

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**CONSTRUCCIÓN CON TIERRA  
REVISIÓN Y SUSTENTO DE LOS ENSAYOS DE CAMPO:  
- PRESENCIA DE ARCILLA O RESISTENCIA SECA  
- CONTROL DE FISURACIÓN CON ARENA GRUESA**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

**José Manuel Montoya Robles**

**ASESOR: Ing. Julio Vargas Neumann**

Lima, marzo de 2017





*Dedico el siguiente trabajo a quienes fomentaron en mí el ejemplo de superación, humildad y sacrificio, gracias por el apoyo incondicional y por siempre llevarme por el buen camino.*

*Gracias Papapa Manuel.*

## RESUMEN

La presente investigación tiene por finalidad corroborar los siguientes ensayos de campo:

Ensayo de “Resistencia Seca”

Ensayo de “Control de Fisuras con Arena Gruesa”.

Cabe mencionar, que dichos ensayos fueron propuestos dentro de las conclusiones de la “Investigación Científica Innovativa: Edificaciones de Adobe en Áreas Sísmicas” realizada por la Pontificia Universidad Católica de Perú en el año de 1983 y también incluidos en los Manuales de Construcción con Tierra. Si bien es cierto, los ensayos son sencillos de difundir y en general aceptados por las comunidades de constructores en tierra, la falencia es que no cuentan con un respaldo técnico adecuado.

La importancia del sustento técnico radica particularmente en la sencillez de los ensayos y por la utilización de cualquier auto-constructor, albañil o maestro de obra de las áreas rurales, cuyo objetivo es determinar la factibilidad del suelo sin herramientas ni laboratorios que conlleven a tener la seguridad de seleccionar o descartar las posibles canteras locales.

Al respecto, la finalidad del primer ensayo es reconocer si una cantera de tierra tiene la suficiente cantidad y/o calidad de arcilla para poder construir, por lo cual se moldean esferas de 20 mm de diámetro, se deja secar por 48 horas, procediéndose al ensayo a compresión con los dedos de la mano tratando de romperlas.

Partiendo del supuesto anterior, cabe la posibilidad de agregar dos tipos de materiales tales como: Paja, la cual es una fibra vegetal resistente a las tracciones o Arena Gruesa de partículas entre 0.5mm - 5mm; con el fin de evitar el agrietamiento durante el secado.

Asimismo, el segundo ensayo tiene como propósito evitar fisuras agregando arena gruesa a la tierra, generando una mezcla óptima sin grietas que conlleva al mejoramiento de la resistencia del material.

Finalmente, se ha llegado a la conclusión que ambos ensayos son complementarios para tener certeza de que la cantera y la mezcla son las óptimas para la construcción en un mínimo tiempo, con lo cual se genera eficiencia, economía y seguridad.

## CONTENIDO:

1.	ANTECEDENTES: .....	1
2.	INTRODUCCIÓN:.....	3
3.	DEFINICIONES DEL SUELO Y SUS COMPONENTES PARA LA CONSTRUCCIÓN CON TIERRA: .....	8
3.1.	EL SUELO: .....	8
3.2.	LA ARCILLA: .....	8
3.3.	LA ARENA:.....	10
4.	ESTADO DEL ARTE DE LAS PRUEBAS DE CAMPO (PUCP) Y SU RELACIÓN CON LA NORMATIVIDAD: .....	12
5.	OBJETIVOS: .....	17
6.	METODOLOGÍA: .....	18
7.	VERIFICACIÓN Y SUSTENTO DE LOS ENSAYOS: .....	19
7.1.	ENSAYO DE “RESISTENCIA SECA” .....	19
7.1.1.	FUERZA DE COMPRESIÓN DE LAS PERSONAS ENTRE EL DEDO PULGAR E ÍNDICE. ....	20
7.1.2.	RESISTENCIA MÁXIMA A COMPRESIÓN DE UNA PROBETA ESFÉRICA DE TIERRA.....	25
7.1.3.	RELACIÓN ENTRE LAS FUERZAS DE COMPRESIÓN Y ESFUERZOS INTERNOS DE TRACCIÓN INDIRECTA EN UN CUERPO ESFÉRICO .....	37
7.1.4.	GRÁFICA RESISTENCIA VS TIEMPO DE SECADO .....	38
7.2.	ENSAYO DE “CONTROL DE FISURAS CON ARENA GRUESA” .....	43
7.2.1.	GRÁFICA RESISTENCIA VS RELACIÓN VOLUMÉTRICA SUELO:ARENA .....	46
7.2.2.	ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA EN MURETES DE ADOBE DEL INFORME USAID 936/5542 DE 1983.....	47
8.	CONCLUSIONES .....	49
9.	RECOMENDACIONES .....	51
10.	BIBLIOGRAFÍA:.....	53
	APÉNDICE 1: ENSAYOS DE COMPRESIÓN DIAMETRAL DE MUESTRAS DEL CAMINO PREHISPÁNCO - PUCP .....	55
	APÉNDICE 2: ENSAYOS DE COMPRESIÓN DIAMETRAL EN MUESTRAS DE TIERRA PUCP CON AGREGADO DE PAJA.....	58

## INDICE DE TABLAS:

TABLA N° 1: Distribución de viviendas urbanas y rurales a nivel nacional .....	6
TABLA N° 2: Tabla granulométrica de arenas .....	11
TABLA N° 3: Fuerza entre pulgar e índice. ....	24
TABLA N° 4: Fuerza entre pulgar e índice corregido.....	24
TABLA N° 5: Muestras de suelo.....	32
TABLA N° 6: Ensayos a compresión con 24 horas de secado - PUCP .....	33
TABLA N° 7: Ensayos a compresión con 48 horas de secado - PUCP .....	34
TABLA N° 8: Ensayos a compresión con 24 horas de secado - CUSCO .....	35
TABLA N° 9: Ensayos a compresión con 48 horas de secado - CUSCO .....	35
TABLA N° 10: Tipos de falla observados en las probetas esféricas.....	37
TABLA N° 11: Mezcla de distintos porcentajes de suelo y arena gruesa .....	38
TABLA N° 12: Cronograma de ensayos durante 2 meses .....	38
TABLA N° 13: Resistencias últimas de probetas esféricas ensayadas a compresión.....	39
TABLA N° 14: Resumen de resistencias últimas de probetas esféricas ensayadas a compresión .....	40
TABLA N° 15: Tabla resumen de resistencia promedio .....	42
TABLA N° 16: Resistencias últimas de probetas esféricas de Camino Prehispánico .....	56
TABLA N° 17: Resistencias últimas de probetas esféricas con agregado de paja .....	58

## INDICE DE FIGURAS:

FIGURA 1: Caral, ciudad más Antigua de América en Lima, Perú. 3000 y 1800 a.C. ....	4
FIGURA 2: Ruinas de la ciudadela de Chan Chan en Trujillo, Perú. ....	5
FIGURA 3: Mapa del Perú donde se muestra las zonas predominantes .....	7
FIGURA 4: Esquema de los componentes del suelo .....	8
FIGURA 5: Fisuras de la arcilla al secarse. ....	9
FIGURA 6: Comportamiento de las partículas de arcilla al contacto con el agua.....	10
FIGURA 7: Muestra de tamaños de partículas de roca dependiendo del tamaño de Tamiz. 10	
FIGURA 8: Muestra de arena gruesa.....	11
FIGURA 9: Primera Norma de Diseño Sismo-Resistente del Perú de 1977. ....	12
FIGURA 10: Informe entregado por la PUCP al US-AID de la.....	13
FIGURA 11: Publicación “Resistencia Sísmica de la Mampostería de Adobe”, originalmente por la PUCP y posteriormente por SENCICO.....	13
FIGURA 12: Publicación del Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la Vivienda (ININVI), de la nueva Norma E.080 ADOBE elaborada por un Comité de profesionales de ININVI, SENCICO, PUCP y UNI en 1985.....	14
FIGURA 13: Primer manual de ADOBE-PUCP de 1985 y su re-edición por SENCICO.....	14
FIGURA 14: Gráficas de la prueba cualitativa para determinar la presencia de arcilla tomadas de los manuales “Nuevas Casas Resistentes de Adobe” .....	15
FIGURA 15: Indicación de agregar paja y/o arena gruesa a la mezcla para evitar fisuras tomadas de los manuales “Nuevas Casas Resistentes de Adobe” .....	16
FIGURA 16: Ensayo de campo de “Resistencia Seca” .....	19
FIGURA 17: Dinamómetro mecánico que funciona a tracción. ....	21
FIGURA 18: Adaptación de una varilla de acero corrugado de ½ pulgada de diámetro para poder medir fuerzas en compresión.....	21
FIGURA 19: Cambio de la balanza mecánica a una digital, con la misma configuración.....	22

FIGURA 20: Similitud en la posición, para obtener resultados significativos. ....	22
FIGURA 21: Detalle de la esfera sintética y su posición final en el dinamómetro. ....	23
FIGURA 22: Encuesta para medir la fuerza las personas pueden aplicar entre los dedos ....	24
FIGURA 23: Máquina compresora de probetas de concreto.....	25
FIGURA 24: Máquina Universal donde se ensayan otro tipo de probetas de distintos materiales en el Laboratorio de Estructuras-PUCP.....	25
FIGURA 25: Placa del Tensiómetro Monsanto del Laboratorio de Mecánica-PUCP.....	26
FIGURA 26: Tensiómetro marca Monsanto del Laboratorio de Mecánica-PUCP .....	26
FIGURA 27: Detalle de la probeta esférica de tierra colocada en el Tensiómetro .....	26
FIGURA 28: Nueva Máquina de compresión Zwick/Roell del Laboratorio de Mecánica-PUCP .....	27
FIGURA 29: Comparación de las gráficas de los ensayo de compresión controlando Deformación Constante vs Carga Constante. ....	28
FIGURA 30: Ensayo con Capping de caucho de 14mm de espesor.....	28
FIGURA 31: Diferentes espesores de caucho para Capping .....	29
FIGURA 32: Materiales potenciales para ser utilizados como Capping. ....	29
FIGURA 33: Ensayo de dureza de los materiales Jebe y Asbesto.....	30
FIGURA 34: Ensayo comparativo de variabilidad de resultados entre .....	31
FIGURA 35: Esferas moldeadas de 20 mm de diámetro aproximadamente .....	32
FIGURA 36: Detalle del ensayo a compresión diametral y tipo de falla de las esferas. ....	33
FIGURA 37: Esferas moldeadas de 20mm de diámetro aproximadamente .....	34
FIGURA 38: Curvas Fuerza vs Deformación de las esferas del “Suelo PUCP” .....	36
FIGURA 39: Curvas Fuerza vs Deformación de las esferas del “Suelo Cusco” .....	36
FIGURA 40: Distribución de esfuerzos a lo largo del diámetro vertical, donde se observan esfuerzos de tracción prácticamente uniformes en dos terceras partes del diámetro. ....	37

FIGURA 41: Familia de curvas esperada - Tiempo de Secado vs Promedio de Resistencias .	41
FIGURA 42: Formación de un esqueleto granular formado por los granos de arena gruesa	43
FIGURA 43: Fabricación de especímenes para el ensayo de Control de Fisuras. ....	44
FIGURA 44: Fabricación de 3 especímenes de cada tipo de mezcla. ....	44
FIGURA 45: Destape de los especímenes, pasadas 48 horas de secado y.....	45
FIGURA 46: Resultado de los distintos morteros luego de destapar los adobes.....	45
FIGURA 47: Curvas de Resistencia vs Relación Volumétrica Suelo:Arena .....	46
FIGURA 48: Ensayos de Compresión Diagonal en muretes de Adobe de 0.60x0.60m.....	47
FIGURA 49: Curvas de Gauss formadas por los diferentes ensayos a Compresión Diagonal	48
FIGURA 50: Esferas talladas de 20mm diámetro aproximadamente. ....	55
FIGURA 51: Detalle del Capping de asbesto de 1.5mm de espesor. ....	55
FIGURA 52: Detalle de la falla de las esferas ensayadas a compresión diametral .....	56
FIGURA 53: Probetas esféricas talladas ensayadas del camino prehispánico .....	57
FIGURA 54: Diagrama Fuerza vs Deformación de las esferas talladas ensayadas a compresión diametral.....	57
FIGURA 55: Ensayo de esferas de tierra con paja.....	58
FIGURA 56: Diagrama Fuerza vs Deformación de las esferas con paja ensayadas a compresión diametral.....	59



## 1. ANTECEDENTES:

Después del terremoto de Huaraz ocurrido en el año 1970 se iniciaron estudios y publicaciones en el tema de construcción y refuerzo en estructuras hechas con tierra cruda, realizados por la Pontificia Universidad Católica del Perú en adelante PUCP. Un estudio importante fue la Investigación Cooperativa entre la PUCP y la Universidad Nacional Autónoma de México en adelante UNAM, realizada en 1980 donde se había encontrado que la mampostería de adobe mexicana tenía aproximadamente tres veces más resistencia que la mampostería de adobe peruana. Al conocer esta diferencia de resistencias se solicitó el apoyo económico de la Organización de Estados Americanos (OEA) para ejecutar un proyecto compartido entre ambas universidades y comprobarse la diferencia de los resultados ya obtenidos.

Esta investigación debía validar los distintos mecanismos de ensayos que se hacían en Perú y México, para esto se estudió la mampostería mexicana con los mecanismos de ensayos peruanos en México y la mampostería peruana con los mecanismos de ensayos mexicanos en Perú, los resultados que se obtuvieron comprobaron la diferencia de resistencias; esta valiosa corroboración impulsó a otra investigación para determinar las razones de esta diferencia de resistencias.

En el año 1983 con el apoyo de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (con sus siglas en inglés US-AID), da inicio a la investigación complementaria "Investigación Científica Innovativa: Edificaciones de Adobe en Áreas Sísmicas". Para estos estudios se seleccionó 6 suelos de diferentes lugares del Perú donde se construye tradicionalmente con adobe: Cajamarca, Cusco, Huancayo, Huaraz, Pisco y Lima (PUCP) con los cuales se realizaron una serie de ensayos de tierra como material de construcción para conocer los factores físicos, físico-químicos y químicos de los suelos, que pudieran influir en la resistencia sísmica de las construcciones de adobe.

Los trabajos fueron ejecutados durante un año y luego de especificar las conclusiones, se propusieron y desarrollaron dos métodos de ensayos de campo, que cumplieran con las condiciones de ser **sencillos**, para que los puedan utilizar cualquier auto-constructor, albañil o maestro de obra de las áreas rurales. El objetivo fue determinar las bondades del suelo sin usar herramientas ni recurrir a laboratorios y tener **certeza** de la calidad para la construcción con tierra, que permita seleccionar o descartar las posibles canteras locales.

