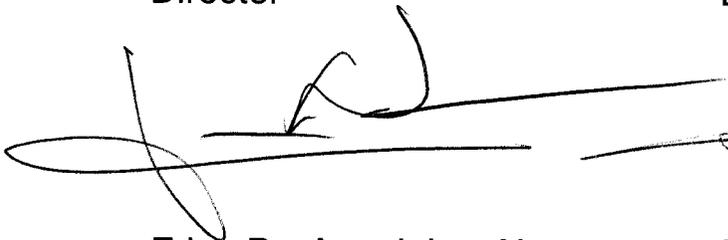
**COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE ESPACIOS
CUBIERTOS CON ESTRUCTURAS TEXTILES**

Tesis que presenta el Arquitecto Flavio Maya Simões para optar al grado de Doctor Arquitecto.



Fdo. Flavio Maya Simões

Director



Fdo. Dr. Arq. Jaime Navarro
Casas

Director



Fdo. Dr. Arq. Juan José Sendra
Salas

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud al Dr. Félix Escrig Pallarés, por iniciarme en el campo de las Estructuras Textiles.

Al Dr. Arquitecto Jaime Navarro Casas por darme la oportunidad de venir a este Departamento para realizar este trabajo, y por la especial atención y dedicación que ha puesto en mi formación investigadora.

Al Dr. Arquitecto Juan José Sendra Salas, por su amabilidad y disponibilidad en todo momento, por la orientación científica de mi trabajo y el empeño que ha puesto para que fuera posible su conclusión.

A los Doutores Teófilo Zamarreño, José Algaba y Francisco Nieves, por la gran simpatía y paciencia que han mostrado tener conmigo, y su inestimable ayuda en las mediciones realizadas en Sevilla.

A Juan Emilio, Miguel y Vicente, por su buena disposición en ayudarme en todo momento.

A todos los amigos que he hecho en España, a los que no nombro pero no olvido.

Al CNPq – *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico*, Brasil, por el apoyo en la consecución de este trabajo.

A la Sociedad de Educación *Ritter dos Reis*, Brasil, por el apoyo en la conclusión de este trabajo.

A Vera, por el incentivo y paciencia en todos los momentos.

A mis padres

A mis hermanos Luiz (en memoria)

Carlos

Sergio (en memoria)

A mi hija Aline

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.	6
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.	11
CAPÍTULO 2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO EN ESPACIOS CUBIERTOS CON ESTRUCTURAS TEXTILES.	33
CAPÍTULO 3. FIJACIÓN DE HIPÓTESIS DE PARTIDA Y METODOLOGÍA.	52
3.1 Definición del campo de actuación de este estudio y su extensión.	52
3.2. Aspectos considerados.	52
3.2.1. Absorción sonora: materiales absorbentes y coeficientes de absorción.....	52
3.2.2. Absorción del aire.....	54
3.2.3. Reverberación	56
3.2.3.1. Tiempo de reverberación	56
3.2.3.2. Tiempos de reverberación óptimos	57
3.2.3.3. Curvas tonales	62
3.2.4. Inteligibilidad de la palabra	62
3.2.5. Distribución sonora.....	63
3.2.5.1. Campo sonoro directo y reverberado	63

3.2.5.2. Teoría Ondulatoria y Acústica Geométrica.....	66
3.2.5.3. Trazado de rayos (<i>ray tracing</i>)	68
3.3 Metodología a seguir.....	69
CAPÍTULO 4. ESTUDIO DE LA ABSORCIÓN SONORA DE LAS CUBIERTAS TEXTILES.....	71
CAPÍTULO 5. MEDICIONES ACÚSTICAS REALIZADAS IN SITU PARA LA EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS. 97	
5.1. Descripción y Justificación del método de medida	97
5.1.1. Mediciones en Sevilla	97
5.1.1.1. Reverberación.....	97
5.1.1.2. Inteligibilidad	98
5.1.1.3. Distribución Sonora y Ruido de Fondo.....	100
5.1.2. Mediciones en Porto Alegre.....	101
5.1.2.1. Reverberación.....	101
5.1.2.2. Ruido de fondo:.....	102
5.1.3. Coeficientes de absorción:.....	102
5.1.4. Modelo informático:	103
5.1.4.1. Reverberación.....	103
5.1.4.2. Inteligibilidad	104
5.1.4.3. Acústica Geométrica:	105

5.2. Mediciones acústicas en espacios cubiertos con estructuras textiles:	106
5.2.1. Palenque, el parasol de la lluvia.	106
5.2.1.1. Reverberación.....	113
5.2.1.2. Inteligibilidad:	115
5.2.1.3. Distribución Sonora:.....	115
5.2.1.4. Ruido de fondo:.....	115
5.2.1.5. Coeficientes de absorción:.....	116
5.2.1.6. Modelo Informático:.....	117
5.2.2. Apeadero del Alta Velocidad Española en EXPO-92..	119
5.2.2.1. Reverberación.....	124
5.2.2.2. Inteligibilidad	126
5.2.2.3. Distribución Sonora.....	126
5.2.2.4. Ruido de Fondo	126
5.2.2.5. Coeficientes de absorción	127
5.2.2.6. Modelo Informático:.....	128
5.2.3. Pabellón Ambiente – 92 en la EXPO-92.....	129
5.2.3.1. Reverberación.....	132
5.2.3.2. Inteligibilidad	134
5.2.3.4. Ruido de fondo.....	136

5.2.3.5. Coeficientes de absorción.....	137
5.2.3.6. Modelo Informático.....	139
5.2.4. Piscina Cubierta, Polideportivo San Pablo, Sevilla.	144
5.2.4.1. Reverberación.....	149
5.2.4.2. Inteligibilidad	151
5.2.4.3. Distribución sonora	152
5.2.4.4. Ruido de fondo.....	152
5.2.4.5. Coeficientes de Absorción.....	152
5.2.4.6. Modelo Informático.....	153
5.2.5. Auditorio Araujo Vianna, Porto Alegre.	160
5.2.5.6. Modelo Informático.....	173
5.3. Análisis de los Resultados	183
5.3.1. Reverberación:	183
5.3.2. Inteligibilidad:.....	185
5.3.4. Ruido de fondo	187
5.3.5. Coeficientes de absorción.....	188
CAPÍTULO 6 - CORRECCIÓN ACÚSTICA DEL AUDITORIO ARAUJO VIANNA.....	190
6.1. Tiempo de Reverberación	194
6.2. Inteligibilidad de la Palabra	204

6.3. Acústica Geométrica:	206
6.4. Ruido de fondo:.....	208
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES. BASES PARA EL DISEÑO ACUSTICO EFECTIVO DE LOS ESPACIOS CUBIERTOS CON ESTRUCTURAS TEXTILES.	212
BIBLIOGRAFIA	217
ÍNDICE DE FIGURAS	225
ANEXO 1. DOCUMENTACIÓN GRÁFICA DISPONIBLE DE PROYECTOS DE LOS EDIFICIOS ESTUDIADOS.....	243

INTRODUCCIÓN.

La Acústica de Salas es probablemente, para un arquitecto, la parte más interesante de la ciencia de los sonidos. Su desarrollo histórico abarca una gran variedad de enfoques culturales, oscilando del puro misticismo a la claridad de visión. La moderna acústica de los recintos se estudia utilizando métodos refinados de análisis de su comportamiento, que permiten alcanzar un alto grado de exactitud.

Aunque desde Sabine a la Acústica de Salas se la puede catalogar como a una ciencia, no tenemos que entenderla como "exacta" pues está muy relacionada con la percepción, en este caso auditiva, sujeta pues a diferentes criterios que pueden no ser "exactamente" los mismos para los especialistas. Como ejemplo, podemos citar un aspecto tan importante como el tiempo de reverberación "óptimo", para el que se dispone de varias formas de predicción de acuerdo con el uso final del espacio.

Bajo la denominación de "estructuras ligeras para grandes luces" podemos nombrar los cascarones, las estructuras espaciales, de aspas articuladas, neumáticas o hinchables, y las cubiertas textiles tensionadas. En éstas, las cubiertas textiles tensionadas, centraremos nuestro estudio, debido a la gran difusión que han tenido en los últimos años en varios eventos, temporales o semi-permanentes y ferias internacionales, como forma de cubrir los más diversos espacios destinados a acoger multitudes.

Algunos ejemplos de las muchas posibilidades de aplicación son los siguientes:

- Grandes eventos (German Garden Exhibition, 1989, Frankfurt).
- Grandes ferias (Expo 86, Australia; Expo-92, Sevilla).
- En el deporte, (gimnasios, cubiertas de grandes superficies y piscinas).
- Cubiertas de teatros y auditorios al aire libre.
- Circos.
- Actividades relacionadas con el turismo.
- Protección del sol y de la lluvia, de calles, veladores y terrazas.

La aparición de materiales sintéticos durables y resistentes y la utilización del ordenador en el análisis de formas complejas, han propiciado recientemente el empleo de este tipo de estructuras con emplazamientos y destinos muy diversos. Además del efecto producido por la iluminación, hay que tener en cuenta la falta de aislamiento térmico y acústico, de lo cual se deriva una sensación de estar bajo cubierto más que de pasar al interior¹.

El interés creciente que han motivado se manifiesta en la aparición de bibliografía especializada y en ser tema de análisis y estudio en congresos internacionales, donde se presentan las realizaciones más destacadas y los avances más significativos.

¹ LLORENS D., J. y SOLDEVILA B., A. Construcciones de lona. *O.N. Diseño*, nº 62, 1985. Pp. 11-32.

Sin embargo, la mayor parte de los trabajos e investigaciones publicados trata preferentemente de aspectos técnicos, tales como la descripción de elementos, detalles constructivos, análisis estructural, estudio de la forma, propiedades mecánicas de los materiales o el modelado con ayuda de ordenador².

Las propiedades acústicas de los materiales flexibles utilizados en estas cubiertas son hasta ahora casi desconocidos por parte de los arquitectos e ingenieros especialistas en ese tipo de estructuras. De ahí que sea un hecho cierto que en la actualidad poco se conoce del comportamiento acústico de los edificios con cubierta textil.

Puesto que al arquitecto se le hace responsable de la buena construcción, en el aspecto integral de su calidad, lo es también del efecto acústico conseguido en recintos cubiertos por este tipo de estructuras.

Entre algunos arquitectos aún predomina la idea de que al autor del proyecto corresponde la definición de los aspectos formales y estructurales, dejando la acústica para que un experto la ajuste por medios electro-acústicos una vez concluida la construcción del edificio, incluida su cubierta. Nada más equivocado, pues basta acercarse a alguna iglesia, a la Estación de Ferrocarriles Santa Justa, al Aeropuerto San Pablo, a la Plaza del Palenque, por citar algunos ejemplos sevillanos, para constatar la mala inteligibilidad de

² MONJO CARRIÓ, J. La arquitectura textil. *Informes de la Construcción*, vol. 36, nº 367, 1985. P. 6.

la megafonía, donde, a pesar de los costosos equipos instalados no se entienden los avisos divulgados.

Dada la magnitud del problema, y ante la ausencia de estudios destacados sobre el mismo, se ha visto la necesidad de realizar un trabajo de investigación que de luz sobre el conocimiento de las condiciones acústicas en estos espacios cubiertos y ofrezca una metodología que permita abordar su acondicionamiento acústico con todo rigor. Esto será el principal objetivo de esta tesis doctoral.

Con el trabajo que aquí se presenta, pretendemos buscar, a través de análisis acústico, formas y tratamientos superficiales, para obtener una mayor eficacia formal y menos problemas arquitectónicos, dentro del campo de estructuras textiles rigidizadas por cables y redes de cables.

También nos proponemos encontrar soluciones económicas para los problemas del acondicionamiento acústico de estos ambientes, y sugerir parámetros de diseño y métodos de análisis del comportamiento acústico.

En este sentido, pretendemos obtener conclusiones en lo referente a:

FORMAS: La apariencia estética, el comportamiento estructural y el comportamiento acústico dependen fundamentalmente de la forma de la estructura. Esa forma tiene una relación directa con los esfuerzos que tendrá que absorber la estructura, pues las reacciones horizontales son inversamente proporcionales a la flecha (la curvatura) que tengan los cables.

MATERIALES: En general las cubiertas textiles están formadas por un entramado de poliéster revestido por PVC. Analizaremos los coeficientes de absorción de este tejido y de otros materiales utilizados en las cubiertas.

TIPOLOGÍAS: Por medio del análisis "in situ" de diversos tipos de espacios cubiertos por estructuras textiles, obtendremos conclusiones sobre el comportamiento acústico en relación a la tipología adoptada.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.

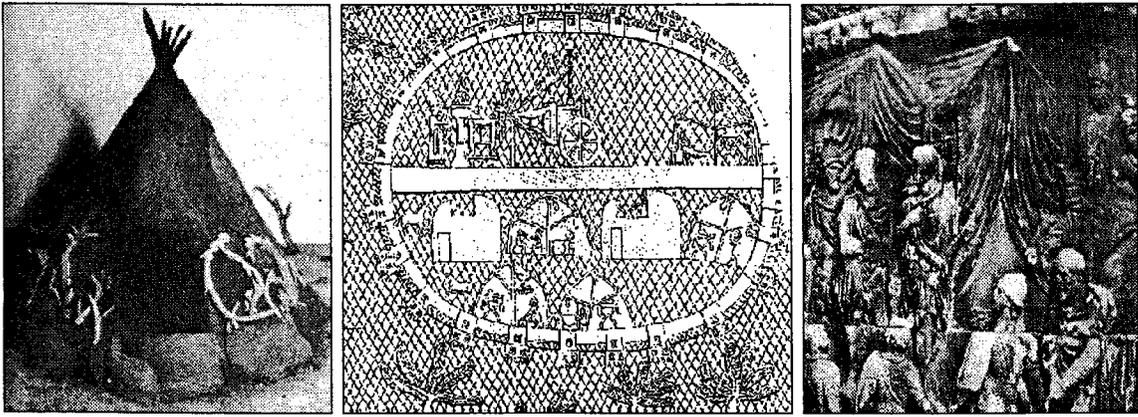
Kronenburg³ señala a los escudos o defensas como las primeras estructuras tensadas hechas por cazadores de hace más de 100.000 años. Como los demás instrumentos o herramientas, estaban fabricados con los subproductos propios de la actividad: pieles, huesos, ramas... Restos de estos simples escudos y construcciones con estructuras de huesos y/o madera cubiertas con pieles han sido encontrados en excavaciones arqueológicas⁴.

Frei Otto y sus colaboradores del Instituto para Estructuras Ligeras, en Stuttgart, Alemania, nos brindan con el libro "Arquitectura Adaptable"⁵, un informe ampliado del Coloquio Internacional del mismo nombre, realizado en la Universidad de Stuttgart, 1974, llamado *IL 14*. En este documento los autores hacen un análisis exhaustivo de los primarios usos de textil y pieles en la arquitectura, desde las excavaciones de campamentos, que datan de 30.000 años, las tiendas en Siberia de los cazadores del Paleolítico de hace 20.000 años (figura 1), las tiendas en las campañas guerreras del rey asirio Senaquerib (705-681 a.J.) (figura 2) y las tiendas militares romanas representadas en un relieve de la columna de Marco (siglo II) de Roma, con barras y lonas tensadas (figura 3).

³ KRONENBURG, R. Tensile architecture. *Architectural Design Profile*, nº 117, Academy Editions, Londres, 1995. P. 9.

⁴ DILLEHEY, T.D. A late ice age settlement in Southern Chile. *Scientific American*, nº 251-4, 1984. Pp. 106-113.

⁵ OTTO, F. et al. *IL 14 / Arquitectura Adaptable*. Barcelona: Gustavo Gili, 1979.



Figuras 1, 2 y 3. Tiendas en la antigüedad.

De la cultura romana, el más interesante y original elemento que, al igual que la tienda, está hecho de tejido, es el *velum* o *velarium*. Según cuentan los escritores romanos, el velum no sólo se tendía sobre los teatros, sino también sobre los patios interiores, calles (como todavía hoy se hace en Sevilla – figura 4) y plazas para proteger al ciudadano contra el viento, la lluvia y el sol. En los documentos que nos han llegado hemos encontrado escasa referencia a la acústica de estos locales cubiertos de esta manera. El anfiteatro de Pompeya (138 x 104 m), el Coliseo de Roma (anfiteatro de Flávio, 185 x 154 m) y los teatros de Orange ($\phi = 102$ m) en Francia y Aspendos en Turquía, Asia Menor ($\phi = 94$ m), estaban provistos de velum. El velum se recogía para protegerlo del viento fuerte y no para disfrutar del cielo azul⁶. Ramelli⁷ nos dice que no se excluye la influencia positiva con la acústica del eventual velarium tensado por encima de la cávea en el teatro de mayor importancia: Teatro de Marcello de Roma ($\phi = 131$ m) (figura 5). El diseño del sistema del velum se basaba en la tecnología de los

⁶ BUBNER, E. Resumen histórico. In OTTO, F. et al. *IL 14 / Arquitectura adaptable*. Barcelona: Gustavo Gili, 1979. P. 28.

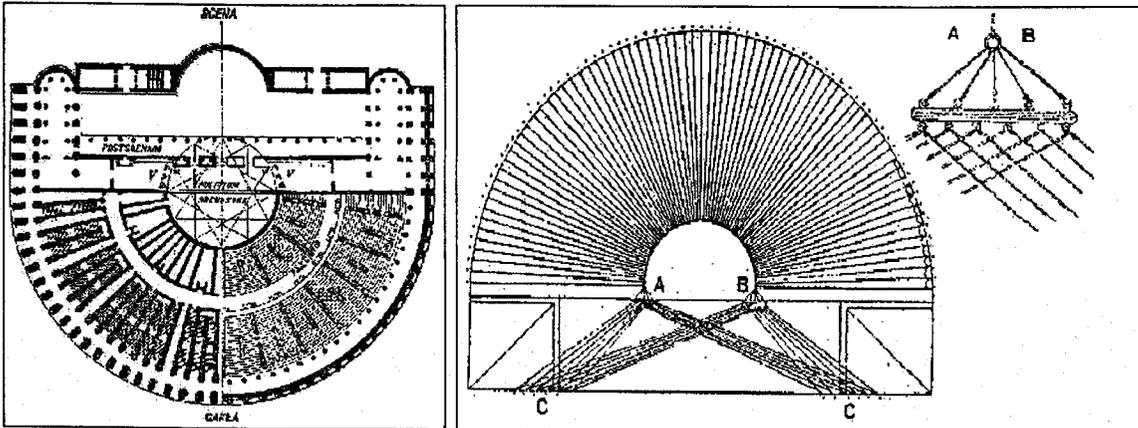
barcos a vela, con mástiles y cables. De hecho solía ser manejado por viejos marineros retirados⁸. En la figura 6 vemos el sistema de tensado del velarium.



Figura 4. Calle de Sevilla, junio de 2.000

⁷ RAMELLI, A.C. *Edifici per gli spettacoli*. Milán: Antonio Vallardi Editore, 1948. P. 12.

⁸ BERGER, H. *Light Structures - Structures of Light: the art and engineering of tensile architecture*. Suiza: Birkhäuser, Basel, 1996. P. 23.



Figuras 5 y 6. Planta y sistema de tensado del velarium. Teatro de Marcello.

Macaulay⁹, en su libro “*City*”, recrea una ciudad romana imaginaria, Verbona, inspirado en las ciudades romanas fundadas entre 300 a.J. y 150 d.J., del cual reproducimos la figura 7, donde se aprecia el velum del teatro y del anfiteatro.

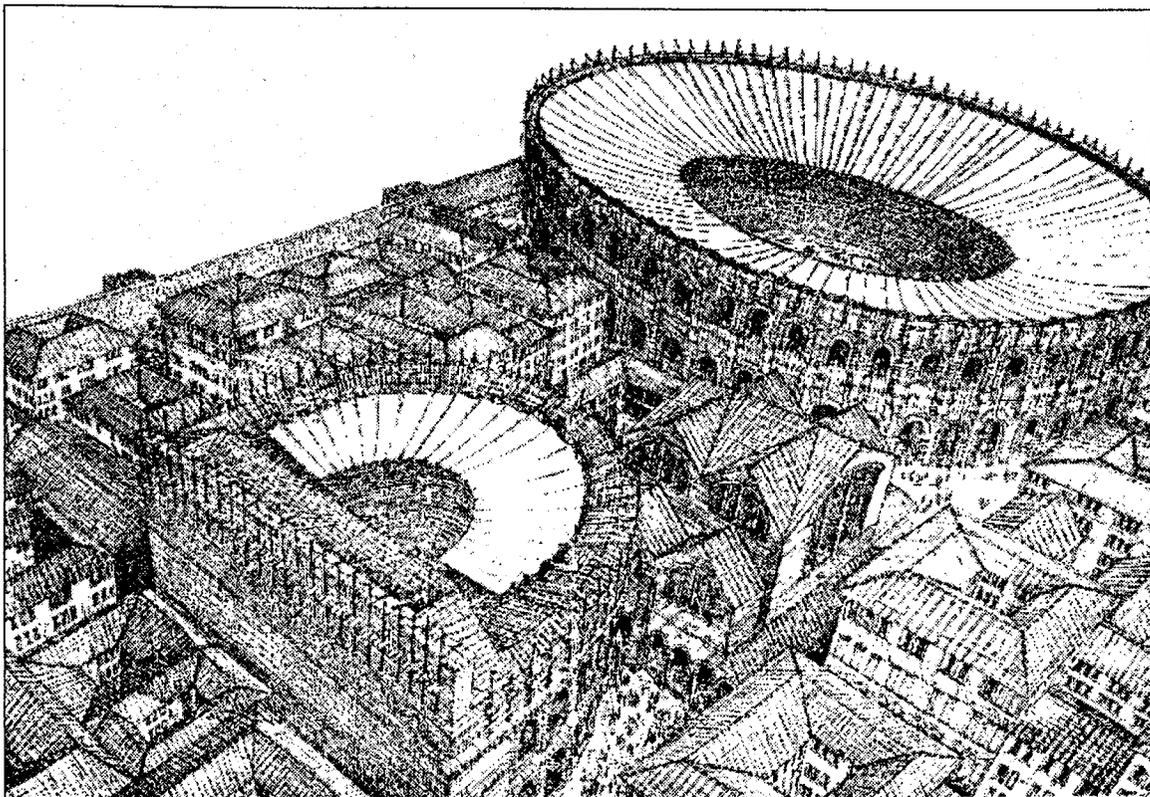
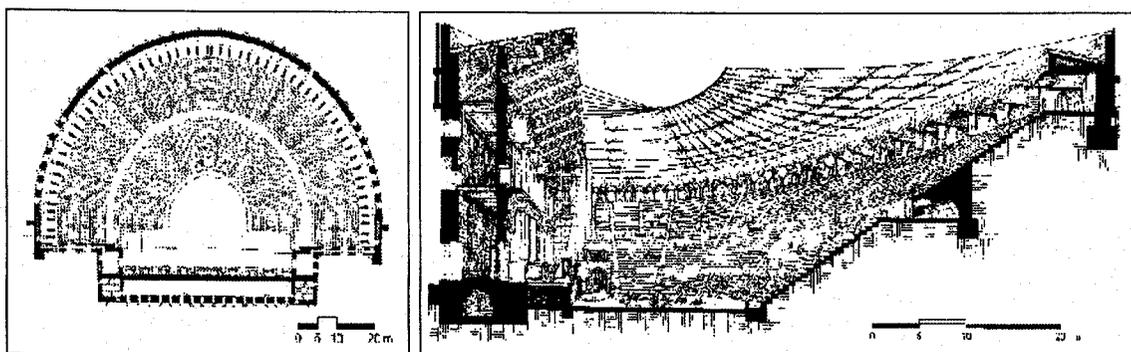


Figura 7. Velum del teatro y anfiteatro romanos.

⁹ MACAULAY, D. *City*, 1974. Edición brasileña: *Construção de uma cidade romana*. São Paulo: Martins Fontes, 1989. P. 51.

Carrión¹⁰ hace referencia, como ejemplo de teatro bien conservado, al de Aspendus, en Turquía, con capacidad para 6.000 espectadores. Con relación a la lona, concluye que, por ser medianamente reflectante, se puede considerar que su presencia no daba lugar a la aparición de reverberación; en cambio, si la lona hubiese cubierto la totalidad del espacio, la reverberación habría impedido su uso como teatro debido a la considerable pérdida de inteligibilidad (figuras 8 y 9).



Figuras 8 y 9. Teatro de Aspendus, planta y sección longitudinal en perspectiva.

Hay una notable ausencia de referencias, en esas civilizaciones antiguas, sobre los problemas y fenómenos llamados hoy de “acústica arquitectónica”. Algunas observaciones de aquel período pueden, sin embargo, ser interpretadas a la luz de los modernos conceptos.

Por citar un ejemplo, la tienda más conocida, cuyo origen data de tres milenios atrás, es la “Tienda de Dios” de los israelitas, que durante sus cuarenta años de éxodo por el desierto vivieron sin

¹⁰ CARRIÓN ISBERT, A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 1998. P. 172.

duda en tiendas. En la Tienda de Dios se guardaba el arca con las Tablas de la Ley¹¹.

Hunt¹² nos hace la siguiente aclaración sobre su acústica: *“Consideremos la descripción del Viejo Testamento de las cortinas de pelo de cabra que serían colgadas en el Tabernáculo. De acuerdo con las especificaciones detalladas en el Éxodo Libro 26, su largo, medido horizontalmente (15.75 x 5.25 metros), supera el perímetro de tal manera que necesariamente tenían que ser colgadas en amplios plegados. Mientras sea impetuoso imputar una motivación acústica para esas exigencias dimensionales, el tratamiento interior conseguido es extrañamente similar a los utilizados en los primeros estudios de radio, donde la reverberación era controlada por colgaduras de hábitos de monjes”*

A lo largo del medievo no hemos encontrado referencias de uso de estructuras textiles que no tengan la finalidad distinta a la protección del sol y lluvia, en campañas militares y organización de festejos, en que el comportamiento acústico resultaba poco relevante. Se trataría así de actuaciones en la misma línea de el saber popular de culturas antiguas. Incluimos aquí, además de los anteriormente nombrados, los toldos de los palacios egipcios¹³, la jaima de los beduinos del desierto (figura 10), la yurta de los mongoles, las tiendas de los tuaregs, gitanos e indios americanos, todavía en uso,

¹¹ BURKHARDT, B. La tienda histórica. In OTTO, F. et al. *IL 14 / Arquitectura adaptable*. Barcelona: Gustavo Gili, 1979. P. 58.

¹² HUNT, F.V. *Origins in acoustics*, Nueva York: Acoustical Society of America, 1992. P. 32.

¹³ LLORENS D., J. y SOLDEVILA B., A. O. C. Pp. 11-32.

por esos pueblos nómadas y el *envelat* en Cataluña¹⁴. Pero apenas hemos encontrado referencias del comportamiento acústico bajo tales construcciones.



Figura 10. Jaima de beduinos en la Expo 92, Sevilla.

Bertold Burkhardt¹⁵ nos cuenta un ejemplo histórico de la vida cortesana del Renacimiento, el famoso *Camp des Draps d'Or* de Calais, en 1520:

“Enrique VIII llegó con 5.000 personas, trescientos caballos y cerca de cuatrocientas tiendas para sus acompañantes. Las tiendas mayores, con aspecto de castillo, contenían lujosas salas para banquetes, habitaciones y una capilla. Este campamento, que representa uno de los mayores derroches de la época, se mantuvo durante tres semanas.”

¹⁴ LLORENS D., J. y SOLDEVILA B., A. *Festa de envelat*. Exposició en Parets del Vallés. Catalunya, 1985.

¹⁵ BURKHARDT, B. O.C. P. 61.

El edificio, de planta circular de 37 metros de diámetro, quedaba cubierto por un techo de lona, soportado por un mástil central de 40 metros y anclado en la parte superior del perímetro construido por paneles de madera, fue destruido por una violenta borrasca de verano¹⁶ (figura 11).

Está claro que todas las estructuras citadas utilizan conocimientos y técnicas navales, adquiridas de los constructores de barcos y marineros. Como ejemplo citamos el Cutty Sark, velero de 1869 con 9.997 m² de velas (figura 12).

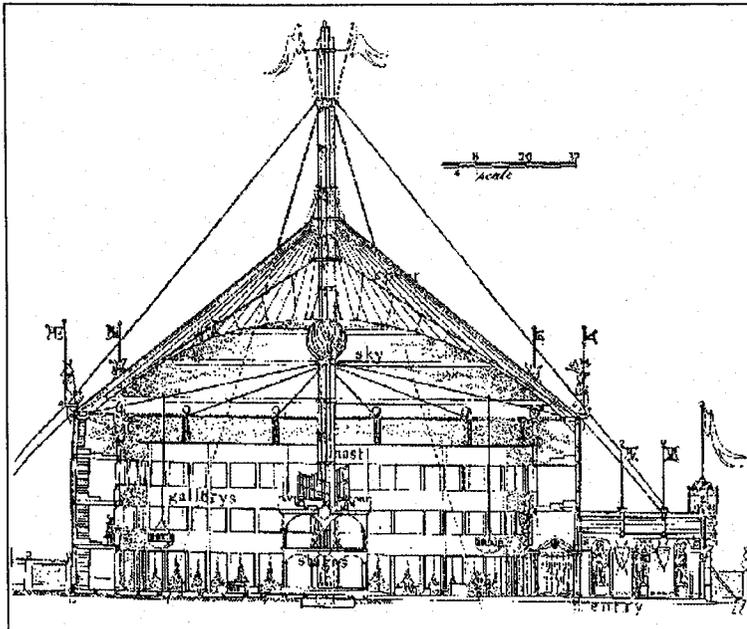


Figura 11. Tienda de banquetes de Enrique VIII en Calais.

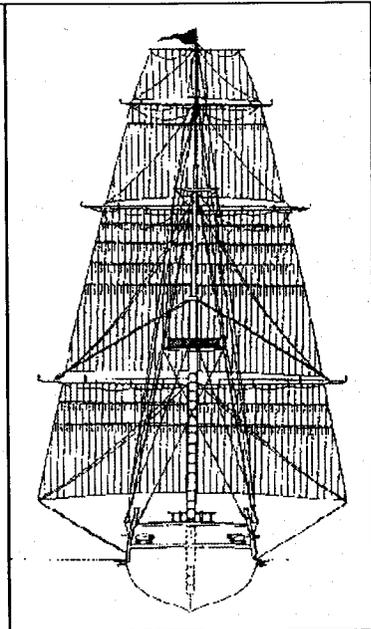


Figura 12. Cutty Sark.

Berger¹⁷ lo aclara:

“Sailing ships provide an unparalleled source of experience with fabric tensile forms and technologies. Sails take on many shapes. Ropes and cables, stays and masts, and the combination of

¹⁶ KRONENBURG, R. O.C. P. 11.

configurations in which these components are arranged, appear in great variety through the long history of naval architecture.”

Oechslin¹⁸, sobre la arquitectura efímera de fiestas del siglo XVIII, comenta la instalación de un techo provisional sobre el patio central del Ayuntamiento de París, para transformar en salón de bailes temporario. Se instalaba en ocasiones muy especiales, como la boda de Louise-Elisabeth de Francia con D. Felipe de España, en 1739 (figura 13), o la boda del Delfín en 1745 (figura 14).

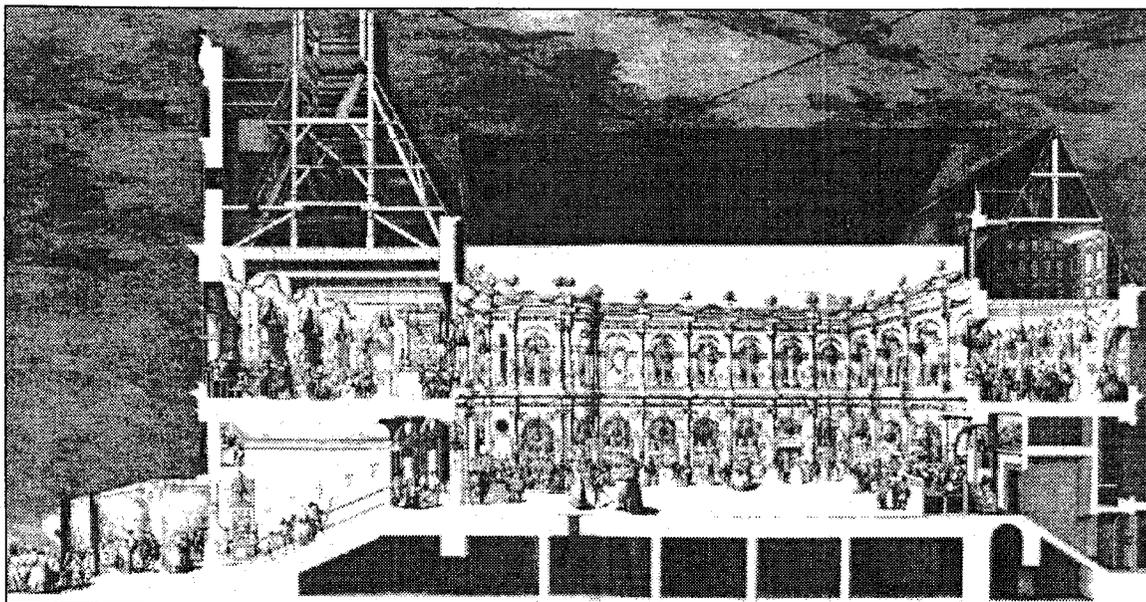


Figura 13. Transformación del patio interior del Ayuntamiento de París, 1739.

No solo las bodas reales, como también las exequias, los cortejos triunfales y las entradas solemnes de Reyes y Papas en las ciudades, hacían de la “Arquitectura de Fiestas” una función oficial del gobierno local.

¹⁷ BERGER, H. O.C. P. 23.

¹⁸ OECHSLIN, W. y BUSCHOW, A. *Architecture de Fête. L'architecte metteur en scène*. Traducción del alemán por Brausch, M. Bruselas: Pierre Mardaga, 1987. P. 43.

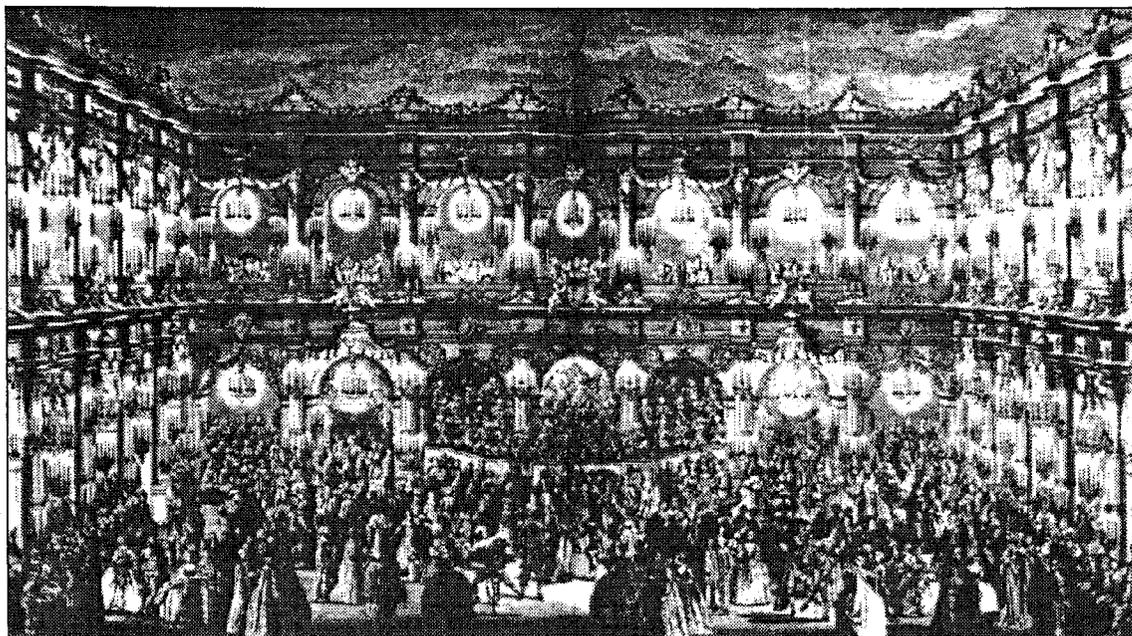


Figura 14. Transformación del patio interior del Ayuntamiento de París, 1745.

En la figura 15 se aprecia la “*Porta Orientale*” de Milán, a 1^{er} de septiembre de 1838, transformada en arco de triunfo estilizado con la ayuda de un baldaquín, para recibir la pareja imperial.



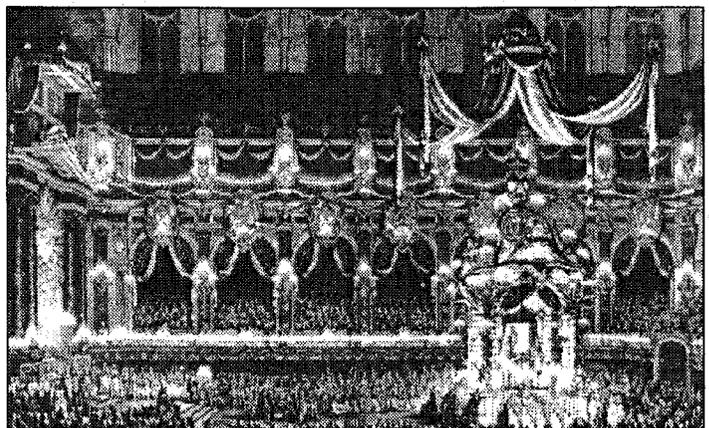
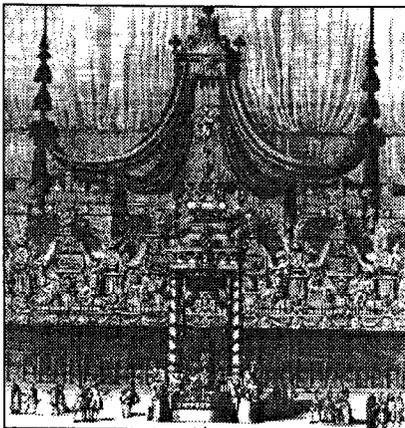
Figura 15. Entrada de la pareja imperial en Milán, en 1838.

Sendra y Navarro¹⁹ nos presentan, en el análisis que realizan sobre la evolución de las condiciones acústicas en las iglesias, diversos

¹⁹ SENDRA SALAS, J.J. y NAVARRO CASAS, J. *La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias del Paleocristiano al Tardobarroco*. Sevilla: IUCC, ETSA, Universidad de Sevilla, 1997. P. 91.

usos de tapices y colgaduras en iglesias y sus efectos en la acústica de estos locales, principalmente en el periodo barroco:

“También podrían considerarse rehabilitaciones acústicas... las operaciones de ornamentación de iglesias, especialmente para las celebraciones religiosas e incluso civiles, festivas o luctuosas (figuras 16 y 17), y que alcanzaron su máximo esplendor en los dos siglos barrocos XVII y XVIII. Esto será ya una constante en los años venideros: la modificación efímera de las características absorbentes de los paramentos, para acomodarlas, sobre todo, a la interpretación musical y coral.... La abundancia de tapices y colgaduras, terciopelos y damascos, además de la profusa decoración general, unido a la gran cantidad de personas, que a su vez iban vestidas con amplias y pesadas telas, no podían sino aumentar notablemente la absorción sonora de esas iglesias, disminuyendo ecos y reverberaciones altas, graves defectos desde un punto de vista acústico”.



Figuras 16 y 17. Decoraciones fúnebres en Notre-Dame de París, 1687 y 1746.

El Palacio de Cristal²⁰ en Sydenham, Londres, de Joseph Paxton, con 540 m de largo, ha sido el primero y mayor palacio de vidrio y hierro destinado a la música (figura 18). Abierto en 1854, con acomodación para orquesta de 4.000 músicos, y un órgano de 4.500 cañones que media 32,9 m de ancho, 42,7 m de altura y 15,2 m de profundidad. El Palacio de Cristal hizo mucho para popularizar la música en gran escala. En el pico de popularidad, en el Festival Handel de 1882, la audiencia totalizó 87.769, con 500 instrumentos y coro de 4.000 voces. En 1913 el edificio se tornó público, continuando con una media de 10 conciertos a la semana hasta la destrucción por un incendio en 1936.

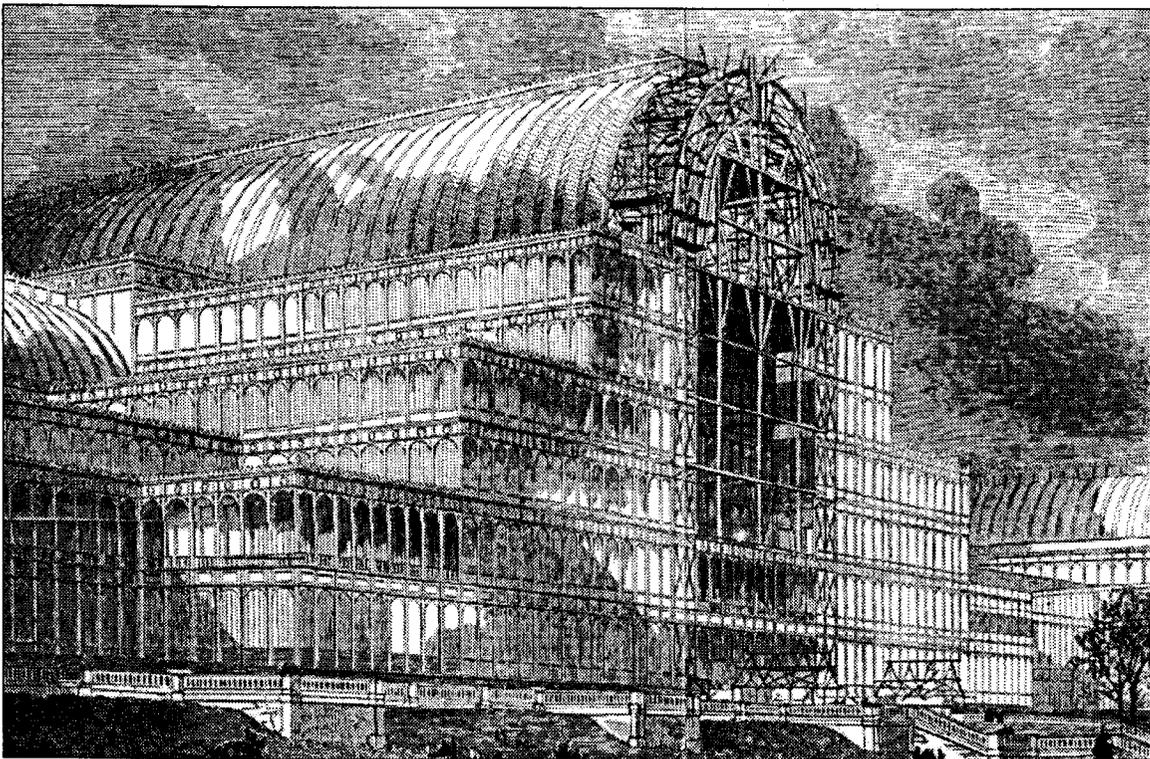


Figura 18. Palacio de Cristal, Londres, 1854.

²⁰ FORSYTH, M. *Buildings for Music: The Architect, the Musician, and the Listener from the Seventeenth Century to the Present Day*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1985. P. 149.

Sobre la acústica del local, Forsyth así lo comenta:

“The huge volume of the Crystal Palace, enclosed by thin, largely sound-transparent glass walls, behaved acoustically almost like the open air and was far from ideal for music written for performance in a conventional building”.

En el primer Festival Handel, de 1857, Charles Greville encontró las actuaciones de *Messiah* y *Israel in Egypt* “*amazingly good*”, y sintió que “*the beauty of the locale, with the vast crowds assembled in it, made an imposing spectacle*”, pero en seguida ha escrito que “*the wonderful assembly of 2.000 vocals and 500 instrumental performers did not produce musical effects so agreeable and so perfect as the smaller number in the smaller space of Exeter Hall*”. Acústicamente, “*the volume of sound was dispersed and lost in the prodigious space*”.

Como comentario sobre la acústica de este local, tenemos que considerar que las paredes de vidrio proporcionaban la absorción de los sonidos graves, de bajas frecuencias. La enorme audiencia asociada a la gran cantidad de cortinas y toldos en su interior, como se puede apreciar en la figura 19, proporcionaba la absorción de los sonidos medios y agudos, de frecuencias medias y altas. La gran absorción, en todo rango de frecuencias audibles, hacía con que el local sonase como espacio abierto.

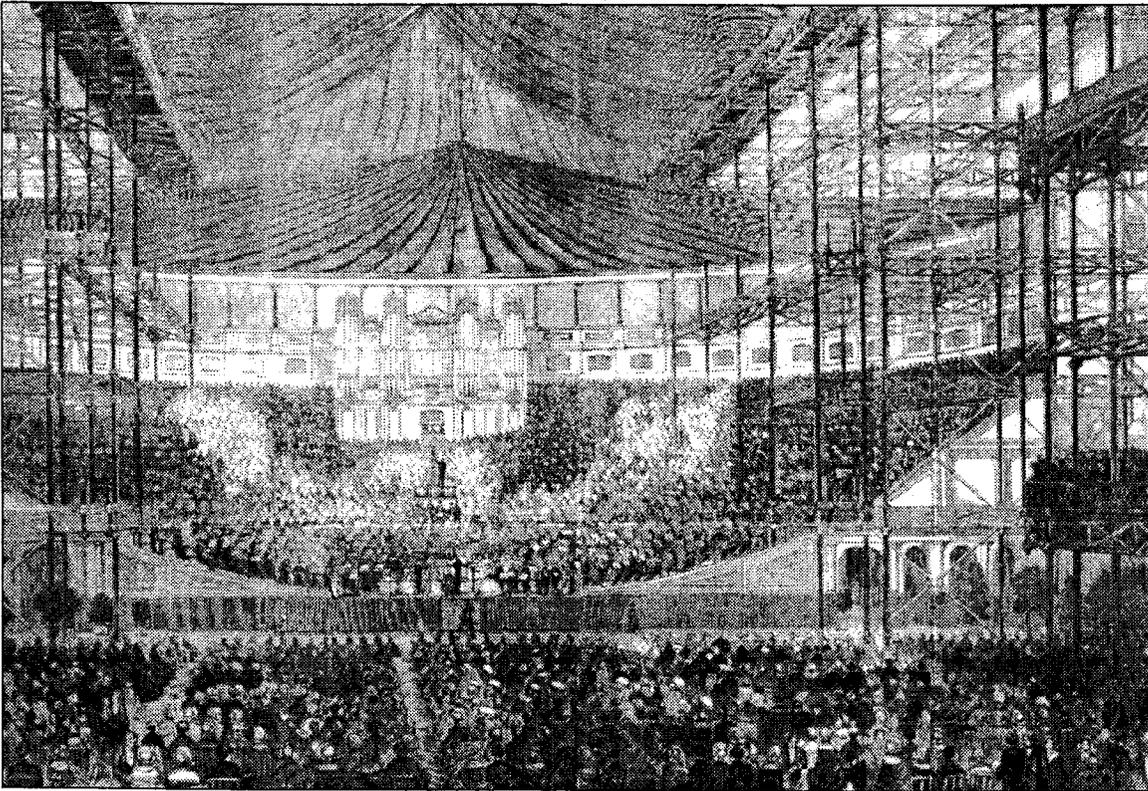


Figura 19. Palacio de Cristal, festival Handel, Londres, 1882.

En 1877 Lord Rayleigh²¹, en su famoso libro *“The theory of sound”*, hace el siguiente comentario sobre la influencia de los tapices y cortinas en la acústica de edificios públicos:

“In connection with acoustics of public buildings there are many points which remain obscure. ... In order to prevent reverberation it may often be necessary to introduce carpets and hangings to absorb sound. In some cases the presence of an audience is found sufficient to produce the desired effect.”

Un tipo de construcción con cubierta textil de gran interés es, sin duda, el circo. Su origen está en los espectáculos ambulantes que

²¹ RAYLEIGH, Lord (J.W.Strut). *The theory of sound*. Londres: Macmillan, 1984, vol. 2. § 287. In BARRON, M. *Auditorium acoustics and architectural design*. Londres: E & FM Spon, 1993. P. 5.

se presentaban con animales y necesitaban de espacios para sus actuaciones. El más conocido era el de Búfalo Bill, que alojaba hombres y animales en grandes tiendas. Al principio las tiendas tenían la forma simple de un paraguas, con un mástil central, como la tienda de banquetes de Enrique VIII, con la desventaja de estar localizado en el centro de atención. Con el objetivo de aumentar la protección de los espectadores y mejorar las visuales, algunos circos utilizan un pórtico metálico que sostiene la lona (figura 20).

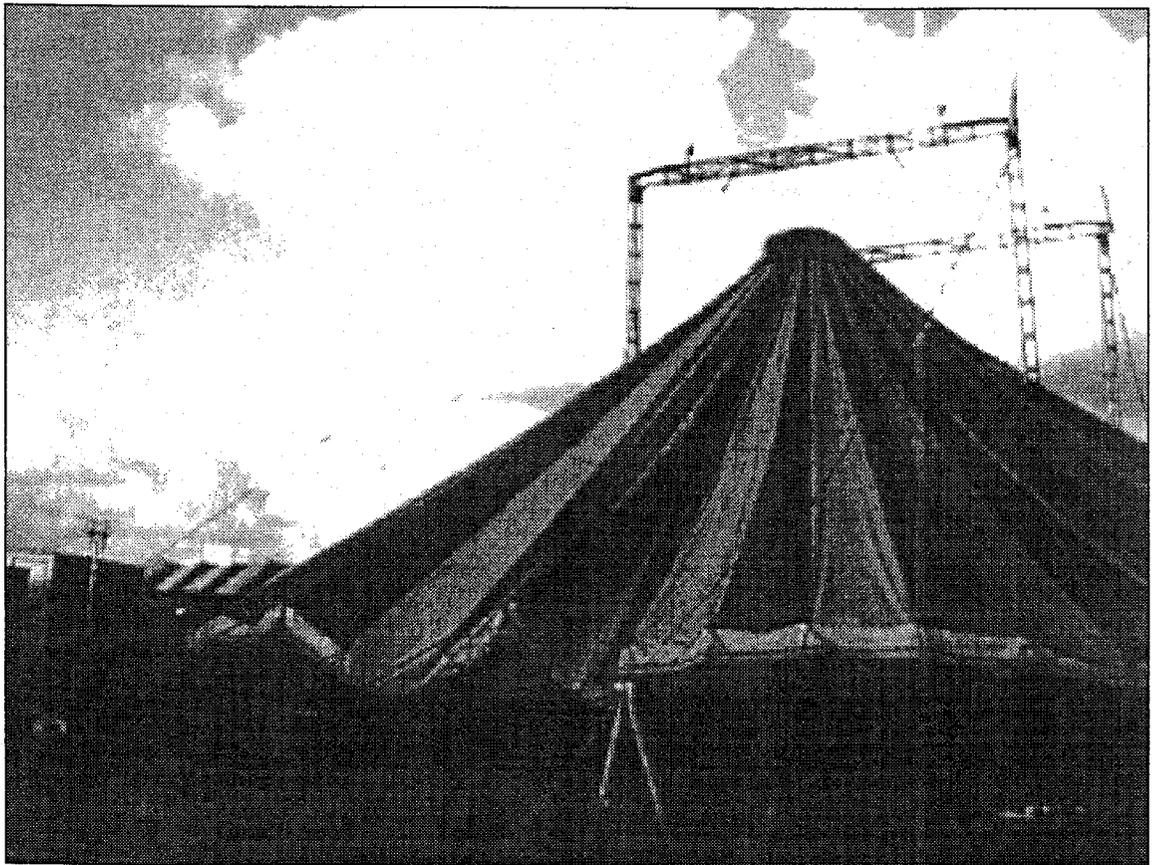


Figura 20. Circo Arlequín, Liverpool, 1995.

En el apogeo de su popularidad, el aforo de los grandes circos llegaba a las 10.000 personas. Entre 1897 y 1902, el circo de *Barnum & Bailey's Greatest Show on Earth* hizo una gira por

Europa en cuatro trenes totalizando 70 vagones²². Además de la escena principal, de 130 x 54 metros, había otros 13 espacios auxiliares, todos transportables y efímeros.

El proyectista ruso V. G. Shookov utilizó la tienda de circo como precedente en la construcción de la Exposición Industrial de 1896 en Nizhiny-Novogorod, el primer ejemplo de arquitectura textil que utiliza elementos de acero en su construcción.

En cualquier caso, y a pesar de los antecedentes históricos señalados, hay pocas referencias a este tipo de construcciones: las cubiertas con estructuras textiles; y son mucho menos aún que hacen alusión a su comportamiento acústico. Llorens y Soldevila²³ lo expresan así:

“Las Historias de la Arquitectura no suelen hacer referencia a la construcción textil. Este tipo de estructuras ha pasado directamente de las soluciones primitivas utilizadas por los pueblos nómadas a las realizaciones de alta tecnología de los últimos veinte años. Las limitaciones de los materiales disponibles sólo permitían la ejecución de construcciones provisionales y efímeras, que no han sido objeto de análisis por falta de permanencia y durabilidad”.

En lo referente a los materiales utilizados para estas cubiertas, Monjo²⁴ nos hace la siguiente aclaración:

²² KRONENBURG, R. O.C. P. 11.

²³ LLORENS D., J. y SOLDEVILA B., A. Características arquitectónicas de las construcciones textiles. *Informes de la construcción*, vol.43, nº 413, 1991. Pp. 23-39.

²⁴ MONJO CARRIÓ, J. O. C. P. 6.

“En un principio fueron las pieles las que constituyeron las membranas que cerraban los espacios habitables, apoyadas sobre entramados leñosos. Más adelante, cuando apareció el tejido, éste sustituyó a la piel como membrana más flexible, de mayor tamaño y de formas y colores más variados, perdurando de ese modo y sin ninguna aportación técnica destacable, hasta la época moderna, variando exclusivamente su tamaño o los materiales de la estructura portante. ... Podemos fijar la década de los años 60 como la que marca la irrupción de estas soluciones de telas colgadas en la Arquitectura Europea, de la mano, en gran medida, del alemán Frei Otto, mientras en los Estados Unidos su aparición se retrasa algo, hasta los 70 en que se monta la tienda del colegio La Verne en California” (figura 21).

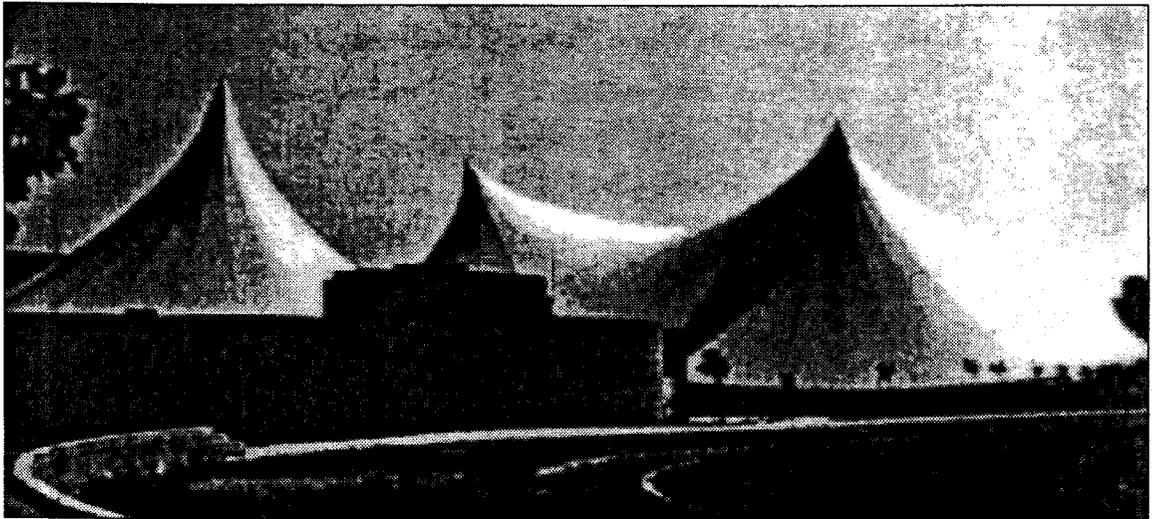


Figura 21. Colegio La Verne, California, USA. (Horst Berger).

Frei Otto ha sido uno de los primeros arquitectos que estudió y proyectó edificios de la llamada “Arquitectura Minimalista”. Especialista en cubiertas de cables, construyó las tiendas en la Exposición Federal de Jardines de Kassel en 1955 (figura 22) y Colonia en 1957. Es autor del Pabellón de la R. Federal de Alemania en la Exposición de Montreal, 1967, y del Estadio

Olímpico de Munich en 1972. En su ponencia en el I Encuentro Internacional de Estructuras para Grandes Luces²⁵ nos relata así el camino seguido por sus estructuras:

“Empiezo con estructuras espaciales de madera y acero. ... Empecé en 1946 trabajando en esta línea. ... En el año 1950 fui hacia las redes de cables y en 1958 me concentré en las estructuras aéreas. Por lo tanto, todos estos tipos de estructuras tiene la raíz en los primeros cincuenta, todos van en paralelo.”

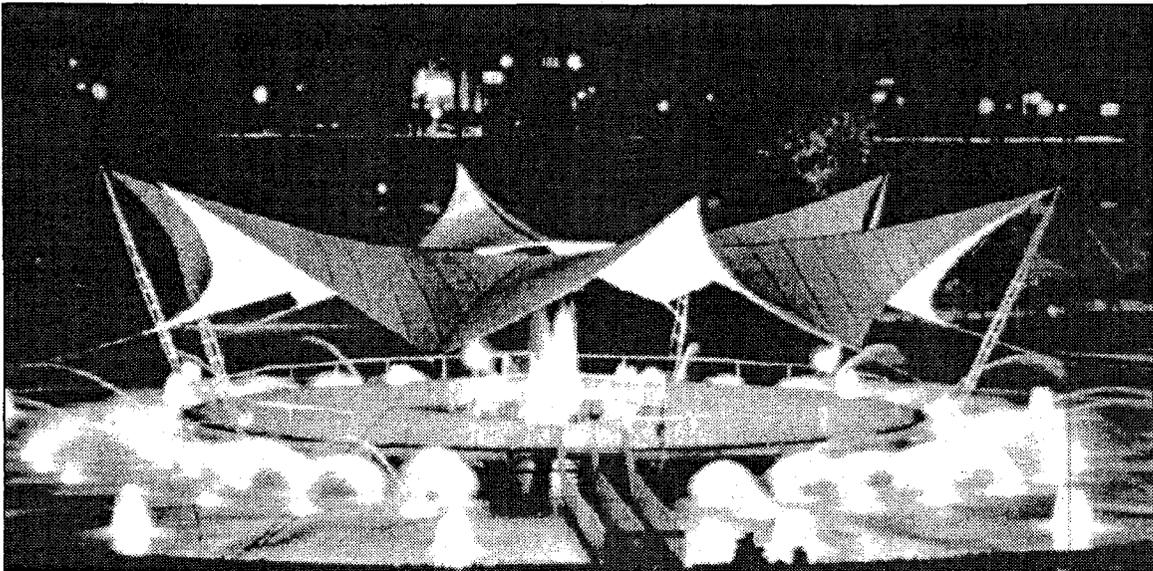


Figura 22. Exposición Federal de Jardines de Kassel, 1955 . (Frei Otto).

Horst Berger ha sido uno de los pioneros en Norte América a desarrollar estas estructuras para grandes luces. Como ejemplos de su obra podemos citar el Pabellón de Estados Unidos en la Expo 70, en Osaka, Japón, con David Geiger (142 x 82 m, figura 23), el Terminal Hadj del Aeropuerto de Jeddah (405.000 m² – 1981) y la cubierta del Estadio de Ryadh (50.000 m² – 1987), en Arabia Saudí,

²⁵ OTTO, F. Arquitectura minimalista. Actas del I Encuentro Internacional – Estructuras Ligeras Para Grandes Luces, Sevilla, 1992. Ed. Fundación Emilio Pérez Piñero, (Pérez B., E. et al.).

y el Terminal Jepesson del Aeropuerto de Denver (35.000 m² – 1994, figura 24), en Estados Unidos.

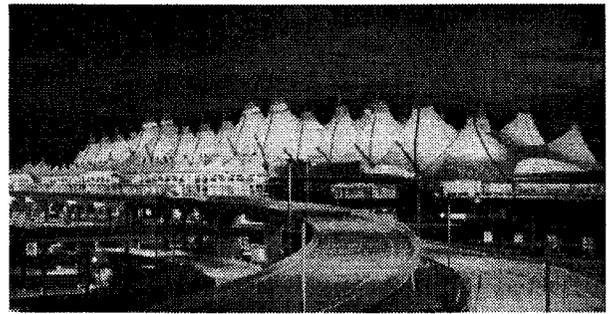
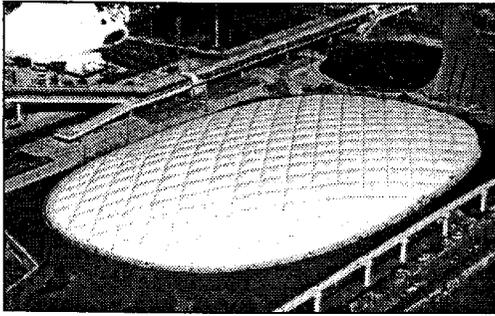


Figura 23. Expo 70, Osaka, Japón.

Figura 24. Aeropuerto de Denver, Estados Unidos.

Dos ejemplos actuales de grandes espacios cubiertos por ese tipo de estructura son la Arena de Nimes (5.000 m² – Schlaich, Bergermann, Sobek), en Francia²⁶(figura 25), y el Teatro de Tecklenburg (1.200 m² – Carl Note GmbH & Co), en Alemania²⁷. En estos dos edificios la cubierta se diseñó con doble capa, alcanzando la forma de almohada, con la presión del aire introducido entre ellas mediante sistema de compresores de aire externos. Las “almohadas” se mantienen en su sitio sujetas por mástiles y cables montados en el perímetro de las ruinas. La forma conseguida es convexa por dentro y por fuera, facilitando la salida de aguas de lluvia y formando un techo difusor desde el punto de vista acústico en el interior. La cubierta de Tecklenburg se retira en invierno, pues no admite cargas de nieve. La cubierta de la Arena de Nimes, construida en membrana de PVC y poliéster, se instala en octubre y

P. 245.

²⁶ SCHLAICH, J. BERGERMANN, R. SOBEK, W. Tensile Membrane Structures. Actas del Congreso del “IASS”, Madrid.1989. P. 30.

²⁷ RUDORF-WITRIN, W. New ways: textile architecture at the open-air theatre Tecklenburg. Actas del “Internationales Techtexil Symposium”, Frankfurt. Conferencia 426. 1993. Pp. 1-8.

se retira en abril, y está diseñada para una carga de nieve de 90 Kg/m².



Figura 25. Arena de Nîmes, Francia.

Como resumen, podemos afirmar que las estructuras ligeras para grandes luces, en los últimos treinta años, se han ido imponiendo cada vez más como una alternativa real de acondicionamiento de grandes espacios, donde se requieren monumentalidad y eficacia. De hecho, actualmente las estructuras textiles tensionadas se están utilizando cada vez con mayor frecuencia en el ámbito de la Arquitectura para cubrir grandes espacios de forma temporal o semipermanente, en los que se desarrollan actividades para las que el aspecto acústico es, la mayor parte de las veces, muy significativo. La *EXPO'92* constituyó un buen ejemplo de lo que acabamos de decir, y ello nos ha brindado una excelente oportunidad para examinar el comportamiento acústico de este tipo de estructuras, una vez finalizado aquel evento.

Además de ofrecer protección de la lluvia y del sol, e incluso de la nieve, su rapidez de montaje y facilidad de desmontaje y reutilización, debido a su bajo peso, así como su estética las hacen muy atractivas para los eventos temporales, tanto para uso de la palabra como espectáculos musicales de todo tipo. La utilización en un número significativo de pabellones y como cubierta de espacios abiertos en la EXPO-92 atestigua el grado de aceptación de esa técnica constructiva.

Llorens y Soldevila²⁸ describen su aspecto exterior y la cualidad ambiental que proporcionan al espacio interior del siguiente modo:

“El aspecto exterior de las cubiertas de lona se caracteriza por tratarse de superficies continuas, sin aristas, y espesor constante. No acaban de forma brusca, sino que se diluyen en los bordes a través del sistema de sujeción perimetral, compuesto por arcos de descarga hacia los puntos de anclaje o por uniones continuas a los elementos estructurales.

El espacio interior se distingue por su luminosidad generalizada y uniforme. Toda la superficie es translúcida e iluminada con variaciones muy matizadas de tonalidad según su geometría. La forma del techo se hace aprehensible a través del despiece de la lona, que señalan las costuras al marcarse al trasluz.

La transición del exterior al interior se realiza a través de un espacio intermedio creado por los bordes, de manera que la penetración se

²⁸ LLORENS D., J. y SOLDEVILA B., A. O.C. 1985. P. 14.

realiza suavemente: no se atraviesa una pared ni se entra de forma brusca."

Sin embargo, a pesar de que en muchas ocasiones estos grandes espacios cubiertos precisan además de unas buenas condiciones acústicas, en función del uso a que se destinan, poco se conoce hoy en día de su comportamiento acústico. En principio se puede constatar que este comportamiento, en muchos casos, es deficiente, lo que, si no corrige, puede condenar a estas cubiertas al mero estado de stand de feria.

CAPÍTULO 2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO EN ESPACIOS CUBIERTOS CON ESTRUCTURAS TEXTILES.

En los espacios al aire libre, la distancia de la fuente a los oyentes más alejados, y su consecuente pérdida de intensidad, son los principales problemas que debemos tener en cuenta en los estudios acústicos. En estos casos la única opción para reforzar el sonido directo es la de dotar la escena con concha acústica o tornavoces (figura 26).

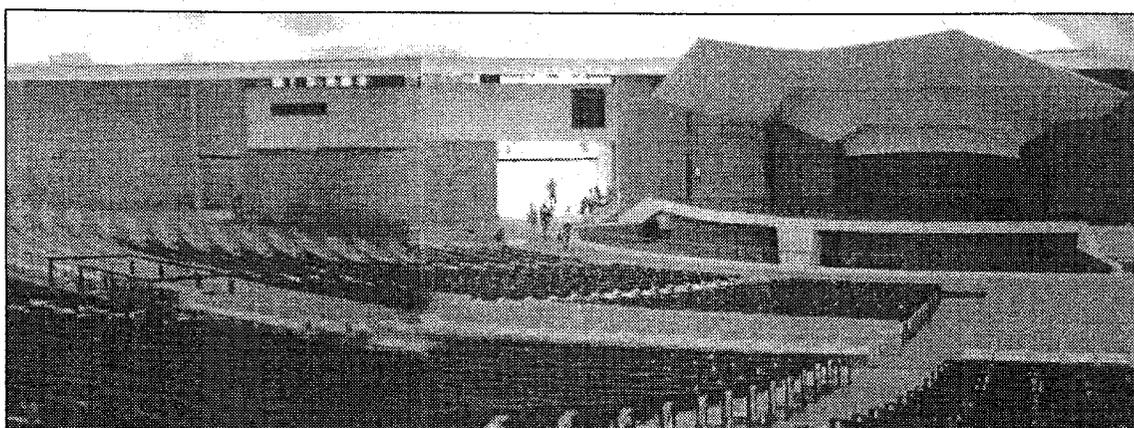


Figura 26. Concha acústica, Auditorio Araujo Vianna, Porto Alegre, Brasil.

Muchos auditorios y espacios abiertos se están cubriendo con estructuras textiles, con la finalidad de protección de la intemperie, aumentando la oferta durante más días del año y mejorando el confort térmico en su interior. Pero, además de la protección y cualidades estéticas que aportan tales estructuras, el efecto en la acústica de los locales es, muchas veces, imprevisible y devastador. El cambio que se produce en el espacio, de abierto a cerrado, da lugar siempre a una importante modificación del campo sonoro, con el consecuente aumento de la reverberación, lo que dependerá de los materiales utilizados. Esta modificación del

comportamiento acústico no siempre será satisfactoria. Los problemas acústicos que las cubiertas textiles inducen merecen ser mejor estudiados. Un ejemplo de la transformación a la que hacíamos alusión está en el Auditorio Araujo Vianna, en Porto Alegre, Brasil, uno de los espacios que esta tesis analiza acústicamente.

Por otro lado encontramos los espacios de nueva planta proyectados desde el principio con este tipo de cubierta, diseñados principalmente para atender a determinadas necesidades de confort, y que al final de la obra no cumplen los requisitos de la acústica de salas para espectáculos. Podemos citar como ejemplo el Palenque, en la Expo-92, cuyo estudio acústico también está incluido en esta tesis doctoral.

Tras la búsqueda bibliográfica realizada, se aprecia en general una ausencia de este tipo de estudios, que muestren, por ejemplo, la implicación que la elección del material de cubierta tiene en el comportamiento acústico del recinto. No obstante, presentamos a continuación algunas aportaciones de diversos autores al conocimiento de la acústica de estos espacios cubiertos.

Con relación al aislamiento acústico, Juan Monjo Carrió²⁹ señala que la tela, como material de construcción de un cerramiento, no puede presentar grandes valores de aislamiento debido a su poco peso y espesor, *“por lo que las condiciones térmicas y acústicas del espacio encerrado habrá que obtenerlas por vía del diseño”*.

²⁹ MONJO CARRIÓ, J. O.C. Pp. 14-15.

Menciona los efectos invernadero y sombrilla para el ambiente térmico, y dice que algo similar habrá que buscar para el ambiente acústico. Y sigue: *“En cuanto al acústico, en ese tipo de cubiertas el aspecto más importante no es el aislamiento del ruido exterior, para el que las telas suponen una barrera muy débil, sino, sobre todo, el acondicionamiento interior, es decir, la disminución de las reflexiones interiores. Como la superficie resultante es muy lisa, la absorción de reflexiones deberá basarse en la adición de algún tipo de rugosidad o de material absorbente; para la rugosidad es bastante corriente el añadir unas bandas a la superficie de la tela, que tienen la misión de romper las reflexiones; es una solución empleada, sobre todo, en grandes cubiertas soportadas por aire, donde la curvatura cóncava hacia el interior facilita la concentración de las reflexiones en el ambiente que cubre, aumentando, por tanto, el nivel de sonido interior.”* La figura 27 muestra las concentraciones y las reflexiones tangenciales, en una cubierta hinchable.

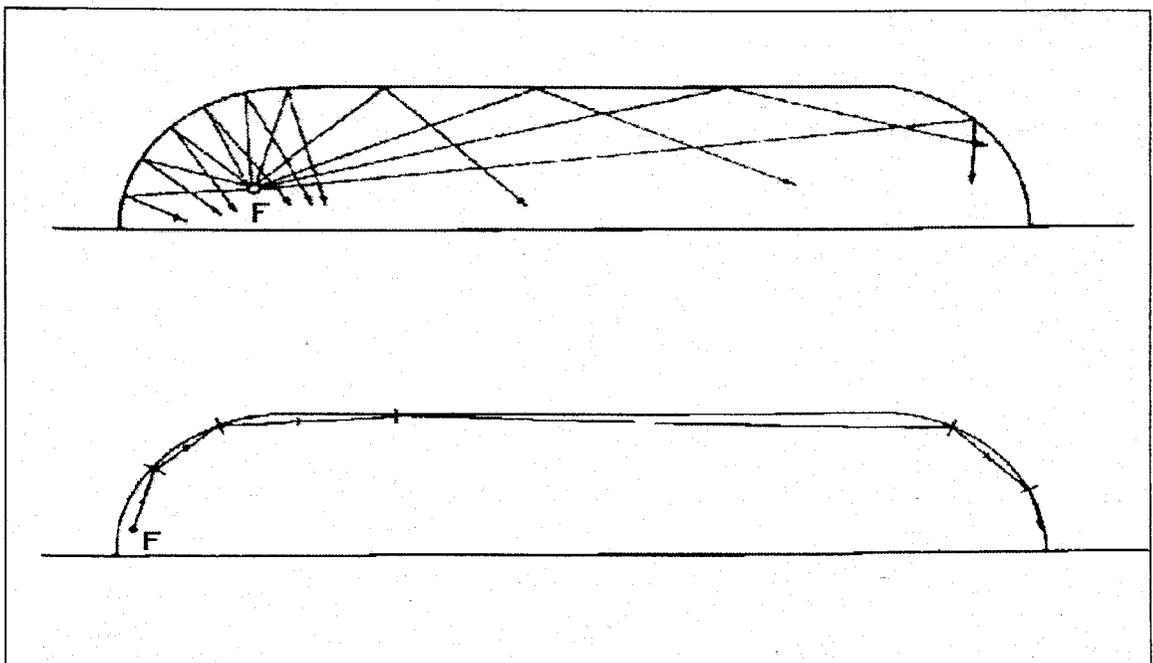


Figura 27. Focalizaciones y reflexiones tangenciales en una carpa hinchable.

A este respecto, habría que señalar que las reflexiones sobre superficies cóncavas implican concentraciones en determinados puntos, en detrimento de otros; aunque ese comportamiento dependerá de la relación entre el radio de la curvatura de la bóveda y la altura de dicho espacio (figura 28).

Por el contrario, la reflexión sobre superficies convexas originará una dispersión de los rayos sonoros y, en consecuencia, un mayor grado de difusión sonora (figura 29).

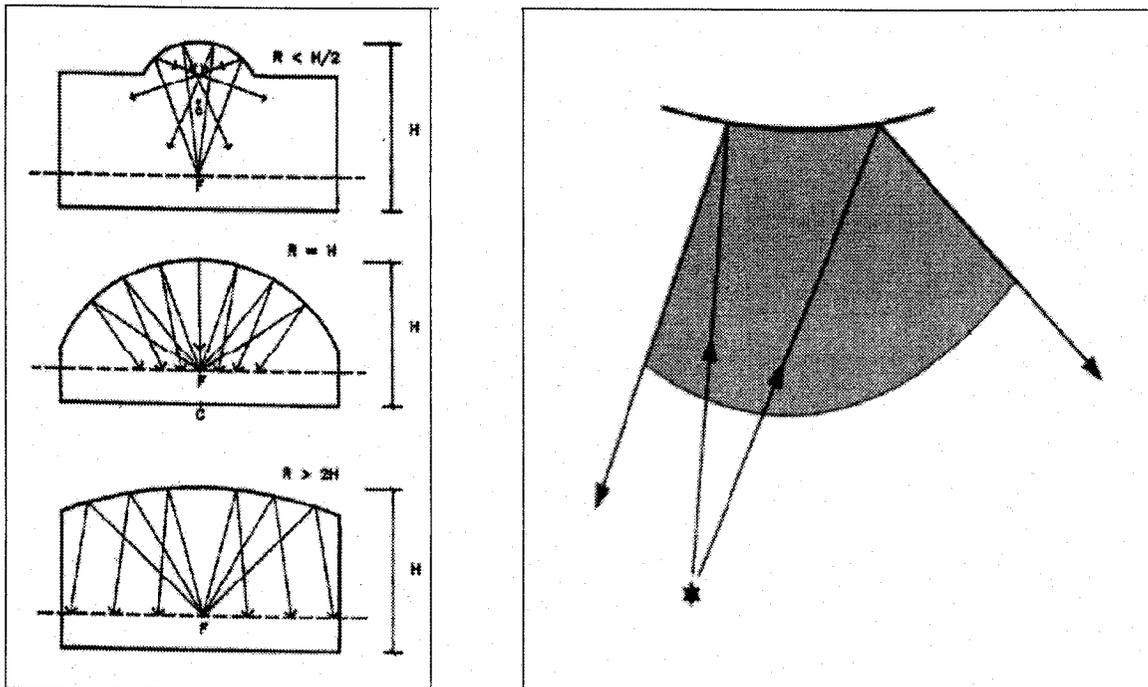


Figura 28. Reflexiones en techos cóncavos. Figura 29. Reflexiones en techo convexo.

Desde un punto de vista teórico, las superficies de las cubiertas textiles, pueden ser planas, tener una curvatura simple o doble. Hay dos tipos de doble curvatura: sinclásticas y anticlásticas. Superficies sinclásticas son cóncavas en una cara, casi siempre la interior, y convexas en la otra, como en la cubierta del Atlanta's Georgia Dome, de *Heery Architects & Engineers*, 36.700 m² y 70.500 personas, 1992 (figura 30).

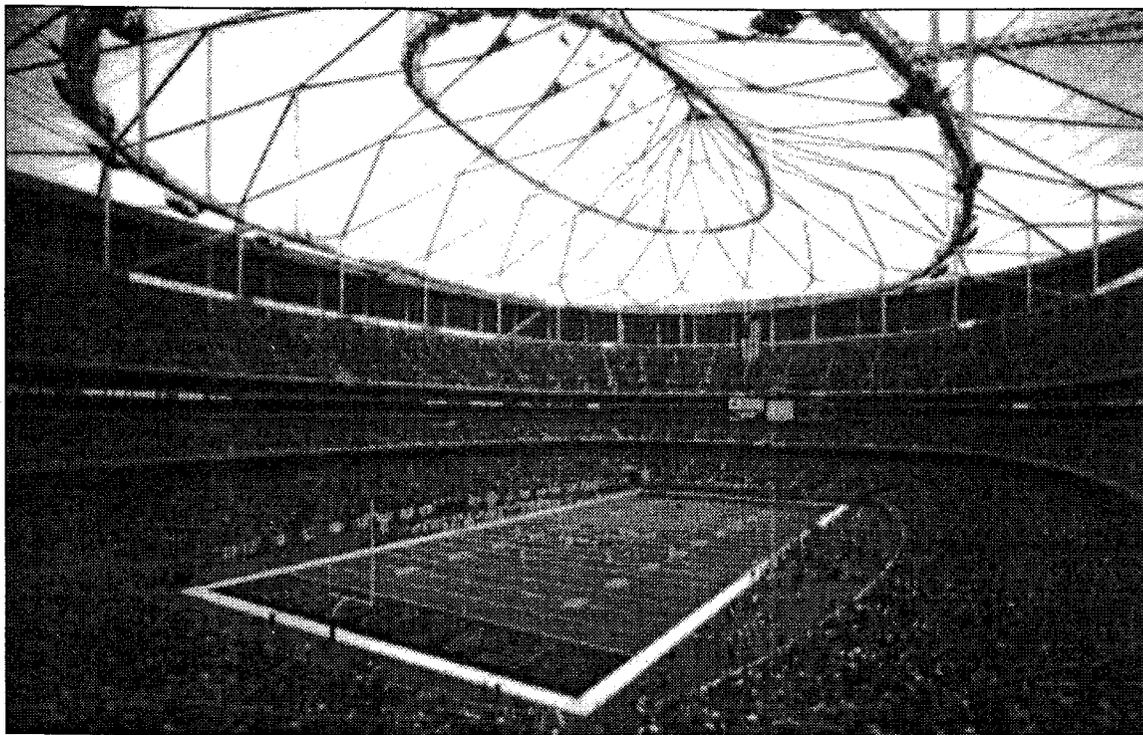


Figura 30. Atlanta's Georgia Dome, Estados Unidos

Cilindros y conos con las generatrices rectas tienen superficies con curvatura simple, y las esferas tienen superficies sinclásticas. Estructuras neumáticas o textiles colgando por su propio peso formarán también superficies sinclásticas, como los globos de aire caliente. Estructuras textiles pretensionadas formarán superficies anticlásticas. Las superficies anticlásticas, con la forma de silla de montar, no pueden ser cóncavas ni convexas³⁰ (figuras 31 y 32).

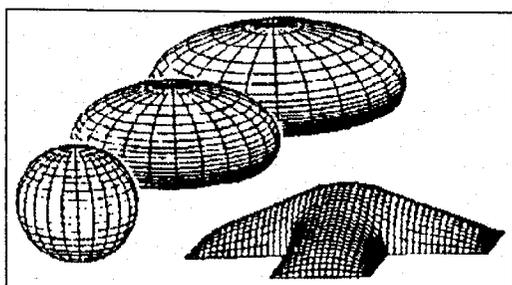


Figura 31. Superficies sinclásticas.

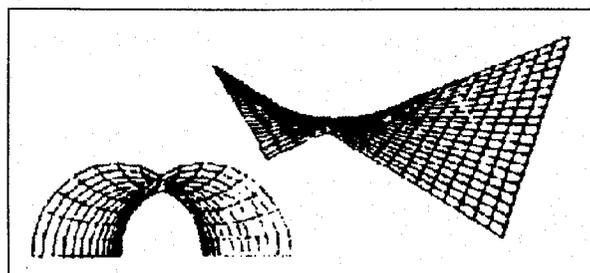


Figura 32. Superficies anticlásticas.

³⁰ BROWN, P.L.D. Fabric structures – Concepts, feasibility, design. Actas del "Innovation and Economics in Building Conference", National Conference Publication – Institution of Engineers, Brisbane, Australia, 1991. P. 81.

Estructuras textiles traccionadas por arcos metálicos pueden aproximarse a una superficie cilíndrica, por ejemplo, la cubierta de *Ambiente-92* (figura 33) y del *Apeadero del Ave* (figura 34), en la *EXPO-92*.

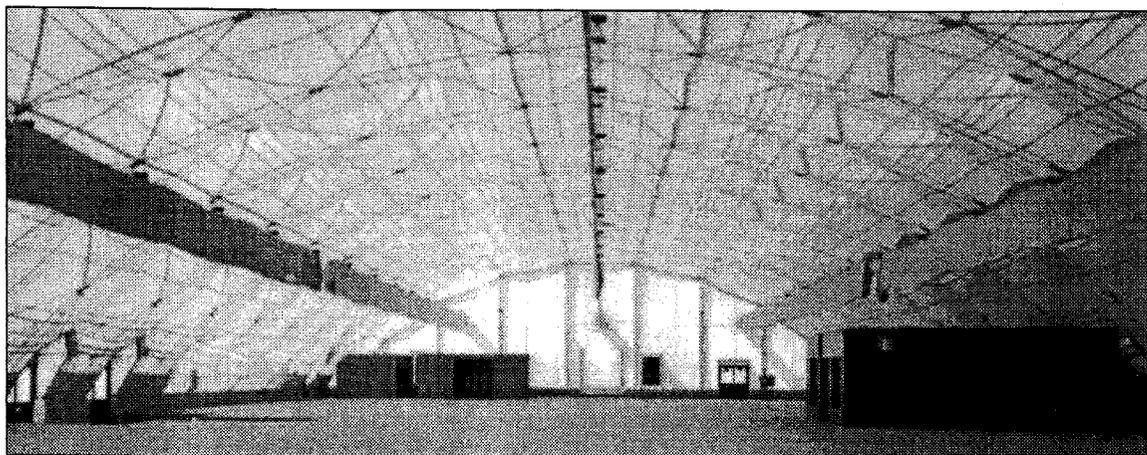


Figura 33. Pabellón Ambiente – 92, en la EXPO – 92.

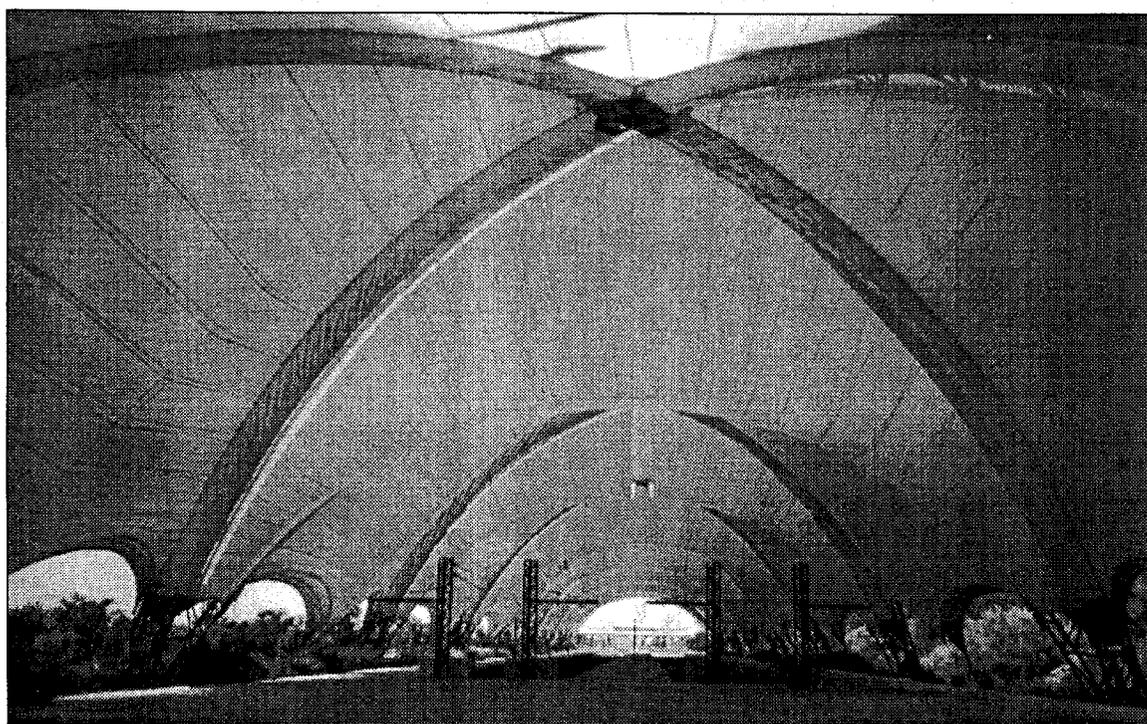


Figura 34. Apeadero del AVE, en la EXPO – 92.

Un aspecto importante ha tener en cuenta en el diseño de espacios cerrados es la presencia de reflexiones cortas, que añaden calidad al sonido. Éstas deben implementarse por medio de soluciones constructivas contenidas en el proyecto, al tiempo que deben evitarse las reflexiones largas en la medida de lo posible, puesto

que añaden distorsiones al sonido emitido, elevando los desfases temporales respecto del sonido directo pudiendo llegar a producirse el desagradable eco. En lo que se refiere a las reflexiones cortas, además, está perfectamente establecido que las que proceden de las paredes laterales de la audiencia aportan calidad adicional al mensaje recibido por ésta por lo que será otro aspecto a considerar. La acústica gráfica y, más recientemente, los programas de simulación informática son las herramientas más adecuadas para esto, puesto que nos permite predecir con antelación el comportamiento acústico que tendrá el espacio.

John Effenberger³¹ nos informa de los resultados obtenidos en el Pontiac Silver Dome, Detroit, USA, una cubierta textil de 40.000 m² de superficie y 200 toneladas de peso, sostenida por la presión positiva del aire interior. En ese estadio se han utilizado bandas acústicas de tejido de fibra de vidrio revestido con *Teflon*, de aproximadamente 1,8 metros de ancho por 6,0 metros de largo, envolviendo material aislante de lana de vidrio de 2,5 pulgadas (6,35 cm) por las dos caras, colgadas de cables por el lado mayor, perpendiculares a la cubierta, con el fin de evitar la propagación de las reflexiones tangenciales y así evitar el "*efecto de galería*" (figura 35). Los coeficientes de absorción de esas bandas se muestran en la tabla 1. La utilización de esta solución absorbente dio como resultado un tiempo de reverberación (medido) de **9,8** segundos

³¹ EFFENBERGER, J. Fabrasorb thermo-acoustical fabrics. Informe de Chemical Fabrics Corporation, facilitado por Birdair, Inc., EE. UU. en las III Jornadas Técnicas Sobre Arquitectura Textil, Universidad Politécnica de Madrid, 1995. P. 2.

promediado entre 500 y 1.000 Hz, demasiado alto para conseguir una buena acústica del local.

