

GERNOT MINKE

**Manual de
CONSTRUCCIÓN
con TIERRA**

**La tierra como material de construcción
y su aplicación en la arquitectura actual**

BRC
EDICIONES

Índice

Prefacio	11	2.5.3	Calor específico	38
Agradecimientos	11	2.5.4	Capacidad térmica	38
1. Introducción	13	2.5.5	Pérdida y ganancia térmica	39
1.1 La tierra como material de construcción	13	2.5.6	Decrecimiento y retraso térmico	39
1.2 Sobre la historia de la construcción con barro	13	2.5.7	Expansión térmica	39
1.3 Qué debemos saber de la tierra como material de construcción	16	2.5.8	Comportamiento en relación al fuego	40
1.4 Mejoramiento del clima interior	19	2.6	Resistencia	40
1.4.1 Generalidades	19	2.6.1	Cohesividad	40
1.4.2 Humedad del aire y salud	19	2.6.2	Resistencia a la compresión	40
1.4.3 Influencia del intercambio de aire en la humedad del aire	20	2.6.3	Resistencia a la tracción	41
1.4.4 El efecto del barro en el balance de la humedad	20	2.6.4	Resistencia a la flexión	41
1.5 Prejuicios contra la tierra como material de construcción	22	2.6.5	Adhesión	41
2. Propiedades de la tierra como material de construcción	23	2.6.6	Resistencia a la abrasión	41
2.1 Composición	23	2.6.7	Módulo de elasticidad	42
2.1.1 Generalidades	23	2.7	Valor pH	42
2.1.2 Arcilla	23	2.8	Radiactividad	42
2.1.3 Limo, arena y grava	24	2.9	Protección a ondas electromagnéticas de alta frecuencia	42
2.1.4 Distribución granulométrica	24	2.10	Contenido Primario de Energía (CPE)	43
2.1.5 Componentes orgánicos	24	3. Preparación del barro	45	
2.1.6 Agua	24	3.1	Generalidades	45
2.1.7 Porosidad	24	3.2	Humedecimiento, trituración y mezcla	45
2.1.8 Superficie específica	25	3.3	Tamizado	47
2.1.9 Densidad	25	3.4	Disolver barro	47
2.1.10 Compactibilidad	25	3.5	Curado	47
2.2 Ensayos para analizar la composición de la tierra	25	3.6	Reducción del contenido de arcilla o rebajado	47
2.2.1 Generalidades	25	4. Mejoramiento de las características del barro mediante tratamientos especiales y aditivos	48	
2.2.2 Análisis combinado de tamizado y sedimentación	25	4.1	Generalidades	48
2.2.3 Contenido de agua	25	4.2	Reducción de las fisuras provocadas por la retracción	48
2.2.4 Ensayos de campo	26	4.2.1	Generalidades	48
2.3 Efectos del agua	29	4.2.2	Rebajado con agregados	48
2.3.1 Generalidades	29	4.2.3	Rebajado con líquidos	49
2.3.2 Expansión y retracción	29	4.2.4	Adición de fibras	49
2.3.3 Determinación de la retracción lineal	29	4.2.5	Medidas estructurales	49
2.3.4 Plasticidad	30	4.3	Estabilización contra el agua	49
2.3.5 Acción capilar	32	4.3.1	Generalidades	49
2.3.6 Estabilidad en agua estática	33	4.3.2	Estabilizadores minerales	50
2.3.7 Resistencia al escurrimiento del agua	33	4.3.3	Productos animales	50
2.3.8 Erosión por lluvia y congelamiento	34	4.3.4	Productos animales y minerales	51
2.3.9 Período de secado	34	4.3.5	Productos vegetales	51
2.4 Efecto del vapor	36	4.3.6	Emulsión asfáltica	51
2.4.1 Generalidades	36	4.3.7	Estabilizadores sintéticos	51
2.4.2 Difusión del vapor	36	4.4	Incremento de la cohesión	51
2.4.3 Equilibrio del contenido de humedad	36	4.4.1	Generalidades	51
2.4.4 Condensación	37	4.4.2	Mezclado y curado	51
2.5 Influencia del calor	38	4.4.3	Incremento del contenido de arcilla	52
2.5.1 Generalidades	38	4.4.4	Aditivos	52
2.5.2 Conductividad térmica	38	4.5	Incremento de la resistencia a compresión	52
		4.5.1	Generalidades	52
		4.5.2	Preparación	52
		4.5.3	Compactación	52
		4.5.4	Aditivos minerales	53

4.5.5	Aditivos orgánicos	57	9.6	Rellenos con barro extruido y con mangueras rellenas de barro alivianado	99
4.5.6	Adición de fibras	57	10.	Técnicas para apisonar, verter y bombear barro alivianado	100
4.6	Resistencia a la abrasión	57	10.1	Generalidades	100
4.7	Incremento del aislamiento térmico	58	10.2	Encofrados	100
4.7.1	Generalidades	58	10.3	Muro de tapial de barro alivianado con paja ..	101
4.7.2	Barro alivianado con paja	58	10.4	Muro de barro aliviando con chips de madera	102
4.7.3	Barro alivianado con agregados minerales	59	10.5	Muros de barro bombeado alivianado con aditivos minerales	102
4.7.4	Barro alivianado con corcho	60	10.5.1	Generalidades	102
4.7.5	Barro alivianado con madera	60	10.5.2	Muros compactados	103
5.	Tierra apisonada (Tapial)	61	10.5.3	Muros de barro vertido	104
5.1	Generalidades	61	10.5.4	Muros bombeados	104
5.2	Encofrados	62	10.5.5	Tratamiento de superficie	105
5.3	Herramientas	63	10.6	Pisos de barro alivianado bombeado	107
5.4	Proceso de construcción	66	10.7	Bloques rellenos con barro	107
5.5	Ejecución de vanos	66	10.8	Mangueras rellenas con barro	107
5.6	Nuevas técnicas para construcción de muros ...	66	11.	Revoques de barro	110
5.6.1	Paneles de barro apisonado	66	11.1	Generalidades	110
5.6.2	Técnicas altamente mecanizadas	68	11.2	Preparación de la superficie	110
5.6.3	Estructura de entramado con relleno de barro apisonado	69	11.3	Composición del revoque	111
5.6.4	Construcciones con encofrado perdido	69	11.3.1	Generalidades	111
5.7	Cúpulas de barro apisonado	70	11.3.2	Revoques exteriores	111
5.8	Proceso de secado	70	11.3.3	Revoques interiores	111
5.9	Mano de obra	71	11.4	Reglas para la aplicación de revoques	112
5.10	Aislamiento térmico	71	11.5	Barro proyectado	112
5.11	Tratamientos de la superficie	71	11.6	Revoque de barro alivianado con aditivos minerales	112
6.	Construcción con adobes	72	11.7	Revoque lanzado	113
6.1	Generalidades	72	11.8	Revoque en muros de fardos de paja	113
6.2	Historia	72	11.9	Modelado de revoques de barro en estado húmedo	113
6.3	Elaboración de adobes	73	11.10	Protección de las esquinas	113
6.4	Dosificación de la mezcla	74	11.11	Revoques exteriores estabilizados	114
6.5	Ejecución de muros	77	12.	Protección de superficies de barro contra las inclemencias del tiempo	115
6.6	Tratamiento de superficie	78	12.1	Generalidades	115
6.7	Fijación de elementos en los muros	79	12.2	Consolidación de la superficie	115
7.	Adobones y paneles prefabricados	80	12.3	Pinturas	115
7.1	Generalidades	80	12.3.1	Generalidades	115
7.2	Adobones	80	12.3.2	Preparación de la superficie	115
7.3	Paneles prefabricados para muros	82	12.3.3	Mezclas recomendadas para pintura	115
7.4	Elementos de relleno para losas	83	12.3.4	Difusión de vapor	117
7.5	Adobes para optimizar la acústica	84	12.3.5	Penetración de agua	117
7.6	Baldosas para pisos	85	12.4	Cómo hacer superficies hidrófobas	118
8.	Modelado directo con barro plástico	86	12.4.1	Aditivos hidrófobos	118
8.1	Generalidades	86	12.4.2	Aplicación de aditivos hidrófobos	118
8.2	Técnicas tradicionales con barro húmedo	87	12.4.3	Ensayos	118
8.3	Panes de barro	90	12.5	Revoques de cal	118
8.4	Técnica del Stranglehm	90	12.5.1	Generalidades	118
8.4.1	Generalidades	90	12.5.2	Preparación de la superficie	121
8.4.2	Elaboración de los elementos de Stranglehm ...	90	12.5.3	Reforzamiento	119
8.4.3	Preparación de la mezcla	92	12.5.4	Composición	120
8.4.4	Colocación de elementos	92	12.5.5	Aplicación	120
9.	Entramados rellenos con barro plástico ..	96	12.5.6	Efecto sobre la difusión de vapor	120
9.1	Generalidades	96	12.6	Ripias, tablazones y otras cubiertas	120
9.2	Bahareque (Quincha)	96			
9.3	Barro proyectado	96			
9.4	Estacas enrolladas y botellas de barro	97			
9.5	Entramados con relleno de barro alivianado ...	99			