Con esta última investigación, además se concluyó que “la paja y la arena gruesa son aditivos naturales eficientes para el control de micro-fisuración de secado del mortero” <sup>1</sup> (Vargas. J, 1983). Debido a que las grietas disminuyen la resistencia del adobe, mortero y mampostería, por esto es necesario encontrar un equilibrio entre la presencia de arcilla y la cantidad de arena gruesa o paja que se debe adicionar al barro a través del ensayo de Control de Fisuras.



---

<sup>1</sup> VARGAS, J et al (1984). “Resistencia sísmica de la Mampostería de Adobe”. Pag.10

## 2. INTRODUCCIÓN:

En la actualidad en las zonas urbanas se construye mayormente con concreto (cemento, piedra y arena) y ladrillo quemado (con mortero de cemento y arena), pero antes de que llegara el cemento, alrededor del año 1900, la tierra cruda fue el material de construcción más utilizado por ser de fácil acceso. La tierra trabajada adecuadamente puede adquirir destacadas resistencias portantes (resistencia a cargas de la gravedad), adicionalmente es un material moldeable (adquiere formas deseadas con ayuda de encofrados o manualmente) y se puede trabajar en conjunto con otros materiales naturales, como por ejemplo la arena, piedra, madera y caña.

En el Perú se construye con tierra cruda desde tiempos muy antiguos, porque es un material natural, fácil de manejar y al alcance disponible por la geografía, esto lo dice Cristóbal Campana en su publicación “Tecnologías constructivas de tierra en la costa norte prehispánica”<sup>2</sup>:

*“Entre los milenios 3° y 2° a.C., el clima de la costa fue más cálido y con muchos humedales,... Los restos encontrados en el valle de Moche como <Huaca de los Reyes>, <Herederos>, o <Huabal> cerca de la antigua <Laguna de los Gentiles>,... Esto se relaciona con un periodo ligeramente posterior a los Templos de Caral en el Valle de Supe, de Cardal en el valle de Lurín, Garagay y El Paraíso en el Rimac... Estas grandes construcciones inicialmente fueron hechas con piedra y barro (lo más abundante en zonas húmedas) o, también el inicio de construcciones con champas y después con quincha. Es decir, barro y raíces, o barro y caña, también eran materiales abundantes en los humedales.”*

---

<sup>2</sup> CAMPANA, C. (2000). Tecnologías Constructivas de tierra en la costa norte prehispánica. pag.35-36



FIGURA 1: Caral, ciudad más Antigua de América en Lima, Perú. 3000 y 1800 a.C.<sup>3</sup>  
(Créditos: Shady, R.)

También, Patricia Chirinos en su publicación: “La aplicación de reconstrucciones digitales para la conservación de patrimonio: Aportes preliminares sobre el caso de Chan Chan” afirma:

*“Chan Chan, complejo monumental de adobe ubicado en la costa norte peruana, fue construido y utilizado por los gobernantes de la cultura Chimú entre los años 900 y 1470 d.C... se encuentra ubicado en la boca del valle de Moche, departamento de La Libertad, Perú, y es considerado como la aglomeración urbana más extensa del área andina. Su perímetro actual es de 15 km<sup>2</sup>; el núcleo monumental tiene una extensión de 6 km<sup>2</sup>... Desde el momento mismo de su construcción y hasta la actualidad, Chan Chan es indudablemente uno de los sitios más importantes y más conocidos de la arqueología peruana... es conocida como la “ciudad de barro más grande de América”.<sup>4</sup>*

<sup>3</sup> SHADY, R. (1997) La ciudad sagrada de Caral - Supe en los albores de la civilización en el Perú. Lima: Fondo editorial UNMSM.

<sup>4</sup> CHIRINOS, P. (2010). “La aplicación de reconstrucciones digitales para la conservación de patrimonio: Aportes preliminares sobre el caso de Chan Chan.



FIGURA 2: Ruinas de la ciudadela de Chan Chan en Trujillo, Perú.  
(Créditos: Mariana R. Correia).<sup>5</sup>

Por otro lado, A. Vildoso, F.M.Monzon en “Seguir construyendo con Tierra” citaron al cronista sacerdote Bernabé Cobo (1613) donde afirmaba:

*“No hacían antiguamente los indios estas tapias como nosotros, de tierra suelta un poco húmeda, sino de barro bien amasado y blando, como hacemos nosotros los adobes. Sacaban las muy derechas y lisas porque arrimaban a los lados en lugar de mantas de madera, mantas y cañizos, y luego las enlucían con el mismo barro. Desde linaje de tapias son los muchos paredones antiguos de que está lleno todo este valle de Lima, por donde sacamos su forma y hechura (Cobo 1956 Lib 14 Cap III p 241) (Muelle 2 pág. 577)”*

En base a las reseñas del cronista español se puede concluir que los antiguos peruanos tenían técnicas propias y diferentes para la elaboración del “adobón”, así mismo se infiere que la técnica del Tapial fue traído al Perú desde Europa.

Por todo lo citado anteriormente se afirma que el Perú es un país con mucha historia y tradición constructiva en tierra cruda; puesto que en la época prehispánica se construían huacas utilizando varias técnicas, entre ellas: adobes, grandes masas

---

<sup>5</sup> CONSERVATION AND MGMT OF ARCH. SITES, Vol. 17 No. 3, August, 2016, 224–256 © 2016 Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group Technical Strategies for Conservation of Earthen Archaeological Architecture

y shicras. Con la llegada de los españoles se implementaron técnicas nuevas (ejemplo: tapial); varias de las cuales han prevalecido en el tiempo y actualmente se sigue construyendo con ellas.

Existen ventajas al construir con tierra cruda:

- El material se encuentra en el mismo sitio, no es necesario comprarlo ni transportarlo; siempre y cuando la calidad de la tierra sea aceptable.
- Reconocer una buena tierra y la técnica de construcción han sido y son aprendidas de generación en generación.
- Existe apoyo entre los comuneros para construir sus viviendas rurales que conlleva a la reciprocidad.

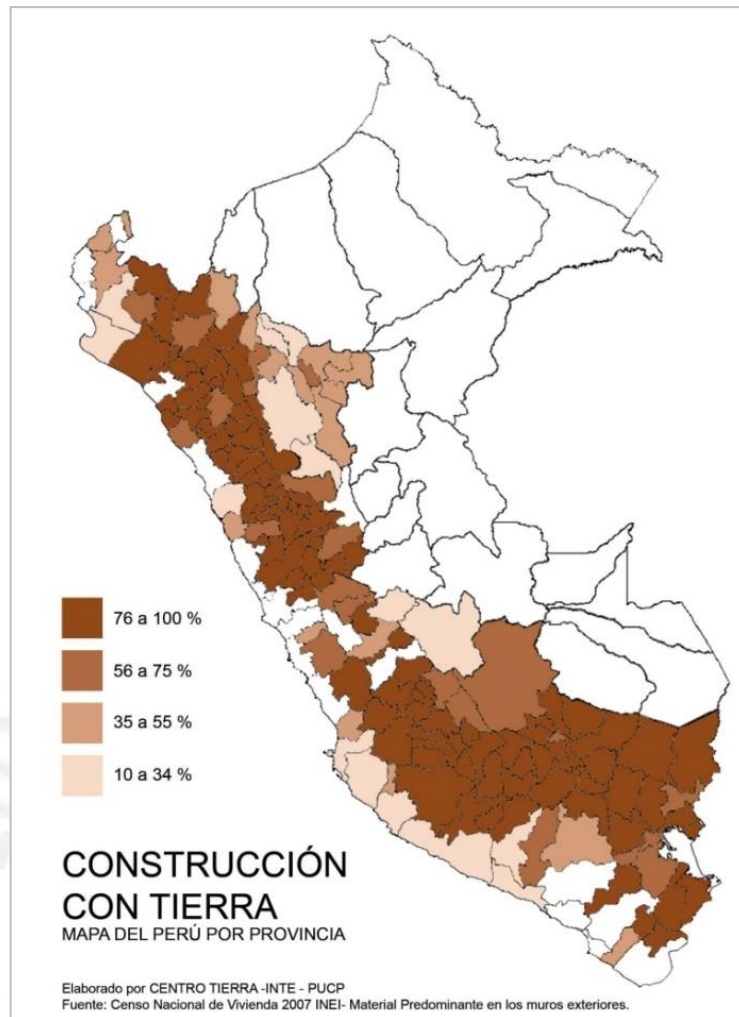
No solo se construye con tierra cruda en zonas rurales, sino también en zonas urbanas, por ejemplo: el casco histórico de las grandes urbes por ejemplo Lima y Trujillo. Si se divide al Perú en urbano y rural, según el “Censo Nacional de Población y Vivienda 2007 INEI”, la construcción en tierra cruda es:

*TABLA N° 1: Distribución de viviendas urbanas y rurales a nivel nacional*

Zona Urbana del Perú	26.2%
Zona Rural del Perú	78.6%
TOTAL	39.4%

*Fuente: Censo Nacional de Vivienda 2007- INEI  
Elaboración: CENTRO TIERRA-INTE-PUCP*

Este porcentaje engloba las construcciones de adobe, tapial, quincha y piedra asentada con mortero de barro.



*FIGURA 3: Mapa del Perú donde se muestra las zonas predominantes que se construye con Tierra.*

En las zonas rurales del Perú son donde más se construye con tierra cruda (Cerca del 80%). Estas familias rurales edifican sus casas de manera artesanal, para poder determinar la calidad del suelo deben basarse en un análisis empírico (sin herramientas ni laboratorio), para que una construcción de tierra cruda sea resistente debería determinarse si la concentración de arcilla es aceptable, este punto será explicado en el capítulo de Definiciones del presente trabajo.

Cerca del 40% de la población del Perú continúa construyendo sus viviendas con tierra, por ello es importante seguir investigando y mejorando los métodos constructivos para disminuir los riesgos que se producen al construir con este material. Entre los riesgos se puede mencionar la capacidad portante por debajo del potencial esperado y también la baja resistencia a cargas laterales (sismos).

### 3. DEFINICIONES DEL SUELO Y SUS COMPONENTES PARA LA CONSTRUCCIÓN CON TIERRA:

#### 3.1. EL SUELO:

El suelo es el cúmulo de rocas meteorizadas por acción del agua, viento y fenómenos meteorológicos, este material se acumula en la superficie terrestre, el material que se estudiará es el suelo de cantera.

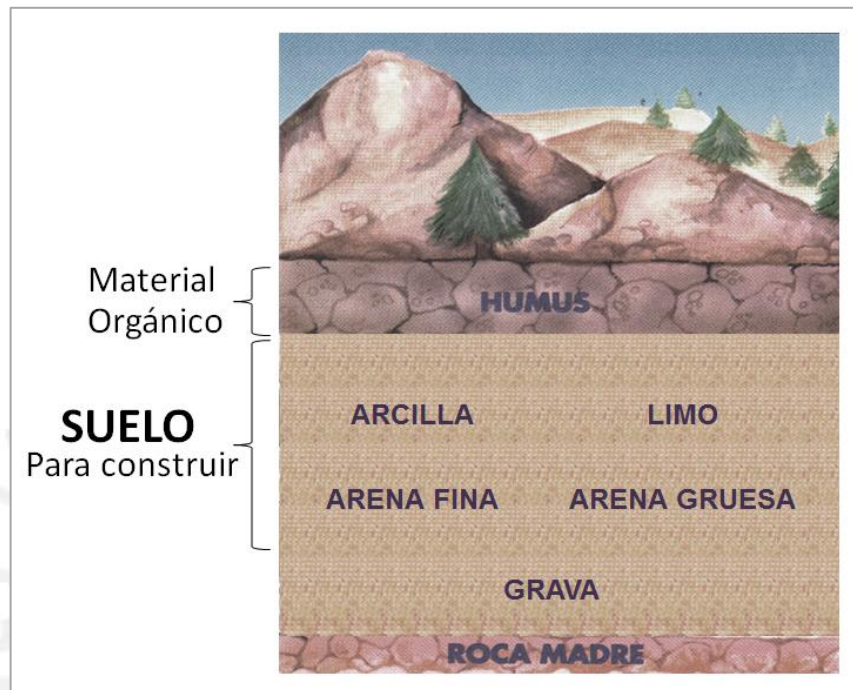


FIGURA 4: Esquema de los componentes del suelo  
(Vargas, J. 2013)

Cada cantera de suelo tiene una mezcla de distintas cantidades de cada elemento (Arcilla, Limo, Arena gruesa, Arena fina, Grava), pero solo dos de estos son los más importantes: La arcilla y la arena gruesa.

#### 3.2. LA ARCILLA:

Según Díaz Rodríguez y Torrecillas (2002) definen a la arcilla como el producto derivado de los agentes de meteorización físico-químicos actuantes sobre la roca madre original y se las puede considerar como unas acumulaciones naturales, consolidadas o no, de tamaño de grano fino menor a  $2\mu\text{m}$  según los mineralogistas e investigadores del suelo.

Para considerar que un suelo es de buena calidad y que con este se pueda construir es necesario que la cantera contenga arcilla, debido a:



- La arcilla es el único componente activo del suelo o cantera de tierra, que varía sus características mecánicas al contacto con el agua.
- Es aglomerante y produce cohesión entre los demás componentes inertes (fracciones de piedra de distinto tamaño: arena fina, arena gruesa y limo).
- Al secarse la arcilla adquiere “resistencia seca”.

Así mismo, tiene la propiedad de cambiar su volumen dependiendo del contenido de humedad, por lo que se expande cuando se humedece y se reduce al secarse.

Así pues, el secado del barro es debido a la evaporación del agua y adquiere paulatinamente resistencia seca; pero, al reducir su volumen las partículas de tierra son sometidas a esfuerzos internos de tracción lo cual genera fisuras.

Hay que tener en cuenta la importancia de controlar la velocidad del secado uniforme, para lo cual se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones: debe secarse a la sombra y estar protegido del viento, puesto que un secado rápido produce mayor agrietamiento que un secado lento.



*FIGURA 5: Fisuras de la arcilla al secarse.*

La gran mayoría de las partículas de arcillas son planas y alargadas, su comportamiento moldeable solo se activa al contacto con el agua, parte de la cual queda atrapada entre las partículas de arcilla, unidas por la tensión superficial como se aprecia en la figura 6.

