

FACTULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE TEJAS CARIBE CON
FINES DE NORMALIZACIÓN**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR

ALBIN ALFONZO

JORGE PANTIN

PROFESOR GUÍA

MSc. ING. GUILLERMO BONILLA

FECHA

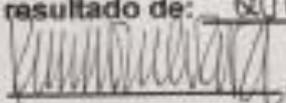
OCTUBRE DE 2019

FACTULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE TEJAS CARIBE CON
FINES DE NORMALIZACIÓN

Este jurado, una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su
contenido con el resultado de: 20 (Vente) puntos

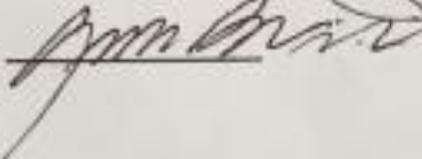
Ramón Guevara:



José Chitty:



Guillermo Bonilla:



TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL



REALIZADO POR

ALBIN ALFONZO
JORGE PANTIN

PROFESOR GUÍA

MSc. ING. GUILLERMO BONILLA

FECHA

OCTUBRE DE 2019

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Católica Andrés Bello, por haber permitido formarnos en una institución donde el éxito implica el desarrollo incesante del conocimiento y los valores a pesar de todas las dificultades.

A nuestros familiares, los pilares de nuestras vidas, por enseñarnos que la excelencia es el objetivo principal de cualquier actividad trascendente en la vida.

A todo el personal que trabaja en el Laboratorio de Tecnología de Concreto de la UCAB, especialmente a nuestro tutor, el ingeniero Guillermo Bonilla, por compartir la iniciativa de iniciar esta investigación y por su entusiasmo compartiendo sus conocimientos.

A la Alfarería Venezuela, en especial a su Presidenta, la Arquitecto María Luisa García, por haber donado la materia prima de nuestra investigación, las tejas.

A nuestros compañeros de estudio, amigos y todo aquel que fue un apoyo durante nuestra carrera universitaria, por haber formado un grupo excepcional, siempre buscando conseguir la excelencia.

SINOPSIS

Este Trabajo de Grado inicia una serie de estudios a ser desarrollados por el Laboratorio de Tecnología del Concreto de la UCAB, que tendrá como objetivo final generar el conocimiento para el desarrollo, ampliación e impulso de normas locales COVENIN referentes a las propiedades y parámetros que deben tener los materiales en estudio. En este sentido, el presente se encargará de iniciar las bases para indagar distintas formas de evaluación de un producto cuya calidad mecánica final es definida mediante el sonido agudo resultado de un impacto que es percibido auditivamente por un maestro experto.

Dentro de este contexto, existen muchos ensayos que se pueden hacer para evaluar las propiedades mecánicas de las tejas, pero este estudio será dedicado específicamente a cuatro (4) modalidades: 1- frecuencia sónica, 2- aceleración de masa, 3- ultrasonido y 4- ensayo a flexión. Fue evaluado la existencia de una relación entre las primeras tres (3) modalidades y la capacidad a rotura (cuarto ensayo). Debido a que los procesos de vitrificación pueden variar según cada teja es normal que estas adquieran diferentes formas, sus partículas tengan distinta cohesión o algunas tengan mayor compactación que otras, incluso siendo de la misma fábrica; Esto se puede traducir en mayor o menor resistencia.

¿El sonido y las vibraciones que producen las tejas cuando se les golpea tienen alguna relación con lo que estas resisten? ¿La velocidad de viaje de una onda sobre las tejas cuando se les aplica un pulso ultrasónico tiene relación con su resistencia? Estas son algunas de las preguntas que se contestaran en esta investigación.

Para la realización de los ensayos se hizo uso, en su mayoría, de equipos contruidos manualmente por nosotros mismos; en el caso del ensayo de ultrasonido, se utilizó el PUNDIT (Portable Ultrasonic Non destructive Digital Indicating Tester). La muestra de tejas a ensayar fue de 30, provenientes de distintas series de producción de la fábrica Alfarería Venezuela. Fueron obtenidas gráficas que permitieron relacionar los ensayos y establecer las respectivas conclusiones.

INDICE

CAPITULO I	1
EL PROBLEMA	1
1.1. Planteamiento de Problema	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Objetivo de la Investigación	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
1.4. Alcance y Limitaciones	3
CAPITULO II	4
MARCO TEORICO	4
2.1. Fundamentos Teóricos	4
2.1.1. Tejas Caribe.	4
2.1.2. Arcilla Cocida.....	4
2.1.3. Aceleración de Masa	5
2.1.4. Acelerómetro	5
2.1.5. Análisis de Frecuencia	5
2.1.6. Transformada Rápida de Fourier (FFT)	6
2.1.7. Teorema de Nyquist - Shannon.	7
2.1.8. Ensayo de frecuencia sónica	7
2.1.10. Ensayo No Destructivo.....	8
2.1.11. Ensayo de Ultrasonido.....	8
CAPITULO III	9
MARCO METODOLOGICO	9
3.1. Naturaleza de la Investigación	9
3.2. Población y Muestra	9
3.3. Recolección de Datos	10
3.4. Equipos utilizados.....	10
3.5. Accesorios empleados.....	10
3.6. Variables en el Análisis y Unidades de Trabajo	10
3.7. Constantes.	10
3.8. Propiedades y Características de los accesorios utilizados.	11
3.8.1. Tejas tipo Caribe.....	11

3.8.2. Sistema percutor.....	11
3.8.3. Equipo PUNDIT.	11
3.9. Fases de Ejecución.	12
3.9.1. Documentación y Planificación.	12
3.9.2. Elaboración de Equipos.	12
3.9.2.1. Equipo de soporte para el percutor.....	12
3.9.2.2. Equipo estabilizador para la colocación de cargas.....	13
3.9.3. Montaje equipo de carga.....	15
3.9.4. Ejecución de los ensayos.....	15
3.9.4.1. Ensayo de aceleración de masa y frecuencia sónica.....	15
3.9.4.2. Ensayo a Flexión 3 puntos.	18
3.9.4.3. Ensayo de Ultrasonido.....	19
CAPITULO IV	20
RESULTADOS Y ANÁLISIS	20
4.1. Carga última de rotura	21
4.2. Estudio sónico.	22
4.3. Aceleración.....	23
4.4. Ultrasonido.	25
CAPITULO V	27
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	27
5.1. Conclusiones	27
5.2. Recomendaciones	28
BIBLIOGRAFIA	29

INDICE DE TABLAS

Tabla III-1: Características de las muestras estudiadas	9
Tabla III-2: Variables	10
Tabla III-3: Constantes	10
Tabla III-4: Propiedades generales de las tejas tipo Caribe	11
Tabla III-5: Sistema percutor	11
Tabla III-6: Equipo PUNDIT	11
Tabla IV-1: Resultados estadísticos de los ensayos	20

INDICE DE FIGURAS

Figura II-1: Ejemplo de teja ensayada	4
Figura II-2: Transformada de Fourier	6
Figura II-3: Nivel de intensidad del sonido.....	7
Figura II-4: Ensayo de ultrasonido.....	8
Figura III-1: Fases de Ejecución.....	12
Figura III-2: Equipo sistema percutor	13
Figura III-3: Equipo estabilizador	14
Figura III-4: Soporte de madera	14
Figura III-5: Montaje de equipo de carga	15
Figura III-6: Dirección del golpe	16
Figura III-7: Onda en el dominio del tiempo	16
Figura III-8: Onda en el dominio de la frecuencia	17
Figura III-9: Onda en el dominio del período	17
Figura III-10: Comportamiento a flexión de tejas	18
Figura III-11: Material ensayado con posibilidad de reúso por sostenibilidad	18
Figura III-12: Realización de ensayo de ultrasonido	19
Figura IV-1: Histograma de frecuencia de la carga última	21
Figura IV-2: Histograma de frecuencia sónica.....	22
Figura IV-3: Carga última vs Frecuencia sónica	22
Figura IV-4: Histograma de frecuencia de aceleración en X.....	23
Figura IV-5: Histograma de frecuencia de aceleración en Y.....	23
Figura IV-6: Carga última vs Aceleración X.....	24
Figura IV-7: Carga última vs Aceleración Y.....	25
Figura IV-8: Histograma de frecuencia de velocidad de onda	25
Figura IV-9: Carga última vs Velocidad de onda	26
Figura V-1: Aceleración con 0 GL.....	28

CAPITULO I EL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del Problema

La generación de normas comenzaron en Venezuela con el Ministerio de Obras Públicas hacia la década de los treinta del siglo pasado; en gran parte influenciadas por la experiencia francesa; con el paso del tiempo, las normas relativas a diseño en construcción pasaron a tener como referencia la experiencia norteamericana con adecuaciones a nuestra realidad. En la actualidad se desea que las especificaciones de productos tengan un componente de investigación nacional. En este sentido, surge la necesidad de iniciar con las investigaciones locales pertinentes para el desarrollo de normas referentes a un material cerámico, en este caso tejas del tipo Caribe; producto de exportación a Estados Unidos e Islas del Caribe.

En las fábricas e industrias productoras de tejas en Venezuela, se tiene un estricto control sobre la materia prima, es decir, la arcilla; sus propiedades químicas y mineralógicas, sus componentes principales, entre otras. Sin embargo, el control de calidad del producto final está más relacionado con el espesor de las tejas, su densidad y, finalmente, el sonido agudo que emite la teja cuando un maestro experto le da un impacto y, a partir de este sonido, la persona es capaz de agrupar las tejas por lotes de venta y de desecho. No existe ninguna norma local en la que el “experto” pueda respaldar su decisión con unos parámetros ya establecidos. En este sentido, lo que se quiere con este estudio, es respaldar esas decisiones de una forma más técnica. Pero, para hacer una norma se requieren de numerosos estudios que repitan y refuercen esta investigación pionera; por lo tanto esta investigación es solo el comienzo de una serie de proyectos que formalizaran ese procedimiento realizado por la persona “experta”.

Son muchos los parámetros mecánicos que se pueden medir en una teja, pero dadas las dificultades para encontrar los materiales necesarios y los inconvenientes para usar los equipos, esta investigación se enfocara en cuatro (4) parámetros: sonido, aceleración de masa, ultrasonido y resistencia a flexión, los cuales se pueden medir y calcular utilizando aplicaciones celulares, equipo ultrasónico del cual se dispone en el Laboratorio y equipos construidos manualmente por nosotros, que a pesar de que no funcionaran con la misma exactitud y precisión de un equipo normado y diseñado con estos propósitos, si son capaces de reproducir y respetar las condiciones iniciales de los ensayos a realizar.

1.2. Antecedentes

Se tomaron en cuenta los siguientes estudios:

- MARIA ALMUDENA, GARCÍA GONZÁLEZ. (2011). *Análisis de las características físicas y del comportamiento mecánico de las tejas cerámicas curvas antiguas y su evolución en el tiempo*. Trabajo fin de Master, Universidad Politécnica de Madrid

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento de las tejas antiguas en comparación con las actuales frente a la helada y su resistencia a flexión, analizándose así mismo sus características físicas como la absorción, permeabilidad y el tiempo de saturación, estableciéndose la influencia que el liquen y el musgo tienen sobre las tejas que colonizan. Se ensayaron tejas de diferentes rangos de edad, evaluando su respuesta frente a las distintas variables. Se concluyó que las tejas antiguas, con el paso del tiempo, conservan o incluso mejoran sus características tanto físicas como mecánicas, pudiendo ser un material reutilizable.

- XAVIER GUERRA, ANDRÉS JARAMILLO. (2015). *Caracterización físicas, mecánica y térmica de materiales vernáculos de la región Sierra del Ecuador*. Proyecto de Grado, Escuela Politécnica Nacional de Ecuador.

En este proyecto se realizó la caracterización física, mecánica y térmica de materiales vernáculos (dentro de los cuales están incluidas tejas artesanales de tierra cocida) de algunas provincias del Ecuador, con las que se busca evaluar las siguientes propiedades: calor específico, conductividad térmica, densidad, resistencia a la compresión del adobe y resistencia a flexión de la teja. Los materiales vernáculos hacen referencia al uso de recursos naturales de fácil acceso en el medio ambiente cercano para así evitar impactos ambientales y fomentar el reciclaje. Como resultados de las tejas se obtuvo, en promedio, una densidad de 1759 kg/m^3 , resistencia a la flexión de 45.28 kgf, conductividad térmica de 0.82 W/m y calor específico de 806 J/kg.