12.7	Métodos estructurales	122	15.7.6	Cúpulas núbicas	160
12.7.1	Protección contra la lluvia	122	15.7.7	Cúpulas estructuralmente optimizadas	161
12.7.2	Protección contra la humedad ascendente	122	15.7.8	Cúpulas y bóvedas con encofrado	163
12.7.3	Protección contra la inundación	122	15.7.9	Quemado de cúpulas de barro	163
			15.7.10	Ejemplos modernos	163
13.	Reparación de elementos de barro	123	15.8	Muro de almacenamiento térmico	167
13.1	Generalidades	123	15.9	Utilización de barro en baños	167
13.2	Daños en construcciones de barro	123	15.10	Construcción de mobiliario y artefactos sanitarios con barro	167
13.3	Reparación de grietas y juntas con reellenos de barro	123	15.11	Cocinas de barro	169
13.3.1	Generalidades	123	15.11.1	Cocinas con bajo consumo de madera	169
13.3.2	Mezclas	123	15.11.2	Cocina integrada con cama	171
13.3.3	Aplicación de reellenos	123	15.11.3	Horno para pan y pizza	171
13.4	Reparación de grietas y juntas con otros materiales de relleno	123	16.	Ejemplos de construcciones modernas de tierra	173
13.4.1	Generalidades	123	16.1	Generalidades	173
13.4.2	Mezclas	123	16.2	Residencia en Turku, Finlandia	173
13.5	Reparación de daños de mayor magnitud	124	16.3	Residencia Tucson, Arizona, Estados Unidos	175
13.5.1	Reparación con barro	124	16.4	Residencia, Villa de Leiva, Colombia	176
13.5.2	Pinturas	124	16.5	Residencia, La Paz, Bolivia	178
13.6	Mejoramiento posterior del aislamiento térmico con barro alivianado	124	16.6	Residencia, Des Montes, NM, Estados Unidos	180
13.6.1	Generalidades	124	16.7	Casa de campo, San Pedro, San Pablo, Brasil	182
13.6.2	Condensación	124	16.8	Vivienda Ezeiza, Buenos Aires, Argentina	183
13.6.3	Aislamiento térmico	125	16.9	Casa de campo, Maldonado, Uruguay	184
13.6.4	Revestimiento de barro alivianado como aislamiento interior	125	16.10	Casita Nuaanarpoq, Taos, Nuevo México, Estados Unidos	186
13.6.5	Elementos prefabricados	125	16.11	Residencia con estudio, Kassel, Alemania	187
14.	Construcciones antisísmicas	126	16.12	Viviendas apareadas, Kassel, Alemania	192
14.1	Generalidades	126	16.13	Condominio (casa de tres familias), Stein in the Rhin, Suiza	196
14.2	Requisitos constructivos y de diseño	126	16.14	Vivienda en Helensville, Nueva Zelanda	198
14.3	Vanos de puertas y ventanas	130	16.15	Vivienda rural, Rio Negro, Argentina	200
14.4	Muros de tapial reforzados con bambú	131	16.16	Vivienda, El Bolsón, Argentina	201
14.5	Cúpulas	132	16.17	Finca, Wazirpur, Haryana, India	202
14.6	Bóvedas	134	16.18	Oficina, Nueva Delhi, India	206
14.7	Muros de mangueras rellenas con barro	136	16.19	Guardería infantil, Oranienburg-Eden, Alemania	208
15.	Diseño de elementos constructivos especiales	138	16.20	Guardería infantil, Sorsum, Alemania	210
15.1	Juntas	138	16.21	Vivienda, Córdoba, Argentina	213
15.2	Diseños especiales para muros	140	16.22	Escuela en Rudrapur, Bangladesh	216
15.2.1	Muros de barro con alto aislamiento térmico	140	16.23	Sala de usos múltiples en Picada Café, Rio Grande do Sul, Brasil	218
15.2.2	Muros de llantas rellenas con barro	140	16.24	Escuela Solvig, Järna, Suecia	220
15.2.3	Muros de mangueras rellenas con barro	141	17.	Perspectivas futuras	221
15.3	Entrepisos de barro	143	18.	Referencias bibliográficas	222
15.3.1	Entrepisos tradicionales de barro	143	19.	Créditos fotográficos	224
15.3.2	Entrepisos modernos	144			
15.4	Pisos de barro apisonado	144			
15.4.1	Generalidades	144			
15.4.2	Pisos tradicionales	145			
15.4.3	Pisos modernos	146			
15.5	Cubiertas tradicionales con recubrimientos de barro	148			
15.6	Cubiertas con barro impermeable	149			
15.7	Bóvedas y cúpulas de adobe	149			
15.7.1	Generalidades	149			
15.7.2	Geometría	150			
15.7.3	Comportamiento estructural	152			
15.7.4	Bóvedas núbicas	156			
15.7.5	Cúpulas afganas y persas	158			



Torre de la mesquita de Tarim, Yemen. 38 m de altura, construido de adobes hechos a mano

Prefacio

Este manual ha sido escrito debido al creciente interés en la construcción con barro en todo el mundo. Está orientado al estudio de la tierra como material de construcción y proporciona un análisis de sus aplicaciones, técnicas de construcción, datos físicos, explica sus propiedades específicas y las posibilidades de optimizarlas.

Ningún libro de teoría, puede reemplazar la experiencia práctica de construir con barro. Los datos, experiencias y ejemplos de construcción con tierra pueden ser utilizados como base para todos los procesos de construcción y para su posible aplicación por parte de ingenieros, arquitectos, empresarios, artesanos, autoconstructores o representantes públicos, que quieran construir con el material más antiguo de la humanidad, la tierra.

La tierra, como material de construcción, viene en miles de composiciones diferentes que pueden ser procesadas de varias maneras. Barro, como se denomina la tierra arcillosa, tiene diferentes nombres según la aplicación, por ejemplo: “tierra compactada o apisonada”, “bloques de suelo”, “bloques de barro” o “adobe”.

