



**Certificación ISO 9001:2000 ‡
Laboratorios acreditados por EMA §**

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN MÉTODOS DE ENSAYOS DE CONSTRUCCIÓN

Horacio Delgado Alamilla
Guadalupe Evangelina Itandehui Martínez Peña
Alfonso Pérez Salazar
Mayra Flores Flores

**Publicación Técnica No 275
Sanfandila, Qro, 2005**

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Estimación de la incertidumbre en métodos
de ensayo de construcción**

**Publicación Técnica No. 275
Sanfandila, Qro, 2005**

Este trabajo fue realizado por los investigadores M en I Horacio Delgado Alamilla, Ing Guadalupe Evangelina Itandehui Martínez Peña, Ing Alfonso Pérez Salazar y M en C Mayra Flores Flores en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte.

Índice

Resumen	III
Abstract	V
Resumen ejecutivo	VII
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 La metrología como sistema de aseguramiento	2
1.3 El proceso de medición	3
1.3.1 Conceptos asociados a la medición	4
1.3.2 Concepto de incertidumbre	5
2 Marco normativo para la estimación de la incertidumbre, en laboratorios de ensayo	7
2.1 Requisitos y acuerdos para la estimación de la incertidumbre en las mediciones	7
2.1.1 Conceptos	7
2.1.1.1 Norma NMX-EC-17025-IMNC-2000	7
2.1.1.2 entidad mexicana de acreditación, a. c. (ema, a. c.)	8
2.1.2 Requisitos de la Norma NMX-EC-17025- IMNC-2000	8
2.1.3 Requisitos de la política MP-CA001-02	9
2.1.4 Acuerdos del Subcomité de Construcción de la EMA (2005)	11
2.2 Criterio para la estimación de la incertidumbre en las mediciones	12
2.3 Procedimiento para la estimación de la incertidumbre	12
3 Metrología en los laboratorios de ensayo	15
3.1 Determinación de intervalos de calibración	17
3.1.1 Métodos para determinar los intervalos de calibración	18
3.1.1.1 Ajuste automático o en escalera	18
3.1.1.2 Carta de control	18
3.1.1.3 Tiempo en uso	18
3.1.1.4 Verificación en servicio o ensayos de caja negra	19
3.1.1.5 Aproximación estadística	19
3.1.1.6 Método de regresión	19
3.2 Uso de los certificados o informes de calibración	19
4 Estimación de la incertidumbre de ensayos	21
4.1 Definición y conceptos básicos para estimación de la incertidumbre	21
4.1.1 Términos generales sobre metrología	21

4.1.2 Mediciones	22
4.1.3 Errores durante el proceso de medición	23
4.2 Norma NMX-CH-140-IMNC-2002	25
4.2.1 Alcance de la Norma	26
4.2.2 Bases teóricas para la estimación de la incertidumbre	26
4.3 Estimación de la incertidumbre	28
4.3.1 Paso 1. Definición del proceso de medición	29
4.3.1.1 Identificación de los equipos de medición a utilizar, y los requisitos que debe cumplir	29
4.3.1.2 Identificación de la repetibilidad y reproducibilidad de la Norma a utilizar	29
4.3.1.3 Identificación de las variables independientes	29
4.3.2 Paso 2. Definición de las variables aleatorias	29
4.3.3 Paso 3. Establecer la relación matemática que describa la función del proceso de medición	30
4.3.4 Paso 4. Establecer la expresión para estimación de la incertidumbre combinada	31
4.3.5 Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad	32
4.3.6 Paso 6. Estimación de la incertidumbre asociada a cada variable	32
4.3.6.1 Incertidumbre normal Tipo A	33
4.3.6.2 Incertidumbre normal Tipo B	34
4.3.7 Paso 7. Estimación de la incertidumbre combinada	35
4.3.8 Paso 8. Determinación de los grados de libertad	35
4.3.9 Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida	36
4.3.10 Paso 10. Reporte de resultados	36
5 Ejemplos de estimación de la incertidumbre	39
5.1 Ejemplo 1. Balanza	40
5.2 Ejemplo 2. Probeta de equivalente de arena	43
5.3 Ejemplo 3. Desgaste de Loa Ángeles	45
5.4 Ejemplo 4. Análisis granulométrico	49
5.5 Ejemplo 5. Equivalente de arena	52
5.6 Ejemplo 6. Gravedad específica	56
Recomendaciones	63
Bibliografía	65
Anexos	
Anexo A1. Desgaste de los Ángeles	IX
Anexo A2. Granulometría	XI
Anexo A3. Equivalente de arena	XIII
Anexo A4. Gravedad específica	XV

Resumen

Se presenta un procedimiento de estimación de la incertidumbre en métodos de medición, en forma detallada para diferentes tipos de ensayos de laboratorio relacionados con la industria de la construcción. Se ilustran los factores que más influyen en éste tipo de análisis, como son los equipos e instrumentos de medición utilizados; y la destreza del ejecutante del ensayo, bajo conceptos estadísticos como son la repetibilidad (σ_r) y reproducibilidad (σ_R) del método. De igual forma se presenta una recopilación bibliográfica de las especificaciones de calidad que debe cumplir mediante el análisis de las Normas NMX-17025, NMX-CH-140 y las políticas de calidad de la **ema, a. c.**

De manera conjunta se presenta una breve descripción de los parámetros metrológicos comúnmente utilizados, ilustrando la aplicación de los mismos en diferentes equipos de medición.

Abstract

This work present a procedure for estimate the bias, in a detail form, in different test method. It shows the main factors used in this type of analysis as equipment and instrument for measurement, the laboratories workers ability, under statistic concepts like repeatability (σ_r) and reproducibility (σ_R). in the same form, it presents a bibliography summary of the quality specification by means the analysis of the standards NMX-EC-17025- IMNC-2000, NMX-CH-140-IMNC-2002 and **ema**, **a. c.** quality politics.

It presents a brief description of the metrologics parameters most common used, illustrating the application in different measurement equipments.

Resumen ejecutivo

Los sistemas de calidad se desarrollaron con el fin de minimizar los problemas comunes durante la producción, y asegurar que todos los productos fueran satisfactorios, ha creado diversos mecanismos y organizaciones, las cuales se han dado a la tarea de homogeneizar todos los criterios establecidos.

Bajo este proceso surgieron organizaciones en diferentes países; la **entidad mexicana de acreditación, a. c. (ema, a. c.)** es una de ellas. Esta organización es la encargada de acreditar a laboratorios tanto de calibración como de ensayos.

Uno de los principales controles de calidad en los ensayos de laboratorio, es el aseguramiento de una correcta medición durante la realización de los mismos; de esto surge un concepto un poco más complejo, al cual se denomina "*incertidumbre*". Uno de los principales retos de la mayoría de los laboratorios es estimar esta incertidumbre, la cual se asocia a todo el proceso de medición, pasando desde el equipo utilizado hasta la confiabilidad requerida en la estimación. Esto puede sonar muy complejo, y en cierta forma lo es ya que se necesita conocer información de diferentes tipos, entre la que cabe mencionar: datos del fabricante del equipo, cartas de calibración, repetibilidad del método de ensayo, entre otras; esto sin mencionar el conocimiento de interpretación de los mismos.

Este trabajo tiene como fin establecer un procedimiento, mediante ejemplos, para la estimación de la incertidumbre en métodos de ensayo utilizados en la industria de la construcción.

En el capítulo 1 se presentan algunos antecedentes relacionados con los sistemas de calidad, enfatizando la importancia del proceso de medición y la incertidumbre asociado al mismo.

Otro punto considerado es la importancia de la metrología como sistema de aseguramiento, la cual se menciona en forma breve.

El capítulo 2 contiene una recopilación bibliográfica del marco normativo que se debe tener en cuenta cuando se realiza un análisis de incertidumbre, tomando en consideración requisitos de diferentes normas, como son la NMX-EC-17025-IMNC-2000, políticas de la **ema, a. c.**, y acuerdos tomados por el subcomité de la misma.

En el tercer capítulo se procede a una descripción de los parámetros metrológicos que se deben considerar a la hora de realizar un ensayo; de igual forma se mencionan diferentes métodos para la estimación de los intervalos de calibración de instrumentos de medición.

Se hace alusión a diferentes aspectos que resultan convenientes durante el análisis de un certificado ó informe de calibración.

El capítulo 4 configura un procedimiento para la estimación de la incertidumbre mediante una secuencia de pasos, los cuales tienen como finalidad facilitar esta estimación.

En forma adicional, se presentan definiciones y conceptos básicos que se deben tener en cuenta, al igual que un análisis de la Norma NMX-CH-140-IMNC-2002, estableciendo los requerimientos más importantes.

En el último capítulo se presenta la estimación de la incertidumbre tanto para equipos comúnmente utilizados así como métodos de ensayo utilizados en la industria de la construcción; estas estimaciones pueden servir como base para análisis de otros ensayos con características similares.

1 Introducción

1.1 Antecedentes

El desarrollo de los sistemas de calidad se dio junto con el comercio militar; durante la Segunda Guerra Mundial se necesitaban productos adecuados para usarlos en sus distintas operaciones, obtenidos a un precio económico y realista. De esta manera, se establecieron requerimientos de compra a los proveedores, y se diseñó un sistema de administración de la calidad para minimizar los problemas comunes durante la producción y asegurar que todos los productos fueran satisfactorios. Este proceso, en su inicio aseguraba un control adecuado en las entradas de insumos y en los procesos de fabricación.

Muy pronto, dicho sistema fue adoptado por los japoneses para sobrevivir económicamente convirtiéndose en un país con capacidad de exportar productos manufacturados. En la actualidad, los japoneses han contribuido a una mejora evidente en la práctica de los conceptos de calidad.

Pero pareciese que, antes de que existieran los sistemas de calidad, el trabajo no se realizaba de forma correcta, y que los sistemas indican cómo hacerlo. La realidad es que la calidad siempre ha existido en el trabajo, y que los sistemas de calidad son una técnica para evidenciar, mantener y mejorar la calidad del trabajo. A nivel conceptual, esta relación puede apreciarse en el ciclo de Deming, que no es más que una versión generalizada del método científico (Figura 1.1)

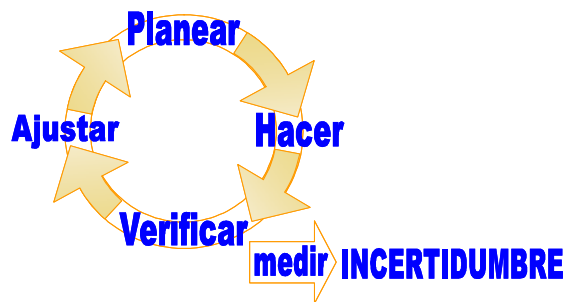


Figura 1.1
Ciclo de Deming

En este ciclo se evidencia que la medición entra como una herramienta indispensable para el conocimiento y el control; y estos, finalmente redundan en una mejor forma de hacer las cosas; esto es, en calidad.

Dado que las mediciones son parte integral del trabajo y de la vida diaria, no tomamos conciencia de la importancia y del valor económico y social que representa la gran cantidad de mediciones que hacemos diariamente. Por lo que,

es fácil imaginar, dentro de un proceso industrial, la importancia del control sistemático de las mediciones pues se ve reflejado en el producto final; en cambio, para laboratorios de ensayo debemos tener la perspectiva de que un resultado obtenido se emplea como base para opiniones y toma de decisiones importantes de un proyecto. De ahí que si la medición no cumple con la especificación se tiende a buscar una segunda opinión; y en caso contrario se aceptan sin problema las mediciones que están dentro de especificación.

El valor de las mediciones depende de su correcta realización y su adecuada interpretación; ya que los instrumentos por tener imperfecciones de fabricación, están expuestos a perturbaciones externas durante la medición, y a la vez se encuentran sujetos al empleo inadecuado por parte de los operadores. El conocimiento de todas estas variaciones y errores durante la medición ayuda a obtener un valor confiable de la medición. Este conjunto de variaciones y errores que pueden llegar a presentarse en la medición, constituye una parte de la estimación de la incertidumbre. De esta manera, la incertidumbre es el elemento fundamental para apreciar en forma adecuada la información que conlleva el resultado de una medición.

1.2 La metrología como sistema de aseguramiento

Las exigencias de calidad y productividad, actualmente son la base de la competitividad y sólo pueden ser afrontadas con éxito si se tiene una cultura metrológica y los elementos para ejercerla adecuadamente. Cabe señalar que no se conoce economía industrializada carente de institutos de metrología o de organismos normalizadores robustos.

El ciclo de Deming (Figura 1.1) realza la importancia de la metrología como soporte a todos los esquemas de normalización, acreditación y certificación, que corresponden a la exigencia creciente y demostrable ante usuarios y consumidores de la sociedad en general.

La metrología es la ciencia que trata de las medidas, de los sistemas de unidades adoptados y los instrumentos usados para efectuarlas e interpretarlas. Para determinar el valor de una magnitud, cualquier laboratorio, ya sea de calibración o de ensayo, “mide”; es decir, lleva a cabo un conjunto de operaciones que tienen por objetivo determinar el valor de una magnitud.

Para que cualquier laboratorio de ensayo logre mediciones confiables, no basta un sistema de aseguramiento de calidad documentado e implantado en la organización; es necesario trabajar en un programa de aseguramiento metrológico. Este programa debe organizar actividades de supervisión de los procesos de medición involucrados en el ensayo; de la destreza del personal; de la recepción de materias primas; y de que la exactitud de los instrumentos de

medición sea la adecuada para los propósitos establecidos. De forma adicional, para asegurar que el mensurando se determina en forma confiable, se requiere desarrollar procedimientos de acuerdo con las necesidades propias del laboratorio. Todo este conjunto de actividades debe ser parte de un sistema de calidad para obtener una acreditación y lograr el reconocimiento y confianza en la misma organización, y poder competir en los mercados nacional o internacional.

La metrología como sistema de aseguramiento tiene como objetivo principal: optimizar los recursos de la organización dirigidos a las actividades de instrumentación, capacitación, elaboración de procedimientos, calibración y asesorías.

En resumen, este sistema de aseguramiento debe basarse en tres elementos fundamentales: instrumentos de medición adecuados; formación del personal; y generación de procedimientos necesarios.

1.3 El proceso de medición

Los conceptos relacionados con las mediciones, dentro del vocabulario técnico de la metrología, tienen significados muy precisos por lo que se hace uso de términos que en el lenguaje común no necesariamente se emplean con el mismo propósito.

Con el fin de describir de manera universal (Internacional Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology, ISO 1993 -traducida por CENAM en 1994-) el concepto de medición, se definen a continuación los siguientes términos:

Medición. Conjunto de operaciones que tienen por objeto determinar el valor de una magnitud.

Magnitud. Atributo de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente.

Mensurando. Magnitud particular sujeta a medición.

Como puede verse, el ámbito de operación de la metrología se circunscribe a la determinación de atributos físicos o químicos de fenómenos naturales.

En la Figura 1.2 se ejemplifica de forma muy generalizada, el proceso que se puede seguir para realizar cualquier medición:

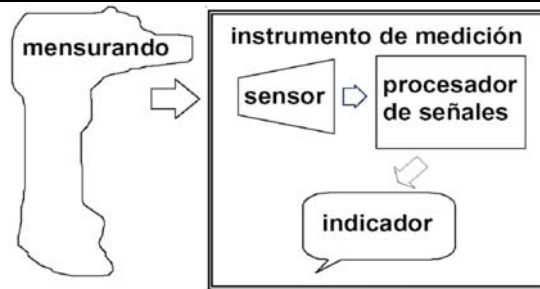


Figura 1.2
Proceso de medición

En cada parte del esquema es posible identificar fuentes de incertidumbre, por ejemplo:

- El sensor puede tener una respuesta no lineal que no se ha considerado en el procesamiento de la señal
- Si el procesamiento de la señal se realiza de manera digital, habrá errores de redondeo
- Si el procesamiento se realiza de manera electrónica, los componentes del circuito tendrán parámetros diferentes con respecto a sus valores de diseño
- Si el indicador es digital, el valor de la medición se verá truncado al número de dígitos disponibles
- Si el indicador es analógico, la incertidumbre de la lectura dependerá de la resolución del instrumento y de la habilidad visual del operador.

La norma **NMX-CH-140-IMNC-2002** “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones”, en **3.3.2** presenta una lista de fuentes posibles de incertidumbre en una medición. Existen muchos factores que influyen en el proceso de medición, pero debe hacerse uso del criterio para identificar los factores más significativos.

1.3.1 Conceptos asociados a la medición

Una medición arroja el valor indicado como “resultado sin corregir” (lectura del indicador en el caso de la Figura 1.2), por tanto, este valor es una aproximación del valor verdadero (y desconocido) del mensurando.

Exactitud significa qué tan cerca se está del valor verdadero, por lo que la evaluación de dicha cercanía depende de nuestro conocimiento de la verdad.

El valor verdadero es algo que existe, pero que no se conoce con un cien por ciento de certeza. Por ello se ha establecido el artificio llamado valor convencionalmente verdadero, apoyado por unidades de patrón de referencia, que representan las diferentes magnitudes convenidas como “verdaderas”, y que nos permiten tener un parámetro de comparación denominado trazabilidad. El valor de un patrón se encuentra más cerca del valor verdadero pero aún así en casi todos

los casos permanecerá un error de medición remanente, el cual no es posible conocer porque se desconoce el valor verdadero del mensurando.