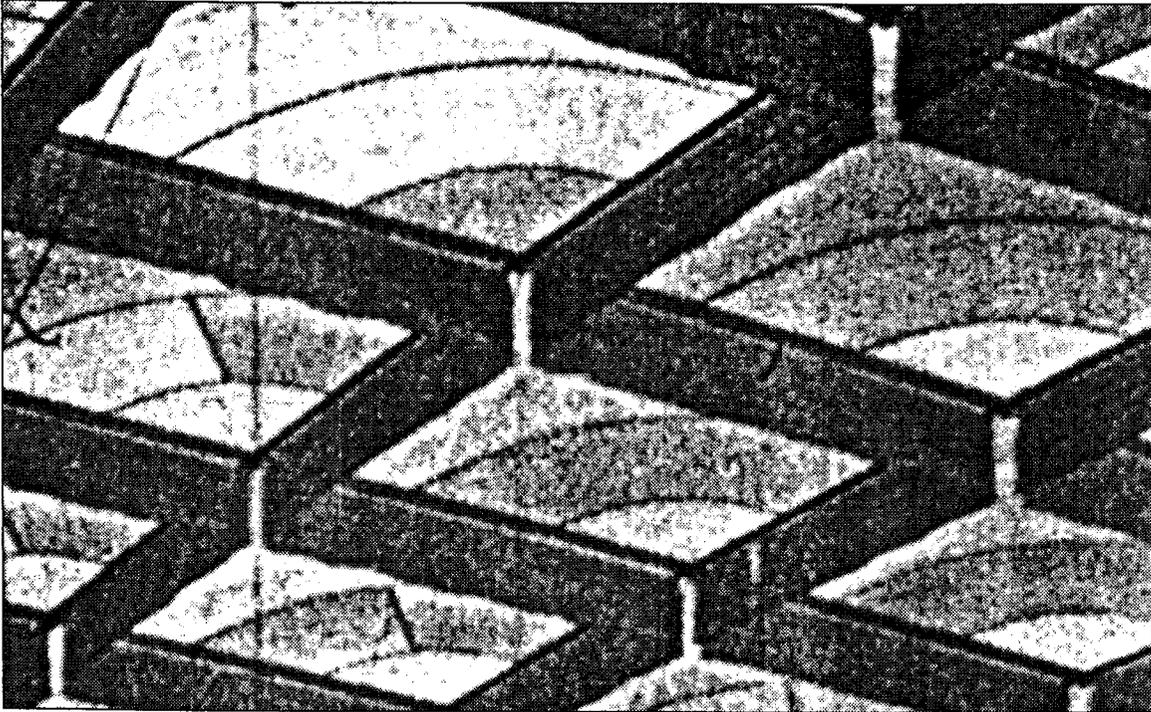


Figura 35. Bandas acústicas absorbentes. Pontiac Silver Dome, USA.

TABLA 1. Coeficientes de absorción de bandas acústicas. Pontiac Silver Dome, USA.

Bandas acústicas – Pontiac Silver Dome						
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Coeficiente de absorción α	0,4	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0

Effenberger³² nos informa, sobre ese tema, de la utilización de un tejido poroso hecho en fibra de vidrio revestido con *Teflón* (PTFE), de denominación comercial *Fabrorb I*, como membrana interior con funciones térmicas y acústicas. Ese tejido es muy ligero, menos de 0,5 Kg/m², y proporciona una reducción del 50% de la pérdida de

calor comparado con una estructura textil de una sola capa. En la tabla 2 se encuentran los coeficientes de absorción obtenidos de acuerdo con la normativa ASTM C 432-77, montaje nº 7.

TABLA 2. Coeficientes de absorción de membrana acústica. Syracuse Carrier Dome, USA.

Fabrosorb						
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Coeficiente de absorción α	0,81	0,75	0,53	0,69	0,71	0,69

Esa solución se ha utilizado en el Syracuse Carrier Dome, obteniéndose un tiempo de reverberación medido de **7,0** segundos, promediado entre 500 y 1.000 Hz, un poco mejor que el medido en el Pontiac Silver Dome, pero aún muy elevado para recinto de buena acústica.

En una gran instalación en Gainesville, Florida, se han utilizado las dos soluciones descritas con anterioridad, bandas colgadas y capa interior a base del tejido denominado *Fabrosorb*, habiéndose obtenido tiempos de reverberación de **2,6** segundos, promediado entre 125 y 4.000 Hz, (figura 36), valores sensiblemente inferiores a los anteriores, y muy próximos a los considerados como óptimos en función del volumen.

³² EFFENBERGER, J. O. C. P. 2.

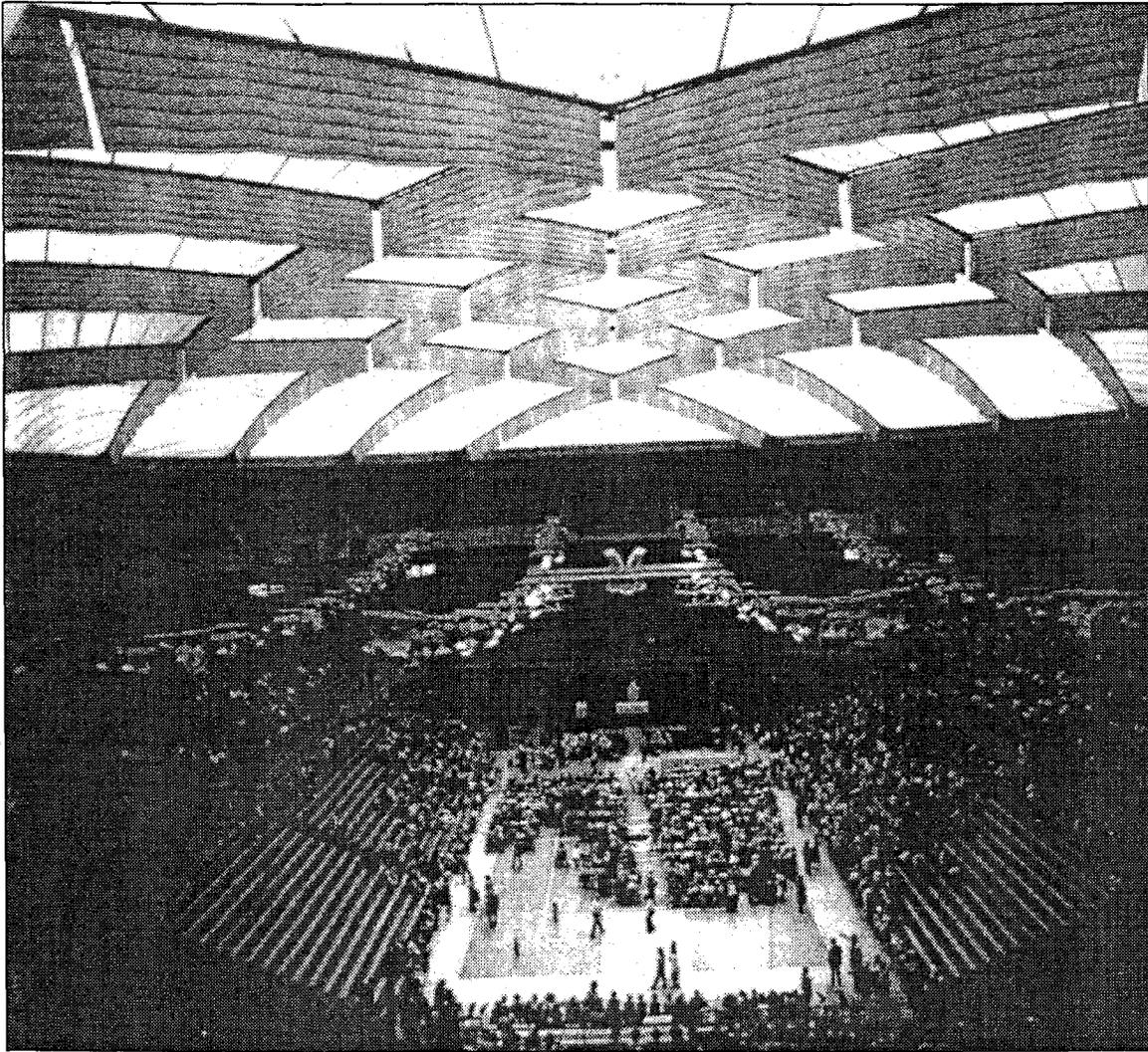


Figura 36. Universidad de Florida, Gainesville.

Monjo³³ nos habla de tejidos especiales para ser usados en contacto con el ambiente interior, con un alto poder de absorción por su estructura y porosidad, que pueden colocarse en bandas perpendiculares, o bien en una hoja de tela adosada a la estructura, *“solución que puede ser empleada fácilmente en las cubiertas colgadas y que pueden alcanzar un coeficiente de reducción del sonido del 0,65 en cubiertas integrales”*. Se referiría a las dos soluciones empleadas en el pabellón de la Universidad de Florida,

³³ MONJO C., J. O. C. P. 15.

pero sin detallar más estos tejidos o su forma de instalación, ni a qué frecuencia se refiere el valor aludido.

Berger³⁴ nos informa del efecto conseguido en el Centro Comercial Bullock's, construido en San José, California, de 1.400,00 m²:

"On a wooden frame of crossed arches, the double fabric membrane admits 7,7% of the light that hits it. It also absorbs sound with a porous lower skin and improves the structure's acoustics" (figura 37). La información sobre el comportamiento acústico apenas se detalla.

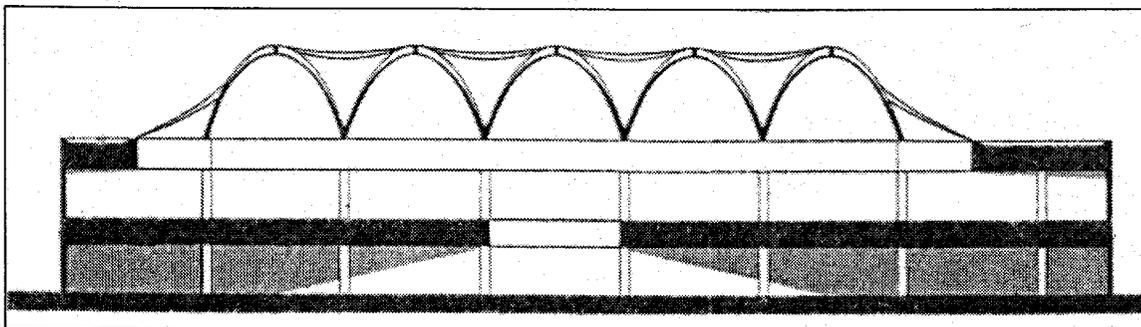


Figura 37. Sección esquemática de una tienda Bullock's, San José, California.

En otra tienda Bullock's, en San Mateo, California, Berger³⁵ nos aclara que la membrana inferior fue instalada por exigencia de los bomberos, en las zonas de menos inclinación ($i < 20\%$), para aumentar la protección contra incendio en el caso de que una rama de árboles ardiendo cayese sobre la cubierta textil (figuras 38 y 39).

³⁴ BERGER, H. y GEIGER, D. Team makes fabric tension roofs take off. *Engineering News*, noviembre, 1977. Pp. 28-29.

³⁵ BERGER, H. O.C. P. 109.



Figura 38. Vista externa, Bullock's, S. Mateo. Figura 39. Vista interna, Bollock's, S. Mateo.

El mismo Berger³⁶, en la Conferencia Internacional "*Engineering a New Architecture*", realizada en la Escuela de Arquitectura de Aarhus, Dinamarca, en 1998, presenta dos nuevos auditorios cubiertos con estructura textil: *Shoreline Amphitheater* (8.000 m²) (figura 40), y el *Cynthia Woods Mitchell Center of the Performing Arts* (2.600 m² - 1990) (figura 41). Su único comentario sobre la acústica es: "*The roof shape is acoustically ideal by eliminating focused echoes*".



Figura 40. Shoreline Amphitheater.

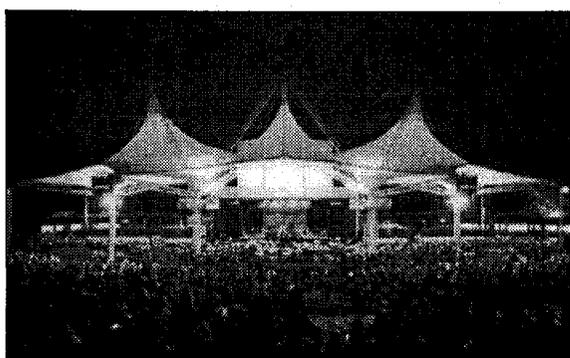


Figura 41. Cynthia Woods Mitchell Center.

³⁶ BERGER, H. *Light Structures, Structures of Light: form and function of tensile architecture*. Actas de la Conferencia Internacional "*Engineering A New Architecture*". Aarhus School of Architecture, Dinamarca, 1998. P. 11.

Derek Croome³⁷, de la Universidad de Bath, Inglaterra, explica porqué el sonido del látigo en el circo suena tan fuerte: la absorción sonora de la cubierta decrece rápidamente con la frecuencia, es decir, resulta sensiblemente menor para los sonidos agudos que para los graves. Además, nos presenta los resultados de un ensayo comparando con la aplicación de la ecuación I para calcular el coeficiente de absorción teórico de membranas de poco peso, (entre 0,5 y 2,0 kg/m²):

$$\alpha = \left[1 + \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right)^2 \right]^{-1} \quad (I)$$

α : coeficiente de absorción

ρ : densidad del aire (1,18 Kg/m³)

c : velocidad del sonido en el aire (\approx 345 m/s)

ω : $2 \pi f$ (frecuencia angular)

f : frecuencia (en Hz)

m : masa por unidad de superficie del textil (Kg/m²)

En la tabla 3 se reflejan los valores de los coeficientes de absorción obtenidos con esta ecuación para tres membranas de fibra de vidrio y su comparación con los obtenidos de mediciones acústicas en cámara reverberante. Hay que tener en cuenta que la citada

³⁷ CROOME, D. Acoustical design for flexible membrane structures. Actas del Congreso "Light Weight Structure In Architecture", Sidney, Australia. 1986. Pp. 69-86.

ecuación no contempla la porosidad del textil *Structo Fab 120*; los otros dos textiles no presentan porosidad, al ser impermeables. Queda clara la gran dispersión entre los valores teóricos y medidos.

TABLA 3. Valores teóricos (T) y medidos (M) para tres membranas de fibra de vidrio.

Membrana	Coeficientes de absorción					
	125 Hz		500 Hz		1.000 Hz	
	T	M	T	M	T	M
Structo Fab 120 0,407 kg/m ²	0,87	0,65	0,292	0,82	0,094	0,86
Structo Fab 375 1,27 kg/m ²	0,39	0,38	0,041	0,17	0,0105	0,15
Structo Fab 450 1,53 kg/m ²	0,32	0,28	0,028	0,14	0,0072	0,08

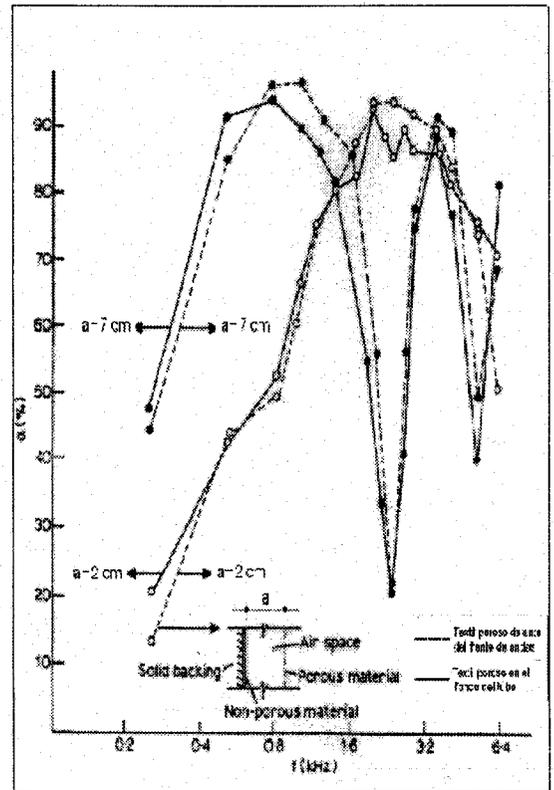
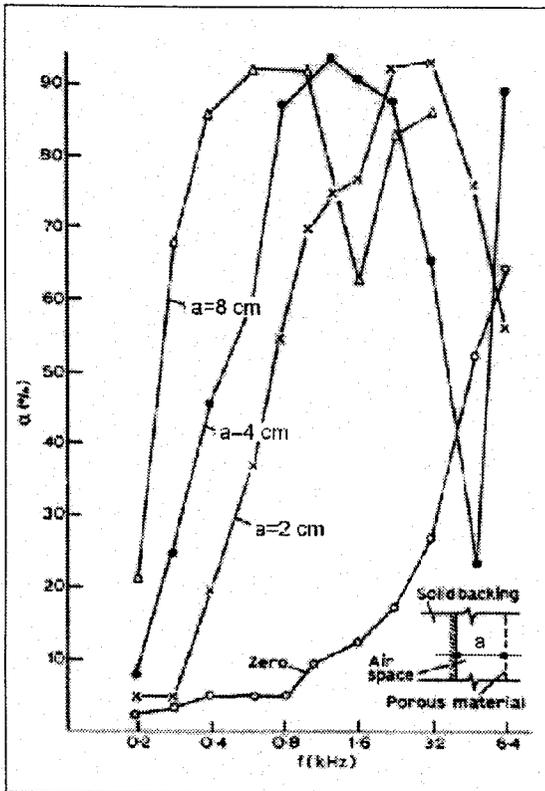
Si se quiere considerar el ángulo de incidencia del rayo sonoro en la superficie, la ecuación sería la siguiente:

$$\alpha = \left[1 + \left(\frac{\omega m}{2 \rho c} \right)^2 \cos^2 \theta \right]^{-1} \quad (II)$$

θ : ángulo de incidencia

Hanna y Kandil³⁸, de la Universidad del Cairo, en su análisis de la absorción de tejidos muy porosos de algodón 100% y no-porosos de mezcla de algodón con poliéster 35/65%, dan a conocer los resultados de las medidas obtenidas en el tubo de ondas estacionarias B&K 4002. Las muestras de tejido poroso se han

montado como cortinas frente a una pared rígida y se ha variado el espacio entre el textil y el fondo del tubo. Aumentando el espesor de la cámara de aire crece la absorción en bajas frecuencias, como se observa en la figura 42. En esa gráfica sólo figura el coeficiente de absorción del material poroso. La muestra utilizada tenía 92,1% de porosidad, 488 g/m² de peso y 0,416 cm de espesor.



Figuras 42 y 43. Valores de α para tejido de algodón poroso y no poroso.

En la figura 43 se muestran los resultados del otro ensayo, realizado con la muestra de tejido poroso en dos posiciones: delante del frente de ondas, conforme detalle en la gráfica (valores de alfa en línea de trazos en la gráfica), y en fondo del tubo (valores de alfa en línea continua en la gráfica), con diferentes espesores de

³⁸ HANNA, Y.I. y KANDIL, M.M. Sound absorbing double curtains from local textile materials. *Applied Acoustics*, nº 34, 1991. Pp. 281-291.

la cámara de aire, indicados en la gráfica. Estos autores señalan en su estudio que esta última solución, además de comportarse como un absorbente sonoro, permite que pase la luz al interior del edificio.

Bubner³⁹ propone dos medidas para mejorar el comportamiento acústico de espacios cubiertos con membranas textiles. Son las siguientes:

Manipulación del material: para reducir el ruido en interiores (absorción acústica) se podría tender un segundo techo de membranas perforadas, perforaciones que se harían haciendo variar el diámetro y la distancia entre las mismas, dependiendo de la necesidad.

Medidas constructivas: para aumentar el aislamiento del sonido, sin aumentar su peso, podemos aumentar la distancia entre las dos membranas, de acuerdo con el resultado de mediciones realizadas (tabla 4).

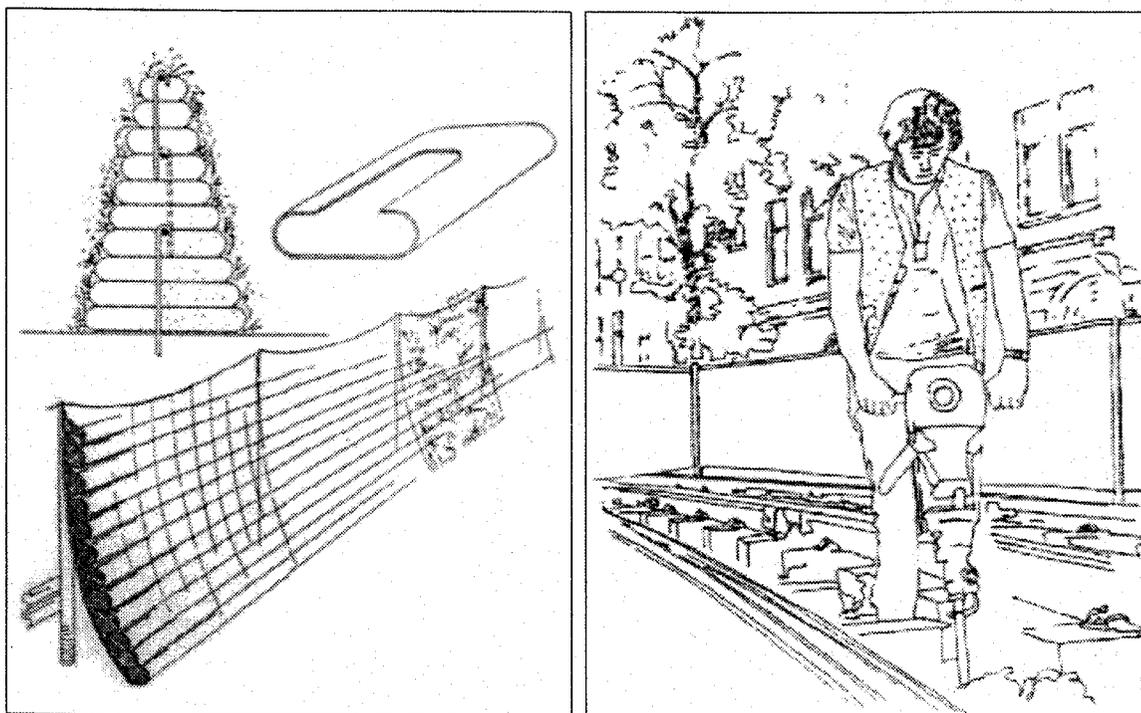
TABLA 4 . Medidas de aislamiento de sonido en membranas dobles.

Peso superficial(g/m²)	Distancia (cm)	Aislamiento (dB A)
2 x 1.000	5	15
2 x 1.000	10	16
2 x 1.000	20	17
2 x 1.000	30	19
2 x 1.000	50	22

³⁹ BUBNER, E. . Akustische eigenschaften von technischen membranen. *Arcus*, Alemania, 1986. Pp. 17-22.

En el aislamiento de sonidos supone un aumento de valores cuando pasamos de la ley de masas, membrana simple, para la ley de masa-aire-masa, o membrana-aire-membrana. En este caso la masa de aire interior a las dos membranas ejerce la función de muelle, mejorando el aislamiento. A partir de los 60 cm existe un desacoplamiento de las dos masas, por lo que pierde efectividad la masa de aire.

Además, el mismo Bubner nos informa que, rellenando el espacio entre las membranas con arena hasta llegar a los 20 kg/m^2 , se consigue un nivel de aislamiento de 38 dB A, por lo que propone su utilización como barreras acústicas permanentes en autopistas y temporales en obras ruidosas (figuras 44 y 45).



Figuras 44 y 45. Barreras acústicas permanentes y temporales. Bubner.

En nuestra búsqueda hemos encontrado algunas soluciones técnicas que pretenden obtener reflexiones cortas, e intentan evitar que las reflexiones largas lleguen a la audiencia. Son las siguientes:

1. Usar paneles reflectores suspendidos del techo, orientados hacia la audiencia, para disminuir, además, el efecto concentrador de las superficies curvas. En la figura 46 se muestra la aplicación de esta solución, con detalles constructivos de los paneles, en el tornavoz *Edmund Hawes Talbot Orchestra Canopy*, 1959, en Tanglewood, de la Orquesta Sinfónica de Boston, Estados Unidos, proyecto de los arquitectos Eliel y Eero Saarinen, siendo los consultores acústicos Bolt, Beranek & Newman⁴⁰.

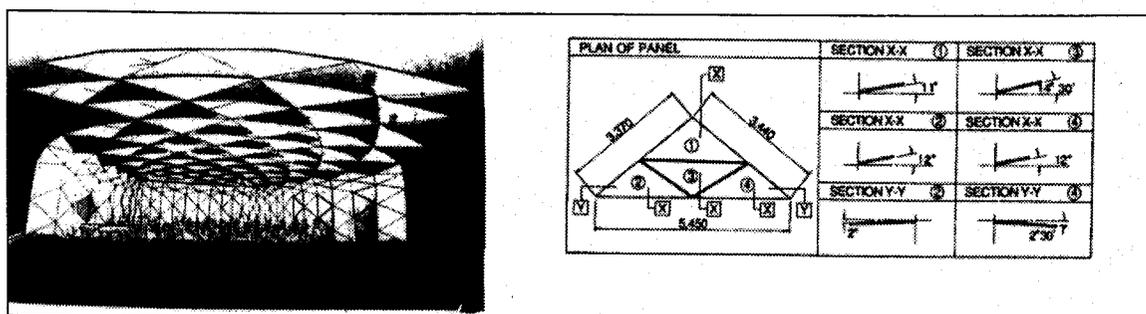


Figura 46. Paneles reflectores en Tanglewood.

2. Diseño de la cubierta de modo que el lado convexo de la cubierta esté situado sobre la fuente sonora. De esta forma habrá una mayor dispersión del sonido, y una mayor contribución a la difusión sonora. La figura 47 muestra, como ejemplo, el caso de la cubierta del escenario para los festivales de 1975, en Canet de Mar, Barcelona, proyecto general del recinto de los arquitectos D. Freixes y P. Rivera, diseño de la cubierta por los arquitectos Donada, Llorens y Soldevila⁴¹.

⁴⁰ Sitio Web de Orquesta Sinfónica de Boston, www.bso.org [Consulta: 25 junio 2.000].

⁴¹ LLORENS y SOLDEVILA. O. C. P. 16.

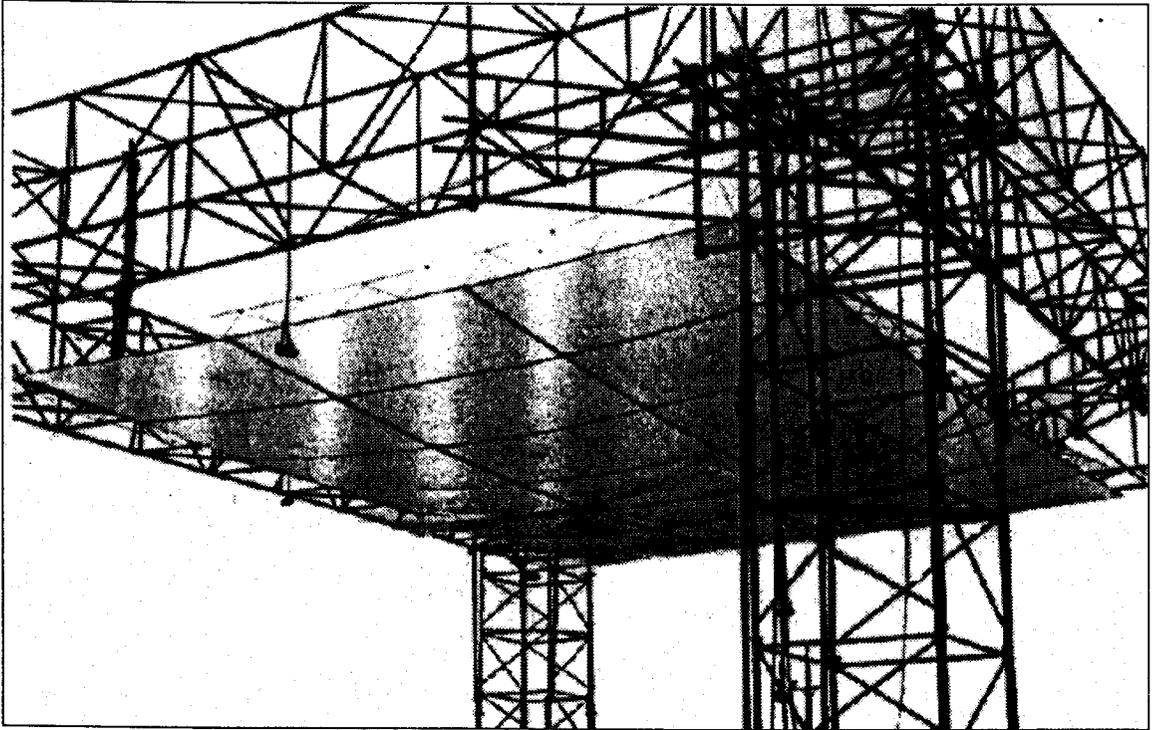


Figura 47. Cubierta en Canet de Mar, Barcelona.

CAPÍTULO 3. FIJACIÓN DE HIPÓTESIS DE PARTIDA Y METODOLOGÍA.

3.1 Definición del campo de actuación de este estudio y su extensión.

Proponemos aportar mejoras en las condiciones acústicas de los espacios cubiertos con estructuras textiles, estudiando casos particulares, mediante uso de la tecnología actual de análisis acústico.

3.2. Aspectos considerados.

3.2.1. Absorción sonora: materiales absorbentes y coeficientes de absorción

La acústica de los recintos considera espacios cerrados por muros, techo y suelo, que normalmente reflejen una cierta fracción de la energía sonora incidente. Otra fracción de energía es 'absorbida', es decir, es substraída del campo sonoro del interior del recinto, por conversión en calor o por transmisión al exterior de los límites de ese recinto.

La capacidad de absorción de un cerramiento es una característica del material y su forma de colocación, y varía con la frecuencia. Se valora mediante su *coeficiente de absorción*, designado por α , definido por la razón entre la cantidad de energía que, por unidad de tiempo, se disipa en una determinada área de la superficie de

ese material y la energía que, durante el mismo intervalo de tiempo, incide en ella⁴².

En la acústica de salas, para la absorción sonora de los materiales se tienen normalmente en cuenta los valores del coeficiente de absorción sonora α en el dominio de frecuencia que se extiende entre 125 Hz y 4000 Hz⁴³.

Los coeficientes de absorción deben emplearse con cierta prevención, pues son varias las circunstancias que pueden alterar su valor a efectos de utilización práctica. De hecho, es frecuente hallar distintos coeficientes para el mismo material al comparar los valores en distintas tablas. Estas diferencias se comprenden fácilmente si se juzgan las posibles condiciones de ensayo: grado de humedad, tamaño y forma de la cámara de ensayo y su repercusión en las frecuencias propias, tamaño y disposición de las muestras, así como cualquier peculiaridad de su montaje, sensibilidad de los aparatos usados, método operatorio, etc. Incluso se ha podido comprobar que, para la misma frecuencia, la absorción de un material no es igual para todas las intensidades.

Si existen diferencias entre distintos ensayos, las condiciones entre el ensayo y el montaje "*in situ*" pueden ser, y de hecho son, más acusadamente diferentes. Tamaño del local y forma, grado de humedad, emplazamiento relativo de la fuente sonora respecto a la superficie del material, dimensión de esta superficie y su situación,

⁴² SILVA, P.M. *Acústica de Edificios*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1995.

⁴³ SILVA, P.M. O. C. P. 49.

son factores variables en cada caso. Además, el tamaño de las superficies afecta a su absorción. Experimentalmente se comprueba que el coeficiente de absorción disminuye con el tamaño de la superficie del material⁴⁴.

La absorción sonora de los materiales de revestimiento se puede obtener mediante la expresión:

$$A_s = \sum_{i=1}^n S_i \alpha_i \quad (\text{III})$$

Siendo:

S_i = área de cada material

α_i = coeficiente de absorción de cada material

3.2.2. Absorción del aire

La absorción producida por el aire es solamente significativa en recintos de grandes dimensiones, a frecuencias relativamente altas (> 2kHz), sobre todo con porcentajes bajos de humedad relativa (del orden de un 10% a un 30%). Dicha absorción se representa por la denominada constante de atenuación del sonido en el aire m .

Para calcular la absorción sonora del aire se adopta la ecuación:

$$A_a = 4 m V \quad (\text{IV})$$

⁴⁴ PÉREZ MIÑANA, J. *Compendio práctico de acústica aplicada*. Barcelona: Labor, 1969. P. 239.

Siendo:

V : el volumen (m^3)

m : el coeficiente de atenuación del aire (m^{-1}) a una determinada frecuencia.

Para las condiciones normales de temperatura (20-22 °C) y humedades relativas del aire superiores al 20-25 %, el valor de m se puede aproximar por la expresión:

$$m = \frac{0,017}{H} f^2 (m^{-1}) \quad (V)$$

Siendo:

f : frecuencia (kHz)

H : humedad relativa (%)

En la tabla 5 se expresan los valores de $4m$ (m^{-1}), en función de la frecuencia, para diferentes valores de la humedad relativa y de la temperatura. Entre 15 °C y 25 °C, el valor de m crece un 4%, aproximadamente, por cada grado de elevación de la temperatura.

TABLA 5. Valores de $4m$ para el aire.

H	T (°C)	2.000 Hz	4.000 Hz	6.300 Hz	8.000 Hz
30 %	15	0.0143	0.0486	0.1056	0.136
	20	0.0119	0.0379	0.0840	
	25	0.0114	0.0313	0.0685	
	30	0.0111	0.0281	0.0564	
50 %	15	0.0099	0.0286	0.0626	0.086
	20	0.0096	0.0244	0.0503	
	25	0.0095	0.0235	0.0444	
	30	0.0092	0.0233	0.0426	
70 %	15	0.0088	0.0223	0.0454	0.060
	20	0.0085	0.0213	0.0399	
	25	0.0084	0.0211	0.0388	
	30	0.0082	0.0207	0.0383	

La fórmula de Sabine corregida, introduciendo la absorción del aire, quedaría:

$$T_r = 0,161 \frac{V}{A + 4mV} \quad (\text{VI})$$

El valor de **A** determinará la importancia relativa del término de la absorción del aire.

3.2.3. Reverberación

3.2.3.1. Tiempo de reverberación

El uso de este indicador fue introducido por W. C. Sabine, hace un siglo. Se define como el tiempo necesario para que, a partir del momento en que se desconecta la fuente, la intensidad del sonido disminuya hasta una millonésima parte de su valor o, lo que es lo mismo, el nivel se reduzca en 60 dB.

En la práctica dicho valor se suele obtener a partir de la extrapolación de la caída de los primeros 30 dB (T_{30}), o 20 dB (T_{20}).

A pesar del tiempo transcurrido desde su introducción por Sabine, aún hoy sigue siendo el indicador por excelencia del comportamiento acústico de los locales, al ser el más significativo en términos globales.

La ecuación propuesta por Sabine para su cálculo es la siguiente:

$$T = 0,16 \frac{V}{\sum S_i \alpha_i} \quad (\text{VII})$$

Siendo:

V : volumen del local (m^3)

$\sum S_i \alpha_i$: absorción sonora debido a los materiales de revestimiento, donde α_i representa el coeficiente de absorción sonora de la superficie de área S_i (m^2).

3.2.3.2. Tiempos de reverberación óptimos

El ajuste del tiempo de reverberación de una sala en un intervalo *óptimo* de valores, para cada octava de frecuencia, es condición indispensable para la buena acústica de la misma. Ese intervalo de tiempo viene determinado por su volumen y el uso a los que se destina. Para locución, como teatros y salas de conferencias, donde resulta importante limitar el efecto de enmascaramiento para lograr una buena inteligibilidad de la palabra, se precisa de unos tiempos de reverberación menores que para música.

Pérez Miñana⁴⁵ nos indica la fórmula empírica del tiempo de reverberación óptimo:

$$T = f u i \sqrt[3]{V} \quad (\text{VIII})$$

Siendo:

f = factor que varia con la frecuencia (tabla 6)

u = coeficiente de uso del local

i = valor que depende de la intervención electro-acústica

Los valores de estos coeficientes, para los distintos casos, son los siguientes:

TABLA 6. Coeficiente f para los locales destinados a la audición de la palabra y cinematógrafos:

F (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
f	1,30	1,15	1,00	0,90	0,90	0,90

Coeficiente u : Para la palabra, $u = 0.075$

Para la música, $u = 0.08$ a 0.10

Coeficiente i : Sin intervención eletro-acústica, $i = 1$

Con intervención eletro-acústica, $i = 0.85$

Expresado el volumen V en metros cúbicos, el tiempo T viene dado directamente en segundos; para este valor debe suponerse el local en condiciones normales de asistencia de público. En la figura 48 presentamos la gráfica para determinación del tiempo de reverberación óptimo, en función del volumen, para la frecuencia de 500 Hz, según la ecuación (VIII).

⁴⁵ PÉREZ MIÑANA, J. O.C.

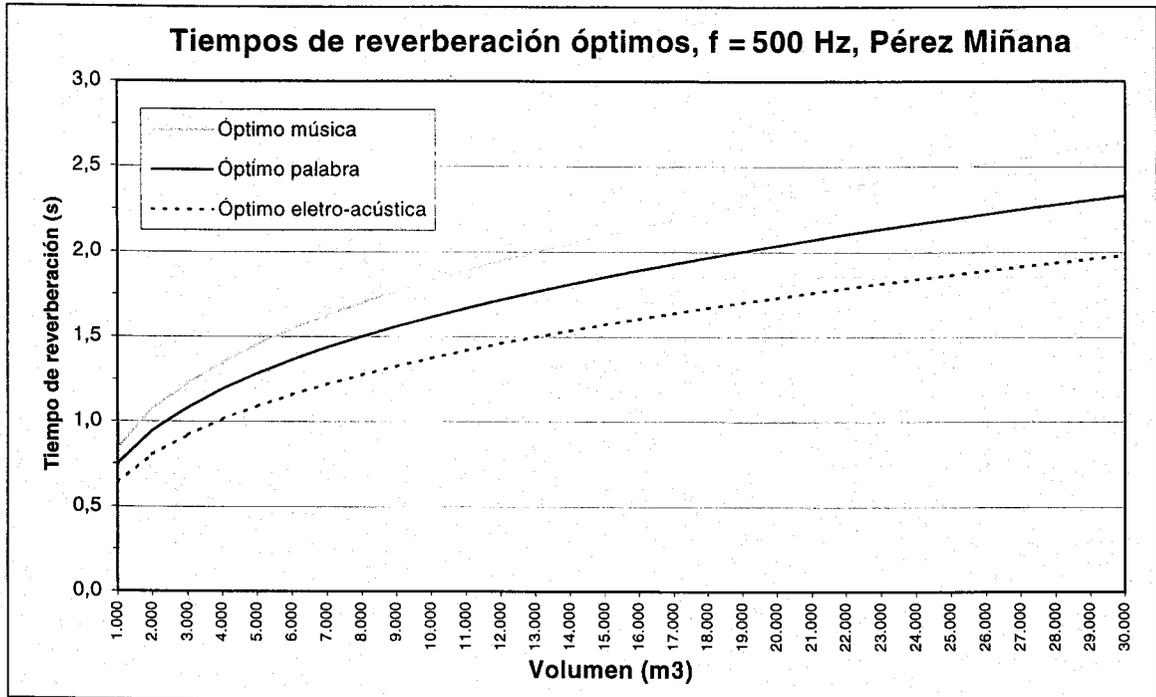


Figura 48. Tiempos de reverberación óptimos para 500 Hz, Pérez Miñana.

La fijación de los tiempos de reverberación óptimos debe, en cualquier caso, atender las siguientes consideraciones:

- a) La inteligibilidad de la palabra requiere menos tiempo de reverberación que la música.
- b) El tiempo de reverberación debe variar con la frecuencia: será menor en los agudos que en los graves, de acuerdo con la diferente sensibilidad del oído.
- c) La presencia de fuentes sonoras electro-acústicas requiere menor tiempo de reverberación que las fuentes naturales. En el primer caso las fuentes se distribuyen por el área de audiencia con lo cual todos reciben un adecuado nivel de sonido directo. En el caso de las fuentes naturales el mayor valor del tiempo de reverberación facilita mayores niveles del campo reverberante que vienen a suplir los bajos niveles del sonido directo en las zonas más alejadas de la audiencia.

d) La música necesita una clasificación. La gran y dispar variedad de la producción musical influye notablemente en la adopción de los tiempos de reverberación deseables.

e) El tiempo de reverberación óptimo es creciente con el volumen del local; esto último es discutible y no válido para grandes volúmenes.

Berane⁴⁶ presenta una gráfica con tiempos de reverberación óptimos, en la frecuencia de 500 Hz, para palabra, ópera y salas de conciertos, en la cual el aumento del volumen del ambiente no produce grandes cambios en el resultado final como en la ecuación (VIII) (figura 49).

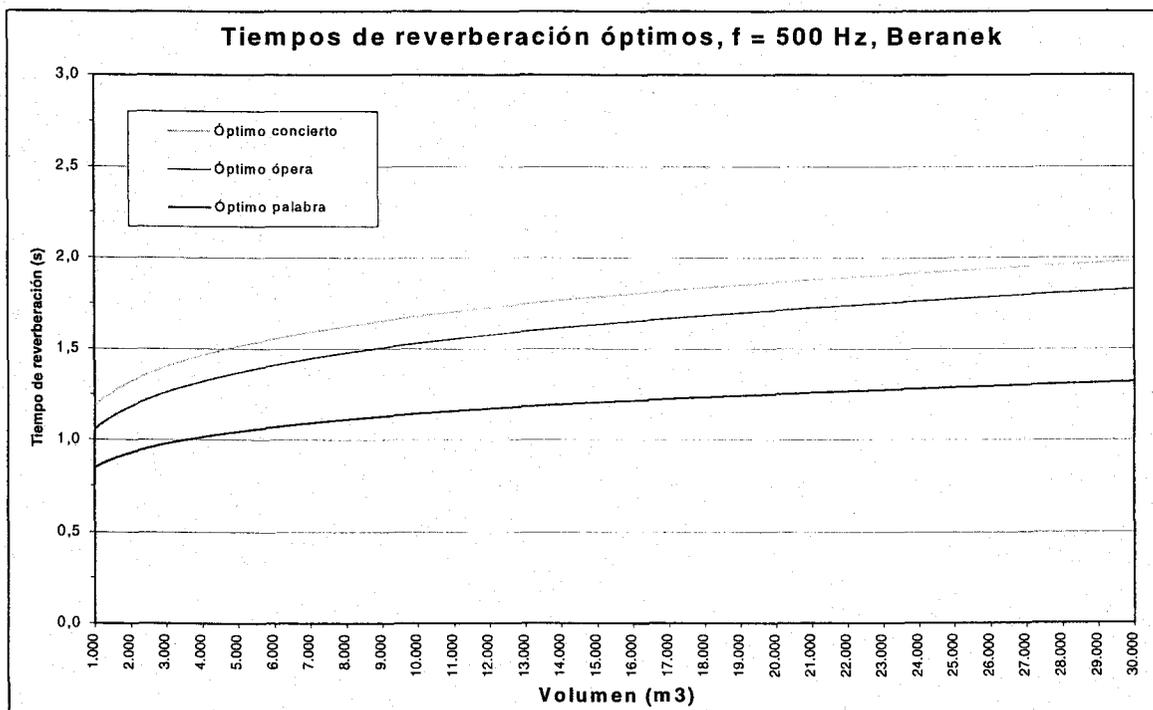


Figura 49. Tiempos óptimos de reverberación para 500 Hz, Beranek.

⁴⁶ BERANEK, L. L. *Acoustics*. Nueva York: Acoustical Society of America, 1993. P. 425.

Para la palabra Beranek indica una curva plana (mismo valor) en todas las frecuencias. Para ópera y concierto indica un aumento del tiempo de reverberación de 0,4 segundos a la frecuencia de 125 Hz, 0,2 s a la frecuencia de 250 Hz y 0,1 s a las demás frecuencias.

Cremer⁴⁷, a su vez, nos presenta una gráfica para determinación del tiempo óptimo de reverberación para la palabra, para las frecuencias de 500 y 1.000 Hz, que nos da los valores máximos y mínimos (figura 50).

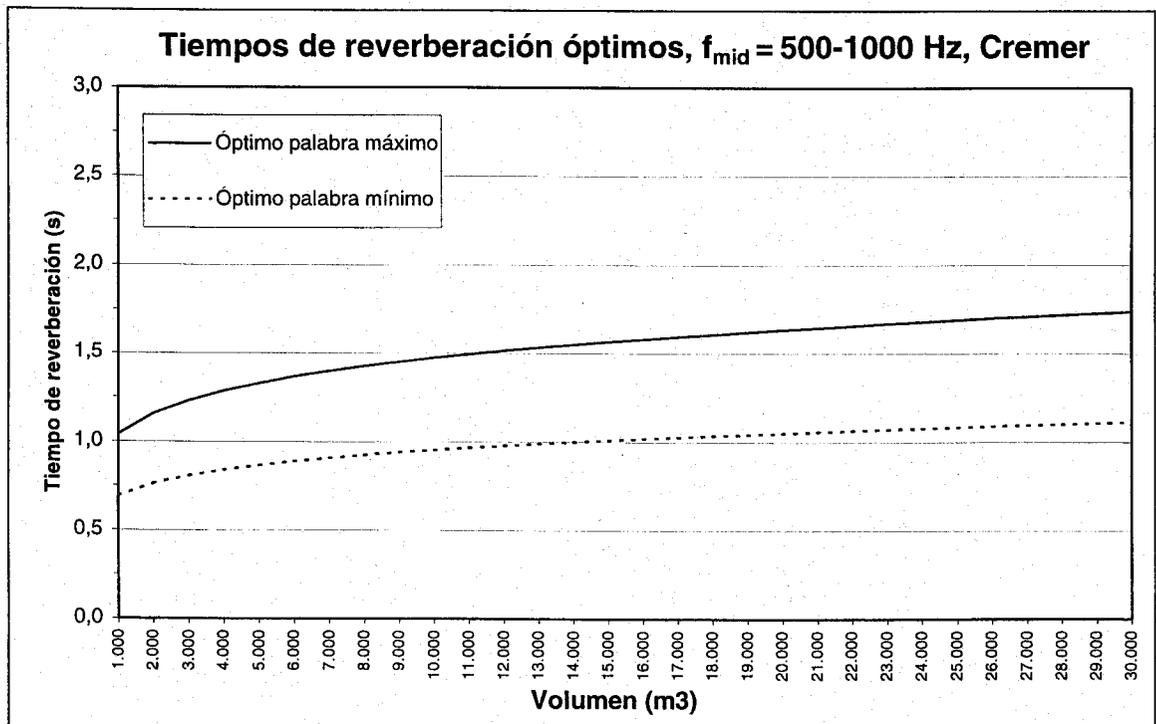


Figura 50. Tiempos óptimos de reverberación para la media entre 500 y 1.000 Hz, Cremer.

⁴⁷ CREMER, L. y MÜLLER, H.A. *Principles and Applications of Room Acoustics*. Traducción de Schultz, T. Londres: Applied Science Publishers LTD., 1982. P. 610.

3.2.3.3. Curvas tonales

Para mejor visualizar la distribución del tiempo de reverberación en las distintas bandas de frecuencias, se presentan gráficas con la frecuencia (en Hertz) en el eje X y el tiempo de reverberación (en segundos) en el eje Y. Uniendo los diversos puntos tendremos lo que llamamos **curva tonal**. Su forma nos proporciona muy rápidamente una idea del comportamiento del recinto, comparada con las **curvas tonales óptimas**, tanto para música como para la palabra. Para espacios polifuncionales se determina una **banda óptima**, limitada por las dos curvas anteriores.

3.2.4. Inteligibilidad de la palabra

La inteligibilidad de un mensaje oral representa la capacidad de entendimiento, por parte de un oyente (espectador), de las palabras transmitidas a través de un canal de transmisión (la sala) por un orador (actor).

Para evaluar la inteligibilidad en las mediciones *in situ* se ha utilizado el índice RASTI⁴⁸ (Rapid Speech Transmission Index) simplificación del STI⁴⁹ (Speech Transmission Index), que presenta sobre otros métodos significativas ventajas en cuanto a su realización y repetitividad.

⁴⁸ HOUTGAST, T, y STEENEKEN, H.J.M. A multi-language evaluation of the RASTI-Method for estimating speech intelligibility in auditoria. *Acústica*, v. 54, nº4, 1984. Pp. 185-199.

⁴⁹ HOUTGAST, T, y STEENEKEN, H.J.M. O.C. P. 185-199.

El estudio teórico de la inteligibilidad se ha obtenido a partir del algoritmo $\%AL_{\text{cons}}$ ⁵⁰ que está implementado en el Programa Informático de Predicción Acústica "AcoustaCADD", de la casa Audio MARK. Este índice valora la pérdida de inteligibilidad de consonantes a partir de la distancia emisor-receptor y del tiempo de reverberación de la sala, considerando el nivel de ruido de fondo.

3.2.5. Distribución sonora

El análisis de la distribución sonora en un local permite valorar la importancia relativa del campo reverberado frente al campo directo en diferentes puntos del mismo, el grado de difusión sonora, así como la ubicación de las zonas de máxima concentración y máximas caídas de nivel sonoro.

3.2.5.1. Campo sonoro directo y reverberado

Las ondas sonoras en una sala son reflejadas muchas veces de superficie a superficie, produciéndose alguna absorción en cada reflexión. Como resultado de esas múltiples reflexiones, la presión sonora en cualquier punto de la sala es mayor de lo que sería, a la misma distancia, en un espacio abierto. La contribución, debida a las reflexiones es conocida como campo reverberante. Su importancia puede ser valorada considerando lo que ocurre cuando cesa la emisión de un sonido en una sala.

⁵⁰ PEUTZ, V.M.A. Articulation loss of consonants as a criterion for speech transmission in a room. *Journal Audio engineering Society*, v. 19. nº 11. 1971. P. 915.

La otra componente del sonido que llega a un cierto punto de un recinto es el sonido directo, que sigue las leyes de propagación en el campo libre, particularmente la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Croome⁵¹ define que el radio del campo libre r para una fuente viene dado por la expresión:

$$r = 0,14\sqrt{RQ} \quad (\text{IX})$$

$$\text{con } R = \frac{S\bar{\alpha}}{(1-\alpha)}$$

Siendo:

Q : factor de directividad de la fuente ($Q = 2$ para la voz humana)

r : distancia a la fuente (m)

R : constante de la sala (m^2)

S : superficie total (m^2) de los límites del recinto (suelo, paredes y techo)

$\bar{\alpha}$: coeficiente de absorción medio de esos límites.

A esta distancia el campo sonoro directo y reverberado se igualan y a partir de ella la incidencia del campo sonoro directo va disminuyendo respecto a la del campo reverberado y la absorción de la sala empieza a ser efectiva en la reducción del nivel de presión sonora.

⁵¹ CROOME, D. O.C. P. 80.

El tiempo de retardo entre la llegada de la componente directa y de la componente reflejada es muy importante para la calidad del sonido recibido. Los valores de estos desfases de tiempo que no deben ser sobrepasados, propuestos por diferentes autores, se recogen en la tabla 7:

TABLA 7. Tiempo de retardo entre la componente directa y reflejada.

Autor	Palabra (ms)	Música (ms)
Egan ⁵²	< 20	20 - 30
Recuero ⁵³	20	-
Haas ⁵⁴	20 - 40	-
Croome ⁵⁵	10 - 30	20 - 40

Barron y Lee⁵⁶ observan que el modelo anterior no da cuenta de algo que se observaba al medir, el campo reverberado no era tan independiente de la distancia a la fuente y proponen una modificación a esta teoría clásica del campo reverberado. En el modelo consideran tres – y no dos – componentes de la energía sonora: el sonido directo d , el sonido reflejado temprano e_r (retardo < 80 ms) y el sonido reflejado que llega más tarde l (retardo > 80 ms):

$$L - L_0 = 10 \log (d + e_r + l) \quad (\text{X})$$

Las fórmulas que dan para la obtención de estas tres componentes son las siguientes:

⁵² EGAN, M.D. *Architectural Acoustics*. Nueva York: Mc Graw –Hill, 1988. P. 96.

⁵³ RECUERO, M. y GIL, C. *Acústica arquitectónica*. Madrid: Paraninfo, 1992. P. 214.

⁵⁴ HAAS, . In RECUERO, M. y GIL, C. O.C. P. 214.

⁵⁵ CROOME, D. O.C. P. 75.

⁵⁶ BARRON, M., LEE, J. Energy relations in concert auditoriums. *Journal of The Acoustical Society of America*, 84 (2), Agosto, 1988. Pp. 618-628.

$$d = \frac{100}{r^2}$$

$$e_r = 31200 \frac{T}{V} e^{-\frac{0,04r}{T}} (1 - e^{-1,117r})$$

$$l = 31200 \frac{T}{V} e^{-\frac{0,04r}{T}} e^{-1,117r}$$

Esta teoría revisada del campo reverberado asume una atenuación del sonido con la distancia, no sólo para el campo directo, sino también para el reverberado.

Hay que señalar que lo e_r es un valor de referencia que ellos toman como el nivel que la fuente produciría a 10 m de distancia si emitiera en campo libre.

3.2.5.2. Teoría Ondulatoria y Acústica Geométrica.

Si la emisión de la fuente se prolonga en el tiempo se forman ondas estacionarias en la sala. Hay varios modos de analizar teóricamente el campo sonoro que se forma.

Si hacemos uso de la teoría ondulatoria, podemos obtener las frecuencias características de un espacio paralelepédico de dimensiones **a**, **b**, **c** por la siguiente ecuación:

$$f_{xyz} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{a}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{b}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{c}\right)^2} \quad (\text{XI})$$

siendo:

f_{xyz} : frecuencia propia del local (Hz)

c: velocidad del sonido en el aire (m/s)

n_x, n_y, n_z : números enteros positivos o nulos

a, b, c : dimensiones del local (m).

Kuttruff⁵⁷ dice que no resulta útil aplicar los métodos de la teoría ondulatoria para encontrar respuestas a cuestiones prácticas, especialmente si la sala es grande y algo irregular en su forma. El cálculo de un valor propio y su correspondiente modo normal es a menudo difícil, y, en general, resulta obligado obtener un número elevado de modos para diferentes tipos de excitación.

En el otro extremo se situaría la teoría geométrica en la que se pierde el carácter ondulatorio del sonido y su propagación se asimila a la óptica geométrica. Este modelo puede ser válido cuando las dimensiones de la sala y sus cerramientos son grandes en relación con la longitud de onda del sonido. A una frecuencia de 1.000 Hz le corresponde una longitud de onda: $\lambda \approx 0,34$ m, y un sonido de frecuencia 125 Hz tiene una longitud de onda: $\lambda \approx 2,72$ m, valores en cualquier caso pequeños si los comparamos con las dimensiones usuales de los recintos cubiertos con ese tipo de estructuras textiles. También, si la incidencia del sonido es tangencial, la teoría geométrica puede ser aplicada.

Es evidente que el estudio de la acústica geométrica nos dará solo un conocimiento parcial del comportamiento acústico del recinto, pero este conocimiento será de gran importancia, especialmente en las aplicaciones prácticas.

⁵⁷ KUTTRUFF, H. *Room Acoustics*. 3ª edición. Londres: Elsevier Science Publisher, 1991. P.266

Al hacer uso de la teoría geométrica, para la acústica de locales reemplazamos el concepto de *onda sonora* por el de *rayo sonoro*. En ese caso, podemos aplicar sin grandes errores las leyes de la reflexión de la óptica geométrica.

Los métodos propios de la reflexión especular son válidos, en general, puesto que la extensión lateral del rayo sonoro es muy pequeña, lo que posibilita su aplicación.

Debido a que las superficies de las textiles son anticlásticas, con la forma de silla de montar, y no pueden ser cóncavas ni convexas, la dificultad viene en determinar los planos tangentes a las dos curvas para poder trazar la reflexión.

3.2.5.3. Trazado de rayos (*ray tracing*)

El trazado de los caminos recorridos por el rayo sonoro, reflejado n veces por la envolvente, nos permite determinar tanto la intensidad del sonido que llega al oyente, como su retardo en el tiempo. Así, pues, tendremos el rayo directo, las reflexiones de primer grado, segundo grado y así sucesivamente hasta la reflexión de grado n .

Si representamos el tiempo de llegada de las n reflexiones por medio de líneas verticales sobre un eje horizontal, cuya longitud sea proporcional al nivel sonoro aportado por cada reflexión, obtendremos lo que se llama *diagrama de reflexiones* o *ecograma*⁵⁸.

⁵⁸ KUTTRUFF, H. O. C. P. 91.

En realidad, hay dos formas diferentes de representación de estos ecogramas: Colocar el nivel de presión sonora asociado al sonido directo (valor máximo de la gráfica) en el origen del eje de abscisa, con lo que dicho eje mediría desfases de tiempo Δt de las distintas reflexiones respecto del sonido directo; o, por el contrario, representar el nivel sonoro directo y de las distintas reflexiones de acuerdo al tiempo que tarda en llegar al oyente, con lo que el eje de abscisa mediría tiempos t .

Esta gráfica contendrá información significativa sobre la distribución temporal del campo sonoro para un determinado punto de la sala.

3.3 Metodología a seguir

Para conocer mejor la acústica de los espacios cubiertos con estructuras textiles de PVC/Poliéster, será necesario efectuar medidas *in situ* en algunos recintos existentes.

En la medida de lo posible se ha procurado hacer una medición exhaustiva de los campos reverberantes en distintos tipos de espacios cubiertos por estructuras textiles, todas elaboradas con tejido de poliéster recubierto con PVC.

Sin embargo, en determinadas ocasiones ha sido imposible de realizar medidas de alguno de los parámetros.

Los espacios analizados son los siguientes:

- Recinto de la EXPO-92:
 - Apeadero del AVE
 - Palenque

- Pabellón de Ambiente-92

- Piscina Cubierta del Polideportivo San Pablo

- Auditorio Araujo Vianna

La descripción detallada de cada uno de estos espacios estudiados se encuentran en el capítulo 5.

CAPÍTULO 4. ESTUDIO DE LA ABSORCIÓN SONORA DE LAS CUBIERTAS TEXTILES.

Hoy en día hay, básicamente, dos tipos de membranas⁵⁹:

- Tejido de fibra de vidrio o aramida revestido de teflón.
- Tejido de poliéster revestido de PVC.

Las membranas del primero tipo son las más utilizadas en Norteamérica⁶⁰. Tienen una vida útil más larga: en torno a cincuenta años. Sólo resultan idóneas para construcciones permanentes, debido a su fragilidad al plegarse, ya que la fibra de vidrio puede partirse. Su coste es muy superior a las del segundo tipo. También admiten tensiones mayores.

Las membranas hechas en tejido de poliéster revestido de PVC son las más utilizadas en Europa⁶¹. Son las más indicadas para construcciones de carácter efímero debido a su flexibilidad, lo que permite que sean desmontadas, plegadas, transportadas a otro sitio y vueltas a montar, sin que se rompan las fibras del poliéster.

Pueden tener espesores y número de hilos aumentados en función de los esfuerzos. Su masa en general es muy pequeña, de 0,5 hasta 2,5 Kg/m², por lo que su aislamiento es muy bajo. Tienen una

⁵⁹ SOBEK, W. et al. Tensile Membrane Structures. Actas del IASS-Congress, Madrid, 1989. Pp. 19-32.

⁶⁰ DAVIES, C. Fabric Structures, *RIBAJ*, octubre, 1985. Pp. 31-35.

⁶¹ Koit Konstruktive Membranen. Rimsting, Germany, 1993.

gran transparencia, del 7% al 15% en muchos casos, suficiente para prescindir durante el día de la iluminación artificial⁶².

Entre éstas, que son las membranas analizadas en este estudio, hemos elegido las que componen sistemas estructurales de forma activa; más específicamente, las que integran sistemas en forma de tienda con apoyo mediante elementos de compresión y sistemas de redes de cables⁶³.

El primer paso de nuestra investigación fue intentar buscar lo que se conoce acerca de los coeficientes de absorción acústica de las membranas. La revisión bibliográfica apenas ofreció datos en este sentido.

Cuando una superficie vibra, una parte de la energía es radiada hacia el exterior, con lo que el efecto es equivalente a una verdadera absorción, ya que dicha energía es sustraída de la energía sonora incidente.

Croome⁶⁴, como se ha mencionado en el capítulo 2, nos indica una ecuación para calcular el coeficiente de absorción teórico de membranas de poco peso (entre 0,5 y 2,0 kg/m²):

$$\alpha = \left[1 + \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right)^2 \right]^{-1} \quad (I)$$

α : coeficiente de absorción

⁶² LLORENS D., J. y SOLDEVILA B., A. O.C., 1991. Pp. 23-39.

⁶³ ENGEL, H. *Sistemas de estructuras*. Madrid: Blume, 1970. P. 46.

ρ : densidad del aire (1,18 Kg/m³)

c : velocidad del sonido en el aire (340 m/s)

ω : $2 \pi f$

f : frecuencia (en Hz)

m : masa por unidad de superficie (Kg/m²)

Algunas fórmulas conocidas consideran la absorción de la membrana en función de la distancia a la pared⁶⁵ (cerramiento del recinto), de modo que, a medida que esa distancia aumenta, disminuye la frecuencia a la cual la absorción es máxima.

En el caso de que la distancia a la pared sea tan grande que la rigidez de la capa de aire detrás de la membrana no represente ningún papel, la ecuación sería la siguiente⁶⁶ :

$$\alpha = \left[1 + \left(\frac{\omega m}{2 \rho c} \right)^2 \cos^2 \theta \right]^{-1} \quad (\text{II})$$

Siendo:

θ : ángulo de incidencia

Esta ecuación coincide con la anterior para una incidencia normal de las ondas sonoras ($\theta = 90^\circ$ y $\cos^2 \theta = 1$)

⁶⁴ CROOME, D. Acoustical design for flexible membrane structures. Actas del Congreso "Light Weight Structure In Architecture", Sidney, Australia, 1986. Pp. 69-86.

⁶⁵ CARRIÓN, A. O. C. P. 81.

⁶⁶ RECUERO, M. y GIL, C. O. C. P. 280.

Por tanto, toda masa vibrante es un absorbente de bajas frecuencias. El coeficiente de absorción se hace cada vez mayor a medida que baja la frecuencia⁶⁷.

A continuación presentamos los valores calculados del coeficiente de absorción, en tercios de octavas, de una membrana de 0,9 Kg/m² (tabla 8), empleando las dos ecuaciones anteriores.

TABLA 8. Coeficientes de absorción calculados para una membrana de 0,9 kg/m².

$m = 0,9 \text{ Kg/m}^2$		Ecuación (II)						
		Ángulo de incidencia θ						
Frecuencias	Ecuación (I)	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
100	0,6748	0,6748	0,6898	0,7345	0,8059	0,8925	0,9687	1,0000
125	0,5705	0,5705	0,5873	0,6391	0,7266	0,8416	0,9519	1,0000
160	0,4477	0,4477	0,4649	0,5194	0,6186	0,7643	0,9236	1,0000
200	0,3416	0,3416	0,3573	0,4089	0,5093	0,6748	0,8855	1,0000
250	0,2493	0,2493	0,2624	0,3069	0,3991	0,5705	0,8319	1,0000
315	0,1730	0,1730	0,1831	0,2181	0,2950	0,4555	0,7571	1,0000
400	0,1148	0,1148	0,1220	0,1474	0,2060	0,3416	0,6591	1,0000
500	0,0766	0,0766	0,0817	0,0997	0,1424	0,2493	0,5531	1,0000
630	0,0497	0,0497	0,0531	0,0652	0,0947	0,1730	0,4380	1,0000
800	0,0314	0,0314	0,0336	0,0414	0,0609	0,1148	0,3259	1,0000
1000	0,0203	0,0203	0,0218	0,0269	0,0399	0,0766	0,2363	1,0000
1250	0,0131	0,0131	0,0140	0,0174	0,0259	0,0504	0,1653	1,0000
1600	0,0080	0,0080	0,0086	0,0107	0,0160	0,0314	0,1078	1,0000
2000	0,0052	0,0052	0,0055	0,0069	0,0103	0,0203	0,0718	1,0000
2500	0,0033	0,0033	0,0035	0,0044	0,0066	0,0131	0,0472	1,0000
3150	0,0021	0,0021	0,0022	0,0028	0,0042	0,0083	0,0302	1,0000
4000	0,0013	0,0013	0,0014	0,0017	0,0026	0,0052	0,0190	1,0000
5000	0,0008	0,0008	0,0009	0,0011	0,0017	0,0033	0,0122	1,0000
6300	0,0005	0,0005	0,0006	0,0007	0,0010	0,0021	0,0077	1,0000
8000	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0006	0,0013	0,0048	1,0000

En la figura 51 presentamos la gráfica con los valores de la tabla 8.

⁶⁷ RECUERO, M. y GIL, C. O. C. P. 281.

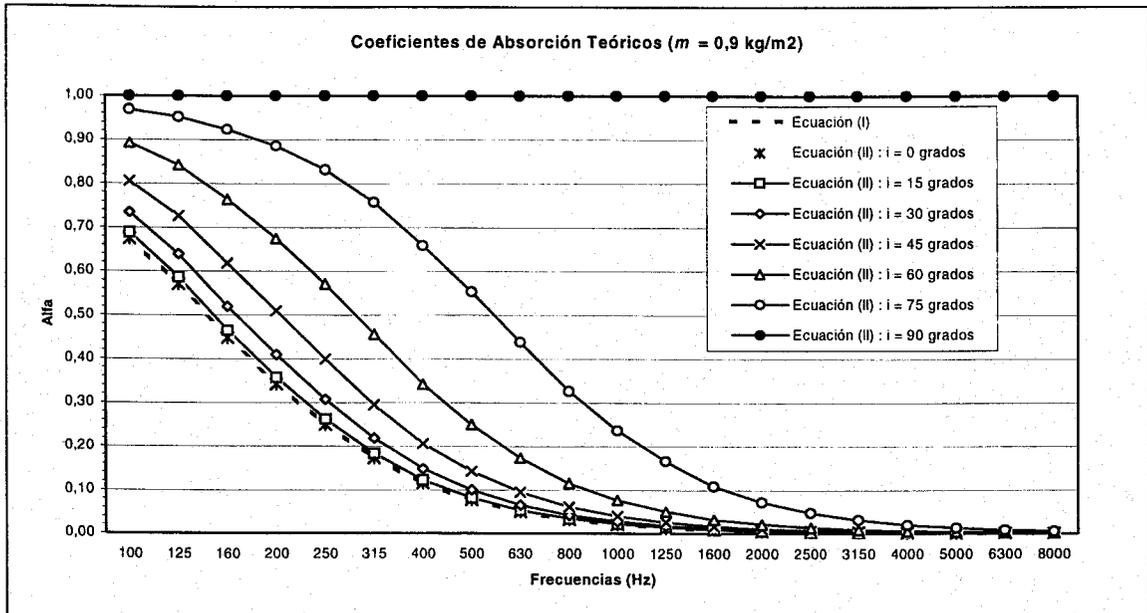


Figura 51. Valores teóricos de coeficientes de absorción para membrana de $m = 0,9 \text{ kg/m}^2$.

Para contrastar la validez de estos resultados, decidimos efectuar una primera comprobación experimental, haciendo uso del Tubo de Ondas Estacionarias, también llamado Tubo de Kundt (figura 52), debido a la existencia de este equipo en el Laboratorio del Departamento de Física Aplicada de la E.T.S.A. de Sevilla. Otra razón que nos estimuló a hacer uso de este equipo fue el bajo coste del ensayo.

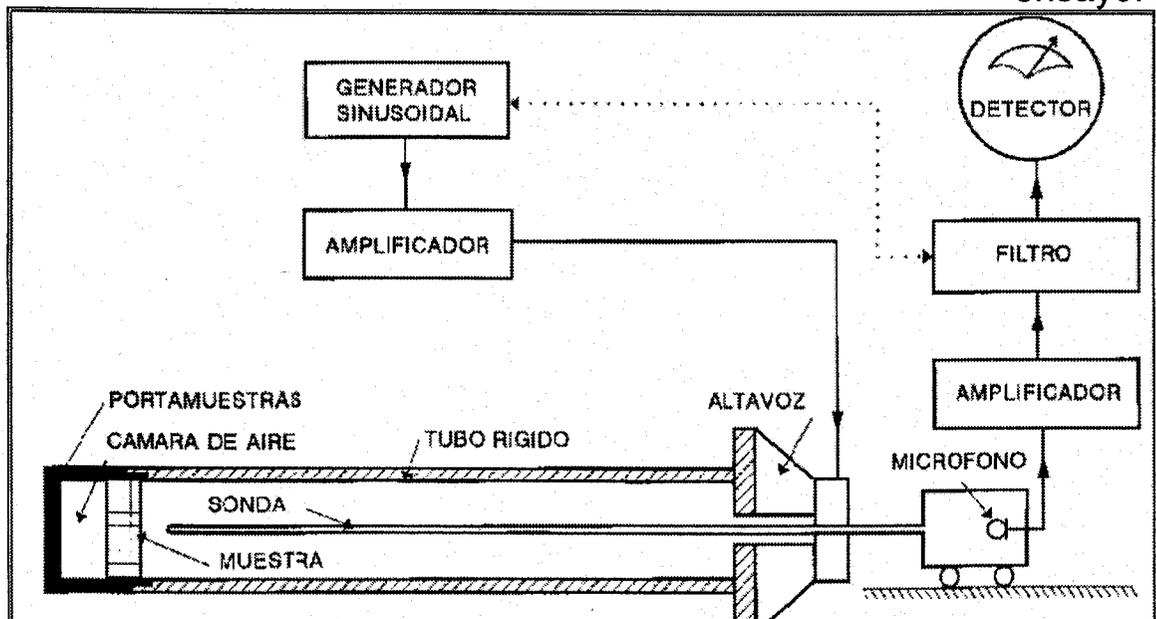


Figura 52. Tubo de ondas estacionarias.

El método del Tubo de Kundt⁶⁸ consiste en introducir una muestra del material que va a ser ensayado en una extremidad del tubo. Como las cubiertas textiles siempre llevan tensión en su montaje, una muestra sin tracción no nos llevaría a resultados fiables. Con la intención de simular las condiciones reales de uso de membranas en espacios cubiertos con estructuras textiles, montamos un bastidor (figura 53) donde podríamos someter la muestra (el mismo textil de la cubierta del Palenque – EXPO 92, de 900 g/m²) a diferentes tensiones controladas con el dinamómetro aplicado a los cables de tracción.

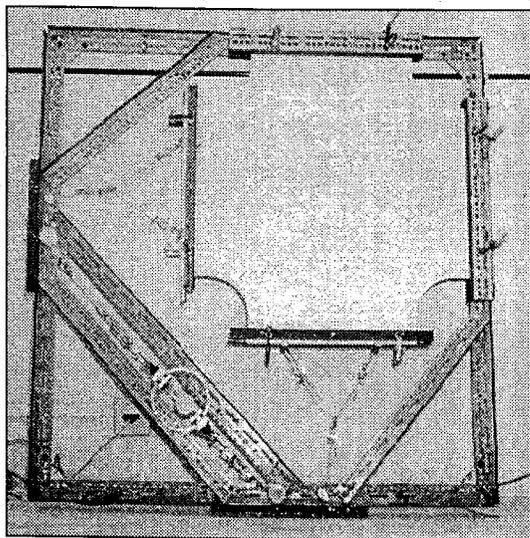


Figura 53. Bastidor de la muestra.

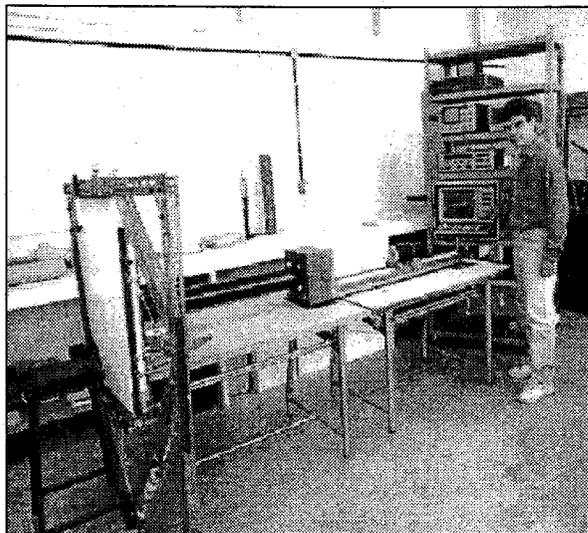


Figura 54. Ensayo con el tubo de Kundt.

Con la muestra preparada, la presionamos contra el tubo (figura 54) de modo que tenemos un campo ``infinito`` detrás del textil. Hemos sometido la membrana a distintas tensiones, 0,5 ; 1,0 ; 1,5 y 2,0 Kg/cm, y repetido el ensayo varias veces.

⁶⁸ JOHNSON, T. *Oscilações, ondas acústicas*. São Paulo: 1963. P. 71.

La tensión en cubiertas textiles se mide en masa por ancho de banda. En algunas especificaciones encontramos **N/5cm**, la carga en Newton aplicada a una banda de textil de 5 cm de ancho. Los datos de tensión se refieren a un ancho de banda de 1 cm, a menos que se especifique otro ancho considerado.

Los resultados obtenidos no nos permitieron la determinación de los coeficientes de absorción, debido a la no repetición de los valores de α conseguidos. Lo que sí se puso de relieve (figura 55) es la mayor absorción a bajas frecuencias (alrededor de 160 a 400 Hz), así como la casi no existencia de absorción a partir de los 600 Hz.

Durante las mediciones pudimos observar cómo la membrana tensada a 1 Kg/cm, empezó a vibrar (resonancia) a la frecuencia de 202 Hz, mientras que la tensada a 2 Kg/cm comenzó a vibrar a la frecuencia de 312 Hz.

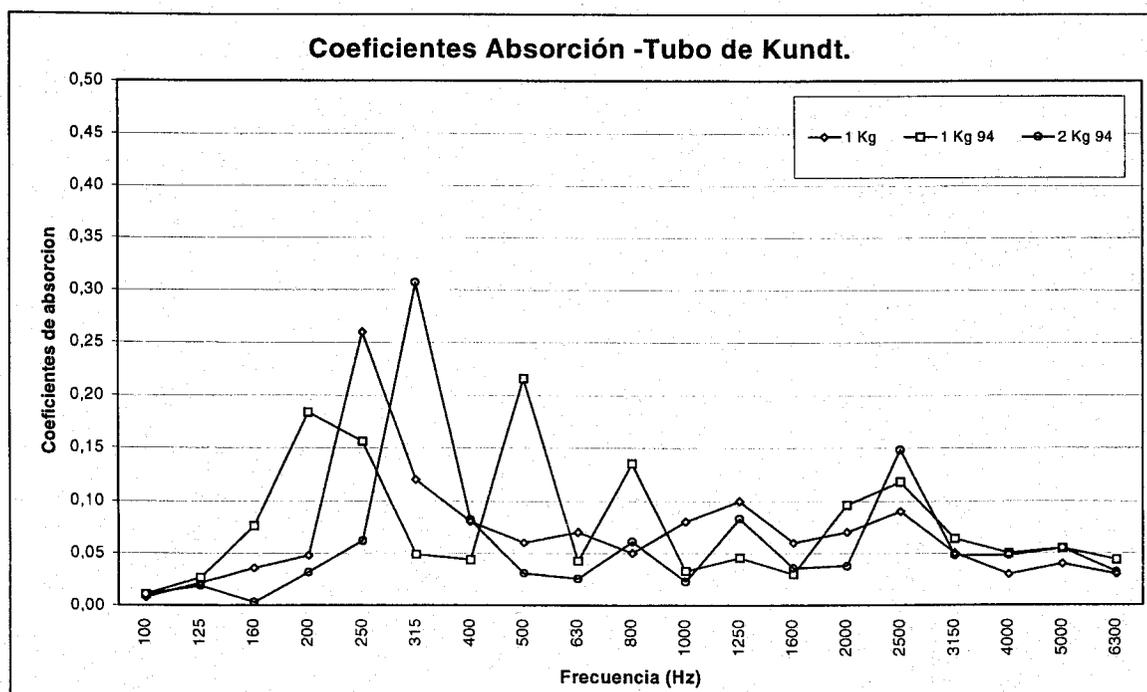


Figura 55. Coeficientes de absorción obtenidos con el tubo de Kundt.

Los resultados obtenidos con el tubo largo de bajas frecuencias y con el tubo corto de altas frecuencias, para la muestra de textil sin tensión y luego tensada a 1 y 2 Kg/cm, se representan figura 55.

La dispersión de los resultados obtenidos sólo nos permite extraer conclusiones generales, pero también nos revela que este método de ensayo no es válido para este tipo de material.

Debido a los resultados poco fiables de las ecuaciones y del ensayo en Tubo de Kundt, hemos desarrollado un modelo tridimensional para ensayos en cámara reverberante. Hemos construido un prototipo lo más parecido a una situación real de uso: un paraboloides hiperbólico con doble curvatura anticlástica, la misma membrana empleada en la cubierta de la Piscina del Polideportivo San Pablo de Sevilla. Hemos montado el modelo en el Laboratorio de Estructuras de la E.T.S.A. de Sevilla, con la colaboración del Prof. Dr. Arq. Félix Escrig Pallarés. El modelo consiste en un cuadro metálico reforzado de 3,20 x 3,20 metros, con dos esquinas opuestas en el suelo y las otras dos esquinas elevadas 1 metro del suelo, para poder tensar la membrana. En ese cuadro hemos montado la membrana de 3 x 3 metros provista de terminaciones metálicas para su anclaje, formando el paraboloides. Con el fin de evitar que las reflexiones alcanzasen la cara inferior del textil hemos cerrado los laterales con tableros de 25 mm. En la figura 56 se muestra el modelo montado en la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica del Centro Nacional de Medios de Protección de Sevilla, donde se aprecia en primer plano el equipo de control de las tensiones, conectado a las galgas extensiométricas pegadas a la membrana, la lateral cerrada con tablero y la estructura metálica.

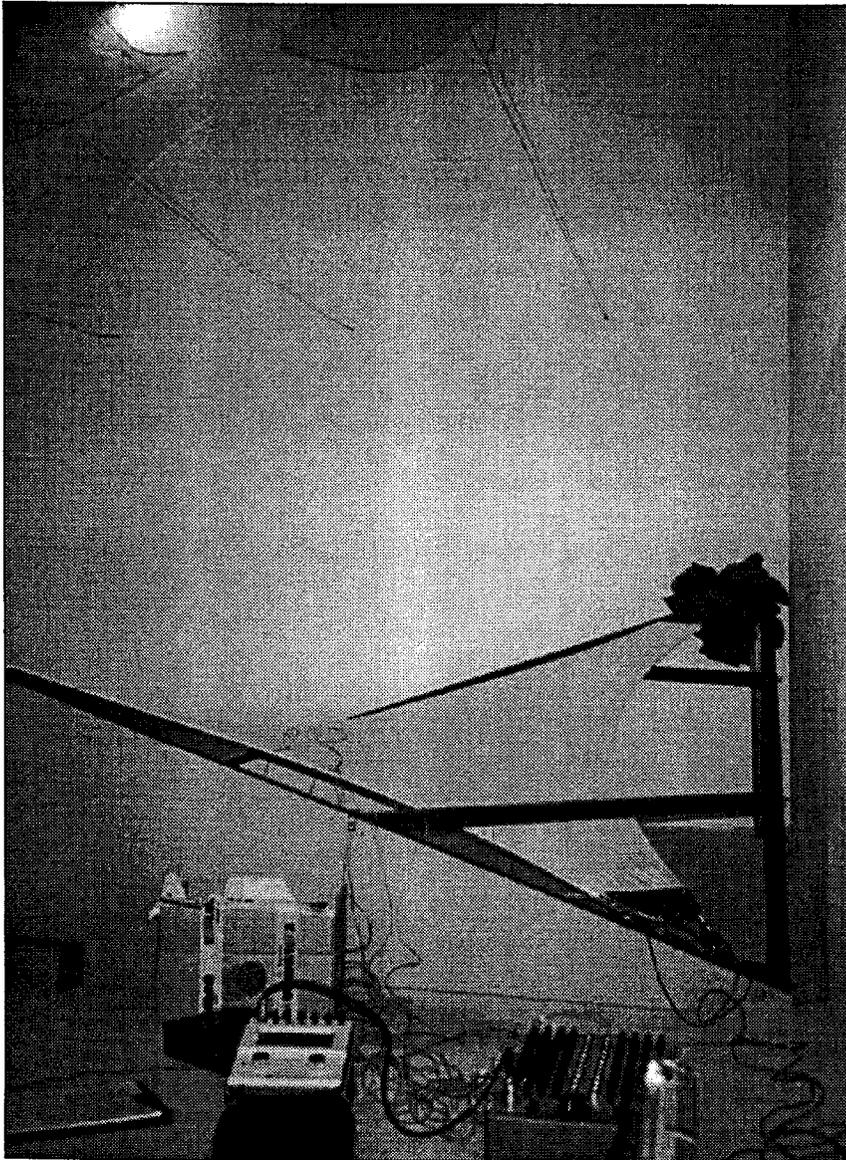


Figura 56. Modelo montado en la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica del Centro Nacional de Medios de Protección de Sevilla.

Para controlar los esfuerzos en el modelo, hemos pegado en la superficie de la muestra sensores extensiométricos (*strain gages*), conectados a una *switching and balancing box*, modelo SS-24R, a su vez conectada al *strain indicator*, modelo SM-60D, todos de la casa Kiowa Eletronic Instruments. Las galgas extensiométricas fueron pegadas una próxima al borde, dos en el centro, otra próxima a una esquina de anclaje y otra a media distancia entre el borde y el centro.

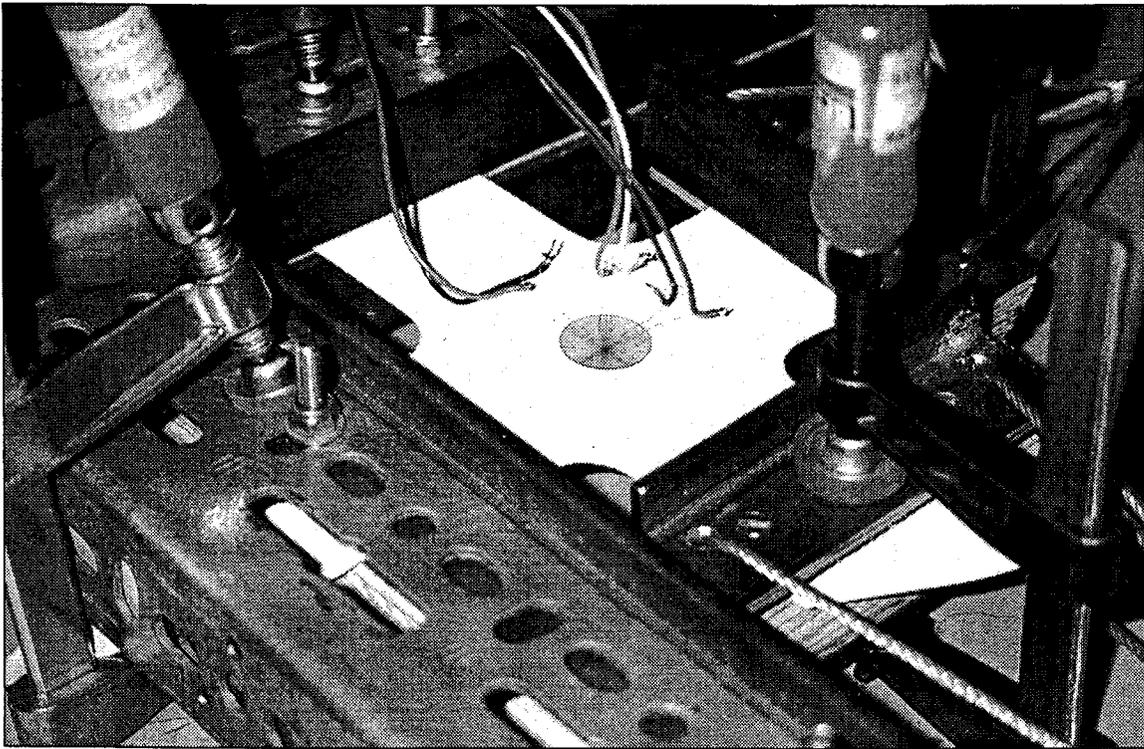


Figura 57. Ensayo de tensión/deformación en probetas de 5 cm de ancho. E.T.S.A. Sevilla.

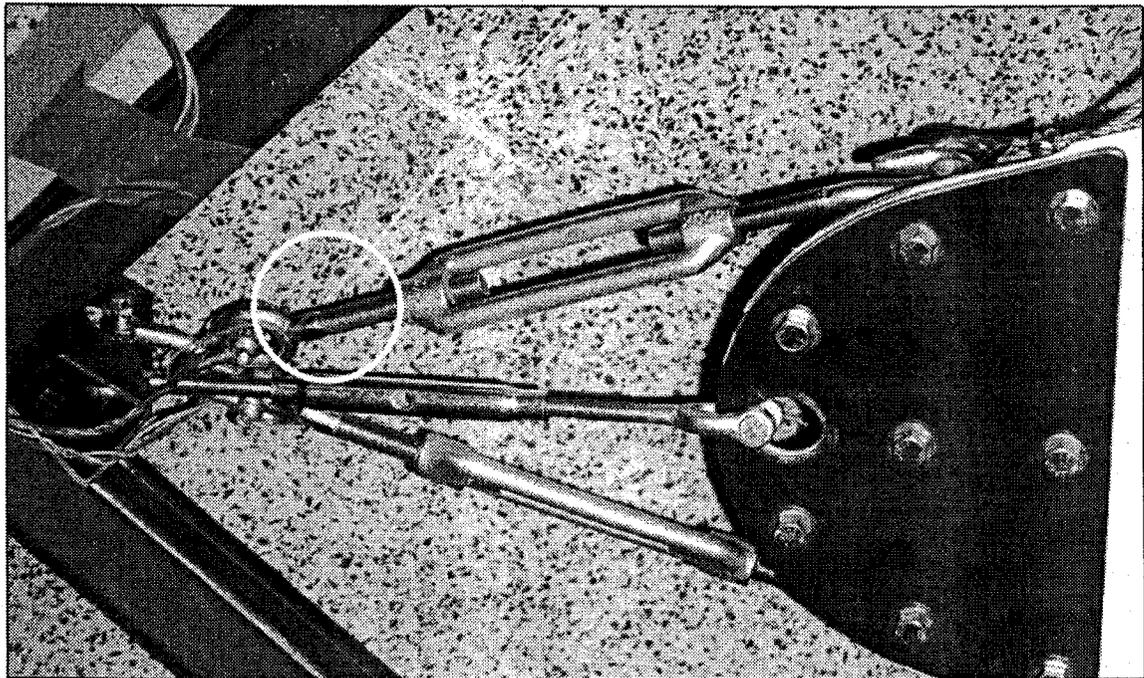


Figura 58. Detalle del modelo, con galgas extensiométricas en los tensores. E.T.S.A. Sevilla.

Para determinar las tensiones en la membrana, hemos ensayado en el dinamómetro probetas de 5 cm de ancho del textil (figura 57), a las que hemos pegado bandas extensiométricas y obtenido la correlación entre deformación (microstrains) y tensión (Kg/cm) (figura 59).

Para obtener la misma tensión en las cuatro esquinas, haciendo uso de un solo dinamómetro, hemos puesto galgas en todos los tensores (figura 58), en los dos lados de los tornillos. De esa forma, cuando igualamos la deformación también igualamos la tensión.

