



El empleo del ultrasonido en tapia de tierra apisonada

Maria Virgínia SIMÃO PEIXOTO, Marco Antônio PENIDO DE REZENDE,
Luiz Antônio CRUZ SOUZA

Article disponible dans les actes du colloque Terra 2016:

JOFFROY, Thierry, GUILLAUD, Hubert, SADOZAÏ, Chamsia (dir.) 2018, *Terra Lyon 2016: Articles sélectionnés pour publication en ligne / articles selected for on-line publication / artículos seleccionados para publicación en línea*. Villefontaine : CRAterre. ISBN 979-10-96446-12-4.

Resumen

Los testes no destructivos han ganado importancia en el campo de la conservación. El ultrasonido ha atraído la atención de los investigadores de conservación debido a sus bajos costos y a la interferencia mínima en la estructura analizada.

El objetivo principal fue estudiar la correlación (o su falta) entre la velocidad de la onda de ultrasonido y la resistencia (compresión) en los paneles de tierra apisonada.

Se construyeron cinco paneles en tierra apisonada. En cuatro de ellos se retiró un ejemplar para probar y en el quinto se hicieron los testes de ultrasonido en el propio panel. La tierra utilizada fue similar a la que se encuentra en la mayor parte de las construcciones del patrimonio en Tierra en Brasil (región del estado de Minas Gerais). Los resultados se resumen en el gráfico, que presenta la relación entre resistencia y velocidad de la onda de ultrasonido.

Los resultados de los ensayos en los cuatro paneles de la primera etapa fueron insatisfactorios. En la segunda etapa los ensayos en el minipanel 5 produjeron resultados satisfactorios.

Con los resultados obtenidos en el quinto minipanel se comprobó la posibilidad de emplear ultrasonido en la evaluación de las características físicas y mecánicas en estructuras de tierra apisonada.

Palabras claves: Testes no destructivos. Ultrasonido. Ultrasonido y construcción con tierra. Tierra apisonada

1 INTRODUCCIÓN

La herencia de la arquitectura de tierra en Brasil es muy rica. El estado de Minas Gerais cuenta con un importante acervo, sin embargo, se encuentra en un precario estado de conservación.

En el desarrollo de la restauración de edificaciones en tierra hay que conocer el estado físico en el que se encuentran dichas construcciones. En la etapa de diagnóstico, los ensayos que hay que realizar, por medio de la evaluación de las características físicas y mecánicas del material empleado, en general son destructivos e implican la retirada de cuerpos de prueba (REZENDE, RODRIGUES, 2007). Como ese procedimiento no es el ideal, surge la necesidad de desarrollar nuevas formas de hacer el diagnóstico del estado de las construcciones, con la intención de no dañar, sino conservar la edificación, por medio del empleo de ensayos no destructivos.

La técnica del ultrasonido es una forma de alcanzar ese objetivo y ya se emplea en estructuras de algunos materiales como el hormigón y el acero. Por lo tanto, la propuesta es la de comprobar la viabilidad de su utilización también en la arquitectura de tierra, buscando determinar las condiciones físicas y mecánicas sin causar daños a su estructura.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el período de la colonización brasileña la tierra fue ampliamente utilizada en la construcción de las edificaciones en prácticamente todas nuestras villas y poblados.

Rezende y Rodrigues (2007), a partir de estudios realizados en ruinas y monumentos históricos construidos en tapia de tierra apisonada, desarrollaron una metodología para la reconstitución de las construcciones de esta tipología.

Yesiller et al (2000) desarrollaron un estudio con la intención de investigar el uso de métodos ultrasónicos en la determinación de características de compactación de suelos arcillosos. En ese estudio comprobaron que la resistencia de un suelo se ve afectada por más factores, además de la dureza, y que incluye vacíos, imperfecciones y defectos. Por consiguiente, la resistencia del suelo no está directamente relacionada a la velocidad de la onda, aunque, generalmente, se suele asociar velocidades más altas a mayores resistencias. Se comprueba también el aumento de la velocidad con el aumento de la densidad seca del suelo debido al hecho de que la transmisión de onda es más rápida en lo sólido que en los vacíos (YESILLER et al, 2000).

