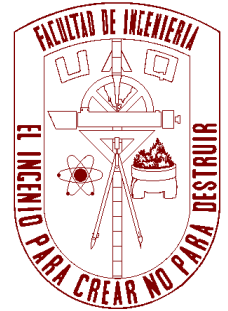


**Universidad Autónoma  
de  
Querétaro**



**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CAMPUS SAN JUAN DEL RÍO  
ÁREA DE ELECTROMECAÁNICA**

**T E S I S**

**DISPOSITIVO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO  
DE LA FATIGA AL IMPACTO DE MATERIALES  
FRÁGILES**

**Que para obtener el título de:**

**INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**PRESENTA:**

**ADRIÁN HUMBERTO GONZÁLEZ ORTIZ**

**Asesor: Dr. José Antonio Romero Navarrete**



*San Juan del Río, Querétaro, Octubre del 2010*

# Presentación

---

Este trabajo forma parte del esfuerzo de esta universidad por atender problemas de carácter social, técnico y nacional. Otros trabajos antecedentes han involucrado el desarrollo de un quemador, especialmente adaptado para las condiciones de trabajo de las ladrilleras de la región de Tequisquiapan - San Juan del Río. Ambos esquemas conforman de esta manera, alternativas tecnológicas que pudieran recibir un apoyo posterior para su implementación.

# Resumen

---

En México y en otros países en desarrollo, persisten técnicas rudimentarias para la fabricación de ladrillos de arcilla cocida, las cuales contrastan con aquellas empleadas en instalaciones industriales, en donde se aplican modernas técnicas de moldeo y de cocimiento. Mientras que en las instalaciones industriales se puede contar con métodos precisos para determinar la calidad de los productos, en las instalaciones tradicionales no se cuenta con procedimientos objetivos para la determinación de esta calidad. A esta problemática se suma la dispersión de las propiedades de los ladrillos fabricados en las “ladrilleras”, como resultado de las situaciones precarias de operación de estas unidades de producción. De esta manera es que se identifica la necesidad de contar con un método, objetivo y accesible, para determinar en campo, la calidad de estos productos. La importancia de estas unidades de producción se puede asociar a su número, el cual es del orden de 150 “ladrilleras” tan solo en la región de San Juan del río-Tequisquiapan.

En esta tesis se propone un dispositivo para la determinación de la calidad de los productos de arcilla fabricados en instalaciones tradicionales, con base a la resistencia a la fatiga por impacto. En el dispositivo, una masa es dejada caer libremente sobre el producto sometido a flexión, al cual se le fabrican un par de muescas transversales con objeto de sensibilizarlo, y tener pruebas relativamente rápidas, de bajo número de ciclos para la falla. Como resultados se presenta la comparación de la resistencia a la compresión, ruptura y de fatiga al impacto, de 5 lotes de muestras de ladrillos. Los valores medidos fueron normalizados al valor máximo obtenido en cada lote, de tal suerte que a cada pieza se le calculó su valor, en un rango de 0 a 1. Se obtuvo una correlación de 0.8 entre los valores promedio normalizados de la resistencia a la compresión y la fatiga al impacto. Por lo tanto, el método de ensaye propuesto se considera apropiado para emplearse en la evaluación de la calidad de los productos de arcilla cocida hechos en “ladrilleras”.

# Contenido

---

	Paginas
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1 Generalidades</b>	<b>7</b>
1.1 Materiales frágiles y dúctiles.	8
1.2 Teoría de la fatiga	9
1.3 Mecánica de la fractura	10
1.4 Impacto	11
1.5 Desarrollo de experimentos	12
1.6 Diseño en ingeniería	14
1.7 Ladrillo recocido	15
<b>Capítulo 2 Revisión de la literatura</b>	<b>18</b>
2.1 Métodos de prueba de materiales frágiles.	18
2.2 Aproximaciones experimentales al estudio de la calidad	20
<b>Capítulo 3 Diseño y construcción del dispositivo experimental</b>	<b>22</b>
3.1 Diseño conceptual	22
3.2 Fabricación del prototipo e instrumentación	31
<b>Capítulo 4 Pruebas preliminares</b>	<b>33</b>
4.1 Diseño de pruebas	33
4.2 Pruebas a impacto con equipo instrumentado	35
4.3 Discusión	43
<b>Capítulo 5 Pruebas de laboratorio</b>	<b>44</b>
5.1 Diseño de las pruebas	45
5.2 Análisis estadístico de resultados	55
5.3 Discusión	61
<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>63</b>
<b>Referencias</b>	<b>66</b>
<b>Apéndice: Datos estadísticos</b>	<b>72</b>

# Índice de figuras

---

Fig. 1 Representación esquemática del dispositivo portable de Schrader para el ensaye de muestras de concreto. (Schrader, 1981).	20
Fig. 2 Máximo y mínimo número de golpes para combinación de diferentes materiales reportado por Deng y li (2006).	21
Fig. 3 Módulos que se reconocen en el dispositivo de prueba.	23
Fig. 4 Representación esquemática del dispositivo propuesto.	27
Fig. 5 Prototipo virtual en 3D, diseñado en UNX 4.	28
Fig. 6 Dispositivo de prueba portable para ensayos de fatiga al impacto de ladrillos de arcilla recocida.	30
Fig. 7 Elaboración de los dos barrenos para cada espécimen.	34
Fig. 8 Preparación de la muestra por cuanto a la elaboración de la muesca transversal.	35
Fig. 9 Muestra de las historias en el tiempo (23 golpes antes de fallar).	38
Fig. 10 Deformaciones máximas para las historias en el tiempo de la Fig. 9.	38
Fig. 11 Golpes antes de falla para los ladrillos hechos en ladrilleras tradicionales.	39

Fig. 12 Muestra de la superficie de fractura para el ladrillo hecho en ladrillera tradicional.	39
Fig. 13 Ladrillos industrializados – resultados para la altura de 10 cm.	40
Fig. 14 Ladrillos industrializados – resultados para la altura de 15 cm.	41
Fig. 15 Ladrillos industrializados – resultados para la altura de 20 cm.	42
Fig. 16 Ladrillos industrializados–ciclos para falla como una función de la altura de caída.	43
Fig. 17 Máquina universal para <i>RC</i> , <i>MR</i> y dispositivo para <i>FI</i> .	44
Fig. 18 Arreglo para el ensaye a Flexión de los ladrillos.	47
Fig. 19 Trazado de las líneas de referencia de la muestra para la prueba de Flexión.	47
Fig. 20 Panel de la prensa universal.	48
Fig. 21 Manivelas de las válvulas de carga y descarga de la máquina universal.	48
Fig. 22 Mitades resultantes de la prueba de módulo de ruptura, a ser empleadas en la prueba a compresión.	50
Fig. 23 Arena Sílica ( $\text{SiO}_2$ ).	51
Fig. 24 Platina inferior de la máquina con una cama de arena sílica.	51
Fig. 25 Posicionamiento de la muestra en la cama inferior de arena sílica.	52

Fig. 26 Aplicación de cama de arena sílica en la parte superior del ladrillo.	52
Fig. 27 Cabeceo con arena fina para evitar huecos de carga y asegurar una superficie uniforme de carga	53
Fig. 28 Roldana para la prueba de fatiga al impacto.	55
Fig. 29 Resultados de mediciones de <i>MR</i> , <i>RC</i> y golpes para <i>FI</i> , para los cinco lotes muestreados.	58
Fig. 30 <i>CDV</i> para los diferentes lotes y propiedades.	59
Fig. 31 Valores normalizados al valor máximo, para cada propiedad de las muestras ( <i>MR</i> , <i>RC</i> , <i>FI</i> ).	59
Fig. 32 Correlación de <i>MR</i> y <i>RC</i> con <i>FI</i> .	60

# Índice de tablas

---

Tabla 1 Características de los componentes del dispositivo de ensayo

29



# Introducción

---

Se describen en esta sección algunos de los aspectos en torno al equipo propuesto, incluyendo la motivación y justificación para el desarrollo del mismo así como el objetivo general perseguido.

## **Antecedentes**

La fabricación de ladrillos de arcilla cocida implica la cocción por temperatura de los materiales moldeados, involucrando temperaturas y tiempos de horneado específicos. Sin embargo, para este proceso se identifican una variedad de técnicas, que van desde la fabricación en instalaciones precarias, en las que las operaciones se hacen manualmente y las fuentes de calor suelen provenir de la quema de desechos; hasta instalaciones fabriles bien establecidas en las que el proceso se da en forma continua. Así, en el primer esquema tecnológico se carece de un sistema objetivo de control de la calidad de los productos, existiendo la creencia de que el color del producto de manera indirecta está asociado al nivel de cocción y, por lo tanto, al nivel de resistencia mecánica. En las instalaciones fabriles se cuenta por lo general, con los medios para efectuar el ensaye de la resistencia de los productos (Chávez, 2008). En ese caso, la calidad de los productos se evalúa en términos de diferentes propiedades, que incluyen la resistencia a la compresión, la textura, las variaciones en el tamaño y la absorción (BC, 2006). Estas diversas propiedades dependen, en buena medida, del nivel de cocción o exposición al calor, y no existe una relación directa entre la resistencia y el color de los productos, o entre la absorción de calor y el color (BC, 2006). La propiedad más significativa de los productos de arcilla cocida está representada por la resistencia a la compresión, la cual ha sido incluso aproximada, en otras

situaciones, mediante ensayos no destructivos tales como ultrasonido (Brozovsky y Zach, 2007).

Respecto a métodos alternativos para evaluar la calidad de productos empleados en la construcción, en el caso de productos y materiales sujetos a impacto durante su uso, se han desarrollado normas específicas, emitidas por asociaciones tales como la *American Society for Testing and Materials* (ASTM), la *American Concrete Institute* (ACI), o la *Society of Automotive Engineers* (SAE). En particular, para algunos componentes se han llegado a desarrollar procedimientos específicos de parte de aquellos que lo han requerido. Por ejemplo, se cuenta con procedimientos normalizados recomendados en el caso de los rines de los vehículos o para los materiales de las defensas de los vehículos (Plasse y Norton, 1999).

Es muy común en la región de Querétaro el uso de ladrillos de arcilla cocida, sin embargo, el reglamento de construcción del estado no contiene normas técnicas complementarias, que definan las características a cumplir por estos materiales, por los que se tiene que hacer referencia a las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. La forma de fabricación es muy parecida en los diferentes lugares donde se fabrica el material. Según la norma NMX-C-006-1976, se define a los ladrillos como “elementos de construcción, de forma prismática rectangular, obtenidos por moldeo, secado y cocción de pastas cerámicas”. Por otro lado, según la NOM-000-SCFI-1994, la resistencia a la compresión de estos materiales de construcción deberá tener un valor mínimo de 60 kg/cm<sup>2</sup> (6.0 MPa). Asimismo, para la resistencia a la tensión (módulo de ruptura), la norma exige un valor mínimo de 6 kg/cm<sup>2</sup> (0.6 MPa). De acuerdo con lo anterior, las pruebas utilizadas a las que se hace referencia para determinar la calidad de los ladrillos de arcilla cocida, incluyen al módulo de ruptura y la resistencia a la compresión, las cuales son pruebas realizadas en laboratorio.

Ante la dispersión de la calidad de los productos elaborados en las instalaciones tradicionales, algunos esfuerzos han sido realizados para mejorar la operación de las ladrilleras en México y el mundo, incluyendo el diseño de hornos alternativos, y ayudas a la combustión a través de quemadores y combustibles (Chávez, 2008; Rivera, 2008). Sin embargo, ante la falta de políticas efectivas de modernización y renovación industrial, tales unidades productivas representan todavía un grave riesgo ambiental (Fernández, 2009; López Nolasco, 2008). Y ello no sólo en México, sino en otros países subdesarrollados. El impacto ambiental se ha establecido del orden de decenas de miles de toneladas de monóxido de carbono emitidas cada año a la atmósfera (Fernández, 2009).

Por otro lado, como se ha mencionado, la calidad de los productos se ha caracterizado como altamente variable, dándole a estos productos una baja confiabilidad en general. Sin embargo, estos productos continúan consumiéndose de manera importante en México (Cook, 1998). De acuerdo a reportes del INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), el 92.9% de las casas cuenta con muros contruidos de ladrillos de arcilla cocida, como resultado de que estos materiales poseen aparentemente, mejores propiedades físicas en conjunto, incluyendo su resistencia a la compresión y conductividad térmica. De esta manera, los productos hechos de arcilla cocida representan un material de producción apreciado en el campo, no obstante su alta dispersión en propiedades, sobre todo cuando tales productos son adquiridos en las tradicionales “ladrilleras”. Sin embargo, existen serias limitantes para obtener una disminución en la dispersión de la calidad de los productos de arcilla cocida de las ladrilleras, por cuanto a su resistencia a la compresión y módulo de ruptura. Ello se desprende del proceso mismo de fabricación empleado en estas ladrilleras, que implica una dispersión enorme por cuanto a la cantidad de calor provisto a los productos durante su cocción. Estas dispersiones en los niveles de cocción se derivan de las distintas posiciones de los productos en el interior del horno, que tiene como consecuencia diferentes cantidades de calor por radiación y convección.

Mientras que los operadores de las ladrilleras saben por experiencia acerca de la calidad de los productos que están poniendo en el mercado, y la dispersión de esta calidad, las medidas de desempeño empleadas resultan subjetivas y no confiables, al basarse en apreciaciones del color y otras propiedades secundarias. Estas evaluaciones subjetivas de la calidad de los productos se debe a la falta de recursos y equipamiento para llevar a cabo pruebas objetivas por cuanto a la calidad de los productos, y a su dispersión. Por lo tanto, una metodología objetiva y accesible a los operadores de las ladrilleras, para determinar la calidad de sus productos, es altamente deseable. Ello permitiría establecer evaluaciones claras de sus productos, para incluso tomar acciones de mejora en la calidad de tales materiales de construcción. En esta tesis se propone un dispositivo portable para efectuar pruebas de fatiga al impacto con objeto de establecer la calidad de los productos. De acuerdo con este concepto de equipo, la cantidad de energía asociada a la acumulación de impactos, establecerá el nivel de calidad del material ensayado.

## **Justificación**

La justificación para este desarrollo se encuentra entonces en la necesidad de contar con los equipamientos necesarios para evaluar las propiedades de calidad de los materiales, tomando en cuenta los apremios y restricciones que se presentan en el contexto nacional por cuanto a la fabricación de ladrillos. La aplicación de este equipo podría constituir entonces un detonador para medir la calidad de los productos y a partir de ahí, establecer un esquema tecnológico para la mejora de estos materiales de construcción. Establecer una medida de desempeño objetiva podría ser de esta manera, el primer paso para mejorar la productividad de estas pequeñas unidades de producción.

## **Objetivos y alcances**

Es el propósito de esta tesis contar con un dispositivo y método de prueba que permita la evaluación objetiva de la calidad de los productos manufacturados en las empresas conocidas como ladrilleras, debiéndose correlacionar el método de fatiga al impacto con las técnicas estándar para la evaluación de la calidad de este tipo de productos.

El contenido de la tesis se agrupa a través de capítulos que describen desde los conocimientos y bases conceptuales necesarias para la comprensión de los fenómenos involucrados, hasta el diseño conceptual, construcción y prueba de los materiales objeto de esta tesis.

De esta forma, en el Capítulo 1 se presentan un conjunto de conocimientos que sirven de antecedentes para comprender mejor la tesis, en un esfuerzo por dar “autocontinencia” a este documento. En ese capítulo se incluyen los fundamentos teóricos y matemáticos de los fenómenos de impacto y fatiga, así como del diseño en ingeniería. Se describen de la misma manera, las propiedades de los ladrillos de arcilla.

En el Capítulo 2 se describe una revisión de los trabajos antecedentes a esta investigación, que incluye la descripción de los métodos de prueba aplicados a materiales frágiles, así como los planteamientos expuestos en el estudio de la calidad. Por otra parte, en el Capítulo 3 se describe el desarrollo conceptual y construcción del dispositivo experimental de pruebas, incluyendo una descripción del equipo resultante.

En el Capítulo 4 se describe el método de prueba desarrollado, empleando en este caso una versión instrumentada del dispositivo de prueba, discutiendo el transitorio de fractura en el dominio del tiempo.

En el capítulo 5 se aglomeran las pruebas realizadas mediante los diferentes métodos de prueba, comparando la resistencia a la fatiga con la resistencia a la compresión y a la flexión (módulo de ruptura). Como capítulo final se realiza una recapitulación de los trabajos realizados, postulando una serie de conclusiones y trabajos recomendados a futuro. Como apéndice de este trabajo se desglosan los datos estadísticos detallados obtenidos.

De esta manera los alcances de esta tesis son desarrollar el prototipo funcional para la prueba de fatiga al impacto y demostrar la correlación directa entre la Resistencia a la compresión, Módulo de ruptura y la Fatiga al impacto. Partiendo desde el concepto, elaborando pruebas con el dispositivo instrumentado y definiendo los parámetros clave para lograr la repetitibilidad del método de fatiga al impacto.

### **Metodología de la investigación**

En el desarrollo de esta tesis se han aplicado los principios de Diseño en Ingeniería. Este proceso se describe en el siguiente capítulo, de generalidades. Otro principio metodológico empleado en el desarrollo de esta tesis, se asocia al manejo de datos y desarrollo de experimentos, en el contexto de los ensayos realizados.

# Capítulo 1 Generalidades

---

Mientras que los materiales desde el comienzo de las antiguas civilizaciones han sido utilizados para mejorar la vida cotidiana, el hombre ha usado el diseño desde tiempos muy antiguos de manera indirecta, para fabricar utensilios y máquinas para la facilitación de las diferentes tareas. Estos equipos han sido empleados para el manejo de diferentes materiales, siendo los más comunes el acero, cobre, papel, hormigón, ladrillo, plástico, vidrio, caucho y aluminio. Existen otros tipos de materiales que a lo largo del progreso del diseño fueron necesarios para crear nuevas máquinas y herramientas. Así, el desarrollo de los materiales tiene una trayectoria muy notable y hoy en día los ingenieros que diseñan deben conocer la estructura interna y propiedades de los materiales, de modo que se tenga la capacidad de seleccionar o inclusive de crear nuevos materiales para cada necesidad. Actualmente, alrededor de 50 mil materiales están a la disposición del ingeniero (Ashby, 1999), persistiendo la innovación y descubrimiento de manera continua.

La aplicación de los materiales a los diferentes fines, involucró un esfuerzo de caracterizarlos para conocer su capacidad para soportar las combinaciones de cargas a las cuales estarán sujetos como partes estructurales, maquinarias y herramientas. En este contexto, se busca en general la confiabilidad y durabilidad de los elementos construidos o fabricados. Son dos los tipos de cargas que pueden ser aplicadas a los elementos diseñados: estáticas y dinámicas.

La caracterización de la respuesta de los materiales a los distintos tipos de carga es lo que ha permitido obtener el conocimiento de los distintos parámetros que describen el comportamiento de los materiales bajo diversas cargas aplicadas.

## 1.1 Materiales frágiles y dúctiles

Esta clasificación de los materiales atiende la cantidad de deformación que el material es capaz de soportar antes de su falla, y es una función de su dureza (Vlack, 1977).

Los materiales frágiles presentan características opuestas a la de los materiales dúctiles. Un material frágil no tiene resistencia a cargas de impacto y se fractura aún a carga estática sin previo aviso, aparte de no contar con un esfuerzo de fractura bien definido. Esto último se debe a que la aparición de grietas en una probeta es bastante aleatoria (Hibbeler, 1996). Sin embargo puede decirse que un material con un alargamiento mayor al 5% es dúctil y menor de 5% frágil (Hibbeler, 1996).