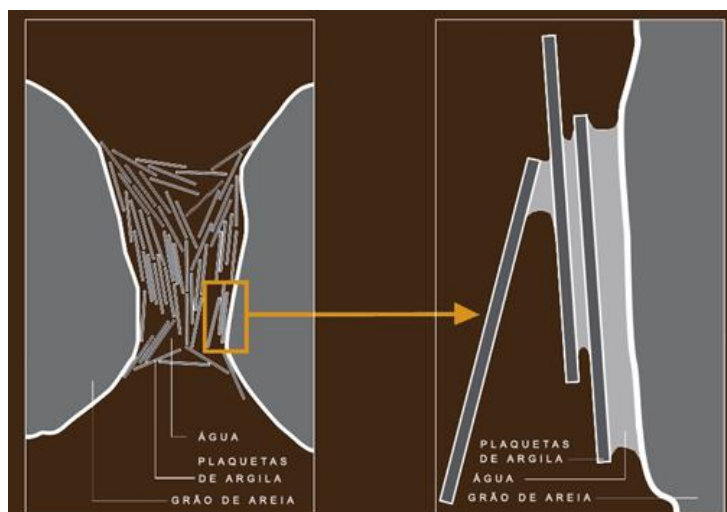


FIGURA 6: Comportamiento de las partículas de arcilla al contacto con el agua (LE TIEC, J., & PACCOUD, G. (2006, May). De L'eau pour construire. PISE H2O, p15.)

### 3.3. LA ARENA:

La arena es un conjunto de partículas de rocas, las cuales pueden ser clasificadas por su tamaño y separada utilizando tamices.

En un suelo es posible encontrar partículas grandes como bolones, piedras y grava, los cuales no son parte de este estudio, también están la arena gruesa, la arena fina y finalmente el limo, todas estas partículas son inertes, las cuales no presentan cambios físicos ni químicos al contacto con el agua.



FIGURA 7: Muestra de tamaños de partículas de roca dependiendo del tamaño de Tamiz

Para los efectos de la prueba de campo “Control de Fisuras” descrita en el presente trabajo de investigación se considera arena gruesa, la que contiene partículas que van desde 0.5 mm a 5 mm.

Las partículas entre 75  $\mu\text{m}$  y 0.5 mm corresponden a la arena fina, este tamaño de partícula no colabora significativamente en formar el esqueleto granular que se requiere para controlar fisuras durante el proceso de secado, este tema se profundizará en el ensayo “Control de Fisuras con Arena Gruesa”.

TABLA N° 2: Tabla granulométrica de arenas

Denominación	Menor a:	Mayor a:
Arena Gruesa	5 mm (Tamiz: #4)	0.5 mm (Tamiz: #40)
Arena Fina	0.5 mm (Tamiz: #40)	75 $\mu$ m (Tamiz: #200)
Arcillas y Limo	75 $\mu$ m (Tamiz: #200)	-

Fuente: VARGAS, J (1984). "Resistencia sísmica de la Mampostería de Adobe"

Elaboración: Propia



FIGURA 8: Muestra de arena gruesa

#### 4. ESTADO DEL ARTE DE LAS PRUEBAS DE CAMPO (PUCP) Y SU RELACIÓN CON LA NORMATIVIDAD:

Después del gran terremoto de Huaraz que sufrió el Perú en el año 1970, los ingenieros civiles de la Pontificia Universidad Católica del Perú y otras instituciones decidieron reforzar las construcciones hechas con tierra, debido a que era el material que predominaba en el país.

En el año 1977 se desarrolla la primera Norma de Diseño Sismo-Resistente del Perú, que incluye un capítulo de “Norma de Adobe y Adobe Estabilizado”, en la cual no se especifican procedimientos para escoger el material ni describe los componentes del suelo útiles para la construcción con tierra.

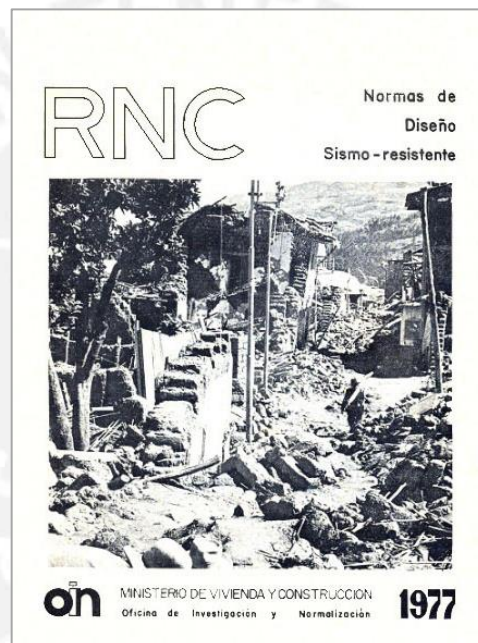


FIGURA 9: Primera Norma de Diseño Sismo-Resistente del Perú de 1977.

En la investigación de la PUCP financiada por el US-AID, “Investigación Científica Innovativa: Edificaciones de Adobe en Áreas Sísmicas” realizada en el año 1983 con el número AID936/5542, y publicada en 1984 con el título “Resistencia Sísmica de la Mampostería de Adobe - Departamento de Ingeniería, PUCP DI-84-01”, se definieron dos ensayos de campo:

- Ensayo de “Resistencia Seca”
- Ensayo de “Control de Fisuras con Arena Gruesa”

Estas pruebas se estudiaron y plantearon con el objetivo de reconocer la calidad de un suelo tamizado, para fines de construcción con tierra y por tanto como herramientas para aprobar, modificar o desaprobar cada cantera de suelo.

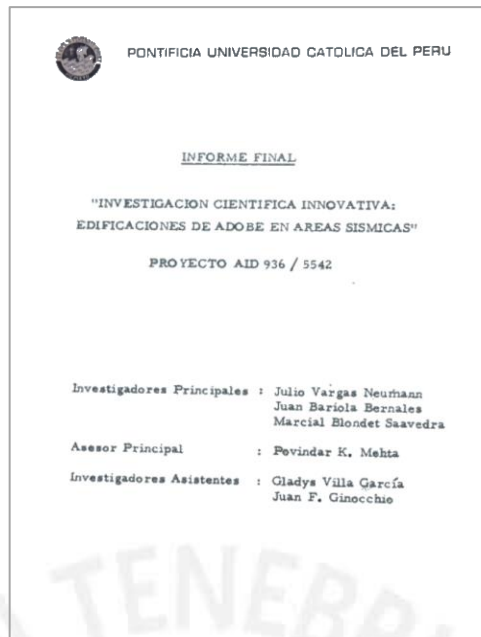


FIGURA 10: Informe entregado por la PUCP al US-AID de la "Investigación Científica Innovativa: Edificaciones de Adobe en Áreas Sísmicas"

Para apoyar la difusión de esta publicación, de escaso tiraje, el Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción del Ministerio de Vivienda (SENCICO) publicó meses después una re-edición de la misma.



FIGURA 11: Publicación "Resistencia Sísmica de la Mampostería de Adobe", originalmente por la PUCP y posteriormente por SENCICO

Los resultados de los estudios e investigaciones realizados en el Departamento de Ingeniería de la PUCP, con el apoyo de su Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

y la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), se elaboró una nueva versión de la Norma de tierra contenida en el RNC 1977, llamada NTE E.080 ADOBE, 1985.

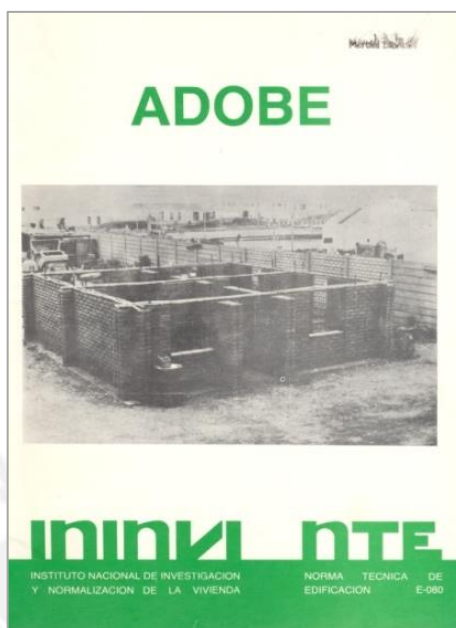


FIGURA 12: *Publicación del Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la Vivienda (ININVI), de la nueva Norma E.080 ADOBE elaborada por un Comité de profesionales de ININVI, SENCICO, PUCP y UNI en 1985.*

En ese mismo año la PUCP publica el primer manual para la construcción “Nuevas Casas Resistentes de Adobe”, en el cual se explica gráficamente la manera de seleccionar el material tierra.



FIGURA 13: *Primer manual de ADOBE-PUCP de 1985 y su re-edición por SENCICO.*

La primera versión de los dos ensayos de campo estudiados apareció en la publicación DI-84-01 del Departamento de Ingeniería, los cuales se expondrán a continuación:

#### 4.1 Ensayo de “Resistencia Seca”

“Realizar el ensayo de Resistencia Seca, consiste en fabricar tres o más bolitas pequeñas de suelo aproximadamente 2 cm de diámetro. Una vez secas (a las 24 horas) se aplasta cada bolita entre los dedos pulgar e índice. Si las bolitas son tan fuertes que ninguna se pueda romper, el suelo tiene suficiente arcilla para ser usado en la construcción con adobe. Si algunas bolitas se rompen, el suelo es inadecuado, ya que le falta arcilla y deberá descartarse.”<sup>6</sup>



FIGURA 14: Gráficas de la prueba cualitativa para determinar la presencia de arcilla tomadas de los manuales “Nuevas Casas Resistentes de Adobe”

Este primer ensayo solo indica que el suelo tiene la suficiente arcilla con la cual se obtiene resistencia seca, esta garantiza que los muros de tierra (adobe, tapial) ganen capacidad portante. No es importante definir la calidad de la arcilla porque en un suelo con escasa cantidad de esta de buena calidad, trabaja igual que un suelo con bastante arcilla de mala calidad.

Para obtener un suelo con resistencia óptima, se necesita controlar las fisuras que se generan durante el proceso de secado. Es recomendable utilizar paja en lugares donde crece abundantemente porque al agregar estas fibras resistentes a las tracciones se obtiene un mejor comportamiento del material.

<sup>6</sup> VARGAS, J et al (1984). “Resistencia sísmica de la Mampostería de Adobe”. Pag.10

#### 4.2. Ensayo de “Control de Fisuras con Arena Gruesa”.

Como ya se ha expresado, se conoce que el suelo arcilloso pierde volumen durante el secado y como consecuencia tiende a formarse fisuras. Otra forma de controlar este efecto es añadir arena gruesa al barro.

“En caso de no haber paja disponible, se deberá realizar el ensayo de control de fisuración, consiste en fabricar dos o más emparedados (dos bloques unidos con mortero) usando bloques de adobe existentes y mortero del suelo en estudio... La proporción suelo/arena más adecuada se determina fabricando por lo menos ocho emparedados, con morteros hechos con mezclas en distintas proporciones de suelo y arena gruesa (de 0.5 a 5 mm) variando entre 1:0 y 1:3 en volumen. El emparedado con el menor contenido de arena gruesa que, al abrirse a las 48 horas ya no muestre fisuras visibles en el mortero, indicará la proporción suelo/arena más adecuada.”<sup>7</sup>



FIGURA 15: Indicación de agregar paja y/o arena gruesa a la mezcla para evitar fisuras tomadas de los manuales “Nuevas Casas Resistentes de Adobe”

En el manual “Nuevas Casas Resistentes de Adobe” solo indica que debe agregarse arena gruesa si los adobes se rajaran, este manual no es tan específico con la explicación del procedimiento como sí lo fue la publicación anterior “Resistencia Sísmica de la Mampostería de Adobe” de 1984 citado en el párrafo anterior.

<sup>7</sup> VARGAS, J. et al (1984). “Resistencia sísmica de la Mampostería de Adobe”. Pag.11



## 5. OBJETIVOS:

- Justificar teórica y experimentalmente la validez de los ensayos de campo de “Resistencia Seca” y de “Control de Fisuras con Arena Gruesa”, para garantizar la calidad y resistencia de la construcción con tierra.
- Demostrar la facilidad y practicidad de los ensayos de campo de “Resistencia Seca” y de “Control de Fisuras con Arena Gruesa”.
- Estandarizar a los sujetos que realizan los ensayos de campo.
- Representar gráficamente las resistencias a compresión de esferas de tierra durante 2 meses.



## 6. METODOLOGÍA:

Se debe desarrollar los fundamentos teóricos y ensayos de laboratorio necesarios para poder sustentar la validez, utilidad, eficiencia, viabilidad y sencillez de los ensayos de campo, que puedan ser transmitidos a un auto-constructor rural, sin necesidad de usar herramientas, ni realizar pruebas de laboratorio.

### 6.1.- Pasos a desarrollar para definir el ensayo de “Resistencia Seca”:

- Determinar un método para estimar el rango humano de la fuerza que ejercen los dedos pulgares e índices comprimiendo una esfera de 20 mm de diámetro elaborada con tierra.
- Contabilizar en un apreciable número de personas a través de una encuesta (mínimo 100 personas), la máxima fuerza que pueden ejercer sobre una esfera de 20 mm de diámetro.
- Ubicar una prensa de laboratorio con suficientemente sensibilidad para conocer el rango de la carga a compresión diametral que produzca la falla en probetas esféricas de tierra de 20 mm de diámetro.
- Elaborar una curva de “Resistencia a la compresión vs. Tiempo de secado” de probetas esféricas de tierra de 20 mm de diámetro, en más de 30 días de secado a la sombra.
- Recurrir a la teoría de elasticidad para conocer la relación que existe entre la fuerza diametral en compresión y la distribución de esfuerzos indirectos de tracción que se producen en el interior de un cuerpo esférico.
- Comprobar la forma de falla en las probetas esféricas con relación a la distribución de esfuerzos internos en ensayos de compresión diametral.

### 6.2.- Pasos a desarrollar para definir el ensayo de “Control de Fisuras”:

- Comprender y detallar el proceso de agregar paulatinamente arena gruesa al barro arcilloso para obtener progresivamente un esqueleto granular más resistente, una vez que la matriz arcillosa se contraiga al evaporarse el agua de la mezcla. Introducir las conclusiones en la propuesta de ensayo optimizado.

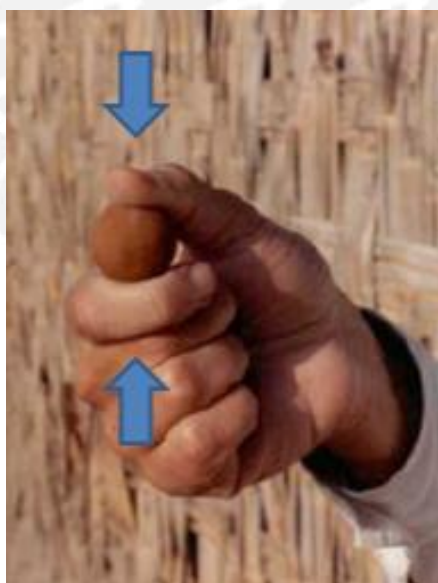
- Reconfirmar experimentalmente (ver referencias “Resistencia sísmica de la Mampostería de Adobe”), que la mayor resistencia de los elementos constructivos de tierra se obtiene cuando se alcanza un equilibrio entre arcilla-arena gruesa, a partir de este punto de equilibrio debe demostrarse que a un mayor aumento de arena gruesa la resistencia disminuye.