El Manual de Construcción con Tierra documenta la mayoría de los experimentos desarrollados hasta la fecha, completados y corregidos a través de investigaciones continuas iniciadas en 1978 en el “Forschungslabor für experimentelles Bauen” (Laboratorio de Construcciones Experimentales, FEB, por su sigla en alemán) de la Universidad de Kassel. Asimismo, la presente edición incorpora los desarrollos y experiencias prácticas de la construcción del “Planungsbüro für Ökologisches Bauen”, Kassel (el estudio del autor).

Este manual está basado en la versión en alemán (“Lehm-bau - Handbuch”). Sin embargo, no se trata de una traducción directa sino que ha sido mejorado y actualizado para satisfacer a una audiencia internacional. Algunas secciones han sido incrementadas, se han incluido más proyectos e ilustraciones.

Agradecimientos

El autor desea agradecer a todos los estudiantes y colegas que han contribuido en la investigación y el desarrollo de proyectos en Alemania, Chile, Guatemala, Ecuador, Hungría y la India. Es gracias a estos esfuerzos que este libro contiene tanta información sobre experiencias prácticas.

Agradecimientos especiales a los asistentes de investigación H.G. Merz, Ulrich Merz, Klaus Eckart, Ulla Lustig-Rössler, Kiran Mukerji, Ulrich Boemans, Uwe Jaensch, Dittmar Hecken, Friedemann Mahlke, Saskia Skaley y a Frank Millies, el técnico que construyó la mayoría de los innovadores equipos de ensayo y aditamentos de construcción.

El capítulo 1 es una introducción a la tierra como material de construcción, describiendo su rol en la historia y en el futuro. Le sigue un corto repaso a la historia de la arquitectura de tierra. Se listan todas las características significativas que hacen a la tierra diferir de los restantes materiales comunes e industrializados de la construcción. El reciente descubrimiento del uso de la tierra en la construcción para balancear el clima interior se explica detalladamente.

En el capítulo 2 se dan datos del comportamiento físico y estructural del material, la mayoría de ellos recientemente investigados y tomando en cuenta que diferentes mezclas de tierra aportan variados resultados.

Los capítulos 3 y 4 ofrecen métodos para obtener un material de construcción de sencilla aplicación a partir de un suelo natural y como se puede modificar la mezcla.

Los capítulos 5 a 11 describen técnicas utilizadas para construir diferentes elementos y componentes constructivos de tierra.

El capítulo 12 explica cómo proteger los componentes de tierra de las inclemencias del tiempo.

El capítulo 13 ofrece indicaciones para reparar construcciones de tierra.

El capítulo 14 ilustra una variedad de soluciones para construcciones antisísmicas.

El capítulo 15 ilustra la variedad de aplicaciones de componentes de tierra optimizados e incluye técnicas innovadoras para la construcción de bóvedas y cúpulas, problemas de diseño, diseño sísmoresistente y aplicaciones en la construcción de mobiliario, artefactos sanitarios y hornos.

El capítulo 16 muestra edificaciones representativas de diferentes países.

El manual concluye con algunos comentarios sobre el futuro de la construcción con tierra y la bibliografía utilizada.

El autor quiere agradecer también a Pawan Kumar y Anke Lubenow, quienes ayudaron en la elaboración de los dibujos; Ulrich Boemans, Sigrid Köster, Uwe Jaensch y Friedemann Mahlke que prepararon los dibujos en la computadora; y especialmente a Rosario Loayza, Gabriela Peterssen y Kareen Herzfeld por la redacción y traducción.

Gernot Minke
Kassel, Noviembre 2008



1.2-2



1.2-3

1. Introducción

1.1 La tierra como material de construcción

En casi todos los climas cálido-secos y templados del mundo, la tierra ha sido el material de construcción predominante. Aún en la actualidad un tercio de la humanidad vive en viviendas de tierra, y en países en vías de desarrollo esto representa más de la mitad.

No ha sido posible resolver los inmensos requerimientos de hábitat en los países en vías de desarrollo con materiales industrializados como ladrillo, hormigón y acero, ni con técnicas de producción industrializadas. No existen en el mundo las capacidades productivas y financieras para satisfacer esta demanda. Las necesidades de hábitat en los países en vías de desarrollo solo se pueden encarar utilizando materiales de construcción locales y técnicas de autoconstrucción.

La tierra es el material de construcción natural más importante y abundante en la mayoría de las regiones del mundo. Este se obtiene frecuentemente directamente en el sitio cuando se excavan los cimientos. En los países industrializados la desmedida explotación de los recursos naturales y los sistemas de producción centralizados, intensivos en capital y energía no solo generan desperdicios sino que contaminan el medio ambiente, incrementando el desempleo. En esos países la tierra a resurgido como material de construcción. Crecientemente las personas que construyen sus viviendas demandan edificaciones eficientes económica y energéticamente, dan mayor valor a la salud y al clima interior balanceado.

Se ha comprendido que la tierra como material de construcción natural tiene mejores cualidades que los materiales industriales como el hormigón, los ladrillos y los silicocalcáreos. Las técnicas de construcción con tierra recientemente desarrolladas demuestran el valor de la tierra no sólo para

la autoconstrucción sino también para la construcción industrializada a cargo de contratistas.

Este manual ofrece datos teóricos básicos sobre el material así como guías para las diferentes aplicaciones de la tierra basadas en investigaciones científicas y experiencias prácticas.

1.2 Sobre la historia de la construcción con barro

Las técnicas de construcción con barro datan de hace más de 9000 años. En el Turquestán fueron descubiertas viviendas de tierra del período 8000 - 6000 a.C. (Pumpelly 1908).

En Asiria fueron encontrados cimientos de tierra apisonada que datan del 5000 a.C. Todas las culturas antiguas utilizaron la tierra no solo en la construcción de viviendas sino también en fortalezas y obras religiosas.