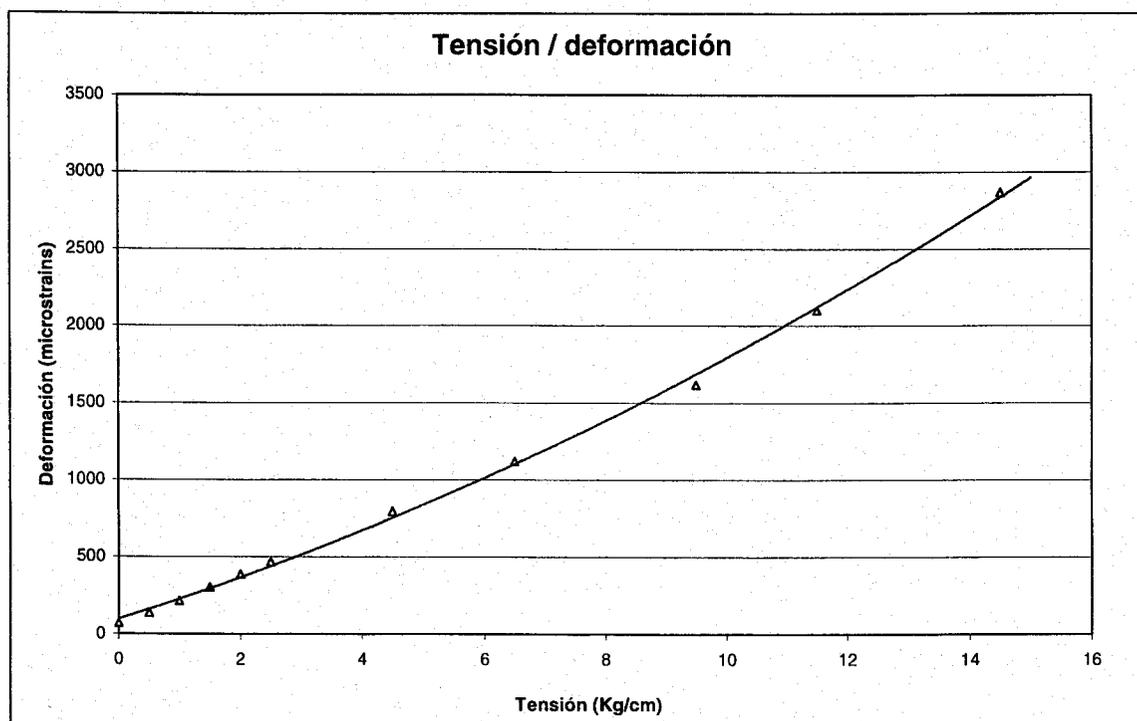


Figura 59. Gráfica tensión - deformación.

Una vez comprobada la validez del modelo, nos desplazamos con todo el equipo a la Cámara Reverberante del Laboratorio de Acústica del Centro Nacional de Medios de Protección de Sevilla, que amablemente colaboró en esa investigación facilitando el acceso a sus dependencias. En las mediciones se utilizó el método de ruido interrumpido, generado por un analizador B&K 2133, un amplificador B&K E5001 y transmitido al interior de la cámara por la fuente B&K BR112TA, recogido por un micrófono B&K 4165.

Para la ejecución del ensayo se siguió la metodología indicada en la norma ISO R/354. Medimos los tiempos de reverberación T20 y T30 de la cámara reverberante vacía, con el bastidor sin la membrana y con la membrana tensada a 0,0 ; 0,5 ; 1,0 ; 1,5 y 2,0 Kg/cm, lo

que representan 0 Kp; 240 Kp; 595 Kp; 720 Kp y 930 Kp, respectivamente, de esfuerzo en el dinamómetro instalado en el puño del textil. A partir de los tiempos de reverberación medidos, calculamos los coeficientes de absorción de la membrana sometida a las diferentes tensiones. Los coeficientes de absorción medios calculados de acuerdo con la ISO R/354, a partir de la diferencia de los T_{20} (con muestra y sin muestra) y T_{30} (con muestra y sin muestra), se presentan en las siguientes figuras 60 y 61:

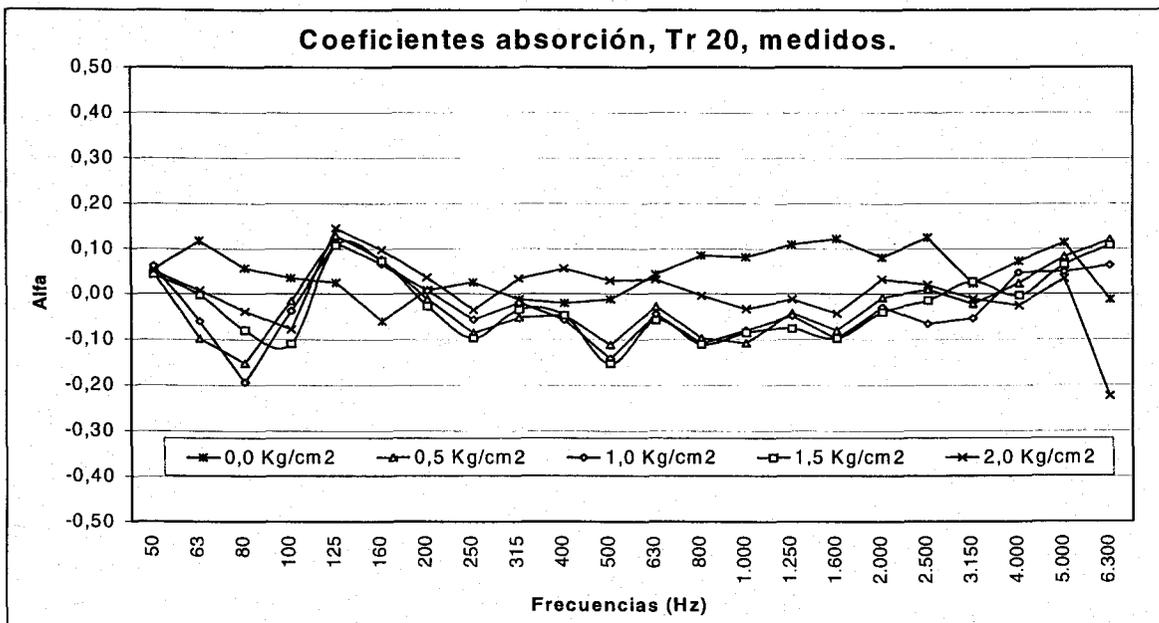


Figura 60. Coeficientes de absorción de la muestra, calculados a partir de T_{20} .

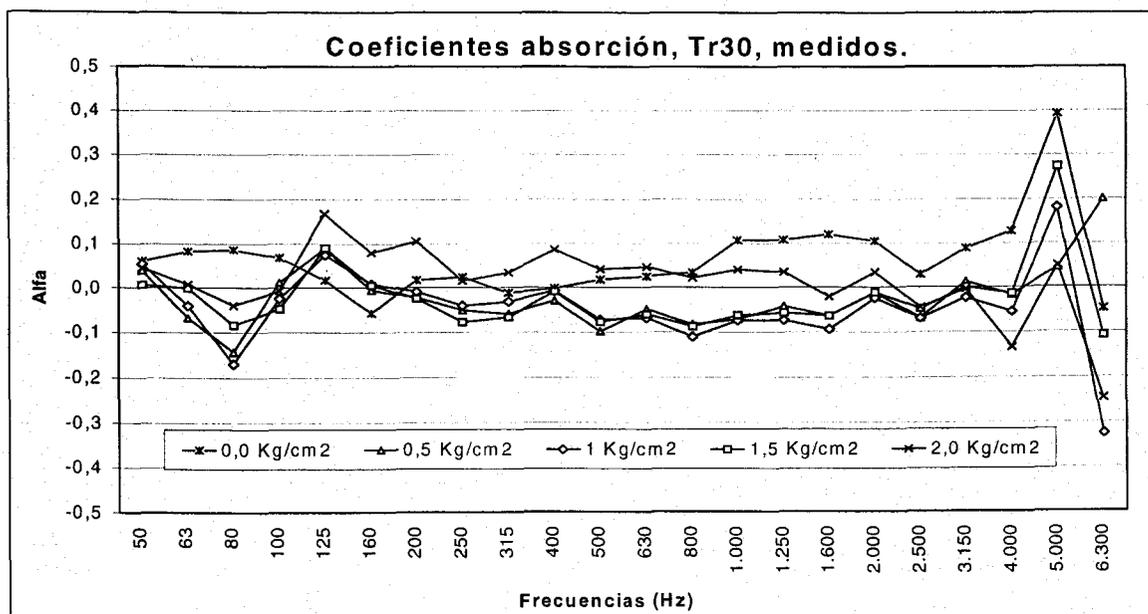


Figura 61. Coeficientes de absorción de la muestra, calculados a partir de T_{30} .

Analizando los resultados se percibe que tampoco este ensayo ha sido concluyente. Entre otras valoraciones, la existencia de resultados negativos para los coeficientes de absorción, después de muchas mediciones promediadas, nos indica que el método de la norma ISO R/354 no resulta idóneo para ese tipo de membrana textil. Estimamos que es debido a la dificultad de conseguir un campo infinito por detrás de la membrana, que es la situación real de uso de la misma.

Seguimos con nuestra investigación en el Laboratorio de Materiales de Construcción, Sector Acústica, también llamado LATA (Laboratorio de Termo-Acústica), de la Universidad Federal de Santa María, en la ciudad de Santa María, RS, Brasil, con la colaboración del Prof. Dr. Ing. Jorge Pizzutti dos Santos.

De los ensayos realizados con anterioridad por el equipo de investigación del Dr. Pizzutti, en la cámara reverberante de este Laboratorio, destacamos dos principalmente:

- 1 – Obtención de los coeficientes de absorción de un tubo cilíndrico metálico ($\phi = 0,30$ m, longitud = 0,84 m, colocando 3 unidades/m²), cerrado en sus dos extremos por una membrana, (película plástica corriente de PVC), con vista a la corrección acústica económica de aulas (figura 62). Los resultados de esto

trabajo fueron presentados en el 1^{er} Congreso Iberoamericano de Acústica celebrado en Brasil⁶⁹.

U F S M -- C T --		LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL SETOR ACÚSTICA		CÓDIGO UFSM
NATUREZA DO TRABALHO Medições de absorções sonoras e coeficientes de absorção sonora em câmara reverberante				Data da Emissão 02/07/1996
INTERESSADO LATA			DISCRIM. PROD. TU84DUP	
CARACTERÍSTICA DA AMOSTRA 30 Tubos Cilind. Deitados, 3/m ² , com membrana em ambos os lados, com L = 0,84 m e d = 0,30 m			Método: O ensaio foi realizado de acordo com a norma ISO L30 / 354. A classe de transmissão sonora (cts) foi determinada segundo a norma astw 413-73	
Freq.	Tmat.	Tvz	Alfa	
100	13,52	17,31	0,05	
125	4,43	11,05	0,45	
160	2,19	10,02	1,19	
200	4,72	15,20	0,49	
250	4,20	11,48	0,50	
315	4,36	12,95	0,51	
400	4,51	12,13	0,46	
500	4,93	11,95	0,40	
630	5,24	10,66	0,32	
800	4,69	10,68	0,40	
1000	4,85	9,96	0,35	
1250	4,59	8,70	0,34	
1600	4,66	7,99	0,30	
2000	4,24	6,83	0,30	
2500	3,95	6,18	0,30	
3150	3,55	4,91	0,26	
4000	3,08	4,05	0,26	
Tvz = Tempo de reverberação sala vazia			alfa = coeficiente de absorção sonora	
Tmat = Tempo de reverberação com material			Freq. = frequência (Hz)	
Responsável pelo laboratório			Responsável técnico	
Francisco Ripoli Filho			Jorge Luiz Pizzutti dos Santos	

Figura 62. Ficha del ensayo de absorción de tubos cilíndricos cerrados con membrana de PVC.

Observando los resultados de este ensayo, se nota la gran capacidad de absorción en bajas frecuencias, especialmente en la frecuencia de 160 Hz, que debe ser la frecuencia de resonancia del dispositivo. Eso es un indicativo del comportamiento acústico típico de las membranas.

⁶⁹ PIZZUTTI et al. Desenvolvimento de absorvedores sonoros alternativos para aplicação em ambientes de grandes dimensões em correções acústicas temporárias. Actas del I Congreso Iberoamericano de Acústica, Brasil, 1998, P. 455.

2 – Medidas de la pérdida de transmisión de ruido rosa en paneles de PVC flexible. Este trabajo también fue presentado al 1^{er} Congreso Iberoamericano de Acústica celebrado en Brasil⁷⁰. Se analizó la pérdida de transmisión por frecuencia, comprobando que la mayor transparencia acústica se sitúa en las bajas frecuencias, lo que es otro indicativo del comportamiento acústico de membranas (figura 63).

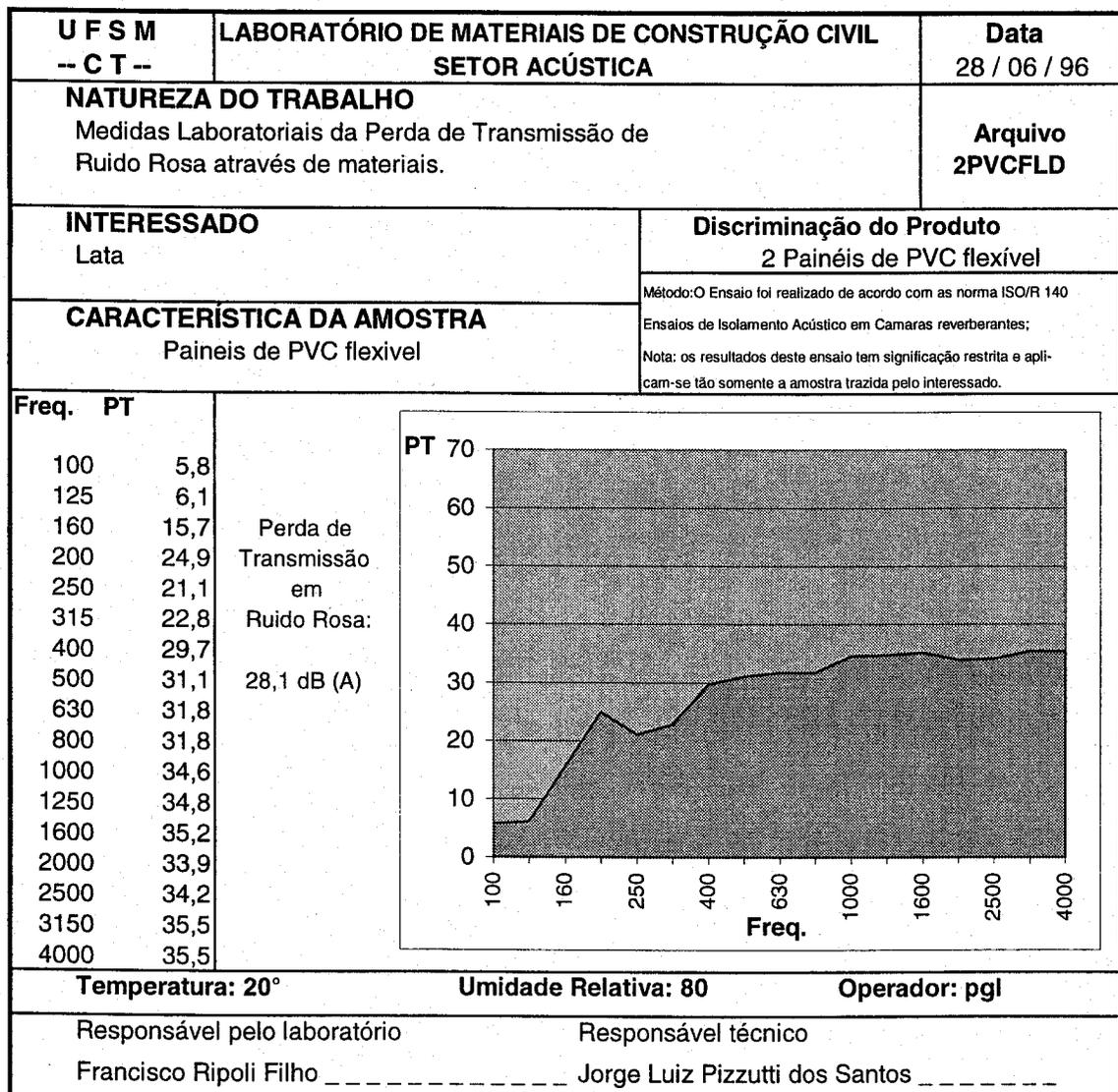


Figura 63. Ficha del ensayo de transmisión en paneles flexibles de PVC.

⁷⁰ PIZZUTTI et al. Estudo de cortinas leves na isolação acústica de ambientes. Actas del I Congreso Iberoamericano de Acústica, Brasil, 1998. P. 311.

Con la membrana del prototipo desarrollado en Sevilla, montamos otros ensayos en la cámara reverberante del LATA. En las mediciones seguimos utilizando el método de ruido interrumpido, generado por fuente sonora B&K 4224. El equipo se completaba con un analizador B&K 2123, un analizador B&K 4418, un analizador B&K 2230 + filtro 1625, y un micrófono B&K 4165 con jirafa giratoria B&K 3923.

En el primer ensayo pusimos la lona en el suelo, sin tensión. Medimos los tiempos de reverberación, y calculamos los coeficientes de absorción de acuerdo con la norma ISO R/354. Aunque en los ensayos anteriores concluimos que la norma citada no era adecuada para las membranas, seguimos utilizándola para poder comparar los resultados obtenidos en los ensayos. Los resultados se encuentran en la figura 64.

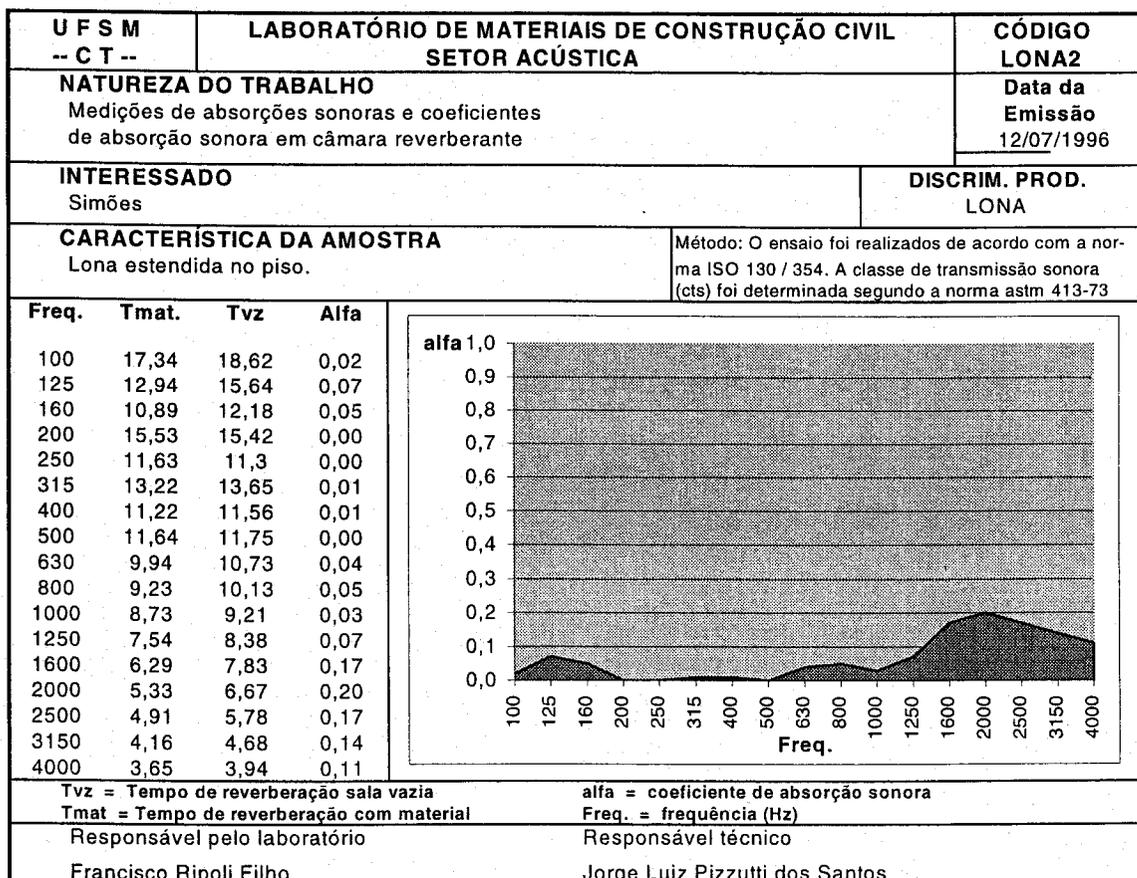


Figura 64. Ficha del ensayo de absorción sonora de la membrana prototipo en el suelo.

En el segundo ensayo extendimos la lona a 34 cm del suelo, apoyada en travesaños de madera, sin tensión. Medimos los tiempos de reverberación y calculamos los coeficientes de absorción de acuerdo con la norma ISO R/354. Los resultados se encuentran en la figura 65.

U F S M -- C T --		LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL SETOR ACÚSTICA		CÓDIGO LONA 1
NATUREZA DO TRABALHO Medições de absorções sonoras e coeficientes de absorção sonora em câmara reverberante			Data da Emissão 12/07/1996	
INTERESSADO Simões			DISCRIM. PROD. LONA	
CARACTERÍSTICA DA AMOSTRA Lona estendida, suspensa a 34 cm do piso.			Método: O ensaio foi realizado de acordo com a norma ISO 130 / 354. A classe de transmissão sonora (cts) foi determinada segundo a norma ASTM 413-73	
Freq.	Tmat.	Tvz	Alfa	
100	15,29	18,62	0,06	
125	13,76	15,64	0,05	
160	8,03	12,18	0,23	
200	12,7	15,42	0,08	
250	9,98	11,3	0,06	
315	11,83	13,65	0,06	
400	10,07	11,56	0,07	
500	11,08	11,75	0,03	
630	9,52	10,73	0,06	
800	9,56	10,13	0,03	
1000	8,95	9,21	0,02	
1250	7,76	8,38	0,05	
1600	7,28	7,83	0,05	
2000	6,46	6,67	0,03	
2500	5,51	5,78	0,05	
3150	4,42	4,68	0,07	
4000	3,56	3,94	0,15	
Tvz = Tempo de reverberação sala vazia			alfa = coeficiente de absorção sonora	
Tmat = Tempo de reverberação com material			Freq. = frequência (Hz)	
Responsável pelo laboratório			Responsável técnico	
Francisco Ripoli Filho			Jorge Luiz Pizzutti dos Santos	

Figura 65. Ficha del ensayo de absorción sonora de la membrana prototipo suspendida 34 cm del suelo.

Comparando las dos gráficas anteriores, observamos que cuando se separa la membrana del suelo aumenta la absorción en bajas frecuencias, al mismo tiempo que disminuye la absorción en altas frecuencias.

En el tercer ensayo montamos el textil cerrando el hueco de la puerta de acceso a la cámara, (figura 66). En este ensayo no hemos considerado ni la forma ni la tensión.

Para evitar que las reflexiones que traspasasen la membrana retornasen a la cámara, dejamos la puerta abierta formando un ángulo de 45 grados con la pared (figura 67), con el fin de dirigir los sonidos al interior de la nave donde se sitúa la cámara reverberante. La intención era simular un campo infinito por detrás de la membrana.

Medimos los tiempos de reverberación y los comparamos con los tiempos de la cámara vacía para obtener los coeficientes de absorción (figura 68). Aunque el ensayo esté fuera de la norma al dejar la puerta de la cámara reverberante abierta, fue el ensayo que dio los mejores resultados, como veremos más adelante .

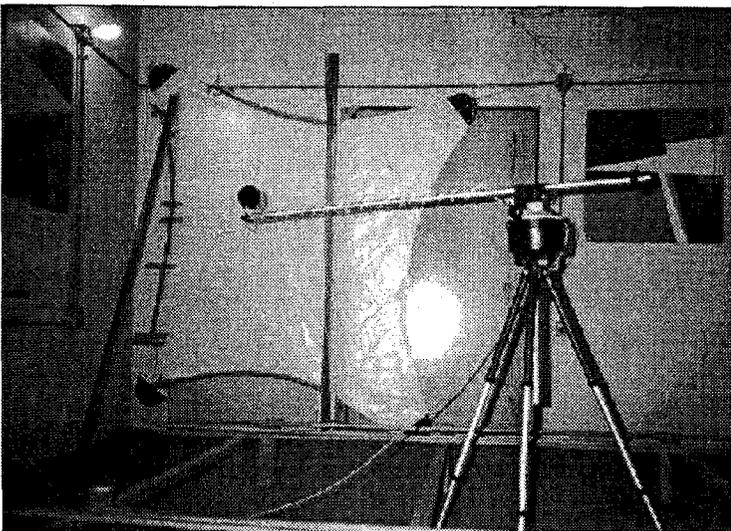


Figura 66. Ensayo de absorción en cámara reverberante.

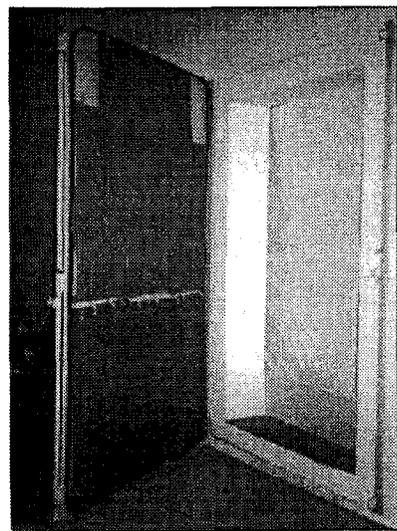


Figura 67. Posición de la puerta.

Con la idea de avanzar más en el estudio de las cubiertas textiles, aprovechamos el montaje para hacer un ensayo de pérdida de transmisión de ruido. Hemos utilizado los equipos ya citados. Instalamos un micrófono en el interior de la cámara reverberante a,

aproximadamente, 1 metro de la lona (figura 69) y otro en el exterior. Generamos ruido rosa en el interior y medimos los niveles de presión sonora en tercios de octavas, con la membrana puesta en la puerta y sin ella. Los resultados de las mediciones y las diferencias de niveles sonoros se encuentran en la tabla 9 y figura 70.

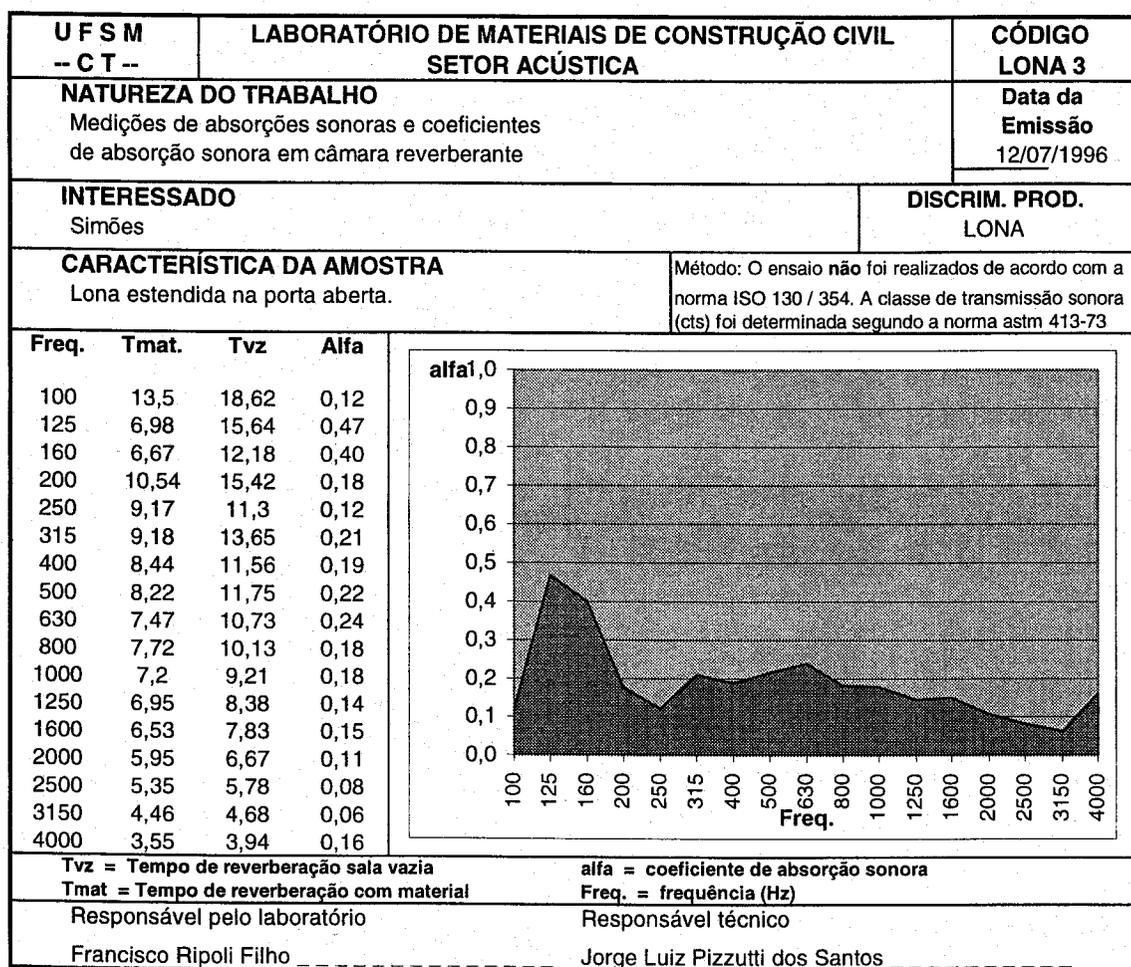


Figura 68. Ficha del ensayo de absorción de la membrana frente a la puerta.

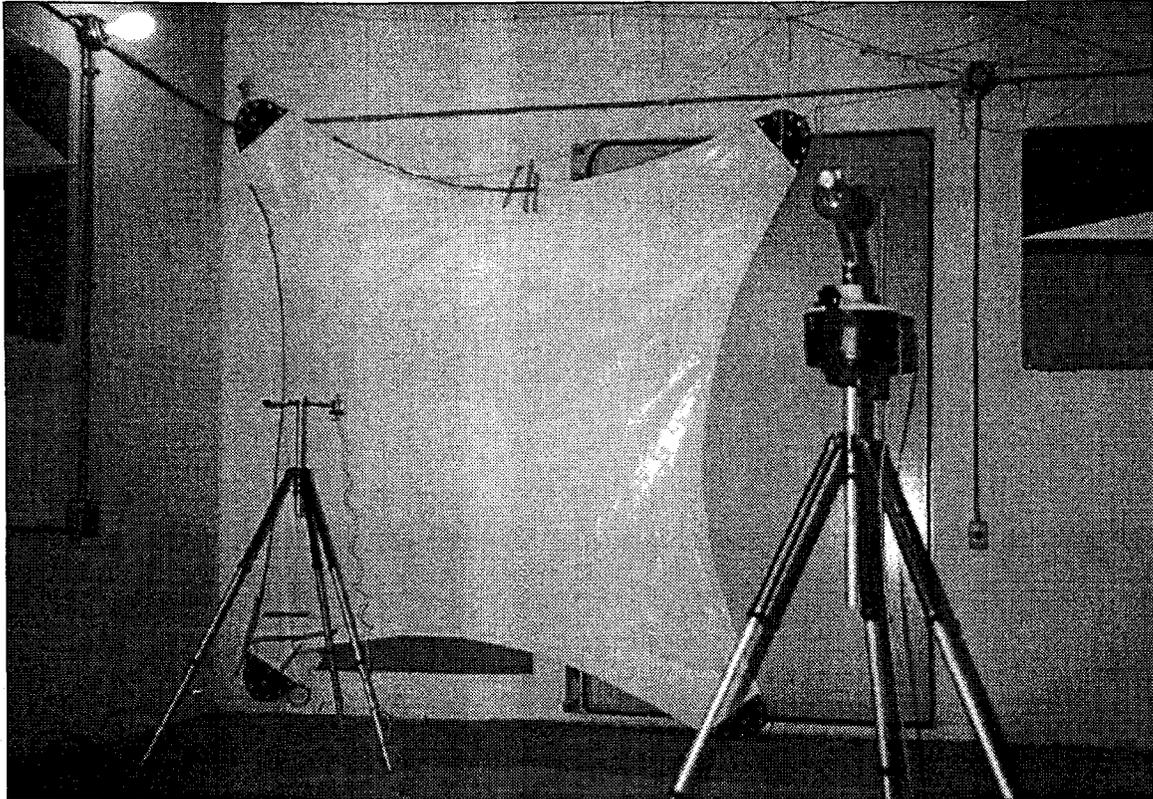


Figura 69. Ensayo de transmisión en el LATA.

TABLA 9. Niveles de presión sonora medidos en el ensayo de transmisión.

Frecuencias	Con lona		Sin lona		Diferencias		Transmisión (c/lona - s/lona)
	Int.	Ext.	Int.	Ext.	C/ lona	S/ lona	
100	96,1	86,5	101,4	87,9	9,6	13,5	-3,9
125	96,1	87,9	100,4	89,1	8,2	11,3	-3,1
160	99,7	86,4	104,9	88,4	13,3	16,5	-3,2
200	97,7	89,1	101,9	90,9	8,6	11,0	-2,4
250	96,6	87,3	100,5	88,4	9,3	12,1	-2,8
315	99,3	89,8	103,0	92,3	9,5	10,7	-1,2
400	101,5	91,4	105,3	95,0	10,1	10,3	-0,2
500	102,9	90,2	106,9	95,7	12,7	11,2	1,5
630	103,6	90,3	107,1	97,2	13,3	9,9	3,4
800	99,0	84,6	102,7	91,5	14,4	11,2	3,2
1000	98,9	83,6	102,3	90,2	15,3	12,1	3,2
1250	97,8	81,5	101,4	89,7	16,3	11,7	4,6
1600	99,9	82,9	103,2	91,9	17,0	11,3	5,7
2000	98,9	80,7	102,2	90,6	18,2	11,6	6,6
2500	97,0	77,5	100,7	88,8	19,5	11,9	7,6
3150	91,7	71,6	95,2	83,2	20,1	12,0	8,1
4000	91,0	69,9	94,7	81,5	21,1	13,2	7,9
5000	81,3	58,2	85,1	73,5	23,1	11,6	11,5
6300	73,9	48,1	78,2	63,8	25,8	14,4	11,4
8000	70,1	41,5	74,2	59,6	28,6	14,6	14,0

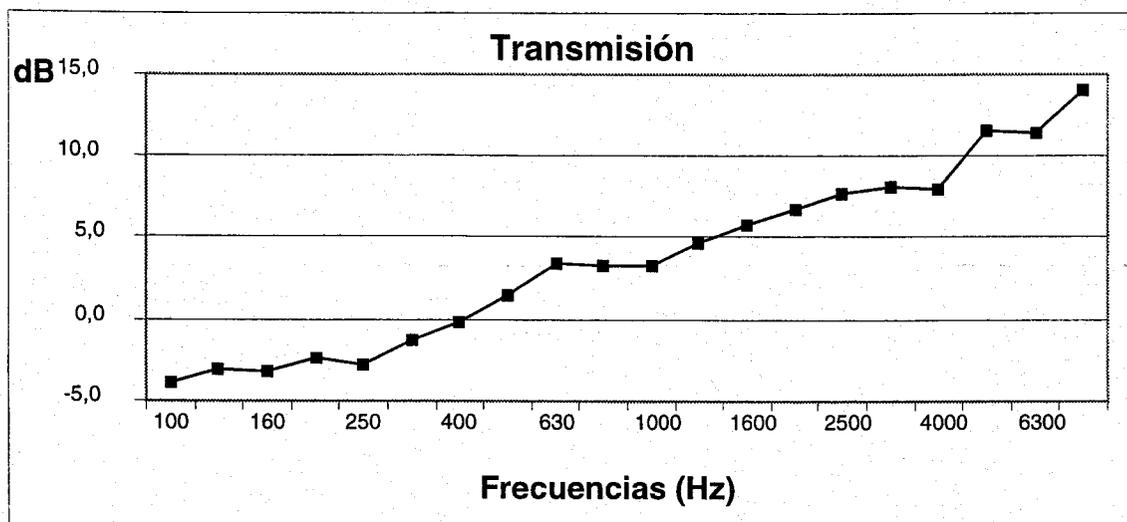


Figura 70. Valores del primer ensayo de transmisión de la membrana.

Hemos realizado un segundo ensayo de transmisión, de acuerdo con la norma ISO 140, en la cámara reverberante doble del LATA. En el interior de la cámara se construyó un muro para ensayos de transmisión de ruido en ventanas. Cerramos el hueco donde se instalaban las ventanas con la misma muestra de membrana, de 670 gr/m². Los valores obtenidos se muestran en la tabla 10 y en las figuras 71 y 72.

TABLA 10. Niveles de presión sonora medidos en el segundo ensayo de transmisión.

Frecuencia (Hz)	L1 (dB)	L2 (dB)	TR (s)	DnT (dB)	L1-L2 (dB)
100	71,9	64,7	2,82	14,7	7,2
125	77,4	69,7	2,75	15,1	7,7
160	79,5	71,5	3,57	16,5	8
200	78	75,1	3,57	11,4	2,9
250	76	70,2	3,58	14,3	5,8
315	80,9	70,6	3,58	18,8	10,3
400	81	69,4	2,41	18,4	11,6
500	82,2	73,1	1,33	13,3	9,1
630	81,9	71,2	1,38	15,1	10,7
800	77,9	65,9	1,64	17,2	12
1000	76	63	1,03	16,1	13
1250	75,7	61,4	1,04	17,5	14,3
1600	76,5	61,2	0,99	18,3	15,3
2000	75,2	58,8	0,98	19,3	16,4
2500	74,4	57,1	0,93	20,0	17,3
3150	69,5	50,8	0,81	20,8	18,7
4000	69	48,5	0,69	21,9	20,5
5000	59,2	37,9	0,63	22,3	21,3

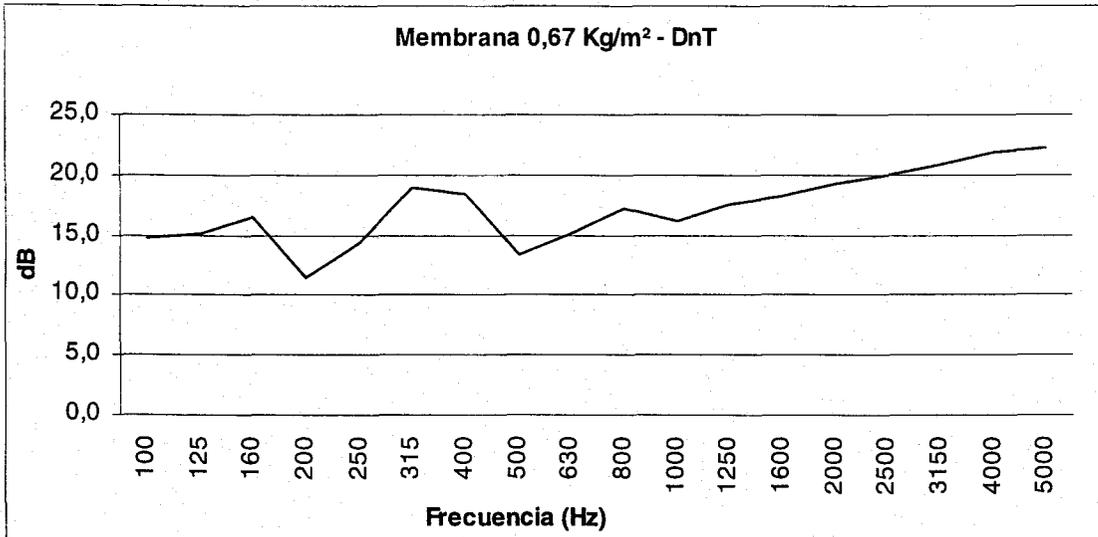


Figura 71. Valores de Dn T(ISO 140) medidos en el segundo ensayo de transmisión.

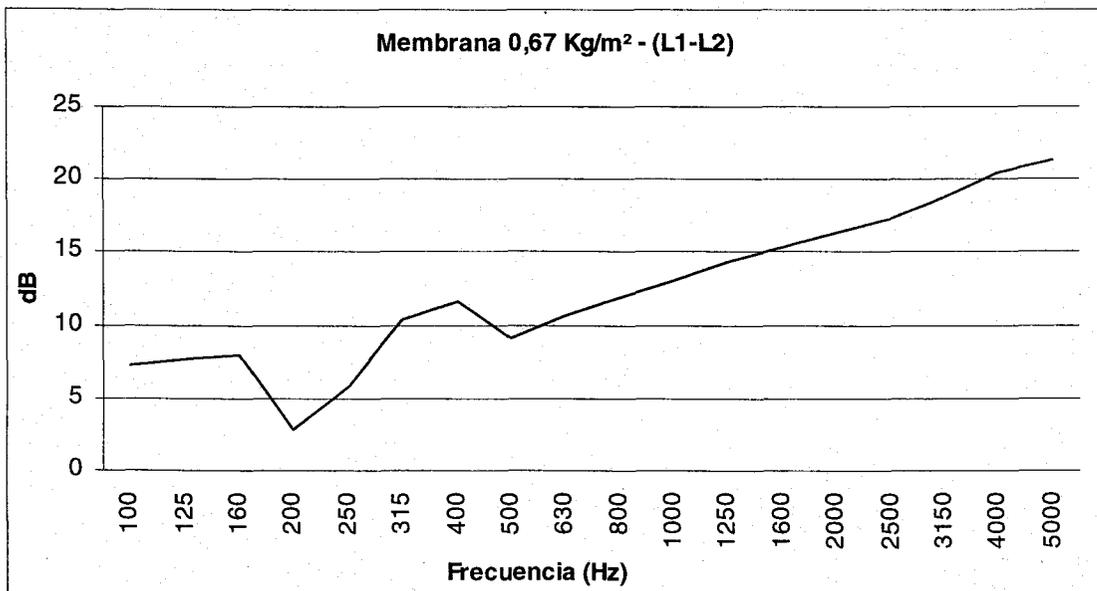


Figura 72. Valores de L1-L2 medidos en el segundo ensayo de transmisión.

Observamos que por ser un material muy ligero, se desarrolla un acoplamiento acústico entre los dos espacios separados por la membrana, generando tiempos de reverberación bastante anómalos, lo que nos lleva a creer que esta no sea la metodología más adecuada, pues nos induce a un error científico desconocido.

Acreditamos que los valores extraños obtenidos para las bajas frecuencias se deben a la resonancia acústica entre los dos espacios.

Publicaciones recientes relacionadas a ensayos con materiales ligeros citan que para aislamientos por debajo de 15 dB pueden ocurrir errores en los resultados de las mediciones al rededor de 5 dB.

Conclusiones:

Los valores obtenidos a través de las ecuaciones nos indican que la absorción aumenta conforme disminuye la frecuencia, pero difieren sustancialmente en las altas frecuencias de los obtenidos en las mediciones *in situ*, como veremos en el capítulo siguiente.

Los valores obtenidos en el tubo de Kundt de poco nos valen, puesto que no se repiten y con los resultados obtenidos no es posible determinar los coeficientes de absorción del textil. Algunas veces los coeficientes de absorción salen negativos. Tampoco podemos comparar con los resultados de las medidas en cámara reverberante realizados de acuerdo con la norma ISO 354, pues no son fiables.

Los ensayos realizados en el Tubo de Ondas Estacionarias o de Kundt demuestran que, aunque apropiados para otros materiales, no sirven para determinar los coeficientes de absorción de los textiles. Eso se debe a la no repetición de los resultados, con una gran variación de valores. Lo atribuimos a cuatro cuestiones:

- 1- Tamaño de la muestra. Es muy difícil reproducir en un pequeño tubo el comportamiento mecánico de la estructura textil.
- 2- Geometría de la muestra. Las superficies formadas por las cubiertas son curvas, alabeadas y la muestra, por el contrario, es una superficie plana.

3- Tensión de la muestra. En la situación real la membrana se tensa con esfuerzos aplicados en los extremos de las dos curvas anticlásticas que forman los paraboloides hiperbólicos o las redes de cables con curvaturas opuestas, básicamente llamados *Sistemas Estructurales de Forma Activa*⁷¹. En nuestro modelo la aplicación de fuerzas se daba en un mismo plano, lo que permitía la resonancia con más facilidad.

4- Campo infinito por detrás de la muestra. Creemos que esa es la principal dificultad de reproducir en laboratorio, para lograr una aproximación al comportamiento acústico de los espacios cerrados con estructura textil.

Tampoco resultan significativos los resultados alcanzados en los primeros ensayos realizados en la cámara reverberante, (figuras 63 y 64) dado el montaje simplificado que se hizo de la muestra, lejano a la situación real de estas cubiertas textiles. Eso se intentó corregir con el tercer ensayo, en cámara reverberante con la puerta abierta y los resultados allí conseguidos (figura 68), son menores en las bajas frecuencias y mayores en las altas frecuencias, comparados con los valores teóricos de las ecuaciones I y II, conforme se aprecia en la figura 73.

⁷¹ ENGEL, H. *Sistemas de estructuras*. Madrid: Blume, 1970.

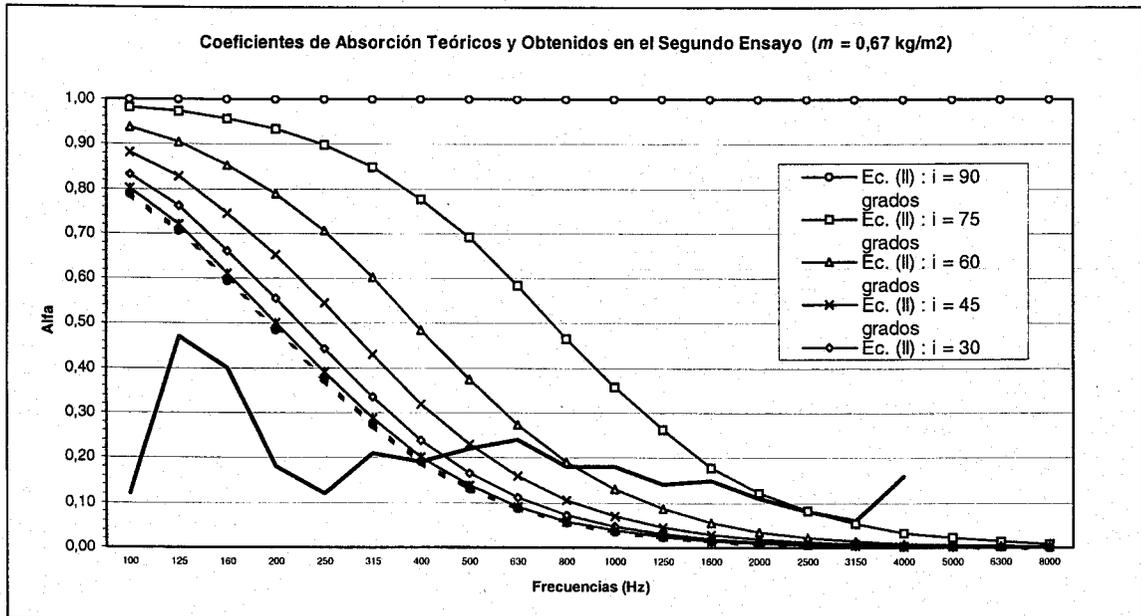


Figura 73. Coeficientes de absorción teóricos y obtenidos en el segundo ensayo.

Una vez más los resultados, aunque se repitiesen, nos llevan a la conclusión de que la norma ISO R/354 no sirve para la consecución de los coeficientes de absorción de este tipo de cubierta, debido a la dificultad de conseguir un campo infinito en una cámara reverberante.

Así pues, somos de la misma opinión que Recuero cuando afirma: *“No hay, por tanto, posibilidad de evaluar las contribuciones de los absorbentes de baja frecuencia de la estructura, a no ser que se midan estos elementos en una cámara reverberante, o – mejor aún – se mida el tiempo de reverberación en el edificio mismo”⁷².*

Consideramos que sólo mediante la medición acústica *in situ*, en espacios cubiertos con este tipo de estructuras, podemos extraer conclusiones fiables sobre los coeficientes de absorción de estas cubiertas, y así hemos procedido. Los resultados de los ensayos y

⁷² RECUERO, M. O. C. P. 282.

los valores calculados de α , obtenidos a partir de los tiempos de reverberación, se encuentran en el próximo capítulo.

CAPÍTULO 5. MEDICIONES ACÚSTICAS REALIZADAS IN SITU PARA LA EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS.

5.1. Descripción y Justificación del método de medida

5.1.1. Mediciones en Sevilla

Las medidas realizadas en Sevilla⁷³, España, fueran efectuadas gracias a la colaboración e interés del equipo del Departamento de Física Aplicada, Profesores Doctores Teófilo Zamarreño, José Algaba y Francisco Nieves, y del Profesor Arquitecto Juan Emilio Ballesteros, del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, todos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla.

5.1.1.1. Reverberación

Para medir el tiempo de reverberación hemos utilizado el método del impulso integrado de Schröder⁷⁴. En un punto adecuado se produce una pequeña explosión que es recogida en el punto de recepción por un micrófono *Bruel & Kjaer 4165* equipado con un preamplificador *Bruel & Kjaer 2639*. La señal de salida del preamplificador se registra digitalmente en un *DAT Sony PC-204*. Posteriormente en el laboratorio fueron analizados estos registros mediante el analizador digital *B&K-2133*, obteniendo para cada uno de los puntos de recepción la respuesta al impulso en el dominio temporal y en el de la frecuencia. De cada una de las respuestas al

⁷³ ZAMARREÑO, T., ALGABA, J., MAYA, F. & BALLESTEROS, J. E., Acústica de estructuras textiles tensionadas. Actas del Congreso Tecniacustica-93. Valladolid, 1993. P. 263.

⁷⁴ SCHRÖEDER, M. R. New Method of Measuring Reverberation Time. *Journal of Acoustic Society of America*, nº 37, 1965, Pp. 409-12.

impulso se ha obtenido un multiespectro, tomando un espectro cada 20 ms. La sucesión de espectros a lo largo del tiempo proporciona la curva de respuesta para cada banda de frecuencia. Integrando hacia atrás esas curvas, según establece el método de Schröder, obtenemos los tiempos de reverberación a partir de sus pendientes. Para obtener estas pendientes se analiza cada una de las curvas con un programa gráfico interactivo en entorno MATLAB. Para cada respuesta se han obtenido tres valores de T_R : T_{R30} para el intervalo de caída -5 a -35 dB, T_{R20} entre -5 y -25 y EDT para los 10 primeros dB de la caída. Disponemos así de los valores de T_r frente a la frecuencia, para cada punto de recepción. El promedio espacial de estos valores para cada frecuencia nos proporciona una descripción del comportamiento del recinto. Esta curva la denominaremos *curva tonal*.

5.1.1.2. Inteligibilidad

Para evaluar la inteligibilidad de la palabra hemos utilizado el índice *RASTI*⁷⁵ (Rapid Speech Transmission Index) simplificación del STI (Speech Transmission Index) implementado en el equipo de medida de *B&K-3361*. En este método, el transmisor envía al canal de transmisión (el recinto) una señal de ruido filtrada en las bandas de octava de 500 y 2000 Hz, esenciales para la inteligibilidad de la palabra, y modulada, con señales de baja frecuencia que reproducen las modulaciones de la voz humana al hablar (1, 2, 4 y 8

⁷⁵ HOUGAST, T., STEENEKEN, H. J. M. The Modulation Transfer Function in Room Acoustics. *Technical Review*, Brüel&Kjaer, nº 3, 1985.

Hz en la banda de 500 Hz y 0,7; 1,4; 2,8; 5,6 y 11,2 Hz en la banda de 2000 Hz). El emisor posee, además, unas características de direccionalidad parecidas a la de la voz humana. En la figura 74 se muestra un esquema del equipo y proceso de medida.

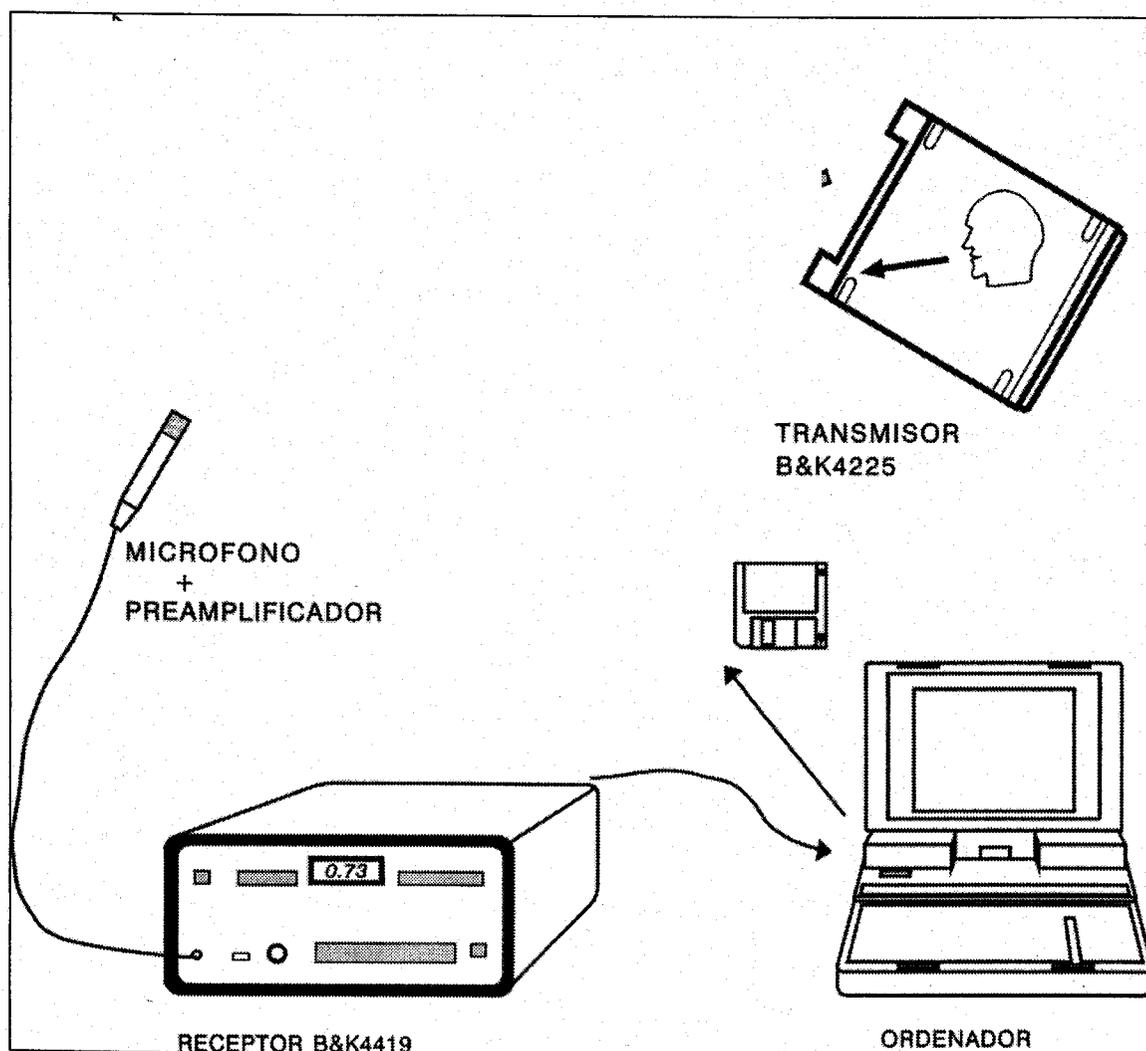


Figura 74. Equipo utilizado para medir el índice RASTI.

Dado que no se ha utilizado instalación de apoyo electroacústico, el nivel del emisor *B&K-4225* se fijó en $+10$ dB y se procuró orientar hacia la zona de medida en cada caso. El receptor *B&K-4419*

estaba conectado, vía interface *RS-232*, a un ordenador portátil que controlaba todo el proceso de medida, desde el acondicionamiento del receptor, hasta la grabación de los datos en disco, a través de un software propio para su posterior análisis y tratamiento. En cada uno de los puntos se hicieron al menos dos registros. En algunas situaciones el ruido de fondo, demasiado alto y fluctuante, comprometió seriamente la medida.

Un micrófono omnidireccional recoge la señal y la envía al receptor. Este analiza la degradación de la modulación entre el punto de emisión y el de recepción, obteniéndose así lo que se denomina la “Función de Transferencia de Modulación” entre los dos puntos. A partir de ella se determina el índice RASTI.

5.1.1.3. Distribución Sonora y Ruido de Fondo.

En este ensayo, una fuente sonora de referencia *B&K-4205* emite una señal estacionaria, aleatoria, de banda ancha, con una potencia de emisión de *99 dB re 1 pW*. Un micrófono *B&K-4165*, con el correspondiente previo, recoge la señal en los diversos puntos de medida, distribuidos por la zona de interés, y se registra en el *DAT*. Previamente se grabó una señal de calibración proporcionada por el calibrador de nivel sonoro *B&K-4230*, lo que nos permite calibrar el sistema para obtener en el laboratorio, mediante el analizador *B&K-2133*, el espectro en cada uno de los puntos. Uno de los puntos de medida se situó en las proximidades de la fuente. Siguiendo un procedimiento similar, se registraba y medía el espectro del ruido de fondo promediado durante, al menos, 5 minutos.

5.1.2. Mediciones en Porto Alegre

Las mediciones realizadas en el Auditorio Araujo Vianna en Porto Alegre, Brasil, fueron efectuadas gracias a la colaboración del Ayuntamiento de Porto Alegre, que demostró gran interés en la adecuación de las condiciones acústicas de su Auditorio, encargándome las mediciones, análisis y redacción del proyecto de rehabilitación acústica del local. Colaboraron en las mediciones los estudiantes Karina Tonet, Luciano Ribeiro, Michelle Xamuset, Luciano Baldino Nabinger y Luciana Maya Simões, de la Facultad de Arquitectura *Ritter dos Reis*, de Porto Alegre, donde actualmente me encuentro impartiendo clases de Confort Ambiental.

5.1.2.1. Reverberación

Para medir el tiempo de reverberación hemos utilizado el método del impulso integrado de Schröder⁷⁶. En este caso la señal impulsiva es recogida en el punto de recepción por un micrófono *1220* equipado con el preamplificador *1201*, y se procesa en tiempo real en el analizador modelo *SA 110*. Todo el equipo es de la firma *Norsonic*, y cumple con los requisitos para sonómetros tipo 1 (IEC 804 e IEC 651). Para cada uno de los puntos de recepción se obtiene la respuesta al impulso en el dominio temporal y en el de la frecuencia, de modo análogo a como se hacía con el *B&K 2133*. Para cada respuesta se han obtenido también tres valores de T_R : T_{R30} , T_{R20} y EDT . En cada punto se han hecho, como mínimo, dos medidas. Posteriormente esas medidas fueran analizadas para

obtener el tiempo de reverberación medio de la sala, en las diversas bandas de octava, de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz, 4.000 Hz y 8.000 Hz.

5.1.2.2. Ruido de fondo:

En este ensayo, los valores de ruido de fondo son recogidos en el punto de recepción por el equipo reseñado en el apartado anterior, obteniendo para cada uno de los puntos de recepción el espectro del ruido de fondo promediado linealmente durante, al menos, 5 minutos. El analizador medía y registraba el espectro en tercios de octavas y dB A, seleccionando la ponderación temporal en “fast”.

5.1.3. Coeficientes de absorción:

Para reproducir las condiciones de uso real en el modelo informático, se hace necesario tener los coeficientes de absorción de todos los materiales, principalmente de la cubierta.

Como ya indicamos anteriormente, dado que los ensayos normalizados no nos han conducido a valores significativos de los coeficientes de absorción de las membranas, pretendemos ahora obtener estos valores a partir de las medidas de T_R en espacios construidos. Para ello, primero se ha procedido a calcular la absorción del aire⁷⁷ en las altas frecuencias, de acuerdo con la fórmula $A_{\text{aire}}=4mV$, para las frecuencias de 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz, con objeto de restarla a los valores de A obtenidos a partir de los T_R

⁷⁶ SCHRÖEDER, M. R. O. C. P.125

⁷⁷ CARRIÓN, A. O.C. P. 73.

medidos y estimados. Conociéndose los coeficientes de absorción y la superficie de los demás materiales, y utilizando la fórmula de Sabine, llegamos a obtener los primeros resultados de los coeficientes de absorción de la cubierta, a distintas frecuencias.

5.1.4. Modelo informático:

En nuestra investigación hemos utilizado ordenadores personales, con software de simulación acústica de la casa MARK IV (USA) – ACOUSTACADD, así como programas desarrollados en los Departamentos de Física Aplicada y Construcciones Arquitectónicas I.

Para la elaboración de los modelos hemos partido del diseño de las cubiertas en AUTOCAD, a partir de planos y mediciones en los edificios, cedidos por la EXPO-92, por los autores del proyecto de la Piscina Cubierta de S. Pablo, por los autores del proyecto del Auditorio Araujo Vianna y por el Ayuntamiento de Porto Alegre, lo que nos ha facilitado enormemente la tarea.

5.1.4.1. Reverberación

Una vez construida la maqueta informática, se le asignan los diversos materiales que componen la envolvente del espacio. La comprobación del grado de ajuste del tiempo de reverberación con lo obtenido en la medición, nos permitirá valorar las condiciones acústicas de la sala.

5.1.4.2. Inteligibilidad

El estudio de la inteligibilidad en los modelos informáticos se ha obtenido a partir del algoritmo $\%AL_{\text{cons}}^{78}$, porcentaje de Pérdida de Articulación de Consonantes, que está implementado en el citado programa ACOUSTACADD. Este índice valora la pérdida de inteligibilidad de consonantes a partir de la distancia emisor-receptor y del tiempo de reverberación de la sala, considerando el nivel de ruido de fondo. La potencia de la fuente (0.01 w) se ajustó para producir a 1 m de la misma un nivel sonoro en torno a 70 dB, que se corresponde con el nivel de la voz humana elevando el tono.

Carrión⁷⁹ indica la valoración subjetiva del índice AL_{cons} , que se muestra en la siguiente tabla 11.

TABLA 11. valoración subjetiva del $\%Alcons$.

$\%AL_{\text{cons}}$	Valoración Subjetiva
0% - 1,4%	Excelente
1,6% - 4,8%	Buena
1,3% - 11,4%	Aceptable
12% - 24,2%	Pobre
27% - 46,5%	Mala

⁷⁸ CARRIÓN, A. O.C. P. 67.

⁷⁹ CARRIÓN, A. O.C. P. 69.

5.1.4.3. Acústica Geométrica:

Para estudiar la influencia de la geometría del local en la reflexión de los rayos sonoros se ha realizado un análisis de acústica geométrica en el modelo informático, con ayuda del programa citado (Acoustacadd).

Mediante los métodos propios de la acústica geométrica es posible valorar el comportamiento de la sala, detectando aquellas zonas que puedan presentar anomalías en la distribución del campo sonoro, así como la presencia de reflexiones excesivamente retardadas (más de 50 milisegundos en el caso de la palabra y más de 100 milisegundos en el caso de la música), poco atenuadas, es decir, que tengan como máximo una atenuación de 12 dB con relación al sonido directo. Los puntos elegidos para el análisis y la ubicación de la fuente sonora son los mismos de las mediciones in situ. El análisis de acústica geométrica se ha realizado con reflexiones de hasta tercer grado.

5.2. Mediciones acústicas en espacios cubiertos con estructuras textiles:

5.2.1. Palenque, el parásol de la lluvia⁸⁰.

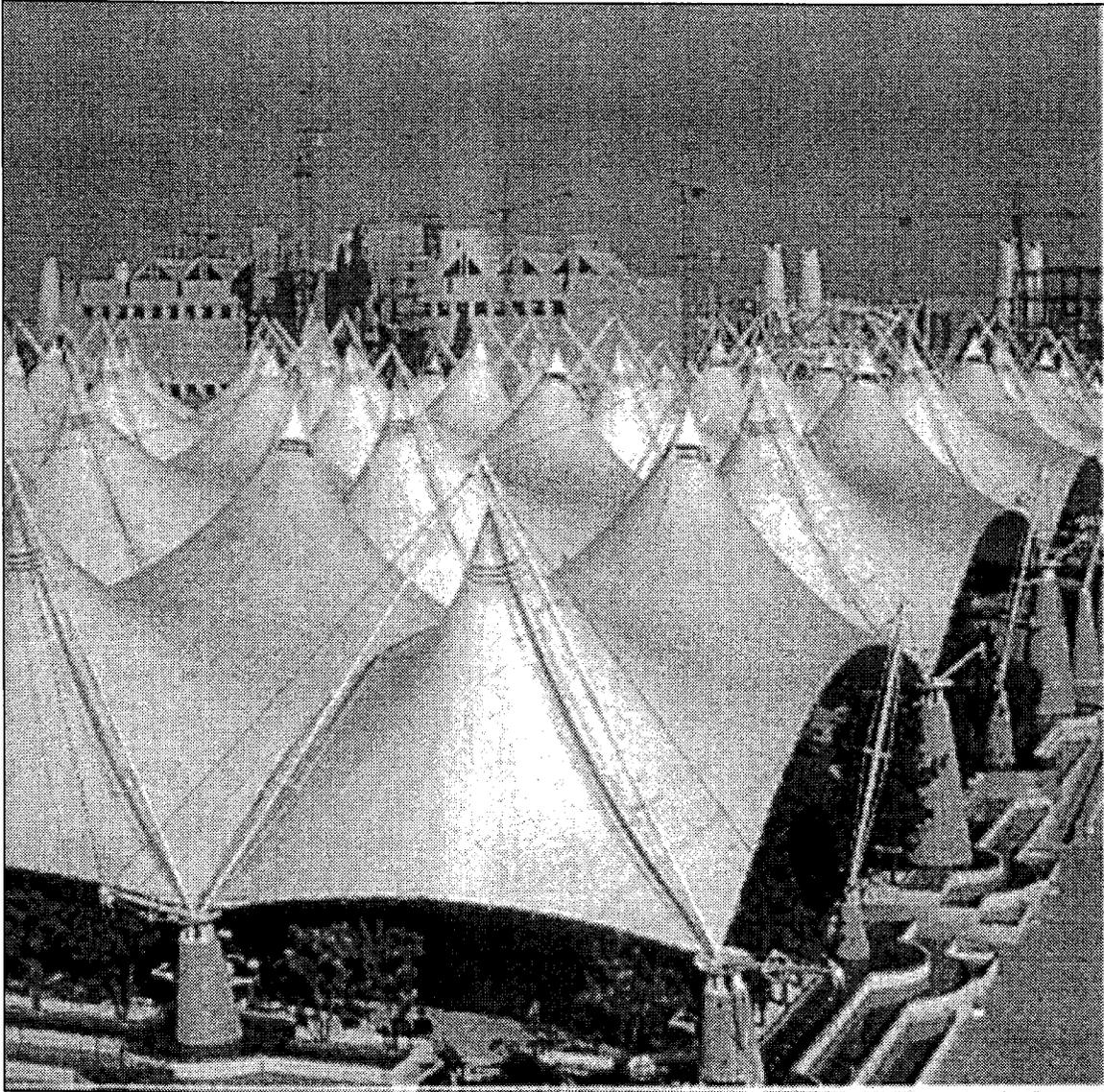
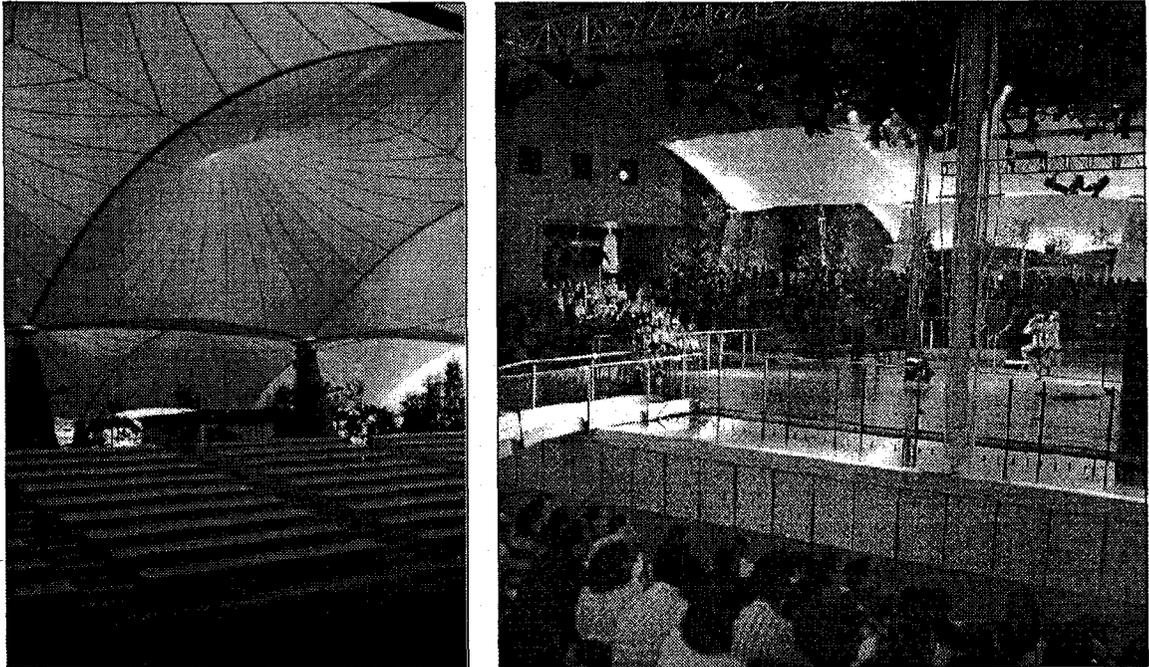


Figura 75. Vista aérea, Palenque.

⁸⁰ PRADA POOLE, J.M. El parásol de la lluvia, cubierta para el Palenque. *Arquitectura & Vida*, nº 20, 1989. P. 46.

El Palenque, situado en la céntrica zona de pabellones internacionales de la EXPO-92, en la Avenida de los Descubrimientos, entre las Avenidas III y IV, es una gran plaza cubierta por una estructura textil de 9.000 m², como se aprecia en la figura 75.



Figuras 76 y 77. Vista de las gradas y del escenario, Palenque.

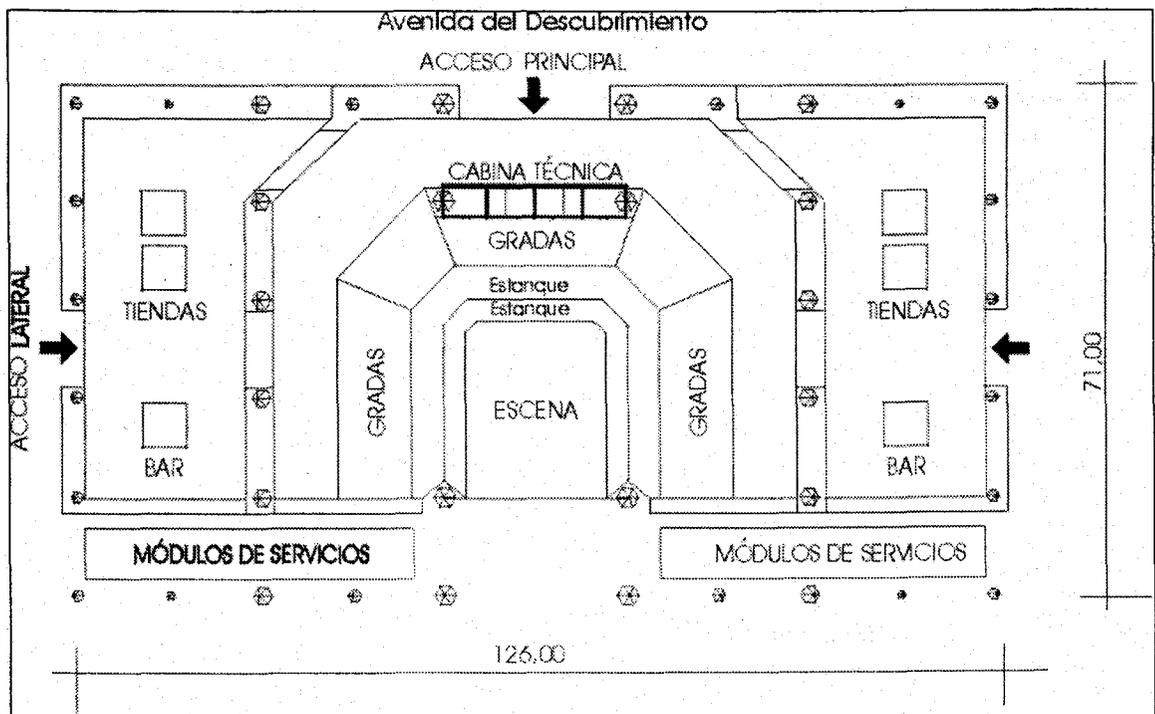


Figura 78. Planta del Palenque.

Proyectada por el Arquitecto José María de Prada Poole fue construída por la Empresa Auxini, bajo la Dirección Facultativa de los Arquitectos Ricardo Huete Fuertes y Félix Escrig Pallarés, con las cuales yo he tenido la oportunidad de colaborar, en tan singular obra.

Fue diseñado para ser la gran sala de fiestas de la EXPO, acogiendo desde las celebraciones de los Días Nacionales y de Honor que celebraron los países y Comunidades Autónomas, pasando por actuaciones infantiles, música, danza, desfiles de moda, conciertos, ... hasta convertirse, al final de la jornada, en una gran sala de baile con música en directo de las mejores orquestas del mundo. A las 3 horas de la madrugada terminaba, después de 17 horas de actividad en las que la acústica cumplía un papel fundamental, la larga jornada del Palenque.

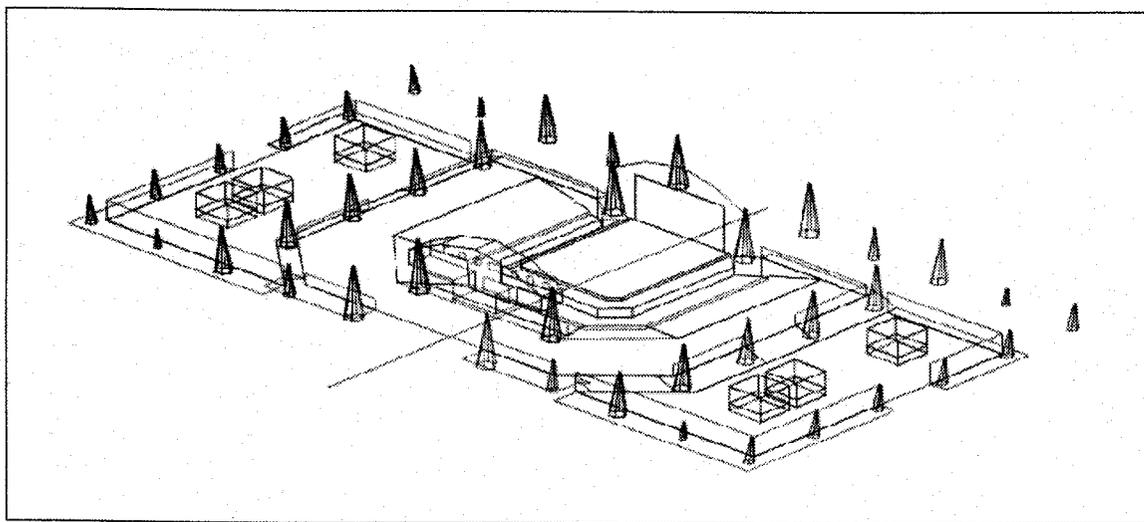


Figura 79. Perspectiva sin la cubierta. Palenque.

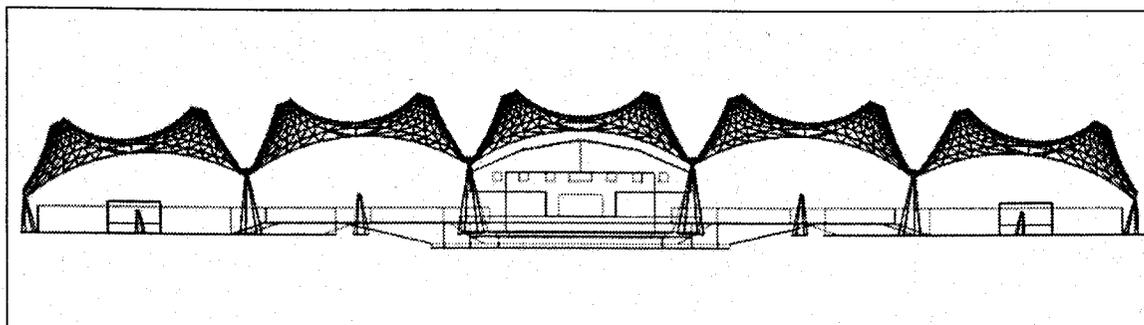


Figura 80. Sección longitudinal. Palenque.

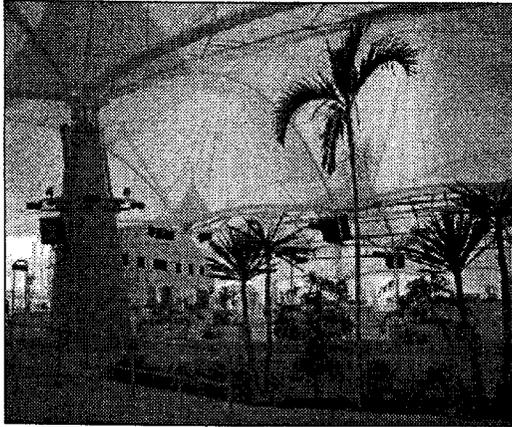


Figura 81. Vista exterior, Palenque.

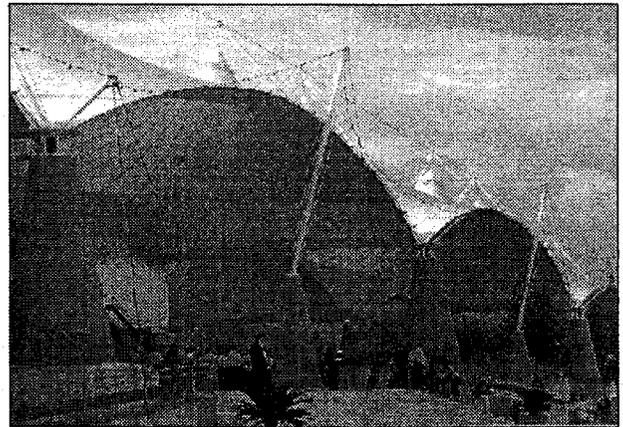


Figura 82. Vista interior, Palenque.

La cubierta textil está formada por 50 elementos, cuya forma geométrica recuerda la figura de un cono, y soportada por 44 pilones de entre 2,00 y 7,50 metros de altura. Tiene forma rectangular (126,00 x 71,00 m) y se encuentra rodeada por un sistema de fuentes y abundante vegetación que contribuyen a su climatización.

Los planos disponibles (plantas, secciones y alzados) se encuentran, en formato reducido, en el anexo 1.

Características de la cubierta del Palenque:

- Material: Poliéster
- Recubrimiento: PVC
- Peso: 950 g/m²
- Espesor: 0,9 mm
- Hilos: 12 x 12
- Resistencia trama: 4200 N/cm
urdimbre: 4500 N/cm
- Desgarre trama: 370 N
urdimbre: 395 N

- Adherencia trama: 165 N/5cm
urdimbre: 185 N/5cm
- Transparencia: 8 a 10 %



Figura 83. Vista exterior, Palenque.

En el centro aloja un espacio escénico, con 500 m² de escenario rodeados por dos láminas de agua y una zona de gradas con capacidad para 1500 espectadores sentados. El agua procedente de los estanques se utiliza para acondicionar el recinto como agua pre-refrigerada. El aire frío resultante de las dos centrales subterráneas se distribuye por plenum por debajo de las gradas a través de los 2.800 difusores instalados en el graderío. La zona de bares, quioscos, comercios, la presencia del agua y vegetación contribuyen a reforzar su carácter de plaza pública o espacio abierto que invita a hacer un alto en los recorridos por la Exposición⁸¹.

⁸¹ *Sevilla Universal*, nº 20, noviembre, 1991. P. 2.

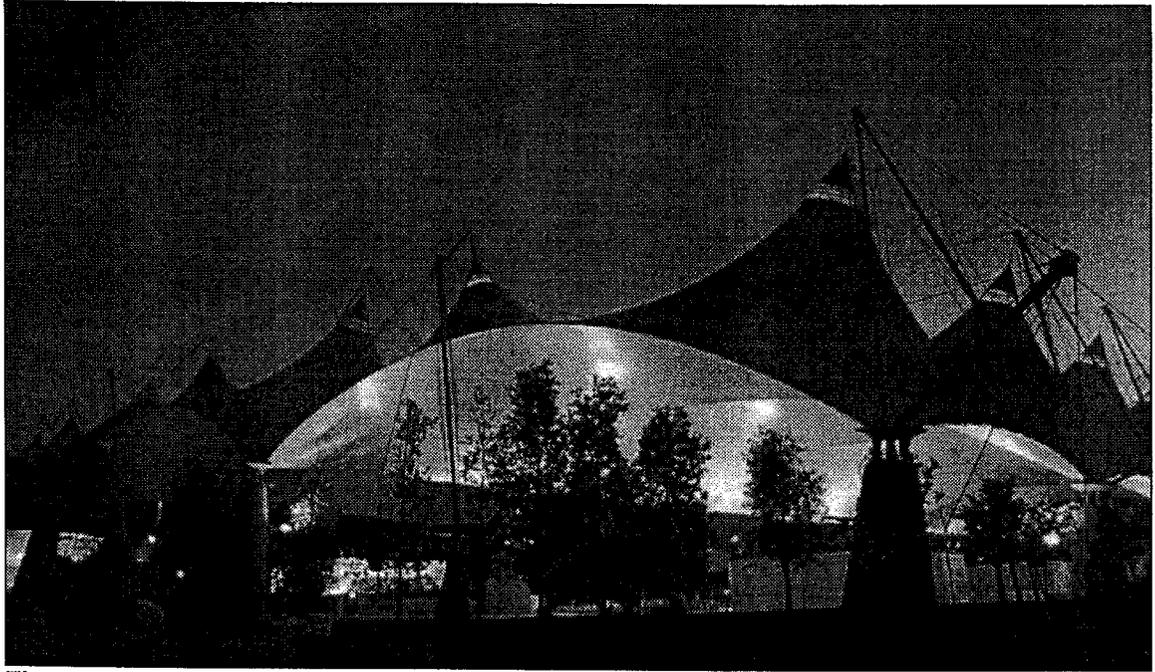


Figura 84. Vista nocturna exterior, Palenque.

El Palenque fue concebido para tener usos muy diversos a lo largo de cada jornada, desde las 10 de la mañana hasta las 3 de la madrugada.

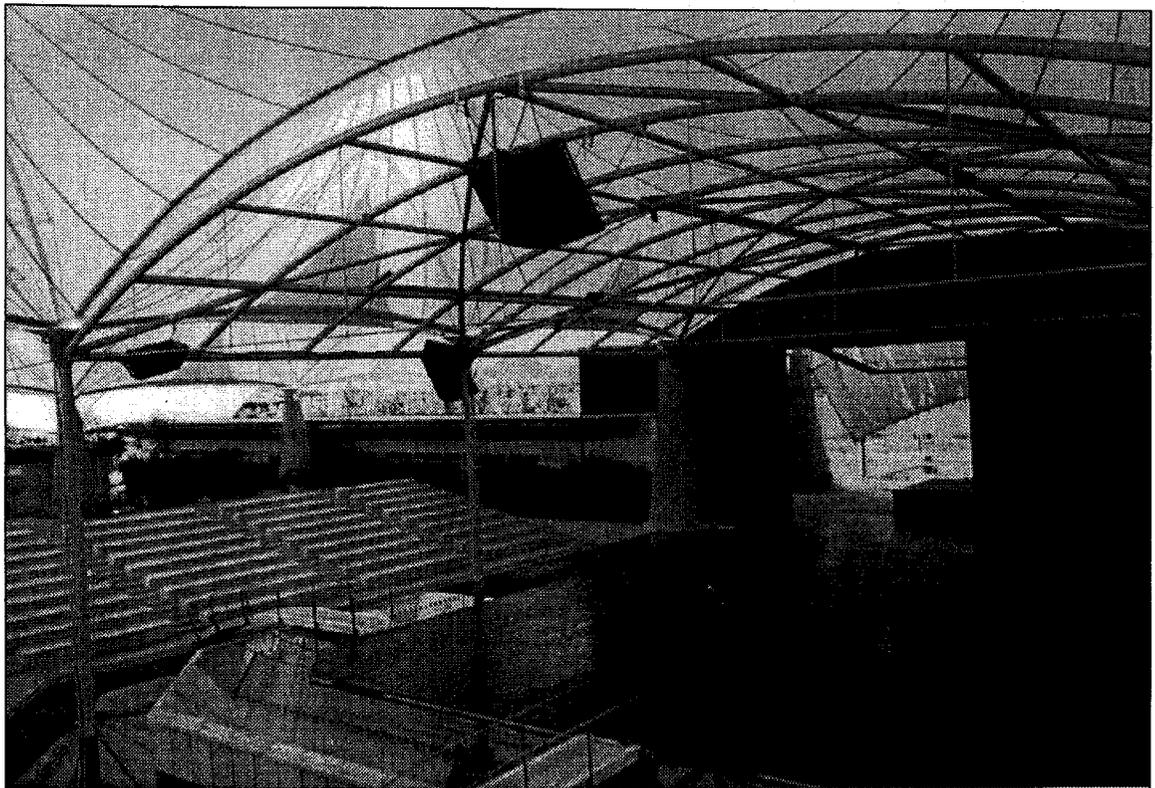


Figura 85. Vista del escenario, estanques y gradas, Palenque.

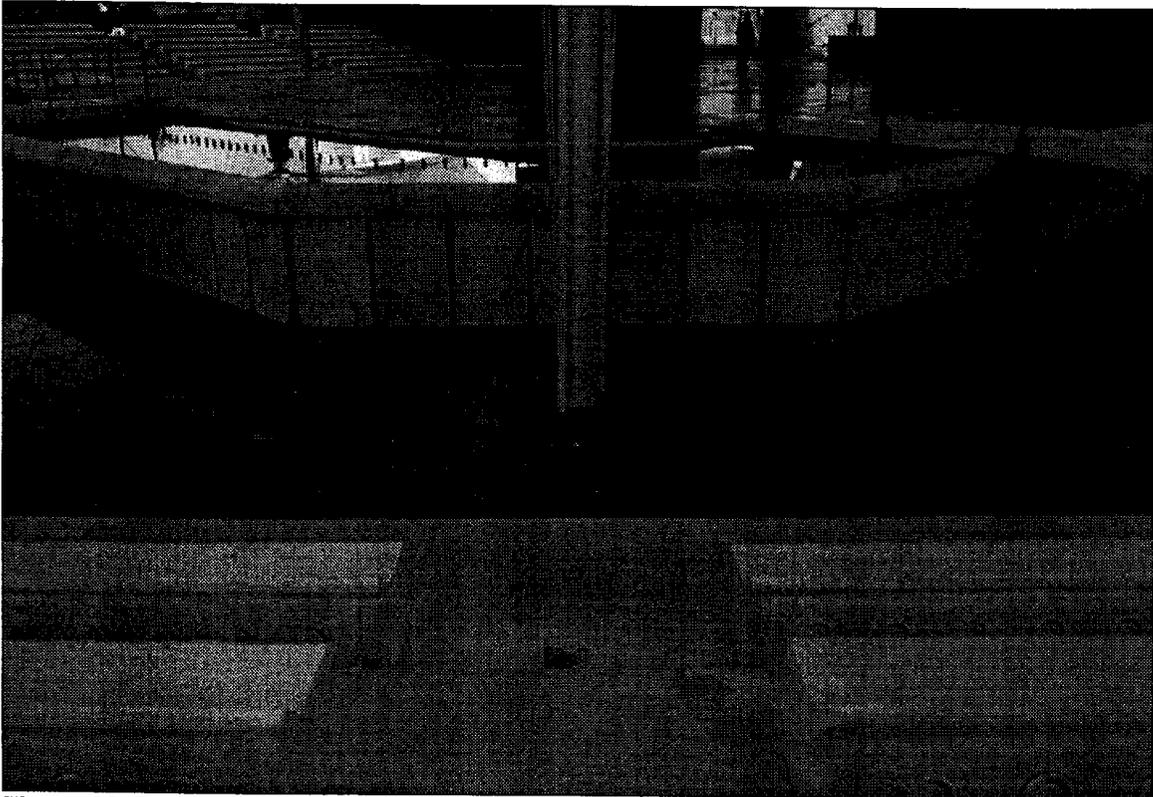


Figura 86. Detalle del aire acondicionado en gradas y escenario, Palenque.