## 7. VERIFICACIÓN Y SUSTENTO DE LOS ENSAYOS:

### 7.1. ENSAYO DE “RESISTENCIA SECA”

El ensayo de “Resistencia Seca” consiste en corroborar la existencia de arcilla en la cantera de tierra seleccionada para poder construir con ella, esta comprobación es importante porque la arcilla es el único componente activo del suelo o cantera de tierra, que varía sus características mecánicas al contacto con el agua; puesto que, es aglomerante y produce cohesión entre los demás componentes inertes y al secarse adquiere “resistencia seca” necesaria para tener capacidad portante en los elementos estructurales.

Para realizar este ensayo se necesita una muestra del suelo o cantera y con este fabricar varias probetas esféricas pequeñas aproximadamente de 20 mm de diámetro, pasadas 48 horas de secado bajo sombra y protegidas del viento se ensayan a compresión con la mano más hábil utilizando los dedos pulgar e índice.



*FIGURA 16: Ensayo de campo de “Resistencia Seca”  
Compresión diametral con los dedos pulgar e índice de la mano más hábil.*

Si las esferas resisten y no se rompen, se concluye que el suelo tiene suficiente arcilla para ser utilizado en la construcción con tierra, en cambio, si algunas esferas se rompen, el suelo es inadecuado, por falta arcilla y debe descartarse.

Para poder validar el ensayo de “Resistencia Seca”, se necesita resolver las siguientes variables fundamentales:

1. Conocer la fuerza de compresión que tienen las personas entre los dedos pulgar e índice.
2. Conocer la fuerza máxima a compresión que resiste una probeta esférica en diversas tierras.
3. Conocer la relación que existe entre las fuerzas de compresión diametral y los esfuerzos internos de tracción indirecta en un cuerpo esférico.

#### **7.1.1. FUERZA DE COMPRESIÓN DE LAS PERSONAS ENTRE EL DEDO PULGAR E ÍNDICE.**

Para poder conocer la fuerza de compresión que una persona pueda ejercer entre los dedos pulgar e índice, fue necesario buscar una máquina que la midiera.

Por lo cual, se evaluó diversas balanzas electrónicas pequeñas con una forma ideal, pero estas son usadas para gramajes mínimos y no pudieron ser consideradas por no tener las escalas correctas; también se consideraron otro tipo de balanzas que contaban con las escalas adecuadas, sin embargo no tenían una disposición comfortable.

Por ello fue necesario desarrollar y adaptar un dinamómetro, el cual aparentemente no serviría porque trabaja a tracción. Partiendo de este supuesto anterior, se modificó añadiendo convenientemente un fierro de construcción de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro doblado en “C”, para redirigir las fuerzas de compresión y así obtener las lecturas en el dinamómetro.



FIGURA 17: Dinamómetro mecánico que funciona a tracción.



FIGURA 18: Adaptación de una varilla de acero corrugado de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro para poder medir fuerzas en compresión.

Se utilizó un fierro de construcción porque es un cuerpo lo suficientemente rígido para las pequeñas fuerzas que se le aplicarán, por lo tanto la deformación de este cuerpo no será una variable significativa.



*FIGURA 19: Cambio de la balanza mecánica a una digital, con la misma configuración.*

La configuración del dinamómetro con la varilla de acero busca adaptar a la forma y distancia aproximada lo más parecido posible al ensayo de compresión realizado con los dedos pulgar e índice.



*FIGURA 20: Similitud en la posición, para obtener resultados significativos.*

Se observó una última variable la cual es el dolor que se siente en el dedo pulgar al momento de comprimir una esfera. Para representar tal efecto, se buscó una esfera sintética partida por la mitad y se colocó en el dispositivo donde actúa el dedo pulgar para así conseguir una mejor similitud con el ensayo real.



*FIGURA 21: Detalle de la esfera sintética y su posición final en el dinamómetro.*

Con el dispositivo-balanza ya desarrollado, se iniciaron las encuestas con el fin de medir la fuerza de los dedos. Preliminarmente se consideró un universo sin distinción de género, edad y oficio; de los primeros sondeos se obtuvo una gran dispersión de resultados, desde 7 kg de una chica colegial hasta 15 kg de un campesino auto-constructor; una muestra con esta diferencia tan grande de fuerzas no es útil porque es posible que una fuerza muy pequeña apruebe una mala cantera.



FIGURA 22: Encuesta para medir la fuerza que las personas pueden aplicar entre los dedos

TABLA N° 3: Fuerza entre pulgar e índice.

GÉNERO	FUERZA MÍNIMA	FUERZA MÁXIMA	FUERZA PROMEDIO
Hombres	9 kg	15 kg	<b>11.2 kg</b>
Mujeres	7 kg	12 kg	<b>9.3 kg</b>

Fuente y elaboración: Propia

Para corregir esta diferencia de fuerzas se recomienda que el procedimiento sea efectuado solo por hombres trabajadores de campo (actividades agrícolas, construcción, mecánicas, pesqueras, entre otras). Con el cambio de criterio de selección de los encuestados se logró fuerzas mínimas y máximas más cercanas.

TABLA N° 4: Fuerza entre pulgar e índice corregido

GÉNERO	FUERZA MÍNIMA	FUERZA MÁXIMA	FUERZA PROMEDIO
Hombres trabajadores de Campo	12 kg	15 kg	<b>13.0 kg</b>

Fuente y elaboración: Propia



### 7.1.2. RESISTENCIA MÁXIMA A COMPRESIÓN DE UNA PROBETA ESFÉRICA DE TIERRA.

Para conocer la fuerza máxima que resiste una probeta esférica de tierra, se requiere hacer ensayos de compresión hasta la rotura, para ello se buscó una máquina de ensayos en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas, donde normalmente se realizan ensayos de compresión, pero en este caso, por la fragilidad de la probeta, estas máquinas no cuentan con la sensibilidad, ni precisión requerida.



FIGURA 23: Máquina compresora de probetas de concreto en el Laboratorio de Estructuras-PUCP



FIGURA 24: Máquina Universal donde se ensayan otro tipo de probetas de distintos materiales en el Laboratorio de Estructuras-PUCP

Posteriormente se buscó en el Laboratorio de Mecánica-PUCP, específicamente en el Laboratorio de Materiales y se encontró una pequeña máquina de mayor sensibilidad, óptima para estos ensayos con probetas esféricas de tierra, denominado Tensiómetro que trabaja con un motor eléctrico y mide la fuerza aplicada en una escala con mercurio.



FIGURA 25: Placa del Tensiómetro Monsanto del Laboratorio de Mecánica-PUCP



FIGURA 26: Tensiómetro marca Monsanto del Laboratorio de Mecánica-PUCP

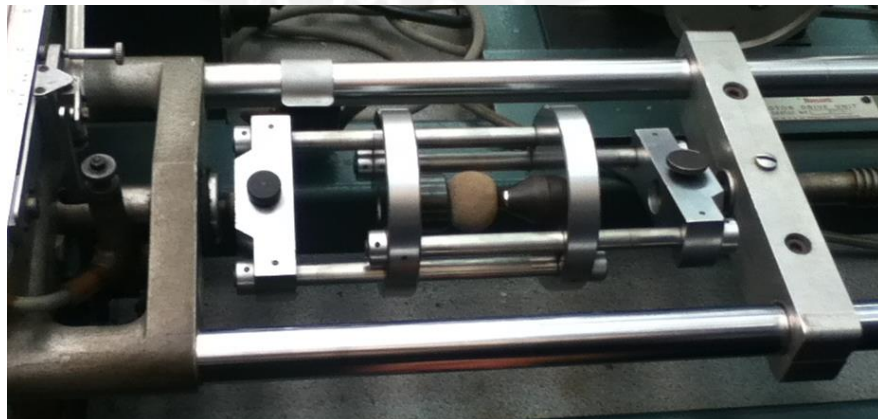
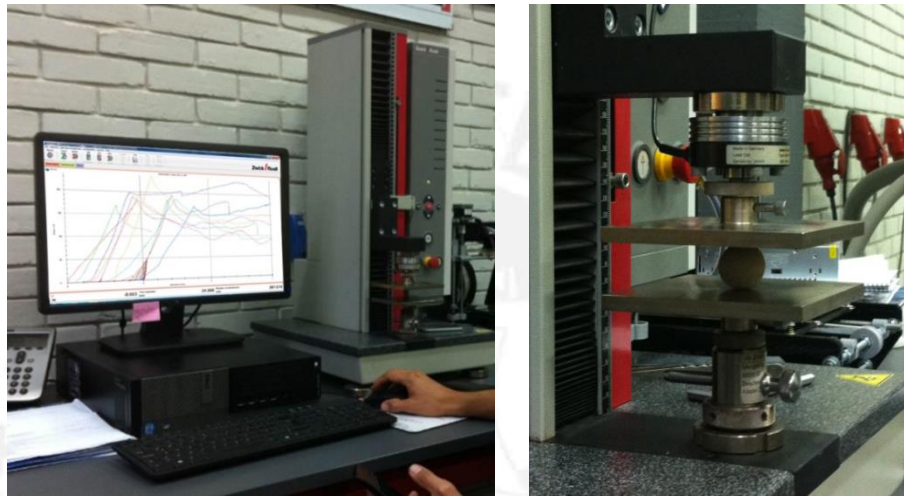


FIGURA 27: Detalle de la probeta esférica de tierra colocada en el Tensiómetro

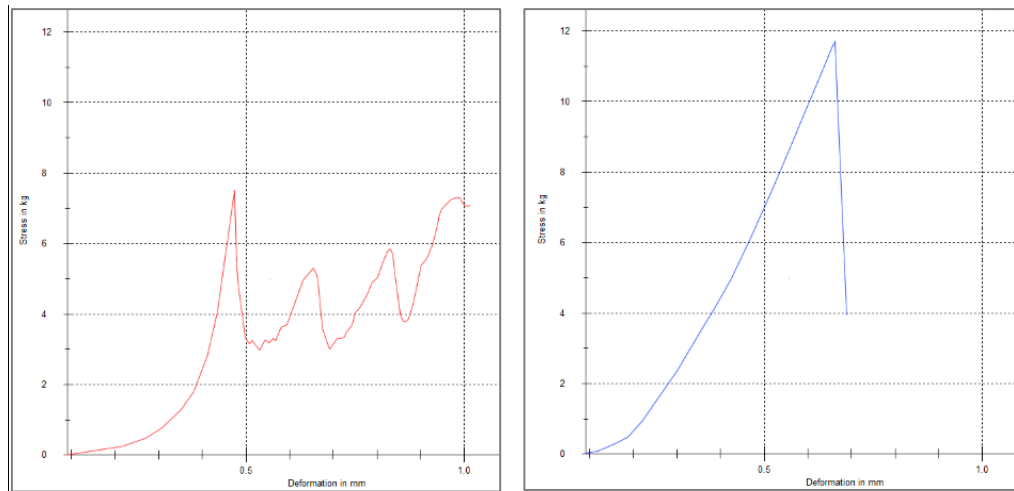
Los ensayos de compresión en el Tensiómetro “Monsanto” fueron positivos, porque esta máquina presentó la sensibilidad necesaria para obtener la fuerza de rotura de una probeta esférica de tierra. Finalmente, se utilizó una nueva máquina Zwick/Roell, adquirida por el Laboratorio de Materiales-PUCP, la cual tiene la ventaja de tener mayor sensibilidad y también de estar conectada a una computadora, la cual permite graficar diagramas de Fuerza vs Deformación y poder deducir otras importantes características de comportamiento.



*FIGURA 28: Nueva Máquina de compresión Zwick/Roell del Laboratorio de Mecánica-PUCP*

Con esta nueva máquina es posible programar varios parámetros entre los cuales tenemos: tipo de ensayo, velocidad de desplazamiento de los platos, tamaño de probetas, entre otros.

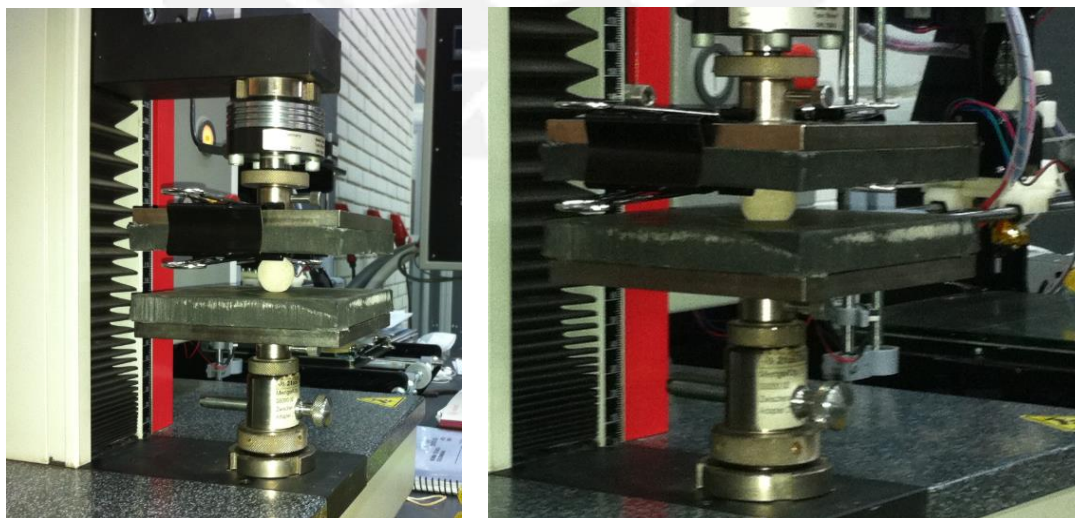
Inicialmente se escogió que los ensayos se realicen a Deformación Constante de 1mm/min, tomando como referencia el tiempo promedio de ensayo de otras probetas, pero las gráficas obtenidas, no corresponden a las de un material frágil, así que se cambió el comando de Deformación Constante a Fuerza Constante, escogiendo finalmente una velocidad de ensayo de 2N/s.



