

## Caracterización probabilística de cerámicas para mamposterías de ladrillos cerámicos huecos en Misiones, Argentina

Duarte, Javier Alberto <sup>1\*</sup> (<https://orcid.org/0009-0000-7651-7389>, [Javier.duarte@fio.unam.edu.ar](mailto:Javier.duarte@fio.unam.edu.ar)),

Seufert, Ariana <sup>1</sup> (<https://orcid.org/0009-0009-5696-1293>, [ariana.seufert@fio.unam.edu.ar](mailto:ariana.seufert@fio.unam.edu.ar)),

Boni, Antonio E. M. <sup>1</sup> (<https://orcid.org/0009-0005-8542-7293>, [antonio.boni@fio.unam.edu.ar](mailto:antonio.boni@fio.unam.edu.ar))

Ares, Alicia E. <sup>2</sup> (<https://orcid.org/0000-0001-8011-6019>, [a.e.ares@gmail.com](mailto:a.e.ares@gmail.com))

Möller, Oscar <sup>3</sup> ([moller@fceia.unr.edu.ar](mailto:moller@fceia.unr.edu.ar))

<sup>1</sup> *universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil. LIC. Misiones, Argentina.*

<sup>2</sup> *IMAM, UNaM, CONICET, FCEQyN, Félix de Azara 1552, N3300LQD, Posadas, Argentina.*

<sup>3</sup> *instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad Cs.Ex., Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina*

---

### Resumen

Las decisiones definidas en el ámbito de las estructuras resistentes repercuten en un porcentaje considerable del costo global de los sistemas constructivos de viviendas sociales en general. Para el caso de la Provincia de Misiones se evalúan sistemas usuales conformados por mamposterías de Ladrillos Cerámicos Huecos (LCH) cuyas prestaciones estructurales en principio carecen de cuantificación en el medio local y regional. Con la finalidad de obtener un mejor aprovechamiento de los materiales, y lograr costos reducidos, los cerramientos de mampostería son incorporados al análisis estructural generando modificaciones en los paradigmas establecidos para el análisis de los estados tensionales en elementos resistentes de los sistemas constructivos en estudio. El presente trabajo presenta la caracterización de las cerámicas componentes de mamposterías LCH de la zona de Misiones, Argentina. Para ello se ensayaron probetas de la cerámica utilizada en la fabricación de los ladrillos y también otras probetas talladas directamente de LCH. Se efectuó un análisis de estadística descriptiva y se obtuvieron parámetros característicos para ser utilizados en modelos de análisis estructural por Método de Elementos Finitos (MEF). Con estos resultados se podrán aplicar procesos de optimización de estos sistemas constructivos con restricciones de confiabilidad que permitan minimizar la función costo de este.

**Palabras Clave** – Cerámicas, Mamposterías, Probabilidad, Estadística, caracterización, materiales.

---

### Abstract

The decisions defined in the field of resistant structures have an impact on a considerable percentage of the global cost of social housing construction systems in general. In the case of the Province of Misiones, the usual systems made of hollow ceramic brick masonry (HCT) are evaluated, whose structural performance is not quantified in the local and regional environment. To obtain a better use of materials and to achieve reduced costs, masonry enclosures are incorporated to the structural analysis, generating modifications in the paradigms established for the analysis of the stress states in resistant elements of the construction systems under study. The present work presents the characterization of the ceramic components of LCH masonry in Misiones, Argentina. For this purpose, specimens of the ceramic used in the manufacture of bricks and other specimens carved directly from LCH were tested. A descriptive statistics analysis was carried out and characteristic parameters were obtained to be used in structural analysis models by Finite Element Method (FEM). With these results it will be possible to apply optimization processes of these construction systems with reliability restrictions that allow minimizing their cost function.

**Keywords** – ceramics, masonry, probability, statistics, characterization, materials.

## SÍMBOLOS

- $G_F$ : Energía de fractura.  
 $h_c$ : ancho de fractura.  
 $\sigma_i$ : tensión normal en la dirección  $i$ .  
 $f'$ : Resistencia característica  
 $f_m$ : Resistencia en valor medio  
 $C.V.$ : Coeficiente de Variación  
 $f_m$ : Resistencia a compresión/tracción en valor medio.  
 $P_i$ : Carga máxima aplicada.  
 $A_i$ : Área de probeta sometida a carga.  
 $\Delta l_i$ : Desplazamiento medido por extensómetro.  
 $l_0$ : longitud de referencia inicial de las probetas.  
 $n$ : número de probetas.  
 $\varepsilon_m$ : Deformación específica en valor medio.  
 $RCPC_{crít}$ : Valor de resistencia en probetas cilíndricas en estado crítico (fisuración).  
 $RCPP_{crít}$ : Valor de resistencia en probetas prismáticas en estado crítico (fisuración).  
 $RCPC_{máx}$ : Valor de resistencia máxima en probetas cilíndricas (Rotura).  
 $RCPP_{máx}$ : Valor de resistencia máxima en probetas prismáticas (Rotura).

---

## Introducción

La provincia de Misiones aparece en la historia argentina caracterizada desde sus inicios por la demanda habitacional, la cual fue resuelta por diferentes medios de forma empírica a lo largo de la historia de la provincia.

El campo de estudio de la situación edilicia de las viviendas unifamiliares es extenso, debido a la variedad de ofertas de materiales componentes en los sistemas de albañilería: Ladrillos macizos, bloques cerámicos huecos, bloques de hormigón, como los más comunes. El problema de estos sistemas constructivos radica en la falta de estudios, a nivel regional, de caracterización del comportamiento mecánico de la mampostería.

Los sistemas de mamposterías, como parte resistente en la estructura de un cuerpo edilicio, fueron estudiados con el paso de los años de manera general y en varias ocasiones que su contacto con elementos de hormigón armado mejora la calidad resistente global del sistema como se comprobó en [1].

En términos de caracterización de propiedades mecánicas, y con un número adecuado de muestras a ensayar, se puede implementar un análisis estadístico a efectos de establecer medidas de tendencia central y dispersión, así como definir el tipo de distribución de probabilidad que se ajusta mejor para cada parámetro analizado de las propiedades mecánicas.

En el contexto de la comprobación de una hipótesis referida a los sistemas de mampostería de la región, mediante la implementación de un programa experimental, se analizaron las variables principales de las propiedades mecánicas de los ladrillos cerámicos huecos utilizados en la región en cuatro situaciones: (i) La primera corresponde a la cerámica componente de dichos ladrillos; (ii) La segunda corresponde al ladrillo LCH estudiado en forma aislada a efectos de compresión y tracción por flexión; (iii) La tercera situación es un arreglo de ladrillos y morteros de junta vertical y horizontal que conforman una “celda de mampostería” en la cual se analiza su comportamiento a compresión;

(iv) Por último, se analiza la situación de un panel de mampostería de dimensiones normalizadas analizado en compresión excéntrica sobre base rígida y compresión centrada sobre base flexible.