En la figura 87 se muestran los puntos de la medición acústica en el Palenque.

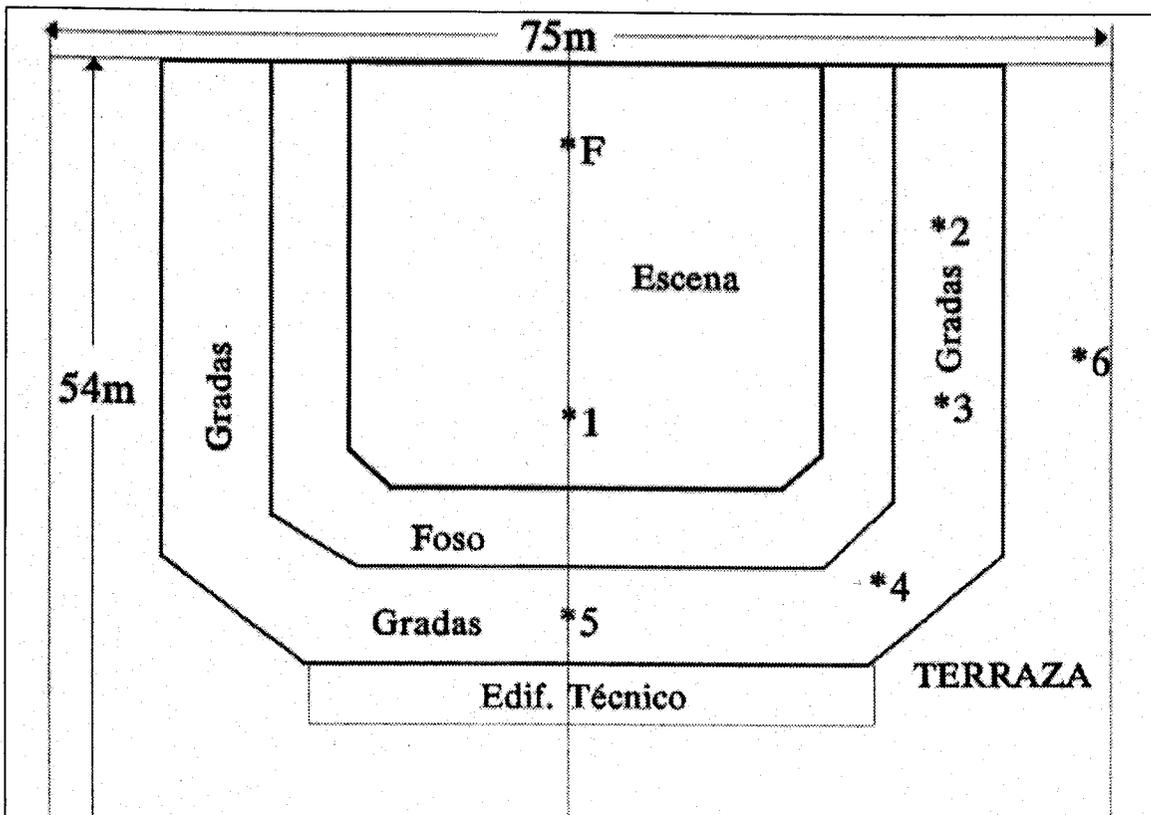


Figura 87. Esquema en planta y puntos de medida en el Palenque.

5.2.1.1. Reverberación

Presentamos, en la figura 88, la curva tonal medida en tercios de octavas, con los tiempos de reverberación promedio de los seis puntos indicados de la figura 87.

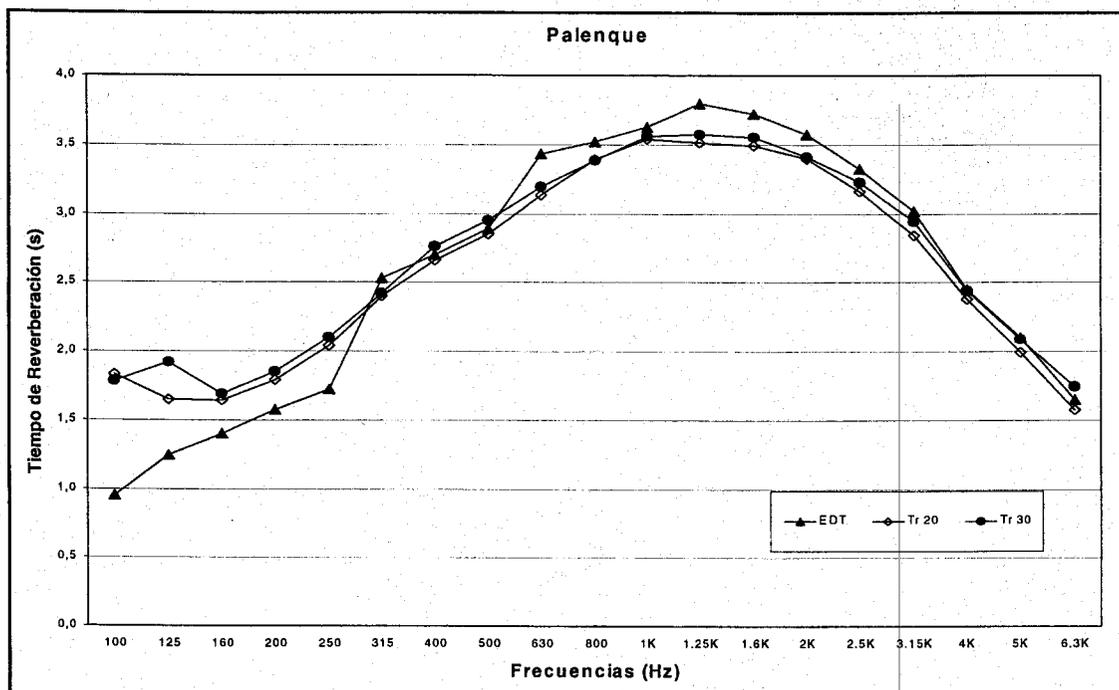


Figura 88. Curvas tonales en tercios de octava del Palenque

En la **tabla 12** presentamos los valores del tiempo de reverberación medido y los valores óptimos, calculados para uso de la palabra con apoyo electro-acústico, a partir de la fórmula empírica de Pérez Miñana⁸², considerando que el espacio, formado por el escenario, los estanques y las gradas, es cerrado para determinar el volumen. A las aperturas al exterior asignamos el coeficiente de absorción $\alpha=1$ a todas las frecuencias. También se presentan los valores óptimos máximos determinados de acuerdo con Cremer⁸³ y Beranek⁸⁴.

⁸² PÉREZ M. O. C. P. 54.

⁸³ CREMER, L. O. C. P. 610.

TABLA 12. Tiempos de reverberación medidos y óptimos, Palenque.

Tiempos de Reverberación Palenque (seg.). 25.000 m ³	Frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Medidos	1,92	2,10	2,95	3,56	3,41	2,44
Óptimos palabra con electro-acústica, Pérez.	2,42	2,14	1,86	1,67	1,67	1,67
Óptimos palabra, máximos, Cremer.	2,1	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4
Óptimos ópera, máximos, Cremer.	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
Óptimos palabra, Beranek.	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28
Óptimos ópera, Beranek.	2,28	2,08	1,78	1,88	1,88	1,88
Óptimos concierto, Beranek.	2,43	2,23	1,93	2,03	2,03	2,03

En la figura 89 se comparan la curva tonal medida y las óptimas para ese espacio.

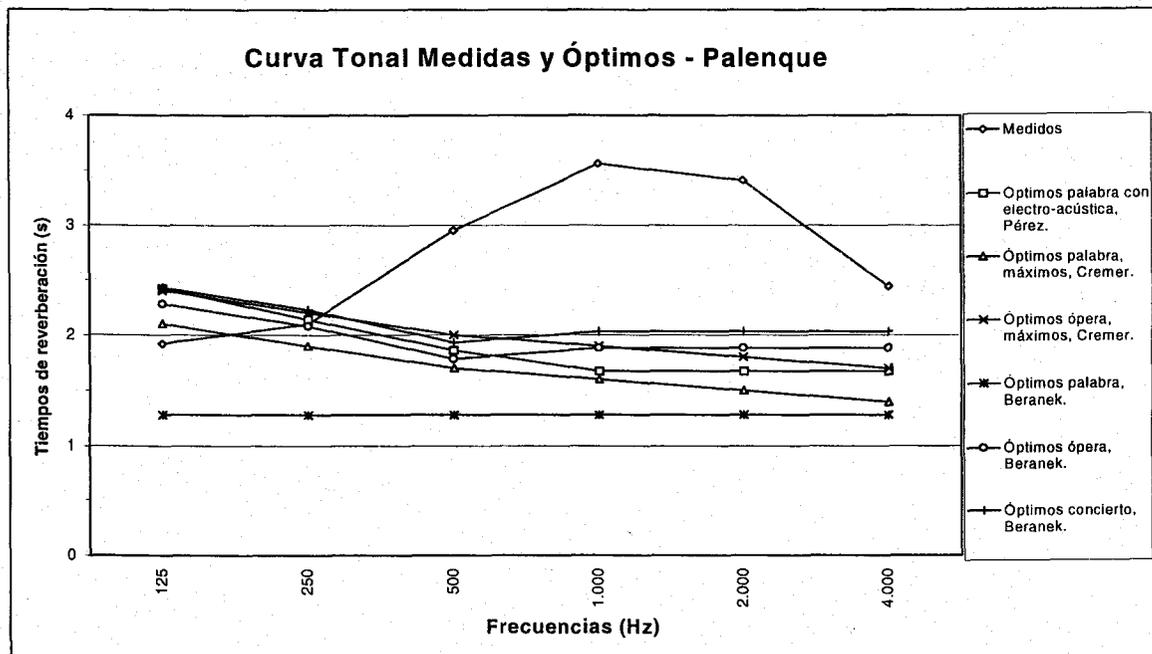


Figura 89. Curva tonal medida y óptimas del Palenque.

84 BERANEK, L. O.C. P. 425.

5.2.1.2. Inteligibilidad:

Hubo que renunciar a realizar las medidas de inteligibilidad debido a las altas fluctuaciones del ruido de fondo (la zona ya estaba abierta al tráfico rodado). Además, cuando se realizaran los ensayos estaba desmantelado el equipo electro-acústico.

5.2.1.3. Distribución Sonora:

En la figura 90 se recogen los resultados del ensayo de distribución sonora realizado en el Palenque en los cinco primeros puntos de la figura 87 y en otro punto situado a 1 metro de la fuente (F).

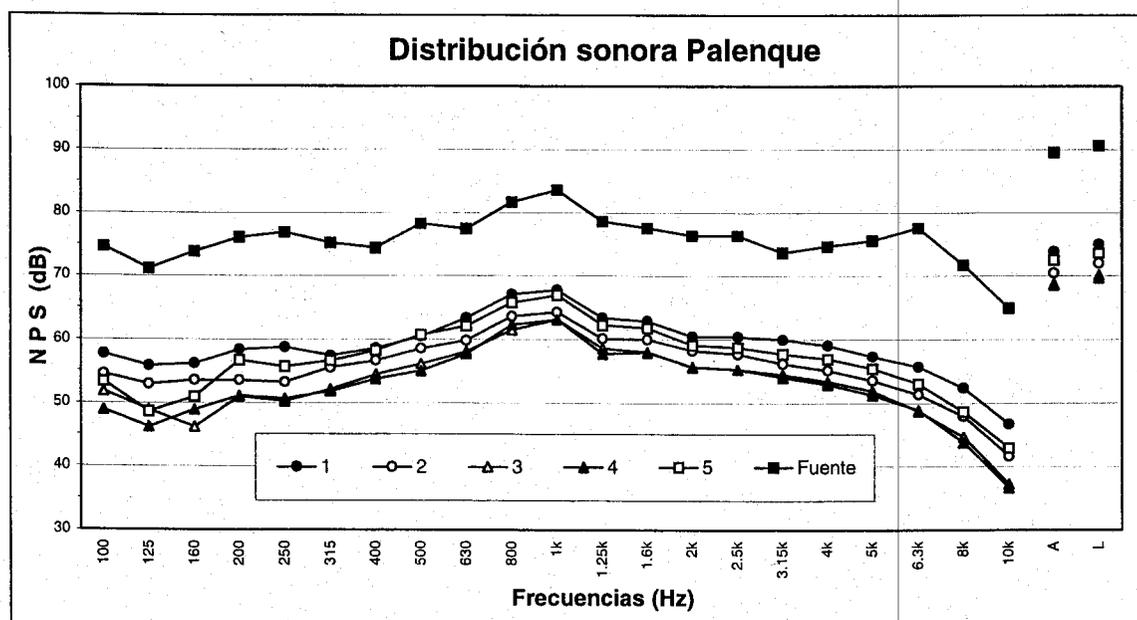


Figura 90. Distribución sonora en tercios de octava, Palenque.

5.2.1.4. Ruido de fondo:

No se ha medido por las razones indicadas anteriormente en 5.2.1.2.

5.2.1.5. Coeficientes de absorción:

Las superficies de los distintos materiales con sus respectivos coeficientes de absorción estimados, en las distintas bandas de octava, así como los coeficientes de absorción calculados para la cubierta, se reflejan en la **tabla 12**. El valor del coeficiente de absorción, calculado, para la membrana de la cubierta se representa en la figura 91, así como los valores teóricos obtenidos con las fórmulas I y II.

TABLA 13. Superficies y sus Coeficientes de Absorción en el Palenque.

MATERIAL	SUPERFICIE (m ²)	Autor / Fuente	Frecuencias (Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
Absorción Aire - m ³	75.300		0,00	0,00	0,00	0,00 3	0,00 9	0,02 3
Superficie Virtual	1.562		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Piedra Artificial	1.554	COAM	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Chapa Perforada Bares	375	Knudsen	0,38	0,87	0,93	0,86	0,84	0,85
Chapa Lisa Bares	160	Egan	0,05	0,10	0,10	0,10	0,07	0,02
Chapa Lisa Cabina Técnica	163	Recuero	0,30	0,20	0,09	0,09	0,08	0,08
Ladrillo Visto	38	Knudsen	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Vegetación	252	Egan	0,03	0,06	0,11	0,17	0,27	0,31
Cristal	28	COAM	0,17	0,07	0,04	0,03	0,03	0,02
Entarimado Madera	453	Pérez Miñana	0,09	0,09	0,08	0,09	0,10	0,07
Terrazo	4.000	Egan	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Cubierta calculado	10.920		0,40	0,34	0,18	0,09	0,06	0,09
TOTAL	19.505							

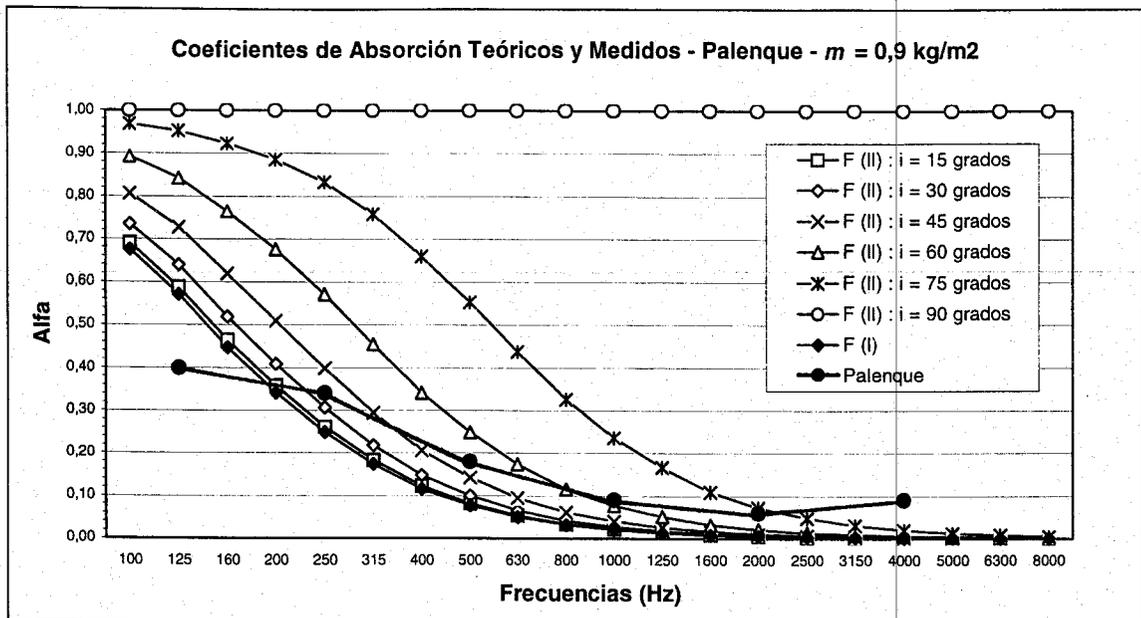


Figura 91. Coeficientes de absorción calculados para la membrana del Palenque.

5.2.1.6. Modelo Informático:

No se ha desarrollado modelo informático de todo el espacio debido a la gran cantidad de planos necesarios y a la limitación del programa AcoustaCadd en 500 planos de construcción del modelo. Lo que sí hemos hecho fue un modelo parcial, compuesto de tres módulos de cubierta, desde el eje central hasta la terraza lateral, englobando la fuente y el punto 3 de la figura 87. En las figuras 92 y 93, tomadas del programa ya mencionado, se muestra el trazado de un rayo sonoro reflejado, en las frecuencias de 250 Hz y 2.000 Hz, lo que permite observar la atenuación con relación al rayo directo, y la diferencia de trayectoria, también con relación al rayo directo. Se aprecia la gran diferencia de camino entre los dos rayos, y la poca atenuación, especialmente en altas frecuencias. Aunque este rayo es aceptable para actuaciones musicales, no lo sería para situaciones donde la inteligibilidad de la palabra fuera importante.

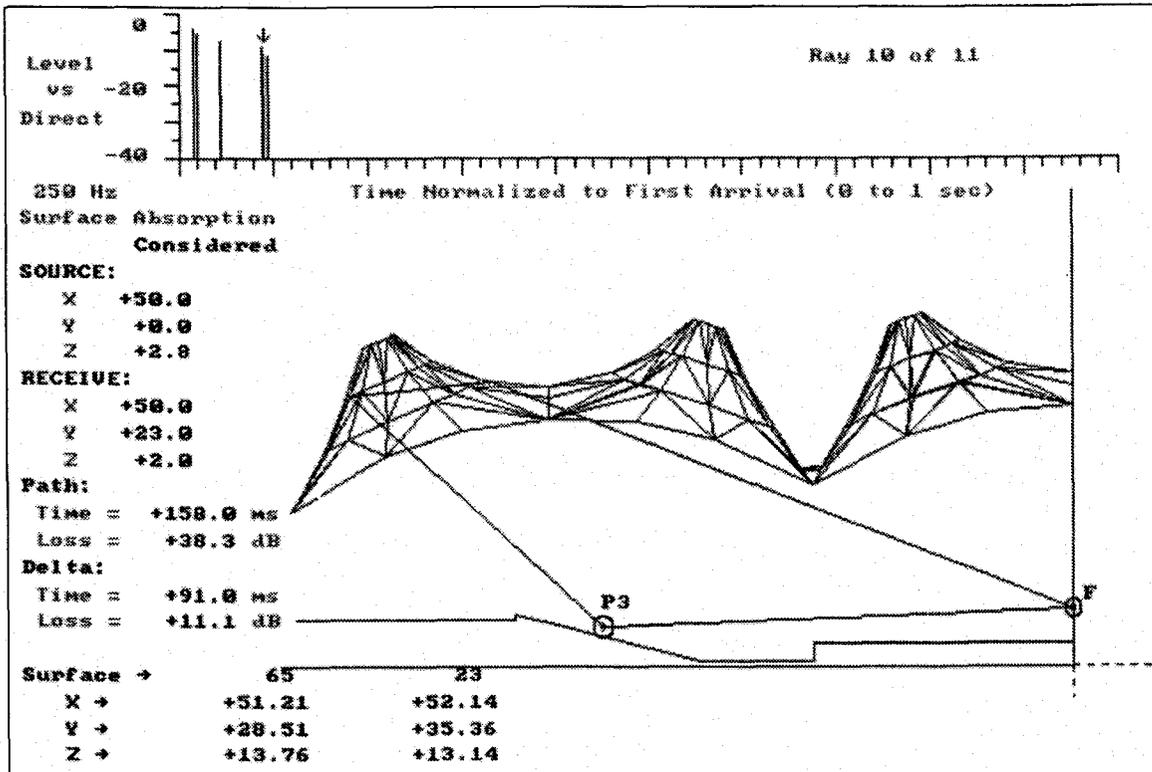
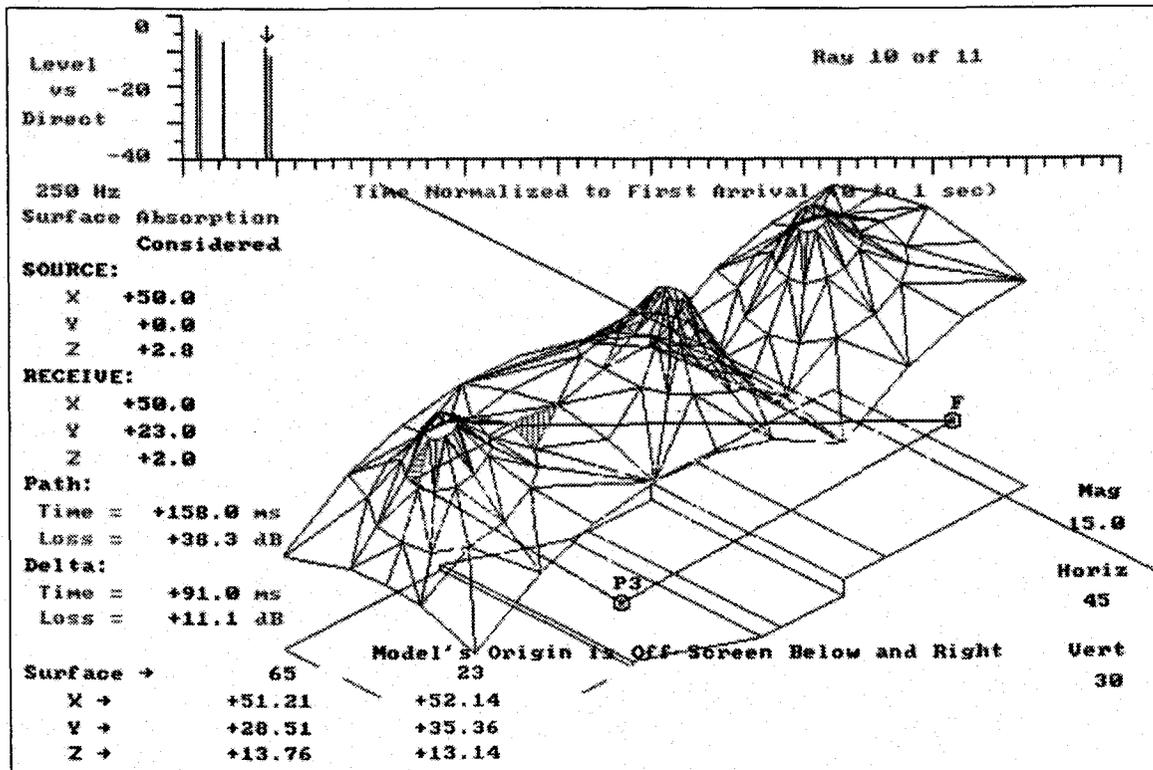


Figura 92. Modelo parcial del Palenque, con trayectoria del rayo directo y reflejado.



Figuras 93. Modelo parcial del Palenque, con trayectoria del rayo directo y reflejado.

5.2.2. Apeadero del Alta Velocidad Española en EXPO-92.

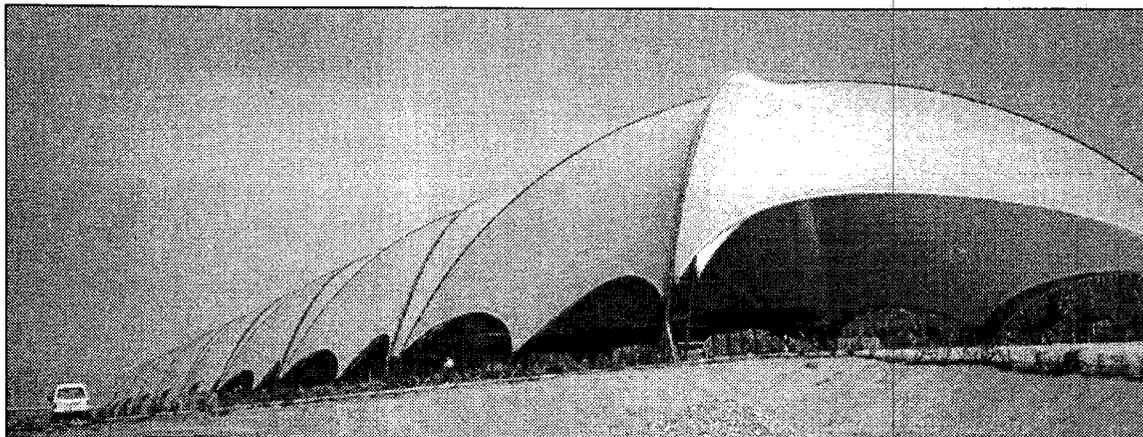


Figura 94. Vista exterior Apeadero del AVE .

El Apeadero del tren de Alta Velocidad Español, el AVE, en el Recinto de la EXPO-92, es una construcción singular. Los autores del proyecto han diseñado una cubierta textil de grandes dimensiones, capaz de abrigar cuatro de los modernos trenes de Alta Velocidad Español en las operaciones de embarque y desembarque de pasajeros, con la monumentalidad y carácter efímero que la ocasión propiciaba (figuras 94 y 95).

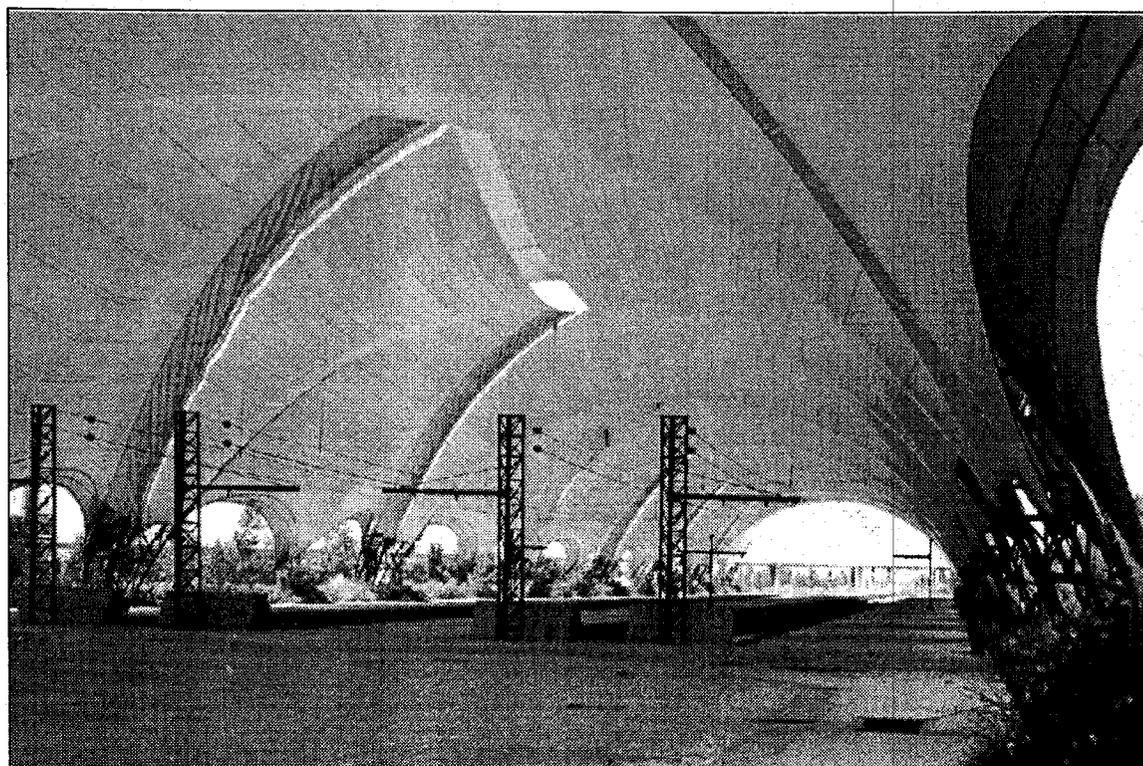


Figura 95. Vista interior del Apeadero del AVE .

Localizado al oeste del recinto de la EXPO-92, entre el Río Guadalquivir y la Puerta del Aljarafe, al final de la Avenida de las Palmeras, acogía a los turistas venidos desde Madrid con un *trailer* de la EXPO.

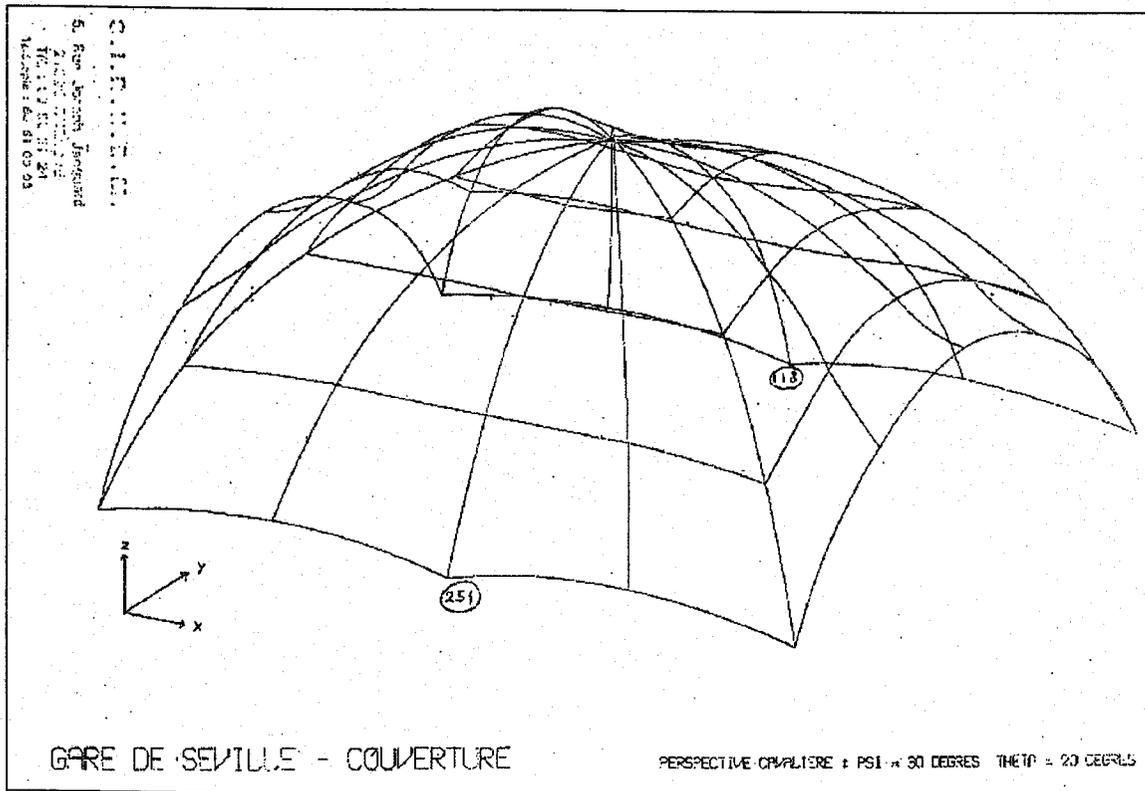


Figura 96. Croquis de un módulo de la cubierta del Apeadero del AVE .

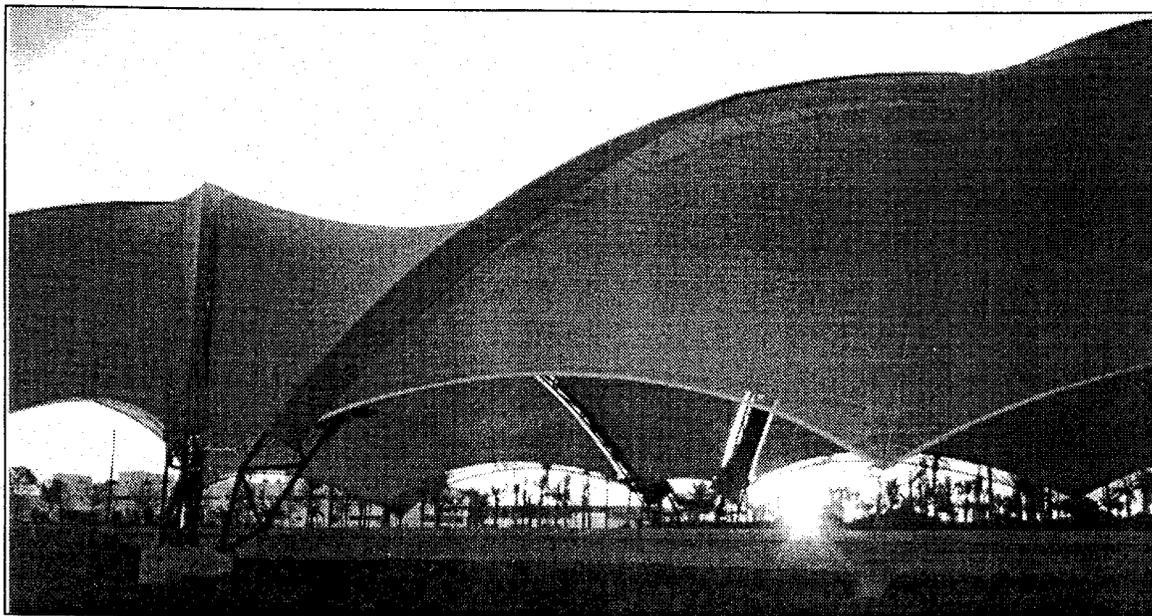


Figura 97. Vista de la cubierta. Apeadero del AVE .

Hemos tenido dificultades en obtener datos sobre este edificio. La escasa información suministrada por la Expo-92 se muestra en las figuras 96, 98 y 99 (croquis de la estructura, de S.I.R.M.R.M.). Los planos disponibles (plantas, secciones y alzados, de Expo-92) se encuentran, en formato reducido, en el anexo 1.

La estructura y la cubierta fueron diseñadas por la casa S.I.R.M.R.M. de Francia.

La cubierta del Apeadero se compone de una doble cubierta textil de 355,50 m por 35,20 m, con una altura máxima de 16,00 m, apoyada en una estructura metálica.

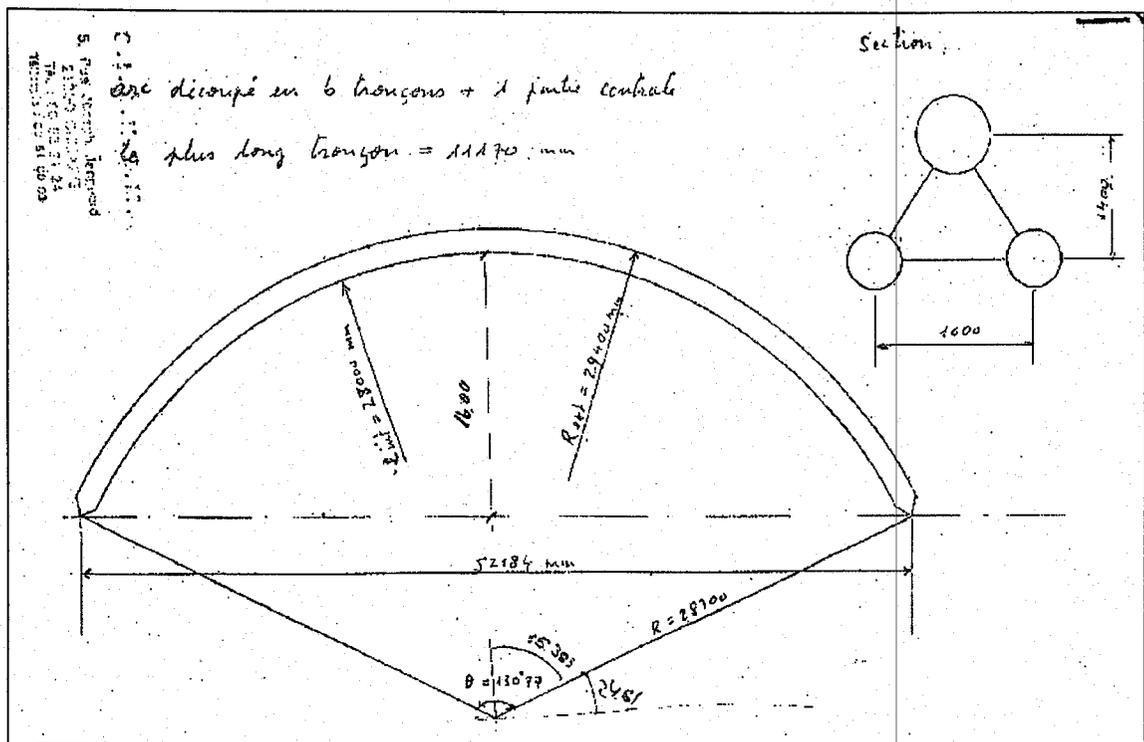


Figura 98. Croquis (alzado) de la estructura. Apeadero del AVE.

La estructura está formada por bloques de cimentación en hormigón armado, y arcos metálicos de 28,00 m de radio interno y 29,40 m de radio externo, con una abertura de $130^{\circ}77'$ de la circunferencia. La distancia entre apoyos es de 52.184 mm, y están formados por una cercha triangular con dos tubos en la cara inferior, separados 1,00

m entre ejes, y un tubo más en la cara superior, separado 1,40 m entre ejes. Estos arcos fueran descompuestos en seis trozos cada uno, más una parte central para facilitar su transporte desde los talleres, de modo que el trozo más largo fuera 11.170 mm. Cada dos arcos, montados en las diagonales, a $46,382^\circ$ con la transversal, formaba un módulo de 36,00m por 37,78 m. En total fueran montados 18 arcos formando 9 módulos con la forma parecida a un iglú.

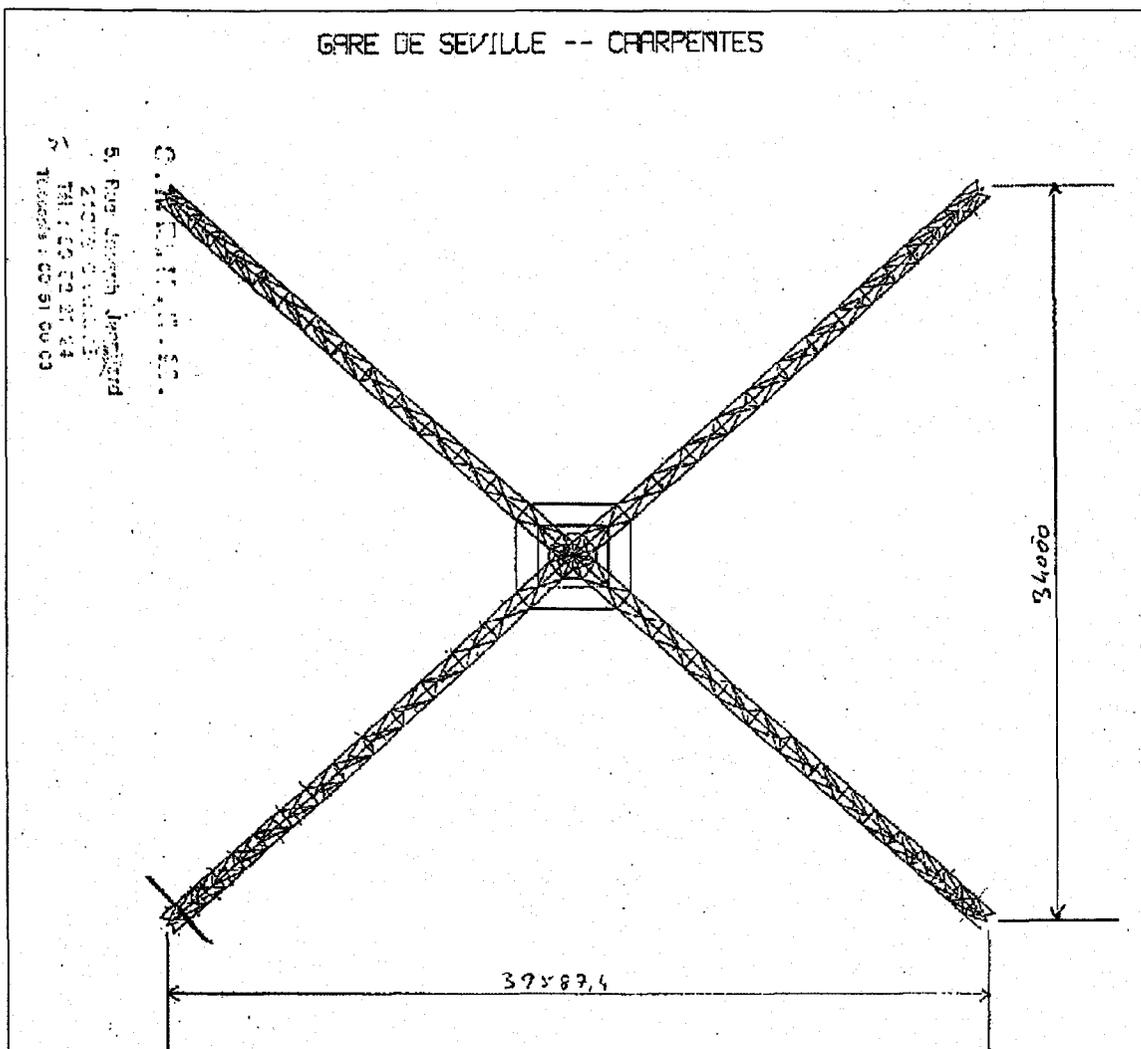


Figura 99. Croquis (planta) de la estructura. Apeadero del AVE .

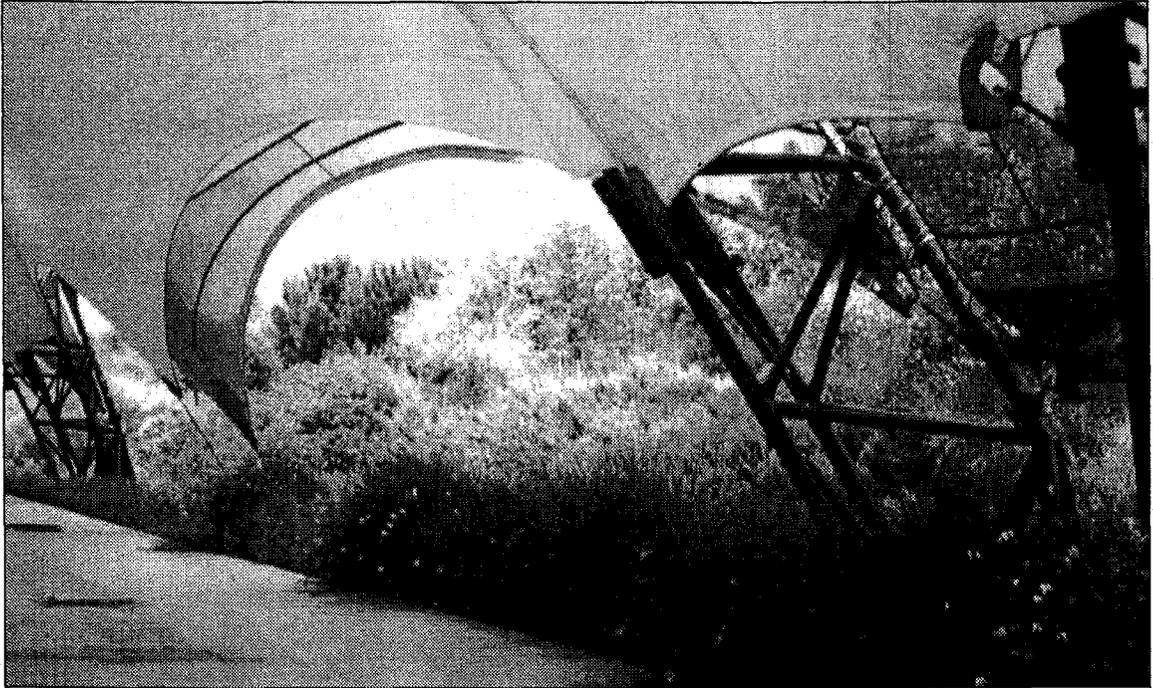


Figura 100. Detalle de la estructura. Apeadero del AVE .

La cubierta protegía del sol y de la lluvia una superficie de 30,80 m por 90,00 m, donde se situaban las oficinas, y tres andenes de embarque y desembarque de 30,80 m por 265,00 m de largo. La capa exterior de la cubierta textil se compone de una membrana permeable, como una red, para que proyecte sombra en la capa interior impermeable, mejorando las condiciones térmicas en el interior del espacio (figura 100).

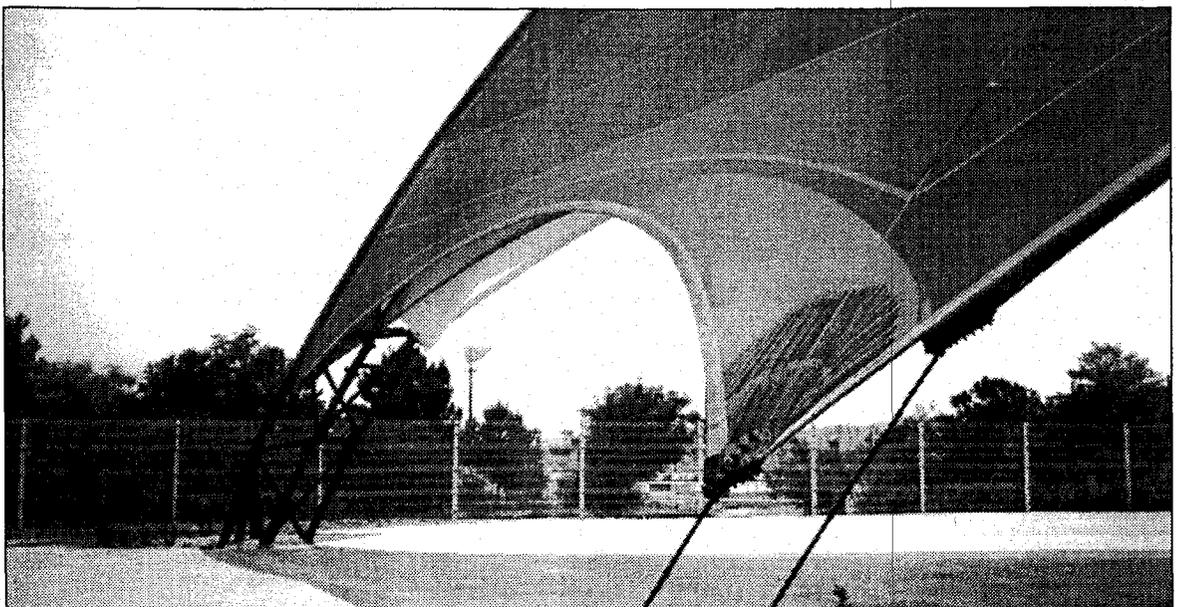


Figura 101. Detalle de la cubierta. Apeadero del AVE .

Se han realizado medidas acústicas en los puntos marcados en el esquema mostrado en la figura 102.

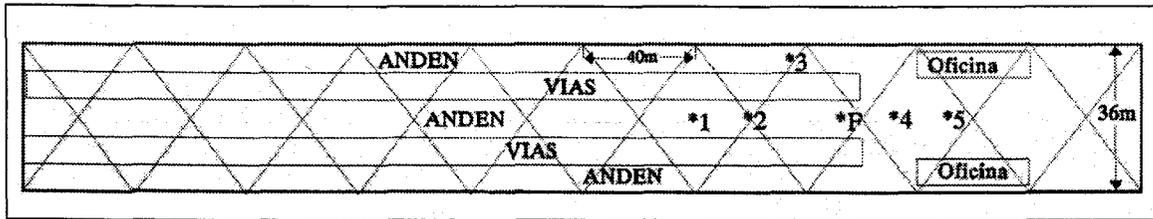


Figura 102 . Esquema en planta y puntos de medida del Apeadero.

5.2.2.1. Reverberación

Los valores obtenidos del tiempo de reverberación, promedio de 5 puntos repartidos en los andenes, se muestran en la figura 103.

En este caso, los elevados niveles de ruido nos han impedido evaluar T_R a las frecuencias más bajas, y por eso la frecuencia que aparece en las mediciones es la de 160 Hz.

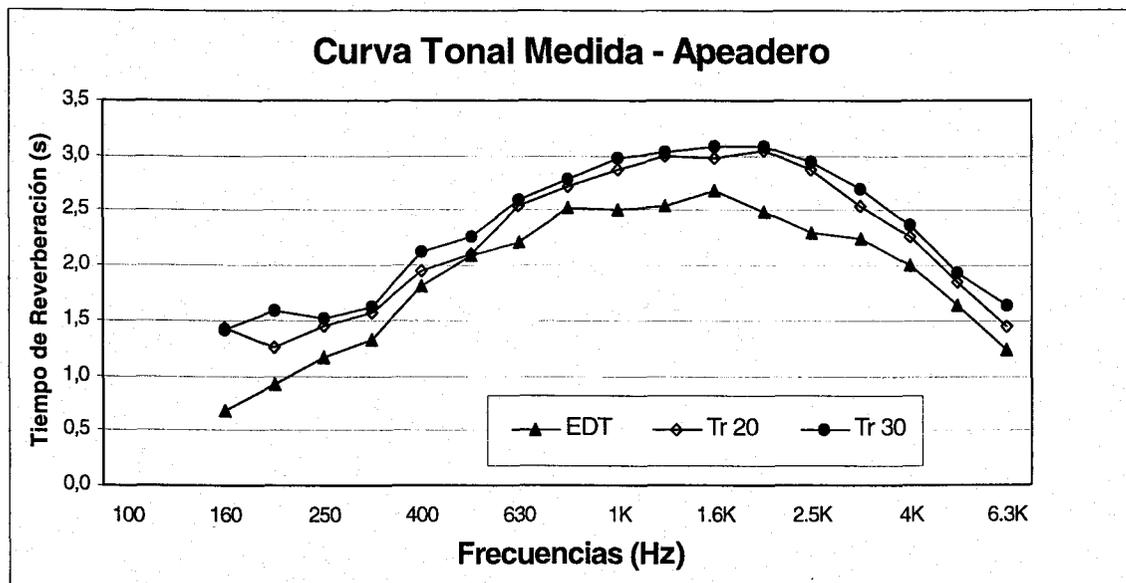


Figura 103. Curvas tonales, en tercios de octava, del Apeadero.

En la **tabla 14** presentamos los valores del tiempo de reverberación medido y los valores óptimos, calculados para uso con apoyo electro-acústico, a partir de Pérez Miñana, Cremer y Beranek,

considerando que el espacio es cerrado para determinar el volumen.

TABLA 14. Tiempos de reverberación medidos y óptimos, Apeadero.

Tiempos de Reverberación Apeadero – AVE (Seg.) 30.000 m ³	Frecuencias (Hz)					
	160	250	500	1.000	2.000	4.000
Medidos	1,41	1,51	2,27	2,97	3,08	2,36
Óptimos palabra con electro-acústica, Pérez.	2,57	2,28	1,98	1,78	1,78	1,78
Óptimos palabra, máximos, Cremer.	2,1	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4
Óptimos ópera, máximos, Cremer.	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,8
Óptimos palabra, Beranek.	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
Óptimos ópera, Beranek.	2,30	2,10	1,80	1,90	1,90	1,90
Óptimos concierto, Beranek.	2,47	2,27	1,97	2,17	2,17	2,17

En la figura 104 se compara la curva tonal medida y las óptimas para ese espacio.

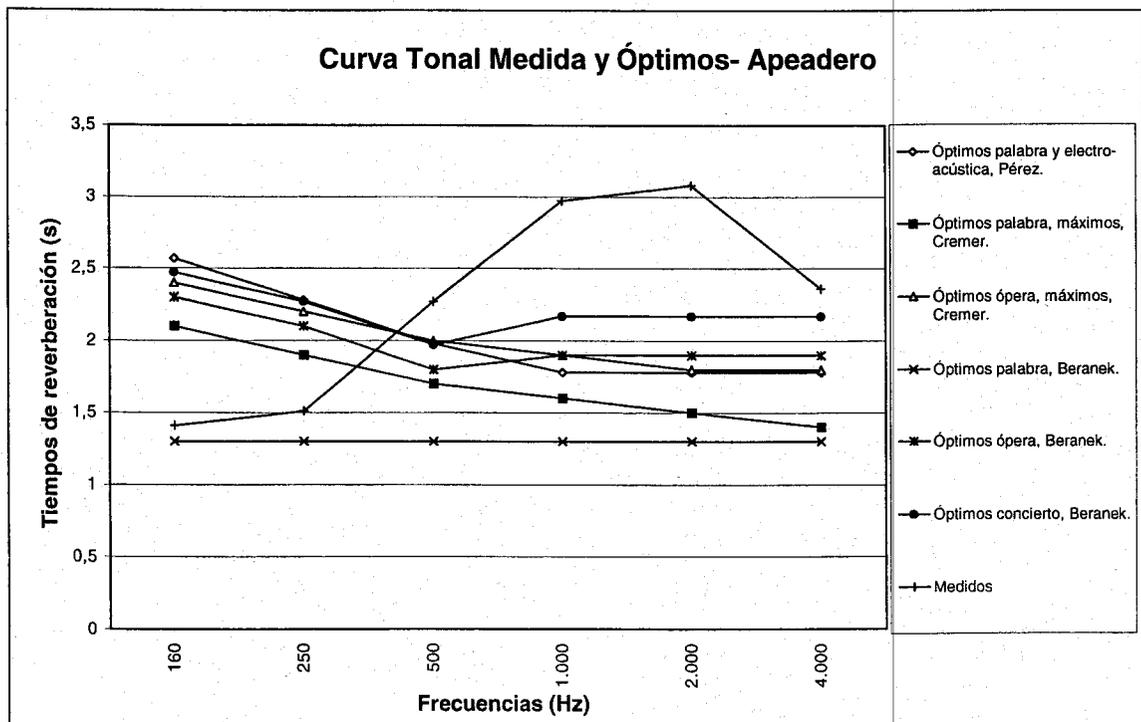


Figura 104. Curva tonal medida y óptimas del Apeadero, centros de octavas.

5.2.2.2. Inteligibilidad

No se pudieron realizar medidas de inteligibilidad debido a los altos y muy variables niveles de ruido. Hay que tener en cuenta que el sistema electro-acústico estaba desmantelado y, por tanto, no podía utilizarse para la emisión.

5.2.2.3. Distribución Sonora

No se pudieron realizar medidas de distribución sonora debido a los altos y muy variables niveles de ruido, las dimensiones del espacio y la pequeña potencia acústica de la fuente disponible.

5.2.2.4. Ruido de Fondo

Presentamos en figura 105 el espectro del ruido de fondo medido. Este espectro se compara con las curvas NC de calificación del ruido.

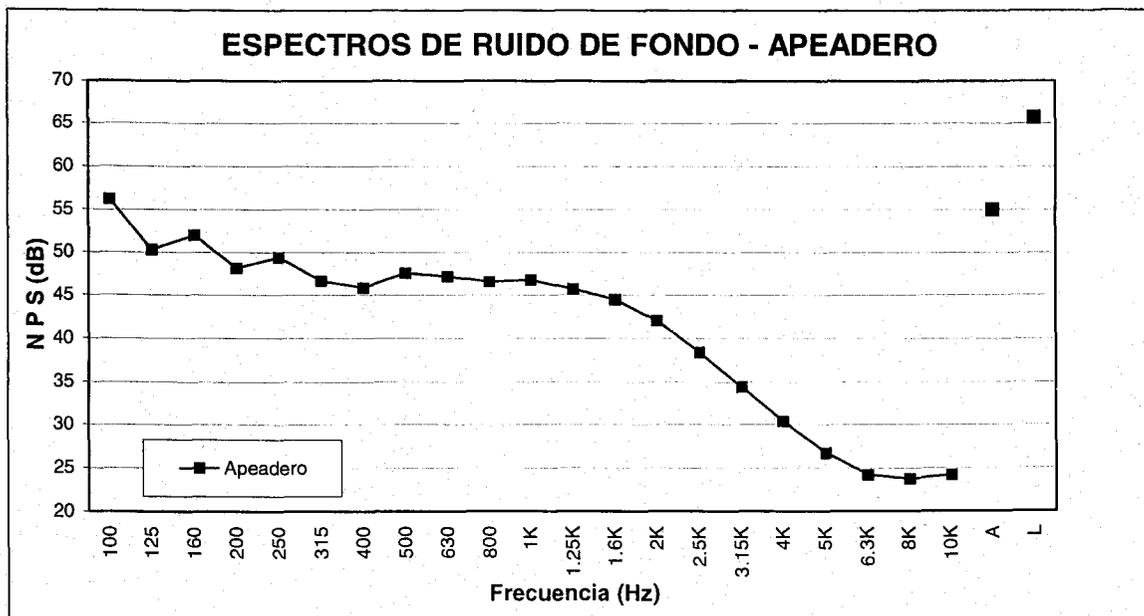


Figura 105. Espectro promedio de ruido de fondo, en tercios de octava, Apeadero.

TABLA _15 . Ruido de fondo y curva NC-46. Apeadero.

Ruido de fondo y curva NC-50 Apeadero – AVE	FRECUENCIAS (HZ)						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Medido (dB)	50,3	49,4	47,6	46,8	42,0	30,4	23,7
NC – 46	60,8	54,8	50	47	45	44	43

En la figura 106 apreciamos que a este espectro podemos asignar un índice NC 46.

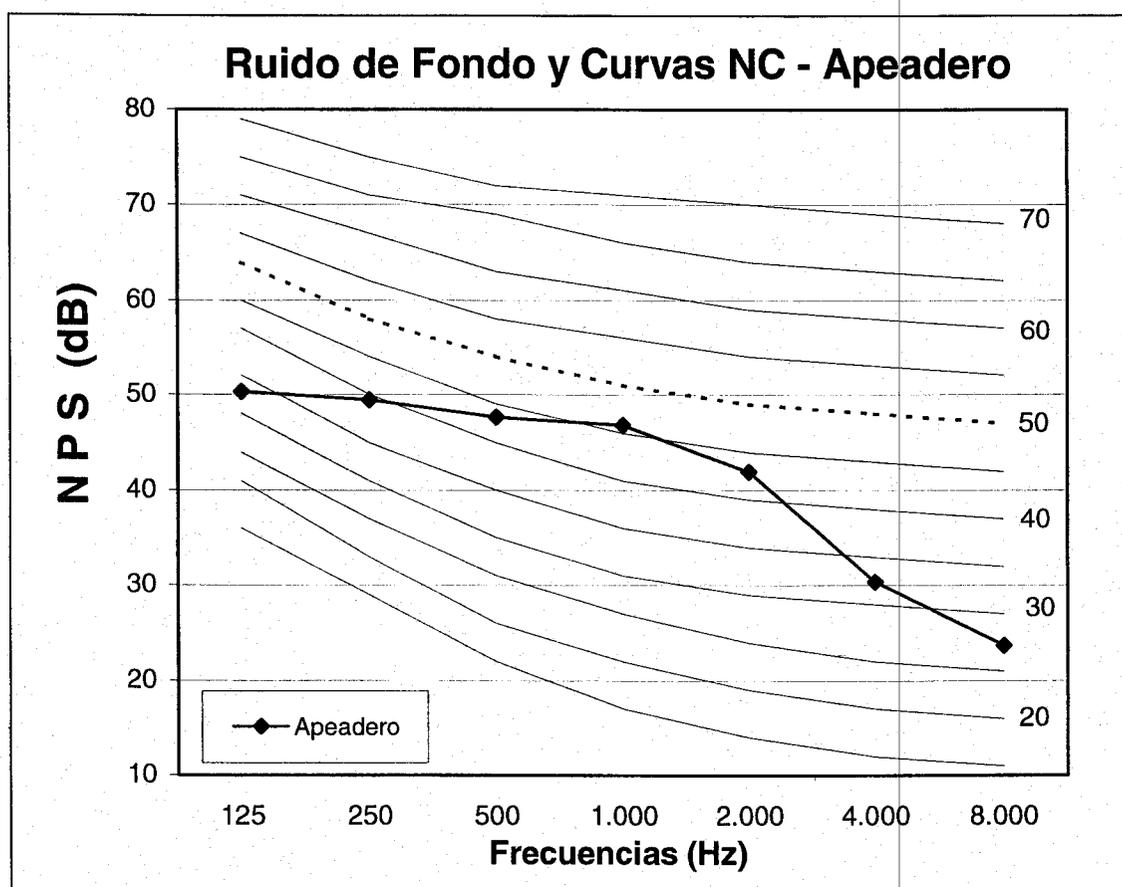


Figura 106. Ruido de fondo y curvas NC, Apeadero.

5.2.2.5. Coeficientes de absorción

Las superficies de los distintos materiales con sus respectivos coeficientes de absorción estimados, en las distintas bandas de octava, así como los coeficientes de absorción calculados para la cubierta, se reflejan en la Tabla 16_. El valor del coeficiente de

absorción para la membrana de la cubierta se representa en la figura 107.

TABLA _16. Superficies y sus Coeficientes de Absorción en el Apeadero.

MATERIAL	SUPERFICIE (m ²)	AUTOR	Frecuencias (Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
Absorción Aire m ³	30.000		0,00	0,00	0,00	0,003	0,009	0,023
Superficie Virtual	725		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Terrazo	2.770	Egan	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Cubierta calculado	4.500		0,60	0,55	0,30	0,17	0,12	0,13
TOTAL	7.995							

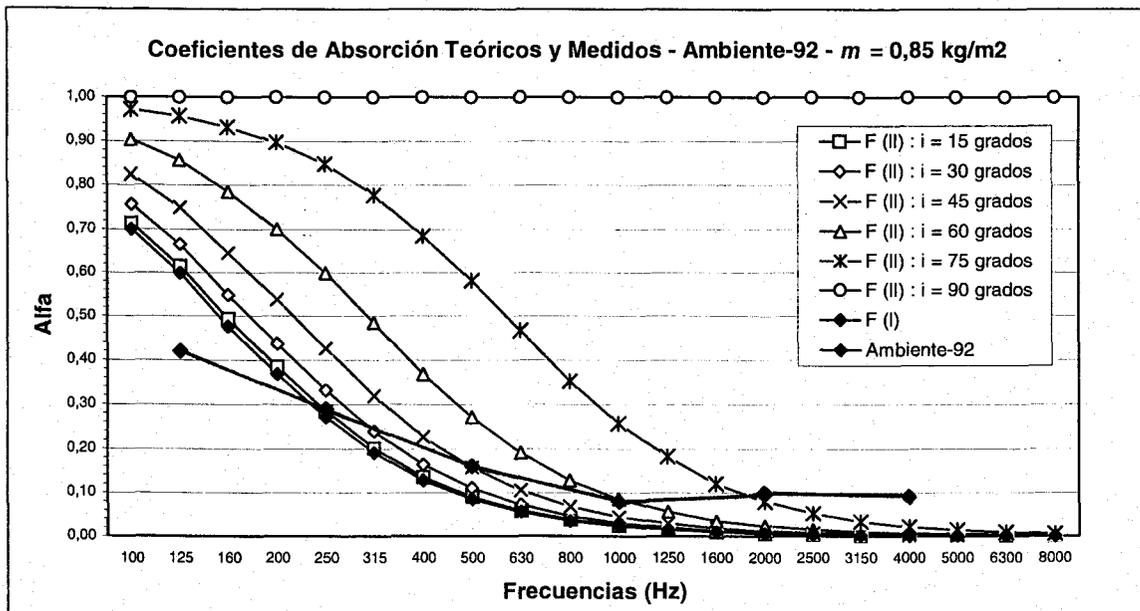


Figura 107. Coeficientes de absorción calculados para la membrana del Apeadero.

5.2.2.6. Modelo Informático:

No se ha desarrollado modelo informático del Apeadero debido a la gran cantidad de planos necesarios y a la limitación del programa Acoustacadd en 500 planos de construcción del modelo.

5.2.3. Pabellón Ambiente – 92 en la EXPO-92.

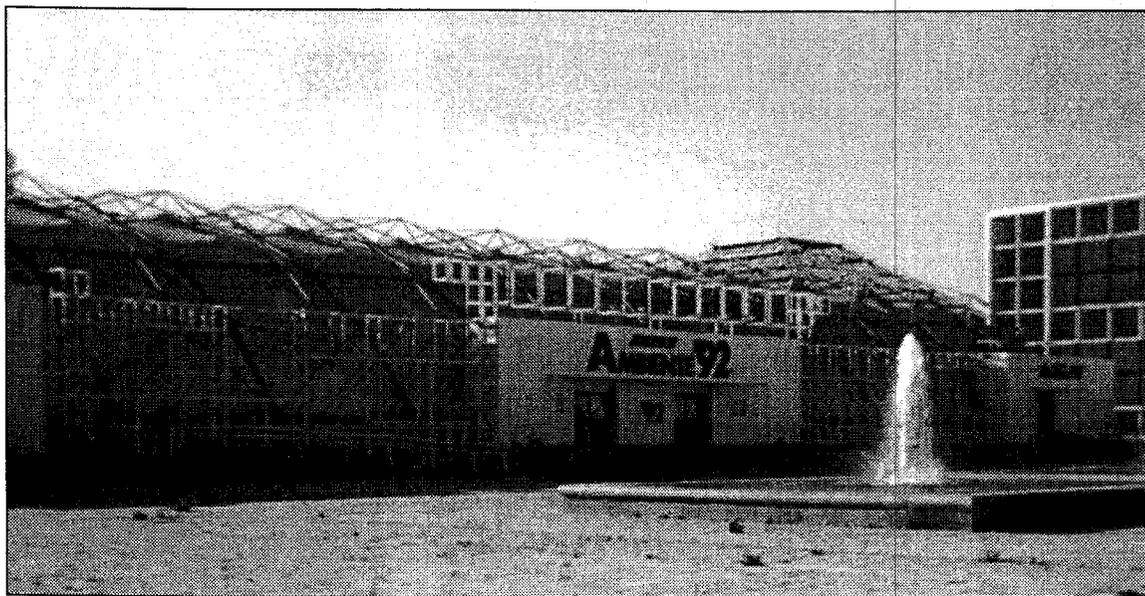


Figura 108. Vista exterior, frente, Ambiente-92.

El Pabellón Ambiente-92 estaba localizado junto a la Puerta de Triana, de la EXPO - 92. El pabellón, proyectado y ejecutado por Binistar, Italia, ofrecía un espacio climatizado destinado a acoger fiestas y celebraciones diversas (figuras 108 y 109). Los planos disponibles (plantas, secciones y alzados) se encuentran en el anexo 1.

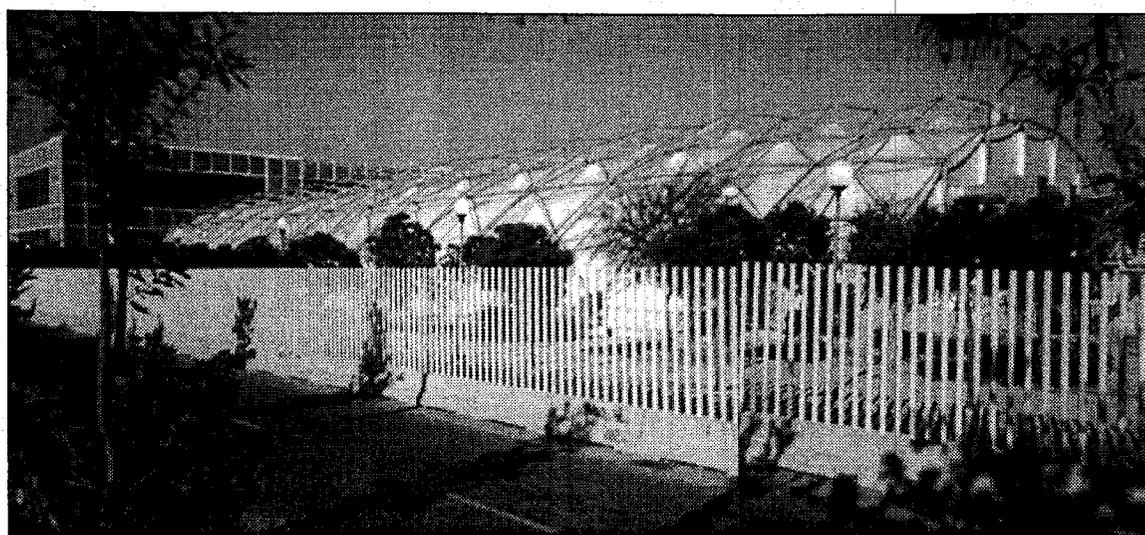


Figura 109. Vista exterior, fondos, Ambiente-92.

En esencia, era una superficie cilíndrica de unos 20.000 m^3 de volumen y 3.000 m^2 en planta ($84,00 \times 36,00 \text{ m}$) y una altura

máxima de 9 m. La cubierta estaba constituida por una estructura metálica exterior que sustentaba y tensionaba la membrana de PVC, de una sola capa, impermeable, con las siguientes características:

- Material: poliéster
- Recubrimiento: PVC
- Peso: 850 g/m²
- Tensión máxima: 8 T/m
- Fabricante: Binistar, Bari, Italia.

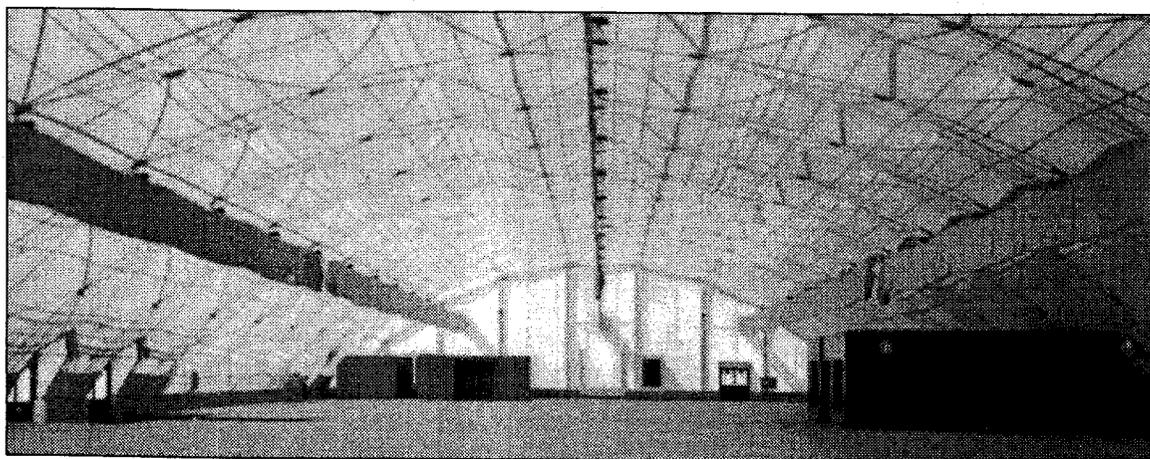


Figura 110. Vista interior, Ambiente-92.

El suelo era de madera, protegida con una lámina plástica, y estaba soportado por una estructura metálica, lo que permitía dejar una cámara por debajo del mismo, donde se ubicaban las diferentes instalaciones.

La carpa estaba dotada de un sistema de aire acondicionado con conductos de distribución textiles, colgados del techo, en número de tres, dispuestos paralelos al eje longitudinal, uno en el centro y los otros dos separados 12 m. Este sistema de climatización no estaba funcionando durante los ensayos acústicos (figura 110). Los compresores y evaporadores del equipo de aire acondicionado se

situaban en el exterior del edificio, insuflando el aire a través de tubos flexibles que se notan en el canto superior derecho de la figura 111. Abajo a la derecha se puede ver la boca del sistema de impulsión de aire.

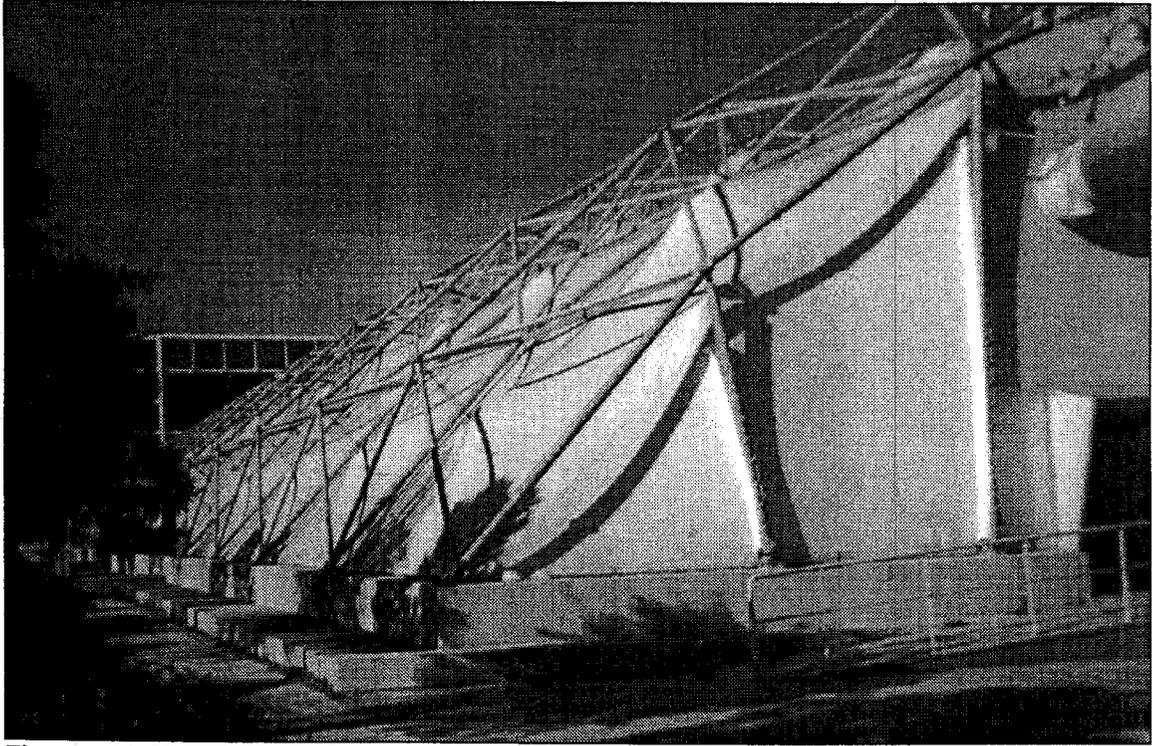


Figura 111. Vista lateral, aire acondicionado, Ambiente-92.

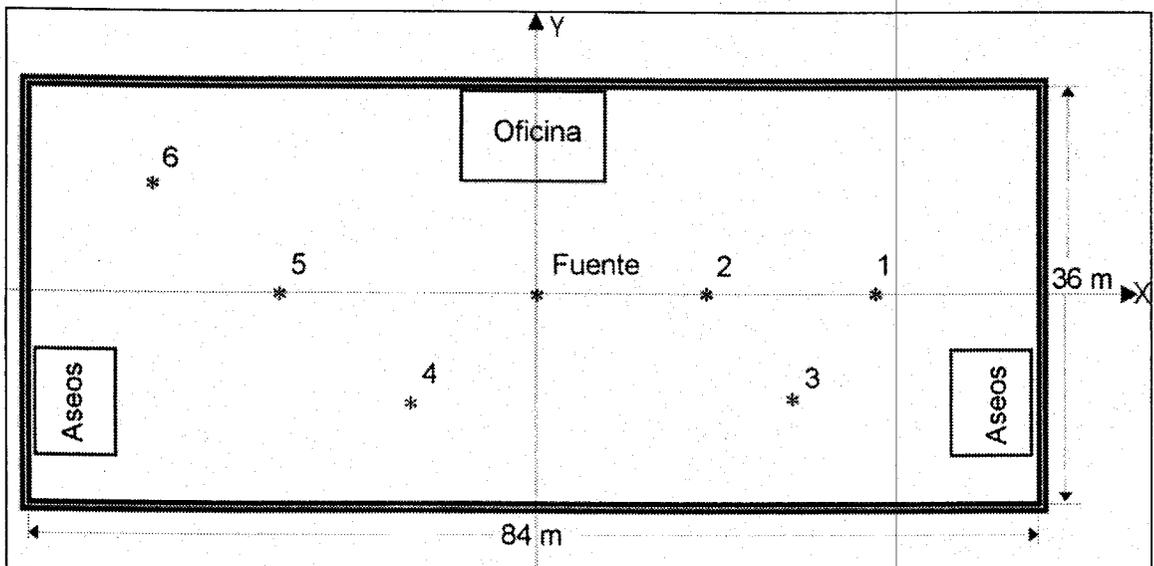


Figura 112. Esquema en planta y puntos de medida del Ambiente-92.

La figura 112 muestra un esquema de la planta con los puntos donde se han realizado las medidas.

5.2.3.1. Reverberación

Para medir el tiempo de reverberación hemos utilizado el método del impulso integrado de Schröder. Los puntos de registro se repartieron por el interior de la sala, según se indica en la figura 113.

En la figura 113 se presentan los tiempos de reverberación promediados, medidos en bandas de 1/3 de octava, de los diversos puntos de la sala.

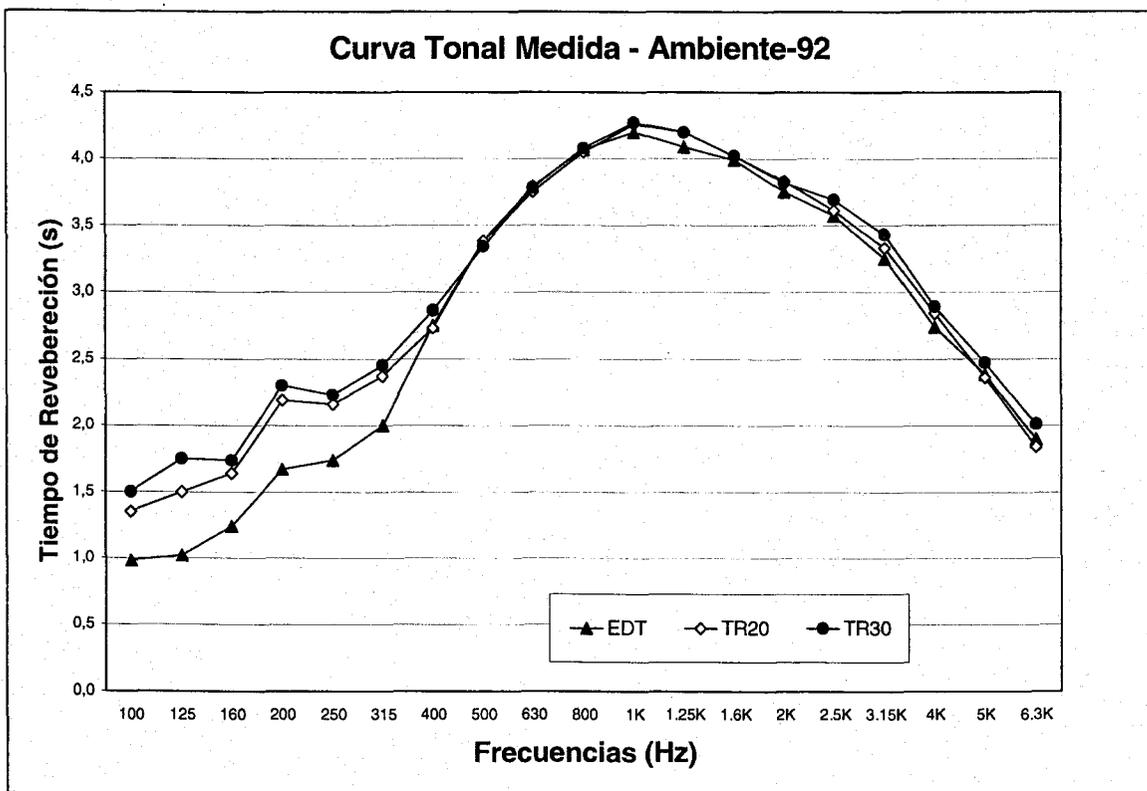


Figura 113. Curvas tonales, en tercios de octava, Ambiente-92.

En la **tabla 17** presentamos los valores del tiempo de reverberación medido en bandas de octavas. Asimismo en esa tabla se incluyen los valores óptimos para la sala, a partir de Pérez Miñana, Cremer y Beranek.

TABLA 17. Tiempos de reverberación medidos y óptimos, Ambiente-92.

Tiempos de Reverberación Ambiente-92 (seg.) 20.000 m ³	Frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Medidos	1,74	2,23	3,34	4,27	3,82	2,89
Óptimos palabra con electro-acústica, Pérez.	2,25	1,99	1,73	1,56	1,56	1,56
Óptimos palabra máximos, Cremer.	2,0	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3
Óptimos ópera máximos, Cremer.	2,3	2,1	1,9	1,8	1,7	1,6
Óptimos palabra, Beranek.	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Óptimos ópera, Beranek.	2,21	2,01	1,71	1,81	1,81	1,81
Óptimos concierto, Beranek.	2,35	2,15	1,85	1,95	1,95	1,95

En la figura 114 se compara la curva tonal medida y las óptimas para ese espacio.

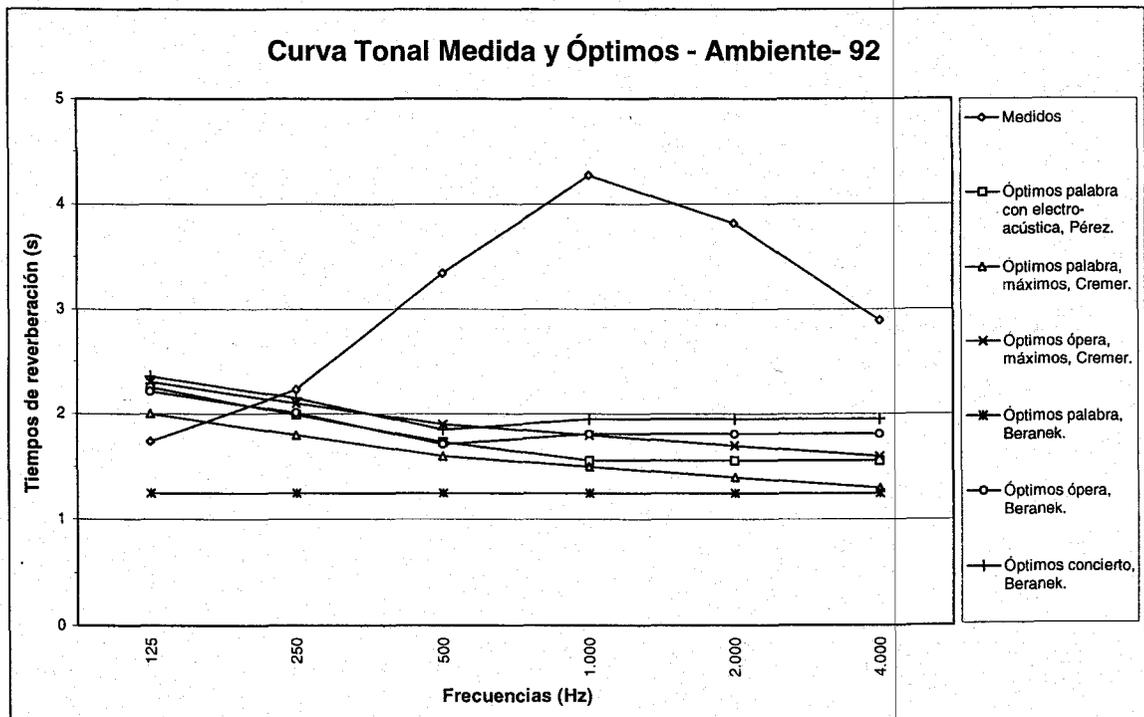


Figura 114. Curvas tonales medidas y óptimas, Ambiente-92.

Como puede observarse en la figura 114, la sala es muy reverberante a las frecuencias medias y altas, y un poco sorda a bajas frecuencias (125 Hz), siendo importante la desviación respecto a los valores óptimos, especialmente teniendo en cuenta que la voz

humana contiene máxima información entre 500 Hz y 4.000 Hz, y su contenido informativo máximo está en la banda de 2.000 Hz⁸⁵, lo que ocasiona un bajo nivel de inteligibilidad de la palabra.

5.2.3.2. Inteligibilidad

Para evaluar la inteligibilidad de la palabra hemos utilizado el índice *RASTI*. Dado que no existía instalación de apoyo electroacústico, el nivel del emisor *B&K-4225* se fijó en $+10$ dB y se procuró orientar hacia la zona de medida en cada caso. El receptor *B&K-4419* estaba conectado, vía *RS-232*, a un ordenador portátil que controlaba todo el proceso de medida, desde el acondicionamiento del receptor, hasta la grabación de los datos en disco. En cada uno de los puntos se hicieron al menos dos registros. En algunas situaciones el ruido de fondo, demasiado alto y fluctuante comprometió seriamente la medida.

En la **tabla 18** se presentan los valores obtenidos en los diferentes puntos indicados en la figura 112. El punto **F** se refiere a un punto situado a 90 cm. del emisor.

Tabla 18. Valores de *RASTI* y *STI* medidos. Ambiente-92.

Punto	RASTI	STI - 500 Hz	STI - 2000 Hz
1	0.46	0.43	0.48
2	0.44	0.41	0.45
3	0.39	0.40	0.37
4	0.46	0.49	0.44
5	0.45	0.32	0.55
6	0.38	0.34	0.41
F	0.97	0.99	0.95

⁸⁵ SILVA, M. *Acústica de edificios*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993.

La calificación cualitativa, sobre la base del *RASTI* medido, no pasa de “pobre”. Sobre esta calificación tiene mayor influencia el *STI* en la banda de 500 Hz, dado que el ruido de fondo en ésta supera en unos 10 dB al de la banda de 2000 Hz y el *EDT* medido es similar para ambas bandas de octava.

5.2.3.3. Distribución Sonora

En la figura 115 se reflejan los valores de los niveles sonoros medidos en diversos puntos de la sala para las distintas bandas de tercio de octava. La ubicación de los puntos se presenta en la figura 112. Asimismo se expresan los valores del nivel sonoro global medido en dB (valor L) y en dB(A) (valor A). La línea continua superior de la figura representa el espectro medido a 1 m de la fuente (*F*). Se pueden observar las focalizaciones sobre el eje provocadas por la geometría de la cubierta (puntos 1, 2 y 5).

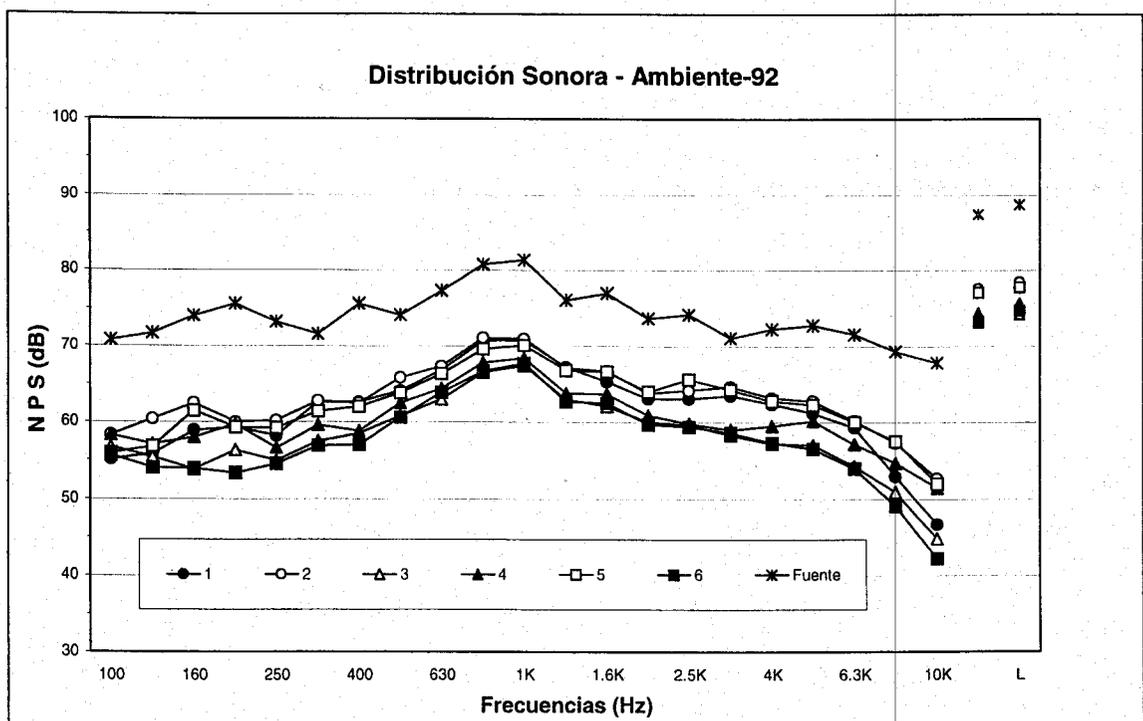


Figura 115. Distribución sonora en tercios de octava, Ambiente-92.

