

**DETERMINAR LA CALIDAD DEL ENSAYO A COMPRESIÓN EN LADRILLOS  
CERÁMICOS MEDIANTE ESTUDIOS DE REPETIBILIDAD Y  
REPRODUCIBILIDAD EN EL LABORATORIO DE CARACTERIZACIÓN DE  
MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.**

**JUAN ALBERTO ORTIZ GUEVARA  
JULIAN DAVID RODRÍGUEZ BAUTISTA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2017**

**DETERMINAR LA CALIDAD DEL ENSAYO A COMPRESIÓN EN LADRILLOS  
CERÁMICOS MEDIANTE ESTUDIOS DE REPETIBILIDAD Y  
REPRODUCIBILIDAD EN EL LABORATORIO DE CARACTERIZACIÓN DE  
MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.**

**JUAN ALBERTO ORTIZ GUEVARA  
JULIAN DAVID RODRÍGUEZ BAUTISTA**

**Proyecto de grado presentado para optar al título de  
INGENIERO CIVIL**

**Directora:**

**HEBENLY CELIS LEGUIZAMO**

**Ingeniería Civil, M. Sc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2017**

## *Dedicatoria*

*Dedico este trabajo especialmente a Dios y a mis padres Anibal Ortiz y Graciela Guevara por todo su esfuerzo y quienes forjaron en mí el deseo de superación y el anhelo de hacer las cosas de forma correcta y honesta. También dedico este esfuerzo a mis hermanas, amigos y compañeros que siempre estuvieron conmigo apoyándome.*

*Ahora que he logrado lo que tengo lo aprovecharé cada día de mi vida para recompensar un poco el apoyo que siempre me brindaron durante todo este tiempo.*

*Juan Alberto Ortiz Guevara*

## *Dedicatoria*

*Hoy que culmina una etapa más de mi vida, agradezco a Dios por cada una de sus bendiciones y por brindarme la sabiduría para poder finalizar mi carrera. A mi Padre Luis Antonio Rodríguez Martínez, aunque no esté presente, y que en este momento me acompaña desde el cielo sé que está orgulloso y feliz de haber luchado y ser partícipe de este logro; porque gracias a su esfuerzo, dedicación y apoyo he culminado esta etapa de mi vida. A mi madre Ernestina Bautista Güicha por esa mujer emprendedora quien, con amor y cariño, me brindo esa voz de aliento para no desfallecer y seguir adelante.*

*A cada uno de mis hermanos por su apoyo y comprensión incondicional, quienes estuvieron presentes en los momentos más difíciles de mi formación, cuando necesite fuerzas y ánimos para afrontar el presente, y poder continuar con mis estudios.*

*A mi compañero y ahora colega Juan Alberto Ortiz por compartir conmigo este proceso el cual se convirtió en el propósito más anhelado para nuestras vidas.*

*JULIAN DAVID RODRÍGUEZ BAUTISTA*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecimientos a nuestra directora de proyecto Ingeniera Hebenly Celis Leguizamo por su guía y orientación y a todos y cada uno de los profesores que nos brindaron sus enseñanzas para formarnos como ingenieros civiles.

A nuestros compañeros que siempre nos dieron su apoyo en las asignaturas de cierto grado de dificultad, por la amistad que nos brindaron, por los consejos que nos ayudaron en el desarrollo profesional y a todos y cada uno de los técnicos del laboratorio de caracterización de materiales de ingeniería civil por su apoyo en el desarrollo de nuestro proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	19
1. OBJETIVOS.....	21
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	21
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
2. METODOLOGÍA .....	22
2.1. MUESTREO .....	22
2.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	23
2.2.1. Método de análisis de varianza (ANOVA).....	23
2.2.2. Resultados obtenidos .....	28
2.2.2.1. Estudio r&R para el laboratorio de caracterización de materiales de la Universidad Industrial de Santander (UIS).....	30
2.2.2.2. Estudio r&R para los ensayos de interlaboratorio.....	33
2.2.3. Método para la estimación de incertidumbre .....	35
2.2.3.1. Especificación del mensurado .....	36
2.2.3.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre.....	36
2.2.3.3. Cálculo de la incertidumbre asociada a cada fuente .....	37
a. Incertidumbre asociada al muestreo.....	37

b.	Incertidumbre asociada a la lectura de datos por parte de los operadores	37
i.	Evaluación tipo A de la incertidumbre.....	37
c.	Incertidumbre asociada a la resolución del instrumento .....	39
d.	Incertidumbre asociada a los efectos de las condiciones ambientales .....	40
2.2.3.4.	Cálculo de la incertidumbre estándar combinada.....	41
i.	Cálculo de la incertidumbre expandida .....	41
3.	CONCLUSIONES .....	43
4.	RECOMENDACIONES.....	44
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	45
	BIBLIOGRAFÍA.....	47
	ANEXOS .....	49

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. ANOVA para un sistema de medición con dos factores. [5].....	24
Tabla 2. Datos de la resistencia a compresión de los ladrillos [Kg/cm <sup>2</sup> ]. .....	28
Tabla 3. Datos de la resistencia a compresión de los ladrillos [Kg/cm <sup>2</sup> ]. .....	29
Tabla 4. Datos de la resistencia a compresión de los ladrillos (muestreo 2) [Kg/cm <sup>2</sup> ]. .....	29
Tabla 5. Tabla ANOVA para los resultados de las 4 partes.....	31
Tabla 6. Tabla ANOVA para los datos de la Tabla 5. ....	34
Tabla 7. Resultados de incertidumbre para resistencia a la compresión.....	39
Tabla 8. Datos de temperatura y humedad relativa al interior del laboratorio de caracterización de la UIS. ....	40
Tabla 9. Resultados de incertidumbre estándar.....	41

## LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Componentes de variación para los ensayos en la UIS .....32

Grafica 2. Componentes de variación para los ensayos de interlaboratorio. ....35

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Muestra ladrillo H15.....	22
Fotografía 2. Ensayos laboratorio UIS .....	30
Fotografía 3. Ensayos laboratorio externo.....	33

## LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexo A: Resultados del estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método estadístico de ANOVA (estudio interno).....	49
Anexo B: Resultados del estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método estadístico de ANOVA (estudio interlaboratorio).....	51

## GLOSARIO

Las definiciones internacionalmente aceptadas de los términos mencionados provienen del “*international vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM)*” [1].

