

**APLICACIÓN DEL METODO GUM PARA LA ESTIMACIÓN DE LA  
INCERTIDUMBRE EN EL ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE  
HORMIGÓN**

**YERLITH ADRIANA DURAN PLAZAS**



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

**2011**

**APLICACIÓN DEL METODO GUM PARA LA ESTIMACIÓN DE LA  
INCERTIDUMBRE EN EL ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE  
HORMIGÓN**

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

**Autor**

**YERLITH ADRIANA DURAN PLAZAS**

**Director**

**HEBENLY CELIS LEGUIZAMO**

**Ingeniero civil**



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

**2011**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primera instancia a Dios porque siempre me ha dado sabiduría y paciencia para vencer todos los obstáculos y malos ratos.

A toda mi familia en especial a mi papa y mi mama que de una y otra manera contribuyeron a este triunfo dejando siempre una enseñanza para mi vida personal y profesional.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION	14
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	15
1.1. OBJETIVO GENERAL	15
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	15
1.3. ALCANCE	15
2. CONCEPTO DE INCERTIDUMBRE	16
2.1 IMPORTANCIA DE CALCULAR LA INCERTIDUMBTE	16
2.2 METODOS PARA MEDIR LA INCERTIDUMBRE	18
2.2.1 Método Mcm (Monte Carlo)	18
2.2.2 Método MSA (Análisis de Sistemas de Medición)	19
2.2.3 Metodo GUM	20
3. METODO GUM	21
3.1 DEFINICIONES Y CONCEPTOS GENERALES	21
3.2 ETAPAS PARA LA EVALUACION DE LA INCERTIDUMBRE	23
3.3 MODELO FISICO Y MODELO MATEMATICO	24
3.4. IDENTIFICACION DE LAS FUENTES DE INCERTIDUMBRE	25
3.5. CUANTIFICACION DE LAS FUENTES DE INCERTIDUMBRE	26
3.5.1. Evaluación Tipo A de la incertidumbre estándar	29
3.5.1.1. Primer caso	29
3.5.1.2. Segundo Caso:	31
3.5.1.3. Tercer Caso:	31
3.5.1.4. Cuarto Caso:	32

3.5.2. Evaluación tipo B de la incertidumbre estándar	32
3.6 REDUCCIÓN (NORMALIZACIÓN)	33
3.6.1 Primer caso	34
3.6.2 Segundo caso:	34
3.6.3 Tercer caso:	34
3.6.4 Cuarto caso	35
3.6.5 Quinto caso	36
3.6.6 Sexto caso	36
3.7. INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR COMBINADA	37
3.7.1 Magnitudes de entrada no correlacionadas.	37
3.7.1.1 Primer caso	38
3.7.1.2 Segundo caso	39
3.7.2 Magnitudes de entrada correlacionadas	39
3.7.2.1 Primer caso	40
3.8. INCERTIDUMBRE EXPANDIDA	40
3.9. EXPRESION DEL RESULTADO DE LA INCERTIDUMBRE	42
4. APLICACIÓN DEL METODO GUM EN EL ENSAYO A LA COMPRESION DE CILINDROS DE HORMIGON	43
4.1. ELABORACION DEL MODELO DE MEDICION:	43
4.2. IDENTIFICACION DE LAS FUENTES DE INCERTIDUMBRE:	43
4.2.1. Incertidumbre:	45
4.3. CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE ESTANDAR:	46
4.4. CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE COMBINADA:	47
4.5. CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA:	47

4.6. EXPRESION DE RESULTADOS:	48
5. CONCLUSIONES	49
BIBLIOGRAFIA	50

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Cumplimiento de especificaciones	17
Figura 2. Diagrama para la estimación de la incertidumbre	23

## LISTA DE TABLA

**Pág.**

Tabla 1 en la cual se presentan los resultados obtenidos durante el proyecto, estos resultados han sido explicados en el desarrollo del Capitulo N°5.	48
---	----

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. CERTIFICADO DE CALIBRACION	51
ANEXO B. TRANSDUCTOR DE FUERZA	54
ANEXO C. MANUAL DE PROCEDIMIENTO	62

## RESUMEN

**TITULO:** APLICACIÓN DEL METODO GUM PARA LA ESTIMACION DE LA INCERTIDUMBRE EN EL ENSAYO A LA COMPRESION DE CILINDROS DE HORMIGON\*.

**AUTOR:** DURAN PLAZAS, Yerlith Adriana \*\*

**PALABRAS CLAVES:** incertidumbre, ensayo, laboratorio, hormigón

### DESCRIPCION:

El resultado obtenido para la magnitud medida (tensión de rotura) es en realidad la mejor aproximación del verdadero valor de dicha magnitud y su significado solo será completo cuando va acompañado por un valor de la incertidumbre.

El cálculo de incertidumbre de medición, provee herramientas para el análisis de confiabilidad de resultados, la última versión de la Norma ISO 17025/2005 incluye el cálculo de la incertidumbre como requisito aplicable a los resultados producidos por laboratorios de ensayo.

En el presente trabajo se busca encontrar los valores de incertidumbre en las medidas obtenidas al realizar el ensayo de compresión de probetas de hormigón. Lo novedoso de este trabajo es que los valores de incertidumbre se encontraron aplicando conocimientos matemáticos, metrológicos y técnicos usando la metodología que establece el método GUM (Guide of the uncertainty in measurement) en español Guía para la Incertidumbre de Medición, que consiste en elaborar un modelo de medición, donde se identifican y evalúan las fuentes de incertidumbre que proviene de los factores aleatorios para lograr determinar la incertidumbre estándar, combinada y expandida y conociendo esos valores expresar los resultados.

Por último, este trabajo otorga una garantía de calidad en los resultados obtenidos para el ensayo de compresión de hormigón realizados por el laboratorio, dando mayor confianza en las mediciones tanto a los analistas como a los clientes del laboratorio.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ing. Hebenly Celis Leguizamo.

## ABSTRAC

**TITLE:**"APPLICATION OF THE GUM METHOD FOR THE ESTIMATION OF UNCERTAINTY IN THE COMPRESSION TESTING OF CONCRETE CYLINDERS".

**AUTHOR:** DURAN PLAZAS, Yerlith Adriana.\*\*

**KEY WORDS:** uncertainty, test, laboratory, concrete.

### **DESCRIPTION:**

The result obtained for the measured variable (rupture stress) is actually the best approximation of the true value of this magnitude and its meaning will be complete only when accompanied by an uncertainty value.

The calculation of measurement uncertainty provides tools for reliability analysis of results, the latest version of the norm ISO 17025/2005 includes the calculation of the uncertainty as a requirement applicable to the results produced by testing laboratories.

This project seeks to find the values of uncertainty in the measurements obtained by making the compression test of concrete specimens. The new thing of this work is that the uncertainty values were found applying math, metrologies and technical knowledge using the methodology that establish the GUM method (Guide of the uncertainty in measurement )that it's about making a measuring model where the uncertainty sources be identify and evaluate which come from the random factors.

Finally, this work provides a guarantee of quality in the results obtained for the concrete compression test conducted by the laboratory, giving greater confidence in measurements both analysts and customers of the laboratory.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ing. Hebenly Celis Leguizamo.

## INTRODUCCION

Al realizar el ensayo de compresión de hormigón, el resultado obtenido para la magnitud medida (tensión de rotura) es en realidad la mejor aproximación del verdadero valor de dicha magnitud que se puede conseguir con los medios y equipos con los que se cuenta y con el procedimiento de ensayo empleado. Sin embargo, el valor real de dicha magnitud se desconoce pues por mucha precisión que se intente obtener en el ensayo siempre existirán factores que aporten una incertidumbre al resultado de la medida.

El objetivo de este trabajo es implementar el proceso de la estimación de la incertidumbre en el ensayo de compresión de cilindros de hormigón de manera sencilla, y aplicando conocimientos matemáticos, metrológicos y técnicos de acuerdo a lo establecido en el método GUM.

## **1. GENERALIDADES DEL PROYECTO**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Implementar el proceso de la estimación de la incertidumbre en el ensayo de compresión de cilindros de hormigón de manera sencilla, y aplicando conocimientos matemáticos, metrológicos y técnicos de acuerdo a lo establecido en el método GUM.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Estudiar la validez del método GUM como una alternativa confiable para la estimación de la incertidumbre en el ensayo de compresión de cilindros de hormigón.
- Tratar de identificar todas las fuentes de incertidumbre que afectan al modelo físico, al matemático y a los parámetros de entrada en el ensayo a la compresión de cilindros de hormigón
- Socializar y capacitar al personal técnico del laboratorio de caracterización de materiales sobre la estimación de la incertidumbre en el ensayo a la compresión de cilindros de hormigón

### **1.3. ALCANCE**

Este proyecto establece los lineamientos para la aplicación de la estimación de la incertidumbre en el ensayo a la compresión de cilindros de hormigón de acuerdo con la GUM y de esta manera cumplir con el numeral 5.4.6.1 de la norma NTC ISO/IEC 17025:2005.

## **2. CONCEPTO DE INCERTIDUMBRE**

La incertidumbre de medida es un parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que pueden atribuirse razonablemente al mensurando.

“La expresión del resultado de una medición está completa sólo cuando contiene tanto el valor atribuido al mensurando como la incertidumbre de medida asociada a dicho valor.”

Estos fragmentos anteriores pertenecen al documento G.U.M., Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement, publicado por primera vez en el año 1993 por la Internacional Organization for Standardization, en el cual se establecen las normas generales para la evaluación y la expresión de la incertidumbre de medida que pueden aplicarse en la mayoría de los campos de mediciones físicas. Además se establece que el método sea uniforme en todo el mundo para que las magnitudes obtenidas en diferentes países sean fácilmente comparables.

