

**El Barro y su aplicación en la arquitectura actual,
- nuevas investigaciones, técnicas y proyectos**

Prof. Dr.-Ing. Gernot Minke, Universidad de Kassel, Alemania
Fax : 0049-561-5428, e-mail : minke@architektur.uni-kassel.de

Abstract

Earth as a building material is investigated since 26 years at the Forschungslabor für Experimentelles Bauen (FEB) University of Kassel, Germany.

Within 15 research and development projects the physical and mechanical properties of different clayey soils were analysed and optimised, for instance to improve the water resistance and the thermal insulation, to reduce the shrinkage ratio and to increase the resistance against compression, bending and abrasion.

New technologies were developed; such as extrusion of earthen building elements, mechanized rammed earth technology, pumping and spraying techniques for lightweight earth and methods to construct wide span adobe domes without formwork. The paper depicts projects built with these techniques in Latin America and Germany. Furthermore it describes prototype structures of earthquake resistant houses built of earth in Guatemala, Mexico, Ecuador, Bolivia and Chile.

Keynote words: earth as a building material, earthquake resistant houses, adobe domes

Abstracto

En el Laboratorio de Investigación de Construcciones Experimentales de la Facultad de Arquitectura, Universidad de Kassel, Alemania, el material barro, la tierra cruda, está investigado hace 26 años.

En un proyecto de investigación las características físicas y mecánicas de diferentes tierras arcillosas fueron analizadas y optimizadas, por ejemplo para mejorar la resistencia contra lluvia, para aumentar el efecto del aislamiento térmico, para reducir la contracción durante el secado y para aumentar la resistencia a la compresión, flexión y abrasión.

Nuevas técnicas para la aplicación del barro fueron desarrolladas, como la extrusión de elementos de barro, tapial mecanizado, barro aliviado bombeado y técnicas de construir bóvedas y cúpulas sin encofrados. Proyectos construidos en Latinoamérica y Alemania serán mostrados.

El reporte describe también los resultados de investigaciones sobre construcciones antisísmicas para viviendas de tierra y los prototipos construidos en Guatemala, Ecuador, Bolivia y Chile.

Palabras de clave : barro como material de construcción, viviendas antisísmicas de tierra, cúpulas de adobe



fig. 1



fig. 2



fig. 3



fig. 4

Hoy en día un tercio de la humanidad vive aún en viviendas de tierra cruda. Hay ejemplos muy importantes en tierra cruda, que están en la lista de proyectos de patrimonio mundial como la ciudad de Shibam en Yemen con alrededor de 500 edificios como rascacielos de hasta 9 pisos de altura, del siglo 16 (fig. 1), la mezquita de Djenné en Mali (fig. 2), el castillo de Bahla del siglo 17 en Omán, y el Taos Pueblo en Nuevo México fundado en el siglo 14 (fig.3).

Hay otros edificios importantes como las bóvedas de adobe en el templo de Ramses II en Egipto, que tienen mas de 3200 años de antigüedad (fig. 4), los condominios de los Hakkas en China, algunos de ellos tienen más de 300 años de antigüedad y la construcción más alta de adobe, de ladrillo crudo hecho a mano, la torre de la mezquita de Tarim en Yemen, que tiene una altura de 38 m (fig. 5). La resistencia a compresión en la base del torre es 2.5 veces mayor que su peso. Es decir el factor de seguridad todavía es 2.5.

También hay ejemplos imponentes de la arquitectura moderna construidos en tierra como el instituto panafricano en Ouagadougou, Burkina Faso, África, que ganó el premio de Aga-Khan de arquitectura en 1992 (fig. 6) y el Koralbyn hotel en Australia construido en tierra apisonada (fig. 7). Fig. 8 muestra una vivienda de bóvedas de adobe en La Paz, Bolivia y fig. 9 una vivienda de tierra apisonada de los Estados Unidos. Se puede ver que la arquitectura de tierra no tiene un estilo propio, el material de construcción no define la apariencia.

En mi Laboratorio de Investigación de Construcciones Experimentales en la Universidad de Kassel, Alemania, hacemos investigaciones con el material barro hace 26 años. Hasta ahora hicimos 15 proyectos de investigación financiados por instituciones nacionales e internacionales.