- HUAYRA GABRIEL, JHAN CARLOS. (2013). *Técnicas de medición de las velocidades de onda para determinar las constantes elásticas dinámicas*. Estudio de la materia Mecánica de Rocas de la Universidad Nacional de Ingeniería del Perú.

Esta investigación se basa en el tratamiento de señales de ondas elásticas que recorren muestras de rocas, y el establecimiento de correlaciones experimentales entre la velocidad de las ondas y algunas propiedades físicas y mecánicas de estos materiales, con

el objeto de buscar relaciones matemáticas que expliquen en forma aproximada y sencilla el comportamiento de las rocas ante diferentes sollicitaciones a que sean sometidas; para este propósito se utilizó un software para transformar las señales registradas en el dominio del tiempo a otros dominios más efectivos como el de la frecuencia.

1.3. Objetivo de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

Caracterizar las propiedades mecánicas de tejas del tipo Caribe con fines de normalización.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Evaluar el comportamiento mecánico a flexión de tejas tipo Caribe provenientes de un distribuidor mediante ensayo 3 puntos
- Analizar incidencia de frecuencia sónica generada por impacto, con la capacidad a flexión de tejas tipo Caribe
- Analizar incidencia de la aceleración interna de masa generada por impacto, con la capacidad a flexión de tejas tipo Caribe
- Analizar incidencia de ultrasonido generado por el PUNDIT, con la capacidad a flexión de tejas tipo Caribe

1.4. Alcance y Limitaciones

Esta investigación sienta las bases del comportamiento mecánico vibratorio para establecer los fundamentos de una futura norma local. Se espera que sea solo la primera de una serie de varios estudios que intentarán formular esta norma, que sea independiente de normas extranjeras.

El estudio ejecutado fue desarrollado en 30 muestras de un mismo proveedor, para las cuales se indicara si existe una relación entre la resistencia a flexión de estas y los resultados de los ensayos de sonido, aceleración de masa y ultrasonido.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Fundamentos Teóricos

2.1.1. Tejas Caribe

También conocidas como “Tejas Romanas”, son tejas de arcilla cocidas (a una temperatura promedio de 960 grados Celsius) que tienen mayor masa y ocupan mayor volumen que una teja criolla (árabe); Gracias a esto tienen una resistencia promedio un poco mayor a las otras, por encima de los 120 Kg/cm². Al aumentar la temperatura de cocción, la vitrificación de la arcilla compacta las partículas, haciendo que la absorción de agua disminuya y su densidad aumente (y su resistencia).

Se caracterizan por tener la pieza canal plana, con los bordes laterales levantados y la cobija curva. Tienen aberturas laterales, que permiten “amarrarse” unas con otras, adquiriendo mayor peso y por lo tanto mayor seguridad ante fuertes vientos y sismos (son mayormente utilizadas en zonas sísmicas). Se pueden colocar hasta 11 unidades por cada m².

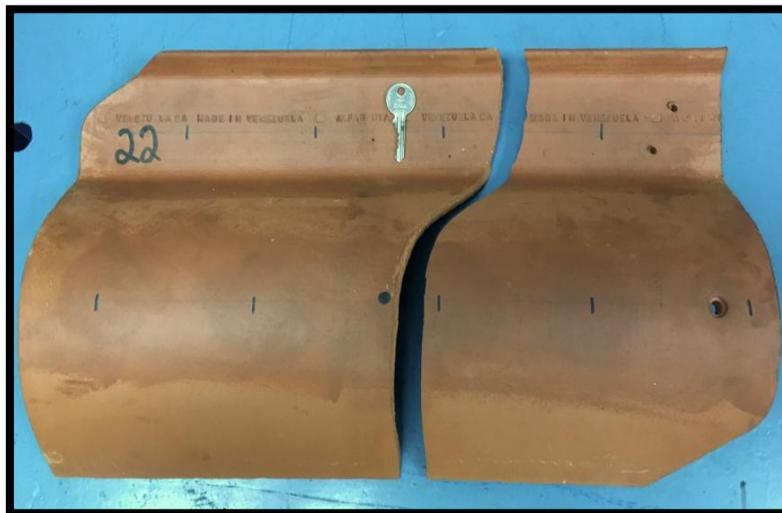


Figura II-1: Ejemplo de teja ensayada
Fuente: Laboratorio de Tecnología del Concreto UCAB

2.1.2. Arcilla Cocida

Corresponde a la materia prima común empleada por la industria ladrillera para la fabricación de sus productos y para materiales de alfarería, debido a su alta durabilidad y

bajo costo. Además, tiene alta plasticidad lo que permite un fácil conformado de las piezas. Una de las características más importantes a evaluar en las arcillas es la composición química y mineralógica, dado que ella influye directamente en las propiedades de los cerámicos obtenidos. Así, una arcilla proveniente de una región puede poseer ciertos minerales (óxido de hierro, feldespato, sílice) en concentraciones y con propiedades distintas a una arcilla de otro sitio. (García Verduch A, 1985).

2.1.3. Aceleración de Masa

De forma sencilla, una vibración se puede considerar como la oscilación o movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición equilibrio. La posición de equilibrio es a la que se llegara cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Esta vibración es causada por una fuerza de excitación que se aplica externamente al objeto o puede tener origen dentro de este. La magnitud y la frecuencia de la vibración vienen determinados por esta fuerza. El movimiento vibratorio de un cuerpo se describe completamente como la combinación de movimientos individuales en las tres (3) direcciones ortogonales X, Y y Z. (White G, 1990).

2.1.4. Acelerómetro

Los acelerómetros son dispositivos para medir vibración convirtiendo la aceleración de la gravedad o de movimiento en una señal eléctrica analógica proporcional a la fuerza aplicada al sistema, o mecanismo sometido a vibración o aceleración. Esta señal analógica indica en tiempo real la aceleración instantánea del objeto sobre el cual el acelerómetro está montado.

Para esta investigación, en la medición de la aceleración se hizo uso del teléfono móvil, utilizando la aplicación "Vibration". Esta cuenta con un acelerómetro interno con una sensibilidad de 0.02 g y un rango de +/- 2 g. Tiene la capacidad de medir aceleraciones en el dominio del tiempo y de realizar un análisis de frecuencia de datos aplicando la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Debido a las limitaciones de la tecnología Apple, la aplicación permite utilizar frecuencias de muestreo máximo hasta 100 Hz, midiendo movimientos de hasta frecuencias de 50 Hz (equivalente a 3000 rpm).

2.1.5. Análisis de Frecuencia

También llamado análisis espectral de señales digitales, tiene por objeto la descomposición de dicha señal en sus diversas componentes dentro del dominio

frecuencial. La idea fundamental es encontrar la relación existente entre la frecuencia discreta de los componentes presentes en el espectro y la frecuencia de las fuerzas dinámicas que generan las vibraciones.

Los estudios en el dominio del tiempo se encuentran con el problema de que en dos dimensiones no existe una única definición de distancia, por lo que el fenómeno del retardo y la ordenación de éste provocan una complejidad muy elevada. Es por esto que para estudiar señales correctamente se debe hacer la transformación digital de estas, desde el dominio del tiempo hasta el dominio de frecuencias; esto se realiza con Fourier.

2.1.6. Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A causa de su rapidez, es el algoritmo computacional más adecuado para llevar a cabo un análisis espectral. Permite calcular la Transformada Discreta de Fourier (DFT) y su inversa. El comportamiento de la DFT implica la actuación de un conjunto de filtros de paso de banda que separan la señal en varias componentes frecuenciales. La mayoría de los analizadores de FFT permiten la transformación de 512, 1024, 2048 o 4096 muestras. El rango de frecuencias cubierto por el análisis FFT depende de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo.

Lo que permite este algoritmo, empleando el principio de la serie de Fourier, es la descomposición de la señal a tratar (función sinusoidal periódica) en una suma infinita de señales más simples que juntas conforman la transformada de nivel superior.

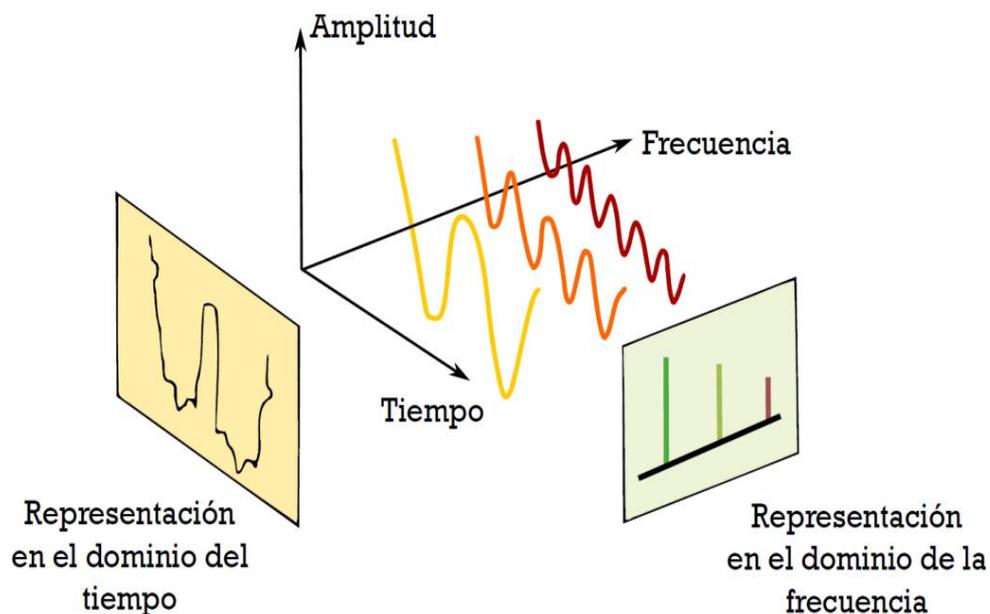


Figura II-2: Transformada de Fourier
Fuente: Esopo

2.1.7. Teorema de Nyquist – Shannon

Mientras mayor sea la frecuencia de muestreo (FS) de la señal mayor será la exactitud con la que se almacena la información y la reconstrucción de esta. Pero, frecuencias altas producen gran cantidad de muestras para almacenar, por lo que se hace necesario convertir la señal muy rápidamente. Por lo tanto, surge la pregunta: ¿Cuál es la frecuencia de muestreo mínima necesaria en una señal específica, para que la información siendo tomada no se distorsione y permita su reconstrucción precisa?

Aquí es donde entra el Teorema de Nyquist-Shannon el cual dice que “La mínima frecuencia de muestreo de una señal que no distorsionara la información tomada debería ser el doble de la frecuencia siendo medida”. En nuestro caso, se escogió una frecuencia de muestreo de 100 Hz, por lo que la frecuencia medida llega hasta 50 Hz.

2.1.8. Ensayo de sonido

Cuando se impacta una teja esta produce un sonido agudo que es utilizado por los expertos para realizar el control de calidad de estas en las fábricas. El objetivo es medir la intensidad de sonido (dB) que se produce en el impacto y ver como este se relaciona con la calidad mecánica de las tejas. En forma de comparación y para tener una idea, se presentará una figura que establece los niveles de sonido (decibeles) para ciertas situaciones de la vida diaria.

Nivel de intensidad del sonido	
200dB	Bomba atómica similar a Hiroshima y Nagasaki
180 dB	Explosión del Volcán Krakatoa. Cohete en despegue
140 dB	Umbral del dolor
136.6 dB	Récord Guinness de ruido en un estadio
130 dB	Avión en despegue
120 dB	Motor de avión en marcha
110 dB	Concierto / acto cívico
100 dB	Perforadora eléctrica
90 dB	Tráfico / Pelea de dos personas
80 dB	Tren
70 dB	Aspiradora
50/60 dB	Aglomeración de gente / Lavaplatos
40 dB	Conversación
20 dB	Biblioteca
10 dB	Respiración tranquila
0 dB	Umbral de audición

Figura II-3: Nivel de intensidad del sonido
Fuente: Presuztati.cf

2.1.8. Ensayo No Destructivo

Se denomina ensayo no destructivo (NDT), a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales; implican un daño imperceptible en la muestra examinada.