5.2.3.4. Ruido de fondo

En la figura 116 se reflejan los niveles acústicos medidos para el ruido de fondo, correspondientes al espectro lineal (sin ponderar). Asimismo se expresan los valores del nivel sonoro global medido en dB (valor L) y en dB(A) (valor A).

Estos valores se han obtenido en el laboratorio mediante el analizador B&K/2133, promediando linealmente un registro de ocho minutos realizado en el DAT, después de la adecuada calibración del sistema. El registro se realizó colocando el micrófono y preamplificador en el centro del espacio, alejados mediante un cable prolongado, del registrador.

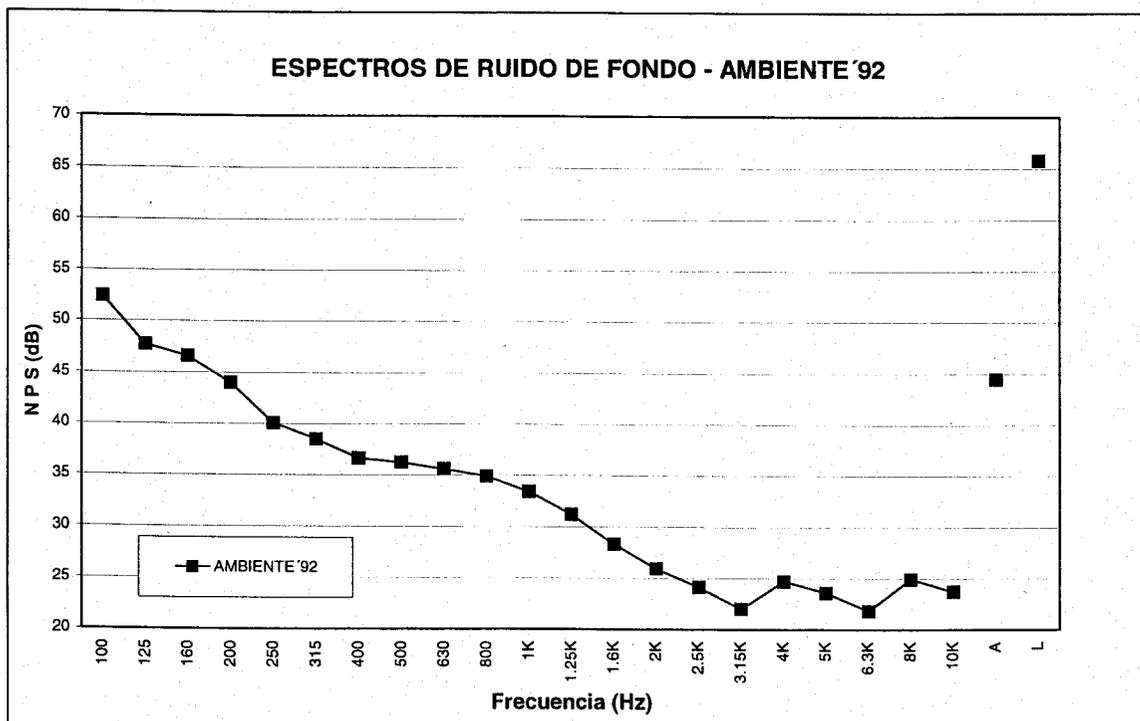


Figura 116. Espectro promedio de ruido de fondo en Ambiente-92.

Como se puede observar en la mencionada figura 112, el valor global lineal es de 65,8 dB, mientras que el ponderado (A) es 44,5 dB(A). Estos valores se deben principalmente a los niveles de ruido de fondo a bajas y medias frecuencias, lo que denota la baja

capacidad aislante de la cubierta en estas bandas, debido a su poco peso.

TABLA 19. Ruido de fondo y curva NC-33. Ambiente-92.

Ruido de fondo y curva NC-35 Ambiente-92	FRECUENCIAS (HZ)						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Medido (dB)	47,7	40,1	36,2	33,4	25,9	24,7	24,9
NC - 33	50,4	43,4	38,4	34	33	31	30

Este espectro se compara con las curvas NC en la tabla 19 y en la figura 117, lo que permite calificar el recinto con el NC-33.

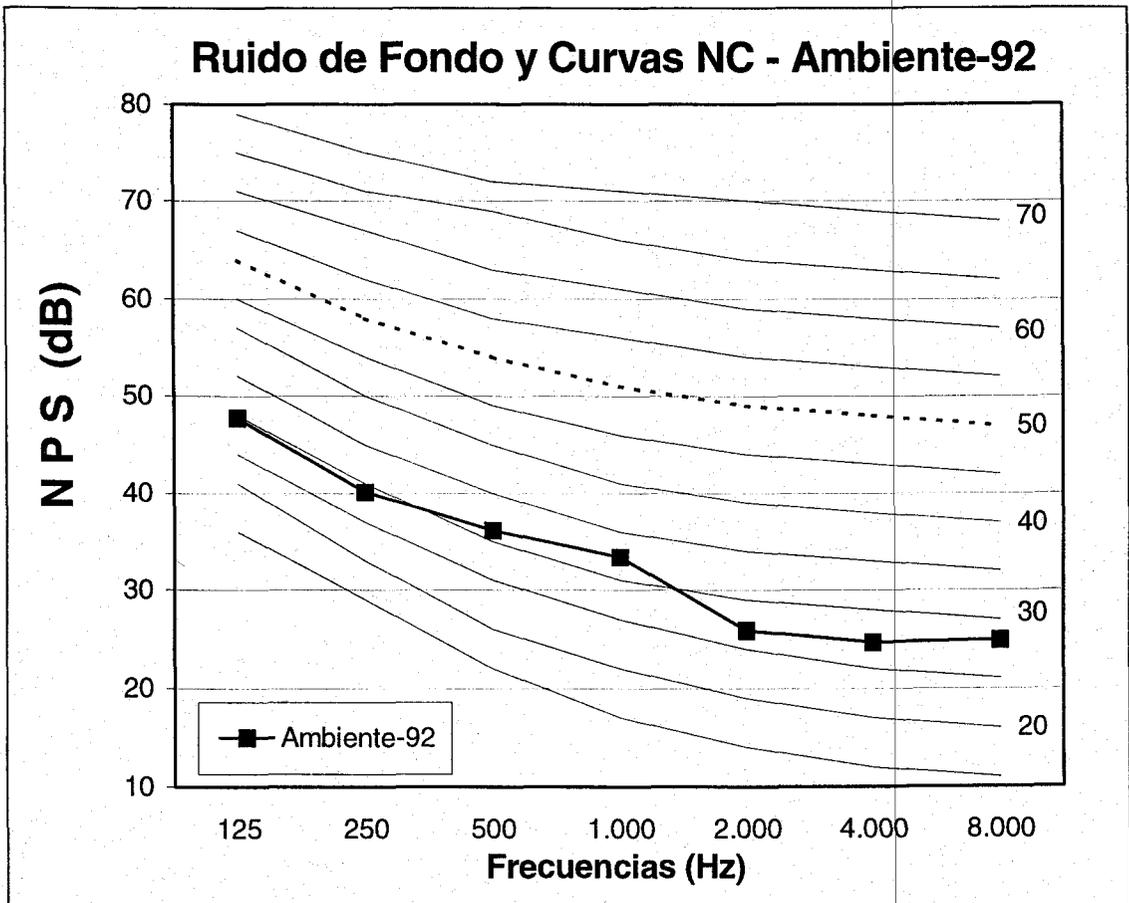


Figura 117. Ruido de fondo y curvas NC, Ambiente-92.

5.2.3.5. Coeficientes de absorción

Las superficies de los distintos materiales utilizados para obtener los coeficientes de absorción de la membrana, también utilizados en

el modelo informático, con sus respectivos coeficientes de absorción estimados, a las distintas frecuencias de octava, se reflejan en la tabla 20.

Los resultados del cálculo para el coeficiente de absorción de la cubierta se han representado en la figura 118. Estos valores, al menos cualitativamente, nos recuerdan los valores teóricos que discutimos en su momento.

Tabla 20. Superficies y sus coeficientes de absorción en bandas de octava. Ambiente-92.

MATERIAL	Superf. (m ²)	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Refer. Biblio.
Absorción Aire (m ³)	20.045	0,00	0,00	0,00	0,002	0,009	0,023	
Enlucido	152	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	Egan
Suelo Plástico	2.800	0,05	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	Recuero
Conductos Aire Acondicionado.	420	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35	Pérez
Chapa Lisa Servicios y Oficina	299	0,05	0,10	0,10	0,10	0,07	0,02	Egan
Cristal	27	0,17	0,07	0,04	0,03	0,03	0,02	COAM
Persona en pie	1400	0.36	0.43	0.47	0.44	0.49	0.49	Recuero
Cubierta, calculado	3.843	0,42	0,29	0,16	0,08	0,10	0,09	
TOTAL	7.555							

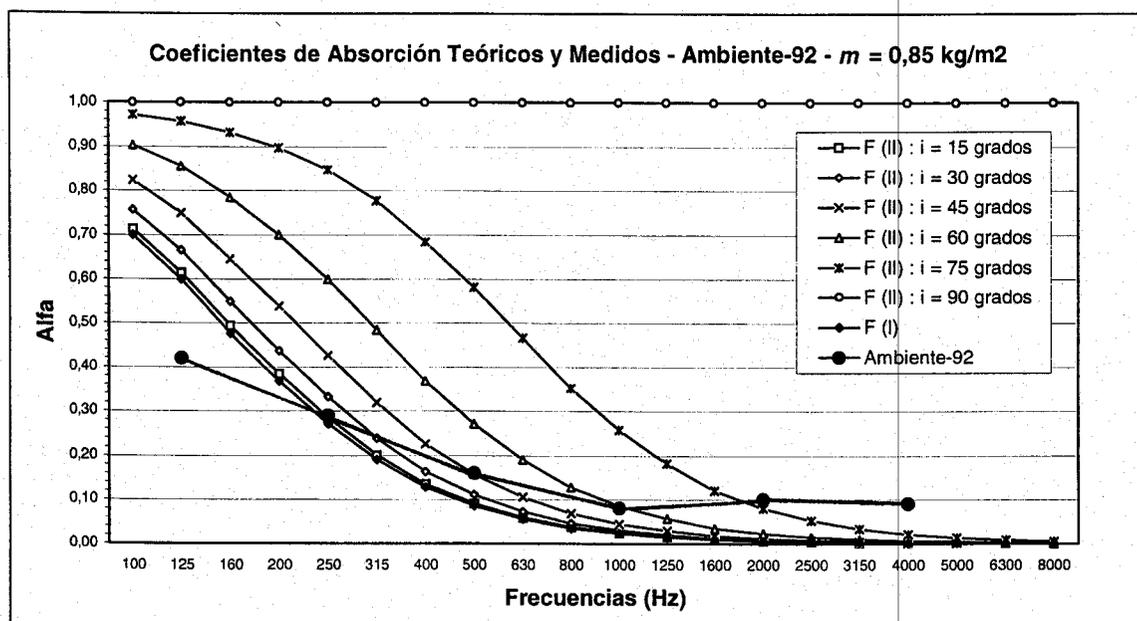


Figura 118. Coeficientes de absorción calculados para la membrana de Ambiente-92.

5.2.3.6. Modelo Informático

Con los datos de la tabla 20 montamos el modelo informático en el programa de simulación ya referido Acoustacadd. Los valores obtenidos a partir del modelo ajustado se muestran a continuación.

5.2.3.6.1. Inteligibilidad

La tabla 21 recoge los resultados proporcionados por el modelo informático, desarrollado con el programa de simulación ACOUSTACADD, que nos permite la obtención del índice $\%Al_{cons}$. Los puntos analizados vienen indicados en la figura 106. Se presentan las coordenadas de los puntos, niveles de presión sonora directo, reverberado y total, así como el índice $\%AL_{cons}$ en cada uno de los puntos, para las bandas de octava determinantes de la inteligibilidad: 500 y 2000 Hz, obtenido para el recinto vacío.

Tabla 21. Inteligibilidad (%AL_{cons}). Recinto vacío.

Fuente -42/0/1.6 P = 0.01w.		Campo Directo (dB)	Campo Reverberado (dB)	TOTAL (dB)	%AL _{cons}
P - 1	500	51,1	66,6	66,7	26,4
-14/0/1.2	2000	51,1	68,5	68,6	39,6
P - 2	500	57,1	66,6	67,0	21,2
-28/0/1.2	2000	57,1	68,5	68,8	32,8
P - 3	500	52,8	66,6	66,7	25,3
-21/-9/1.2	2000	52,8	68,5	68,6	38,1
P - 4	500	57,4	66,6	67,1	20,8
-52/-9/1.2	2000	57,4	68,5	68,8	32,3
P - 5	500	53,6	66,6	66,8	24,7
-63/0/1.2	2000	53,6	68,5	68,6	37,4
P - 6	500	49,6	66,6	66,6	27,2
-74/9/1.2	2000	49,6	68,5	68,5	40,5

La observación de la última columna de la tabla muestra los elevados valores del %AL_{cons}. Por consiguiente, la inteligibilidad de la sala es calificada como “*mala*” en todos los puntos. La conclusión es, por tanto, la misma que la extraída con el índice RASTI.

En la tabla 22 se presenta la predicción teórica del índice %AL_{cons} en la simulación de ocupación del suelo con público al 50% de la capacidad, para las bandas de octava de 500 y 2000 Hz. Los puntos son los mismos de la simulación anterior, y se indican sus coordenadas.

La última columna muestra la mejora en la inteligibilidad que se produciría con la introducción de público, aunque no podría ser calificada mejor que “*pobre*”, insuficiente para ser aceptable como espacio destinado a actuaciones artísticas o conferencias.

Tabla 22. Inteligibilidad (%AL_{cons}). Recinto ocupado.

Fuente - 42/0/1.6 P = 0.01w.		Campo Directo	Campo Reverberado	TOTAL	%AL _{cons}
P - 1	500	51,1	64,5	64,7	17,6
-14/0/1.2	2000	51,1	65,3	65,5	20,5
P - 2	500	57,1	64,5	65,2	13,8
-28/0/1.2	2000	57,1	65,3	65,9	16,2
P - 3	500	52,8	64,5	64,8	16,6
-21/-9/1.2	2000	52,8	65,3	65,5	19,5
P - 4	500	57,4	64,5	65,3	13,5
-52/-9/1.2	2000	57,4	65,3	66,0	15,9
P - 5	500	53,6	64,5	64,8	16,2
-63/0/1.2	2000	53,6	65,3	65,6	19,0
P - 6	500	49,6	64,5	64,6	18,2
-74/9/1.2	2000	49,6	65,3	65,4	21,2

5.2.3.6.2. Acústica Geométrica

Ya por último, y aplicando asimismo el modelo informático citado (*ACOUSTACADD*), se ha realizado un análisis de acústica geométrica, cuya documentación detallada se adjunta en el Anexo 2. El modelo se han elaborado simulando la sala vacía de público.

El análisis de acústica geométrica realizado con reflexiones de hasta tercer grado, revela el gran número de reflexiones que llegan excesivamente retardadas con respecto al sonido directo, principalmente provenientes de la cubierta y de las paredes laterales que cierran la sala, especialmente a las frecuencias altas, provocando una baja comprensión tanto de la música como de la palabra. En las figuras 119 y 120 se muestran las trayectorias de los rayos directo y reflejado, para el punto 1 de la figura 112, en las frecuencias de 250 y 2.000 Hz, respectivamente. También se

aprecian los valores de la diferencia de camino de los rayos sonoros directo y reflejado, así como el ecograma con el rayo reflejado indicado.

En las figuras 121 y 122 se muestran las trayectorias del rayo directo y reflejado, para el punto 3 de la figura 112, en las frecuencias de 250 y 2.000 Hz, respectivamente. Como en las dos figuras anteriores, también se aprecian los valores de la diferencia de camino de los rayos sonoros y el ecograma con el rayo reflejado indicado.

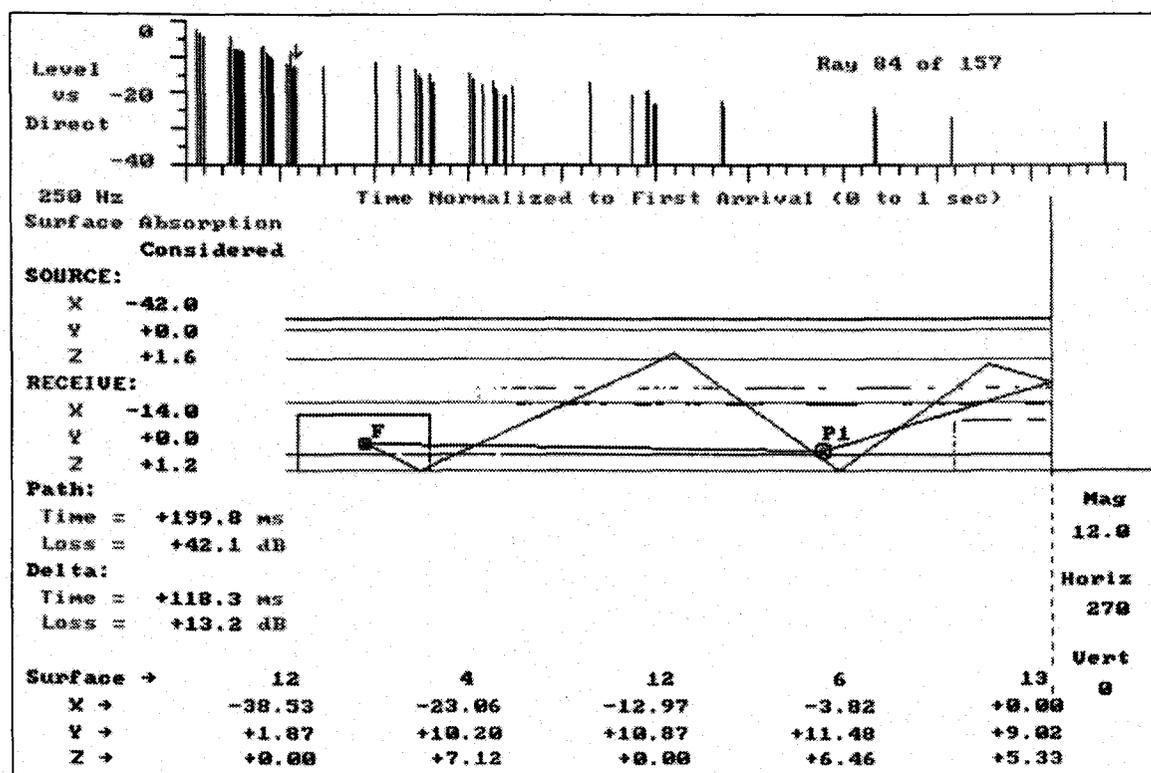


Figura 119. Modelo del Ambiente-92, con trayectoria del rayo directo y reflejado.

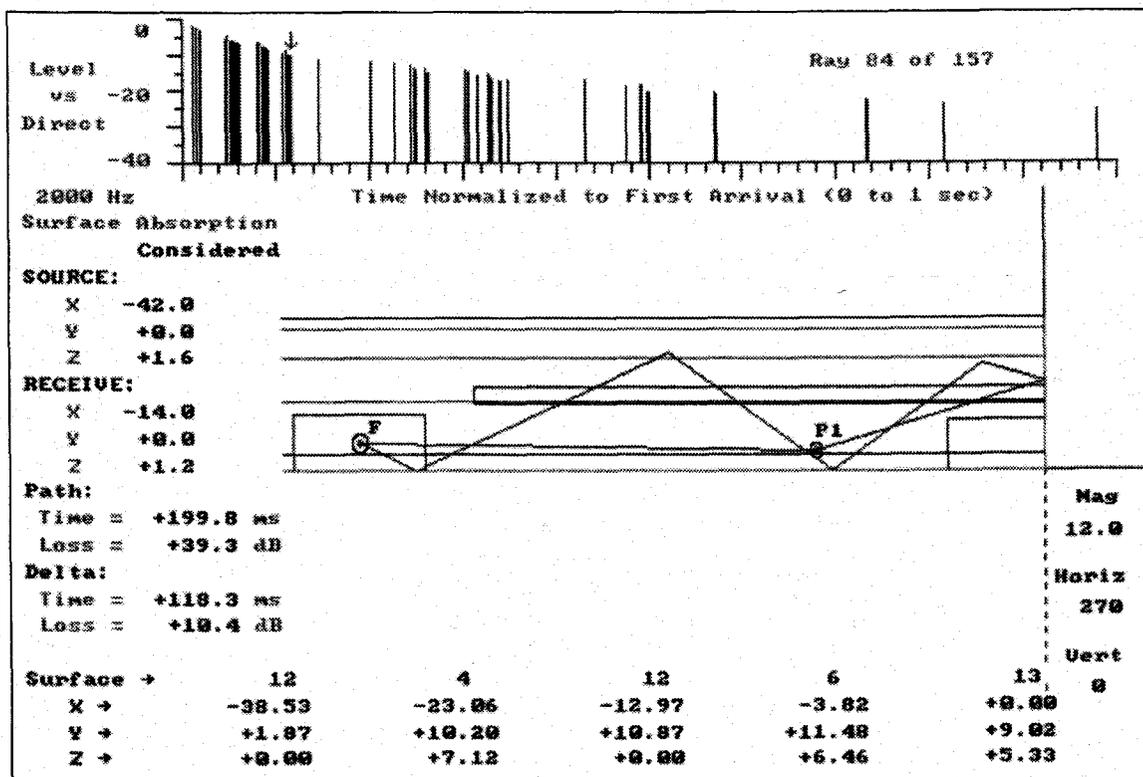
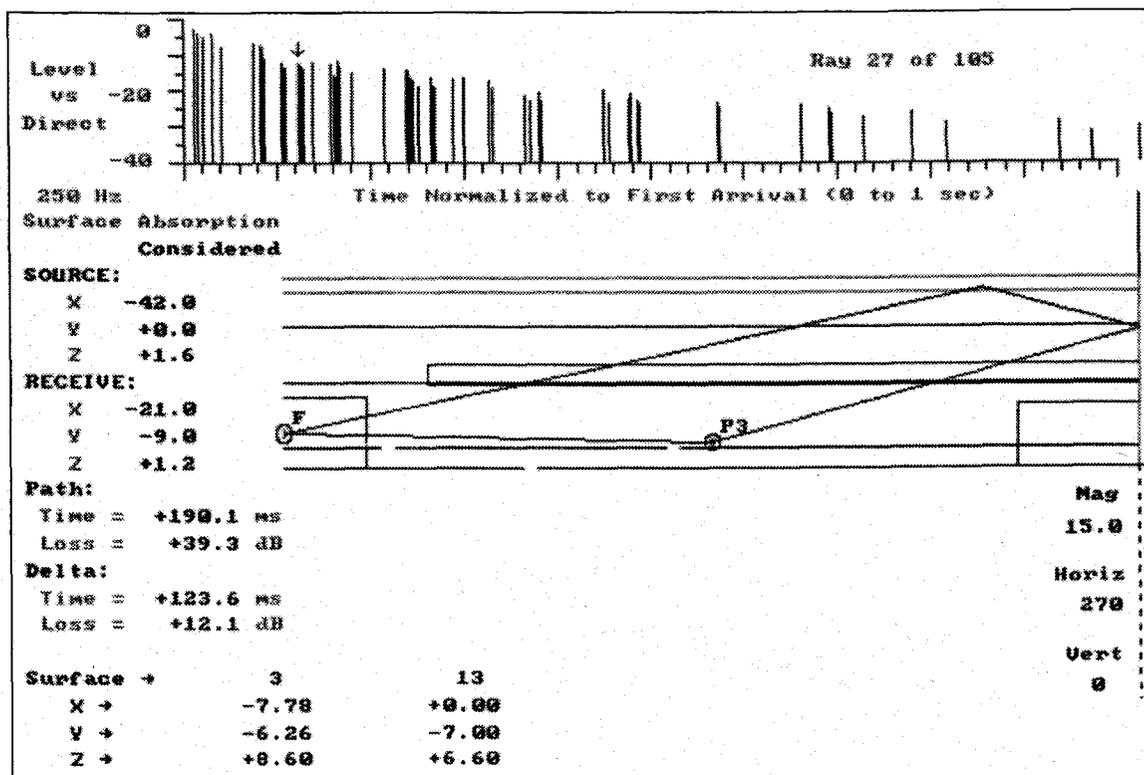
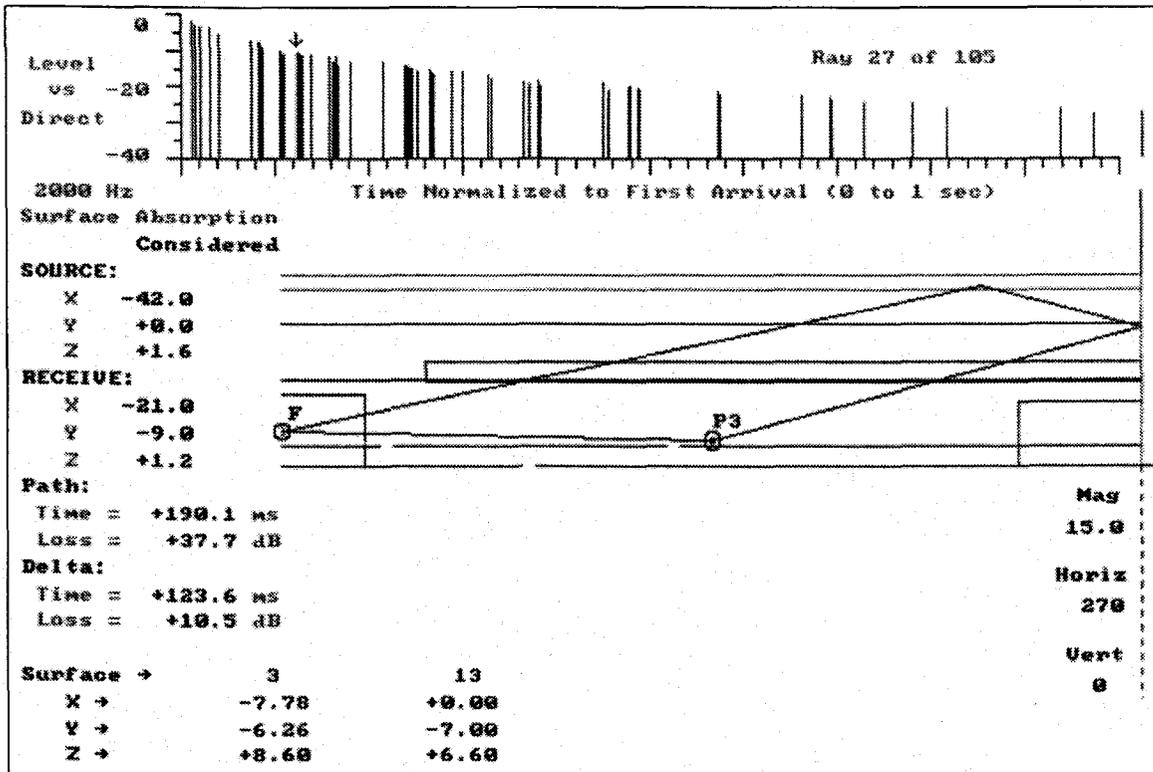


Figura 120. Modelo del Ambiente-92, con trayectoria del rayo directo y reflejado.



Figuras 121. Modelo del Ambiente-92, con trayectoria del rayo directo y reflejado.



Figuras 122. Modelo del Ambiente-92, con trayectoria del rayo directo y reflejado.

5.2.4. Piscina Cubierta, Polideportivo San Pablo, Sevilla.

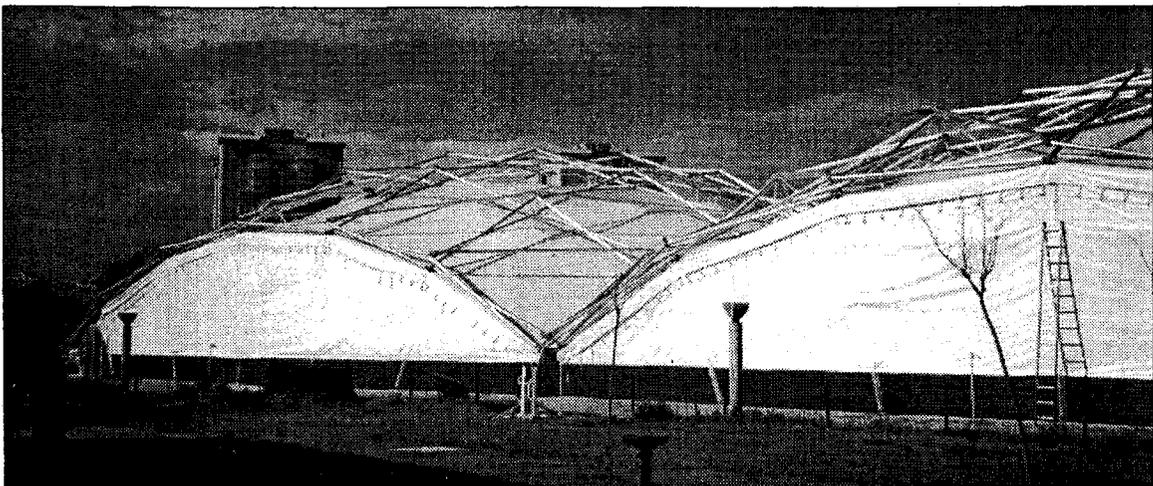


Figura 123. Vista exterior. Piscina San Pablo.

El Equipo del Dr. Arq. Félix Escrig ha desarrollado una estructura de haces plegable para la cubierta textil de la Piscina del Polideportivo San Pablo, en Sevilla (figura 123). El objetivo de esta estructura ligera para grandes luces es proporcionar abrigo a una piscina a cielo abierto, transformándola en piscina térmica. Además, servía

como prototipo de cobertura para proteger cualquier actividad al aire libre que necesite protección de la intemperie, como pistas de atletismo y polideportivos, entendiéndose como un modo de apoyo a la candidatura de la Ciudad de Sevilla como sede de las Olimpiadas del 2004. La facilidad de producción en taller, su bajo peso, las pequeñas cargas transmitidas a las cimentaciones, el pequeño número de apoyos necesarios, la rapidez de montaje/desmontaje y la posibilidad de cubrir sin grandes interferencias las instalaciones deportivas ya existentes, hacen de la estructura articulada una opción para protección de grandes luces.

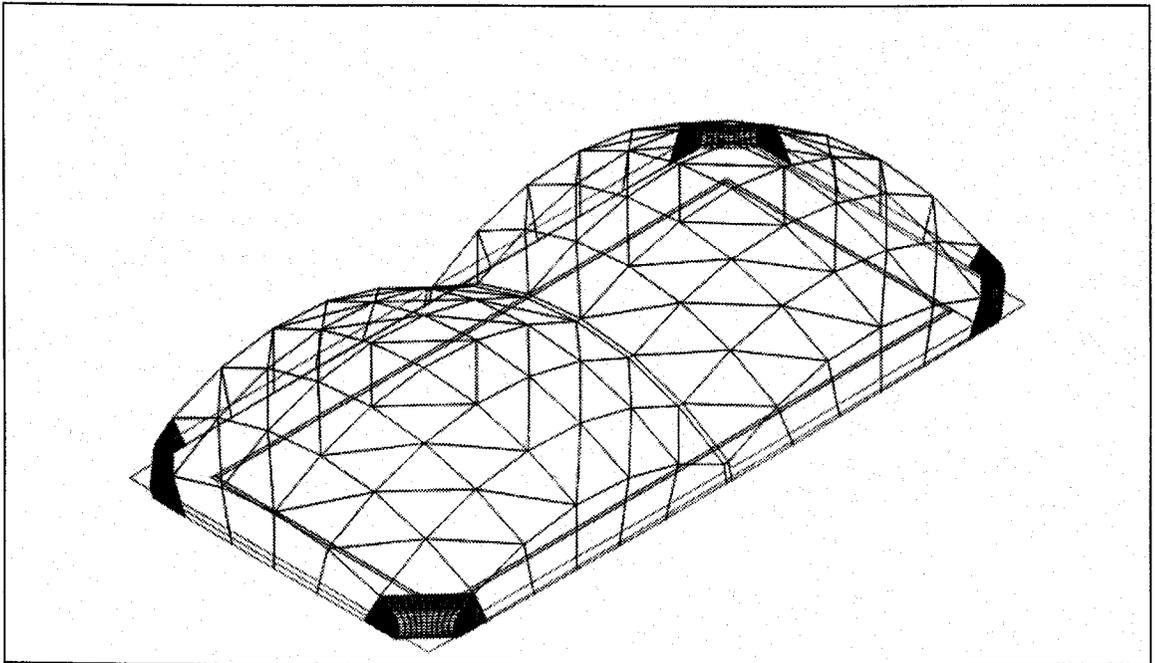


Figura 124. Perspectiva. Piscina San Pablo.

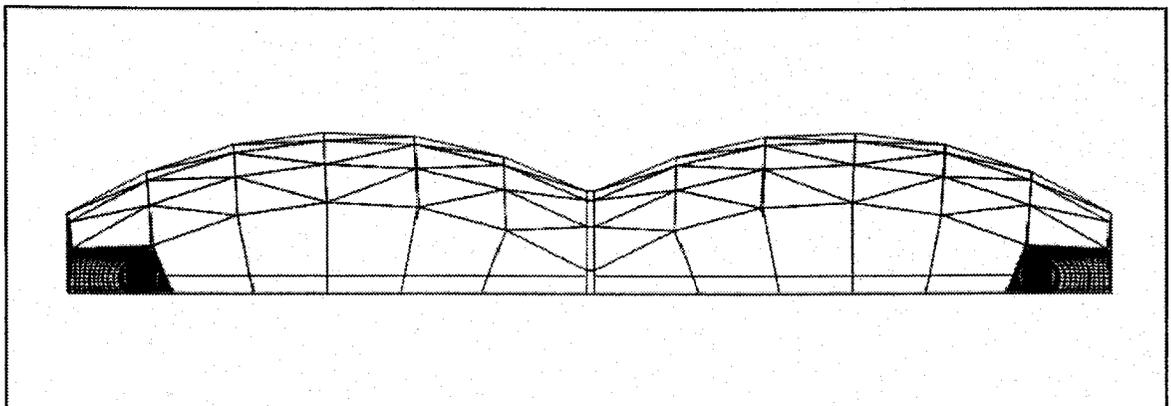


Figura 125. Alzado principal. Piscina San Pablo.

Son dos módulos en forma de cúpula (figuras 124 y 125), de 30,00 x 30,00 m y una altura máxima de 9,50 m unidos por el lateral, formando un espacio cubierto de unos 12.000 m³ de volumen y 1800 m² en planta. Cada cúpula ocupa 62,825° de una esfera de 19,150 m de radio.

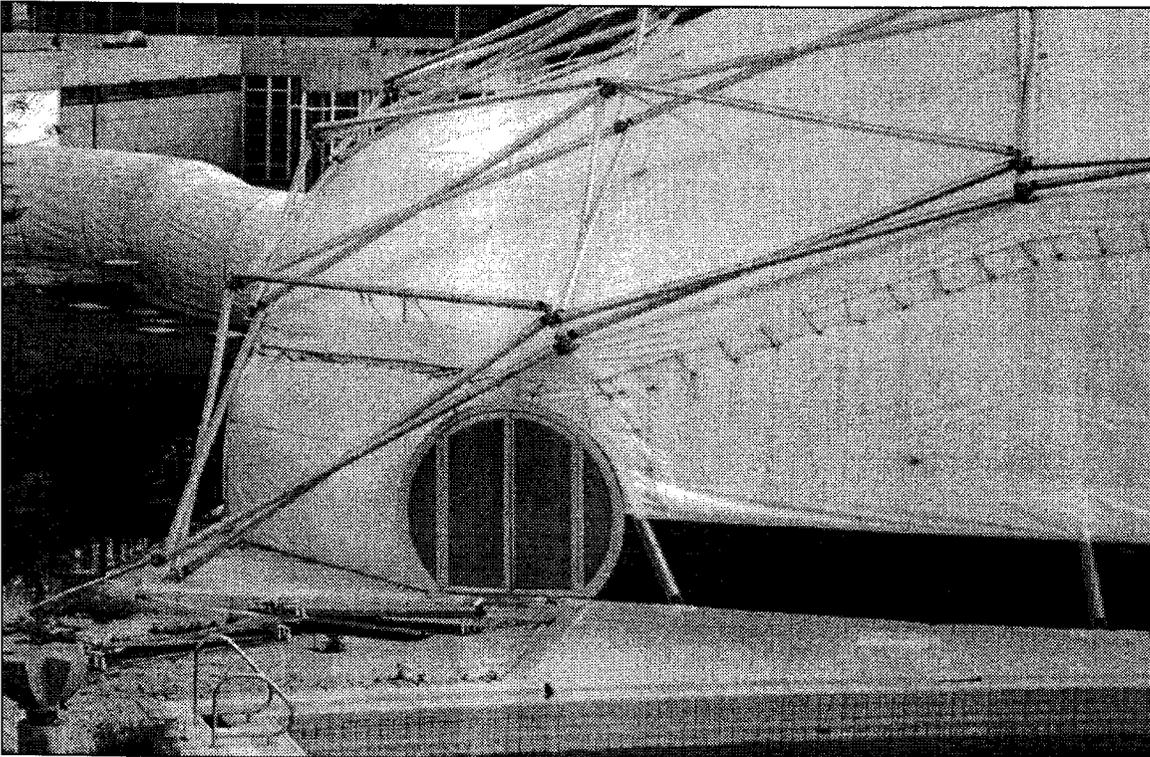


Figura 126. Detalle de los accesos y de la estructura. Piscina San Pablo.

La cubierta está constituida por una estructura metálica plegable exterior (figura 126), que sustenta y tensiona la membrana de poliéster + PVC, de una sola capa, impermeable, con las siguientes características:

- Material: 1100 Dtex PES HT
- Recubrimiento: PVC
- Peso: 670 g/m²
- Resistencia trama: 280 daN/5cm
urdimbre: 280 daN/5cm

preexistente. En la figura 126 se aprecia el exterior del acceso protegido.

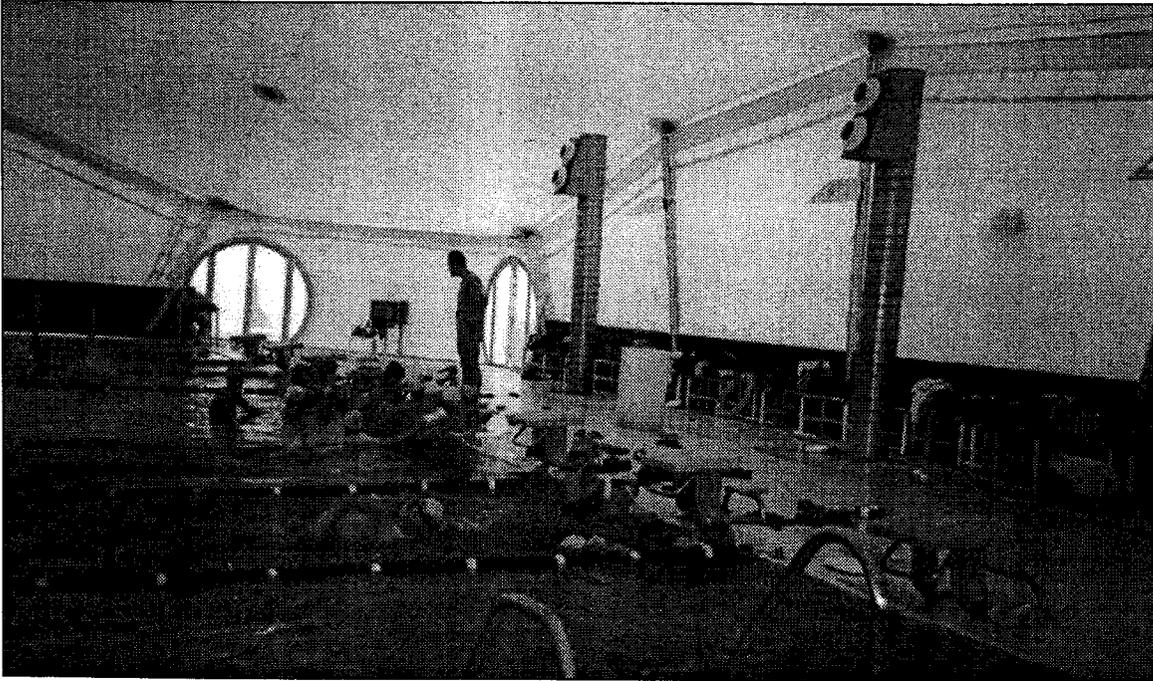


Figura 128. Vista interior. Piscina San Pablo.

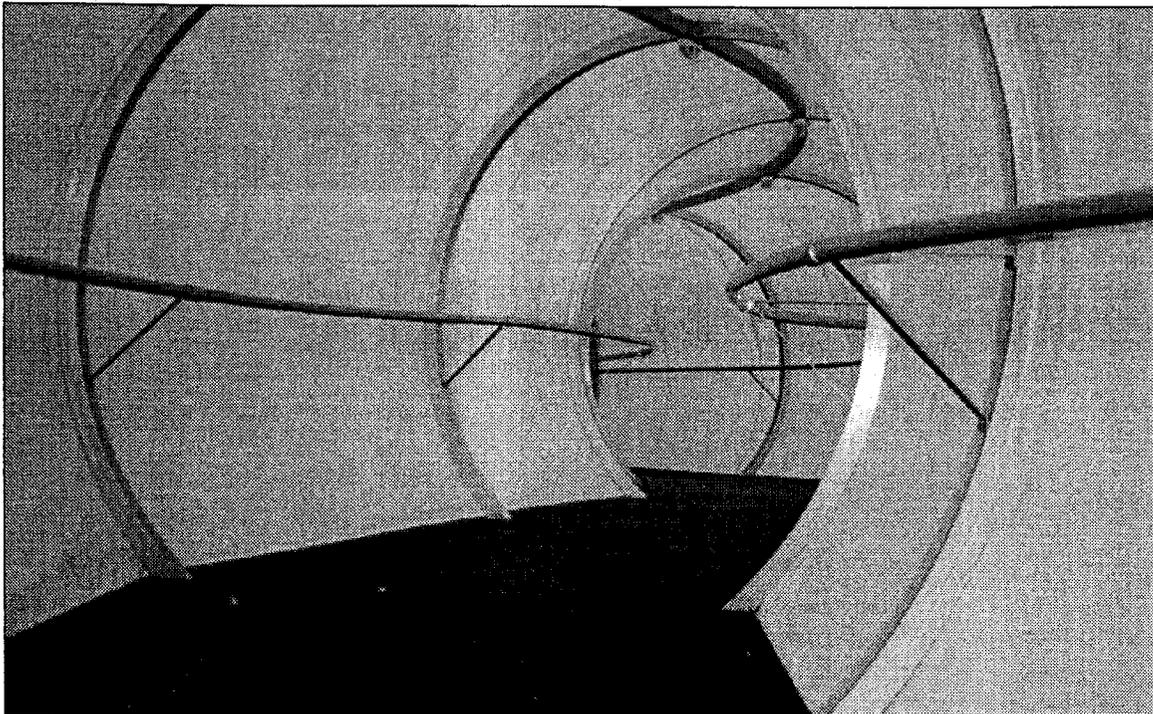


Figura 129. Acceso protegido de los vestuarios. Piscina San Pablo.

5.2.4.1. Reverberación

Para medir el tiempo de reverberación hemos ubicado la fuente en dos posiciones distintas, una en el fondo y otra en el centro del lateral del espacio cubierto, y hemos situado seis puntos distribuidos por el perímetro de la piscina, conforme se indica en la figura 130.

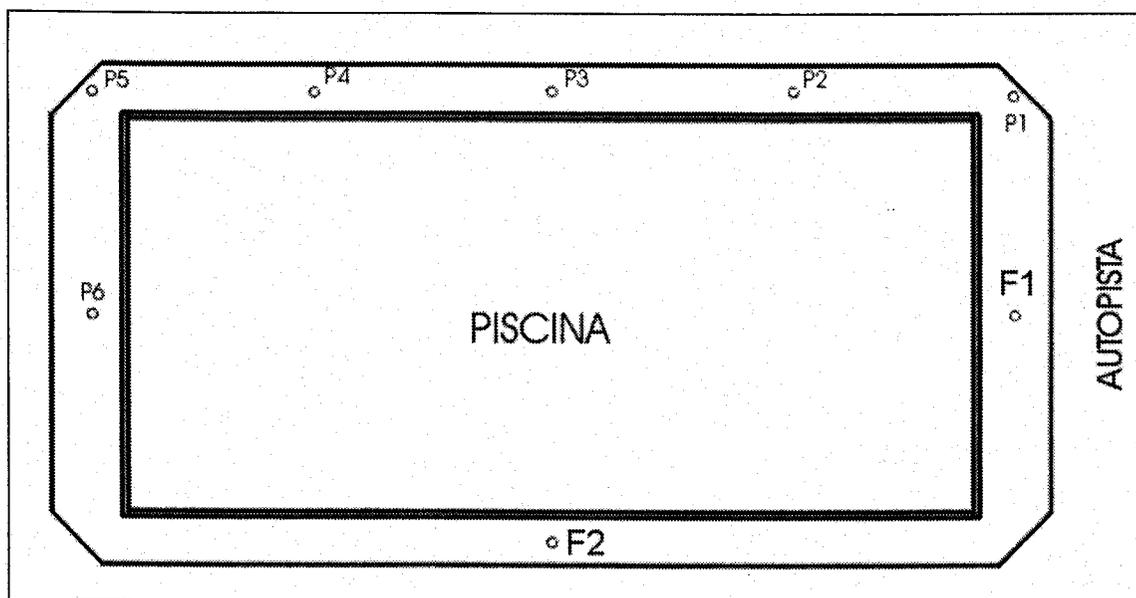


Figura 130. Esquema en planta y puntos de medida. Piscina San Pablo.

En las figuras 131 y 132 se muestran las dos curvas tonales obtenidas en la medición.

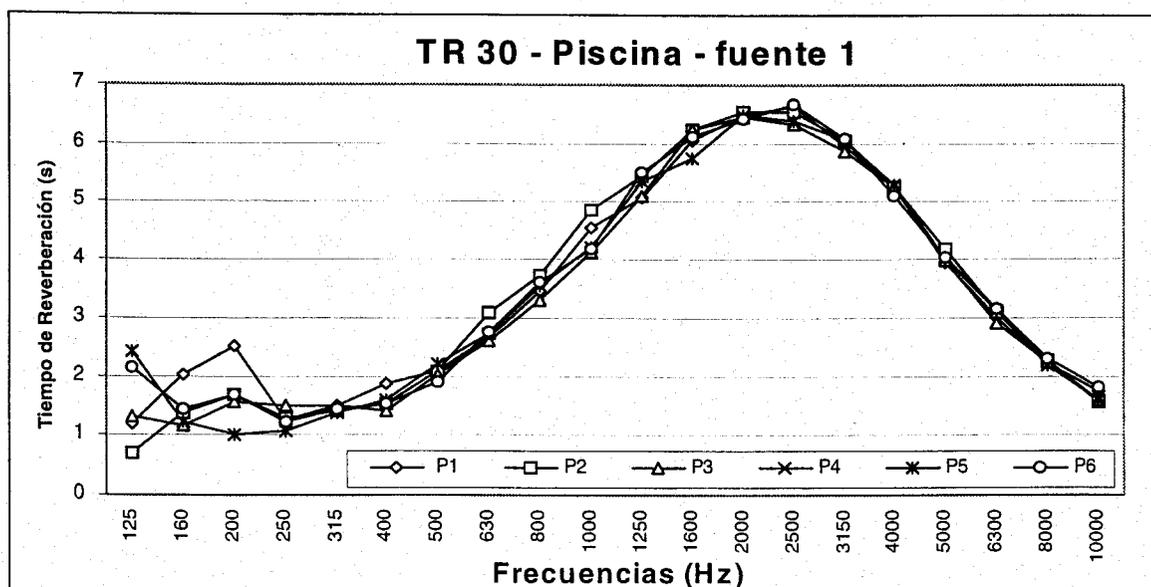


Figura 131. Curvas tonales en tercios de octava, fuente 1. Piscina San Pablo.

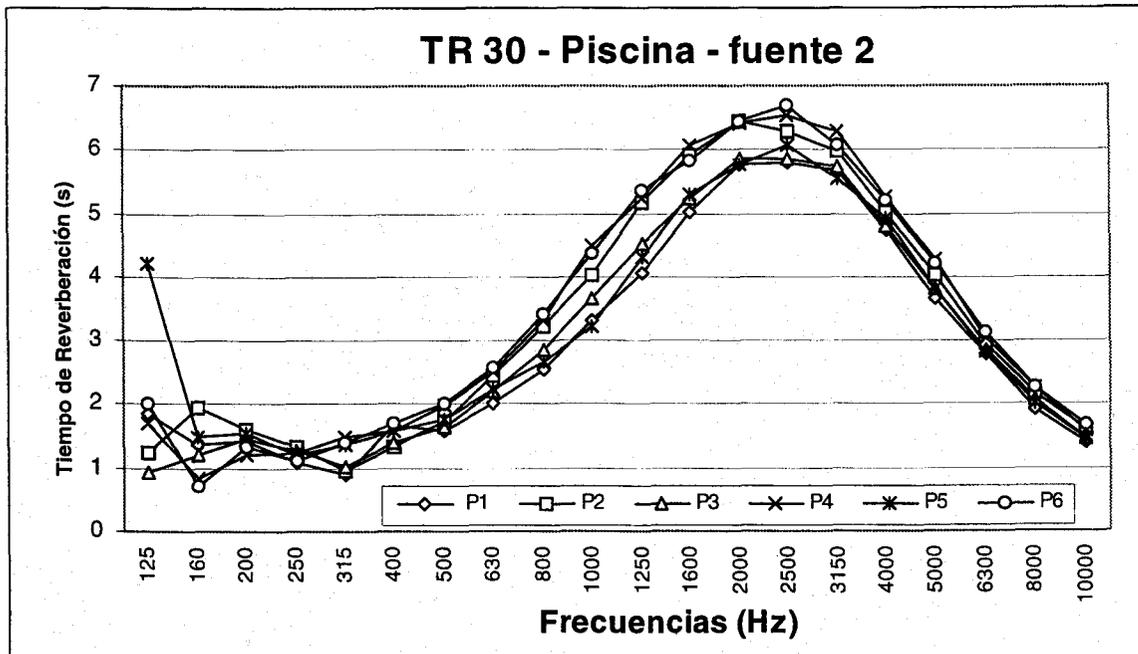


Figura 132. Curvas tonales en tercios de octava, fuente 2. Piscina San Pablo.

En la tabla 23 presentamos los valores promediados del tiempo de reverberación medido en bandas de octavas. Asimismo en esa figura se incluyen los valores óptimos para la sala, a partir de Pérez Miñana, Cremer y Beranek.

TABLA 23. Tiempos de Reverberación medidos y óptimos. Piscina.

Tiempos de reverberación Piscina (seg.) 12.000 m ³	Frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
MEDIDOS	1,60	1,20	1,94	4,15	6,40	5,17
Óptimos palabra con electro-acústica, Pérez.	1,90	1,68	1,46	1,31	1,31	1,31
Óptimos palabra, máximos, Cremer.	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3	1,2
Óptimos ópera, máximos, Cremer.	2,2	2,0	1,8	1,7	1,6	1,5
Óptimos palabra, Beranek.	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
Óptimos ópera, Beranek.	1,98	1,78	1,58	1,68	1,68	1,68
Óptimos concierto, Beranek.	2,22	2,02	1,72	1,82	1,82	1,82

En la figura 133 se comparan la curva tonal medida y las óptimas para este espacio.

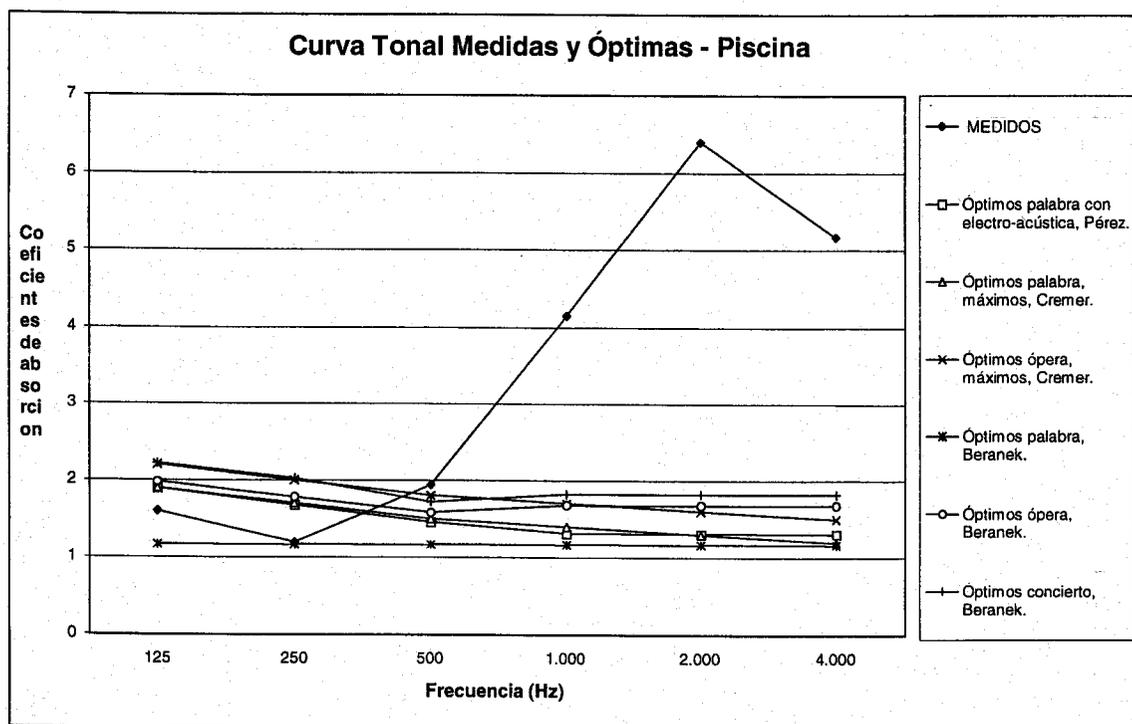


Figura 133. Curva tonal medida y óptimas en octavas. Piscina San Pablo.

Bouillart⁸⁶ nos indica que el tiempo óptimo de reverberación para las piscinas cubiertas debe situarse entre 1,5 y 2,0 segundos, en todas las frecuencias. Esos tiempos son necesarios para que haya una buena comprensión de las instrucciones de los monitores a los alumnos, en las clases de natación.

5.2.4.2. Inteligibilidad

No se ha medido *in situ*. Hemos estudiado la inteligibilidad del local en el modelo informático, en el apartado 5.2.4.2.

⁸⁶ BOUILLART, R. Introduction a l'étude acoustique des piscines couvertes. *Actas del Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, París, marzo nº 348: 1977. P. 109.

5.2.4.3. Distribución sonora

No se ha medido, debido a la dificultad de ubicar la fuente sonora sobre la superficie del agua, donde se sitúan, en la práctica, los receptores.

5.2.4.4. Ruido de fondo

No se ha medido, debido a las obras cercanas en el recinto del Polideportivo San Pablo, cuando tuvieron lugar las mediciones.

5.2.4.5. Coeficientes de Absorción

Las superficies de los distintos materiales con sus respectivos coeficientes de absorción estimados, a las distintas frecuencias de octava, así como los coeficientes de absorción calculados para la cubierta, se reflejan en la Tabla 24.

TABLA 24. Superficies y sus Coeficientes de Absorción a las Frecuencias de Octava. Piscina Polideportivo San Pablo, Sevilla.

MATERIAL	Superficie (m ²)	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Refer. Biblio.
Absorción Aire (m ³)	12.174	0,00	0,00	0,00	0,003	0,009	0,023	
Agua	1.050	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	Egan
Terraza	782	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	Egan
Rejilla	40	0,06	0,05	0,07	0,15	0,13	0,17	Egan
Panel metálico	140	0,30	0,20	0,09	0,09	0,08	0,08	Recuero
Puertas	25	0,17	0,07	0,04	0,03	0,03	0,02	COAM
Cubierta	2.505	0,45	0,62	0,39	0,15	0,05	0,01	Calculado
TOTAL	4.542							

Los resultados del cálculo para el coeficiente de absorción de la cubierta se han representado en la figura 134.

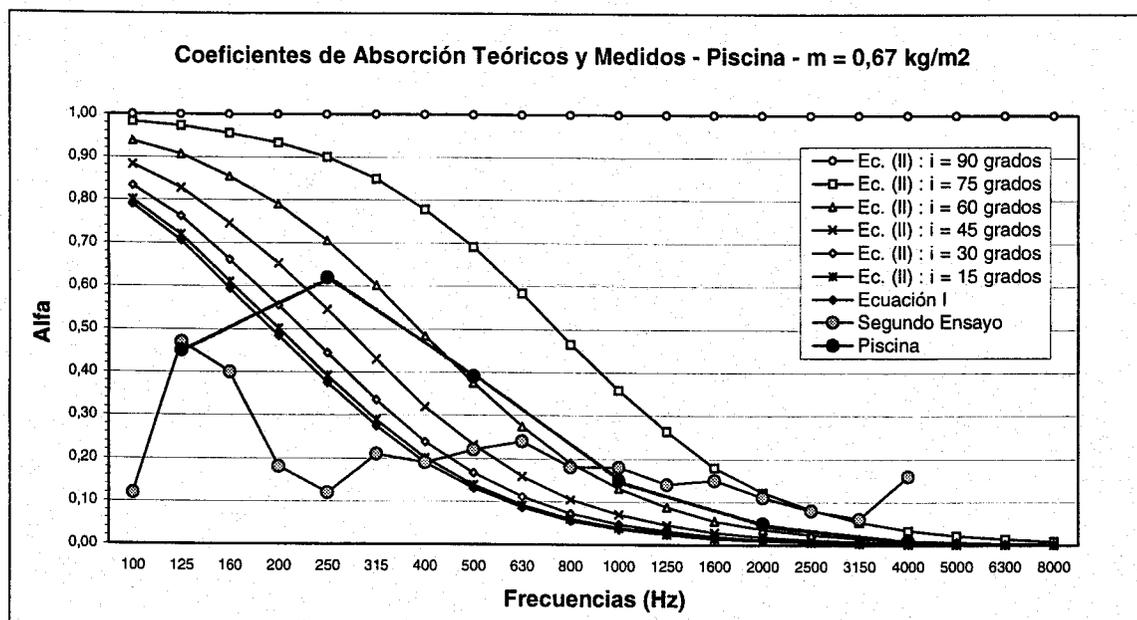


Figura 134. Coeficientes de absorción calculados para la membrana de la Piscina.

5.2.4.6. Modelo Informático

En la elaboración del modelo informático hemos utilizado los materiales y sus respectivos coeficientes de absorción presentados en la tabla 24.

5.2.4.6.1. Inteligibilidad

La tabla 25 recoge los resultados obtenidos en el modelo informático, desarrollado con el programa de simulación citado ACOUSTACADD, que nos proporciona el índice AL_{cons} . Los puntos analizados se sitúan sobre la superficie del agua, donde estarían los alumnos de natación. Se presentan las coordenadas de los puntos, los niveles de presión sonora directo, reverberado y total, así como el índice $\%AL_{\text{cons}}$ en cada uno de los puntos, para las bandas de octava determinantes de la inteligibilidad: 500 y 2000 Hz.

Tabla 25. Inteligibilidad (%AL_{cons}). Recinto vacío.

Fuente X=40, Y=0, Z=1,6 - W = 0,01w		Campo Directo (dB)	Campo Reverberado (dB)	TOTAL (dB)	%AL _{cons}
P - 1	500	74,1	72,9	76,6	7,4
19/-9/0,20	2000	74,6	78,9	80,2	24,6
P - 2	500	60,1	72,9	73,1	15,6
19/9/0,20	2000	60,1	78,9	78,9	52,9
P - 3	500	60,8	72,9	73,1	15,3
40/-9/0,20	2000	60,8	78,9	78,9	52,3
P - 4	500	57,5	72,9	73,0	16,6
40/9/0,20	2000	57,5	78,9	78,9	54,5

La observación de la última columna de la tabla muestra los elevados valores del %AL_{cons}, especialmente en la frecuencia de 2.000 Hz. Por consiguiente, la inteligibilidad de la piscina es calificada como "mala" en todos los puntos.

La normativa francesa NFS 31-047 define la distancia máxima de inteligibilidad para la voz normal y elevada, para diferentes valores del nivel perturbador, correspondiente a la media aritmética del ruido ambiente para las octavas de 500, 1.000, 2.000 y 4.000 Hz. La curva de la figura 135 nos muestra, como ejemplo, que, para voz elevada y un nivel perturbador de 50 dB, la distancia máxima de inteligibilidad (95% de inteligibilidad) es aproximadamente de 4,00 metros.

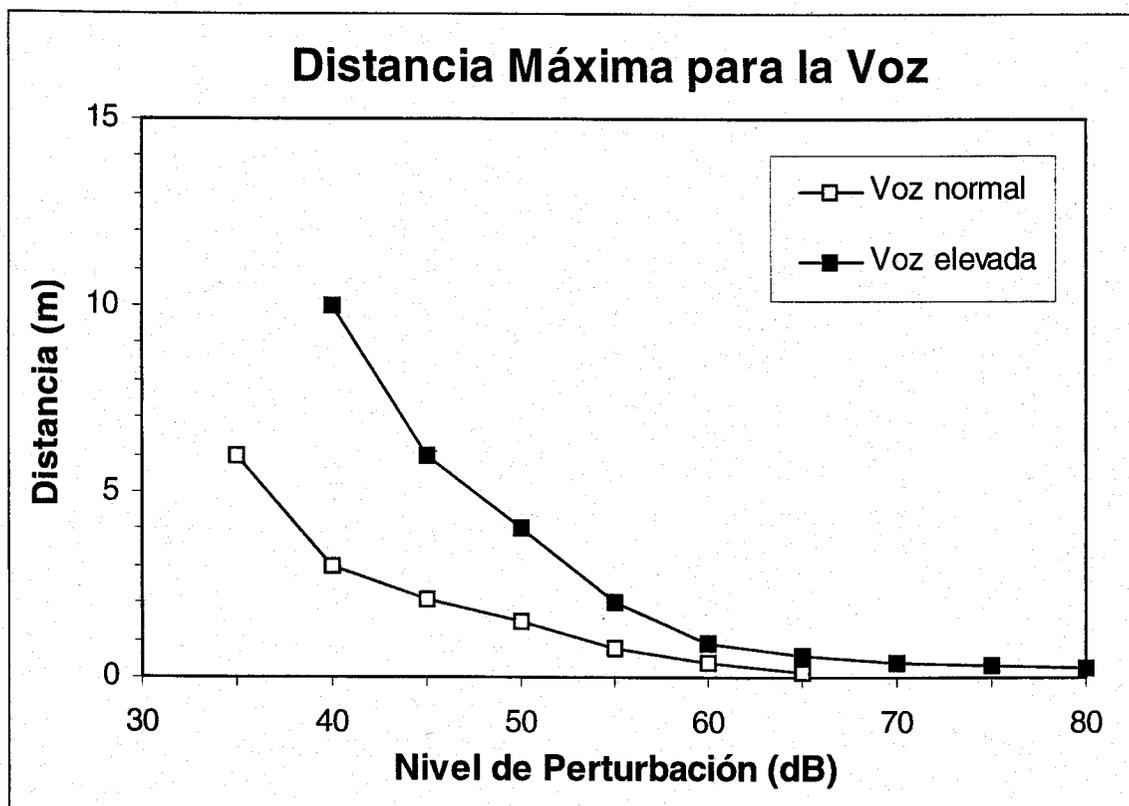


Figura 135. Curva representativa de la distancia máxima de inteligibilidad para voz normal y elevada en función del nivel perturbador de la inteligibilidad, NFS 31-047.

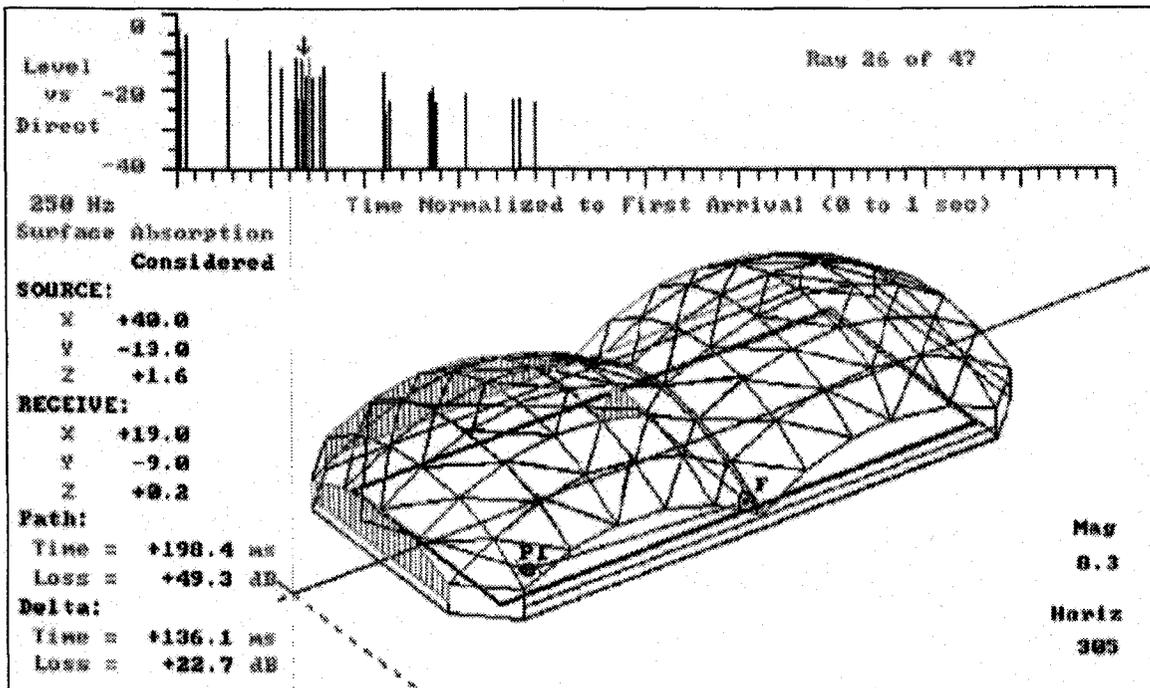
5.2.4.6.2. Acústica Geométrica:

El análisis de la acústica geométrica se ha elaborado con ayuda del modelo informático ya citado.

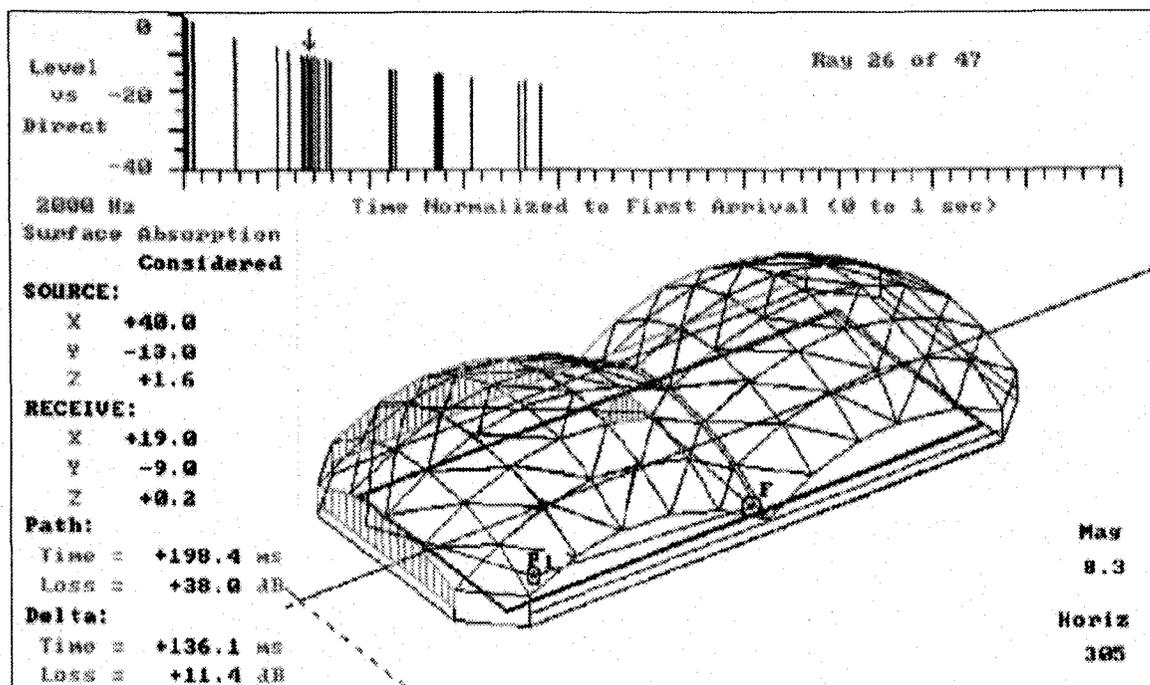
Bouillart⁸⁷ recomienda que los paramentos de edificios para abrigar piscinas deben ser lo más difusores posibles, evitar la presencia de superficies paralelas, numerosos colgaduras y adornos, y si es posible superficies convexas en lugar de formas cóncavas. A continuación presentamos las figuras con el estudio de la geometría del local, desarrollado con el programa de simulación acústica AcoustaCadd.

⁸⁷ BOUILLART, R. O. C. P. 113.

En las figuras 136 a 143 se muestran las trayectorias de los rayos directos y reflejados, para los puntos indicados en las figuras, en las frecuencias de 250 y 2.000 Hz. También se aprecia los valores de la diferencia de camino de los rayos sonoros directo y reflejado, y el ecograma con el rayo reflejado indicado.



Figuras 136. Piscina, punto 1, 250 Hz, trayectoria del rayo directo y reflejado.



Figuras 137. Piscina, punto 1, 2.000 Hz, trayectoria del rayo directo y reflejado.

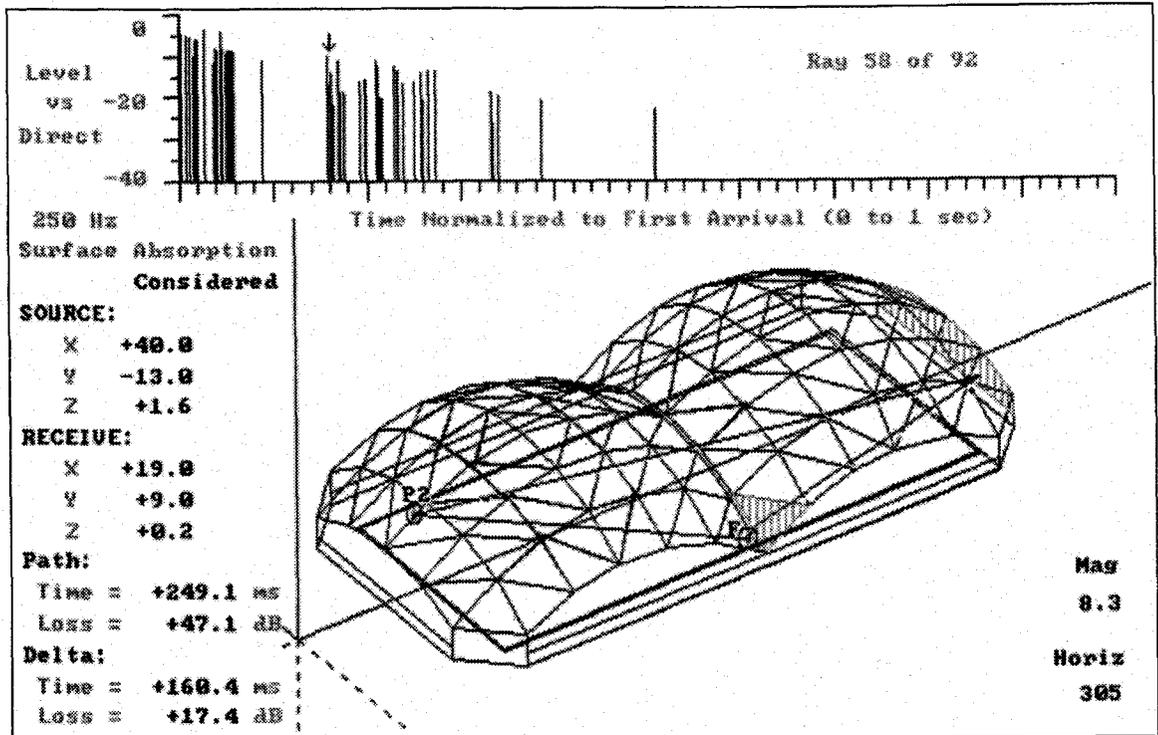
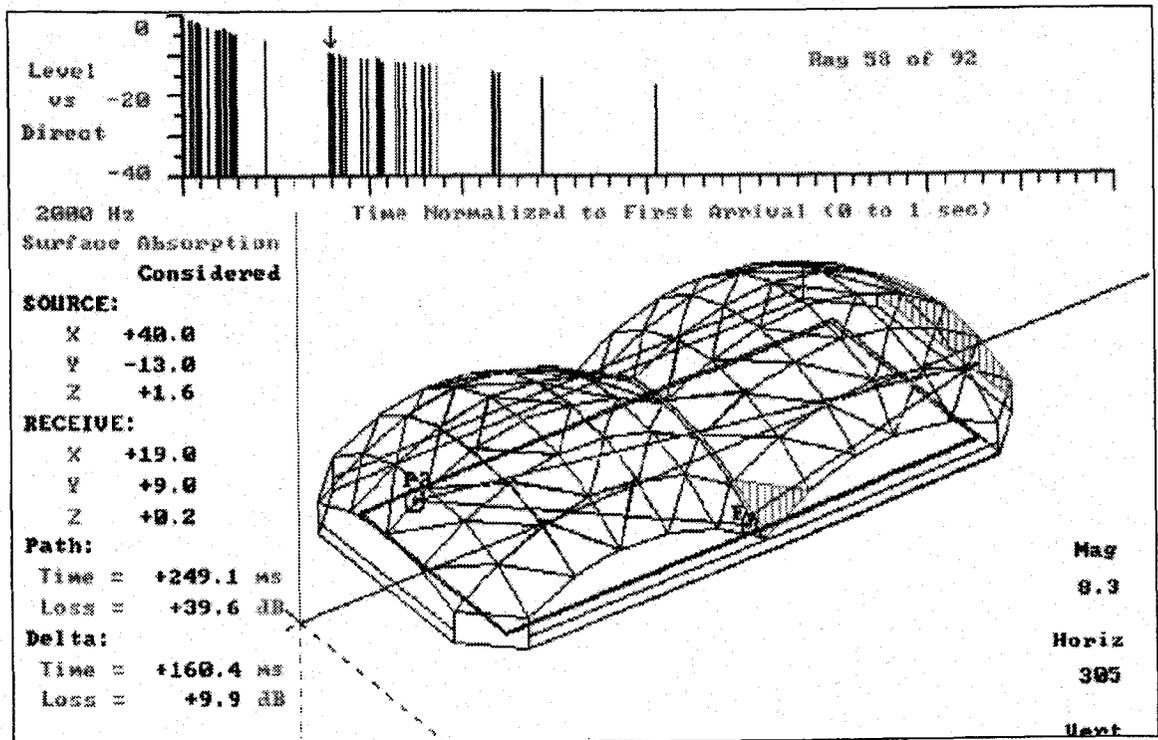
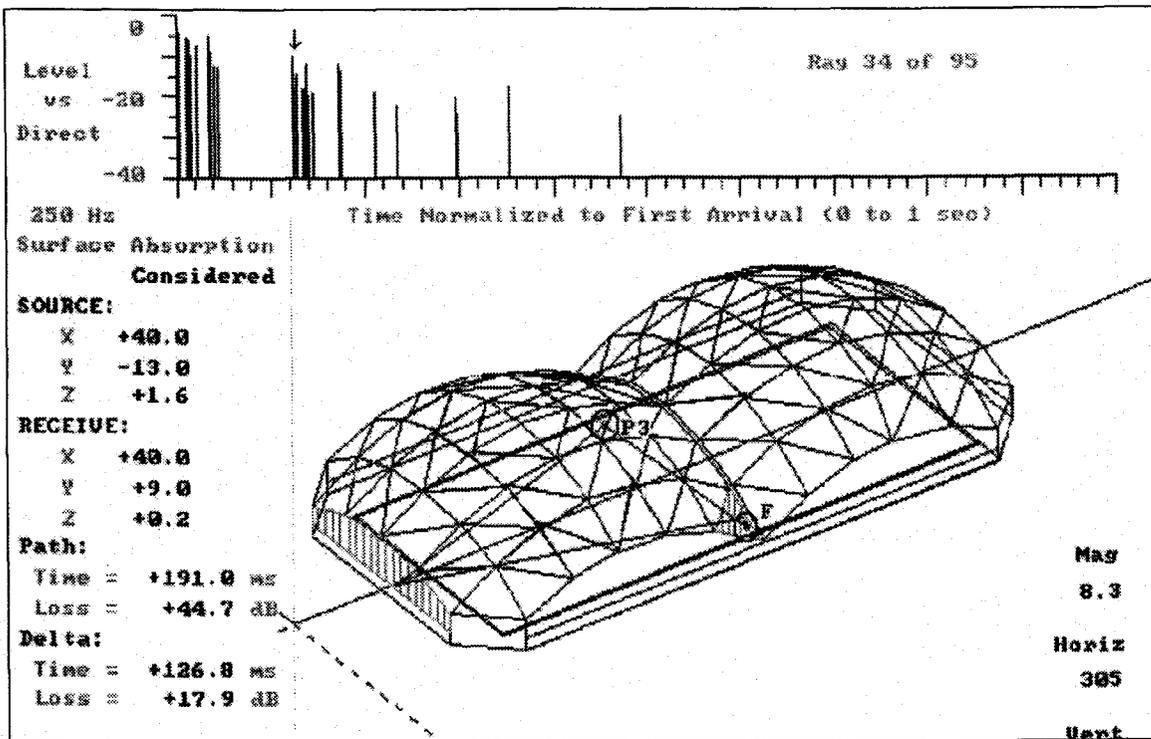


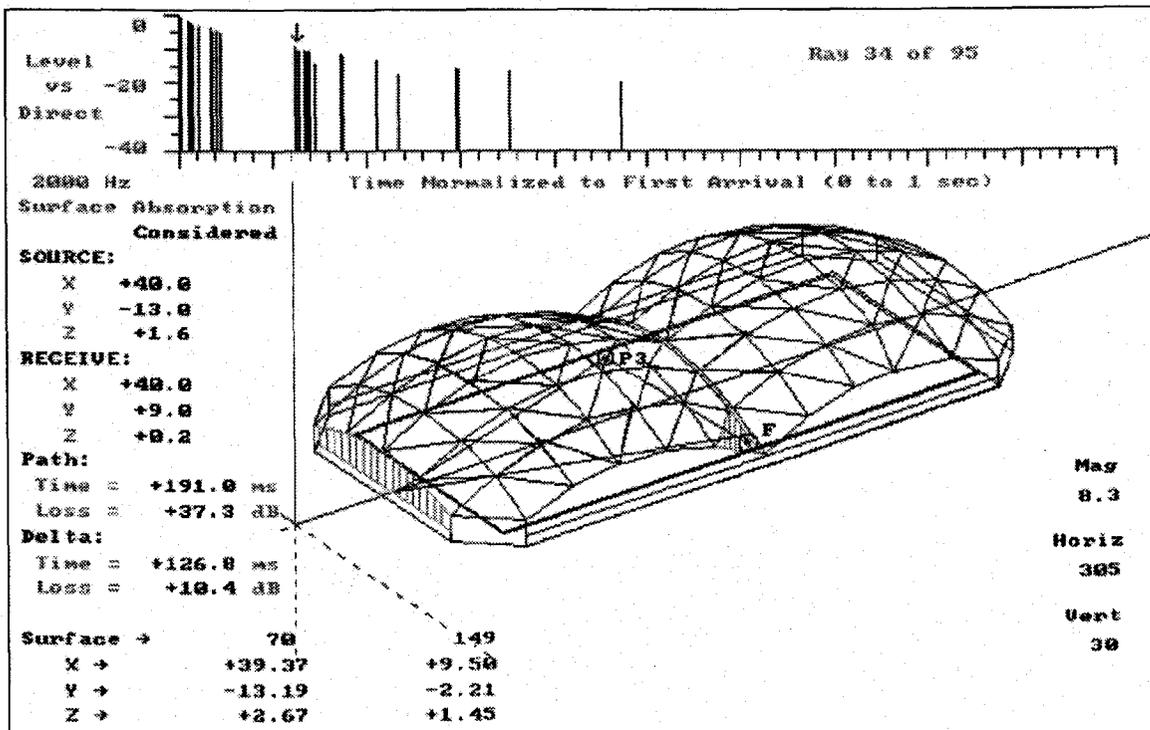
Fig 138. Piscina, punto 2, 250 Hz, trayectoria del rayo directo y reflejado.



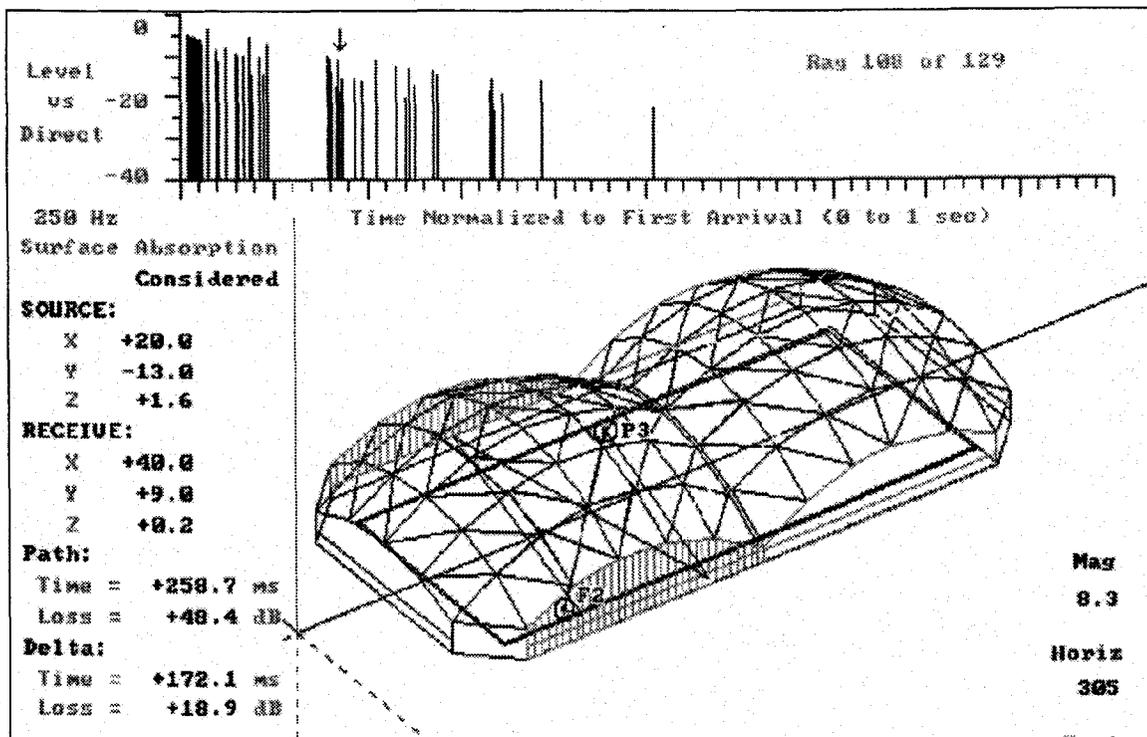
Figuras 139. Piscina, punto 2, 2.000 Hz, trayectoria del rayo directo y reflejado.



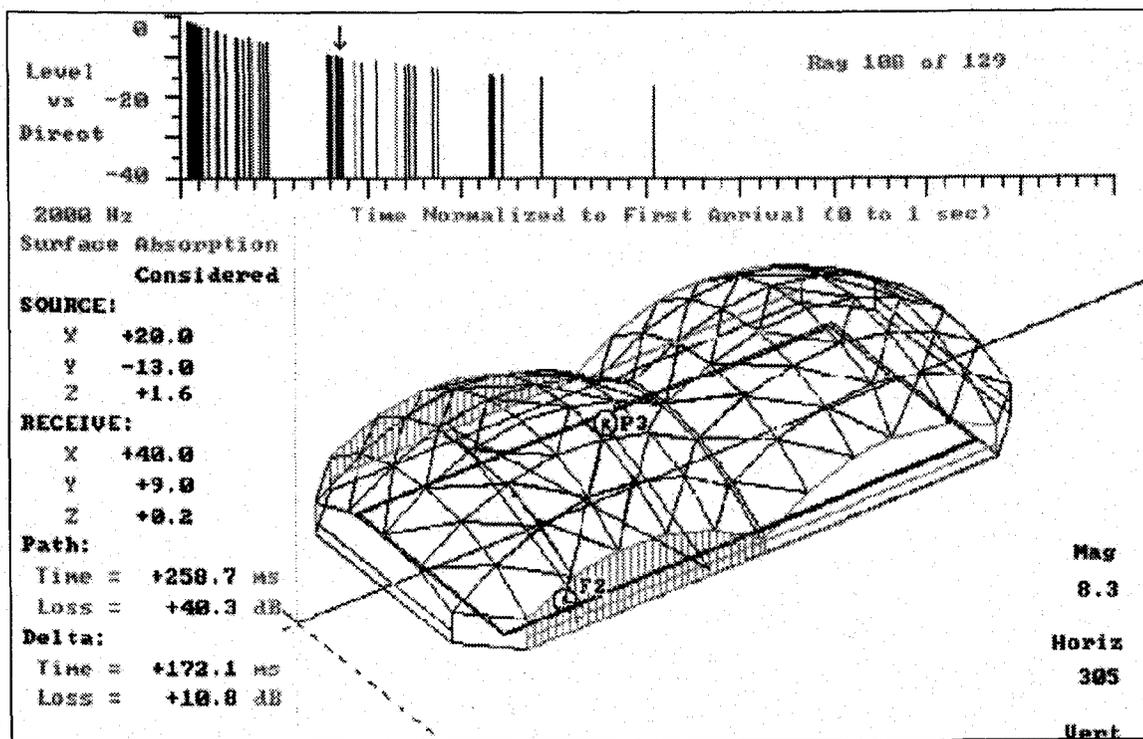
Figuras 140. Piscina, punto 3, 250 Hz, trayectoria del rayo directo y reflejado.



Figuras 141. Piscina, punto 3, 2.000 Hz, trayectoria del rayo directo y reflejado.



Figuras 142. Piscina, punto 3, 250 Hz, fuente 2, trayectoria del rayo directo y reflejado.



Figuras 143. Piscina, punto 3, 2.000 Hz, fuente 2, trayectoria del rayo directo y reflejado.