Hicimos miles de pruebas con diferentes mezclas de tierras arcillosas y diferentes agregados para estudiar

y optimizar sus características físicas y mecánicas. Por ejemplo la resistencia a la lluvia, que es un problema muy grave, porque la tierra tienen muy poca resistencia al agua corriente. Construimos una maquina para simular una lluvia muy fuerte, y estudiamos la influencia de diferentes agregados.

Utilicé en mi casa algunos de los resultados de esta investigación, para dos lavamanos de barro, que son utilizados cada día y no muestran erosión. En un caso utilizamos aceite de linaza (fig. 10) en el otro cal y caseína (fig. 11) para hacer impermeable el barro crudo.

Debido a que muchos revoques de barro tienen una baja resistencia a la abrasión, construimos un aparato para probar su resistencia a la abrasión. También desarrollamos un aparato para comprobar la resistencia a los impactos en las esquinas de los adobes. En 1988 descubrimos que la tierra arcillosa absorbe y desorbe



fig. 5



fig. 6



fig. 8



fig. 7



fig. 9



fig. 10



fig. 11

la humedad del aire más que todos los otros materiales masivos de construcción. Si la humedad relativa del aire sube de 50 a 80 % una capa de tierra arcillosa de 15 mm absorbe casi 300 g de agua por metro cuadrado mientras que un ladrillo cocido del mismo espesor solo de 6 hasta 30 g/por metro cuadrado, es decir solo 2 hasta 10 %, ver fig. 12.

Uno de los últimos resultados de nuestras investigaciones demostró que el barro puede absorber rayos electromagnéticos de alta frecuencia más que otros materiales masivos, ver fig.13.

Hay muchas investigaciones que demuestran , que los rayos de los teléfonos celulares y los teléfonos inalámbricos tipo DECT son peligrosos para la salud del hombre. Hicimos pruebas que fueron investigadas en el laboratorio de la Universidad de Munich que demuestran por ejemplo que un muro de 24 cm de ladrillos crudos absorbe más de 99,6 % de los rayos de 2 Gigahertz, mientras un muro de 16 cm de hormigón armado solo absorbe 80 % de los rayos de 2 GHz. Una bóveda de adobe de 24 cm con un techo verde con 16 cm de tierra absorbe 99,999 %, que es casi 100%. El standard de la Baubiologie reclama, que la intensidad de los rayos electromagnéticos de alta frecuencia no debe ser mas de 10 Mikrowatt por metro cuadrado ($\mu\text{W}/\text{m}^2$) con rayos palpitados (como del celular y del teléfono sin cable). El celular ya funciona con una intensidad de $0,001 \mu\text{W}/\text{m}^2$. Mientras en un edificio en Alemania abajo del techo en una distancia de 20 m del emisor fue medido mas de $10.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$. Estos son 10 000 000 veces mas que necesita el celular. Por eso para mi una absorción de 90 % es no aceptable. Normalmente recomiendo 99,9 % absorción. Pero siempre hay que medir la intensidad del e-smog en el lugar, y después se puede diseñar las medidas para obtener una absorción que garantiza no más de $10 \mu\text{W}/\text{m}^2$.