**Medición:** Proceso de obtener experimentalmente uno o más valores de la magnitud que razonablemente se puede atribuir a una cantidad.

**Método de medición:** Descripción genérica de una organización lógica.

**Procedimiento de medición:** Descripción detallada de una medición de acuerdo con una o más principios de medición y a un método de medición dado, basado en un modelo de medición y que incluye cualquier cálculo para obtener un resultado de medición.

**Repetibilidad:** Precisión de medición bajo un conjunto de condiciones de repetibilidad de medición.

**Condición de repetibilidad:** Condición de medición, de un conjunto de condiciones que incluye el mismo procedimiento de medición, los mismos operadores, el mismo sistema de medición, las mismas condiciones de funcionamiento y la misma ubicación y las mediciones repetidas en los mismos objetos o en objetos similares durante un corto período de tiempo.

**Reproducibilidad:** Precisión de medición en condiciones de reproducibilidad de medida.

**Condición de reproducibilidad:** Condición de medición, de un conjunto de condiciones que incluye diferentes ubicaciones, operadores, sistemas de medición y mediciones de repetición en objetos iguales o similares.

**Incertidumbre:** Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores de cantidad atribuidos a un mensurando, sobre la base de la información utilizada.

**Incertidumbre estándar:** Incertidumbre de medición expresada como una desviación estándar.

## RESUMEN

**TITULO:** DETERMINAR LA CALIDAD DEL ENSAYO A COMPRESIÓN EN LADRILLOS CERÁMICOS MEDIANTE ESTUDIOS DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD EN EL LABORATORIO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER<sup>1</sup>

**AUTORES:** ORTIZ GUEVARA, Juan Alberto  
RODRÍGUEZ BAUTISTA, Julian David \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Compresión, cerámicos, repetibilidad, reproducibilidad, acreditación, caracterización, validar, varianza.

### DESCRIPCIÓN

Este proyecto tiene como objeto determinar la calidad del ensayo a compresión en ladrillos cerámicos mediante estudios de repetibilidad y reproducibilidad (r&R) a partir de ensayos realizados en el Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander y en un laboratorio externo que cuente con la certificación de calidad por parte del Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC). El estudio r&R se realizó a través del método ANOVA (Análisis de Varianza) para los ensayos realizados, con la finalidad de analizar las dispersiones de los resultados y determinar si las desviaciones son acertadas. Este proyecto se realiza con el fin de obtener un soporte para la acreditación de este ensayo en el laboratorio ante los organismos de acreditación.

La Guía para la Expresión de la Incertidumbre (GUM), que consiste en elaborar un modelo de medición, donde se identifican y evalúan las fuentes de contribución a la incertidumbre para lograr determinar la incertidumbre estándar, combinada y expandida y conociendo estos valores expresar su resultado.

Este método fue aplicado únicamente para muestras ensayadas en el laboratorio de caracterización de materiales de la Universidad Industrial de Santander para estimar el valor de la incertidumbre con un nivel de confiabilidad del 95 %.

---

<sup>1</sup> Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ciencias Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Hebenly Celis Leguizamo. Ingeniera Civil, M.Sc.

## ABSTRACT

**TITLE:** DETERMINATE THE QUALITY OF THE BRICK'S COMPRESSION TEST IN CERAMIC BRICKS BY STUDIES OF REPEATABILITY AND REPRODUCIBILITY PRACTICED IN THE LABORATORY OF MATERIALS CHARACTERIZATION IN THE INDUSTRIAL UNIVERSITY OF SANTANDER.<sup>2</sup>

**AUTHORS:** ORTIZ GUEVARA, Juan Alberto  
RODRÍGUEZ BAUTISTA, Julian David \*\*

**KEY WORDS:** Compression, ceramic bricks, repeatability, reproducibility, accreditation, characterization, validation, variance

## DESCRIPTION

This project has as object to determine the quality of the compression trial in ceramic bricks by the study of repeatability and reproducibility (r&R) as from trials carried out in the Materials Characterization Laboratory of the Industrial University of Santander and in an external laboratory that has the quality certification by the National Accreditation Agency of Colombia (ONAC by the initial in Spanish). The r&R study was carried out through the ANOVA method (Analysis of Variance) for the trials carried out, with the purpose of analyzing dispersions obtained and determining if the deviations are correct. This project is carried out in order to obtain support for the accreditation of this trial in the laboratory before the accreditation bodies.

The Guide to Expressing Uncertainty (GUM), which consists of elaborating a measurement model, where the sources of contribution to uncertainty are identified and evaluated to determine the standard, combined and spreaded out uncertainty and knowing these values express their result.

This method was applied only to samples trialed in the Material Characterization Laboratory of the Industrial University of Santander to estimate the value of uncertainty with a 95% confidence level.

---

<sup>2</sup> Graduation project

\*\* Faculty of Mechanical Physics. School of Civil Engineering. Director: Hebenly Celis Leguizamo. Civil Engineer, M.Sc.

## INTRODUCCIÓN

Los ladrillos de arcilla se utilizan en la construcción de obras civiles principalmente en edificios y viviendas, por los bajos costos del material, su propiedad de aislamiento térmico y su disponibilidad geográfica. Estas edificaciones están diseñadas en su mayoría, con un sistema de pórticos resistentes a momentos, mampostería reforzada o confinada, según el reglamento colombiano sismo resistente (NSR-10) [2]. Durante su vida útil, estas construcciones están sujetas a la acción de cargas verticales y horizontales, y pueden generar fracturas en piezas de mampostería y en muros. Si su calidad no es adecuada, pone en peligro a sus ocupantes y este fracturamiento influye en el aumento de su vulnerabilidad, en especial por la acción sísmica [3,4].

El sector de la construcción a lo largo de la historia se ha convertido en algo especialmente comprometedor desde el punto de vista de las elevadas cantidades de materiales que se utilizan y por la implementación de diferentes tipos de materiales tanto estructurales como no estructurales y dado que los conceptos de seguridad y fiabilidad en este sector son fundamentales, han surgido sistemas para el control de calidad con el fin de garantizar que los productos cumplen con las especificaciones establecidas y a su vez se han creado organizaciones que se han dado a la tarea de homogenizar todos los criterios establecidos. Además, estas organizaciones operan en conformidad con las normas ISO/IEC que son las encargadas de calificar y acreditar a los laboratorios tanto de calibración como de ensayos; el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC) es una de ellas.

El presente trabajo de investigación se refiere al tema de la calidad en el ensayo de resistencia a la compresión de ladrillos cerámicos H-15 siguiendo los parámetros establecidos en la norma NTC 4017, ya que se hace necesario tener estimaciones claras de dicho criterio, de igual manera se hace importante y necesario obtener la acreditación de los laboratorios para que se cuente con una gran confiabilidad al momento de obtener los resultados de dichos ensayos.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar la calidad del ensayo a compresión para ladrillos cerámicos mediante estudios de repetibilidad y reproducibilidad en el laboratorio de caracterización de materiales de la Universidad Industrial de Santander de acuerdo a la norma NTC 4017.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar la reproducibilidad del ensayo a compresión en ladrillos cerámicos mediante ensayos de interlaboratorio.
- Medir la repetibilidad del ensayo a compresión en ladrillos cerámicos en el laboratorio de caracterización de materiales de la Universidad industrial de Santander.
- Determinar la relación de reproducibilidad y repetibilidad.
- Analizar los resultados respecto a la incertidumbre del ensayo.
- Evaluar la calidad en las pruebas de ensayo para mantener la fiabilidad de los resultados obtenidos.

## 2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el desarrollo de los estudios de repetibilidad y reproducibilidad en el Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander, se identificó la normativa para el desarrollo de los ensayos, instrumentos de medición y operadores que conforman el sistema de medición que serán evaluados.

El desarrollo de este proyecto se realizó a través de las siguientes etapas: muestreo, realización de los ensayos, análisis de resultados y conclusiones.

### 2.1. MUESTREO

*Fotografía 1. Muestra ladrillo H15*



Las muestras seleccionadas para el desarrollo de este proyecto fueron ladrillos cerámicos H15 de perforación horizontal de un mismo lote de producción.

Se realizó un muestreo en una ladrillera 1 ubicada a 200 metros de la vía que conduce de Girón a Zapatoca, donde se tomaron 24 muestras, de las cuales 8 muestras se ensayaron en un laboratorio externo certificado por la ONAC y las 16 muestras restantes en el Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander entre dos técnicos (operador A y operador B).

El primer paso para realizar los ensayos a compresión fue acordar una fecha para realizar los ensayos el mismo día en los dos laboratorios y finalmente se procede a realizar el ensayo de las muestras de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 4017.

## **2.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Para el análisis de resultados se utilizó el método estadístico ANOVA, ya que es el método más exacto para calcular la variabilidad de un sistema de medición por que posee la ventaja de cuantificar de mejor manera todas las fuentes de variación presentes en el estudio debido a la interacción entre los operadores y las partes.

Además de realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad, se realizó un análisis a los datos reportados por los laboratorios para obtener un grado de incertidumbre a través del método de la guía para la expresión de incertidumbre de medida GUM, mediante la evaluación tipo A debido a que es el método de evaluación de la incertidumbre por medio de análisis estadístico de una serie de observaciones.

A continuación, se presenta el método ANOVA (Análisis de varianza), implementado en el estudio de repetibilidad y reproducibilidad y el método implementado para el cálculo de la incertidumbre.

**2.2.1. Método de análisis de varianza (ANOVA)** En el análisis de varianza, la varianza puede ser seccionada en cuatro categorías: partes, evaluadores, interacción entre las partes y evaluadores y error de replicación debida al equipo. La tabla de ANOVA para un sistema de medición es la que se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** ANOVA para un sistema de medición con dos factores.

Fuente de variación	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios
Operador	$SS_A$	$K-1$	$MS_A = \frac{SS_A}{K-1}$
Partes	$SS_P$	$n-1$	$MS_P = \frac{SS_P}{n-1}$
Interacción	$SS_{AP}$	$(n-1)(K-1)$	$MS_{AP} = \frac{SS_{AP}}{(n-1)(K-1)}$
Equipo	$SS_e$	$nK(r-1)$	$MS_e = \frac{SS_e}{nK(r-1)}$
Total	$SS_T$	$nKr-1$	

Fuente: *Measurement systems analysis (MSA), reference manual- fourth edition 2010.*

Donde:

$K$ : es el número de operadores

$n$ : es el número de partes

$r$ : es el número de medidas para cada parte por cada operador

$N$ : es el número total de datos.

Los pasos que se deben seguir para realizar la tabla del ANOVA de dos factores son [6]:

1. Se calcula la suma total de todos los datos, como lo muestra la ecuación (1).

$$T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n X_{ijk} \quad (1)$$

Donde  $X_{ijk}$  es cada uno de los datos del experimento.

2. Se calcula la suma del cuadrado de todos los datos por medio de la ecuación (2).

$$T_x^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n X_{ijk}^2 \quad (2)$$

Donde  $X_{ijk}$  es cada uno de los datos del experimento.

3. Se calcula la suma de los cuadrados de los totales de las combinaciones de factores, dividido por el tamaño muestral respectivo por medio de la ecuación (3).

$$T_c^2 = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b T_{ij}^2 \quad (3)$$

Donde  $T_{ij}$  es la suma de los datos de cada parte del experimento.

4. Se calcula el término de corrección por medio de la ecuación (4).

$$\frac{T^2}{N} \quad (4)$$

5. Se calcula la suma de los cuadrados de los totales para el factor 1 (operadores) y se divide por su tamaño muestral respectivo por medio de las siguientes ecuaciones (5):

$$T_1^2 = \frac{1}{nr} \sum_{j=1}^a \sum_{k=1}^b T_{jk}^2 \quad (5)$$

Donde  $T_{jk}$  es la suma de los datos de cada operador.

6. Se calcula la suma de los cuadrados de los totales para el factor 2 (partes) y se divide por su tamaño muestral respectivo por medio de la ecuación (6):

$$T_2^2 = \frac{1}{kr} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^b T_{ik}^2 \quad (6)$$

Donde  $T_{ik}$  es la suma de los datos de cada parte.

7. Se calculan las sumas de cuadrados necesarias por medio de las ecuaciones (7), (8), (9), (10) y (11).

$$SS_A = T_1^2 - \frac{T^2}{N} \quad (7)$$

$$SS_P = T_2^2 - \frac{T^2}{N} \quad (8)$$

$$SS_{AP} = T_c^2 + \frac{T^2}{N} - T_1^2 - T_2^2 \quad (9)$$

$$SS_e = T_x^2 - T_c^2 \quad (10)$$

$$SS_T = T_x^2 - \frac{T^2}{N} \quad (11)$$

Después de obtener la tabla de análisis de varianza (ANOVA), se procede a calcular la variación del sistema de medida con un rango del 99% de confiabilidad, siguiendo los siguientes pasos:

1. La repetibilidad del sistema de medida está dada por la ecuación (12) [5].

$$EV = r = 5.15\sqrt{MS_e} \quad (12)$$

2. La reproducibilidad del sistema de medida está dada por la ecuación (13) [5].

$$AV = R = 5.15\sqrt{\frac{MS_A - MS_{AP}}{nr}} \quad (13)$$

Nota: si en algún caso el término de la raíz es un número negativo, entonces la reproducibilidad es cero.

3. La interacción entre los operadores y las partes se calcula por medio de la ecuación (14) [5].

$$I = 5.15\sqrt{\frac{MS_{AP} - MS_e}{r}} \quad (14)$$

Nota: Si en algún caso el término de la raíz es un número negativo, la interacción entre operadores y partes es cero.

4. La relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad está dada por la ecuación (15) [5].

$$r \& R = \sqrt{r^2 + R^2 + I^2} \quad (15)$$

5. La variación de las partes está dada por la ecuación (16) [5].

$$PV = 5,15 \sqrt{\frac{MS_P - MS_{AP}}{Kr}} \quad (16)$$

6. La variación total del análisis está dada por la ecuación (17).

$$TV = \sqrt{r \& R^2 + PV^2} \quad (17)$$

7. Después de obtener los resultados de las ecuaciones (12), (13), (14) y (15), los dividimos por el resultado obtenido de la ecuación (17) para poder obtener los porcentajes de contribución.

8. Interpretación de resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos por el método serán interpretados por medio de los siguientes criterios: [7].

- Si  $\% r \& R < 10\%$  el sistema de medición es aceptable y existe compatibilidad entre las diferentes condiciones que fueron evaluadas.
- Si  $10\% \leq \% r \& R < 30\%$  el sistema de medición puede ser aceptable en base a la importancia de la aplicación, costo del equipo de medición, costo del servicio de calibración o reparación, etc.
- Si  $\% r \& R > 30\%$  el sistema de medición es considerado como no aceptable y requiere de mejoras en cuanto al operador, equipo, método, condiciones, etc.

Después de analizar la información que resulta del estudio de repetibilidad y reproducibilidad, es posible evaluar las causas que originan la variación del sistema de medición o del instrumento: [5]

- Si la repetibilidad es mayor a la reproducibilidad las razones podrían ser: El instrumento necesita mantenimiento correctivo, el equipo requiere ser mejorado,

el montaje o ubicación donde se efectúan las mediciones necesita ser mejorado y/o, existe una variabilidad excesiva entre las partes.

- Si la reproducibilidad es mayor que la repetibilidad, las causas pueden ser: El operador necesita mejor entrenamiento en cómo utilizar y como leer el instrumento, la indicación del instrumento no es clara, no se han mantenido condiciones de reproducibilidad (ambiente, montaje, ruidos, etc.) y/o el instrumento de medición presenta deriva.

**2.2.2. Resultados obtenidos** Como los resultados reportados por el laboratorio externo (Tabla 3) presentan cierta discrepancia con los resultados reportados por el Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander (Tabla 2), se realizó un segundo muestreo en una ladrillera 2 ubicada sobre la vía Llanadas del municipio de Girón donde se tomaron 20 muestras con el fin de realizar nuevos ensayos entre los dos laboratorios.

**Tabla 2.** Datos de la resistencia a compresión de los ladrillos [Kg/cm<sup>2</sup>].

Partes	Lab. Caracterización de materiales UIS			
	Operador A		Operador B	
	Medida 1	Medida 2	Medida 1	Medida 2
1	27,46	26,84	28,39	29,29
2	23,73	23,69	23,27	23,24
3	20,24	19,73	20,79	21,28
4	21,99	21,57	22,12	22,03
5	24,41	18,70	31,48	17,62

**Tabla 3.** Datos de la resistencia a compresión de los ladrillos [Kg/cm<sup>2</sup>].

Partes	Laboratorio externo	
	Operador C	
	Medida 1	Medida 2
1	28,80	28,50
2	12,70	12,10
3	22,30	22,60
4	16,40	11,60
5	30,30	25,90

**Tabla 4.** Datos de la resistencia a compresión de los ladrillos (muestreo 2) [Kg/cm<sup>2</sup>].

Partes	Lab. Caracterización de materiales UIS		laboratorio externo	
	Medida 1	Medida 2	Medida 1	Medida 2
1	20,17	20,84	18,9	19
2	12,44	11,19	15,8	16
3	13,73	13,57	17	17,6
4	16,82	16,75	16,3	16
5	16,84	18,81	18	18,2

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se realizó un estudio de r&R interno entre los operadores A y B con los datos de la Tabla 2 y otro con el laboratorio externo con los datos de la Tabla 4.

Para determinar los factores que afectan la variabilidad del estudio r&R, se analizó la variación de las medidas debido a la interacción entre operadores, partes, partes y operadores y equipo.

### 2.2.2.1. Estudio r&R para el laboratorio de caracterización de materiales de la Universidad Industrial de Santander (UIS)

*Fotografía 2. Ensayos laboratorio UIS*



Con ayuda de una hoja electrónica de Excel, las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y los datos de la Tabla 2, se obtienen los valores necesarios para realizar la tabla ANOVA (Tabla 1), a continuación, se resumen los resultados

$$T = 375,66$$

$$T_x^2 = 8951,69$$

$$T_c^2 = 8950,75$$

$$T^2/N = 8820,03$$

$$T_1^2 = 8821,69$$

$$T_2^2 = 8946,49$$

$$SS_A = 1,66$$

$$SS_P = 126,47$$

$$SS_{AP} = 2,59$$

$$SS_e = 0,94$$

$$SS_T = 131,66$$

Los datos del ANOVA para los resultados de las 4 partes de la Tabla 2, se encuentra en la Tabla 5

**Tabla 5.** Tabla ANOVA para los resultados de las 4 partes.

<b>Fuente de Variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrados medios</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>Operador</b>	1	1,66	1,66	1,93	0,202
<b>Partes</b>	3	126,47	42,16	48,86	0,000
<b>Operador - Partes</b>	3	2,59	0,86	7,34	0,011
<b>Equipo</b>	8	0,94	0,12		
<b>Total</b>	15	131,66			

Donde:

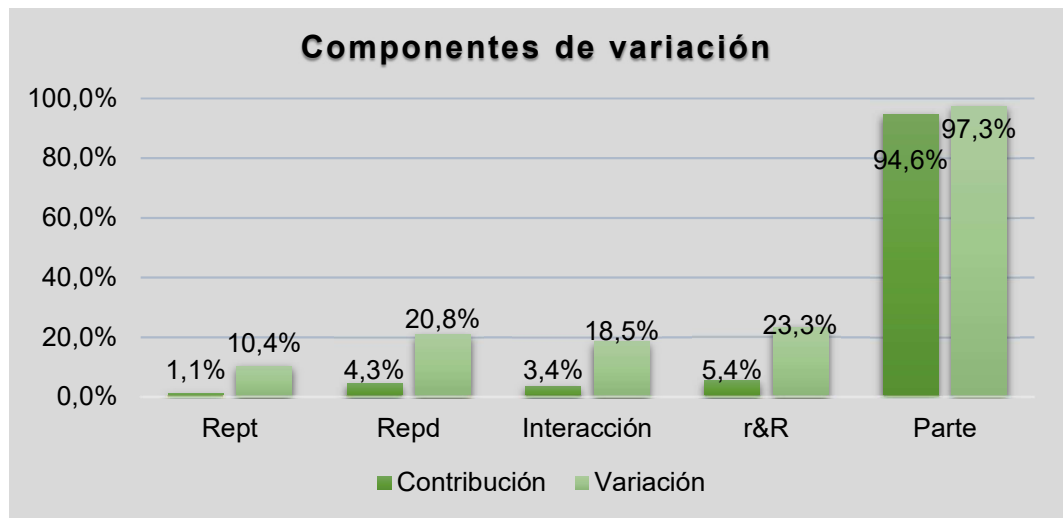
DF: es el grado de libertad, SS: es la suma de cuadrados, MS: son los cuadrados medios, F: valor estadístico y P: es la probabilidad.

De acuerdo a los resultados obtenidos por el método ANOVA, cuando la probabilidad es menor a 0,05 indica que el factor analizado tiene influencia en el estudio r&R. De acuerdo a la Tabla 5, los factores partes y operador-partes presentan  $P < 0,05$ , de acuerdo a lo anterior son factores que influyen en el sistema de medición.

Analizando la variabilidad de los resultados obtenidos en la Grafica 1, se puede observar el porcentaje de contribución a la variación de los datos por parte de cada uno de los elementos que influyen en la determinación del r&R del sistema de medición.

Se determina que la interacción entre las partes afecta de manera considerable en un 97,3% la variación de los datos obtenidos en el ensayo. Mientras que el aporte al sistema de medición debido a la interacción es del 18,5%, de la reproducibilidad es del 20,8% y de la repetibilidad es del 10,4%. Además, se puede observar que el porcentaje de la variación del estudio r&R es del 23,3%. Por tal razón el sistema de medición es aceptable y se debe mejorar las condiciones para su reproducibilidad, según los criterios del ítem 8 del numeral 2.2.1.

**Grafica 1.** Componentes de variación para los ensayos en la UIS



En el Anexo A se resumen los porcentajes de variación y de contribución del estudio, producidos por cada uno de los factores que influyen en la evaluación del sistema de medición.

### 2.2.2.2. Estudio r&R para los ensayos de interlaboratorio

**Fotografía 3.** Ensayos laboratorio externo.



Con ayuda de una hoja electrónica de Excel, las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y los datos de la Tabla 4, se obtienen los valores necesarios para realizar la tabla ANOVA (Tabla 1), a continuación, se resumen los resultados

$$T = 333,96$$

$$T_x^2 = 5694,18$$

$$T_c^2 = 5690,95$$

$$T^2/N = 5576,46$$

$$T_1^2 = 5583,24$$

$$T_2^2 = 5658,04$$

$$SS_A = 6,77$$

$$SS_P = 81,58$$

$$SS_{AP} = 26,13$$

$$SS_e = 3,23$$

$$SS_T = 117,71$$

Los datos del ANOVA para los resultados de la Tabla 4, se encuentra en la Tabla 6.

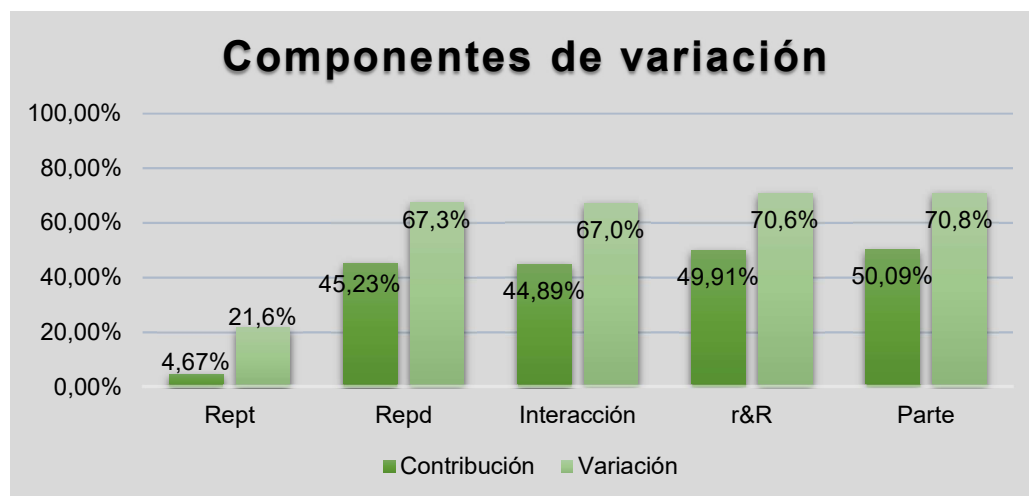
**Tabla 6.** Tabla ANOVA para los datos de la Tabla 5.

<b>Fuente de Variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrados medios</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>Operador</b>	1	6,77	6,77	1,04	0,333
<b>Partes</b>	4	81,58	20,39	3,12	0,066
<b>Operador - Partes</b>	4	26,13	6,53	20,22	0,000
<b>Equipo</b>	10	3,23	0,32		
<b>Total</b>	19	117,71			

Analizando la variabilidad de los resultados obtenidos en la Grafica 2, se puede observar el porcentaje de contribución a la variación de los datos por parte de cada uno de los elementos que influyen en la determinación del r&R del sistema de medición.

Se determina que la interacción entre las partes afecta de manera considerable en un 70,8% la variación de los datos obtenidos en el ensayo. Mientras que el aporte al sistema de medición debido a la interacción es del 67%, de la reproducibilidad es del 67,3% y de la repetibilidad es del 21,6%. Además, se puede observar que el porcentaje de la variación del estudio r&R es del 70,6%. Por tal razón el sistema de medición no es aceptable y se debe mejorar las condiciones para su reproducibilidad, según los criterios del ítem 8 del numeral 2.2.1.

**Grafica 2.** Componentes de variación para los ensayos de interlaboratorio.



En el Anexo B se resumen los porcentajes de variación y de contribución del estudio, producidos por cada uno de los factores que influyen en la evaluación del sistema de medición.

**2.2.3. Método para la estimación de incertidumbre** Calcular la incertidumbre de medición se ha transformado gradualmente en una exigencia de los sistemas de calidad actuales, tanto de gestión como de competencia de laboratorios.

Al informar el resultado de la medición de una magnitud física, es obligatorio que se dé alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado para que los que la usen puedan evaluar su fiabilidad. Sin esta indicación, los resultados de las mediciones no pueden compararse entre sí o con valores de referencia dados en una especificación o normas. Por lo tanto, es necesario establecer un procedimiento fácilmente comprensible y generalmente aceptado para caracterizar la calidad de un resultado de una medición, es decir, para evaluar y expresar su incertidumbre.

El método ideal para evaluar y expresar la incertidumbre del resultado de una medición debe ser:

- ✓ Universal: El método debe ser aplicable a todo tipo de medidas y a todos los tipos de datos de entrada utilizados en las mediciones.
- ✓ Internamente consistente: debe derivarse directamente de los componentes que contribuyen a ella, así como independientemente de cómo se agrupan estas componentes y de la descomposición de los componentes en subcomponentes.
- ✓ Transferible: debe ser posible utilizar directamente la incertidumbre evaluada para un resultado como componente en la evaluación de la incertidumbre de otra medición en la que se utiliza el primer resultado.

El proceso para la estimación de incertidumbre consta principalmente de cuatro etapas: especificación del mensurado, identificación de las fuentes de incertidumbre, cálculo de la incertidumbre asociada a cada fuente y el cálculo de la incertidumbre combinada y/o expandida. [8]

**2.2.3.1. Especificación del mensurado** De acuerdo con la ecuación presentada por la norma técnica colombiana NTC4017 para el cálculo de la resistencia a la compresión, se determina que el mesurado es función de las mediciones de carga, tomadas de la prensa hidráulica y de las dimensiones de los ladrillos, medidas con cinta métrica.

**2.2.3.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre** En la práctica existen numerosas fuentes posibles de incertidumbre en una medición [8], entre ellas tenemos:

- a) Muestra (preparación de muestras)
- b) Operario (lectura de datos de medición)
- c) Equipo (resolución del instrumento de medida)
- d) Instalaciones y condiciones ambientales
- e) Método

**2.2.3.3. Cálculo de la incertidumbre asociada a cada fuente** Una vez identificadas las fuentes de incertidumbre, se procede a calcular la incertidumbre asociada a cada fuente para posteriormente combinarlas. El método a usar depende de la clasificación de la misma.

Siguiendo la GUM podemos agrupar las componentes de incertidumbre en dos categorías según el método de evaluación, tipo A y tipo B. en nuestro caso utilizaremos el método de evaluación tipo A, ya que este método se basa en un análisis estadístico de una serie de observaciones.

**a. Incertidumbre asociada al muestreo** El aporte de esta fuente a la incertidumbre no se tomó en cuenta, debido a que el muestreo es realizado por el cliente.

**b. Incertidumbre asociada a la lectura de datos por parte de los operadores** Los ensayos realizados bajo condiciones de precisión intermedia sirven de base para identificar y estimar la incertidumbre debida a las lecturas tomadas por operadores del laboratorio. Para el cálculo de la incertidumbre asociada a esta fuente se tomaron los mismos datos del estudio r&R para el laboratorio de la UIS (Tabla 2) y el método de evaluación tipo A de la incertidumbre.

**i. Evaluación tipo A de la incertidumbre**

➤ En la mayor parte de los casos, la mejor estimación del valor esperado  $\mu_q$  de una magnitud  $q$  y para la cual se han hecho  $n$  observaciones

independientes  $q_k$  en las mismas condiciones de medida, es la media aritmética  $\bar{q}$  de las  $n$  observaciones [8].

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (18)$$

- Los valores de las observaciones individuales  $q_k$  difiere en razón de las variaciones aleatorias. La varianza experimental de las observaciones, que estima la varianza  $\sigma^2$  de la distribución de probabilidad de  $q$ , viene dada por:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (19)$$

Esta estimación de la varianza y su raíz cuadrada positiva  $s(q_k)$ , denominada desviación típica experimental, representa la variabilidad de los valores observados  $q_k$ , es decir, su dispersión alrededor de su media  $\bar{q}$ .

- La mejor estimación de  $\sigma^2(\bar{q}) = \sigma^2/n$ , varianza de la medida, viene dada por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (20)$$

La varianza experimental de la media  $s^2(\bar{q})$ , y su raíz cuadrada positiva  $s(\bar{q})$ , denominada la desviación estándar experimental de la media, cuantifican que tan bien  $\bar{q}$  estima el valor esperado de  $q$ , y se puede utilizar como una medida de la incertidumbre de  $\bar{q}$ . En otras palabras, la evaluación tipo A de la incertidumbre estándar de un conjunto de mediciones  $q_k$  se logra con la ecuación:

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n(n-1)}} \quad (21)$$

Este método abarca la mano de obra, método, condiciones ambientales y parte del instrumento de medición [9].

**Tabla 7. Resultados de incertidumbre para resistencia a la compresión.**

<b>Grado de libertad</b>	15	
<b>Numero de datos</b>	n	16
<b>Media</b>	$\bar{q}$	23,48
<b>Varianza</b>	$s^2(q_k)$	8,7773
<b>Desviación estándar</b>	$\sqrt{s^2(q_k)}$	2,9626
<b>Varianza experimental de la media</b>	$s^2(\bar{q})$	0,5586
<b>Desviación estándar de la media</b>	$\sqrt{s^2(\bar{q})}$	0,7406
<b>Incertidumbre estándar</b>	$U(x_i)$	0,7406

**c. Incertidumbre asociada a la resolución del instrumento** Una de las fuentes de incertidumbre de un instrumento digital es la resolución de su dispositivo indicador. Si la resolución del dispositivo indicador es  $\delta x$ , el valor del estímulo que produce una indicación  $X$  dada, puede localizarse con igual probabilidad en cualquier lugar en el intervalo de  $X - \delta_x/2$  a  $X + \delta_x/2$ . [10] El estímulo puede describirse mediante una distribución rectangular de anchura  $\delta x$  con varianza  $u_2 = (\delta_x)^2/12$ , implicando una incertidumbre estándar de  $u(d) = 0,29\delta_x$  para cualquier indicación.

En el caso de la prensa hidráulica para ensayos a compresión se tiene una resolución de 0.1 KN, lo que indica una incertidumbre de:

$$u(d) = \frac{0,29(resolucion) \times 102}{Area} \quad (22)$$

$$u(d) = \frac{0,29(0,1) \times 102}{462,08} = 0,0064$$

**d. Incertidumbre asociada a los efectos de las condiciones ambientales**

En la Tabla 8 se presentan una serie de mediciones de temperatura y humedad relativa al interior del laboratorio de caracterización de la UIS en horas de la mañana y tarde.

**Tabla 8.** Datos de temperatura y humedad relativa al interior del laboratorio de caracterización de la UIS.

Día	T [°C]	H [%]
1	23	60
	23	48
2	24	73
	24	73
3	24	70
	24	68
4	23	59
	24	62
5	23	50
	23	44

Como podemos ver en la Tabla 8 los cambios por temperatura y humedad relativa son pequeñas, por lo tanto, se llegó a la conclusión que el aporte a la incertidumbre por condiciones ambientales no es apreciable. Además, la

incertidumbre asociada a esta fuente se encuentra abarcada por el método de evaluación tipo A, como se mencionó anteriormente.

**2.2.3.4. Cálculo de la incertidumbre estándar combinada** La incertidumbre estándar combinada  $U_c$  es una desviación estándar estimada que caracteriza la dispersión de los datos que pueden ser razonablemente atribuidos al mensurando [10]. En esta etapa se relacionaron las incertidumbres estándar de diversas fuentes, de manera tal que se combinaran entre sí. De esta manera se obtendrá la incertidumbre combinada  $U_c$ , calculada como se expresa en la ecuación (23).

$$U_c = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2} \quad (23)$$

Donde cada  $U_i$  representa la incertidumbre estándar estimada de cada una de las fuentes mencionadas en el numeral 2.2.3.2 del presente documento. En la Tabla 9 se presentan los valores de incertidumbre estándar calculados.

**Tabla 9.** Resultados de incertidumbre estándar.

<b>Incetidumbre estándar</b>	<b>Resistencia [Kgf/cm<sup>2</sup>]</b>
Precisión intermedia	0,7406
Resolución del instrumento	0,0064
<b>Incetidumbre combinada</b>	0,7406

- i. **Cálculo de la incertidumbre expandida** Para aumentar la probabilidad hasta valores más útiles de cara a la toma de decisiones, podemos multiplicar la incertidumbre combinada por un numero denominado factor de cobertura ( $k_p$ ).

$$U = k_p U_c \quad (24)$$

El resultado de una medición se expresa entonces, convenientemente, como  $X = x \pm U$ . que se interpreta diciendo que la mejor estimación del valor atribuible al mensurando  $X$  es  $x$ , y que se espera que el intervalo que va de  $x - U$  a  $x + U$  abarque una fracción importante de la distribución de los valores que razonablemente pueden ser atribuidos a  $X$ . Tal intervalo también se puede expresar como;  $x - U \leq X \leq x + U$ . [10].

De acuerdo con el Anexo G de la guía técnica colombiana GTC 51, para este caso de estudio utilizaremos un factor de cobertura  $k_p=2$  para obtener un intervalo cuyo nivel de confianza es de aproximadamente 95%.

$$U = 2 \times 0,7406$$

$$U = 1,48 \text{ Kgf/cm}^2$$

### 3. CONCLUSIONES

- Con los estudios r&R se determinó que una de las posibles causas que puede afectar la variabilidad del %r&R, es la heterogeneidad en la fabricación del ladrillo, por lo cual se recomienda realizar el ejercicio bajo un procedimiento estándar para la producción de ladrillos en el laboratorio.
- Se estableció que uno de los factores que contribuye a la incertidumbre estándar proviene del proceso de medida por parte de los técnicos, esto se debe a que la velocidad de aplicación de la carga no es la ideal y el centrado de los ladrillos en la maquina no es el perfecto
- La incertidumbre expandida calculada en este proyecto para el ensayo a compresión en ladrillos cerámicos H15 con perforación horizontal en el laboratorio de caracterización de materiales de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander fue de +/- 1,48 Kgf/cm<sup>2</sup>.
- La estimación de la incertidumbre y los estudios r&R aplicados a los ensayos para determinar la resistencia a compresión en ladrillos cerámicos H15 con perforación horizontal, representan un referente para la ejecución y demostración de procesos de validación y estimación de la incertidumbre para el ensayo a compresión en mampostería de arcilla frente al Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC).

#### 4. RECOMENDACIONES

- El número de muestras es un factor determinante en la evaluación de la precisión y exactitud de un método, si se desea demostrar la confiabilidad de sus resultados; por tal razón, se recomienda que el diseño experimental de las pruebas a realizar en el procedimiento de repetibilidad, reproducibilidad y de estimación de incertidumbre, sea lo suficientemente representativo en cuanto a número de muestras ensayadas se refiere para garantizar el cumplimiento de los criterios de aceptación planteados en la norma técnica de referencia adoptada por el laboratorio.
- Se recomienda actualizar la información sobre las versiones de este estudio, para introducir los correspondientes cambios y mejorar la confianza de los resultados obtenidos, además se recomienda realizar un acuerdo con la ladrillera al momento de realizar la actualización para garantizar que las muestras sean en lo posible homogéneas, debido a que las muestras presentan cierta variación en la resistencia con respecto a otra.
- Se recomienda hacer jornadas de capacitación al personal técnico del laboratorio, con enfoque en la preparación de las muestras y en la realización de ensayos para determinar la resistencia a compresión ya que los técnicos toman algunos valores de manera subjetiva.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), Versión 2008 con correcciones menores. 3 ed. JCGM, 2012, p. 23-27.
- [2] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10. Bogotá D.C.: AIS, 2010.
- [3] CUÉLLAR HENRÍQUEZ, Edwin O., PORTILLO BARRERA, Cristian J., RENDEROS CARTAGENA, Mario A. y VIDES CAÑAS, Francisco A. Evaluación de la resistencia a la fractura de los ladrillos de barro fabricados por compresión. Trabajo de grado ingeniería mecánica. San Salvador, El Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón cañas. Facultad de ingeniería y arquitectura, 2006.
- [4] ASOCIACIÓN DE INGENIERÍA SÍSMICA. Guía de patología constructiva, estructural y no estructural. Bogotá D.C: AIS, 2004.
- [5] DOWN Michael, CZUBAK Frederick, GRUSKA Gregory, STAHLEY Steve y BENHAM David. Measurement systems analysis (MSA) - Reference manual. 4 ed. AIAG, Automotive Industry Action Group, 2010. ISBN#: 978-1-60-534211-5.
- [6] MENDOZA VARGAS Jairo A., ARBELAEZ SALAZAR Osiel y BOTERO ARBELAEZ Marcela. Método ANOVA utilizado para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro del control de calidad de un sistema de medición. *Revista Scientia et Technica de la Universidad Tecnológica de Pereira*. Diciembre, 2007, nro. 37 p. 534-535. ISSN. 0122-1701.
- [7] METAS & METRÓLOGOS ASOCIADOS. Aplicación Metrológica de los Estudios r&R (Repetibilidad y Reproducibilidad). México: la guía Metas, 2003, p. 4.

[8] JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. Evaluation of measurement data-Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). 1 ed. JCGM, 2008.

[9] DURAN P. Yerlith A. Aplicación del método GUM para la estimación de la incertidumbre en el ensayo de la compresión de cilindros de hormigón. Trabajo de grado ingeniería civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas, 2011, p. 45

[10] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones. GTC 51. Bogotá, D.C.: INCONTEC, 1997.

## BIBLIOGRAFÍA

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10. Bogotá D.C.: AIS, 2010.

ASOCIACIÓN DE INGENIERÍA SÍSMICA. Guía de patología constructiva, estructural y no estructural. Bogotá D.C: AIS, 2004.

CUÉLLAR HENRÍQUEZ, Edwin O., PORTILLO BARRERA, Cristian J., RENDEROS CARTAGENA, Mario A. y VIDES CAÑAS, Francisco A. Evaluación de la resistencia a la fractura de los ladrillos de barro fabricados por compresión. Trabajo de grado ingeniería mecánica. San Salvador, El Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón cañas. Facultad de ingeniería y arquitectura, 2006.

DOWN Michael, CZUBAK Frederick, GRUSKA Gregory, STAHLEY Steve y BENHAM David. Measurement systems analysis (MSA) - Reference manual. 4 ed. AIAG, Automotive Industry Action Group, 2010. ISBN#: 978-1-60-534211-5.

DURAN P. Yerlith A. Aplicación del método GUM para la estimación de la incertidumbre en el ensayo de la compresión de cilindros de hormigón. Trabajo de grado ingeniería civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas, 2011, p. 45

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones. GTC 51. Bogotá, D.C.: INCONTEC, 1997.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. Evaluation of measurement data-Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). 1 ed. JCGM, 2008.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), Versión 2008 con correcciones menores. 3 ed. JCGM, 2012, p. 23-27.

MENDOZA VARGAS Jairo A., ARBELAEZ SALAZAR Osiel y BOTERO ARBELAEZ Marcela. Método ANOVA utilizado para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro del control de calidad de un sistema de medición. *Revista Scientia et Technica de la Universidad Tecnológica de Pereira*. Diciembre, 2007, nro. 37 p. 534-535. ISSN. 0122-1701.

METAS & METRÓLOGOS ASOCIADOS. Aplicación Metrológica de los Estudios r&R (Repetibilidad y Reproducibilidad). México: la guía Metas, 2003, p. 4.

## ANEXOS

**Anexo A:** Resultados del estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método estadístico de ANOVA (estudio interno).

Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander		
Fuente	Varianza	% de contribución (varianza)
Repetibilidad	0,12	1,1%
Reproducibilidad	0,47	4,3%
Operador	0,10	0,9%
Interacción	0,37	3,4%
R&R	0,59	5,4%
Parte	10,32	94,6%
Total	10,91	100,0%

Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander		
Fuente	Desv. Estándar	5,15 Desv. Estándar
Repetibilidad	0,34	1,77
Reproducibilidad	0,69	3,54
Operador	0,32	1,63
Interacción	0,61	3,14
R&R	0,77	3,96
Parte	3,21	16,55
Total	3,30	17,01

Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad  
Industrial de Santander

<b>Fuente</b>	<b>% de la variación (desv. Estándar)</b>
Repetibilidad	10,4%
Reproducibilidad	20,8%
Operador	9,6%
Interacción	18,5%
R&R	23,3%
Parte	97,3%
Total	100,0%

**Anexo B:** Resultados del estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método estadístico de ANOVA (estudio interlaboratorio).

Ensayos interlaboratorio		
Fuente	Varianza	% de contribución (varianza)
Repetibilidad	0,32	4,7%
Reproducibilidad	3,13	45,2%
Operador	0,02	0,3%
Interacción	3,10	44,9%
R&R	3,45	49,9%
Parte	3,47	50,1%
Total	6,92	100,0%

Ensayos interlaboratorio		
Fuente	Desv. Estándar	5,15 Desv. Estándar
Repetibilidad	0,57	2,93
Reproducibilidad	1,77	9,11
Operador	0,16	0,80
Interacción	1,76	9,07
R&R	1,86	9,57
Parte	1,86	9,59
Total	2,63	13,55

Ensayos interlaboratorio	
Fuente	% de la variación (desv. Estándar)
Repetibilidad	21,6%
Reproducibilidad	67,3%
Operador	5,9%
Interacción	67,0%
R&R	70,6%
Parte	70,8%
Total	100,0%