2.1.11. Ensayo de ultrasonido

Un pulso de ondas longitudinales de estrés ultrasónicas (mayores a 20 KHz, es decir, superior al umbral máximo de audición humana) es enviado por la superficie del material a medir mediante un transductor acoplado a esta superficie con un gel, grasa o vaselina. Este pulso es recibido por un transductor similar a una cierta distancia. Midiendo el tiempo que tarda el pulso en recorrer la distancia entre los dos (2) transductores se puede obtener la velocidad de este.

La velocidad con que impulsos de ultrasonido viajan a través de un material sólido depende de la densidad y de las propiedades elásticas de ese material. La calidad de ciertos materiales a veces está relacionada a su rigidez elástica, es por eso que la medición de la velocidad de un impulso de ultrasonido en ciertos materiales puede ser usada para indicar la calidad del mismo, así como para determinar sus propiedades elásticas.

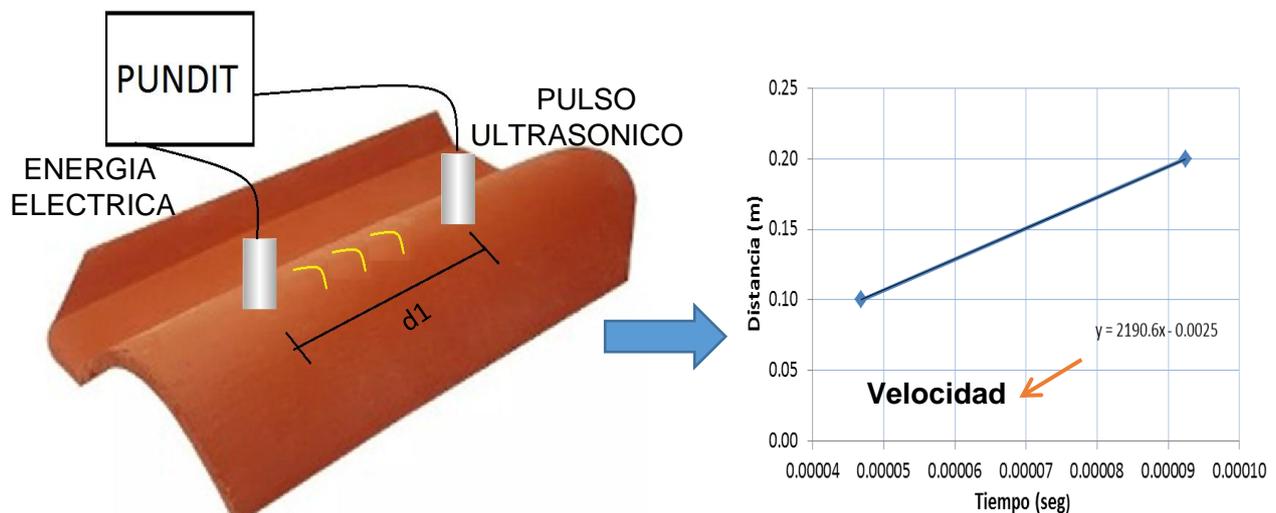


Figura II-4: Ensayo de ultrasonido
Fuente: Elaboración propia

CAPITULO III

MARCO METODOLOGICO

3.1. Naturaleza de la Investigación

La investigación fue de tipo experimental de campo, descriptiva y exploratoria, en la cual fueron analizadas distintas propiedades mecánicas de las tejas tipo Caribe.

3.2. Población y Muestra

Un total de 30 tejas tipo Caribe, conforman la población principal de la investigación. Además, fueron utilizadas 10 tejas para calibrar los equipos a utilizar.

A continuación se muestran las características principales de la población estudiada. Todas aquellas tablas y figuras para las cuales no se indique la fuente, son de elaboración propia.

	Masa (Kg)	Vol (Litros)
Teja 1	2.76	1.28
Teja 2	2.80	1.33
Teja 3	2.78	1.23
Teja 4	2.82	1.31
Teja 5	2.79	1.30
Teja 6	2.82	1.32
Teja 7	2.81	1.30
Teja 8	2.79	1.25
Teja 9	2.80	1.31
Teja 10	2.82	1.29
Teja 11	2.75	1.19
Teja 12	2.83	1.33
Teja 13	2.83	1.30
Teja 14	2.77	1.27
Teja 15	2.77	1.31
Teja 16	2.81	1.28
Teja 17	2.80	1.16
Teja 18	2.83	1.32
Teja 19	2.82	1.26
Teja 20	2.81	1.28
Teja 21	2.81	1.28
Teja 22	2.82	1.29
Teja 23	2.83	1.33
Teja 24	2.82	1.27
Teja 25	2.82	1.20
Teja 26	2.81	1.30
Teja 27	2.77	1.24
Teja 28	2.76	1.25
Teja 29	2.82	1.23
Teja 30	2.78	1.30
Promedio	2.80	1.28
Desv Estan	0.023	0.043
Coef Varia	0.836	3.348

Tabla III-1: Características de las muestras estudiadas

3.3. Recolección de Datos

La recolección de datos se hizo de manera distinta para cada ensayo y manejados a través de hojas de cálculo. En los ensayos de frecuencia sónica y aceleración fueron captados mediante aplicaciones del celular. Para el ensayo de ultrasonido y la resistencia a flexión fueron utilizados equipos de videograbación; las deflexiones mediante el uso de comparadores.

3.4. Equipos Utilizados

- Equipo estabilizador para la colocación de cargas
- Equipo de soporte para el percutor
- PUNDIT, equipo de ultrasonido del Laboratorio de Tecnología del Concreto UCAB

3.5. Accesorios Empleados

- Comparador tipo carátula
- Cámaras Digitales
- Soportes de madera para el equipo estabilizador en el ensayo a flexión
- Percutor

3.6. Variables en el Análisis y Unidades de Trabajo

	Masa teja (kg)	Volumen teja (l)	Aceleración (m/s ²)	Decibeles (dB)	Velocidad de onda (m/s)	Carga ultima (kgf)	Deflexión (mm)
Independiente	X	X					
Dependiente			X	X	X	X	X

Tabla III-2: Variables

3.7. Constantes

Separación de transductores	Frecuencia de transductores	Rata de aplicación de carga	Temperatura
cm	KHz	seg	°C

Tabla III-3: Constantes

3.8. Propiedades y características de los accesorios utilizados

3.8.1. Tejas tipo Caribe

Absorción	6 – 10 %
Resistencia a la flexión	> 120 kg/cm ²
Temperatura de cocción promedio	960 grados Celsius
Masa (kg)	2.6 – 3.2
Tolerancia dimensional	+/- 3 %

Tabla III-4: Propiedades generales de las tejas tipo Caribe
Fuente: Grupo AlfaSur

3.8.2. Sistema percutor

Material del percutor	Metal
Masa del percutor	38.95 gr
Longitud del percutor	21 cm
Constante de rigidez del resorte 1	239.05 N/m
Constante de rigidez del resorte 2	229.18 N/m
Constante de rigidez en serie	118.21 N/m

Tabla III-5: Propiedades y Características del sistema percutor

3.8.3. Equipo PUNDIT

Frecuencia de los transductores	54 KHz
Diámetro de los transductores	5 cm

Tabla III-6: Características de funcionamiento equipo PUNDIT
Fuente: C.N.S. Electronics Ltd.

3.9. Fases de Ejecución

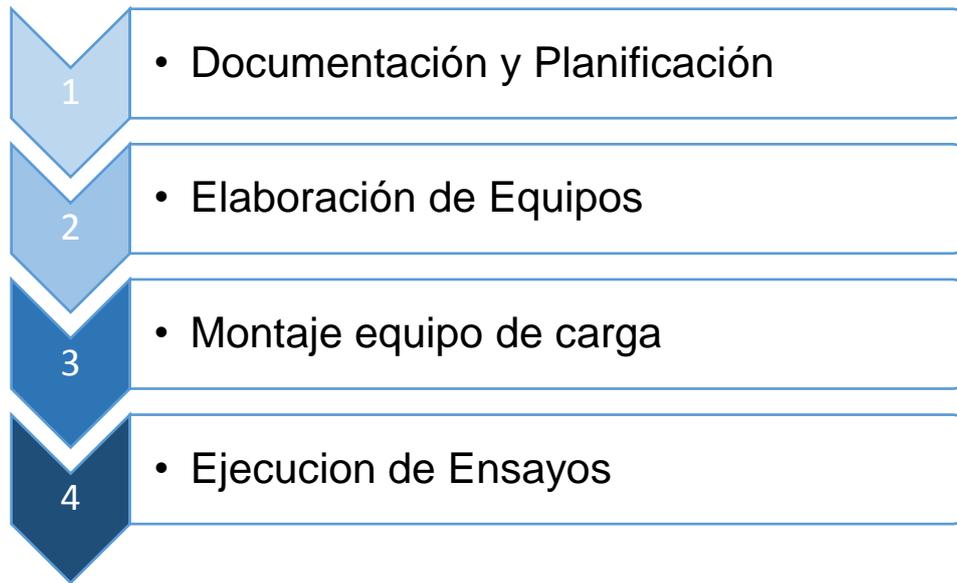


Figura III-1: Fases de Ejecución

3.9.1. Documentación y Planificación

En esta fase se procedió a investigar sobre la teoría detrás de los objetivos establecidos; ensayos no destructivos, incluyendo aceleración de masa de cuerpos en reposo, técnicas de medición de pulsos ultrasónicos y propiedades mecánicas de tejas curvas (conceptos utilizados para la realización del marco teórico). Esto con la finalidad de establecer los alcances, limitaciones y las variables a analizar en la investigación en estudio. Toda documentación digital que no tenga expresada su fuente, es de elaboración propia.

3.9.2. Elaboración de Equipos

3.9.2.1. Equipo de soporte para el percutor

Luego de varios intentos fallidos por conseguir el sistema que nos funcionara adecuadamente, fue elaborado el equipo mostrado con materiales reciclables provenientes del taller de Jorge Pantin en Valencia. El sistema de soporte se corresponde con un banco de metal utilizado para montar objetos, el cual fue reacomodado para servir a nuestros propósitos. En la parte inferior, se ajustó el percutor con un sistema sencillo de tuercas en el sitio exacto de golpeo.

En referencia al percutor, este consta de un tubo de PVC que sirve como cascarón protector para un tubo de aluminio que junto con 2 resortes forman el sistema percutor. Se colocó un gatillo que sirve para asegurar que el golpe tenga aproximadamente la misma fuerza en cada ensayo.