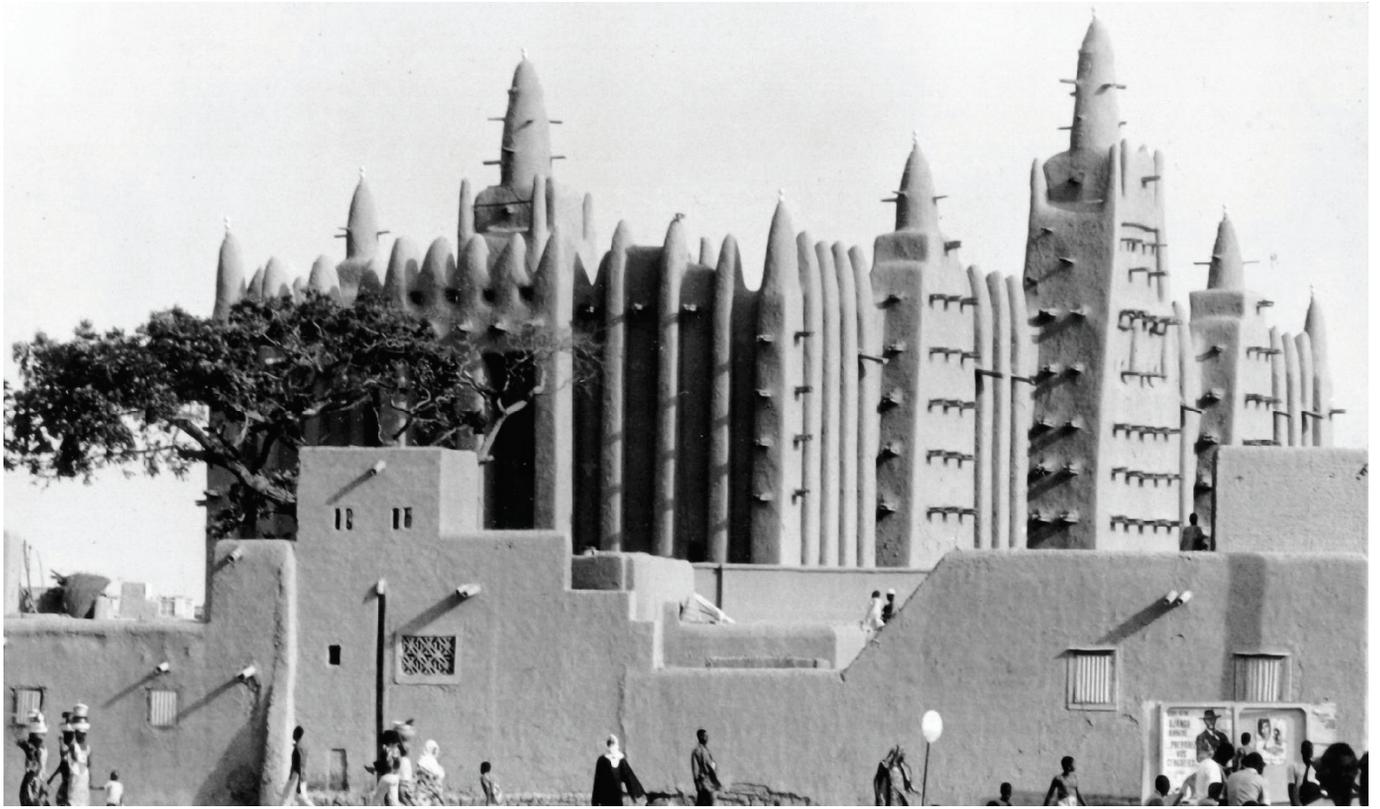
La Fig. 1.2-1 muestra bóvedas del Templo mortuorio de Ramses II en Gourná, Egipto, construido con adobes hace más de 3000 años. La ciudadela Arge Bam en Irán (Fig. 1.2-2) tiene partes de sus construcciones con 2500 años de antigüedad. También en Marruecos en el valle de Draa hay ciudades fortificadas construidas de tierra en el siglo XVIII, ver Fig. 1.2-3.

La Gran Muralla China se construyó hace 4000 años, inicialmente casi toda con tierra apisonada (tapial) y posteriormente fue enchapada con piedras naturales y ladrillos, dándole la apariencia de una muralla de piedra. El centro de la Pirámide del Sol en Teotihuacán, México, está constituido por 2 millones de toneladas de tierra apisonada y fue construida entre los años 300 - 900.

En los climas secos donde la madera es escasa, se desarrollaron, en el transcurso de los siglos, técnicas de mampostería para la construcción de cúpulas, mediante las cuales es posible techar las edificaciones prescindiendo de vigas de madera durante la construcción. La Fig. 1.2-6 muestra el Bazar de



1.2-1 Almacenes, templo de Ramses II, Gourná, Egipto



1.2-4 Gran Mezquita, Mopti, Malí construida en 1935



1.2-5 Mezquita, Kashan, Irán

Sirdjan en Irán cubierto con ese tipo de cúpulas y bóvedas.

En China viven aproximadamente 20 millones de personas en viviendas subterráneas, cuevas que fueron excavadas en suelo limoso.

Hallazgos de la era del bronce han demostrado que en Alemania, se utilizaba el barro como material de relleno en palizadas y entramados. El bajareque también fue utilizado en muchos países europeos. El ejemplo más antiguo de muros de tierra en Alemania se encuentra en la fortaleza de Heuneberg próxima al lago Constance y data de siglo VI a.C. (Fig. 1.2-8).

En África casi todas las mezquitas fueron construidas en tierra. La Fig. 1.2-9 muestra una del siglo XII en Nando, y las figuras 1.2-4 y 1.2-5 posteriores de Mali e Irán.

A partir de los textos antiguos de Plinio sabemos que ya a fines del año 100 a.C. existían fortalezas de tierra apisonada en España.

En México, Centroamérica y Sudamérica existieron construcciones de adobe en casi todas las culturas precolombinas. La técnica del tapial se conocía en algunos lugares, para otros esta fue traída por los conquistadores españoles. La Fig. 1.2-7 muestra una finca de tapial construida en el Estado de San Pablo, Brasil, que tiene una antigüedad de

250 años.

Muchas iglesias y fincas de tapial en Latinoamérica y Brasil tienen una antigüedad de aproximadamente 300 años.

En la Edad Media (siglos XIII–XVII) la tierra se utilizó en toda Europa central como relleno de entramados de madera, así como para cubrir techos de paja para hacerlos resistentes al fuego.

En Francia la técnica del tapial llamada “terre pisé” estuvo muy extendida desde el siglo XV al XIX. Existen muchas edificaciones de más de 300 años de antigüedad, aún habitadas, cerca de la ciudad de Lyon. En 1790 y 1791 François Cointeraux publicó cuatro folletos sobre esta técnica, que fueron traducidos al alemán dos años después (Cointeraux, 1793). Esta técnica se difundió en Alemania y sus alrededores debido a Cointeraux y a David Gilly que escribió el famoso libro *Handbuch der Lehmbackkunst* (Gilly, 1787) donde se describe la técnica del tapial como el método de construcción con tierra más ventajoso.

En Alemania la vivienda más antigua aún habitada con muros de tapial data de 1795 (Fig. 1.2-10). El dueño de esta vivienda era el director de bomberos y proclamaba que con esta técnica se podía construir una vivienda resistente al fuego de manera más económica que las viviendas construidas con entramados de madera rellenos con tierra.



1.2-6 Bazar, Sirdjan, Irán

La vivienda más alta de Europa con muros de barro macizo está en Weilburg, Alemania. El edificio se terminó en 1828 y aún está habitada (Fig. 1.2-11). Todos los entresijos y el techo descansan sobre muros macizos de tierra apisonada de 75 cm de espesor en la base y 40 cm en la cima (los esfuerzos de compresión alcanzan $7,5 \text{ kg/cm}^2$ en la base). La Fig. 1.2-12 muestra las fachadas de otras casas de barro apisonado en Weilburg construidas alrededor de 1830.

Después de la Primera y Segunda Guerra Mundial, cuando los materiales de construcción eran escasos en Alemania, se construyeron miles de viviendas y asentamientos usando bloques de barro o tapial (Günzel 1986, p.156), ver Fig. 1.2-13.

1.3 Qué debemos saber de la tierra como material de construcción

A la tierra utilizada como material de construcción se le ha dado diferentes nombres. Se denomina barro a la mezcla de arcilla, limo (arena muy fina), arena, agregados mayores como gravilla o grava. Cuando se habla de bloques de tierra arcillosa hechos a mano se emplea por lo general el término de bloques de barro o adobe, cuando se habla de bloques comprimidos se emplea el término bloques de suelo, cuando son extruidos en una ladrillería y no son cocidos se emplea el término ladrillo crudo.

En comparación con materiales industrializados comunes

el barro tiene tres desventajas:

1. El barro no es un material de construcción estandarizado

Su composición depende del lugar de donde se extrae, puede contener diferentes cantidades y tipos de arcilla, limo, arena y agregados.

Por eso sus características pueden variar de lugar a lugar y la preparación de la mezcla correcta para una aplicación específica puede variar también. Resulta necesario saber la composición específica del barro para poder juzgar sus características y modificarlas con aditivos si fuera necesario.