### **2.1 IMPORTANCIA DE CALCULAR LA INCERTIDUMBTE**

Un indicador de la calidad de las medidas es la incertidumbre, de lo que se deduce la necesidad de emplear elementos fiables para su determinación.

El resultado de una medida es únicamente una aproximación o estima del valor del mensurando. Su significado solo será completo cuando va acompañado por una indicación de la incertidumbre de esta estima. La incertidumbre del resultado

de una medida refleja la falta de conocimiento exacto del valor del mensurando. Esa incertidumbre proviene de los efectos aleatorios y de la corrección imperfecta del resultado de la medida debida a efectos sistemáticos.

Un sistema eficaz de gestión de las mediciones asegura que el equipo y los procesos de medición son adecuados para su uso previsto y es importante para alcanzar los objetivos de la calidad del producto y gestionar el riesgo de obtener resultados de medición incorrectos. El objetivo de un sistema de gestión de las mediciones es gestionar el riesgo de que los equipos y procesos de medición pudieran producir resultados incorrectos que afecten a la calidad del producto de una organización.



**Figura 1. Cumplimiento de especificaciones**

Como se observa en la figura 1, al cumplir unas especificaciones requeridas para un producto, en un proceso de medición, se tienen tres zonas. Una donde las especificaciones se cumplen: zona de conformidad, otra donde las especificaciones no se cumplen: zona de no conformidad y por último, otra donde no se sabe si las especificaciones se cumplen: zona de duda. El tamaño de la zona de duda dependerá del valor de la incertidumbre asociada. Por eso, para considerar que el resultado de nuestra medición cumple las especificaciones es necesario determinar su incertidumbre asociada, porque aun obteniendo un

resultado dentro de los límites de especificación, se puede no cumplir con las especificaciones requeridas.

## **2.2 METODOS PARA MEDIR LA INCERTIDUMBRE**

### **2.2.1 Método Mcm (Monte Carlo)**

Es una herramienta de investigación y planteamiento; básicamente es una técnica de muestreo artificial, empleada para operar numéricamente sistemas complejos que tengan comportamientos aleatorios, en otras palabras, es una técnica que combina conceptos estadísticos ( muestreo aleatorio) con la capacidad que tiene los ordenadores para generar números pseudo-aleatorios y automatizar cálculos.

Un elemento importante en los procesos de simulación es identificar las distribuciones de probabilidad apropiadas para los datos. Esto, normalmente, requiere analizar información empírica o histórica, y ajustarla a alguna distribución.

El método Monte Carlo (MCM) es un método probabilístico o estocástico cuya evaluación viene determinada por sucesos al azar, donde las leyes de causa efecto no explican cómo actúa un sistema o fenómeno de manera determinística, sino en función de probabilidades.

La clave de la simulación Monte Carlo consiste en crear un modelo matemático del sistema, proceso o actividad que se quiere analizar, identificando aquellas variables (inputs del modelo), cuyo comportamiento aleatorio determina el comportamiento global del sistema. Una vez identificados dichos inputs o variables aleatorias, se lleva a cabo un experimento consistente en:

1. generar con ayuda del ordenador muestras aleatorias (valores concretos) para dichos inputs.

2. analizar el comportamiento del sistema ante los valores generados.

Tras repetir  $n$  veces este experimento, se dispone de  $n$  observaciones sobre el comportamiento del sistema, lo cual será de utilidad para entender el funcionamiento del mismo; obviamente, el análisis será tanto más preciso cuanto mayor sea el número  $n$  de experimentos que se lleven a cabo.

El algoritmo para seguir es el siguiente:

1. Determinar las variables aleatorias y sus distribuciones acumuladas ( $f$ )
2. Generar un número aleatorio distribuido uniformemente entre (0 y 1)
3. Determinar el valor de la variable aleatoria para el número aleatorio generado de acuerdo con las clases que se tengan.
4. Calcular media, desviación estándar.
5. Analizar resultados para distintos tamaños de muestras.

### **2.2.2 Método MSA (Análisis de Sistemas de Medición)**

En inglés: Measurement Systems Analysis. El objeto de MSA es entender el proceso de medición, determinar la cantidad de error en el proceso, y evaluar la adecuación del sistema de medición, para mantener dentro de los límites de control el producto y el proceso. MSA promueve el entendimiento y mejora (reducción de la variación). Incertidumbre es el intervalo de valores medidos, definidos por un intervalo de confianza, asociado con un resultado de medición que se espera incluya el valor verdadero de medición, orientado a obtener el mejor desempeño de exactitud del sistema de medición.

Es un hecho que algunos estudios realizados por MSA, tal como los estudios de R&R (repetibilidad y reproducibilidad) o GRR (repetibilidad y reproducibilidad de medición), son complicados de considerar como fuente de incertidumbre,

evidencia de esto ha sido la necesidad de desarrollar una Especificación Técnica al respecto, la ISO/TS 21748 (Orientación para el uso de estimados de repetibilidad, reproducibilidad y veracidad en la estimación de la incertidumbre de medida). Los estudios de r&R rara vez eran utilizados en cálculos de metrología, mientras que este concepto es y ha sido ampliamente utilizado además de muy útil en química y pruebas físicas (Silva, 2002).

### **2.2.3 Método GUM** (Guía para la Incertidumbre de Medición)

En inglés: Guide of the uncertainty in measurement. La GUM es una guía de cómo la incertidumbre de medición puede ser evaluada y expresada. Esta dada al usuario entendimiento de la teoría y conjunto de lineamientos acerca de cómo las fuentes de incertidumbre de la medición pueden ser clasificadas, combinadas, debe considerarse un documento de referencia de alto nivel, no un manual de “como hacer”. Esta prevee orientación al usuario en algunos de los tópicos más avanzados, tales como, independencia estadística de las fuentes de variación, análisis de sensibilidad, grados de libertad, etc. Que son críticos cuando evaluamos sistemas de medición multi-parametros más complejos.

Metodología:

- Elaborar un modelo de la medición
- Identificar las fuentes de incertidumbre
- Evaluación de la incertidumbre estándar
- Determinación de la incertidumbre estándar combinada
- Determinación de la incertidumbre expandida
- Expresión de resultados

### 3. METODO GUM

#### 3.1 DEFINICIONES Y CONCEPTOS GENERALES

**Incertidumbre de la medición:** La *incertidumbre de medición* es un parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que pueden atribuirse razonablemente al mensurando

**Mensurando:** son las magnitudes particulares objeto de una medición. Un mensurando puede ser medido directamente (por ejemplo la medición de la temperatura de un cuerpo con un termómetro) o bien en forma indirecta a partir de otras magnitudes de entrada que se relacionan con él a través de un modelo matemático o relación funcional (por ejemplo la medición de la densidad a partir de mediciones de masa y volumen utilizando el modelo matemático densidad=masa/volumen).

La relación entre el mensurando  $Y$  (o magnitud de salida) que depende de una serie de magnitudes de entrada  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), se puede expresar en forma general como:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

La función modelo  $f$  representa el procedimiento de medición y el método de evaluación, describe cómo se obtienen los valores de la magnitud de salida  $Y$  a partir de los valores de las magnitudes de entrada  $X_i$ . En la mayoría de los casos, la función modelo corresponde a una sola expresión analítica, pero en otros casos se necesitan varias expresiones de este tipo que incluyan correcciones y factores de corrección de los efectos sistemáticos, en cuyo caso existe una relación más

complicada que no se expresa explícitamente como una función. Es más,  $f$  puede determinarse experimentalmente, existir sólo como un algoritmo de cálculo que deba ser numéricamente evaluado, o ser una combinación de todo ello.

**Incertidumbre tipo A:** método para evaluar la incertidumbre mediante el análisis estadístico de una serie de observaciones.

La mejor estimación del valor esperado  $\mu_q$  de una magnitud  $q$  que varia aleatoriamente, y de la cual se han obtenido  $n$  mediciones independientes  $q_k$  bajo condiciones de repetibilidad es el promedio  $\bar{q}$ .

$$q = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (2)$$

Los valores obtenidos en una serie de mediciones difieren entre sí debido a efectos aleatorios en todas aquellas magnitudes que le afectan. A partir de esa serie de observaciones es posible calcular la varianza experimental como:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (3)$$

La mejor estimación de  $\sigma^2(\bar{q}) = \frac{\sigma^2}{n}$  la varianza de la medida está dada por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (4)$$