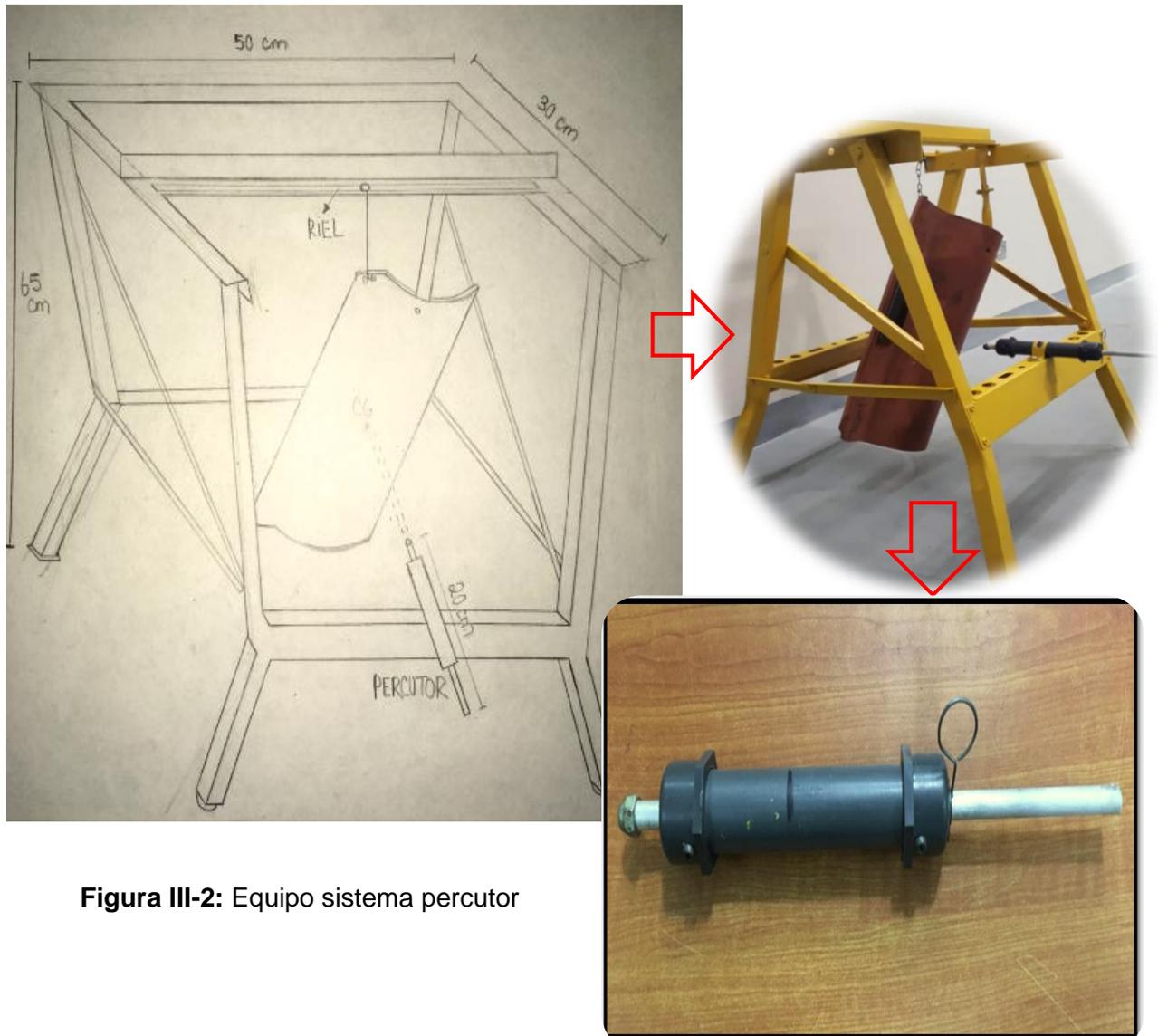


Figura III-2: Equipo sistema percutor

3.9.2.2. Equipo estabilizador para la colocación de cargas

Este equipo fue desarrollado en un taller de Caracas y consta de un soporte metálico rectangular al cual, con tornillos, se le ajusto los dos soportes laterales de madera. También, se soldaron 4 tubos circulares de acero que servirán como guía para un segundo soporte de metal de idénticas dimensiones. A este segundo soporte se le soldó 4 tubos huecos que deslizan por las guías quedando bien ajustada la teja a la hora del ensayo.

Los soportes de madera (3) son de idénticas dimensiones. Para asegurar un buen acople entre las tejas y los soportes y cumplir con los requerimientos de la norma, se colocaron tres (3) tiras de goma (goma espuma) de seis (6) mm de espesor.

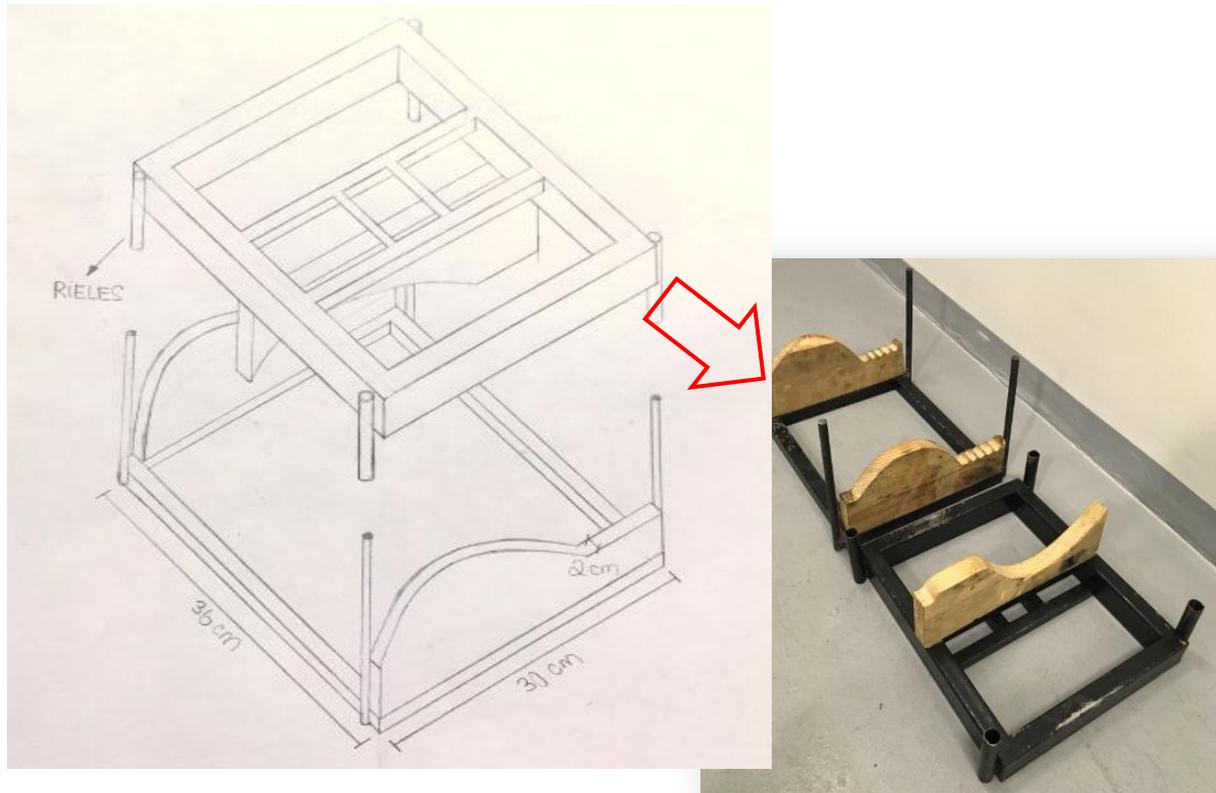


Figura III-3: Equipo estabilizador

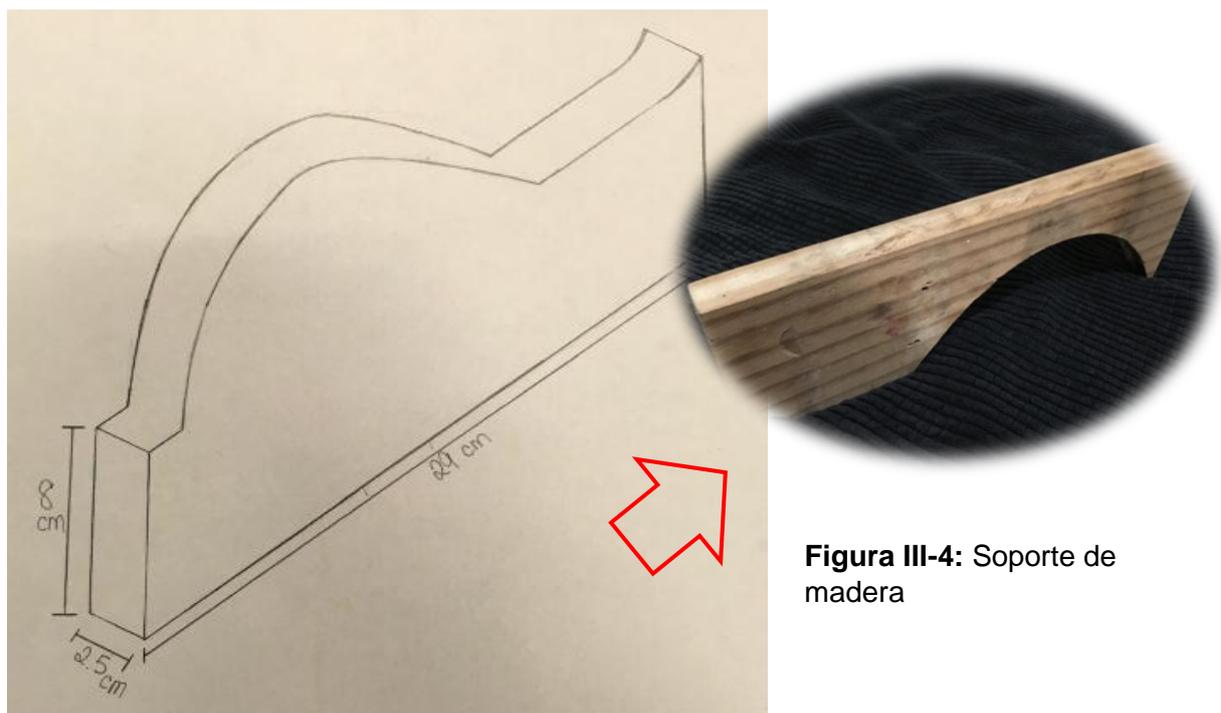


Figura III-4: Soporte de madera

3.9.3. Montaje equipo de carga

Luego de elaborar los equipos, se prepararon para realizar los ensayos. En el sistema percutor es importante la posición del celular para la captación de las aceleraciones y de la frecuencia sónica. Igualmente, para el ensayo 3 puntos, se debe asegurar la perpendicularidad del comparador respecto al punto de medición sobre la teja.

El equipo de carga se colocó sobre un lugar elevado para colocar el comparador debajo del centro de gravedad y medir la máxima deflexión.



Figura III-5: Montaje de equipo de carga

3.9.4. Ejecución de los ensayos

Una vez listo el montaje de los equipos, se procedió a realizar los ensayos, los cuales se explicaran gráficamente a continuación:

3.9.4.1. Ensayo de aceleración y frecuencia sónica

En la calibración de las aplicaciones de celular, sobre todo para la aplicación que mide aceleración, era necesario e importante identificar la dirección del golpe y relacionarla

con los ejes de aceleración X, Y y Z del celular. Como se ve en la figura, la dirección del golpe coincide con la dirección Z de medición del celular.



Figura III-6: Dirección del golpe

Cuando se impacta un objeto, este produce vibraciones. Cuando vemos una onda o señal, lo normal es verla en el dominio del tiempo.

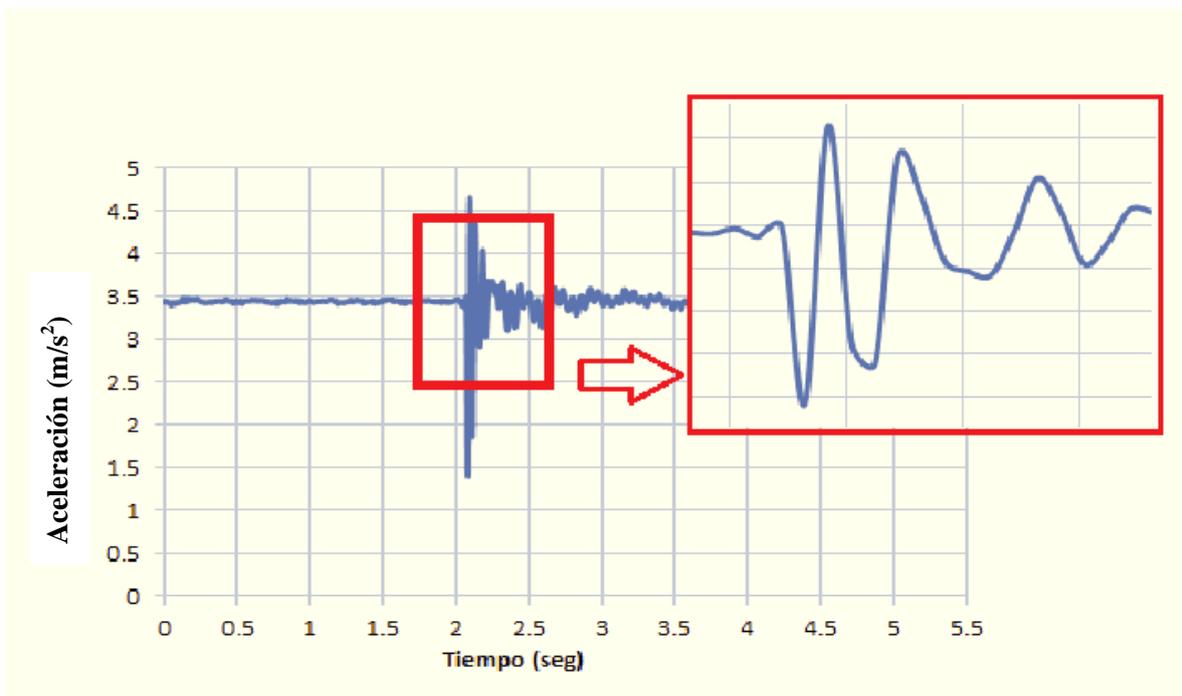


Figura III-7: Onda en el dominio del tiempo

En el dominio del tiempo se ve como una señal varía en su amplitud, pero la información no nos da otra información relevante y está muy distorsionada. Si se quiere obtener mayor información de la onda existe el botón FFT (Transformada Rápida de Fourier) el cual transforma ese tiempo en frecuencias. Así, el dominio de frecuencia nos indica cuán de frecuentes son esas variaciones de señal.