2. El barro se contrae al secarse

A través de la evaporación del agua de amasado (necesaria para activar la capacidad aglomerante de la arcilla y para poder ser manipulado) pueden aparecer fisuras. La retracción lineal durante el secado oscila entre 3-12% en técnicas de tierra húmeda (como las que se usan para morteros y bloques de barro) y entre 0,4-2% en técnicas con mezclas secas (utilizadas para tapial, o bloques compactados). La retracción se puede disminuir reduciendo la cantidad de agua y arcilla, optimizando la composición granulométrica o mediante el empleo de aditivos. (Ver sección 4.2).

3. El barro no es impermeable

El barro debe ser protegido contra la lluvia y las heladas especialmente en estado húmedo.



Las paredes de tierra pueden protegerse con aleros, barreras impermeabilizantes, tratamientos de superficies etc. (Ver sección 4.3 y 12).

Por otra parte el barro tiene muchas ventajas en comparación con los materiales de construcción industriales:

1. *El barro regula la humedad ambiental*

El barro tiene la capacidad de absorber y emitir humedad más rápido y en mayor cantidad que los demás materiales de construcción. Por eso regula el clima interior. Experimentos llevados a cabo en el Laboratorio de Construcciones Experimentales (FEB, por su sigla en alemán) de la Universidad de Kassel, Alemania, demostraron que cuando la humedad relativa en un ambiente interior aumenta súbitamente de 50% a 80%, los bloques de barro pueden absorber 30 veces más humedad que los ladrillos cocidos en un lapso de dos días. Aún cuando se colocan en una cámara climática a 95% de humedad relativa durante 6 meses los adobes se humedecen pero no se ablandan. Mediciones hechas durante un lapso de 8 años en una vivienda recientemente construida en Alemania donde todos los muros interiores y exteriores son de tierra, mostraron que la humedad relativa en esa vivienda es de 50% durante todo el año. Esta fluctúa solamente entre 5 y 10% ofreciendo así condiciones de vida saludables. (Para más detalles ver sección 1.4).

2. *El barro almacena calor*

Al igual que otros materiales densos, el barro almacena calor. En zonas climáticas donde las diferencias de temperaturas son amplias, o donde es necesario almacenar la ganancia térmica por vías pasivas, el barro puede balancear el clima interior.

3. *El barro ahorra energía y disminuye la contaminación ambiental*

El barro prácticamente no produce contaminación ambiental en relación a los otros materiales de uso frecuente, para preparar, transportar y trabajar el barro en el sitio se necesita solo 1% de la energía requerida para la preparación, transporte y elaboración de hormigón armado o ladrillos cocidos.

4. *El barro es reutilizable*

El barro crudo se puede volver a utilizar ilimitadamente. Solo necesita ser triturado y humedecido con agua para ser reutilizado. El barro en comparación con otros materiales no será nunca un escombros que contamine el medio ambiente.

5. *El barro economiza materiales de construcción y costos de transporte*

Generalmente el barro que se encuentra en la mayoría de las obras producto de la excavación de cimientos puede ser utilizado para la construcción. Si este no contiene suficiente arcilla, esta será añadida y si contiene mucha arcilla deberá mezclarse con arena lo que significa modificar la compo-



1.2-8 Reconstrucción de un muro de adobe del siglo VI a.C., Heuneburg, Alemania



sición del barro. En comparación con otros materiales de construcción se pueden disminuir considerablemente los costos si se utiliza el suelo excavado. Aún cuando este deba ser transportado de otros lugares resulta usualmente más económico que los materiales industriales.

6. El barro es apropiado para la autoconstrucción

Las técnicas de construcción con tierra pueden ser ejecutadas por personas no especializadas en construcción, es suficiente la presencia de una persona experimentada controlando el proceso de construcción. Estas técnicas de construcción son ideales para trabajos de autoconstrucción

porque se pueden ejecutar con herramientas sencillas y económicas, aunque al mismo tiempo son más trabajosas en su ejecución.

7. El barro preserva la madera y otros materiales orgánicos

El barro mantiene secos los elementos de madera y los preserva cuando están en contacto directo con él, debido a su bajo equilibrio de humedad de 0.4 a 6% en peso y a su alta capilaridad.

Los insectos y hongos no pueden destruir la madera en esas condiciones ya que los insectos necesitan un mínimo de



Izquierda:

1.2-10 Casa de tapial, Meldorf, Alemania, 1795

1.2-11 Casa de tapial, Weilburg, Alemania, 1828

Derecha:

1.2-12 Casa de Tapial, Weilburg, Alemania, ca. 1830

1.2-13 Asentamiento Lübeck-Schlutup, Alemania



humedad de 14 a 18% y los hongos más de 20% de humedad para vivir (Möhler 1978, p.18). Así mismo, el barro puede preservar pequeñas cantidades de paja dentro de su masa.

Sin embargo si se utiliza barro alivianado con paja con una densidad menor de 500 – 600 kg/m³ esta capacidad de preservación del barro no resultará suficiente debido a la alta capilaridad de la paja cuando se utiliza en esas proporciones. En esos casos se debe tener en cuenta que está latente la posibilidad de su descomposición por la putrefacción provocada por una prolongada exposición a la humedad. (Ver sección 10.3).

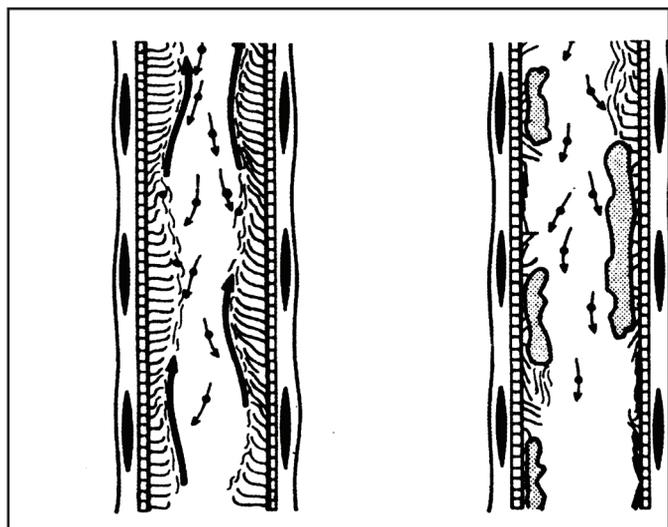
8. *El barro absorbe contaminantes*

Se ha dicho muchas veces que el barro contribuye a purificar el aire de un ambiente interior pero hasta el momento esto no ha sido científicamente comprobado. Es una realidad que el barro puede absorber contaminantes disueltos en agua. Por ejemplo existe una planta de demostración en Berlin-Ruhleben que remueve diariamente fosfatos de 600m³ de aguas residuales usando suelos arcillosos. Los fosfatos se pegan a los minerales de la arcilla y son extraídos de los residuos. La ventaja de este procedimiento es que no quedan sustancias ajenas en el agua ya que el fosfato se convierte en fosfato de calcio y se puede reutilizar como fertilizante.

1.4 Mejoramiento del clima interior

1.4.1 Generalidades

En ciudades con climas templados y fríos las personas pasan el 90% de su tiempo en edificios cerrados. Resultando el clima interior muy importante para su bienestar. Su confort depende de la temperatura del espacio interior, de la temperatura del espacio circundante, del movimiento del aire interior, del contenido de humedad del aire y de la



1.4-1 Corte de una tráquea con membrana mucosa del epitelio normal (izquierda) y una reseca (derecha)

contaminación del aire.