Trazabilidad es una serie de eslabones encadenados que relacionan el resultado de una medición con las unidades patrón establecidas.

Los conceptos asociados a la medición se pueden ver en la Figura 1.3.

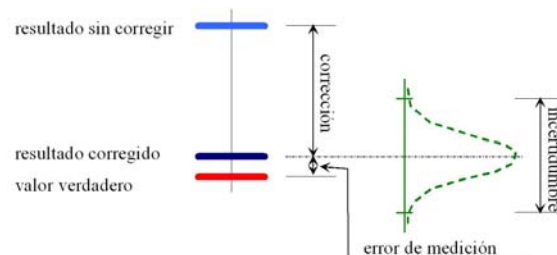


Figura 1.3
Términos comunes asociados a una medición

En esta figura se aprecia que en una medición se obtiene un “resultado sin corregir”, que corresponde a la lectura del instrumento de medición; así, este valor es una primera aproximación al valor verdadero del mensurando. Si se conocen los factores de influencia en la medición y se corrige el resultado, se obtiene un resultado corregido y que constituye una mejor estimación del valor del mensurando. Una información disponible de forma inmediata para conocer el error del instrumento es el certificado o informe de calibración; en él se encuentra la diferencia de los valores obtenidos con el instrumento de medición, contra el patrón de mayor exactitud.

1.3.2 Concepto de incertidumbre

La incertidumbre de una medición, se define como el intervalo estadístico dentro del cual se tiene una probabilidad de que se encuentre el valor verdadero. La incertidumbre es en cierta medida subjetiva, y se debe tomar como la duda que se tiene del resultado de la medición, debido a los errores que se cometen y que no se corrigen.

La NMX-CH-140-IMNC-2002 “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones” define **incertidumbre** como: parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando (Figura 1.3).

El resultado de la medición tiene asociado un intervalo de valores en el cual, de acuerdo con la información disponible, se podría suponer que se encuentra el valor verdadero. Sin esta estimación, la verificación del cumplimiento con estándares podría arrojar resultados incorrectos.

Al resultado de la medición “y”, se le asocia un intervalo $\pm U$ que representa la estimación de su incertidumbre. Dentro del ámbito industrial, la norma propone que cuando el intervalo $y \pm U$ se encuentre completamente dentro de la especificación, el cliente deberá aceptar que los productos son conformes con la especificación. En caso contrario, un producto no es conforme cuando este intervalo es encuentra completamente fuera de la especificación. En caso ambiguo, la norma no establece una solución general, y es responsabilidad del proveedor definir reglas y garantías especiales para estos casos (Figura 1.4).

Dentro del campo de laboratorios de ensayo, la estimación de la incertidumbre es importante para apoyar en bases firmes las decisiones tomadas para un proyecto, servicio o solicitud en específico. En los casos ambiguos, de igual manera, se deben definir reglas y garantías especiales basadas en la experiencia tanto del personal, como del sistema de calidad del laboratorio de ensayos (Figura 1.4).

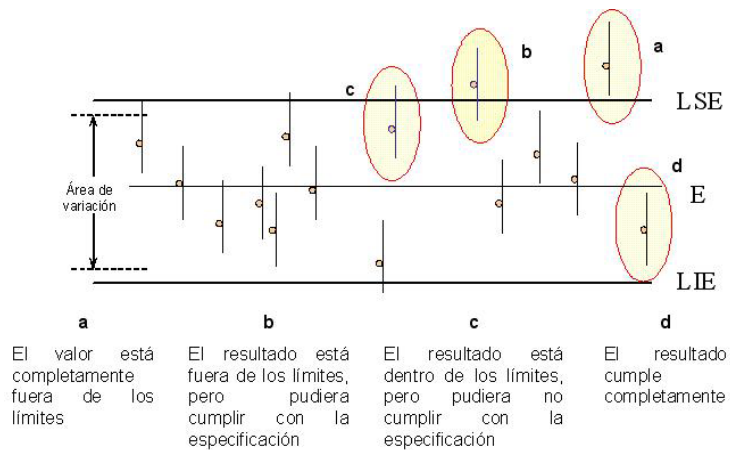


Figura 1.4
Esquema de evaluación de la conformidad e incertidumbre

2 Marco normativo para la estimación de la incertidumbre en laboratorios de ensayo

La acreditación es el acto que da la seguridad y avala que los laboratorios de ensayo ejecutan las regulaciones, normas o estándares, declarados por la organización, con precisión acorde con los servicios que consume la sociedad.

La **entidad mexicana de acreditación, a. c.** es la primera entidad de gestión privada, de tercera parte, imparcial, incluyente y profesional en nuestro país, que tiene por objetivo acreditar a los organismos de la evaluación de la conformidad (laboratorios de ensayo y calibración, organismos de certificación y unidades de verificación).

Dicha acreditación para laboratorios de ensayo es otorgada siempre y cuando la organización cumpla con los requisitos que marca la norma NMX-EC-17025-IMNC-2000 (ISO/IEC 17025:1999) Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración, las políticas establecidas por la **entidad mexicana de acreditación, a. c.** y los acuerdos emitidos por el Comité de Evaluación de Laboratorios de Ensayo.

Los laboratorios de ensayo que quieren acreditarse deben cumplir con una serie de requisitos establecidos en norma, y adquirir los compromisos que establece la **entidad mexicana de acreditación, a. c.** Uno de los más importantes y quizá el menos conocido es la estimación de la incertidumbre. No existe un método universal para estimar la incertidumbre de las mediciones debido a la diversidad de los tipos de medición y de las variables que afectan a cada tipo. Además, para la estimación de la incertidumbre en ensayos es indispensable que lo haga la persona experta en el conocimiento teórico y práctico del ensayo, con bases firmes de estadística y conocimientos básicos de metrología. A continuación se resumen los requisitos y criterios que marca actualmente la norma NMX-EC-17025-IMNC-2000 (ISO/IEC 17025:1999) Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración, la **entidad mexicana de acreditación, a. c.** y el Comité de Evaluación de Laboratorios de Ensayo.

2.1 Requisitos y acuerdos para estimación de incertidumbre en las mediciones

2.1.1 Conceptos

2.1.1.1 Norma NMX-EC-17025-IMNC-2000

En la norma NMX-EC-17025-IMNC-2000 Requisitos para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración, sección 5, se establece lo siguiente:

“Sección 5. Requisitos técnicos.

5.1.1 Son muchos los factores que determinan la exactitud y fiabilidad de los ensayos y/o las calibraciones realizados por un laboratorio. Estos factores incluyen contribuciones de:

- factores humanos,
- instalaciones y condiciones ambientales,
- métodos de ensayo y calibración y validación de métodos,
- equipo,
- trazabilidad de la medición,
- el muestreo,
- el manejo de los elementos de ensayo y calibración.

5.1.2 El grado en que los factores contribuyen a la incertidumbre total de las mediciones difiere considerablemente entre (tipos de) ensayos y entre (tipos de) calibraciones. El laboratorio tendrá en cuenta estos factores para desarrollar métodos y procedimientos de ensayo y calibración, adiestrar y calificar al personal, y seleccionar y calibrar los equipos que utiliza.”

2.1.1.2 entidad mexicana de acreditación, a. c.

La **entidad mexicana de acreditación, a. c.** adopta como concepto de incertidumbre el establecido en la NMX-Z-055:1996 IMNC Metrología-Vocabulario de Términos Fundamentales y Generales, como: Parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente, ser atribuidos al mesurando.

2.1.2 Requisitos de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2000

La norma NMX-EC-17025-IMNC-2000 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración, establece las siguientes cláusulas sobre incertidumbre de medición en laboratorios:

“**Sección 5.4.6.2.** Los laboratorios de ensayo tendrán y aplicarán procedimientos para estimar la incertidumbre de la medición. Hay casos en que la naturaleza del método de ensayo puede impedir un cálculo riguroso metrológica y estadísticamente válido de la incertidumbre de la medición. En estos casos el laboratorio intentará al menos identificar los componentes de la incertidumbre y hacer un estimado razonable, y asegurar que el modo de informar resultados no ofrezca una impresión errónea de la incertidumbre. El estimado se basará en el conocimiento del desempeño del método y el alcance de la medición, y considerará, por ejemplo, datos de validación del desempeño del método y el alcance de la medición, y considerará, por ejemplo, datos de validación y experiencias anteriores.

Nota 1. El grado de rigor necesario para estimar la incertidumbre depende de los factores tales como:

- requisitos del método de ensayo
- requisitos del cliente
- existencia de límites reducidos en que basar las decisiones de conformidad con una especificación

Nota 2. Si un método reconocido especifica límites para los valores de las fuentes principales de incertidumbre de medición y especifica la forma de presentar los resultados calculados, se considera que el laboratorio ha cumplido con este apartado al aplicar el método de ensayo e informar los resultados (vea 5.10).”

“Sección 5.4.6.3. Al estimar la incertidumbre de la medición, se considerará todos los componentes de la incertidumbre importantes para la situación dada, usando para ello métodos de análisis adecuados.

Nota 1. Entre las fuentes que contribuyen a la incertidumbre se incluyen, aunque sin limitarse necesariamente a las mismas, los patrones de referencia y materiales de referencia utilizados, los métodos y equipos utilizados, las condiciones ambientales, las propiedades y la condición del artículo ensayado o calibrado, y el operador.

Nota 2. Por lo general, cuando se estima la incertidumbre de la medición no se tiene en cuenta la conducta a largo plazo pronosticada para el artículo ensayado y/calibrado.

Nota 3. Para más información vea la ISO 5725 y la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de la Medición.”

“Sección 5.10.3.1 inciso c)...los informes de ensayo incluirán en los casos necesarios para interpretar los resultados del ensayo:

c) si procede, una declaración sobre la incertidumbre estimada de la medición; esta información sobre la incertidumbre es necesaria en los informes de ensayo cuando resulta importante para la validez o aplicación de los resultados de ensayo, cuando las instrucciones del cliente así lo requieren, o cuando la incertidumbre influye en la conformidad con un límite de especificación;”

2.1.3 Requisitos de la Política MP-CA001-02

“**Sección 3.1** de la Política MP-CA001-02. La incertidumbre para cada paso en la cadena de trazabilidad debe ser estimada (a través de cálculos) de acuerdo a los métodos definidos en la norma NMX-CH-140-IMNC-2002 Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones. Cuando un sistema particular de medición quede fuera del alcance de esta norma, el laboratorio debe presentar un procedimiento de estimación detallado generalmente aceptado. En ambos casos debe ser declarada a cada paso de la cadena de tal manera que la incertidumbre estándar combinada pueda ser calculada para la cadena completa. Estas incertidumbres deben estar soportadas matemáticamente y estarán representadas como incertidumbres expandidas usando un nivel de confianza de aproximadamente el 95 % y su factor de cobertura correspondiente.”

“**Sección 3.3** de la Política MP-CA001-02. Los laboratorios de ensayo deben:

3.3.1 Poseer y aplicar procedimientos para estimar la incertidumbre de medición asociada con los resultados de los ensayos o mediciones químicas que realicen. Asimismo, esta información debe estar disponible y ser lo suficientemente clara para los usuarios.

3.3.2 Estimar la incertidumbre de los resultados analíticos provenientes de los métodos de medición que empleen, aplicando los procedimientos correspondientes de acuerdo a los siguientes criterios:

3.3.2.2 Cuando la naturaleza del método de ensayo de la medición química dificulte el cálculo de la incertidumbre componente por componente, el laboratorio debe al menos, intentar identificar todos los componentes de la incertidumbre y hacer una estimación razonable, asegurándose de que la manera de informar los resultados no proporcione una interpretación inadecuada de la incertidumbre.

Una estimación razonable se debe basar en el conocimiento del desempeño del método de acuerdo a los siguientes casos:

I. Cuando se emplee un método validado la incertidumbre se estimará:

Quando la validación se haya realizado en el laboratorio, la incertidumbre se estimará utilizando la desviación estándar de la reproducibilidad de los resultados, s_R , que se evalúa de manera formal por medio de un análisis de varianza.

La incertidumbre estimada, deberá estimarse con las incertidumbres que considere el laboratorio significativas y que no se encuentren incluidas dentro del diseño de la validación... la incertidumbre se expresará o calculará empleando las expresiones mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1
Expresión para el cálculo de la incertidumbre

CASO	Expresión para estimar la incertidumbre	Incertidumbre	Incertidumbre expandida
I	$u = \sqrt{(s_R^2) + \left(\sum_{i=1}^n u_i^2\right)}$	s_R Desviación estándar de la reproducibilidad de los resultados en el diseño de experimentos	$U = k * u$ $k = 2$
$u = \sqrt{(s_R^2) + \left(\sum_{i=1}^n u_i^2\right)}$ en donde: $\sum_{i=1}^n u_i^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots u_n^2$ u_i = incertidumbre por tipo de matriz, muestreo, pretratamiento de muestra, incertidumbre de los materiales de referencia, medio ambiente de laboratorio en la muestra, otras			

3.3.2.3 Los laboratorios de ensayos solicitantes y acreditados por ema, pueden satisfacer temporalmente una deficiencia citada contra la cláusula 5.4.6.2 y/o 5.4.6.3 de la NMX-EC-17025-IMNC-2000, presentando un plan de implantación documentado de acción correctiva. El plan de implantación debe contener los pasos que dará el laboratorio para redactar e implementar sus procedimientos para calcular la incertidumbre de medición y se debe reportar trimestralmente a ema el avance que se obtenga, el tiempo límite para la implantación del plan será de un año.

3.3.4 La incertidumbre estimada, u , en los casos de la sección 3.3.2.2 debe expresarse como incertidumbre expandida, U , de acuerdo a la Tabla 1.”

2.1.4 Acuerdos del Subcomité de construcción de la ema, a. c. (2005)

Acuerdo aprobado en 2004-09-01 y en vigor a partir del 2005-01-12:

“Si en una visita de vigilancia se detecta que el laboratorio no cumplió con el plan de incertidumbre se considerará como no conformidad, pero este solo hallazgo no será motivo de suspensión, para esto se deberá analizar el resto de las no conformidades para determinar si se suspende totalmente la acreditación.

Por otro lado por esta sola no conformidad se otorgará un plazo de 60 días naturales para presentar la evidencia del cumplimiento al 100 % con el plan de incertidumbre que el laboratorio haya establecido.”

2.2 Criterio para la estimación de la incertidumbre en las mediciones

La Política MP-CA001-02 Trazabilidad e Incertidumbre de mediciones emitida por la entidad mexicana de acreditación, a. c. establece lo siguiente:

“**Sección 3.3.2.4** Queda fuera del alcance de esta política la estimación de la incertidumbre de resultados de ensayos cualitativos o semi cuantitativos.”

2.3 Procedimiento para estimación de la incertidumbre

En la realización del procedimiento de estimación de la incertidumbre, dentro de una organización, debe tomarse en cuenta lo ya expuesto en los puntos anteriores. La Tabla 2 resume los requisitos y acuerdos.

Tabla 2
Resumen de requisitos y acuerdos para estimación de la incertidumbre en mediciones

Norma NMX-EC-17025-IMNC-2000 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración	
5.4.6.2	Los laboratorios tendrán... procedimientos para estimar la incertidumbre de la medición...
	Los laboratorios... aplicarán procedimientos para estimar la incertidumbre de la medición...
5.4.6.3	Al estimar la incertidumbre de la medición, se considerarán todos los componentes de la incertidumbre...
5.10.3.1	...los informes de ensayo incluirán en los casos necesarios para interpretar los resultados del ensayo... c) si procede, una declaración sobre la incertidumbre estimada de la medición;...
Política MP-CA001-02 emitida por la entidad mexicana de acreditación, a. c.	
3.1	La incertidumbre para cada caso de la cadena de trazabilidad debe ser estimada...
3.3.1	Posee... procedimientos para estimar la incertidumbre de medición...
	... aplica procedimientos para estimar la incertidumbre de medición...
3.3.2	Estimar la incertidumbre de los resultados...
3.3.2.2 I	... identificar todos los componentes de la incertidumbre y hacer una estimación razonable...Cuando se emplee un método validado...