Un factor importante en la caracterización de los materiales frágiles y dúctiles, es la temperatura, debido a que las pruebas realizadas en laboratorios (tracción y compresión) se ejecutan a temperaturas normales. Sin embargo, un material dúctil puede presentar las características de un material frágil, a temperaturas muy bajas, mientras que un material frágil puede comportarse como dúctil a muy altas temperaturas (Juvinal, 2002). Por lo tanto puede afirmarse, por lo general que la mayoría de los materiales exhiben un comportamiento tanto dúctil como frágil (Ashby, 1999).

El comportamiento de los materiales es una función entonces del tipo de carga a la que queda sometido. Las cargas dinámicas se distinguen de las estáticas por el hecho de originar modificaciones tanto en la magnitud de las tensiones como en las deformaciones a que dan lugar, afectando también la forma y resistencia última de los materiales. Muchos materiales que frente a cargas estáticas tienen un comportamiento dúctil, en el caso de cargas dinámicas presentan un comportamiento frágil (Madayag, 1969). Una carga dinámica por



excelencia es la carga de impacto, la cual representa una fuerza aplicada por un muy breve tiempo, del orden de milésimas o centésimas de segundo.

Por otro lado, las carga aplicadas pueden ser de distinta naturaleza: axial (tensión - compresión), flexionales o torsionales.

## **1.2 Teoría de la fatiga**

### Conceptos de la teoría de la fatiga

Desde la antigüedad se sabe que la falla de los materiales bajo cargas repetidas se produce más fácilmente que con cargas estáticas. Por ejemplo, es prácticamente imposible romper manualmente un alambre estirando desde sus extremos, lo que si se logra con relativa facilidad al flexionarlo repetidamente. Sin embargo, el comportamiento tan sorprendente no fue de interés para los ingenieros hasta mediados del siglo XIX, cuando todavía se trataban las cargas fluctuantes o repetidas de la misma manera que las cargas estáticas, salvo que se utilizaban factores de seguridad mayores (Fuchs y Stephens, 1980). El término fatiga es introducido por Poncelet en Francia en un libro publicado en 1839. Sin embargo las autoridades modernas sugieren que el término fractura progresiva sería más apropiado (Juvinall, 2002).

La fatiga es una forma de fractura que se produce en estructuras sujetas a tensiones dinámicas y fluctuantes. Bajo estas circunstancias es posible que la fractura se produzca a niveles de esfuerzo relativamente bajos.

El término fatiga es usado debido a que este tipo de fractura normalmente se produce después de un periodo de esfuerzos repetitivos o cíclicos. Se estima que la fatiga comprende aproximadamente un 90% de todas las fracturas metálicas, siendo de tipo catastrófica y ocurriendo rápidamente sin aviso. Esto lo

descubre August Wöhler. Al respecto, los cerámicos son también susceptibles a este tipo de fractura. (Laird, 1966).

La fractura por fatiga es semejante en naturaleza a la fractura frágil aun en materiales dúctiles en los que hay un poco, o ninguna deformación plástica asociada con la fractura (Juvinal, 2002).

Las etapas del proceso de fatiga comprenden la iniciación y la propagación de las fisuras. La grieta inicial por fatiga provoca por lo común un aumento en la concentración de esfuerzos, con lo que la velocidad de la propagación de la grieta aumenta hasta que la sección remanente ya no es capaz de soportar una sola aplicación de carga y ocurre la fractura final. Generalmente, la superficie de fractura es perpendicular a la dirección de las tensiones de tracción aplicadas. Debido a que la cedencia plástica local puede ser el principio de una falla por fatiga, es necesario reforzar los lugares vulnerables tales como barrenos, esquinas agudas, raspaduras en la superficie y huellas de corrosión. Reforzar estos lugares es como hacer la parte entera de un material más resistente. (Juvinal, 2002).

R. R. Moore contribuyó en gran medida a la comprensión del fenómeno de fatiga al desarrollar una máquina para aplicar esfuerzos a flexión totalmente invertidos a una probeta (Juvinal, 2002). A partir de estos experimentos es que se identificó el Límite de Resistencia a la Fatiga.

Estos conceptos de la fatiga serán aplicados en el contexto de cargas de impacto aplicadas a los ladrillos hechos de arcilla cocida.

### **1.3 Mecánica de la fractura**

La mecánica de la fractura estudia la propagación de fisuras a partir del fondo de una grieta existente (González, 2003). Según esta teoría, existiría un

nivel de esfuerzo, o tamaño de la grieta, arriba de los cuales se da el crecimiento rápido de la grieta (Marin, 1962).

En el fondo de una grieta se establece un factor de intensidad de esfuerzo, denominado  $K$ , el cual depende de una multitud de factores que incluyen la temperatura y la estructura misma de los materiales. Este factor de intensidad de esfuerzo alcanza su valor crítico al incrementarse la velocidad de propagación de la grieta a niveles de propagación del sonido en el material.

Al tratar los diferentes tipos de comportamiento de los materiales a la falla por fractura, se deben tomar en cuenta los tipos de falla que pueden observarse en los materiales: Falla dúctil y falla frágil. Esto es una función de la cantidad de deformación permanente que ocurre en el material antes de que ocurra la fractura final (Hertz, 1976; González, 2003).

#### **1.4 Impacto**

A la carga de impacto también se le conoce como carga de choque, repentina o de impulso. Las cargas de impacto pueden dividirse en tres categorías según aumenta la severidad:

- Cargas que se mueven con rapidez de magnitud esencialmente constante, como las que produce un vehículo que cruza un puente
- Cargas aplicadas repentinamente, como aquellas que son resultado de una explosión
- Cargas de impacto directo, como las producidas por el choque de un vehículo.

La caracterización de las propiedades de los materiales por cuanto a su capacidad de absorber cargas de impacto ha resultado conveniente para predecir la respuesta de los distintos materiales a condiciones críticas de carga. Una

calidad de los materiales que se puede determinar mediante los ensayos a impacto es la capacidad de éstos a absorber energía de deformación plástica. De esta forma, se idearon métodos y equipos especializados para caracterizar esta capacidad de absorción de energía de parte de los materiales. Esta aproximación se basó en general en la medición de la energía asociada a la fractura de los materiales, por lo que los métodos de Charpy e Izod han sido empleados desde hace más de un siglo para el ensaye de la tenacidad de los materiales (Askeland, 1998).

Estos métodos comprenden básicamente, el dejar oscilar una masa desde una cierta energía potencial, la cual fractura al material y por lo tanto es incapaz de alcanzar la misma altura en el otro extremo del movimiento del péndulo. La diferencia de alturas, que se asocia a una diferencia de energía potencial, se interpreta entonces como la energía que absorbió el material. Estos ensayos a choque determinan, así, la fragilidad o capacidad de un material de absorber cargas instantáneas, también conocida como tenacidad, misma que es la habilidad para absorber energía durante la deformación plástica. Esta corresponde al cálculo del área bajo la curva del diagrama esfuerzo-deformación (Jeme, 2006), la cual, es medida en las pruebas de impacto.

## **1.5 Desarrollo de experimentos**

Un experimento que haya sido diseñado comprende una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar los efectos de estos cambios sobre un conjunto de variables de salida o de respuesta (Montgomery, 1991). El diseño experimental es un medio de gran importancia en el medio de la ingeniería para mejorar el rendimiento de algún proceso o sistema en particular.

Diseñar un experimento implica la previa identificación y definición clara de los objetivos, se deben considerar aspectos tales como el costo de estos experimentos, los factores influyentes y no influyentes (parámetros), así como los valores de los factores sobre los cuales se tiene control (niveles). Por lo anterior no es adecuado dejar la elección de los experimentos y la evaluación de los resultados a la mera intuición del experimentador. Es más razonable utilizar metodologías matemáticas y estadísticas que permitan diseñar la secuencia de experimentos de la mejor forma, de modo que se minimice tanto el costo de la experimentación como la influencia del error experimental sobre la información buscada; éste es el objetivo del Diseño Estadístico de Experimentos (Ferré y Rius, 2002). Un experimento debe limitarse a investigaciones que establecen un conjunto particular de circunstancias, bajo un protocolo específico para observar y evaluar las implicaciones de las observaciones resultantes (Ferré y Rius, 2002).

Los experimentos pueden ser clasificados en:

**Sistemáticos:** Los tratamientos son asignados a las unidades experimentales de acuerdo a algún patrón determinado. Tales diseños no proveen estimaciones validas del error experimental.

**Aleatorizados:** La asignación de los tratamientos a las unidades experimentales depende de algún patrón de aleatorización. Solo para estos diseños, las técnicas de análisis estadístico son validas.

Por otro lado, el experimento comparativo es el tipo de experimento que utilizan los investigadores en áreas como biología, medicina, agricultura, ingeniería, sicología y otras ciencias experimentales. El adjetivo comparativo implica que se establezca más de un conjunto de circunstancias en el experimento y que se comparen entre sí las respuestas a las diferentes circunstancias. (Kuehl, 2001).

Un desarrollo experimental se incrusta en general en el contexto del método científico, con objeto de validar una hipótesis. Esta hipótesis de investigación propone un conjunto de circunstancias y consecuencias (tratamientos). Los tratamientos son una creación de las circunstancias para el experimento, y representan el conjunto de circunstancias creadas para el experimento, en respuesta a la hipótesis de investigación, además constituyen el núcleo central del experimento (Kuehl, 2001).

## **1.6 Diseño en ingeniería**

En el contexto ingenieril, el diseño es una actividad que busca satisfacer alguna necesidad, individual, colectiva o de un mercado, para lo cual se plantea un conjunto de hipótesis, las cuales comprenden lo que se conoce como diseño conceptual. El diseño conceptual establece los módulos en los que se puede dividir el problema, para pasar a la identificación de los principios de operación de cada uno de estos módulos.

La modularización es la actividad más importante del diseño, al proponerse atender los problemas de manera especializada. Esta división implica la identificación de partes físicas o lógicas que pueden tener diferentes principios de operación. Como se puede esperar, existirán diferentes principios de aplicación, por lo que se requiere validar o evaluar cada uno de estos principios. En este proceso, otra característica esencial es el divergir por cuanto a la definición de los principios de operación. Esto es, discutir la mayor cantidad de posibles soluciones para cada uno de los principios de operación de los distintos módulos.

De esta forma, el diseño es un proceso iterativo. El punto de partida es una necesidad o una nueva idea; el punto final son las especificaciones del equipo o sistema. Es esencial definir con precisión la necesidad de la forma: "Un dispositivo es necesario para realizar la tarea X" (Ashby, 1999).

Después de haber conceptualizado al diseño, y hecho las estimaciones pertinentes, se sugiere un concepto que es potencialmente viable, pasando a la etapa de diseño de detalle, el cual comprende el dimensionamiento de las partes y la selección de los componentes pre-existentes.

Es importante mencionar que existe una interacción estrecha entre el diseño en sí, los materiales empleados y el proceso de manufactura seleccionado. De esta forma, el diseño puede variar como resultado de los materiales seleccionados o de los procesos de manufactura elegidos.

### **1.7 Ladrillo recocido.**

La norma NMX-C-006-1976, referente a “Los ladrillos y bloques cerámicos, de barro, arcilla y/o similares”, como los elementos de construcción, de forma prismática rectangular, obtenidos por moldeo, secado y cocción de pastas cerámicas, de barro, arcilla y/o similares, extruidos o comprimidos. Por otro lado, la Norma Oficial Mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2005, “Industria de la construcción bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural especificaciones y métodos de prueba” especifican, entre otras características dimensionales, que la resistencia a la compresión tendrá un valor mínimo de  $60\text{kg/cm}^2$  (6.0 MPa). Por cuanto a la resistencia a la tracción (módulo de ruptura), se especifica un valor mínimo de  $6\text{Kg/cm}^2$ . (0.6 MPa).

En términos generales, la materia prima utilizada para la fabricación del tabique rojo cocido incluye una arcilla, la cual se determina su utilidad para la fabricación del material con simple visualización del producto. Asimismo, un material de origen orgánico, que puede ser estiércol o aserrín, según la decisión que tomen los productores en la región donde se produce el material. También se incluye arena de mina, agua y un material limoso.

Por cuanto al proceso de fabricación de los ladrillos, y después de observar los procesos de producción en cada zona, se puede decir que el procedimiento de elaboración es muy similar, lo que difiere de una a otra es el uso de algún material como la utilización o no del estiércol, aserrín y arena blanca de mina. Ello se debe a la facilidad de conseguir estos diferentes materiales en la zona. En términos generales, la fabricación implica el proceso de mezclado de los materiales y moldeo de los ladrillos.

En función de las condiciones ambientales es que se define el tiempo en que el material se dejará secar al intemperie (24 hrs aproximadamente). Los productos ya secos, se van colocando en el interior del horno, “cuatropeados” de tal suerte que reciban tanto calor por radiación como por convección. La separación entre ladrillos es por lo común de 5 cm.

La cocción procede con el encendido de un quemador, el cual usualmente es de combustóleo o aceite automotriz. Una vez que ha transcurrido el tiempo que se considera suficiente para determinar el nivel de cocción de los materiales, el horno se sella, con objeto de uniformizar las temperaturas en todo el volumen del horno. Esto es, se apaga el quemador y se deja fluir el calor en su interior. La etapa más contaminante del proceso se da durante este sellado, dado que en la descarga del horno se colocan materiales tales como estiércol o cáscaras y basura de coco, las cuales se encienden para proveer calor a los ladrillos en la descarga del horno.

Los tiempos en la producción son relativamente lentos, un proceso completo para un horno de 15000 tabiques y 6 empleados en promedio (capacidad y número de empleados promedio), dura 22 días en promedio.

Aparte de zonas de producción de ladrillos en lugares aledaños a la capital del estado, se tiene el poblado de San Nicolás, en el municipio de Tequisquiapan,



que por las características de su material (acabado uniforme en dimensiones y apariencia en general), es muy solicitado para usarse en acabados de fachadas.

## Capítulo 2 Revisión de la literatura

---

El ensayo a impacto de los materiales ha constituido una herramienta importante para evaluar la capacidad de los materiales para soportar condiciones de operación difíciles (Siewert et al., 2000). El ensayo de impacto representa el resultado de un proceso que se dio para establecer la resistencia al impacto y la tenacidad de los materiales (Siewert et al., 2000), en la cual un solo impacto se aplica a la muestra ensayada. Mientras que este procedimiento de prueba es esencial por cuanto a muchos requerimientos de desempeño de los materiales, el ensayo a fatiga por impacto, en la cual la fractura de la muestra ocurre después de un cierto número de golpes, ha llegado a ser relevante al evaluar a los materiales frágiles (Schrader, 1981; BSI, 1990; Dumitru, 2007). A continuación se presenta una revisión acerca de las técnicas empleadas para el ensaye de los materiales frágiles, incluyendo los dispositivos empleados y las dispersiones resultantes en los resultados para los distintos materiales.

### 2.1 Métodos de prueba de materiales frágiles

Una pluralidad de esquemas experimentales se ha considerado para evaluar y estudiar la respuesta al impacto de los materiales frágiles. Tales configuraciones apuntan a la determinación de la energía de fractura para ensayos de carga repetida o carga única, tanto para estructuras nuevas como existentes. Estas técnicas se han basado en la aplicación de cargas axiales, cortantes o flexionantes.

La flexión en tres o cuatro puntos se ha considerado para determinar las energías de fractura de los materiales frágiles, bajo cargas repetidas o únicas (Nakayama, 2005; Malvar y Warren, 1987; Ruiz et al., 2000). Para edificios existentes hechos de ladrillos se requiere por lo general de técnicas no-

destructivas, empleándose para su ensaye métodos esclerosc6picos o ultras6nicos (Brozovsky et al, 2008).

En el caso de los materiales polim6ricos, 6stos han sido ensayados por impacto para determinar los 6ptimos par6metros de manufactura, como una funci3n de la energa absorbida, en esquemas de carga 6nica o carga repetida (Ho et al, 2004). A diferencia de los ensayos del tipo Charpy, para los materiales polim6ricos no se fabrica ninguna muesca. Por otro lado, cargas de impacto repetidas se han aplicado para el ensaye de la calidad de materiales empleados en la fabricaci3n de zapatos (BSI, 1990). En ese caso, se considera una m6quina especial tipo p6ndulo, la cual determina la absorci3n de energa en cada golpe, de tal suerte que el nivel de calidad de los productos se asocia al n6mero de golpes para la falla (o bien, que no ocurra la falla despu6s de 27 impactos), as6 como la energa involucrada en el 6ltimo golpe. Los materiales de construcci3n que han sido ensayados bajo esquemas de cargas repetidas, incluyen a las fibras de refuerzo a emplearse en el concreto (Mohammadi et al., 2009) y en los pilares (Zielinski et al., 1981). La relativa simplicidad de los m6todos de impacto ha sido aprovechada de manera ventajosa para la determinaci3n de las propiedades de los diferentes ensambles y materiales de construcci3n, como en el caso de la resistencia de los mamposteos (Beattie et al., 2001).

Gracias a la simplicidad relativa del m6todo de impacto, 6ste se ha usado para la determinaci3n de la resistencia al impacto de materiales usados en construcci3n y albañiler6a, tal es el caso que se utiliza el esfuerzo cortante para probar materiales de albañiler6a (Schrader, 1981).

El dispositivo propuesto en este documento mantiene algunas similitudes con un dispositivo propuesto por E. K. Schreder, para evaluar la resistencia al impacto del concreto. (Schrader, 1981). La Fig. 1 ilustra una representaci3n esquem6tica de este dispositivo port6til, que consiste en una bola de 4.5kg que impacta al espec6men desde una altura de 457mm, no necesitando entonces de

fuentes de energía externas. El procedimiento de prueba, involucra la manipulación del peso y la determinación visual de la primera grieta.

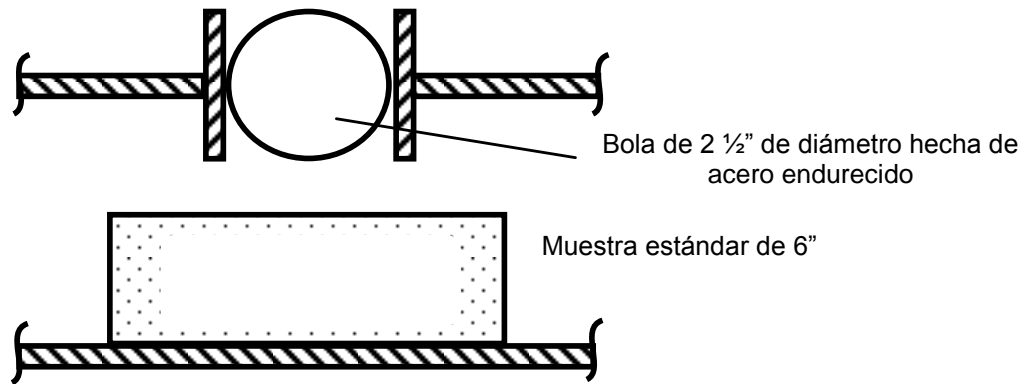


Fig. 1 Representación esquemática del dispositivo portable de Schrader para el ensayo de muestras de concreto. (Schrader, 1981).

## 2.2 Aproximaciones experimentales al estudio de la calidad

Si bien en un principio el ensayo a impacto fue objeto de muchas críticas, enfocadas de manera fundamental en la falta de repetibilidad de los resultados (Siewert et al., 2000), la estandarización de los procedimientos ha hecho a estas técnicas altamente confiables y necesarias para caracterizar las propiedades de los materiales. Sin embargo, la dispersión de los resultados permanece, lo cual se ha atribuido a la variación natural de las propiedades de los materiales, especialmente cuando éstos poseen falta de homogeneidad e isotropía, tal cual el caso de concreto reforzado (Weerheijm et al., 2005).