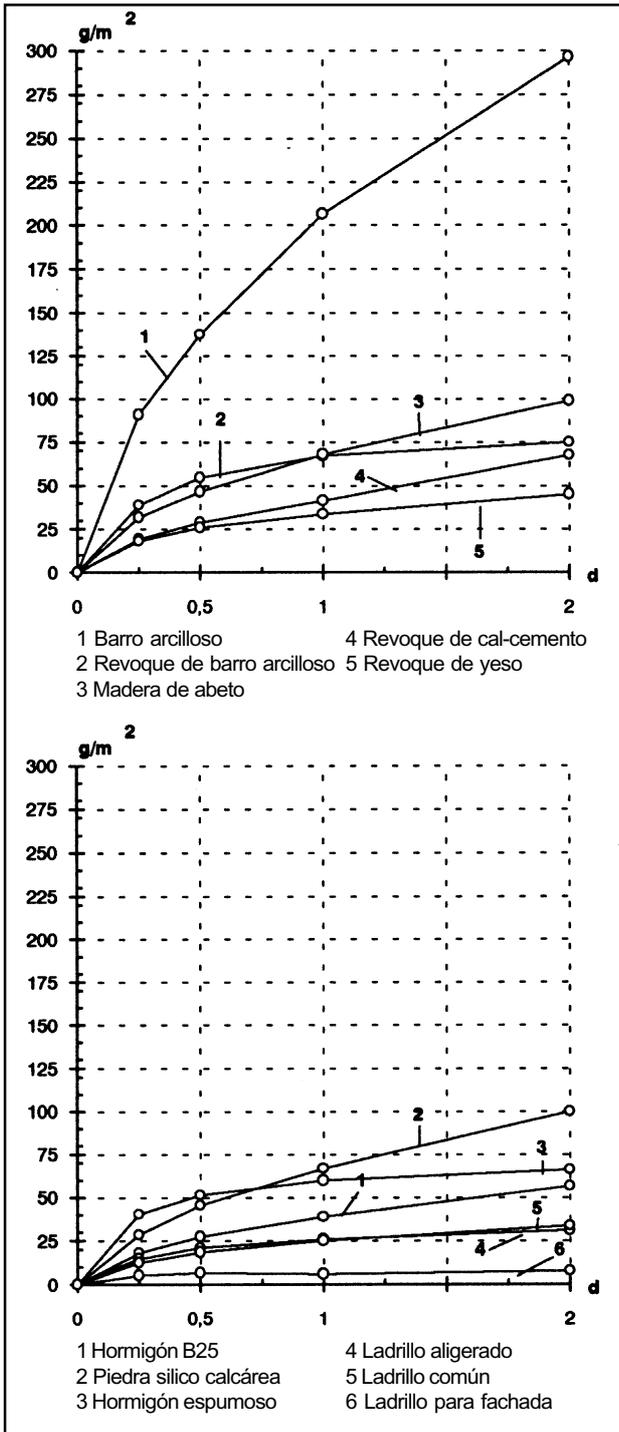


fig. 12

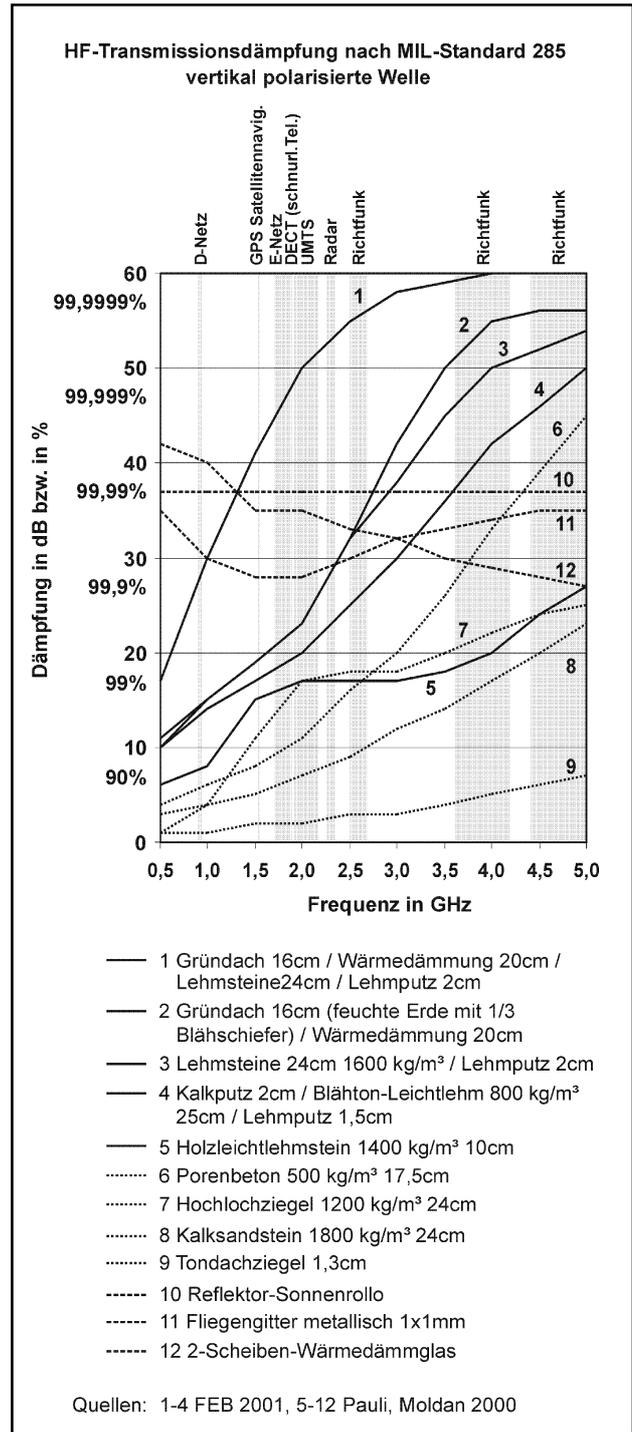


fig. 13



fig. 14



fig. 15



fig. 16

En mi laboratorio optimizamos y desarrollamos también diferentes técnicas para construir con barro: En un proyecto de investigación sobre viviendas antisísmicas de tierra estudiamos las diferentes posibilidades para construir viviendas antisísmicas de tierra. Construimos una vivienda prototipo en Guatemala en 1978, ver fig. 14 hasta 17, donde los muros fueron construidos con elementos de tapial reforzados con bambú en forma de T, con uniones, que pueden abrirse durante el sismo, sin que los elementos caigan, porque están sujetos arriba a una viga cadena y abajo de otra embarcada en el zócalo (sobre-cimiento). Publicamos un manual en Español y en Inglés donde las diferentes posibilidades y técnicas están descritas (1). Por ejemplo la estabilización con elementos de tapial que son estables por su forma, ver fig. 18. En Chile construimos una vivienda utilizando esta técnica combinada con un reforzamiento con coligüé (una planta local, similar de bambú), ver fig. 19,20. En Ecuador construimos una vivienda mínima con elementos de tierra apisonada en forma de U. En este proyecto mezclamos la tierra arcillosa del lugar con piedra pómez para mejorar el aislamiento térmico.