2 Marco normativo para la estimación de la incertidumbre en laboratorios de ensayo

3.3.2.3	Los laboratorios de ensayo solicitantes y acreditados por ema, pueden satisfacer temporalmente una deficiencia citada contra la cláusula 5.4.6.2 y/o 5.4.6.3 de la NMX-EC-17025-IMNC-2000, presentando un plan de implantación documentado de acción correctiva...
3.3.4	La incertidumbre estimada, u , en los casos de la sección 3.3.2.2 debe expresarse como incertidumbre expandida, U , de acuerdo con la Tabla 1
Acuerdos del Comité de Evaluación de Laboratorios de Ensayo de 2005	
Acuerdo aprobado en 2004-09-01 y en vigor a partir de 2005-01-12	Si en una <u>visita de vigilancia</u> se detecta que el laboratorio no cumplió con el plan de incertidumbre se considerará como <u>no conformidad</u> , pero este solo hallazgo no será motivo de suspensión, para esto se deberá analizar el resto de las no conformidades para determinar si se suspende totalmente la acreditación. Por otro lado por esta sola no conformidad se otorgará un plazo de 60 días naturales para presentar la evidencia del cumplimiento al 100 % con el plan de incertidumbre que el laboratorio haya establecido

3 Metrología en los laboratorios de ensayo

En la mayoría de los casos, el mensurando no es directamente medible, sino que dependen de otras cantidades medibles y que se relacionan a través de una función matemática. Así, la incertidumbre de la medición del mensurando es resultado de combinar las incertidumbres de medición de las diferentes cantidades medidas, que dependerán de la importancia que cada componente tiene en el modelo de medición. De esta manera, los procesos de medición son potencialmente complejos, ya que están sujetos a: influencias externas que afectan los resultados, al cuidado que se tiene para realizar una buena medición, y al análisis y estimación razonable de la incertidumbre asociada al mensurando.

Dentro de los Laboratorios de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, los instrumentos más usados para determinar el mensurando en los ensayos acreditados son:

- Básculas y balanzas
- Termómetros
- Reglas metálicas
- Calibrador vernier
- Tamices (mallas)
- Manómetros
- Vacuómetros
- Celdas de carga
- etc.

Dadas las imperfecciones de fabricación del propio instrumento de medición, resulta necesario conocer los errores que pueden cometerse con su uso. Cabe aclarar que la incertidumbre no es propia del instrumento;- la incertidumbre existe cuando se lleva a cabo una medición con el instrumento.

Para conocer el error que existe por parte del instrumento, cuando se lleva a cabo una medición es necesario comparar el instrumento con otros de mayor exactitud, es decir, con instrumentos o valores patrón ya sean primarios o secundarios más cercanos al valor verdadero. Esta determinación se hace mediante otro proceso de medición que a su vez tendrá una incertidumbre propia de su método y procedimiento. A esa incertidumbre se le llama incertidumbre heredada del instrumento, y se conoce mediante una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo conocimiento de la incertidumbre en cada uno de los eslabones de la cadena.

Dicha cadena tiene su origen en el Sistema Internacional de Unidades, que está establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI con el nombre de Sistema General de Unidades de Medida, y es el único legal y de uso obligatorio en México de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 5 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización. Además de que es indispensable su cumplimiento para un laboratorio acreditado o por acreditarse.

Esta cadena ininterrumpida de comparaciones se le llama trazabilidad cuya definición es: “propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón por la cual pueda ser relacionado a referencias determinadas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas incertidumbres estimadas”.

La trazabilidad de los resultados de las mediciones se caracteriza por seis elementos:

1. *Una cadena ininterrumpida de comparaciones.* (Con origen en patrones de medición nacionales o internacionales, y termina con el valor del resultado de una medición o con el valor del patrón)
2. *Incertidumbre de la medición.* (Estimar la incertidumbre para cada paso de los métodos definidos y declararla para la estimación de la incertidumbre de la cadena completa)
3. *Documentación.* (Cada paso de la cadena debe ser realizado con procedimientos y documentos reconocidos, y los resultados deben ser registrados)
4. *Competencia.* (Evidencia de competencia técnica –acreditación–)
5. *Referencia al Sistema Internacional de Unidades (SI).* (Punto único de origen a patrones de máxima calidad metrológica utilizados para la realización de las unidades de SI)
6. *Recalibraciones.* (Para asegurar que la incertidumbre declarada del valor del patrón no se degrada en un tiempo determinado)

El último eslabón de la cadena de trazabilidad es las mediciones que se realizan en una pieza, ensayo o producto determinado y proporciona una parte esencial para la estimación de la incertidumbre de la cadena completa.

De esta manera, para una estimación de incertidumbre de un método de ensayo es necesario conocer la incertidumbre heredada de los equipos utilizados para determinar el mensurando. Un elemento importante para conocer la incertidumbre heredada, son las calibraciones y las verificaciones intermedias que se realizan a los equipos de medición.

Otro beneficio que ofrecen las calibraciones y las verificaciones periódicas es comprobar el desgaste del equipo de medición, y tener la certeza de que siempre son utilizados dentro de tolerancia. También existe la posibilidad de que la calibración de los instrumentos de medición se haga más de lo necesario y para lo cual es necesario seleccionar y documentar un intervalo de calibración.

3.1 Determinación de intervalos de calibración

Los principales factores que influyen en la determinación del intervalo de calibración inicial son: recomendación del fabricante; recomendación de un laboratorio nacional; extensión y severidad de uso; efectos ambientales (temperatura y humedad); incertidumbre requerida de medición; error máximo tolerado; etc.

Adicionalmente, para el reajuste influyen: tipo de instrumentos; tendencia de los datos de registro de calibraciones previas; tendencia de desgaste (fricción) y deriva; patrones de referencia; frecuencia y calidad de calibraciones y verificaciones internas; impacto mecánico y vibración; radiaciones ionizantes; riesgos de transportación; contaminación; choque térmico; historial de calibración; riesgo de medición; métodos de análisis estadísticos; aseguramiento de datos de medición; datos de población de equipo similar; degradación de componentes electrónicos; grado de entrenamiento del personal; y costos de calibración.

Los fabricantes de instrumentos de medición recomiendan que éstos deben calibrarse cada doce meses en promedio; eso sin conocer el uso actual y la severidad de uso. El criterio de calibración de doce meses se basa en que la asociación estadounidense de aparatos científicos (SAMA) indica que las especificaciones que declara el fabricante deben ser mantenidas por el equipo al menos por un año después de su fabricación.

No es fácil elaborar y fundamentar los intervalos de calibración y menos aún que tales intervalos se empleen de forma universal. La Tabla 3.1 muestra una recopilación de intervalos de calibración, mencionados en varias referencias técnicas.

Tabla 3.1
Ejemplos de intervalos de calibración

Instrumento	Intervalo de calibración inicial (meses)	Fuente
Cinta de 28 m	60	NIST
Cinta de 7 m	60	NIST
Regla de acero 45 cm	120	NIST
Regla rígida de acero 1- 3 m	24	Nordtest
Banco de longitud	24	Labs
Balanza para pesar (con verificaciones intermedias)	12	Nordtest
Pesas 1 kg (no aplicaciones comerciales)	48	NIST
	60	Nordtest
Pesas 2 kg – 30 kg	12	Labs
Pesas 1 mg – 500 g	6	Labs
Pesas 1 mg – 25 kg	12	Labs

Transductor de fuerza	24	DIN
Transductor de fuerza	12	Nordtest
Calibrador eléctrico	12	Nordtest
Termopar o resistencia	6 a 24	Nordtest
Higrómetro	24	NIST
Termómetro	12	Labs
Transductor de presión	6	SNC
Manómetro Bourdón	6	SNC

Estos valores pueden servir como guía para el intervalo de calibración inicial o recalibración, pero sin olvidar los factores de influencia ya mencionados que pueden causar cambios importantes en los valores de medición.

Los intervalos de calibración deben cumplir dos requisitos: mantener al mínimo el riesgo de estar fuera de tolerancia, lo cual puede preverse con calibraciones frecuentes; y mantener al mínimo los costos de calibración de acuerdo con un tiempo máximo de calibración.

Existen técnicas gráficas y estadísticas que hacen uso de resultados de calibraciones previas para estimar la tendencia del instrumento de medición, y así determinar los intervalos de calibración.

3.1.1 Métodos para determinar los intervalos de calibración

3.1.1.1 Ajuste automático o en escalera

Cada vez que un instrumento se calibra, el intervalo de calibración se puede ampliar si el instrumento está dentro de tolerancia, o reducido si el instrumento está fuera de tolerancia. De esta manera se produce un ajuste rápido de los intervalos de calibración sin esfuerzo administrativo.

3.1.1.2 Carta de control

Se seleccionan diversos puntos significativos de calibración y los resultados se grafican con respecto al tiempo. En estas gráficas se calcula la deriva, estabilidad y el intervalo de calibración adecuado.

3.1.1.3 Tiempo en uso

Esta es una variación de los métodos ya mencionados. El método básico se mantiene sin cambios, pero el intervalo de calibración se expresa en horas de uso.

3.1.1.4 Verificación en servicio o ensayo de “caja negra”

Los parámetros críticos de instrumentos complejos se verifican frecuentemente contra un patrón de verificación portátil o “caja negra”. Si el instrumento se encuentra fuera de tolerancia, entonces se realiza una calibración completa.

3.1.1.5 Aproximación estadística

Cuando un número grande (grupo) de instrumentos idénticos se calibran, el intervalo de calibración puede determinarse con métodos estadísticos.

3.1.1.6 Método de regresión

Se modela la deriva y estabilidad de la medición de un instrumento de medición en los puntos críticos de control, mediante una regresión lineal que se estima por mínimos cuadrados, lo que permite predecir el intervalo de calibración del instrumento de medición.

3.2 Uso de los certificados o informes de calibración

El resultado de una calibración es la relación entre las lecturas de un instrumento y los valores indicados por un patrón.

El contenido de los certificados de calibración está descrito en la cláusula 5.10 de la Norma NMX-17025-IMNC:2000 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.

Los beneficios que se obtienen de estos documentos son:

- Saber el error de medición de las lecturas del instrumento en relación con el patrón. Esto nos brinda la posibilidad de corregir y asegurar la trazabilidad con una incertidumbre apropiada
- Proporciona el dato de la incertidumbre heredada para estimación de la incertidumbre
- Constituye una evidencia de la calibración del instrumento y de que el equipo de medición está dentro de los límites de tolerancia
- Evidencia la cadena de trazabilidad de los resultados de la calibración. Así, esta trazabilidad se trasladará a las mediciones mediante su respectiva incertidumbre.

Una buena calibración se lleva a cabo bajo condiciones especiales en el laboratorio y mediante procedimientos establecidos. Por tanto, estrictamente los resultados sólo son válidos bajo estas circunstancias. Sin embargo, para fines prácticos se considera que los resultados siguen siendo válidos por un lapso que depende de las características del instrumento y el uso que se le da; por lo que en el certificado no se encontrará la vigencia de los resultados. Pero si las condiciones de uso son diferentes a las del laboratorio de calibración, se deben considerar las correcciones adecuadas a las lecturas.

4 Estimación de la incertidumbre en ensayos

4.1 Definiciones y conceptos básicos para estimación de la incertidumbre

4.1.1 Términos generales sobre metrología

La palabra “incertidumbre” significa duda, por lo que en un sentido más amplio “incertidumbre de medición” significa duda en la validez del resultado de la medición.

Incertidumbre de medición, parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían atribuirse razonablemente, al mensurando.

La incertidumbre puede expresarse como una variabilidad o un intervalo, por ejemplo:

$$20\text{ °C} \pm 5\text{ °C} \quad \text{ó} \quad [15 \text{ a } 25]\text{ °C}$$

Este concepto, de incertidumbre es válido siempre y cuando el proceso de medición este normalizado. Eso significa que la distribución de frecuencias de los posibles resultados que puede dar el proceso de medición se comporte conforme una distribución de frecuencias normal (Campana de Gauss Figura 4.2)

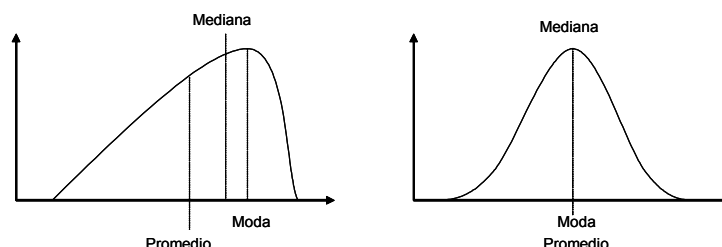


Figura 4.1
Distribución normal

Se dice que un proceso de medición está “normalizado” cuando:

- No existen errores sistemáticos de ningún tipo
- No existen errores aleatorios de causas especiales
- Solo existen errores aleatorios de causas comunes

Eso significa que la medición siempre se hace de la misma forma.

Los términos específicos para el procedimiento de estimación de incertidumbre que se describe más adelante, son (Norma NMX-CH-140-IMNC-2002 Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones):

Incertidumbre estándar. Incertidumbre del resultado de una medición expresada como una desviación normal: u

Evaluación (de incertidumbre) tipo A. Método para evaluar la incertidumbre mediante el análisis estadístico de una serie de observaciones. Tipo A: σ

Evaluación (de incertidumbre) tipo B. Método para evaluar la incertidumbre por otro medio que no sea el análisis estadístico de una serie de observaciones. Tipo B: e/k

Incertidumbre normal combinada. Incertidumbre normal del resultado de una medición cuando el resultado se obtiene a partir de los valores de algunas otras magnitudes, igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, siendo estos términos las varianzas y las covarianzas de otras magnitudes ponderadas de acuerdo a cómo el resultado de la medición varía con respecto a cambios en estas magnitudes.

$$u_{c(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{dy}{dx_i} u_{(x_i)} \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{dy}{dx_i} \frac{dy}{dx_j} u_{(x_i)} u_{(x_j)} r(x_i, x_j)}$$

Incertidumbre expandida. Cantidad que define un intervalo alrededor de una medición del que se puede esperar que abarque una fracción grande de la distribución de valores que pudiera atribuirse razonablemente al mensurando.

$$U = ku_c$$

Factor de cobertura. Factor numérico usado como multiplicador de la incertidumbre normal combinada, con el propósito de obtener una incertidumbre expandida.

$$k = t_{(\%, \nu)}$$

4.1.2 Mediciones

El objetivo de una medición es determinar el valor convencional verdadero. Por lo que una medición comienza con una especificación apropiada del mensurando, el método de medición y el procedimiento de medición.

El resultado de una medición sólo es un aproximado o estimado del valor convencional verdadero del mensurando; y entonces está completo si va acompañado de la declaración de la incertidumbre.

En la práctica, la especificación requerida o definición del mensurando está determinada por la exactitud de la medición requerida. El mensurando debe definirse con el suficiente detalle con respecto a la exactitud requerida para que, en todos los propósitos prácticos asociados con la medición, su valor sea único.

En la estimación de la incertidumbre se utilizan cinco conceptos básicos:

- *Valor verdadero*. Es el que se obtendría si se midiese de manera perfecta
- *Valor convencional verdadero*. Valor determinado en forma convencional, y sustituye al valor verdadero.
- *Trazabilidad*. Cadena no interrumpida de comparaciones
- *Exactitud*. Distancia entre el valor convencional verdadero y el valor verdadero (libre de error sistemático). Ver la Figura 4.2
- *Precisión*. Esta referida a la diferencia entre las mediciones realizadas. Ver la Figura 4.2

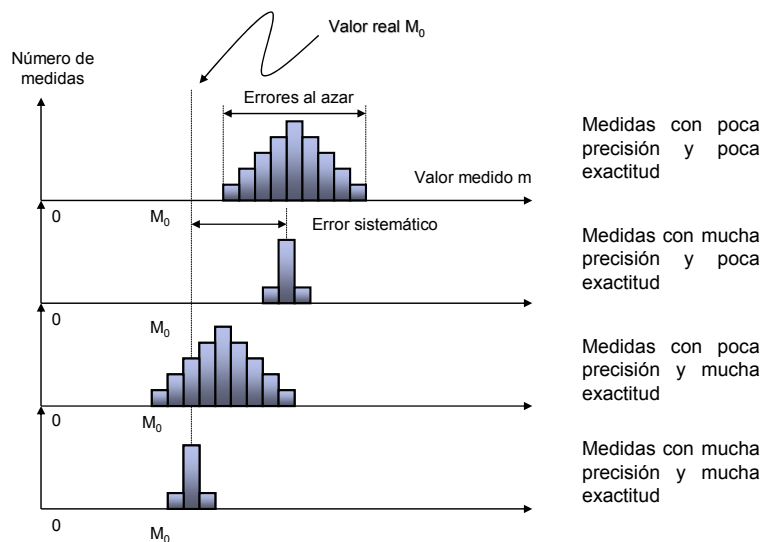


Figura 4.2
Exactitud y Precisión

4.1.3 Errores durante el proceso de medición

El análisis de las variables implicadas en un proceso de medición permite detectar un sinnúmero de factores que intervienen directamente al efectuarla. Todos ellos provocan cierto grado de desviación, d , en la estimación del valor del mensurando debido al desconocimiento o a la falta de control de la influencia de estos factores en el proceso de medición. En otras palabras, la desviación entre el valor obtenido y el valor convencionalmente verdadero se llama **error**.

De esta manera, una medición tiene imperfecciones que dan origen a un error en el resultado de la medición. Tales como:

- Trazabilidad de los materiales de referencia
- Errores instrumentales
- Correcciones, etc.

Los errores instrumentales son debidos a:

- Resolución de lectura
- Error de paralelaje
- Error de posición
- Error por utilizar instrumentos no calibrados
- Error por el instrumento
- Etc.

Los errores por imperfección en las correcciones son:

- Por temperatura
- Por presión
- Por paralelismo corregido
- Por altura
- Por flotación en el aire
- Por columna hidrostática
- Etc.