Varum et al (2006), empleando la técnica de ultrasonido, un ensayo no destructivo, han realizado investigaciones en lo que respecta al comportamiento estructural de edificaciones construidas con albañilerías de adobe, a partir de la estimación de la resistencia y del módulo de rigidez que esta presentaba. Tenía como objetivo desarrollar directrices de procedimientos de rehabilitación de estas estructuras y crear un conjunto de estrategias de acciones para prevenir que colapsaran. Unas de las causas posibles para que esta investigación no alcanzara los resultados esperados pudo haber sido la sensibilidad que presentó el aparato utilizado.

Bandeira (2009), en su estudio, buscando establecer una correlación entre resistencia mecánica y velocidad ultrasónica para un material terroso, después de realizar testes ultrasónicos y ensayos de ruptura a compresión simple en 78 cuerpos de prueba hechos del material terroso, concluye que existe una “fuerte correlación entre la tensión de ruptura y la velocidad de propagación de la onda ultrasónica, cuyo coeficiente de correlación fue igual a 0,96” (BANDEIRA, 2009, p77).

3. METODOLOGÍA– ULTRASONIDO

3.1 – Metodología de la primera etapa de la investigación.

En una primera etapa de esta investigación se construyeron cuatro minipaneles en tapia de tierra apisonada con las siguientes dimensiones: 2,0m de longitud, 1,20m de altura y 0,44m de espesura.

Fueron realizados ensayos de caracterización del suelo utilizado, entre ellos: análisis granulométrico, masa específica, límite de liquidez, límite de plasticidad y ensayos de compactación del suelo.

Los prototipos de las paredes en tapia de tierra apisonada fueron ejecutados a partir de la compactación del suelo dentro de moldes previamente trabajados, en capas sucesivas de, aproximadamente, 15 a 20cm.

El aparato de ultrasonido fue calibrado en todas las frecuencias utilizadas en ensayos, siendo estas: 82kHz, 150 kHz y 200 kHz. De acuerdo con el procedimiento normal se necesita la realización de tres medidas, siendo que los resultados registrados deben presentar una variación máxima de 5% del valor mediano obtenido.

3.2 – Metodología de la segunda etapa de la investigación.

3.2.1 – Ejecución del prototipo 5

Fue elaborado un tapial, con las siguientes dimensiones internas: 1,5m de longitud, 0,90 de altura y 0,44m de espesura. El suelo utilizado, similar al que se encuentra en la mayor parte de las construcciones del patrimonio en Tierra en Brasil (región del estado de Minas Gerais), fue previamente preparado, ya pasado por la criba, con tela de 4,8mm. Su compactación fue realizándose en sucesivas capas de, aproximadamente, 15 a 20cm, con el uso de un pisón de madera, con base en formato cónico. La retirada del molde del prototipo 5 se realizó 9 días después de su compactación.

3.2.2 Ensayo de ultrasonido en el prototipo 5

La calibración del aparato de ultrasonido fue realizada en todas las frecuencias utilizadas en los ensayos, siendo estas: 54kHz y 500kHz.

Para los testes se utilizaron transductores de 54kHz y 500kHz. De acuerdo con la norma BSI 1881, deben ser realizadas tres medidas, siendo que los resultados registrados deben presentar una variación máxima de un 5% del valor medio obtenido.



FIGURA 1: Panel 5.
Fuente: PEIXOTO, 2012.



FIGURA 2: Teste de ultrasonido en el Panel 5.
Fuente: PEIXOTO, 2012.

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Resultados de la primera etapa de la investigación

Los ensayos de ultrasonido realizados en los paneles produjeron resultados insatisfactorios. Se utilizaron los transductores de 82kHz, 150kHz y 200kHz. El sistema de medición utilizado fue el indirecto. El aparato no registró ninguna lectura en los prototipos 2, 3 y 4. Sólo el panel 1, el panel defectuoso, presentó lecturas, sin embargo, los datos generados no fueron considerados válidos.