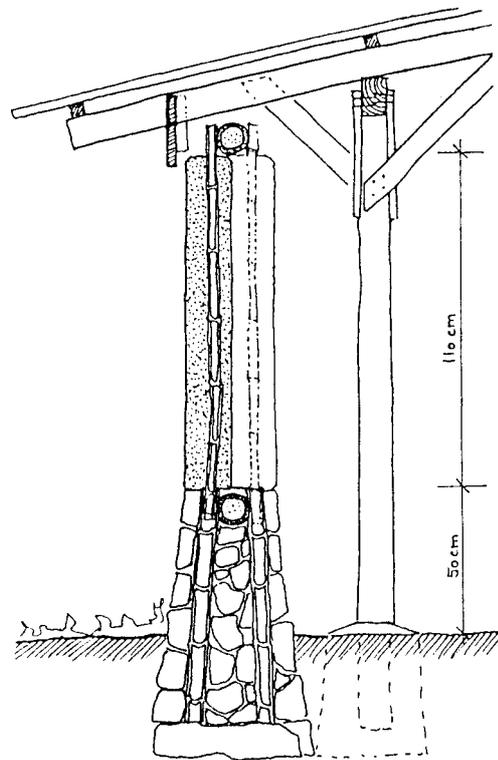


fig. 17

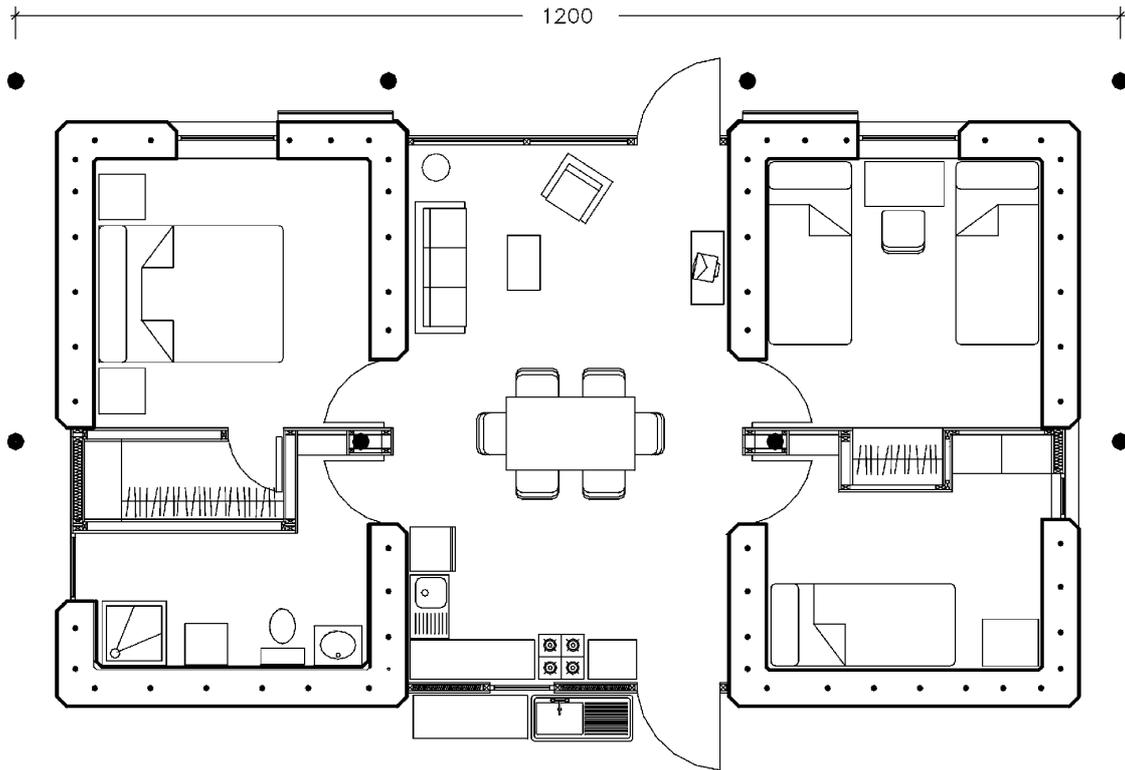


fig. 19

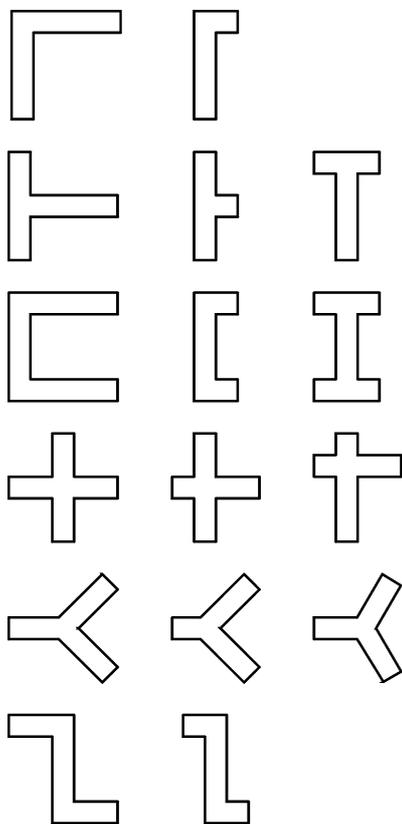


fig. 18

En los 3 proyectos siempre el techo descansa sobre columnas aisladas de los muros. Esta es una medida muy importante para la sismo resistencia porque el techo y los muros tienen una frecuencia de movimiento diferente cuando hay choques horizontales durante el sismo, y así pueden moverse independiente. En México utilizamos la técnica de bahareque para construir una vivienda antisísmica para eco turismo en la región de los Indios Huicholes.



fig. 20



fig. 21

Otra técnica que desarrollamos es la del barro extruído. Los elementos se colocan en estado plástico, sin mortero, formando paredes, y también objetos (fig. 21, 22).