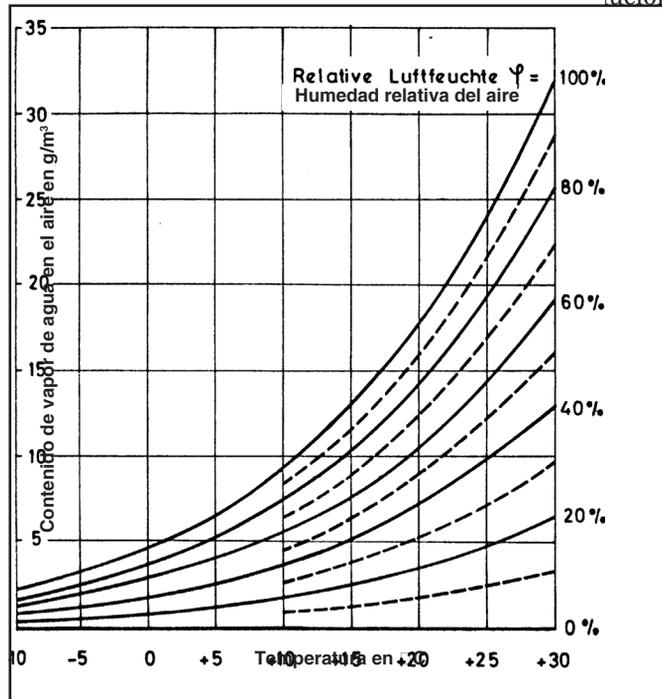
Si la temperatura es muy alta o muy baja los habitantes lo perciben, pero la influencia dañina de una humedad muy alta o muy baja no es de conocimiento común. La humedad del aire en los interiores ejerce una influencia significativa en el bienestar de los habitantes y la tierra tiene la capacidad de balancear la humedad del aire como ningún otro material. Este aspecto de reciente investigación se describe en detalle en la siguiente sección.

1.4.2 Humedad del aire y salud

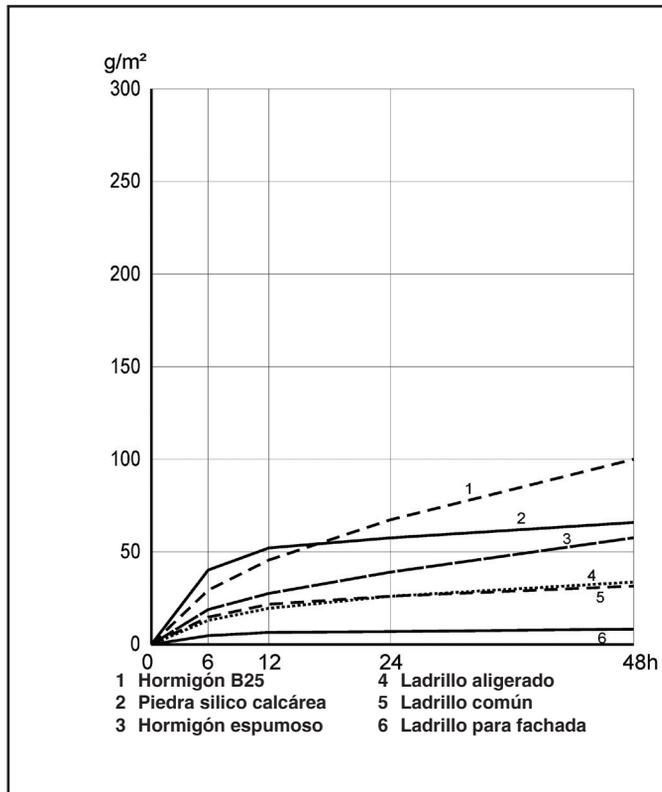
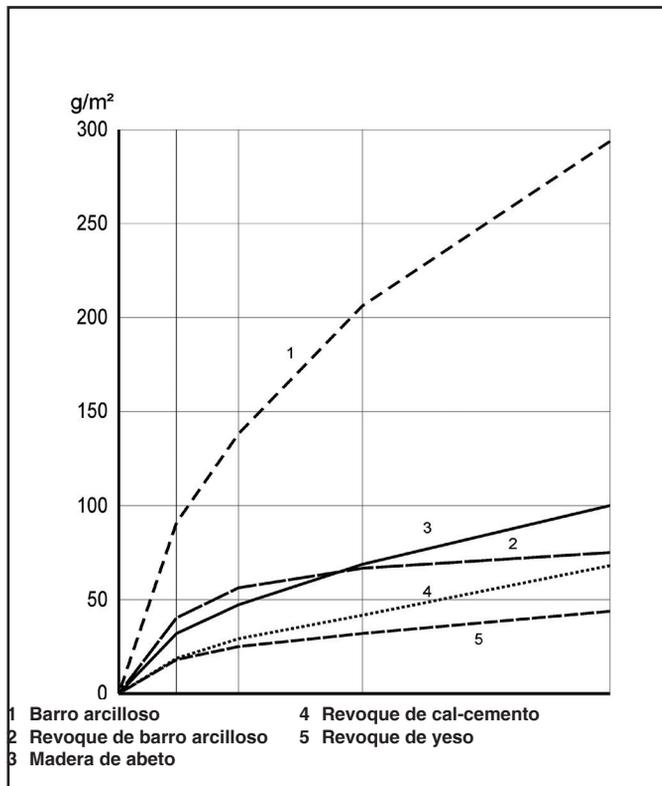
De las investigaciones de Grandjean (1972) y Becker (1986) sabemos que una humedad relativa menor de 40% durante un largo período puede resecar las mucosas. Esto conlleva a una disminución de la resistencia, a los resfriados y a enfermedades relacionadas. Esto se debe a que normalmente las mucosas del epitelio de la tráquea absorben polvo, bacterias, virus etc. y los restituyen a la boca mediante el movimiento ondulatorio de los vellos del epitelio. Si este sistema de absorción y transporte se interrumpe por resecamiento, estos cuerpos ajenos alcanzan los pulmones provocando enfermedades. (Ver Fig. 1.4-1.)

Una humedad relativa de 50 a 70% tiene muchas influencias positivas: reduce el contenido de polvo fino en el aire, activa los mecanismos de protección de la piel contra los microbios, disminuye la vida de muchas bacterias y virus y disminuye los olores y la electricidad estática en las superficies de objetos.

Una humedad relativa de más del 70% resulta en la mayoría de los casos desagradable debido a la disminución



1.4-2 Diagrama de Carrier. Contenido de agua en el aire en relación con la temperatura



1.4-3 Curvas de absorción en relación al tiempo, de muestras de diferentes materiales de 1,5 cm de espesor, a una temperatura de 21 °C con un incremento súbito de la humedad del ambiente de 50% a 80%

en la absorción de oxígeno de la sangre en condiciones cálido húmedas. Se observan incrementos de las dolencias reumáticas en ambientes fríos y húmedos. El crecimiento de hongos en espacios cerrados se incrementa cuando la humedad alcanza más de 70 u 80%. Las esporas de hongos en grandes cantidades pueden conllevar a diferentes enfermedades y alergias. A partir de estas consideraciones, se puede establecer que el contenido de humedad en un ambiente interior no debe ser menor a 40% ni mayor a 70%.