Ante los resultados presentados por el ensayo del ultrasonido en los prototipos, se comprobó la necesidad de retirar los cuerpos de prueba en el área cercana a las esquinas de los prototipos, despreciando las regiones lesionadas debido a la retirada de los moldes. Estas muestras presentan, aproximadamente, las siguientes dimensiones: 10,0x10,0x44,0cm.

Para los ensayos de ultrasonido, realizados en los cuerpos de prueba retirados de los paneles, fueron utilizados los transductores de 82kHz, con 32mm de diámetro. Como acoplante, en la calibración, se usó betún. En los ensayos en los cuerpos de prueba se usó pegamento blanco escolar. El sistema de medición fue el indirecto.

En el panel 1 se comprobó el mayor tiempo medio de propagación y la menor velocidad media de propagación, factores que pueden explicarse debido a la mayor presencia de agua en su constitución. Los paneles 2 y 3 exhiben valores aproximados para tiempo medio de propagación y velocidad media de propagación, observándose una disminución del tiempo y un aumento de la velocidad. Por otro lado, el panel 4, compactado con la tierra bien seca, muestra el menor tiempo medio de propagación y la mayor velocidad de propagación entre todos. De acuerdo con esos datos se puede observar que la humedad presenta una relación directamente proporcional al tiempo de propagación de la onda e inversamente proporcional a su velocidad al recorrer el cuerpo de prueba.

4.2 Resultados de la segunda etapa de la investigación

4.2.1 Caracterización geotécnica del suelo de los prototipos

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de los ensayos de caracterización del suelo utilizado en este trabajo, este podrá ser clasificado, según la Asociación Brasileña de Normas Técnicas - ABNT, como una arcilla areno limosa de color amarilla, altamente plástica, con poquísimo pedregullo.

4.2.2 Ensayo del ultrasonido en el prototipo 5

Los ensayos de ultrasonido realizados en los paneles produjeron resultados satisfactorios. Se realizaron, según la norma BSI 1881 Parte 206 – Ultrasonic Test for concrete, con el equipamiento modelo PUNDIT, fabricado por la empresa CNS, utilizados los transductores de 54kHz con sistema de medición indirecto y transductores de 500kHz con sistema de medición utilizado directo. El acoplante utilizado fue gel.

En los ensayos ejecutados con el uso del transductor con frecuencia de 54kHz el punto 1 presentó menor tiempo medio de propagación y mayor velocidad media de propagación con respecto al punto 2. Se comprobó una mayor amplitud en el punto 1 y más variancia y desvío estándar en el punto 2.

Aún en el punto 1 se usaron ensayos con transductores con frecuencia de 500kHz y, diferentemente del ensayo con transductor de 54kHz, donde el sistema de medición utilizado fue el indirecto, en estos el sistema usado fue el directo. Se pudo comprobar que ocurrían mayores tiempos para la propagación de la onda, el fenómeno puede explicarse por la distancia a ser recorrida, ya que, en los ensayos indirectos, la distancia entre transductores era de 5cm y en los ensayos directos (sistema usado con el transductor de 500kHz) la distancia era de 44cm. Sin embargo, se registraron mayores velocidades de propagación de la onda, seguramente debido a la frecuencia del transductor y al sistema directo de transmisión. Aún en este ensayo se observaron la aparición de mayor variancia y desvío estándar entre los tiempos marcados y las velocidades obtenidas por la onda ultrasónica.

4.2.3 Resultados del prototipo 5

En esta 2ª etapa de la 2ª fase se obtuvieron resultados tanto para la frecuencia de 54kHz como para la de 500kHz.

Con los resultados anteriormente descritos se comprobó la posibilidad de la elaboración de gráficos, con base en ecuaciones desarrolladas a partir de los gráficos de resultado final, obtenidos en la investigación de la autora Bandeira (2009), donde se desarrolla un estudio de correlación entre la resistencia mecánica y la velocidad ultrasónica en materiales terrosos.