### 3.2 ETAPAS PARA LA EVALUACION DE LA INCERTIDUMBRE

#### Diagrama para la Estimación de la Incertidumbre

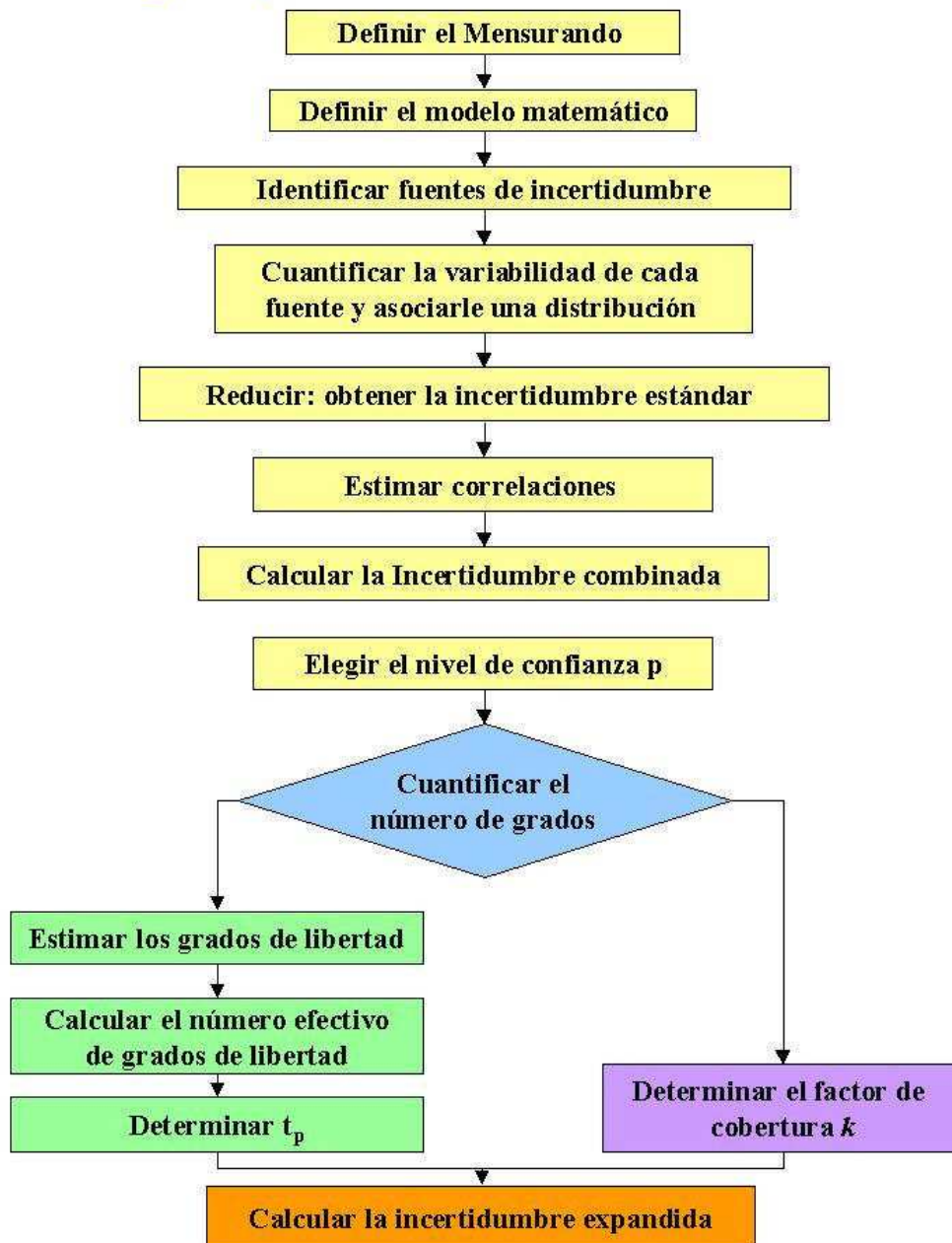


Figura 2. Diagrama para la estimación de la incertidumbre

Dependiendo de cada medición puede ocurrir que alguna etapa de estas sea simplificada e incluso eliminada. No obstante, el presente esquema muestra todas las posibilidades a las que se puede enfrentar un usuario al realizar la estimación de la incertidumbre.

### 3.3 MODELO FISICO Y MODELO MATEMATICO

Un **modelo físico** de la medición consiste en el conjunto de suposiciones sobre el propio mensurando y las variables físicas o químicas relevantes para la medición.

Estas suposiciones usualmente incluyen:

- a) relaciones fenomenológicas entre variables,
- b) Consideraciones sobre el fenómeno como conservación de las cantidades, comportamiento temporal, comportamiento espacial, simetrías,
- c) Consideraciones sobre propiedades de la sustancia como homogeneidad e isotropía.

Una medición física, por simple que sea, tiene asociado un modelo que solo se aproxima al proceso real.

El **modelo matemático** es una descripción del modelo físico utilizando lenguaje matemático. Tal como se ha señalado, el modelo matemático es una aproximación al modelo físico, es decir una descripción imperfecta del fenómeno que se está midiendo, pero que adecuada a propósitos particulares y específicos.

El modelo matemático es normalmente representado como la relación funcional  $f$  entre las variables medidas  $X_i$  (conocidas también como valores de entrada) y el mensurando  $Y$  (o valor de salida), esto es:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (5)$$

Dado que no es posible determinar exactamente el valor de cada variable de entrada  $X_i$ , en la realizada únicamente se puede hacer la mejor estimación, por ello, en lenguaje matemáticamente es mejor representar el modelo matemático como:

$$y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (6)$$

Son ejemplos de modelos matemáticos los siguientes:

- Ecuación de los gases ideales:  $PV = nRT$
- Ecuación para la estimación de la densidad ( $\rho$ ) de un cuerpo a partir de su masa ( $m$ ) y de su volumen ( $V$ ):  $\rho = m/V$
- Ecuación para el cálculo de la presión ( $P$ ) en función de la fuerza ( $F$ ) y del área ( $A$ ):  $P = F/A$
- Ecuación  $C_2 = C_1 * V_1 / V_2$

### 3.4. IDENTIFICACION DE LAS FUENTES DE INCERTIDUMBRE

El siguiente paso en el proceso de estimación de la incertidumbre es determinar las fuentes de incertidumbre que afectan al modelo físico, al modelo matemático, a las variables influyentes o a los parámetros de entrada.

Entre las fuentes de incertidumbre presentes con mayor frecuencia se encuentran:

- La incertidumbre del patrón utilizado en la calibración de un instrumento
- La incertidumbre propia de la calibración de los instrumentos utilizado en los ensayos
- la repetibilidad de las lecturas

- la reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos, condiciones de las pruebas, etc.
- características del propio instrumento, como resolución, histéresis, deriva, etc.
- variaciones de las condiciones ambientales
- la definición del propio mensurando
- el modelo particular de la medición
- variaciones en las magnitudes de influencia.

### 3.5. CUANTIFICACION DE LAS FUENTES DE INCERTIDUMBRE

Una vez establecido el modelo matemático de la medición, comienza el proceso de estimación de las magnitudes de salida ( $y \rightarrow Y$ ) y de entrada ( $x_l \rightarrow X_l$ ), transformándose el modelo matemático de las magnitudes físicas invariantes, representado por la ecuación 7, en el siguiente modelo estadístico:

$$y = f(X_1, X_2, \dots, X_L) \quad (7)$$

donde:

$l$ : contador de las diferentes fuentes de incertidumbres, representadas en términos de sus correspondientes variables aleatorias  $x_l$  ( $l=1; 2; \dots; L$ )

Cada una de las variables de entrada son medidas o tomadas de alguna referencia, por lo que deben estar acompañadas por una estimación razonable de su incertidumbre.

Según el método de evaluación utilizado para estimar su valor numérico, la incertidumbre estándar del resultado de una medición puede agruparse en una de las siguientes categorías:

- **Tipo A:** la incertidumbre estándar se obtiene de una función de densidad de probabilidad derivada de una distribución de frecuencias observadas, lo que implica la elaboración estadística de series de mediciones.
- **Tipo B:** la incertidumbre estándar se obtiene de una función de densidad de probabilidad asumida, basada en un grado de confianza de que el evento ocurrirá (frecuentemente llamado probabilidad subjetiva). La evaluación Tipo B de una componente de la incertidumbre generalmente se basa en un conjunto de información confiable.

**Propósito de la clasificación del método de evaluación de la incertidumbre de la medición.**

El propósito de la clasificación en Tipo A o Tipo B es facilitar la discusión con respecto a la evaluación de la incertidumbre de los componentes de la medición: no pretende mostrar si existe alguna diferencia en la naturaleza de los componentes resultantes de la clasificación en Tipo A o Tipo B.

Ambos tipos de clasificaciones de las componentes de la incertidumbre de la medición se basan:

- En distribuciones de probabilidades,
- En el uso de las varianzas y las desviaciones estándares para su cuantificación.

Estas categorías aplicadas a la evaluación de la incertidumbre de los componentes de la medición no sustituyen a los términos “aleatorio” y “sistemático”.

### **Consideraciones prácticas.**

1. Como el tiempo y los recursos necesarios para la evaluación de la incertidumbre de la medición mediante métodos estadísticos son escasos en la práctica, la incertidumbre del resultado de la medición se evalúa generalmente mediante el desarrollo de un modelo matemático de la medición y la Ley de propagación de la incertidumbre.
2. El alcance de la modelación matemática de la medición lo definirá la exactitud requerida por la propia medición.
3. como el modelo matemático de la medición puede estar incompleto, todas las magnitudes influyentes deben variarse tanto como la práctica lo permita, de manera que la evaluación de la incertidumbre esté basada en lo posible, en datos observados.
4. Siempre que sea posible, el uso de los modelos matemáticos empíricos de la medición deben basarse en:
  - Datos obtenidos a largo plazo,
  - El uso de los patrones de comprobación y las Cartas de Control que indiquen si una medición está bajo control estadístico,
  - en experimentos bien diseñados.
5. La incertidumbre estándar asociada a una corrección se desprecia si su contribución a la incertidumbre del resultado de la medición es insignificante.
6. Si el valor de la corrección es insignificante con respecto a la incertidumbre del resultado de la medición, también se desprecia.

7. Los errores groseros en el registro o análisis de datos pueden introducir un error desconocido significativo en el resultado de una medición. Los errores grandes se pueden identificar generalmente durante la revisión de los datos, sin embargo, los pequeños pueden no ser detectados o confundirse con variaciones aleatorias. La medición de la incertidumbre no considera tales errores.

### 3.5.1. Evaluación Tipo A de la incertidumbre estándar

Una incertidumbre estándar de tipo A puede obtenerse por cualquier método estadístico que ofrezca un estimado válido de la dispersión de los datos.