Por lo que la incertidumbre tiene un grado de subjetividad debido a los errores que ocurran en el proceso de medición.

Tradicionalmente, se consideran dos tipos de error: aleatorios y sistemáticos.

Los errores aleatorios son las perturbaciones que no siempre afectan en la misma forma en las mediciones. Son la suma de un gran número de pequeñas desviaciones, las cuales tienen igual probabilidad de ser positivas o negativas, que originan que se asignen diferentes valores como resultado de una misma medición que se repite. Este efecto se conoce como dispersión y se representa mediante el símbolo σ .

Los errores sistemáticos son las perturbaciones que afectan con la misma magnitud y el mismo signo positivo o negativo a todas las mediciones que se realizan en iguales condiciones. Este efecto se conoce como desviación y se representa con el símbolo **D**.

Los errores de causa común son las perturbaciones que se aceptan en el proceso de medición, y que son la combinación de errores aleatorios y errores por las correcciones aplicadas para eliminar los sistemáticos que existen cuando el proceso de medición ya está normalizado.

Los errores de causa especial son las perturbaciones que no se aceptan en el proceso de medición, y que son la combinación de errores aleatorios y sistemáticos que existen cuando el proceso de medición se realiza fuera de las condiciones ya normalizadas. Este tipo de errores no deben existir en un proceso de medición.

4.2 Norma NMX-CH-140-IMNC-2002

La Norma **NMX-CH-140-IMNC-2002 Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones** establece que cuando se informe el resultado de una medición de una magnitud física, es obligatorio proporcionar alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado, de tal manera que el cliente aprecie la confiabilidad del servicio. Sin esta indicación, los resultados de las mediciones no pueden ser comparados, ni entre ellos mismos ni con respecto a valores de referencia dados en una especificación o norma. Por tanto, es necesario un procedimiento expedito, fácil de usar y aceptado de manera general para caracterizar la calidad del resultado de una medición, y evaluar y expresar su incertidumbre. Así, la guía se realizó con conceptos elementales de cálculo diferencial y estadística básica.

La incertidumbre se compone de contribuciones de diversas fuentes, algunas de ellas descritas por las magnitudes de entrada respectiva. Ciertas contribuciones son inevitables por la definición del propio mensurando, mientras otras pueden depender del principio de medición, del método y del procedimiento seleccionados para la medición. Por lo que el propósito de esta guía es establecer de manera formal y consistente las simplificaciones aceptables a este complejo problema estadístico, sugerir aproximaciones lineales y presentar métodos sencillos para incorporar en términos estadísticos el conocimiento de parámetros de los que se tiene muy poca información.

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

- *Universal*. El método debe ser aplicable a cualquier tipo de mediciones y a cualquier tipo de datos utilizados en las mediciones.

La cantidad para expresar la incertidumbre debe ser:

- *Internamente consistente*. Debe poder obtenerse a partir de los componentes que contribuyen a ella; así mismo, debe ser independiente de la forma en que dichas componentes se agrupan y del método en que éstas se descomponen en subcomponentes.
- *Transferible*. Deber ser posible emplear directamente la incertidumbre evaluada para un resultado, como una componente al evaluar la incertidumbre de otra medida en la cual se utiliza el primer resultado.

4.2.1 Alcance de la norma

Esta guía establece reglas generales para la evaluación y la expresión de incertidumbres en la medición, las cuales pueden seguirse a diferentes niveles de exactitud y en todos los campos.

Esta guía trata, principalmente, de la expresión de incertidumbre en la medición de una magnitud física bien definida –el mensurando- que puede caracterizarse por un valor esencialmente único.

Esta guía aplica, también, para la evaluación y la expresión de incertidumbres asociadas con el diseño conceptual y el análisis teórico de experimentos, métodos de medición, y componentes y sistemas complejos.

Esta guía proporciona reglas generales para evaluar y expresar la incertidumbre en la medición, más que instrucciones técnicas detalladas y específicas.

4.2.2 Bases teóricas para la estimación de la incertidumbre

Como ya se mencionó, la incertidumbre del resultado de una medición generalmente se forma de varias componentes agrupadas en dos categorías que dependen de la forma en que se evalúan:

Tipo A Son aquellas que se estiman mediante métodos experimentales estadísticos

Tipo B Aquellas que se estiman por otros medios

Es importante aclarar que no existe una correspondencia obligatoria entre la categoría A y B y la clasificación entre errores aleatorios y sistemáticos. Cuando se presenta un informe detallado de la estimación de la incertidumbre, éste debe contener una lista completa de los componentes individuales que integran la incertidumbre, indicando para cada caso el método A o B que se utilizó para su estimación.

Los componentes estimados con el método tipo A se determinan mediante la estimación de la varianza como desviación normal experimental, tomando una muestra de la población de los posibles resultados y sus grados de libertad asociados. En el caso de que existan covarianzas entre los componentes es necesario considerar su valor.

Los componentes estimados con el método tipo B se determinan mediante la suposición de valores que pueden ser considerados como aproximaciones de las varianzas reales correspondientes. Estas cantidades supuestas se manejan como desviaciones normales de la población. En el caso de que existan covarianzas entre los componentes es necesario considerar su valor.

La incertidumbre combinada total se obtiene a través de la suma de las componentes utilizando el método normal de combinación de varianzas. El resultado final se expresa como una desviación normal.

Si para una aplicación particular se requiere expandir la incertidumbre combinada para mejorar su nivel de confianza, p , el factor multiplicativo utilizado debe especificarse

Correlación. A menudo los resultados de mediciones de dos magnitudes de entrada están ligados, ya sea porque existe una tercera magnitud que influye en ambas; porque se usa el mismo instrumento para medir, o el mismo patrón para calibrar; o por alguna otra razón. Desde el punto de vista estadístico, dos variables son independientes cuando la probabilidad asociada a una de ellas no depende de la otra; esto es, si q y w son dos variables aleatorias independientes, la probabilidad conjunta se expresa como el producto de las probabilidades de las variables respectivas.

Factor de cobertura y nivel de confianza. La incertidumbre normal, u_c , tiene un valor igual a la desviación normal de la función de distribución del mensurando. El intervalo centrado en el mejor estimado del mensurando contiene el valor verdadero con una probabilidad, p , de 68 % aproximadamente, bajo la suposición de que los posibles valores del mensurando siguen una distribución normal.

Generalmente se desea una probabilidad mayor a 68 % (Figura 4.3), esto se obtiene con la expansión del intervalo por un factor k , llamado factor de cobertura. El resultado se conoce como incertidumbre expandida, U .

La incertidumbre expandida, U , indica el intervalo de confianza que representa una fracción, p , de los valores que puede probablemente tomar el mensurando. El valor de p es llamado el nivel de confianza y se elige a conveniencia.

La relación entre el factor de cobertura, k , y el nivel de confianza, p , depende de la distribución de probabilidad del mensurando.

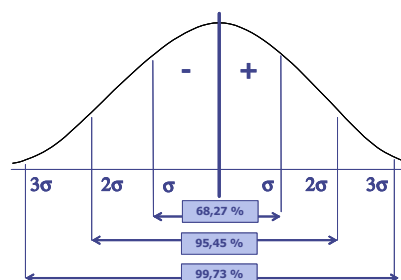


Figura 4.3
Distribución normal

Distribución t de Student. Una distribución, t , de student refleja las limitaciones de la información disponible debidas al número infinito de mediciones. Esta distribución coincide con la distribución normal en el límite cuando n tiende a infinito, pero difiere considerablemente de ella cuando n es pequeño.

La aproximación será mejor mientras más grande sea el número de fuentes de incertidumbre y sus contribuciones sean similares, independientemente de la forma particular de sus distribuciones.

La disponibilidad limitada de información hace necesario el uso de la distribución t de student para determinar la incertidumbre expandida de manera rigurosa (con la suposición de que los valores del mensurando obedecen una distribución normal).

Por ejemplo, cuando las lecturas obtenidas con un instrumento de baja exactitud son idénticas debido a la resolución de éste y las otras fuentes de incertidumbre son insignificantes, es plausible suponer que el mensurando sigue una distribución rectangular cuyos límites se determinan por el valor de la escala del instrumento. Entonces, puede estimarse directamente el ancho del intervalo que contiene la fracción p , de los valores que pueden atribuirse razonablemente al mensurando.

Grados de libertad. El número ν de grados de libertad puede considerarse una incertidumbre de la incertidumbre de esa magnitud. Entre mayor sea ν , la estimación de la incertidumbre será más confiable.

En la estimación de la incertidumbre con el método de estimación tipo A, la repetibilidad de la medición llevada a cabo con n lecturas tiene $n-1$ grados de libertad.

En el método tipo B los grados de libertad se determinan mediante el criterio del metrólogo soportado por su experiencia, aun cuando sea subjetiva, para determinar la incertidumbre relativa de la propia incertidumbre, y calcular el número de grados de libertad para esa fuente específica, i .

4.3 Estimación de la incertidumbre

A pesar de que la Norma NMX-CH-140-IMNC-2002 Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones usa conceptos elementales de cálculo diferencial y estadística básica, es un documento considerado de difícil lectura por el usuario casual. De cualquier manera, no hay duda que esta metodología es la más adecuada para estimar la incertidumbre en la mayor parte de las mediciones y, dada su aceptación generalizada, es de vital importancia continuar los esfuerzos para difundir su conocimiento y aplicación.

A continuación se expone de manera sencilla la metodología de la Norma NMX-CH-140-IMNC-2002 Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones,

basada en diez pasos, los cuales han sido propuestos por varios estudiosos y expertos en la ciencia petrológica (Ricardo Martínez, 2004).

4.3.1 Paso 1. Definición del proceso de medición

En este primer paso se realiza el análisis del proceso de medición con el fin de conocer el mensurando y los requerimientos que se deben cumplir.

4.3.1.1 Identificación de los equipos de medición a utilizar y los requisitos que se deben cumplir

Ejemplo: En un ensayo de contenido de agua [w (%)] se utiliza como equipo de medición una balanza. El procedimiento establece que la resolución de lectura debe de ser de 0,01 g. Adicionalmente se debe revisar la carta de calibración con el fin de verificar si cumple con los errores permitidos.

4.3.1.2 Identificación de la repetibilidad y reproducibilidad de la norma a utilizar

Ejemplo: En el inciso de precisión e incertidumbre del procedimiento de ensayo de contenido de agua (norma ASTM) se indica que la repetibilidad (σ_r) está dado como coeficiente de variación (CV_r) y es de 2,7 %; y la reproducibilidad (σ_R) del método también está dado como coeficiente de variación (CV_R) es de 5,0 %.

4.3.1.3 Identificación de las variables independientes

Ejemplo: Las componentes de la ecuación para calcular el contenido de agua son: peso húmedo (W_h) y peso seco (W_s); ambas se relacionan con la siguiente función matemática:

$$w(\%) = \frac{W_h - W_s}{W_s} \times 100$$

4.3.2 Paso 2. Definición de las variables aleatorias

Establecer las variables aleatorias involucradas en el proceso de medición. Esto significa que se deben definir cuáles son las variables independientes que pueden afectar al resultado de la medición, para definir una función.

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

Donde:

- Y Variable aleatoria dependiente, resultado de la medición
- X_i Variables aleatorias independientes

Ejemplo: Las variables aleatorias involucradas en el cálculo del contenido de agua y su relación, se presentan en la Figura 4.4

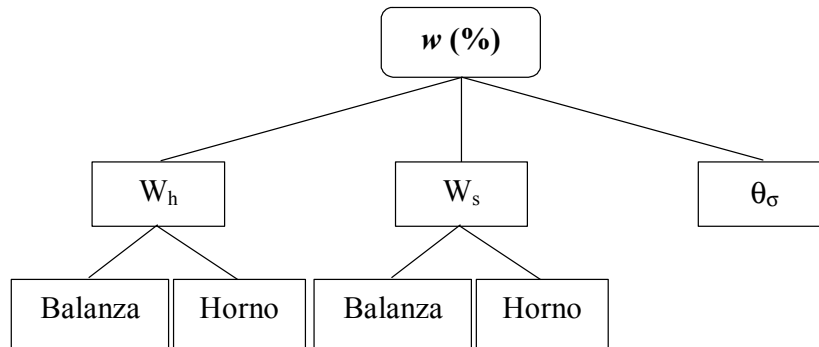


Figura 4.4
Relación de las variables aleatorias

4.3.3 Paso 3. Establecer la relación matemática que describa la función del proceso de medición

Se debe determinar la relación matemática que describa la función del proceso de medición.

$$Y = f(X_1) + f(X_2) + f(X_3) + \dots + f(X_n)$$

Donde:

- Y Estimación de la variable dependiente (resultado)
- X_i Estimación de la variable aleatoria independiente

Si existen errores sistemáticos que puedan ser corregidos, incluya esta corrección en la relación matemática para calcular la mejor estimación del mensurando:

$$Y = f(x_i) - C$$

Ejemplo: Las variables aleatorias que definen la relación matemática del cálculo de contenido de agua, son las siguientes:

$$w(\%) = f(W_h, W_s, \theta_\sigma)$$

Con base en estas variables se define la relación matemática, tomando en cuenta dos puntos importantes, la ecuación para el cálculo y la repetibilidad del método de medición.

$$w(\%) = \frac{W_h - W_s}{W_s} \times 100 + \theta_\sigma$$

4.3.4 Paso 4. Establecer la expresión para estimación de la incertidumbre combinada

Se establece la expresión para estimar la incertidumbre combinada del mensurando, $u_{c(y)}$, con base en la relación matemática y en la ley de propagación de los errores. Esta ecuación sirve como base en estimaciones posteriores.

A continuación se presenta la ecuación general para la estimación de la incertidumbre combinada del mensurando:

$$u_{c(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{dy}{dx_i} u_{(x_i)} \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{dy}{dx_i} \frac{dy}{dx_j} u_{(x_i)} u_{(x_j)} r(x_i, x_j)}$$

Donde:

$u_{c(y)}$	Incertidumbre combinada
$\frac{dy}{dx_i}, \frac{dy}{dx_j}$	Coefficientes de sensibilidad
$r(x_i, x_j)$	Coefficientes de correlación entre variables independientes
$u_{(x_i)}, u_{(x_j)}$	Incertidumbres individuales de las variables

En esta expresión se consideran todas las variables aleatorias que pueden causar incertidumbre en la medición del mensurando. Esto incluye las involucradas en la relación matemática, las correcciones y las indicadas como una función desconocida.

En el caso de no existir correlación entre las variables independientes, la ecuación anterior se simplifica a:

$$u_{c(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{dy}{dx_i} u_{(x_i)} \right)^2}$$

La expresión presentada hace la suposición de que la propagación de los errores se comporta linealmente como una función de primer orden, y que el sistema físico es casi estático.

Ejemplo: Tomando en consideración las variables mencionadas, y suponiendo que no existe una correlación entre ellas se establece la siguiente ecuación:

$$u_{w(\%)} = \left[\left(\frac{\partial w(\%)}{\partial W_h} u_{W_h} \right)^2 + \left(\frac{\partial w(\%)}{\partial W_s} u_{W_s} \right)^2 + \left(\frac{\partial w(\%)}{\partial \theta_\sigma} u_{\theta_\sigma} \right)^2 \right]$$

4.3.5 Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad

En este paso se realiza una de las estimaciones más importantes en el desarrollo del procedimiento, debido a que el coeficiente de sensibilidad representa la magnitud con que se relaciona el comportamiento del mensurando con cada variable.

Si se cuenta con una relación matemática que combine las variables independientes entre sí para calcular el resultado (variable dependiente), Los coeficientes de sensibilidad corresponden a las derivadas parciales del mensurando y con relación a cada variable x_i .

$$\frac{dy}{dx_i}$$

En caso de que existan funciones desconocidas, se puede realizar a partir de gráficas de observaciones experimentales, donde el coeficiente de sensibilidad corresponde a la pendiente de la curva que relaciona el comportamiento del mensurando con cada variable.

Ejemplo: El coeficiente de sensibilidad del ensayo de contenido de agua con respecto al peso seco (W_s) es:

$$w(\%) = \frac{W_h - W_s}{W_s} \times 100 + \theta_\sigma; \quad \text{por tanto} \quad \frac{dw(\%)}{dW_s} = \frac{W_h}{W_s^2} \times 100$$

4.3.6 Paso 6. Estimación de la incertidumbre asociada a cada variable

Por lo general, en este paso se presentan complicaciones en su determinación, debido a que depende en gran parte de información que muchas veces no se tiene.

Como ejemplo se puede mencionar que para el ensayo de equivalente de arena se necesitan datos de la balanza a utilizar (linealidad y excentricidad) y los valores de repetibilidad del procedimiento de ensayo.

A continuación se presenta el procedimiento de estimación de los dos tipos de incertidumbre.

4.3.6.1 Evaluación de la incertidumbre normal tipo A

Esta estimación se basa en estudios experimentales y análisis estadísticos de los resultados considerando su distribución de frecuencia. Generalmente se determina mediante experimentos de observaciones repetidas de la magnitud medida, y se calcula como la desviación normal de los datos.