*FIGURA 29: Comparación de las gráficas de los ensayo de compresión controlando Deformación Constante vs Carga Constante.*

Para una mayor similitud de los ensayos con la realidad, se utilizó Capping (material homogéneo que se coloca entre la probeta y los platos de la máquina de ensayo), con esto se aumenta el área de contacto, de lo contrario se generarían cargas puntuales y resultados dispersos. Se seleccionó un capping entre varias alternativas de material, espesor y dureza.

Se probaron varios Cappings, el inicial fue de caucho de 14 mm de espesor que se utilizan en los ensayos de probetas de concreto en el Laboratorio de Estructuras, pero se observó que era muy blando y ocasionaba un área de contacto excesiva, los valores obtenidos no fueron representativos; por lo que también se probó con el mismo material de otros espesores, tales como: 6.5 mm y 2.5 mm; obteniéndose los mismos resultados.



*FIGURA 30: Ensayo con Capping de caucho de 14mm de espesor*



FIGURA 31: Diferentes espesores de caucho para Capping

Posteriormente, se buscó información de Cappings que se utilizan para materiales frágiles pero no se encontró información apropiada. Entonces se decidió investigar con nuevos materiales de las siguientes características:

- El material debe ser estándar, con control de calidad.
- El ensayo debe ser replicable, con la misma exactitud, tanto en los laboratorios de la PUCP como en otros laboratorios.
- Debe ser un material relativamente accesible.

En Lima, se encontró varios materiales potenciales que cumplían con las características exigidas y podían servir para estos ensayos, entre los cuales se destacan:

- Neopreno
- Jebe con lona
- Jebe
- Asbesto

Los nuevos materiales escogidos fueron todos de 1.5mm de espesor, para evitar que exista una excesiva área de contacto, como ocurrió en ensayos anteriores.



FIGURA 32: Materiales potenciales para ser utilizados como Capping.

En el Laboratorio de Materiales del Laboratorio de Mecánica-PUCP se hicieron los ensayos de dureza de los materiales encontrados.



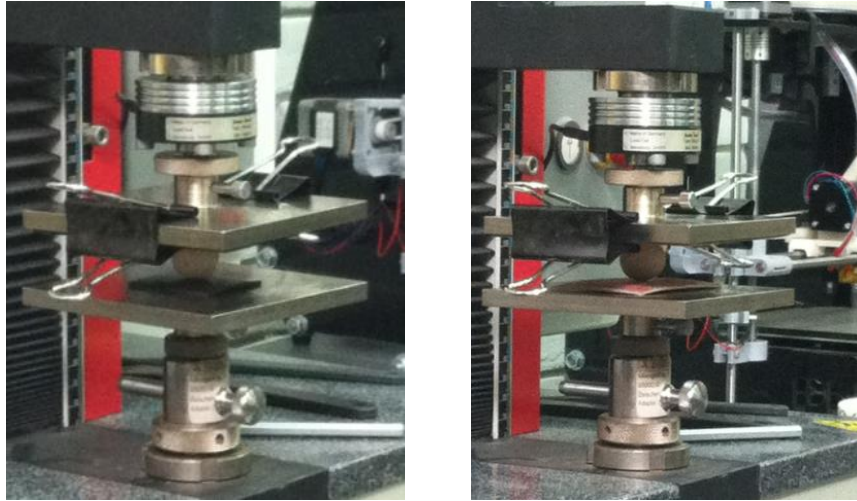
FIGURA 33: Ensayo de dureza de los materiales Jebe y Asbesto.

Los resultados para cada uno de los materiales escogidos fueron:

- Neopreno: 75.9 SHORE
- Jebe Puro: 75.7 SHORE
- Jebe con Lona: 79.5 SHORE
- Asbesto: 95.1 SHORE

Con los resultados de dureza se escogió los materiales que presentaron mayor valor:

- Jebe con Lona
- Asbesto



*FIGURA 34: Ensayo comparativo de variabilidad de resultados entre Jebe con Lona y Asbesto*

Con cada uno de estos Capping se hizo un último ensayo y finalmente se escogió el Asbesto por su mayor dureza y menor variabilidad en los resultados.



## Ensayos:

Con la máquina de ensayos disponible y el Capping definido se procedió con los ensayos de compresión de las probetas esféricas en el Laboratorio de Materiales de la sección de Ingeniería Mecánica-PUCP, se obtuvo muestras de dos canteras diferentes de suelo, se define como muestra al material de cantera sin preparar, ni optimizar, con la cual se quiere construir. La primera muestra provino de una excavación del suelo del campus PUCP con vocación agrícola y la segunda es una muestra recogida de una “chacra” o tierra de cultivo en Cusco.

TABLA N° 5: Muestras de suelo

<b>MUESTRA “A”:</b> Suelo PUCP.	<b>MUESTRA “B”:</b> Suelo de Cusco, del distrito de Ccatcca.
Proporcionado por el Laboratorio de Estructuras, extraído de la excavación para la construcción de la Biblioteca del Complejo de Innovación Académica (CIA).	Recogido directamente de una “chacra” recientemente arada a 40 km al sur de la ciudad de Cusco.

Fuente y elaboración: Propia

## MUESTRA “A”: Suelo PUCP

Se fabricaron probetas esféricas de 20 mm de diámetro con la muestra “Suelo PUCP”, dejando secar por 24 horas y también 48 horas, fueron ensayadas a compresión diametral en el Laboratorio de Materiales de la sección de Ingeniería Mecánica a una velocidad de ensayo de 2N/s.



FIGURA 35: Esferas moldeadas de 20 mm de diámetro aproximadamente



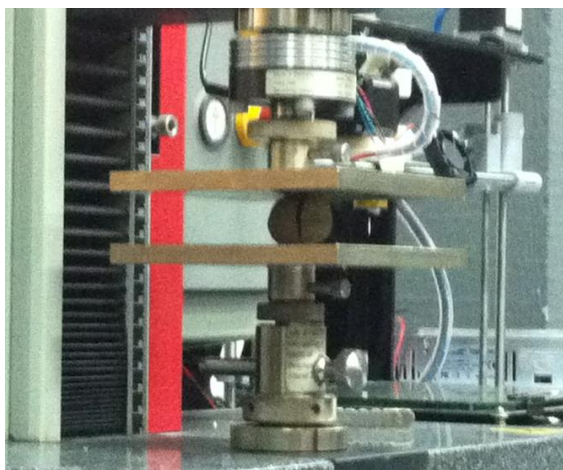


FIGURA 36: Detalle del ensayo a compresión diametral y tipo de falla de las esferas.

## RESULTADOS:

TABLA N° 6: Ensayos a compresión con 24 horas de secado - PUCP

MUESTRA PUCP (24 horas)	DIAMETRO (cm)	RESISTENCIA (kg)	Observación
1	2.3	9.8	--
2	2.2	12.2	núcleo húmedo
3	2.3	11.6	núcleo húmedo
4	2.4	11.2	--
5	2.4	10.3	núcleo húmedo
6	2.1	11.7	núcleo húmedo
7	2.5	9.1	núcleo húmedo
8	2.4	11.0	--
9	2.3	8.3	--
10	2.2	10.5	núcleo húmedo

Fuente y elaboración: Propia

Promedio de la resistencia: 10.57 Kg.

Eliminando el mayor y el menor valor: Promedio =10.65 Kg.

TABLA N° 7: Ensayos a compresión con 48 horas de secado - PUCP

MUESTRA PUCP (48 horas)	DIAMETRO (cm)	RESISTENCIA (kg)	Observación
1	2.2	15.4	--
2	2.4	14.3	--
3	2.3	20.5	--
4	2.6	16.4	--
5	2.4	16.3	--
6	2.6	15.9	--
7	2.5	19.2	--
8	2.4	16.9	--
9	2.4	15.8	--
10	2.5	15.6	--

Fuente y elaboración: Propia

Promedio de la resistencia: 16.63 Kg.

Eliminando el mayor y el menor valor: Promedio =16.43 Kg.

### MUESTRA "B": Suelo de Cusco, del distrito de Ccatcca

Se fabricaron probetas esféricas de 20 mm de diámetro con la muestra "Suelo de Cusco", dejando secar por 24 horas y también 48 horas, fueron ensayadas a compresión diametral en el Laboratorio de Materiales de la sección de Ingeniería Mecánica a una velocidad de ensayo de 2N/s.



FIGURA 37: Esferas moldeadas de 20mm de diámetro aproximadamente

## RESULTADOS:

TABLA N° 8: Ensayos a compresión con 24 horas de secado - CUSCO

MUESTRA CUSCO (24 horas)	DIAMETRO (cm)	RESISTENCIA (kg)	Observación
1	2.2	8.8	núcleo húmedo
2	2.2	7.5	núcleo húmedo
3	2.1	10.9	núcleo húmedo
4	2.2	9.7	núcleo húmedo
5	2.2	10.3	núcleo húmedo
6	2.3	8.6	núcleo húmedo
7	2.2	11.5	--
8	2.2	9.7	núcleo húmedo
9	2.2	9.5	núcleo húmedo
10	2.2	10.1	--

Fuente y elaboración: Propia

Promedio de la resistencia: 9.66 Kg.

Eliminando el mayor y el menor valor: Promedio =9.7 Kg.

TABLA N° 9: Ensayos a compresión con 48 horas de secado - CUSCO

MUESTRA CUSCO (48 horas)	DIAMETRO (cm)	RESISTENCIA (kg)	Observación
1	2.2	15.2	--
2	2.2	17.1	--
3	2.1	12.7	--
4	2.2	17.4	--
5	2.2	10.4	--
6	2.3	14.6	--
7	2.2	19.4	--
8	2.2	15.4	--
9	2.2	16.6	--
10	2.2	14.4	--

Fuente y elaboración: Propia

Promedio de la resistencia: 15.32 Kg.

Eliminando el mayor y el menor valor: Promedio =12.34 Kg.

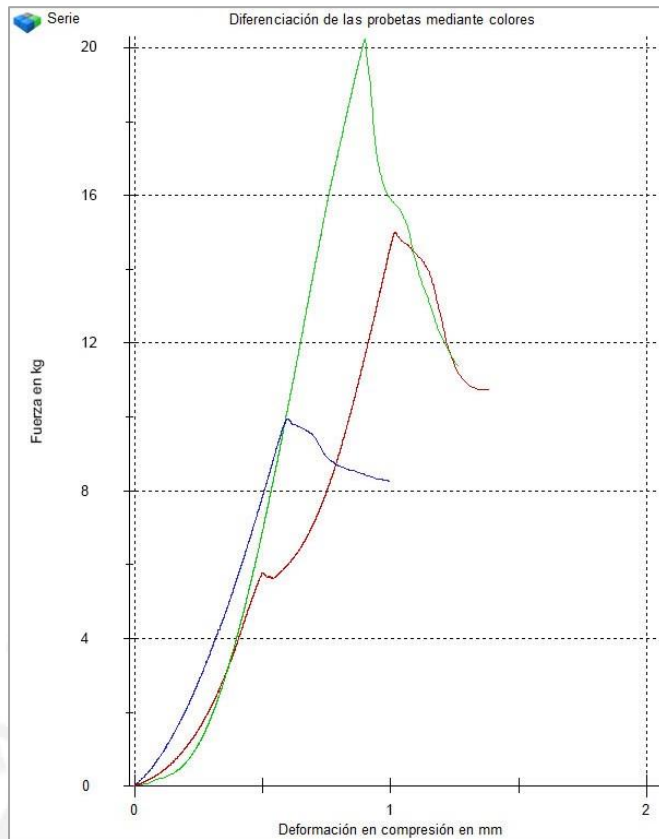


FIGURA 38: Curvas Fuerza vs Deformación de las esferas del "Suelo PUCP" (Curvas promedio, mínima y máxima)

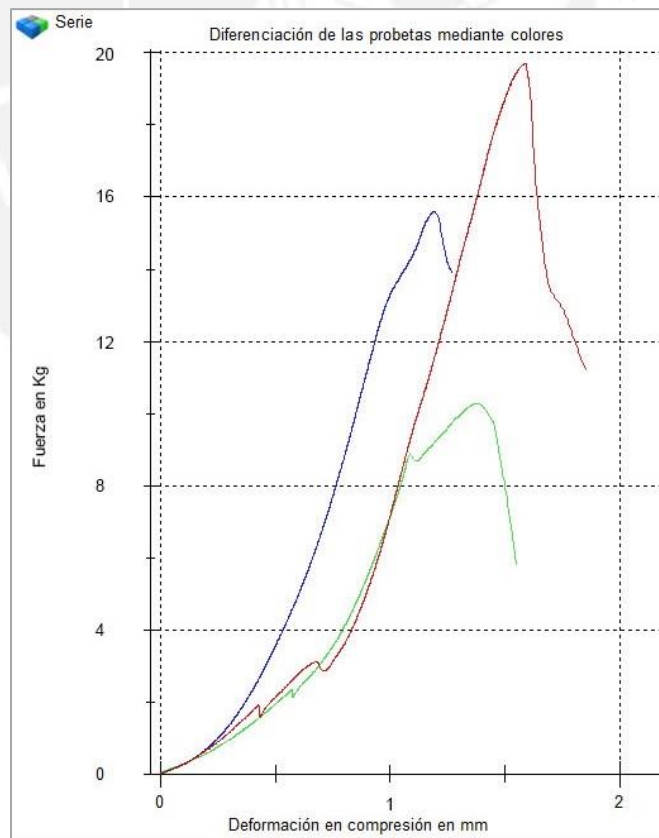


FIGURA 39: Curvas Fuerza vs Deformación de las esferas del "Suelo Cusco" (Curvas promedio, mínima y máxima)

### 7.1.3. RELACIÓN ENTRE LAS FUERZAS DE COMPRESIÓN Y ESFUERZOS INTERNOS DE TRACCIÓN INDIRECTA EN UN CUERPO ESFÉRICO

Recurriendo a la teoría de la elasticidad, un comportamiento lineal y uniforme, como el presentado en el artículo “Effective volume of specimens in diametral compression”, escrito por Neergaard, describe la relación entre fuerza diametral en compresión y esfuerzos de tracción transversal máximo al interior de una esfera:

$$\sigma_{max} = \frac{P}{2\pi R^2}$$

Donde:

$\sigma_{max}$ : Esfuerzo en el punto de máxima tensión en el centro de la esfera.

R: Radio de la esfera.

P: Carga de compresión diametral.