La Fig. 2 ilustra la dispersión de los golpes para la falla en el caso de diferentes combinaciones de concreto reforzado mediante fibras (Mat\_1 a Mat\_6) (Deng y Li, 2006). Estos resultados se presentan tan sólo como una referencia del orden de magnitud cuando se tiene el fenómeno de fatiga al impacto de bajo

número de ciclos, con una relación de valores máximos a mínimos desde 2.5 hasta 7.6.

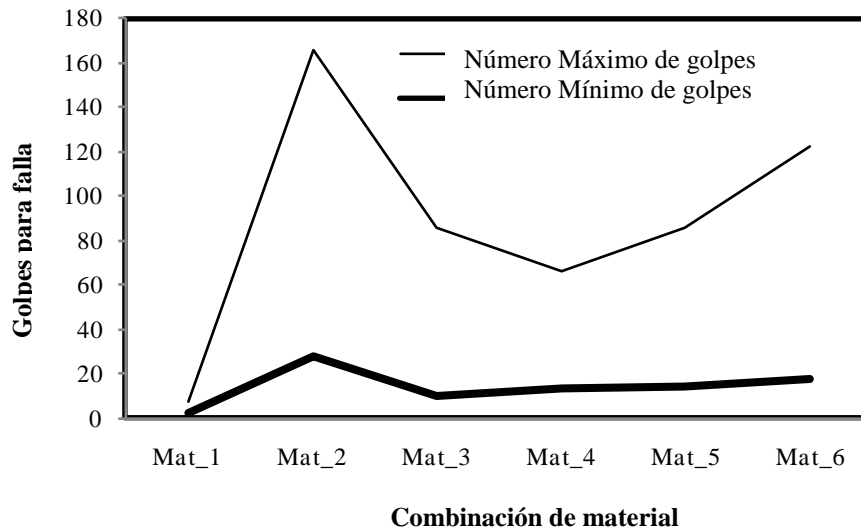


Fig. 2 Máximo y mínimo número de golpes para combinación de diferentes materiales reportado por Deng y li (2006)

De esta manera, se puede ver que el ensaye de fatiga al impacto ha sido empleado para caracterizar a los materiales, incluyendo productos terminados y materiales de construcción.

# Capítulo 3 Diseño y construcción del dispositivo experimental

---

Se describe el proceso de diseño del dispositivo de pruebas, en sus etapas de conceptualización y construcción. En particular, se describe la configuración no instrumentada del equipo. El equipo descrito es el que finalmente sería empleado en campo, esto es, sin instrumentación alguna.

## 3.1 Diseño conceptual

El dispositivo tiene como objetivo el ensaye a fatiga al impacto de materiales de construcción hechos de arcilla cocida, para satisfacer las necesidades de evaluación de la calidad de los productos elaborados en las llamadas “ladrilleras”, que son unidades de producción de baja rentabilidad y alto impacto ecológico ubicadas esencialmente alrededor de zonas urbanas. La fatiga al impacto se ha seleccionado como metodología de ensaye la cual debería ser simple, pero a la vez objetiva, si se le compara con otras aproximaciones que involucraran la resistencia a la compresión o a la flexión; este dispositivo deberá contar de esta manera, con principios de funcionamiento y operación sencillos, al tiempo que deberá ser portable para poder realizar ensayos en las distintas regiones donde se fabrican estos materiales de construcción.

Una demanda específica para el dispositivo debe de ser el costo, que no deberá exceder de 500 pesos mexicanos. Esta cifra es una estimación por cuanto al precio unitario de los ladrillos, del orden de un peso. El dispositivo debe aprovechar la simplicidad relativa del método de impacto, además ninguna fuente eléctrica debe ser necesaria para operar el equipo, y debería involucrar un tiempo de prueba corto, menor a media hora.

El diseño conceptual implica la identificación de módulos en los que se divide el equipo, así como la identificación de las interacciones entre estos módulos identificados y los respectivos principios de operación.

La Fig. 3 ilustra los diferentes módulos que se identifican en el equipo. Estos módulos se describen a continuación:

Módulo Impactor (MI). Este módulo contiene los elementos para canalizar el impacto hacia la pieza ensayada (PE). En particular, deberá proveer los elementos para guiar la masa caediza, así como los elementos para sujetarse a la pieza ensayada.

Módulo sufridera (MS). Los componentes de este módulo incluyen las partes que serán sometidas al impacto, y que darán soporte a la pieza ensayada.

Módulo pieza ensayada (MPE). La pieza deberá poseer lo necesario para ser soportada por el módulo sufridera, y a la vez, dar soporte al elemento impactor.

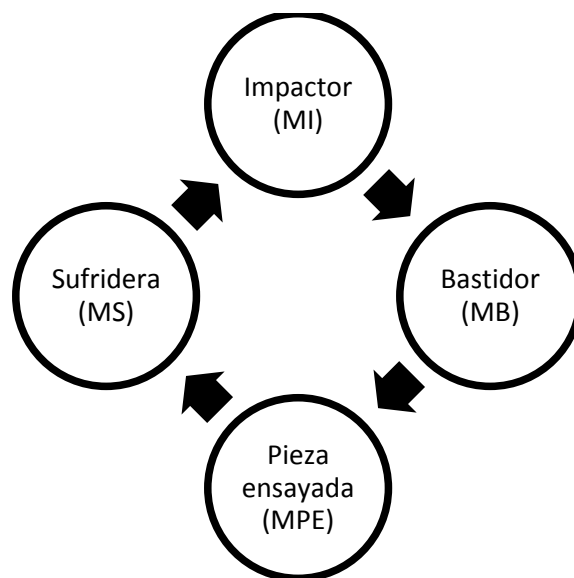


Fig.3 Módulos que se reconocen en el dispositivo de prueba.

Módulo bastidor (MB). Este módulo dará soporte a todo el conjunto de impacto, y deberá poderse descansar en el piso. Durante el ensaye, el bastidor deberá exhibir estabilidad y resistencia suficientes ante las cargas a impacto.

A continuación se discuten los principios de operación de los diferentes módulos identificados, uno por uno.

### Módulo Impactor (MI)

Una vez aceptado el principio de operación por cuanto a la fatiga al impacto, la segunda decisión por hacer se refiere a la situación de flexión contra carga axial para la fatiga al impacto. Para el caso, la prueba de flexión representa ventajas y desventajas. Por el lado de las ventajas, se tiene que la flexión requiere de menos energía para alcanzar el esfuerzo último en el material. Esto es, como resultado del gradiente de esfuerzo, la energía de deformación elástica que se requiere almacenar para la falla de la barra axial, es varias veces aquella que es necesario almacenar para la falla de la viga en flexión, para un esfuerzo dado y para las mismas características dimensionales. En el caso de elementos rectangulares, la relación entre las condiciones de carga axial y en flexión, es (Higdon et al, 1998):

$$U_{barra} = 3 U_{viga} \quad (1)$$

Adicionalmente, se ha reconocido que la carga axial es más susceptible de exhibir una falta de uniformidad en los esfuerzos de impacto, lo cual da incertidumbre a ese ensayo (Zhu et al., 2009). De esta forma, se asume que los esfuerzos a flexión producen una mejor uniformidad en los esfuerzos, en tanto que se disminuye la incertidumbre por cuanto a la falta de “centricidad” de las cargas aplicadas y en cuanto a su dirección, lo cual es común en las cargas axiales.



En comparación con la flexión en tres o cuatro puntos, la viga en voladizo representa una condición de carga más agresiva, ya que la fuerza total de impacto se concentrará en el área debilitada, implicando por ello que un nivel menor de energía sea necesario para causar la fractura de los ladrillos o cuñas.

Como desventaja del método de impacto a flexión se tiene que la fatiga podría ser menos probable que ocurra, en la medida que una menor cantidad de material es sometida a niveles de esfuerzo altos. Esto es, la falla por fatiga por lo general se “nuclea” en regiones débiles del material, sometidas a esfuerzos elevados, y dicha combinación es más probable que ocurra cuando se aplican las cargas axiales (Juvinall y Marshek, 2003).

#### Módulo Sufridera (MS)

De acuerdo a la selección hecha del ensaye al impacto a flexión, resulta necesario considerar una pieza de soporte del espécimen ensayado, la cual proporcione la libertad necesaria para poder manipular el espécimen, al tiempo de poseer la rigidez necesaria. Esto apunta a la necesidad de implementar una segunda viga en voladizo, la cual cuente con lo necesario para sujetar la pieza ensayada. Esta pieza deberá sujetarse al bastidor del dispositivo, y deberá tener una rigidez tal, que proporcione un bajo amortiguamiento a los impactos impartidos a la pieza de prueba.

#### Módulo Pieza Ensayada (MPE)

El ensayo de las probetas en voladizo, habiéndose maquinado muescas en el material en el filo del soporte de la probeta, tiene otra ventaja potencial respecto al ensayo de flexión en tres o cuatro puntos, la cual consiste en que la fractura ocurrirá lejos de donde se está dando la carga por impacto. Esta situación

disminuye la influencia de efectos locales tales como el confinamiento. Tales elevadores de esfuerzo garantizarían que la falla ocurra en el área designada. El espécimen necesitará entonces ser procesado de diversas maneras, incluyendo el maquinado de la muesca y de otros trabajos para: i) sujetar al ladrillo al elemento sufridera, y ii) sujetar a la probeta las guías de la masa caediza. Si bien los especímenes de doble muesca han sido considerados para ensayos de resistencia al cortante (Ünal y Bansal, 2000), tal enfoque se adopta en el diseño propuesto para evaluar la resistencia a la flexión de los ladrillos (en este caso, las muescas estarán alineadas). Tales arreglos de muescas dobles intensificarán la concentración de los esfuerzos, con lo que se decrecerá el número de impactos para la falla. Los especímenes considerados son ladrillos de 25.5 x12.5 x6 cm.

#### Módulo bastidor (MB)

Dadas las características de portabilidad requeridas para este equipo, se identifican como características esenciales de construcción y materiales, el que consista de una estructura metálica tubular soldada. Ciertas características de ergonomía incluyen la altura a la cual deberán ubicarse los elementos de impacto. Asimismo, la capacidad de poderse instalar en terreno irregular, como comúnmente se presenta alrededor de las ladrilleras. De esta forma, se ha seleccionado un perfil tubular rectangular (PTR), soldado, que comprende una parte superior en donde se instale la sufridera, al tiempo de constar con tres piernas, con objeto de evitar que el equipo “cojee”, durante los ensayos. La localización del soporte para la sufridera, deberá ser tal que no comprometa la estabilidad lateral del equipo.

#### Equipo resultante

La Fig. 4 incluye una foto y su representación esquemática de la versión instrumentada del dispositivo de masa caediza (módulos MPE, MS, MI), en donde

es posible observar el trabajo hecho al espécimen, que incluye la doble muesca y los dos barrenos, uno para sujetar el espécimen a la viga en voladizo, y el otro para asegurar a la probeta la barra guía de la masa caediza. En este caso, los barrenos fueron practicados mediante el uso de una plantilla y las herramientas adecuadas, y las muescas fueron hechas mediante segueta. Estas ranuras se realizaron una vez que el espécimen se encontraba asegurado al dispositivo, ello con objeto de asegurar que las muescas fueran hechas en el filo de la viga en voladizo.

La Fig. 5 ilustra imágenes del diseño del dispositivo empleado (Dibujos realizados en CAD UNX 4), con objeto de establecer la configuración de los distintos módulos. Para las partes enumeradas en esta figura, la Tabla 1 lista los componentes del equipo.

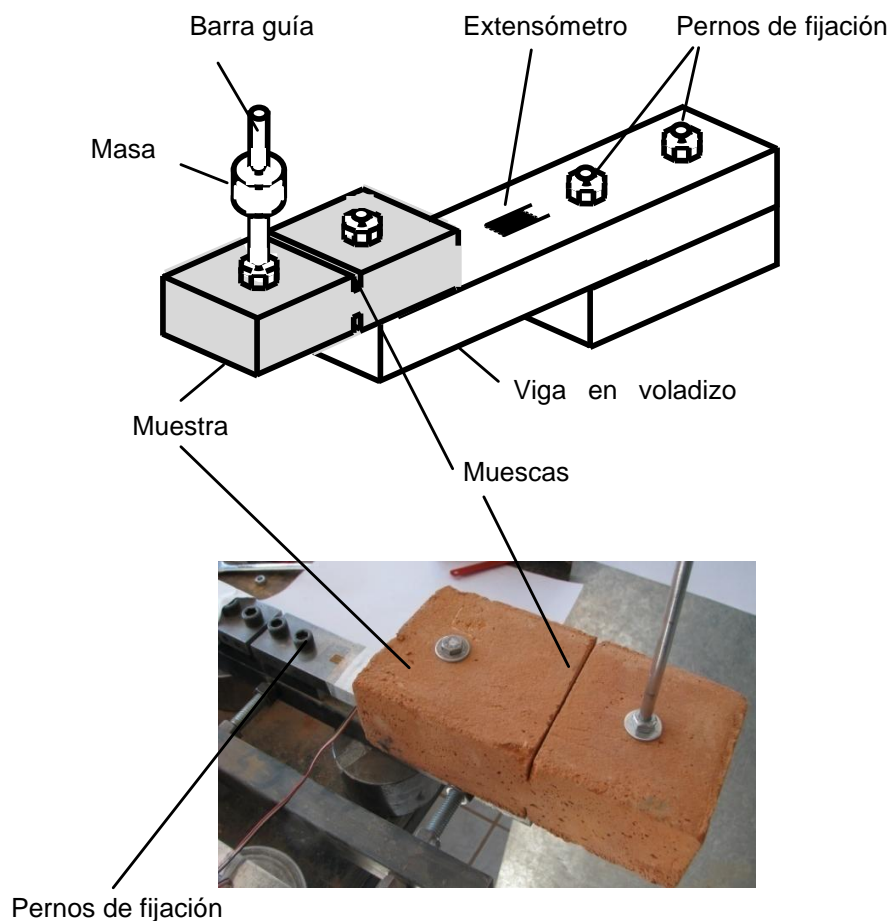


Fig. 4 Representación esquemática del dispositivo propuesto.

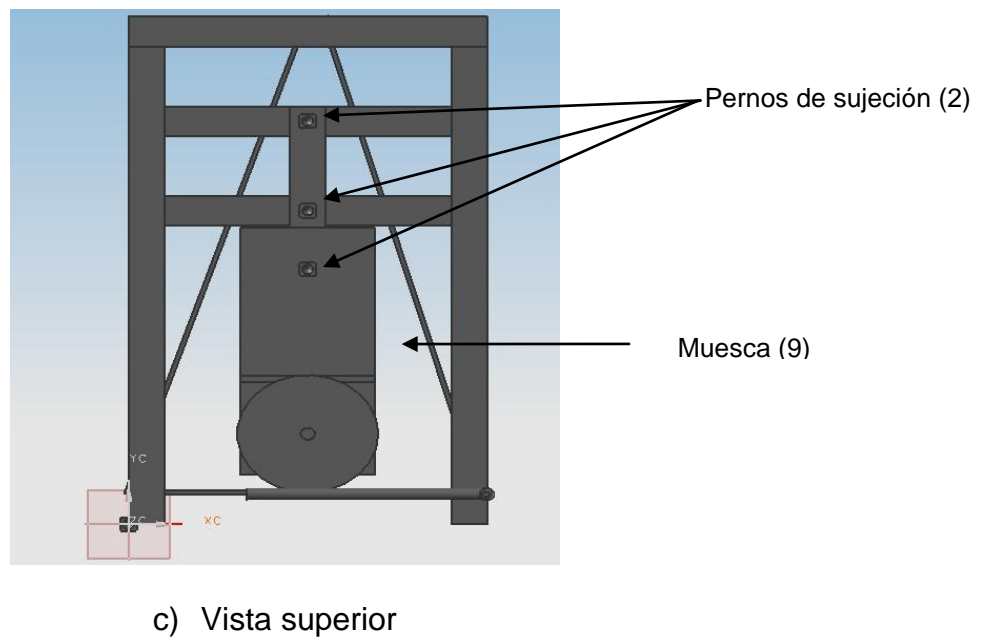
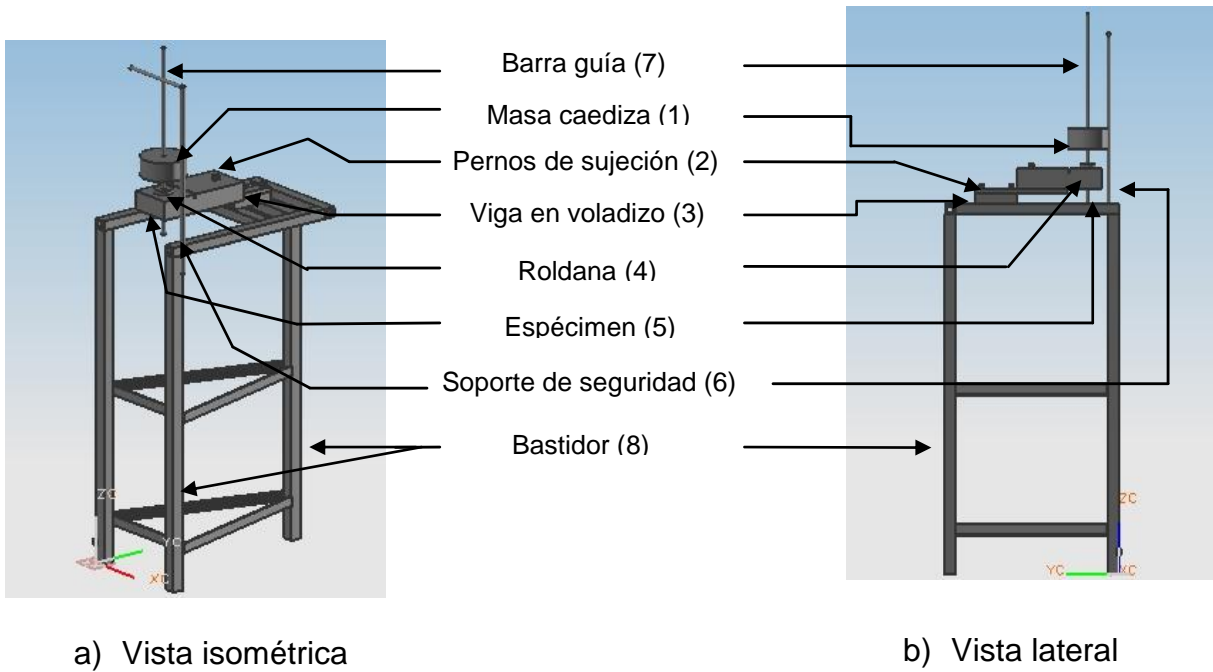


Fig. 5 Prototipo virtual en 3D, diseño en UNX 4

Tabla 1 Características de los componentes del dispositivo de ensayo.