5.2.5. Auditorio Araujo Vianna, Porto Alegre.

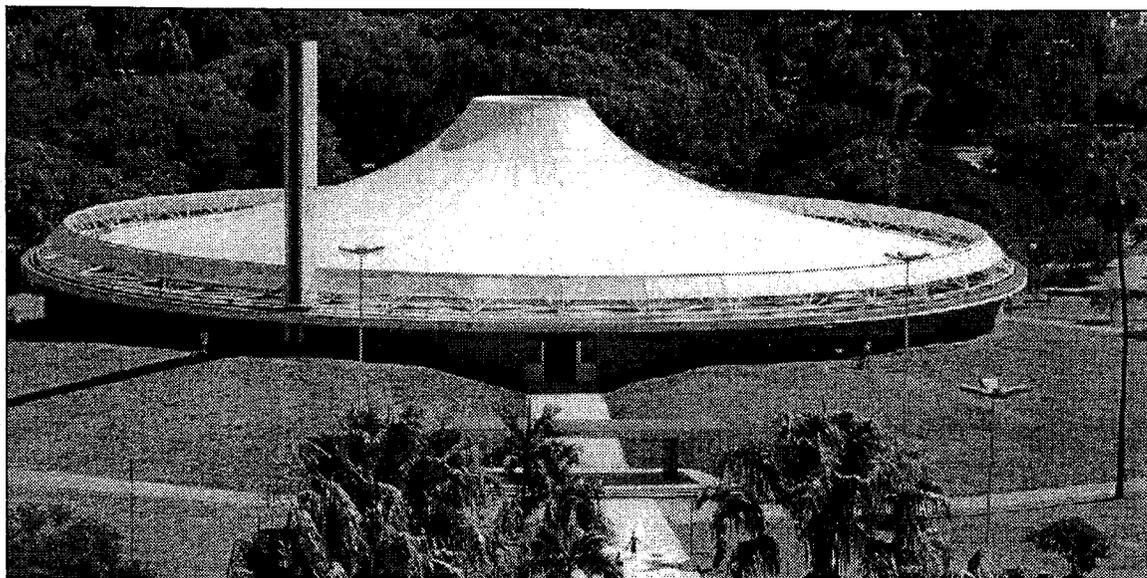
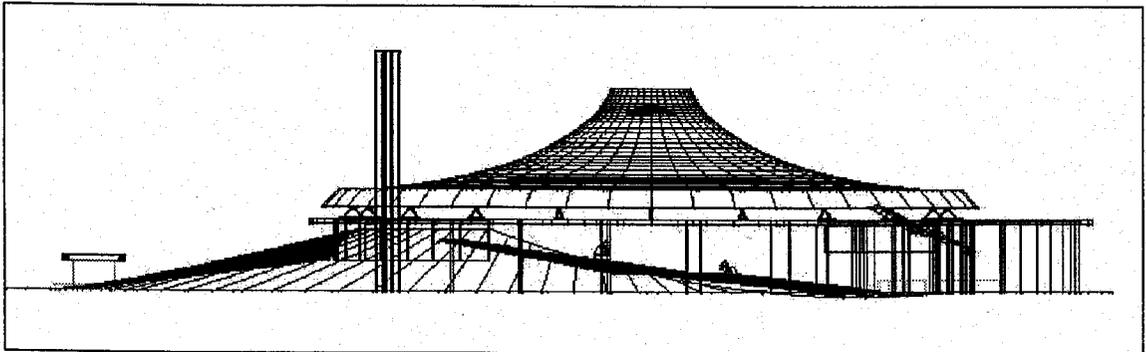


Figura 144. Auditorio Araujo Vianna. Porto Alegre, Brasil.

El Auditorio Araujo Vianna⁸⁸ fue inaugurado en 1964, 19 días antes del golpe militar. Es uno de los primeros equipamientos culturales públicos que se instaló a más de 1 kilómetro de la Plaza de la Matriz, el centro histórico de la ciudad. Inicialmente tenía capacidad para 4500 personas, a cielo abierto, con una concha acústica de 22 metros de boca y foso de orquesta para 60 músicos, además de oficinas y salas de ensayo. El proyecto de los Profesores Arquitectos Carlos Maximiliano Fayet y Moacyr Moojen Marques, ofrecía a la audiencia solamente el techo de las estrellas: espacio abierto y libre para el encuentro del pueblo con la cultura. Pero para los militares el diseño del auditorio visto desde lo alto – un semicírculo cortado simétricamente por dos segmentos de recta – era asociado a un icono del comunismo. El Profesor Fayet fue brutalmente expulsado de la Facultad de Arquitectura de la

Universidad Federal después del golpe y en su ficha constaba el “crimen” del diseño del Auditorio⁸⁹.

En su labor los Arquitectos han sido asesorados por los técnicos en acústica Roberto P. Richter y Fernando Haidar de la casa Eucatex. El Auditorio, “bien proyectado y construido”, fue incluido como ejemplo de buena acústica en espacios abiertos por el Profesor Ingeniero Pérides Silva, de la Escuela de Arquitectura de la Universidad Federal de Minas Gerais⁹⁰.



Figuras 145. Alzado lateral. Auditorio Araujo Vianna.

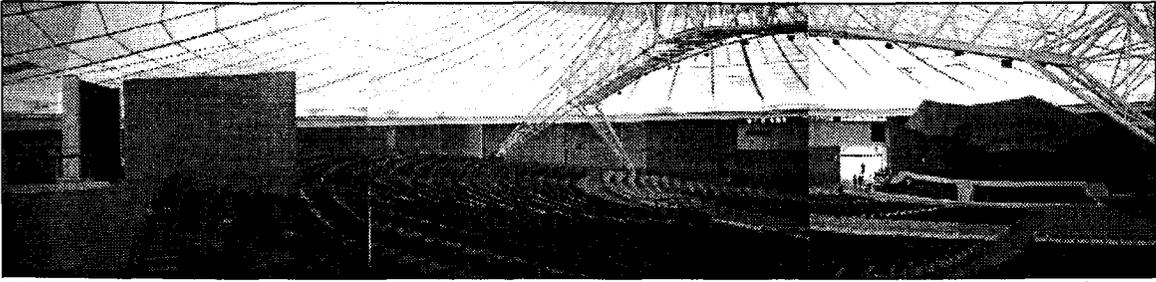
Los planos disponibles, en formato reducido, se encuentran en el anexo 1.

El bautismo del Auditorio fue un homenaje al primer compositor gaucho reconocido fuera del Estado (Rio Grande do Sul). José de Araujo Vianna (1871 – 1916) destacó en la escena musical brasileña a finales del siglo pasado, con las óperas “*Carmela*” y “*O Rei Galaor*”, entre otros trabajos artísticos.

⁸⁸ *Revista Viva no Sul*. Araujo Vianna, música no parque. Porto Alegre, Brasil: VE Editores, No. 16, febrero, 2.000. P. 5.

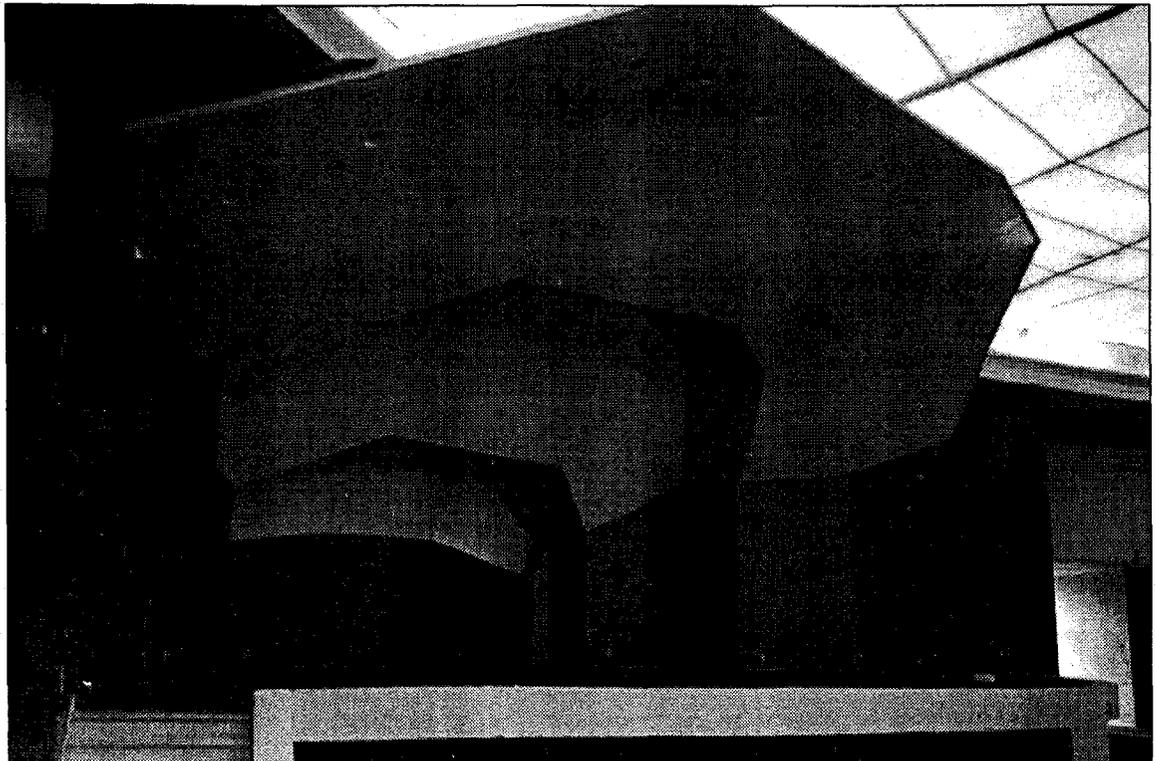
⁸⁹ *Periódico JÁ*. Porto Alegre, no. 240, 31 de enero, 1999. P. 2.

⁹⁰ SILVA, P. *Acústica Arquitetônica e condicionamento de ar*. Lisboa: EDTAL, 3^a ed. 1997. P. 82.



Figuras 146. Vista interior. Auditorio Araujo Vianna.

Localizado en el céntrico Parque Farroupilha, en Porto Alegre, Brasil, presenció la evolución de la música del sur de Brasil. Inicialmente pensado para ser la sede de la Coral y Banda Municipal, en poco tiempo pasó a abrigar las más diversas manifestaciones artísticas. En los años 70 se caracterizó como un espacio para presentación de espectáculos de la buena música popular brasileña. La incertidumbre de la intemperie, y el consecuente aplazamiento o cancelación de los conciertos, hizo que se formase una corriente popular favorable a cubrir el Auditorio.



Figuras 147. Concha Acústica. Auditorio Araujo Vianna.

El 4 de octubre del año 1996 el Auditorio fue re-inaugurado después de pasar por una rehabilitación, substituyendo los viejos bancos de madera por 3.050 butacas metálicas numeradas, mejoras generales en la escena, iluminación, servicios, red hidráulica y la nueva cubierta, una estructura textil en PVC/Poliéster.



Figuras 148. Pórtico de sustentación de cubierta. Auditorio Araujo Vianna.

Tabla 26. Características técnicas de la membrana Sansuy. Auditorio Araujo Vianna.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:	
MEMBRANA SANSUY MP 1400 S 77 Vinilona	
Fabricante	Sansuy S.A. Industria de Plásticos – Brasil
Peso	927gr/m ² .
Espesor	0,8 mm
Color	Blanco
Elongamiento en ruptura long/trans.	20 % (DIN 53.354)
Resistencia al rasgado	60 Kgf (DIN 53.363)
Tensión ruptura long/trans.	270 Kgf / 5 cm (DIN 53.354)

La nueva cubierta, de unos 4.000 m², anunciada como la mayor cubierta textil de la América Latina, tiene la forma de un gran circo y se compone de un anillo de compresión en cercha metálica, apoyado sobre la losa de la marquesina y fijado al suelo por tirantes metálicos, figura 149. La parte alta del cono, figura 5, está sustentada por un pórtico metálico de cuatro patas, para no ofrecer ningún obstáculo a la visibilidad de la escena. Este pórtico también sirve como soporte a la iluminación del graderío y escena.



Figuras 149. Anillo de compresión. Auditorio Araujo Vianna.

Pero la acústica, que era buena, pasó a ser decepcionante, con muchas reclamaciones en la prensa local. El optimismo de la inauguración festiva, con la presencia de João Gilberto, dio paso al abandono y insatisfacción, debido a la acústica del recinto, por parte de las productoras de eventos. La portada del cuaderno de artes de un periódico local⁹¹ refleja el ánimo de los profesionales:

“El escenario está vacío. Problemas de acústica están espantando los espectáculos del Araujo Vianna”.

Algunas reclamaciones recogidas en la prensa local⁹²:

“...la acústica es problemática. Después que hicieran la cubierta... El local no ha sido concebido para albergar grandes equipos electro-acústicos”. L.P.F. Productor.

“...no se puede comparar con lo que era antes. Quedó peor”. M.B. Músico y productor.

“Ni el mejor técnico de sonido consigue compensar la reverberación...” A.M. Productor.

Con relación a la inteligibilidad reproducimos la observación del crítico musical Dirceu Alves Jr⁹³:

“Djavan llevó más de 3 mil personas al Auditorio Araujo Vianna... El público sabía las letras de las canciones de memoria (lo que ha

⁹¹ Periódico Zero Hora. Porto Alegre: 27 de mayo, 2º cuad, 1997. P. 1.

⁹² Periódico Zero Hora. Porto Alegre: 13 de diciembre, 1997. P. 36.

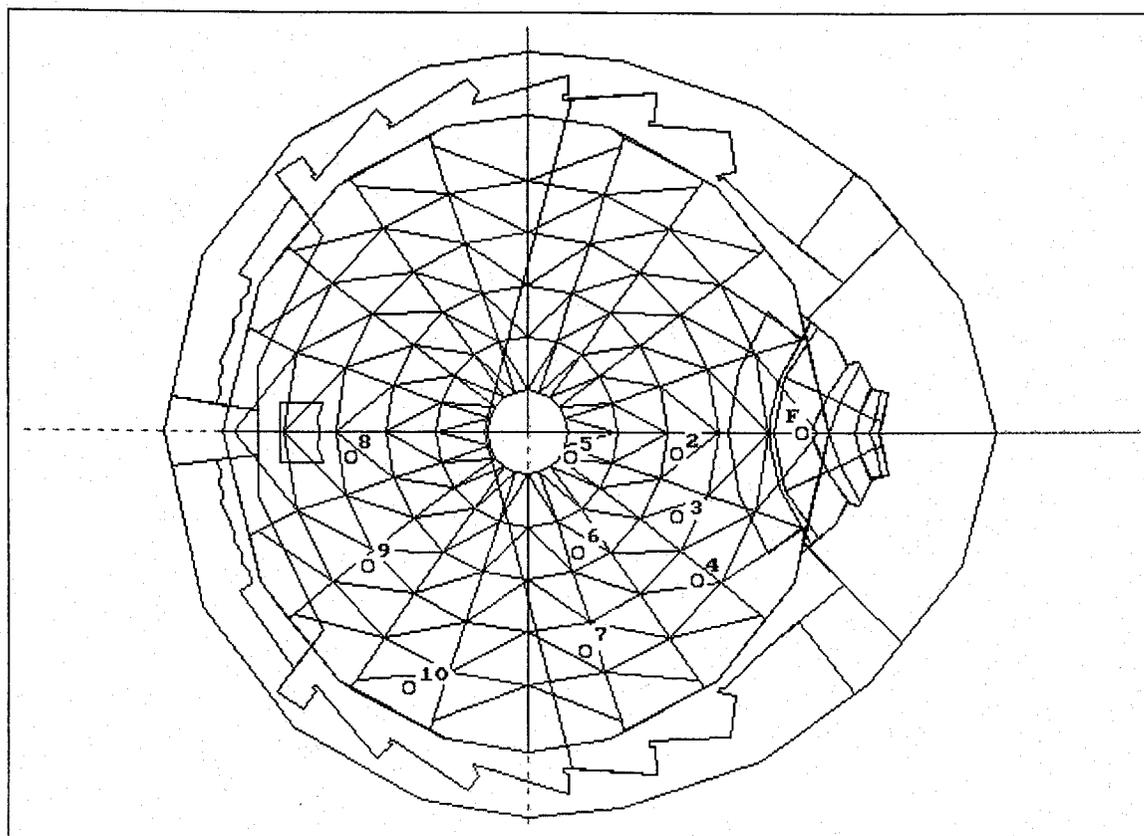
⁹³ Periódico Zero Hora. Porto Alegre: 23 de noviembre, 2º cuad. 1999. P. 4.

ayudado a disfrazar algunos de los eternos problemas de acústica del Araujo) y salió satisfecho.”

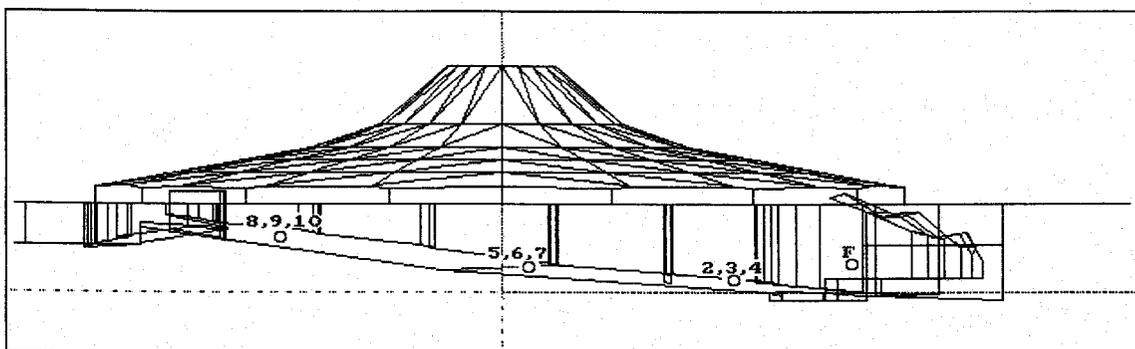
Queda claro, por todo lo expuesto con anterioridad, que las malas condiciones acústicas que presenta el auditorio, después de ejecutada la rehabilitación se debe, en gran parte, a la cubierta textil.

5.2.5.1. Reverberación

Para analizar las condiciones acústicas del Auditorio hicimos primero una serie de medidas del tiempo de reverberación, con la fuente ubicada en la escena y varios puntos repartidos por la audiencia, como muestran las figuras 150 y 151, imágenes hechas del modelo tridimensional desarrollado con el programa de simulación acústica *AcoustaCadd*.



Figuras 150. Esquema en planta y puntos de medida. Auditorio Araujo Vianna



Figuras 151. Esquema en sección y puntos de medida. Auditorio A. Vianna.

En la figura 152 aparecen las curvas tonales medidas en bandas de octava, con los tiempos de reverberación promedio de los nueve puntos indicados en la figura 150.

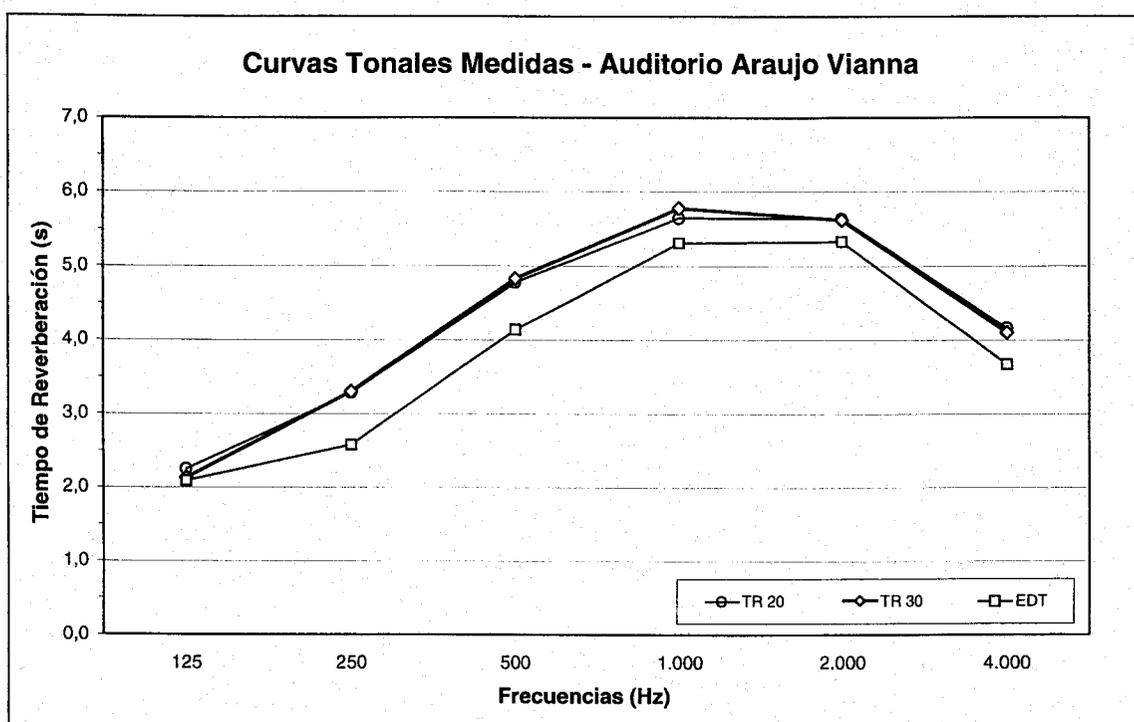


Figura 152. Tiempos de reverberación medidos, T_{20} , T_{30} y EDT, en octavas. Auditorio A.V.

En las figuras 153, 154 y 155 se muestran los tiempos de reverberación medidos T_{20} , T_{30} y EDT, de los puntos indicados en la figura 150.

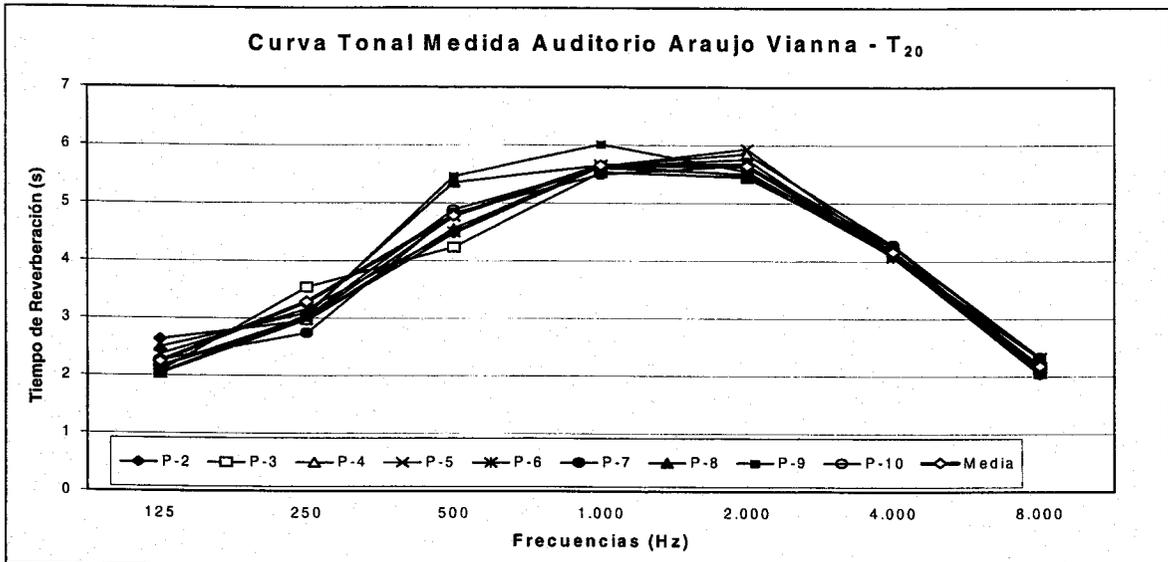


Figura 153. Tiempos de reverberación medidos, T_{20} en octavas. Auditorio A.V.

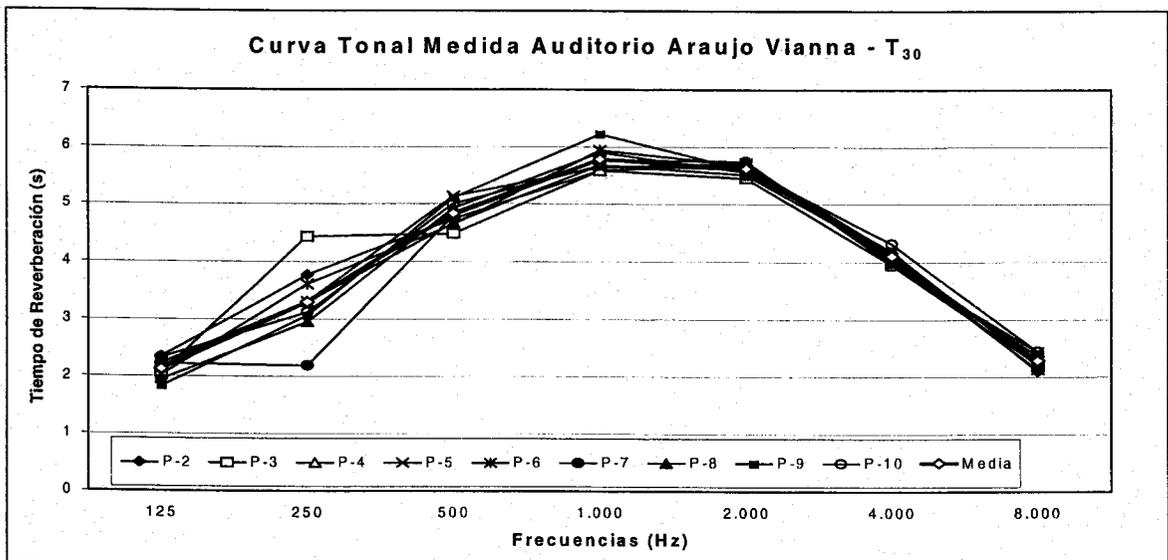


Figura 154. Tiempos de reverberación medidos, T_{30} en octavas. Auditorio A.V.

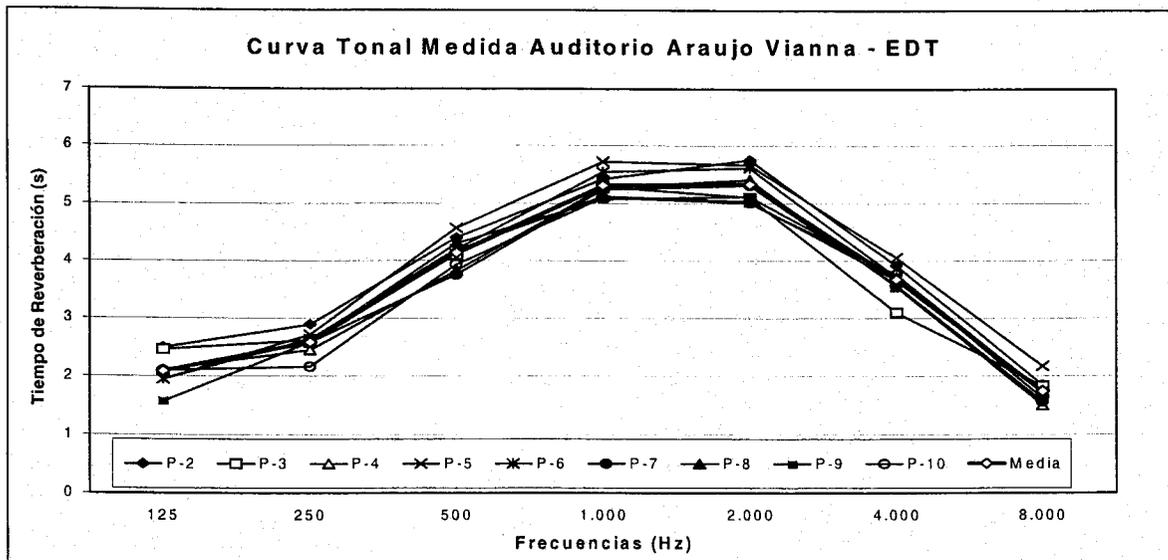


Figura 155. Tiempos de reverberación medidos, EDT, en octavas. Auditorio A.V.

En la tabla 27 y figura 156 se comparan los tiempos de reverberación medidos con los óptimos, calculados a partir de las propuestas de Pérez Miñana⁹⁴, Cremer⁹⁵ y Beranek⁹⁶.

Tabla 27. Tiempos de reverberación medidos y óptimos. Auditorio A.V.

Tiempos de reverberación Auditorio Araujo Vianna – 27.600 m ³	Frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Óptimos palabra con electro-acústica, Pérez.	2,49	2,20	1,92	1,72	1,72	1,72
Óptimos palabra, Pérez.	2,87	2,54	2,21	1,99	1,99	1,99
Óptimos música, Pérez.	3,45	3,05	2,65	2,39	2,39	2,39
Óptimos palabra máximos, Cremer.	2,1	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4
Óptimos ópera máximos, Cremer.	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
Óptimos palabra, Beranek.	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Óptimos ópera, Beranek.	2,3	2,1	1,8	1,9	1,9	1,9
Óptimos concierto, Beranek.	2,47	2,27	1,97	2,07	2,07	2,07
T _{R20} medidos	2,25	3,28	4,78	5,65	5,64	4,16
T _{R30} medidos	2,13	3,30	4,83	5,78	5,62	4,10
EDT medidos	2,09	2,58	4,14	5,31	5,33	3,67

⁹⁴ PÉREZ M., J., O. C., P 239.

⁹⁵ CREMER, L. O. C., P 610.

⁹⁶ BERANEK, L. O.C., P 425.

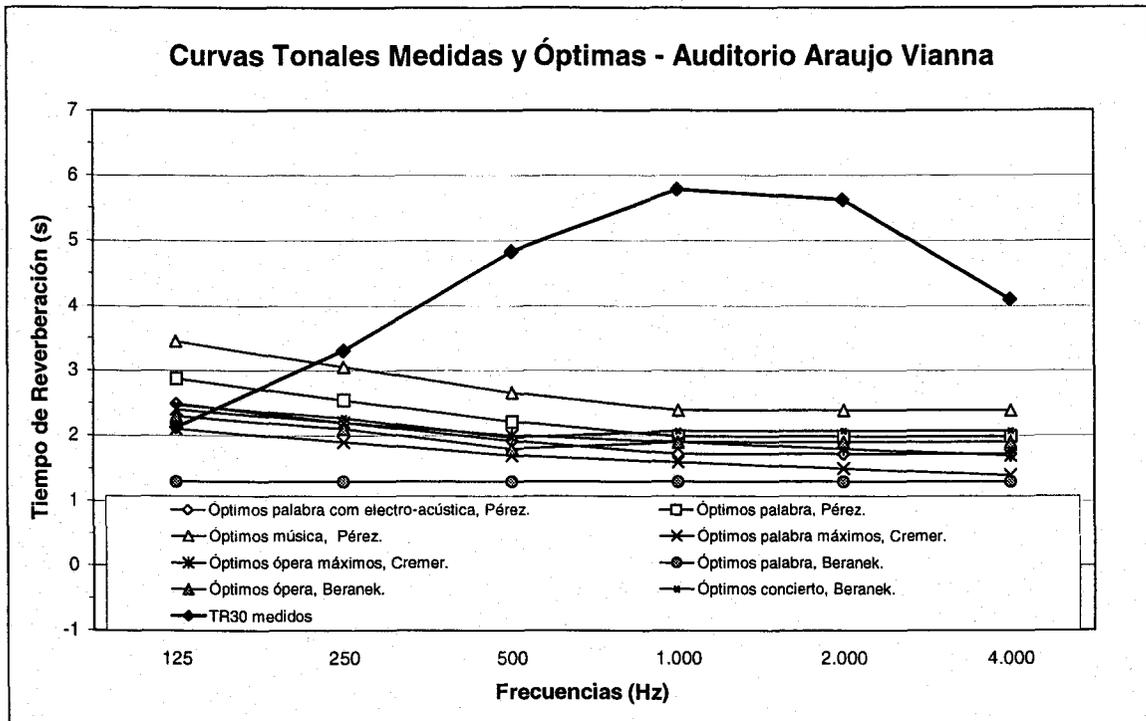


Figura 156. Curva tonal medida y óptimas. Auditorio Araujo Vianna.

5.2.5.2. Inteligibilidad

No se ha medido la inteligibilidad en el Auditorio, debido a que no disponíamos del equipo necesario. El análisis de la inteligibilidad se ha producido en el modelo informático.

5.2.5.3. Distribución sonora

No se ha medido.

5.2.5.4. Ruido de fondo

Presentamos en la tabla 28 el resultado de las mediciones del nivel de ruido de fondo, efectuadas en diversos horarios, dentro del Auditorio, en bandas de octava, dB(A) y la correspondiente curva NC alcanzada. En la figura 157 se comparan los valores de la medición con las curvas NC (*Noise Criteria*).

Por la comparación de las mediciones hechas a las 18:31h con lluvia y a las 18:53h y 18:58 sin lluvia, se constata una gran variación en el

nivel de ruido provocado por la lluvia fuerte que caía en el momento de la medición, 57 dB(A) o NC-47, especialmente en las bajas frecuencias.

El ruido del tráfico es muy intenso en la Avenida Oswaldo Aranha, donde se localiza el Auditorio, distando de ella aproximadamente 100 m. En las mediciones realizadas en diversas horas del día, registramos valores de 55 dB(A) o NC-44, al final de la tarde, debido a la "transparencia" del material de ser a los sonidos graves. En horas más avanzadas, cerca de la media noche, el ruido disminuye a 50 dB(A) o NC-40, bajando a 48 dB(A) o NC-36, a la 1h30m.

Según Recuero⁹⁷, el nivel medio de ruido aceptable para una sala de espectáculos sería de 35 dB(A), o NC-25.

Una segunda capa en la cubierta mejoraría las condiciones de ruido de fondo, aumentando el aislamiento.

Tabla 28. Ruido de fondo en octavas, dB(A) y curvas NC. Auditorio A.V.

Ruido de Fondo – Auditorio Araujo Vianna								
Frecuencia	18:31h (lluvia)	18:53h	18:58 h	23:35h	23:37h	23:39h	1:25h	1:29h
125 Hz	61,6	58,9	57,7	54,0	52,6	50,0	52,8	56,5
250 Hz	53,3	51,2	50,7	54,4	49,5	44,8	45,8	49,4
500 Hz	49,2	48,1	46,5	49,4	44,2	41,5	39,8	42,3
1 kHz	45,0	43,6	42,8	42,3	44,5	40,2	35,5	37,1
2 kHz	39,6	39,5	35,4	33,0	36,2	31,5	29,5	30,3
4 kHz	34,9	33,2	28,2	27,2	27,7	25,9	26,4	26,7
8 kHz	30,7	28,9	28,0	28,0	27,8	27,8	28,0	28,1
d B (A)	57	55,1	54,1	54,1	53,1	49,6	48,6	51,5
N C	47	44	42	46	44	40	36	40

⁹⁷ Recuero, M. y GIL, C. *Acústica Arquitectónica*. Madrid: Paraninfo, 1992. P 441.

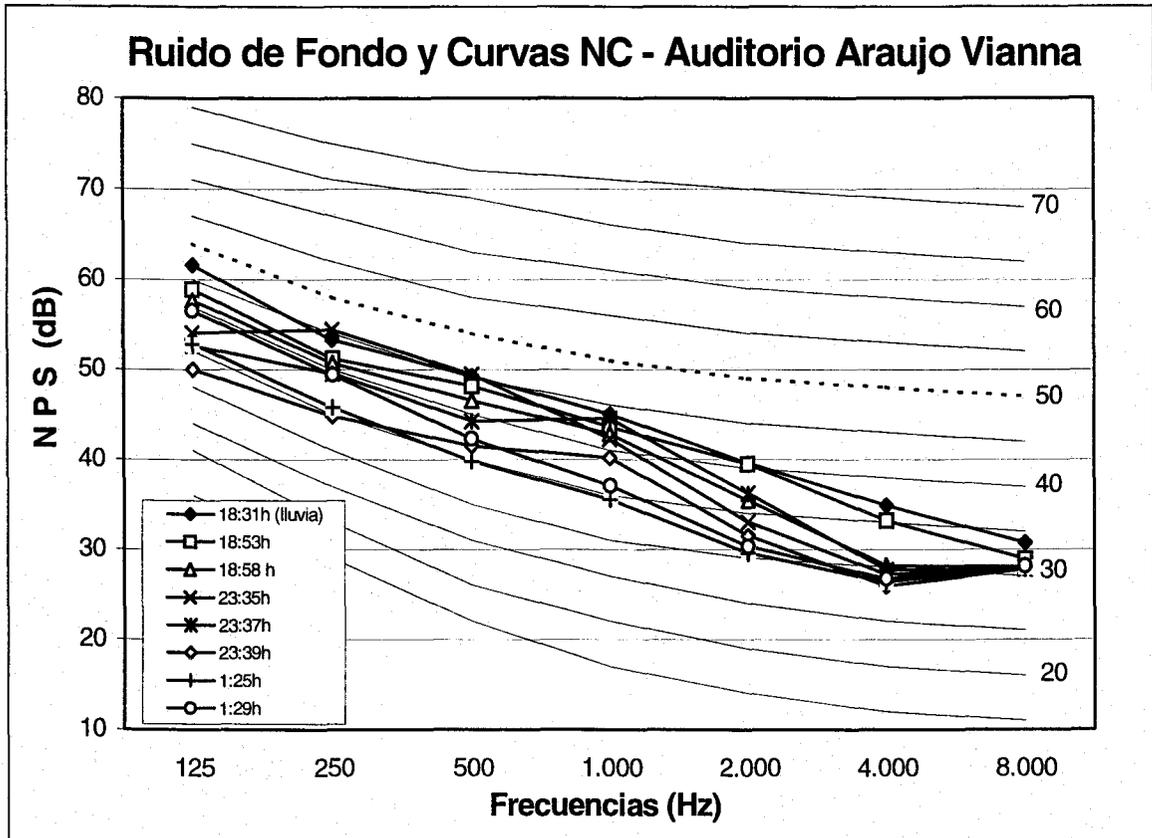


Figura 157. Ruido de fondo en octavas y curvas NC. Auditorio Araujo Vianna.

5.2.5.5. Coeficientes de Absorción:

Las superficies de los distintos materiales con sus respectivos coeficientes de absorción estimados, a las distintas frecuencias de octava, así como los coeficientes de absorción calculados para la cubierta, se reflejan en la Tabla 29.

Tabla 29. Materiales y sus coeficientes de Absorción, en octavas. Auditorio Araujo Vianna.

Material	Superf. (m ²)	Coeficiente de Absorción						Referencia
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
Absorción del Aire (m ³)	27.600					0,001	0,007	Pérez Miñana
Superficie Virtual (portones)	214	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Sillas Metálicas	2.910	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,08	Recuero

Escena, tarima de madera	160	0,09	0,09	0,08	0,09	0,10	0,07	Pérez Miñana
Hormigón Pintado (concha acústica, marquesina)	1.043	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	Knudsen
Ladrillo enlucido	202	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	Egan
Ladrillo cara vista	1.139	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	Egan
Falso techo escayola (accesos)	106	0,20	0,15	0,10	0,05	0,05	0,05	Recuero
Cerramiento Superior (ventilación)	50	0,50	0,50	0,40	0,35	0,30	0,25	Pérez Miñana
Membrana (cobertura)	3.126	0,52	0,39	0,15	0,08	0,06	0,09	calculado
Total	8.950							

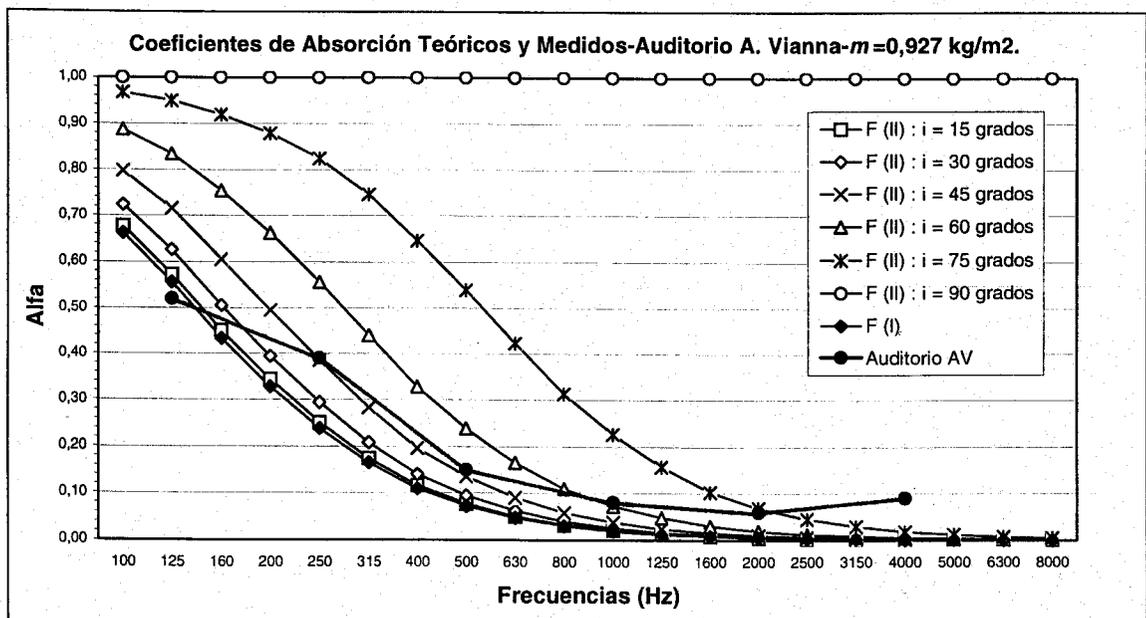


Figura158. Coeficientes de absorción de la cubierta. Auditorio Araujo Vianna.

5.2.5.6. Modelo Informático

Para estudiar las condiciones acústicas del auditorio hemos desarrollado un modelo informático en el programa de simulación ya mencionado, *Acoustacadd*.

5.2.5.6.1. Inteligibilidad

El estudio teórico de la inteligibilidad se ha desarrollado con ayuda del modelo informático, construido con los datos de la tabla 29 y obtenido a partir del algoritmo $\%AL_{\text{cons}}$ ⁹⁸, porcentaje de Pérdida de Articulación de Consonantes, que está implementado en el programa ACOUSTACADD, ya citado con anterioridad.

El índice $\%AL_{\text{cons}}$ en todos los puntos analizados alcanza un valor entre **23** y **48**, para el auditorio vacío, y entre **18** y **29** para el auditorio con 2/3 de ocupación, lo que revela que la inteligibilidad de la sala es “*mala*”.

Presentamos en la tabla 30 los valores obtenidos en la simulación con el auditorio vacío, y en la tabla 31, los valores obtenidos de la simulación del auditorio ocupado en 2/3 de su aforo (2.000 personas, aproximadamente).

Tabla 30. Índice $\%AL_{\text{cons}}$. Auditorio Vacío. Auditorio Araujo Vianna.

Punto	Coordenadas			Frecuencias (Hz)	Directo (dB)	Reverberado (dB)	Total (dB)	$\%AL_{\text{cons}}$
	X	Y	Z					
1 Fuente	27	0	2,8	500	67,5	73,9	74,8	23,2
2	16	-2,6	1,62	2000	67,5	74,8	75,6	29,3
3	17	-7,6	1,71	500	66,1	73,9	74,5	25,8
				2000	66,1	74,8	75,4	32,4
4	19,5	-12,6	1,68	500	64,2	73,9	74,3	29,1
				2000	64,2	74,8	75,2	36,5

⁹⁸ CARRIÓN, A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 1998. P. 67.

5	0	-2,6	2,68	500	59,0	73,9	74,0	36,3
				2000	59,0	74,8	75,0	44,7
6	2,2	-13,8	3,06	500	58,5	73,9	74,0	36,8
				2000	58,5	74,8	74,9	45,3
7	5,6	-22,4	3,08	500	57,6	73,9	74,0	37,6
				2000	57,6	74,8	74,9	46,1
8	-17	-3,3	5,35	500	54,5	73,9	73,9	39,5
				2000	54,5	74,8	74,9	48,2
9	-15	-14,7	5,67	500	54,4	73,9	73,9	39,6
				2000	54,4	74,8	74,9	48,2
10	-11,6	-24	5,65	500	54,1	73,9	73,9	39,7
				2000	54,1	74,8	74,9	48,4

Tabla 31. Índice %AL_{cons.} 2/3 de ocupación. Auditorio Araujo Vianna.

Punto	Coordenadas			Frecuencia (Hz)	Directo (dB)	Reverberado (dB)	Total (dB)	%AL _{cons.}
	X	Y	Z					
1 Fuente	27	0	2,8	500	65,9	71,5	72,6	15,4
				2000	65,9	72,2	73,1	18,0
3	17	-7,6	1,71	500	65,0	71,5	72,4	16,4
				2000	65,0	72,2	73,0	19,2
4	19,5	-12,6	1,68	500	63,6	71,5	72,2	17,8
				2000	63,6	72,2	72,8	20,8
5	0	-2,6	2,68	500	58,3	71,5	71,7	22,6
				2000	58,3	72,2	72,4	26,2
6	2,2	-13,8	3,06	500	57,9	71,5	71,7	22,9
				2000	57,9	72,2	72,4	26,5
7	5,6	-22,4	3,08	500	57,2	71,5	71,7	23,3
				2000	57,2	72,2	72,4	27,0
8	-17	-3,3	5,35	500	54,1	71,5	71,5	24,8
				2000	54,1	72,2	72,3	28,6
9	-15	-14,7	5,67	500	54,0	71,5	71,6	24,9
				2000	54,0	72,2	72,3	28,6
10	-11,6	-24	5,65	500	53,8	71,5	71,6	24,9
				2000	53,8	72,2	72,3	28,7

5.2.5.6.2. Acústica geométrica

El estudio teórico de la acústica geométrica se ha desarrollado con ayuda del modelo informático, construido con los datos de la tabla 29 en el programa de simulación *ACOUSTACADD*, ya citado con anterioridad, con el objetivo de evaluar la naturaleza y participación del sonido reflejado en el campo sonoro.

Analizamos la incidencia de los rayos sonoros directos y reflejados en distintos puntos representativos de la sala. A continuación presentamos los gráficos relativos a los nueve puntos estudiados, en imágenes obtenidas por medio del programa citado.

En los puntos 2 y 3, de las figuras 159 y 160 se aprecia la pequeña cantidad de rayos reflejados que llegan a los oyentes. Algunas reflexiones largas que llegan a los puntos indicados serían atenuadas por la distancia.

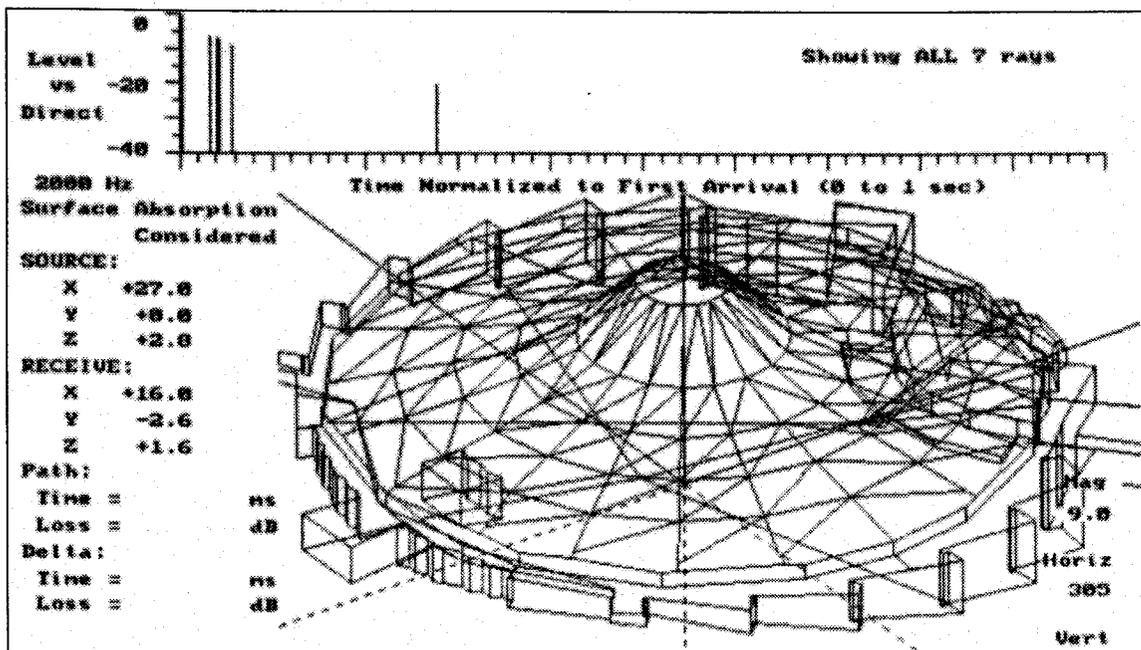
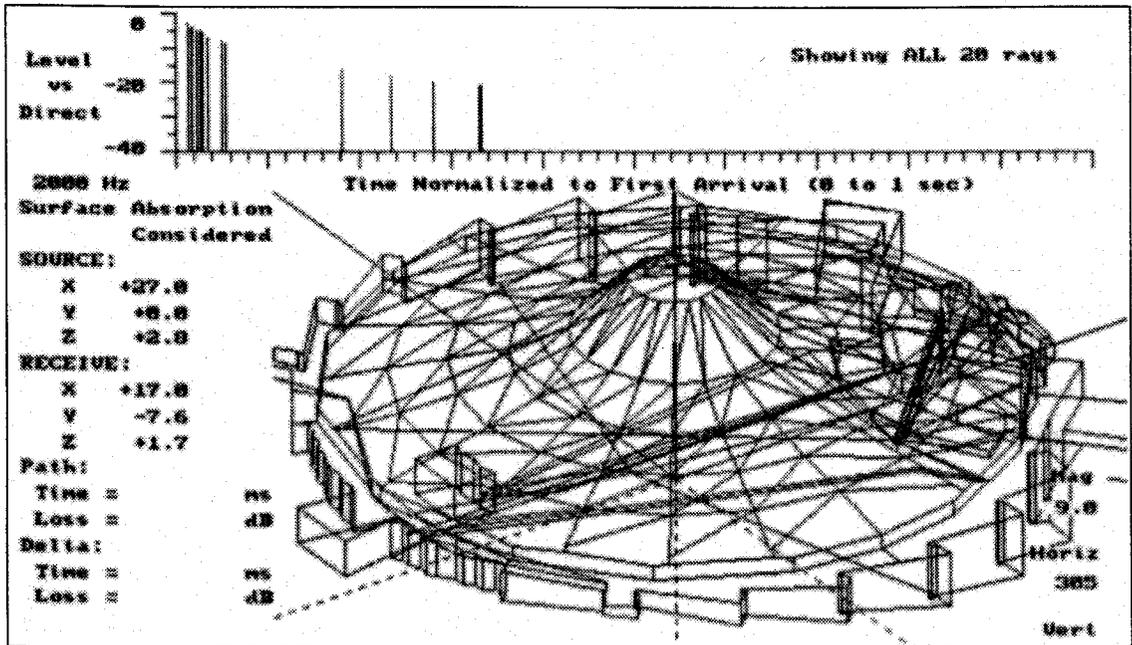
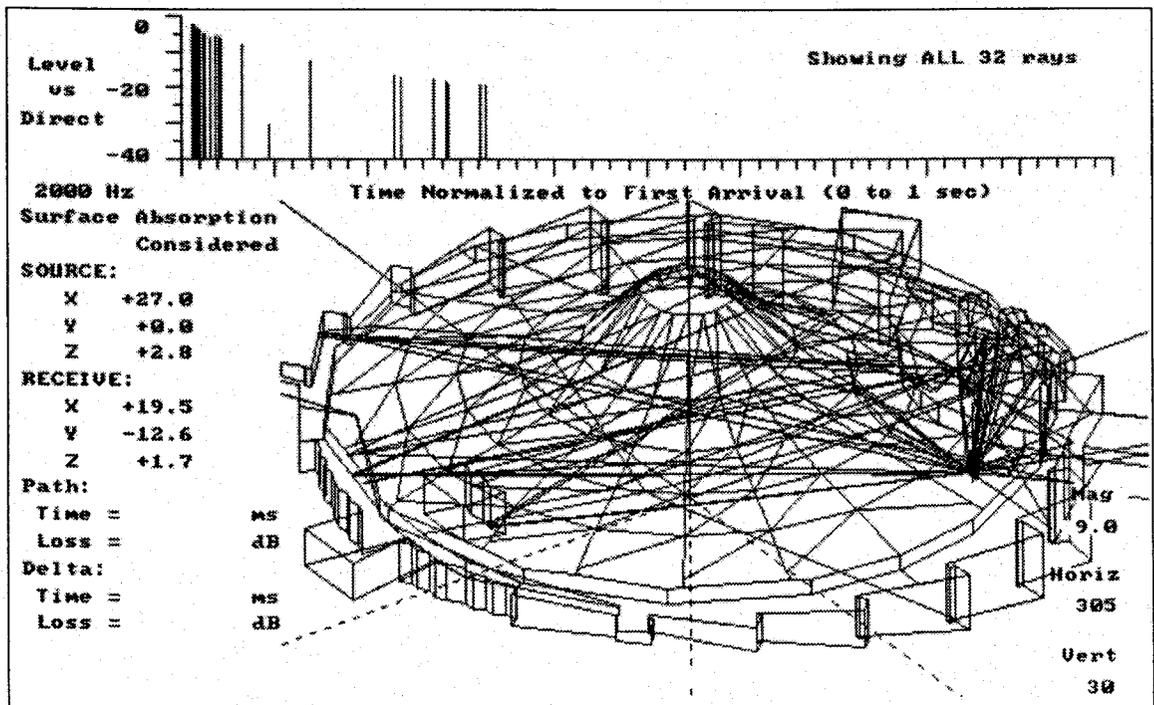


Figura 159. Punto 2, $f = 2.000$ Hz.

Figura 160. Punto 3, $f = 2.000$ Hz.

A medida que nos alejamos de la fuente, puntos 4 y 5 (figuras 161 y 162), empezamos a observar reflexiones largas y fuertes, con un desfase de tiempo mayor que 50 milisegundos y atenuaciones menores de 10 dB. Pero también observamos que hay muchas reflexiones cortas y fuertes agrupadas en el inicio del ecograma, con desfases de tiempo menores que 50 ms y atenuaciones menores de 10 dB, ya citados.

Figura 161. Punto 4, $f = 2.000$ Hz.

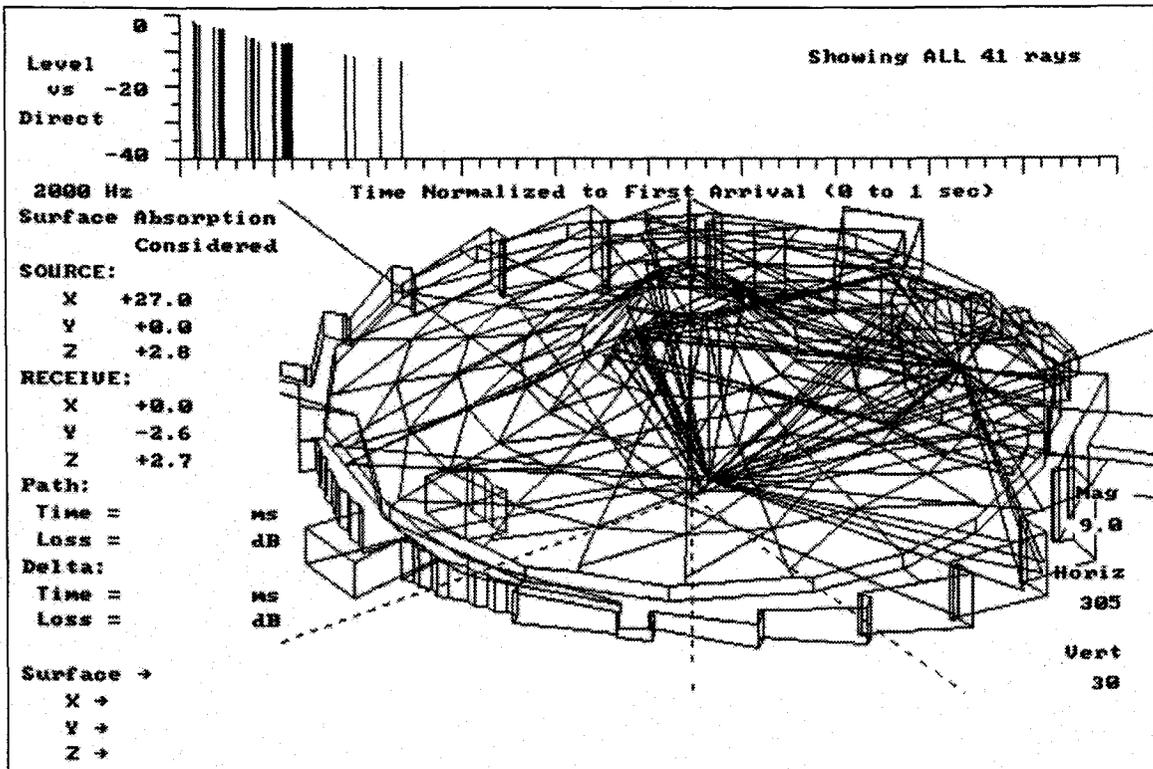


Figura 162. Punto 5, $f = 2.000$ Hz.

En la figura 163 se destaca el rayo 3, indicado en el ecograma, de los 31 rayos reflejados que llegan al espectador situado en el punto 6, así como el lugar de la reflexión en la cubierta.

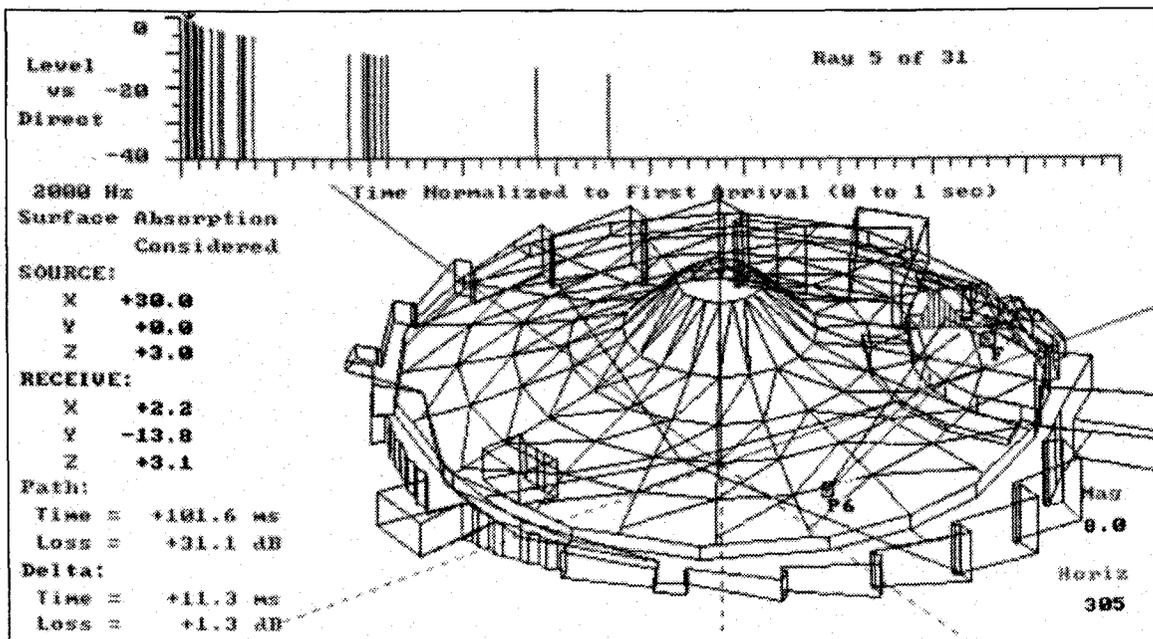


Figura 163. Punto 6, $f = 2.000$ Hz, rayo 5.

Se puede observar la actuación positiva de este rayo sonoro 6 para la acústica del local, debido al corto desfase de tiempo, de 11,3 ms, y su pequeña atenuación, de 1,2 dB, con relación al rayo directo.

En la figura 164 del mismo punto 6 se observa otro rayo, también indicado en el ecograma, y que, por el contrario, al ser una reflexión larga y fuerte, con desfase de tiempo de 198 ms y atenuación de 10,4 dB, produce el indeseable eco para esta localización.

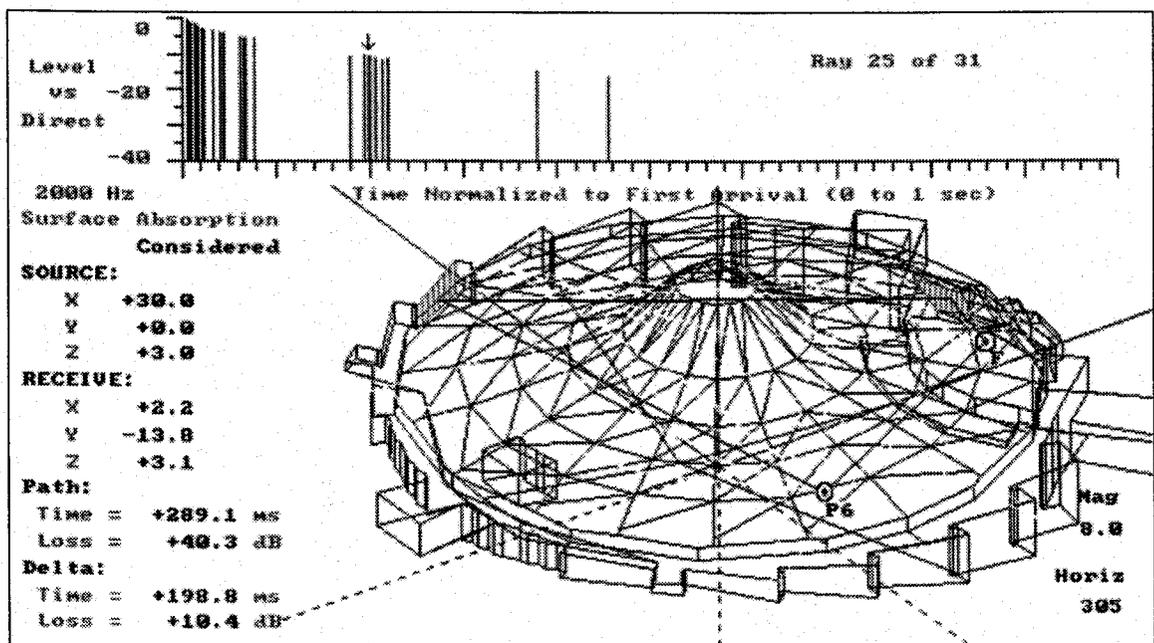


Figura 164. Punto 6, $f = 2.000$ Hz, rayo 25.

En las figuras 165 y 166 se aprecian los ecogramas de los puntos 7 y 8. Se observan las reflexiones cortas agrupadas en el inicio de la gráfica, bien como las reflexiones largas y fuertes muy desplazadas en la escala de tiempo, lo que no es bueno para la acústica del recinto.

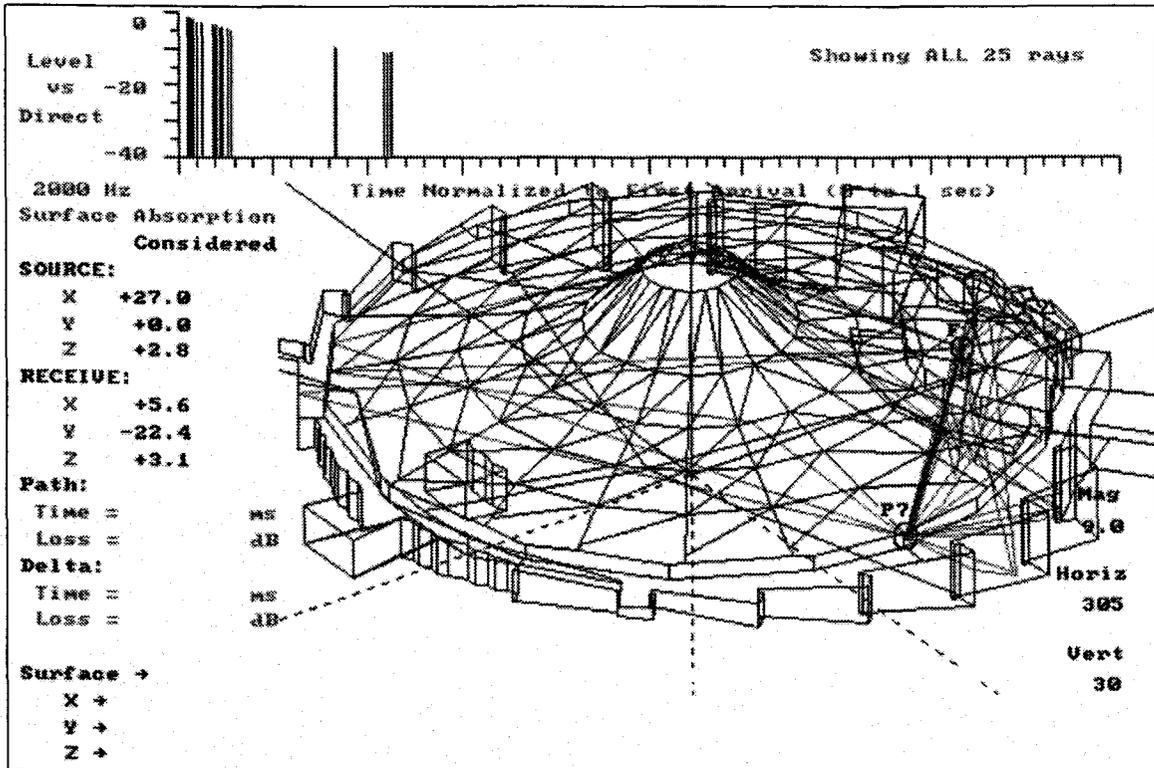


Figura 165. Punto 7, $f = 2.000$ Hz.

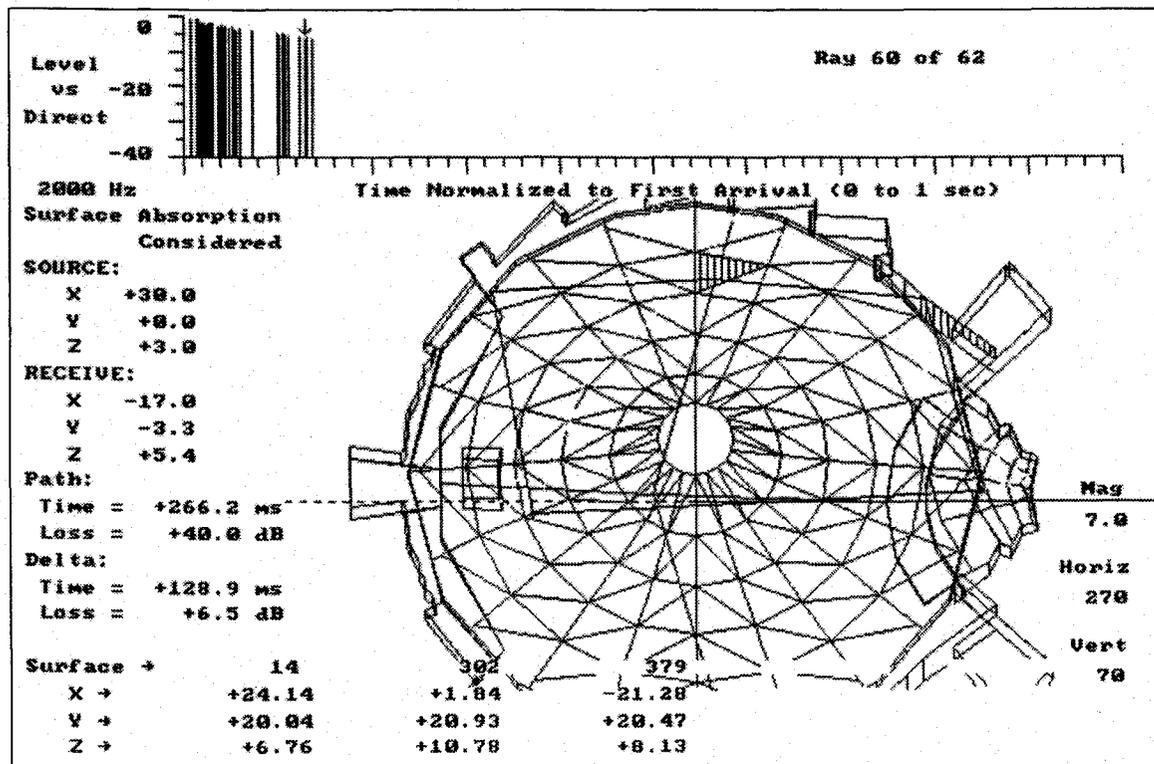


Figura 166. Punto 8, $f = 2.000$ Hz.

En las figuras 167 y 168 de los puntos 9 y 10, respectivamente, se observa la gran cantidad de rayos sonoros con poca atenuación que llegan a estas localidades, aunque que muchos de ellos están

excesivamente desfasados en el tiempo, más de 100 ms, con relación al rayo directo, lo que puede perjudicar la inteligibilidad de los mensajes hablados con el aumento de la reverberación.

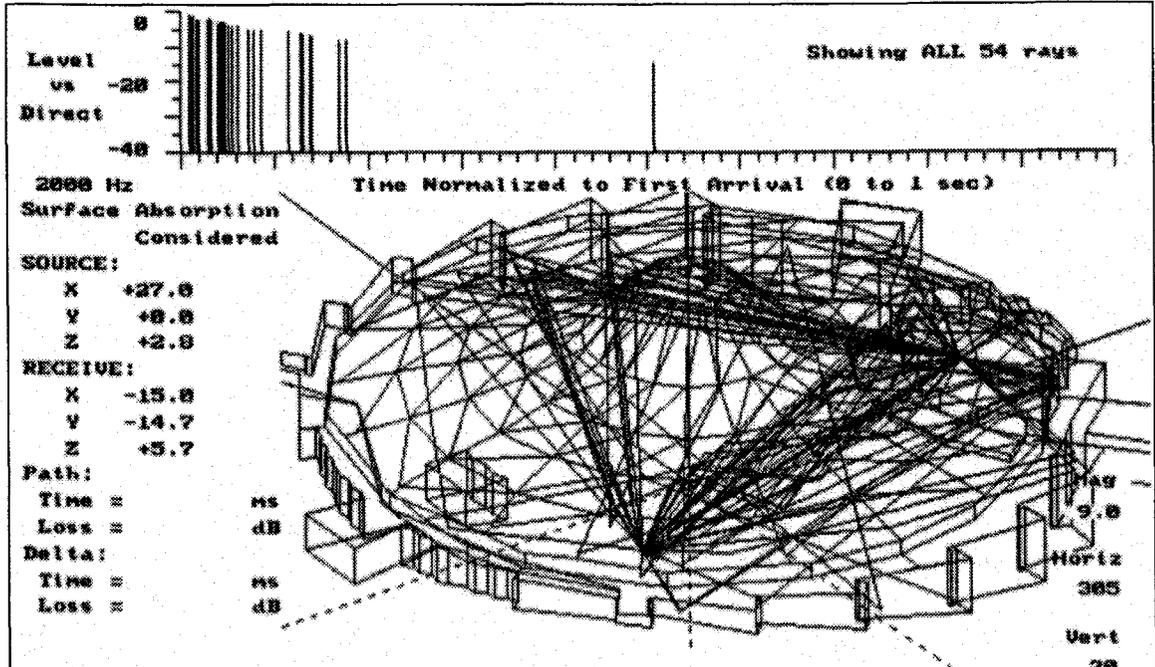


Figura 167. Punto 9, $f = 2.000$ Hz.

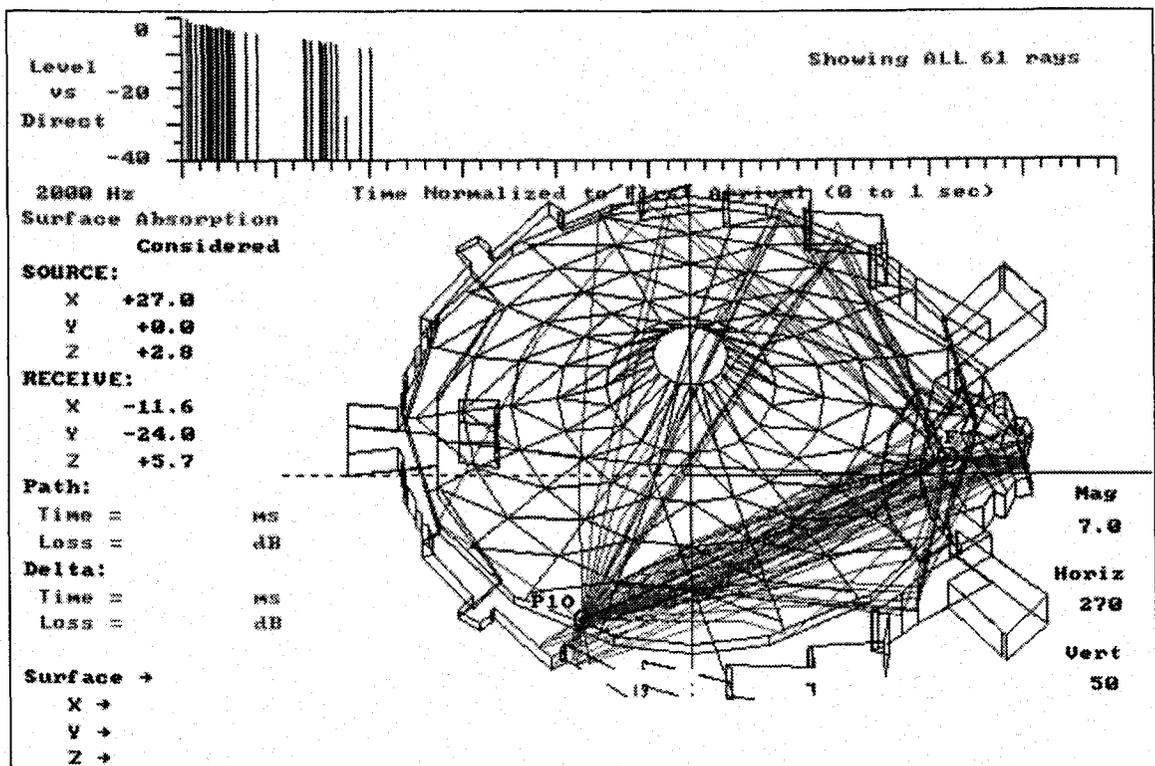


Figura 168. Punto 10, $f = 2.000$ Hz.

También observamos que algunos rayos aparecen agrupados en el inicio del gráfico (figuras 167 y 168), situación indicada como ideal para teatros y auditorios, pues refuerzan la palabra y contribuyen a dar una sensación de *claridad e intimidad*.

Las reflexiones atrasadas y fuertes provienen en gran parte de la cubierta y paredes laterales, debido a la escasa absorción de esos materiales. Otra importante superficie con baja absorción es el conjunto de sillas metálicas. Cualquier adecuación acústica pasa necesariamente por estas superficies.

Una vez constatadas las deficiencias del local, redactamos el proyecto de adecuación acústica, que se encuentra en el capítulo 6 de este trabajo.

5.3. Análisis de los Resultados

5.3.1. Reverberación:

En los cinco edificios en que se hicimos el análisis las condiciones acústicas, los tiempos de reverberación presentan las mismas características: baja reverberación en graves y muy elevada a las frecuencias medias y altas, especialmente entre 1.000 y 2.000 Hz, como se aprecia en la tabla 32.

Tabla 32. Tiempos de reverberación medidos.

TIEMPOS DE REVERBERACIÓN MEDIDOS						
Local	Frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Palenque 25.000 m ³	1,92	2,10	2,95	3,56	3,41	2,44
Apeadero – AVE 30.000 m ³	1,41	1,51	2,27	2,97	3,08	2,36
Ambiente 92 20.000 m ³	1,74	2,23	3,34	4,27	3,82	2,89
Piscina San Pablo 12.000 m ³	1,60	1,20	1,94	4,15	6,40	5,17
Auditorio A. Vianna 27.600 m ³	2,13	3,30	4,83	5,78	5,62	4,10

En la figura 169 se muestran las curvas tonales de los recintos estudiados.

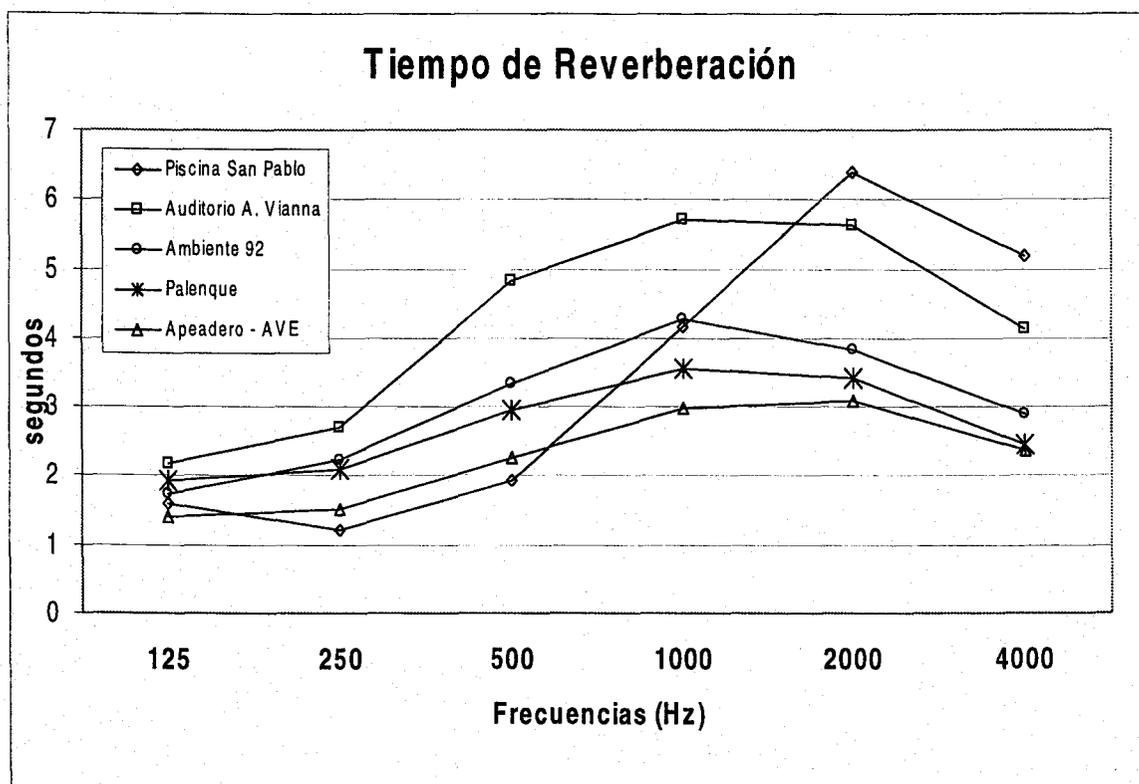


Figura 169. Tiempos de reverberación medidos en los espacios estudiados.

La forma de las curvas muestran un aspecto muy similar, poniendo de manifiesto comportamientos acústicos semejantes para espacios de diferentes formas y distintas tensiones en la cubierta. Los tiempos de reverberación más altos corresponden a la zona central del rango de frecuencias de medida, con un máximo en torno a los 1000 Hz y valores relativamente pequeños para la zona de bajas frecuencias, invirtiéndose la tendencia de la curva *óptima*. Esto implica que este tipo de cubiertas⁹⁹, membranas de PVC flexibles tensadas, presentan un buen comportamiento como absorbentes de bajas frecuencias y muy poco absorbentes a medias y altas frecuencias, con lo que los problemas de acondicionamiento son, en principio, más fáciles de resolver. Para obtener buenos niveles de

⁹⁹ ZAMARREÑO, T. et al. O. C. P. 266.

bienestar acústico se debe buscar superficies donde se pueda aumentar la absorción de los sonidos medios y agudos. El descenso que se observa a altas frecuencias, a partir de los 2.000 Hz, es normal para recintos de estas dimensiones y se debe a la absorción del aire.

5.3.2. Inteligibilidad:

Hemos utilizado el índice RASTI y el STI para evaluar la inteligibilidad en la carpa Ambiente-92, y su calificación resultó en “*mala*”, con valores situados entre 0,32 y 0,55.

También resultó en “*mala*” el análisis realizado con los modelos informáticos del Ambiente-92, Piscina San Pablo y Auditorio Araujo Vianna, utilizando el índice Al_{cons} :

En el Ambiente-92 se obtuvieron valores comprendidos entre 26 y 45 para la simulación del recinto vacío, y valores de 17 a 21 para la simulación del recinto ocupado en el 50% de su aforo, lo que la califica como “*pobre*”.

En la Piscina San Pablo, los valores obtenidos en la simulación se sitúan entre 24 y 54, lo que, otra vez, califica la inteligibilidad como “*mala*”.

En el Auditorio Araujo Vianna realizamos dos simulaciones con el modelo informático. Para el recinto vacío se obtuvieron valores comprendidos entre 23 y 48, y para el recinto ocupado en dos tercios de su aforo, se obtuvieron valores situados entre 18 y 29, lo que demuestra que la inteligibilidad en este espacio también se califica como “*mala*”.

Acreditamos que estos índices bajos de la inteligibilidad, en todos los espacios en que realizamos el análisis, se deben a los elevados valores del tiempo de reverberación, especialmente en la frecuencia de 2.000 Hz, fundamental para la comprensión de los mensajes orales.

La baja capacidad aislante de las membranas también colabora en la obtención de estos resultados, permitiendo valores elevados de ruido de fondo.

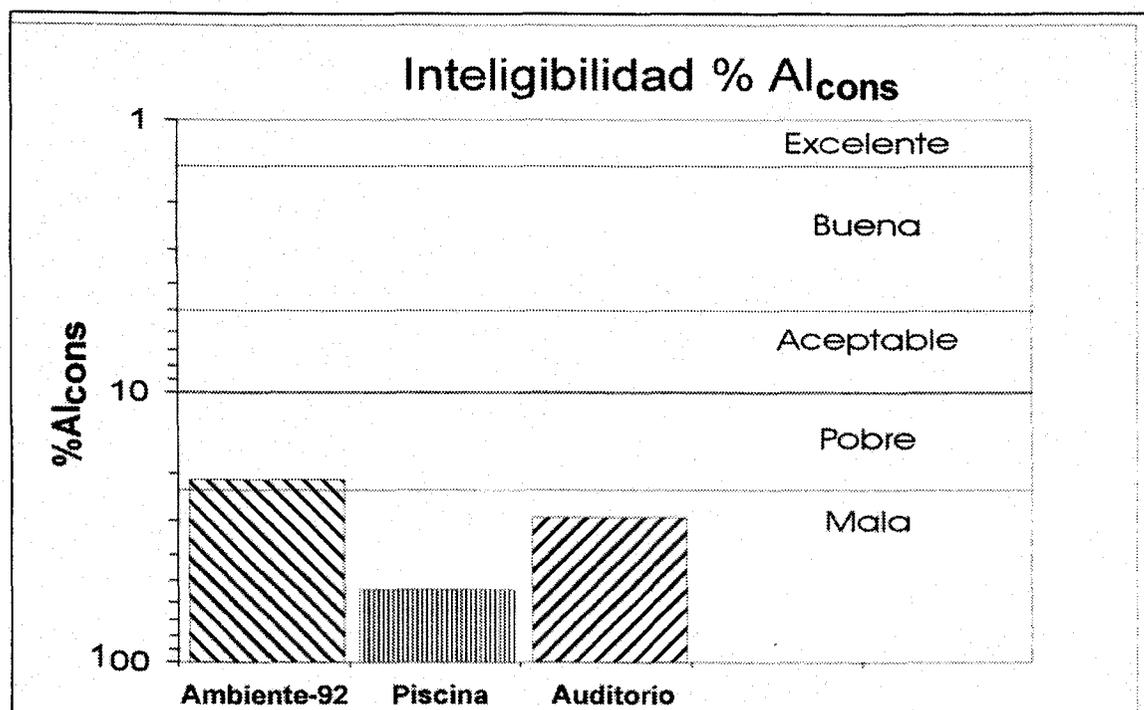


Figura 170. Inteligibilidad del Ambiente-92, Piscina San Pablo y Auditorio Araujo Vianna.

5.3.3. Distribución sonora:

En los dos casos medidos, para todas las frecuencias, los niveles correspondientes a los diferentes puntos se mantienen en una banda de un 5 dB. En la carpa *Ambiente'92* se pueden observar las focalizaciones sobre el eje provocadas por la geometría de la cubierta (puntos 1, 2 y 5), mientras que en la Plaza del Palenque, cuya geometría tiende a dispersar más que a focalizar, se detecta un comportamiento más uniforme del campo acústico, solo alterado

en el punto 5 por las reflexiones producidas en la fachada del edificio técnico.

Conviene resaltar que el programa de simulación AcoustaCadd a la hora de calcular la distribución sonora no lleva en cuenta la geometría de la cubierta, razón por la cual no hemos considerado la distribución sonora obtenida con los modelos informáticos.

5.3.4. Ruido de fondo

Hemos realizado mediciones del ruido de fondo en tres de los espacios estudiados:

En el Apeadero del AVE encontramos niveles de ruido que caracterizan como NC-46, debido a la proximidad del tráfico de vehículos.

En el recinto del Ambiente-92, podemos calificar los niveles de ruido en la curva NC-33, al estar más alejado de las fuentes sonoras.

En el Auditorio Araujo Vianna, las mediciones realizadas con lluvia, a las 18:30 h, indican la curva NC-47, al paso que a las 1:30 h ese nivel ha bajado hasta la curva NC-36, debido a la disminución del tráfico urbano.

Queda patente el bajo nivel de aislamiento acústico de las membranas, debido a su poco peso. En la **figura** se muestran los niveles de ruido de fondo medidos y las curvas NC.

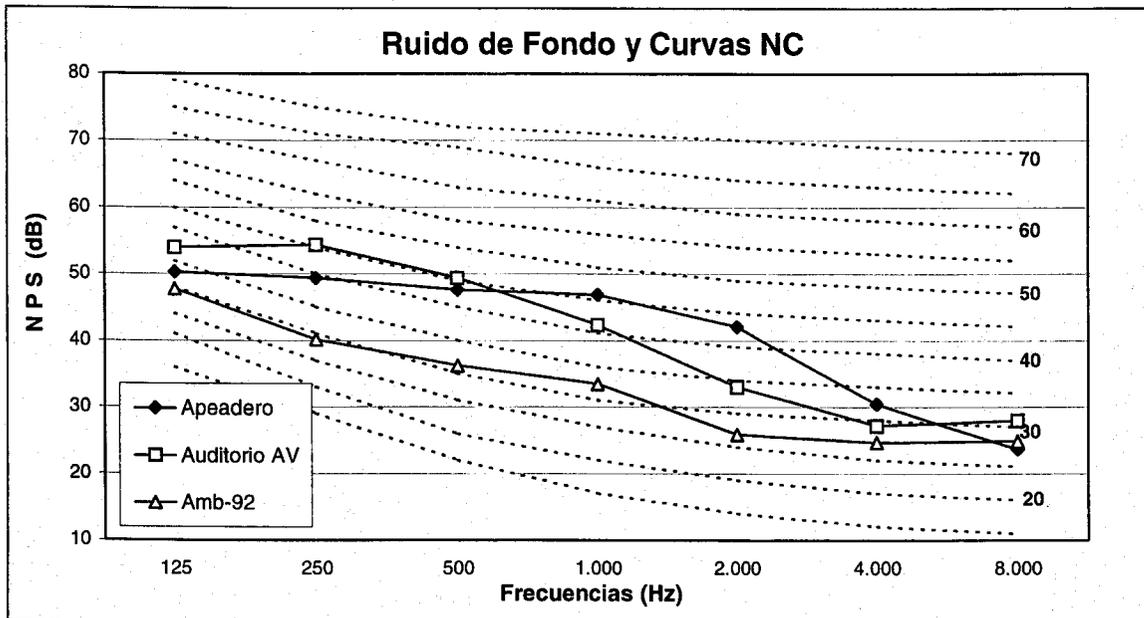


Figura 171. Ruido de fondo de tres espacios cubiertos con textiles y curvas NC.