4.2.3.1 Resultado final para los ensayos con transductores de 54kHz

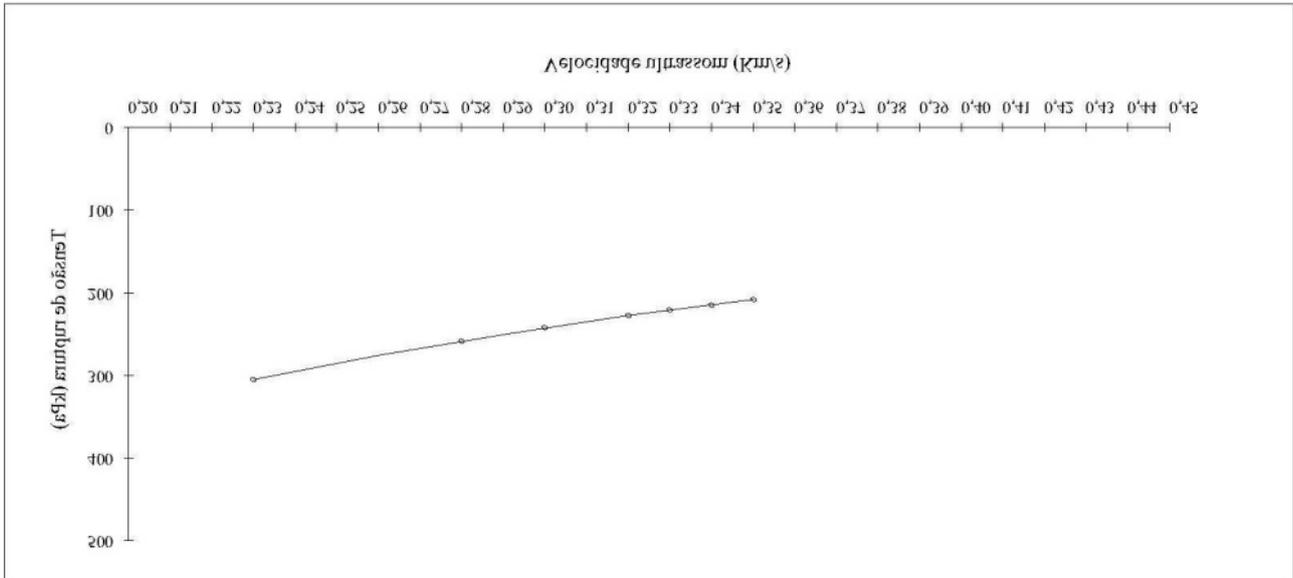


FIGURA 3 – Gráfico – Tensão de ruptura x velocidade ultrasónica
FUENTE: BANDEIRA, 2009. p. 74. Adaptado por: PEIXOTO, 2011

El gráfico de la figura 3 muestra que las menores velocidades de onda corresponden a las mayores tensiones de ruptura.