1.4.3 Influencia del intercambio de aire en la humedad del aire

En climas templados y fríos cuando la temperatura exterior es mucho menor que la interior, este último se vuelve seco como resultado del intercambio de aire fresco y puede afectar nuestra salud. Por ejemplo si un aire exterior con una temperatura de 0°C y 60% de humedad relativa entra en un espacio y se calienta hasta 20°C su humedad relativa disminuye a menos de 20%. Aún si el aire exterior a una temperatura 0°C tuviera 100% de humedad y se calienta a 20°C su humedad relativa disminuirá a menos de 30%. En ambos casos resulta necesario aumentar la humedad para alcanzar condiciones saludables. Esto se puede lograr con la desorción de humedad de los muros, pisos, entrepisos y muebles. (Ver Fig. 1.4-2).

1.4.4 El efecto del barro en el balance de la humedad

Un material poroso tiene la capacidad de absorber humedad del ambiente y desorberla, ofreciendo un balance de humedad en el ambiente interior. El contenido de humedad del material depende de la temperatura y de la humedad del ambiente (ver sección 2.4.3 y Fig. 2.4-3). La efectividad de este proceso de balance depende también de la velocidad de la absorción y la desorción. Por ejemplo, experimentos desarrollados por el FEB muestran que la primera capa de 1,5 cm de un muro de bloques de barro (adobe) es capaz de absorber aproximadamente 300 g de agua por m² de la superficie del muro en 48 horas, si la humedad del ambiente incrementa súbitamente de 50 a 80%. En cambio, la piedra silicocalcárea y la madera de pino de un mismo espesor absorben solamente 100 g/m² aproximadamente, el revoque 26-76 g/m² y el ladrillo cocido sólo 6-30 g/m² en el mismo período. (Ver Fig. 1.4-3).

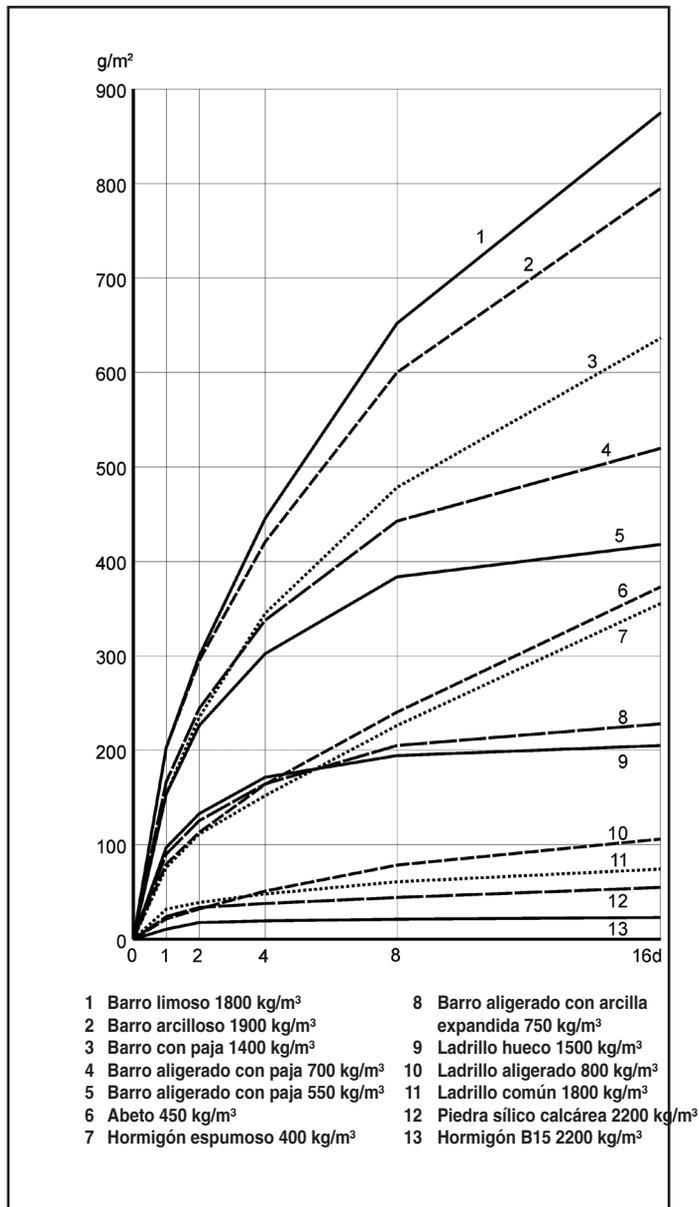
Las curvas de absorción por ambas caras de muros de 11,5 cm de espesor, de diferentes materiales sin revoque por un lapso de 16 días se muestran en la Fig. 1.4-4.

Los resultados demuestran que los bloques de barro (adobes) absorben 50 veces más humedad que los ladrillos cocidos a altas temperaturas. Los datos de absorción de muestras de 1.5 cm de espesor con un incremento súbito de la humedad del aire de 30 a 70% se muestran en la Fig. 1.4-5.

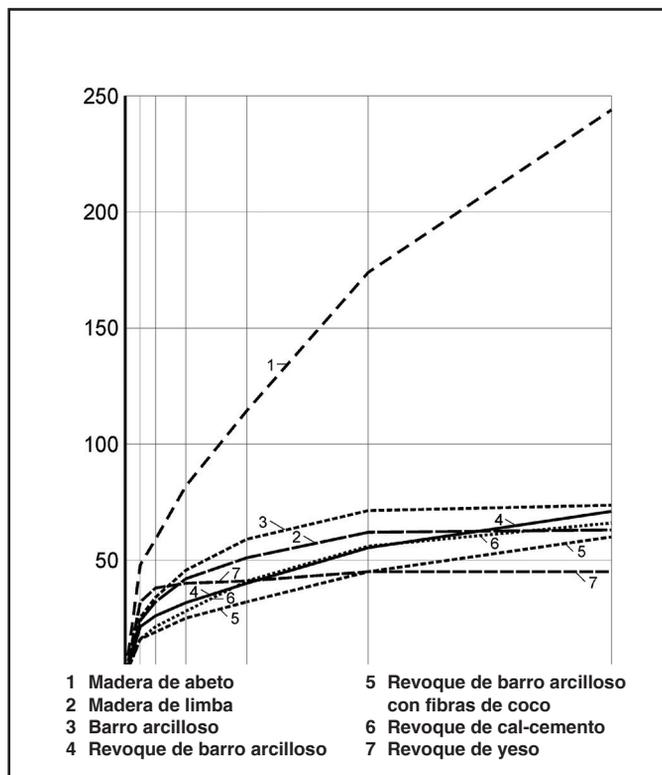
La influencia del espesor de las capas de barro en relación

a la absorción se muestra en la Fig. 1.4-6. Aquí vemos que cuando la humedad incrementa súbitamente de 50% a 80% sólo los 2 cm exteriores absorben la humedad en las primeras 24 horas y en los 4 primeros días sólo la capa exterior de 4 cm es activa. Pinturas de cal, caseína y cola celulosa reducen esta absorción ligeramente mientras que con pinturas de doble látex y aceite de linaza se puede obtener un efecto de reducción de la absorción en un 38% y 50% respectivamente, como se muestra en la Fig.1.4-7.