En la actualidad se han estudiado casos de riesgo como en [2], en donde se concluye que las dimensiones del muro deben limitarse cuando la acción sucede en forma perpendicular a su plano. En [3] se menciona la importancia de establecer parámetros obtenidos en el ámbito experimental a efectos de configurar adecuadamente los procedimientos de diseño de este tipo de sistemas.

En [4] se establece la importancia de utilizar modelos de mampostería confinada para reducir riesgos de fallas en problemas referentes a la acción sísmica, además de establecer categorías de muros en función del uso de refuerzos de hormigón armado y las direcciones de estos refuerzos. Este documento muestra de forma práctica la importancia que adopta el confinamiento de muros en la resistencia final del sistema constructivo.

En [5] se hace mención del hecho que las mamposterías confinadas son concebidas como una opción estructural económica que permite aprovechar de forma estructural los cerramientos de un sistema constructivo y sumar su resistencia a la respuesta global del conjunto. A su vez en [6] se establecen niveles de ductilidad y se clasifica para los sistemas de mamposterías como de baja ductilidad dada su condición de elemento confinado, y en función a esto se modifican en estos casos ciertos coeficientes de respuesta al entender que se considera un diseño post-elástico.

El objetivo general del trabajo es caracterizar en forma estadística las propiedades mecánicas de los materiales componentes de ladrillos cerámicos huecos (LCH) de la zona, además de proponer un aporte a la metodología de estudio de materiales estructurales. Una vez obtenidos los resultados del análisis estadístico, en trabajos futuros servirán como insumos para procedimientos de optimización con restricciones de confiabilidad, que dan lugar a un proceso basado en la probabilidad de falla de los elementos estudiados.

En el presente trabajo se presentaron resultados correspondientes a la primera etapa de análisis y caracterización del material cerámico componente de ladrillos LCH. Los resultados serán utilizados como parámetros de configuración de modelos numéricos que puedan reproducir con precisión y convergencia aceptables lo ocurrido en el ámbito experimental.

## **Metodología**

La metodología del presente trabajo consistió en obtener datos experimentales de los parámetros mecánicos representativos del material componente del elemento conocido como ladrillo cerámico hueco (LCH) en las escalas de análisis mencionadas y caracterizarlos de manera probabilística. Las escalas presentadas aquí son aquellas que involucraron el estudio de la cerámica en diferentes comportamientos, específicamente las dos primeras etapas de análisis experimental (correspondiente a la materia prima procesada y al producto en calidad de “mampuesto”).

Con respecto a los materiales componentes se constituye por acillas de río y de yacimientos ubicados en diferentes puntos del departamento Libertador Gral. San Martín. Además, se incorporan porcentajes de áridos finos y residuos de aserrado de la madera con el objetivo de establecer medidas

de control para el fenómeno de contracción de la arcilla la cual se intensifica en el proceso de cocción de los ladrillos.

La metodología de fabricación de las probetas y de los ladrillos ensayados comprende: en primer lugar, el proceso de extracción de las arcillas, en diferentes tipologías, y su traslado a la planta productiva. El estacionamiento de las arcillas se mantiene al menos un año, luego se inicia la etapa de preparación en donde se mezclan las arcillas mediante equipos de mezclado, a continuación, se vuelve a estacionar por 7 días, para luego ser extruido en diferentes moldes de acero y cerámica. Por último, se pasa a la etapa de secado al ambiente y quemado en horno continuo a temperatura media de 900 °C para luego proceder a sector de embalaje en pallets y envoltura con filme y su posterior distribución.

Respecto a las propiedades físicas de las muestras ensayadas, se pudo constatar en laboratorio según [13] que el valor medio de la densidad aparente es del orden de menos de 20000 N/m<sup>3</sup>.

Se realizaron ensayos sobre probetas cerámicas a compresión, obteniendo una estimación experimental de los siguientes parámetros: módulo de elasticidad de la cerámica, carga de rotura, acortamiento en rotura, y relación tensión – deformación.

Luego se realizaron ensayos sobre probetas cerámicas a tracción, obteniendo una estimación experimental de los parámetros: energía de fractura, resistencia a tracción, carga en rotura, alargamiento en rotura, y relación tensión – deformación.

Cada resultado de estos ensayos fue procesado para la obtención de valores característicos representativos del material o del elemento analizado según el caso dado considerando intervalos de confianza del orden 90%. Los datos de partida del análisis son: geometría de las muestras, valores de carga y desplazamiento en función del tiempo. El interés por comparar resultados en probetas de cerámica y en ladrillos LCH ensayados en forma aislada sin juntas de mortero, se basa en el objetivo de comparar el comportamiento del material en forma pura y aquel que sucede dentro del elemento moldeado (ladrillo extruido). La ecuación (1) a continuación descripta establece la manera de considerar dicho tratamiento de caracterización, tomando como ejemplo la tensión de rotura de las piezas ensayadas:

$$f' = f_m \cdot (1 - 1.64 \cdot C.V.) \quad (1)$$

El mismo criterio se aplica a los diferentes parámetros obtenidos de los ensayos experimentales como ser deformaciones, modulo elásticos, y energía de fractura, entre otros. Cabe destacar que el factor de confianza adoptado fue de 95% para los ensayos de las etapas 1 y 2.

A partir del registro experimental de valores de fuerza aplicada y desplazamientos medidos se calcularon los siguientes parámetros mecánicos: tensión, deformación específica y, finalmente, se estimaron módulos de elasticidad obtenidos del análisis de las curvas de tensión-deformación específica para cada una de las probetas ensayadas. A continuación, se realiza una descripción detallada de los ensayos realizados.

### **Ensayos de caracterización de la materia prima.**

Se presenta a continuación una síntesis de los resultados obtenidos en ensayos realizados en el Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC) de UNaM en probetas de cerámica moldeadas y cocidas en

forma específica. Dicho proceso de fabricación fue desarrollado de la misma manera replicando el mismo proceso de fabricación de ladrillos LCH en fábrica.

Las muestras fueron elaboradas en dos formas: cilíndricas y prismáticas. Este criterio se adoptó a efectos de poder comparar resultados y establecer el orden de magnitud que tiene la forma en el comportamiento mecánico.

Se debe tener en cuenta que la forma de las paredes de la cerámica en el ladrillo LCH es prismática rectangular. Por otra parte, es sabida la condición de la cerámica como material frágil similar al hormigón, por lo tanto, se moldearon pequeñas probetas de relación lado/diámetro en el orden de 2/1.

Las probetas de cerámica fueron ensayadas utilizando un adaptador de prensa para tamaños del orden de 4 cm de lado dentro de los cuales se colocaron las probetas tanto cilíndricas como prismáticas como se puede apreciar en la figura 2. Respecto de la velocidad de carga se adoptó como valor ensayar las probetas a un valor medio de velocidad de carga del orden de 7 Kg/seg. Esta velocidad aseguró el resultado de aplicarle a la probeta una carga de tipo monótonica. La tabla 1 muestra valores estadísticos basados en procedimientos de caracterización geométrica de las probetas ensayadas. Los resultados fueron obtenidos a partir de lotes de más de 20 probetas.