**3.5.1.1. Primer caso:** la magnitud de entrada  $X$  se estima a partir de  $n$  mediciones independientes  $x_i$  bajo condiciones de repetibilidad.

En la mayoría de las mediciones, el mejor estimado disponible de la esperanza  $\mu_X$  de una magnitud  $X$  que varía aleatoriamente en  $n$  observaciones independientes  $x_i$  ( $i=1; 2; \dots; n$ ) bajo condiciones de repetibilidad, es la media aritmética o promedio  $\bar{x}$ :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

La varianza del promedio  $s^2(\bar{x})$  es un estimador isegado de la varianza de la medida de las muestras y se determina según la siguiente ecuación:

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x)}{n} \quad (9)$$

Donde:

$s^2(x)$ : varianza experimental de las observaciones. Se determina según la siguiente ecuación:

$$s^2(\bar{x}) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 \quad (10)$$

La desviación estándar del promedio es la raíz cuadrada positiva de la varianza del promedio:

$$s(\bar{x}) = + \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (11)$$

La desviación estándar experimental del promedio  $s(\bar{x})$  es la estadística utilizada para la cuantificación de la incertidumbre estándar de la medición:

$$\mu(X) = s(\bar{x}) \quad (12)$$

donde:

$\mu(X)$ : es llamada incertidumbre estándar tipo A.

En este simple caso, los grados de libertad  $v$  de la variable aleatoria continua  $X$  se determinan a partir de  $n$  observaciones independientes según la siguiente ecuación:

$$v = n-1 \quad (13)$$

Los grados de libertad siempre deben estar disponibles cuando se documentan las evaluaciones de las componentes de incertidumbre de tipo A.

Si las variaciones aleatorias en las observaciones de una magnitud de entrada están correlacionadas, por ejemplo, con el tiempo, entonces el promedio y la desviación estándar experimental del promedio pueden ser estimadores inapropiados de los estadísticos deseados.

En estos casos, las observaciones no se distribuyen según la distribución normal y deben analizarse mediante métodos estadísticos especialmente diseñados para el tratamiento de series de mediciones correlacionadas que varían aleatoriamente.

**3.5.1.2. Segundo Caso:** Evaluación de la incertidumbre de la medición mediante el análisis estadístico de los datos obtenidos de un diseño experimental

Este es el caso, más complejo que el primero, del llamado Análisis de Varianza (ANOVA), que si bien persigue otros objetivos también permite las evaluaciones Tipo A de las componentes de la incertidumbre mediante el diseño de secuencias anidadas de mediciones del mensurando variando los valores de las magnitudes de entrada de las que depende.

Existen diferentes modelos incluidos bajo el nombre general de ANOVA y son utilizados exitosamente en muchas situaciones de mediciones encontradas en la práctica, sin embargo, es poco probable lograr la variación de todas las magnitudes de entrada debido a las limitaciones en tiempo y recursos por lo que normalmente se evalúan solo algunas componentes de incertidumbre utilizando estos métodos.

**3.5.1.3. Tercer Caso:** El ajuste por el método de los mínimos cuadrados de una curva  $Y = f(X_j)$  a partir de datos experimentales.

La varianza y la incertidumbre estándar de los parámetros que caracterizan la curva y de cualquier punto predicho, se calculan también mediante los procedimientos estadísticos asociados a las técnicas ANOVA, perfectamente establecidos en la literatura estadística.

#### 3.5.1.4. Cuarto Caso: La incertidumbre estandar mancomunada o histórica.

En el caso de mediciones que se realicen bajo control estadístico en el cual está determinada una desviación estándar del comportamiento de las mediciones mancomunadas o históricas ( $s_p$ ), como incertidumbre de la medición realizada podría utilizarse:

$$\mu(x) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

Donde:

n: es el número de réplicas de mediciones en el caso particular.

La incertidumbre estándar mancomunada tiene una especial importancia en los niveles más bajos de la cadena de calibración, donde los patrones de referencia constituyen prácticamente “valores verdaderos” al ser calibrados en Laboratorios Nacionales o Primarios, de manera que la incertidumbre del resultado de la calibración comprende una sola componente y es la incertidumbre estándar de tipo A calculada a partir de la desviación estándar mancomunada del procedimiento de medición  $s_p$ .

#### 3.5.2. Evaluación tipo B de la incertidumbre estándar

Para un estimado  $x$  de una magnitud  $X$  que no se obtuvo a partir del procesamiento de series de mediciones repetidas, la estimación de la incertidumbre estándar  $\mu(x)$  se evalúa a partir del juicio científico basado en la posible variabilidad de  $X$ . Este conjunto de información incluye:

- Los datos de mediciones previas.
- La experiencia o conocimiento general del comportamiento y propiedades de los equipos de medición, incluyendo los materiales de referencia.
- Las especificaciones del fabricante.
- Los datos provenientes de la calibración u otras certificaciones.
- Las incertidumbres asignadas a los datos de referencia en Manuales u otras fuentes.

Por conveniencia,  $\mu^2(X)$  y  $\mu(X)$  evaluadas de esta manera son conocidas como varianza de tipo B e incertidumbre estándar de tipo B.

El uso adecuado del conjunto de información disponible para una evaluación tipo B de la incertidumbre de la medición depende de la experiencia y el conocimiento del evaluador, que se afianzan con la práctica.

Debe reconocerse que una evaluación tipo B de la incertidumbre estándar puede ser tan confiable como una tipo A, sobre todo cuando el número de observaciones es pequeño.

### **3.6 REDUCCIÓN (NORMALIZACIÓN)**

La transformación de la incertidumbre de la medición en una incertidumbre estándar, sin que se asocie necesariamente al concepto probabilístico de intervalo de confianza, es una etapa fundamental para el posterior proceso de combinación de las diferentes componentes de incertidumbre mediante la Ley de Propagación de las Incertidumbres.

A continuación se analizan diferentes formas posibles para obtener un estimado de una incertidumbre estándar de tipo B a partir de la información disponible:

**3.6.1 Primer caso:** cuando la incertidumbre del estimado  $x$  se da como un múltiplo  $k$  de la desviación estándar:

$$\mu_p = k * \mu(x) \rightarrow \mu(x) = \frac{\mu_p}{k} \quad (15)$$

Donde:

$\mu_p$ : incertidumbre expandida para una probabilidad de cobertura igual a  $P$ .

$k$ : factor de cobertura. Su valor generalmente se encuentra entre 2 y 3.

**3.6.2 Segundo caso:** la incertidumbre del estimado  $x$  puede darse para los intervalos de confianza correspondientes a  $p = 90, 95$  ó  $99 \%$ , en vez de un múltiplo  $k$  de la desviación estándar. Aunque no se indique, se asume que se utilizó la Distribución Normal para calcular el intervalo de confianza, de manera que:

$$\mu(x) = \frac{\mu_p}{z} \quad (16)$$

Donde:

$z$ : estadística correspondiente a una distribución normal ( $k=z$ )

**3.6.3 Tercer caso:** si la única información que se posee es que la probabilidad de que la magnitud de entrada  $X$  esté en el rango desde  $a_-$  (limite inferior) hasta  $a_+$  (limite superior) es del  $100.P$ , entonces se asume que:

- El mejor estimador de  $x$  de  $X$  es el punto medio del rango:

$$\bar{x} = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad (17)$$

- La distribución de los posibles valores de  $X$  es normal, de manera que su incertidumbre estándar se calcula según la siguiente ecuación:

$$\mu(x) = \frac{\mu_p}{z} = \frac{\alpha}{z} \quad (18)$$

Donde:

$\alpha$ : Semiancho del rango donde, con un nivel de confianza  $100.P$ , se espera que se encuentre el valor verdadero de  $X$ . se determina según la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{\alpha_+ + \alpha_-}{2} \quad (19)$$

**3.6.4 Cuarto caso:** En otros casos solamente es posible estimar las fronteras (los límites inferior y superior) de  $X$  para plantear que “la probabilidad de que el valor de  $X$  esté dentro del rango desde  $a_-$  hasta  $a_+$  para todos los propósitos prácticos es igual a uno y de que esté afuera de este rango es esencialmente cero”.

Si no hay un conocimiento específico acerca de los posibles valores de  $X$  dentro del rango, se asume que es igualmente probable para  $X$  estar en cualquier punto del rango: estamos en presencia de una distribución rectangular o uniforme de los posibles valores de  $X$ , con las siguientes características:

- Esperanza o valor esperado de  $X$ :

$$\bar{x} = \frac{\alpha_+ + \alpha_-}{2} \quad (20)$$

- Varianza de  $X$ :

$$\mu^2(x) = \frac{(\alpha_+ - \alpha_-)^2}{12} \quad (21)$$

Si los límites superior e inferior son simétricos con respecto a  $\bar{x}$ , es decir:

$$\alpha_+ - \alpha_- = 2.a$$

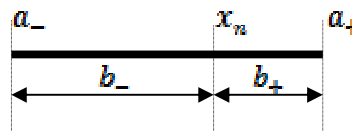
Entonces:

$$\mu^2(x) = \frac{(\alpha)^2}{3} \quad (22)$$

La incertidumbre estándar de X es:

$$\mu(x) = \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \quad (23)$$

**3.6.5 Quinto caso:** si los límites superior e inferior de la magnitud de entrada no son simétricos con respecto a su mejor estimador  $x_n$ , de tal manera que:



$$a_- = x_n - b_-$$

$$a_+ = x_n + b_+$$

Como el valor  $x_n$  no está en el centro del rango, la distribución de probabilidades de X no tiene que ser uniforme, sin embargo, si no hay suficiente información disponible que permita seleccionar una distribución adecuada, una simple aproximación es considerar que  $x_n$  sigue una distribución rectangular con ancho  $(b_+ - b_-)$  e incertidumbre estándar:

**3.6.6 Sexto caso:** Cuando no hay un conocimiento específico acerca de los posibles valores de X dentro de sus límites estimados  $a_-$  y  $a_+$ , se asume que los valores de X siguen una distribución uniforme, tal como se planteó en el cuarto y quinto caso.

Sin embargo, la discontinuidad de la función paso en una distribución de probabilidad es irreal, no representa fenómeno físico alguno: es más realista esperar que los valores cercanos a las fronteras sean menores que aquellos

cercanos al punto medio, por lo tanto, en ocasiones es razonable remplazar la distribución uniforme por la triangular simétrica, con las siguientes características:

- Valor esperado o esperanza:

$$\bar{x} = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad (25)$$

- Desviación estándar:

$$\mu(x) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (26)$$

### 3.7. INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR COMBINADA

La incertidumbre estándar del mensurando  $Y$ , se obtiene combinando apropiadamente las incertidumbres estándares de los estimados de las magnitudes de entrada [  $\mu(x_j)$  ], que pueden ser de tipo A, B e incluso, combinada.

#### 3.7.1 Magnitudes de entrada no correlacionadas.

La varianza mancomunada se determina según la siguiente ecuación:

$$\mu_c^2(y) = \sum_{l=1}^L c_l^2 \cdot \mu^2(x_l) \quad (27)$$

Donde:

$c_l = \left. \frac{\delta y}{\delta x_l} \right|_{x_l}$  : derivadas parciales evaluadas en  $X_l = x_l$  frecuentemente llamadas coeficientes de sensibilidad, describen como el estimador de la magnitud de salida y varía con los cambios en los valores de los estimados de las magnitudes de entrada  $X_l$ .

La incertidumbre estándar combinada del resultado de la medición, designada por  $\mu_c(y)$  es la raíz cuadrada positiva de la varianza mancomunada:

$$\mu_c(y) = +\sqrt{\mu_c^2(y)} \quad (28)$$

se sugiere expresar la desviación de la siguiente forma:

$$\mu_c^2(y) = \sum_{i=1}^L \mu_i^2(y) \quad (29)$$

Donde:

$$\mu_i(y) = c_i \cdot \mu(x_i)$$

La incertidumbre estándar combinada del resultado de la medición es una desviación estándar estimada que caracteriza la dispersión de los valores que pudieran ser razonablemente atribuidos al mensurando  $Y$ .

### Casos particulares:

**3.7.1.1 Primer caso:** si el mensurado puede describirse a través del siguiente modelo matemático lineal:

$$Y = \sum_{i=1}^L c_i \cdot X_i \quad (30)$$

Donde:

$c_i = \pm 1$ : Constante de la función matemática.

Entonces,

$$\mu_c^2(y) = \sum_{i=1}^L \mu^2(x_i) \quad (31)$$

**3.7.1.2 Segundo caso:** si el mensurado puede describirse a través del siguiente modelo matemático no lineal:

$$Y = \prod_{i=1}^L c_i \cdot (X_i)^{p_i} \quad (32)$$

Entonces:

$$\left[ \frac{\mu_c(y)}{y} \right]^2 = \sum_{i=1}^L \left[ p_i \cdot \frac{\mu(x_i)}{x_i} \right]^2 \quad (33)$$

Donde:

$\frac{\mu_c(y)}{y}$ : Incertidumbre estándar combinada relativa del resultado de la medición.

### 3.7.2 Magnitudes de entrada correlacionadas

La varianza mancomunada se determina según la siguiente ecuación:

$$\mu_c^2(y) = \sum_{i=1}^L \sum_{z=1}^L c_i \cdot c_z \cdot \mu(x_i, x_z) \quad (35)$$

Desarrollando la ecuación anterior:

$$\mu_c^2(y) = \sum_{i=1}^L c_i^2 \cdot \mu^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^L \sum_{z=1}^L c_i \cdot c_z \cdot \mu(x_i, x_z) \quad (36)$$

Donde:

$\mu(x_i, x_z)$ : la covarianza estimada asociada a los estimadores  $x_i$  y  $x_z$ . se determina según la siguiente ecuación:

$$\mu(x_i, x_z) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i) \cdot (x_z - \bar{x}_z) \quad (37)$$

**Casos particulares:**

**3.7.2.1 Primer caso:** cuando todos los estimadores de entrada están perfectamente correlacionados con coeficientes de correlación  $r(x_i, x_z)=1$ , se reduce a la siguiente ecuación:

$$\mu_e^2(y) = \sum_{l=1}^L [c_l \cdot \mu(x_l)]^2 \quad (38)$$

### 3.8. INCERTIDUMBRE EXPANDIDA

Partiendo de la suposición que la incertidumbre estándar sigue una distribución normal, se puede afirmar que esta representa un intervalo centrado en el estimado del mensurando que contiene el valor verdadero con una probabilidad  $p$  de 68 % aproximadamente.

Cuando por razones prácticas, legales o técnicas se requiere expresar el resultado a una probabilidad mayor, es necesario expandir la incertidumbre estándar en un factor  $k$ , denominado factor de cobertura, obteniéndose de esta manera una incertidumbre expandida  $U$ .

$$\mu = k\mu_e \quad (39)$$

Para una distribución normal, un factor de cobertura  $k=2$  define un intervalo cuyo nivel de confianza es de aproximadamente 95% y  $k=3$  define un intervalo cuyo nivel de confianza es de aproximadamente 99%.

Condiciones que favorecen que la incertidumbre estándar se aproxime a una distribución normal son:

- Que el mensurando  $Y$  sea estimado a partir de un número significativo de argumentos  $X_i$  que pueden ser descritos mediante distribuciones de

probabilidad bien definidas, por ejemplo distribuciones normales, rectangulares, etc.

- Las contribuciones de las estimaciones de los argumentos contribuyen en cantidades comparables, ya sean estimadas como una incertidumbre Tipo A o Tipo B.
- La función sujeta estudio tiene un comportamiento lineal.
- La incertidumbre asignada a cada argumento posee un número no pequeño de grados de libertad.

Cuando estas condiciones no se dan y es necesario realizar una estimación de la Incertidumbre a partir de los grados efectivos de libertad. Según la ecuación de Welch– Satterhwaite los grados efectivos están dados por la ecuación:

$$v_{efec} = \frac{\mu_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{\mu_i^4(y)}{v_i}} \quad (40)$$

Cuando la incertidumbre de un argumento es estimada como una incertidumbre Tipo A, se pueden asignar n-1 grados de libertad; si se estima como una incertidumbre Tipo B siguiendo una distribución rectangular se le asignan infinito número de grados de libertad.

Conociendo los grados efectivos de libertad  $v_{efec}$ , se determina el factor de cobertura  $k_p$  haciendo uso de una tabla de t-student para el nivel de confianza deseado. Finalmente se calcula la incertidumbre expandida como:

$$\mu_p = k_p \mu_c \quad (41)$$

Donde  $p$  representa el nivel de confianza seleccionado.

### **3.9. EXPRESION DEL RESULTADO DE LA INCERTIDUMBRE**

La expresión del resultado de la medición y de su incertidumbre debe incluir los siguientes:

- El resultado de la medición (por ejemplo un valor promedio)
- La incertidumbre estándar
- la incertidumbre expandida
- En ambos casos declarar como se ha calculado la incertidumbre estándar (indicar sus componentes).
- Si se expresa como una incertidumbre expandida indicar el nivel de confianza y el valor del factor de cobertura utilizado.
- Normalmente, la incertidumbre expandida se expresa con una o dos cifras significativas. Expresarla con más cifras no tiene sentido práctico. Si se desea expresar con una sola cifra debe analizarse previamente la pérdida de información y el peligro de sobreestimar o subestimar la magnitud de la incertidumbre producto del proceso de redondeo. En general, expresarla con dos cifras es quizás la práctica más común.

## 4. APLICACIÓN DEL METODO GUM EN EL ENSAYO A LA COMPRESION DE CILINDROS DE HORMIGON

### 4.1. ELABORACION DEL MODELO DE MEDICION:

$$\sigma = f(P, S)$$

$$\sigma = \frac{P}{S}$$

Donde:

**$\sigma$** : Tensión de rotura (mensurado).

**P**: Fuerza (toneladas). El valor de la carga que se lee en la prensa, se corrige con sus datos de calibración ajustados con una curva de dos parámetros.

**S**: superficie de la probeta.

### 4.2. IDENTIFICACION DE LAS FUENTES DE INCERTIDUMBRE:

Las fuentes de incertidumbre se asocian a cada magnitud de entrada (P,S)

#### ❖ Método:

- Recepción de la muestra:
  - Encabezado de la probeta.
  - Verificación de su planimetría.
  
- Medición de la tensión de rotura:

- Según norma NTC 637.
- Procesamiento de los resultados:
  - Tensión de rotura
  - Edad
  - Tipo de hormigón
  - Uso
- ❖ **Mano de obra:**
  - Desarrollo del ensayo.
  - Informe de resultados.
- ❖ **Mediciones:**
  - Fuerza (P)
  - Superficie (S)
- ❖ **Materiales:**
  - Azufre y grafito para el encabezado de la probeta
- ❖ **Medio ambiente:** condiciones ambientales en que se desarrollan los procesos.
  - Encabezado de la probeta: extracción de los gases generados por fusión del azufre.
  - Medición de la tensión de rotura: condiciones de temperatura y humedad que se pueden influir en el cemento.
- ❖ **Maquina:**
  - Encabezado de probeta:
    - Horno y extractor
    - Escuadra normalizada
    - Encabezado, confirmación metrológica, aptitud de uso.

- Medición:
  - Prensa mecánica, confirmación metrológica, aptitud de uso.
  - Calibre, confirmación metrológica, aptitud de uso.

#### 4.2.1. Incertidumbre:

$\mu_{BFS}$  → **Tipo B**: debido al patrón de calibración del instrumento.

$\mu_{AS}$  → **Tipo A**: de repetibilidad y abarca la mano de obra, método, medio ambiente y parte del instrumento de medición.

$\mu_{BC}$  → **Tipo B**: debido a la curva de ajuste de la lectura de la prensa.

#### INFORMACION EXPERIMENTAL Y DOCUMENTAL:

##### ❖ PARA P:

- Promedio de 4 lecturas de P
  - Del certificado de calibración se informa sobre el patrón de referencia utilizado en la calibración:  
Grado de confianza= 95%  
Resolución= 0,1 Kn indicador digital.

##### ❖ PARA S:

- Promedio de 4 lecturas de D (mm).
- Certificado de calibración del calibre se obtiene la incertidumbre expandida  $\mu$  y la probabilidad del 95%.

### 4.3. CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE ESTANDAR:

$\mu_{BFS} \rightarrow$  **Tipo B**: debido al patrón de calibración del instrumento.

$$\text{CALIBRACION DE LA PRENSA} = \frac{\text{ROTURA PROMEDIO} * \text{INCERTIDUMBRE COMBINADA}}{100}$$

$$\text{Calibración de la prensa} = ((23 * 0,219) / 100)$$

$$\text{Calibración de la prensa} = 0,051$$

$\mu_{AS} \rightarrow$  **Tipo A**: de repetibilidad y abarca la mano de obra, método, medio ambiente y parte del instrumento de medición.

**Reproducibilidad** = Incertidumbre estándar

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$$

$$\sigma = ((22,4 + 23,4 + 23,8 + 23,1) / 4)$$

$$\sigma = 23$$

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2$$

$$S^2 = ((22,4-23)^2 + (23,4-23)^2 + (23,8-23)^2 + (23,1-23)^2) / (4-1)$$

$$S = 0,59$$

$\mu_{BC} \rightarrow$  **Tipo B**: debido a la curva de ajuste de la lectura de la prensa.

$$\text{RESOLUCION DE LA PRENSA} = \frac{\text{RESOLUCION DE LA MAQUINA AL 20\% * 1000}}{2 \text{ AREA}}$$

$$\text{Resolución de la prensa} = ((0,31*1000)/(2*17671,5))$$

$$\text{Resolución de la prensa} = 0,009$$

#### 4.4. CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE COMBINADA:

$$\text{INCERTIDUMBRE COMBINADA} = \sqrt{\sum (\text{INCERTIDUMBRE ESTANDAR})^2}$$

$$\text{INCERTIDUMBRE COMBINADA} = (((0,051)^2 + (0,591)^2 + (0,009)^2)^{\frac{1}{2}})$$

$$\text{INCERTIDUMBRE COMBINADA} = 0,593$$

#### 4.5. CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA:

$$\text{INCERTIDUMBRE EXPANDIDA} = k * \text{INCERTIDUMBRE COMBINADA}$$

$$\text{INCERTIDUMBRE EXPANDIDA} = 2*0,593$$

$$\text{INCERTIDUMBRE EXPANDIDA} = 1,19$$

$K = 2 \rightarrow$  Intervalo cuyo nivel de confianza es de aproximadamente 95%

#### 4.6. EXPRESION DE RESULTADOS:

- El resultado de la medición ( ejemplo un valor promedio)
- Incertidumbre estándar.
- Incertidumbre expandida.
- Indicar como se calcula la incertidumbre.
- Indicar el nivel de confianza y el factor de cobertura utilizado en la incertidumbre expandida.
- Expresar la incertidumbre expandida con 2 cifras significativas.

**Tabla 1 en la cual se presentan los resultados obtenidos durante el proyecto, estos resultados han sido explicados en el desarrollo del Capítulo N° 5.**

MENSURANDO		ESFUERZO DE ROTURA			
UNIDAD DE MEDIDA		MPa			
NORMAS DE REFERENCIA		NTC 673			
FUENTES DE INCERTIDUMBRE	VALOR	DISTRIBUCIÓN	TIPO	DIVISOR	INCERTIDUMBRE ESTANDAR
calibración prensa	0,051	Normal	A	1,00	0,051
Reproducibilidad	0,591	Normal	A	1,00	0,591
resolución de la prensa	0,009	Rectangular	B	1,73	0,005
INCERTIDUMBRE COMBINADA					0,593
FACTOR DE COBERTURA				2	MPa
INCERTIDUMBRE EXPANDIDA				1,19	MPa

## 5. CONCLUSIONES

- Analizar las variables físicas y ambientales que intervienen en la estimación de la incertidumbre en el resultado de la medición en el ensayo de probetas de hormigón permite incrementar la calidad del resultado que se obtiene, brindando mayor confianza a los usuarios de estos resultados.
- La principal contribución a la incertidumbre estándar proviene de la incertidumbre debido al proceso de medida esto se debe a que el centrado de las probetas en las maquinas no es el perfecto y a la variabilidad de los materiales utilizados en la fabricación de las probetas.
- El laboratorio realiza sus ensayos de acuerdo a la norma NTC 637 y cuenta con la experiencia de los analistas para seguir este procedimiento.
- Como se ha dicho el procedimiento de cálculo para la incertidumbre presentado en este documento depende en su mayor parte de la naturaleza de lo que se mide pero además del método y procedimiento de medición. Por esta razón, la calidad y el uso de la incertidumbre asociada a lo que se quiere medir dependerá de la honestidad, experiencia y criterio de quienes contribuyeron a su cálculo y de aquellos que harán uso de la información.
- La incertidumbre expandida para el ensayo de compresión de cilindros de hormigón calculada en este proyecto en el laboratorio de caracterización de materiales de ingeniería civil fue de +/- 1,19 Mpa.

## BIBLIOGRAFIA

1. EAL-R2. Expresión de la Incertidumbre de medidas en calibraciones. Primera edición, 1997, Cooperación Europea para la Acreditación de Laboratorios.
2. Guía para estimar la Incertidumbre de la medición. Primera edición, 2000. Centro Nacional de Metrología de México (Cenam).
3. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, primera edición, 1993, revisada y reeditada en 1995, International Standardization Organization (Ginebra, Suiza).
4. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, primera edición, 1993, revisada y reeditada en 1995, International Standardization Organization (Ginebra, Suiza).
5. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. 1994. NIST, USA.
6. *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*, segunda edición, 1993, International Standardization Organization (Ginebra, Suiza).
7. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement, Segunda edición, 2000, EURACHEM/ CITAC.
8. The Expression of Uncertainty in Testing. Primera edición, UKAS.

# ANEXO A. CERTIFICADO DE CALIBRACION



## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN Certificate of calibration

Número **0346 F**  
Number

Página/Pages **2 de 4**  
Anexo **Sello de**  
Attached **Calibración**

METODO DE MEDICIÓN: Fuerza Indicada Constante  
Method of measurement  
LOCALIZACIÓN: Laboratorio de Ensayos de Materiales  
Location  
NORMA TÉCNICA N°: Norma Técnica Colombiana NTC 7500-1 / 2007-07-25  
Standard

### RESULTADOS DE LA MEDICIÓN (o CALIBRACIÓN):

Certificado de Calibración 0346 F

CARGA (%)	Indicación del Instrumento Patrón (F) en kN					PROMEDIO L1, L2 y L3	Indicación del instrumento a calibrar (F <sub>0</sub> )	Errores encontrados %				
	L1	Girar Celda 120° L2	Girar Celda 120° L3	L4	Reversibilidad F <sub>0</sub> F <sub>1</sub> L2 Descendentes			Resolución relativa (a)	Reversibilidad (v)	Repetibilidad (b)	Exactitud (c)	Accesorios
6,3	48,694	48,546	48,891	48,0537	48,710	49,03	1,00		1,72	-0,66	2,04	
12,5	96,790	97,390	97,626	97,8710	97,285	96,07	0,50		1,21	-0,82	0,10	
25,0	193,013	193,456	193,161	192,3733	193,210	196,13	0,25		0,56	-1,49	1,86	
37,5	290,547	291,876	291,679	290,2520	291,367	294,20	0,17		0,56	-0,96	1,38	
50,0	389,201	389,890	390,333	388,5617	389,808	392,27	0,12		0,45	-0,63	0,95	
62,5	486,571	486,522	486,896	486,7680	486,653	490,33	0,10		0,07	-0,75	0,73	
75,0	584,976	585,010	585,714	585,7476	585,567	588,40	0,08		0,30	-0,48	0,28	
87,5	682,760	683,193	683,538	683,9314	683,180	686,47	0,07		0,17	-0,48	0,37	
93,8	732,258	732,593	732,406	733,2915	732,406	735,50	0,07		0,14	-0,42	0,30	

Temperatura °C				
Inicial	28	28	28	28
Final	28	28	28	28

Indicación Residual de la máquina de ensayo sin carga (F <sub>0</sub> ):	L1	L2	L3	L4
		0	0	0

	Cero F <sub>0</sub>	Reversibilidad (v)	Repetibilidad (b)	Exactitud (c)	Resolución Relativa	Accesorios
Máximos errores encontrados (%)	0,000	No se determino	1,72	1,49	1,0	2,04
Máximos errores permitido para clase :	± 0,2	± 3,0	2,0	± 2,0	1,00	3,00
Norma Técnica Colombiana NTC 7500-1 Primera actualización 2007-07-25	Numeral: 6.4.5	6.4.8	6.5.2	6.5.1	6.2.1	6.4.6

Calle 63D No. 71A-52 • PBX y Fax: 223 56 56 • Bogotá, D.C. - Colombia  
E-mail: [contactenos@concrelab.com](mailto:contactenos@concrelab.com) • [www.concrelab.com](http://www.concrelab.com)

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN**  
*Certificate of calibration*

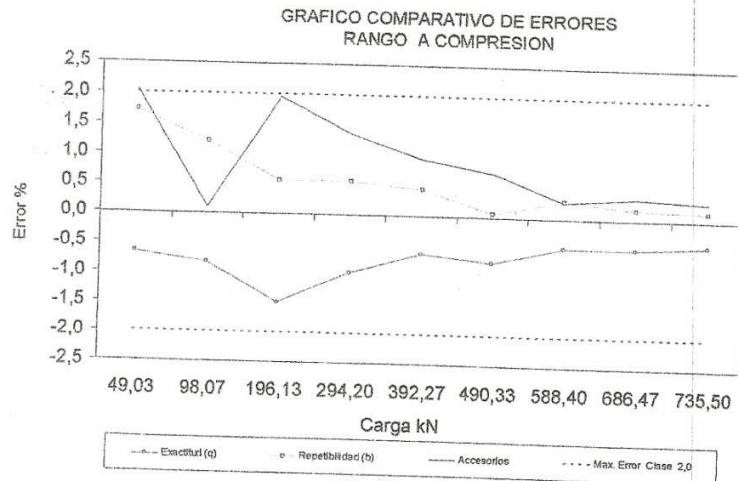
Número **0346 F**  
Number

Página/Pages 3 de 4  
Anexo Sello de  
Attached Calibración

**INCERTIDUMBRE**

Indicación Máquina kN	Incertidumbre Combinada Relativa (%)	Media Aritmética/ lecturas Máquina	Incertidumbre Expandida Relativa (%)
49,03	0,256	48,710	0,512
98,07	0,475	97,265	0,950
196,13	0,256	193,210	0,512
294,20	0,249	291,367	0,499
392,27	0,219	389,808	0,439
490,33	0,150	486,653	0,299
588,40	0,182	585,567	0,363
686,47	0,159	683,160	0,317
735,50	0,154	732,406	0,309

**La Incertidumbre Máxima asociada a esta Calibración Para K= 2 es de +/- 0.950 % a partir del 10 % de la Capacidad Máxima Del Equipo.**



Calle 63D No. 71A-52 • PBX y Fax: 223 56 56 • Bogotá, D.C. - Colombia  
E-mail: [contactenos@concrelab.com](mailto:contactenos@concrelab.com) • [www.concrelab.com](http://www.concrelab.com)

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN**  
*Certificate of calibration*

Número **0346 F**  
Number

Página/Pages 4 de 4  
Anexo Sello de  
Attached Calibración

**CLASIFICACION**

La maquina de ensayo se clasifica, Teniendo en cuenta los parámetros establecidos por la Norma NTC 7500-1 así:

RANGO	CLASE
5 t .....80 t COMPRESION	2.0

**TRAZABILIDAD**

Identificación de los patrones de calibración empleados.

Equipo	Marca	Capacidad	Serie	Modelo	Entidad emitió Certificado	Certificado No.	Fecha de Calibración
Indicador	HBM	2mV/V	TG001C	MGCPiue ML 30	SIC	17744	2008-07-01
Celda de carga	HBM	1000 kN	31090	C3H2	SIC	17746	2008-07-14

**OBSERVACIONES:** *Concrelab Ltda. Puede abstenerse de expedir un certificado cuando, por características técnicas considere que el equipo no es apto para el trabajo y entregara en este caso un informe indicando los motivos.*

*La calibración en cualquier equipo de medida solo reporta el comportamiento del equipo en el lugar y fecha en que se realizan las lecturas, por lo tanto no se puede garantizar la repetibilidad de las mismas a través del tiempo.*

## ANEXO B. TRANSDUCTOR DE FUERZA



### DIVISION DE METROLOGIA

CERTIFICADO DE CALIBRACION

NUMERO: 17746

Código: FU-021/2008

LABORATORIO DE FUERZA

FECHA: 2 008-07-14

Página 2 de 9

#### 1. NORMA TECNICA UTILIZADA PARA LA CALIBRACION

El instrumento es calibrado según las disposiciones de la Norma Técnica ISO 376: 1999, que en Colombia es la Norma Técnica NTC 4350 (2003-08-26).

Se establece una clasificación del Instrumento para cada rango de medición, según los resultados obtenidos (Ver Tabla 6)

#### 2. DISPOSITIVO PATRON UTILIZADO

Máquina Hidráulica Patrón de Referencia marca ERICHSEN para 1000 kN

Capacidad: 20 kN a 1000 kN

Incertidumbre de medición:  $< \pm 0,02\%$

#### 3. INSTRUMENTO OBJETO DE CALIBRACION

##### 3.1 Instrumento sensor

Transductor de Fuerza para Compresión, con medición digital de la deformación

Capacidad: 1000 kN

Número de serie: 31090

Modelo: C3H2

Señal cero: 0,03508 con pieza de aplicación de la carga en Compresión

Longitud del cable: 260 cm

FABRICANTE: Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM)

Dirección: Im Tiefen See 45

Ciudad / País: Darmstadt - Alemania

##### 3.2 Instrumento Indicador digital

Capacidad de medición:  $\pm 2,0$  mV / V

Resolución: 0,00001 mV / V – 300 000 Dígitos

Valor de Calibración: -----

Filtro: ----- / Canal 1

Número de serie: TG001C

Modelo: MGC PLUS – ML30B

FABRICANTE: Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM)

Dirección: Im Tiefen See 45

Ciudad / País: Darmstadt - Alemania

3030/FU-034

DIVISION DE METROLOGIA

CERTIFICADO DE CALIBRACION

NUMERO: 17746

Código: FU-021/2008

LABORATORIO DE FUERZA

FECHA: 2 008-07-14

Página 3 de 9

**3.3 Acoples utilizados para el montaje**

Pieza de aplicación de la carga en Compresión propia del Transductor

**4. TEMPERATURA DEL LABORATORIO DURANTE LA CALIBRACION**

Temperatura inicial: 18,8 °C

Temperatura final: 19,2 °C

**5. RESULTADOS DE LA CALIBRACION**

5.1 Los resultados de la Calibración están dados en las Tablas 1 a la 7

Los valores dados están reducidos en el valor indicado en el punto cero

**SINOPSIS**

**TABLA 1** Valores indicados en la última precarga

**TABLA 2** Valores indicados para cargas ascendentes en las columnas series 1, 2, 3 y 4  
Valores indicados para cargas descendentes de las series de mediciones 3 y 4  
en las columnas series 3\* y 4\*

**TABLA 3** Indicaciones residuales relativas

**TABLA 4** Promedio aritmético para cargas ascendentes en igual posición de montaje  
Desviaciones relativas en igual posición de montaje  
Promedio aritmético para cargas ascendentes en diferentes posiciones de  
montaje  
Desviaciones relativas en diferentes posiciones de montaje  
Desviaciones relativas por reversibilidad

**TABLA 5** Promedio aritmético para cargas ascendentes en diferentes posiciones de  
montaje  
Promedio calculado por interpolación  
Desviación relativa por interpolación

3030/FU-034

DIVISION DE METROLOGIA

CERTIFICADO DE CALIBRACION

NUMERO: 17746

Código: FU-021/2008

LABORATORIO DE FUERZA

FECHA: 2 008-07-14

Página 4 de 9

**TABLA 6** Clasificación según la Norma ISO 376, (NTC 4350) y su correspondiente Incertidumbre de Medición , calculada según el Documento EAL – G22.

**TABLA 7** Tabla de interpolación para fuerzas en KILONEWTON calculada con ayuda de la ecuación de TERCER grado que se calculó del promedio aritmético en diferentes posiciones de montaje, por el método de los mínimos cuadrados y la cual se dará al final de la Tabla 4, como Ecuación 1  
La Ecuación 2 se utiliza para calcular la fuerza en función de la deformación

**Observación:** La Incertidumbre de Medición dada corresponde al doble de la desviación standard, considerando el conjunto de los resultados de la calibración.

**5.2 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES**

Indicación del sensor en el punto cero: 0,03508

**TABLA 1 VALORES INDICADOS EN LA ULTIMA PRECARGA (Tercera)**

Indicación en el punto cero: 0,00000

Indicación para carga Nominal: 2,03188

Indicación residual: 0,00002

3030/FU-034

DIVISION DE METROLOGIA	
CERTIFICADO DE CALIBRACION	NUMERO: 17746
LABORATORIO DE FUERZA	Código: FU-021/2008
	FECHA: 2 008-07-14
	Página 5 de 9

TABLA 2 VALORES INDICADOS PARA CARGAS ASCENDENTES Y DESCENDENTES

Posición de montaje CARGA en kN	Igual posición de montaje		Diferentes posiciones de montaje			
	Ascendentes		Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente
	0 °	0 °	120 °	120 °	240 °	240 °
	Serie 1 Lecturas	Serie 2 Lecturas	Serie 3 Lecturas	Serie 3* Lecturas	Serie 4 Lecturas	Serie 4* Lecturas
0,00	0,00000	0,00000	0,00000	-----	0,00000	-----
100,00	0,20309	0,20309	0,20309	0,20331	0,20311	0,20330
200,00	0,40629	0,40626	0,40629	0,40660	0,40628	0,40660
300,00	0,60948	0,60948	0,60951	0,60992	0,60950	0,60992
400,00	0,81276	0,81276	0,81279	0,81324	0,81278	0,81319
500,00	1,01598	1,01600	1,01602	1,01647	1,01602	1,01643
600,00	1,21923	1,21925	1,21927	1,21969	1,21922	1,21958
700,00	1,42242	1,42245	1,42249	1,42280	1,42241	1,42272
800,00	1,62561	1,62563	1,62567	1,62586	1,62559	1,62580
900,00	1,82873	1,82878	1,82883	1,82879	1,82873	1,82882
1000,00	2,03184	2,03185	2,03188	-----	2,03183	-----
0,00	0,00002	0,00004	-----	0,00004	-----	0,00004

TABLA 3 INDICACIONES RESIDUALES RELATIVAS, REFERENCIADAS A CARGA NOMINAL

Serie de mediciones	Serie 1	Serie 2	Serie 3 / 3*	Serie 4 / 4*
Cambios del punto cero en %	0,001	0,002	0,002	0,002

3030/FU-034

Sede principal: Kr 13 No 27 - 66, Pisos 5, 7 y 10. Conmutador 3820840, Fax 3505220  
E mail: info@sic.gov.co www.sic.gov.co Sede Cali: Av Kr 50 No 27-55 int 2. Teléfono 3153265/69  
Rec. Equipos 2218715. Bogotá D. C., Colombia

DIVISION DE METROLOGIA	
CERTIFICADO DE CALIBRACION	NUMERO: 17746
LABORATORIO DE FUERZA	Código: FU-021/2008
	FECHA: 2 008-07-14
	Página 6 de 9

TABLA 4 PROMEDIOS, DESVIACIONES RELATIVAS DE INDICACION Y REVERSIBILIDAD

Carga en kN	Series 1 y 2		Series 1, 3 y 4		Error de reversibilidad (%)
	Lecturas Promedio	Error de Repetibilidad (%)	Lecturas Promedio	Error de Repetibilidad (%)	
100,00	0,20309	0,000	0,20310	0,010	0,101
200,00	0,40628	0,007	0,40629	0,002	0,078
300,00	0,60948	0,000	0,60950	0,005	0,068
400,00	0,81276	0,000	0,81278	0,004	0,053
500,00	1,01599	0,002	1,01601	0,004	0,042
600,00	1,21924	0,002	1,21924	0,004	0,032
700,00	1,42244	0,002	1,42244	0,006	0,022
800,00	1,62562	0,001	1,62562	0,005	0,012
900,00	1,82876	0,003	1,82876	0,005	0,001
1000,00	2,03185	0,000	2,03185	0,002	-----

ECUACION 1: donde Y es el valor de deformación calculado y F es la fuerza aplicada

$$f3: Y = -2,45911635071184E-12 * F^3 + 3,39208542195442E-9 * F^2 + 0,002030905511961 * F$$

ECUACION 2: donde Y es la fuerza calculada y F es el valor de deformación encontrado

$$f3: Y = 0,144280889713865 * F^3 - 0,40438617754762 * F^2 + 492,391101931906 * F$$

DIVISION DE METROLOGIA	
CERTIFICADO DE CALIBRACION	NUMERO: 17746
LABORATORIO DE FUERZA	Código: FU-021/2008
	FECHA: 2 008-07-14
	Página 7 de 9

TABLA 5 PROMEDIOS Y DESVIACIONES RELATIVAS POR INTERPOLACION

Carga en kN	Series 1, 3 y 4 Lecturas promedio	Valores promedio	
		Por interpolación	Desviación %
100,00	0,20310	0,20312	0,012
200,00	0,40629	0,40630	0,002
300,00	0,60950	0,60951	0,002
400,00	0,81278	0,81275	-0,004
500,00	1,01601	1,01599	-0,001
600,00	1,21924	1,21923	-0,001
700,00	1,42244	1,42245	0,001
800,00	1,62562	1,62564	0,001
900,00	1,82876	1,82877	0,000
1000,00	2,03185	2,03184	-0,001

TABLA 6 CLASIFICACION DEL INSTRUMENTO MEDIDOR DE FUERZA

CLASIFICACION DEL INSTRUMENTO MEDIDOR DE FUERZA		
Tomando como base los resultados anteriores de las mediciones, el instrumento medidor de fuerza, según las prescripciones de la Norma ISO 376, (NTC 4350), se clasifica así:		
Rangos de medición	Clase de precisión	Incertidumbre de medición (%)
Desde 1000,00 kN hasta 500,00 kN	00	± 0,028
Desde 1000,00 kN hasta 400,00 kN	00	± 0,034
Desde 1000,00 kN hasta 300,00 kN	00	± 0,041
Desde 1000,00 kN hasta 200,00 kN	0,5	± 0,061
Desde 1000,00 kN hasta 100,00 kN	0,5	± 0,061

DIVISION DE METROLOGIA

CERTIFICADO DE CALIBRACION

NUMERO: 17746

Código: FU-021/2008

LABORATORIO DE FUERZA

FECHA: 2 008-07-14

Página 8 de 9

**TABLA 7 VALORES COMPENSADOS CALCULADOS EN DEPENDENCIA DE LA CARGA**

KN	0,000	5,000	10,000	15,000	20,000	25,000	30,000	35,000	40,000	45,000
100,000	0,20312	0,21328	0,22344	0,23360	0,24375	0,25391	0,26407	0,27423	0,28439	0,29455
150,000	0,30470	0,31486	0,32502	0,33518	0,34534	0,35550	0,36566	0,37582	0,38598	0,39614
200,000	0,40630	0,41646	0,42662	0,43678	0,44694	0,45710	0,46726	0,47742	0,48758	0,49774
250,000	0,50790	0,51806	0,52822	0,53838	0,54854	0,55870	0,56887	0,57903	0,58919	0,59935
300,000	0,60951	0,61967	0,62983	0,63999	0,65016	0,66032	0,67048	0,68064	0,69080	0,70097
350,000	0,71113	0,72129	0,73145	0,74161	0,75177	0,76194	0,77210	0,78226	0,79242	0,80259
400,000	0,81275	0,82291	0,83307	0,84323	0,85340	0,86356	0,87372	0,88388	0,89405	0,90421
450,000	0,91437	0,92453	0,93469	0,94486	0,95502	0,96518	0,97534	0,98551	0,99567	1,00583
500,000	1,01599	1,02616	1,03632	1,04648	1,05664	1,06680	1,07697	1,08713	1,09729	1,10745
550,000	1,11762	1,12778	1,13794	1,14810	1,15826	1,16842	1,17859	1,18875	1,19891	1,20907
600,000	1,21923	1,22939	1,23956	1,24972	1,25988	1,27004	1,28020	1,29036	1,30052	1,31069
650,000	1,32085	1,33101	1,34117	1,35133	1,36149	1,37165	1,38181	1,39197	1,40213	1,41229
700,000	1,42245	1,43261	1,44277	1,45293	1,46309	1,47325	1,48341	1,49357	1,50373	1,51389
750,000	1,52405	1,53421	1,54437	1,55453	1,56469	1,57484	1,58500	1,59516	1,60532	1,61548
800,000	1,62564	1,63579	1,64595	1,65611	1,66627	1,67642	1,68658	1,69674	1,70690	1,71705
850,000	1,72721	1,73737	1,74752	1,75768	1,76784	1,77799	1,78815	1,79830	1,80846	1,81861
900,000	1,82877	1,83892	1,84908	1,85923	1,86939	1,87954	1,88970	1,89985	1,91001	1,92016
950,000	1,93031	1,94047	1,95062	1,96077	1,97093	1,98108	1,99123	2,00138	2,01153	2,02169
1000,00	2,03184	2,04199	2,05214	2,06229	2,07244	2,08259	2,09274	2,10289	2,11304	2,12319

At.

DIVISION DE METROLOGIA

CERTIFICADO DE CALIBRACION

NUMERO: 17746

LABORATORIO DE FUERZA

Código: FU-021/2008

FECHA: 2 008-07-14

Página 9 de 9

**OBSERVACIONES:**

1. "Un Instrumento de medición de fuerza debe calibrarse de nuevo cuando sufra una sobrecarga superior a la del ensayo de sobrecarga (véase Capítulo B.1) o después de una reparación." (Numeral 7.3.2 de ISO 376, o NTC 4350) es decir, si la carga excede en más del 12% la capacidad nominal del Instrumento, o también si se realizan reparaciones en él o en su instrumento indicador, sin tener en cuenta el tiempo transcurrido desde la presente calibración.
2. "Para los fines de esta Norma, la duración de la validez del certificado no puede superar los 26 meses" (Numeral 7.3.2 de ISO 376, o NTC 4350)

**FIRMA(S) AUTORIZADA(S)**

Authorized signature(s)

Elaboró:

  
**Ing. LUIS HENRY BARRETO ROJAS**  
Laboratorio de Fuerza

Revisó:

  
**Ing. ARISTIDES C. DAJER ESPELETA**  
Laboratorio de Fuerza

## **ANEXO C. MANUAL DE PROCEDIMIENTO**

- 1.** Llenar la hoja llamada "OPCIONES" con los datos del certificado de calibración (hoja 3).
- 2.** En la hoja "REPRODUCIB" digitar la carga de rotura en KN correspondiente a cada cilindro ensayado.
- 3.** En la hoja "OPCIONES" en la columna "indicación máquina" busco el valor de la carga en KN más cercana al valor promedio de rotura calculado en el paso número 2.
- 4.** En la hoja "OPCIONES" en la columna de incertidumbre combinada (%) busco el valor el correspondiente del seleccionado en el paso número 3.
- 5.** Teniendo las coordenadas de esa celda voy a la hoja "Ui" me ubico en la celda de calibración prensa y en la celda de frente reemplazo el valor de la celda.