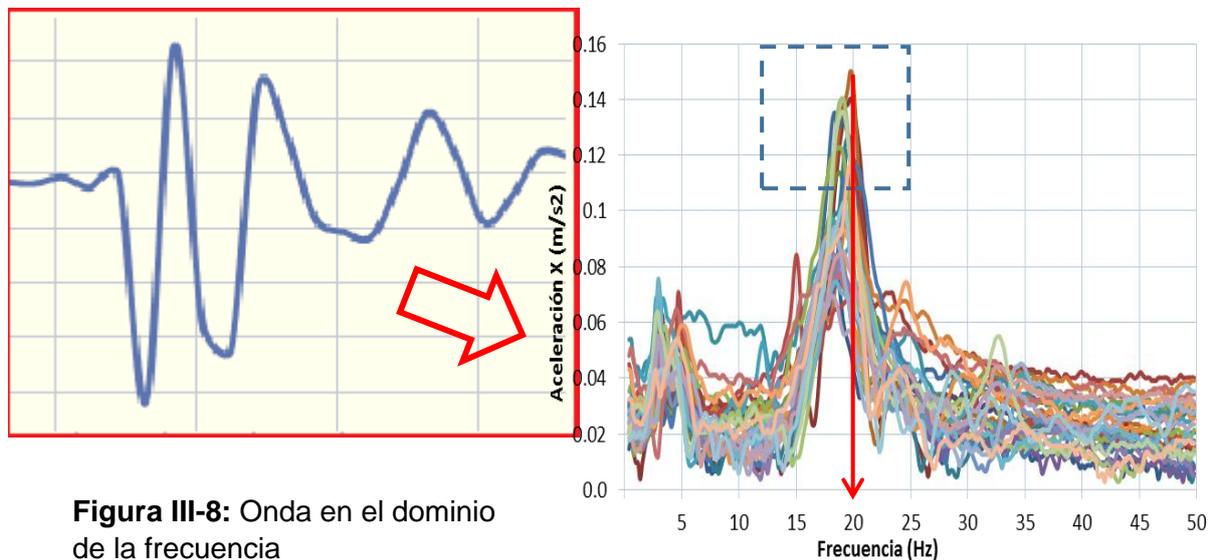


Figura III-8: Onda en el dominio de la frecuencia

Esta repetición de las variaciones de la señal se da porque cualquier señal es la suma de ondas sinusoidales con una amplitud y una fase determinada. De manera que con la FFT se transforma la señal en esta serie de sinusoidales que se suman cada una con su amplitud y fase y se obtienen agrupaciones de frecuencias.

Adicionalmente, del dominio del tiempo, con los intervalos de tiempo y el número de ciclos de la onda en el momento del impacto, se puede ver la señal en el dominio del período.

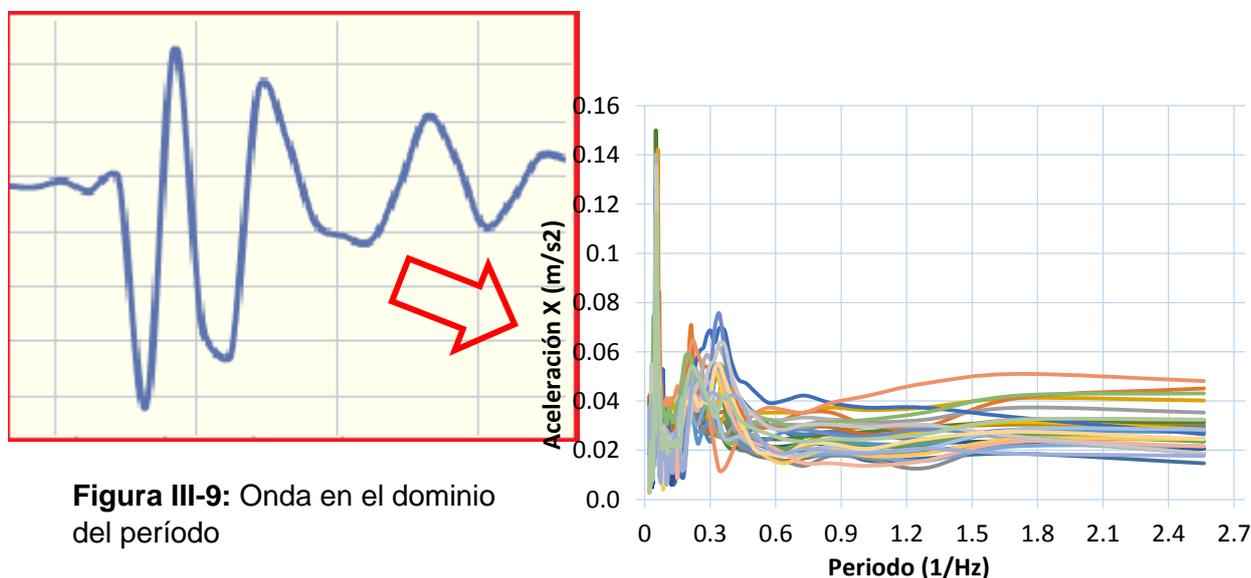


Figura III-9: Onda en el dominio del período

3.9.4.2. Ensayo a Flexión 3 puntos

Los ensayos a flexión son normalmente utilizados para obtener la carga ultima de rotura del material ensayado y su comportamiento Tensión – Deflexión. En el caso de las tejas curva y otros cerámicos, su comportamiento es muy frágil. Este comportamiento se explicara a continuación con el siguiente gráfico:



Módulo de Rotura - Cerámicos

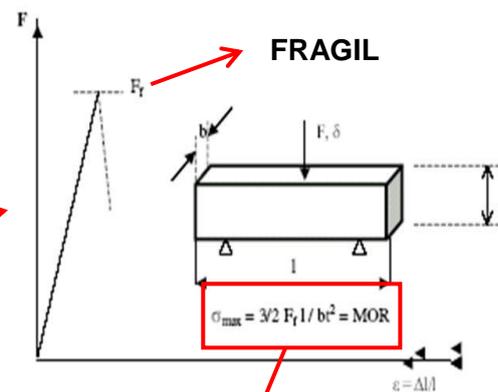


Fig 7 El Módulo de Ruptura MOR es la tensión superficial en el momento de la falla en flexión. Es igual a, o levemente superior, a la tensión de falla en tracción.

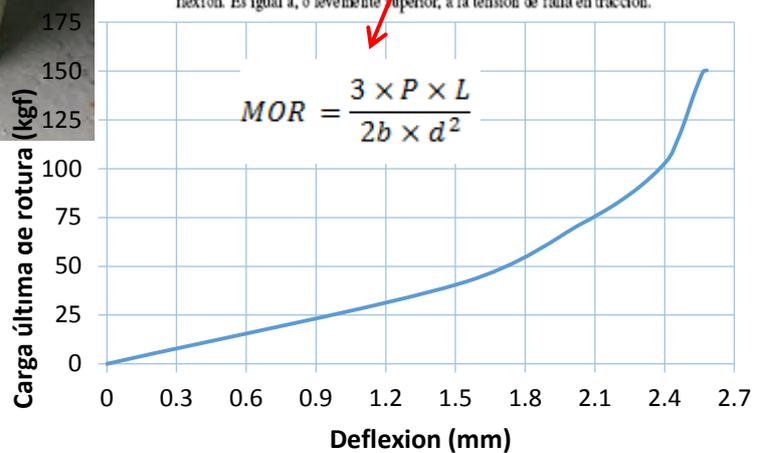


Figura III-10: Comportamiento a flexión de tejas



Según la ASTM C1167 – 03, norma imperante en el mercado interesado, cualquier teja curva debe tener una resistencia mínima a flexión de 100 kgf.

Figura III-11: Material ensayado con posibilidad de reúso por sostenibilidad

3.9.4.3. Ensayo de Ultrasonido

Los ensayos de ultrasonido con el PUNDIT se vienen usando desde hace muchos años con el concreto para detectar grietas y fallas que puedan existir en losas, vigas, columnas, etc. No es el caso con las tejas, por lo que este ensayo fue exploratorio, con el objetivo de iniciar una rama de investigación en este aspecto.

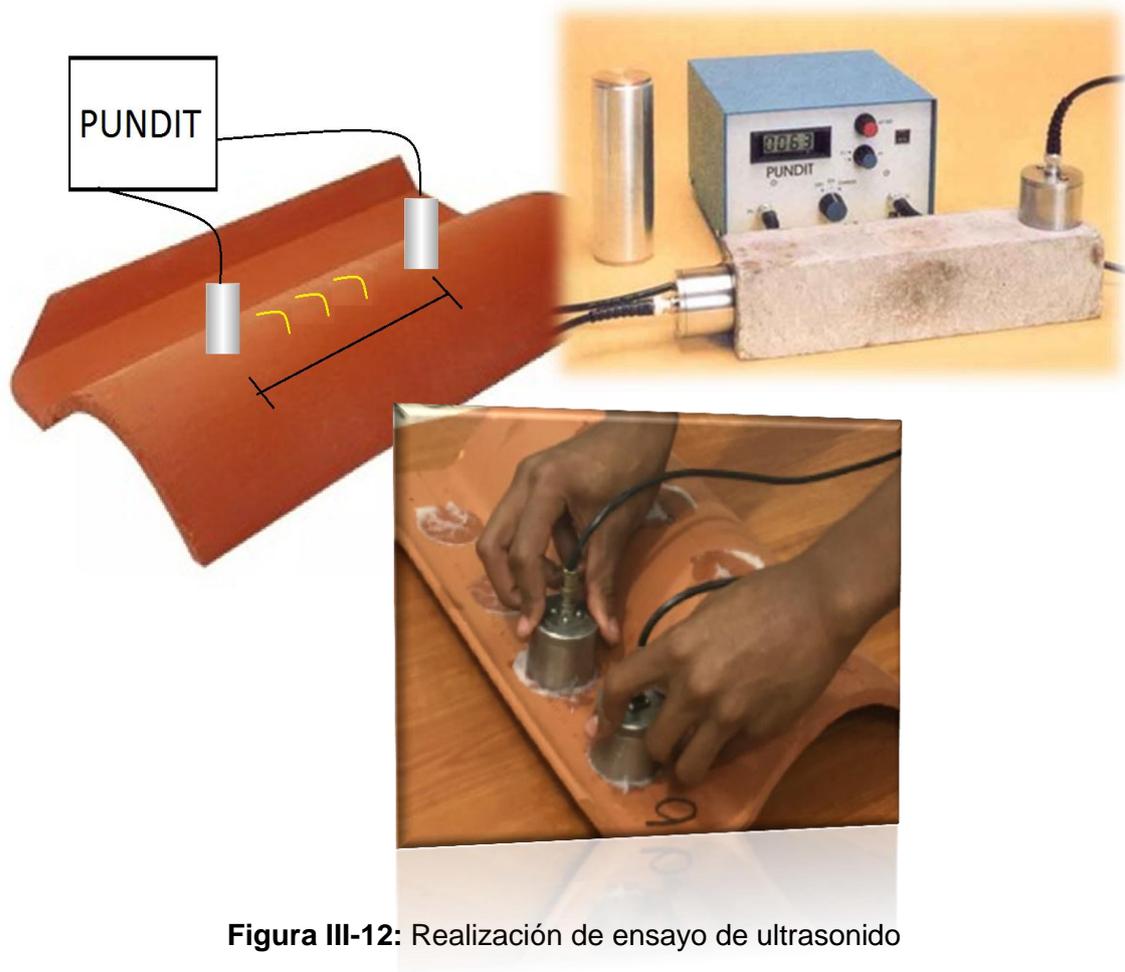


Figura III-12: Realización de ensayo de ultrasonido

Se hicieron mediciones indirectas tanto en la parte plana como en la parte curva de las tejas. Estas se realizaron para una distancia entre transductores en la primera mitad de la teja de 10 cm y luego otra de 20 cm. Se repitió este mismo procedimiento para la segunda mitad de la teja y luego se hizo un promedio entre los tiempos obtenidos.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANALISIS

Se muestran los análisis de cada ensayo y luego las relaciones que fueron encontradas entre las distintas variables correspondientes a los objetivos propuestos. Para el análisis de cada variable fueron realizados histogramas que muestran la frecuencia de estas y sus tendencias, pudiendo establecer un promedio entre los resultados. En referencia a las relaciones, se mostraran gráficos de dispersión que permiten ver las tendencias con altos índices de exactitud (R cuadrado alto). Todas las figuras mostradas a continuación son de elaboración propia.