También desarrollamos una técnica para bombear barro alivianado, que es tierra arcillosa con agregados livianos como arcilla expandida, piedra pómez o vermiculite, para construir muros de barro con un mejor aislamiento térmico.



fig. 22

Las técnicas tradicionales para construir bóvedas y cúpulas de adobe sin cimbra, o encofrado son conocidas hace mucho tiempo. Las bóvedas construidas con la técnica Núbica de Egipto, en el templo de Ramses II tienen una antigüedad de mas de 3200 años y aún se mantienen así (fig. 4). Optimizamos esta técnica tradicional utilizando adobes cónicos para ahorrar mezcla en las uniones y utilizando hilos para obtener la



fig. 23



fig. 24

curva optima, que es una catenaria invertida.

Para construir cúpulas grandes con adobe sin cimbra, sin encofrado, desarrollamos una guía rotatoria (fig. 25). Y para minimizar el espesor de la cúpula optimizamos la curva de la sección con un programa de computadora. Esta sección optimizada garantiza que la cúpula no tenga fuerzas de anillo, ni a tracción ni a compresión. Las fuerzas son transferidas verticalmente hacia abajo y por eso es fácil construir aberturas como ventanas y puertas en la cúpula, sin provocar problemas estructurales.

En mi casa construida hace 10 años todos las habitaciones principales están cubiertas con cúpulas de adobe utilizando la guía rotatoria mencionada antes, ver fig. 23, 24.

En La Paz, Bolivia, construimos una cúpula con un diámetro de 8,80 m y una altura de 6 m con adobes hechos a mano. Esta cúpula, que fue construida para el Goethe-Institut (centro cultural alemán), es utilizada como centro cultural para conciertos, exhibiciones y conferencias, ver fig. 26.

En el Waldorf Kindergarten en Sorsum, Alemania, que



fig. 25



fig. 26



fig. 27

es cubierto de un techo verde (fig. 27), la sala central, una sala multiuso es una cúpula de 10 m diámetro y 7 m de altura, construida con una guía rotatoria y ladrillos crudos especiales (fig. 28, 29). Por sus esquinas redondeadas hay una distribución del sonido, por la inclinación de los adobes hay una reflexión de los sonidos hacia arriba, evitando el efecto de reflexión al centro. Por los huecos y las uniones excavadas hay un efecto de absorción del sonido. El resultado es una acústica óptima para conciertos.

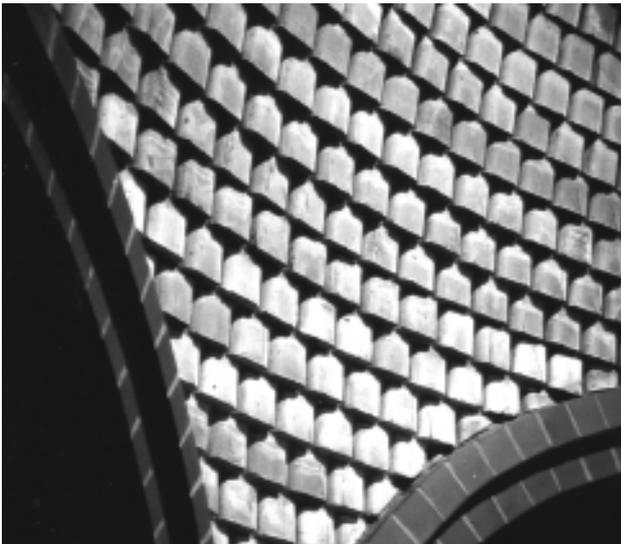


fig. 28

La cúpula más grande construida hasta ahora es la del Kindergarten en Oranienburg-Eden en Alemania, tiene un diámetro de 11 m.

Una nueva técnica que desarrollamos es la del barro empacado en mangueras de algodón (fig. 30). El barro se mezcla con agregados livianos como arcilla expandida o piedra pómez, y se bombea en las mangueras. Estos se colocan sin mortero en estado plástico. Cuando están frescas son flexibles y pueden ser colocadas de manera creativa, ver fig. 31, 32.



fig. 29

Más informaciones sobre las técnicas y proyectos mencionados se pueden ver en la literatura (2).

(1) Gernot Minke: Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra, Kassel 2001, 50 páginas. Se puede descargar de la dirección www.gtz.de/basin/publications/

(2) Gernot Minke: Manual de construcción en tierra, la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual, Editorial Nordan, Montevideo, Uruguay, 2001, 222 páginas



fig. 30



fig. 31



fig. 32