5.3.5. Coeficientes de absorción

En la siguiente tabla 33 se muestran los coeficientes de absorción de las cubiertas, calculados a partir del tiempo de reverberación y utilizando la fórmula de Sabine:

Tabla 33. Coeficientes de absorción de las membranas, calculados.

FRECUENCIAS (Hz)	PALENQUE	APEADERO	AMBIENTE92	PISCINA	AUDITORIO
125	0,40	0,60	0,42	0,45	0,52
250	0,34	0,55	0,29	0,62	0,39
500	0,18	0,30	0,16	0,39	0,15
1000	0,09	0,17	0,08	0,15	0,08
2000	0,06	0,12	0,10	0,05	0,06
4000	0,09	0,13	0,09	0,01	0,09

En la figura 170 se muestran los coeficientes de absorción indicados en la tabla 33.

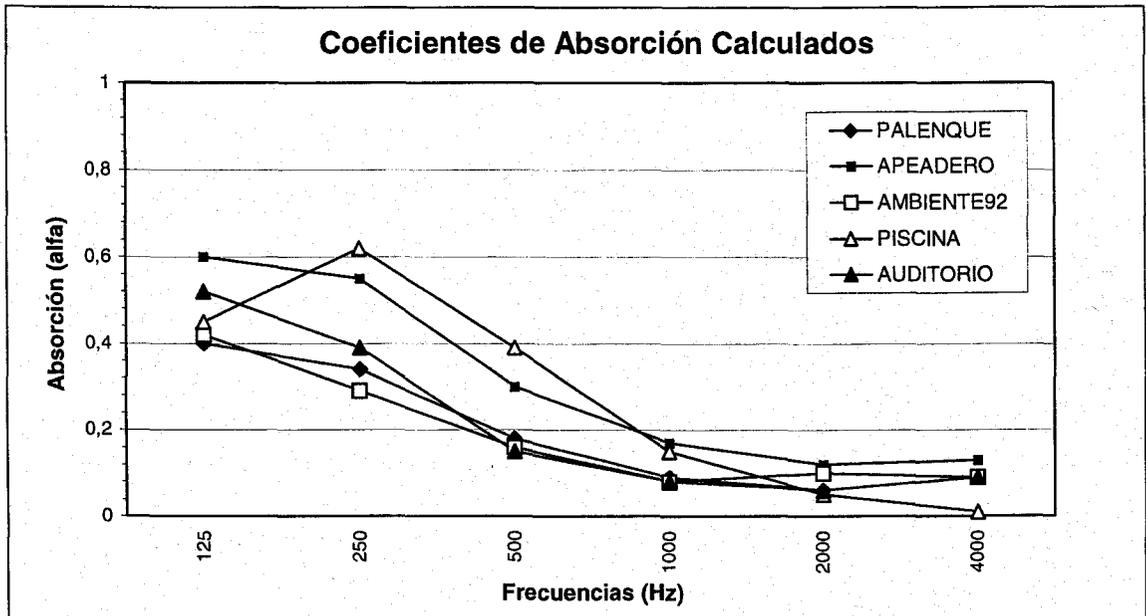


Figura 172. Coeficientes de absorción calculados de los espacios estudiados.

En el siguiente capítulo presentamos la corrección acústica del Auditorio Araujo Vianna.

CAPÍTULO 6 - CORRECCIÓN ACÚSTICA DEL AUDITORIO ARAUJO VIANNA.

Presentamos a continuación el estudio de corrección acústica del Auditorio Araújo Vianna desarrollado con el programa de simulación AcoustaCADD y otros programas propios.

El proyecto original del Auditorio Araújo Vianna contemplaba una concha acústica al aire libre. Se destinaba como sede de la Banda Municipal y a todo tipo de actuaciones, que se servían de la acústica pasiva del Auditorio.

Con la nueva cobertura se permite una mayor utilización del espacio, pero a costa de un aumento sensible del Tiempo de Reverberación. Además del aumento de la potencia disponible en los equipos de electro-acústica y del cambio de los hábitos musicales, esta operación produjo una modificación de la actividad los artistas y del público, requiriendo una adecuación acústica para mantener la cualidad del local.

Con el objetivo de disminuir el exceso de la reverberación, procuramos en este estudio suministrar la absorción necesaria, sin interferir acusadamente en la arquitectura del recinto. En el análisis de las condiciones acústicas detectamos tres importantes superficies con posibilidad de aumento de su absorción sonora:

- La cubierta textil.
- Las sillas metálicas.
- La concha acústica.

De hecho, el estudio cuyos resultados se presentan corresponde a una simulación efectuada tras las siguientes operaciones:

- Cubierta de doble capa, añadiendo a la actual una nueva similar al material textil denominado *Fabrasorb I®*, en concreto un tejido de poliamida fabricado por **ITM**, (industria textil local).
- Tapizado ligero de las sillas metálicas.
- Paneles absorbentes en la concha acústica.

En concreto, se ha analizado el Tiempo de Reverberación, Acústica Geométrica, Inteligibilidad de la Palabra y Ruido de Fondo.

Hemos preparado una muestra de la cubierta del auditorio a la que hemos aplicado un revestimiento de poliuretano expansible, con el objetivo de aumentar el aislamiento acústico, pero la manipulación de la muestra reveló que no es el producto indicado, debido al desprendimiento del revestimiento de la membrana.

En las simulaciones realizadas con el material *FABRASORB I®*, utilizado con éxito en la corrección acústica del Aeropuerto de Denver, USA, utilizamos resultados de ensayos de laboratorio gentilmente cedidos por **BIRDAIR, Inc.** NY, EE.UU.

La empresa **ITM** – Industrias Têxteis H. Milagre S.A., de Farroupilha, RS – se interesó en presentar productos (tejido absorbente acústico permeable) que podrían ser utilizados en el estudio. Visitamos la Fábrica y elegimos un producto de la línea de producción que podría servir a nuestro propósito. La Empresa se comprometió a producir una muestra de 12 m² para ensayos. Con la muestra gentilmente cedida realizamos ensayos de absorción

acústica, en el Laboratorio de Termo-Acústica de la Universidad Federal de Santa María, con el fin de determinar su comportamiento a las diversas frecuencias, indispensable para el cálculo del Tiempo de Reverberación.

La forma de instalar la segunda membrana, paralela a la membrana actual y separada 20 cm, sería montar una red de cables de acero anclada en la estructura metálica. Esta malla serviría de apoyo al tejido formando un techo acústico. Debido a las bajas tensiones exigidas en esta capa, y no habiendo cargas de viento, la malla de cables de acero podría ser bastante esbelta, con transmisión de esfuerzos a la estructura metálica solamente debidos al peso propio y a las tensiones para fijar la membrana textil.

El revestimiento de las sillas metálicas con un tejido que resista la limpieza de la cubierta, es importante para garantizar la misma cualidad acústica con el Auditorio vacío u ocupado. Este revestimiento, acompañado de una espuma de goma sintética, formando un acolchado ligero, aumentaría la absorción de la platea vacía, colaborando a la reducción del tiempo de reverberación en las altas frecuencias y disminuyendo la diferencia de comportamiento acústico en las situaciones de lleno/vacío, además de aumentar el confort, siendo altamente recomendable debido a que las actividades más frecuentes exigen tiempos de reverberación bajos, debido al sistema de amplificado electro-acústico utilizado.

La concha acústica tiene la función de producir reflexiones cortas del sonido producido en la escena hacia la platea, aumentando el nivel de presión sonora por la suma de las componentes directa y

reflejada. Esa función pierde algo de su sentido cuando la emisión del sonido se hace, casi siempre, por medio de equipos electroacústicos. En ese caso, la presencia de la concha puede dar lugar a reflexiones poco convenientes (por tardías) desde la platea hacia los músicos, perjudicando al necesario sincronismo entre ellos. Con el objetivo de anular las características reflectantes de la concha acústica, con un efecto contrario al deseado, se han proyectado paneles móviles absorbentes para la concha, que puedan ser removidos para actuaciones que hagan uso de la acústica pasiva del local.

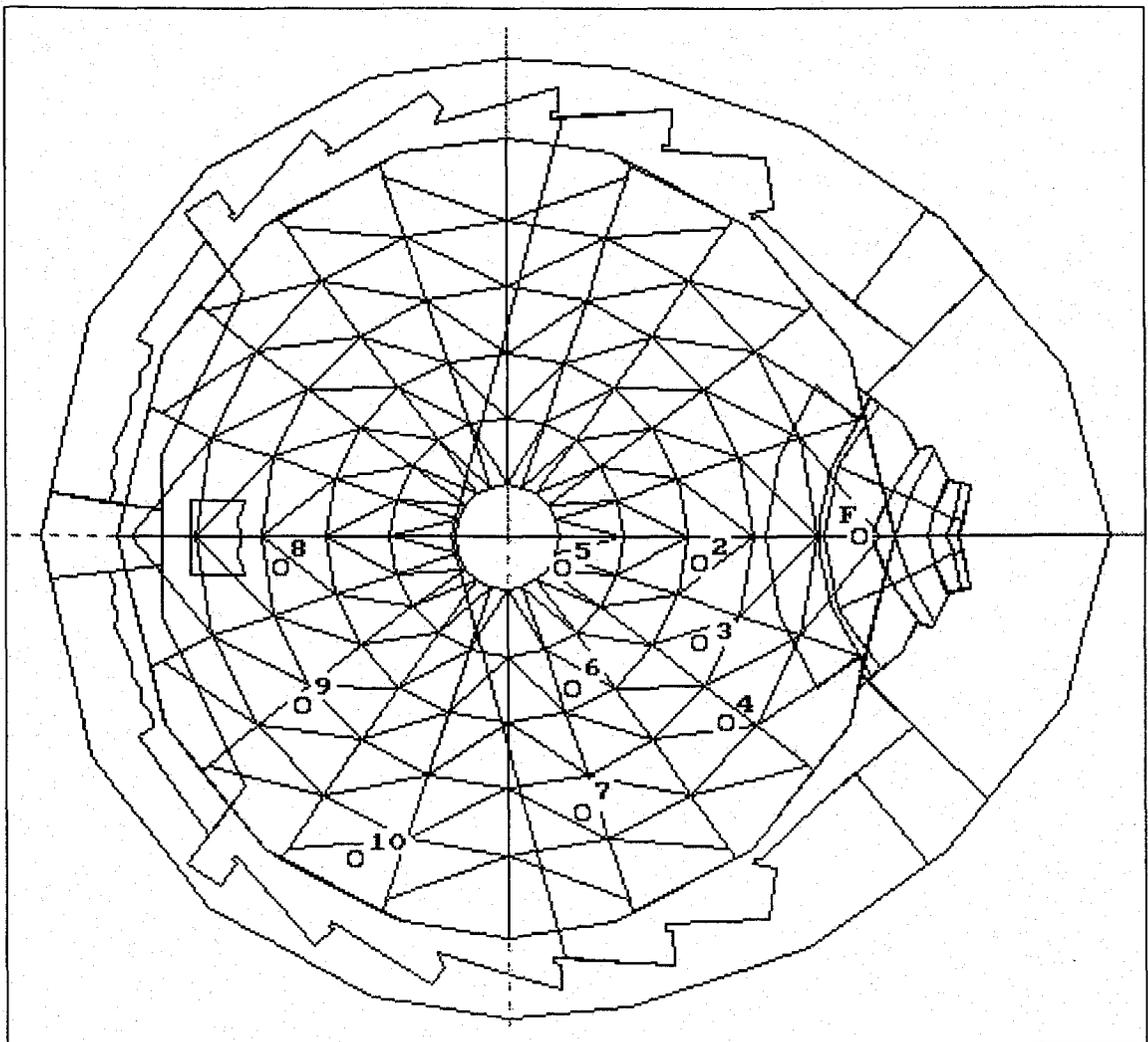


Figura 173. Esquema en planta y puntos de medida. Auditorio Araujo Vianna.

Los puntos donde fueron realizadas las simulaciones son los mismos de las mediciones y están indicados en la figura 173 :

6.1. Tiempo de Reverberación

Fabrasorb es una membrana porosa absorbente hecha en tejido de fibra de vidrio y revestimiento de politetrafluoroetileno (PTFE-teflón), utilizada como capa interior de las membranas compuestas del mismo material, con aplicación en construcciones permanentes.

Tabla 33. Características técnicas de membrana Fabrasorb I.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS: MEMBRANA FABRASORB I					
Fabricante	Chemfab Corporation, USA.				
Peso	0,475 Kg/m²				
Espesor	0,4 mm				
Color	Blanco				
Transmisión Solar	24,5 %				
Reflectancia Solar	65,0 %				
Incombustibilidad	Aprobado – Norma ASTM E-136				
Frecuencias (Hz)	250	500	1.000	2.000	4.000
Coefficientes de absorción sonora	0,66	0,43	0,56	0,64	0,65

Para la simulación, los cálculos de las curvas tonales teóricas se realizaron adoptando los coeficientes de absorción que figuran en la tabla 34.

Tabla 34. Materiales y coeficientes de absorción. Auditorio Araujo Vianna.

Material	Superf. (m ²)	Coeficiente de Absorción						Refer.
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
Absorción del Aire (m ³)	27.600					0,001	0,007	Pérez Miñana
Superficie Virtual accesos	214	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Sillas Metálicas acolch. Ligero	2.910	0,10	0,15	0,24	0,26	0,26	0,24	Recuero
Tarima de Madera escena	160	0,09	0,09	0,08	0,09	0,10	0,07	Pérez Miñana
Hormigón Pintado concha ac., marquesina	1.043	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	Knudsen
Ladrillo enlucido	202	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	Egan
Ladrillo cara vista	1.139	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	Egan
Falso techo yeso accesos	106	0,20	0,15	0,10	0,05	0,05	0,05	Recuero
Cierre Superior rejillas ventilación	50	0,50	0,50	0,40	0,35	0,30	0,25	Pérez Miñana
Membrana cubierta	1.000	0,52	0,39	0,15	0,08	0,06	0,09	calculado
Membrana doble PVC/Poliéster + Fabrasorb	2.126	0,66	0,66	0,43	0,56	0,64	0,65	Cedar Knolls
Total	8.950							

Los valores óptimos del tiempo de reverberación, para las seis principales bandas de octava, de acuerdo con el uso a que se destina, según Pérez Miñana, Cremer y Beranek, se expresan en la tabla 35. En esta misma tabla se reflejan también los valores del tiempo de reverberación medidos en el estudio inicial, así como los

obtenidos por medio de la simulación, para el recinto vacío y para una ocupación de 2/3 del aforo total sentados en sillas ligeramente acolchadas. Para la cubierta se ha considerado 2.126,00 m² de doble capa formada por la cobertura actual y por la membrana *FABRASORB I*, paralelas, con una cámara de aire de 20 cm entre ellas.

Tabla 35. Tiempos óptimos de reverberación, medidos y estimados. Auditorio Araujo Vianna.

Tiempos de reverberación Auditorio Araujo Vianna - 27.600 m ³	FRECUENCIAS (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Óptimos palabra, Pérez.	2,87	2,54	2,21	1,99	1,99	1,99
Óptimos música, Pérez	3,45	3,05	2,65	2,39	2,39	2,39
Óptimos palabra con electro-acústica, Pérez	2,49	2,20	1,92	1,72	1,72	1,72
Óptimos palabra máximos, Cremer.	2,1	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4
Óptimos ópera máximos, Cremer.	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
Óptimos palabra, Beranek.	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Óptimos ópera, Beranek.	2,3	2,1	1,8	1,9	1,9	1,9
Óptimos concierto, Beranek.	2,47	2,27	1,97	2,07	2,07	2,07
T _R medidos	2,13	3,30	4,83	5,78	5,62	4,10
Simulación recinto vacío	1,76	1,75	2,15	1,89	1,75	1,64
Simulación recinto con 2/3 ocupación	1,70	1,73	1,96	1,78	1,65	1,58

Presentamos, en la figura 174, las curvas tonales medidas, óptimas y estimadas, con los valores de la tabla 35.

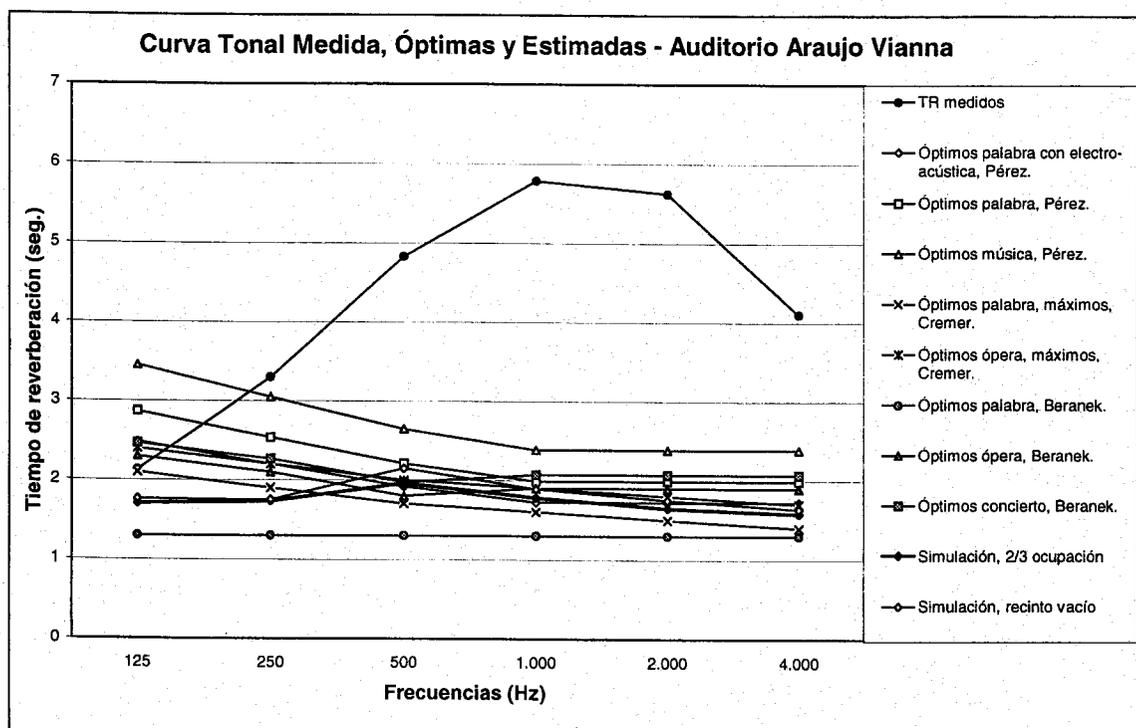


Figura 174 Tiempos de reverberación medidos, óptimos y estimados en octavas. Auditorio A.V.

De la observación de la figura 174 concluimos que el Auditorio puede ser corregido con las operaciones descritas. Entendemos que, después de la corrección, será apropiado para actuaciones con amplificación electro-acústica, tornándose una sala neutra donde el técnico de sonido determina en qué momentos o situaciones es deseable una mayor reverberación, compensando una pequeña falta en las bajas frecuencias.

El material actual utilizado en la cubierta del Auditorio se compone de un tejido de poliéster y un recubrimiento de PVC, de vida útil más corta que la membrana Fabrasorb, prevista para construcciones permanentes y con un coste también más alto. Intentamos buscar un material más acorde con la cubierta existente, con durabilidad y costes en el rango de las construcciones temporales. Peter Lord y

Duncan Templeton¹⁰⁰ nos indican que la absorción de tejidos se debe a la porosidad de la malla: tejidos con trama muy abierta y con poca densidad son acústicamente transparentes; una trama mediana proporciona mucho más absorción que cerrada o abierta. También nos revelan como efectuar un examen empírico para verificar la resistencia del flujo en la tela: intentar soplar del material. Debe ser posible soplar a través del textil con alguna resistencia, para que el tejido tenga óptima resistencia del flujo para sonidos. Effenberger¹⁰¹ nos lo confirma y da la porosidad de la membrana Fabrasorb: 17 SCFM @ ½" H₂O.

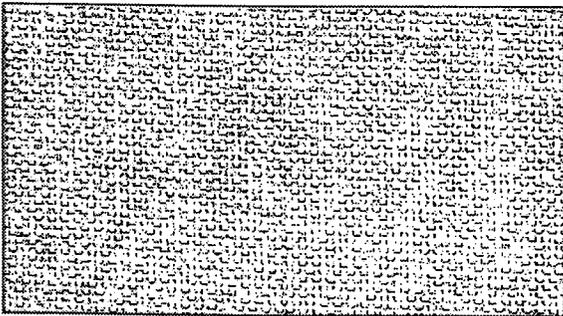


Figura 175. Fabrasorb I.



Figura 176. Tejido ITM 4400.

En la visita que hicimos a la Industria Textil ITM encontramos un producto de la línea de producción que, aparentemente, tenía una porosidad parecida a la del tejido *Fabrasorb*, de la que disponíamos una muestra cedida por la casa BIRD AIR, USA. Figuras 175 y 176. Sus ventajas serían el bajo coste, proximidad de la planta industrial y colores variados.

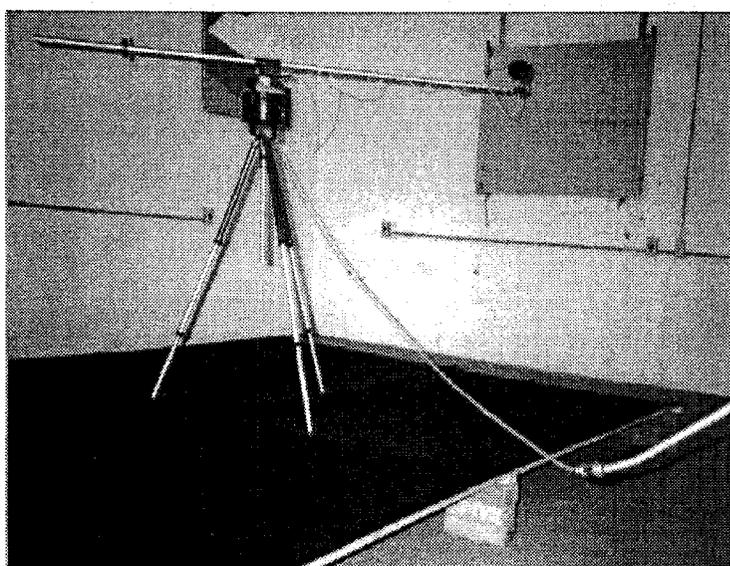
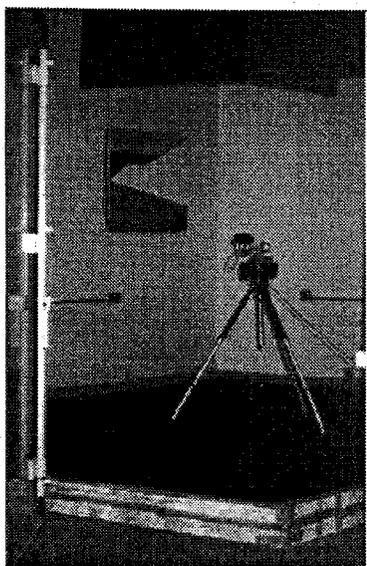
¹⁰⁰ LORD, P., TEMPLETON, D. *Detailing for Acoustics*. Londres: E & FN Spon. 3ª Ed., 1996. P.146.

¹⁰¹ EFFENBERGER, J. Fabrasorb thermo-acoustical fabrics. Informe de Chemical Fabrics Corporation facilitado por Birdair, Inc., EE. UU. en las III Jornadas Técnicas Sobre Arquitectura Textil, Universidad Politécnica de Madrid, 1995. P. 2.

Tabla 36. Características técnicas de membrana ITM 4.400.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS: MEMBRANA ITM 4.400	
Fabricante	Industrias Texteis H. Milagre S.A. Brasil.
Peso	0,368 Kg/m²
Espesor	0,7 mm
Color	A elegir
Composición	100 % Poliamida

Para verificar el comportamiento acústico del textil de ITM hicimos un ensayo en la cámara reverberante del Laboratorio de Termoacústica de la Universidad de Santa María, con una muestra de 12,00 m², figuras 177 y 178. Con el objetivo de simular la situación real de uso, montamos una reja de madera para mantener el textil separado del suelo, inicialmente una separación de 10 cm y luego con una separación de 20 cm. Medimos la absorción con los bordes abiertos y cerrados. Los resultados del ensayo se muestran en la tabla 37 y figura 179.



Figuras 177 y 178. Ensayo de absorción, textil ITM. Laboratorio Termoacustica de U.F.S.M.

Tabla 37. Coeficientes de absorción de la membrana textil ITM 4.400.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN SONORA					
Tejido 4400 ITM, color 13 negro, 100% Poliamida, 368 g/m2, Pieza nº 333333/01 1642					
Frecuencia (Hz)	20 cm (abierto)	20 cm (cerrado)	10 cm (abierto)	10 cm (cerrado)	Media
100	0,03	0,07	0,02	0,03	0,04
125	0,03	0,18	0,03	0,03	0,07
160	0,04	0,12	0,02	0,03	0,05
200	0,07	0,17	0,02	0,05	0,08
250	0,19	0,50	0,07	0,14	0,22
315	0,28	0,43	0,13	0,23	0,27
400	0,39	0,54	0,25	0,41	0,40
500	0,44	0,66	0,33	0,48	0,48
650	0,50	0,67	0,49	0,53	0,55
800	0,55	0,63	0,57	0,61	0,59
1000	0,57	0,60	0,64	0,68	0,62
1250	0,60	0,57	0,61	0,65	0,61
1600	0,61	0,59	0,62	0,64	0,62
2000	0,60	0,57	0,68	0,60	0,61
2500	0,60	0,61	0,59	0,57	0,59
3150	0,61	0,60	0,56	0,55	0,58
4000	0,63	0,58	0,59	0,56	0,59
5000	0,63	0,58	0,55	0,60	0,59
6300	0,72	0,59	0,56	0,63	0,62
8000	0,68	0,28	0,45	0,45	0,47

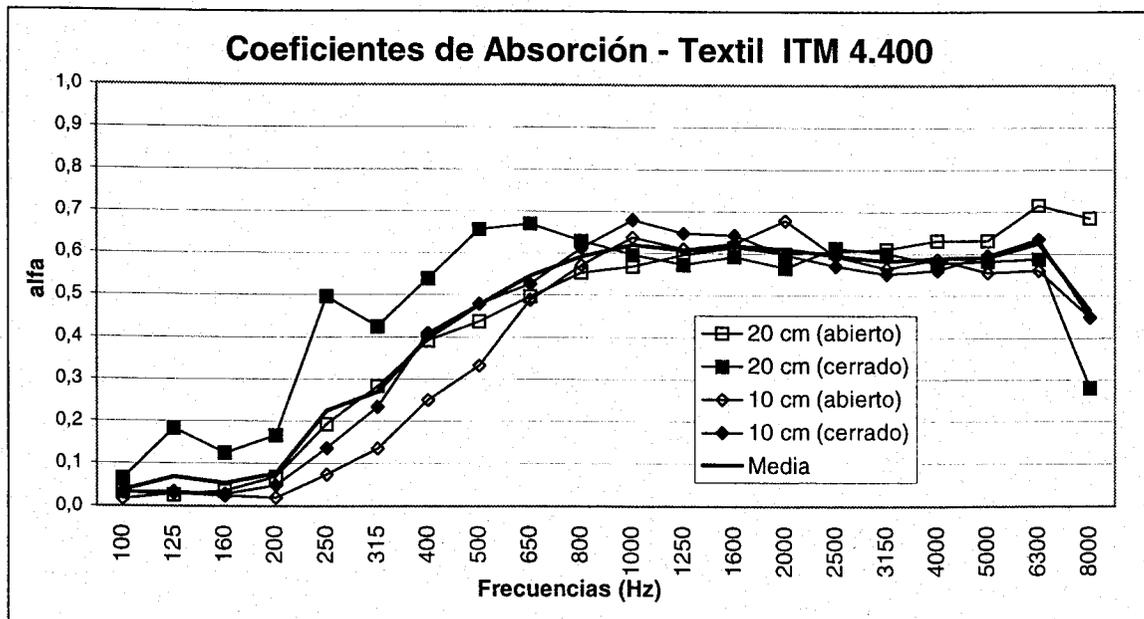


Figura 179. Coeficientes de absorción membrana ITM 4.400

Con el fin de mantener la propuesta original y permitir la celebración de actuaciones sin electro-acústica, proyectamos un revestimiento removible para la concha acústica, con una superficie aproximada de 200,00 m². Este revestimiento se compone de un soporte en madera contrachapada naval de 6 mm, sobre el que se apoya una manta de lana de vidrio no resinada, densidad 60 Kg/m³, espesor 50 mm, armada con una tela metálica galvanizada, denominación comercial **MI 560 x 50, Compañía Vidriaría Santa Marina – ISOVER** (tabla 38). Para dar rigidez al conjunto, en todo el perímetro y en las juntas, será aplicada una pieza de madera de 5 x 5 cm, donde se fijará la tela metálica del panel **MI**. Tendrá perforaciones para fijarlo a la losa de la concha acústica. Esta fijación será con tornillos anclados en la losa de hormigón, y provistos de tuerca tipo mariposa para facilitar la instalación y remoción del conjunto absorbente (figura 180).

Tabla 38. Coeficientes de Absorción panel MI 560 x 50.

PANEL MI 560 X 50 – material sobre el suelo, certificado 775.975 IPT																	
Frecuencia(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
α	0.24	0.33	0.62	0.84	0.99	1.08	1.10	1.01	1.02	1.09	1.05	1.01	0.98	1.02	0.98	1.05	0.94

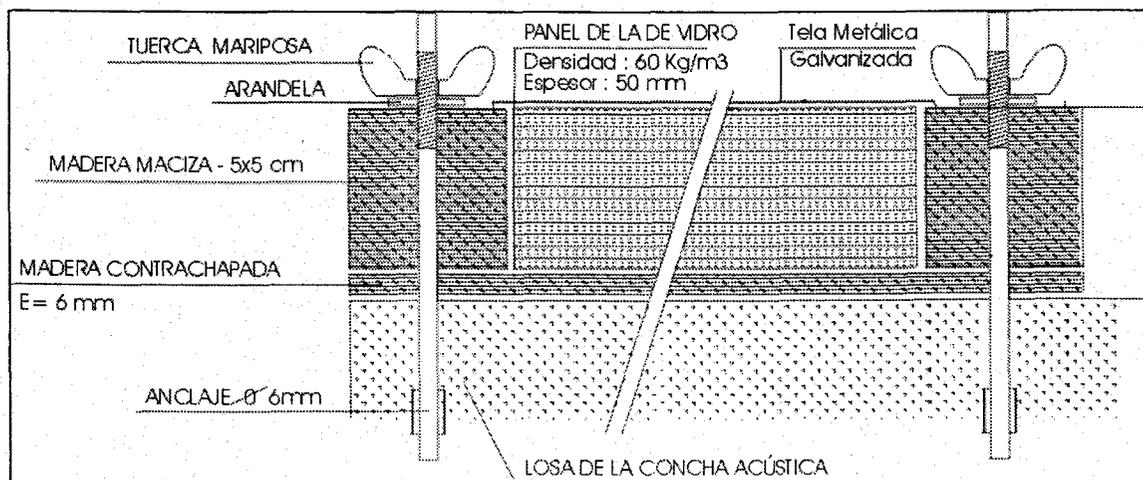


Figura 180. Detalle paneles absorbentes.

El cálculo de las curvas tonales teóricas se realizó adoptando los coeficientes de absorción de los materiales de revestimiento y mobiliario especificados en la tabla 39. Para la cubierta doble utilizamos los coeficientes de la membrana simple para las frecuencias 125 y 250 Hz, y los coeficientes del textil ensayado para las demás frecuencias.

Tabla 39. Materiales y coeficientes de absorción. Auditorio Araujo Vianna.

Material	Superf. (m ²)	Coeficiente de Absorción						Refer.
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
Absorción del Aire (m ³)	27.600					0,001	0,007	P. Miñana
Superficie Virtual accesos	214	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Sillas Metálicas acolch. Ligeró	2.910	0,10	0,15	0,24	0,26	0,26	0,24	Recuero
Tarima de Madera escena	160	0,09	0,09	0,08	0,09	0,10	0,07	Pérez Miñana
Hormigón Pintado marquesina	843	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	Knudsen
Ladrillo enlucido paredes	202	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	Egan
Ladrillo cara vista paredes	1.139	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	Egan
Falso techo yeso accesos	106	0,20	0,15	0,10	0,05	0,05	0,05	Recuero
Cierre Superior rejillas ventilación	50	0,50	0,50	0,40	0,35	0,30	0,25	Pérez Miñana
Membrana cubierta	1.526	0,52	0,39	0,15	0,08	0,06	0,09	Calculado
Membrana doble PVC/Poliéster + ITM 4400	1.600	0,52	0,39	0,48	0,62	0,61	0,59	UFMS
Revestimiento concha acústica	200	0,33	0,99	1,00	1,00	1,00	0,94	IPT
Total	8.950							

Los valores óptimos del tiempo de reverberación, para las seis principales bandas de octava, de acuerdo con el uso a que se destina, según Pérez Miñana, Cremer y Beranek, se expresan en la tabla 40. En esta misma tabla se reflejan también los valores del tiempo de reverberación medidos en el estudio inicial, así como los obtenidos por medio de la simulación, para el recinto vacío y para una ocupación de 2/3 del aforo total sentados en sillas ligeramente acolchadas y paneles absorbentes revistiendo la concha acústica. Para la cubierta se ha considerado 1.600,00 m² de doble capa formada por la cobertura actual y por la membrana textil de ITM, paralelas, con una cámara de aire de 20 cm entre ellas.

Tabla 40. Tiempos óptimos de reverberación, medidos y estimados. Auditorio Araujo Vianna.

Tiempos de reverberación Auditorio Araujo Vianna - 27.600 m ³	FRECUENCIAS (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Óptimos palabra, Pérez.	2,87	2,54	2,21	1,99	1,99	1,99
Óptimos música, Pérez	3,45	3,05	2,65	2,39	2,39	2,39
Óptimos palabra con electro-acústica, Pérez	2,49	2,20	1,92	1,72	1,72	1,72
Óptimos palabra máximos, Cremer.	2,1	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4
Óptimos ópera máximos, Cremer.	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
Óptimos palabra, Beranek.	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Óptimos ópera, Beranek.	2,3	2,1	1,8	1,9	1,9	1,9
Óptimos concierto, Beranek.	2,47	2,27	1,97	2,07	2,07	2,07
T _R medidos	2,13	3,30	4,83	5,78	5,62	4,10
Simulación recinto vacío	1,94	2,06	2,02	1,86	1,86	1,77
Simulación recinto con 2/3 ocupación	1,70	1,73	1,96	1,78	1,65	1,58

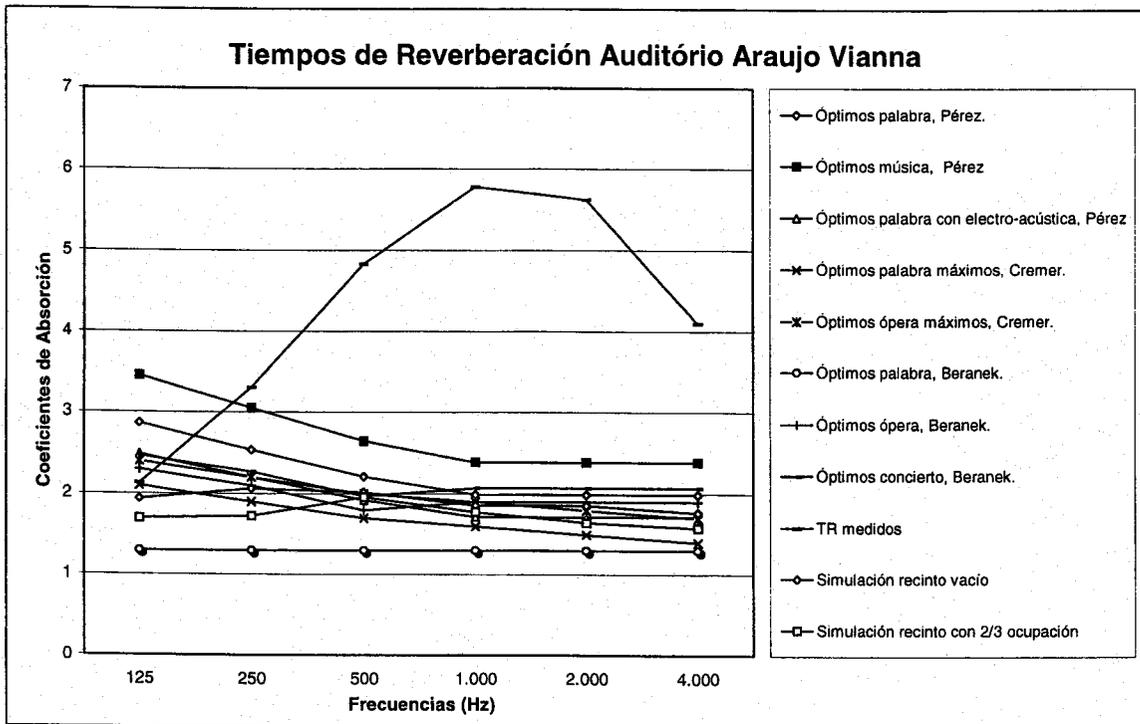


Figura 181. Tiempos óptimos de reverberación, medidos y estimados. Auditorio Araujo Vianna.

De la observación de la figura 181 concluimos que el Auditorio puede ser corregido con la aplicación del techo textil de ITM 4400, revestimiento de la concha acústica con paneles de madera y lana de vidrio, y aplicación de tapizado ligero en las sillas metálicas. La utilización de estos materiales proporcionará una adecuada curva tonal para el ambiente.

6.2. Inteligibilidad de la Palabra

Realizamos un estudio teórico de la inteligibilidad de la palabra (capacidad de entendimiento por parte del oyente de las palabras pronunciadas por un orador). Utilizamos el índice AI_{cons} , implementado en el programa informático ya citado. La potencia de la fuente se ajustó para producir, a 1 m de ella, niveles acústicos semejantes al de la voz humana.

En la escala de valoración de una sala cuando se utiliza el índice AI_{cons} , la inteligibilidad se considera **excelente** cuando se obtienen

valores comprendidos entre **0** y **1,4**, **buena** para valores entre **1,4** y **5**, **aceptable** para valores entre **5** y **12**, **pobre** para valores entre **12** y **25**, y **mala** a partir de **25**.

En el estudio de Corrección Acústica el índice AI_{cons} , en los puntos 2 a 7, alcanza un valor entre **8,6** y **14** para el auditorio con 2/3 de ocupación, lo que revela que la inteligibilidad de la sala será **aceptable** en general. En los puntos 8, 9 y 10, localizados en el tercio final del auditorio, el índice AI_{cons} alcanzado de **15,2** nos indica que la inteligibilidad será algo deficiente en la frecuencia de 500 Hz.

Presentamos aquí, en la tabla 41 y figuras 182 y 183, los valores obtenidos con la simulación:

Tabla 41. Índice Alcons en la simulación. Auditorio Araujo Vianna.

TABLA ÍNDICE AI_{cons} - Capa Dupla, 2/3 ocupado					
Punto	Coordenadas			Frecuencia (Hz)	AI_{cons}
	X	Y	Z		
1-Fonte	27	0	2,8	500	9,2
2	16	-2,6	1,62	2000	8,6
3	17	-7,6	1,71	500	9,7
				2000	9,1
4	19,5	-12,6	1,68	500	10,5
				2000	9,7
5	0	-2,6	2,68	500	13,5
				2000	12,5
6	2,2	-13,8	3,06	500	13,7
				2000	12,7
7	5,6	-22,4	3,08	500	14,0
				2000	13,1
8	-17	-3,3	5,35	500	15,2
				2000	14,2
9	-15	-14,7	5,67	500	15,2
				2000	14,2
10	-11,6	-24	5,65	500	15,3
				2000	14,2

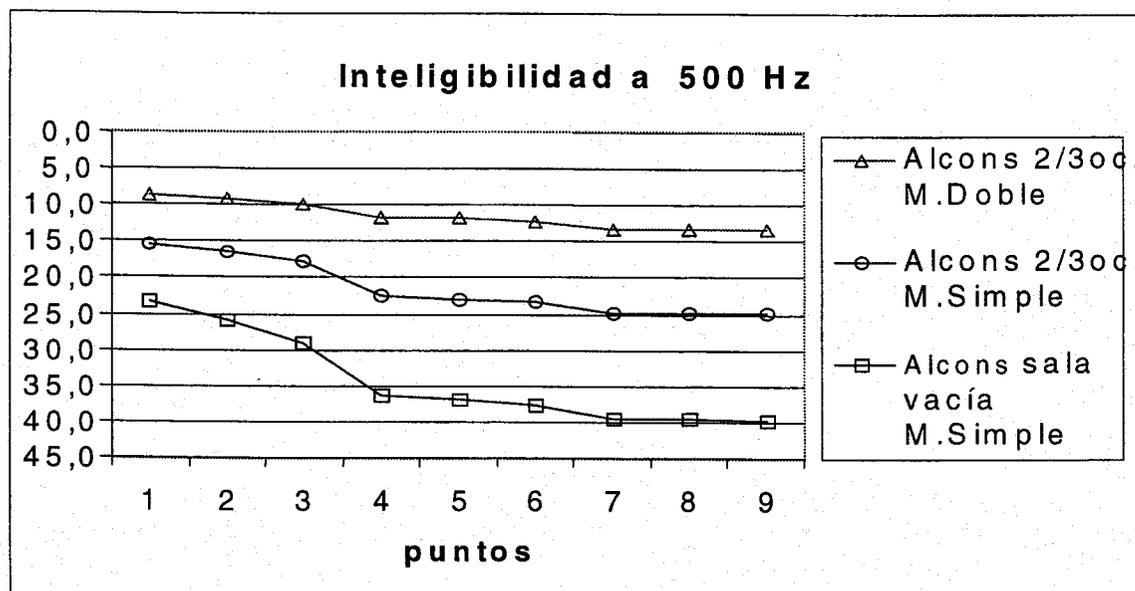


Figura 182. Inteligibilidad a 500 Hertz.

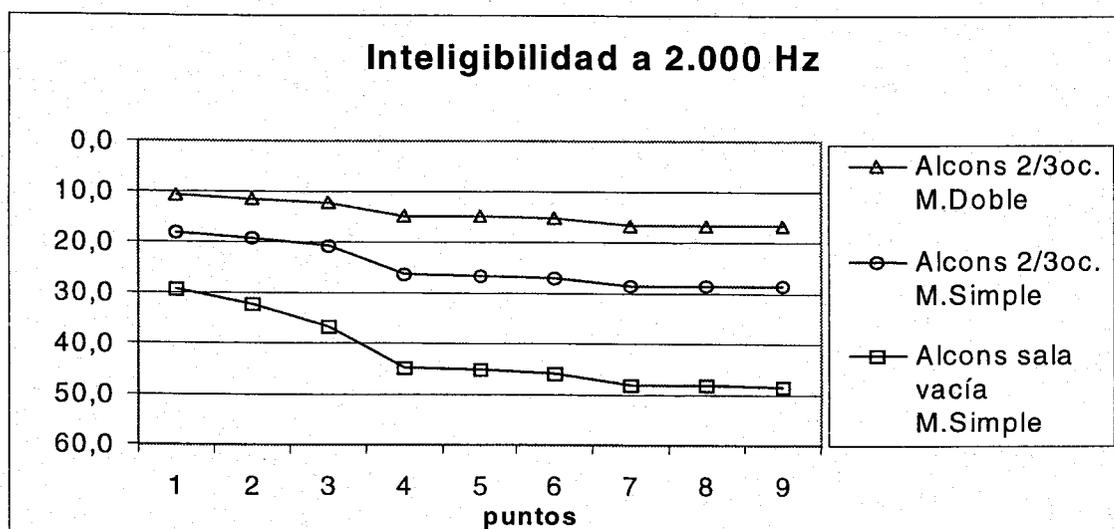


Figura 183. Inteligibilidad a 2.000 Hertz.

6.3. Acústica Geométrica:

Para realizar este estudio se modeló el auditorio y, utilizando el programa informático AcoustaCADD, se realizó un estudio teórico de Acústica Geométrica, con el objetivo de valorar la naturaleza y participación del sonido reflejado en el campo sonoro. Analizamos la incidencia de los rayos sonoros directos y reflejados en distintos puntos representativos de la sala. A continuación presentamos las figuras 184 y 185, relativas a los puntos estudiados 2 y 3, que manifiestan el acierto de las modificaciones propuestas.

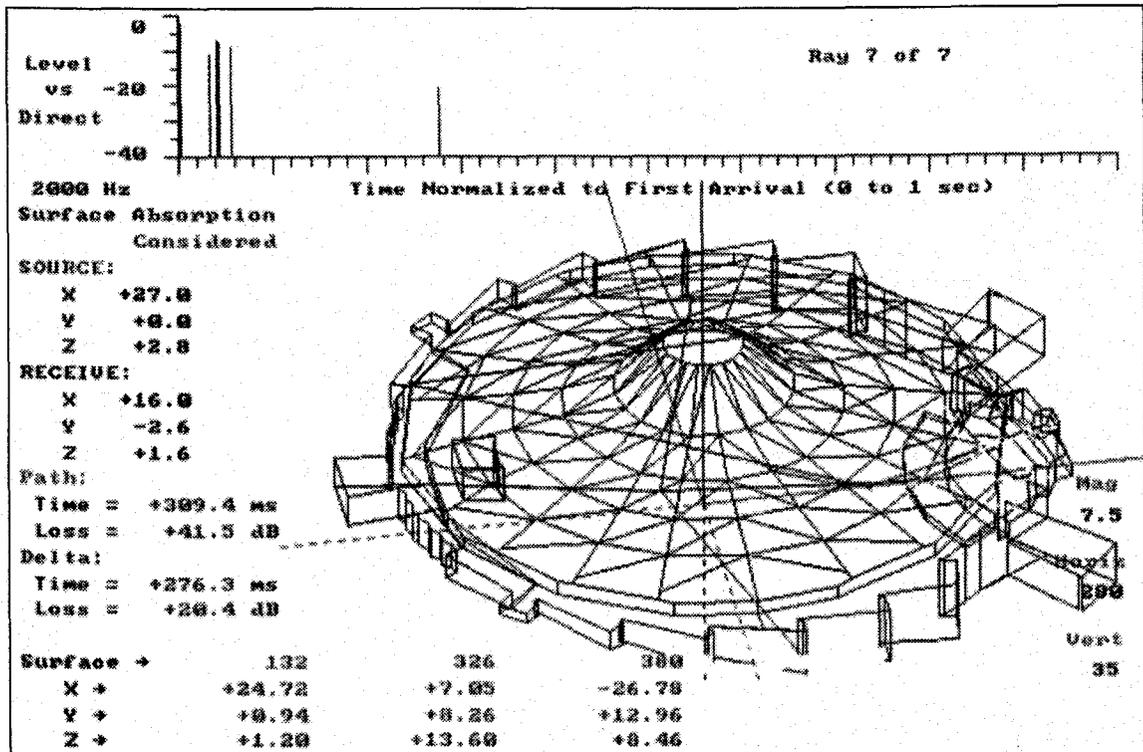


Figura 184. Trazado de rayos sonoros en punto 2, en 2.000 Hz.

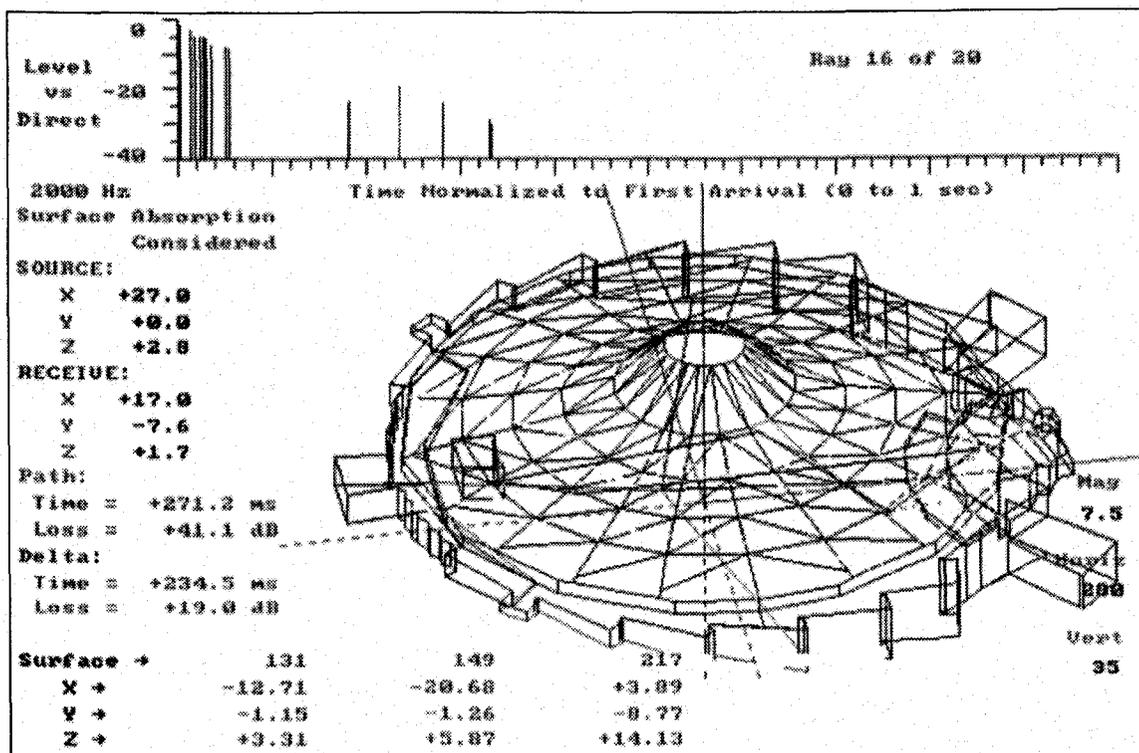


Figura 185. Trazado de rayos sonoros en punto 3, en 2.000 Hz.

Es de observar que la intensidad de las reflexiones atrasadas disminuiría, gracias a la absorción introducida con la membrana porosa, llegando con una atenuación de 20 dB, aproximadamente, no perjudicando consecuentemente la inteligibilidad del sonido.

6.4. Ruido de fondo:

En el estudio acústico hecho en el Aeropuerto de Denver, USA, elaborado por Shen Milson & Wilke, Inc., N.Y., se constató que el aislamiento proporcionado por la membrana doble, aumenta sensiblemente respecto de la simple. En concreto, se encontraron valores de pérdida de transmisión de 28 dB para 4.000 Hz, 24 dB para 2.000 Hz, 19 dB para 1.000 Hz, 16 dB para 500 Hz, 11 dB para 250 Hz y 7 dB para 125 Hz, utilizando una membrana exterior de fibra de vidrio revestida con PTFE y una membrana interior de Fabrasorb.

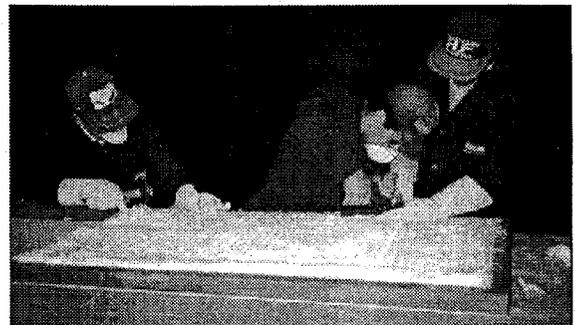
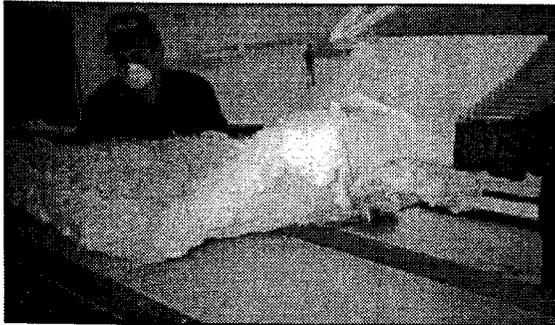
John Effenberg, Director de tecnologías de Chemical Fabrics Corporation, fabricante de Fabrasorb, también nos informa de la eficiencia en el aislamiento térmico de estas coberturas, reduciendo en 50% la pérdida de calor, respecto a la de membrana simple.

Con la aplicación de una segunda capa en la cobertura del Auditorio ciertamente tendríamos menos ruido de fondo en su interior, así como menores índices de ruido en su exterior, producidos por las actividades nocturnas.

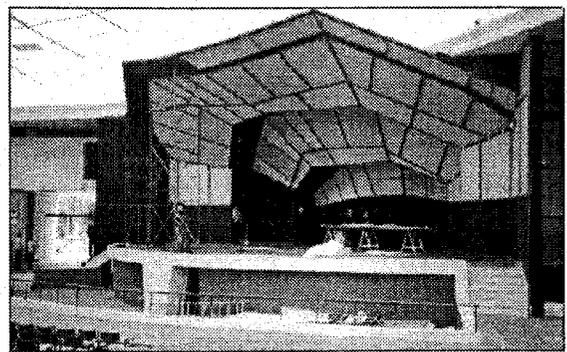
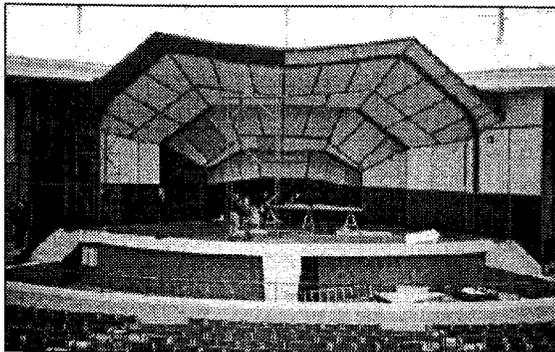
Nota: Hasta el momento en que elaboramos este estudio no se había concluido la adaptación acústica del Auditorio. Lo que sí está hecho es el revestimiento de la concha acústica. En las figuras 186 a 194 se enseñan el montaje de los paneles y la concha durante y después de la obra.



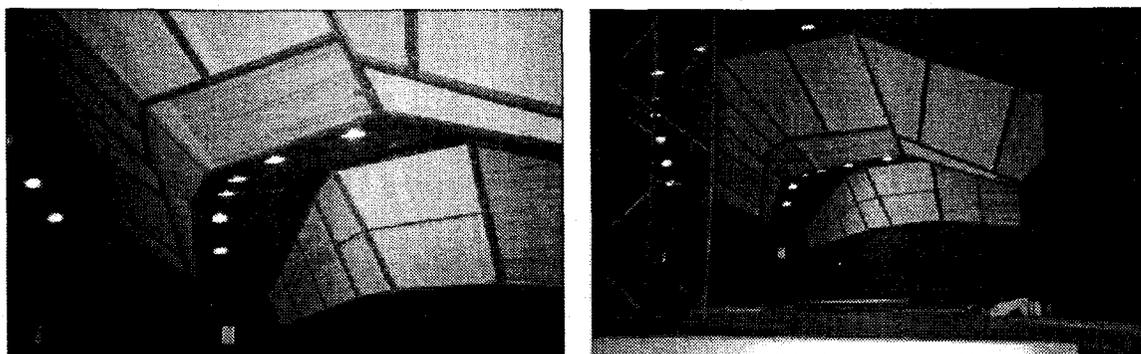
Figura 186. Vista general. Auditorio Araujo Vianna.



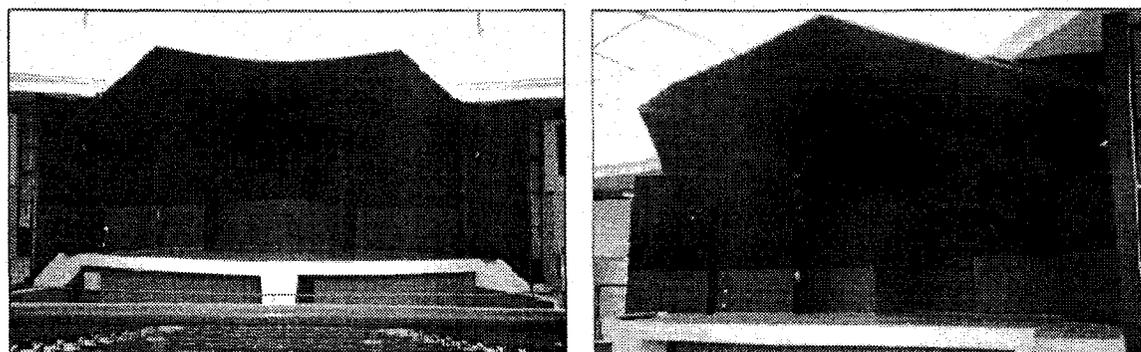
Figuras 187 y 188. Montaje de un panel absorbente. Auditorio Araujo Vianna.



Figuras 189 y 190. Vista general de la concha durante las obras. Auditorio Araujo Vianna.



Figuras 191 y 192. Vista general de la concha durante las obras. Auditorio Araujo Vianna.



Figuras 193 y 194. Vista general de la concha al final de las obras. Auditorio Araujo Vianna.

Los resultados de las mediciones del tiempo de reverberación hechas con la misma metodología y en los mismos puntos de la medición inicial, después de ejecutado el recubrimiento del hormigón de la concha por el panel absorbente de lana de vidrio se muestran en la tabla 42 y figura 195.

Tabla 42. Tiempos de reverberación medidos. Auditorio Araujo Vianna.

Tiempo de reverberación medido	Frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (Anterior)	2,09	2,58	4,14	5,31	5,33	3,67
EDT (Actual)	1,25	2,08	3,49	4,31	4,44	3,44
Diferencia EDT	0,84	0,50	0,65	1,00	0,89	0,23
T-20 (Anterior)	2,25	3,28	4,78	5,65	5,64	4,16
T-20 (Actual)	2,00	2,95	3,72	4,54	4,76	3,85
Diferencia T-20	0,25	0,33	1,06	1,11	0,88	0,31
T-30 (Anterior)	2,13	3,30	4,83	5,78	5,62	4,10
T-30 (Actual)	2,49	2,86	3,71	4,58	4,80	3,79
Diferencia T-30	-0,36	0,44	1,12	1,20	0,82	0,53
Simulación con revestimiento de la concha acústica	2,10	2,69	3,97	4,56	4,53	3,57

La diferencia de los tiempos de reverberación estimados en la simulación y medidos se debe a que hemos utilizado la fórmula clásica de Sabine¹⁰², que supone la existencia de un campo sonoro idealmente difuso homogéneo, así como una distribución uniforme de los materiales absorbentes en la sala. En la primera etapa de la adecuación acústica los paneles absorbentes están concentrados en la concha acústica, alrededor de la fuente, lo que proporcionó una mejora mayor que la esperada, principalmente en el EDT. En la frecuencia de 125 Hz hemos tenido dificultad en la medición, debido al tráfico en la avenida cercana. En las presentaciones musicales habidas después de la instalación de los paneles absorbentes los músicos se quedaron satisfechos, pues (sic) había menos reverberación en la escena, proporcionando mejores condiciones de trabajo para los artistas.

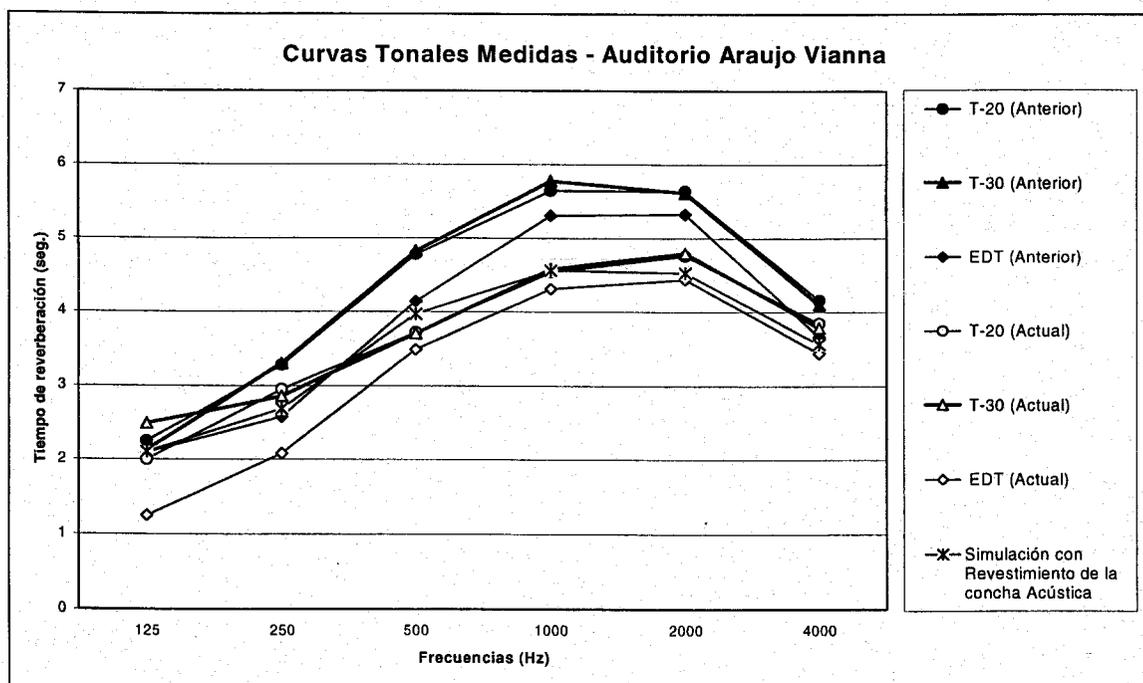


Figura 195. Tiempos de reverberación medidos. Auditorio Araujo Vianna.

¹⁰² Carrión, A. O.C. p. 365.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES. BASES PARA EL DISEÑO ACUSTICO EFECTIVO DE LOS ESPACIOS CUBIERTOS CON ESTRUCTURAS TEXTILES.

En todos los espacios cubiertos con estructuras textiles que hemos analizado, su comportamiento acústico es deficiente.

En primer lugar, por lo que se refiere a la reverberación, tal y como se ha expuesto en capítulos anteriores, se manifiestan unos tiempos de reverberación excesivos a partir de los 1.000 Hz, ya que las membranas son bastante transparentes a las bajas frecuencias, por su poca masa, y muy reflectantes a las medias y altas frecuencias. Y eso, a pesar de que, por ser recintos normalmente de un gran volumen, la absorción debida al aire encerrado es significativamente mayor para los sonidos agudos.

Los coeficientes de absorción de las membranas son difíciles de determinar con exactitud, pero con los ensayos y mediciones que hemos realizado y presentado en este trabajo, podemos establecer un comportamiento típico de las cubiertas textiles.

Los ensayos llevados a cabo, presentados en este trabajo, nos muestran que hay poca alteración en la absorción aplicando diferentes tensiones a la membrana. Las mediciones efectuadas *in situ* lo atestigua, pues en los espacios donde se realizaron los análisis acústicos el textil estaba sometido a esfuerzos muy variados, desde las altas tensiones en el Palenque y en el Auditorio Araujo Vianna, hasta las tensiones mínimas para mantener el aspecto de la cubierta, en el pabellón Ambiente-92 y en la Piscina

San Pablo. Sin embargo, todos estos espacios presentan un comportamiento acústico similar.

Los elevados tiempos de reverberación a medias y, sobre todo, altas frecuencias, perjudican la inteligibilidad de la palabra en esos espacios: en todos ellos resultó ser “*mala*” la capacidad de los oyentes para entender mensajes orales, pronunciados por un conferenciante.

Por consiguiente, un proyecto de acondicionamiento acústico de estos espacios, en general, debería tener como objetivo proporcionar absorción a esas frecuencias, lo cual puede lograrse por medio del diseño de los mismos, o por la presencia de absorbentes como pueden ser los propios materiales de revestimientos y acabados.

Afortunadamente, la absorción a esas frecuencias es la más fácil de conseguir en la práctica. Buenos absorbentes de dichos sonidos, presentes en casi todos los espacios artísticos, son los cortinajes y colgaduras. También las sillas o butacas bien acolchadas. Moquetas, alfombras y tapices son materiales porosos, idóneos para proporcionar absorción a dichas frecuencias, que pueden ser utilizados como revestimientos de suelos o paredes.

Un modo singular, propio de estos espacios, de lograr una significativa absorción sonora es precisamente por medio de la cubierta, dada la importancia que adquiere esta superficie por su tamaño. Bastaría emplear una membrana de doble capa, siendo la interior porosa y permeable. Esta solución se ha utilizado en la Terminal Jeppeson del Aeropuerto Internacional de Denver, EE.UU., y se está empleando en el Auditorio Araujo Vianna, en

Porto Alegre, Brasil, de acuerdo al proyecto de acondicionamiento acústico que he elaborado, y que se ha expuesto en capítulos anteriores.

Otro factor determinante del tiempo de reverberación es el volumen de aire encerrado en el espacio. Cuanto mayor el volumen, más elevado es el tiempo de reverberación - en relación directa, según la fórmula de Sabine -. Como ejemplo podemos citar las grandes catedrales, con enormes volúmenes de aire y poca absorción, lo que produce valores altos de los tiempos de reverberación y la consecuente pérdida de la inteligibilidad. Debemos, por tanto, controlar el volumen interior de los espacios proyectados.

En segundo lugar, la distribución sonora en los espacios estudiados tampoco ha sido buena. Debido a las características absorbentes de las membranas, y en concreto a su selectividad según la frecuencia, no se produce una distribución ecualizada en esos espacios, habiendo un exceso de reflexiones a dichas frecuencias. Esas reflexiones, excesivamente retrasadas y poco amortiguadas, pueden incluso producir eco, perjudicando aún más la inteligibilidad de las palabras.

Los estudios de acústica geométrica, desarrollados con ayuda de modelos informáticos, nos muestran los caminos seguidos por los rayos sonoros, según la posición de la fuente sonora, asumiendo que esas reflexiones son del tipo especular, lo cual, como bien sabemos, dista de ser cierto para membranas, que producirían una mayor difusión de lo indicado por esos modelos.

El resultado de esos estudios muestra que para muchos de los largos recorridos la membrana ofrece una superficie poco

absorbente y tiene además una geometría que refleja el sonido de manera inadecuada, dando lugar a indeseables reflexiones fuertes y retrasadas. La introducción de una segunda capa con propiedades absorbentes, tras una capa interior porosa y permeable, tal y como hemos expuesto anteriormente, ayudaría a reducir el efecto nocivo de estas reflexiones.

Bouillart¹⁰³, en el *Étude Acoustique des Piscines Couvertes*, nos llama la atención sobre la influencia de la forma, afirmando que las paredes de las piscinas cubiertas deben ser lo más difusoras posibles, con lados no paralelos, con numerosas colgaduras y adornos, proponiendo superficies reflectantes convexas y no cóncavas.

Las formas más usuales de las cubiertas textiles sostenidas por una estructura tensionada son las “hypar”, en forma de silla de montar, los conos cóncavos y el textil estirado sobre arcos metálicos, generando una superficie anticlástica¹⁰⁴. Pero las superficies anticlásticas no son cóncavas ni convexas. A este problema debemos dedicar especial atención a la hora de construir los modelos para hacer las simulaciones. Debemos determinar los planos tangentes a la superficie del textil, en los puntos donde el rayo sonoro toca la membrana, para poder establecer los ángulos de incidencia y de reflexión.

¹⁰³ Bouillart, R. O. C. p.113.

¹⁰⁴ Brown, P.L.D. Fabric Structures –Concepts, feasibility, design. *Innovation And Economics In Building Conference*. Brisbane, Australia, 1991. P. 80.

En tercer y último lugar está el problema del control del ruido. Los niveles de ruido de fondo medidos, así como los ensayos de transmisión de ruido rosa realizados, testifican que uno de los grandes atractivos de estas estructuras, su ligereza, produce un reducido aislamiento acústico. Este es otro factor que contribuye a reducir los índices de inteligibilidad de las palabras.

El principal modo de luchar contra este aspecto negativo del control ambiental es la prevención. Mediante decisiones propias de la planificación urbana, podemos alejar de estos recintos las fuentes de ruido perturbadoras, como el tráfico de vehículos, además de ubicar estos espacios cubiertos con estructuras textiles en sitios donde no produzcan incomodidad a los vecinos, ya que las actividades culturales (por ejemplo, musicales) que tengan lugar allí pueden ser, a su vez, originarias de ruido para los inmuebles adyacentes.

La utilización de barreras acústicas, ejecutadas con vegetación o materiales adecuados (son numerosas las patentes comercializadas en el mercado) pueden ayudar a mitigar sensiblemente los efectos del ruido.

BIBLIOGRAFIA

- BARRON, M., LEE, J. Energy relations in concert auditoriums. *Journal of The Acoustical Society of America*, 84 (2) Agosto. 1988.
- BERANEK, L. L. *Acoustics*. Nueva York: Acoustical Society of America, 1993. ISBN: 0-88318-494-X. P. 425.
- BERANEK, L. L. Concert hall acoustics - 1992. *Journal Acoustical Society of America*, vol.92, nº 1, julio. 1992.
- BERGER, H. *Light Structures - Structures of Light: the art and engineering of tensile architecture*. Suiza: Birkhäuser, Basel, 1996.
- BERGER, H. Light Structures, Structures of Light: form and function of tensile architecture. Actas de la Conferencia Internacional "Engineering A New Architecture". Dinamarca: Aarhus School of Architecture, 1998.
- BERGER, H. New Developments in Lightweight Dome Structures. Actas del congreso "IASS-MSU Symposium on Domes Structures". Istambul: 1988.
- BERGER, H. y GEIGER, D. Team makes fabric tension roofs take off. *Engineering News*, noviembre, 1977
- BOUILLART, R. Introduction a l'étude acoustique des piscines couvertes. *Actas del l'Institute Technique du Batiment et des Travaux Publics*, marzo, nº 348. París: 1977
- BROWN, P.L.D. Fabric structures – Concepts, feasibility, design. Actas del Congreso "Innovation and Economics in Buiding

Conference, National Conference Publication – Institution of Engineers”. Brisbane, Australia: 1991.

BUBNER, E. Akustische eigenschaften von technischen membranen. *Arcus*, Alemania, 1986.

BUBNER, E. Resumen histórico. In OTTO, F. et al. *IL 14 / Arquitectura adaptable*. Barcelona: Gustavo Gili, 1979.

BURKHARDT, B. La tienda histórica. In OTTO, F. et al. *IL 14 / Arquitectura adaptable*. Barcelona: Gustavo Gili, 1979.

CARRIÓN ISBERT, A. *Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 1998.

CREMER, L. y MÜLLER, H. A . *Priciples and Applications of Room Acoustics*. Traducción de Scultz, T. Londres: Applied Science Publishers LTD. , ISBN 0-85334-113-3. P. 610.

CROOME, D. Acoustical design for flexible membrane structures. Actas del congreso “Light Weight Structure In Architecture”. Sidney, Australia: 1986.

DAUMAL, F. Acoustical poetry in architecture. Actas del Congreso “2nd European Conference on Architecture”. Paris, Francia: Kluwer Academic Publishers, 4-8 December, 1989.

DAVIES, C. Fabric Structures, *RIBAJ* , octubre, 1985.

DILLEHEY, T.D. A late ice age settlement in Southern Chile. *Scientific American*, nº 251-4, 1984.

DODD, G. Active or passive acoustics for auditoria? -a preliminary survey. Actas del "2nd European Conference on Architecture", Paris, Francia: Kluwer Academic Publishers,. 4-8 Diciembre, 1989.

EGAN, M. D. *Architectural Acoustics*. Nueva York: Mc Graw- Hill, 1988. P.96. ISBN: 0-07-019111-5.

EFFENBERGER, J. Fabrasorb thermo-acoustical fabrics. Informe facilitado por Birdair, Inc., EE. UU. en las III Jornadas Técnicas Sobre Arquitectura Textil, Universidad Politécnica de Madrid, 1995.

ENGEL, H. *Sistemas de estructuras*. Madrid: Blume, 1970.

ESCRIG F. & PEREZ VALCARCEL, J. Conceptos básicos para el diseño y análisis de estructuras ligeras tensadas. *Revista de Edificación*, nº 6, junio 1989, y nº 8, diciembre 1990.

FAULKNER-BROWN, H. 1983. Concert grand. *Architectural Journal*, 23 febrero, 1983.

GERO, J.S. Behavior of cable network structures. Actas del Congreso "Second International Conference on Space Structures". Inglaterra: Universidad de Surrey, 1975.

GERO, J.S. The preliminary design of cable network structures. *IASS*, nº 69, diciembre, 1976.

HANNA, Y.I. y KANDIL, M.M. Sound absorbing double curtains from local textile materials. *Applied Acoustics*, nº 34, 1991.

HOUGAST, T., STEENEKEN, H. J. M. RASTI: A Toll for Evaluating Auditoria. *Technical Review*, Brüel&Kjaer, nº 3, 1985.

HOUGAST, T., STEENEKEN, H. J. M. The modulation Transfer Function in Room Acoustics. *Technical Review*, Brüel&Kjaer, nº 3, 1985.

HUNT, F.V. *Origins in acoustics*. Nueva York: Acoustical Society of America, 1992.

ISLER, H. Typologie und technik der modernen schalen. *Werk, Bauen + Wohnen*, nº 12. Alemania: 1983.

FOLMER - JOHNSON, T. *Oscilações, ondas acústicas*. São Paulo: 1963.

KNUDSEN, V.O. The measurement of sound-absorption in a room. *Phil. Mag.*, S. 7, vol.5, nº 33, junio, 1928.

Koit Konstruktive Membranen. Informes Técnicos: Rimsting, Alemania, 1993.

KRONENBURG, R. Tensile Architecture. *Architectural Design Profile*, nº 117. Londres: Academy Editions, 1995. ISBN: 185 490 251 2 (uk).

KUTTRUFF, H. *Room Acoustics*. 3ª edición. Londres: Elsevier Science Publisher, 1991. ISBN: 1 85166 576 5.

LAWRENCE, A.B. *Architectural Acoustics*. Londres: Applied Science Publishers Ltd., 1970.

LLINARES G., J. y LLOPIS R., A. *Acústica arquitectónica*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 1987.

LLORENS D., J. y SOLDEVILA B., A. Características arquitectónicas de las construcciones textiles. *Informes de la Construcción*, vol.43, nº 413. Madri:1991.

LLORENS D., J. y SOLDEVILA B., A. Construcciones de lona. *O.N. Diseño*, nº 62. Madri: 1985.

LLORENS D., J. y SOLDEVILA B., A. Festa de Envelat. Exposición en Parets del Vallés, Cataluña: 1985.

LYONS, R. Sound Insulation of Acoustic Louvres and Open Screen. *Building Acoustics*, V.1(2), 1994.

MACAULAY, D. *City*. 1974. Edición brasileña: *Construção de uma cidade romana*. São Paulo: Martins Fontes, 1989.

MONJO CARRIÓ, J. La arquitectura textil. *Informes de la Construcción*, vol. 36, nº 367. Madri: 1985.

MOTONOBU, N. Development in fabric structures in Japan and in the United States. *Buletín de la "International Association for Shell and Spatial Structures"*, vol.33, nº 107, diciembre, 1991.

OECHSLIN, W. y BUSCHOW, A. *Architecture de Fête. L'architecte metteur en scène*. Traducción del alemán por Brausch, M. Bruselas: Pierre Mardaga, 1984. ISBN 2-87009-283-0.

OTTO, F. Arquitectura Minimalista. Actas del I Encuentro Internacional – Estructuras Ligeras Para Grandes Luces. Sevilla: Ed. Fundación Emilio Pérez Piñero, 1992.

OTTO, F. et al. *IL 14 / Arquitectura Adaptable*. Barcelona: Gustavo Gili, 1979.

PÉREZ M., J. *Compendio práctico de acústica aplicada*. Barcelona: Labor, 1969.

PIZZUTTI et al. Desenvolvimento de absorvedores sonoros alternativos para aplicação em ambientes de grandes dimensões em correções acústicas temporárias. Actas del I Congreso Iberoamericano de Acústica, Florianópolis, Brasil, 1998. P. 455.

PIZZUTTI et al. Estudo de cortinas leves na isolação acústica de ambientes. Actas del I Congreso Iberoamericano de Acústica. Florianópolis, Brasil: 1998.

PRADA P., J.M. El parasol de la lluvia, cubierta para el Palenque. *Arquitectura & Vida*, nº 20, 1989.

PRADA P., J.M. Carpas para auditorio en Pinar del Rey. *Informes de la Construcción*, nº 38, mayo. Madrid: 1986.

RAMELLI, A.C. *Edifici per gli spettacoli*. Milán: Antonio Vallardi Editore, 1948.

RAYLEIGH, Lord (J.W.Strut) *The theory of sound*. Londres: Macmillan, 1984, vol. 2. § 287. In BARRON, M. *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Londres: E & FM Spon, 1993. P. 5. ISBN: 0 419 17710 8

RECUERO, M. y GIL, C. *Acústica arquitectónica*. Madrid: Paraninfo, 1992. ISBN: 84 604 025 1.

RUDORF-WITRIN, W. New ways: textile architecture at the open-air theatre Tecklenburg. Actas del Congreso "Internationales Techtexil Symposium", comunicación 426. Frankfurt, Alemania: 1993.

SCHRÖEDER, M. R. New Method of Measuring Reverberation Time. *Journal of Acoustic Society of America*, nº 37, 1965.

SENDRA SALAS, J.J. Acústica gráfica: un instrumento eficaz para la acústica arquitectónica. *Revista de la Edificación*, nº 11, mayo. Madrid: 1992.

SENDRA SALAS, J.J. y NAVARRO CASAS, J. *La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias del Paleocristiano al Tardobarroco*. Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, ETSA, Universidad de Sevilla, 1997.

SENDRA, J. et al. *El problema de las condiciones acústicas en las iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación*. Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, E.T.S.A. Universidad de Sevilla, 1997.

Sevilla Universal, nº 20, noviembre , 1991.

SILVA, M. *Acústica de edificios* . Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993.

SOBEK, W. et al. Tensile Membrane Structures. Actas del "IASS-Congress". Madrid: 1989.

STETTNER A. & GREENBERG, D.P. Computer graphics visualization for acoustic simulation. *Computer Graphics*, vol.23, nº 3, julio, 1989.

WEISSE, K. *Acústica de locales*. Barcelona: Ed. Gustavo Gili, 1956.

WINTER, J. Mound Stand, Lord's Cricket Ground, . *Architectural Journal*, Septiembre. Londres: 1987.

ZAMARREÑO T. & ALGABA, J. Medida de la impedancia acústica específica para incidencia normal. Actas del congreso Tecniacustica-93, Valladolid:1993.

ZAMARREÑO, T., ALGABA, J., MAYA, F. & BALLESTEROS, J. E., Acústica de estructuras textiles tensionadas. Actas del Congreso Tecniacustica-93. Valladolid: 1993.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1- Tiendas en la antigüedad. Reconstrucción de una tienda e los hallazgos de malta, en Siberia junto a Irkutsk. Estas tiendas, que utilizaran cazadores del Paleolítico en las tundras durante la época glaciaria hace unos 20000 años, son parecidas a las de tipo indio de Norteamérica. De *Bild der Wissenschaft*. n. 11 – 13, Stuttgart: 1973..... 12
- Figura 2- Tiendas en la antigüedad. En relieves vemos las campañas guerreras de Senaquerib (705 – 681 a. J.). La representación de la tienda del rey asirio aparece en un campamento y guarda analogías con los tabernáculos judíos. Se reconocen claramente los apoyos y la piel tensada sobre ellos. De LAYARD, A. H. *Monuments of Niniveh*. 1953..... 12
- Figura 3-Tiendas en la antigüedad. Tiendas militares romanas representadas en un relieve de la columna de Marco (siglo II), de Roma. Las tiendas son de barras con lonas tensadas. De CICHORIOS, Conrad. *Die Reliefs der Trajansaule*. Berlin: 1900. 12
- Figura. 4-Calle de Sevilla, junio de 2.000. * 13
- Figura 5- Planta Teatro de Marcello. De RAMELLI, A. *Edífice Per Gli Spettacoli*. Italia: Antonio Vallardi Editore, 1948..... 14
- Figura 6- Sistema de tensado del velarium. Teatro Marcello. De RAMELLI, A. *Edífice Per Gli Spettacoli*. Italia: Antonio Vallardi Editore, 1948..... 14

- Figura 7-Velum del teatro y anfiteatro romanos. De MACAULEY, David. *Construção de uma Cidade Romana*. Traducción Cirene de Castro. Brasil: Editora Martins Fontes: 1989. Título original: City.. 14
- Figura 8- Teatro de Aspendus, Turquía (planta). De IZENOUR, G. *Theater Design*. Nueva York: Mc Graw Hill Book Company, 1997.15
- Figura 9- Teatro de Aspendus, Turquía (sección longitudinal en perspectiva). De IZENOUR, G. *Theater Design*. Nueva York: Mc Graw Hill Book Company, 1997..... 15
- Figura 10- Jaima de Beduinos en la Expo 92, Sevilla Berber Tent. De KRONENBURG, R. *Tensile Architecture. Architectural Design Profile*. Londres: Academy Editions,1995. N. 117. ISBN 185 490 251 2 (UK)..... 17
- Figura 11-Tienda de banquetes de Enrique VIII en Calais. Banqueting house of Henry VIII, Calais, 1520, utilizing maritime construction techniques. De KRONENBURG, R. *Tensile Architecture. Architectural Design Profile*. Londres: Academy Editions,1995. N. 117. ISBN 185 490 251 2 (UK)..... 18
- Figura. 12- The Cutty Sark, 1869, used 9,997 square meters of sail to develop 2,259 horse power through a system of compressive (masts), tension (rigging) and pneumatic (sails) forces. De KRONENBURG, R. *Tensile Architecture. Architectural Design Profile*. Londres: Academy Editions. 1995. N. 117. ISBN 185 490 251 2 (UK)..... 18

Figura 13- Transformación del patio interior del Ayuntamiento de Paris,1739. De Transformation de la cour intérieure de l'Hôtel de Ville de Paris à l'occasion du bal donné en l'honneur du mariage de Madame Louise –Elizabeth de France et Dom Philippe Infant d'Espagne le 30/ 31 août 1739. In : « Descriptions des Festes....., « , Paris 1740. De OESHSLIN, W. BUSCHOW, A. *Architecture de Fête*. Bruselas: edición Pierre Mardaga, 1984. ISBN 3-7757- 0203-2..... 19

Figura 14- Transformación del patio interior del Ayuntamiento de Paris, 1745. Transformation de la cour intérieure de l'Hotel de Ville de Paris à l'occasion du bal donné en l'honneur du mariage du Dauphin le 28 février 1745. In : « Fêtes publique données par la ville de Paris à l'occasion du mariage de Mgr. Le Dauphin le 23 et 26 février 1745 ». Paris. De OESHSLIN, W. BUSCHOW, A. *Architecture de Fête*, Bruselas: edición Pierre Mardaga, 1984. ISBN: 3-7757-0203-2..... 20

Figura 15-Entrada de la pareja imperial en Milán, en 1838. De OESHSLIN, W. BUSCHOW, A. *Architecture de Fête*. Bruselas: edición Pierre Mardaga, 1984. ISBN: 3-7757-0203-2..... 20

Figura 16- Decoraciones fúnebres en Notre-Dame de Paris, 1687. Emmanuel Rodrigues dos Santos, “castrum doloris” , pour Jean V du Portugal dans S. Antônio dei Portoghesi, Rome, 1751. Gravure de Giusepe Vasi. In “Exequias Feitas em Roma A Majestade Fidelíssima So Senhor Rey Dom João V.....” Roma 1752. De OESHSLIN, W. BUSCHOW, A. *Architecture de Fête*, Bruselas: edición Pierre Mardaga, 1984. ISBN 3-7757- 0203-2.... 21

- Figura 17-Decoraciones fúnebres en Notre-Dame de Paris, 1746. Le Noir / Frères Soldtz , “Pompe Funèbre” pour Philippe V. Roy d’Espagne, dans Notre Dame, Paris, 15 decembre 1746. Gravure de Charles Nicolas Cochin fills in : ‘Recueil des Festes, Feux d’Artifice, et Pompes Funébres, ordonnés pour le Roi..’ Paris, 1756. De OESHSLIN, W. BUSCHOW, A. *Architecture de Fête*. Bruselas: edición Pierre Mardaga, 1984. ISBN 3-7757- 0203-2..... 21
- Figura 18- Palacio de Cristal, Londres, 1854. De FORSYTH, M. *Buildings for Music. The Architect, the Musician, and the Listener from the Seventeenth Century to the Present Day*..... 22
- Figura 19-Palacio de Cristal, festival Handel, Londres, 1882. The Handel Festival at the Crystal Palace, 1859: view of the platform. (Mansell Collection, London). De FORSYTH, M. *Buildings for music. The Architect, the Musician, and the Listener from the Seventeenth Century to the Present Day*..... 24
- Figura 20- Harlequin Circus at Liverpool, 1995. De KRONENBURG, R. *Tensile Architecture. Architectural Design Profile*. Londres: Academy Editions, 1995. N. 117. ISBN 185 490 251 2 (UK)..... 25
- Figura 21- Colegio La Verne, California, USA. (Horst Berger). Tension Structures with steel cables carrying the load, such as this La Verne College drama lab and Campus Center. Du Pont – informe comercial..... 27
- Figura 22-Exposición Federal de Jardines de Kassel, 1955. (Frei Otto). Dance Pavilion, Federal Garden Exhibition, 1957. De KRONENBURG, R. *Tensile Architecture. Architectural Design*

- Profile*. Londres: Academy Editions, 1995. N. 117. ISBN 185 490 251 2 (UK)..... 28
- Figura 23- Expo 70, Osaka, Japón. De KRONENBURG, R. *Tensile Architecture. Architectural Design Profile*. Londres: Academy Editions, 1995. N. 117. ISBN 185 490 251 2 (UK)..... 29
- Figura 24- Aeropuerto de Denver, Estados Unidos. De BERGER, H. *Light Structures – structures of light: The art and engineering of tensile structures*. Berlin: Birkhäuser, 1996. ISBN: 3-7643-5352-X (BASEL) ISBN: 0-8176-5352-X (BOSTON)..... 29
- Figura 25 - Arena de Nimes, Francia. De SCHLAICH, R. BERGMANN, R. SOBEK, W. *Invited Lecture in IASS-Congress. Tensile Membrane Structures*. Madrid: septiembre, 1989..... 30
- Figura 26- Concha acústica, Auditorio Araujo Vianna, Porto Alegre, Brasil. * 33
- Figura 27-Focalizaciones y reflexiones tangenciales en una carpa hinchable. De CROOME, D. *Acoustical design for flexible membrane structures*. Actas del congreso "Light Weight Structures in Architecture. Sidney, Australia: 1986. 35
- Figura 28- Reflexiones en techos cóncavos. De BARRON, M. *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Inglaterra: E & FN SPON, 1993. ISBN 0-419-17710-8..... 36
- Figura 29-Reflexiones en techo convexo. De BARRON, M. *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Inglaterra: E & FN SPON, 1993. ISBN 0-419-17710-8..... 36

- Figura 30- Atlanta's Georgia Dome, Estados Unidos. Fotografía de Robert Reck. De Birdair, informe comercial. Birdair, Inc. – 65 Lawrence Bell Drive – Amrest, Nueva York 14221 – USA..... 37
- Figura 31 – Superficies sinclásticas. De SCHLAICH, R. BERGMANN, R. SOBEK, W. *Invited Lecture in IASS-Congress. Tensile Membrane Structures*. Madrid: septiembre, 1989..... 37
- Figura 32- Superficies anticlásticas. De SCHLAICH, R. BERGMANN, R. SOBEK, W. *Invited Lecture in IASS-Congress. Tensile Membrane Structures*. Madrid: septiembre, 1989..... 37
- Figura 33- Pabellón Ambiente-92, en la EXPO-92. *..... 38
- Figura 34- Apeadero del AVE, en la EXPO – 92. *..... 39
- Figura 35- Bandas acústicas absorbentes. Pontiac Silver Dome, USA. De Du Pont – Informe Publicitario..... 40
- Figura 36- Universidad de Florida, Gainesville. De *Membrane Structures – The Design Process*. Vinzenz Sedlack .1995..... 42
- Figura 37- Sección esquemática de una tienda Bullok's, San José, California. De "Team makes fabric tension roofs take off". *Engineering News. ENR. Vol 199. 1997*..... 43
- Figura 38- Vista exterior, Bullok's, S. Mateo. BERGER, H. De *Light Structures- structures of light: the art and engineering of Tensile Architecture*. Berlin: 1996. ISBN: 3-7643-5352-X (Basel). ISBN: 0-8176-5352-X (Boston)..... 44
- Figura 39 - Vista interior, Bollock's, S. Mateo. BERGER, H. De *Light Structures - Structures of Light: the art and engineering of Tensile*

Architecture. Berlin: 1996. ISBN: 3-7643-5352-X (Basel). ISBN: 0-8176-5352-X (Boston)..... 44

Figura 40 – Shoreline Amphitheater. BERGER, H. De *Light Structures - Structures of Light: the art and engineering of Tensile Architecture*. Berlin: 1996. ISBN: 3-7643-5352-X (Basel). ISBN: 0-8176-5352-X (Boston)..... 44

Figura. 41- Cynthia Woods Michel Center. BERGER, H. De *Light Structures - Structures of Light: the art and engineering of Tensile Architecture*. Berlin: 1996. ISBN: 3-7643-5352-X (Basel). ISBN: 0-8176-5352-X (Boston)..... 44

Figura 42, 43- Valores de α para tejido de algodón poroso y no poroso. HANNA, Y. KANDIL, M. Sound absorbing double curtains from local textile materials. *Applied Acoustics*. , nº 34, Pp. 281-291... .. 47

Figura 44, 45- Barreras acústicas permanentes y temporales. De BUBNER, E. Akustische eigenschaften von technischen membranen. *Arcus*, Alemania: 1986. 49

Figura 46- Paneles reflectores en Tanglewood. Perspective view of the stage end of the Tanglewood Music Shed, Lenox, Massachusetts, showing the orchestra enclosure installed in 1959. De BERANEK, L. *Concert Hall Acoustics - 1992*. Massachusetts: 1992. PACS numbers: 43.10. Ln,43.55..... 50

Figura 47- Cubierta del escenario para los festivales de Canet de Mar (Barcelona) – 1975. Donada, Llorens y Sodevila, arqtos. De Construcciones de Lona. *O.N. Diseño*, nº 62, 1985. Pp. 11-32..... 51

Figura 48- Tiempos de reverberación óptimos para 500Hz, Pérez Miñana.....	59
Figura 49- Tiempos óptimos de reverberación para 500Hz, Beranek.....	60
Figura 50- Tiempos óptimos de reverberación para la media entre 500 y 1.000 Hz, Cremer.....	61
Figura 51 – Valores teóricos de coeficientes de absorción para membrana de $m=0,9 \text{ kg/m}^2$	75
Figura 52 – Tubo de ondas estacionarias.....	75
Figura 53 – Bastidor de la muestra *	76
Figura 54- Ensayo con el tubo de Kundt *	76
Figura 55 – Coeficientes de absorción obtenidos con el tubo de Kundt.....	77
Figura 56 – Modelo montado en la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica del Centro Nacional de Protección de Sevilla *	79
Figura 57 – Ensayo de tensión / deformación en probetas de 5 cm de ancho. E.T.S.A. Sevilla *	80
Figura 58 – Detalle del modelo, con galgas extensiométricas en los sensores. E.T.S.A. Sevilla *	80
Figura 59 – Gráfica tensión / deformación.....	81
Figura 60 – Coeficientes de absorción de la muestra, calculados a partir de T 20.....	82

Figura 61- Coeficientes de absorción de la muestra calculados a partir de T 30.....	82
Figura 62 – Ficha del ensayo de absorción de tubos cilíndricos cerrados con membrana de PVC.....	84
Figura 63 – Ficha de ensayo de transmisión en paneles flexibles de PVC.....	85
Figura 64 – Ficha del ensayo de absorción sonora de la membrana prototipo en el suelo.....	86
Figura 65 – Ficha del ensayo de absorción sonora de la membrana prototipo suspendida 34 cm del suelo.....	87
Figura 66 – Ensayo de absorción en cámara reverberante *	88
Figura 67 – Posición de la puerta *	88
Figura 68 – Ficha del ensayo de absorción de la membrana frente a la puerta.....	89
Figura 69 – Ensayo de transmisión en el LATA. *	90
Figura 70 – Valores del ensayo de transmisión de la membrana...	91
Figura 71 – Valores de $D_n T$ (ISO 140) medidos en el segundo ensayo de transmisión.....	92
Figura 72 – Valores de L1-L2 medidos en el segundo ensayo de transmisión.....	92
Figura 73 – Coeficientes de absorción teóricos y obtenidos en el segundo ensayo.....	95

Figura 74 – Equipo utilizado para medir el índice RASTI.....	99
Figura 75 – Vista aérea, Palenque. De <i>Sevilla</i> , publicación de la Fundación Caja de Arquitectos, p. 15.	106
Figura 76 y 77- Vista de las gradas y del escenario, Palenque.*.	107
Figura 78 – Planta del Palenque.....	107
Figura 79 – Perspectiva sin la cubierta. Palenque.....	108
Figura 80- Sección longitudinal. Palenque.....	108
Figura 81 – Vista exterior, Palenque. De <i>Sevilla Universal</i> . Sevilla: noviembre 1991. N. 20. Fotografía de F. Alda.....	109
Figura 82 – Vista interior, Palenque. De <i>Sevilla Universal</i> . Sevilla: noviembre 1991. N. 20. Fotografía de E. San Martín.....	109
Figura 83 – Vista Exterior, Palenque. De invitación para la inauguración del Palenque, EXPO-92.....	110
Figura 84 – Vista Nocturna exterior, Palenque. De <i>Sevilla Universal</i> . Sevilla: noviembre 1991. Fotografía de A. Elias.	111
Figura 85 – Vista del escenario, estanques y gradas, Palenque. *.	111
Figura 86 – Detalle del aire acondicionado en gradas y escenario, Palenque. *.....	112
Figura 87 – Esquema en planta y puntos de medida en el Palenque.	112
Figura 88 – Curvas tonales en tercios de octava del Palenque...	113

Figura 89 – Curva tonal medida y óptimas del Palenque.....	114
Figura 90 – Distribución sonora en tercios de octava, Palenque.	115
Figura 91 – Coeficientes de absorción calculados para la membrana del Palenque.....	117
Figura 92 y 93 – Modelo parcial del Palenque, con trayectoria del rayo directo y reflejado.....	118
Figura 94 – Vista exterior Apeadero del AVE. *.....	119
Figura 95 – Vista interior del Apeadero del Ave. *.....	119
Figura 96 – Croquis de un módulo de la cubierta del Apeadero del AVE.....	120
Figura 97 – Vista de la cubierta. Apeadero del AVE. *.....	120
Figura 98 – Croquis (alzado) de la estructura. Apeadero del AVE.....	121
Figura 99 – Croquis (planta) de la estructura. Apeadero del AVE.	122
Figura 100 – Detalle de la estructura. Apeadero del AVE. *.....	123
Figura 101 – Detalle de la cubierta. Apeadero del AVE. *.....	123
Figura 102 – Esquema en planta y puntos de medida del Apeadero.....	124
Figura 103 – Curvas tonales, en tercios de octava, del Apeadero.....	124
Figura 104 – Curva tonal medida y óptimas del Apeadero, centro de octavas.....	125

Figura 105 – Espectro promedio de ruido de fondo, en tercios de octava, Apeadero.....	126
Figura 106 – Ruido de fondo y curvas NC , Apeadero.....	127
Figura 107 – Coeficientes de absorción calculados para la membrana del Apeadero.....	128
Figura 108 – Vista exterior, frente, Ambiente-92. *.....	129
Figura 109 – Vista exterior, fondos, Ambiente- 92. *.....	129
Figura 110 – Vista interior, Ambiente- 92. *.....	130
Figura 111 – Vista lateral, aire acondicionado, Ambiente-92.*.....	131
Figura 112 – Esquema en planta y puntos de medida del Ambiente-92.....	131
Figura 113 – Curvas tonales, en tercios de octava, Ambiente-92.....	132
Figura 114 – Curvas tonales medidas y óptimas, Ambiente-92... ..	133
Figura 115 - Distribución sonora en tercios de octava, Ambiente-92.....	135
Figura116 – Espectro promedio de ruido de fondo en Ambiente-92.....	136
Figura 117 – Ruido de fondo y curvas NC, Ambiente-92.....	137
Figura 118 – Coeficientes de absorción calculados para la membrana de Ambiente-92.....	139
Figura 119, 120, 121 y 122 – Modelo del Ambiente-92, con trayectoria del rayo directo y reflejado.....	142 a 144

Figura 123 – Vista Exterior. Piscina San Pablo *	144
Figura 124 - Perspectiva. Piscina San Pablo.....	145
Figura 125 – Alzado principal. Piscina San Pablo.....	145
Figura 126 – Detalle de los accesos y la estructura. Piscina San Pablo. *	146
Figura 127 – Vista interior. Piscina San Pablo. *	147
Figura 128 – Vista interior. Piscina San Pablo. *	148
Figura 129 – Acceso protegido de los vestuarios. Piscina San Pablo.....	148
Figura 130 – Esquema en planta y puntos de medida. Piscina San Pablo.....	149
Figura 131 – Curvas tonales en tercios de octava, fuente 1. Piscina San Pablo.....	149
Figura 132 – Curvas tonales en tercios de octava, fuente 2. Piscina San Pablo.....	150
Figura 133 – Curva tonal medida y óptimas en octavas. Piscina San Pablo.....	151
Figura 134 – Coeficientes de absorción calculados para la membrana de la piscina.....	153
Figura 135 – Curva representativa de la distancia máxima de inteligibilidad para voz normal y elevada en función del nivel perturbador de la inteligibilidad, NFS 31-047.....	155

Figura 136 – Modelo de la Piscina, con trayectoria del rayo directo y reflejado. P 1 – 250Hz.....	156
Figura 137 – Modelo de la Piscina, con trayectoria del rayo directo y reflejado. P 1 – 2000Hz.....	156
Figura 138 – Modelo de la Piscina, con trayectoria del rayo directo y reflejado. P 2 – 250Hz.....	157
Figura 139 – Modelo de la Piscina, con trayectoria del rayo directo y reflejado. P 2 – 2000Hz.....	157
Figura 140 – Modelo de la Piscina, con trayectoria del rayo directo y reflejado. P 3 – 250Hz.....	158
Figura 141 – Modelo de la Piscina, con trayectoria del rayo directo y reflejado. P 3 – 2000Hz.....	158
Figura 142 – Modelo de la Piscina, con trayectoria del rayo directo y reflejado. P 3 – F 2 - 250Hz.....	159
Figura 143 – Modelo de la Piscina, con trayectoria del rayo directo y reflejado. P 3 – F 2 - 2000Hz.....	159
Figura 144 – Auditorio Araujo Vianna. Porto Alegre, Brasil. <i>Viva no Sul</i> . Brasil: VE Editores .Ano 3, numero 16 , febrero 2000.....	160
Figura 145 – Alzado lateral. Auditorio Araujo Vianna.....	161
Figura 146 – Vista interior. Auditorio Araujo Vianna. *.....	162
Figura 147 – Concha Acústica. Auditorio Araujo Vianna. *.....	162
Figura 148 – Pórtico de sustentación de cubierta. Auditorio Araujo Vianna. *	163

Figura 149 – Anillo de compresión. Auditorio Araujo Vianna. *....	164
Figura 150 – Esquema en planta y puntos de medida. Auditorio Araujo Vianna.....	166
Figura 151 – Esquema en sección y puntos de medida. Auditorio A. Vianna.....	167
Figura 152 – Tiempos de reverberación medidos, T_{20} , T_{30} y EDT en octavas . Auditorio A.V.....	167
Figura 153 – Tiempos de reverberación medidos, T_{20} en octavas. Auditorio A. V.	168
Figura 154 – Tiempos de reverberación medidos, T_{30} en octavas. Auditorio A. V.	168
Figura 155 – Tiempos de reverberación medidos, EDT en octavas. Auditorio A. V.	168
Figura 156 – Curva Tonal medida y óptimos. Auditorio Araujo Vianna.	170
Figura 157 – Ruido de fondo en octavas y curvas NC. Auditorio Araujo Vianna.....	172
Figura 158 – Coeficientes de absorción de la cubierta. Araujo Vianna..	173
Figura 159 – Punto 2, $f = 2.000$ Hz.....	176
Figura 160 – Punto3, $f = 2.000$ Hz.....	177
Figura 161 – Punto 4, $f = 2.000$ Hz.....	177

Figura 162 - Punto 5, $f = 2.000$ Hz.....	178
Figura 163 – Punto 6, $f = 2.000$ Hz, rayo 5.	178
Figura 164 – Punto 6, $f = 2.000$ Hz, rayo 25.	179
Figura 165 – Punto 7, $f = 2.000$ Hz.....	180
Figura 166 – Punto 8, $f = 2.000$ Hz.....	180
Figura 167 – Punto 9, $f = 2.000$ Hz.....	181
Figura 168 – Punto 10, $f = 2.000$ Hz.....	181
Figura 169 – Tiempos de reverberación medidos.	184
Figura 170. Inteligibilidad del Ambiente-92, Piscina San Pablo y Auditorio Araujo Vianna.	186
Figura 171. Ruido de fondo de tres espacios cubiertos con textiles y curvas NC.....	188
Figura 172. Coeficientes de absorción calculados de los espacios estudiados.....	189
Figura 173. Esquema en planta y puntos de medida. Auditorio Araujo Vianna.....	193
Figura 174 Tiempos de reverberación medidos, óptimos y estimados en octavas. Auditorio A.V.....	197
Figura 175. Fabrasorb I.....	198
Figura 176. Tejido ITM 4400.....	198

Figuras 177 y 178. Ensayo de absorción, textil ITM. Laboratorio Termoacustica de U.F.S.M.....	199
Figura 179. Coeficientes de absorción membrana ITM 4.400.....	200
Figura 180. Detalle paneles absorbentes.....	201
Figura 181. Tiempos óptimos de reverberación, medidos y estimados. Auditorio Araujo Vianna.....	204
Figura 182. Inteligibilidad a 500 Hertz.....	206
Figura 183. Inteligibilidad a 2.000 Hertz.....	206
Figura 184. Trazado de rayos sonoros en punto 2, en 2.000 Hz.	207
Figura 185. Trazado de rayos sonoros en punto 3, en 2.000 Hz.	207
Figura 186. Vista general. Auditorio Araujo Vianna. *	209
Figuras 187 y 188. Montaje de un panel absorbente. Auditorio Araujo Vianna. *	209
Figuras 189 y 190. Vista general de la concha durante las obras. Auditorio Araujo Vianna. *	209
Figuras 191 y 192. Vista general de la concha durante las obras. Auditorio Araujo Vianna. *	210
Figuras 193 y 194. Vista general de la concha al final de las obras. Auditorio Araujo Vianna. *	210
Figura 195. Tiempos de reverberación medidos. Auditorio Araujo Vianna. *	211

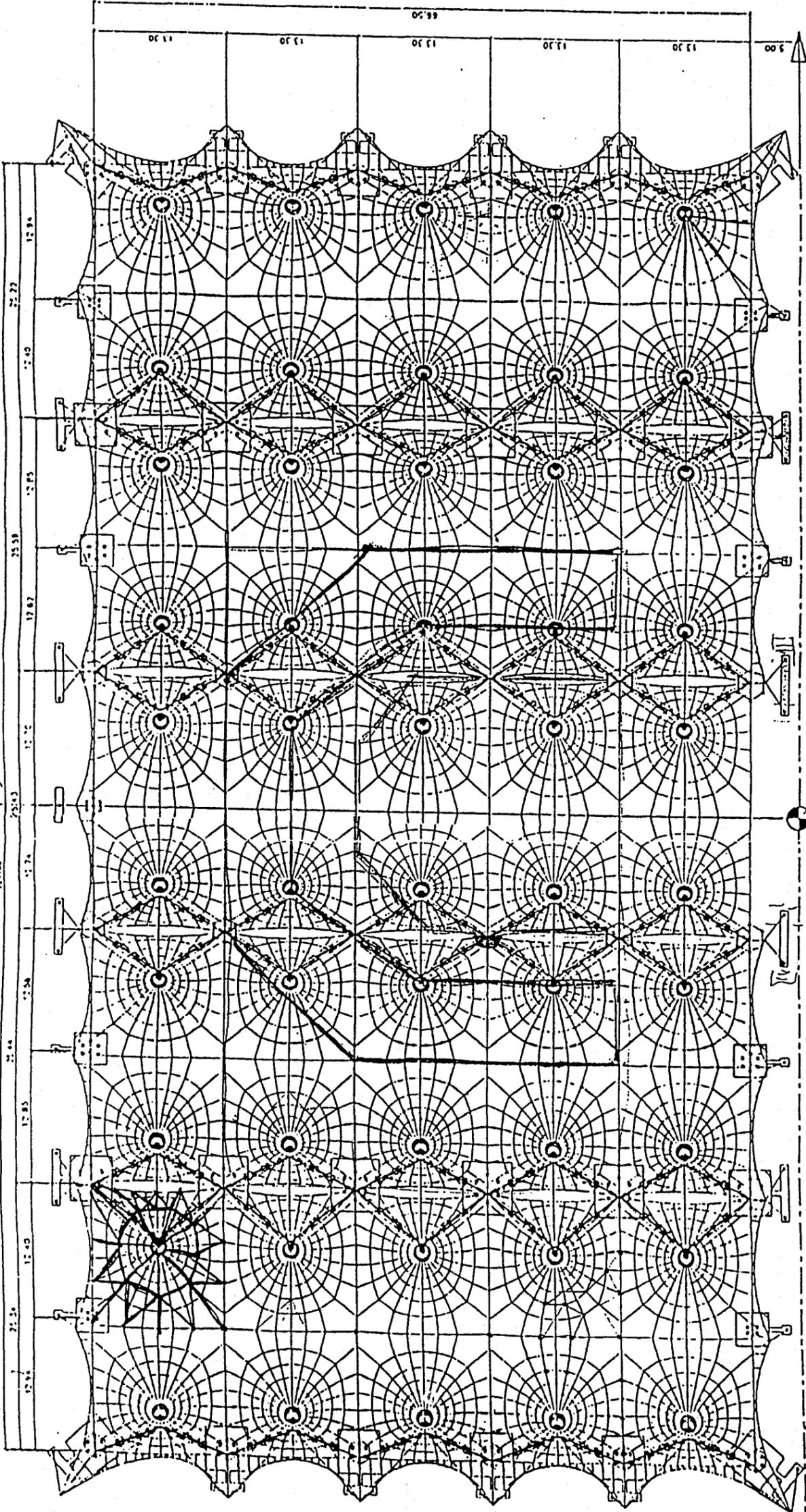
* = Fotografía de Flavio Maya Simões.

ANEXO 1 - DOCUMENTACIÓN GRÁFICA DISPONIBLE DE PROYECTOS DE LOS EDIFICIOS ESTUDIADOS

L (K) (J) (H) (E) (Y) (ED) (HD) (JD) (KD) (LD)

AVENIDA DEL DESCUBRIMIENTO

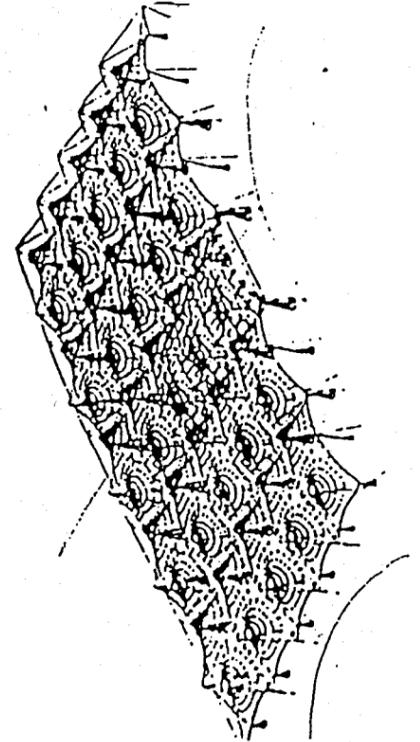
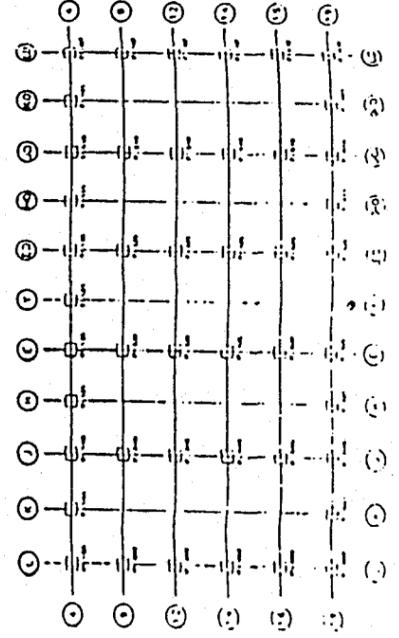
Δy



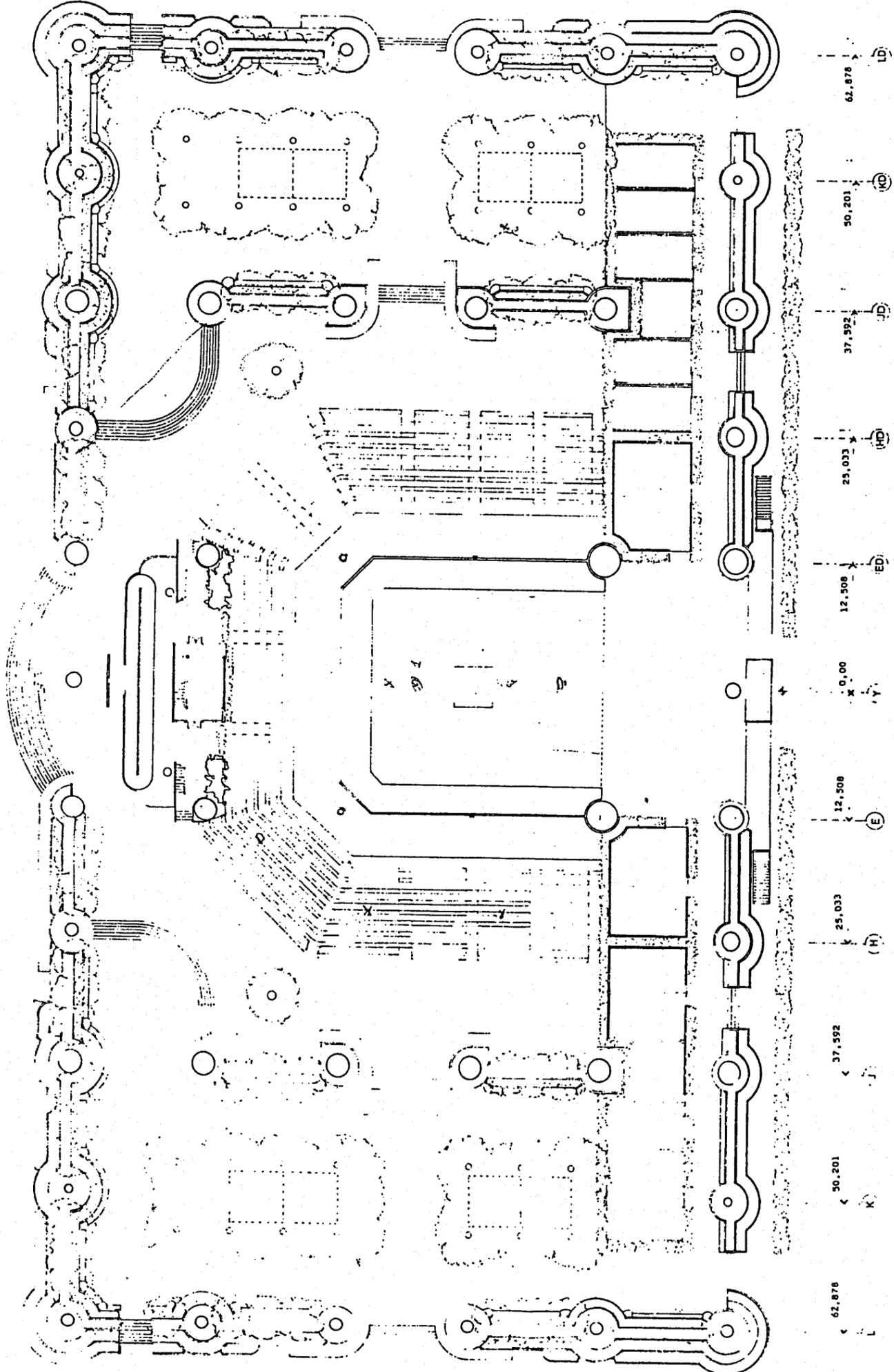
COORDINATES OF REFERENCE EXPO'92
 $x=20.109 / y=1.888,5 / z= s.note$

L (K) (J) (H) (E) (Y) (ED) (HD) (JD) (KD) (LD)

NOTA: La cota 0,00 del Palenque correspondera al nivel de Pavimentacion de la AVENIDA DEL DESCUBRIMIENTO = 0,1 m.



Sociedad Estatal para la Promoción Urbana de Sevilla S2	
DIVISION DE PROYECTOS Y CONSTRUCCION	
ESTRUCTURAS DE SOMBRAS	
PALENQUE	
PLANO VIE W	
VISTA DE ENCIMA	
Escala 1:250	



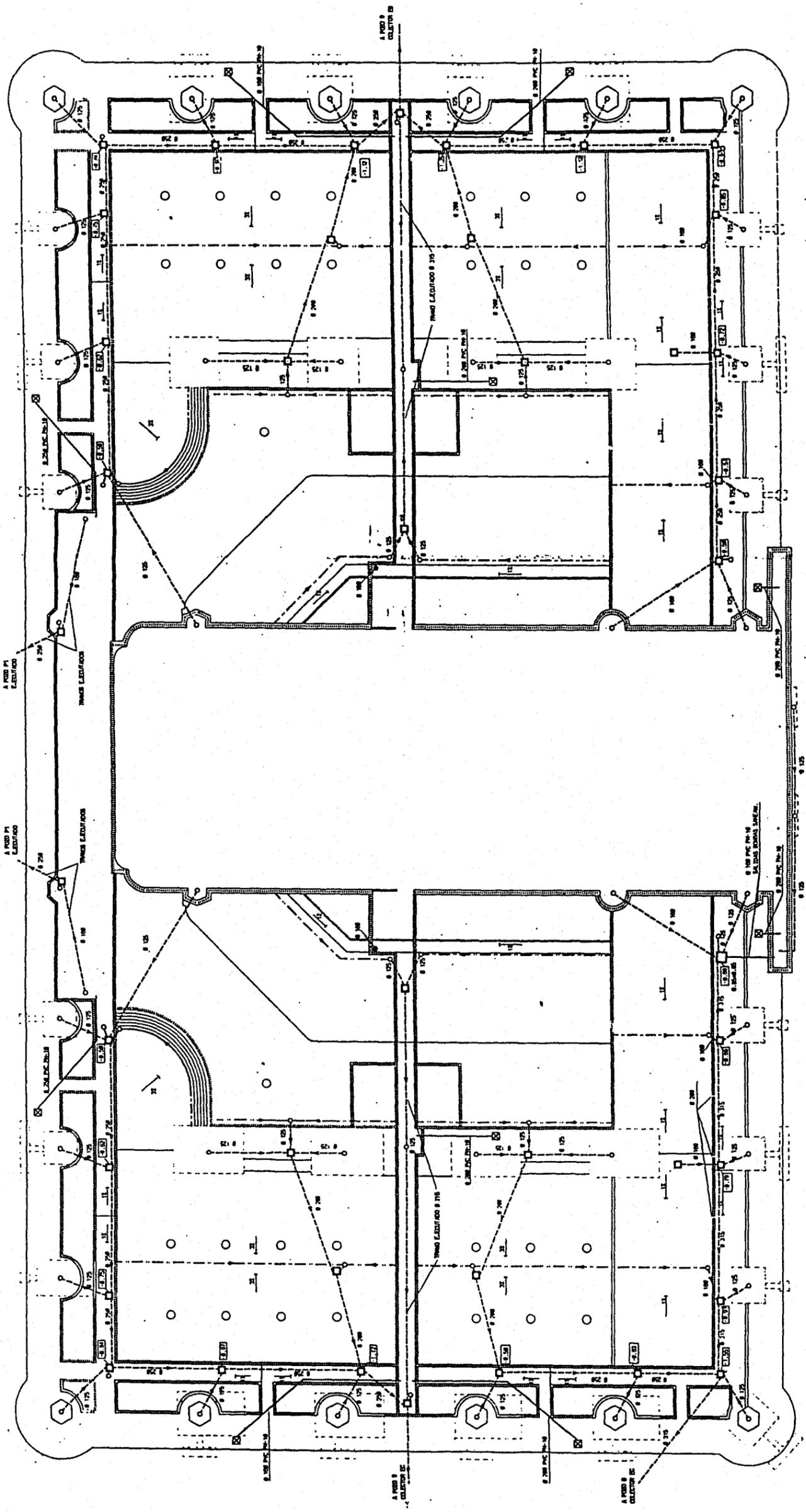
4. ^ 11.50
 9. ^ 58.20
 12. ^ 44.90
 14. ^ 31.60
 15. ^ 18.30
 19. ^ 3.00
 X ^ 0.00

62.878
 50.201
 37.592
 25.033
 12.508
 0.00
 12.508
 25.033
 37.592
 50.201
 62.878

NOTA:
 LAS COTAS DE LOS EJES
 ESTAN REFERIDAS AL
 NIVEL 0'00.

Hidalgo

INSTITUCION: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		PROYECTO: PLANTA GENERAL PLAZA	
AUTOR: J.M. PRADA		FECHA: 11/11/81	
Escala: 1:250		Hoja: 247	



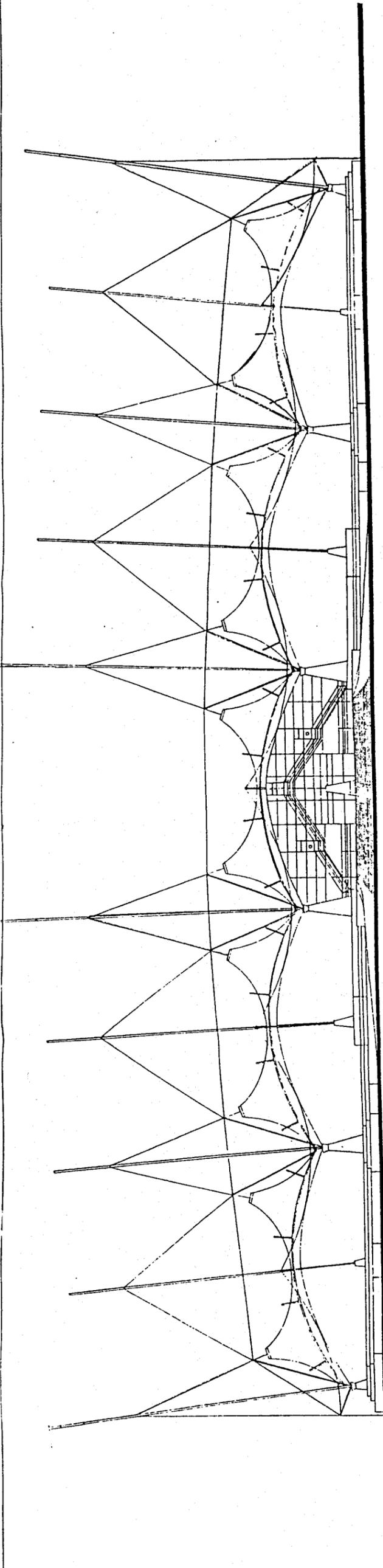
NOTA:
VER DETALLES EN PLANO
A1 334 0703

LEYENDA:

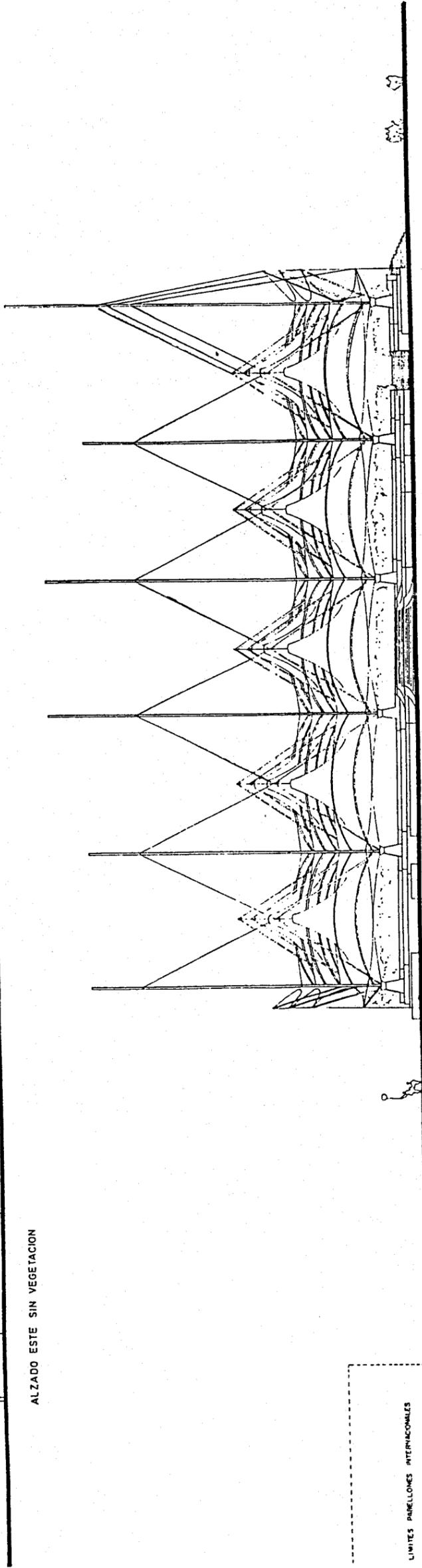
- TUBERIA DE P.C. PN-4
- TUBERIA DE P.C. PN-10
- - - CAZ PREFABRICADO
- SUMIDERO SIFONICO
- AOLETA DE PISO 0.05x0.65 INTERIOR (Profundidad variable)
- ⊗ AOLETA DE ASPIRACION 0.70x0.70 INTERIOR (Profundidad 0.50m)
- ⊞ COTA FIBRO DE AOLETA
- PASAJERO FORJADO

KEY	FECHA	DESCRIPCION	DIBUJO	COMP.	PROYECT.	1	2	3	4	5	6	7	8
1	27-08-1998	EMISION											
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													


 SOCIEDAD ESTATAL PARA LA EXPOSICION UNIVERSAL DE SEVILLA 92
 DIVISION DE PROYECTOS Y CONSTRUCCION
P A L E N O U E
 SANEAMIENTO PLAZA

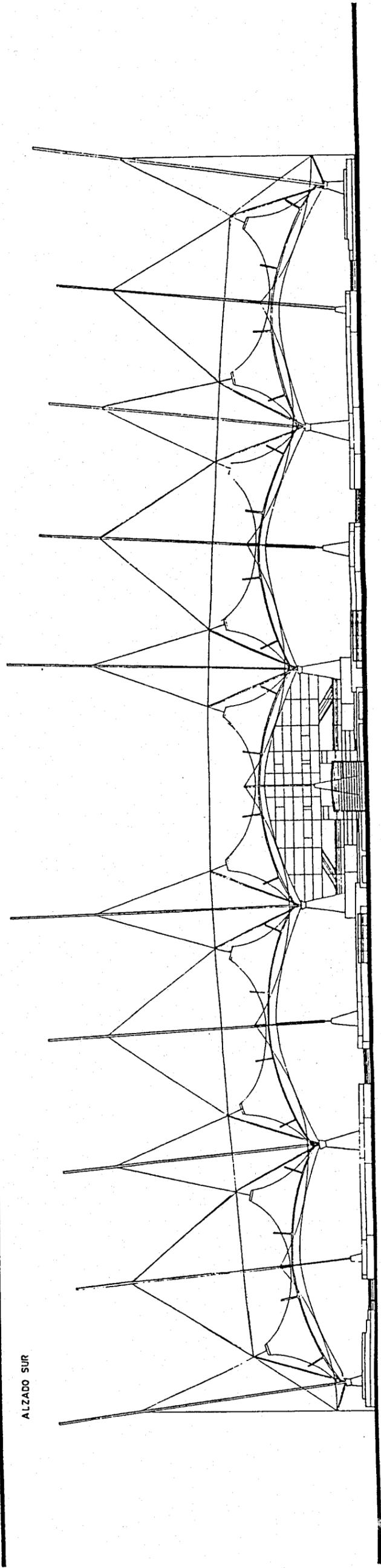


ALZADO ESTE SIN VEGETACION



ALZADO SUR

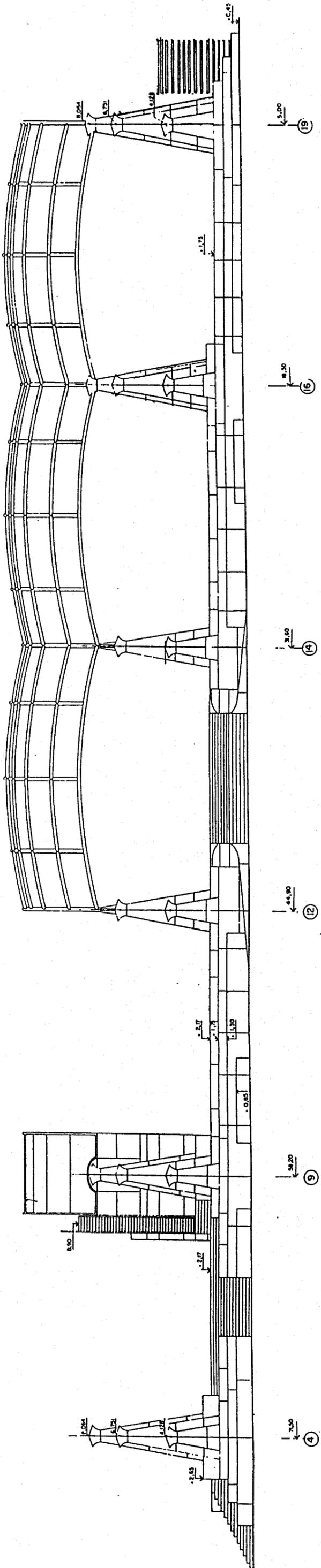
LIMITES PABELLONES INTERNACIONALES

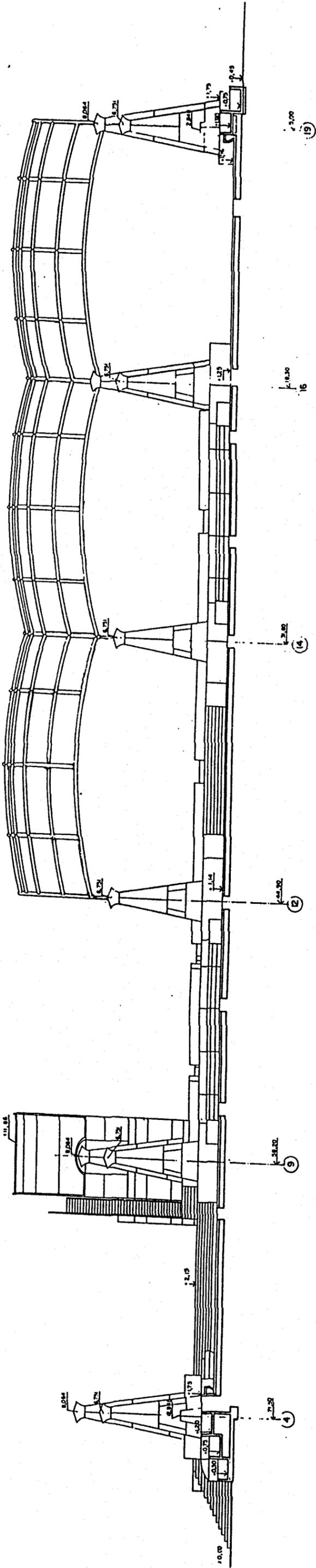


ALZADO OESTE SIN VEGETACION

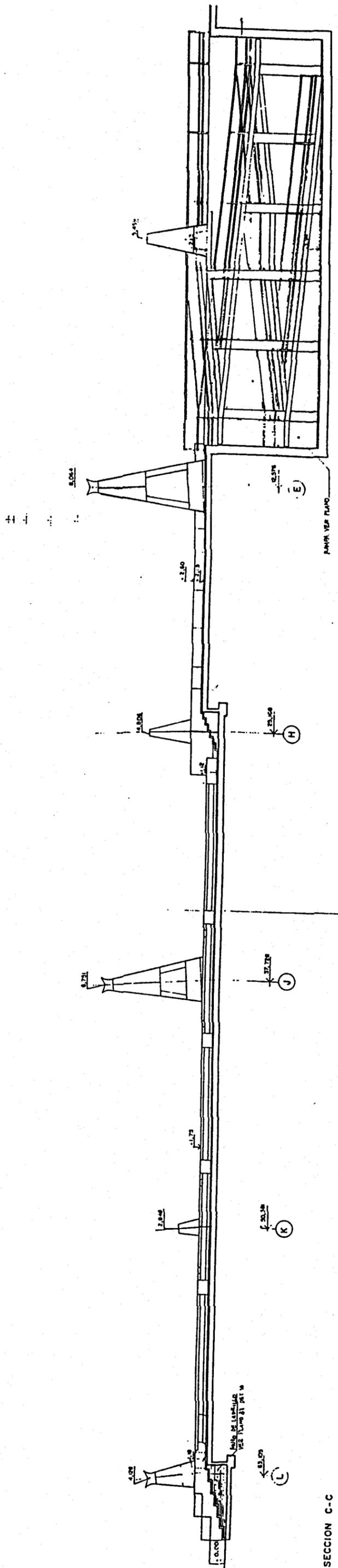
INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS		SECCION DE PROYECTOS Y CONSTRUCCION	
PALENOQUE		J. M. DE PRADA	
ALZADOS GENERALES		21 334 - 0808	
		1-250	

0005

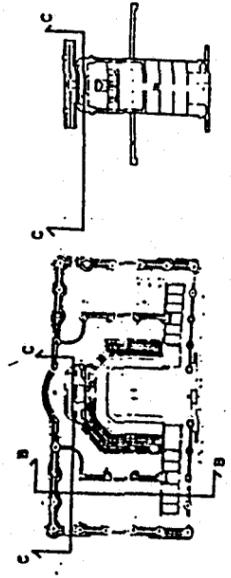




SECCION B-B

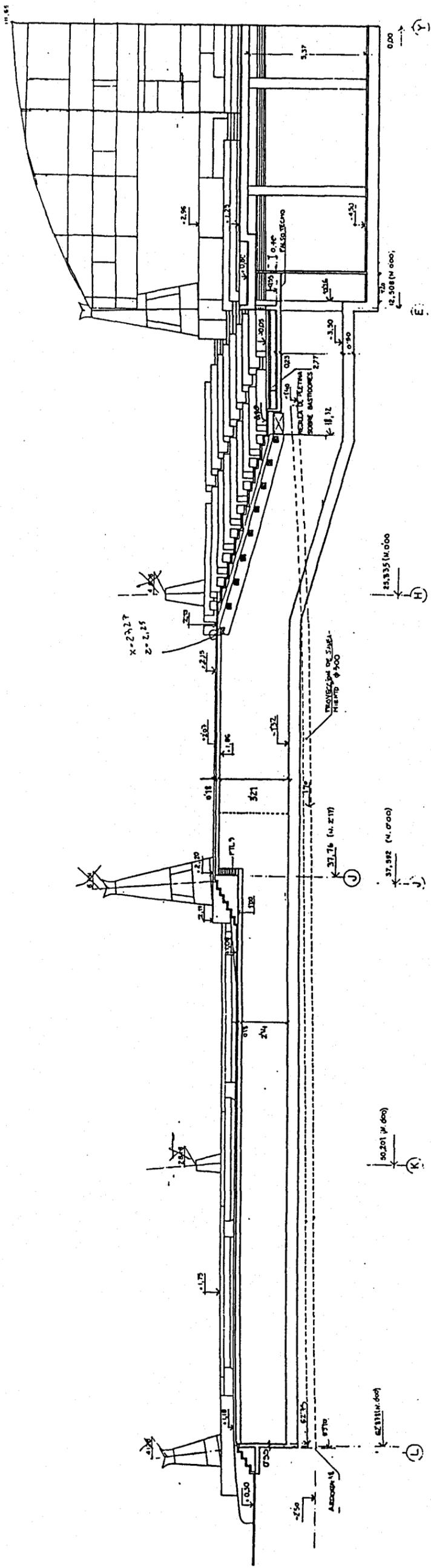


SECCION C-C

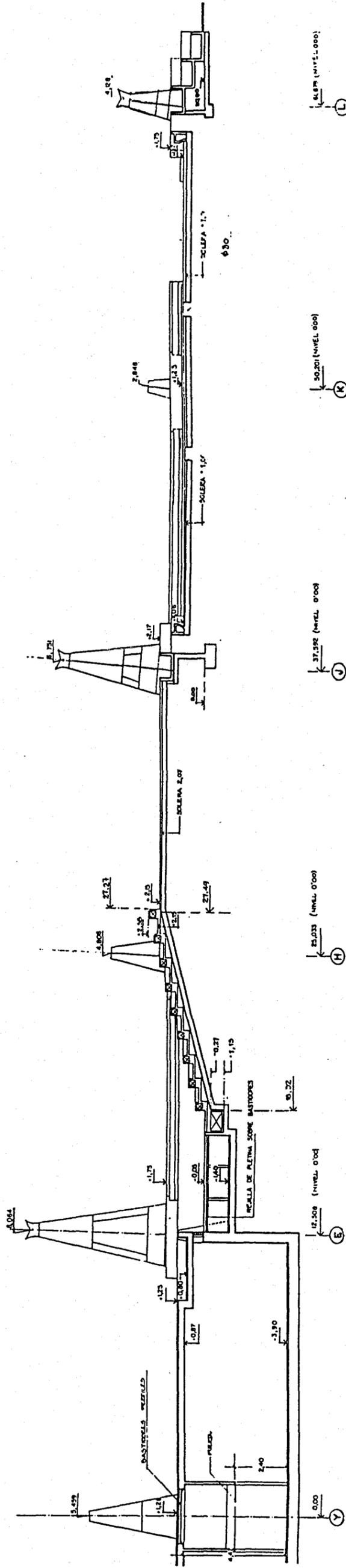


Nota 010.

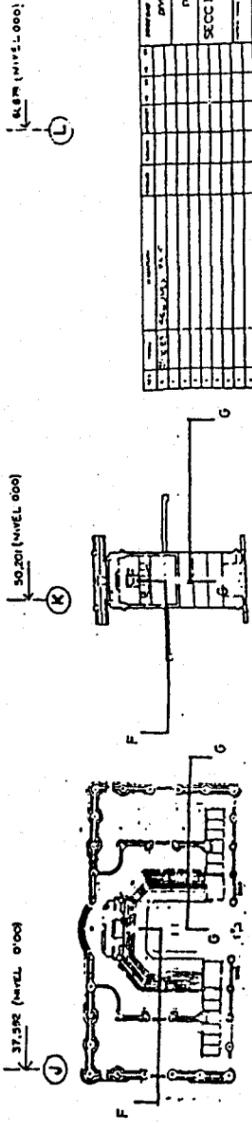
PROYECTO	SECCIONES B-B, C-C
PROYECTISTA	J.M. PAC
CLIENTE	PALENOUE
FECHA	11.10.68
ESCALA	1:100



SECCION F-F

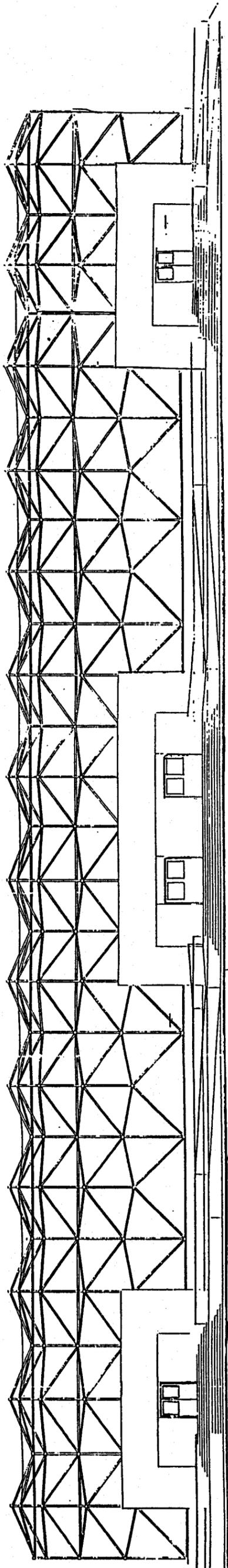


SECCION G-G

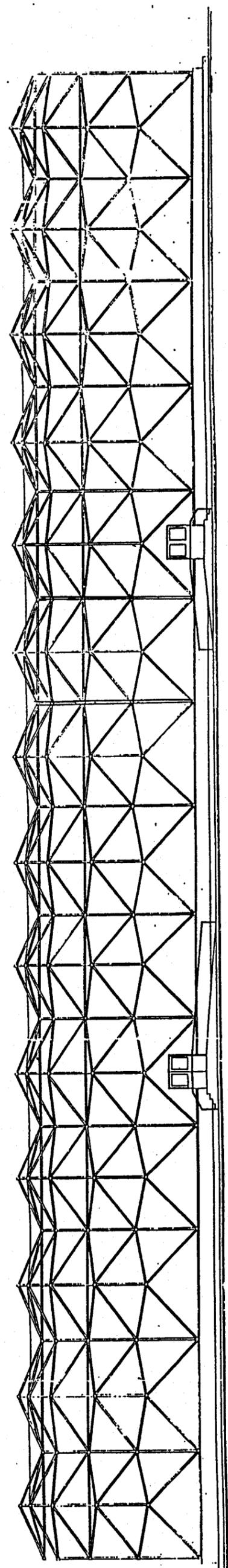


072/01
Made 877

PROYECTO	PROYECTO DE PROTECCION Y CONSTRUCCION
PROYECTISTA	J. M. PRADA
SECCIONES	SECCIONES F-F, G-G
ESCALA	1:100



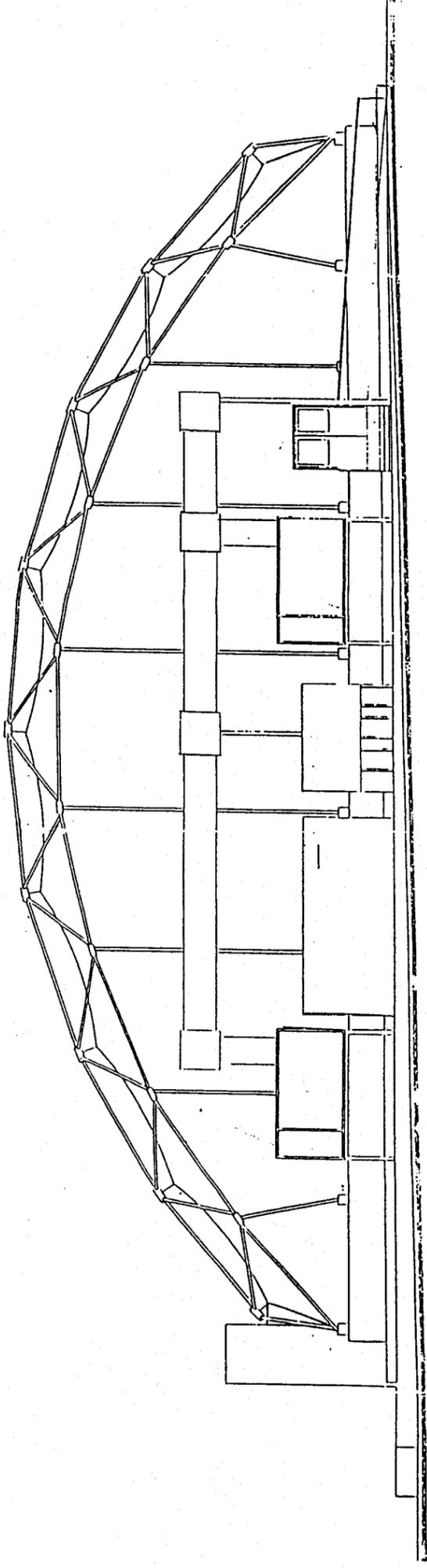
ALZADO ESTE



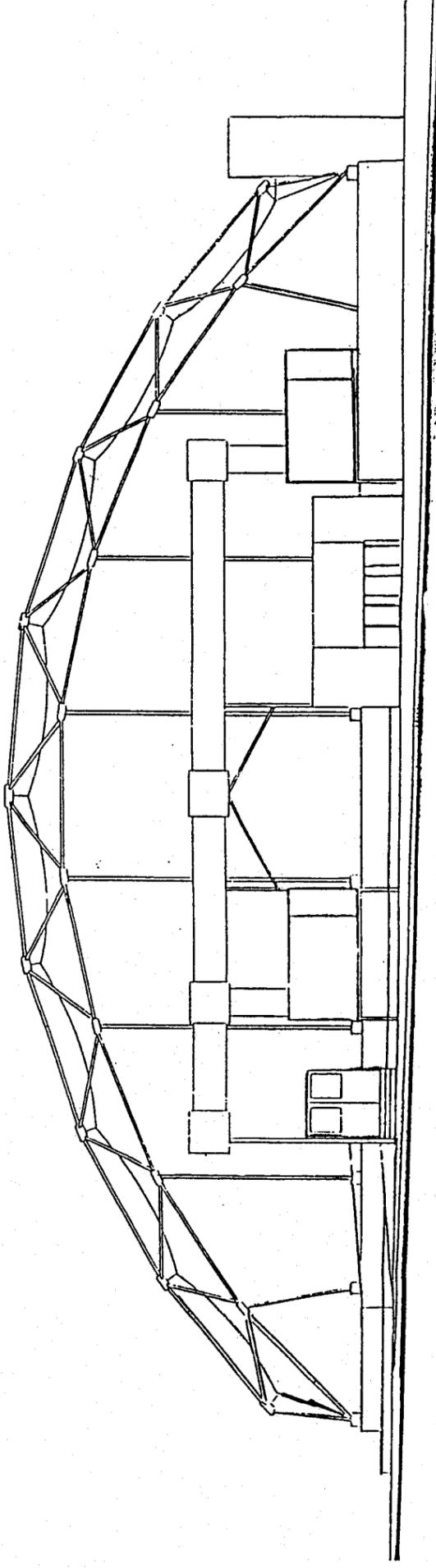
ALZADO OESTE

NO. PROYECTO	131/5-1002
FECHA	1/10
PROYECTO	PROYECTO BASICO Y DE EJECUCION DE CARPA EN PUERTA TRIANA
ALZADO	ALZADO ESTE Y ALZADO OESTE

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS Y TECNOLÓGICAS
 DIVISION DE PROYECTOS Y CONSTRUCCIONES



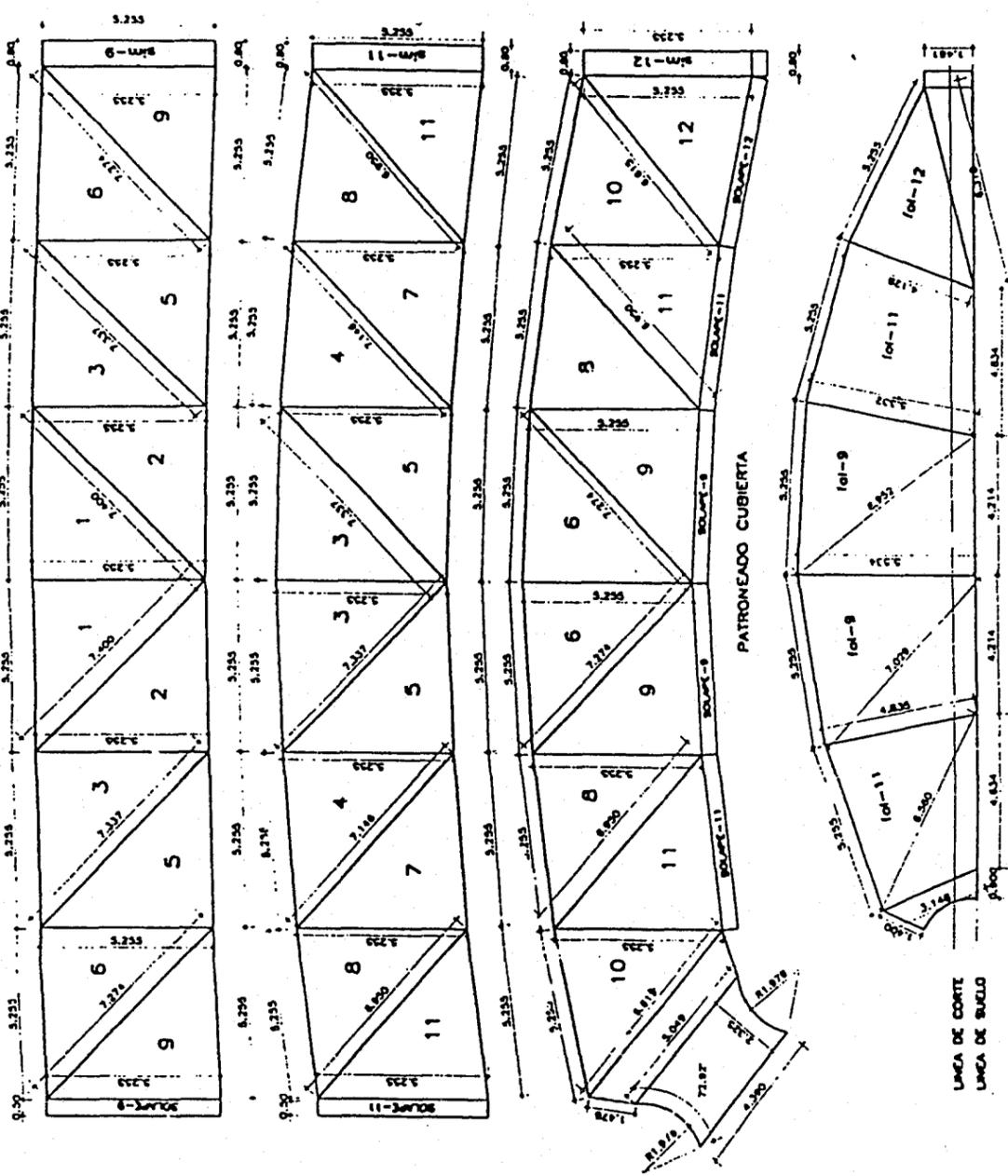
ALZADO NORTE



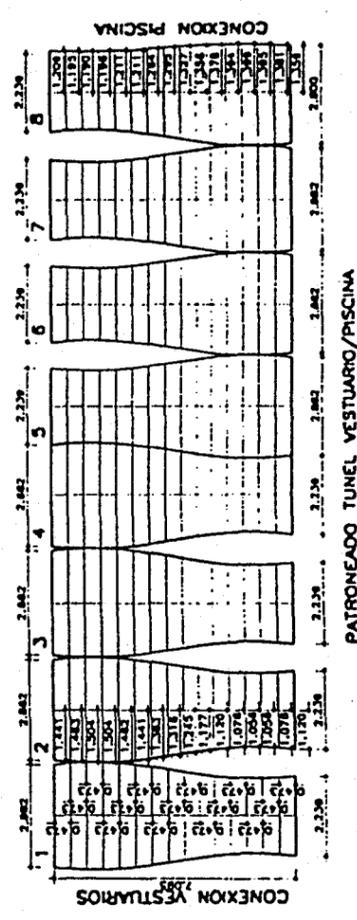
ALZADO SUR

REV.	FECHA	DESCRIPCION	DIBUJO	COMPA.	PROYECT.	V.	PI.	VI.	SI.
0									
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

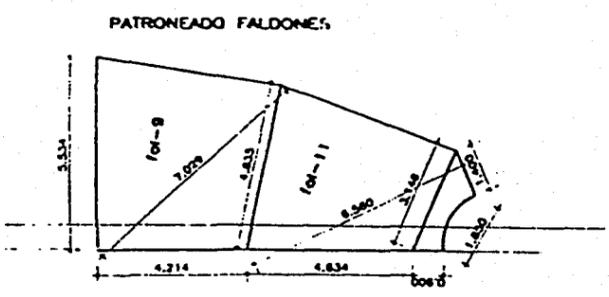
SOCIEDAD ESTATAL PARA LA EXPOSICION UNIVERSAL DE SEVILLA 52
 DIVISION DE PROYECTOS Y CONSTRUCCION
 PROYECTO BASICO Y DE EJECUCION DE CARPA EN PUERTA TRIANA
 ALZADO NORTE Y ALZADO SUR CON AIRE ACONDICIONADO
 A9-131/55H.004
 1:100
 1:100



PATRONEADO FALDOONES

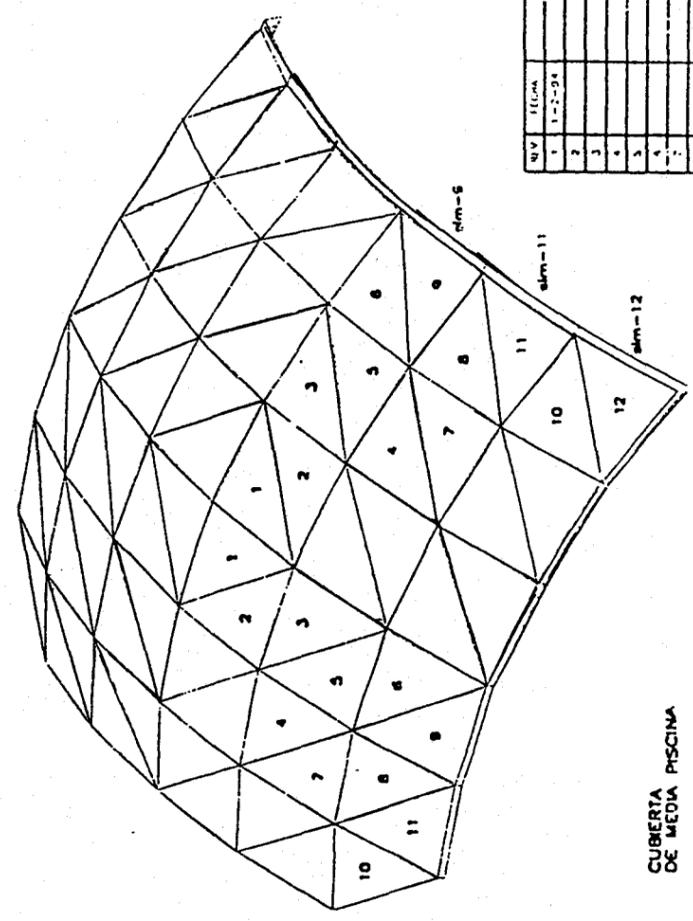


PATRONEADO TUNEL VESTUARIO/PISCINA

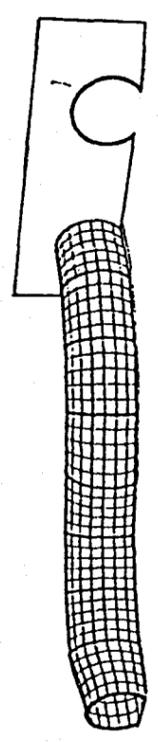


LINEA DE CORTE
LINEA DE SUELO

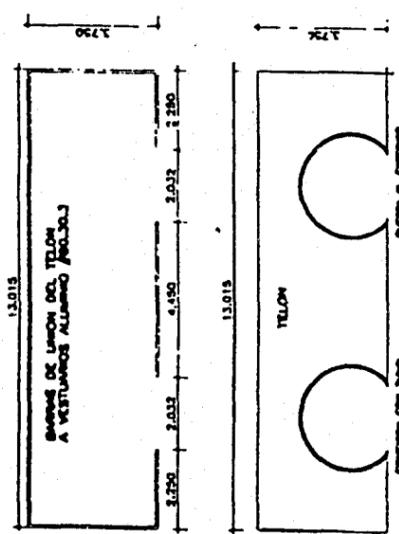
- LA CUBIERTA DE CADA LADO DE LA PISCINA SE CONSTRUYE DE UNA SOLA PIEZA Y SE UNIFICAN A UN ÚNICO PLANO SEGUN DETALLE 8 Y 9 DEL PLANO 2.
- LOS FALDOONES SE UNIFICAN A LOS DETALLES SEGUN EL DETALLE 11 DEL PLANO 6.
- LA CUBIERTA SE UNIFICA A LOS FALDOONES SEGUN DETALLE 19 DEL PLANO 6.
- LOS FALDOONES SE UNIFICAN AL PANEL DE SUELO SEGUN DETALLE 13 DEL PLANO 6.
- LAS CUBIERTAS DE LOS LUBALOS SE UNIFICAN ENTRE SI SEGUN EL DETALLE 14 DEL PLANO 2.



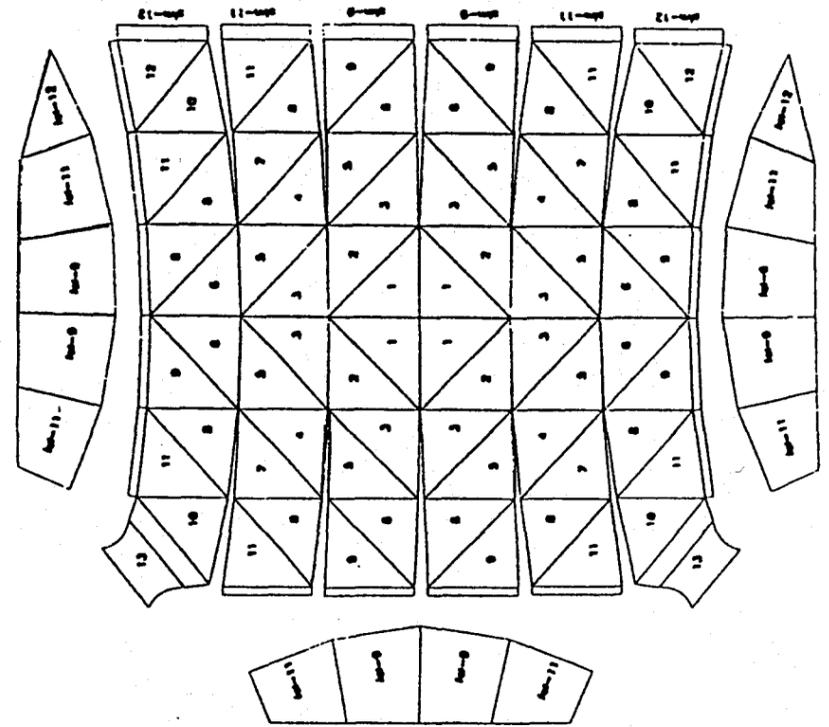
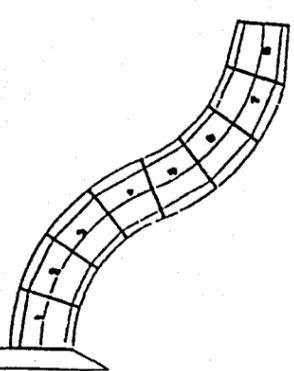
CUBIERTA DE MEDIA PISCINA



TUNEL VESTUARIOS/PISCINA



PATRONEADO TOLON DE UNION A VESTUARIOS



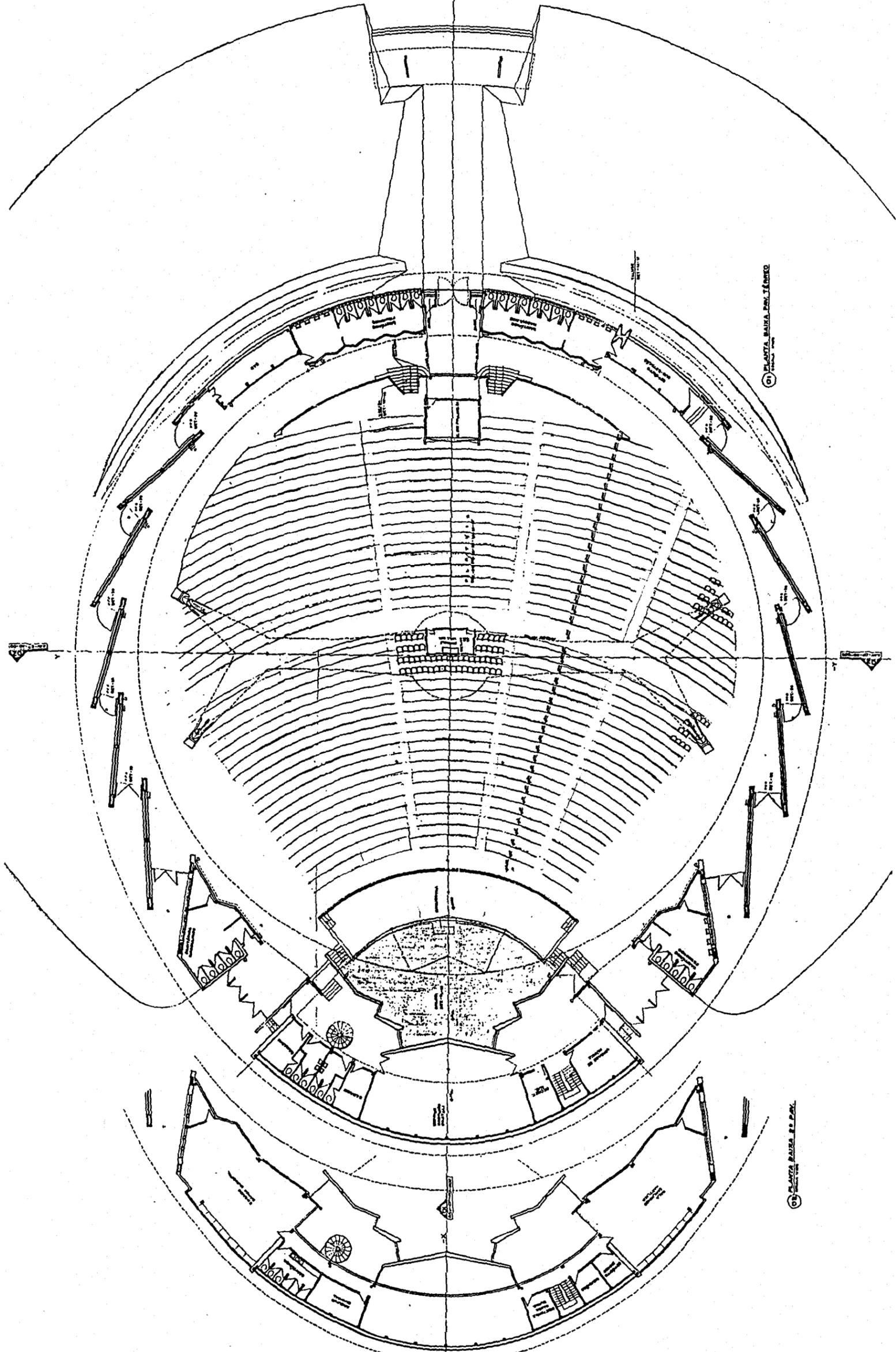
Nº	TIPO	DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	1-2-2-2-4					
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						

INSTITUTO MUNICIPAL DE DEPORTES
AYUNTAMIENTO DE SEVILLA
CUBIERTA DE PISCINA OLIMPICA DEL C.D. SAN PABLO
PATRONEADO
AECOSAN S.A.

LEGENDA

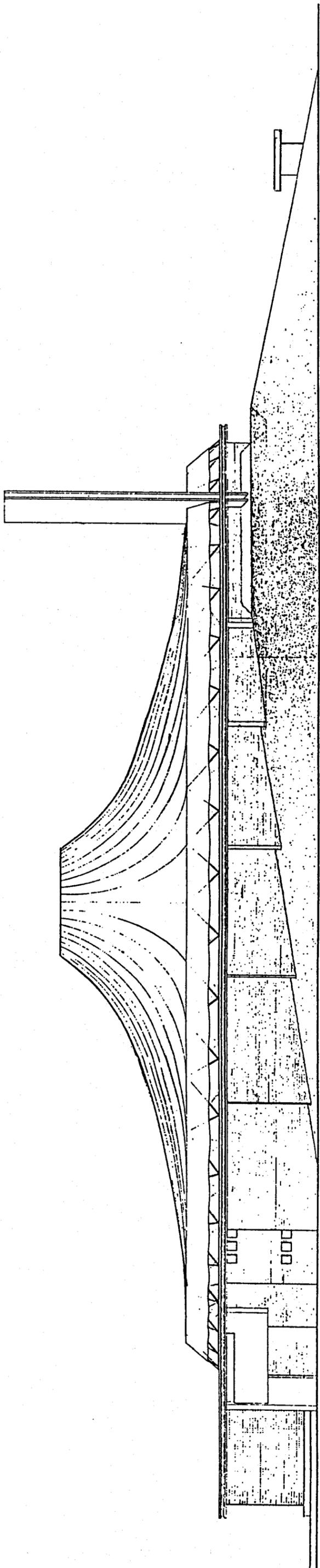
- 1. - PIANO DI TERRA - 0.00
- 2. - PIANO DI TERRA - 0.00
- 3. - PIANO DI TERRA - 0.00
- 4. - PIANO DI TERRA - 0.00

PER LA UNIVERSITA' DI TRIESTE
 AUDITORIUM - PALAZZO VIA NINNA
 33018 TRIESTE (TS)
 ARCHITETTO
 ALBERTO
 1971

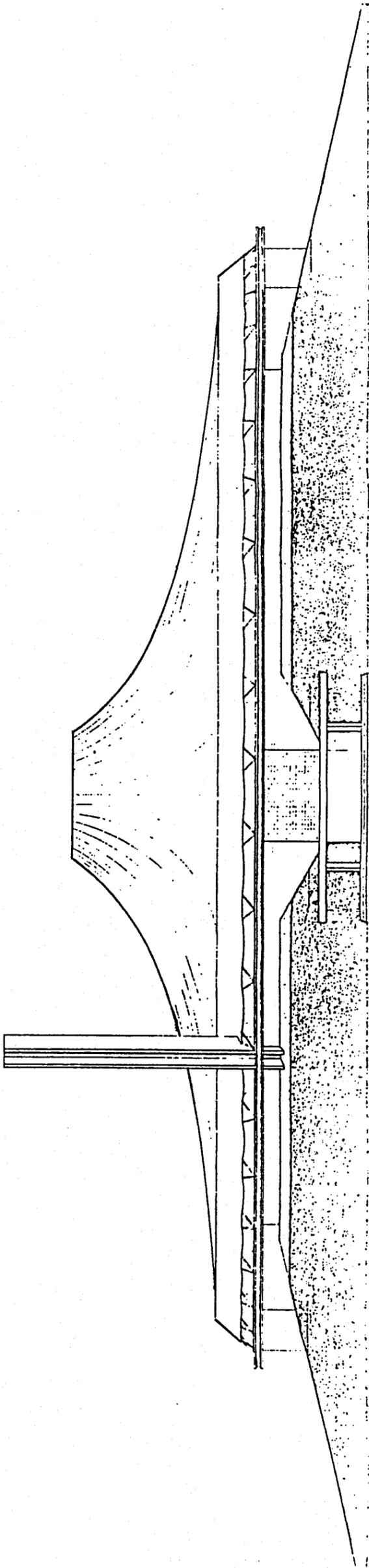


61 - PALAZZO NINNA, PIANO I, AUDITORIUM

61 - PALAZZO NINNA, PIANO I, AUDITORIUM

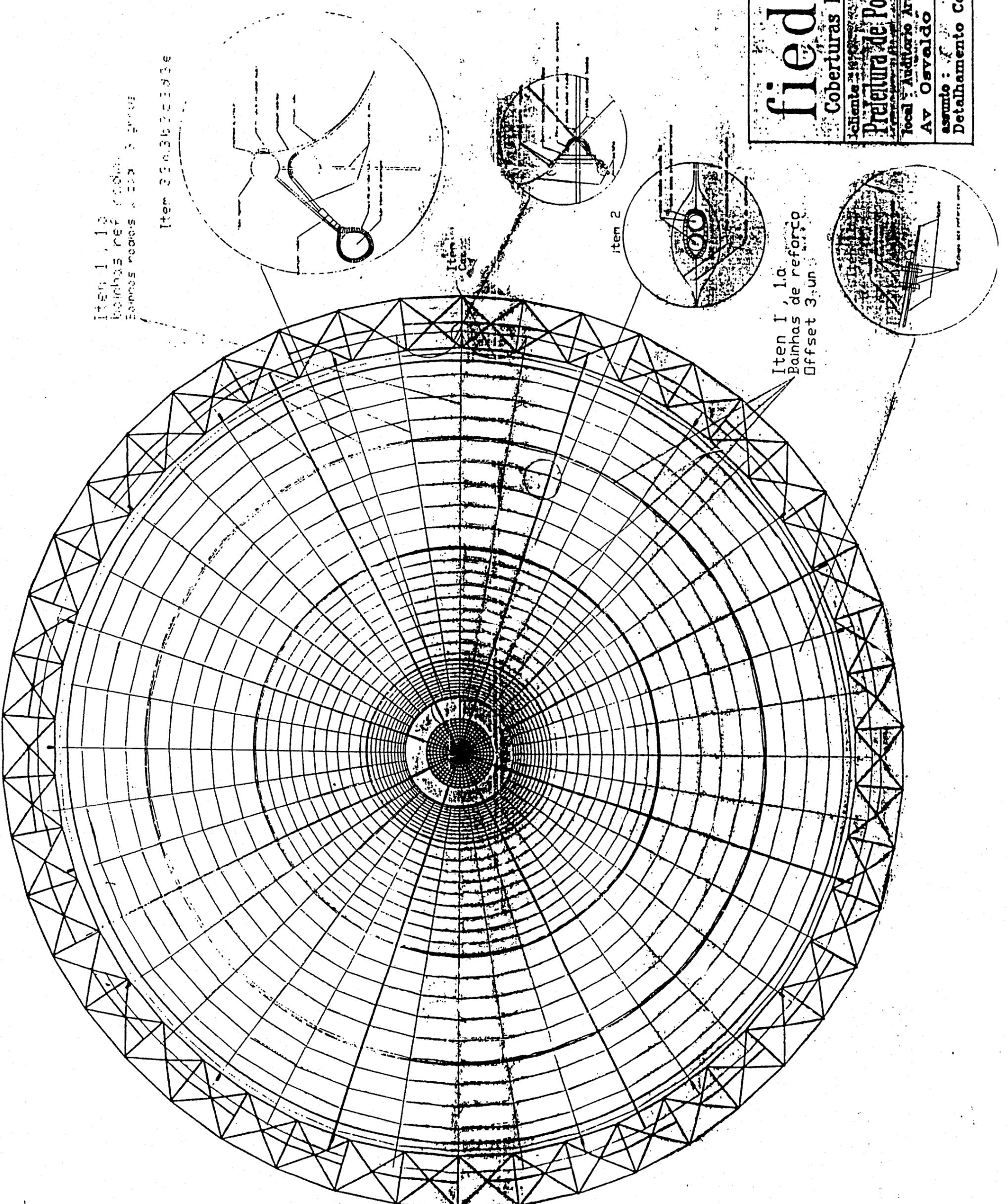


1. ELEVACÃO OESTE



2. ELEVACÃO NORTE

Carlos Maximiliano Faye
 ARQUITETO RESPONSÁVEL
AUDITÓRIO ARAUJO VIAN
 PROJETO ARQUITETÔNICO
 INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E CULTURA
 DE SÃO PAULO
 Rua Carlos Maximiliano Faye, 100 - Vila Mariana - São Paulo - SP
 CEP: 04011-000
 Fone: (011) 5082-1111



Item 1, 1a
Bainhas ref. cobo.
Offset 3, un.

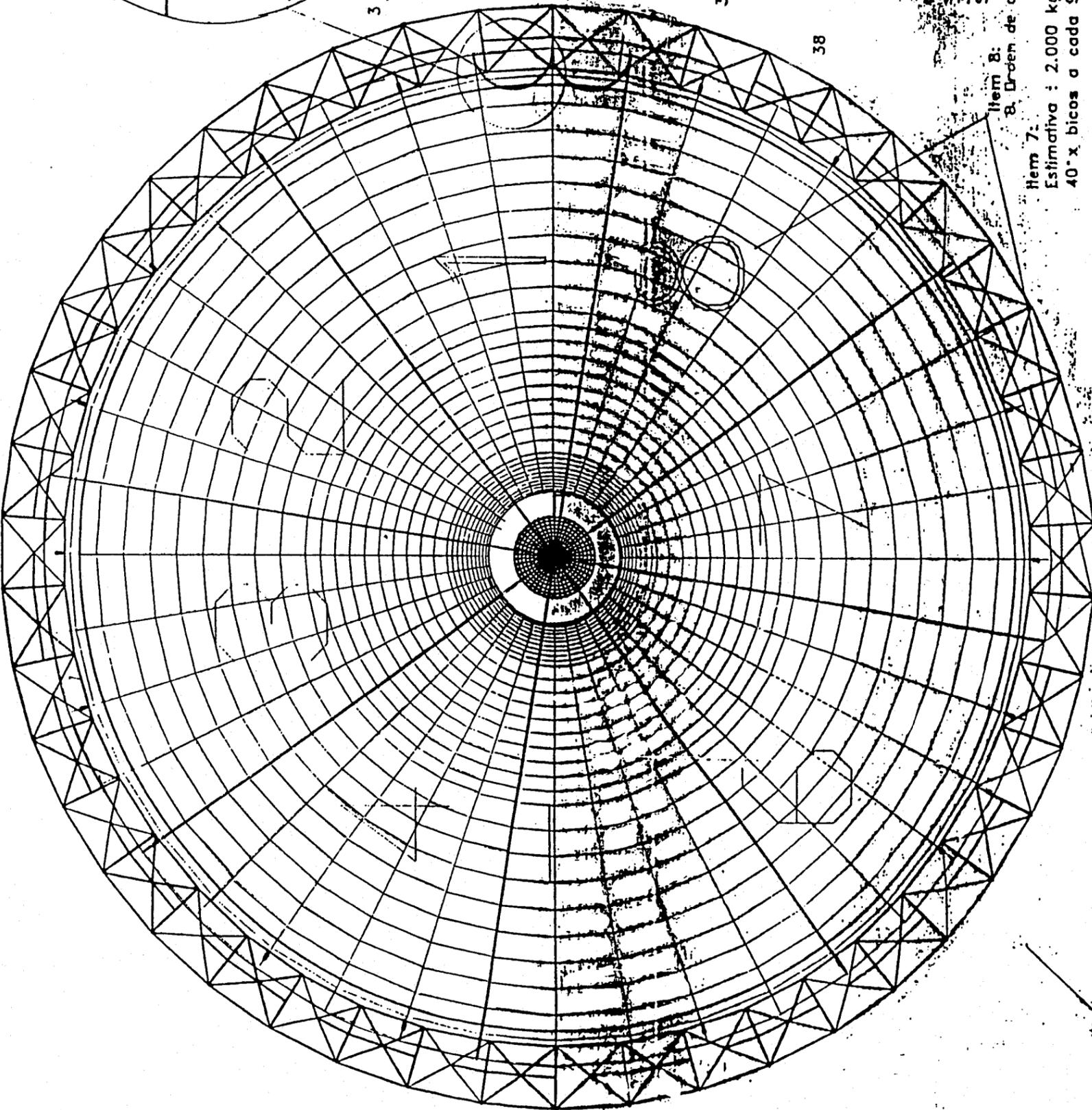
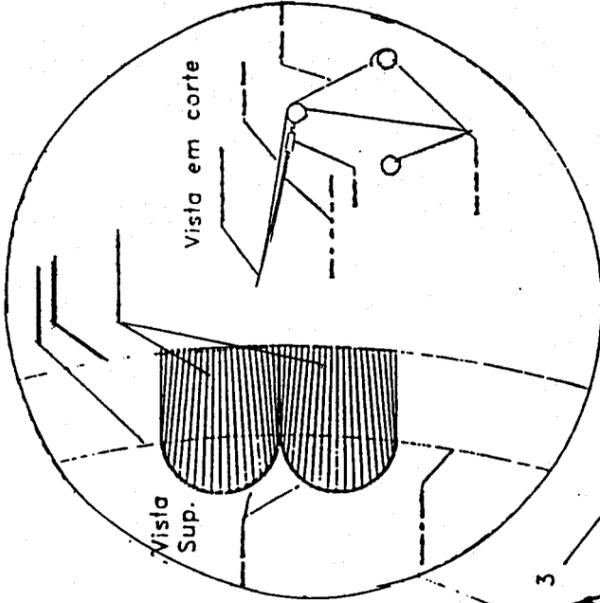
Item 2

Item 3

Item 4
Bainhas ref. cobo.
Offset 3, un.

contrato licitacao	rev 95	desenho No	escala
fiedler	0001	VISTAS	
coberturas Especiais		revisao	
cliente: Prefeitura de Porto Alegre			
local: Auditorio Araujo Vianna			
AV Osvaldo Aranha			
assunto: Detalhamento Cobertura 1			
obras			

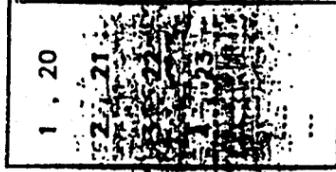
Item 5 - Item 6



9.0 Orden e Sistema de Profensao Inicial do Laminado de Cobertura

500 kgf

1000 kgf



1500 kgf

2.000 kgf

orden iden

Item 10:

Mesmo Ordem acima

Avallacao por dinamometro de deflexao

10.a Tractionamento por falhas de corrente

10.b Embainhamento continuo

Item 12: Manutencao... e parte da laminação

Artificial, deverá ser lavada a no minimo 6 meses

3 meses utilizando se sabao em po, NAI/ UTILIZAR

SOLVENTES

Item 8:

8. Orden de colocacao dos Panos

Item 7:

Estimativa : 2.000 kgf por bico

40 x bicos a cada 9.0 graus

Item 11: Sistema de Limpeza por lavagem a jato de agua quente

com operacao manual. Os operarios deverão utilizar cintos de segurança

trabalho no perimetro externo do anel superior de aço da cobertura

para não caírem por escorregamento.

Item 13: Condições de Operacao:

Ten-se observado a tendencia por parte de adolescentes em andar por cima das coberturas utilizando-se como tobogam ou para pular de altura.

A segurança da cobertura e destas pessoas, depende de um sistema de guarda eficiente.

Toda e qualquer ANORMALIDADE, bolsas com agua, rasgos, manchas, grandes oscilacoes etc devem ser imediatamente comunicados a empresa fabricante da cobertura.

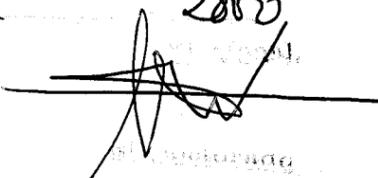
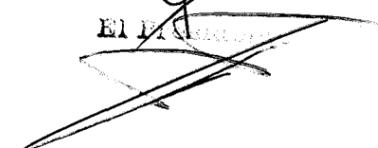
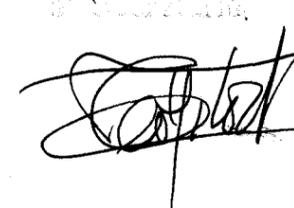
contrato licitacao	fev 95	descricao No	0002
fiedler		escala	escala
Coberturas Especiais		PREFEITURA DE PORTO ALEGRE VISIAS	
local : Auditorio Araujo Vianna		revisão	
av Osvaldo Aranha		assunto	
cobertura Detalhes 2		observações	

NOTA

en el
D. Flavio Maya Sineses
titulado "Comportamiento acústico de espacios cubiertos
con estructuras textiles"

acordó SOBRESALIENTE CON
LAUDEM POR UNANIMIDAD

20 diciembre 2000

 El M. en C.	 M. en C.	 M. en C.
 El M. en C.	 M. en C.	Flavio Sineses