Núm. de Parte	Descripción	Características
1	Masa caediza	Acero (SAE1018).Masa: 1.70 kg
2	Pernos de sujeción	2 pernos para fijar la viga en voladizo (9-52 mm diámetro.).
3	Viga en voladizo	Acero (SAE1018) Dimensiones: 101.6 mm de ancho, 12.7 mm de espesor y 259 mm de largo
4	Roldana	Acero (SAE 1018). Dimensiones: 50 mm de diámetro y espesor de 12.7 mm
5	Espécimen	Ladrillo de arcilla recocida (tabique rojo) Dimensiones: varia según sea cuña o tabique
6	Soporte de seguridad	Barra de acero circular (SAE1018) Sirve como protección al usuario para proteger al momento de la fractura. Dimensiones: 12.7 mm de diámetro con un longitud de 1000 mm
8	Bastidor	PTR cuadrado cal. 14.Las uniones se realizaron con soldadura AWS E 6013 Acero ASTM A-500 Grado B
7	Barra guía	Barra roscada de un extremo para la sujeción del espécimen y lisa por la parte donde de desliza la masa caediza. Dimensiones: 6.35 mm de diámetro el largo es variable según la distancia de prueba
9	Muesca	Las muescas se le generan a cada uno de los especímenes con objeto de sensibilizarlo y tener pruebas relativamente rápidas, de bajo número de ciclos para la falla. Profundidad ≈12.7 mm

En esta tabla se incluyen las propiedades y características generales de los diversos componentes, tales como la profundidad de las muescas realizadas. Es importante mencionar que el costo de los materiales enumerados anteriormente fue menor a \$500.00 pesos, que concuerda con las necesidades planeadas.

La Fig. 6 ilustra una fotografía del equipo completo, al que le falta solamente el espécimen bajo ensayo. El arreglo de la instrumentación empleada

para el estudio de la respuesta dinámica de la muestra ensayada al impacto, será descrito mas adelante.



Fig. 6 Dispositivo de prueba portable para ensayos de fatiga al impacto de ladrillos de arilla recocida

### **3.2 Fabricación del prototipo e instrumentación**

Como se indicó en la sección anterior, se empleó un programa de diseño para visualizar la configuración del equipo. El fin de tener un prototipo virtual es contar con una fase anterior a la fabricación, y analizar los aspectos estéticos, funcionales y técnicos. Esta fase acelera el desarrollo y brinda seguridad para adoptar decisiones entre varias alternativas que estén en perspectiva. Como elementos complementarios, aquellos listados en la Tabla 1, se tienen diferentes elementos sujetadores. En particular, los elementos de sujeción del impactor a la muestra, fueron de 6.35 mm de diámetro (1/4 de pulgada), mientras que los pernos de sujeción de la sufridera al bastidor, fueron de 9.5 mm (3/8 pulgada).

El bastidor está formado mediante un perfil estructural cuadrado (PTR) con dos ejes de simetría y propiedades geométricas favorables para trabajar en tensión, compresión, flexión y torsión (Hernández, 2005). Este tipo de materiales poseen un esfuerzo a la cedencia de 320 MPa y un esfuerzo último de 420 MPa.

La fabricación del dispositivo se realizó de manera unitaria, sin el empleo de aditamentos especiales, excepto una base plana para asegurar el paralelismo de las piernas del dispositivo. Para esta manufactura se emplearon diferentes dispositivos y herramientas (brocas, prensas, limas, lijas, cortadoras manuales, flexómetro, taladro de banco, escuadras, morsa, máquina para soldar, electrodos, arco con segueta y llaves mixtas). Esta fabricación se efectuó en el taller del área de Ing. Electromecánica de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Los planos de fabricación se emplearon durante la etapa constructiva, asumiendo tolerancias para todos los ensambles, del orden de  $\pm 0.5$  mm.

Primeramente se barrenaron los elementos que lo requirieron. Posteriormente se presentaron las partes superiores del bastidor, con ayuda de escuadras y la morsa fue posible garantizar que las uniones fueran a 90°

(escuadradas). Una vez que se tuvieron las partes listas se puntearon las uniones para posteriormente revisar el ángulo entre las uniones.

Una vez que se contó con el ensamble de la parte superior del bastidor, se prosiguió con la base. De la misma manera se presentaron cada una de las piernas de la base y se escuadraron. Posteriormente, se puntearon y por último se aplicó cada uno de los cordones de soldadura en las uniones correspondientes.

Ya que se tuvo el bastidor listo, se montó el soporte empotrado de la viga en voladizo donde se montaran los especímenes. Por último se soldó el soporte de seguridad en uno de los costados del bastidor.



## Capítulo 4 Pruebas preliminares

---

Se describe en este capítulo el desarrollo de los ensayos para el estudio de la fatiga al impacto de los materiales frágiles, empleando la metodología y principios de prueba descritos en el capítulo previo, para el caso particular en el que el elemento sufridera estuvo instrumentado mediante medidores de deformación. Las pruebas descritas en este capítulo tienen como objetivo estudiar la falla de fatiga al impacto de los elementos ensayados, observando la respuesta del elemento instrumentado a los impactos de la masa caediza. Se asume que los parámetros de la humedad, presión atmosférica y temperatura no tendrán alguna repercusión en los resultados, Estos ensayos se efectuaron a diferentes alturas con objeto de aproximar una curva de energía por impacto versus golpes para la falla, asimismo, verificar que los materiales no muestran un indicio de la falla inminente.

Dos tipos de materiales son evaluados en esta etapa. Por un lado se consideran los ladrillos manufacturados en las ladrilleras, y por el otro, ladrillos fabricados en una empresa que aplica principios de fabricación modernos, que incluyen el horneado a gas y el moldeo por extrusión.

### 4.1 Diseño de pruebas

Los ensayos deberán considerar procedimientos normalizados de prueba para la selección del tamaño de los especímenes específicos en una muestra de un lote de productos (ASTM, 2007). En caso necesario, los grupos de muestras deberían clasificarse de acuerdo a sus características dimensionales. Respecto a la aplicación de esta metodología para evaluar la calidad de los productos, el número mínimo de golpes que debería soportar una muestra antes de fallar debería definirse a partir de estudios de campo. Al respecto, durante la preparación de las muestras deberán tomarse las precauciones necesarias para

evitar que las piezas sean dañadas durante su manejo, lo cual es particularmente importante en el caso de sólidos frágiles (Subhash et al., 2008).

### Preparación de la para la prueba de fatiga al impacto

Una vez que se cuenta con los datos anteriores, se identifican cada uno de los especímenes. El siguiente paso se observa en la Fig. 7, que ilustra la forma en que se realizan 2 barrenos; uno para sujeción de la pieza ensayada al elemento denominado sufridera, y el otro para sujetar al impactor a la pieza misma ensayada. Para esto se empleó una broca para concreto de 1/4 de pulgada, a una distancia experimental de 1/5 del largo del ladrillo. Esta distancia resultó conveniente después de haber realizado una serie de pruebas buscando el punto de mayor de sujeción y el punto donde se generara palanca máxima con el impacto.



Fig. 7 Elaboración de los dos barrenos para cada espécimen.

Una vez que se tienen los barrenos en el espécimen se procede a la generación de las muescas a lo largo del ancho de la pieza, como se muestra en la Fig. 8. La muesca deberá quedar alineada con el filo de la viga en voladizo que comprende la sufridera. La forma correcta es montar el espécimen en el dispositivo y marcar la muesca. Una vez trazada la línea de referencia para la elaboración de la muesca, se procede a maquinarla a través de una segueta, sujetando la pieza en un tornillo de banco. La profundidad de la muesca coincidió con la altura de la segueta, esto es, 12.5 mm.



Fig. 8 Preparación de la muestra por cuanto a la elaboración de la muesca transversal.

Una vez completados los pasos anteriores, las piezas se consideran listas para ser ensayadas por fatiga al impacto en el dispositivo generado. Los especímenes son empotrados al extremo de la viga en voladizo del dispositivo y en el otro extremo del espécimen se fija con una barra guía en donde la masa caediza generará el impacto por caída libre.

Se consideraron diferentes factores y niveles para la realización de las pruebas. Como factores se tuvieron el tipo de material de ladrillo y la altura de caída de la masa caediza, como se describe en los apartados siguientes.

#### **4.2 Pruebas a impacto con equipo instrumentado**

Como se indicó líneas arriba, a través de este grupo inicial de pruebas se buscó analizar el efecto de los diferentes golpes sobre la fractura final de la pieza.

El análisis de la respuesta de la pieza a los golpes se obtuvo a través de la instrumentación de la sufridera mediante un extensómetro (*strain gage*). La captura de la señal incluyó un sistema basado en la medición de la deformación mediante un equipo *National Instruments – LABView*. Se emplearon los módulos SCXI-1600 y el módulo para extensometría NI SCXI 1000 DC. La frecuencia de muestreo en estas pruebas fue de 1 kHz. El extensómetro empleado fue un Vishay Micro-Measurements CEA-06-125UW-350.

Los resultados se presentan de acuerdo a los dos grupos de materiales ensayados: los ladrillos hechos en las ladrilleras, y los ladrillos industrializados. Las ladrilleras usan hornos rectangulares, en donde los ladrillos se acomodan de tal suerte que no a todos los alcanza el calor de radiación, y de manera irregular los gases de la combustión sirven para calentar los ladrillos. El combustible empleado en estas instalaciones es combustóleo, el cual se atomiza por vapor, operando bajo un esquema de operación intermitente. De esta manera, los ladrillos exhiben variaciones significativas de coloración, lo que sugiere que los niveles de cocción son bastante diferentes. Sin embargo, estos productos son ampliamente empleados en México para la construcción de casas (Cook, 1998) y fachadas

#### Ladrillos hechos en las ladrilleras tradicionales

El primer grupo de productos de arcilla fueron cuñas hechos de manera tradicional en las ladrilleras. Estos productos fueron ensayados asimismo en el dispositivo instrumentado, para así evaluar la resistencia a la fatiga por impacto de estos productos. Las muestras fueron seleccionadas aleatoriamente a partir de un lote de productos. Se consideró una distancia de caída de 100mm, 150 mm y 200 mm, usando una masa-dardo de 1.765 kg, con lo que la energía de impacto fue de 5.2 J.

### Respuestas en el tiempo

La Fig. 9 muestra un conjunto sobrepuesto de respuestas en el tiempo del transductor de fuerza montado en el dispositivo, para los 23 golpes antes de la falla, en donde la mínima respuesta se observa en el caso del último golpe. Se observa una dispersión de los valores pico, la cual es atribuida a la operación manual del dispositivo por cuanto al posicionamiento de la masa caediza. Los picos consecutivos de las historias presentadas en Fig.9, se presentan en la Fig. 10, indicando un muy pequeño cambio en la respuesta de los ladrillos en la medida que los golpes consecutivos son aplicados. Esto es, no se observa advertencia alguna de la inminente falla del ladrillo. La dispersión de picos antes de la falla presenta una desviación del 3.64% respecto al valor promedio ( $22.4 \mu\epsilon$  en valor absoluto, para un pico promedio de  $616 \mu\epsilon$ ). Por otro lado, la Fig. 11 ilustra el número de golpes antes de la falla para los 16 ladrillos ensayados, sugiriendo una elevada desviación estándar, del orden de 10 golpes, para un promedio de golpes para falla de 9.8. La Fig. 12 muestra una imagen del área fracturada, en donde se puede observar la falta de homogeneidad del material, y la existencia de impurezas y huecos, que podrían justificar de alguna manera la dispersión en las propiedades.

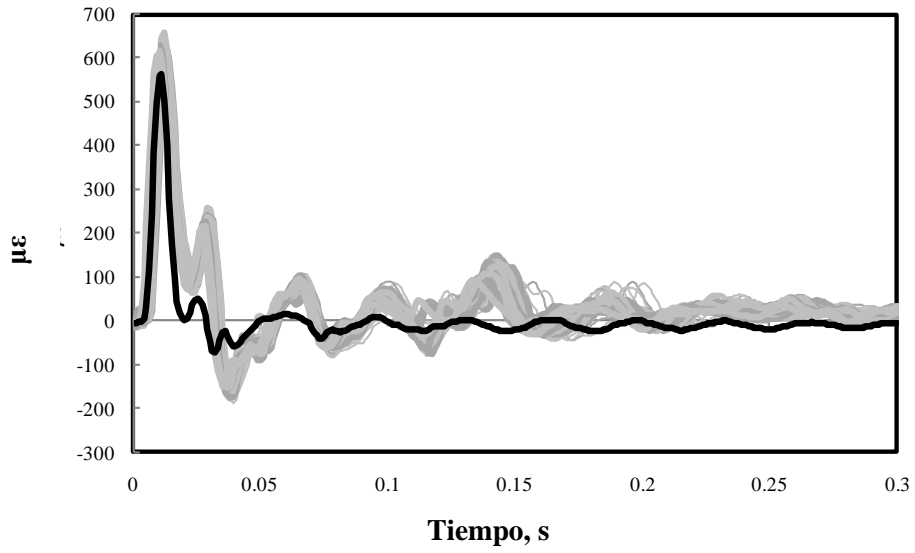


Fig. 9 Muestra de las historias en el tiempo (23 golpes antes de fallar).

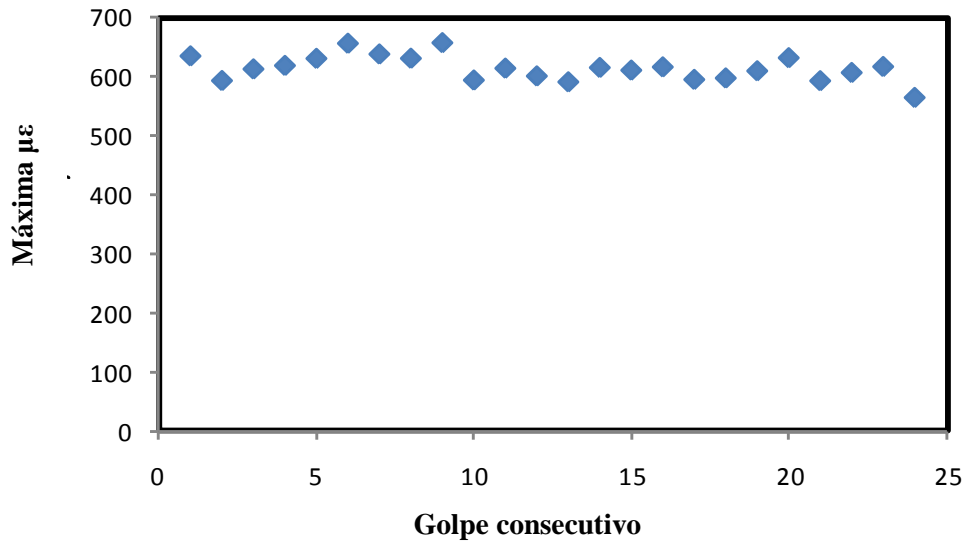


Fig. 10 Deformaciones máximas para las historias en el tiempo de la Fig.9.

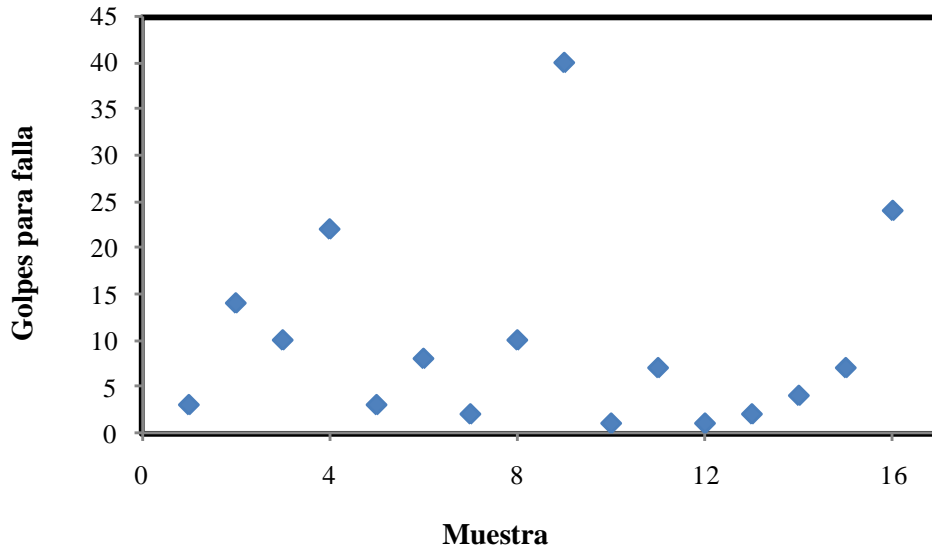


Fig.11 Golpes antes de falla para los ladrillos hechos en ladrilleras tradicionales.

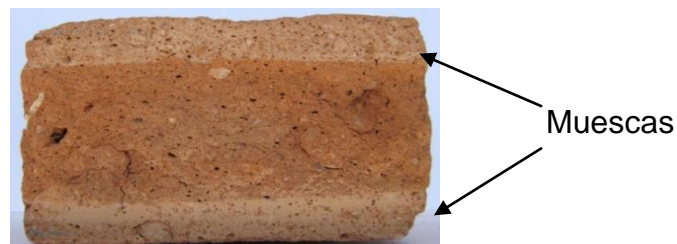


Fig. 12 Muestra de la superficie de fractura para el ladrillo hecho en ladrillera tradicional.

### Ladrillos industrializados

El segundo grupo de ladrillos considerado para la aplicación de la metodología propuesta, consistió de ladrillos manufacturados en empresas tipo industrial. En este caso se consideraron tres distancias de caída: 10, 15 y 20 cm, para la misma masa caediza de 1.765 kg. Tres muestras se seleccionaron para las distancias de 10 y 15 cm, y 5 para el caso de los 20 cm de distancia de caída. Las Fig. 13 a la 15 ilustran las deformaciones pico como una función de los golpes consecutivos, para las diferentes distancias consideradas. Con excepción de la tercera muestra de las pruebas a 10 cm, los picos en estos resultados no

proporcionan indicción alguna de la falla inminente del espécimen. El cociente del número máximo de golpes entre el número mínimo de golpes, fue de 191/133, 103/49 y de 30/4, respectivamente para las distancias de 10, 15 y 20 cm. Con estos datos se ha construido una curva S-N (Altura versus número de golpes para falla), como se muestra en la Fig. 16. Los resultados muestran en esta figura que a pesar de la dispersión resultante, un ajuste logarítmico para estos valores arroja una curva S-N estándar.

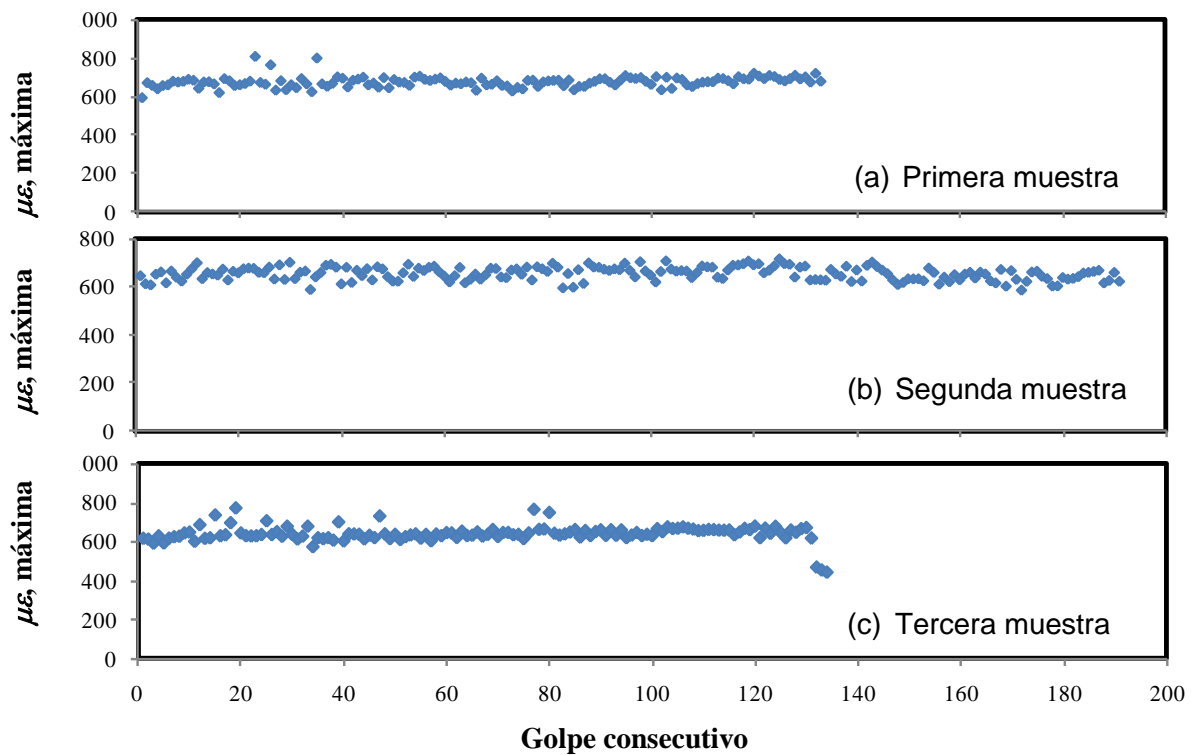


Fig. 13 Ladrillos industrializados – resultados para la altura de 10 cm.