En la siguiente tabla fueron presentados los resultados estadísticos: promedio, mínimo, máximo, desviación y coeficiente de variación de todos los objetivos. Se puede ver que la mayoría de casos el coeficiente de variación es bajo, exceptuando el caso de deflexión y carga última; esto debido a el método de carga, en el cual se obtienen pocos puntos para reproducir la curva Tensión – Deflexión (sin embargo, es normal que exista variación ya que las prueba se hicieron a lotes de tejas distintos; no se busca conocer la calidad del lote sino el comportamiento del mercado).

Se descartó el eje Z de aceleración, debido a la alta dispersión de datos existente en ese eje: la teja es guindada con 3 grados de libertad de movimiento; al impactar el percutor la teja permanece oscilando en dirección del golpe (Z), produciéndose las aceleraciones extra.

		Promedio	Mínimo	Máximo	Desv Estan	Coef Varia
	Sonido (dB)	97.68	95.80	99.40	1.07	1.09
Aceleración en el Dominio del Tiempo	X (m/s ²)	0.456	0.386	0.570	0.038	8.398
	Y (m/s ²)	-1.048	-1.166	-0.801	0.057	-5.444
Aceleración en el Dominio de la Frecuencia	X (m/s ²)	0.086	0.070	0.105	0.009	10.361
	Y (m/s ²)	0.120	0.104	0.140	0.009	7.094
	Vel de Onda Curva (m/s)	2322.2	2085.0	2528.0	116.00	5.00
	Densidad (Kg/m ³)	2180.7	2110.9	2292.4	48.21	2.21
	Capacidad (Kgf)	150	124	199	18.98	12.65
	Deflexión Max. (mm)	2.57	1.68	3.48	0.47	18.10
	Masa (Kg)	2.80	2.75	2.83	0.02	0.79

Tabla IV-1: Resultados estadísticos de los ensayos

Para el análisis final de los datos, se establecieron intervalos de confianza dentro de los cuales se encuentra cada valor. Se obtienen la media y la desviación estándar de los datos analizados y los límites superior e inferior del intervalo. Luego de definir los intervalos se filtraron aquellos valores que quedaran fuera, de manera de obtener mayor confiabilidad y menor dispersión en los datos. Finalmente, los resultados serán referenciales, ya que no se mostrarán todas las curvas generadas por cuestión de espacio.

Primeramente, se colocarán los resultados de carga última, seguido de los de frecuencia sónica, aceleración, finalizando con los de velocidad de onda (ultrasonido).

4.1. Carga última de rotura

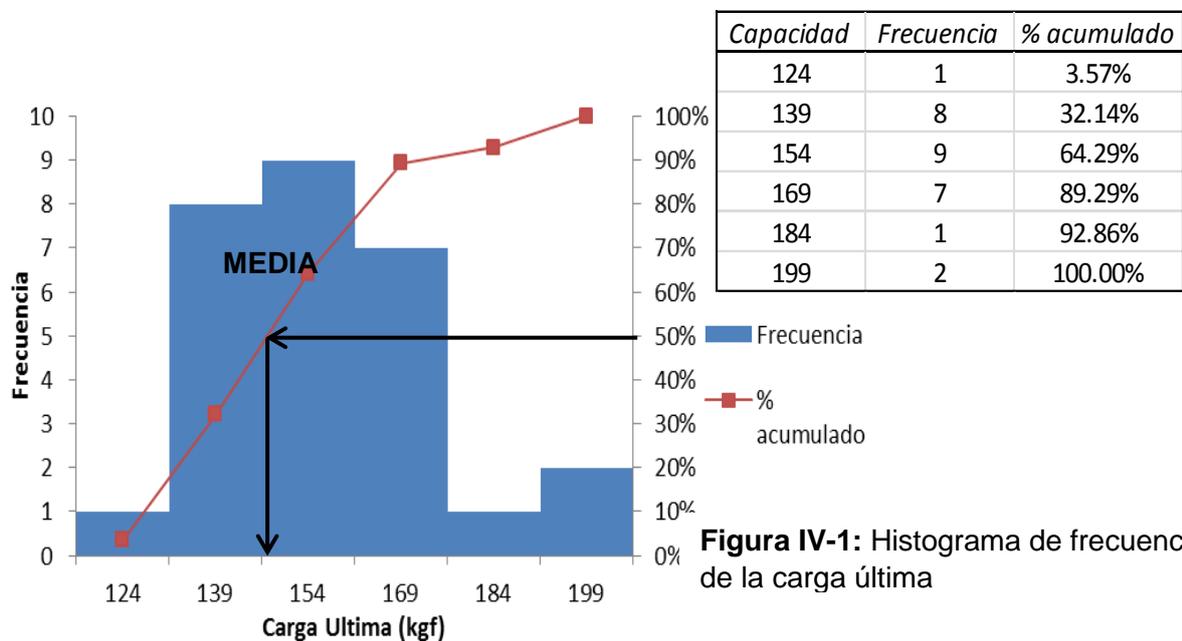


Figura IV-1: Histograma de frecuencia de la carga última

En la figura IV-1 se puede observar que la gran mayoría de las tejas tienen una resistencia que va desde los 124 hasta los 169 kgf, con una media de 150 kgf en un rango de 45 kgf; cumpliendo así con la norma de la resistencia mínima. Aquellos valores que están fuera de este rango, pueden ser tejas que presentan algún defecto de fabricación, como por ejemplo tiempo cocción, vitrificación, entre otras, o simplemente errores humanos en la realización de los ensayos.

Como se dijo anteriormente, a partir de ahora, para los gráficos de dispersión, se mostrarán los tres (3) intervalos, bajo, medio y alto (el cual siempre estará a la derecha solitario) y se analizará únicamente el de mayor R^2 y mayor muestra de tejas.

4.2. Estudio sónico

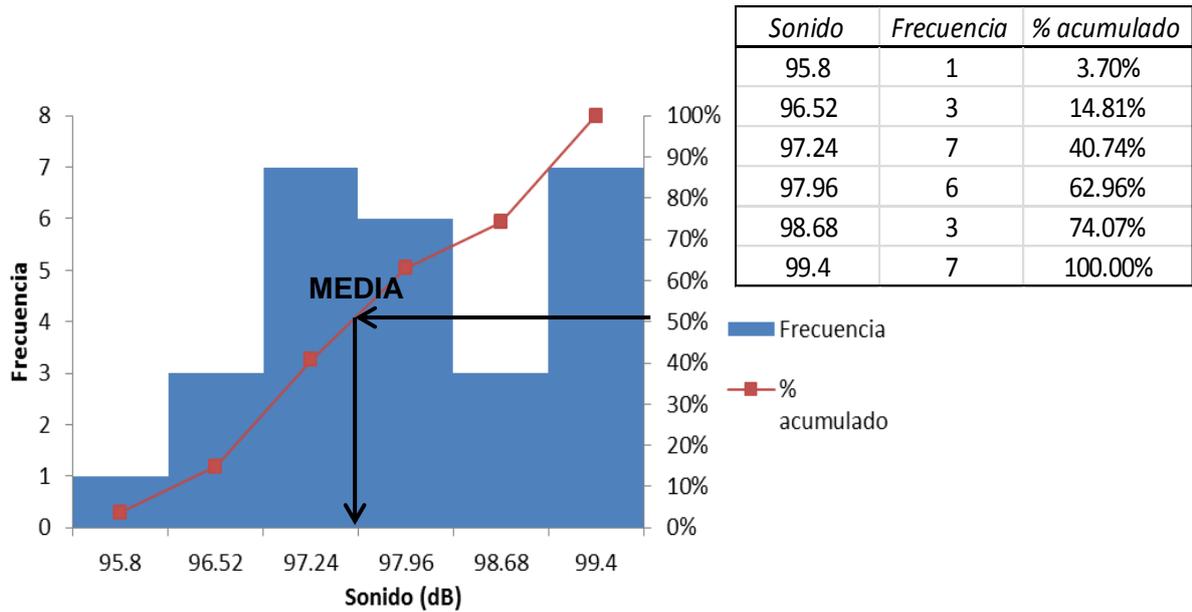


Figura IV-2: Histograma de frecuencia sónica

De la figura IV-2 se puede observar que existen 2 modas principales de dB emitidos, en la primera entre 96.52 y 97.97 se encuentra la media (97.68 dB) y luego una moda entre 98.68 y 99.4 dB; es curioso que estas dos (2) modas no pertenezcan a intervalos consecutivos, podría deberse a que son lotes distintos. En el primer intervalo (valores menores a 96 dB), solo existe una teja, por lo que es seguro decir que este valor es atípico y se debe a un error científico.

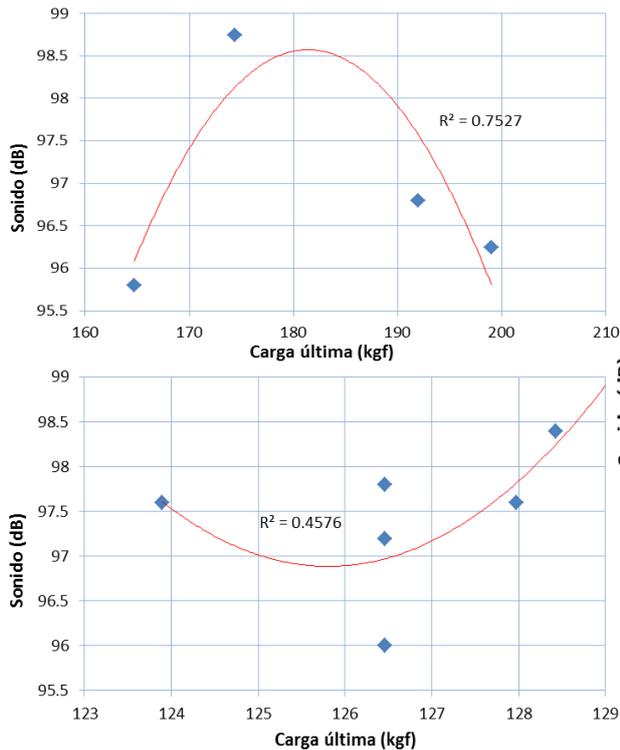
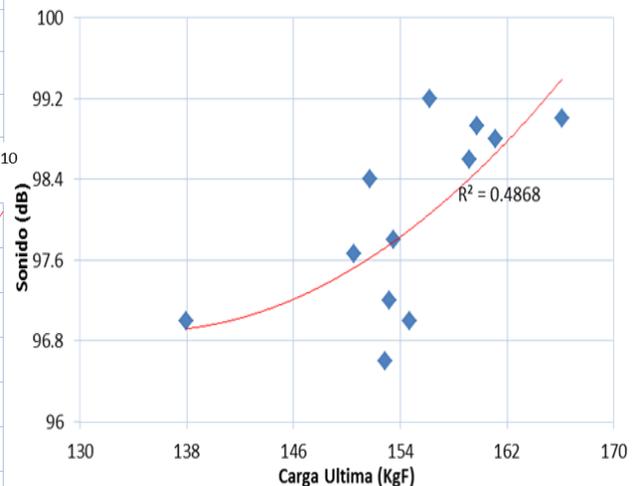


Figura IV-3: Carga última vs Frecuencia sónica



En la figura IV-3 el intervalo a analizar es el medio, el cual tiene una confiabilidad del 49%; esto quiere decir que los ensayos realizados no son suficientes para establecer si existe una relación directa entre estas variables. La frecuencia sónica se encuentra en un intervalo entre los 96.6 y los 99.2 dB, mientras que la carga ultima se encuentra entre los 150 y los 166 kgf, con un valor atípico de 138 kgf.