Pueden considerarse dos situaciones:

- a) Si el resultado de la medición se obtiene de una sola observación, la incertidumbre se evalúa como la desviación normal, σ , obtenida de la prueba o estudio de repetibilidad del método de medición en condiciones normalizadas, u otro medio.

$$u_{(x_i)} = \sigma$$

En este caso, los grados de libertad de σ se pueden estimar como infinitos (∞).

- b) Si el resultado de la medición se obtiene como el promedio de varias observaciones, la incertidumbre se puede estimar de dos formas dependiendo de la información con que se cuente:

1. Se conoce la variabilidad σ del método a partir de un estudio de repetibilidad bajo condiciones normalizadas u otro medio:

$$u_{(x_i)} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde:

- $u_{(x_i)}$ Incertidumbre
- σ Desviación normal de la población conocida
- n Número de repeticiones

En este caso, los grados de libertad (ν) de σ se pueden estimar como infinitos (∞).

2. Se estima la variabilidad en el mismo momento que se realiza la medición:

$$u_{(x_i)} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Donde:

- $u_{(x_i)}$ Incertidumbre
- s Desviación normal estimada de la muestra
- n Número de repeticiones

En este caso, los grados de libertad (ν) de s se pueden estimar como $n-1$.
Donde n es el número de observaciones repetidas.

4.3.6.2 Evaluación de la incertidumbre normal tipo B

Esta evaluación se basa en criterios del que realiza la medición, tomando en cuenta su experiencia, los datos del fabricante, los certificados de calibración, las mediciones previas, los datos manuales, artículos o especificaciones. Esta estimación se trata igual que la de tipo A. como una desviación normal.

$$u_{(x_i)} = \sigma$$

Generalmente, el valor que se toma para evaluar una incertidumbre individual por el método tipo B, se considera que está expandida. Por tanto, es necesario dividirla entre el coeficiente, k , para llevarla a $\pm 1 \sigma$.

$$u_{(x_i)} = \frac{U_{x_i}}{k} = \sigma$$

Donde:

- $U_{(x_i)}$ Incertidumbre expresada en la información
- k Coeficiente de expansión indicado

Si la incertidumbre se expresa con un nivel de confianza, p , entonces, a menos que se especifique otra cosa, se supone una distribución normal de la variable. Ésta se calcula como la incertidumbre indicada dividida entre el factor, Z , (que puede considerarse como equivalente al factor de expansión, k , correspondiente al factor indicado para una distribución normal.

$$u_{(x_i)} = \frac{U_{x_i}}{Z}$$

Donde:

Z Factor de expansión relativo al nivel de confianza p de la distribución indicada

Si se especifica que la variable se encuentra dentro de un intervalo de valores máximos (entre $\pm a$), se debe suponer una distribución rectangular en la que se considera que el valor verdadero de la magnitud tiene la misma probabilidad de ser cualquier valor que se encuentre en el intervalo considerado, y cero probabilidad de ser un valor fuera del intervalo. Por tanto, está se evalúa como la incertidumbre indicada dividida entre la raíz cuadrada de tres.

$$u_{(x_i)} = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Si se tienen datos de que los valores de la magnitud en cuestión alrededor del valor medio, a , son más probables que los valores que se encuentran cerca de los límites que acotan el intervalo especificado, entonces la suposición de una distribución triangular puede considerarse una mejor elección, y se calcula como:

$$u_{(x_i)} = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

Las incertidumbres individuales, $u_{(x_i)}$, están a su vez formadas por varios componentes de incertidumbre individuales. Por tanto, su tratamiento corresponde al mismo utilizado para la estimación de la incertidumbre combinada, $u_{c(Y)}$.

4.3.7 Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada

Después de obtener los valores de coeficiente de sensibilidad, K , e incertidumbre individual, $u_{(x_i)}$, se calcula la incertidumbre combinada, $u_{c(Y)}$, sustituyendo los datos en la ecuación del paso 4.

4.3.8 Paso 8. Determinación de los grados de libertad

En este punto se presenta la expresión para calcular los grados de libertad, ν , efectivos del modelo:

$$\nu = \frac{(u_{c(Y)})^4}{\sum_{i=1}^n (u_{Y/x_i})^4}$$

Donde:

u_Y/x_i	Incertidumbre en unidades del mensurando debida a la incertidumbre de cada variable independiente, x_i . Corresponde a la multiplicación del coeficiente de sensibilidad, K , por la incertidumbre de cada variable x_i .
ν	Grados de libertad de cada variable x_i

Si la incertidumbre se estima por el método tipo A, los grados de libertad, ν , se pueden estimar como el número de repeticiones menos uno ($n-1$)

Si es por el método B, los grados de libertad, ν , vienen junto con la información considerada. En el caso de que no se tenga esta información, se puede estimar como:

$$\nu = \frac{1}{2d^2}$$

Donde:

d	Duda que se tenga de la incertidumbre expresada en forma decimal
-----	--

4.3.9 Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida

La incertidumbre expandida depende del nivel de confianza, p , que se quiera tener en la estimación; generalmente, se recomienda una confiabilidad del 95 %, la cual equivale a 1,96 veces de desviación normal (σ).

La estimación de la incertidumbre expandida, U_Y , se realiza con base en los grados de libertad, ν , del modelo y el nivel de confianza, p , establecido para el resultado de la medición.

$$U_Y = k * u_{c(Y)}$$

Donde:

k	se estima como la t-student al nivel de confianza, p , establecido y los grados de libertad, ν , calculados
-----	---

4.3.10 Paso 10. Reporte de resultados

Reporte el resultado de la medición indicando el valor obtenido, la incertidumbre estimada, el factor de expansión y los grados de libertad.

Una forma útil de presentar los resultados es mediante una tabla que concentre todos los resultados; a este tipo de concentrado se le denomina presupuesto de incertidumbre.

En la Tabla 4.1 se presenta el presupuesto de incertidumbre para el método de ensayo de contenido de agua.

Tabla 4.1
Presupuesto de incertidumbre

F.V.	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$	u_{x_i}	U_{Y/x_i}
∂W_h	$\frac{\partial w(\%)}{\partial W_h} =$		
∂W_s	$\frac{\partial w(\%)}{\partial W_s} =$		
$\partial \theta_\sigma$	$\frac{\partial w(\%)}{\partial \theta_\sigma} =$		
			$U_c =$
			$v =$
			$k =$
			$U =$

5 Ejemplos de estimación de la incertidumbre

Después de haber descrito el procedimiento de análisis en el capítulo anterior, se procede a presentar algunos ejemplos de estimación de incertidumbre en procedimientos de ensayo. Para esto, se seleccionaron dos equipos de medición y cuatro métodos de ensayos.

La selección de los métodos de ensayo se realizó tomando como base que los procedimientos de cálculo fueran diferentes, con el fin de que el lector pudiera aplicar los procedimientos en forma posterior, en una gama más amplia de ensayos.

Los equipos de medición y métodos seleccionados son los siguientes:

Equipos:

Balanza de cucharón con una capacidad máxima de 15 kg y resolución de lectura de 1 g

Probeta de equivalente de arena con un rango de lectura de 0 a 50 divisiones y una resolución de lectura de 1 unidad

Métodos:

ASTM C 131 Método de ensayo para determinar la resistencia a la degradación de agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión en la Máquina de Los Ángeles

ASTM C 136 Método de ensayo para el análisis granulométrico de agregados gruesos y finos

ASTM D 2419 Método de ensayo para determinar el valor de equivalente de arena de suelos y agregados finos

ASTM D 854 Método de ensayo para determinar la gravedad específica de suelos usando un picnómetro con agua

5.1 Ejemplo 1. Balanza

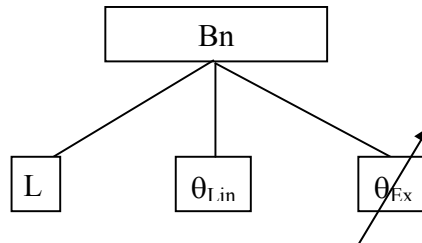
Uno de los principales equipos de medición utilizados en laboratorio de construcción es la balanza o báscula, de aquí la importancia de realizar esta estimación.

Paso 1. Definición del proceso de medición

Variables: L_i Error por lectura
 θ_{Lin} Incertidumbre por linealidad

El resultado de la medición es: 3 253 g

Paso 2. Definición de las variables aleatorias



Definiciones: B Balanza o báscula

Para este análisis en particular, al ser una báscula de cucharón no existe la variable de excentricidad.

Paso 3. Establecer la relación matemática que describa la función del proceso de medición

$$B = f(L_i, \theta_{Lin}); \quad B = L_i + \theta_{Lin}$$

Paso 4. Establecer la expresión para estimación de la incertidumbre combinada

$$u_B = \left[\left(\frac{\partial B}{\partial L_i} u_{L_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial \theta_{Lin}} u_{\theta_{Lin}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad

$$\frac{dB}{dL_i} = 1; \quad \frac{dB}{d\theta_{Lin}} = 1$$

Paso 6. Estimación de la incertidumbre asociada a cada variable**✦ L_i (tipo B)**

No se tiene datos del fabricante, pero la balanza es nueva y se ve en buen estado, por lo tanto se decidió utilizar una distribución triangular $\left(\frac{\text{error}}{\sqrt{3}}\right)$.

Error de resolución de lectura: $E_{RL} = \frac{RL}{2}$

Incertidumbre por lectura: $U_{L_i} = \frac{E_{RL}}{\sqrt{3}} = \frac{RL}{2\sqrt{3}} = \frac{RL}{\sqrt{12}}$

Para este tipo de báscula, cuando se realiza una medición se deben de realizar dos lecturas, la primera para verificar que el indicador marque cero y la segunda para registrar el valor. Por tanto el error se duplica.

Para duplicar el error se debe utilizar la ley de propagación de los errores, la cual indica que los errores se deben propagar en forma cuadrática; esto es, que se elevan al cuadrado, se suman y se obtiene la raíz cuadrada del resultado.

$$\text{Suma de errores} = \sqrt{(E)^2 + (E)^2} = \sqrt{2E^2} = \sqrt{2}E$$

$$\text{Un error} = \frac{RL}{\sqrt{12}}$$

$$\text{Dos errores} = \frac{\sqrt{2}RL}{\sqrt{12}} = \frac{\sqrt{2}RL}{\sqrt{2}\sqrt{6}} = \frac{RL}{\sqrt{6}} = \frac{1}{\sqrt{6}} = 0,408$$

Donde: RL Resolución de lectura del equipo de medición

✦ θ_{Lin} (tipo B)

Error por linealidad: $E_{Lin} = RL$

En algunos casos se considera la linealidad como dos veces la RL.

La norma ASTM estima que un buen error de linealidad es el 0,1 % de la lectura.

Incertidumbre por linealidad: $\theta_{Lin} = \frac{E_{Lin}}{\sqrt{3}} = \frac{L(0,1\%)}{\sqrt{3}} = \frac{3,253}{\sqrt{3}} = 1,8781$

Donde: L Lectura del instrumento

Paso 7. Estimación de la incertidumbre combinada.

$$u_B = \sqrt{[(1)(0,408)]^2 + [(1)(1,878)]^2} = \sqrt{3,693} = 1,921$$

La estimación de la incertidumbre combinada (u_B) dependerá de los niveles de cada variable.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad

$$v_B = \frac{u_{c_B}^4}{\frac{u_{L_i}^4}{v_{L_i}} + \frac{u_{\theta_{Lin}}^4}{v_{\theta_{Lin}}}} = \frac{(0,70667)^4}{\frac{(0,408)^4}{\infty} + \frac{(1,878)^4}{\infty}} = \frac{(0,70667)^4}{0+0}; \quad v_B = \infty$$

Para el caso de los análisis individuales de equipo, sólo se necesita el valor de la incertidumbre combinada y los grados de libertad efectivos del modelo.

Presupuesto de Incertidumbre

$F.V$	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$	U_{xi}	$U_{Y/xi}$
∂L_i	$\frac{\partial B}{\partial L_i} = 1$	0,408	0,408
$\partial \theta_{Lin}$	$\frac{\partial B}{\partial \theta_{Lin}} = 1$	0,577	0,577

$$u_c = 0,7066$$

$$v = \infty$$

$$k = \text{-----}$$

$$U = \text{-----}$$

5.2 Ejemplo 2. Probeta de Equivalente de arena

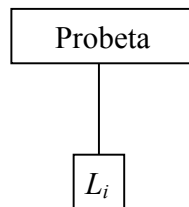
Este equipo de medición fue seleccionado con el fin de utilizarse en un cálculo posterior, como es el análisis de incertidumbre del ensayo de equivalente de arena.

Paso 1. Definición del proceso de medición

Variables: L_i Incertidumbre por lectura

La lectura en el equipo es: 35

Paso 2. Definición de las variables aleatorias



Paso 3. Establecer la relación matemática que describa la función del proceso de medición

$$B = f(L_i) \quad B = L_i$$

Paso 4. Establecer la expresión para estimación de la incertidumbre combinada

$$u_{\text{Probeta}} = \left[\left(\frac{\partial \text{Probeta}}{\partial L_i} u_{L_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad

$$\frac{d\text{Probeta}}{dL_i} = 1$$

Paso 6. Estimación de la incertidumbre asociada a cada variable

✦ ***L_i* (tipo B)**

Error de resolución de lectura: $E_{RL} = \frac{RL}{2}$

Incertidumbre por lectura: $U_{L_i} = \frac{E_{RL}}{\sqrt{3}} = \frac{RL}{\sqrt{12}} = 0,028867$

Donde: ***RL*** Resolución de lectura del equipo de medición

Paso 7. Estimación de la incertidumbre combinada.

La estimación de la incertidumbre combinada ($u_{Probeta}$) dependerá de los niveles de cada variable.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad

$$u_{Probeta} = \frac{u_{c_{Probeta}}}{\frac{u_{L_i}}{v_{L_i}}} = \frac{(0,02886)^4}{\frac{(0,02886)^4}{\infty}} = \frac{(0,02886)^4}{0}; \quad u_{Probeta} = \infty$$

Para el caso de los análisis individuales de equipo sólo, se necesita el valor de la incertidumbre combinada y los grados de libertad efectivos del modelo.

Presupuesto de Incertidumbre

<i>F.V</i>	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$	U_{x_i}	U_{Y/x_i}
∂L_i	$\frac{\partial Probeta}{\partial L_i} = 1$	0,02886	0,02886

$$u_c = 0,02886$$

$$v = \infty$$

$$k = -$$

$$U = -$$

5.3 Ejemplo 3. Desgaste de los Ángeles

Este ejemplo ilustra la estimación de la incertidumbre del método de ensayo ASTM C 131, el cual se utiliza para determinar la resistencia a la degradación del agregado grueso por abrasión en la Máquina de Los Ángeles.

Paso 1. Definición del proceso de medición

Variables:

W_{ini} = 5 006 g	Masa inicial
W_{fin} = 4 187 g	Masa final
% <i>Desgaste</i>	Porcentaje de Desgaste de Los Ángeles

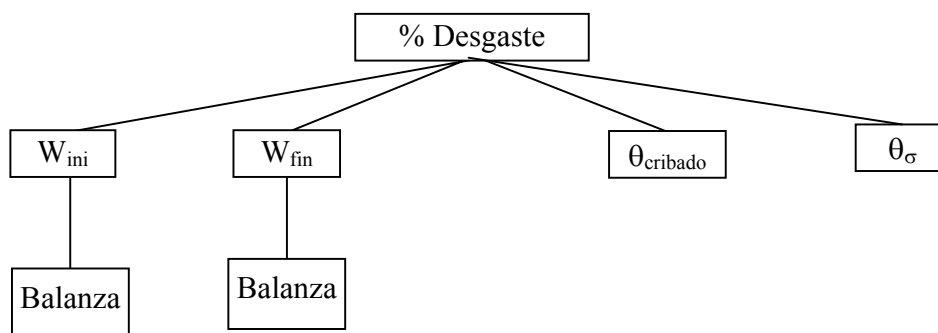
Fórmula:

$$\%Desgaste = \frac{W_{ini} - W_{fin}}{W_{fin}} \times 100 = \frac{5006 - 4187}{5006} = 16\%$$

Equipos a utilizar:

Balanza con resolución de lectura de 1,00 g
Horno que pueda mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5 °C

Paso 2. Definición de las variables aleatorias



Definiciones:	θ_{σ}	Variabilidad del método de ensayo
	$\theta_{cribado}$	Variabilidad del cribado (ASTM C 136)

Los análisis de incertidumbre de cada instrumento de medición se encuentran en los anexos mencionados.