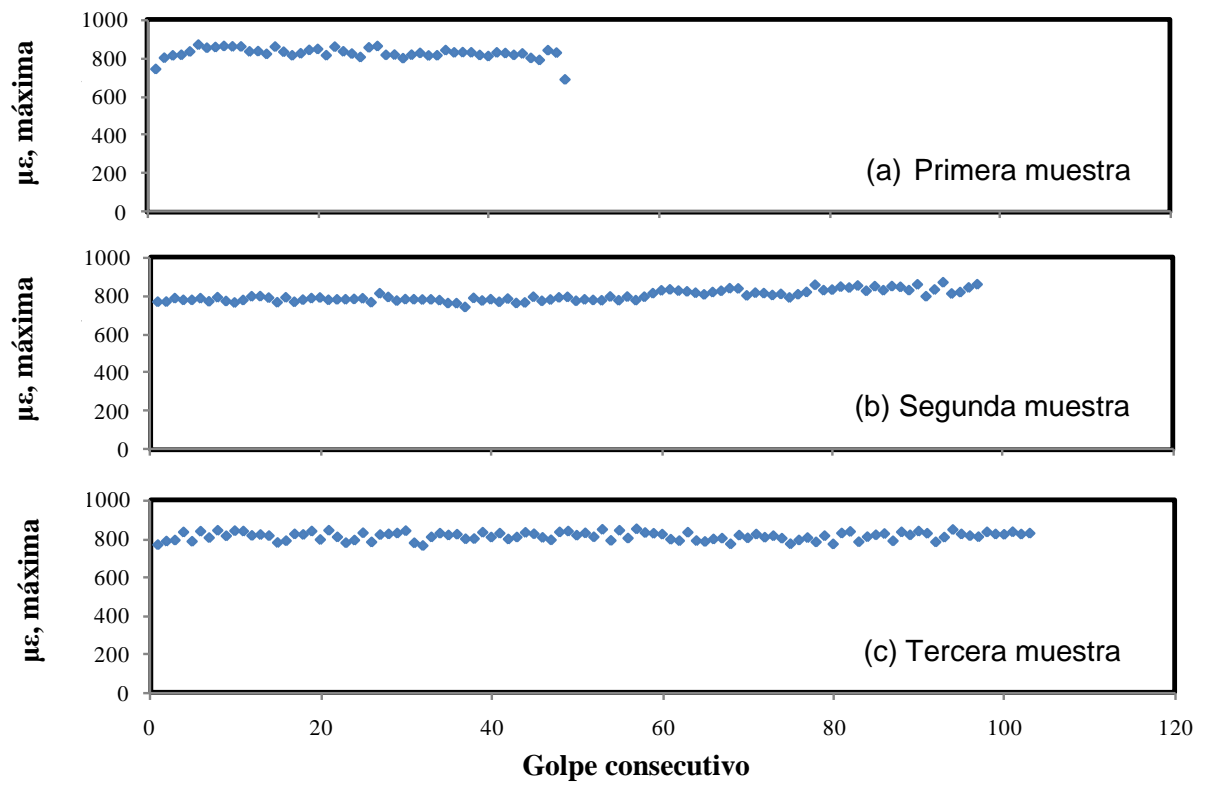


Fig.14 Ladrillos industrializados – resultados para la altura de 15 cm.

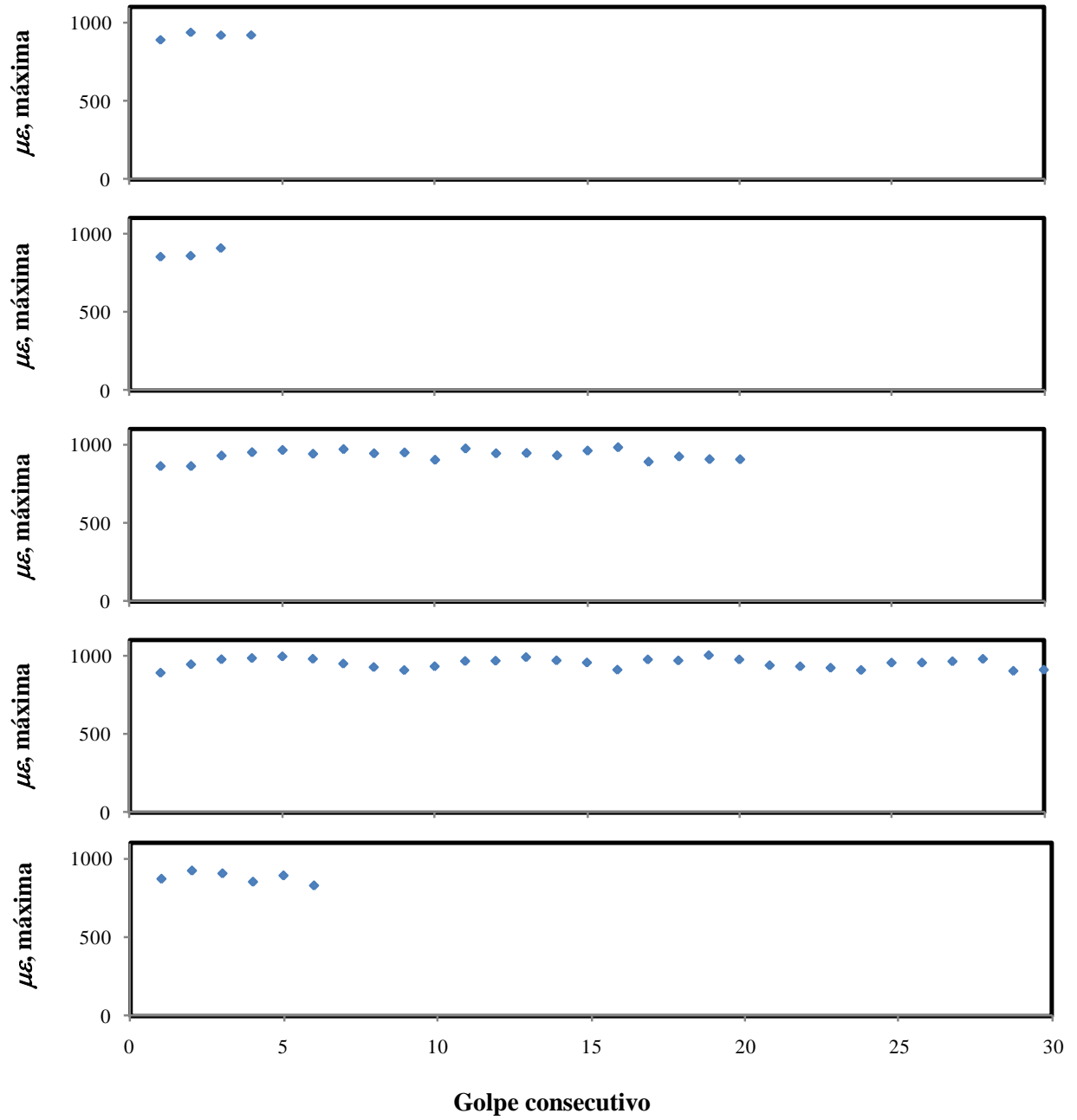


Fig. 15 Ladrillos industrializados – resultados para la altura de 20 cm.

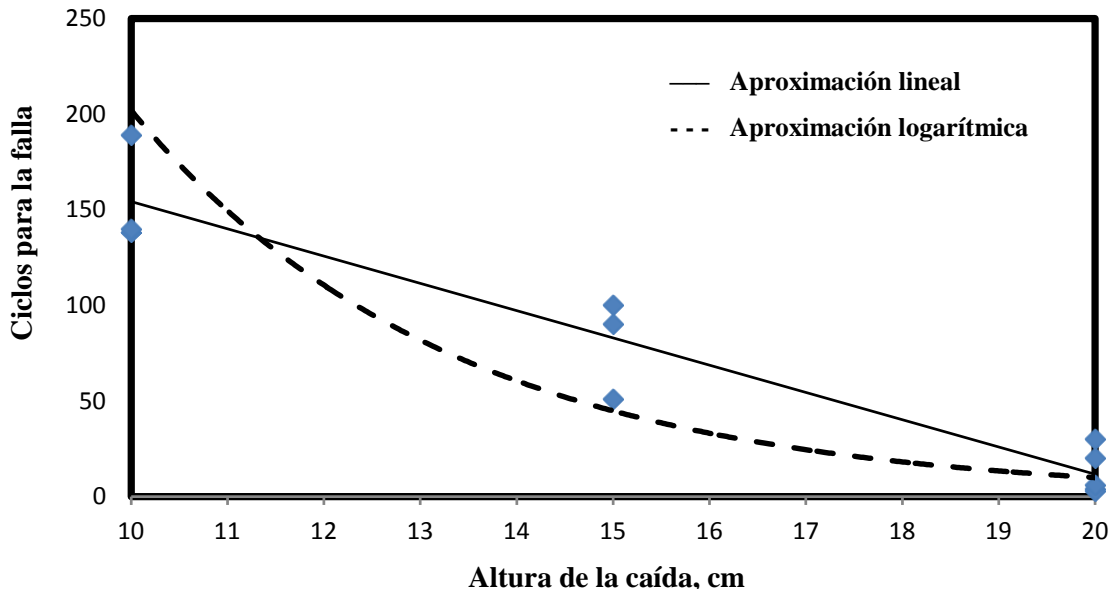


Fig. 16 Ladrillos industrializados—ciclos para falla como una función de la altura de caída.

### 4.3 Discusión

El análisis de las historias en el tiempo del dispositivo instrumentado reveló que no hay una indicación de la inminente falla del ladrillo que está siendo ensayado. Los picos de deformación asociados a los impactos consecutivos en el caso de los ladrillos de ladrillera reveló una pequeña desviación estándar, del orden del 3.6% respecto a la deformación promedio. Los ladrillos hechos bajo condiciones controladas de manufactura, a diferentes distancias de caída de la masa, reveló una relación esperada entre el número de golpes y la altura de caída de la masa. La dispersión en el número de impactos para la falla se considera en línea con lo que ha sido reportado en la literatura por cuanto al comportamiento al impacto de materiales de construcción (Schrader, 1981) (BSI, 1990). Consecuentemente, la calidad de los productos debería basarse en intervalos de confianza, en los cuales un porcentaje dado de productos debería sobrepasar un número mínimo de golpes antes de fallar.

## Capítulo 5 Pruebas de laboratorio

---

En este capítulo se presenta el desarrollo de pruebas que tuvieron como finalidad correlacionar la resistencia a la fatiga por impacto con los procedimientos tradicionales, para evaluar la calidad de los ladrillos, esto es, la resistencia a la compresión y la determinación del módulo de ruptura. Esta potencial correlación entre ambas pruebas es crucial para la diseminación en campo del método de prueba propuesto en esta tesis.

Para contrastar el tipo de recursos necesarios para los distintos procedimientos de prueba, la Fig. 17 muestra la prensa universal que será empleada para las pruebas de módulo de ruptura (*MR*) y resistencia a la compresión (*RC*), junto con el dispositivo desarrollado para los ensayos de fatiga al impacto (*FI*).



Fig. 17 Máquina universal para *RC*, *MR* y dispositivo para *FI*

## 5.1 Diseño de las pruebas

El diseño y desarrollo de las pruebas implica diferentes aspectos, incluyendo lo siguiente:

- Selección de las muestras a ensayar;
- Definición del tamaño de los lotes de estas piezas;
- Procesamiento de las muestras para ensayo;
- Aplicación de las metodologías para el cálculo de las propiedades.

### Selección de las muestras a ensayar y tamaño de los lotes

Como se ha indicado en los capítulos precedentes, la calidad de los productos de las ladrilleras es altamente variable, tanto por el proceso mismo aplicado para la manufactura de los productos como por los materiales empleados. De esta manera, para la selección de los ladrillos a ensayar resultaba importante involucrar diferentes proveedores y horneadas de tales proveedores. Al respecto, se consideró que muestras de al menos cinco horneadas, de diferentes proveedores, deberían ser suficientes para la validación de una correlación potencial entre la fatiga al impacto y la resistencia a la compresión.

Las muestras provinieron de al menos tres fabricantes de la región. La aleatorización en la selección de las muestras a ensayarse a fatiga al impacto y por compresión, fue un factor importante para darle representatividad a los resultados. Al respecto, esta técnica de aleatorizar tiene como propósito dar al investigador la seguridad de que variables extrañas, conocida o desconocidas, no afecten sistemáticamente los resultados del estudio (Weimer, 2002).

En general, se acordó que 5 lotes de los diferentes proveedores de ladrillos deberían ser suficientes para la validación de una correlación potencial entre la

fatiga al impacto y la resistencia a la compresión. El tamaño de cada lote de muestras fue de 50 piezas, empleándose 25 de ellas para estudios de compresión-módulo de ruptura, y las otras 25 para ensayos de fatiga al impacto.

#### Procedimiento de prueba - módulo de ruptura (MR)

Los métodos de prueba para ensaye para determinar el módulo de ruptura y la resistencia a la compresión, están relacionados por cuanto a las muestras empleadas. Esto es, las muestras “quebradas” como parte del procedimiento del ensaye a flexión, con objeto de determinar el módulo de ruptura, fueron empleadas para los ensayos a compresión.

Cada una de las piezas perteneciente a los diferentes lotes fue numerada, procediendo a su pesaje y dimensionamiento. Dadas las irregularidades en la forma geométrica de los ladrillos, se tomaron 4 mediciones de cada dimensión, es decir, 4 largos, anchos y espesores para tener un área promedio de cada pieza.

La imagen de la Fig. 18 ilustra con claridad el procedimiento de prueba. Esto es, la determinación del módulo de ruptura consiste en hacer fallar la pieza a flexión. Para asegurar la aplicación de la carga vertical en la parte media del ladrillo ensayado, se requiere trazar tres líneas transversales en el ladrillo. Una en la cara superior, y dos en la cara inferior respecto a la aplicación de la carga de prueba. Las dos líneas inferiores sirven para centrar los apoyos al ladrillo, a través de un par de ángulos de 1 pulgada. La línea superior sirve entonces para centrar la aplicación de la carga, a través de una barra circular sólida y mediante la prensa. Las líneas inferiores se realizaron a 25.4 mm desde cada uno de los extremos.

La Fig. 19 muestra el acotamiento que se realizó a cada uno de los especímenes que posteriormente se ensayaron. Se puede observar que el

marcado de las muestras incluyó la numeración de las mismas, en ambas partes (A y B). Una de estas partes, una vez fallada la pieza en flexión, fue empleada para el ensayo a compresión.

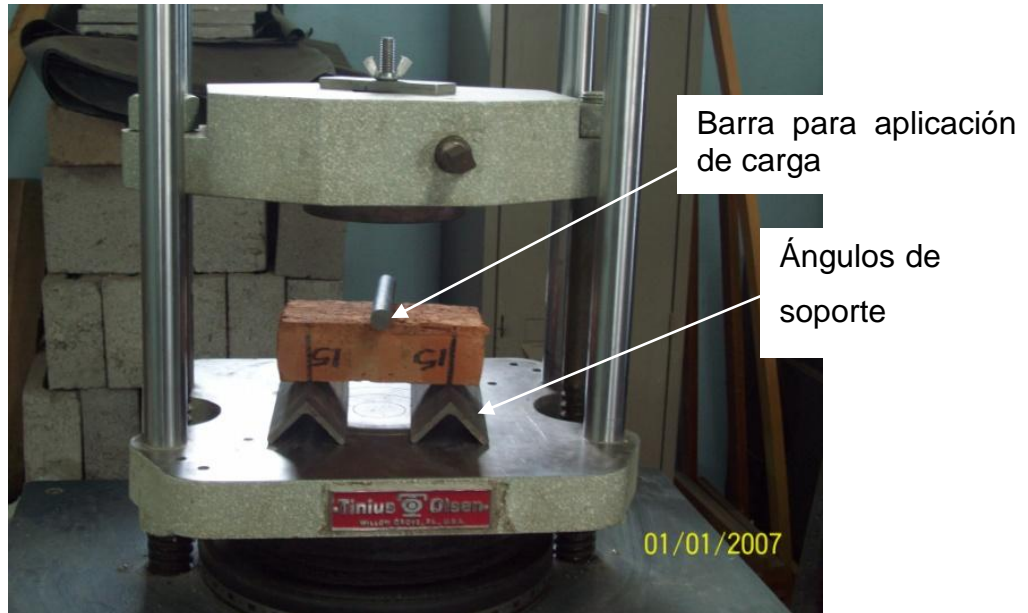


Fig. 18 Arreglo para el ensayo a Flexión de los ladrillos.



Fig. 19 Trazado de las líneas de referencia de la muestra para la prueba de Flexión.

Una vez colocada la pieza en la platina de ensayo de la prensa, se procede a mover el pistón de la prensa universal a una distancia mínima del perfil redondo, esto con objeto de indicarle a la máquina el punto de inicio desde donde se desea

comenzar a aplicar la carga. Enseguida, en el panel de la máquina se presiona el botón de “Zero” que le indica a la máquina poner la carga en cero (Fig. 20).



Fig. 20 Panel de la prensa universal.

Una vez ajustada la carga a cero se procede a la aplicación de la carga, mediante la apertura de la válvula del sistema hidráulico (“LOAD”). Las válvulas de carga (LOAD) y descarga (UNLOAD), se muestran en la Fig. 21. Es importante mencionar que ambas válvulas poseen una escala graduada desde 1 hasta 10, para ajustar las velocidades de carga / descarga. En particular, en el desarrollo de las pruebas se ajustó al nivel 2, que corresponde a una velocidad baja de carga.



Fig. 21 Manivelas de las válvulas de carga y descarga de la máquina universal.



Por cuanto al desarrollo de este tipo de prueba, en la pantalla de la máquina se despliega de manera continua el valor de la carga aplicada. Esta máquina posee la opción de registrar la máxima carga aplicada, ello mediante la función "READ".

El cálculo del módulo de ruptura ( $MR$ ), procede de acuerdo a la siguiente fórmula (ASTM-C67-91):

$$MR = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

donde:

$MR$  : Módulo de ruptura (Kg/cm<sup>2</sup>).

$P$  : Carga máxima (Kg).

$L$  : Distancia entre apoyos de apoyo (cm).

$b$  : Ancho (cm).

$d$  : Peralte (cm).

#### Procedimiento de prueba – resistencia a la compresión ( $RC$ )

La resistencia a la compresión simple depende del tipo de arcilla utilizada para el moldeo del ladrillo, del proceso de manufactura mismo y del grado de cocción alcanzado. Para determinar la resistencia nominal a la compresión de los ladrillos se siguieron los lineamientos de la norma NMX – C -036. (Determinación a la Resistencia a la Compresión de Ladrillos y Bloques para la Construcción.)