**Tabla 1. Resumen estadístico de caracterización de probetas cilíndricas y prismáticas.**

| <b>Probetas cilíndricas</b> | <b>alto [mm]</b> | <b>Diámetro [mm]</b> | <b>Probetas prismáticas</b> | <b>alto [mm]</b> | <b>Lado [mm]</b> |
|-----------------------------|------------------|----------------------|-----------------------------|------------------|------------------|
| Media                       | 47.53            | 24.38                | Media                       | 21.31            | 9.38             |
| Desvío típico               | 0.78             | 0.23                 | Desvío típico               | 0.44             | 0.33             |
| Variación %                 | 1.64 %           | 0.94 %               | Variación %                 | 2.06 %           | 3.5 %            |
| Sesgo                       | 0.217            | -0.185               | Sesgo                       | 0.094            | 0.507            |
| Curtosis                    | 0.417            | -0.104               | Curtosis                    | 0.329            | 0.579            |

La figura 1 muestran dos lotes de probetas ensayadas en el LIC. Con respecto a las probetas prismáticas se adoptó el criterio de moldearlas con dimensiones similares a las paredes de los ladrillos LCH (del orden de 8 mm en valor medio) a efectos de darle contexto a los resultados obtenidos.

La caracterización geométrica se realizó con calibres mecánicos de lectura digital con precisión de décima de mm. Se aplicó el criterio usual en estos casos que consistió en efectuar mediciones efectivas en diferentes puntos y aristas de la probeta para luego calcular el valor medio de altura y diámetro en el caso de probetas cilíndricas, y altura y lados en el caso de probetas prismáticas.

Con respecto a las probetas ensayadas a tracción fueron talladas de los mismos ladrillos LCH que fueron ensayados a compresión. En estos experimentos se registraron no solo valores de carga, sino

también valores de alargamientos de las probetas hasta el punto de máxima resistencia etapa de y luego se confeccionaron las curvas de ablandamiento.

El objetivo fue cuantificar la energía de fractura de la cerámica componente de ladrillos LCH para utilizarse en futuros procedimientos de simulación numérica.



**Figura 1. Ensayo de resistencia a Compresión en probetas de cerámica.**

Con respecto a la cantidad de probetas ensayadas en el caso de las probetas cilíndricas se recibieron 25 probetas de las cuales se descartaron 3 unidades por no contar con la relación geométrica adecuada, mientras que en el caso de las probetas prismáticas se descartaron 2 unidades de 30 en total.

En cuanto al intervalo de confianza adoptado fue de 95% para establecer el cálculo de los valores característicos en cada parámetro analizado. Con esto se trató de contemplar la variedad de resultados obtenidos en los ensayos realizados.

Luego de obtenidos los resultados experimentales directos (carga y desplazamientos) se procedió a calcular valores de tensiones y deformaciones específicas para cada lote de datos depurados y filtrados. Luego se construyeron gráficos de relación constitutiva en donde se aproximó la pendiente de dichas curvas constitutivas con el objetivo de efectuar una estimación del módulo de elasticidad, además de estudiar la secuencia de toma de carga hasta la rotura y los fenómenos que pudieran suceder durante el procedimiento.

En la figura 2 se observa una vista general del ensayo y los equipos e instrumentales utilizados. El equipo consta de una prensa para ensayos de tracción y compresión accionada en forma mecánica mediante un motor con caja reductora.

La prensa utilizada para las probetas cerámica es de tipo manual y tiene adaptado un equipo de accionamiento electromecánico que permite trabajar en velocidades de presión del orden de los 4 MPa/min. Con respecto a la velocidad de avance de la prensa fue adoptada en función de generar un



estado de carga monotónico, para evitar distorsiones en el resultado por efecto dinámico de aplicación de la carga.

La adquisición de datos se efectúa en forma digital con capacidad de 5 Hz en términos de frecuencia de muestreo disponible (para extensómetros y celdas de carga). El software de procesamiento de datos fue elaborado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones.



**Figura 2. Ejemplos de ensayos de resistencia a Compresión/Tracción en probetas de cerámica.**

La metodología adoptada para el procesamiento de los resultados se detalla en las ecuaciones presentadas a continuación:

$$f_m = \sum_{n=1}^k \frac{(P_i)}{n} \quad (2)$$

$$\varepsilon_m = \sum_{n=1}^k \frac{(\Delta l_i)}{n} \quad (3)$$

$f_m$ : Resistencia a compresión/tracción en valor medio.

$P_i$ : Carga máxima aplicada.

$A_i$ : Area de probeta sometida a carga.

$\Delta l_i$ : Desplazamiento medido por extensómetro.

$l_0$ : longitud de referencia inicial de las probetas.

$n$ : número de probetas.

$\varepsilon_m$ : Deformación específica en valor medio.

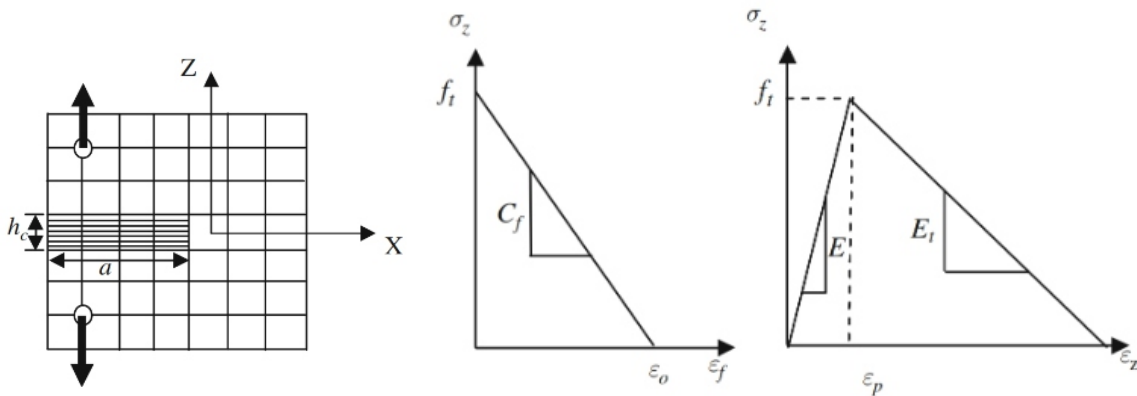
Como criterio, la misma expresión se aplica a la cerámica y evalúa la resistencia característica para un cuantil 5% y distribución normal.

$$f = f_m (1 - 1.64 CV) \quad (4)$$

$f_m$ : valor medio de la tensión.

CV: Coeficiente de variación de la muestra.

Para analizar la resistencia a tracción, se adoptó el modelo propuesto por Hillerborgh en [8] (ver figura 3). En esta propuesta se desarrolló junto a otros investigadores en trabajos paralelos un modelo de bandas en el cual la zona de fractura es aproximada mediante un sistema de fisuras paralelas que son continuamente separadas en el elemento finito, se establece un ancho de la zona de fractura que se asume constante ( $h_c$ ) a fin de evitar la sensibilidad por tamaño de malla, Esto asegura que la disipación de energía debida a fractura por unidad de área sea constante y que sea equivalente a la energía de fractura del material,  $G_F$ .



**Figura 3. Energía de fractura  $G_f$  según el modelo de [Hillerborg, 1978].**

En la figura 7 se puede apreciar una imagen de los ensayos efectuados para completar el cálculo de la energía de fractura del material cerámico, La energía de fractura  $G_F$  definida como la energía consumida en abrir la fisura de una banda viene dada por:

$$G_F = h_c \int_0^{\epsilon_0} \sigma_z(\epsilon) d\epsilon \quad (5)$$

La integral representa el área bajo la curva esfuerzo –deformación, y si se adopta una relación entre estas, se tiene:

$$G_F = \frac{f_t^2}{2 C_F} h_c \quad (6)$$

$h_c$ : ancho de zona de fractura

$G_F$ : Energía de fractura de la probeta.

$f_t$ : tensión de tracción en la probeta.



Donde las variables pueden ser extraídas a partir de la curva tensión-deformación registrada en forma experimental siendo  $C_F$  la pendiente de la curva de ablandamiento luego de ocurrida la rotura de la probeta.

Los ensayos se filmaron con cámara de alta velocidad dejando como dato particular que a una velocidad de 3 cuadros por segundo no se puede apreciar en detalle el desarrollo de la línea de fisura en la probeta, señalando el alto margen de fragilidad que presenta el material cerámico, Es posible pensar que la resistencia a tracción de la cerámica juegue un papel importante en el comportamiento mecánico del mampuesto entre otros factores.

## **Análisis y discusión de resultados.**

### **Resistencia a compresión del material cerámico.**

Los resultados obtenidos en estos ensayos de compresión se resumieron en la tabla 2 presentando estadísticos de cada parámetro estudiado para el caso de probetas cilíndricas. Tomando como base la expresión propuesta para ladrillos en [7] que dice “La resistencia especificada o característica a la rotura a compresión de la sección neta del ladrillo hueco se evaluará sobre una muestra representativa, compuesta de 10 o más unidades”.

Los modos de rotura en probetas cilíndricas se observan en las figuras 5 a) b) y c). Entre los modos de falla más frecuentes se encontraron la rotura en forma de cono doble, ver figura 4 a), y se pudo observar que el proceso de desintegración de partículas del material mostró cierta ductilidad al desarrollar las líneas y/o superficies de falla en el material.

En la mayoría de los casos se observó un salto en la curva experimental debido al agrietamiento y acomodamiento de las partículas de la probeta, lo que explica el hecho de poder acumular energía interna de deformación.

Luego la curva se restableció en forma lineal con reducción de la pendiente. En la figura 4 se observa el registro de esfuerzos y deformaciones para una probeta sometida a una carga de compresión centrada mediante una prensa mecánica a velocidad de 0.075 KN/seg aproximadamente.

Los valores de modulo  $E$  fueron obtenidos de las rectas marcadas en la gráfica del ensayo utilizando interpolación lineal y los coeficientes de la función fueron calculados por el método de mínimos cuadrados.

En primer lugar, se pudo observar que las probetas utilizadas mostraron baja dispersión en sus parámetros geométricos, indicando que el proceso de cocción de la cerámica no genera dispersiones importantes en la geometría final de los mampuestos a pesar de que existen diferencias en las medidas reales de cada pieza respecto de las consideradas nominales.

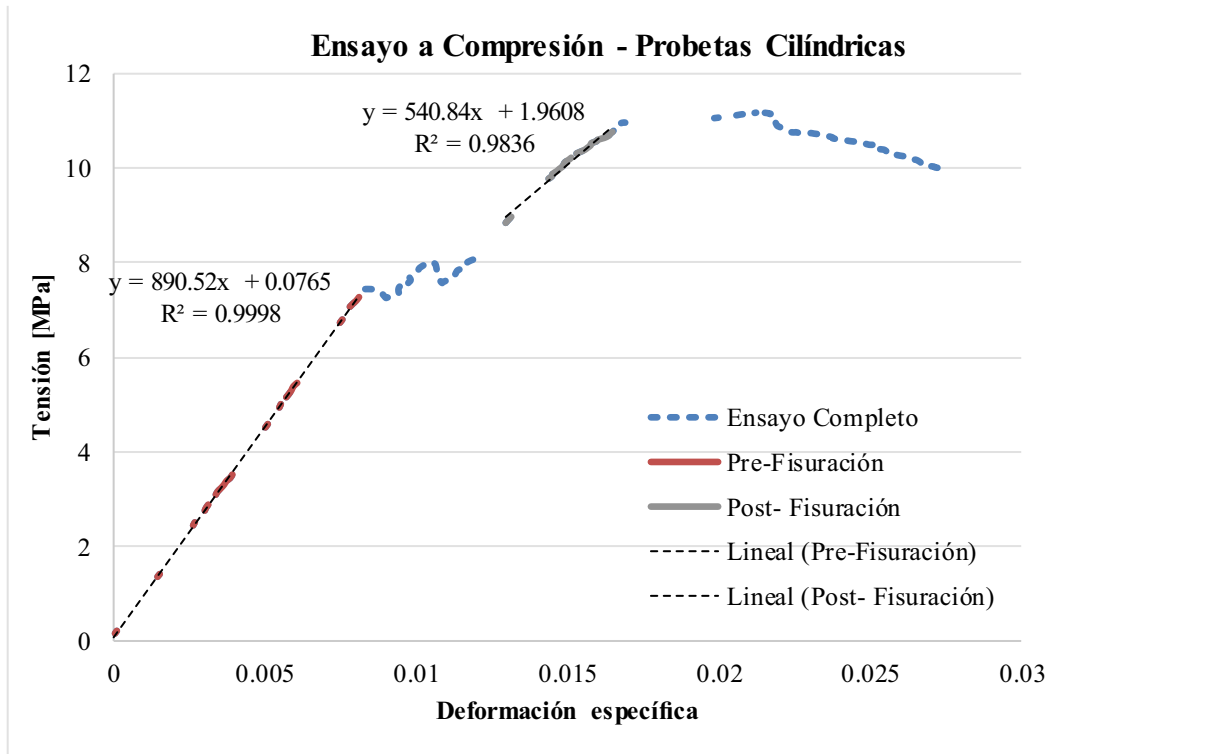


Figura 4. Registro de un ensayo a Compresión aplicado a una probeta de cerámica de forma cilíndrica.

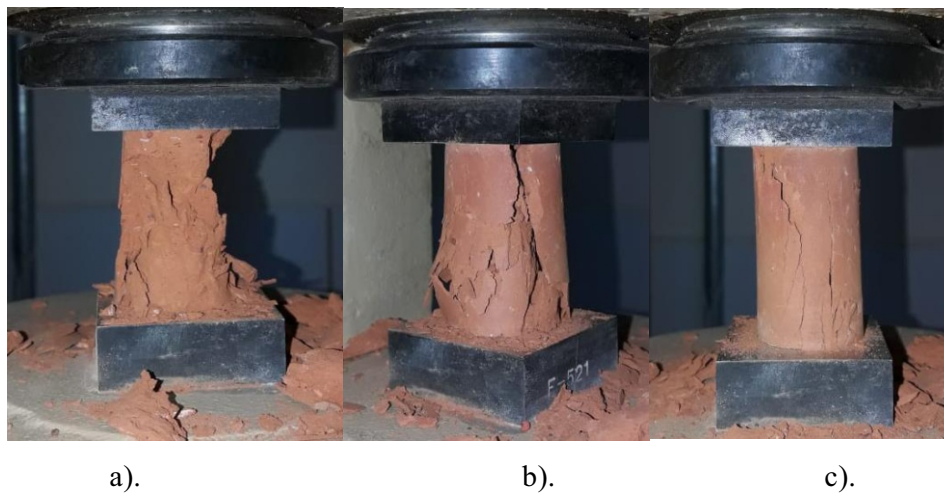


Figura 5. Algunos modos de falla en probetas de cerámica sometidas a Compresión.

**Tabla 2 Resumen estadístico de ensayos de probetas cilíndricas de cerámica a compresión.**

| Parámetro estadístico | Carga Máxima [KN] | Tensión crítica [MPa] | Deformación crítica [mm/mm] | Tensión máxima [MPa] | Deformación máxima [mm/mm] | E [MPa] Tramo 1 | E [MPa] Tramo 2 |
|-----------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|
| Media                 | 4,83              | 7,21                  | 0,0079                      | 9,27                 | 0,0137                     | 902,53          | 599,32          |
| Desvío típico         | 0,42              | 0,41                  | 0,0004                      | 0,51                 | 0,0006                     | 52,67           | 26,88           |
| Variación %           | 8,7               | 5,69                  | 5,06                        | 5,50                 | 4,38                       | 5,84            | 4,49            |
| Sesgo                 | 0,0897            | 0,4099                | 0,1396                      | -0,0325              | 0,0687                     | -0,3208         | -0,0806         |
| Curtosis              | -0,5133           | -0,3573               | 0,2386                      | 0,2431               | -0,5399                    | -0,1218         | -0,0961         |

Luego en la tabla 2 se resumieron los resultados de ensayos a compresión para probetas prismáticas de relación aproximada 1:1:2 (ancho alto y largo respectivamente). También se presentan datos estadísticos a manera de establecer comparaciones con el tipo de probeta anterior. Se ensayaron este tipo de probetas por ser correspondiente con la forma de las paredes de los ladrillos LCH estudiados.

**Tabla 3 Resumen estadístico de ensayos de probetas prismáticas de cerámica a compresión.**

| Parámetros estadísticos     | Carga máxima [KN] | Tensión fisuración [MPa] | Tensión máxima [MPa] | E [MPa] Tramo 1 | E [MPa] Tramo 2 |
|-----------------------------|-------------------|--------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| Promedio                    | 2,80              | 6,56                     | 7,59                 | 1235,27         | 887,62          |
| Desvío                      | 0,13              | 0,21                     | 0,33                 | 105,42          | 80,12           |
| Coefficiente de variación % | 4,64              | 3,20                     | 4,35                 | 8,53            | 9,03            |
| Sesgo                       | 0,6923            | 0,5801                   | -0,2744              | 0,0822          | -0,1508         |
| Curtosis                    | 1,3117            | 0,1269                   | -0,2844              | -0,3257         | -0,0310         |

En la tabla anterior se resumieron los resultados procesados de los ensayos a compresión efectuados en probetas de cerámica prismáticas, Se pudo ver que los datos se han ajustado de mejor manera descartando valores alejados en base a criterios estadísticos conocidos (valores outliers).

Se observaron diferencias en los valores de ambos tipos de probetas, La medida de dispersión de los datos fue menor (tal como se esperaba) en las probetas cilíndricas que, en las probetas prismáticas, diferencias en algunos casos superiores a 1,5 veces.

La dispersión observada en la tensión de fisuración es aceptable y razonable con lo cual se adoptaron estos valores para alimentar futuros procedimientos de simulación en la sección de relaciones constitutivas, Por otra parte, las probetas prismáticas se analizaron por motivo de ser compatibles en cuanto a su forma respecto de la forma que tienen las paredes de los mampuestos.

**Tabla 4** Valores característicos adoptados de cerámica para LCH a compresión.

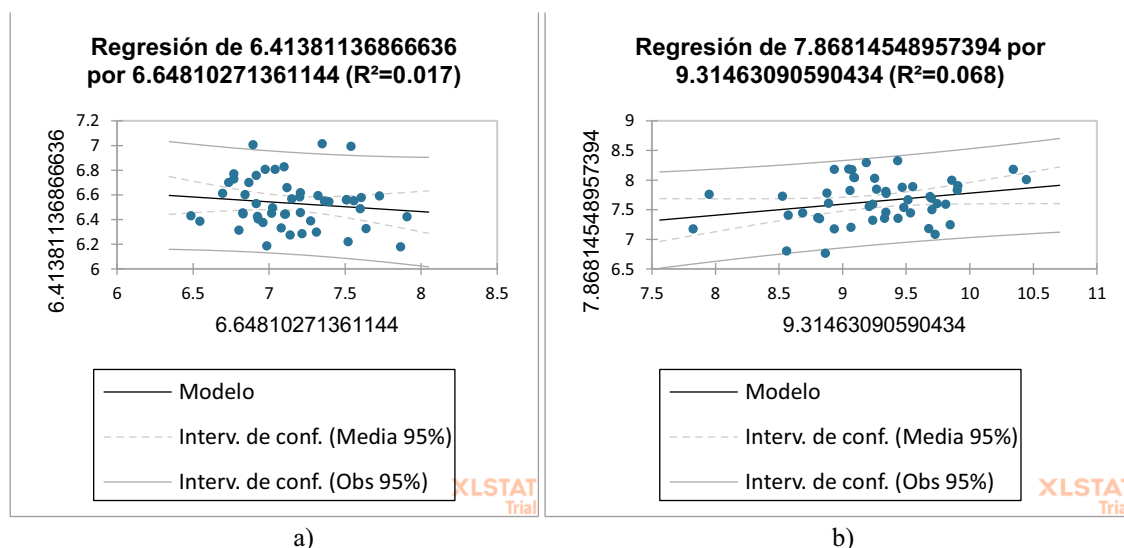
| parámetros                  | Carga máxima [KN] | Tensión fisuración [MPa] | Deformación de Fisuración [mm/mm] | Tensión máxima [MPa] | Deformación máxima [MPa] | E [MPa] Tramo 1 | E [MPa] Tramo 2 |
|-----------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|
| Promedio                    | 4,83              | 7,21                     | 0,0079                            | 9,27                 | 0,0137                   | 902,53          | 599,32          |
| Desvío                      | 0,42              | 0,42                     | 0,0004                            | 0,51                 | 0,00                     | 52,67           | 26,88           |
| Coefficiente de variación % | 8,70              | 5,83                     | 5,06                              | 5,50                 | 4,38                     | 5,84            | 4,49            |
| Sesgo                       | -0.3527           | 0.1167                   | 0.3407                            | -0.0905              | 0.2007                   | 0.4804          | -0.6418         |
| Curtosis                    | -0.3480           | 0.3679                   | -0.2661                           | 0.6909               | -0.5594                  | 0.6426          | 0.6355          |
| Valor característico        | 4,24              | 6,62                     | 0,0074                            | 8,56                 | 0,0128                   | 828,79          | 561,70          |

En la tabla 4 se resumen los resultados estadísticos que serán utilizados en las etapas subsiguientes a efectos de cotejar el comportamiento de la cerámica del material ladrillo cerámico y el material compuesto mampostería de ladrillo LCH, a efectos de utilizar estos parámetros en modelos de simulación numérica para diferentes esquemas de comportamiento.

Cabe destacar que los valores de deformación se han excluido de este segmento del presente trabajo por adoptar el criterio de analizar las correspondientes al material mampuesto en conjunto con el resto de los componentes del sistema constructivo, De todas formas, su análisis está implícito en el Módulo Elástico obtenido a partir de los tramos de carga 1 y 2 respectivamente.

Con respecto al análisis de Varianza se contrastaron resultados de resistencia crítica y de Resistencia máxima en probetas cilíndricas y probetas prismáticas. En dicho análisis se observó baja correlación entre valores críticos y máximos y al establecer un intervalo de confianza de 95% se observó que el valor de resistencia crítica que define el inicio de la fisuración en piezas de este material se situó en un orden de magnitud de 6.155 MPa como se puede observar en la figura 5 a

continuación. Cabe destacar que los valores obtenidos por la ecuación (3) especificada en [7] arrojó valores de mayor magnitud. Es necesario mencionar que analizando la variable para probetas cilíndricas el valor característico para un intervalo de confianza de 955 asciende a 6.89 MPa lo cual permite asumir que el valor a tener en cuenta en función de las probetas prismáticas en conservador.



**Figura 6** Regresión lineal para un análisis de Varianza de resistencia : a) valores críticos de fisuración. b) valores máximos de rotura.

**Tabla 5.** Valores estadísticos descriptivos de Resistencia crítica y Resistencia máxima.

| Variable | Observaciones | Obs. con datos perdidos | Obs. sin datos perdidos | Mínimo | Máximo | Media | Desv. típica |
|----------|---------------|-------------------------|-------------------------|--------|--------|-------|--------------|
| RCPCcrít | 49            | 0                       | 49                      | 6.177  | 7.012  | 6.533 | 0.203        |
| RCPPcrít | 49            | 0                       | 49                      | 6.485  | 7.907  | 7.139 | 0.332        |
| RCPCmáx  | 49            | 0                       | 49                      | 6.759  | 8.324  | 7.643 | 0.371        |
| RCPPmáx  | 49            | 0                       | 49                      | 7.824  | 10.445 | 9.269 | 0.518        |

RCPCcrít: Valor de resistencia en probetas cilíndricas en estado crítico (fisuración).

RCPPcrít: Valor de resistencia en probetas prismáticas en estado crítico (fisuración).

RCPCmáx: Valor de resistencia máxima en probetas cilíndricas (Rotura).

RCPPmáx: Valor de resistencia máxima en probetas prismáticas (Rotura).

La tabla 5 muestra comparativas de dispersión en términos de los valores analizados por método ANOVA (análisis de varianza). Los valores obtenidos mostraron diferencias y se observó un incremento del desvío hacia el instante de rotura lo cual es lógico al considerar que a partir del estado de fisuración el comportamiento del material se desarrolla sobre la base de patrones no lineales.

**Resistencia a Tracción del material cerámico.**

La cerámica es un material que tiene respuesta mecánica diferente para cada esfuerzo aplicado debido a su anisotropía, Se lo puede considerar ortotrópico por el proceso de extrusión, Luego, se evalúa su respuesta a compresión y a tracción.

Habiendo presentado en la sección anterior el comportamiento y la resistencia a compresión en probetas de cerámica, se trata ahora el comportamiento de las piezas sometidas a un esfuerzo de tracción. En la figura 5 se aprecia una imagen del ensayo a tracción aplicado a fragmentos de probetas talladas de mampuestos.



**Figura 7** Probetas ensayadas a tracción.

En esta se pueden apreciar las diferentes líneas de rotura obtenidas en los ensayos a tracción. En algunos casos se apartan de la sección con la entalla, lo cual modifica la superficie considerada para el cálculo de la resistencia a tracción.

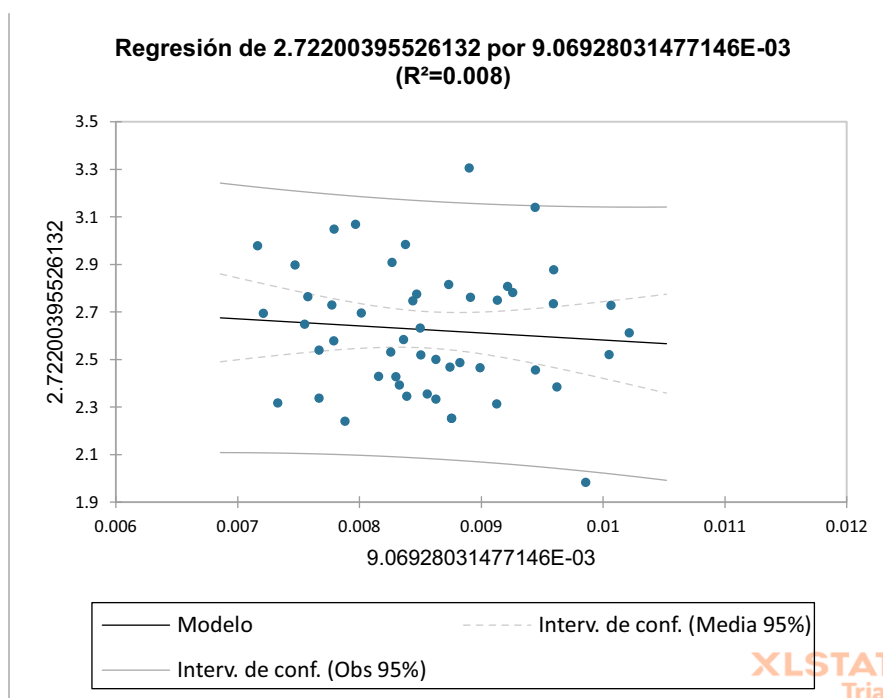
La tabla 4 muestra resultados en valor medio y desvío estándar de los ensayos de probetas de cerámica sometidas a esfuerzos de tracción en dirección paralela a la línea de extrusión del proceso de fabricación del ladrillo, para los cuales se estimó la energía de fractura promedio siguiendo la metodología propuesta por [8].

**Tabla 6** Valores característicos de cerámicas sometidas a Tracción.

| parámetros | Carga máxima [KN] | Resistencia a Tracción [MPa] | Deformación específica [mm/mm] | Energía de Fractura [N/mm] | Rigidez Axial [MPa] | E [MPa] | C <sub>f</sub> [MPa] |
|------------|-------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------|---------|----------------------|
| Promedio   | 1,17              | 2,58                         | 0,0087                         | 0,21                       | 15,43               | 680,51  | 692,38               |
| Desvío     | 0,08              | 0,25                         | 0,0008                         | 0,02                       | 0,909               | 53,24   | 60,05                |

|                             |         |        |         |         |         |         |         |
|-----------------------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Coefficiente de variación % | 6,84    | 9,69   | 9,20    | 9,52    | 5,89    | 7,82    | 8,67    |
| Sesgo                       | -0,0422 | 0,2253 | 0,2049  | -0,0389 | 0,6036  | 0,1976  | 0,0681  |
| Curtosis                    | -0,5690 | 0,0973 | -0,5988 | 0,8581  | -0,2595 | 0,7219  | -0,8329 |
| Valor característico        | 1,039   | 2,170  | 0,007   | 0,177   | 13,939  | 593,196 | 593.898 |

Se analizó varianzas por método ANOVA para las probetas ensayadas a tracción y se obtuvieron los resultados presentados en la figura 6. El valor característico para un intervalo de confianza de 95% fue del orden de 2.1 MPa frente a valor calculado según recomendación de [7] el cual fue de 2.17 MPa. Por lo tanto, se pudo asumir que valores característicos de diseño que propone el reglamento son razonables con algunas reservas en términos del nivel de precisión que se pretenda establecer

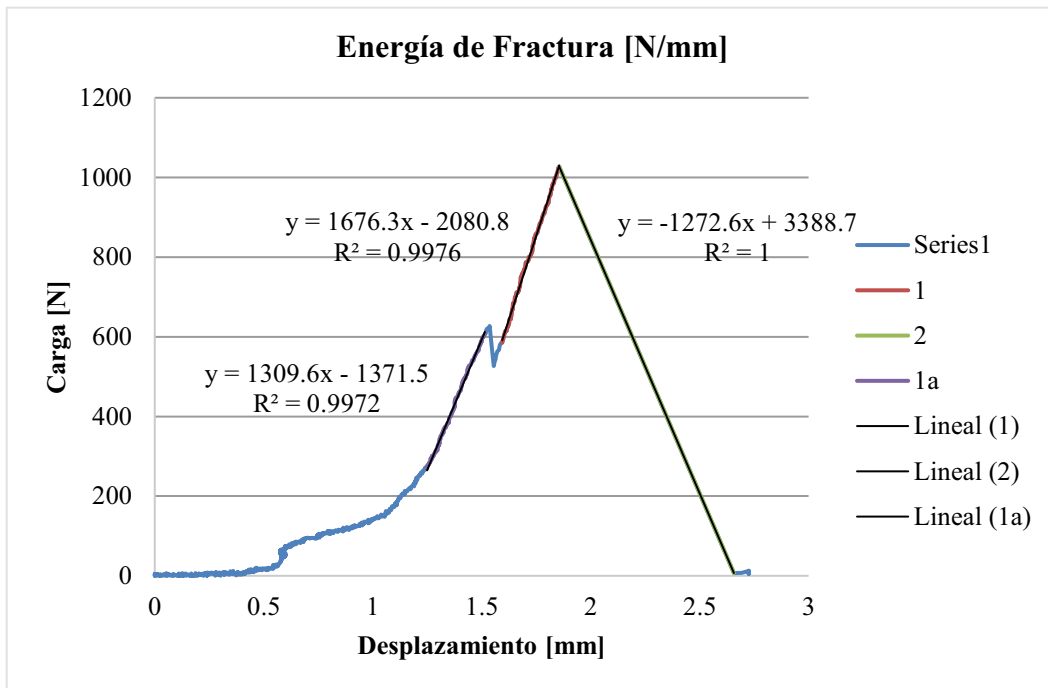


**Figura 8 Resultados ANOVA en Probetas ensayadas a tracción.**

### Energía de fractura del material cerámico.

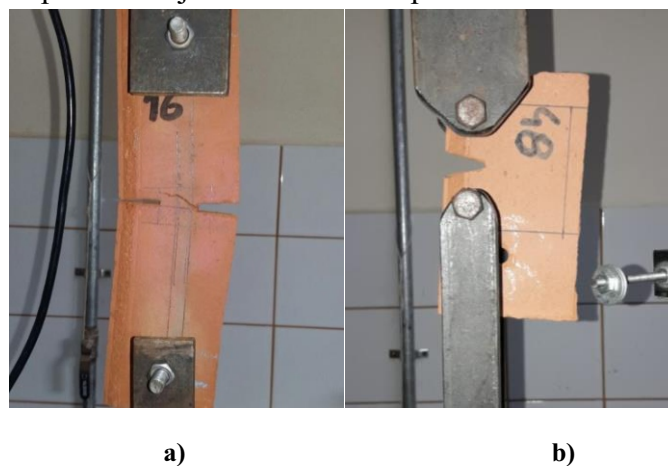
En la figura 8 se presenta una imagen de la curva experimental de ensayo a tracción, Se observa un comportamiento lineal en tramos pre y post fisuración, La frecuencia de muestreo del equipo adquiredor de datos (5 Hz) permitió registrar un acomodamiento que se estima se debió al inicio de la fisuración en la probeta dado que posteriormente prosiguió un ascenso de la curva experimental hasta alcanzar la rotura del material.





**Figura 9 Curva experimental de una probeta ensayada a Tracción.**

En la tabla 4 se presentaron los valores calculados de energía de fractura a partir de las curvas experimentales de carga y desplazamiento obtenidas en laboratorio para los ensayos mostrados en la figura 10. Se realizaron dos tipos de ensayos, (i) El primero produce un efecto de tracción directa analizado en probetas talladas de las paredes interiores de los mampuestos ensayados a compresión, figura 7 a.), (ii) El segundo produce un efecto de tracción por flexión haciendo que la carga aplicada presente una excentricidad respecto del eje mecánico de la probeta.



**Figura10 Ensayo a Tracción: a) Tracción Directa. b) Tracción por Flexión.**

En los extremos de la probeta se colocaron vainas de polímero para evitar distorsiones en el registro de datos durante en el procedimiento experimental dado que la fricción entre la cerámica y los dispositivos de anclajes.

Cabe señalar que la línea falla observada en probetas ensayadas a tracción mostró coincidencia con la presencia de partículas de grano relativamente grande en función del espesor de tales probetas, Es sabido que las mezclas utilizadas para extruir ladrillos LCH contienen un porcentaje de arenas lo cual se estima tiene impacto directo en cuestiones como resistencia mecánica y trayectoria de patrones de agrietamiento.

La referencia [12] propone criterios de consideración para la zona de ablandamiento de la curva de resistencia del sistema, Por lo tanto, es importante el estudio experimental luego de ocurrida la fisuración.

### **Propiedades Físicas de la cerámica.**

Otro factor a tener en cuenta es el proceso de extrusión para la fabricación de los mampuestos que puede inducir una orientación de las escamas de partículas que conforman la arcilla usada como materia, Dicha arcilla es mezclada en proporciones dosificadas con residuos derivados de la madera (aserrín) y contenido de agregados finos, Se puede observar en la figura11 que los planos de falla están condicionados por la concentración de tensiones producida alrededor de las partículas de agregado fino y por la orientación de las escamas que conforman la arcilla.



**Figura11** Trayectoria de las fisuras en probetas de cerámica.

Con esto quedó definido el conjunto de parámetros característicos propuestos para las propiedades mecánicas de la cerámica componente de los mampuestos LCH.

### **Conclusiones.**

Se enuncian a continuación las conclusiones del presente trabajo en el cual se lograron resultados en términos de la caracterización de las cerámicas que componen los ladrillos LCH utilizados en la construcción de mamposterías en la Provincia de Misiones y regiones adyacentes.

Con respecto a la caracterización experimental desarrollada se obtuvieron parámetros relevantes para definir el comportamiento mecánico del material analizado obteniendo su resistencia a compresión, su resistencia a tracción, y su energía de fractura.

La resistencia a tracción y la energía de fractura son parámetros importantes para el análisis de las siguientes etapas de evaluación del comportamiento, permitiendo la posibilidad de utilizarlos como insumos de modelos numéricos de mayor complejidad.

Se confirmó que el modo de falla de la cerámica como material homogéneo obedece a la forma de respuesta de materiales frágiles como el hormigón o el vidrio con las diferencias lógicas en términos del orden de magnitud de sus parámetros principales.

Respecto a la respuesta de la cerámica como material estructural, la resistencia a tracción muestra valores del orden del 15% en promedio de su resistencia a compresión lo cual refuerza el carácter de material frágil como medio homogéneo sometido a acciones mecánicas.

Se mostró que el material cerámico sometido a compresión en el instante de la primera fisura presenta un reajuste interno para continuar absorbiendo esfuerzos de compresión hasta el instante de la rotura.

Los parámetros obtenidos son utilizables en la configuración de procesos de simulación numérica que pueden servir para la construcción de superficies de respuesta del material, A su vez los resultados experimentales comprueban el carácter isotrópico de dicho material.

A futuro se deben tener presente los siguientes aspectos: constatar el fenómeno de reajuste del material luego del inicio de la fisuración en ladrillos cerámicos huecos fabricados con este tipo de cerámicas, analizar cómo impacta el valor de la resistencia a tracción en el comportamiento de elementos estructurales fabricados con este material, y por último encontrar la manera de predecir patrones de fisuración en sistemas estructurales conformados por ladrillos cerámicos huecos.

Paralelamente se tendrá en cuenta la relación de dimensiones geométricas y como impacta en la resistencia a tracción para evaluar la necesidad de establecer el análisis tensional de una manera más detallada. Es importante mencionar que los mecanismos de falla se asumen condicionados por los valores de resistencia a tracción por lo tanto su análisis como parámetro de diseño debe efectuarse en profundidad.

Otro conjunto de factores importantes desde el enfoque de los insumos a disponer para alimentar códigos de simulación numérica son los factores de intensidad de tensión. Estos factores a futuro debieran estudiarse en profundidad para el caso de las cerámicas de la región Nor-Este de la República Argentina y países limítrofes. Una vez recolectados y determinados estos parámetros se puede analizar comportamiento de la cerámica por simulación numérica lo cual implica una reducción considerable en los costos de investigación para las empresas interesadas en impulsar procesos de mejora continua en sus productos.

### **Agradecimientos**

Este trabajo ha sido llevado a cabo gracias al apoyo del Laboratorio de Ingeniería Civil, dependiente del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones. Los autores agradecen a Fabio Gattelli, Maximiliano Galván y Ricardo Miranda por la colaboración prestada en la preparación de este artículo.

## Referencias

- [1] Reinert H, O., evaluación de solicitaciones por elementos finitos aplicada a medios continuos, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, mecánica computacional, Volumen XXXII, Number 42, Structural Analysis, ISSN 2591 -3522, 2013.
- [2] Aviram A., Investigación del Colapso de un Muro de Mampostería de Ladrillo no Reforzado Bajo Fuerzas de Viento Moderado, Universidad EAFIT, Medellín, COLOMBIA, Revista Ingeniería de Construcción RIC Vol. 34 N°1 2019 www, ricuc, c.
- [3] NSR10, reglamento colombiano de construcción sismo resistente, comisión asesora permanente para el desarrollo de construcciones sismo resistentes, ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, Colombia, 2010.
- [4] Chandrupatla T, et Al., Introducción al Método de los Elementos Finitos en Ingeniería, Rowan College, New jersey, Versión traducida de Universidad Autónoma de México, segunda edición, ISBN 970 -17-0260-3, 1999.
- [5] Franco, Y., González, L., Milanés, C. , Félix, N, y Calderín, F, (2023), Mampostería confinada vs pórticos de hormigón: Selección de alternativas para viviendas por esfuerzos propios en Cuba, MODULO ARQUITECTURA CUC, 30, 99–126, <http://doi.org/10,17981/mod,arq,cuc,30,1,2023,04>.
- [6] Normas de Seguridad Estructural para Guatemala Diseño de Mampostería reforzada NSE 7,4 Edición 2018, Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, AGIES Proyecto desarrollado por AGIES por medio de la Dirección de Comités Técnicos.
- [7] Reglamento CIRSOC 501, Estructuras de mampostería, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios.
- [8] HILLERBORG A., “A model for fracture analysis,” Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1978, TVBM-3005.
- [9] Reglamento CIRSOC 501-E Viviendas de mampostería bajo compromiso estructural, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios.
- [10] Corcuera Sakamoto M., Estudio de investigación para el desarrollo de viviendas sociales de bajo coste en la ciudad de lima – Perú, Universitat politécnica de Catalunya, - <http://es.scribd.com/doc/62623064/till-app> - noviembre de 2012.
- [11] Schacher T., Construyendo Viviendas de Mampostería Confinada de Uno y Dos Pisos: Una Guía Para Constructores y Arquitectos, ISBN: 978-1-932884-65-4, EERI Publication Number WHE - 2015- 01.
- [12] Zúñiga C, O, evaluación basada en desplazamientos de Edificaciones de mampostería confinada, Revista de Ingeniería Sísmica No, 79 25-48 (2008).
- [13] Duarte, J.; Interacción estructural de cuerpos edilicios en Misiones, Argentina. Tesis doctoral presentada en la carrera de Doctorado en Ciencias aplicadas, mención tecnología de materiales, Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Misiones, (2021).