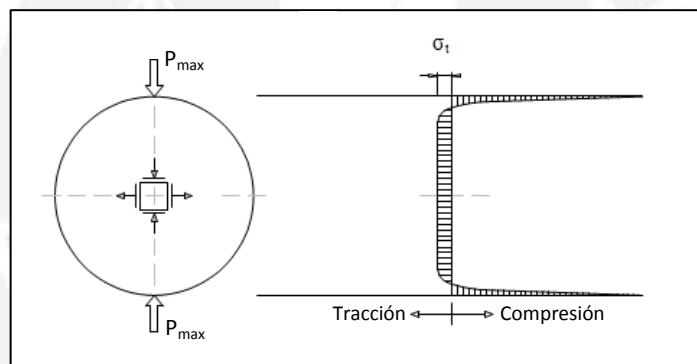


FIGURA 40: Distribución de esfuerzos a lo largo del diámetro vertical, donde se observan esfuerzos de tracción prácticamente uniformes en dos terceras partes del diámetro.

TABLA N° 10: Tipos de falla observados en las probetas esféricas

TIPOS DE FALLA OBSERVADOS EN LAS PROBETAS ESFÉRICAS		
	1 Plano de Falla visible	
	2 Planos de Falla	

Fuente y elaboración: Propia

#### 7.1.4. GRÁFICA RESISTENCIA VS TIEMPO DE SECADO

Con una cantera de suelo de Lima, se obtuvo una familia de curvas que muestran el incremento de resistencia con el tiempo de secado; es decir, la distribución de la resistencia adquirida a través del tiempo. La familia de curvas, que corresponde a la variación de porcentajes en la adición de arena gruesa, simula o representa la comparación de distintas calidades de suelo:

TABLA N° 11: Mezcla de distintos porcentajes de suelo y arena gruesa

(1:0)	Suelo puro, sin agregado de arena gruesa
(1: ½)	1 volumen de suelo + ½ volumen de arena gruesa
(1:1)	1 volumen de suelo + 1 volumen de arena gruesa
(1:1½)	1 volumen de suelo + 1½ volumen de arena gruesa
(1:2)	1 volumen de suelo + 2 volumen de arena gruesa

Fuente y elaboración: Propia

Se ensayó tres probetas esféricas de cada mezcla. La programación de los días de ensayo, fue de intervalos crecientes, hasta llegar a los 2 meses de secado:

TABLA N° 12: Cronograma de ensayos durante 2 meses

Día	Fecha
0	09-nov-2015 (se moldearon las probetas esféricas)
1	10-nov-2015
2	11-nov-2015
5	14-nov-2015
9	18-nov-2015
18	27-nov-2015
31	11-dic-2015
62	13-ene-2016

Fuente y elaboración: Propia

Se promediaron y graficaron los resultados de resistencias obtenidos en las diferentes mezclas con arena gruesa:

TABLA N° 13: Resistencias últimas de probetas esféricas ensayadas a compresión

Mezclas:	1:0	1:1/2	1:1	1:1 1/2	1:2
10-nov	9.80	10.40	5.93	5.54	6.68
	10.70	11.90	6.20	5.48	7.81
	10.42	13.90	5.99	6.19	6.20
Promedio	<b>10.31</b>	<b>12.07</b>	<b>6.04</b>	<b>5.74</b>	<b>6.90</b>
11-nov	12.23	14.40	10.00	7.22	8.67
	10.67	13.10	7.29	7.42	8.28
	11.80	14.90	8.32	7.63	5.29
Promedio	<b>11.57</b>	<b>14.13</b>	<b>8.54</b>	<b>7.42</b>	<b>7.41</b>
14-nov	13.10	15.30	10.30	7.94	7.08
	13.74	15.42	9.56	9.57	10.20
	14.14	16.30	9.32	7.50	6.24
Promedio	<b>13.66</b>	<b>15.67</b>	<b>9.73</b>	<b>8.34</b>	<b>7.84</b>
18-nov	16.12	17.90	9.90	9.50	7.05
	15.70	16.10	11.70	9.27	10.70
	14.86	17.63	11.70	11.00	8.19
Promedio	<b>15.56</b>	<b>17.21</b>	<b>11.10</b>	<b>9.92</b>	<b>8.65</b>
27-nov	19.30	17.90	13.20	10.30	9.70
	19.98	22.20	12.50	8.55	9.77
	18.82	23.60	13.10	10.30	11.80
Promedio	<b>19.37</b>	<b>21.23</b>	<b>12.93</b>	<b>9.72</b>	<b>10.42</b>
11-dic	20.37	19.00	11.40	9.20	10.40
	19.91	21.30	13.75	10.38	9.16
	20.20	22.40	11.70	10.03	9.72
Promedio	<b>20.16</b>	<b>20.90</b>	<b>12.28</b>	<b>9.87</b>	<b>9.76</b>
13-ene	20.14	20.50	12.53	10.40	9.73
	20.30	21.92	11.56	9.55	10.11
	19.98	21.50	12.88	9.42	10.33
Promedio	<b>20.14</b>	<b>21.31</b>	<b>12.32</b>	<b>9.79</b>	<b>10.06</b>

Fuente y elaboración: Propia

TABLA N° 14: Resumen de resistencias últimas de probetas esféricas ensayadas a compresión

**Cuadro de resistencias promedio:**

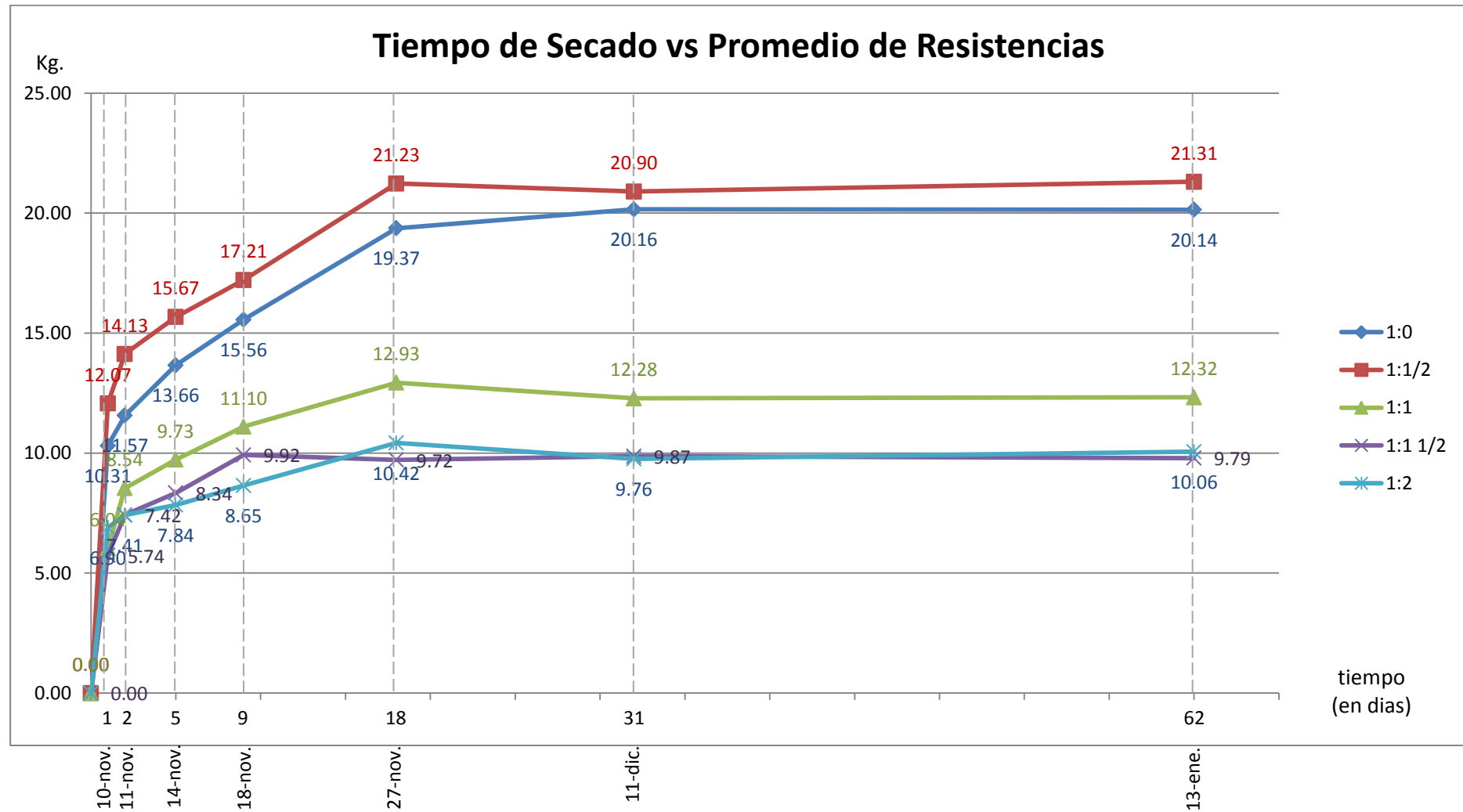
día	Mezclas	1:0	1:1/2	1:1	1:1 1/2	1:2
0	09-nov	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	10-nov	10.31	12.07	6.04	5.74	6.90
2	11-nov	11.57	14.13	8.54	7.42	7.41
5	14-nov	13.66	15.67	9.73	8.34	7.84
9	18-nov	15.56	17.21	11.10	9.92	8.65
18	27-nov	19.37	21.23	12.93	9.72	10.42
31	11-dic	20.16	20.90	12.28	9.87	9.76
62	13-ene	20.14	21.31	12.32	9.79	10.06

Fuente y elaboración: Propia





FIGURA 41: Familia de curvas esperada - Tiempo de Secado vs Promedio de Resistencias



Fuente y elaboración: Propia

Se observa que la resistencia que alcanza una probeta esférica de tierra de 20 mm de diámetro se estabiliza aproximadamente a los 18 días.

Con relativa uniformidad en todas las mezclas, se comprueba la conveniencia de escoger para la ejecución del ensayo de compresión, los 2 días de secado, debido a que los resultados están a alrededor de dos tercios de su resistencia aproximada final, como se observa en la tabla 15. Los dos días son la corta y a la vez prudente espera para realizar los ensayos de campo de “Resistencia Seca”.

TABLA N° 15: Tabla resumen de resistencia promedio

día	fecha	1:0	1:1/2	1:1	1:1 1/2	1:2
2	11-nov	11.57	14.13	8.54	7.42	7.41
18	27-nov	19.37	21.23	12.93	9.72	10.42

Fuente y elaboración: Propia



## 7.2. ENSAYO DE “CONTROL DE FISURAS CON ARENA GRUESA”

El ensayo de “Control de Fisuras con Arena Gruesa”, consiste en determinar la cantidad necesaria de arena gruesa que se debe agregar a un suelo arcilloso para evitar las grietas generadas por la retracción de la arcilla (propiedad de la arcilla que consiste en la reducción de volumen durante el secado). Estas grietas no permiten que la mampostería de adobes genere su resistencia máxima.

Cada cantera de tierra presenta diferentes calidades y cantidades de arcilla. Esta variabilidad no debe tomarse en cuenta porque un suelo con poco porcentaje de arcilla de buena calidad puede trabajar igual que un suelo con alto porcentaje de arcilla de baja calidad.

La arena gruesa al mezclarse con un suelo arcilloso genera un esqueleto granular, el cual es formado por cada uno de los granos de arena que se apoyan unos contra otros y así impiden la excesiva reducción de volumen. (ver figura 30)



FIGURA 42: Formación de un esqueleto granular formado por los granos de arena gruesa (Vargas, J. 2013)

El tamaño de los granos de la arena gruesa es menor que 4.75 mm (Tamiz #4) y mayor a 2 mm (Tamiz #10), siendo el tamaño ideal de partículas porque si fueran de mayor tamaño se generan concentraciones de esfuerzos.

Para realizar este ensayo debe hacerse de 5 a 6 mezclas de tierra arcillosa y arena gruesa con las siguientes proporciones:

- 1.- (1: 0) Un volumen de suelo sin arena gruesa.
- 2.- (1: ½) Un volumen de suelo + ½ volumen de arena gruesa.
- 3.- (1: 1) Un volumen de suelo + 1 volumen de arena gruesa.

4.- (1:1½) Un volumen de suelo + 1½ volumen de arena gruesa.

5.- (1: 2) Un volumen de suelo + 2 volumen de arena gruesa.

6.- (1:2½) Un volumen de suelo + 2½ volumen de arena gruesa.

Con cada una de estas mezclas se conforma un mortero de 20 milímetros de espesor que une dos adobes existentes y este espécimen se deja secar por 48 horas a la sombra como se aprecia en la figura 31 y 32 los cuales se dejan secar bajo un techo de esteras.



FIGURA 43: Fabricación de especímenes para el ensayo de Control de Fisuras.



FIGURA 44: Fabricación de 3 especímenes de cada tipo de mezcla.

Pasadas las 48 horas se destapan cada uno de estos adobes y se realiza una inspección ocular de la cantidad de fisuras que se logran visualizar en el mortero.



FIGURA 45: Destape de los especímenes, pasadas 48 horas de secado y verificación de espesor de 20 mm.

Al destapar los adobes, se alcanza percibir que en el suelo sin agregado de arena gruesa (1:0) se tiende a producir grandes fisuras; a comparación de las siguientes mezclas que contienen arena gruesa en distintas proporciones.

Al observar la mezcla de 1 volumen de suelo +  $\frac{1}{2}$  volumen de arena gruesa ( $1:\frac{1}{2}$ ) aún se observan pequeñas fisuras; sin embargo, en las mezclas 1 volumen de suelo + 1 volumen de arena gruesa (1:1); 1 volumen de suelo +  $1\frac{1}{2}$  volumen de arena gruesa ( $1:1\frac{1}{2}$ ); 1 volumen de suelo + 2 volumen de arena gruesa (1:2) ya no se visualizan las fisuras.

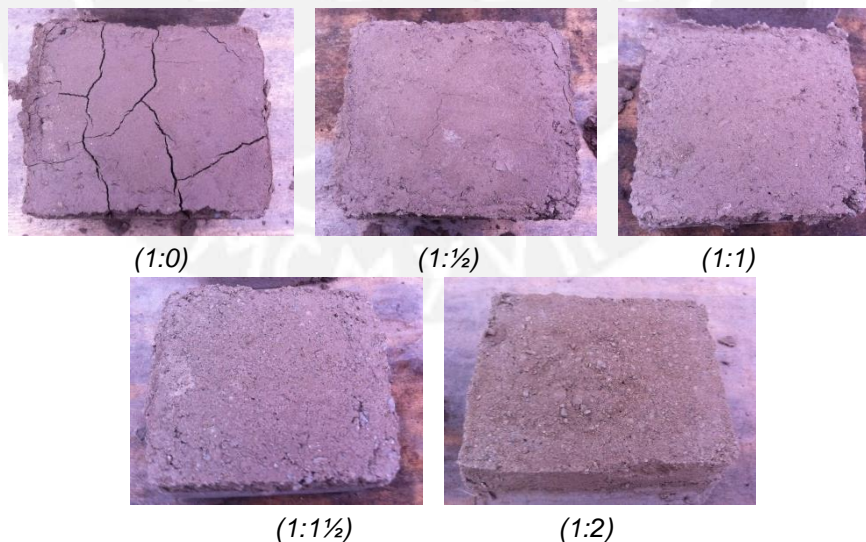


FIGURA 46: Resultado de los distintos morteros luego de destapar los adobes.