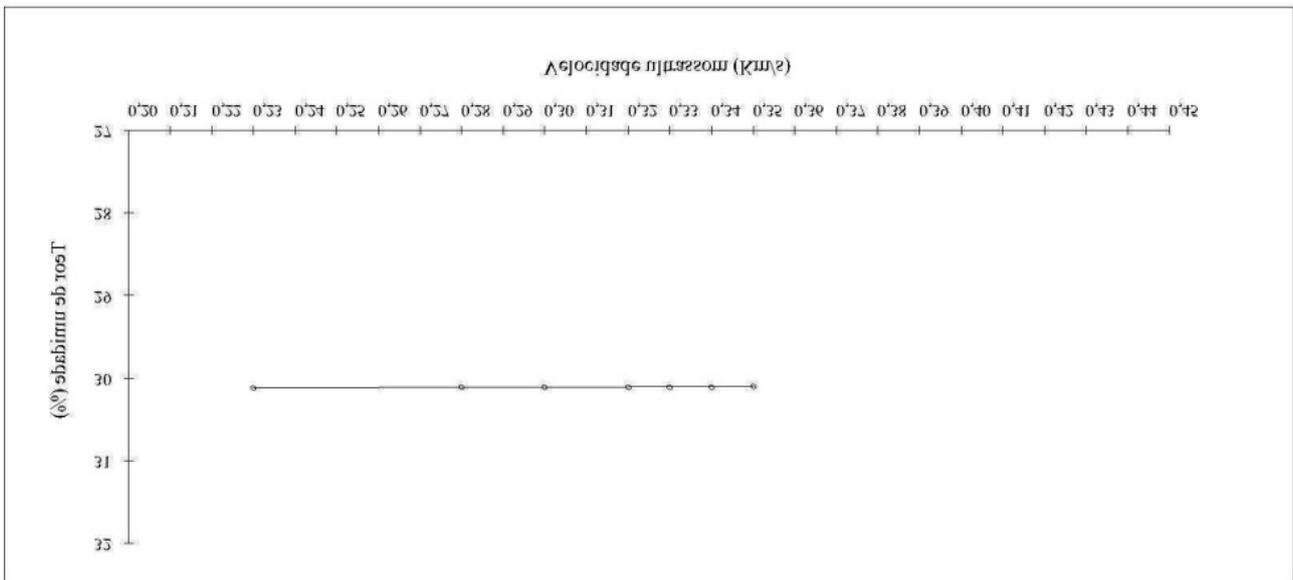


FIGURA 4 – Gráfico – Tenor de humidade x velocidade ultrasónica
FUENTE: BANDEIRA, 2009. p. 74. Adaptado por: PEIXOTO, 2011

Al analizar el gráfico de la figura 4 se puede comprobar que las mayores velocidades tienen lugar en suelos que presentan menores tenores de humedad.

4.2.3.2 Resultado final para los ensayos con transductores de 500kHz

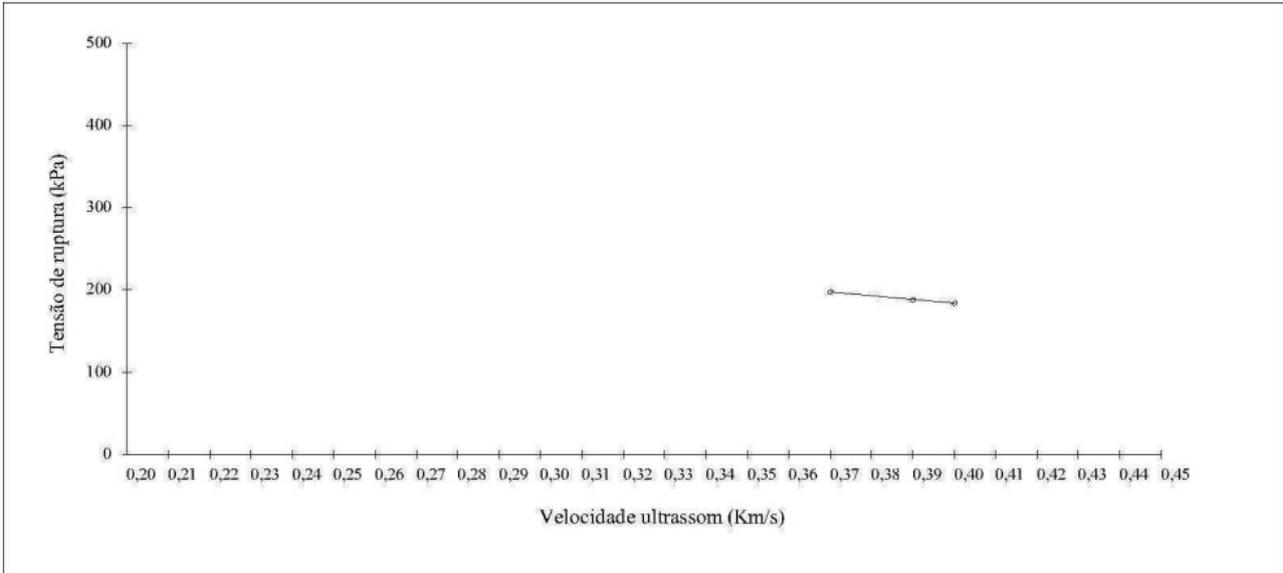


FIGURA5 – Gráfico – Tensão de ruptura x velocidade ultrasónica
FUENTE: BANDEIRA, 2009. p. 74. Adaptado por: PEIXOTO, 2011

El gráfico de la figura 5 muestra que las menores velocidades de onda corresponden a las mayores tensiones de ruptura.

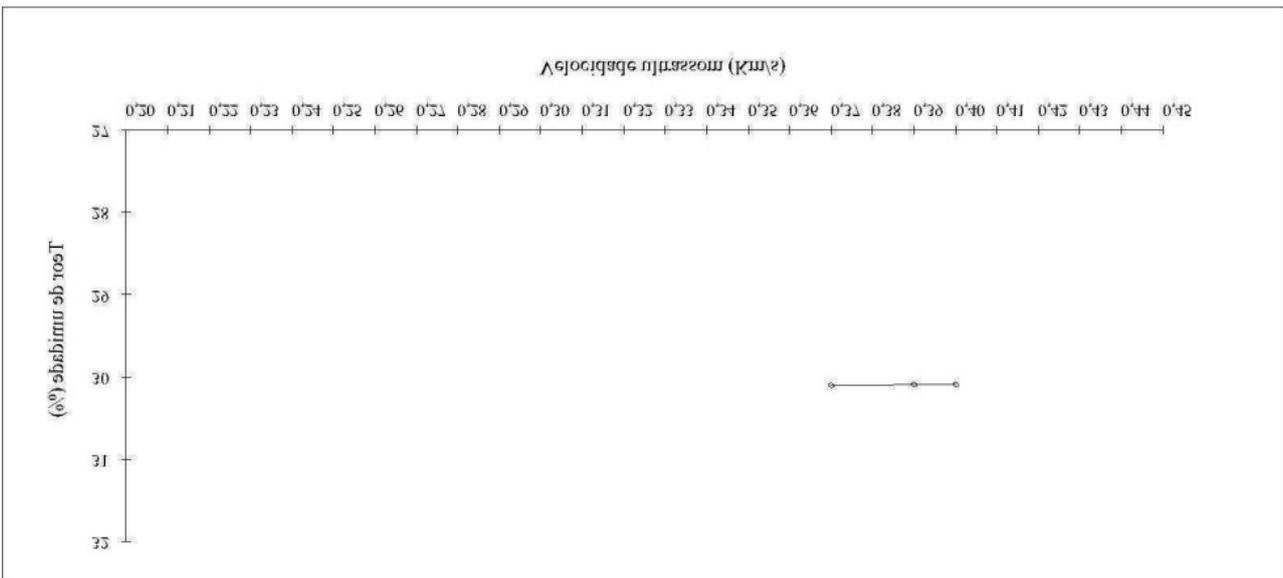


FIGURA 6 – Gráfico – Tenor de humedades x velocidade ultrasónica
FUENTE: BANDEIRA, 2009. p. 74. Adaptado por: PEIXOTO, 2011

Al analizar el gráfico de la figura 6 se puede comprobar que las mayores velocidades tienen lugar en suelos que presentan menores tenores de humedad.

5 CONCLUSIONES

Esta investigación tuvo como objetivo principal verificar la viabilidad de la aplicación de ultrasonido como método de evaluación no-destruccionista de las condiciones de resistencia presentada por estructuras erguidas en material terroso.

En la primera fase de la investigación quedó comprobada la correlación existente entre velocidad ultrasónica y resistencia. En la primera etapa de la segunda fase no se obtuvieron lecturas en la mayoría de los prototipos y solo uno presentó lectura, por lo que estos resultados fueron considerados inválidos. Siendo así, la correlación no pudo ser verificada a partir de testes realizados directamente en la pared. Sin embargo, al ser retirados cuerpos de prueba con dimensiones mayores que los de la primera fase, en estos el ultrasonido presentó lectura y generó resultados válidos.

En la segunda etapa de la 2ª fase, al ser construido un prototipo más, siendo este ejecutado con suelo con mayor tenor de arcilla y menor tenor de limo, una arcilla areno limosa, y compactado con pisón adecuado, de madera, con la base en formato cónico, dentro de la forma construida siguiendo los moldes del tapial y con empleo de madera más resistente y adecuada para absorber mejor el impacto de la energía de la compactación, presentó menos rajaduras y pulverizaciones y, consecuentemente, menor cantidad de vacíos internos. Con ello, los testes que se realizaron en él demostraron resultados válidos en las dos frecuencias usadas: 54kHz y 500kHz. Se constató que las mayores velocidades ocurren en suelos que presentan menores tenores de humedad y las menores velocidades de onda corresponden a las mayores tensiones de ruptura.

Por lo tanto, al parecer, todo señala que es necesario profundizar más los estudios en esta área, del uso de la tecnología del ultrasonido, en la inspección de estructuras en tierra, buscando desarrollar una metodología para ensayos ultrasónicos que pueda aplicarse en la verificación de la calidad y resistencia presentada por las construcciones erguidas en sistema estructural de tierra.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANDEIRA, R. F. (2009). *Estudo da correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica para um material terroso*, UFMG, Belo Horizonte.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. (1986). *BSI 1881: Part 203. Testing concrete – Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulse in concrete*, London.
- PEIXOTO, M. V. S. (2011). *Metodologia para aplicação de ensaios ultrassônicos em mini painéis de taipa de pilão*, UFMG, Belo Horizonte.
- REZENDE, M.A.P & RODRIGUES, R (2007) – *Projeto Piloto. Avaliação da Integridade Mecânica em Painéis de Taipa de Pilão Utilizando a Técnica do Ultra-som*, UFMG/CNPQ, Belo Horizonte.
- VARUM, H. et al. (2006). *Ensaio de caracterização do comportamento estrutural de construções existentes em adobe*. Mendoza, Argentina, p. 48-51.
- YESILLER, Nazli. et al. (2000). Ultrasonic Testing for Compacted Clayey Soils. *Advances in Unsaturated geotechnics*, p. 54-68.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais – la financiación para el desarrollo de la investigación.

INFORMACIÓN SOBRE LOS AUTORES

Maria Virgínia Simão Peixoto

Licenciada en Arquitectura y Urbanismo (PUC-MG, 2000). Especialista en Revitalización Urbana y Arquitectónica (UFMG, 2007) y Master en Ambiente Construido y Patrimonio Sostenible por la Escuela de Arquitectura (UFMG, 2011). Doctoranda – Escuela de Bellas Artes – UFMG. Profesor asistente en la Escuela de Arquitectura y Urbanismo (Centro Universitario de Belo Horizonte – Unibh).

Marco Antônio Penido de Rezende

Profesor Asociado en la Escuela de Arquitectura de la Universidad Federal de Minas Gerais. Licenciado en Arquitectura y Urbanismo (UFMG, 1987), Master en Arquitectura y Urbanismo (UFMG, 1998), Doctor en Construcción Civil (Poli-USP, 2003), Post-Doctorado en arquitectura vernácula con el Programa de Preservación Histórica de la Universidad de Oregon, EE.UU. (2010).

Luiz Antônio Cruz Souza

Profesor asociado – LACICOR / CECOR, Escuela de Bellas Artes – UFMG. Licenciado en Ciencias Químicas (UFMG, 1986). Master en Química – Ciencia de la conservación de bienes culturales (UFMG, 1991). Doctor en Química (UFMG, 1996). Post-Doctorado en metodologías científicas aplicadas en el arte y arqueología (Universidad de Perugia, Italia, 2014).