Como ya fue mencionado arriba, primero se toman las mitades resultantes de la prueba del Módulo de ruptura. La Fig. 22 muestra las mitades que se obtienen después de la prueba de módulo de ruptura. Una de las mitades de cada pieza se seleccionó de manera aleatoria para realizar la prueba de resistencia a la compresión.



Fig.22 Mitades resultantes de la prueba de módulo de ruptura, a ser empleadas en la prueba a compresión.

Con objeto de tener el área del ladrillo necesaria para el cálculo de la resistencia a la compresión de la muestra, es menester obtener las medidas significativas de las muestras “quebradas” durante el ensayo a flexión. De esta manera, se tomaron tres mediciones para el largo de las mitades de cada una de las piezas, las cuales fueron promediadas para obtener un valor significativo del largo de las piezas. Por cuanto al ancho significativo de las muestras, éste se registró desde el ensayo a flexión.

Al respecto, la Fig. 22 ilustra cómo algunas de las piezas fallaron en diagonal, como resultado de la irregular forma de los ladrillos, que ocasionaba que los apoyos, los ladrillos y la aplicación de la carga en flexión, fueran irregulares.

Una etapa importante del procedimiento normalizado de ensayo a compresión de los ladrillos, consiste en aplicar un polvo para lograr un asentamiento regular entre el ladrillo y la platina de la máquina, y entre el carnero de la prensa y la pieza en la parte superior. Este proceso se conoce como “cabeceado”. El polvo a emplear es arena sílica (bióxido de silicio,  $\text{SiO}_2$ ), con tamaño de partícula de 2 mm. La Fig. 23 muestra este material granular.



Fig. 23 Arena Sílica ( $\text{SiO}_2$ ).

La Fig. 24 muestra la arena sílica en la platina inferior de la prensa, con objeto de crear esta superficie uniforme de apoyo para la pieza ensayada. La Fig. 25 muestra la pieza asentada sobre la arena sílica.



Fig. 24 Platina inferior de la máquina con una cama de arena sílica.



Fig. 25 Posicionamiento de la muestra en la cama inferior de arena sílica.

Por cuanto a la cama superior de arena sílica, la Fig. 26 ilustra cómo se aplica esta capa de polvo en la parte superior del ladrillo asentado sobre la cama inferior de la arena sílica.



Fig. 26 Aplicación de cama de arena sílica en la parte superior del ladrillo.

Como etapa final del proceso de asentado del ladrillo, la Fig. 27 ilustra la colocación de la placa superior de acero sobre la superficie del ladrillo, a través de

la cama de arena sílica. La placa de acero, cubrió de manera total la superficie del ladrillo, al tener un tamaño de 30 x 16 x 2.5 cm. En este proceso, es importante efectuar un movimiento de vaivén de la pieza, con objeto de asegurar el asentamiento uniforme del ladrillo sobre las superficies de carga.

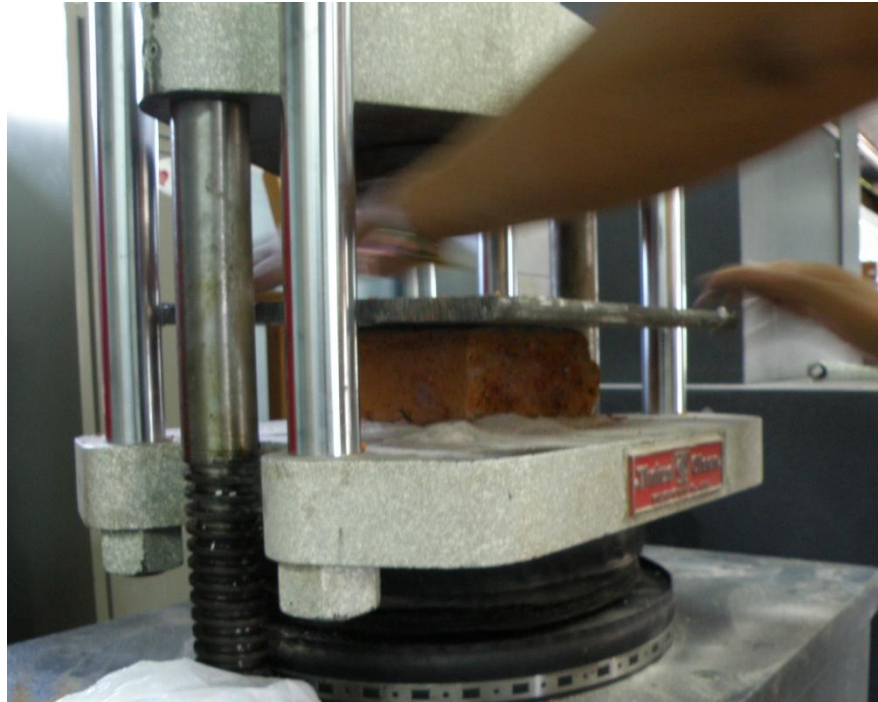


Fig.27 Cabeceo con arena fina para evitar huecos de carga y asegurar una superficie uniforme de carga.

Una vez que se tiene la pieza centrada y asentada en la máquina se procede, de la misma manera que en la prueba de módulo de ruptura, en poner el pistón a una distancia mínima de la placa, ajustando la carga en ceros. Esta puesta en ceros corresponde a la calibración de la celda de carga. El proceso de carga se inicia al abrir la válvula de carga e iniciar la compresión de la pieza ensayada. Durante la prueba es necesaria una observación cuidadosa de la pieza, a todo su alrededor, a fin de detectar la primera aparición de una grieta. Esto resulta porque dadas las características de la falla, no ocasiona ésta una variación

sensible de la carga aplicada. Esto es, la superficie sometida a compresión permanece igual, aún con la pieza fallada.

Para detectar esta primera grieta se deben tener cuando menos un observador que no pierda de vista el espécimen, de tal suerte que en cuanto se percate de que el material presenta esta primera grieta, deberá avisarle al operador de la máquina, para que él pueda registrar la carga a la cual apareció dicha grieta. Este valor de carga será el significativo para el cálculo de la resistencia a la compresión, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$RC = \frac{P}{A} \quad (3)$$

donde:

$RC$  : Resistencia a la primera grieta (Kg/cm<sup>2</sup>)

$P$  : Carga a la primera grieta (Kgf)

$A$  : Área promedio de la muestra (cm<sup>2</sup>).

#### Procedimiento de prueba - fatiga al impacto (FI)

En este grupo de pruebas se realizaron algunos cambios para mejorar la repetibilidad de los resultados. En particular, se empleó una roldana de mayor tamaño en el punto de contacto con el impactor, además de emplear arena sílica para mejorar el asiento de las partes. Esta arena se empleó tanto en la parte superior (en el punto de impacto) como en la inferior (en la interfaz con la sufridera). La Fig. 28 ilustra la roldana empleada, de 50 mm de diámetro.



Fig. 28 Roldana para la prueba de fatiga al impacto.

Algunas pruebas preliminares indujeron que la altura de caída de la masa fuera de 5 cm.

## 5.2 Análisis estadístico de resultados

El objetivo de este desarrollo experimental fue establecer una correlación entre la resistencia a la compresión de las muestras, el módulo de rigidez, y la resistencia de la fatiga al impacto. De esta manera, se requería de una medida de desempeño que permitiera comparar estas diferentes resistencias, que se expresan en unidades diferentes. Esto es, se requería de una medida adimensional que permitiera establecer una tendencia entre los diferentes lotes de muestras.

Por otro lado, se requería establecer una medida de la dispersión de los resultados, como una comprobación de la enorme variación en las propiedades de los materiales.

Por cuanto a la medida adimensional para establecer la correlación entre las diferentes mediciones, se recurrió a normalizar el valor promedio obtenido en cada una de las pruebas, respecto al valor máximo obtenido en ellas. De esta

manera fue posible normalizar todos *i*-ésimos valores de las propiedades ( $v_i$ ), en términos del valor máximo obtenido ( $\mu$ ), obteniendo el valor  $p_i$ :

$$p_i = \frac{v_i}{\mu} \quad (4)$$

La dispersión de las propiedades se midió en términos de los coeficientes de variación ( $CDV$ ), que representa el valor de la desviación estándar ( $\rho$ ), dividida entre el valor promedio ( $\mu$ ), de la siguiente manera:

$$CDV = \frac{\rho}{\mu} \times 100 \quad (5)$$

Finalmente, la comprobación de la correlación entre las diferentes propiedades se obtuvo mediante el coeficiente de correlación, de la siguiente manera:

El cálculo del coeficiente de correlación lineal lo podemos expresar, en puntuaciones diferenciales o centradas mediante la siguiente formula, (Salkind, 1999).

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2} \sqrt{\sum y^2}} \quad (6)$$

Donde:

$$x = X - \bar{X} \quad (\text{El primer valor de la muestra 1 menos la media de la muestra 1})$$

$$y = Y - \bar{Y} \quad (\text{El primer valor de la muestra 2 menos la media de la muestra 2})$$



## Resumen de resultados

Mientras que en esta sección se utilizan los valores promedio obtenidos en cada prueba respectivamente, en el apéndice se listan los valores crudos referentes a cada uno de los ensayos.

Por medio de la metodología de la estadística, se procedió con el análisis de las pruebas efectuadas, para poder observar y evaluar las implicaciones y parámetros acordados del proceso.

Los diferentes lotes ensayados correspondieron a las muestras de los siguientes proveedores:

Lote 1: Qro.

Lote 2: San Nicolás.

Lote 3: Qro.

Lote 4: San Nicolás.

Lote 5: San Nicolás.

Se tuvo cuidado de que los lotes de la misma localidad, procedieran de diferente proveedor.

La Fig. 29 ilustra los valores promedio de resultados de las diferentes propiedades, en función del lote ensayado. Estos resultados sugieren una dispersión importante de todas las propiedades consideradas, en particular en el caso de la fatiga al impacto y del módulo de ruptura. La dispersión de los resultados, en términos del *CDV*, se muestra en la Fig. 30. Estos resultados revelan una gran dispersión de los valores, que alcanzan hasta el 50% en el caso de la resistencia a la compresión y la fatiga al impacto. La resistencia a la compresión es la propiedad que menor dispersión presenta, con un máximo de *CDV* del 42%.

Esta significativa dispersión de las propiedades, comprueba lo señalado en la parte introductoria por cuanto a la poca confiabilidad de estos productos de arcilla cocida, fabricados en condiciones poco tecnificadas.

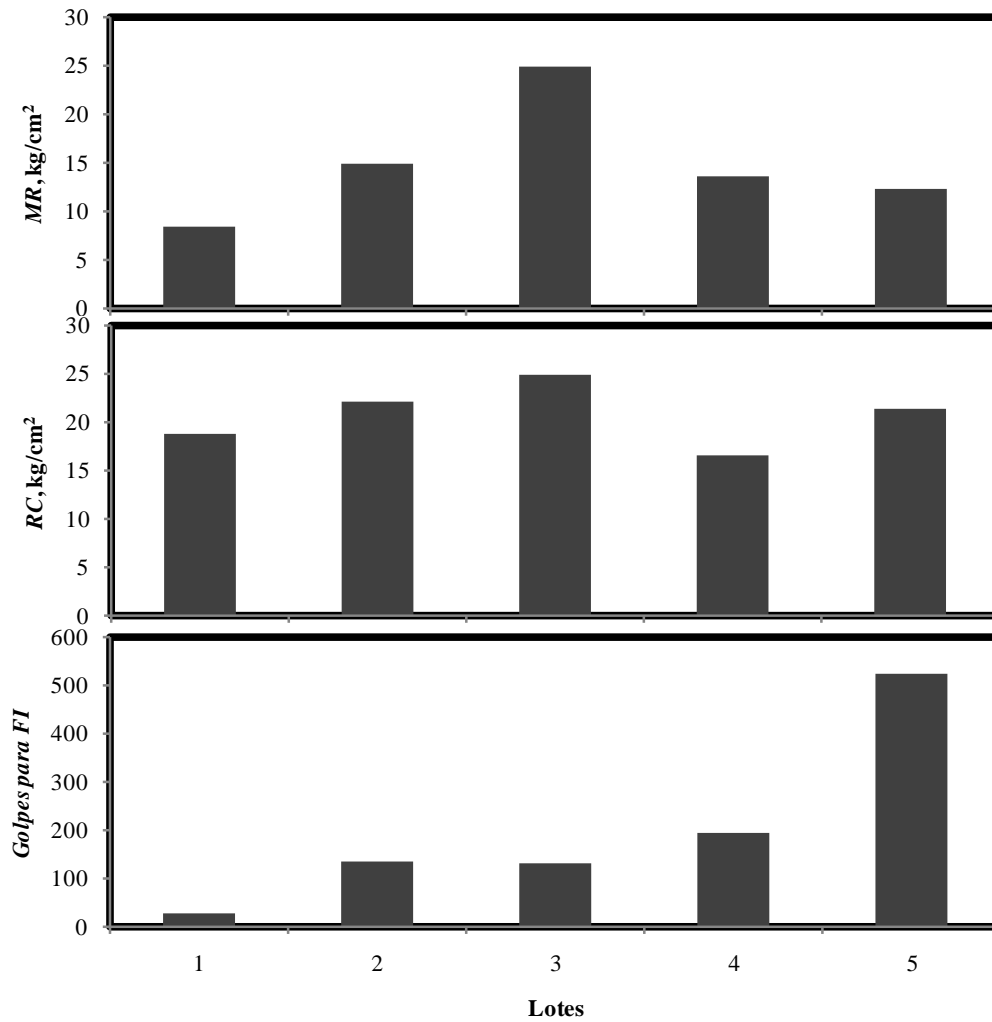


Fig. 29 Resultados de mediciones de *MR*, *RC* y golpes para *FI*, para los cinco lotes muestreados.

Para evaluar la correlación de los resultados se aplica la normalización de las mediciones efectuadas, aplicando tanto la ecuación (4) para la normalización de resultados como la ecuación (6) para medir la correlación de estos valores promedio normalizados. La Fig.31 muestra los valores normalizados para las distintas propiedades respecto a cada uno de los cinco lotes de muestras

ensayadas. De esta manera, lo que resta es calcular la correlación entre los distintos valores representados en la Fig. 31.

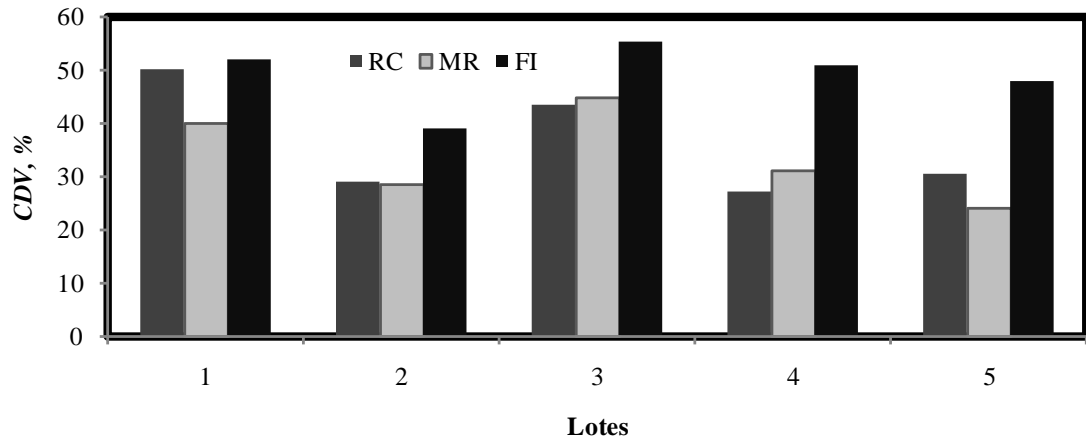


Fig. 30 *CDV* para los diferentes lotes y propiedades.

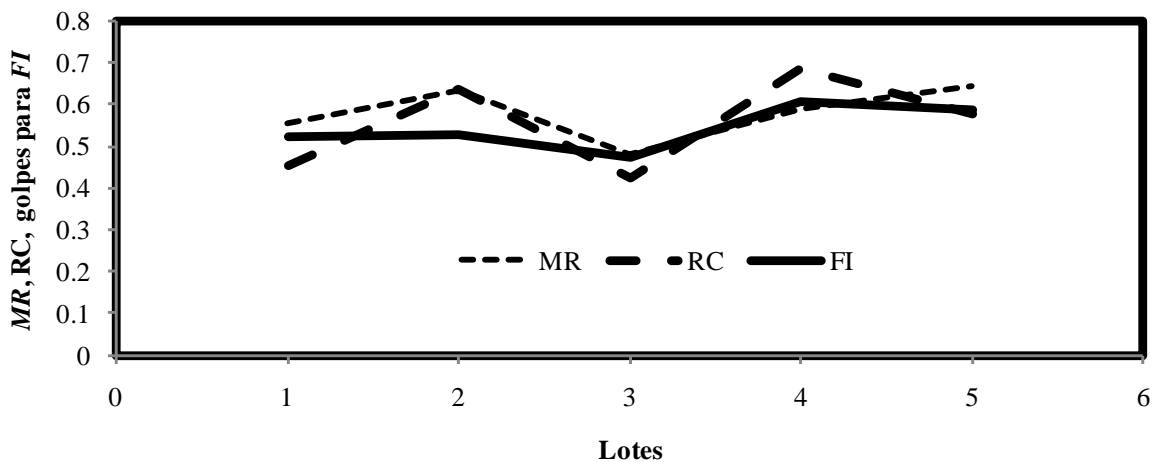


Fig. 31 Valores normalizados al valor máximo, para cada propiedad de las muestras (*MR*, *RC*, *FI*).

La Fig. 32 muestra los valores promedio para las distintas propiedades evaluadas: la parte (a) del *MR* con la *FI*, y la parte (b) de la *RC* con la *FI*. En esta gráfica, se incluye una línea recta de tendencia, la cual resulta con pendiente positiva, de tal suerte que un incremento en *RC* y *MR* se relaciona con un

incremento en la *FI*. Sobre estos resultados, se obtienen los siguientes coeficientes de correlación:

Módulo de Ruptura – Golpes para fatiga al impacto: 0.56

Resistencia a la compresión – Golpes para fatiga al impacto: 0.80

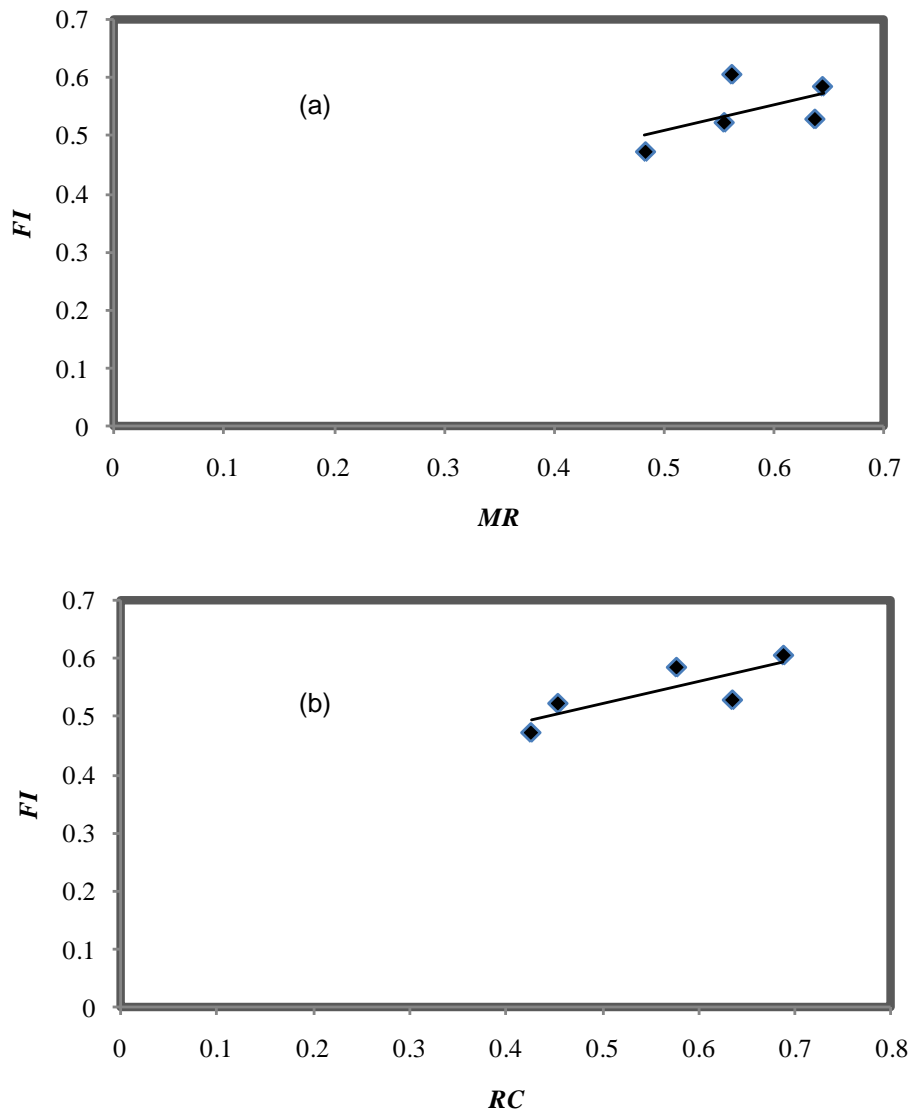


Fig. 32 Correlación de *MR* y *RC* con *FI*.

De esta manera, el Módulo de Ruptura muestra una correlación pobre, mientras que la Resistencia a la Compresión ilustra que efectivamente esta propiedad está relacionada con la resistencia a la fatiga por impacto.

La relativamente pobre correlación entre *MR* y la *FI* se asocia, asimismo, a las enormes diferencias dimensionales de los ladrillos, que implicaron ensayos en los que el asiento de los ángulos se proporcionaba de manera irregular. La correlación relativamente alta de *FI* con la *RC* (0.8), se asocia a que, a pesar de no contar con algún método automático para detectar el inicio de la fractura, el arreglo experimental, en el que se vierte arena sílica para acondicionar las superficies de trabajo, facilitó una mayor homogeneidad en los resultados.

### **5.3 Discusión**

Se ha descrito un proceso relativamente largo de evaluación de las propiedades de los ladrillos, que permitieron obtener cinco cifras promedio para las propiedades de Módulo de Ruptura, Resistencia a la compresión y de Fatiga al Impacto. Estas cifras finalmente obtenidas muestran dos características fundamentales. Por un lado, exhiben una alta dispersión, en particular, la propiedad Módulo de Ruptura. Por otro lado, efectivamente muestran una correlación con la resistencia a la fatiga al impacto.

Se puede decir que existe una gran variedad en los resultados, la cual pudiera deberse a que además de la variación en las propiedades de los ladrillos, producto de las incertidumbres en las propiedades de las materias primas y condiciones aplicadas durante el proceso de fabricación, se tienen variaciones en el proceso de ensayo mismo. Esto ocurre aún con el empleo de las máquinas de ensayo, dado que, de forma particular en el caso del Módulo de Ruptura, las superficies de apoyo durante la prueba, implican diferentes condiciones de prueba para cada ladrillo, en función de sus muy particulares características dimensionales.

Por cuanto a la preparación de las muestras para el ensaye a fatiga por impacto, también se tiene un cúmulo de incertidumbres, en particular, por cuanto a la manufactura de las ranuras de concentración de esfuerzos. Sin embargo, en este caso, una cantidad que permanece esencialmente constante, es la energía impartida a la muestra en cada golpe.

De esta forma, se tienen procesos de prueba con factores dimensionales y de operación que afectan la certidumbre de los resultados. No obstante, la incertidumbre está presente en todas las mediciones y se ha elaborado una metodología de análisis de que alguna manera toma control de las incertidumbres presentes, que produce una correlación fuerte entre la resistencia a la compresión y la resistencia de la fatiga al impacto.

# Conclusiones y Recomendaciones

---

---

En México y en otros países en desarrollo persisten técnicas rudimentarias para la fabricación de ladrillos de arcilla cocida, que contrastan con instalaciones industriales en las que se aplican modernas técnicas de moldeo y de cocimiento. Mientras que en las instalaciones industriales se puede contar con métodos precisos para determinar la calidad de los productos, en las instalaciones tradicionales no se cuenta con procedimientos objetivos para la determinación de la calidad de los productos.

Aprovechando la simplicidad general asociada a los ensayos al impacto de los materiales y piezas, en esta tesis se ha propuesto un dispositivo, y el procedimiento de prueba correspondiente, para calificar la calidad de los productos manufacturados en las ladrilleras. El dispositivo propuesto consiste de una viga en voladizo a la cual se montan las muestras a probar, practicándoles una doble o simple muesca transversa. Las muescas sirven como elevadores de esfuerzo, para facilitar la falla del ladrillo. Se considera un ensayo de fatiga al impacto de bajo número de ciclos, considerando a los ciclos para falla como un indicador de la resistencia de los productos muestreados.

Para el análisis de la respuesta global de los ladrillos a las cargas de impacto, una serie de pruebas se reportan, cuyo objetivo fue el caracterizar el efecto de los golpes consecutivos sobre la respuesta al impacto de los ladrillos, a través de un dispositivo instrumentado. Se consideraron para análisis dos diferentes tipos de ladrillos de arcilla cocida, incluyendo ladrillos hechos en instalaciones tradicionales, y ladrillos hechos en un ambiente industrial moderno. Los resultados de las vidas al impacto de los productos de las ladrilleras revelaron

una dispersión significativa, con relaciones de máximo a mínimo número de golpes para falla.

El análisis de las historias en el tiempo del dispositivo instrumentado reveló además que no hay una indicación de la inminente falla del ladrillo que está siendo ensayado. Los picos de deformación asociados a los impactos consecutivos en el caso de los ladrillos de ladrillera reveló una pequeña desviación estándar, del orden del 3.6% respecto a la deformación promedio. El ensaye de los ladrillos hechos bajo condiciones controladas de manufactura, a diferentes distancias de caída de la masa, reveló una relación esperada entre el número de golpes y la altura de caída de la masa.

Tomando 5 lotes de muestras de 50 piezas cada uno, se procedió al ensayo para determinar los módulos de ruptura, resistencia a la compresión y resistencia de la fatiga al impacto. Los valores medidos de estas propiedades, fueron normalizados al valor máximo obtenido en cada lote, de tal suerte que a cada pieza se le calculó su valor de la propiedad, en un rango de 0 a 1. Una medida adimensional se derivó para análisis, para cada propiedad y lote de muestras, al normalizar el valor promedio con el máximo obtenido. La dispersión en los valores de estas propiedades resultó grande, del orden del 50% al medirla en términos del coeficiente de variación.

El ensaye de la correlación de las propiedades de las piezas ensayadas, uno a uno entre el módulo de ruptura y la fatiga al impacto, y entre la resistencia a la compresión y la fatiga al impacto, reveló que están correlacionadas estas propiedades, al obtener coeficientes de correlación de 0.56 y 0.8, respectivamente. Por lo tanto, el método de ensaye propuesto se considera apropiado para emplearse en la evaluación de la calidad de los productos de arcilla cocida hechos en “ladrilleras”. La resistencia a la compresión resulta la propiedad más significativa y valiosa de estos materiales, al exhibir la



determinación del módulo de ruptura una gran dispersión, al depender en gran medida de las propiedades geométricas de las piezas.

Como recomendaciones de trabajo futuro se considera la posibilidad de ensayar otros materiales de construcción mediante estas técnicas de impacto, al tiempo de diseminar el método presentado entre los fabricantes de ladrillos en Querétaro y el resto de la república.

Por otro lado, y dados los impactos ecológicos asociados a la fabricación de este tipo de productos, se recomienda la sustitución de estos productos por otros ecológicamente amigables.

# Referencias

---

Ashby, M. F. (1999). Material selection in mechanical design. England: Butterworth Heinemann.

Askeland, D. R. (1998). Ciencia e Ingeniería de los Materiales. México. Internacional Thomson Editores, S. A. de C. V.

ASTM (2007) ASTM E122 - 07 Standard Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With Specified Precision, the Average for a Characteristic of a Lot or Process.

BC (2006) Manufacturing of brick. Technical Notes on Brick Construction.

Beattie, G., Molyneaux, TCK, Gilbert, M., and Burnett, S.(2001) Masonry shear strength under impact loading. Proceedings of the 9th Canadian Masonry Symposium (New Brunswick); p 10.

Brozovsky, J. Zach, J., and Brozovsky, Jr., J. (2008). Determining the strength of solid burnt bricks in historical structures. Proceedings of the 9th International Conference on NDT of Art (Jerusalem).

Brozovsky, J., Zach, J. (2007) Non-destructive Testing of Solid Brick Compression Strength in Structures. Proceedings of the IV Pan-American Conference on NDT (Buenos Aires).

BSI. (1990). Methods of test for footwear and footwear materials, Part 4. Other components; Section 4.8 Resistance of heels of ladies' shoes to lateral impact. British Standards Institute. BS 5131: Section 4.8

Chavez,(2008) RH. Pollution reduction and energy savings of a coupled two-kiln system for bricks making. *Environmental Progress*; 27(3): 397 – 404.

Cook, S. (1998) *Mexican Brick Culture in the Building of Texas, 1800s–1980s*. Texas A&M University Press.

Deng, Z., and Li, J. (2006) Mechanical behaviors of concrete combined with steel and synthetic macrofibers. *International Journal of Physical Sciences*; 1(2): 057-066.

Dumitru, I. Marsavina, L., Faur. N (2007). Experimental study of torsional impact fatigue of shafts. *Journal of Sound and vibration*; 308(3-5): 479-488.

Fernández, E., 2009, *Ladrilleras envenenan el aire*, Nota periodística, El Universal, Lunes 16 de Marzo de 2009, <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad/94535.html>.

Ferré J., F. X. Rius (2002) *Técnicas de Laboratorio*.

Fuchs, H. O. y Stephens, R. I. (1980). *Metal Fatigue in Engineering*. New York. John Wiley & Sons, Inc.

González, J. L. (2003). *Metalurgia Mecánica*. México, D. F. Limusa.

Hernández, L. S. (2005). *Diseño de armaduras para techo*. Chapingo, México: Tesis de ingeniería en irrigación, Universidad Autónoma Chapingo.

Hertz, R. W. (1976). *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. Nueva York: John Wiley & Sons, Inc.

Hibbeler, R. (1996). *Mecánica de Materiales*. México. Continental.

Higdon, A., Ohlsen, EH, Stiles, WB, Weese, JA, Riley, WF.(1998) Dynamic Loading. In: Mechanics of materials. John Wiley and Sons. 597-623.

Ho, MH, Hwang, JR, Doong, JL, Fung, ChP. (2004) Impact fatigue of a polycarbonate/acrylonitrilebutadiene- styrene blend. Polymer Engineering and Science; 39(4): 708 – 720.

Jeme, J. R. (2006). Mecánica de Materiales. México: Cengage Learning Latin America.

Juvinall, R. C. (2002). Fundamentos de diseño para Ingeniería Mecánica. México: Limusa.

Juvinall, RC, Marshek, KM. (2003) Impact. In: Fundamentals of Machine Component Design, John Wiley and Sons. P: 135-156.

Kuehl, R. O. (2001). Diseño de experimentos. México: Thomson Learning, Inc.

Laird, C. (1966). Fatigue Crack Propagation. ASTM SPT 415.

López Nolasco, E., 2008, *Mejoran producción en ladrilleras, con aserrín*, Nota periodística, El Sol de Morelia, 17 de diciembre de 2008, <http://www.oem.com.mx/elsoldemorelia/notas/n973466.htm>.

Madayag, A. F. (1969). Metal Fatigue. Theory and Design. Nueva York: John Wiley & Sons, Inc.

Malvar, LJ, Warren, GE. (1987). Fracture energy for three point bend test on single edge notched beams: proposed evaluation. *Materials and Structures*. 20: 440-447.

Marin, J. (1962). *Mechanical Behavior of Engineering Materials*. Englewood Cliffs, N.J. Prentice-Hall, Inc.

Mohammadi, Y., Carkon-Azad, R., Singh, SP, Kaushik, SK (2009) Impact resistance of steel fibrous concrete containing fibers of mixed aspect ratio. *Construction and building materials*; 23(1): 183-189.

Montgomery, D. C. (1991). *Diseño y Análisis de experimentos*. México: Iberoamericana.

Nakayama, J. (2005). Direct Measurement of Fracture Energies of Brittle Heterogeneous Materials. *Journal of the American Ceramic Society* , 48(11): 583-587,200x.

Rivera, Arturo, 2008, *Quemador regenerativo de combustóleo con atomización por vapor y eyección de combustible*, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Fecha de titulación: 21 Noviembre 2008, 122 pp.

Ruiz, G. Ortiz, M., Pandol, A. (2000). Three-dimensional finite-element simulation of the dynamic Brazilian tests on concrete cylinders. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 48; 963-994.

Plasse, BP, Norton, RL.(1999) Dynamic Characterization of Microcellular Urethane Jounce Bumpers Under Impact Conditions. SAE 1999; SAE paper 1999-01-0035.

Salkind, Neil J. (1999) Métodos de Investigación. México. Prentice Hall.

Schrader, EK. (1981). Impact Resistance and Test Procedure for Concrete. Journal Proceedings , 78 (2): 141-146.

Siewert, TA, Manahan, MP, McCowan, CN, Holt, JM, Marsh, FJ, Ruth, EA. (2000). The History and Importance of Impact Testing. E. A. In Siewert TA, Manahan: 2000, editors. Pendulum Impact Testing: A Century of Progress. ASTM STP 1380.

Subhash, G, Maiti, S., Geubelle, PH, Ghosh, D. (2008) Recent Advances in Dynamic Indentation Fracture, Impact Damage and Fragmentation of Ceramics. Journal of the American Ceramic Society; 91(9): 2777-2791.

Ünal, Ö, and Bansal, NP (2000) In-Plane and Interlaminar Shear Strength of a Unidirectional Hi-Nicalon Fiber-Reinforced Celsian Matrix Composite; Report NASA/TM – 2000-210608: 21 pp.

Vlack, L. H. (1977). Materiales para la ingeniería. México, D.F.: Continental.

Weimer, R. C. (2002). Estadística. México: Continental, S.A. de C.V.

Weerheijm, J., Vegt, I., Pedersen, RR, and Sluys, LJ.(2005) An integrated experimental and computational study to the rate effect of concrete in tension. Proceedings of the 12th International Symposium on Interaction of the Effects of Munition with Structures (Delft, the Netherlands).

Zielinski, AJ, Reinhard, HW, and Körmeling, HA.(1981) Experiments on concrete under repeated uniaxial impact tensile loading. Materials and Structures; 14(80): 103-112.

Zhu, J., Hub, S., and Wang, L. (2009). An analysis of stress uniformity for concrete-like specimens during SHPB tests. *International Journal of Impact Engineering*; 6: 61–72.

# Apéndice: Datos estadísticos

Resultados de las pruebas de módulo de ruptura en piezas de tabiques rojos recocidos muestreados en la ciudad de Querétaro.

Muestra	DIMENSIONES (cm)			CARGA (kg)	MR (kg/cm <sup>2</sup> )
	LARGO	ANCHO	ALTO		
1	24.98	12.48	6.03	179	11.76
2	25.43	12.8	6.33	175	10.33
3	25.53	12.73	6.4	135	7.85
4	25.7	12.7	6.45	140	8.12
5	25.53	12.8	6.5	125	6.96
6	25.3	12.4	6.5	55	3.07
7	25.48	12.8	6.6	140	7.89
8	25.2	12.48	6.2	30	2.02
9	25.35	12.5	6.48	200	11.76
10	25,40	12.5	6.5	175	10
11	25.5	12,40	6.4	250	15
12	25.2	12.7	6.6	190	10.25
13	24.9	12.3	6.3	240	14.3
14	25.7	12.5	6.5	120	7
15	25.7	12.3	6.3	85	5.4
16	25	12.5	6.2	120	7.3
17	25.4	12.1	6.5	75	4.5
18	25.3	12.5	6.4	90	5.32
19	25	12.4	6.4	110	6.45
20	25.5	12.5	6.5	120	6.89
21	25.4	12.3	6.3	150	9.35
22	25.5	12.4	6.2	140	8.97
23	25.4	12.5	6.5	190	10.95
24	25.2	12.5	6.4	210	12.1
25	25.5	12.6	6.5	75	4.25
Media					8.3116
Varianza					10.9950223
Desv. Estandar					3.31587429
Cv					0.39894536



Resultados de las pruebas de módulo de ruptura en piezas de tabiques rojos recocidos muestreados en la comunidad de San Nicolás.

Muestra	DIMENSIONES (cm)			CARGA (kg)	MR (kg/cm <sup>2</sup> )
	LARGO	ANCHO	ALTO		
1	18.9	9.3	5.5	240	16.860
2	19.1	9.4	5.3	165	12.358
3	19.2	9.5	5.2	130	10.315
4	19.1	9.4	5.5	290	19.861
5	18.5	9.4	5.5	350	23.483
6	18.8	9.4	5.5	200	13.894
7	18.8	9.5	5.4	240	16.806
8	18.9	9.4	5.5	210	14.378
9	19	9.5	5.5	315	21.516
10	19	9.4	5.5	330	23.245
11	18.9	9.5	5.2	75	5.774
12	18.8	9.4	5.4	145	10.475
13	18.7	9.2	5.4	240	17.305
14	18.7	9.4	5.2	215	16.473
15	18.9	9.5	5.5	182	12.448
16	19	9.5	5.5	120	8.747
17	18.8	9.4	5.5	220	15.373
18	18.9	9.4	5.2	130	10.119
19	19.1	9.5	5.2	190	14.243
20	18.7	9.5	5.4	190	13.312
21	19	9.4	5.4	180	13.428
22	19.2	9.5	5.5	240	16.581
23	18.7	9.5	5.4	230	16.373
24	18.7	9.4	5.4	220	15.721
25	19	9.5	5.2	190	14.931
Media					14.961
Varianza					18.195811
Desv. Estándar					4.26565482
Cv					0.28512309

Resultados de las pruebas de módulo de ruptura, en piezas de tabiques rojos recocidos muestreados en la ciudad de Querétaro.

Muestra	DIMENSIONES (cm)			CARGA (kg)	MR (kg/cm <sup>2</sup> )
	LARGO	ANCHO	ALTO		
1	26.2	12.8	5.4	200	18.973
2	26.5	12.5	5.3	180	14.873
3	26	13	5.2	140	13.341
4	26.5	12.4	4.9	180	14.910
5	26	12.9	5.2	297	21.784
6	26.5	13.3	5.1	170	17.795
7	26.6	13.3	5.5	300	26.551
8	26.5	13.2	5.4	340	34.869
9	26	13	5.5	150	12.770
10	26.5	13.4	5.4	420	41.202
11	26.4	12.9	5.5	210	20.496
12	26.5	12.5	5	300	32.205
13	26	12.9	5.1	160	12.072
14	26.2	13	5.5	220	23.229
15	26.4	12.8	5.5	200	16.893
16	26.7	13.2	5	150	12.334
17	26	13	5.1	420	40.162
18	25	12.9	5	220	16.957
19	26.5	13	5.2	430	44.690
20	26.8	13	5	330	33.023
21	26	12.5	5.5	270	26.354
22	25.8	12.5	5.5	510	51.483
23	26.1	13	5.4	225	22.244
24	26.9	13.4	5.1	330	33.013
25	26.1	12.8	5.4	180	18.730
Media					24.838
Varianza					124.154641
Desv. Estándar					11.1424701
Cv					0.44860205

Resultados de las pruebas de módulo de ruptura, en piezas de tabiques rojos recocidos muestreados en la comunidad de San Nicolás

Muestra	DIMENSIONES (cm)			CARGA (kg)	MR (kg/cm <sup>2</sup> )
	LARGO	ANCHO	ALTO		
1	27.3	13.4	5.8	120	8.893
2	26.7	13	5.9	249	17.885
3	26.4	13	5.9	181	12.801
4	27	13.4	5.8	152	11.126
5	26.7	13.4	5.7	154	11.489
6	25.7	12.8	5.9	161	11.185
7	26.3	12.8	5.8	210	15.581
8	26.5	13	6.1	164	10.913
9	26.4	13	6	102	14.621
10	26.5	13	6	203	13.943
11	26.4	13	6	199	13.653
12	27	12.8	6	166	11.911
13	26.5	13.5	5.8	170	12.064
14	26.8	13.3	6	113	7.702
15	26.6	13	6.5	160	9.405
16	26.4	13.4	6	152	10.104
17	26.5	13	5.9	135	9.587
18	26.3	13	5.9	276	19.416
19	26.7	13.4	6	169	11.418
20	25.9	12.9	5.8	293	21.143
21	26.5	13	6	176	12.088
22	26.4	13.4	5.7	203	14.936
23	26.5	12.9	5.9	188	13.462
24	26.4	12.7	6.2	153	10.032
25	26.4	13.2	5.8	106	7.687
Media					12.522
Varianza					11.4170078
Desv. Estándar					3.3789063
Cv					0.26984096

Resultados de las pruebas de módulo de ruptura, en piezas de tabiques rojos recocidos muestreados en la comunidad de San Nicolás

Muestra	DIMENSIONES (cm)			CARGA (kg)	MR (kg/cm <sup>2</sup> )
	LARGO	ANCHO	ALTO		
1	26.5	13	5.9	144	10.276
2	26.5	13.2	5.4	177	14.850
3	26	13	6	155	10.457
4	26.5	13.2	5.8	157	11.412
5	26.8	13.4	5.8	170	12.329
6	26.5	13.4	5.4	165	13.596
7	26.5	13.1	5.8	135	9.854
8	26.4	13	5.8	218	16.007
9	26.4	13.2	5.5	188	15.079
10	26.4	13.4	5.4	156	12.793
11	26.5	13.1	5.2	151	13.719
12	26.8	13.3	5.8	105	7.705
13	26.4	13	6	278	19.046
14	26.8	13.4	6	127	8.625
15	26.6	13.3	5.8	104	7.511
16	26.8	13	5.7	163	12.631
17	26.5	13.5	5.8	125	8.858
18	26.2	13.2	5.5	172	13.722
19	26.4	13	5.6	178	14.023
20	26.3	13.2	5.7	155	11.520
21	26	13	5.5	218	17.399
22	26.4	13.5	5.8	155	10.956
23	26.5	13.6	5.5	185	14.476
24	26.4	13	5.9	144	10.189
25	26.5	13.1	5.7	127	9.645
Media					12.267
Varianza					8.78294396
Desv. Estandar					2.96360321
Cv					0.2415892

Resultados de las pruebas de compresión simple, en piezas de tabiques rojos recocidos muestreados en la ciudad de Querétaro.

Muestra	DIMENSIONES (cm)			CARGA (kg)	AREA(cm <sup>2</sup> )	RC(kg/cm <sup>2</sup> )
	LARGO	ANCHO	ALTO			
1	10.861	12.48	6.03	900	135.542	6.64
2	15.885	12.8	6.33	1100	203.327	5.41
3	10.104	12.73	6.4	1330	128.627	10.34
4	15.607	12.7	6.45	5090	198.209	25.68
5	11.424	12.8	6.5	1550	146.226	10.6
6	14.113	12.4	6.5	1400	175.000	8
7	5.221	12.8	6.6	1650	66.829	24.69
8	13.921	12.48	6.2	3400	173.735	19.57
9	12.521	12.5	6.48	5650	156.510	36.1
10	12.951	12.5	6.5	3500	161.887	21.62
11	13.076	12,40	6.4	6690	162.143	41.26
12	12.138	12.7	6.6	4250	154.153	27.57
13	13.101	12.3	6.3	4230	161.143	26.25
14	12.454	12.5	6.5	1700	155.678	10.92
15	12.701	12.3	6.3	2020	156.226	12.93
16	12.442	12.5	6.2	3000	155.521	19.29
17	13.910	12.1	6.5	1700	168.317	10.1
18	11.846	12.5	6.4	4620	148.077	31.2
19	12.500	12.4	6.4	3875	155.000	25
20	11.199	12.5	6.5	1880	139.985	13.43
21	13.599	12.3	6.3	3730	167.265	22.3
22	13.999	12.4	6.2	2300	173.585	13.25
23	10.000	12.5	6.5	2515	125.000	20.12
24	15.023	12.5	6.4	2860	187.787	15.23
25	12.458	12.6	6.5	1620	156.977	10.32
Media						18.713
Varianza						88.8381877
Desv. Estándar						9.42540119
Cv						0.50368738

Resultados de las pruebas de compresión simple, en piezas de tabiques rojos recocidos muestreados en la comunidad de San Nicolás.

Muestra	DIMENSIONES (cm)			CARGA (kg)	AREA (cm <sup>2</sup> )	MR (kg/cm <sup>2</sup> )
	LARGO	ANCHO	ALTO			
1	10.219	9.3	5.5	1200	95.035	12.627
2	9.631	9.4	5.3	1000	90.533	11.046
3	10.352	9.5	5.2	1270	98.342	12.914
4	13.248	9.4	5.5	3600	124.535	28.908
5	8.327	9.4	5.5	1960	78.275	25.040
6	11.465	9.4	5.5	2330	107.769	21.620
7	10.253	9.5	5.4	1800	97.399	18.481
8	9.696	9.4	5.5	2780	91.146	30.500
9	9.120	9.5	5.5	1970	86.639	22.738
10	9.120	9.4	5.5	2820	85.725	32.896
11	9.977	9.5	5.2	2060	94.779	21.735
12	10.106	9.4	5.4	1900	95.000	20.000
13	11.373	9.2	5.4	2800	104.630	26.761
14	9.085	9.4	5.2	2260	85.402	26.463
15	10.335	9.5	5.5	1920	98.181	19.556
16	10.005	9.5	5.5	2050	95.047	21.568
17	13.695	9.4	5.5	2600	128.731	20.197
18	12.516	9.4	5.2	1700	117.652	14.449
19	8.884	9.5	5.2	1970	84.398	23.342
20	11.985	9.5	5.4	2100	113.859	18.444
21	13.601	9.4	5.4	2000	127.846	15.644
22	9.150	9.5	5.5	2690	86.923	30.947
23	9.424	9.5	5.4	1640	89.523	18.319
24	8.748	9.4	5.4	2870	82.232	34.901
25	11.116	9.5	5.2	2700	105.603	25.567
Media						22.187
Varianza						41.3015954
Desv. Estandar						6.42663173
Cv						0.28966364

Resultados de las pruebas de compresión simple, en piezas de tabiques rojos recocidos muestreados en la ciudad de Querétaro.

Muestra	DIMENSIONES (cm)			CARGA (kg)	ÁREA (cm <sup>2</sup> )	RC (kg/cm <sup>2</sup> )
	LARGO	ANCHO	ALTO			
1	13.901	12.8	5.4	5568.5	177.928	30.133
2	11.725	12.5	5.3	3000	146.561	20.380
3	13.579	13	5.2	1752.3	176.528	9.908
4	12.770	12.4	4.9	2768.7	158.343	16.770
5	12.000	12.9	5.2	3200	154.800	20.672
6	13.803	13.3	5.1	6100	183.585	36.440
7	13.183	13.3	5.5	1474.6	175.332	8.862
8	12.977	13.2	5.4	5600	171.302	34.188
9	13.829	13	5.5	5900	179.782	33.116
10	13.404	13.4	5.4	9800	179.608	58.542
11	10.003	12.9	5.5	3960	129.034	30.784
12	14.000	12.5	5	4417	175.000	26.292
13	14.401	12.9	5.1	2030	185.773	10.754
14	13.575	13	5.5	4175	176.481	24.380
15	12.667	12.8	5.5	4076	162.138	22.873
16	13.860	13.2	5	5720	182.952	32.099
17	12.895	13	5.1	3957	167.629	23.604
18	11.709	12.9	5	3919	151.047	25.966
19	15.127	13	5.2	3412	196.651	18.197
20	23.031	13	5	1745	299.399	6.070
21	14.086	12.5	5.5	4900	176.069	26.923
22	15.675	12.5	5.5	5990	195.938	31.180
23	14.000	13	5.4	5550	182.000	30.495
24	13.408	13.4	5.1	3409	179.672	19.883
25	13.000	12.8	5.4	4241	166.400	26.098
Media						24.984
Varianza						117.872525
Desv. Estándar						10.8569114
Cv						0.43454861

Resultados de las pruebas de compresión simple, en piezas de tabiques rojos recocidos muestreados en la comunidad de San Nicolás.

Muestra	DIMENSIONES (cm)			CARGA (kg)	AREA (cm <sup>2</sup> )	RC (kg/cm <sup>2</sup> )
	LARGO	ANCHO	ALTO			
1	15.5	13.4	5.8	2500	207.7	12.037
2	15	13	5.9	4700	195	24.103
3	17	13	5.9	5300	221	23.982
4	14	13.4	5.8	3100	187.6	16.525
5	14	13.4	5.7	2500	187.6	13.326
6	14	12.8	5.9	3186	179.2	17.779
7	13	12.8	5.8	3494	166.4	20.998
8	14.0375	13	6.1	3252	182.4875	17.820
9	15.1	13	6	2809	196.3	14.310
10	12.425	13	6	3200	161.525	17.516
11	14.65	13	6	2268	190.45	19.811
12	15.35	12.8	6	2196	196.48	11.909
13	13.8	13.5	5.8	2500	186.3	11.177
14	14.5	13.3	6	1945	192.85	13.419
15	14.1	13	6.5	2071	183.3	23.243
16	13.15	13.4	6	1756	176.21	10.086
17	11.8	13	5.9	3476	153.4	11.298
18	15.975	13	5.9	6141	207.675	22.660
19	13.75	13.4	6	3043	184.25	16.516
20	14.75	12.9	5.8	2500	190.275	13.139
21	14.125	13	6	2630	183.625	14.323
22	13.7	13.4	5.7	3400	183.58	18.521
23	15.025	12.9	5.9	4500	193.8225	23.217
24	14.275	12.7	6.2	2800	181.2925	15.445
25	15.325	13.2	5.8	2369	202.29	11.711
Media						16.595
Varianza						20.1566361
Desv. Estandar						4.48961425
Cv						0.27054544



Resultados de las pruebas de compresión simple, en piezas de tabiques rojos recocidos muestreados en la comunidad de San Nicolás.

Muestra	DIMENSIONES (cm)			CARGA (kg)	AREA(cm <sup>2</sup> )	MR (kg/cm <sup>2</sup> )
	LARGO	ANCHO	ALTO			
1	13.875	13	5.9	3116	180.375	17.275
2	10.925	13.2	5.4	2700	144.21	18.723
3	14.625	13	6	5720	190.125	30.085
4	13.25	13.2	5.8	2800	174.9	16.009
5	15.15	13.4	5.8	3440	203.01	16.945
6	15.525	13.4	5.4	5460	208.035	26.246
7	16.4	13.1	5.8	1850	214.84	29.916
8	13.525	13	5.8	5260	175.825	20.707
9	15	13.2	5.5	4100	198	30.189
10	14.525	13.4	5.4	3300	194.635	16.955
11	12.625	13.1	5.2	5400	165.3875	32.651
12	12.125	13.3	5.8	2810	161.2625	12.470
13	12.875	13	6	2670	167.375	17.425
14	11.675	13.4	6	2115	156.445	15.952
15	10.25	13.3	5.8	2338	136.325	13.519
16	14.3	13	5.7	3500	185.9	17.150
17	16.2	13.5	5.8	3900	218.7	18.827
18	9.175	13.2	5.5	4500	121.11	17.833
19	13.6	13	5.6	3564	176.8	37.156
20	13.275	13.2	5.7	3500	175.23	20.158
21	13.125	13	5.5	3724	170.625	19.974
22	12.275	13.5	5.8	3426	165.7125	21.826
23	15.9	13.6	5.5	3900	216.24	20.674
24	13.825	13	5.9	2700	179.725	18.036
25	10.675	13.1	5.7	4100	139.8425	29.319
Media						21.441
Varianza						42.4941273
Desv. Estándar						6.51875198
Cv						0.3040349

Resultados de las pruebas de fatiga al impacto a 5 cm, en piezas de tabiques rojos recocidos muestreados en la ciudad de Querétaro.

Muestra	DIMENSIONES (cm)			# DE GOLPES A 5 cm
	LARGO	ANCHO	ALTO	
1	25.7	12.5	6	49
2	25.2	12.6	6.2	45
3	25	12.5	6.4	42
4	24.5	12.7	6.5	23
5	25.5	12.5	6.6	20
6	25	12.3	6.4	19
7	25.5	12.7	6.5	18
8	25.2	12.5	6.1	24
9	25.35	12.2	6.3	13
10	25.4	12.4	6.4	18
11	25.5	12.3	6.5	28
12	25.6	12.6	6.7	7
13	25.7	12.2	6.2	15
14	25.7	12.4	6.4	47
15	25.9	12.5	6.2	45
16	25.2	12.4	6.7	44
17	24.6	12.4	6.5	32
18	27	12.8	6.3	29
19	25.4	12.3	6.2	27
20	25.8	12.1	6.6	32
21	25	12.5	6.1	8
22	25	12.7	6.3	21
23	25.3	12.3	6.4	17
24	25.4	12.2	6.4	14
0.6	25.5	12.4	6.1	4
Media				25.640
Varianza				178.74
Desv. Estándar				13.36936797
Cv				0.521426208

Resultados de las pruebas de fatiga al impacto a 5 cm, en piezas de tabiques rojos recocidos muestreados en la comunidad de San Nicolás.

Muestra	DIMENSIONES (cm)			# DE GOLPES A 5 cm
	LARGO	ANCHO	ALTO	
1	18.5	9.2	5.3	203
2	18.5	9.1	5.4	130
3	19	9.4	5.4	112
4	19.4	9.3	5.3	144
5	18.4	9.2	5.2	126
6	18.7	9.6	5.5	115
7	18.9	9.1	5.5	139
8	18.7	9.2	5.4	155
9	19.2	9.4	5.2	99
10	19.1	9.4	5.4	89
11	19	9.3	5.5	86
12	18.5	9.5	5.3	95
13	18.6	9.6	5.3	217
14	18.9	9.2	5.5	250
15	18.9	9.4	5.6	140
16	18.8	9.2	5.3	159
17	18.5	9.5	5.4	90
18	18.4	9.7	5.5	60
19	19	9.1	5.5	122
20	18.4	9.5	5.2	42
21	18.7	9.3	5.4	88
22	18.4	9.3	5.4	92
23	19	9.3	5.5	220
24	18.8	9.5	5.3	170
25	18.3	9.2	5.5	167
Media				132.400
Varianza				2664.583333
Desv. Estandar				51.61960222
Cv				0.38987615

Resultados de las pruebas de fatiga al impacto a 5 cm, en piezas de tabiques rojos recocidos muestreados en la ciudad de Querétaro.

Muestra	DIMENSIONES (cm)			# DE GOLPES A 5 cm
	LARGO	ANCHO	ALTO	
1	26.3	12.5	5.2	140
2	26.5	12.3	5.4	159
3	26.4	12.5	5.3	30
4	25.2	12.3	5.2	97
5	26.1	12.4	5.3	100
6	26.6	12.9	5.4	160
7	25.6	12.5	5.3	236
8	26	12.9	5.2	81
9	26.4	13.2	5.4	50
10	26.6	13.5	5.3	278
11	25.5	13.4	5.6	156
12	26.4	12.9	5.2	87
13	26.5	13.1	5.5	196
14	26.4	13.1	5.4	257
15	26.5	12.5	5.4	156
16	26.4	13.2	5.3	47
17	26.3	12.9	5.6	81
18	26.5	12.7	5.2	87
19	26.4	12.8	5	109
20	26.6	13.4	5.6	206
21	26.2	13.1	5.4	240
22	26	12,7	5.3	145
23	26	12.5	5.2	113
24	26.8	13.3	5.8	30
25	26.5	13.2	5	40
Media				131.240
Varianza				5312.023333
Desv. Estándar				72.88362871
Cv				0.55534615

Resultados de las pruebas de fatiga al impacto a 5 cm, en piezas de tabiques rojos recocidos muestreados en la comunidad de San Nicolás.

Muestra	DIMENSIONES (cm)			# DE GOLPES A 5 cm
	LARGO	ANCHO	ALTO	
1	27.3	13.2	5.4	77
2	26.8	13.3	5.2	295
3	26.5	13.2	5.8	242
4	26.9	13.5	5.8	68
5	27	13	5.5	243
6	26.4	13.1	5.4	253
7	26.5	13.4	5.8	276
8	26.8	13.4	5.7	260
9	26.4	13.3	5.5	259
10	27	13.1	5.7	320
11	27.3	13.2	5.3	146
12	26.7	13.6	5.8	294
13	27.1	13	6	276
14	26.8	13.4	5.8	24
15	26.5	13.6	6.1	200
16	26.3	13.2	5.9	211
17	26.7	13.5	6	18
18	27.3	13.6	6.2	267
19	27.3	13.8	5.3	80
20	27	13.6	5.7	40
21	26.8	13.8	5.8	299
22	26.4	13	6	233
23	26.4	13.3	5.4	200
24	26.3	13.5	6.1	46
25	26.8	13.3	5.7	236
Media				194.520
Varianza				9860.26
Desv. Estándar				99.29884189
Cv				0.5104814

Resultados de las pruebas de fatiga al impacto a 5 cm en, piezas de tabiques rojos recocidos muestreados en la comunidad de San Nicolás.

Muestra	DIMENSIONES (cm)			# DE GOLPES A 5 cm
	LARGO	ANCHO	ALTO	
1	26.4	13.2	5.7	392
2	26.5	13.4	5.5	196
3	26.7	13.1	6.1	140
4	26.2	13.5	5.6	756
5	26.5	13.3	5.9	532
6	26.2	13.5	5	392
7	26.6	13.2	5.3	728
8	26.5	13.1	5.5	756
9	26.8	13	5.8	280
10	26.3	13.3	5.9	588
11	26.8	13.2	5.9	728
12	26.7	13.4	5.5	756
13	26.3	13.4	5.6	280
14	26.4	13.5	5.8	812
15	26.7	13	5.7	476
16	26.3	13.1	6	728
17	26.7	13.6	5.6	896
18	26.5	13.5	5.4	140
19	26.4	13.2	5.4	420
20	26.8	13.1	6	84
21	26.3	13.5	5.9	840
22	26.2	13.3	5.7	588
23	26.6	13.4	6	252
24	26.5	13.1	5.8	616
25	26.4	13.2	5.4	756
Media				525.280
Varianza				63130.29333
Desv. Estándar				251.2574244
Cv				0.478330461