Paso 3. Establecer la relación matemática que describa la función del proceso de medición

$$\%Desgaste = f(W_{ini}, W_{fin}, \theta_{cribado}, \theta_{\sigma})$$

$$\%Desgaste = \frac{W_{ini} - W_{fin}}{W_{fin}} \times 100 + \theta_{cribado} + \theta_{\sigma}$$

Paso 4. Establecer la expresión para estimación de la incertidumbre combinada

$$u_{\%Desgaste} = \left[\left(\frac{\partial \%Desgaste}{\partial W_{ini}} u_{W_{ini}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%Desgaste}{\partial W_{fin}} u_{W_{fin}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%Desgaste}{\partial \theta_{cribado}} u_{\theta_{cribado}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%Desgaste}{\partial \theta_{\sigma}} u_{\theta_{\sigma}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad

$$\frac{d\%Desgaste}{dW_{ini}} = \frac{1}{W_{fin}} \times 100 = \frac{1}{4187} \times 100 = 0,023883$$

$$\frac{d\%Desgaste}{dW_{fin}} = -\frac{W_{ini}}{W_{fin}^2} \times 100 = -\frac{5006}{(4187)^2} \times 100 = -0,028555$$

$$\frac{d\%Desgaste}{d\theta_{cribado}} = 1$$

$$\frac{d\%Desgaste}{d\theta_{\sigma}} = 1$$

Paso 6. Estimación de la incertidumbre asociada a cada variable

Se puede observar que la incertidumbre asociada a W_{ini} y W_{fin} depende solamente de la balanza utilizada, para este caso en particular se supone que:

$$W_{ini} = 1,913 \text{ 4 g}$$

$$W_{fin} = 1,823 \text{ 8 g}$$

Para la incertidumbre por cribado se supone un valor de 0,54

El valor de repetibilidad de este ensayo es de 0,32

θ_{cribado}	Ver análisis de incertidumbre método de medición ASTM C 136.
θ_{σ}	Valor de repetibilidad del método de medición (Anexo A1)

Paso 7. Estimación de la incertidumbre combinada.

$$u_{\% \text{Desgaste}} = \sqrt{[(0,023883)(1,9134)]^2 + [(-0,028555)(1,8238)]^2 + [(0,54)(1)]^2 + [(0,32)(1)]^2}$$

$$u_{\% \text{Desgaste}} = \sqrt{0,00208828 + 0,00271218 + 0,2916 + 0,1024} = \sqrt{0,39880046} = 0,6315$$

La estimación de la incertidumbre combinada ($u_{\% \text{Desgaste}}$) dependerá de los niveles de cada variable.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad

$$v_{\% \text{desgaste}} = \frac{u_{c\% \text{Desgaste}}^4}{\frac{u_{W_{ini}}^4}{v_{W_{ini}}} + \frac{u_{W_{fin}}^4}{v_{W_{fin}}} + \frac{u_{\theta_{\text{cribado}}}^4}{v_{\theta_{\text{cribado}}}} + \frac{u_{\theta_{\sigma}}^4}{v_{\theta_{\sigma}}}}$$

$$v_{\% \text{desgaste}} = \frac{(0,6315)^4}{\frac{1,9134}{\infty} + \frac{1,8238}{\infty} + \frac{0,54}{\infty} + \frac{0,32}{\infty}}$$

$$v_{\% \text{Desgaste}} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida

$$U_{\% \text{Desgaste}} = k * u_{\% \text{Desgaste}} = 2(0,6315) = 1,2630$$

$$k = t_{95,45}^{\infty}$$

Donde: $k = 2,00$

Paso 10. Reporte del resultado

El reporte del cálculo de la incertidumbre se expresará a dos cifras significativas.

$$\%Desgaste = 16 \% \pm 1 \%$$

Presupuesto de Incertidumbre

$F.V$	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$	U_{x_i}	U_{Y/x_i}
∂W_{ini}	$\frac{\partial \%Desgaste}{\partial W_{ini}} = 0,023883$	1,9134	0,045697
∂W_{fin}	$\frac{\partial \%Desgaste}{\partial W_{fin}} = 0,028555$	1,8238	0,052626
$\partial \theta_{cribado}$	$\frac{\partial \%Desgaste}{\partial \theta_{cribado}} = 1$	0,54	0,54
$\partial \theta_{\sigma}$	$\frac{\partial \%Desgaste}{\partial \theta_{\sigma}} = 1$	0,32	0,32

$$\begin{aligned}
 u_c &= 0,6315 \\
 v &= \infty \\
 k &= 2,00 \\
 U &= 1 \%
 \end{aligned}$$

5.4 Ejemplo 4. Análisis granulométrico

Este ejemplo ilustra el cálculo de la incertidumbre del método de ensayo ASTM C 136, el cual se utiliza para el análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

Paso 1. Definición del proceso de medición

Variables: M_{ret} = 174,1 g Masa retenida en la malla
 M_{total} = 1 589,3 g Masa total de la muestra
 Malla $\frac{3}{4}$ in (material grueso)

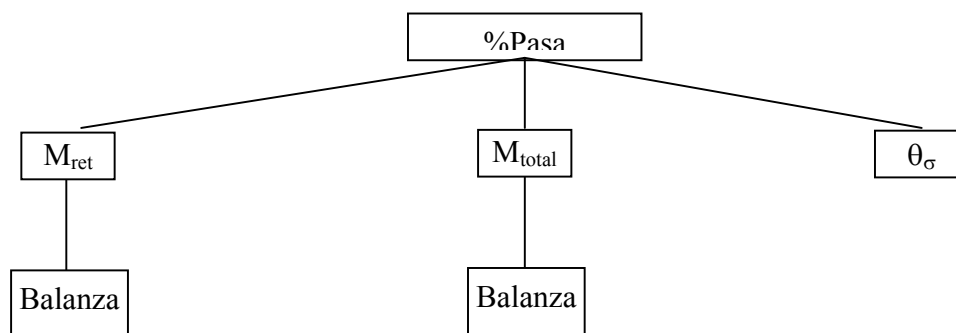
Fórmula:

$$\%Pasa = \left(1 - \frac{M_{ret}}{M_{total}}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{174,1}{1589,3}\right) \times 100 = 89,0$$

Equipos a utilizar:

Balanza con resolución de lectura de 0,1 g.
 Malla (diferente tamaño de aberturas)

Paso 2. Definición de las variables aleatorias



Definiciones: θ_{σ} Variabilidad del método de medición

Los análisis de incertidumbre de cada instrumento de medición se encuentran en los anexos mencionados.

Se debe tomar en cuenta que el análisis de este método depende del resultado del cálculo (% que pasa) y del tamaño del material (Grueso o fino); por tanto, se debe realizar un cálculo para cada malla.

Paso 3. Establecer la relación matemática que describa la función del proceso de medición

$$\%Pasa = f(M_{ret}, M_{total}, \theta_{\sigma}); \quad \%Pasa = \left(1 - \frac{M_{ret}}{M_{total}}\right) \times 100 + \theta_{\sigma}$$

Paso 4. Establecer la expresión para estimación de la incertidumbre combinada

$$u_{\%pasa} = \left[\left(\frac{\partial \%Pasa}{\partial M_{ret}} u_{M_{ret}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%pasa}{\partial M_{total}} u_{M_{total}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%pasa}{\partial \theta_{\sigma}} u_{\theta_{\sigma}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad

$$\frac{d\%pasa}{dM_{ret}} = -\frac{1}{M_{total}} \times 100 = -\frac{1}{1589,3} \times 100 = -0,0629207$$

$$\frac{d\%pasa}{dM_{total}} = \frac{M_{ret}}{M_{total}^2} \times 100 = \frac{174,1}{1589,3^2} \times 100 = 0,00689266$$

$$\frac{d\%Pasa}{d\theta_{\sigma}} = 1$$

Paso 6. Estimación de la incertidumbre asociada a cada variable

La incertidumbre asociada a M_{ret} y M_{total} se presenta a continuación:

El valor de repetibilidad de este ensayo es de 0,81

$$M_{ret} = 0,17 \text{ g}$$

$$M_{total} = 0,92 \text{ g}$$

θ_{σ} Valor de repetibilidad del método de medición (Anexo A2)

Paso 7. Estimación de la incertidumbre combinada.

$$u_{\%pasa} = \sqrt{[(-0,0629207)(0,17)]^2 + [(0,00689266)(0,92)]^2 + [(1)(0,81)]^2} = \sqrt{0,656254} = 0.810095$$

La estimación de la incertidumbre combinada ($u_{\%Pasa}$) dependerá de los niveles de cada variable.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad

$$U_{\%Pasa} = \frac{u_{c_{\%Pasa}}^4}{\frac{u_{M_{ret}}^4}{U_{M_{ret}}} + \frac{u_{M_{total}}^4}{U_{M_{total}}} + \frac{u_{\theta_\sigma}^4}{U_{\theta_\sigma}}} = \frac{(0,810095)^4}{\frac{0,17}{\infty} + \frac{0,92}{\infty} + \frac{0,81}{\infty}} = \frac{(0,81009)^4}{0}; \quad U_{\%Pasa} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida

$$U_{\%Pasa} = k * u_{\%Pasa} = (2) * (0,81009) = 1,62018; \quad k = t_{95,45}^\infty$$

Donde: $k = 2,00$

Paso 10. Reporte del resultado

El reporte de la estimación de la incertidumbre se expresará a dos cifras significativas.

$$\%Pasa = 89,0 \% \pm 1,6 \%$$

Presupuesto de Incertidumbre

$F.V$	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$	U_{xi}	$U_{Y/xi}$
∂M_{ret}	$\frac{\partial \%Pasa}{\partial M_{ret}} = -0,0629207$	0,17	-0,010696
∂M_{total}	$\frac{\partial \%Pasa}{\partial M_{total}} = 0,00689266$	0,92	0,006341
$\partial \theta_\sigma$	$\frac{\partial \%Pasa}{\partial \theta_\sigma} = 1$	0,81	0,81

$$U_c = 0,810095$$

$$v = \infty$$

$$k = 2$$

$$U = 1,6 \%$$

5.5 Ejemplo 5. Equivalente de arena

Este ejemplo ilustra el cálculo de la incertidumbre del método de ensayo ASTM D 2419, el cual se utiliza para determinar el valor de equivalente de arena de suelos y agregados finos.

Paso 1. Definición del proceso de medición

Variables:

L_{arena}	= 3,6	Lectura de arena
$L_{arcilla}$	= 4,7	Lectura de arcilla
$\%EA$		Porcentaje de equivalente de arena

Fórmula:

$$\%EA = \frac{L_{arena}}{L_{arcilla}} \times 100 = \frac{3,6}{4,7} \times 100 = 77 \%$$

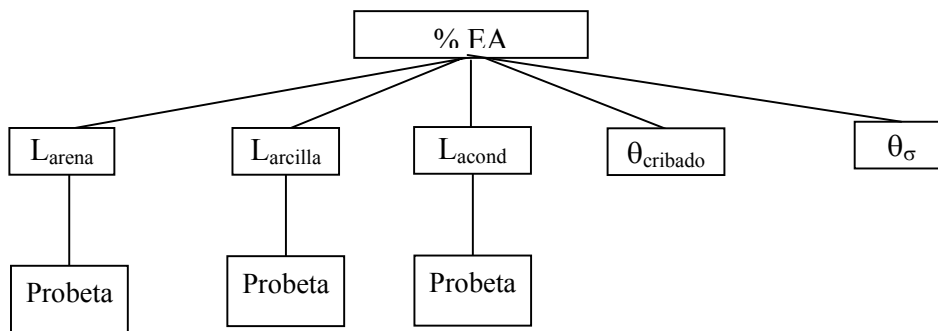
Equipos a utilizar:

Probeta para lectura de equivalente de arena
 Horno que pueda mantener una temperatura uniforme de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$

Paso 2. Definición de las variables aleatorias

Se presentan cinco variables.

L_{arena} y $L_{arcilla}$ que corresponden a las lecturas realizadas durante el ensayo.



Definiciones:

L_{acond}	Lectura de acondicionamiento.
θ_{σ}	Variabilidad del método de medición
$\theta_{cribado}$	Variabilidad del cribado (ASTM C 136)

Paso 3. Establecer la relación matemática que describa la función del proceso de medición

$$\%EA = f(L_{arena}, L_{arcilla}, L_{acond}, \theta_{cribado}, \theta_{\sigma})$$

$$\%EA = \frac{L_{arena}}{L_{arcilla}} \times 100 + L_{acond} + \theta_{cribado} + \theta_{\sigma}$$

Paso 4. Establecer la expresión para estimación de la incertidumbre combinada

$$u_{\%EA} = \left[\left(\frac{\partial \%EA}{\partial L_{arena}} u_{L_{arena}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%EA}{\partial L_{arcilla}} u_{L_{arcilla}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%EA}{\partial L_{acond}} u_{L_{acond}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%EA}{\partial \theta_{cribado}} u_{\theta_{cribado}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%EA}{\partial \theta_{\sigma}} u_{\theta_{\sigma}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad

$$\frac{d\%EA}{dL_{arena}} = \frac{1}{L_{arcilla}} \times 100 = 21,276595$$

$$\frac{d\%EA}{dL_{arcilla}} = -\frac{L_{arena}}{L_{arcilla}^2} \times 100 = -16,2969669$$

$$\frac{d\%EA}{dL_{acond}} = 1$$

$$\frac{d\%EA}{d\theta_{cribado}} = 1$$

$$\frac{d\%EA}{d\theta_{\sigma}} = 1$$

Paso 6. Estimación de la incertidumbre asociada a cada variable

Para la incertidumbre asociada a las lecturas L_{arena} , $L_{arcilla}$ y L_{acond} , solo influye la incertidumbre de la probeta, la cual se establece como 0,028 86

La incertidumbre asociada al cribado se propone de 0,54

La repetibilidad para este ensayo es 2,9

Las lecturas de la probeta son:

L_{arena}	= 0,028 86
$L_{arcilla}$	= 0,028 86
L_{acond}	= 0,028 86

$\theta_{cribado}$ Ver análisis de incertidumbre método de medición ASTM C 136
 θ_{σ} Valor de repetibilidad del método de medición (Anexo A3)

Paso 7. Estimación de la incertidumbre combinada.

$$u_{\%EA} = \sqrt{[(21,276)(0,02886)]^2 + [(-16,2969669)(0,02886)]^2 + [(1)(0,02886)]^2 + [(1)(0,54)]^2 + [(1)(2,9)]^2}$$

$$u_{\%EA} = \sqrt{9,3007} = 3,0497$$

La estimación de la incertidumbre combinada ($u_{\%EA}$) dependerá de los niveles de cada variable.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad

$$v_{\%EA} = \frac{u_{C\%EA}^4}{\frac{u_{L_{arena}}^4}{v_{L_{arena}}} + \frac{u_{L_{arcilla}}^4}{v_{L_{arcilla}}} + \frac{u_{L_{acond}}^4}{v_{L_{acond}}} + \frac{u_{\theta_{cribado}}^4}{v_{\theta_{cribado}}} + \frac{u_{\theta_{\sigma}}^4}{v_{\theta_{\sigma}}}}$$

$$v_{\%EA} = \frac{(3,0497)^4}{\frac{0,02886}{\infty} + \frac{0,02886}{\infty} + \frac{0,02886}{\infty} + \frac{0,54}{\infty} + \frac{2,9}{\infty}}$$

$$v_{\%EA} = \frac{(3,0497)^4}{0} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida

$$U_{\%EA} = k u_{\%EA} = (2)(3,0497) = 6,0994$$

$$k = t_{95,45}^{\infty}$$

Donde: $k = 2,00$

Paso 10. Reporte del resultado

El reporte del cálculo de la incertidumbre se expresará a dos cifras significativas.

$$\%EA = 77 \% \pm 6 \%$$

Presupuesto de Incertidumbre

<i>F.V</i>	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$	U_{x_i}	U_{Y/x_i}
∂L_{arena}	$\frac{\partial \%EA}{\partial L_{arena}} = 21,2765$	0,02886	0,61403
$\partial L_{arcilla}$	$\frac{\partial \%EA}{\partial L_{arcilla}} = -16,29696$	0,02886	0,47033
∂L_{acond}	$\frac{\partial \%EA}{\partial L_{acond}} = 1$	0,02886	0,02886
$\partial \theta_{cribado}$	$\frac{\partial \%EA}{\partial \theta_{cribado}} = 1$	0,54	0,54
$\partial \theta_{\sigma}$	$\frac{\partial \%EA}{\partial \theta_{\sigma}} = 1$	2,9	2,9

$$U_c = 3,0497 \%$$

$$v = \infty$$

$$k = 2,00$$

$$U = 6 \%$$

5.6 Ejemplo 6. Gravedad específica

Este ejemplo ilustra el cálculo de la incertidumbre del método de ensayo ASTM D 854, el cual se utiliza para determinar la gravedad específica de los suelos finos usando el picnómetro con agua.

a) Masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura de ensayo

Paso 1. Definición del proceso de medición

Variables:

$M_{\rho_{a,t}}$	Peso del picnómetro lleno de agua a la temperatura de ensayo (T_p); g
M_p	Promedio del peso del picnómetro calibrado, g
V_p	Volumen promedio del picnómetro calibrado, ml
$\rho_{a,t}$	Densidad de la masa del agua a la temperatura de ensayo, g/ml