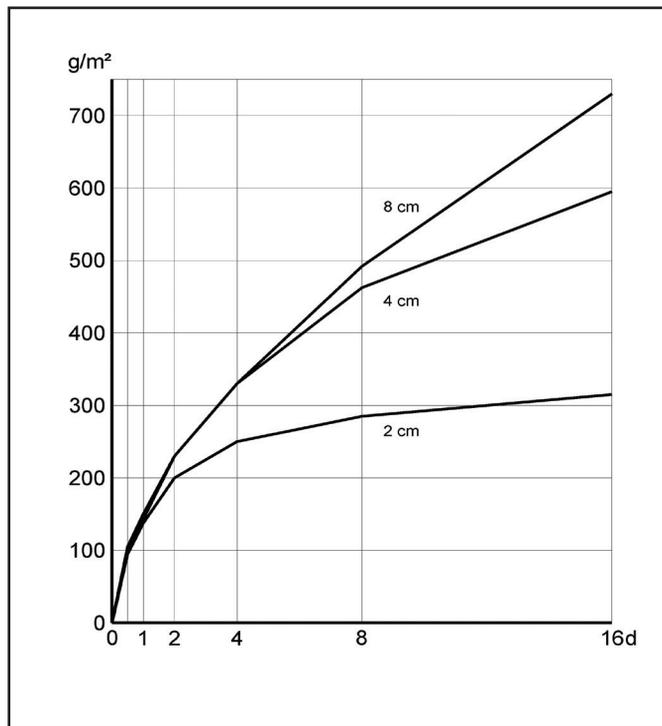
En una habitación con un área de 3 x 4 m, una altura de 3m y una superficie en muros de 30m² (sin contar los vanos de puertas y ventanas), si incrementa la humedad del aire interior de 50 a 80%, el muro de bloques de barro sin



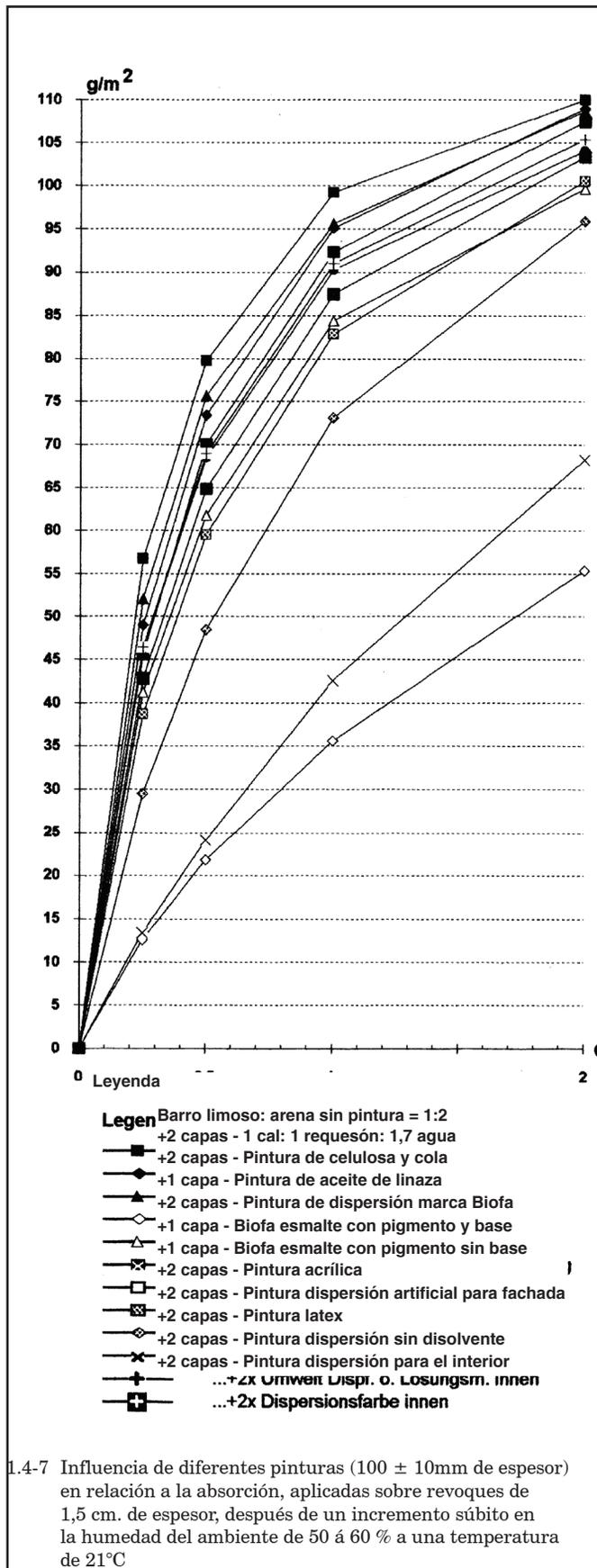
1.4-4 Curvas de absorción de un muro interior de 11.5 cm con ambas caras expuestas a una temperatura de 21°C luego de un incremento súbito de la humedad del aire de 50% a 80%



1.4-5 Curvas de absorción de muestras de 1,5 cm de espesor con una cara expuesta a una temperatura de 21°C luego de un incremento súbito de la humedad del ambiente de 30% a 70%



1.4-6 Influencia del espesor de las capas de barro en relación a la absorción de humedad, a una temperatura de 21°C y luego de un incremento súbito de la humedad del ambiente de 50% a 80%



revoque absorbe aproximadamente 9 litros de agua en 48 horas. (Si la humedad disminuye del 80% a 50% la misma cantidad es desorbida).

Los mismos muros construidos con ladrillos cocidos absorberían solamente 0.9 litros de agua en el mismo lapso de tiempo, lo que significa que no son apropiados para balancear la humedad de los ambientes.

Mediciones realizadas durante un lapso de cinco años en diferentes ambientes de una vivienda construida en 1985 en Alemania, donde los muros exteriores e interiores están construidos con tierra mostraron que la humedad relativa se mantiene constante durante el año variando de 45 á 55%. El dueño quería una humedad mayor de 50-60% sólo en el dormitorio y fue posible mantener este nivel (que es más sano para personas propensas a los resfríos) utilizando la mayor humedad del baño para liberarla en la habitación adyacente. Si la humedad en el dormitorio disminuye se abre la puerta del baño luego de tomar una ducha y las paredes de la habitación se cargan nuevamente con humedad.

1.5 Prejuicios contra la tierra como material de construcción

Los prejuicios contra la tierra son contradictorios y generalmente relacionados con la ignorancia. Para muchas personas resulta difícil concebir que un material natural como la tierra no necesite ser procesado y que en muchos casos la excavación de cimientos ofrezca un material que puede ser utilizado directamente para construir.

La siguiente reacción es característica en un albañil que debe construir un muro con adobes: “Esto es como en la Edad Media”; “Ahora tenemos que ensuciarnos las manos con este barro”. El mismo albañil observa complacido sus manos luego de trabajar con adobes durante una semana diciendo: “Ha visto usted alguna vez manos de albañil tan suaves y sin heridas? Trabajar con adobes es más agradable porque no tienen los bordes filosos”.

La afirmación de que gusanos o insectos puedan vivir en muros de tierra es infundada cuando estos son macizos. Los insectos solo pueden existir si hay huecos en muros de bajareque o de adobe. En Sudamérica el mal de chagas que conduce a la ceguera proviene de insectos que viven en los muros de bajareque.

Los huecos se pueden evitar construyendo muros de tierra apisonada o con bloques de barro con juntas totalmente rellenas. Asimismo si la tierra contiene demasiado aditivo orgánico como en el caso de la arcilla alivianada con paja con una densidad menor de 600 kg/cm³, se pueden alojar en su masa pequeños insectos y atacarla.

El problema de que las paredes de barro son difíciles de limpiar (especialmente en cocinas y baños) se puede resolver si se pintan con caseína, cal-caseína, aceite de linaza u otras pinturas de manera que no sean abrasivas. Los baños con paredes de barro son usualmente más higiénicos que los revestidos con azulejos, debido a que las paredes de barro absorben rápidamente la humedad e inhiben el crecimiento de hongos como se explica en la sección 15.9.