4.3. Aceleración

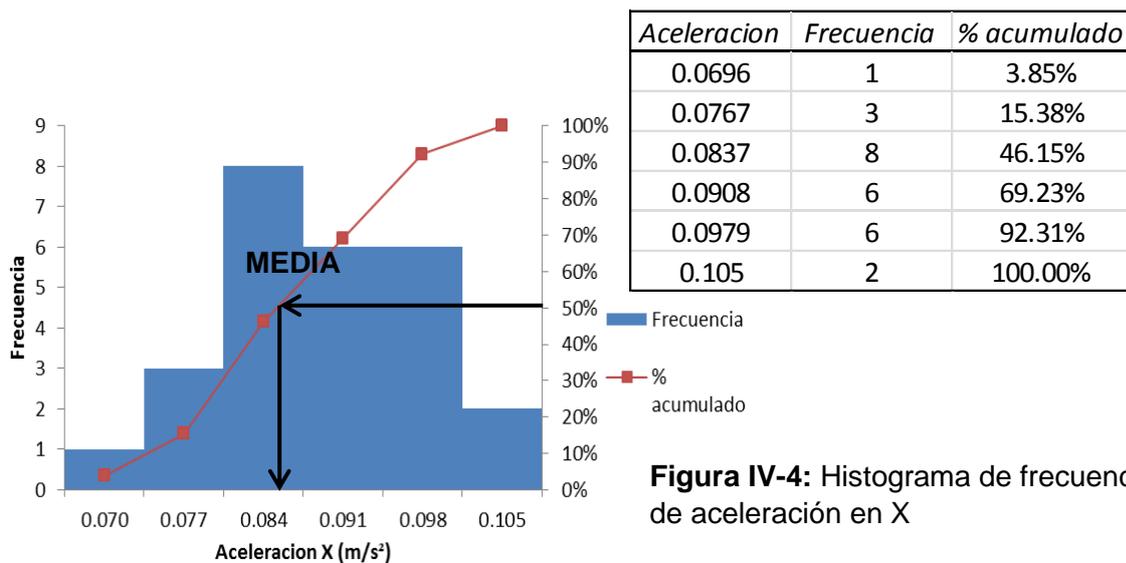


Figura IV-4: Histograma de frecuencia de aceleración en X

De la figura IV-4 se observa que existe una tendencia clara a que los picos de aceleración en X se encuentren entre los 0.084 y los 0.098 m/s², agrupando así más del 65% de la muestra total, con una media de 0.086 m/s². Existe una moda para el rango 0.084. Con estos resultados se puede decir que existe una alta confiabilidad de esta variable para luego ser analizada respecto a la resistencia última.

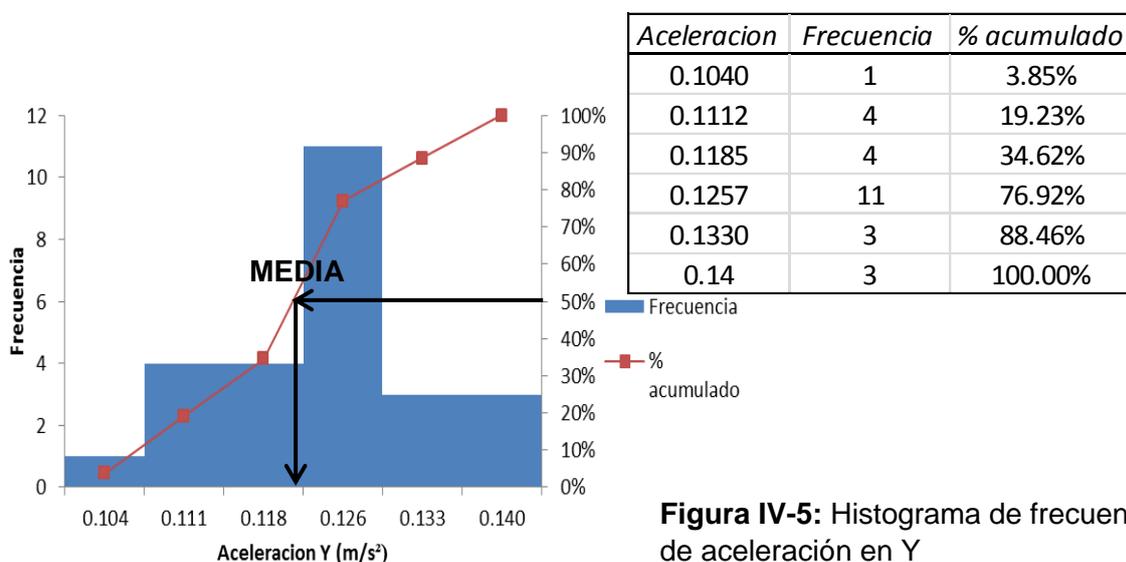


Figura IV-5: Histograma de frecuencia de aceleración en Y

Igualmente, en la figura IV-5, se observa que existe un pico claro de aceleración entre los 0.119 y 0.126 m/s² (11 de las tejas se encuentran en este intervalo); siendo la media 0.120 m/s². Con esto, y en relación con la tabla resumen de valores estadísticos, se puede concluir que existe una alta confiabilidad de este eje de aceleración para relacionarlo con la carga última.

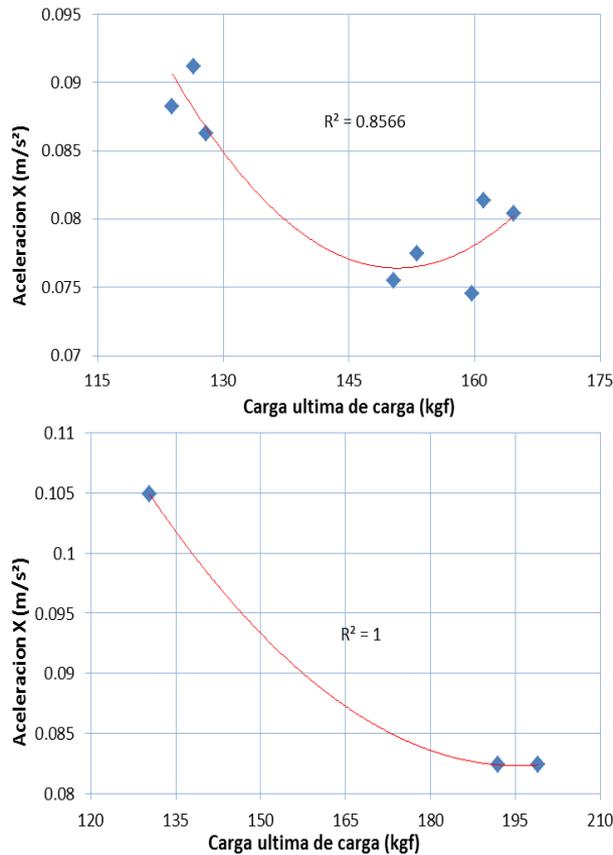
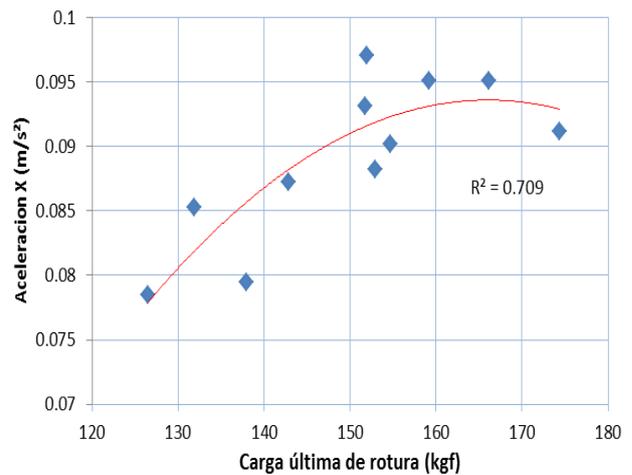


Figura IV-6: Carga última vs Aceleración X



En la figura IV-6 el intervalo a analizar es el bajo, el cual tiene aceleraciones que van desde 0.078 hasta 0.1 m/s², mientras que la resistencia esta entre los 125 y los 175 kgf. La curva tiene una confiabilidad de 70.9%. Esta grafica nos indica que, a pesar de que existe un valor atípico de aceleración igual a los 0.097 m/s², la curva tiene una tendencia definida y existe una relación casi directa entre la aceleración en X y la carga última.

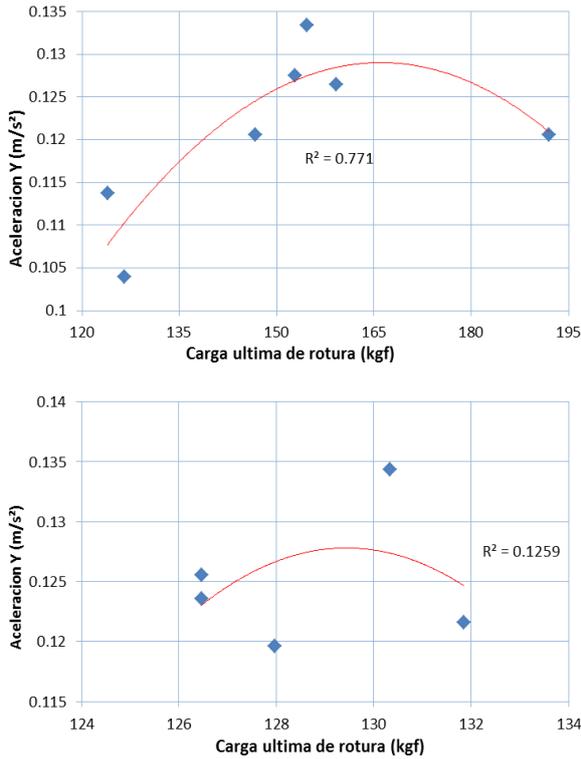
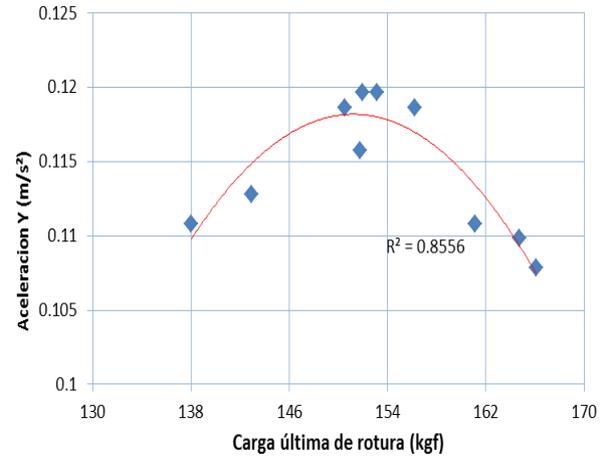


Figura IV-7: Carga última vs Aceleración Y



En la figura IV-7 el intervalo analizado es el bajo; se observa que las aceleraciones están entre los 0,11 y los 0,12 m/s², en un intervalo de carga que varía entre 135 y 175 kgf. La curva tiene una confiabilidad alta de 86%. Es lógico que exista una alta confiabilidad ya que este fue el eje de aceleración con menor coeficiente de variación.

4.4. Ultrasonido

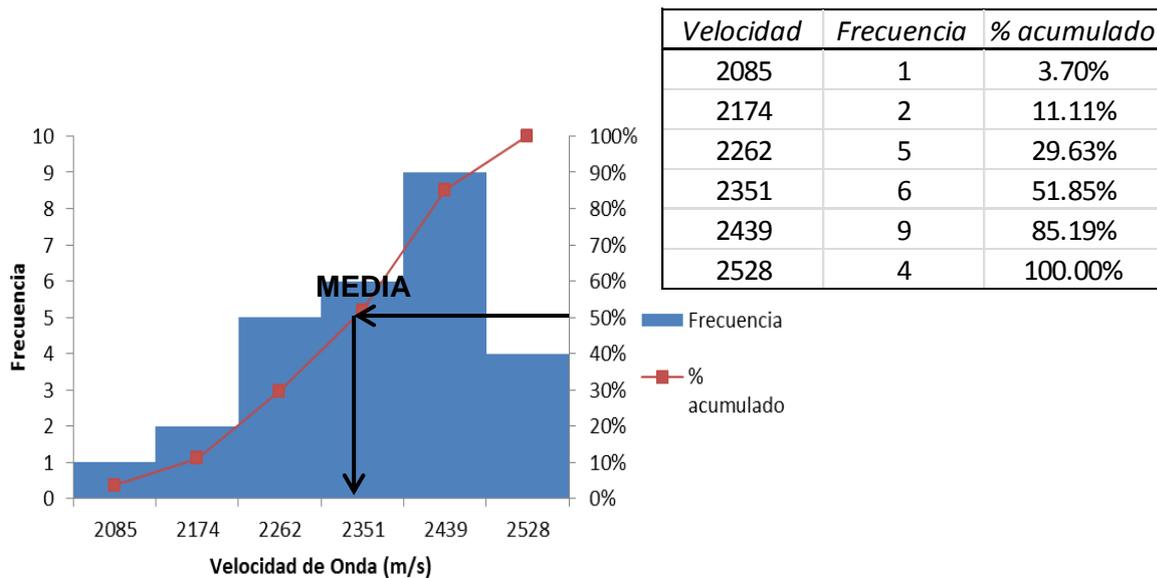


Figura IV-8: Histograma de frecuencia de velocidad de onda

De la figura IV-8, se puede concluir que existe una tendencia a obtener altas velocidades de onda, exceptuando las velocidades mayores a 2439 m/s, en donde esta tendencia a aumentar se ve interrumpida; se tiene una media de 2332 m/s. Igualmente, solo existe una teja en el intervalo de velocidades menores a 2100 m/s, lo cual puede ser considerado como un error experimental.

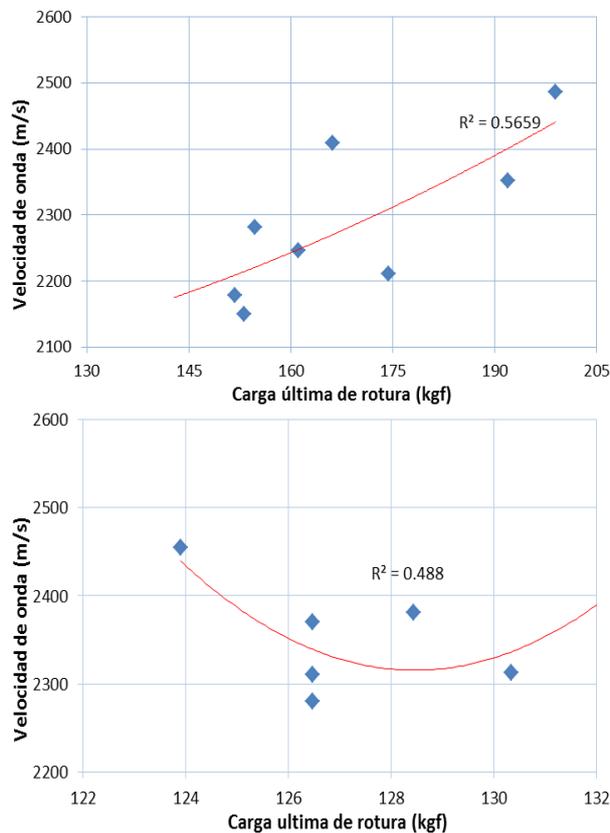
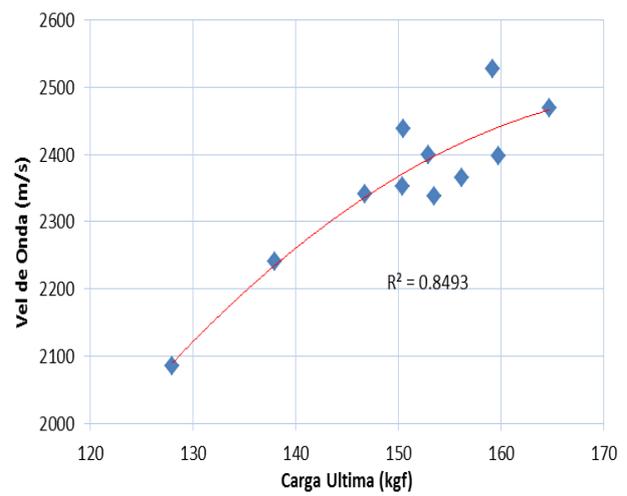


Figura IV-9: Carga última vs Velocidad de onda



En la figura IV-9 el intervalo que se analiza es el medio, el cual posee velocidades de onda que van desde 2100 hasta 2550 m/s, y el intervalo de resistencia va desde los 125 hasta los 165 KgF, cumpliendo con lo mínimo recomendado por norma (ASTM C1167 – 03). La curva tiene una confiabilidad del 84.93%. A pesar de que este ensayo era exploratorio se obtuvo una alta confiabilidad y una relación casi directa entre la velocidad de onda y la carga última.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Fue realizado un estudio de la resistencia mecánica a flexión de las tejas tipo Caribe mediante el ensayo tres puntos; se relacionó y comparo esta variable con otras propiedades del material, como la velocidad de pulso de las ondas de ultrasonido en ensayos indirectos medidos en diferentes puntos de la teja, la aceleración interna de masa que se produce en un plano perpendicular al eje de impacto (el cual fue producido sobre la teja en su punto medio) y el sonido generado por dicho impacto. Hay que tomar en cuenta que estos son los primeros estudios que se realizaran para ampliar el conocimiento en el área para futuras normas del producto; en este sentido, se abre una nueva línea de investigación no sólo dentro del Laboratorio de tecnología del concreto UCAB sino también dentro de la normativa venezolana de construcción, que estudia las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos ya descritas buscando si existen relaciones entre ellas. A continuación se exponen las conclusiones:

En los casos estudiados cada variable fue separada en tres (3) intervalos, en función del porcentaje de variación entre cada magnitud y el mayor valor medido de la variante en estudio; fueron denominados intervalo bajo, intervalo medio e intervalo alto. Esta simplificación fue realizada a manera de filtrar datos agrupándolos. De las gráficas resultantes, se prefirió hacer uso de tendencia mediante comportamiento polinómico. Hay que tomar en cuenta que los estudios fueron realizados sobre una muestra de un único proveedor.

Respecto a la variable principal, la carga última de rotura, su comportamiento a flexión tres (3) puntos permite concluir que las tejas tipo Caribe de la empresa tienen una resistencia promedio que va desde los 120 hasta los 200 kgf.

En el estudio sónico, no se visualiza un comportamiento directo entre el sonido producto del impacto y la resistencia a flexión de la teja, con valores que van desde los 96.5 hasta los 99.2 dB, con una media de 97.68 dB.

En el estudio de las aceleraciones se descartó el eje "Z" de aceleración debido a su alta dispersión producto de las oscilaciones de la teja. En la aceleración en "X" se observa un comportamiento directo entre ambas variables, con valores entre los 0.08 y 0.095 m/s². En "Y" existe una tendencia similar al eje "X", con aceleraciones un poco mayores que están entre 0.11 y 0.12 m/s².

Por último, para el caso de ultrasonido, fue el estudio que mostro mayor precisión en los datos, observándose una relación casi lineal con la capacidad de rotura. El rango de valores varió entre los 2100 y los 2600 m/s.

Para complementar este estudio, se realizó, con una muestra de 5 tejas, el ensayo de aceleración por impacto con 0 grados de libertad; comparando los resultados obtenidos con el montaje original. La grafica en el dominio de la frecuencia obtenido fue:

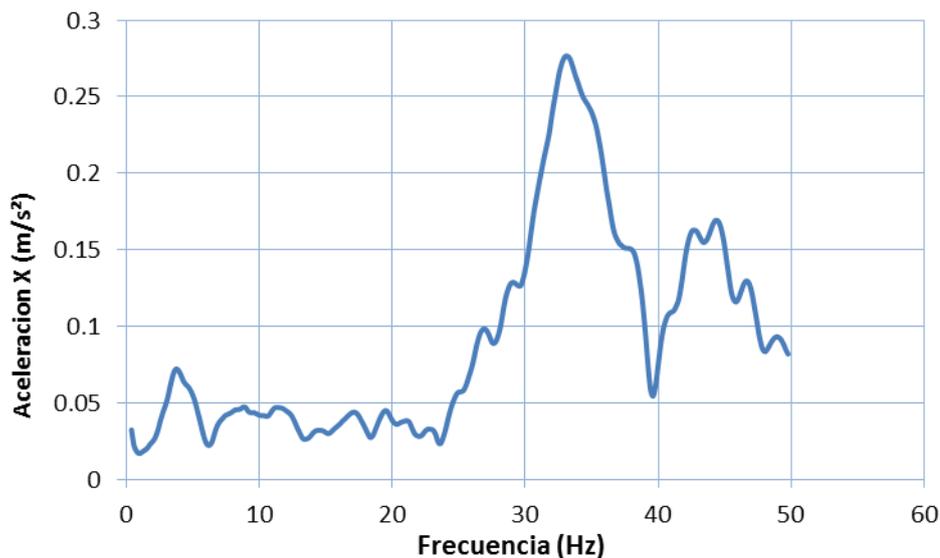


Figura V-1: Aceleración con 0 GL

Como se puede ver, a diferencia del impacto con 3 GL, no se producen tantas variaciones en los picos de aceleración, ya que a la teja se le impide oscilar y por lo tanto crear ondas de vibración extras. Únicamente se produjo un pico claro de aceleración, el del impacto, con una frecuencia fundamental mayor que el original, a 35 Hz. Esto quiere decir que la onda tuvo un mayor número de ciclos producto del impacto a 0 GL.

5.2. Recomendaciones

Como se mencionó anteriormente, la composición química y mineralógica de la arcilla es muy importante en el comportamiento de esta frente a las altas temperaturas a las cuales es sometida el producto final, es decir, las tejas. En este sentido, se recomienda ampliar las muestras en estudio a alfarerías de diferentes regiones con arcillas de distinta composición.

Debido a que el estudio sónico no mostro ningún resultado ni ninguna relación con la carga a rotura de las tejas, se recomienda no seguir con los ensayos de sonido. En cuanto a

la aceleración, el ensayo si mostró tendencias aceptables, por lo que se recomienda, a manera de comparación, utilizar acelerómetros con distinta sensibilidad para verificar resultados u obtener mayor precisión.

Se recomienda seguir con los avances en el estudio de ondas de ultrasonido sobre este material y realizar mediciones directas en el ensayo en búsqueda de una mejor relación, además de probar con otros equipos: en el área existen equipos mucho más modernos que el utilizado por nosotros.

No limitarse únicamente a tejas tipo Caribe sino expandir los estudios a otros materiales cerámicos, tales como tejas planas, criollas, ladrillos, entre otros.

Se recomienda ampliar la muestra de tejas para el ensayo de 0 grados de libertad de aceleración. Esto permitirá establecer patrones de comportamiento y seguir con los estudios en busca de relaciones.

Finalmente, se recomienda realizar los ensayos de sonido y aceleración con el celular directamente en las alfarerías junto con el maestro experto, a manera de obtener mayor información de la intensidad del golpe del maestro.

BIBLIOGRAFIA

Huayra Gabriel, J. Técnicas de medición de las velocidades de onda para determinar las constantes elásticas dinámicas. Lima, 2014. Estudio Mecánica de Rocas I. Escuela Profesional de Ingeniería de Minas.

J.L. Henry, A. Aguado y L. Agulló. Sistema de control de resistencias durante la ejecución mediante la medida de la velocidad de ultrasonidos. Madrid, 2008. Revista Hormigón y Acero.

A. García Verduch. Origen y Composición de las arcillas cerámicas. Madrid, 1985. Instituto de Cerámica y Vidrio, C.S.I.C.

Toro, F; Gordillo, M; Delvasto S y Savastano H. Modelación del módulo de la resistencia a la flexión de un material compuesto cementicio a partir de propiedades en estado fresco. Santiago, 2014. Revista ingeniería de construcción Vol., 29.

Guerra Sarche, X y Jaramillo Villacís, A. Caracterización física, mecánica y térmica de materiales vernáculos de la región Sierra del Ecuador. Quito, 2015. Escuela Politécnica Nacional (Facultad de Ingeniería Mecánica).

White G. Introducción al análisis de vibraciones. Azima DLI. Miami, 1990.

García González, M.A. Análisis de las características físicas y del comportamiento mecánico de las tejas cerámicas curvas antiguas y su evolución en el tiempo. Madrid, 2011. Universidad Politécnica de Madrid (Escuela de Arquitectura Técnica).