M_p	= 182,18 g
V_p	= 499,57 ml
$\rho_{a,t}$	= 0,998 27 g/ml

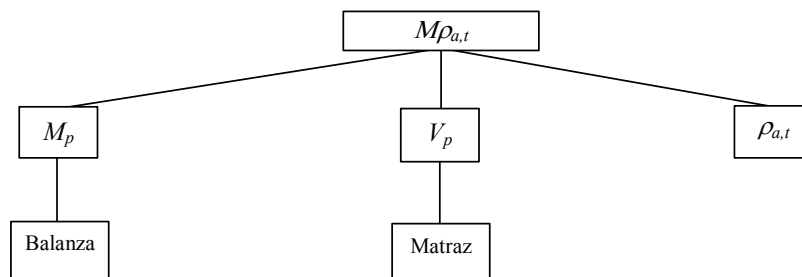
Fórmula:

$$M_{\rho_{a,t}} = M_p + (V_p * \rho_{a,t}) = 182,18 + (499,57 * 0,99827) = 680,886$$

Equipos a utilizar:

Balanza con aproximación a 0,01 g
Termómetro con resolución de lectura de 0,1 °C
Matraz con resolución de lectura de 1 ml

Paso 2. Definición de las variables aleatorias



Paso 3. Establecer la relación matemática que describa la función del proceso de medición

$$M\rho_{a,t} = f(M_p, V_p, \rho_{a,t})$$

$$M\rho_{a,t} = M_p + (V_p \times \rho_{a,p})$$

Paso 4. Establecer la expresión para estimación de la incertidumbre combinada

$$u_{M\rho_{a,t}} = \left[\left(\frac{\partial M\rho_{a,t}}{\partial M_p} u_{M_p} \right)^2 + \left(\frac{\partial M\rho_{a,t}}{\partial V_p} u_{V_p} \right)^2 + \left(\frac{\partial M\rho_{a,t}}{\partial \rho_{a,t}} u_{\rho_{a,t}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad

$$\frac{dM\rho_{a,t}}{dM_p} = 1$$

$$\frac{dM\rho_{a,t}}{dV_p} = \rho_{a,t} = 0,99827$$

$$\frac{dM\rho_{a,t}}{d\rho_{a,p}} = V_p = 499,57$$

Paso 6. Estimación de la incertidumbre asociada a cada variable

La incertidumbre del peso, M_p , y del volumen del picnómetro, V_p , se estima mediante métodos estadísticos (tipo A)

$$M_p = 0,015\ 28$$

$$V_p = 0,030\ 53$$

La incertidumbre asociada a la densidad del agua se propone de:

$$\rho_{a,t} = 0,000\ 04$$

Paso 7. Estimación de la incertidumbre combinada.

$$u_{M_{\rho_{a,t}}} = \sqrt{[(1)(0,01528)]^2 + [(0,99827)(0,03053)]^2 + [(499,57)(0,00004)]^2} = \sqrt{0,00156} = 0,0395$$

La estimación de la incertidumbre combinada ($u_{M_{\rho_{a,t}}}$) dependerá de los niveles de cada variable.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad

$$v_{M_{\rho_{a,t}}} = \frac{(0,0395)^4}{\frac{(0,0153)^4}{\infty} + \frac{(0,0305)^4}{\infty} + \frac{(0,00004)^4}{\infty}} = \frac{(00395)^4}{0} = \infty ; \quad v_{M_{\rho_{a,t}}} = \infty$$

b) Gravedad específica del suelo a la temperatura de ensayo

Paso 1. Definición del proceso de medición

Variables:

- $G_{S,t}$ Gravedad específica del sólido del suelo a la temperatura de ensayo
- $M_{\rho_{ws,t}}$ Peso del picnómetro lleno de agua y sólidos a la temperatura de ensayo, g
- M_s Peso de los sólidos del suelo seco al horno, g
- $M_{\rho_{a,t}}$ Peso del picnómetro lleno de agua a la temperatura de ensayo (T_p), g

$$\begin{aligned} M_{\rho_{ws,t}} &= 715,35 \text{ g} \\ M_s &= 56,12 \text{ g} \\ M_{\rho_{a,t}} &= 680,886 \text{ g} \end{aligned}$$

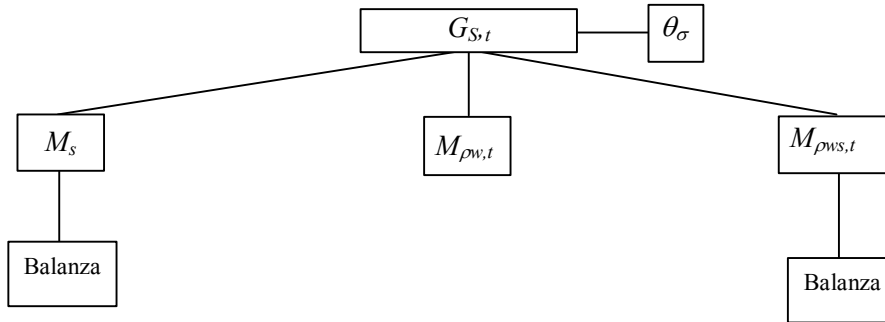
Fórmula:

$$G_{S,t} = \frac{M_s}{M_{\rho_{a,t}} + M_s - M_{\rho_{ws,t}}} = \frac{56,12}{680,886 + 56,12 - 715,35} = 2,591$$

Equipos a utilizar:

- Balanza con aproximación a 0,01 g
- Termómetro con resolución de lectura de 0,1 °C

Paso 2. Definición de las variables aleatorias



Paso 3. Establecer la relación matemática que describa la función del proceso de medición

$$G_{S,t} = f(M_s, M_{\rho_{\omega,t}}, M_{\rho_{\omega S,t}}); \quad G_{S,t} = \frac{M_s}{M_{\rho_{\omega,t}} + M_s - M_{\rho_{\omega S,t}}} + \theta_\sigma$$

Paso 4. Establecer la expresión para estimación de la incertidumbre combinada

$$u_{G_{S,t}} = \left[\left(\frac{\partial G_{S,t}}{\partial M_s} u_{M_s} \right)^2 + \left(\frac{\partial G_{S,t}}{\partial M_{\rho_{\omega,t}}} u_{M_{\rho_{\omega,t}}} \right)^2 + \left(\frac{\partial G_{S,t}}{\partial M_{\rho_{\omega S,t}}} u_{M_{\rho_{\omega S,t}}} \right)^2 + \left(\frac{\partial G_{S,t}}{\partial \theta_\sigma} u_{\theta_\sigma} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad

$$\frac{dG_{S,t}}{dM_s} = \frac{M_{\rho_{\omega,t}} - M_{\rho_{\omega S,t}}}{(M_{\rho_{\omega,t}} + M_s - M_{\rho_{\omega S,t}})^2} = \frac{680,886 - 715,35}{(680,886 + 56,12 - 715,35)} = -0,07349$$

$$\frac{dG_{S,t}}{dM_{\rho_{\omega,t}}} = \frac{-M_s}{(M_{\rho_{\omega,t}} + M_s - M_{\rho_{\omega S,t}})^2} = \frac{-56,12}{(680,886 + 56,12 - 715,35)^2} = -0,11967$$

$$\frac{dG_{S,t}}{dM_{\rho_{\omega S,t}}} = \frac{M_s}{(M_{\rho_{\omega,t}} + M_s - M_{\rho_{\omega S,t}})^2} = \frac{52,12}{(680,886 + 56,12 - 715,35)^2} = 0,11967$$

$$\frac{dG_{S,t}}{d\theta_\sigma} = 1$$

Paso 6. Estimación de la incertidumbre asociada a cada variable

La incertidumbre asociada a $M_{\rho_{ws,t}}$ y M_s se presenta a continuación:

$$\begin{aligned} M_{\rho_{ws,t}} &= 0,015\ 28 \\ M_s &= 0,042\ 49 \\ M_{\rho_{\alpha,t}} &\text{ Ver el inciso anterior} \end{aligned}$$

El valor de repetibilidad de este ensayo es de 0,027 (Anexo A4)

Paso 7. Estimación de la incertidumbre combinada.

$$\begin{aligned} u_{G_{s,t}} &= \sqrt{[(-0,07349)(0,01528)]^2 + [(-0,011967)(0,04249)]^2 + [(0,11967)(0,03951)]^2 + [(1)(0,027)]^2} \\ u_{G_{s,t}} &= \sqrt{0,0000013 + 0,0000259 + 0,0000223 + 0,000729} = \sqrt{0,000779} = 0,0279 \end{aligned}$$

La estimación de la incertidumbre combinada ($u_{G_{s,t}}$) dependerá de los niveles de cada variable.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad

$$\begin{aligned} \nu_{G_{s,t}} &= \frac{(0,0279)^4}{\frac{(0,01528)^4}{\infty} + \frac{(0,04249)^4}{\infty} + \frac{(0,03951)^4}{\infty} + \frac{0,027}{\infty}} = \frac{(0,0279)^4}{0} = \infty \\ \nu_{G_{s,t}} &= \infty \end{aligned}$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida

$$U_{G_{s,t}} = k * u_{G_{s,t}} = 2 * 0,0279 = 0,056$$

$$k = t_{95,45}^{\infty}$$

Donde: $k = 2,00$

Paso 10. Reporte del resultado

$$G_{S,t} = 2,251 \pm 0,056$$

FV	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$		u_{xi}	$u_{Y/xi}$
$?M_s$	$\frac{\partial G_{S,t}}{\partial M_s} =$	-0,073490	0,015280	-0,00112
$?M_{\rho a}$	$\frac{\partial G_{S,t}}{\partial M_{\rho a}} =$	-0,119670	-0,039510	0,00473
$M_{\rho ws}$	$\frac{\partial G_{S,t}}{\partial M_{\rho ws}} =$	0,119670	0,042490	0,00508
$? \theta_\sigma$	$\frac{\partial G_{S,t}}{\partial \theta_\sigma} =$	1,0	0,027000	0,027000
			$u_{G_{S,t}} =$	0,027901
			$\nu =$	8
			$k =$	2,00
			$U_{G_{S,t}} =$	0,056

Recomendaciones

Para realizar una estimación de incertidumbre es necesario tener conocimientos básicos en ciencias como la estadística, las matemáticas y la metrología. Esta estimación también involucra el pleno entendimiento e interpretación de los métodos de ensayo y un dominio en normas de calidad. Debido a esto, se recomienda crear un grupo de trabajo para que lleve a cabo una correcta estimación de incertidumbre en los ensayos del laboratorio.

La capacidad del experto en métodos de ensayo debe ser tal que sea capaz de identificar los puntos importantes para definir las variables involucradas en la estimación de la incertidumbre.

Un conocimiento básico en metrología ayuda a que el proceso de medición sea eficaz, además de evitar los errores sistemáticos y de causas especiales durante el proceso.

Una correcta interpretación de informes/certificados de calibración/verificación de los instrumentos de medición, nos permite evaluar la consistencia y estabilidad de los equipos a través del tiempo. Además, este control metrológico nos permite planear y optimizar los requerimientos de calibración/verificación de los equipos.

El uso de procedimientos de ensayo normalizados nos da la ventaja de conocer la variabilidad de los resultados que se obtienen en las condiciones específicas de dicho procedimiento, mediante los parámetros de repetibilidad y reproducibilidad del método normalizado.

Es responsabilidad del laboratorio de ensayo demostrar, mediante evidencia física, la capacidad técnica del personal que ejecuta los ensayos y comprobar el cumplimiento de la repetibilidad y reproducibilidad del método de ensayo. El cumplimiento de la repetibilidad y reproducibilidad por parte del laboratorio asegura una correcta estimación de la incertidumbre. El cumplimiento de esta variabilidad en los resultados del procedimiento de ensayo se verifica mediante ensayos de aptitud interlaboratorio. En caso de que la **entidad mexicana de acreditación, a. c.** realice ensayos de aptitud es obligación de un laboratorio acreditado participar en dichos programas.

Debido a que el funcionamiento de los equipos se deteriora con el tiempo, la estimación de la incertidumbre se ve afectada, por tanto, se recomienda realizar hojas de cálculo para optimizar el proceso de análisis.

Bibliografía

1. Alfonso, C. J. "Seminario-Taller Calidad Total Normalización-Acreditamiento y programa Medura". Centro Nacional de Metrología. Instituto Politécnico Nacional (Agosto 1997).
2. Catalina, C. C. "La Certificación ISO-9000/NMX-CC". Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S.C. Normex (Agosto 1997).
3. Desarrollo Básico de un Manual de Calidad para un Laboratorio. Sistema Nacional de Acreditamiento de Laboratorios de Pruebas. SECOFI.
4. Alfredo, V. C. "Requisitos del Manual de Calidad de acuerdo a la norma mexicana NMX-CC-13-1992".
5. Estructuración del manual de calidad de acuerdo a la norma mexicana NMX-CC-13-1992. Requisitos generales de acreditamiento de unidades de verificación NMX-CC-16-1993-SCFI.
6. Ley federal sobre metrología y normalización. SECOFI. Serie jurídica.
7. Ricardo, M. R. "Estadística aplicada a las mediciones". Medida. Empresa Marbor de México S.A. de C. V. (Mayo 2004).
8. Ricardo, M. R. "Incertidumbre en procesos de medición". Entidad Mexicana de Acreditación A. C. (2004).
9. Políticas de Trazabilidad e Incertidumbre. Coordinación de promoción y difusión. Entidad Mexicana de Acreditación A. C. (2004).
10. Ismael, C. S. "Uso de la distribución en la estimación de la incertidumbre de la medición. Centro Nacional de Metrología (Diciembre 2002)
11. Rothery, Brian. ISO 9000 (1993).
12. Hector, G. M. "Incertidumbre en la calibración de calibradores tipo vernier". Centro Nacional de Metrología (Mayo 2001)
13. Ernst, O. G. New tendencies in the realisation of the si-units. Simposio de metrología (2002).
14. Richard, F. K. "The traceability of measurements in USA". National Institute of Standards and Technology.
15. Graham, C. "ISO/IEC 17025-Enhancing the competitiveness of calibration and testing laboratories".

16. Ismael, C. S. "Incertidumbre en las mediciones: impactos económicos y sociales". Centro Nacional de Metrología.
17. Ignacio, H. G. "Calibraciones en metrología mecánica como oportunidad de negocios". Centro Nacional de Metrología. Dirección de Metrología Mecánica.
18. Wolfgang, A. S. "La simulación numérica como una herramienta en la estimulación de la incertidumbre de medición". Centro Nacional de Metrología. División de Óptica y Radiometría:
19. Wolfgang, A. S. "La incertidumbre expandida y los grados de libertad: Un análisis comparativo entre el método recomendado por la Gum y métodos simplificados". Centro Nacional de Metrología. División de Óptica y Radiometría.
20. Miguel, T. V. "Metrología, normalización y calidad: Estrategia para lograr la competitividad educativa y tecnológica. Coordinación de Metrología, Normas y Calidad Industrial. Coordinación General de Vinculación. Instituto Politécnico Nacional.
21. Ed, N. "Metrology, accreditation, standards, & quality the task for developing countries making the transition from a centralized to market economy. International Affairs. NCSL international. International Marketing consultant.
22. M. Araya. "La red nacional de metrología de Chile, una solución a nuestra medida". CESMEC LIMITADA. Laboratorios Nacionales de Temperatura y Masa.
23. Avila M. J, Martinez F, Salas J. A. "Desarrollo de material de referencia de esferas de vidrio con distribución de tamaño de partícula de 20 a 150 micrómetros". Centro Nacional de Metrología. División Cerámicos.
24. Enrique, V. D. "Técnicas de simulación para el análisis estadístico de datos de medición". Centro de Investigación de Matemáticas A. C.
25. Román, V. S. "Diseño de experimentos en metrología". Centro de Investigación de Matemáticas A. C.
26. Amparo L. Luján Solís, Jorge Nava Martínez y Félix Pezet Sandoval. "Establecimiento de la escala nacional de masa en México de mg a 10 kg. Centro Nacional de Metrología. Laboratorios Patrones de Referencia.
27. Jorge Nava Martínez y Félix Pezet Sandoval. "Comparación entre CENAM, BIPM y TROEMNER para determinar la susceptibilidad magnética en una pesa de 100 g. Centro Nacional de Metrología. Laboratorios Patrones de Referencia de Masa.