Se puede concluir que el primer espécimen donde no se observan fisuras es la mezcla óptima (suelo + arena gruesa) porque al no tener fisuras tiene un comportamiento homogéneo y los siguientes son muy arenosos lo cual es desfavorable debido el bajo porcentaje de arcilla.

### 7.2.1. GRÁFICA RESISTENCIA VS RELACIÓN VOLUMÉTRICA SUELO:ARENA

Del grupo de ensayos con el cual se graficó la familia de curvas de Resistencia vs Tiempo de Secado, se procedió a agrupar los resultados por fechas para obtener un nuevo e interesante grupo de curvas donde se observa un ligero aumento de resistencia en todas las muestras de 1 volumen de suelo + ½ volumen de arena gruesa (1: ½); como se observa en la figura 35.

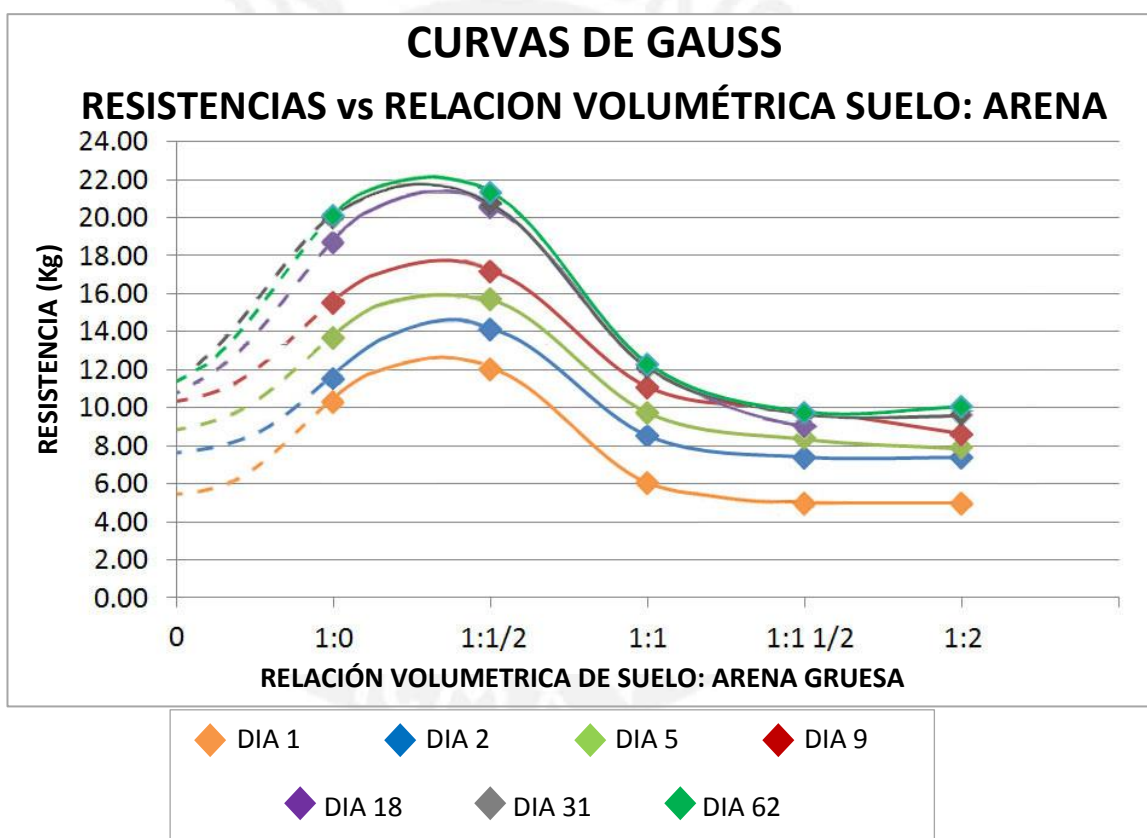


FIGURA 47: Curvas de Resistencia vs Relación Volumétrica Suelo: Arena  
(Fuente y Elaboración: Propia)

Se observa que se forman diferentes Curvas de Gauss donde la mezcla de 1 volumen de suelo + ½ volumen de arena gruesa (1: ½) siempre obtiene un ligero aumento de resistencia a comparación del suelo solo (1:0), para luego bajar considerablemente su resistencia mientras más arena gruesa se agregue. La curva

de Gauss sugiere que la mezcla (1: ½) no es óptima ya que la resistencia alcanzada no está en el vértice de la curva, pero se encuentra bastante cercano.

### 7.2.2. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA EN MURETES DE ADOBE DEL INFORME US-AID 936/5542 DE 1983.

En este completo informe donde se estudió las características mecánicas, físicas, químicas y físico-químicas de varios suelos del Perú. Se desarrolló un ensayo donde se construyeron muretes de adobe con mortero de barro de 0.60x0.60 m y se probaron a compresión diagonal (figura 36), con el fin de determinar cómo obtener una buena mampostería, debido a que es controlada por la resistencia de la interfase mortero-adobe. Este ensayo se prefirió al del ensayo de tracción directa a pesar de que implica más tiempo, material y costo, pero se obtienen resultados con menor grado de dispersión.

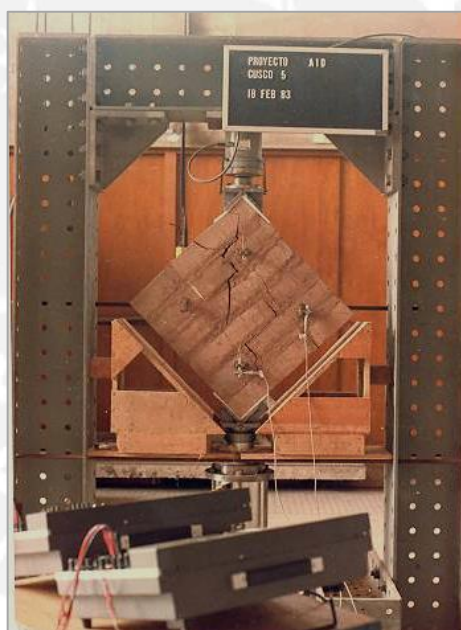


FIGURA 48: Ensayos de Compresión Diagonal en muretes de Adobe de 0.60x0.60m  
(Fuente: Informe final US-AID 1983, pág. 74)  
(Elaboración: Vargas J. Bariola J. y Blondet M.)

Estos muretes de adobe se ensayaron de la siguiente forma: en principio con tierra sola y posteriormente agregándole pequeñas cantidades (porcentajes) de arena gruesa para obtener en detalle el aumento de resistencia. Gráficamente estos ensayos forman curvas de Gauss, se infiere que, en los suelos de Cajamarca y Lima (PUCP) existe perfeccionamiento al momento de graficarse, en contraste con los suelos de Huancayo Blanco y Huaraz donde se observa un aumento de resistencia incompleta por falta de especímenes. Ver figura 37.

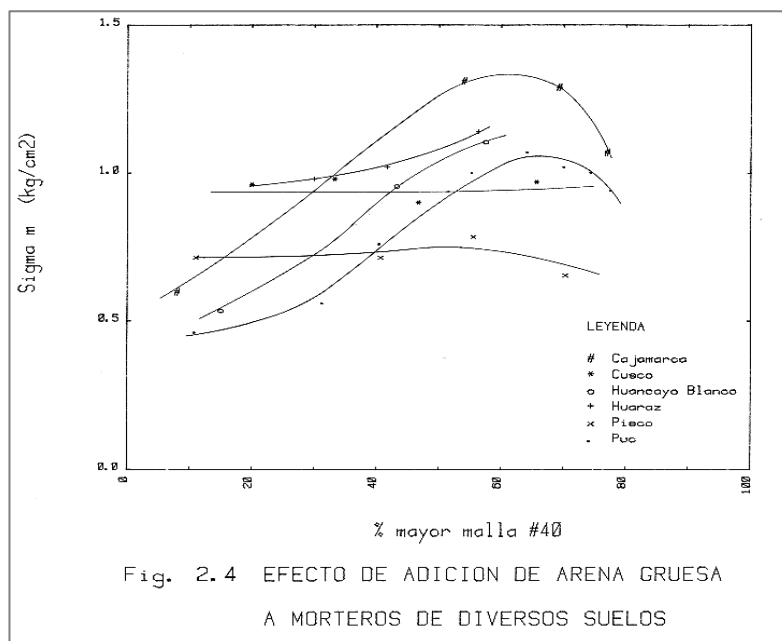
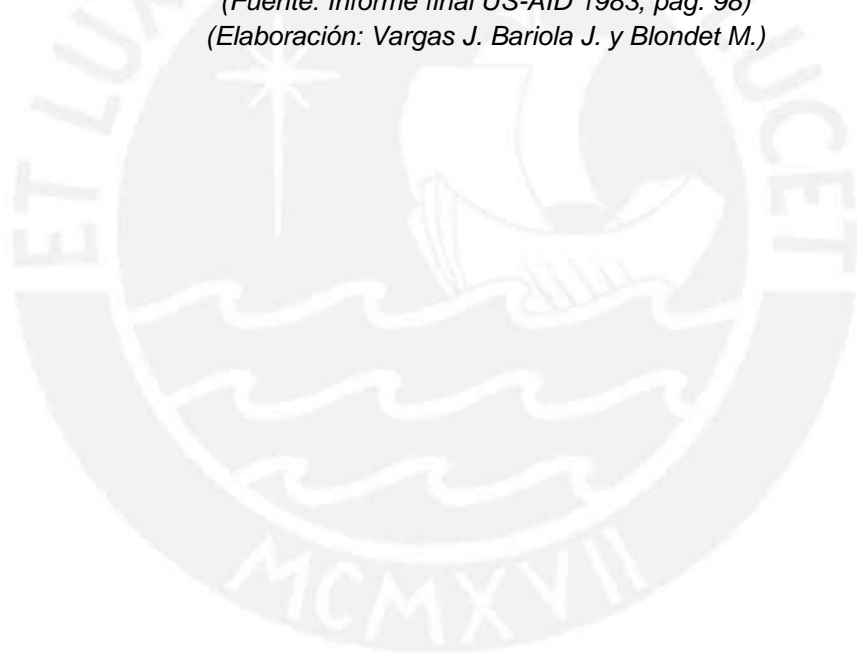


FIGURA 49: Curvas de Gauss formadas por los diferentes ensayos a Compresión Diagonal en muretes de Adobe de 0.60x0.60m agregando arena gruesa.  
 (Fuente: Informe final US-AID 1983, pág. 98)  
 (Elaboración: Vargas J. Bariola J. y Blondet M.)





## 8. CONCLUSIONES

- La resistencia de las probetas esféricas moldeadas con un suelo arcilloso, puestas a secar por 24 horas son de 0.099 kN (10.17 kgf), en 48 horas de secado son en promedio 0.141 kN (14.38 kgf). Comparadas con la fuerza promedio que tienen las personas entre los dedos pulgar e índice que es de 0.127 kN (13 kgf). Por lo tanto, una buena tierra debe superar la fuerza promedio de las personas en 2 días de secado, por ello se recomienda que el ensayo de “Resistencia Seca” debe realizarse a las 48 horas de secado por un tema de eficiencia y productividad para el auto-constructor.
- Los suelos que tengan una resistencia menor o igual de 0.117 kN (12 kg) están descartados y no se podrá construir con este suelo por no tener la suficiente presencia de arcilla o resistencia seca. Este suelo podría salvarse al aumentar su porcentaje de arcilla sí se mezcla con un suelo más arcilloso para mejorar su comportamiento.
- El ensayo de “Resistencia Seca” es útil por su simplicidad, sin necesidad de utilizar herramientas, debido a que las probetas esféricas son moldeadas sin necesidad de compactación. Este ensayo está asociado a comprobación experimental de laboratorio, siendo el único ensayo de campo que tiene un respaldo teórico y experimental.
- El ensayo de “Control de fisuras con Arena Gruesa” mejora el comportamiento y resistencia de un suelo arcilloso, controlando las grietas generadas por la retracción de la arcilla (propiedad de la arcilla que consiste en la reducción de volumen durante el secado). Estas grietas no permiten que la mampostería de adobes genere su resistencia máxima.
- Se corroboró la validez del ensayo de “Control de Fisuras con Arena Gruesa”. Se obtuvo una curva de Gauss mezclando un suelo de una cantera del norte de Lima y porcentajes de arena gruesa. Se observó tendencias de resistencias máximas, siendo la proporción óptima de 3/8 de volumen de arena gruesa; pero por practicidad del ensayo, con ½ volumen se alcanza un valor cercano, similar a la resistencia máxima.
- Los ensayos de “Resistencia Seca” y de “Control de fisuras con Arena Gruesa” son complementarios; puesto que, son necesarios para optimizar la mezcla a usar en obra.

- Se concluye que ambos ensayos son viables y prácticos. En esta investigación se ha demostrado que son suficientes para garantizar la calidad de una cantera y que la mezcla sea óptima para la construcción en poco tiempo. Lo cual genera eficiencia, economía y seguridad.



## 9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que el ensayo de “Resistencia Seca” sea realizada por hombres de Campo, que trabajen con las manos, porque estas personas comparten aproximadamente la misma fuerza de compresión entre los dedos pulgar e índice.
- Se recomienda una mayor difusión de estos ensayos con el fin de extender su conocimiento a toda la población rural y sean puestas en práctica para que las edificaciones de tierra sean más seguras.
- En el caso de los lugares donde crece abundante paja, es suficiente hacer el ensayo de “Control de Fisuras con Paja” y no es necesario utilizar la arena gruesa como aditivo, dando lugar a una investigación de revalidación en este material o sustitutos.
- Se recomienda cambiar la redacción de los manuales y folletos de construcción con tierra por el siguiente párrafo:

*“Para corroborar que un suelo de cantera es lo suficiente bueno para poder construir, es necesario hacer dos ensayos simultáneamente:*

*-Primero el ensayo de Resistencia Seca, el cual consiste en fabricar tres probetas esféricas pequeñas aproximadamente de 20 mm de diámetro moldeadas con las palmas de ambas manos y con la mínima agua necesaria, luego de 48 horas de secado bajo sombra y protegidas del viento, un maestro de obra debe ensayar a compresión con los dedos pulgar e índice de su mano más hábil todas las esferas tratando de romperlas. Si las esferas resisten y no se rompen, se concluye que el suelo tiene suficiente arcilla para proceder con el siguiente ensayo, en cambio, si algunas esferas se rompen, el suelo es inadecuado, por falta arcilla y debe descartarse.*

*-Segundo, el ensayo de Control de Fisuras con Arena Gruesa que consiste en fabricar seis emparedados (dos bloques unidos con mortero de 20 milímetros de espesor) usando adobes existentes y mortero del suelo en estudio, este suelo se mezcla con distintas proporciones de arena gruesa (de 2 mm a 5 mm), los cuales son:*

- 1- (1: 0) Un volumen de suelo sin arena gruesa.
- 2- (1: ½) Un volumen de suelo + ½ volumen de arena gruesa.
- 3- (1: 1) Un volumen de suelo + 1 volumen de arena gruesa.
- 4- (1:1½) Un volumen de suelo + 1½ volumen de arena gruesa.
- 5- (1: 2) Un volumen de suelo + 2 volumen de arena gruesa.
- 6- (1:2½) Un volumen de suelo + 2½ volumen de arena gruesa.

*La proporción suelo/arena más adecuada se determinará luego de 48 horas de secado bajos sombra y protegido del viento será el que tenga menor contenido de arena gruesa y que no muestre fisuras visibles en el mortero.”*



## 10. BIBLIOGRAFÍA:

- BLONDET, M. VARGAS, J. TARQUE, N. VELÁSQUEZ, J. (2005). "IV SIACOT: La Tierra Armada: 35 años de investigación en la PUCP". Lima.
- CHIRINOS, H. ZÁRATE, E. (2011). "TESIS: Historia de la Construcción en Lambayeque. Periodos Prehispánico y Virreinal. Lima: UNI.
- CHIRINOS, P. (2010). "Revista Electrónica de Arquitectura PUCP volume 5: La aplicación de reconstrucciones digitales para la conservación de patrimonio: Aportes preliminares sobre el caso de Chan Chan". Lima.
- CORREIA, M. GUERRERO, L. CROSBY, A. (2016). "Conservation and Management of Archaeological Sites volume 17, Technical Strategies for Conservation of Earthen Archaeological Architecture".
- DARVELL, B. (1990). "Journal of Materials Science volume 25, Uniaxial compression tests and the validity of indirect tensile strength".
- INEI. (2007). Censo de Vivienda y Población 2007 - Materiales predominantes en muros de vivienda. Lima.
- LE TIEC, J., & PACCOUD, G. (2006). PISÉ H2O, De l'eau pour construire. France: CRATerre Editions.
- NEERGAARD, L. (1997). Journal of Materials Science volume 32, Effective volume of specimens in diametral compression.
- MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO. (2000). Norma Técnica de edificación NTE E.080 ADOBE. Lima.
- PROCOPIO, A. (2003). Journal of Materials Science volume 38, Analysis of the diametral compression test and the applicability deforming materials.
- RODRIGUEZ-LARRAÍN, S. MONTOYA, T. GIL, S. ONNIS, S. VARGAS, J. (2013). Cuadernos 18, Aportes de la enseñanza de la arquitectura en tierra a la mitigación de riesgos, Departamento Académico de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima: Editorial PUCP.
- PUCP. (1985). Manual para la construcción de NUEVAS CASAS RESISTENTES DE ADOBE. Lima: Editorial PUCP.

- VARGAS, J. BARIOLA, J. BLONDET, M. (1983). Investigación científica Innovativa: Edificaciones de Adobe en Áreas Sísmicas, Proyecto AID 936/5542. Lima: Editorial PUCP.
- VARGAS, J. (2013). La Tierra como Material de Construcción. Clase seminario de Construcción 1, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima.



## APÉNDICE 1: ENSAYOS DE COMPRESIÓN DIAMETRAL DE MUESTRAS DEL CAMINO PREHISPÁNICO - PUCP

Se llevó al Laboratorio de Materiales, en la sección de Ingeniería Mecánica muestras talladas esféricas del Camino Prehispánico-PUCP para ser ensayadas en compresión diametral.

- 6 esferas del Muro Sur/Parámetro Sur/Tramo 24-1



FIGURA 50: Esferas talladas de 20mm diámetro aproximadamente.

La velocidad de ensayo fue de 2N/s.

Se utilizó Capping de Asbesto de 1.5mm de espesor en la parte superior e inferior de la muestra, para aumentar el área de contacto entre la probeta y los platos de la máquina de compresión.



FIGURA 51: Detalle del Capping de asbesto de 1.5mm de espesor.



FIGURA 52: Detalle de la falla de las esferas ensayadas a compresión diametral

RESULTADOS:

TABLA N° 16: Resistencias últimas de probetas esféricas de Camino Prehispánico

MUESTRA	DIAMETRO (mm)	RESISTENCIA (kg)	Planos de falla
1	21.9	13.7	2
2	22.1	13.4	1.5
3	22.2	8.49	--
4	23.3	13.8	1.5
5	22.3	13.2	1.5
6	20.7	4.8	2



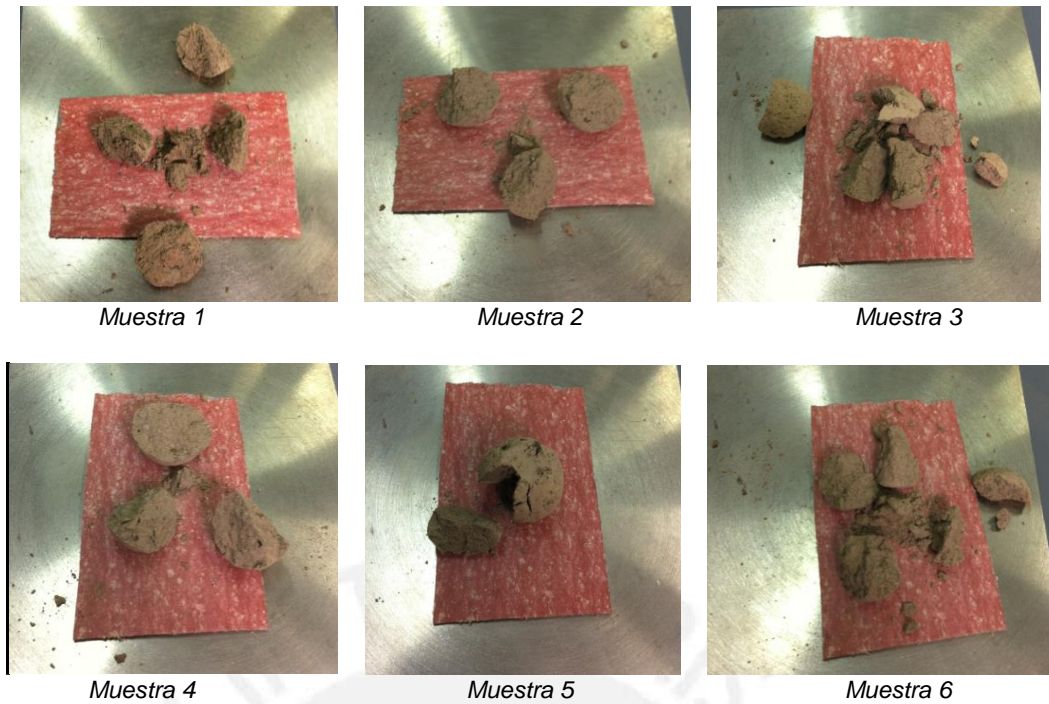


FIGURA 53: Probetas esféricas talladas ensayadas del camino prehispánico

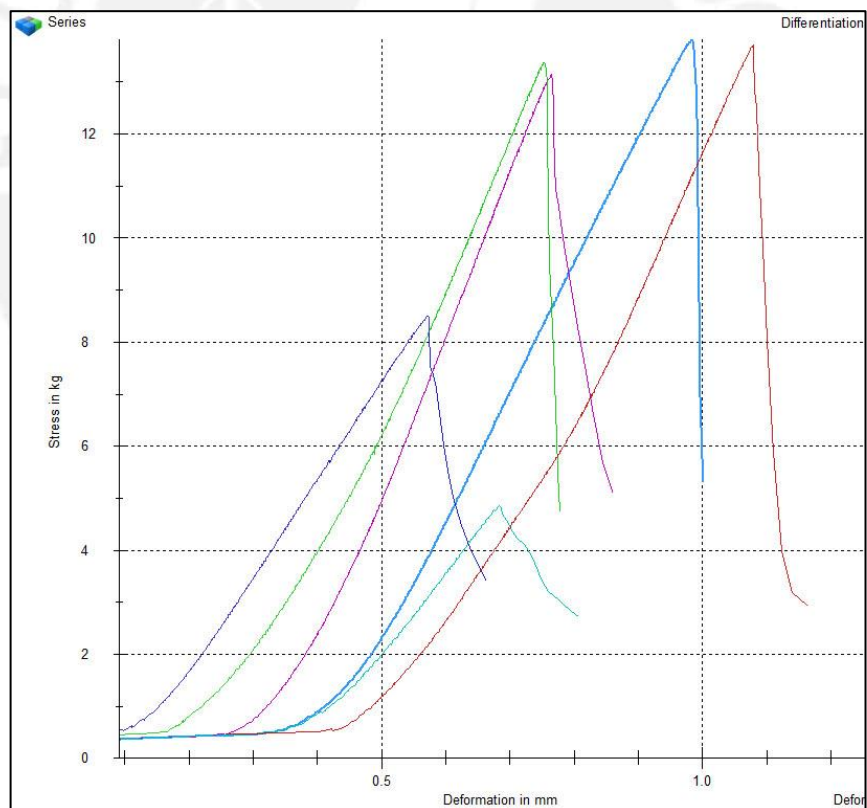


FIGURA 54: Diagrama Fuerza vs Deformación de las esferas talladas ensayadas a compresión diametral.

## APÉNDICE 2: ENSAYOS DE COMPRESIÓN DIAMETRAL EN MUESTRAS DE TIERRA PUCP CON AGREGADO DE PAJA.

Se llevó al Laboratorio de Materiales, en la sección de Ingeniería Mecánica muestras de tierra PUCP con paja para ser ensayadas en compresión diametral.

- 10 esferas del Muro Sur/Parámetro Sur/Tramo 24-1
- No se utilizó Capping en estos ensayos.
- La velocidad de ensayo fue de 2N/s.



FIGURA 55: Ensayo de esferas de tierra con paja.

### RESULTADOS:

TABLA N° 17: Resistencias últimas de probetas esféricas con agregado de paja

MUESTRA	DIAMETRO (cm)	RESISTENCIA (kg)	Planos de falla
1	2.2	18.4	2
2	2.4	17.3	2
3	2.3	23.5	2
4	2.6	20.3	1.5
5	2.4	19.4	2
6	2.6	18.9	1.5
7	2.5	24.2	2
8	2.4	19.9	2
9	2.4	18.8	2
10	2.5	18.6	2

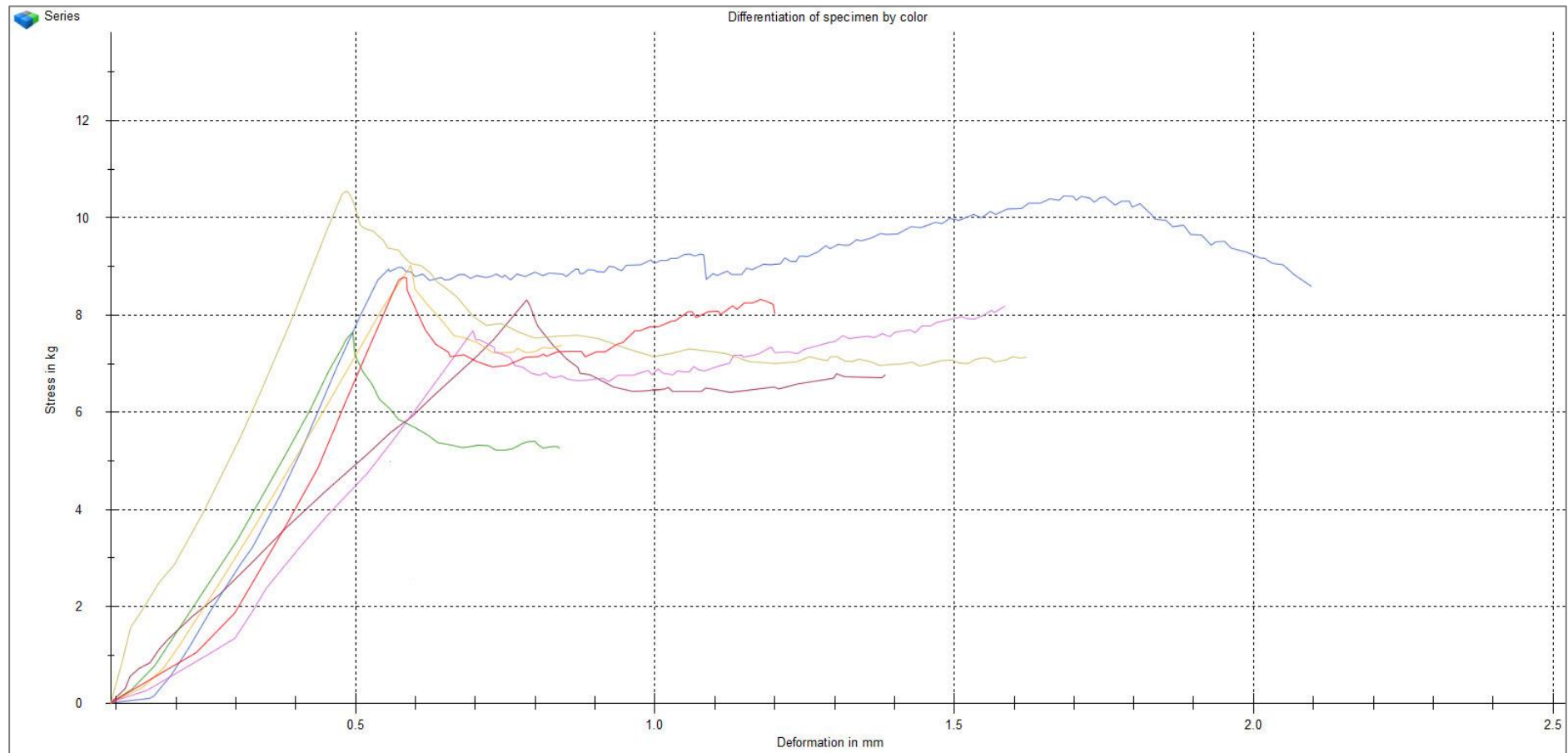


FIGURA 56: Diagrama Fuerza vs Deformación de las esferas con paja ensayadas a compresión diametral.