28. Erick René, A. U. "Mapa para análisis de requisitos en la norma ISO/IEC-17025 (NMX-EC-17025-IMNC-2000)". Grupo empresarial ACCE.
29. Zeleny, R. "Actividades del comité técnico 213 de ISO". Instituto de Metrología de Mitutoyo/ Mitutoyo Mexicana S.A. de C. V.
30. Wolfgang A. Schmid y Rubén J. Lazos Martínez. "Guía para estimar la incertidumbre de la medición". Centro nacional de Metrología (Abril 2004)
31. Andrés Hernández Guzmán, Manuel de Jesús Fabela Gallegos, Miguel Martínez Madrid. "Sistemas de calidad aplicados a laboratorios de prueba". Publicación Técnica No. 185. Secretaría de comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano el Transporte (2001).
32. Graciano, A. C. "Un equipo avanzado tecnológicamente". Curso se de sistemas de calidad. Centro Nacional de Ingeniería y Desarrollo Industrial.
33. Rubén, L. M. "Uso de certificados de calibración". Nota. Centro Nacional de Metrología. Diciembre (2002).
34. "El sistema internacional de unidades (SI)". Publicación técnica CNM-MMM-PT-003. Centro Nacional de Metrología. Área de Metrología Mecánica. División de Metrología de Masa (2003).
35. K. H. Barry. "The impact of metrology on the quality of life en the UK". National Physical Laboratory. Simposio de metrología (2001).
36. W. Bich. "Aplication of the guide to the expression of uncertainty in measurement at the industrial level". CNR-IMGC. Instituto di metrología G. Colonnetti, Torino, Italia.
37. Eugen T. "Proveedores de Servicio para la Metrología Dimensional ¿De qué viven?". UNIMETRIK S.A. Vitoria, España.
38. Héctor N. J. "Reseña Y Perspectiva de las mediciones en México". Centro Nacional de Metrología.
39. N. Muñoz. "Cálculo numérico de la integral de Rayleigh y validación de resultados mediante datos experimentales". Centro Nacional de Metrología.
40. E. Rivera, J. Moreno. "Determinación de un coeficiente con comportamiento de segundo orden y su incertidumbre". CENAM. Laboratorio de Resistencia Eléctrica. Dirección de Metrología Eléctrica.
41. Erick A. U. "Presentación de la norma ISO-IEC 17025 (NMX-EC-17025)". Grupo Empresarial ACCE .

42. Erick A. U. "Consideraciones técnicas y administrativas en auditorías y evaluaciones". Grupo Empresarial ACCE.
43. Durán A. "Clasificación de instrumentos para pesar por exactitud según la NOM-010-SCFI-1994 y selección de patrones. Masstech S.A. de C.V.
44. Talavera M., Pezet F., Ramírez L.M. "Transferencia del kilogramo No. 21 a patrones de masa de acero inoxidable. Centro Nacional de Metrología.
45. Becerra L. Omar y Bich Walter "Calibración del volumen y masa de pesas simultáneamente por medio de series cerradas. Centro Nacional de Metrología. Instituto di metrología G. Colonnetti.
46. Estacio H. M., Valle J. H. "Acreditación del laboratorio de ensayos CENEX. Su participación en obras industriales". CENEX, MICONS, Cienfuegos, Cuba.
47. José Francisco V. H. y José Luis J. L. "Importancia de un laboratorio secundario en México". Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial.
48. Miguel T. V. "El programa de metrología del IPN: Oferta tecnológica de calidad a la industria". Coordinación de Metrología, Normas y Calidad Industrial. Coordinación General de Vinculación. Instituto Politécnico Nacional.
49. Rubén L. M. "ISO 9001: 2000, Trazabilidad e incertidumbre". Centro Nacional de Metrología.
50. M. Gutierrez-Munguía. "Diseño de un laboratorio secundario de metrología dimensional acreditado para el estado de Guanajuato". Centro de Investigaciones en óptica, A. C.
51. Héctor N. J. "Una década trabajando para el fortalecimiento metrológico de México". Centro Nacional de Metrología. Simposio de metrología. Octubre 2004.
52. Arden B. "Metrology is fundamental to economic and social development" National Institute of Standards and Tecnology. National Science Foundation, USA. Simposio de Metrología (Octubre 2004).
53. Michael Kühne, Michael Krystek, Andreas Odin. "Traceability of measurament results in the industrial metrology". Physikalish-Technische Bundesantalt. Simposio de Metrología (Octubre 2004)
54. J. Mauricio L-Romero. "La unidad de tiempo y el SI". Centro Nacional de Metrología. División de Tiempo y Frecuencia. Simposio de Metrología. (Octubre 2004).

Anexo A1 Desgaste de los Ángeles

A1. Precisión y desviación

A1.1 *Precisión.* Para agregado de tamaño nominal máximo de 19,0 mm (3/4 in) con pérdidas de porcentaje en el rango de 10 a 45 % , el coeficiente de variación multilaboratorio se ha encontrado que es 4,5 %. Por tanto, los resultados de dos ensayos realizados apropiadamente de dos laboratorios diferentes en una muestra del mismo agregado, no deben diferir una respecto a la otra por más de 12,7 % de su promedio. El coeficiente de variación de un sólo operador es de 2,0 %. De ahí que, los resultados de dos ensayos llevados a cabo apropiadamente por el mismo operador en el mismo agregado granular, no debe diferir una con respecto a la otra en más de 5,7 % de su promedio.

A1.2 *Desviación.* No hay un valor de referencia para este método de ensayo.

Anexo A2 Granulometría

A2. Precisión y desviación

A2.1 Precisión. La precisión para este método de ensayo puede apreciarse en la Tabla A2.1. La estimación se basa en los resultados del programa de ensayos y procedimientos de los laboratorios de referencia AASHTO, y con métodos de ensayo C 136 y AASHTO T 27. Los resultados están respaldados en el análisis de ensayos de 65 a 233 laboratorios que ensayaron 18 pares de muestras de agregado grueso, y en resultados de ensayos de 74 a 222 laboratorios que ensayaron 17 pares de muestras de agregado fino. Los valores de la tabla están dados para diferentes rangos del porcentaje total de agregados que pasan una malla.

**Tabla A2.1
Precisión**

	Porcentaje total del material que pasa		Desviación estándar (1s)	Rango aceptable de dos resultados (d2s)
			% ^A	% ^A
Agregado grueso ^B	<100	≥ 95	0,32	0,9
	<95	≥ 85	0,81	2,3
	<85	≥ 80	1,34	3,8
	<80	≥ 60	2,25	6,4
	<60	≥ 20	1,32	3,7
Precisión de un sólo operador	<20	≥ 15	0,96	2,7
	<15	≥ 10	1,00	2,8
	<10	≥ 5	0,75	2,1
	<5	≥ 2	0,53	1,5
	<2	> 0	0,27	0,8
Precisión multilaboratorio	<100	≥ 95	0,35	1,0
	<95	≥ 85	1,37	3,9
	<85	≥ 80	1,92	5,4
	<80	≥ 60	2,82	8,0
	<60	≥ 20	1,97	5,6
	<20	≥ 15	1,60	4,5
	<15	≥ 10	1,48	4,2
	<10	≥ 5	1,22	3,4
Agregado fino ^B	<100	≥ 95	0,26	0,7
	<95	≥ 60	0,55	1,6
	<60	≥ 20	0,83	2,4
	<20	≥ 15	0,54	1,5
	<15	≥ 10	0,36	1,0
Precisión de un sólo operador	<10	≥ 2	0,37	1,1
	<2	> 0	0,14	0,4
	<100	≥ 95	0,23	0,6
Precisión multilaboratorio	<95	≥ 60	0,77	2,2
	<60	≥ 20	1,41	4,0
	<20	≥ 15	1,10	3,1
	<15	≥ 10	0,73	2,1
	<10	≥ 2	0,65	1,8
	<2	> 0	0,31	0,9

^A Estos números representan los límites (1s) y (d2s), respectivamente, descritos en la Práctica C 670.

^B La precisión estimada se basa en agregados con tamaño nominal máximo de 19,0 mm (³/₄ in)

A2.1.1 La precisión de los valores para agregado fino en la Tabla A2.2 se respalda en muestras de 500 g. La revisión de este método de ensayo en 1994, permitió limitar muestras de agregado fino a un tamaño de 300 g como mínimo. El análisis de resultados de ensayos con especímenes de 300 g y 500 g se muestra en la Tabla A2.2, los cuales indican solamente pequeñas diferencias debidas al tamaño de la muestra.

Tabla A2.2
Precisión obtenida para muestras de 300 g y 500 g

Resultados de ensayo %				Tamaño de la muestra	Numero de laboratorios	Promedio	1ds	D2s	1s	D2s
Material total malla No 4	pasa	la		500 g	285	99,992	0,027	0,066	0,037	0,104
				300 g	276	99,990	0,021	0,060	0,042	0,117
Material total malla No 8	pasa	la		500 g	281	84,10	0,43	1,21	0,63	1,76
				300 g	274	84,32	0,39	1,09	0,69	1,92
Material total malla No 16	pasa	la		500 g	286	70,11	0,53	1,49	0,75	2,10
				300 g	272	70,00	0,62	1,74	0,76	2,12
Material total malla No 30	pasa	la		500 g	287	48,54	0,75	2,10	1,33	3,73
				300 g	276	48,44	0,87	2,44	1,36	3,79
Material total malla No 50	pasa	la		500 g	286	13,52	0,42	1,17	0,98	2,73
				300 g	275	13,51	0,45	1,25	0,99	2,76
Material total malla No 100	pasa	la		500 g	287	2,55	0,15	0,42	0,37	1,03
				300 g	270	2,52	0,18	0,52	0,32	0,89
Material total malla No 200	pasa	la		500 g	278	1,32	0,11	0,32	0,31	0,85
				300 g	266	1,30	0,14	0,39	0,31	0,85

A2.2 Desviación. No hay un valor de referencia para este método de ensayo.

Anexo A3 Equivalente de arena

A3. Precisión y desviación

A3.1 Las siguientes estimaciones de precisión, para este método de ensayo, se basan en resultados obtenidos por el laboratorio de referencia AASHTO de materiales (AMRL) del Programa de muestreo de Referencia, el muestreo se realizó de acuerdo al método de ensayo AASHTO T176. No hay diferencias significativas entre los dos métodos. Los análisis de datos son el resultado de un análisis de 8 pares de resultados de 50 a 80 laboratorios, con el rango de valores de equivalentes de arena promedio para ensayos con variación de aproximadamente 60 a 90.

A3.1.1 *Precisión del operador.* La desviación normal debida al operador fue de 1,5 para equivalentes de arena mayores a 80 y 2,9 para valores menores que 80 (1s).⁹ Por tanto, los resultados de dos ensayos realizados, por el mismo operador, sobre materiales similares no deben diferir de 4,2 y 8,2⁹; respectivamente (d2s).

A3.1.2 *Precisión multilaboratorio.* La desviación normal para la diversidad de laboratorios fue de 4,4 para valores de equivalente de arena mayores que 80 y 8 para valores menores que 80 (1s)⁹. Por tanto, los resultados de dos ensayos realizados por diferentes laboratorios, en materiales similares no deben diferir por más de 12,5 y 22,6⁹; respectivamente (d2s).

A3.1.3 Se dispone de datos adicionales de precisión, de un estudio hecho por una agencia estatal que involucra la circulación de pares de ensayos sobre 20 laboratorios en tres ocasiones diferentes. El rango de variación de valores de equivalente de arena para esos ensayos varía aproximadamente de 30 a 50; estos fueron materiales tienen mucho más finos que las muestras del laboratorio AASHTO reportadas en A3.1.1 y A3.1.2.

A3.1.3.1 La desviación normal multilaboratorio de esta agencia fue de 3,2 (1s). Por tanto, en los laboratorios de esta agencia, los resultados de dos ensayos desarrollados, de manera adecuada, por diferentes laboratorios sobre materiales similares no difieren más de 9,1 (d2s).

A3.2 *Desviación.* No hay un valor de referencia para este método de ensayo.

Anexo A4 Gravedad específica

A4. Precisión y desviación

A4.1 *Precisión.* En las Tablas A4.1 y A4.2 se muestra el criterio para juzgar la aceptabilidad de los resultados obtenidos del ensayo para estos métodos de ensayo de acuerdo al tipo de suelo con el método A (excepto el suelo secado al aire). Estas estimaciones de la precisión se basan en los resultados de programas interlaboratorio conducidos en el programa de ensayos y suelos de referencia ASTM. En este programa, algunos laboratorios ejecutan tres ensayos por tipo de suelo (ensayo triple), mientras que otros laboratorios ejecutan un solo ensayo por tipo de suelo. La precisión estimada puede cambiar con el tipo de suelo y el método usado (A ó B). Se debe tener cuidado al aplicar estas estimaciones para otro suelo o método.

A4.1.1 Los datos de la Tabla A4.2 se basan en ensayos triples en cada tipo de suelo. La desviación normal de un sólo operador y multilaboratorio se muestran en la Tabla A4.2, columna 4; la cual se obtuvo de E 691 donde se recomienda que cada ensayo de laboratorio se realice por lo menos tres veces. El resultado de dos ensayos llevados a cabo apropiadamente, ejecutados por el mismo operador con el mismo material, usando el mismo equipo y en periodos de tiempo relativamente cortos no debe diferir más que en límites para un sólo operador en d_{2s} mostrado en la Tabla A4.2, columna 5. Para definición de d_{2s} ver nota C en la Tabla A4.1. Los resultados de dos ensayos conducidos apropiadamente, ejecutados por diferentes operadores, en diferentes días no deben diferir más de límites de d_{2s} multilaboratorio mostrados en la Tabla A4.2, columna 5.

A4.1.2 En los suelos de referencia y programas de ensayo ASTM, algunos laboratorios ejecutaron únicamente un ensayo. Esta es una práctica común en la industria del diseño y construcción. Los datos en la Tabla A4.2 se basan en el primer resultado de los ensayos triples de laboratorio y en los resultados de un ensayo de los otros laboratorios. Los resultados de dos ensayos conducidos apropiadamente, por dos diferentes laboratorios, con diferentes operadores, usando equipos diferentes y en diferentes días no deben variar más que el límite de d_{2s} mostrados en la Tabla A4.2, columna 5.

A4.1.3 En la Tabla A4.1 se presenta una interpretación rigurosa de los datos de ensayo triples de acuerdo con la práctica E 691 de laboratorios precalificados. La Tabla A4.2 se deriva de los datos de ensayo que se presentan en la práctica común.

Tabla A4.1
Resumen de resultados para ensayos triples de laboratorio (Gravedad Específica).

Tipo de Suelo	No de ensayos de laboratorio triplicados	Valor promedio ^A	Desviación estándar ^B	Rango aceptable de dos resultados ^C
1	2	3	4	5
Resultados de un operador (dentro de la repetibilidad del laboratorio)				
CH	14	2,717	0,009	0,03
CL	13	2,670	0,006	0,02
ML	14	2,725	0,006	0,02
SP	14	2,658	0,006	0,02
Resultados multilaboratorio (entre la reproducibilidad del laboratorio)				
CH	14	2,717	0,028	0,08
CL	13	2,670	0,022	0,06
ML	14	2,725	0,022	0,06
SP	14	2,658	0,008	0,02

^A El número de dígitos significativos y decimales presentados son representativos de los datos de entrada. De acuerdo con la práctica D 6026, la desviación estándar y el rango aceptable de resultados no puede tener más decimales que los datos de entrada.

^B La desviación estándar es calculada de acuerdo con la práctica E 691 y se refiere a los límites (1S)

^C El rango aceptable de dos resultados se refiere a los límites d_{2s} y se calcula como $1960 \sqrt{2} \cdot 1s$, como se define en la práctica E 177. La diferencia entre dos ensayos adecuadamente conducidos no deberá exceder este límite. El número de cifras significativas presentado es igual a aquel prescrito para estos métodos de ensayo o práctica D 6026. En suma, el valor presentado puede tener el mismo número de decimales como la desviación estándar, incluso si estos resultados tienen más cifras significativas que la desviación estándar.

^D Los criterios para asignar la desviación estándar para suelos no cohesivos no están disponibles.

Tabla A4.2
Resumen de resultados de ensayos sencillos de cada laboratorio (Gravedad específica)^A

Tipo de suelo	No de ensayos triples de laboratorio	Valor promedio	Desviación estándar	Rango aceptable de dos resultados
1	2	3	4	5
Resultados multilaboratorio (ensayo sencillo ejecutado por cada laboratorio)				
CH	18	2,715	0,027	0,08
CL	18	2,673	0,018	0,05
ML	18	2,726	0,022	0,06
SP	18	2,660	0,007	0,02

A4.1.4 Los tipos de suelo se basan en los resultados de ensayo multilaboratorio. Los suelos usados en el programa se describen de acuerdo con la práctica D 2487. A continuación, se presentan los nombres locales para los diferentes tipos de suelos:

CH	arcilla grasa, LL = 60 %, IP = 39 % el suelo ha sido secado al aire y pulverizado nombre local: Arcilla Buckshot Vicksburg.	CH ₁	finos 99 % café grisáceo	ML	limo, LL = 27 %, IP = 4 % el suelo ha sido secado al aire y pulverizado nombre local: Limo Vicksburg.	ML ₁	finos 99 % café claro
CL	arcilla magra, LL = 33 %, IP = 13 % el suelo ha sido secado al aire y pulverizado nombre local: Arcilla Anápolis.	CL ₁	finos 89 % gris	SP	arena mal graduada, arena gruesa 20 %, arena media 48 %, arena fina 30 %, finos 2% café amarillenta. nombre local: Arena Frederick.	SP ₁	

A4.2 Desviación. No hay un valor de referencia para este método de ensayo.



‡ **Certificación ISO 9001:2000 según documento No 03-007-MX, vigente hasta el 24 de octubre de 2006 (www.imt.mx)**

§ **Laboratorios acreditados por EMA para los ensayos descritos en los documentos MM-054-010/03 y C-045-003/03, vigentes hasta el 9 de abril de 2007 (www.imt.mx)**

CIUDAD DE MÉXICO

Av Patriotismo 683
Col San Juan Mixcoac
03730, México, D F
tel (55) 5598-5610
fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro
tel (442) 216-9777
fax (442) 216-9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx