



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA

INCERTIDUMBRE ESTADÍSTICA
EN LOS PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO DE GEOTECNIA

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

GUADALUPE EVANGELINA ITANDEHUI MARTÍNEZ PEÑA

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO. NOVIEMBRE 2006

BIBLIOTECA CENTRAL UAQ

No. Adq. 171500

No. Título _____

621.381548

M385i



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias

**INCERTIDUMBRE ESTADÍSTICA
EN LOS PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO DE GEOTECNIA**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Guadalupe Evangelina Itandehui Martínez Peña

Dirigida por:

Dr. Paul Garnica Anguas

SINODALES

Dr. Paul Garnica Anguas
Presidente


Dr. Eduardo Rojas González
Secretario

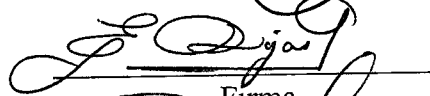
M. en I. Alfredo Zepeda Garrido
Vocal

M. en C. Dario Hurtado Maldonado
Suplente

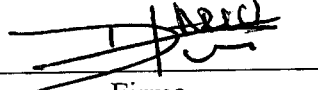
Dr. Jesús Alonso Mota
Suplente

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad

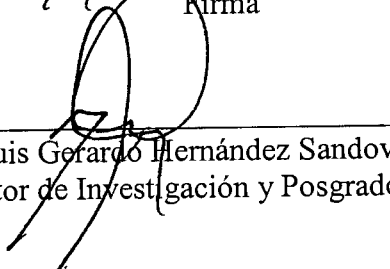

Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro. Noviembre 2006
México

RESUMEN

Este trabajo presenta una aplicación del concepto de incertidumbre estadística en los ensayos de laboratorio de Geotecnia. Las ciencias experimentales enfrentan el problema de la variabilidad de los resultados que se obtienen en las observaciones de laboratorio. Dicha variabilidad genera incertidumbre respecto al “verdadero” valor del mensurando que tiene efectos negativos en el costo de las obras civiles y en la seguridad de los usuarios, por la necesidad de utilizar factores de seguridad altos. El concepto de incertidumbre tiene una sólida aplicación en laboratorios de química, especialmente farmacéuticos, donde la precisión y exactitud de las mediciones resulta prioritaria. En los laboratorios de Geotecnia el manejo de éste concepto y la metodología para su estimación, aún no es de uso común; sin embargo, en este trabajo se defiende la tesis de que su utilización refleja la competitividad técnica de un laboratorio de ensayos y por lo tanto en un futuro próximo resultará altamente prioritario para su permanencia. El trabajo consta de seis capítulos medulares, más las conclusiones, la bibliografía y los anexos. Los capítulos centrales exponen los conocimientos básicos de metrología aplicados, el marco normativo para la estimación de la incertidumbre en laboratorios de ensayo, los modelos de aplicación específica a diez ensayos de laboratorio de Geotecnia incluyendo su estimación cuantitativa y finalmente se concluye con la descripción de la relación cliente – laboratorio en la que se puede especificar una incertidumbre requerida por alguna aplicación particular por parte del cliente. Como parte de los resultados obtenidos se obtiene evidencia de que la incertidumbre que resulta en un proceso de medición dentro de los procedimientos de ensayo de Geotecnia, es mínima, siempre y cuando sea un procedimiento normalizado. Encontrándose que el mayor aporte a la incertidumbre se debe a la repetibilidad y reproducibilidad del procedimiento de ensayo normalizado.

(Palabras clave: incertidumbre, ensayos, Geotecnia)

SUMMARY

This research work presents an application of the uncertainty statistical concept in geotechnical laboratory tests. Experimental sciences face an important problem derived from the variability of the results in the observations in the laboratory. This variability produces uncertainty on the “real” value of the measurand, which has negative effects in civil works costs as a result of the implicated use of high safety factors. Nowadays the uncertainty concept is widely used in chemical laboratories, especially the pharmaceutical ones, where the accuracy and precision of measurements are a priority. In geotechnical laboratories the use of the uncertainty concept and the methodology for its estimation are not a common practice yet, but in this work it is sustained that its use is an indicator of the laboratory technical competitiveness and that in a near future it will be an important factor of permanency in the field. This publication is formed by six fundamental chapters, plus the conclusions, bibliography and annexes. The central chapters give the basic knowledge of applied metrology, the normative framework for the uncertainty estimation in laboratories, the description of the mathematical models applied to ten geotechnical laboratory tests, including its quantitative estimation, and finally, the interrelation client – laboratory is described, outlining the possibility for the laboratory to receive a solicitude for a test with a specific uncertainty, as a consequence of a particular client’s necessity. As a part of the research results, evidence is obtained of that, in geotechnical tests, the uncertainty resulting from a measuring process is at the minimum if it is a normalized one, and that the main source of uncertainty come from the repeatability and the reproducibility of the normalized test procedure.

(Key words: Uncertainty, Geotechnical laboratory tests)

Con dedicación especial a las mujeres que pese a cualquier adversidad salen adelante por sí mismas con decisión y perseverancia. Espero que este trabajo me permita sumar méritos para que algún día pueda ser incluida en el linaje de mujeres admirables, del cual provengo.

AGRADECIMIENTOS

Es fácil cometer errores en este segmento, solo espero que los errores que cometa sean calificados como errores aleatorios, debido a mi memoria con tendencia a ser olvidadiza, y no se califiquen como errores sistemáticos. Si es esto último, favor de disculpar la pobre exactitud de mi memoria.

Agradezco al Instituto Mexicano del Transporte por darme la posibilidad de brindar herramientas nuevas a la Geotecnia. A la Universidad Autónoma de Querétaro agradezco haber acrecentado mi conocimiento en la Mecánica de Suelos y en la vida.

Dr. Paul Garnica Anguas mi mas sincero agradecimiento por su dedicación para cultivarme como investigadora.

A Alfonso Pérez Salazar y Miguel Ángel Cervantes Nieto compañeros de trabajo que al transcurrir el tiempo y las convivencias nos hemos convertido en amigos.

Agradezco infinitamente a mis padres por su apoyo y gentil dirección en mi ir y venir por la vida. A mis hermanos Luis Natanahel y María Luz y sus respectivas familias, muchas gracias por su cariño y amistad incondicional.

Agradezco sobremanera los cuidados de mama Yolis, mami Xilo y Sra. Martha.

Gracias al maestro Oscar, pues como un buen director de orquesta ha sabido enseñarme a ordenar mis ideas y palabras que ahora expreso.

Hiram, el presente trabajo también conlleva esfuerzo por parte tuya, muchas gracias.

A Teresita Guerrero, Juan Carlos Vázquez, Luis Enrique Suárez, Rosalinda, Joel Bustamante, Edgar Ramírez, Horacio Delgado, R. Michael Wilst por su afinidad con mi alma ó con mi carácter... gracias por su amistad.

Me conoces la sonrisa, me lees la mirada, me sientes las palabras,
me mantienes cerca, me hablas de las cualidades, me piensas mi lado oscuro,
me aprehendes las debilidades y no te aprovechas de ellas,
al contrario, me fortaleces, muchas gracias.

INDICE

RESUMEN.	i
SUMMARY.	iii
ÍNDICE	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
I. INTRODUCCIÓN.	1
Descripción del problema.	1
Antecedentes.	2
Justificación.	3
Fundamentación teórica.	4
Objetivos.	8
Hipótesis de trabajo.	9
Metodología.	9
II. METROLOGÍA BÁSICA.	11
La metrología y la vida diaria.	11
Las medidas y sus unidades.	11
El proceso de medición.	13
Términos asociados al proceso de medición.	15
El proceso de medición en los procedimientos de ensayo de Geotecnia.	16

III. MARCO NORMATIVO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES.	19
Los laboratorios de ensayo y la entidad mexicana de acreditación, a. c. (ema, a. c.) .	19
Estimación de la incertidumbre en las mediciones, requisito para acreditación de laboratorios de ensayo.	20
Requisitos normativos para estimación de la incertidumbre.	22
Realización de un procedimiento para estimación de incertidumbre en las mediciones.	27
IV. NORMA MEXICANA NMX-CH-140-IMNC-2002 “GUÍA PARA LA EXPRESIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES”.	29
Concepto de incertidumbre.	29
Fuentes posibles de incertidumbre.	29
Conceptos fundamentales para la estimación de incertidumbre en las mediciones.	30
Error e incertidumbre.	32
Método ideal para estimación de incertidumbre.	34
Componentes de la incertidumbre.	36
Norma mexicana NMX-CH-140-IMNC-2002 “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones”.	36
Definiciones de la NMX-CH-140-IMNC-2002.	37
Bases teóricas de la NMX-CH-140-IMNC-2002.	37
Propuesta de procedimiento para estimación de incertidumbre en las mediciones de ensayos de laboratorio de Geotecnia.	41
Evaluación de incertidumbre Tipo A.	46
Evaluación de incertidumbre Tipo B.	48

V.	ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES DE LOS PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO DE GEOTECNA.	53
	Dispersiones de resultados en los ensayos de Geotecnia.	53
	Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación del contenido de agua en suelos y rocas mediante diferencia de pesos.	56
	Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación de la cantidad de suelo más fina que 75 μm (Malla No. 200).	58
	Modelo para estimación de incertidumbre en el análisis granulométrico de agregados gruesos y finos, mediante tamices.	60
	Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos.	63
	Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación de la gravedad específica de los suelos por el método del picnómetro con agua.	68
	Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación de las características de compactación de un suelo con una energía de compactación de 600 $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$.	73
	Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación de la resistencia a la degradación de agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión en la Máquina de los Ángeles.	77
	Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación de partículas planas, alargadas o planas y alargadas de agregado grueso.	80
	Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación de equivalente de arena.	82
	Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación del módulo Resiliente para materiales de base, sub-base y subrasante.	85
VI.	ESTIMACIÓN NUMÉRICA DE INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES DE LOS PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO DE GEOTECNA.	101

VII. EVALUACIÓN DE LA CONFORMIDAD EN GEOTECNIA.	137
Concepto de evaluación de la conformidad.	137
Aplicación de la evaluación de la conformidad en Geotecnia.	138
Incertidumbre requerida en Geotecnia.	141
VIII. CONCLUSIONES.	147
IX. REFERENCIAS.	151
X. ANEXOS.	
Anexo I. Repetibilidad y reproducibilidad de los procedimientos de ensayo de Geotecnia.	155
Anexo II. Modelo de estimación de incertidumbre para las mediciones en una báscula o balanza.	171
Anexo III. Modelo de estimación de incertidumbre para las mediciones en una probeta graduada.	177
Anexo IV. Modelo de estimación de incertidumbre para regresión lineal.	181

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página	
I.	1	Distribución normal.	7
II.	1	Proceso de medición.	14
II.	2	Términos comunes asociados a una medición.	15
IV.	1	Exactitud y precisión.	31
IV.	2	Distribución normal.	35
IV.	3	Niveles de confianza.	40
IV.	4	Relación de las variables aleatorias.	43
V.	1	Distribución normal.	55
VII.	1	Esquema de Evaluación de la Conformidad e Incertidumbre.	138
VII.	2	Zona granulométrica recomendable de los materiales para bases que sean cubiertas solo con un tratamiento asfáltico superficial.	139
VII.	3	Resultado de la granulometría 1 realizada.	140
VII.	4	División de la zona de control.	142
X.II.	1	Funcionamiento del procedimiento de lectura para el desplegado de resultados de una báscula o balanza electrónica.	172
X.II.	2	Ilustración gráfica de la evaluación de incertidumbre normal para una magnitud a partir de una distribución rectangular.	173
X.III.	1	Ilustración gráfica de la evaluación de incertidumbre normal para una magnitud a partir de una distribución triangular.	178
X.IV.	1	Cuadrantes establecidos.	181

INDICE DE TABLAS

Tabla		Página	
II.	1	Medidas y unidades de medición.	13
III.	1	Expresión para la estimación de la incertidumbre.	25
III.	2	Resumen de requisitos y acuerdos para estimación de la incertidumbre en mediciones.	27
IV.	1	Presupuesto de incertidumbre.	51
VII.	1	Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos asfálticos.	139
VII.	2	Resultados de los ensayos realizados.	140
VII.	3	Comparación de los resultados de los ensayos realizados con la norma especificada.	141
VII.	4	Factores de riesgo.	143
VII.	5	Incertidumbre requerida para un factor de riesgo $f_r = 2$ y división de la zona de control en tres partes para la especificación de granulometría en bases que sean cubiertas solo con un tratamiento asfáltico superficial.	143
VII.	6	Comparación de la incertidumbre requerida para granulometría para bases que sean cubiertas solo con un tratamiento asfáltico superficial.	144
VII.	7	Incertidumbre estimada por el laboratorio en los resultados de los ensayos de límite líquido, índice plástico, equivalente de arena, desgaste de los ángeles partículas planas, alargadas o planas y alargadas.	145
VII.	8	Comparación de la incertidumbre requerida en límite líquido, índice plástico, equivalente de arena, desgaste de los ángeles y partículas planas, alargadas o planas y alargada para materiales de bases que sean cubiertas sólo con un tratamiento asfáltico superficial con respecto a la incertidumbre declara por el laboratorio.	145

VIII.	1	Comparación de la incertidumbre estimada y la repetibilidad del procedimiento de ensayo normalizado.	148
X.I.	1	Resumen de los resultados de ensayos triples realizados por los laboratorios (porcentaje de finos).	156
X.I.	2	Resumen de los resultados de un ensayo de cada laboratorio (porcentaje de finos).	156
X.I.	3	Precisión.	159
X.I.	4	Precisión obtenida para muestras de 300 g y 500 g	159
X.I.	5	Resumen de los resultados de ensayo de laboratorios que realizaron ensayos por triplicado (Límites de Atterberg).	162
X.I.	6	Resumen de los resultados de un solo ensayo de cada laboratorio (Límites de Atterberg).	162
X.I.	7	Resumen de resultados para ensayos triples de laboratorio (Gravedad específica).	163
X.I.	8	Resumen de resultados de ensayos sencillos de cada laboratorio (Gravedad específica).	164
X.I.	9	Resumen de resultados de ensayos triples (energía de compactación).	166
X.I.	10	Resumen de ensayos individuales para cada uno de los laboratorios (energía de compactación).	166
X.I.	11	Tamaño de 19,00 mm a 12,50 mm Planas y alargadas (porcentaje).	168
X.I.	12	Tamaño de 12,00 mm a 9,50 mm Planas y alargadas (porcentaje).	168
X.I.	13	Tamaño de 9,50 mm a 4,75 mm Planas y alargadas (porcentaje).	168
X.II.	1	Errores e incertidumbres para básculas o balanzas de funcionamiento no automático de desplegado electrónico y lectura manual.	175

I. INTRODUCCIÓN

“If you can not measure it, you can not improve it.”

“When you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely in your thoughts advanced to the state of Science, whatever the matter may be.”

William Thompson, Lord Kelvin (1824 – 1907)

Descripción del problema.

Uno de los retos al que se enfrentaron los pioneros de la Geotecnia fue: cómo “medir” los parámetros necesarios para resolver los problemas, por lo que se dieron a la tarea de proponer “procedimientos de ensayo” basados en los “principios” y “métodos” de medición. Una vez propuestos los procedimientos de ensayo e iniciado el proceso de obtención de resultados, la duda que subsiste es: ¿el resultado obtenido es el verdadero? Para la Geotecnia, esta pregunta sólo se puede resolver de manera parcial, puesto que realmente no existe un valor “verdadero” para cualquier propiedad de los suelos. Lo que se puede responder a la pregunta, es que es posible expresar de manera cuantitativa la duda que se tiene del resultado de la medición, debido a los errores que se cometen y que no se corrigen durante el proceso de medición. Actualmente, existe una herramienta que estima esta duda. Esta metodología se considera de carácter universal, es decir, el método es aplicable a cualquier tipo de medición y a cualquier tipo de datos utilizados en las mediciones. Por lo anterior, el presente estudio pretende aplicar la norma mexicana NMX-CH-140-IMNC-2002 “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones” y definir

modelos para la estimación de la incertidumbre en las mediciones que se llevan a cabo en algunos procedimientos de ensayos de Geotecnia.

Antecedentes.

Los sistemas de calidad se han desarrollado con el propósito de minimizar los problemas en la producción derivados de las variaciones en la calidad de los insumos y para asegurar productos satisfactorios. En consecuencia se han creado mecanismos y organizaciones dedicados a la tarea de homogeneizar los criterios de control a nivel mundial.

Para 1975 México disponía de 2 298 normas mexicanas dedicadas en su mayoría a la industria química, seguida de la industria alimenticia, automotriz y en último lugar a instrumentos de medición. Al inicio de la década de los ochenta, en un intento por mantenerse a la par con el desarrollo de la industria y los sistemas de calidad, el país se reactiva con el decreto del establecimiento del Sistema Nacional de Laboratorios de Prueba (SINALP) y el Sistema de Desarrollo de Calibración (SNC), se fortalece el sistema normalizador nacional (DGN) y aparece el proyecto de un laboratorio primario en el país.

En el año de 1994, con la firma del Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos y Canadá, se marca la pauta para que el proyecto de creación de un laboratorio primario en nuestro país sea una realidad y que las mediciones que se realicen en cualquier campo sean comparables y equivalentes con otras mediciones realizadas en laboratorios primarios de otros países.

En 1999 se crea la **entidad mexicana de acreditación, a. c. (ema, a. c.)**, organismo acreditador encargado de dar a conocer y vigilar que se cumplan los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. De esta manera, las actividades de un laboratorio realizadas bajo estas condiciones son equivalentes y comparables a las realizadas por otros laboratorios que cuenten con una acreditación otorgada por un organismo paralelo a la **ema, a. c.**, en otro país.

Uno de los principales requisitos para la acreditación es estimar la incertidumbre de las mediciones realizadas en los procedimientos de ensayo. La expresión de este valor es un control de calidad en las actividades del laboratorio y asegura una correcta medición durante la realización de los ensayos.

La norma mexicana NMX-CH-140-2002 “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones” es un procedimiento expedito, fácil de usar y aceptado de manera general para estimar y expresar la incertidumbre (NMX-CH-140-IMNC-2202). Por lo que el presente trabajo pretende aplicar dicha guía para estimar las incertidumbres en algunos de los ensayos de geotecnia.

Justificación.

La Geotecnia es, fundamentalmente, una especialidad orientada hacia las aplicaciones. Y al recurrir al método científico, necesariamente tiene bases empíricas, que se expresan por correlaciones y en adaptaciones de técnicas desarrolladas en otros campos. El uso racional de la incertidumbre, dentro de los laboratorios de ensayo de Geotecnia, dará la posibilidad de proporcionar al cliente la confiabilidad de los resultados de los ensayos. Tal es el caso del rechazo o aceptación de materiales y la predicción del comportamiento mecánico del suelo.

Otra de las ventajas, al determinar de manera confiable las propiedades del suelo, es que al utilizarlas como insumos de entrada en los diferentes algoritmos de cálculo, los resultados obtenidos serán más acordes con la realidad y se minimizará la duda del comportamiento para el fenómeno en estudio.

La confiabilidad derivada de poseer información de mayor calidad respecto a los materiales de construcción, permitirá a la industria constructiva economías y mejoras en la seguridad, que se traducen en beneficios para la sociedad en su conjunto.

Actualmente en el país, según listas (2005) publicadas por la **entidad mexicana de acreditación, a. c. (ema, a. c.)** en su página de internet sobre laboratorios acreditados, sólo el 1 % son de Geotecnia. El presente trabajo pretende dar una herramienta práctica a los laboratorios de geotecnia que quieran acreditarse y cumplir con el requisito de estimación de incertidumbre.

La realidad de los sistemas de calidad en nuestro país va tomando forma con el afán de competir en los mejores mercados. La dirección que tomará el país a ese respecto es, la gestación de una legislación que sólo permitirá trabajar a los laboratorios que realicen sus actividades bajo este sistema de acreditamiento. En cuanto se emita y se vuelva obligatoria la legislación, se otorgará un tiempo de dos años a los laboratorios para cumplirla. Esta cuestión aún no es declarada oficialmente, pero la organización de Pequeñas y Medianas Empresas (PyMes) en conjunto con la **entidad mexicana de acreditación, a. c. (ema, a. c.)** están dando la oportunidad de préstamos y cuotas bajas para ir propiciando el acreditamiento de laboratorios de ensayo o calibración. Por lo que, el presente trabajo pretende dar a conocer el camino recorrido en el aspecto de estimación de incertidumbre y ofrecerlo como una herramienta de aplicación a los laboratorios de ensayo.

Fundamentación teórica.

La dispersión de los resultados de los ensayos para determinar las propiedades del suelo proviene de (Sedano, 1982):

- La heterogeneidad del suelo.
- Las técnicas de muestreo.
- La realización de ensayos.

La heterogeneidad del suelo. Los productos de la acción de los agentes de intemperismo, que dan origen a los suelos, pueden quedar en el lugar, directamente sobre la roca madre. Estos suelos son llamados residuales y la heterogeneidad en sus propiedades físicas depende del grado de alteración de la roca madre. Pero puede suceder que los productos sean removidos mediante los mismos agentes de intemperismo y transportados a

otra zona. Por lo que se generan suelos que sobreyacen de otros estratos sin relación alguna con ellos, estos suelos se denominan transportados. La heterogeneidad de estos suelos depende del proceso seguido en su historia de depositación. Debido a esta heterogeneidad, es prácticamente imposible que existan valores verdaderos para cada uno de los casos y para cada una de las propiedades de los suelos. Por lo que, no se puede hablar de valores determinísticos. Pero si es posible definir un intervalo de variación de dicha propiedad mediante la técnica estadística de variable aleatoria. Esta técnica consiste en asignar a las propiedades del suelo una función de probabilidad que refleje la incertidumbre asociada a la heterogeneidad del suelo. Así, los valores que se encuentran dentro de este intervalo, son razonablemente aproximados al valor verdadero.

Sin embargo, existen casos en los cuales es necesario definir un valor convencionalmente verdadero para una propiedad en particular como es el caso de intercomparaciones entre laboratorios o dentro del mismo laboratorio. Estas intercomparaciones son llamadas ensayos de aptitud. Así, dentro del marco de los ensayos de aptitud es posible determinar la reproducibilidad o repetibilidad del resultado de la propiedad en específico y ser tomada como valor convencionalmente verdadero.

Las técnicas de muestreo. De manera irremediable las técnicas de muestreo ocasionan cambios definitivos en las propiedades del suelo. Para realizar la recuperación de un suelo, éste es afectado antes, durante y después de la extracción. Los expertos en muestreo han propuesto técnicas para reducir estos daños y algunas veces estas propuestas han dado origen a normas. Por lo que, estas normas son un reflejo del conocimiento profundo que se ha adquirido en el muestreo de suelos y sobretodo de la "sensibilidad" que tiene el ingeniero civil para detectar las fuentes de error que afectan sus fines. Los cambios relacionados con el muestreo son: *a)* cambio de las condiciones de esfuerzo, *b)* cambio del contenido de agua y de la relación de vacíos, *c)* alteración de la estructura del suelo, *d)* cambios químicos y *e)* mezcla y segregación. Estos factores ya han sido ampliamente discutidos.

La realización de ensayos. En la realización de ensayos conviene distinguir entre dos conceptos que pueden dar lugar a confusión, “procedimiento de ensayo normalizado” y “proceso de medición normalizado”.

Un procedimiento de ensayo normalizado es un procedimiento de ensayo en donde se realizó la validación del método de ensayo. La validación de método es el proceso de establecer las características de desempeño y las limitaciones de un método y la identificación de las influencias que pueden cambiar esas características, y en qué medida (EURACHEM, 1998).

La validación es una actividad indispensable para asegurar que un objeto satisface los requisitos necesarios para un cierto uso. Puede darse el caso que el método haya sido suficientemente validado y descrito por quien lo desarrolle y quien lo aplique sólo tenga que demostrar su competencia para aplicarlo, lo cual ya no es parte de la validación (Lazos y Hernández 2004). Tal es el caso de las normas que se presentan en este trabajo de tesis.

En un proceso de medición las propiedades del suelo (mensurando) no se miden de manera directa sino que dependen de otras cantidades medibles y se asocian a través de una función matemática. Las fuentes posibles de incertidumbre que pueden presentarse durante la medición en los ensayos son (NMX-CH-140-IMNC-2202):

- Definición incompleta del mensurando
- Muestreo representativo
- Conocimiento inadecuado de los efectos de las condiciones ambientales
- Errores de apreciación del operador en la lectura de instrumentos
- Valores inexactos de patrones de medición
- Variaciones en observaciones repetidas del mensurando bajo condiciones similares.

La importancia de estos factores en el proceso de medición dependerá de la sensibilidad del mensurando ante cada factor. Esta sensibilidad está determinada, cuando el proceso de medición está normalizado. Se dice que el *proceso de medición está*

normalizado si la distribución de frecuencias de los posibles resultados se comporta conforme una distribución de frecuencias normal (Campana de Gauss, Figura I.1).

Lo anterior es muy usual debido a que por el Teorema del Límite Central, que proviene de la estadística, la variable aleatoria que resulta de la suma de N variables aleatorias con distribuciones de probabilidad cualesquiera, tiende a tener una distribución de probabilidad normal, conforme N crece (Schmid, 2004).

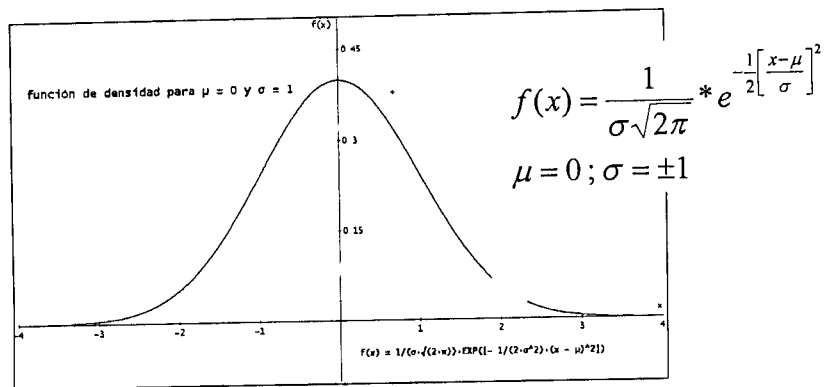


Figura I.1 Distribución normal

Además de que dentro del proceso de medición normalizado del procedimiento de ensayo:

- ✘ No deben existir errores sistemáticos de ningún tipo,
- ✘ No deben existir errores aleatorios de causas especiales,
- ✓ Solo pueden existir errores aleatorios de causas comunes.

Si se cumplen estas condiciones, significa que el proceso de medición del procedimiento de ensayo se hace de la misma forma, lo cual es deseable.

Un método ideal para estimar la incertidumbre sería de carácter universal, es decir, el método debe ser aplicable a cualquier tipo de mediciones y a cualquier tipo de datos utilizados en las mediciones.

En cuanto a la cantidad utilizada para expresar la incertidumbre deber ser (NMX-CH-140-IMNC-2002):

- *Internamente* consistente. Debe poderse obtener directamente a partir de las 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*. Debe ser posible utilizar directamente la incertidumbre evaluada para un resultado, como una componente al estimar la incertidumbre de otra medida en la cual se utiliza el primer resultado.

Objetivos.

- Analizar la teoría y métodos estadísticos en que se basa la norma mexicana NMX-CH-140-IMNC-2002 “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones”.
- Elaborar una síntesis del marco normativo para la estimación de incertidumbre en los laboratorios de ensayo.
- Realizar los modelos de estimación de la incertidumbre de los ensayos índice de acuerdo con la metodología que plantea la norma mexicana NMX-CH-140-IMNC-2002 “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones”.
- Aplicar la incertidumbre estimada en la evaluación de la conformidad de ensayos geotécnicos.
- Proponer una herramienta que promueva que el uso de la incertidumbre que acompaña el resultado de ensayos de laboratorio tenga un mínimo de efectos negativos en las decisiones del cliente que tome con base en esta información.

Hipótesis de trabajo.

En ensayos de geotecnia, el aporte a la incertidumbre global por parte del método de medición es menor que la debida a la repetibilidad o la reproducibilidad del procedimiento de ensayo normalizado.

Metodología.

El método por aplicar seguirá las fases tradicionales del método experimental: planteamiento del problema, elaboración de hipótesis, realización de observaciones y/o experimentación, análisis y conclusiones.

El problema proviene de la incertidumbre inherente a la obtención de resultados en los laboratorios de geotecnia que nos lleva a la pregunta ¿el resultado obtenido es el verdadero?

La investigación que se plantea en el presente trabajo sólo puede dar una respuesta parcial a la pregunta, ya que no existe valor verdadero para cualquier propiedad del suelo, sin embargo la estimación se encontrará dentro de límites conocidos, lo cual añade certidumbre a la información y a las decisiones que se tomen con base en ella.

La fase de observación consiste en verificar que el proceso de medición cumple con el marco de requisitos exigidos por la norma mexicana NMX-CH-140-IMNC-2002 “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones”, para realizar los modelos de estimación y cuantificación de incertidumbre en los ensayos.

Para confirmar o rechazar la hipótesis de investigación, el análisis consistirá en la comparación de la incertidumbre por el método de medición, contra la variabilidad del procedimiento de ensayo normalizado. Lo anterior se efectuará con base en conocimientos básicos de metrología y de estadística inferencial, aplicados en la realización de ensayos de Geotecnia.

Con base en las fases anteriores se comprobará o rechazará la hipótesis planteada, lo cual aportará conocimiento que se espera sea de utilidad para los laboratorios de Geotecnia.

El trabajo consta de seis capítulos medulares, más las conclusiones, la bibliografía y los anexos. Los capítulos centrales exponen los conocimientos básicos de metrología aplicados, el marco normativo para la estimación de la incertidumbre en laboratorios de ensayo, los modelos de aplicación específica a diez ensayos de laboratorio de Geotecnia incluyendo su estimación cuantitativa y finalmente se concluye con la descripción de la relación cliente – laboratorio en la que se puede especificar una incertidumbre requerida por alguna aplicación particular por parte del cliente. Como parte de los resultados obtenidos se obtiene evidencia de que la incertidumbre que resulta en un proceso de medición dentro de los procedimientos de ensayo de Geotecnia, es mínima, siempre y cuando sea un procedimiento normalizado. Encontrándose que el mayor aporte a la incertidumbre se debe a la repetibilidad y reproducibilidad del procedimiento de ensayo normalizado.

II. METROLOGÍA BÁSICA.

La metrología y la vida diaria.

La metrología es la ciencia que trata de las medidas, de los sistemas de unidades adoptados y los instrumentos usados para efectuarlas e interpretarlas.

Una de las primeras necesidades del ser humano fue la de contar. De la relación con otros seres humanos y buscando satisfacer sus necesidades o de la observación de su mundo y de esa incansable curiosidad, surgió la necesidad de “medir”.

El uso de la metrología en la vida diaria pasa de manera inadvertida. Se suele llegar tarde a la cita con los amigos si el reloj no va de manera sincronizado con el de ellos. El desagradable sabor del guisado, tal vez, es porque no se usó la misma medida para las especias, tal como lo estipulaba la receta. Dada nuestra familiaridad con estas situaciones no tomamos conciencia de la importancia y valoración tanto económica como social de las mediciones que realizamos diariamente. Esto quiere decir que el valor de las mediciones depende en gran medida de su correcta realización y de su adecuada interpretación.

Los instrumentos que usamos para realizar mediciones tienen defectos de fábrica, están sujetos a perturbaciones externas durante la medición y además, el operador puede darle un uso inadecuado. Esto podría ser obvio, pero la mayoría de las personas no las tienen presentes al considerar la información que proporciona el resultado de la medición.

Las medidas y sus unidades.

La metrología se inició como ciencia a partir de que se hicieron comparaciones en las transacciones comerciales para que fueran llevadas a cabo de manera justa. Es decir, las nociones de cerca-lejos, rápido-lento, liviano-pesado, claro-oscuro, duro-suave, frío-caliente se identificaron como individuales y con el paso del tiempo y de acuerdo al desarrollo de la humanidad surgieron los sistemas de medidas.

Inglaterra mejoró y simplificó sus medidas base, de origen anglosajón, y surgió el sistema libra-pie-segundo. A finales del siglo XVIII, Francia creó y desarrolló un sistema simple basado en los conocimientos científicos de la época y surgió el sistema métrico decimal. El nombre de este sistema es debido a su unidad de medida base: el metro; en francés *mètre*, derivado a su vez del griego *metrón* que significa medida y el uso del sistema decimal para establecer múltiplos y submúltiplos.

La unificación de criterios de medidas y unidades se desarrolló para que el comercio internacional fuera posible sin mayores dificultades. En 1875, el Sistema Métrico Decimal se hizo universal mediante la firma de la Convención del Metro y en 1960 se le denominó Sistema Internacional de Unidades (SI).

En nuestro país el SI se establece a través de la norma oficial mexicana NOM-008-SCFI-1993 "Sistema General de Unidades de Medida". En el artículo 5 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización del país se especifica que: "En los Estados Unidos Mexicanos el Sistema General de Unidades de Medidas es el único legal y de uso obligatorio". Cabe señalar que en la misma norma mexicana se establece el uso de la coma decimal y no del punto decimal.

El Sistema Internacional de Unidades se basa en siete medidas básicas. Una unidad es un valor en términos del cual puede definirse la magnitud de medida. Las unidades para cada una de las medidas básicas se pueden ver en la Tabla II.1. Con estas unidades básicas y el empleo de algoritmos matemáticos es posible expresar las unidades llamadas derivadas.

Tabla II.1 Medidas y unidades de medición.

MEDIDA	UNIDAD
Longitud	metro
Masa	kilogramo
Tiempo	segundo
Temperatura	kelvin
Intensidad luminosa	candela
Corriente eléctrica	ampere
Cantidad de sustancia	mol

El proceso de medición.

Para determinar el valor de una magnitud, cualquier laboratorio, ya sea de calibración o ensayo, “mide” es decir, lleva a cabo un conjunto de operaciones que tienen por objetivo determinar el valor de una magnitud.

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 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.

La Figura II.1 ilustra de manera general el proceso de cualquier medición:

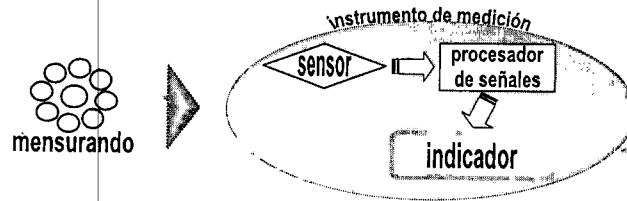


Figura II.1 Proceso de medición

De acuerdo al esquema, si el mensurando es el **flujo** de un fluido a través de un tubo, el sensor tiene una respuesta al paso del fluido y se produce una señal eléctrica que es procesada y el indicador despliega el resultado. Dentro de este proceso se pueden identificar algunas 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 identificación de todos los factores que afectan el proceso de medición es casi imposible, pero debe hacerse lo posible en identificar los factores más significativos. Un conocimiento adecuado del proceso de medición dará la posibilidad de identificarlos y combinarlos con técnicas estadísticas para obtener la mejor estimación de la duda que subsiste después del proceso de medición.

Términos asociados al proceso de medición.

Una medición proporciona el valor indicado como “resultado sin corregir” (lectura del indicador en el caso de la Figura II.2); por lo 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 esta 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 II.2

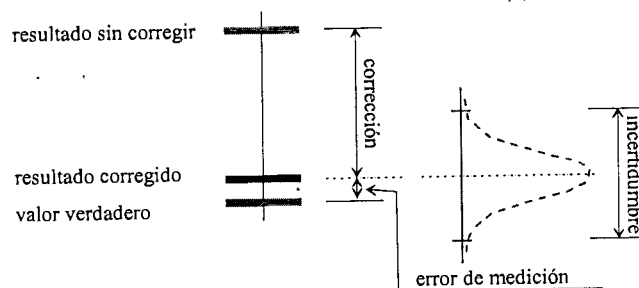


Figura II.2 Términos comunes asociados a una medición.

En esta figura se puede apreciar 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.

El proceso de medición en los procedimientos de ensayo de Geotecnia.

Es fácil confundir el proceso de medición con el procedimiento de ensayo, pero ello implica fusionar dos ciencias, en donde una de ellas es la herramienta y la otra la aplicación de la herramienta. El proceso de medición debe comprenderse como una acción, que para llevarse a cabo es necesario conocer el tipo del mensurando, cómo se utilizará el mensurando, cuál es su aplicación, con qué medida se le asigna un valor, qué instrumento se utiliza, qué exactitud se requiere, qué método de medición se utiliza, cómo se toma y registra la lectura, qué correcciones se aplican, cómo se reporta el resultado, etc. La Geotecnia, en este caso, responde todas esas preguntas mediante los procedimientos de ensayo existentes.

El “principio de medición” es el fundamento científico del método de medición. Con un conocimiento perfecto del principio de medición es posible dominar la medición; esto es, modificarla, diseñar otra, evaluar su conveniencia. Ejemplos: el principio de Arquímedes, el efecto termoeléctrico aplicado a la medición de temperatura, el efecto Doppler aplicado a la medición de velocidad, etc.

El “método de medición” es la secuencia lógica de operaciones, descritas de manera general, usadas en la ejecución de la medición de acuerdo al principio de la medición.

El “procedimiento” es el conjunto de operaciones, descritas de manera específica, utilizadas en la ejecución de mediciones particulares, de acuerdo a un método de medición determinado. El procedimiento se registra de manera documental y describe de manera detallada las operaciones, lo que le permite al operador realizar la medición sin información adicional.

Un ejemplo ilustrativo es el ensayo de gravedad específica donde el principio de medición es el “principio de Arquímedes”, el “método de medición” es mediante el uso de un picnómetro y por último el “procedimiento” es el que especifica las condiciones de temperatura, los tiempos de desaireado, el tipo de material que puede ser ensayado mediante este método, el tipo de aproximación que se necesita en los instrumentos de medición, como presentar los resultados, etc.

El procedimiento ayuda a que el proceso de medición se haga bajo las mismas condiciones, es decir, el mensurando, el observador, el instrumento de medición, el lugar y la repetición de la medición en un intervalo corto, no cambian. Una medición realizada bajo estas condiciones se conoce como “repetibilidad” (θ_r) y caracteriza la cercanía, entre sí, de las mediciones llevadas a cabo en condiciones de repetibilidad. Este tipo de

Cuando las mediciones se repiten bajo condiciones diferentes, se habla de “reproducibilidad” (θ_R). Las distintas condiciones pueden incluir: el principio de medición o el método de medición, el observador, el instrumento de medición, el patrón de referencia, la ubicación, las condiciones de uso, el tiempo, etc. La reproducibilidad de las mediciones caracteriza la cercanía, entre sí, los resultados de las mediciones del mismo mensurando llevadas a cabo bajo condiciones de reproducibilidad. Para que la reproducibilidad sea válida es necesario especificar las condiciones que se varían. La reproducibilidad puede ser expresada cuantitativamente en términos de las características de dispersión de los resultados.

En un procedimiento de ensayo normalizado se conocen las condiciones de repetibilidad y reproducibilidad. Esto significa que se conoce la variabilidad de los resultados del ensayo en las condiciones específicas en las que se lleva a cabo.

En el proceso de medición, como ya se mencionó, existen técnicas estadísticas con las cuales es posible determinar la variabilidad de las mediciones también en condiciones de repetibilidad y reproducibilidad.

De esta manera se tiene un proceso dentro de otro proceso, donde es posible conocer la variabilidad de los resultados en cada uno de ellos. Al determinar esta variabilidad para cada uno de los procesos el procedimiento de ensayo que se realiza en un laboratorio es confiable y existe evidencia física y contundente de ello.

En el presente trabajo de tesis, se expone la metodología estadística que actualmente existe para determinar la variabilidad del resultado del proceso de medición involucrado en los procedimientos de ensayo de Geotecnia.

III. MARCO NORMATIVO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES.

Los laboratorios de ensayo y la entidad mexicana de acreditación, a. c. (ema, a. c.).

Un laboratorio acreditado significa que declara mediante evidencia que ejecuta las regulaciones, normas o estándares con precisión de acuerdo a los servicios que se le solicitan. La acreditación es el acto que da seguridad y avala las actividades que realiza un laboratorio mediante revisiones periódicas a su sistema de calidad y al desempeño técnico que declara la organización.

En nuestro país, la organización encargada para otorgar una acreditación es la **entidad mexicana de acreditación, a. c.** Esta organización es la primera entidad de gestión privada en tercera parte, imparcial, incluyente y profesional en nuestro país, cuyo objetivo es acreditar los organismos de la evaluación de la conformidad (laboratorios de ensayo, laboratorios de calibración, organismos de certificación y unidades de verificación u organismos de inspección –PROFECO-).

Los requisitos que un laboratorio debe cumplir para que le sea otorgada la acreditación, por parte de la **ema, a. c.**, es la norma ISO/IEC 17025:1999. En nuestro país, la norma equivalente es la norma mexicana NMX-EC-17025-IMNC-2000 “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”. Otros requisitos que deben cubrirse es que la organización debe cumplir con las normas mexicanas que le apliquen, las políticas establecidas por la **ema, a. c.** y los acuerdos emitidos por el Comité de Evaluación de Laboratorios de Ensayo de la **ema, a. c.**

Un laboratorio acreditado: cuenta con herramientas necesarias para competir equitativamente a nivel internacional, facilita el intercambio comercial en nuestro país y en el mundo, y participa de manera activa en el mundo globalizado ofreciendo sus servicios de alta calidad y confiabilidad.

Estimación de incertidumbre en las mediciones, requisito para acreditación de laboratorios de ensayo.

Un requisito importante, y quizás el menos conocido, es la estimación de la incertidumbre de las mediciones que realiza un laboratorio que pretenda obtener la acreditación.

Hacé tres años, la **ema, a. c.** otorgaba la acreditación a un laboratorio de ensayo, siempre y cuando éste se comprometiera a estimar la incertidumbre de los ensayos que acreditaba en un plazo de un año o menos. Actualmente, sólo se otorga la acreditación si el laboratorio ya presenta evidencias de que realiza actividades para cumplir dicho requisito.

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 de que, 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 marcan 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.

Definición de incertidumbre en la Norma NMX-EC-17025-IMNC-2000

La Norma NMX-EC-17025-IMNC-2000 Requisitos para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración, en la sección 5, 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.”

Definición de incertidumbre en la Política de Trazabilidad e Incertidumbre de Mediciones de la **entidad mexicana de acreditación, a. c. (ema, 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”.

Requisitos normativos para la estimación de la incertidumbre.

Requisito que establece la Norma mexicana NMX-EC-17025-2000 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.

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 estimación de incertidumbre en las medición realizadas por los 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 qué 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;”

Requisito que establece la Política de Trazabilidad e Incertidumbre de Mediciones de la entidad mexicana de acreditación, a. c. (ema, a. c.) 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:

Cuando 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 III.1.

Tabla III.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, a. c.**, 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, a. c.** 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 III.1.”

*Requisito que establece los 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.”

*Criterio que establece la **ema, a. c.** para la estimación de 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 semicuantitativos.”

Sin embargo, como una buena práctica, los laboratorios que realicen ensayos cualitativos o semi-cuantitativos debieran hacer un intento razonable de estimar la incertidumbre en las mediciones. Es decir, obtener un entendimiento de la variabilidad de

los resultados hasta donde sea posible. Esto no es fácil, en vista de la complejidad de la emisión y falta de aproximación convenida para estimar la incertidumbre en ensayos cualitativos o semicuantitativos.

Este criterio emitido por la **ema, a. c.** puede modificarse posteriormente pues la norma NMX-EC-17025-IMNC-2000 en la sección 5.4.6.2 dice muy claramente que: ... “Hay casos en que la naturaleza del método de ensayo puede impedir un cálculo riguroso metrológica y estadísticamente válido...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...”

Realización de un procedimiento para estimación de incertidumbre en las mediciones.

La realización de un procedimiento para estimación de incertidumbre en las mediciones puede hacerse apoyándose en la norma mexicana NMX-CH-140-2002 “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones”; claro, tomando en cuenta el marco normativo que ya se expuso, un conocimiento profundo de los procedimientos de ensayo de Geotecnia, conocimiento básico de metrología y un buen conocimiento de estadística básica.

En la Tabla III.2 se resumen los requisitos normativos ya expuestos.

Tabla III.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	
	Los laboratorios tendrán... procedimientos para estimar la incertidumbre de la medición...
5.4.6.2	Los laboratorios... aplicarán procedimientos para estimar la incertidumbre de la medición...
5.4.6.3	Al estimar la incertidumbre de la medición, se considerará 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...
Posee... procedimientos para estimar la incertidumbre de medición...
- 3.3.1 ... 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...
- 3.3.2.3 Los laboratorios de ensayo solicitantes y acreditados por **ema a. c.**, 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 a la Tabla III.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 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

IV. NORMA MEXICANA NMX-CH-140-IMNC-2002

“GUÍA PARA LA EXPRESIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES”.

Concepto de incertidumbre.

La incertidumbre de la medición es una forma de expresar que para un mensurando y su resultado existe un número infinito de valores dispersos alrededor del resultado, que son consistentes con todas las observaciones de datos y conocimientos que se tengan del mundo físico y que distintos niveles de confianza pueden ser atribuidos al mensurando.

El concepto tradicional de incertidumbre se relaciona con la duda: *Una medida del posible error en el valor estimado del mensurando proporcionado por el resultado de una medición.* La incertidumbre de la medición no implica duda acerca de la validez de un mensurando; por el contrario, el conocimiento de la incertidumbre implica el incremento de la confianza en la validez del resultado de una medición.

La norma mexicana NMX-CH-140-IMNC-2002 la define como: *“Parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían atribuirse razonablemente al mensurando.”*

Fuentes posibles de incertidumbre.

En la mayoría de los casos, el mensurando no es directamente medible, sino que depende de otras cantidades medibles, a través de una función matemática. Así, la incertidumbre de la medición del mensurando, es el 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.

Durante la realización de los ensayos la incertidumbre del resultado puede originarse de muchas fuentes posibles, tales como:

- Definición incompleta del mensurando.
- Realización imperfecta de la definición del mensurando.
- Muestreo representativo.
- Conocimiento inadecuado de los efectos de las condiciones ambientales sobre las mediciones o mediciones imperfectas de dichas condiciones ambientales.
- Errores de apreciación del operador en la lectura de instrumentos analógicos.
- Resolución finita del instrumento o umbral de discriminación finito.
- Valores inexactos de patrones de medición y materiales de referencia.
- Aproximaciones y suposiciones incorporadas en los métodos y procedimientos de medición.
- Variaciones en observaciones repetidas del mensurando bajo condiciones similares.

Todas estas fuentes no necesariamente son independientes y algunas veces, todas influyen en ésta última.

“El resultado de una medición está completo únicamente cuando está acompañado por una declaración cuantitativa de la incertidumbre, que expresa la calidad del mismo y permite valorar la confiabilidad en este resultado”.

Conceptos fundamentales para la estimación de incertidumbre en las 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 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 de 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). Figura IV.1
- *Precisión.* Esta referida a la diferencia entre las mediciones realizadas.

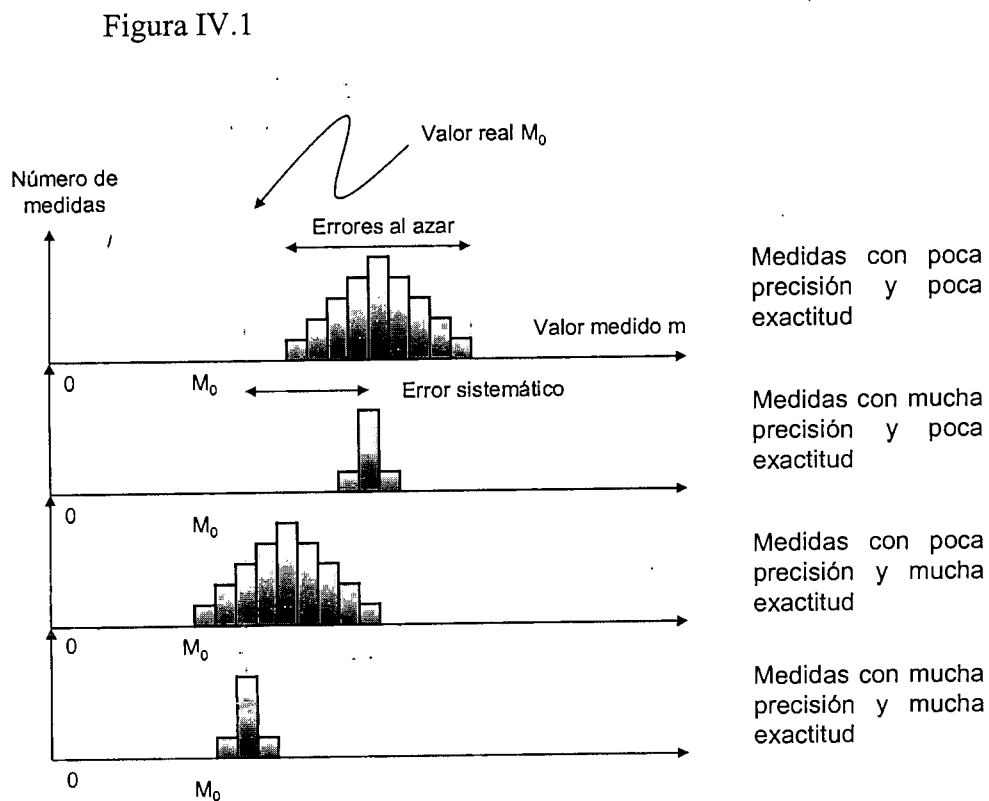


Figura IV.1 Exactitud y Precisión.

Error e incertidumbre

El análisis de las variables que están implicadas en un proceso de medición permite detectar un sinnúmero de factores que intervienen directamente al efectuarla. Todos estos factores provocan un 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 que existe entre el valor obtenido y el valor convencional 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
- Etc.

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

Tradicionalmente, se considera que existen dos tipos de error: aleatorios y sistemáticos.

Los errores aleatorios son las perturbaciones que no afectan siempre 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 las mismas 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.

Método ideal para estimación de incertidumbre.

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 lo tanto es necesario que exista un procedimiento expedito, fácil de usar y aceptado de manera general para caracterizar la calidad del resultado de una medición, para evaluar y expresar su incertidumbre. Así, la guía fue realizada 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. Algunas 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 utilizada 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 utilizar 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.

Requisitos que debe cumplir el proceso de medición para estimar la incertidumbre con norma mexicana NMX-CH-140-IMNC-2002.

Este concepto de incertidumbre es válido siempre y cuando el proceso de medición esté normalizado. Esto 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 IV.2

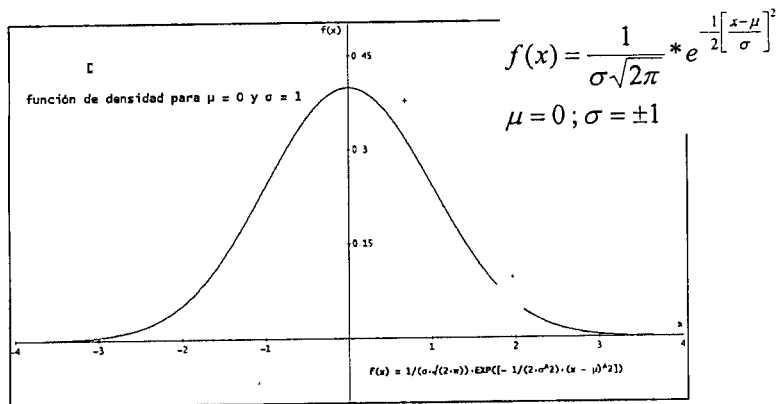


Figura IV. 2 Distribución normal.

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

- no existen errores sistemáticos de ningún tipo,
- no existen errores aleatorios de causas especiales y
- solo existen errores aleatorios de causas comunes.

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

Componentes de la incertidumbre.

La incertidumbre se debe a errores aleatorios de causas comunes presentes en el momento en que se realiza la medición, más todos aquellos que se heredan por otras causas. Tales como:

- trazabilidad de los materiales de referencia,
- errores instrumentales,
- correcciones, etc.

$$u = \sqrt{\sigma^2 + \sum u_{y/xi}^2}$$

Norma mexicana NMX-CH-140-IMNC-2002 “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones”.

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.

Definiciones.

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.

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

Bases teóricas.

Como ya se menciona, la incertidumbre del resultado de una medición generalmente se forma de varias componentes que son 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 ó B que se utilizó para su estimación.

Los componentes estimados mediante 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 mediante 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 mediante 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 IV.3), lo que se obtiene expandiendo este intervalo por un factor k , llamado factor de cobertura. El resultado se llama incertidumbre expandida U .

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

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

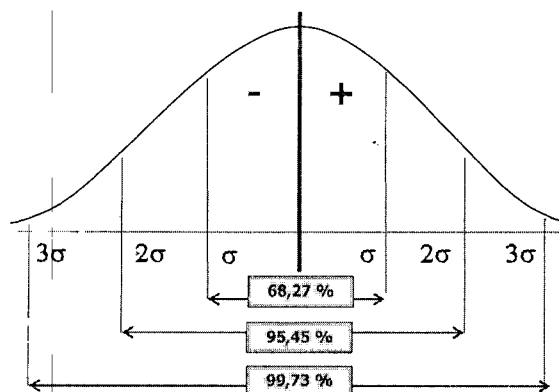


Figura IV.3 Niveles de confianza.

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 pequeña.

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 a una distribución normal.

Por ejemplo, cuando las lecturas obtenidas con un instrumento de baja exactitud son idénticas debido a la resolución del instrumento y las otras fuentes de incertidumbre son insignificantes, es de suponer que el mensurando sigue una distribución rectangular cuyos límites están determinados 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 .

Propuesta de procedimiento para estimación de incertidumbre en las mediciones.

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 usada en 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 metrológica (Martínez, 2003).

Paso 1. Definición del mensurando y 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.

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 y la Norma 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.

Identificación de la repetibilidad y reproducibilidad de la Norma a utilizar

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

Identificación de las variables independientes

Ejemplo: Las componentes de la ecuación para el cálculo del contenido de agua son: peso húmedo (W_h) y peso seco (W_s), se relacionan de la siguiente manera:

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

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.

Establecer las variables aleatorias que están involucradas en el proceso de medición. Esto significa que 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 IV.4

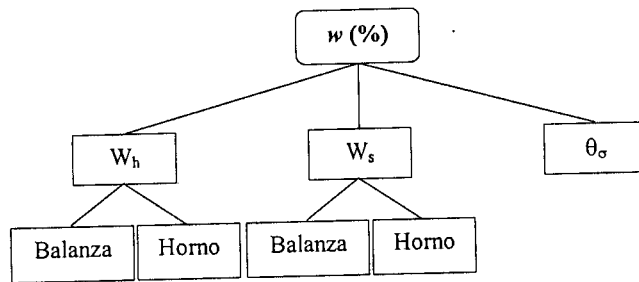


Figura IV.4 Relación de las variables aleatorias.

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:

$$Y = f(x_1) - C$$

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.

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

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

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

La ecuación general para la estimación de la incertidumbre combinada del mensurando es la siguiente:

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

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 variables 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 antes mencionadas y suponiendo que no existe una correlación entre ellas, se establece la siguiente ecuación

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

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

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 a 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:

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

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

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

Como ejemplo podemos mencionar que para el ensayo de equivalente de arena se necesitan tener datos de la balanza a utilizar como son la linealidad y excentricidad, al igual que los valores de repetibilidad.

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

Evaluación de la incertidumbre normal Tipo A

Esta estimación está basada 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: 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 (∞).

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.

Evaluación de la incertidumbre normal Tipo B

Esta evaluación se basa en el criterio de la persona 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 lo 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. Esta variable 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 lo tanto, esta variable 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 cercanos al 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 lo tanto, su tratamiento corresponde al mismo utilizado para la estimación de la incertidumbre combinada $u_{c(Y)}$.

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 $u_{c(Y)}$, substituyendo los datos en la ecuación del paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

En este punto se presenta la expresión para el cálculo de 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 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 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

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

La incertidumbre expandida depende del nivel de confianza p que se requiera en la estimación. Generalmente se recomienda tener una confiabilidad del 95 % la cual equivale a 1,96 veces de desviación estándar (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

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 obtenidos, a este tipo de concentrado se le denomina presupuesto de incertidumbre.

En la Tabla IV.1 Se presenta el presupuesto de incertidumbre para el método de ensayo de contenido de agua.

Tabla IV.1 Presupuesto de incertidumbre.

F.V.	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$	u_{x_i}	$U_{Y,1,\alpha}$
∂W_h	$\frac{\partial w(\%) }{\partial W_h} =$		
∂W_s	$\frac{\partial w(\%) }{\partial W_s} =$		
$\partial \theta_\sigma$	$\frac{\partial w(\%) }{\partial \theta_\sigma} =$		
			$U_c =$
			$\nu =$
			$k =$
			$U =$

V. ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES DE LOS PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO DE GEOTECNIA.

Dispersiones de resultados en los ensayos de Geotecnia.

La dispersión de los resultados de los ensayos para determinar las propiedades del suelo proviene de (Sedano, 1982):

- La heterogeneidad del suelo.
- Las técnicas de muestreo.
- La realización de ensayos.

La heterogeneidad del suelo. Los productos de la acción de los agentes de intemperismo, que dan origen a los suelos, pueden quedar en el lugar, directamente sobre la roca madre. Estos suelos son llamados residuales y la heterogeneidad en sus propiedades físicas depende del grado de alteración de la roca madre. Pero puede suceder que los productos sean removidos mediante los mismos agentes de intemperismo y transportados a otra zona. Por lo que se generan suelos que sobreyacen de otros estratos sin relación alguna con ellos, estos suelos se denominan transportados. La heterogeneidad de estos suelos depende del proceso seguido en su historia de depositación. Debido a esta heterogeneidad, es prácticamente imposible que existan valores verdaderos para cada uno de los casos y para cada una de las propiedades de los suelos. Por lo que, no se puede hablar de valores determinísticos. Pero si es posible definir un intervalo de variación de dicha propiedad mediante la técnica estadística de variable aleatoria. Esta técnica consiste en asignar a las propiedades del suelo una función de probabilidad que refleje la incertidumbre asociada a la heterogeneidad del suelo. Así, los valores que se encuentran dentro de este intervalo, son razonablemente aproximados al valor verdadero.

Sin embargo, existen casos en los cuales es necesario definir un valor convencionalmente verdadero para una propiedad en particular como es el caso de intercomparaciones entre laboratorios o dentro del mismo laboratorio. Estas intercomparaciones son llamadas ensayos de aptitud. Así, dentro del marco de los ensayos

de aptitud es posible determinar la reproducibilidad o repetibilidad del resultado de la propiedad en específico y ser tomada como valor convencionalmente verdadero.

Las técnicas de muestreo. De manera irremediable las técnicas de muestreo ocasionan cambios definitivos en las propiedades del suelo. Para realizar la recuperación de un suelo, éste es afectado antes, durante y después de la extracción. Los expertos en muestreo han propuesto técnicas para reducir estos daños y algunas veces estas propuestas han dado origen a normas. Por lo que, estas normas son un reflejo del conocimiento profundo que se ha adquirido en el muestreo de suelos y sobretodo de la “sensibilidad” que tiene el ingeniero civil para detectar las fuentes de error que afectan sus fines. Los cambios relacionados con el muestreo son: *a)* cambio de las condiciones de esfuerzo, *b)* cambio del contenido de agua y de la relación de vacíos, *c)* alteración de la estructura del suelo, *d)* cambios químicos y *e)* mezcla y segregación. Estos factores ya han sido ampliamente discutidos.

La realización de ensayos. En la realización de ensayos conviene distinguir entre dos conceptos que pueden dar lugar a confusión, “procedimiento de ensayo normalizado” y “proceso de medición normalizado”.

Un procedimiento de ensayo normalizado es un procedimiento de ensayo en donde se realizó la validación del método de ensayo. La validación de método es el proceso de establecer las características de desempeño y las limitaciones de un método y la identificación de las influencias que pueden cambiar esas características, y en qué medida (EURACHEM, 1998).

La validación es una actividad indispensable para asegurar que un objeto satisface los requisitos necesarios para un cierto uso. Puede darse el caso que el método haya sido suficientemente validado y descrito por quien lo desarrolle y quien lo aplique sólo tenga que demostrar su competencia para aplicarlo, lo cual ya no es parte de la validación (Lazos y Hernández 2004). Tal es el caso de las normas que se presentan en este trabajo de tesis.

En los procedimientos de ensayo de Geotecnia, para determinar la propiedad del suelo, es necesario llevar a cabo varios procesos de medición que relacionados mediante

una función matemática nos da el resultado que se busca conocer. Las fuentes posibles de incertidumbre que pueden presentarse durante el proceso de medición son (NMX-CH-140-IMNC-2202):

- Definición incompleta del mensurando
- Muestreo representativo
- Conocimiento inadecuado de los efectos de las condiciones ambientales
- Errores de apreciación del operador en la lectura de instrumentos
- Valores inexactos de patrones de medición
- Variaciones en observaciones repetidas del mensurando bajo condiciones similares.

La importancia de estos factores en el proceso de medición dependerá de la sensibilidad del mensurando ante cada factor. Esta sensibilidad está determinada, cuando el proceso de medición está normalizado. Se dice que el *proceso de medición está normalizado* si la distribución de frecuencias de los posibles resultados se comporta conforme una distribución de frecuencias normal (Campana de Gauss, Figura I.1).

Lo anterior es muy usual debido a que por el Teorema del Límite Central, que proviene de la estadística, la variable aleatoria que resulta de la suma de N variables aleatorias con distribuciones de probabilidad cualesquiera, tiende a tener una distribución de probabilidad normal, conforme N crece (Schmid, 2004).

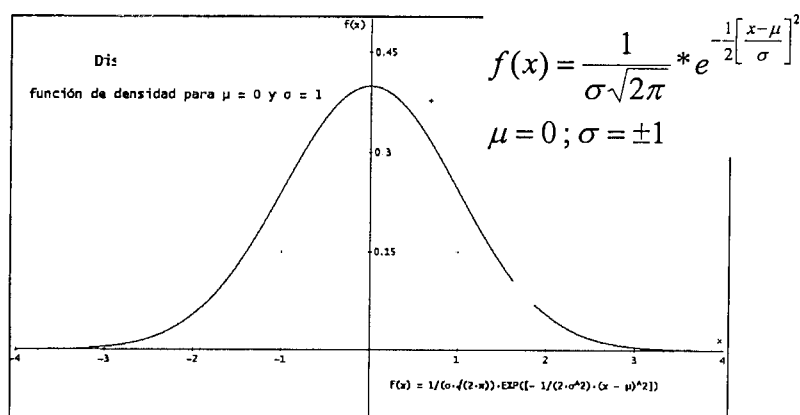


Figura V.1 Distribución normal

Además de que dentro del proceso de medición normalizado del procedimiento de ensayo:

- ✗ No deben existir errores sistemáticos de ningún tipo,
- ✗ No deben existir errores aleatorios de causas especiales,
- ✓ Solo pueden existir errores aleatorios de causas comunes.

Si se cumplen estas condiciones, significa que el proceso de medición del procedimiento de ensayo se hace de la misma forma, lo cual es deseable.

Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación del contenido de agua (humedad) en suelos y rocas.

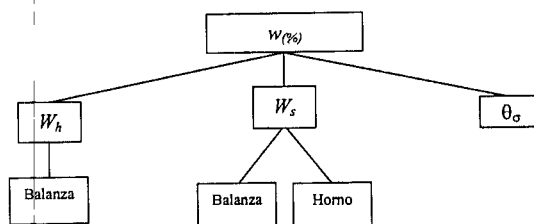
Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando: w (%) Contenido de agua
- Variables necesarias para determinar el mensurando: W_h Peso de la muestra húmeda
 W_s Peso de la muestra seca
- Función matemática que define al mensurando:

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

- Equipo con se realiza las mediciones:
 - ✓ Balanza con resolución de lectura de 0,01 g para valores de hasta 200 g y de 0,1 g para valores mayores a 200 g.
 - ✓ Horno que pueda mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5 °C.

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



donde: θ_σ variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I).

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

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

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

$$u_{w(\%)} = \left[\left(\frac{\partial w(\%)}{\partial W_h} u_{W_h} \right)^2 + \left(\frac{\partial w(\%)}{\partial W_s} u_{W_s} \right)^2 + \left(\frac{\partial w(\%)}{\partial \theta_\sigma} u_{\theta_\sigma} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{dw(\%)}{dW_h} = \frac{1}{W_s} \times 100; \quad \frac{dw(\%)}{dW_s} = -\frac{W_h}{W_s^2} \times 100; \quad \frac{dw(\%)}{d\theta_\sigma} = 1$$

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

Para el caso de la determinación de peso húmedo, W_h y de peso seco, W_s la medición se hace mediante una balanza de funcionamiento no automático y de indicación digital y automática (electrónica). El modelo para estimación de incertidumbre de las mediciones que se realizan en este tipo de instrumentos se presenta en el Anexo X.II. El valor de repetibilidad del método de ensayo (θ_σ) se presenta en el Anexo X.I.

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada ($u_{w(\%)}$) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5), de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable y el valor de repetibilidad del método de ensayo (Paso 6) en la ecuación definida en el Paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados

de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de la incertidumbre del mensurando.

$$U_{w(\%)} = \frac{u_{w(\%)}^4}{\frac{u_{W_h}^4}{U_{W_h}} + \frac{u_{W_s}^4}{U_{W_s}} + \frac{u_{\theta_\sigma}^4}{U_{\theta_\sigma}}}; \quad U_{w(\%)} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{w(\%)} = k * u_{w(\%)}; \quad k = t_{95,45}^{\infty}$$

Donde: $k = 2,00$

Paso 10. Reporte de resultados.

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

Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación de la cantidad de suelo más fino que 75 μm (Malla No. 200).

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando:

% Mat más fino Porcentaje de material más fino que malla No. 200

- Variables necesarias para determinar el mensurando:

W_t Peso total de la muestra

W_r Peso retenido de la muestra

- Función matemática que define al mensurando: $\% \text{Mat más fino} = \frac{W_t - W_r}{W_t} \times 100$

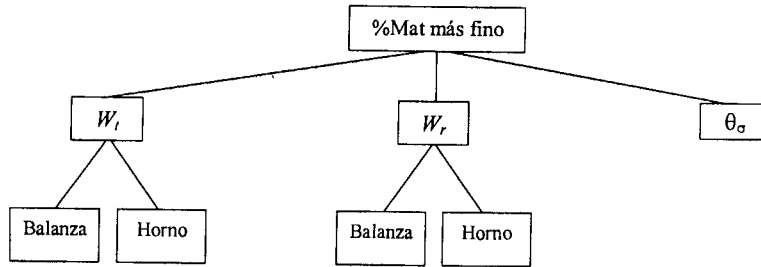
- Equipo con se realiza las mediciones:

✓ Balanza con resolución a 0,1 % del peso del espécimen de ensayo.

✓ Malla No. 200.

✓ Horno que pueda mantener una temperatura uniforme de 110 °C \pm 5 °C.

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



Donde: θ_{σ} variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I).

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

$$\%Mat \text{ más fino} = f(W_r, W_t, \theta_{\sigma});$$

$$\%Mat \text{ más fino} = \frac{W_t - W_r}{W_t} \times 100 + \theta_{\sigma}$$

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

$$u_{\%Mat \text{ más fino}} = \left[\left(\frac{\partial \%Mat \text{ más fino}}{\partial W_r} * u_{W_r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%Mat \text{ más fino}}{\partial W_t} u_{W_t} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%Mat \text{ más fino}}{\partial \theta_{\sigma}} u_{\theta_{\sigma}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d\%Mat \text{ más fino}}{dW_r} = -\frac{1}{W_t} \times 100; \quad \frac{d\%Mat \text{ más fino}}{dW_t} = -\frac{W_r}{W_t^2} \times 100;$$

$$\frac{d\%Mat \text{ más fino}}{d\theta_{\sigma}} = 1$$

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

Para el caso de la determinación de peso total, W_t y de peso retenido, W_r , la medición se hace mediante una balanza de funcionamiento no automático y de indicación digital y automática (electrónica). El modelo para estimación de incertidumbre de las mediciones que se realizan en este tipo de instrumentos se presenta en el Anexo X.I. El valor de repetibilidad del método de ensayo (θ_{σ}) se presenta en el Anexo X.I.

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada ($u_{\%Mat\ más\ fino}$) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5), de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable y el valor de repetibilidad del método de ensayo (Paso 6) en la ecuación definida en el Paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

$$U_{\%Mat\ más\ fino} = \frac{u_{\%Mat\ más\ fino}^4}{\frac{u_{W_r}^4}{v_{W_r}} + \frac{u_{W_t}^4}{v_{W_t}} + \frac{u_{\theta_\sigma}^4}{v_{\theta_\sigma}}}; \quad U_{\%Mat\ más\ fino} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{\%Mat\ más\ fino} = k * u_{\%Mat\ más\ fino}; \quad k = t_{95,45}^\infty$$

Donde: $k = 2,00$

Paso 10. Reporte de resultados.

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

Modelo para estimación de incertidumbre en el análisis granulométrico de agregados gruesos y finos, mediante tamices.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

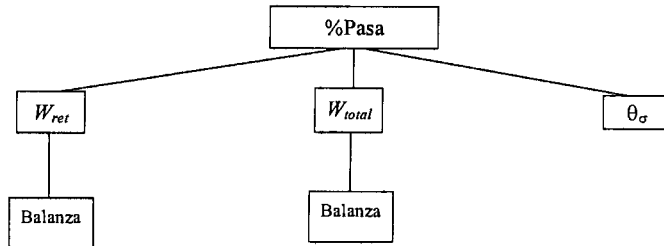
- Mensurando: $\%Pasa$ Porcentaje que pasa
- Variables necesarias para determinar el mensurando:
 - W_{ret} Peso retenido en la malla
 - W_{total} Peso total de la muestra

- Función matemática que define al mensurando:

$$\%Pasa = \left(1 - \frac{W_{ret}}{W_{total}}\right) \times 100$$

- Equipo con se realiza las mediciones:
 - ✓ Balanza con aproximación a 0,1 % de la masa del espécimen.
 - ✓ Malla (con diferentes aberturas).

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



donde: θ_{σ} variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I).

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

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

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

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

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d\%Pasa}{dW_{ret}} = -\frac{1}{W_{total}} \times 100; \quad \frac{d\%Pasa}{dW_{total}} = -\frac{W_{ret}}{W_{total}^2} \times 100; \quad \frac{d\%Pasa}{d\theta_{\sigma}} = 1$$

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

Para el caso de la determinación de peso retenido, W_{ret} y de peso total, W_{total} la medición se hace mediante una balanza de funcionamiento no automático y de indicación digital y automática (electrónica). El modelo para estimación de incertidumbre de las

mediciones que se realizan en este tipo de instrumentos se presenta en el Anexo X.I. El valor de repetibilidad del método de ensayo (θ_σ) se presenta en el Anexo X.I.

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada ($u_{\%Pasa}$) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5), de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable y el valor de repetibilidad del método de ensayo (Paso 6) en la ecuación definida en el Paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

$$v_{\%Pasa} = \frac{u_{\%Pasa}^4}{\frac{u_{W_{ret}}^4}{v_{W_{ret}}} + \frac{u_{W_{total}}^4}{v_{W_{total}}} + \frac{u_{\theta_\sigma}^4}{v_{\theta_\sigma}}}; \quad v_{\%Pasa} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

Donde:
$$U_{\%Pasa} = k * u_{\%Pasa}; \quad k = t_{95,45}^\infty$$

$$k = 2,00$$

Paso 10. Reporte de resultados.

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

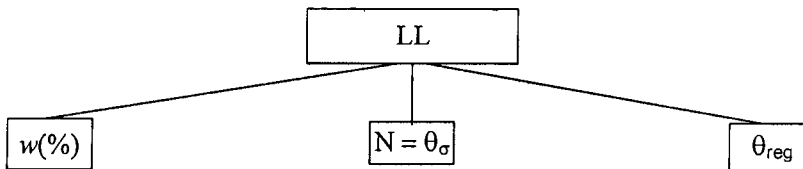
Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos.

a) Límite Líquido.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando: LL Límite Líquido
- Variables necesarias para determinar el mensurando:
 - $w(\%)$ Contenido de agua para un número de golpes dado.
 - N Número de golpes.
- Función matemática que define al mensurando: La selección del valor de Límite líquido (LL) se lleva a cabo utilizando una ecuación de regresión, por lo que se involucrará este proceso como parte del análisis (ver Anexo X.IV)
- Equipo con se realiza las mediciones:
 - ✓ Balanza con aproximación a 0,1 % de la masa del espécimen.

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



- Donde:
- $w(\%)$ Ver modelo para contenido de agua en suelos y rocas.
 - θ_σ variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I).
 - θ_{reg} incertidumbre de la ecuación de regresión (ver Anexo X.IV)

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

$$LL = f(w_{(\%)}, \theta_\sigma, \theta_{reg}); \quad LL = w_{(\%)} + \theta_\sigma + \theta_{reg}$$

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

$$u_{LL} = \left[\left(\frac{\partial LL}{\partial w_{(\%)}} u_{w_{(\%)}} \right)^2 + \left(\frac{\partial LL}{\partial \theta_\sigma} u_{\theta_\sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial LL}{\partial \theta_{reg}} u_{\theta_{reg}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{dLL}{dw_{(\%)}} = 1; \quad \frac{dLL}{d\theta_{\sigma}} = 1; \quad \frac{dLL}{d\theta_{reg}} = 1$$

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

Para el caso de la determinación de contenido de agua, $w_{(\%)}$ la medición se hace mediante una balanza de funcionamiento no automático y de indicación digital y automática (electrónica). El modelo para estimación de incertidumbre de las mediciones que se realizan en este tipo de instrumentos se presenta en el Anexo X.I. El valor de repetibilidad del método de ensayo (θ_{σ}) se presenta en el Anexo X.I. θ_{reg} incertidumbre de la ecuación de regresión (ver Anexo X.IV).

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada (u_{LL}) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5), de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable y el valor de repetibilidad del método de ensayo (Paso 6) en la ecuación definida en el Paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

$$v_{LL} = \frac{u_{LL}^4}{\frac{u_{w_{(\%)}}^4}{v_{w_{(\%)}}} + \frac{u_{\theta_{\sigma}}^4}{v_{\theta_{\sigma}}} + \frac{u_{\theta_{reg}}^4}{v_{\theta_{reg}}}}; \quad v_{LL} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{LL} = k * u_{LL}; \quad k = t_{95,45}^{\infty}$$

donde: $k = 2,00$

Paso 10. Reporte de resultados.

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

b) Límite Plástico

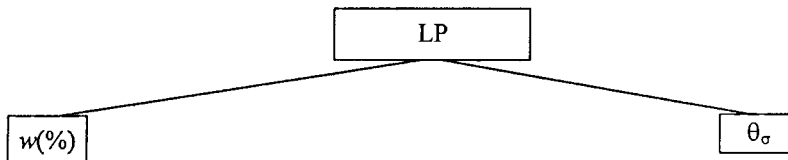
Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando: **LP** Límite Plástico.
- Variables necesarias para determinar el mensurando:
 $w(\%)$ Contenido de agua para un número de golpes dado.
- Función matemática que define al mensurando:

$$LP = w_{(\%)}$$

- Equipo con se realiza las mediciones:
 - ✓ Balanza con aproximación a 0,1 % de la masa del espécimen.

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



Donde: θ_σ variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I).
 $w(\%)$ ver modelo para contenido de agua en suelos y rocas.

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

$$LP = f(w_{(\%)}, \theta_\sigma); \quad LP = w_{(\%)} + \theta_\sigma$$

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

$$u_{LP} = \left[\left(\frac{\partial LP}{\partial w_{(\%)}} u_{w_{(\%)}} \right)^2 + \left(\frac{\partial LP}{\partial \theta_\sigma} u_{\theta_\sigma} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{dLP}{dw(\%)} = 1; \quad \frac{dLP}{d\theta_{\sigma}} = 1$$

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

Para el caso de la determinación de contenido de agua, $w(\%)$ la medición se hace mediante una balanza de funcionamiento no automático y de indicación digital y automática (electrónica). El modelo para estimación de incertidumbre de las mediciones que se realizan en este tipo de instrumentos se presenta en el Anexo X.II. El valor de repetibilidad del método de ensayo (θ_{σ}) se presenta en el Anexo X.I.

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada (u_{LP}) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5), de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable y el valor de repetibilidad del método de ensayo (Paso 6) en la ecuación definida en el Paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

$$U_{LP} = \frac{u_{LP}^4}{\frac{u_{w(\%)}^4}{v_{w(\%)}} + \frac{u_{\theta_{\sigma}}^4}{v_{\theta_{\sigma}}}}; \quad U_{LP} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{LP} = k * u_{LP}; \quad k = t_{95,45}^{\infty}$$

Donde: $k = 2,00$

Paso 10. Reporte de resultados.

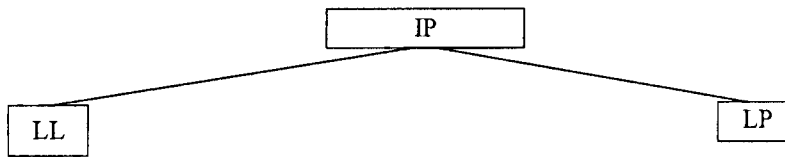
El reporte de la estimación de incertidumbre se expresará a dos cifras significativas.

c) Índice plástico

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando: **IP** Índice Plástico.
- Variables necesarias para determinar el mensurando: **LL** Límite Líquido
LP Límite Plástico
- Función matemática que define al mensurando: $IP = LL - LP$

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



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

$$IP = f(LL, LP); \quad IP = LL - LP$$

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

$$u_{IP} = \left[\left(\frac{\partial IP}{\partial LL} u_{LL} \right)^2 + \left(\frac{\partial IP}{\partial LP} u_{LP} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{dIP}{dLL} = 1; \quad \frac{dIP}{dLP} = -1$$

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

Para el caso de la determinación de Límite Líquido, **LL** y de Límite Plástico, **LP** realizarla como se describió en el inciso **a)** y **b)** respectivamente.

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada (u_{IP}) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5), de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable y el valor de repetibilidad del método de ensayo (Paso 6) en la ecuación definida en el Paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

$$v_{IP} = \frac{u_{IP}^4}{\frac{u_{LL}^4}{v_{LL}} + \frac{u_{LP}^4}{v_{LP}}}; \quad v_{IP} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{IP} = k * u_{IP}; \quad k = t_{95,45}^{\infty}$$

Donde: $k = 2,00$

Paso 10. Reporte de resultados.

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

Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación de la gravedad específica de los suelos por el método del picnómetro con agua.

a) Masa del picnómetro llenado con agua a la temperatura de ensayo.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando:

$M_{pa,t}$ Masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura de ensayo (T_p); g

- Variables necesarias para determinar el mensurando:

$M_{\rho_{a,t}}$ Masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura de ensayo (T_p), g

M_p Promedio de la masa 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

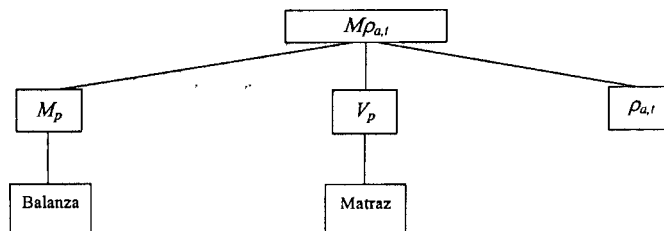
- Función matemática que define al mensurando:

$$M_{\rho_{a,t}} = M_p + (V_p * \rho_{a,t})$$

- Equipo con se realiza las mediciones:

- ✓ 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.



Donde: M_p Promedio de la masa del picnómetro calibrado, g
 V_p Volumen promedio del picnómetro calibrado, ml

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

$$M_{\rho_{a,t}} = f(M_p, V_p, \rho_{a,t}); \quad M_{\rho_{a,t}} = M_p + (V_p \times \rho_{a,p})$$

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

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

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{dM_{\rho_{a,t}}}{dM_p} = 1; \quad \frac{dM_{\rho_{a,t}}}{dV_p} = \rho_{a,t}; \quad \frac{dM_{\rho_{a,t}}}{d\rho_{a,p}} = V_p$$

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

Para el caso de la determinación del promedio de la masa, M_p y del volumen del picnómetro calibrado, M_p , las mediciones se hacen mediante una balanza de funcionamiento no automático y de indicación digital y automática (electrónica). El modelo para estimación de incertidumbre de las mediciones que se realizan en este tipo de instrumentos se presenta en el Anexo X.II. La determinación de la densidad de la masa del agua a la temperatura de ensayo se obtiene de la tabla que se presenta en el método de ensayo.

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada ($u_{M\rho_{a,t}}$) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5), de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable y el valor de repetibilidad del método de ensayo (Paso 6) en la ecuación definida en el Paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

$$u_{M\rho_{a,t}} = \frac{u_{M\rho_{a,t}}^4}{\frac{u_{M_p}^4}{v_{M_p}} + \frac{u_{V_p}^4}{v_{V_p}} + \frac{u_{\rho_{a,t}}^4}{v_{\rho_{a,t}}}}; \quad u_{M\rho_{a,t}} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{M\rho_{a,t}} = k * u_{M\rho_{a,t}}; \quad k = t_{95,45}^{\infty}$$

Donde: $k = 2,00$

Paso 10. Reporte de resultados.

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

b) Gravedad específica del suelo a la temperatura de ensayo.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando:

$G_{S,t}$ Gravedad específica del sólido del suelo a la temperatura de ensayo

- Variables necesarias para determinar el mensurando:

$G_{S,t}$ Gravedad específica del sólido del suelo a la temperatura de ensayo

$M_{pws,t}$ Masa del picnómetro lleno de agua y sólidos a la temperatura de ensayo, g

M_s Masa de los sólidos del suelo seco al horno, g

$M_{pa,t}$ Masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura de ensayo (T_p), g

- Función matemática que define al mensurando:

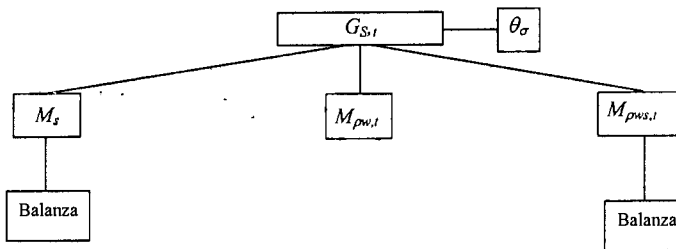
$$G_{S,t} = \frac{M_s}{M_{pa,t} + M_s - M_{pws,t}}$$

- Equipo con se realiza las mediciones:

✓ Balanza con aproximación a 0,01 g

✓ Termómetro con resolución de lectura de 0,1 °C

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



Donde: θ_σ variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I).

$M_{pa,t}$ Masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura de ensayo (T_p); g. Ver inciso a)

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

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

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

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

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{dG_{S,t}}{dM_s} = \frac{M_{\rho a,t} - M_{\rho ws,t}}{(M_{\rho a,t} + M_s - M_{\rho ws,t})^2};$$

$$\frac{dG_{S,t}}{dM_{\rho a,t}} = \frac{-M_s}{(M_{\rho a,t} + M_s - M_{\rho ws,t})^2};$$

$$\frac{dG_{S,t}}{dM_{\rho ws,t}} = \frac{M_s}{(M_{\rho a,t} + M_s - M_{\rho ws,t})^2}; \quad \frac{dG_{S,t}}{d\theta_\sigma} = 1$$

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

Para el caso de la determinación de la masa de los sólidos secos al horno, M_s , y la masa del picnómetro lleno de agua y sólidos a la temperatura de ensayo, $M_{\rho ws,t}$, las mediciones se hacen mediante una balanza de funcionamiento no automático y de indicación digital y automática (electrónica). El modelo para estimación de incertidumbre de las mediciones que se realizan en este tipo de instrumentos se presenta en el Anexo X.II. Para la masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura de ensayo $M_{\rho w,t}$ ver inciso a).

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada ($u_{G_{S,t}}$) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5), de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable y el valor de repetibilidad del método de ensayo (Paso 6) en la ecuación definida en el Paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados

de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

$$u_{G_{S,t}} = \frac{u_{G_{S,t}}^4}{\frac{u_{M_s}^4}{v_{M_s}} + \frac{u_{M_{pv,t}}^4}{v_{M_{pv,t}}} + \frac{u_{M_{pvs,t}}^4}{v_{M_{pvs,t}}}} ; \quad u_{G_{S,t}} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{G_{S,t}} = k * u_{G_{S,t}} ; \quad k = t_{95,45}^{\infty}$$

Donde: $k = 2,00$

Paso 10. Reporte de resultados.

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

Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación de las características de compactación de un suelo con una energía de compactación de 600 kN•m/m³.

a) Peso específico húmedo del suelo compactado.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

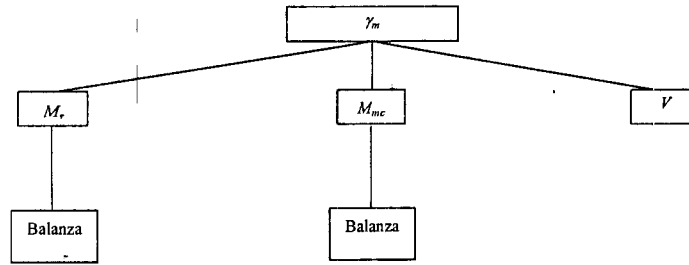
- Mensurando: γ_m Peso específico húmedo del suelo compactado
- Variables necesarias para determinar el mensurando:
 - M_t Masa del suelo húmedo más molde, kg
 - M_{md} Masa del molde de compactación, kg
 - V Volumen del molde de compactación, m³

- Función matemática que define al mensurando: $\gamma_m = \frac{M_t - M_{md}}{1000V}$

- Equipo con se realiza las mediciones:

✓ Balanza con aproximación a 0,01 % de la masa de prueba.

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



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

$$\gamma_m = f(M_t, M_{md}, V); \quad \gamma_m = \frac{M_t - M_{md}}{1000V}$$

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

$$u_{\gamma_m} = \left[\left(\frac{\partial \gamma_m}{\partial M_t} u_{M_t} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_m}{\partial M_{md}} u_{M_{md}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_m}{\partial V} u_V \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d\gamma_m}{dM_t} = \frac{1}{1000V}; \quad \frac{d\gamma_m}{dM_{md}} = -\frac{1}{1000V}; \quad \frac{d\gamma_m}{dV} = \frac{M_{md} - M_t}{1000V^2}$$

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

Para el caso de la determinación de la masa del suelo húmedo más molde de compactación, M_t , y la masa del molde de compactación, M_{md} , las mediciones se hacen mediante una balanza de funcionamiento no automático, de indicación digital y automático (electrónica). El modelo para estimación de incertidumbre de las mediciones que se realizan en este tipo de instrumentos se presenta en el Anexo X.II. El valor del Volumen del molde de compactación es de 0,5 %, de acuerdo con el procedimiento de verificación del método de ensayo

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada (u_{γ_m}) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5), de los valores de la estimación de

la incertidumbre de cada variable y el valor de repetibilidad del método de ensayo (Paso 6) en la ecuación definida en el Paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

$$U_{\gamma_m} = \frac{u_{\gamma_m}^4}{\frac{u_{M_t}^4}{U_{M_t}} + \frac{u_{M_{md}}^4}{U_{M_{md}}} + \frac{u_V^4}{U_V}}; \quad U_{\gamma_m} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

Donde:
$$U_{\gamma_m} = k * u_{\gamma_m}; \quad k = t_{95,45}^{\infty}$$

$$k = 2,00$$

Paso 10. Reporte de resultados.

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

b) Peso específico seco del suelo compactado

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando: γ_d Peso específico seco del suelo compactado
- Variables necesarias para determinar el mensurando:

γ_m Peso específico húmedo del suelo compactado, kg/m³

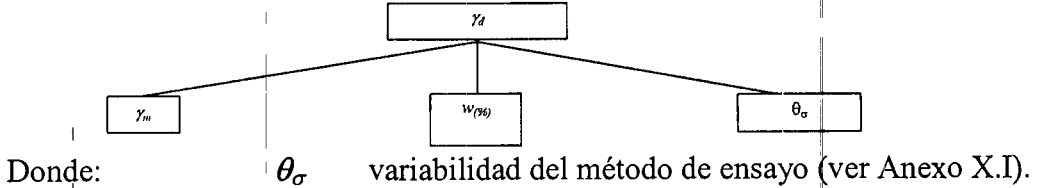
$w(\%)$ Contenido de agua del suelo compactado.

- Función matemática que define al mensurando:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \frac{w(\%)}{100}}$$

- Equipo con se realiza las mediciones:
 - ✓ Balanza con aproximación a 0,01 % de la masa de prueba.

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



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

$$\gamma_d = f(\gamma_m, w_{(%)}, \theta_\sigma); \quad \gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \frac{w_{(%)}}{100}} + \theta_\sigma$$

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

$$u_{\gamma_d} = \left[\left(\frac{\partial \gamma_d}{\partial \gamma_m} u_{\gamma_m} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_d}{\partial w_{(%)}} u_{w_{(%)}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_d}{\partial \theta_\sigma} u_{\theta_\sigma} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d\gamma_d}{d\gamma_m} = \frac{1}{1 + \frac{w_{(%)}}{100}}; \quad \frac{d\gamma_d}{dw_{(%)}} = -\frac{\gamma_m}{100 \times \left[1 + \frac{w_{(%)}}{100} \right]^2}; \quad \frac{d\gamma_d}{d\theta_\sigma} = 1$$

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

Para la determinación del peso específico húmedo del suelo compactado, γ_m , ver inciso a). Para el contenido de agua del suelo, $w_{(%)}$, ver modelo de estimación para contenido de aguas en suelos y rocas.

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada (u_{γ_d}) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5), de los valores de la estimación de

la incertidumbre de cada variable y el valor de repetibilidad del método de ensayo (Paso 6) en la ecuación definida en el Paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

$$U_{\gamma_d} = \frac{u_{\gamma_d}^4}{\frac{u_{\gamma_m}^4}{U_{\gamma_m}} + \frac{u_{w(\%) }^4}{U_{w(\%) }} + \frac{u_{\theta_\sigma}^4}{U_{\theta_\sigma}}}; \quad U_{\gamma_d} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

Donde:
$$U_{\gamma_d} = k * u_{\gamma_d}; \quad k = t_{95,45}^{\infty}$$

$$k = 2,00$$

Paso 10. Reporte de resultados.

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

Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación de la resistencia a la degradación de agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión en la Máquina de los Ángeles.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando: **%Desgaste** Porcentaje de desgaste de los ángeles.
- Variables necesarias para determinar el mensurando:

W_{ini} Peso inicial, kg

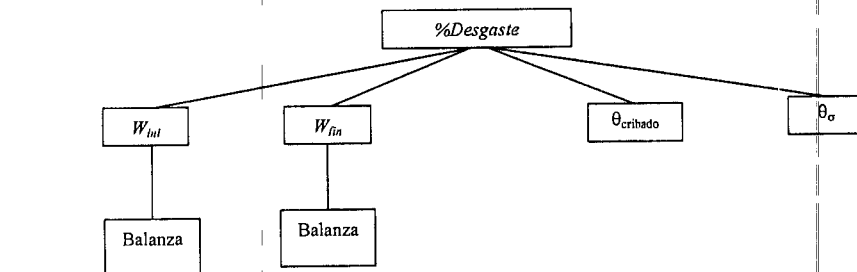
W_{fin} Peso final, kg

- Función matemática que define al mensurando:

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

- Equipo con se realiza las mediciones:
 - ✓ Balanza con resolución de lectura de 1,00 g
 - ✓ Horno que mantenga una temperatura uniforme de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



Donde: θ_σ variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I).
 $\theta_{cribado}$ variabilidad el cribado (ver modelo de estimación para granulometría)

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

$$\%Desgaste = f(W_{ini}, W_{fin}, \theta_{cribado}, \theta_\sigma); \quad \%Desgaste = \frac{W_{ini} - W_{fin}}{W_{ini}} \times 100 + \theta_{cribado} + \theta_\sigma$$

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

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

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d\%Desgaste}{dW_{fin}} = -\frac{1}{W_{ini}} \times 100; \quad \frac{d\%Desgaste}{dW_{ini}} = \frac{W_{fin}}{W_{ini}^2} \times 100;$$

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

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

Para la determinación del peso inicial W_{ini} y el peso final W_{fin} , las mediciones se hacen mediante una balanza de funcionamiento no automático, indicación analógica y mecánico. El modelo para estimación de incertidumbre de las mediciones que se realizan en este tipo de instrumentos se presenta en el Anexo X.I. $\theta_{cribado}$ ver análisis de incertidumbre para análisis granulométrico. θ_{σ} valor de repetibilidad del método de medición en anexo Anexo X.I.

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada ($u_{\%Desgaste}$) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5), de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable y el valor de repetibilidad del método de ensayo (Paso 6) en la ecuación definida en el Paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

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

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{\%Desgaste} = k * u_{\%Desgaste}; \quad k = t_{95,45}^{\infty}$$

Donde: $k = 2,00$

Paso 10. Reporte de resultados.

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

Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación de partículas planas, alargadas o planas y alargadas de agregado grueso.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando:

%Partículas Porcentaje de partículas (alargada, plana o plana y alargada).

- Variables necesarias para determinar el mensurando:

W_{part} Peso de partículas, kg

W_{total} Peso total, kg

- Función matemática que define al mensurando:

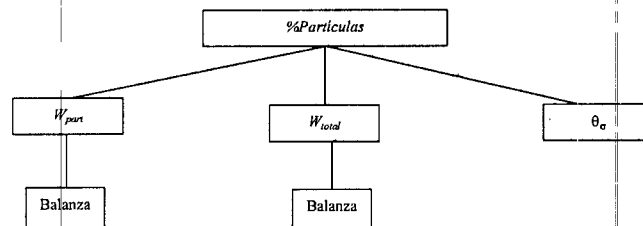
$$\%Partículas = \frac{W_{part}}{W_{total}} \times 100$$

- Equipo con se realiza las mediciones:

✓ Calibrador de forma de la partícula.

✓ Báscula con aproximación de 0,5 % del peso del espécimen de ensayo.

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



Donde: θ_{σ} variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I).

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

$$\%Partículas = f(W_{part}, W_{total}, \theta_{\sigma}); \quad \%Partículas = \frac{W_{part}}{W_{total}} \times 100 + \theta_{\sigma}$$

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

$$u_{\%Partículas} = \left[\left(\frac{\partial \%Partículas}{\partial W_{part}} u_{W_{part}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%Partículas}{\partial W_{total}} u_{W_{total}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%Partículas}{\partial \theta_{\sigma}} u_{\theta_{\sigma}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d\%Partículas}{dW_{part}} = \frac{1}{W_{total}} \times 100; \quad \frac{d\%Partículas}{dW_{total}} = -\frac{W_{part}}{W_{total}^2} \times 100; \quad \frac{d\%Partículas}{d\theta_{\sigma}} = 1$$

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

Para la determinación del peso de las partículas W_{part} , y el peso total W_{total} , las mediciones se hacen mediante una balanza de funcionamiento no automático, indicación analógica y mecánica. El modelo para estimación de incertidumbre de las mediciones que se realizan en este tipo de instrumentos se presenta en el Anexo X.II. θ_{σ} el valor de repetibilidad del método de medición en Anexo X.I.

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada ($u_{\%Partículas}$) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5), de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable y el valor de repetibilidad del método de ensayo (Paso 6) en la ecuación definida en el Paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

$$v_{\%Partículas} = \frac{u_{\%Partículas}^4}{\frac{u_{M_{part}}^4}{v_{M_{part}}} + \frac{u_{M_{total}}^4}{v_{M_{total}}} + \frac{u_{\theta_{\sigma}}^4}{v_{\theta_{\sigma}}}}; \quad v_{\%Partículas} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{\%Partículas} = k * u_{\%Partículas}; \quad k = t_{95,45}^{\infty}$$

donde: $k = 2,00$

Paso 10. Reporte de resultados.

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

Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación de equivalente de arena.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando: **%EA** Porcentaje de equivalente de arena.
- Variables necesarias para determinar el mensurando:

L_{arena} Lectura de arena, ml

$L_{arcilla}$ Lectura de arcilla, ml

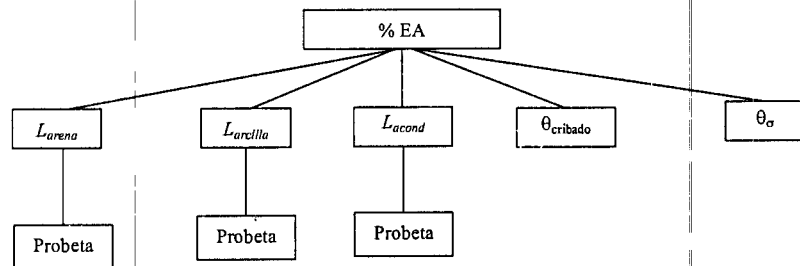
- Función matemática que define al mensurando:

$$\%EA = \frac{L_{arena}}{L_{arcilla}} \times 100$$

- Equipo con se realiza las mediciones:

- ✓ Probeta de lectura de equivalente de arena.
- ✓ Horno que pueda mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5 °C.

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



Donde: θ_{σ} variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I).

L_{acond} Lectura de acondicionamiento.

$\theta_{cribado}$ Variabilidad el cribado (ver modelo de estimación para análisis granulométrico)

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

$$\%EA = f(L_{arena}, L_{arcilla}, L_{acond}, \theta_{cribado}, \theta_{\sigma}); \quad \%EA = \frac{L_{arena}}{L_{arcilla}} \times 100 + L_{acond} + \theta_{cribado} + \theta_{\sigma}$$

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

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

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d\%EA}{dL_{arena}} = \frac{1}{L_{arcilla}} \times 100; \quad \frac{d\%EA}{dL_{arcilla}} = -\frac{L_{arena}}{L_{arcilla}^2} \times 100; \quad \frac{d\%EA}{dL_{acond}} = 1; \quad \frac{d\%EA}{d\theta_{cribado}} = 1; \quad \frac{d\%EA}{d\theta_{\sigma}} = 1$$

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

Para la determinación de las lecturas de arena L_{arena} , de arcilla $L_{arcilla}$, y de acondicionamiento L_{acond} ; las mediciones se realizan en una probeta graduada. El modelo para estimación de incertidumbre de las mediciones que se realizan en este instrumento se presenta en el Anexo X.III. θ_{σ} el valor de repetibilidad del método de medición en Anexo X.I y $\theta_{cribado}$ ver análisis de incertidumbre para análisis granulométrico

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada ($u_{\%EA}$) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5), de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable y el valor de repetibilidad del método de ensayo (Paso 6) en la ecuación definida en el Paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

$$u_{\%EA} = \frac{u_{\%EA}^4}{\frac{u_{Larena}^4}{v_{Larena}} + \frac{u_{Larcilla}^4}{v_{Larcilla}} + \frac{u_{Lacond}^4}{v_{Lacond}} + \frac{u_{\theta_{cribado}}^4}{v_{\theta_{cribado}}} + \frac{u_{\theta_{\sigma}}^4}{v_{\theta_{\sigma}}}} ; \quad u_{\%EA} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{\%EA} = k * u_{\%EA} ; \quad k = t_{95,45}^{\infty}$$

Donde: $k = 2,00$

Paso 10. Reporte de resultados.

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

Modelo para estimación de incertidumbre en la determinación del módulo resiliente para materiales de base, sub-base y subrasante.

a) Preparación del espécimen.

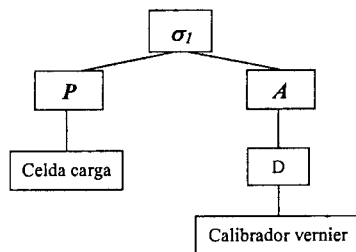
El peso volumétrico húmedo compactado en laboratorio no debe variar $\pm 3 \%$ del peso volumétrico del lugar o del peso volumétrico de proyecto. El contenido de agua para realizar el espécimen compactado en laboratorio no debe variar $\pm 1 \%$ para materiales granulares o mezclas y de $\pm 0,5 \%$ para materiales finos del contenido de agua del lugar o del contenido de agua de proyecto.

b) Esfuerzo Principal.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando: σ_1 Esfuerzo principal
- Variables necesarias para determinar el mensurando: P Carga
 A Área
- Función matemática que define al mensurando: $\sigma_1 = \frac{P}{A}$
- Equipo con se realiza las mediciones:
 - ✓ Celda de carga con aproximación de $\pm 4,5 \text{ N}$; $\pm 10,0 \text{ N}$ ó $\pm 22,24 \text{ N}$.
 - ✓ Calibrador vernier con aproximación de $0,01 \text{ cm}$.

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



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

$$\sigma_1 = f(P, A); \quad \sigma_1 = \frac{P}{A}$$

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

$$u_{\sigma_1} = \left[\left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial P} u_P \right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial A} u_A \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d\sigma_1}{dP} = \frac{1}{A} \quad ; \quad \frac{d\sigma_1}{dA} = -\frac{P}{A^2} ;$$

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

6. a) Incertidumbre para las mediciones de la carga con celda de carga.

Para la determinación de la carga P , las mediciones se realizan mediante una celda de carga cuya incertidumbre se calcula:

$$u_P = \sqrt{u_{RL}^2 + u_{reg}^2 + u_{patron}^2} \quad ; \quad U_P = \infty$$

$$u_P = \left[\left(\frac{RL}{\sqrt{12}} \right)^2 + u_{reg}^2 + \left(\frac{U}{k} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ec. V.1

- donde:
- u_P Incertidumbre debida a la medición en la celda de carga.
 - u_{RL} Incertidumbre debida a la medición por la resolución del equipo.
 - u_{reg} Incertidumbre de la ecuación de regresión. (ver Anexo X. IV)
 - $u_{patrón}$ Incertidumbre heredada del patrón (certificado o informe de calibración).
 - RL Resolución del equipo (lectura mínima del desplegado electrónico). Anexo X. II Figura X.II.2)
 - U Incertidumbre expandida del patrón (certificado o informe de calibración).
 - 2 Factor de cobertura, k , para una confiabilidad el 95,45 %
 - $\frac{RL}{\sqrt{12}}$ Estimación de incertidumbre a partir de una distribución rectangular

6. b) Incertidumbre para las mediciones del diámetro para la determinación del área.

Para la determinación del área del espécimen se mide n veces el diámetro con un calibrador vernier, así que la incertidumbre para la medición del diámetro se tiene que:

$$u_D = \sqrt{u_{D_{\text{tipo A}}}^2 + u_{D_{\text{tipo B}}}^2} \quad \text{Ec. V.2}$$

La incertidumbre tipo A de la medición del diámetro, $u_{\text{tipo A}}$, se estima como:

$$u_{D_{\text{tipo A}}} = \frac{\text{Desv. normal}}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec. V.3}$$

Para la estimación de la incertidumbre tipo B de la medición del diámetro, $u_{\text{tipo B}}$, se tiene que:

$$u_{D_{\text{tipo B}}} = \sqrt{u_{RL}^2 + u_{\text{patrón}}^2} = \left[\left(\frac{RL}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{U}{k} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. V.4}$$

Los grados de libertad para la medición del diámetro son: $U_D = \infty$

Una vez estimada la incertidumbre en la medición del diámetro para la estimación de la incertidumbre del área resulta que:

Mensurando	A
Variables aleatorias	D
Función matemática	$A = \frac{\pi D^2}{4}$
Relación matemática	$u_A = f(D)$
Expresión para estimación de incertidumbre combinada	$u_A = \left[\left(\frac{\partial A}{\partial D} u_D \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$
Coefficiente de sensibilidad	$\frac{d}{dD} \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi}{2} D$
Grados de libertad	$U_A = \infty$

Estimación de incertidumbre combinada para el área del espécimen de ensayo:

$$u_A = \left[\left(\frac{\pi}{2} D * u_D \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ec. V.5

donde: u_D Incertidumbre estimada de la medición del diámetro del espécimen de ensayo con la Ec. V.2

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada para el esfuerzo principal (σ_1) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5) y de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable en la ecuación definida en el Paso 4.

$$u_{\sigma_1} = \left[\left(\frac{1}{A} u_P \right)^2 + \left(\frac{P}{A} u_A \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ec. V.6

donde:

u_{σ_1} Incertidumbre estimada de la medición del esfuerzo principal

A Área del espécimen de ensayo

P Carga aplicada

u_P Incertidumbre estimada de la medición de la carga mediante la ecuación 4.11.6.1

u_A Incertidumbre estimada de la medición del área del espécimen de ensayo mediante la ecuación

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

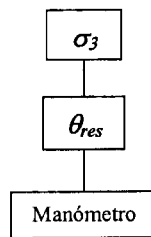
$$v_{\sigma_1} = \frac{u_{\sigma_1}^4}{\frac{u_P^4}{v_P} + \frac{u_A^4}{v_A}} ; \quad v_{\sigma_1} = \infty$$

c) Esfuerzo confinante.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando: σ_3 Esfuerzo confinante
- Variables necesarias para determinar el mensurando: θ_{RL} Error por resolución.
- Equipo con se realiza las mediciones:
 - ✓ Manómetro con resolución de 1 kPa

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



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

$$\sigma_3 = f(\theta_{res})$$

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

$$u_{\sigma_3} = \left[\left(\frac{\partial \sigma_3}{\partial \theta_{RL}} u_{\theta_{RL}} \right)^2 + u_{patrón}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \text{ [referenciación]}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d\sigma_3}{d\theta_{RL}} = 1$$

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

La incertidumbre por resolución del equipo esta dada por la siguiente expresión:

$$u_{\theta_{RL}} = \frac{RL}{\sqrt{12}} \quad \text{Ec. V.7}$$

La incertidumbre heredada por el patrón se estima como:

$$u_{\text{patrón}} = \frac{U}{2} \quad \text{Ec. V.8}$$

- donde:
- $u_{\theta RL}$ Incertidumbre debida a la resolución del manómetro.
 - RL Resolución del equipo (lectura mínima del desplegado electrónico).
 - $\frac{RL}{\sqrt{12}}$ Estimación de incertidumbre a partir de una distribución rectangular (Anexo X. II Figura X.II.2)
 - $u_{\text{patrón}}$ Incertidumbre heredada del patrón (certificado o informe de calibración).
 - U Incertidumbre expandida del patrón (certificado o informe de calibración).
 - 2 Factor de cobertura, k , para una confiabilidad el 95,45 %

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada para el esfuerzo confinante (σ_3) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5) y de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable en la ecuación definida en el Paso 4.

$$u_{\sigma_3} = \left[\left(\frac{RL}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{U}{k} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. V.9}$$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

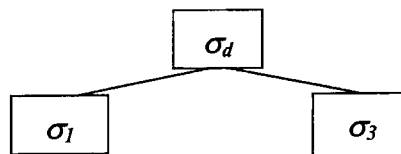
$$v_{\sigma_3} = \frac{u_{\sigma_3}^4}{\frac{u_{\theta RL}^4}{v_{\theta RL}} + \frac{u_{\text{patrón}}^4}{v_{\text{patrón}}}} \quad ; \quad v_{\sigma_3} = \infty$$

d) Esfuerzo desviador.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando: σ_d Esfuerzo desviador
- Variables necesarias para determinar el mensurando: σ_1 Esfuerzo principal
 σ_3 Esfuerzo confinante
- Función matemática que define al mensurando: $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



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

$$\sigma_d = f(\sigma_1, \sigma_3) \quad ; \quad \sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$$

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

$$u_{\sigma_d} = \left[\left(\frac{\partial \sigma_d}{\partial \sigma_1} u_{\sigma_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma_d}{\partial \sigma_3} u_{\sigma_3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d\sigma_d}{d\sigma_1} = 1 \quad ; \quad \frac{d\sigma_d}{d\sigma_3} = -1$$

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

La incertidumbre para el esfuerzo principal, u_{σ_1} , se estima con la Ec. V.6 y la incertidumbre del esfuerzo confinante, u_{σ_3} , se estima con la Ec. V.9.

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

La estimación de incertidumbre combinada para el esfuerzo desviador (σ_d) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5) y de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable en la ecuación definida en el Paso 4.

$$u_{\sigma_d} = \left[(u_{\sigma_1})^2 + (u_{\sigma_3})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. V.10}$$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

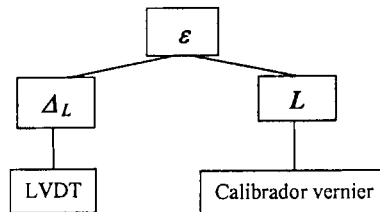
$$v_{\sigma_d} = \frac{u_{\sigma_d}^4}{\frac{u_{\sigma_1}^4}{v_{\sigma_1}} + \frac{u_{\sigma_3}^4}{v_{\sigma_3}}} \quad ; \quad v_{\sigma_d} = \infty$$

e) Deformación unitaria.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando: ε Deformación unitaria
- Variables necesarias para determinar el mensurando:
 - Δ_L Variación en la longitud del espécimen
 - L Longitud inicial del espécimen
- Función matemática que define al mensurando: $\varepsilon = \frac{\Delta_L}{L}$
- Equipo con se realiza las mediciones:
 - ✓ Transductor de desplazamiento con una capacidad máxima de medición de ± 1 mm, $\pm 2,5$ mm ó ± 6 mm. Con una linealidad de $\pm 0,25$ % de la escala total. Una repetibilidad de ± 1 % de la escala total.
 - ✓ Calibrador vernier con resolución de 0,01 cm

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



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

$$\varepsilon = f(\Delta_L, L) \quad ; \quad \varepsilon = \frac{\Delta_L}{L}$$

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

$$u_\varepsilon = \left[\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \Delta_L} u_{\Delta_L} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial L} u_L \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d\varepsilon}{d\Delta_L} = \frac{1}{L} \quad ; \quad \frac{d\varepsilon}{dL} = -\frac{\Delta_L}{L^2}$$

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

a) *Incertidumbre de las mediciones la longitud inicial del espécimen.*

Las mediciones n veces de la longitud inicial del espécimen de ensayo se realiza con un calibrador vernier, así que para la estimación de la incertidumbre se tiene que:

$$u_L = \sqrt{u_{L_{\text{tipo A}}}^2 + u_{L_{\text{tipo B}}}^2} \quad \text{Ec. V.11}$$

La incertidumbre tipo A de la medición de la longitud inicial del espécimen de ensayo, $u_{L \text{ tipo A}}$, se estima como:

$$u_{L_{\text{tipo A}}} = \frac{\text{Desv. normal}}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec. V.12}$$

donde:

Desv. normal Desviación normal de las mediciones n de longitud inicial del espécimen.
 n Número de mediciones.

Para la estimación de la incertidumbre tipo B de la medición del diámetro, $u_{L \text{ tipo B}}$, se tiene que:

$$u_{L_{\text{tipo B}}} = \sqrt{u_{RL}^2 + u_{\text{patrón}}^2}$$

$$u_{L_{\text{tipo B}}} = \left[\left(\frac{RL}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{U}{k} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. V.13}$$

Los grados de libertad para la medición de la longitud inicial son: $U_L = \infty$

b) *Incertidumbre de las mediciones de la variación de la longitud.*

Las mediciones de la variación de la longitud del espécimen, Δ_L , se obtienen a partir de la diferencia entre dos lecturas del transductor de desplazamiento:

$$\Delta_L = l_1 - l_2$$

La incertidumbre para la medición de la longitud con transductor de desplazamiento se estima como:

$$u_{l_i} = \sqrt{u_{RL}^2 + u_{reg}^2 + u_{patrón}^2} \quad ; \quad U_{l_i} = \infty$$

$$u_{l_i} = \left[\left(\frac{RL}{\sqrt{12}} \right)^2 + u_{reg}^2 + \left(\frac{U}{k} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ec. V.14

donde:

u_{li} Incertidumbre debida a la medición con transductor de desplazamiento.

l_i Lectura *i-ésima* en el transductor de desplazamiento.

u_{RL} Incertidumbre debida a la medición por la resolución del equipo.

u_{reg} Incertidumbre de la ecuación de regresión. (ver Anexo X. IV)

$u_{patrón}$ Incertidumbre heredada del patrón (certificado o informe de calibración).

U Incertidumbre expandida del patrón

2 Factor de cobertura, k (certificado o informe de calibración).

RL Resolución del equipo (lectura mínima del desplegado electrónico).

$\frac{RL}{\sqrt{12}}$ Estimación de incertidumbre a partir de una distribución rectangular

(Anexo X. II Figura X.II.2)

Por lo que la incertidumbre para la variación de la longitud del espécimen se estima como:

$$u_{\Delta L} = \left[(u_{l_1})^2 + (u_{l_2})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ec. V.15

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

La estimación de incertidumbre combinada para la deformación unitaria (ϵ) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5) y de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable en la ecuación definida en el Paso 4.

$$u_{\epsilon} = \left[\left(\frac{1}{L} u_{\Delta L} \right)^2 + \left(-\frac{\Delta L}{L^2} u_L \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ec. V.16

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

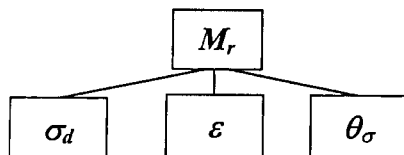
$$v_{\epsilon} = \frac{u_{\epsilon}^4}{\frac{u_{\Delta L}^4}{v_{\Delta L}} + \frac{u_L^4}{v_L}} \quad ; \quad v_{\epsilon} = \infty$$

f) Módulo resiliente.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando: M_r Módulo resiliente
- Variables necesarias para determinar el mensurando:
 - σ_d Esfuerzo de deformación
 - ε Deformación unitaria
- Función matemática que define al mensurando: $M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon}$

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



donde: θ_σ Variabilidad del método de ensayo

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

$$M_r = f(\sigma_d, \varepsilon, \theta_\sigma) \quad ; \quad M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon} + \theta_\sigma$$

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

$$u_{M_r} = \left[\left(\frac{\partial M_r}{\partial \sigma_d} u_{\sigma_d} \right)^2 + \left(\frac{\partial M_r}{\partial \varepsilon} u_\varepsilon \right)^2 + \left(\frac{\partial M_r}{\partial \theta_\sigma} u_{\theta_\sigma} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{dM_r}{d\sigma_d} = \frac{1}{\varepsilon} \quad ; \quad \frac{dM_r}{d\varepsilon} = -\frac{\sigma_d}{\varepsilon^2} \quad ; \quad \frac{dM_r}{d\theta_\sigma} = 1$$

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

$u_{\sigma d}$ Incertidumbre de la determinación del esfuerzo desviador (Ec. V.10).

u_{ε} Incertidumbre de la determinación de la deformación unitaria (Ec. V.16).

$u_{\theta\sigma}$ Incertidumbre de la variabilidad del método de ensayo.

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

a) *Incertidumbre combinada tipo B*

La estimación de incertidumbre combinada el módulo resiliente (M_r) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5) y de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable en la ecuación definida en el Paso 4.

$$u_{M_{rB}} = \left[\left(\frac{1}{\varepsilon} u_{\sigma d} \right)^2 + \left(-\frac{\sigma_d}{\varepsilon^2} u_{\varepsilon} \right)^2 + (1 * u_{\theta\sigma})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{ec. 4.11.6.17}$$

b) *Incertidumbre combinada tipo A*

El módulo resiliente, M_r , se determina a partir de un promedio de 5 ciclos, por lo que debe estimarse una incertidumbre combinada de tipo A:

$$u_{M_{rA}} = \frac{\text{Desv. normal}}{\sqrt{n}} \quad \text{ec. 4.11.6.18}$$

La incertidumbre combinada de la determinación del módulo resiliente, M_r , es:

$$u_{M_r} = \left[(u_{M_{rA}})^2 + (u_{M_{rB}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{ec. 4.11.6.19}$$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados

de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando.

$$U_{M_r} = \frac{u_{M_r}^4}{\frac{u_{\sigma_d}^4}{v_{\sigma_d}} + \frac{u_{\varepsilon}^4}{v_{\varepsilon}} + \frac{u_{\theta_{\sigma}}^4}{v_{\theta_{\sigma}}}} \quad ; \quad U_{M_r} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{M_r} = k * u_{M_r} ; \quad k = t_{95,45}^{\infty}$$

donde: $k = 2,00$

Paso 10. Reporte de resultados.

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

Presupuesto de Incertidumbre

FV	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$	u_{xi}	$u_{Y/xi}$
$? \sigma_d$	$\frac{\partial M_r}{\partial \sigma_d} = \frac{1}{\varepsilon}$	$u_{\sigma_d} = \left[(u_{\sigma_d})^2 + (u_{\sigma_d})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	---
$? \varepsilon$	$\frac{\partial M_r}{\partial \varepsilon} = -\frac{\sigma_d}{\varepsilon^2}$	$u_{\varepsilon} = \left[\left(\frac{1}{\varepsilon} u_{\sigma_d} \right)^2 + \left(-\frac{\sigma_d}{\varepsilon^2} u_{\varepsilon} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	---
$? \theta_{\sigma}$	$\frac{\partial M_r}{\partial \theta_{\sigma}} = 1$	θ_{σ}	---
Tipo B $u_{M_rA} = \left[\left(\frac{1}{\varepsilon} u_{\sigma_d} \right)^2 + \left(-\frac{\sigma_d}{\varepsilon^2} u_{\varepsilon} \right)^2 + (1 * u_{\theta_{\sigma}})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$			
$v =$?
Tipo A $u_{M_rB} = \frac{Desv. normal}{\sqrt{n}}$			
$k =$			Unidades
$U_{M_r} =$			$\left[(u_{M_rA})^2 + (u_{M_rB})^2 \right]^{\frac{1}{2}} * k$

VI. ESTIMACIÓN NUMÉRICA DE INCERTIDUMNRE EN LAS MEDICIONES DE ENSAYOS DE GEOTECNIA

Determinación del contenido de agua (humedad) en suelos y rocas.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

Variables: $W_h = 368,40 \text{ g}$; $W_s = 308,59 \text{ g}$

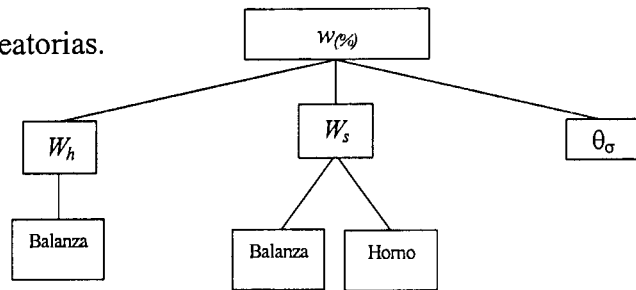
Fórmula: $w(\%) = \frac{W_h - W_s}{W_s} \times 100$ $w(\%) = \frac{368,40 - 308,60}{308,60} \times 100 = 19,4 \%$

Equipo: La balanza utilizada es de funcionamiento no automático y de lectura electrónica con resolución de 0,01 g. Los errores del instrumento conocidos por la calibración son:

Linealidad 0,02 g para lecturas $\leq 200 \text{ g}$ y de 0,01 % para lecturas $> 200 \text{ g}$

Horno que pueda mantener una temperatura uniforme de $110 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



Cv Coeficiente de variabilidad (ver Anexo X.I) 2,7 %

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

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

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

$$u_{w(\%)} = \left[\left(\frac{\partial w(\%)}{\partial W_h} u_{W_h} \right)^2 + \left(\frac{\partial w(\%)}{\partial W_s} u_{W_s} \right)^2 + \left(\frac{\partial w(\%)}{\partial \theta_\sigma} u_{\theta_\sigma} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{dw(\%)}{dW_h} = \frac{1}{W_s} \times 100 \quad \frac{1}{W_s} \times 100 = \frac{1}{308,60} \times 100 = 0,324055$$

$$\frac{dw(\%)}{dW_s} = -\frac{W_h}{W_s^2} \times 100 \quad -\frac{W_h}{W_s^2} \times 100 = \frac{368,40}{(308,60)^2} \times 100 = -0,386862$$

$$\frac{dw(\%)}{d\theta_\sigma} = 1 \quad 1$$

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

$$u_{W_h} = \left[\left(\frac{0,01}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{368,40 * 0,0001}{\sqrt{3}} \right)^2 + (0,003)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,021673 \quad \text{Ver Anexo X.II}$$

$$u_{W_s} = \left[\left(\frac{0,01}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{308,59 * 0,0001}{\sqrt{3}} \right)^2 + (0,003)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,018296 \quad \text{Ver Anexo X.II}$$

$$\theta_\sigma = (19,40) * (2,7/100) = 0,523306$$

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

$$u_w = \left[(0,324055 * 0,02673)^2 + (-0,386862 * 0,018296)^2 + (1 * 0,523306)^2 \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$u_{w(\%)} = 0,523401 \quad \%$$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

$$U_{w(\%)} = \frac{0,523401^4}{\frac{0,324055^4}{\infty} + \frac{-0,386862^4}{\infty} + \frac{1^4}{\infty}} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{w(\%)} = 0,523401 * 2 = 1,05 \% \quad k = t_{95,45}^{\infty} = 2,00$$

Paso 10. Reporte de resultados.

$\% w =$	19,4 %	\pm	1,0 %
----------	---------------	-------	--------------

Presupuesto de Incertidumbre

FV	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$		u_{xi}	$u_{Y/xi}$
∂W_h	$\frac{\partial w(\%)}{\partial W_h} =$	0,324055	0,021673	0,007023
∂W_s	$\frac{\partial w(\%)}{\partial W_s} =$	-0,386862	0,018296	-0,007078
$\partial \theta_{\sigma}$	$\frac{\partial w(\%)}{\partial \theta_{\sigma}} =$	1	0,523306	0,523306
			$u_{w(\%)} =$	0,523401
			$U =$	∞
			$k =$	2,00
				Unidades
			$U_{w(\%)} =$	1,0 %

Determinación de la cantidad de suelo más fino que 75 μm (Malla No. 200).

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

Variables: $W_t = 375,44 \text{ g}$; $W_r = 76,37 \text{ g}$

Fórmula: $\% \text{ Mat más fino} = \frac{W_t - W_r}{W_t} \times 100$; $\% \text{ Mat más fino} = \frac{375,44 - 76,37}{375,44} \times 100 =$

$\% \text{ Mat más fino} = 79,7 \%$

Equipo:

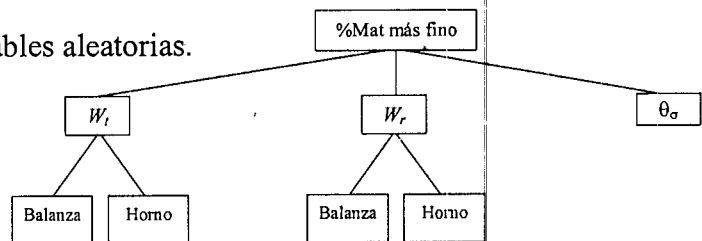
La balanza utilizada es de funcionamiento no automático y de lectura electrónica con resolución de 0,01 g. Los errores del instrumento conocidos por la calibración son:

Linealidad 0,02 g para lecturas ≤ 200 g y de 0,01 % para lecturas > 200 g

Malla No. 200

Horno que pueda mantener una temperatura uniforme de 110 °C ± 5 °C

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



θ_σ variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I) 0,15

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

$\% \text{ Mat más fino} = f(W_r, W_t, \theta_\sigma)$; $\% \text{ Mat más fino} = \frac{W_t - W_r}{W_t} \times 100 + \theta_\sigma$

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

$$u_{\%Mat\ más\ fino} = \left[\left(\frac{\partial \%Mat\ más\ fino}{\partial W_r} * u_{W_r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%Mat\ más\ fino}{\partial W_t} u_{W_t} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%Mat\ más\ fino}{\partial \theta_\sigma} u_{\theta_\sigma} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d \% Mat\ más\ fino}{d W_r} = - \frac{1}{W_t} \times 100 \qquad - \frac{1}{W_t} \times 100 = - \frac{1}{375,44} \times 100 = -0,266354$$

$$\frac{d \% Mat\ más\ fino}{d W_t} = \frac{W_r}{W_t^2} \times 100 \qquad \frac{W_r}{W_t^2} \times 100 = \frac{76,37}{375,44^2} \times 100 = 0,054180$$

$$\frac{d \% Mat\ más\ fino}{d \theta_\sigma} = 1 \qquad 1$$

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

$$u_{W_r} = \left[\left(\frac{0,01}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{0,02}{\sqrt{3}} \right)^2 + (0,003)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,022072 \qquad \text{Ver Anexo X.II}$$

$$u_{W_t} = \left[\left(\frac{0,01}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{375,44 * 0,0001}{\sqrt{3}} \right)^2 + 0,003^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,012275 \qquad \text{Ver Anexo X.II}$$

$$\theta_\sigma = 0,150 \qquad \text{Ver Anexo X.I}$$

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

$$u_{\%Mat\ más\ fino} = \left[(-0,266354 * 0,022072)^2 + (0,054180 * 0,012275)^2 + (1 * 0,15)^2 \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$u_{\%Mat\ más\ fino} = 0,150117 \quad \%$$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

$$U_{\%Mat\ más\ fino} = \frac{0,150117^4}{\frac{-0,266354^4}{\infty} + \frac{0,054180^4}{\infty} + \frac{1^4}{\infty}} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$u_{\%Mat\ más\ fino} = 0,150117 * 2 = 0,300233 \quad \% \quad ; \quad k = t_{95,45}^{\infty} = 2,00$$

Paso 10. Reporte de resultados.

% Mat más fino = 79,7 % ± 0,3 %
--

Presupuesto de Incertidumbre

FV	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$		u_{x_i}	u_{Y/x_i}	
∂W_r	$\frac{\partial \% Mat\ más\ fino}{\partial W_r} =$	-0,266354	0,022072	-0,005879	
∂W_t	$\frac{\partial \% Mat\ más\ fino}{\partial W_t} =$	0,054180	0,012275	0,000665	
$\partial \theta_{\sigma}$	$\frac{\partial \% Mat\ más\ fino}{\partial \theta_{\sigma}} =$	1	0,150000	0,150000	
			$u_{\%Mat\ más\ fino} =$	0,150117	
			$U =$	∞	
			$k =$	2,00	Unidades
			$U_{\%Mat\ más\ fino} =$	0,3	%

Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos, mediante tamices.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

Variables: $W_{ret} = 174,1 \text{ g}$; $W_{total} = 1589,3 \text{ g}$ (malla de 3/4 in)

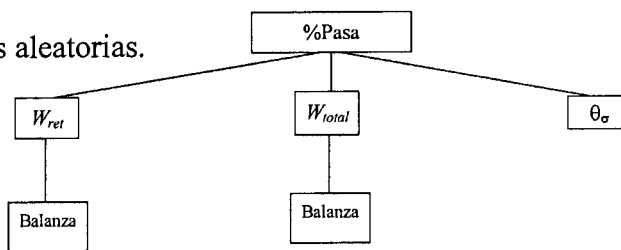
Fórmula: $\%Pasa = \left(1 - \frac{W_{ret}}{W_{total}}\right) \times 100$; $\%Pasa = \left(1 - \frac{174,1}{1589,3}\right) \times 100 = 89,0 \%$

Equipo: La balanza utilizada es de funcionamiento no automático y de lectura electrónica con resolución de 0,1 g. Los errores del instrumento conocidos por la calibración son:

Linealidad: 1 g para lecturas $\leq 10\,000 \text{ g}$ y de 0,1 % para lecturas $> 10\,000 \text{ g}$

Malla (diferentes aberturas)

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



θ_σ variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I) 0,81

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

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

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

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

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d \% Pasa}{dW_{ret}} = -\frac{1}{W_{total}} \times 100 \qquad -\frac{1}{W_{total}} \times 100 = -\frac{1}{1589,30} \times 100 = -0,062921$$

$$\frac{d \% Pasa}{dW_{total}} = -\frac{W_{ret}}{W_{total}^2} \times 100 \qquad -\frac{W_{ret}}{W_{total}^2} \times 100 = \frac{174,10}{1589,30^2} \times 100 = -0,006893$$

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

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

$$u_{W_{ret}} = \left[\left(\frac{0,1}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 + (0,15)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,597216 \qquad \text{Ver Anexo X.II}$$

$$u_{W_{total}} = \left[\left(\frac{0,1}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 + (0,15)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,597216 \qquad \text{Ver Anexo X.II}$$

$$\theta_{\sigma} = 0,810 \qquad \text{Ver Anexo X.I}$$

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

$$u_{\%Pasa} = \left[(-0,062921 * 0,597216)^2 + (-0,006893 * 0,597216)^2 + (1 * 0,810)^2 \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$u_{\%Pasa} = 0,810882 \quad \%$$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

$$U_{\%Pasa} = \frac{0,810882^4}{\frac{0,062921^4}{\infty} + \frac{0,006893^4}{\infty} + \frac{1^4}{\infty}} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{\%Pasa} = 0,810882 * 2 = 1,621763 \quad \% \quad ; \quad k = t_{95,45}^{\infty} = 2,00$$

Paso 10. Reporte de resultados.

$$\% \text{ Pasa}_{\text{malla } 3/4} = 89,0 \% \pm 1,6 \%$$

Presupuesto de Incertidumbre

FV	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$		u_{xi}	$u_{Y/xi}$	
∂W_{ret}	$\frac{\partial \% \text{ Pasa}}{\partial W_{ret}} =$	-0,062921	0,597216	-0,037577	
∂W_{total}	$\frac{\partial \% \text{ Pasa}}{\partial W_{total}} =$	-0,006893	0,597216	-0,004116	
$\partial \theta_{\sigma}$	$\frac{\partial \% \text{ Pasa}}{\partial \theta_{\sigma}} =$	1	0,810	0,810000	
			$u_{\%Pasa} =$	0,810882	
			$v =$	∞	
			$k =$	2,00	Unidades
			$U_{\%Pasa} =$	1,6	%

Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos.

a) Límite Líquido.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

Variables:

Número golpes	% w	$u_{w(\%)}$
34	65,60	1,772816
28	66,66	1,800763
26	66,50	1,799435
20	67,70	1,827601
15	69,10	1,866359
$\overline{u_{w(\%)}} =$		1,813395

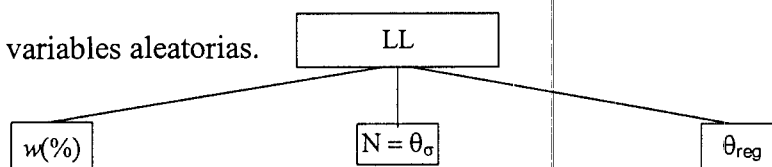
Equipo:

La balanza utilizada es de funcionamiento no automático y de lectura electrónica con resolución de 0,01 g. Los errores del instrumento conocidos por la calibración son:

Linealidad 0,02 g para lecturas ≤ 200 g y de 0,01 % para lecturas > 200 g

Excentricidad 0,01 g

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



θ_σ variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I)

0,70

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

$$LL = f(w_{(\%)}, \theta_\sigma, \theta_{reg}) \quad ; \quad LL = w_{(\%)} + \theta_\sigma + \theta_{reg}$$

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

$$u_{LL} = \left[\left(\frac{\partial LL}{\partial w_{(\%)}} u_{w_{(\%)}} \right)^2 + \left(\frac{\partial LL}{\partial \theta_{\sigma}} u_{\theta_{\sigma}} \right)^2 + \left(\frac{\partial LL}{\partial \theta_{reg}} u_{\theta_{reg}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{dLL}{dw_{(\%)}} = 1$$

$$\frac{dLL}{d\theta_{\sigma}} = 1$$

$$\frac{dLL}{d\theta_{reg}} = 1$$

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

$u_{w_{(\%)}}$	=	1,81339	Incertidumbre promedio, resultado del contenido de agua
$u_{\theta_{\sigma}}$	=	0,70000	Ver Anexo X.I
u_{reg}	=	0,41225	Ver Anexo X.IV

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

$$u_{LL} = \left[(1 * 1,81339)^2 + (1 * 0,70)^2 + (1 * 0,41225)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1,987046 \quad \%$$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

$$v_{LL} = \frac{1,987046^4}{\frac{1,81339^4}{\infty} + \frac{0,70^4}{\infty} + \frac{0,41225^4}{\infty}} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{LL} = 1,987046 * 2 = 3,974092 \quad \% \quad ; \quad k = t_{95,45}^{\infty} = 2,00$$

Paso 10. Reporte de resultados.

$$LL = 67 \% \pm 4,0 \%$$

Presupuesto de Incertidumbre

FV	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$		u_{xi}	u_{Yxi}	
$\partial w (\%)$	$\frac{\partial LL}{\partial w (\%)} =$	1,0	1,813395	1,813395	
$\partial \theta_{\sigma}$	$\frac{\partial LL}{\partial \theta_{\sigma}} =$	1,0	0,700000	0,700000	
$\partial \theta_{reg}$	$\frac{\partial LL}{\partial \theta_{reg}} =$	1,0	0,412250	0,412250	
			$u_{LL} =$	1,987046	
			$\nu =$	∞	
			$k =$	2,00	Unidades
			$U_{LL} =$	4,0	%

b) Límite Plástico.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

Variables:

	% w	$u_{w(\%)}$
	23,4	0,632432
	24,6	0,665217
	24,0	0,649158
Promedio	24,0	0,648936

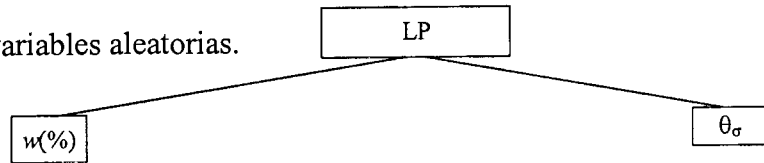
Equipo:

La balanza utilizada es de funcionamiento no automático y de lectura electrónica con resolución de 0,01 g. Los errores del instrumento conocidos por la calibración son:

Linealidad 0,02 g para lecturas ≤ 200 g y de 0,01 % para lecturas > 200 g

Excentricidad 0,01 g

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



θ_σ variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I)

0,50

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

$$LP = f(w_{(\%)}, \theta_\sigma) \quad ; \quad LP = w_{(\%)} + \theta_\sigma$$

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

$$u_{LP} = \left[\left(\frac{\partial LP}{\partial w_{(\%)}} u_{w_{(\%)}} \right)^2 + \left(\frac{\partial LP}{\partial \theta_\sigma} u_{\theta_\sigma} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{dLP}{dw_{(\%)}} = 1$$

$$\frac{dLP}{d\theta_\sigma} = 1$$

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

$$u_{w_{(\%)}} = 0,648936$$

$$u_{\theta_\sigma} = 0,500000 \quad \text{Ver Anexo X.I}$$

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

$$u_{LP} = \left[(1 * 0,648936)^2 + (1 * 0,50)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,819218 \quad \% \quad \text{Tipo B}$$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

$$U_{LP} = \frac{0,819218^4}{\frac{0,752378^4}{\infty} + \frac{0,50^4}{\infty}} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{LP} = 0,819218 * 2 = 1,6 \quad \% \quad ; \quad k = t_{95,45}^{\infty} = 2,00$$

Paso 10. Reporte de resultados.

$$LP = 24 \% \pm 1,6 \%$$

Presupuesto de Incertidumbre

FV	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$		u_{xi}	$u_{Y/xi}$
$\partial w_{(\%)}$	$\frac{\partial LP}{\partial w_{(\%)}} =$	1,0	0,648936	0,648936
$\partial \theta_{\sigma}$	$\frac{\partial LP}{\partial \theta_{\sigma}} =$	1,0	0,500000	0,500000

Tipo B $u_{LP} = 0,819218$

$U = \infty$

Tipo A $u_{LP} = 0,013589256$

$k = 2,00$

Unidades

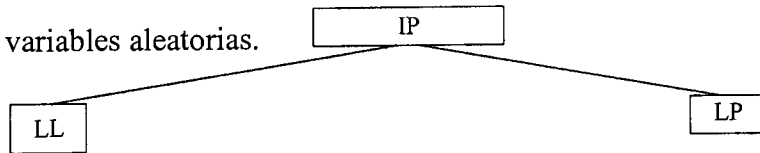
$U_{LP} = 1,6 \%$

c) Índice Plástico.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

Variables: $LL = 67,0 \%$ $LP = 24,0 \%$
Fórmula: $IP = LL - LP$ $IP = 67,0 - 24,0 = 43,0 \%$

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



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

$$IP = f(LL, LP) ; \quad IP = LL - LP$$

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

$$u_{IP} = \left[\left(\frac{\partial IP}{\partial LL} u_{LL} \right)^2 + \left(\frac{\partial IP}{\partial LP} u_{LP} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{dIP}{dLL} = 1 \quad \frac{dIP}{dLP} = -1$$

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

$u_{LL} = 1,987046 \%$ Ver 5.4 a)
 $u_{LP} = 0,819330 \%$ Ver 5.4 b)

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

$$u_{IP} = \left[(1 * 1,987046)^2 + (1 * 0,819330)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 2,149338 \quad \%$$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

$$v_{IP} = \frac{2,149338^4}{\frac{1,987046^4}{\infty} + \frac{0,819330^4}{\infty}} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{IP} = 2 * 2,149338 = 4,3 \quad \% \quad ; \quad k = t_{95,45}^{\infty} = 2,00$$

Paso 10. Reporte de resultados.

IP = 4,3 % ± 4,3 %

Presupuesto de Incertidumbre

FV	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$		u_{xi}	$u_{Y/xi}$	
∂LL	$\frac{\partial IP}{\partial LL} =$	1,0	1,987046	1,987046	
∂LP	$\frac{\partial IP}{\partial LP} =$	1,0	0,819330	0,819330	
			$u_{IP} =$	2,149338	
			$v =$	∞	
			$k =$	2,00	Unidades
			$U_{IP} =$	4,3	%

Determinación de la gravedad específica de los suelos por el método del picnómetro con agua.

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

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición. $M_{\rho_{a,t}}$

Variables: $M_p = 182,18 \text{ g}$; $V_p = 499,53 \text{ ml}$;
 $\rho_{a,t} = 0,9983 \text{ g/ml}$

Fórmula: $M_{\rho_{a,t}} = M_p + (V_p * \rho_{a,t})$;
 $M_{\rho_{a,t}} = 182,18 + (499,53 * 0,99827) = 680,846 \text{ g}$

Equipo: La balanza utilizada es de funcionamiento no automático y de lectura electrónica con resolución de 0,01 g. Los errores del instrumento conocidos por la calibración son:

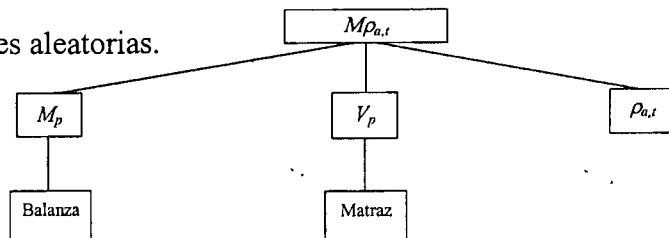
Linealidad 0,02 g para lecturas $\leq 200 \text{ g}$ y de 0,01 % para lecturas $> 200 \text{ g}$

Excentricidad 0,01 g

Termómetro con resolución de lectura de 0,1 °C

Matraz calibrado con aproximación de 1 ml

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



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

$$M_{\rho_{a,t}} = f(M_p, V_p, \rho_{a,t}) \quad ; \quad M_{\rho_{a,t}} = M_p + (V_p \times \rho_{a,t})$$

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

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

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

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

1

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

$$\rho_{a,t} = 0,99827$$

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

$$V_p = 499,53$$

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

La incertidumbre debida a la determinación del peso y volumen del matraz en el proceso de verificación es:

$$Prom_{M_p} = 182,184$$

$$\sigma = 0,005477$$

$$u_{M_p} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,005477}{\sqrt{5}} = 0,002449$$

$$Prom_{V_p} = 499,534$$

$$\sigma = 0,039749$$

$$u_{V_p} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,039749}{\sqrt{5}} = 0,017776$$

La incertidumbre del peso y volumen del matraz debida a las variables que influyen en en su determinación:

$$u_{M_p} = \left[\left(\frac{0,01}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{0,02}{\sqrt{3}} \right)^2 + 0,003^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,012275 \quad \text{Ver Anexo X.II}$$

$$u_{V_p} = \left[\left(\frac{0,01}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{499,57 * 0,0001}{\sqrt{3}} \right)^2 + 0,003^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,029139 \quad \text{Ver Anexo X.II}$$

La incertidumbre asociada para cada variable es:

$$u_{M_p} = \left[(0,002449)^2 + (0,012275)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,012517$$

$$u_{V_p} = \left[(0,017776)^2 + (0,029139)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,034134$$

$$u_{\rho_{a,t}} = 0,00004$$

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

$$u_{M_{\rho_{a,t}}} = \left[(1 * 0,012517)^2 + (0,99827 * 0,034134)^2 + (499,53 * 0,00004)^2 \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$u_{M_{\rho_{a,t}}} = 0,037364$$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

$$U_{M_{\rho_{a,t}}} = \frac{0,037141^4}{\frac{0,017944^4}{\infty} + \frac{0,035324^4}{\infty} + \frac{0,00004^4}{\infty}} = \infty$$

b) Gravedad específica del suelo a la temperatura de ensayo.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

Variables: $M_{\rho a,t} = 680,85 \text{ g}$; $M_s = 56,12 \text{ g}$; $M_{\rho ws,t} = 715,4 \text{ g}$

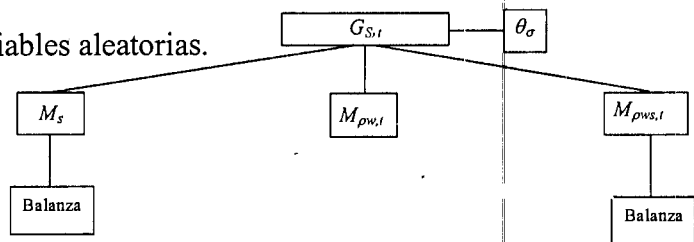
Fórmula: $G_{S,t} = \frac{M_s}{M_{\rho a,t} + M_s - M_{\rho ws,t}}$; $G_{S,t} = \frac{56,12}{680,89 + 56,12 - 715,35} = 2,596$

Equipo: La balanza utilizada es de funcionamiento no automático y de lectura electrónica con resolución de 0,01 g. Los errores del instrumento conocidos por la calibración son:

Linealidad 0,02 g para lecturas $\leq 200 \text{ g}$ y de 0,01 % para lecturas $> 200 \text{ g}$

Excentricidad 0,01 g

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



θ_σ variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I)

0,027

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

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

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

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

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{dG_{S,t}}{dM_s} = \frac{M_{\rho a,t} - M_{\rho vs,t}}{(M_{\rho a,t} + M_s - M_{\rho vs,t})^2}$$

$$\frac{dG_{S,t}}{dM_s} = \frac{680,89 - 715,35}{(680,89 + 56,12 - 715,35)^2} = -0,073846$$

$$\frac{dG_{S,t}}{dM_{\rho a,t}} = \frac{-M_s}{(M_{\rho a,t} + M_s - M_{\rho vs,t})^2}$$

$$\frac{dG_{S,t}}{dM_{\rho a,t}} = \frac{-56,12}{(680,89 + 56,12 - 715,35)^2} = -0,120109$$

$$\frac{dG_{S,t}}{dM_{\rho vs,t}} = \frac{M_s}{(M_{\rho a,t} + M_s - M_{\rho vs,t})^2}$$

$$\frac{dG_{S,t}}{dM_{\rho vs,t}} = \frac{56,12}{(680,89 + 56,12 - 715,35)^2} = 0,120109$$

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

1

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

$$u_{M_s} = \left[\left(\frac{0,01}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{0,02}{\sqrt{3}} \right)^2 + 0,003^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,012275 \quad \text{Ver Anexo X.II}$$

$$u_{M_{\rho a,t}} = 0,037364 \quad \text{Ver inciso a)}$$

$$u_{M_{\rho vs,t}} = \left[\left(\frac{0,01}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{715,35 * 0,0001}{\sqrt{3}} \right)^2 + 0,003^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,041510 \quad \text{Ver Anexo X.II}$$

$$u_{\theta_\sigma} = 0,027 \quad \text{Ver Anexo X.I}$$

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

$$u_{G_{S,t}} = \left[(-0,073846 * 0,012275)^2 + (-0,120109 * 0,037141)^2 + (0,120109 * 0,041510)^2 + (1 * 0,027)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,027836$$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

$$v_{G_{S,t}} = \frac{0,027836^4}{\frac{0,015275^4}{\infty} + \frac{0,039511^4}{\infty} + \frac{0,042494^4}{\infty} + \frac{0,027^4}{\infty}} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{G_{s,t}} = 0,027836 * 2 = 0,055671 \quad ; \quad k = t_{95,45}^{\infty} = 2,00$$

Paso 10. Reporte de resultados.

$G_{s,t} = 2,596 \pm 0,056 \%$

Presupuesto de Incertidumbre

FV	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$		u_{xi}	$u_{Y/xi}$
∂M_s	$\frac{\partial G_{s,t}}{\partial M_s} =$	-0,073846	0,012275	-0,000906
$\partial M_{\rho a}$	$\frac{\partial G_{s,t}}{\partial M_{\rho a,t}} =$	-0,120109	0,037364	-0,004488
$M_{\rho ws}$	$\frac{\partial G_{s,t}}{\partial M_{\rho ws,t}} =$	0,120109	0,041510	0,004986
$\partial \theta_{\sigma}$	$\frac{\partial G_{s,t}}{\partial \theta_{\sigma}} =$	1,0	0,027000	0,027000
			$u_{G_{s,t}} =$	0,027836
			$\nu =$	∞
			$k =$	2,00
			$U_{G_{s,t}} =$	0,056

Determinación de las características de compactación de un suelo con una energía de compactación de 600 kN·m/m³.

a) Peso específico húmedo del suelo compactado.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

Variables:

$$M_t = 3,2045 \text{ kg} \quad ; \quad M_{md} = 1,7725 \text{ kg}$$

$$M_t = 0,0314 \text{ kN} \quad ; \quad M_{md} = 0,0174 \text{ kN}$$

$$V = 0,000945 \text{ m}^3$$

Fórmula:

$$\gamma_m = \frac{M_t - M_{md}}{1000 * V} \quad ; \quad \gamma_m = \frac{3,2045 - 1,7725}{1000 * 0,0009447} = 1,52 \text{ Mg/m}^3$$

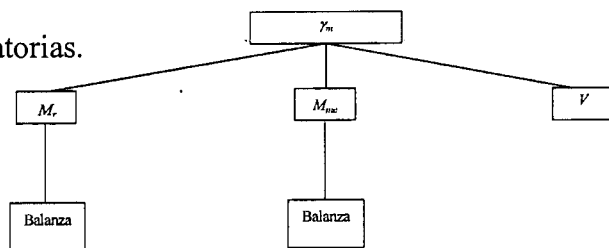
$$\gamma_m = \frac{0,0314 - 0,0174}{0,0009447} = 14,87 \text{ kN/m}^3$$

Equipo: La balanza utilizada es de funcionamiento no automático y de lectura electrónica con resolución de 0,1 g. Los errores del instrumento conocidos por la calibración son:

Linealidad 1 g para lecturas $\leq 10\,000$ g y de 0,1 % para lecturas $> 10\,000$ g

Excentricidad: 1 g

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



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

$$\gamma_m = f(M_t, M_{md}, V) \quad ; \quad \gamma_m = \frac{M_t - M_{md}}{1000 * V}$$

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

$$u_{\gamma_m} = \left[\left(\frac{\partial \gamma_m}{\partial M_t} u_{M_t} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_m}{\partial M_{md}} u_{M_{md}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_m}{\partial V} u_V \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d\gamma_m}{dM_t} = \frac{1}{1000V} \qquad \frac{1}{1000 * V} = \frac{1}{1000 * 0,0009447} = 1,058537$$

$$\frac{d\gamma_m}{dM_{md}} = -\frac{1}{1000V} \qquad -\frac{1}{1000 * V} = -\frac{1}{1000 * 0,0009447} = -1,058537$$

$$\frac{d\gamma_m}{dV} = \frac{M_{md} - M_t}{V^2} \qquad \frac{M_{md} - M_t}{1000 * V^2} = \frac{3,2045 - 1,7725}{1000 * 0,0009447^2} = -1604,5571$$

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

$$u_{M_t} = \left[\left(\frac{1 \times 10^{-7}}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{1 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}} \right)^2 + (1,5 \times 10^{-7})^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,0000006 \quad \text{Ver Anexo X.II}$$

$$u_{M_{md}} = \left[\left(\frac{1 \times 10^{-7}}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{1 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}} \right)^2 + (1,5 \times 10^{-7})^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,0000006 \quad \text{Ver Anexo X.II}$$

$$V = 0,5 \% * V = 4,7235E-06 \quad \text{Ver Anexo X.I}$$

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

$$u_{\gamma_m} = \left[(1,058537 * 0,0000006)^2 + (-1,058437 * 0,0000006)^2 + (-1604,5571 * 0,000004)^2 \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$u_{\gamma_m} = 0,007579 \quad \text{Mg/m}^3 = 0,074351 \quad \text{kN/m}^3$$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

$$\nu_{\gamma_m} = \frac{0,007579^4}{\frac{1^4}{\infty} + \frac{1^4}{\infty} + \frac{0,000004^4}{\infty}} = \infty$$

b) Peso específico seco del suelo compactado.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

Variables:

$$\gamma_m = 1,515825 \quad \text{Mg/m}^3 \quad w(\%) = 21,3 \%$$

$$\gamma_m = 14,870245 \quad \text{kN/m}^3$$

Fórmula:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \frac{w(\%)}{100}}$$

$$\gamma_d = \frac{1,515825}{1 + \frac{21,3}{100}} = 1,25 \quad \text{Mg/m}^3$$

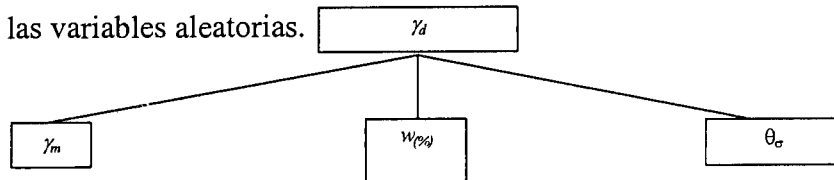
$$\gamma_d = \frac{14,870245}{1 + \frac{21,3}{100}} = 12,26 \quad \text{kN/m}^3$$

Equipo: La balanza utilizada es de funcionamiento no automático y de lectura electrónica con resolución de 0,1 g. Los errores del instrumento conocidos por la calibración son:

Linealidad 1 g para lecturas $\leq 10\,000$ g y de 0,1 % para lecturas $> 10\,000$ g

Excentricidad: 1 g

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



θ_σ variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I)

0,0090	Mg/m ³
0,08	kN/m ³

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

$$\gamma_d = f(\gamma_m, w(\%), \theta_\sigma) \quad ; \quad \gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \frac{w(\%)}{100}} + \theta_\sigma$$

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

$$u_{\gamma_d} = \left[\left(\frac{\partial \gamma_d}{\partial \gamma_m} u_{\gamma_m} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_d}{\partial w(\%)} u_{w(\%)} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_d}{\partial \theta_\sigma} u_{\theta_\sigma} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$\frac{d\gamma_d}{d\gamma_m} = \frac{1}{1 + \frac{w(\%)}{100}}$	$\frac{1}{1 + \frac{w(\%)}{100}} = \frac{1}{1 + \frac{21,3}{100}} = 0,824402$
---	---

$\frac{d\gamma_d}{dw(\%)} = \frac{\gamma_m}{100 \times \left[1 + \frac{w(\%)}{100} \right]^2}$	$= \frac{\gamma_m}{100 \times \left[1 + \frac{w(\%)}{100} \right]^2} = \frac{1,515825}{100 \times \left[1 + \frac{21,3}{100} \right]^2} = -0,010302$
---	--

$\frac{d\gamma_d}{d\theta_\sigma} = 1$	1
--	---

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

$u_{\gamma_m} = 0,007579 \quad \text{Mg/m}^3 \quad \text{Ver inciso a)}$

$u_{w(\%)} = 0,576365$

$u_{\sigma} = 0,009 \quad \text{Ver Anexo X.I}$

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

$$u_{\gamma_d} = \left[(0,824402 * 0,007579)^2 + (-0,010302 * 0,576365)^2 + (1 * 0,009)^2 \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$u_{\gamma_d} = 0,012462 \quad \text{Mg/m}^3 = 0,122251 \quad \text{kN/m}^3$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

$$v_{\gamma_d} = \frac{0,012462^4}{\frac{0,007579^4}{\infty} + \frac{0,576365^4}{\infty} + \frac{0,090^4}{\infty}} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{\gamma_d} = 0,012462 * 2 = 0,024924 \quad \text{Mg/m}^3 = 0,244502 \quad \text{kN/m}^3$$

$$k = t_{95,45}^{\infty} = 2,00$$

Paso 10. Reporte de resultados.

$\gamma_d =$	12,26 kN/m³	\pm	0,24 kN/m³
$\gamma_d =$	1,25 Mg/m³	\pm	0,02 Mg/m³

Presupuesto de Incertidumbre

FV	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$	u_{xi}	$u_{Y/xi}$
$\partial \gamma_m$	$\frac{\partial \gamma_d}{\partial \gamma_m} =$	0,824402	0,007579
∂w (%)	$\frac{\partial \gamma_d}{\partial w} =$	-0,010302	0,576365
$\partial \theta_{\sigma}$	$\frac{\partial \gamma_d}{\partial \theta_{\sigma}} =$	1,0	0,009000
		$u_{\gamma_d} =$	0,012462
		$v =$	∞
		$k =$	2,00
			Unidades
		$U_{\gamma_d} =$	0,24 kN/m³
		$U_{\gamma_d} =$	0,02 Mg/m³

Determinación de la resistencia a la degradación de agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión en la Máquina de los Ángeles.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

Variables: $W_{ini} = 5006 \text{ g}$; $W_{fin} = 4187 \text{ g}$

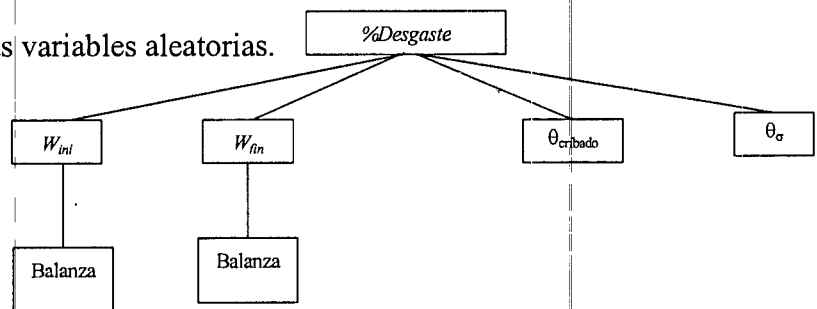
Fórmula: $\% \text{ Desgaste} = \frac{W_{ini} - W_{fin}}{W_{ini}} \times 100$

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{5006 - 4187}{5006} \times 100 = 16 \quad \%$$

Equipo: La balanza utilizada es de funcionamiento no automático y de lectura manual con resolución de 1 g. Los errores del instrumento conocidos por la calibración son:

Linealidad: 2 g para lecturas $\leq 2000 \text{ g}$ y de 0,1 % para lecturas $> 2000 \text{ g}$

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



Cv Coeficiente de variabilidad (ver Anexo X.I) 2,0 %

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

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

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

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

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

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d\%Desgaste}{dW_{ini}} = \frac{W_{fin}}{W_{ini}^2} \times 100 \quad \frac{4187}{5006^2} \times 100 = \quad 0,016708$$

$$\frac{d\%Desgaste}{dW_{fin}} = -\frac{1}{W_{ini}} \times 100 \quad -\frac{1}{5006} \times 100 = \quad -0,019976$$

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

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

$$u_{W_{ini}} = \left[\left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)^2 + \left(\frac{5006 * 0,001}{\sqrt{3}} \right)^2 + 0,15^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \quad 2,922758 \quad \text{Ver Anexo X.II}$$

$$u_{W_{fin}} = \left[\left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)^2 + \left(\frac{4187 * 0,001}{\sqrt{3}} \right)^2 + 0,15^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \quad 2,456181 \quad \text{Ver Anexo X.II}$$

$$u_{\theta_{\sigma}} = 16,360368 * 0,02 = \quad 0,327207$$

$$u_{\theta_{cribado}} = \quad 0,96 \quad \text{Ver Anexo X.I}$$

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

$$u_{\%Desgaste} = \left[(0,016708 * 2,922758)^2 + (0,019976 * 2,456181)^2 + (1 * 0,327207)^2 + (1 * 0,96)^2 \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$u_{\%Desgaste} = \quad 1,016591$$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

$$U_{\%Desgaste} = \frac{1,016591^4}{\frac{2,918906^4}{\infty} + \frac{2,451596^4}{\infty} + \frac{0,327207^4}{\infty} + \frac{0,96^4}{\infty}} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{\%Desgaste} = 1,016591 * 2 = 2,033181 \quad \% \quad ; \quad k = t_{95,45}^{\infty} = 2,00$$

Paso 10. Reporte de resultados.

%Desgaste =	16 %	±	2,03 %
--------------------	-------------	----------	---------------

Presupuesto de Incertidumbre

FV	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$		u_{xi}	$u_{Y/xi}$	
∂W_{ini}	$\frac{\partial \% Desgaste}{\partial W_{ini}} =$	0,016708	2,922758	0,048833	
∂W_{fin}	$\frac{\partial \% Desgaste}{\partial W_{fin}} =$	-0,019976	2,456181	-0,049065	
θ_{cribad}	$\frac{\partial \% Desgaste}{\partial \theta_{cribado}} =$	1,0	0,327207	0,327207	
$\partial \theta_{\sigma}$	$\frac{\partial \% Desgaste}{\partial \theta_{\sigma}} =$	1,0	0,960000	0,960000	
			$u_{\%Desgaste} =$	1,02	
			$U =$	∞	
			$k =$	2,00	Unidades
			$U_{\%Desgaste} =$	2,03	%

Determinación de partículas planas, alargadas o planas y alargadas de agregado grueso.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

Variables: $W_{part} = 35 \text{ g}$; $W_{total} = 1256 \text{ g}$

Fórmula: $\% \text{ Partículas} = \frac{W_{part}}{W_{total}} \times 100$

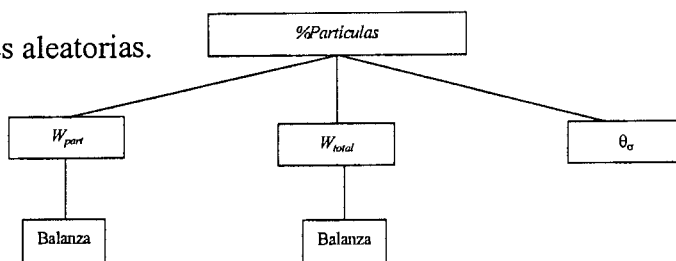
$$\% \text{ Partículas} = \frac{35}{1256} \times 100 = 2,8 \%$$

Equipo: Calibrador de forma de la partícula

La balanza utilizada es de funcionamiento no automático y de lectura manual con resolución de 1 g. Los errores del instrumento conocidos por la calibración son:

Linealidad: 2 g para lecturas $\leq 2\,000 \text{ g}$ y de 0,1 % para lecturas $> 2\,000 \text{ g}$

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



θ_{σ} variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I) 51,2 %

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

$$\% \text{ Partículas} = f(W_{part}, W_{total}, \theta_{\sigma}) ; \quad \% \text{ Partículas} = \frac{W_{part}}{W_{total}} \times 100 + \theta_{\sigma}$$

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

$$u_{\% \text{ Partículas}} = \left[\left(\frac{\partial \% \text{ Partículas}}{\partial W_{part}} u_{W_{part}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \% \text{ Partículas}}{\partial W_{total}} u_{W_{total}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \% \text{ Partículas}}{\partial \theta_{\sigma}} u_{\theta_{\sigma}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{d\% \text{ Partículas}}{dW_{part}} = \frac{1}{W_{total}} \times 100 \qquad \frac{1}{W_{total}} \times 100 = \frac{1}{1256} \times 100 = 0,079618$$

$$\frac{d\% \text{ Partículas}}{dW_{total}} = -\frac{W_{part}}{W_{total}^2} \times 100 \qquad -\frac{W_{part}}{W_{total}^2} = -\frac{35}{1256^2} \times 100 = 0,002219$$

$$\frac{d\% \text{ Partículas}}{d\theta_{\sigma}} = 1 \qquad 1$$

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

$$u_{W_{part}} = \left[\left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)^2 + \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^2 + 0,15^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1,233896 \qquad \text{Ver Anexo X.II}$$

$$u_{W_{total}} = \left[\left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)^2 + \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^2 + 0,15^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1,233896 \qquad \text{Ver Anexo X.II}$$

$$u_{\theta_{\sigma}} = 0,512 \qquad \text{Ver Anexo X.I}$$

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

$$u_{\% \text{ Partículas}} = \left[(0,079618 * 1,233896)^2 + (0,002219 * 1,233896)^2 + (1 * 0,512)^2 \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$u_{\% \text{ Partículas}} = 0,521347 \quad \%$$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

$$v_{\% \text{ Partículas}} = \frac{0,521347^4}{\frac{1,224745^4}{\infty} + \frac{1,224745^4}{\infty} + \frac{0,512^4}{\infty}} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{\%Particulas} = 0,521347 * 2 = 1,042694 \quad \% \quad ; \quad k = t_{95,45}^{\infty} = 2,00$$

Paso 10. Reporte de resultados.

%Particulas =	3 %	±	1,04 %
----------------------	------------	----------	---------------

Presupuesto de Incertidumbre

FV	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$		u_{xi}	$u_{Y/xi}$	
∂W_{part}	$\frac{\partial \% Particulas}{\partial W_{part}} =$	0,079618	1,233896	0,098240	
∂W_{total}	$\frac{\partial \% Particulas}{\partial W_{total}} =$	0,002219	1,233896	0,002738	
$\partial \theta_{\sigma}$	$\frac{\partial \% Particulas}{\partial \theta_{\sigma}} =$	1,0	0,512000	0,512000	
			$u_{\%Particulas} =$	0,521347	
			$\nu =$	∞	
			$k =$	2,00	Unidades
			$U_{\%Particulas} =$	1,04	%

Determinación de equivalente de arena.

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

Variables: $L_{arena} = 3,6$; $L_{arcilla} = 4,7$

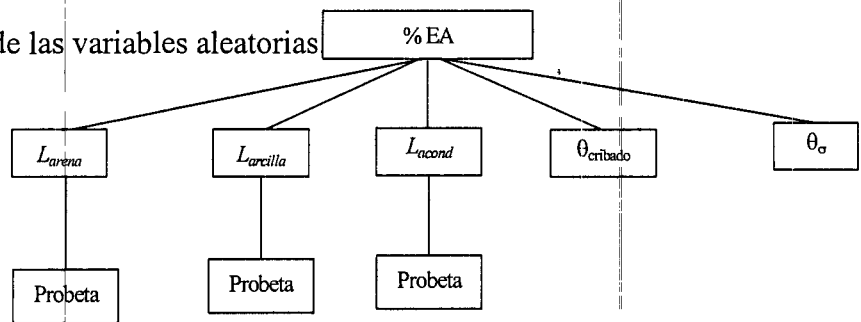
Fórmula: $\% EA = \frac{L_{arena}}{L_{arcilla}} \times 100$

$$\% EA = \frac{3,6}{4,7} \times 100 = 76,6 \%$$

Equipo: Probeta de equivalente de arena

Horno que pueda mantener una temperatura uniforme de $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Paso 2. Definición de las variables aleatorias



θ_σ variabilidad del método de ensayo (ver Anexo X.I)

2,9

Paso 3. Establecer relación la matemática que describa el 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 del mensurando.

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

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

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

$$\frac{1}{L_{arcilla}} \times 100 = \frac{1}{4,7} \times 100 = 21,276596$$

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

$$-\frac{L_{arena}}{L_{arcilla}^2} \times 100 = -\frac{3,6}{4,7^2} \times 100 = -16,296967$$

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

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

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

1

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

$$u_{L_{arena}} = \frac{0,1}{\sqrt{12}} =$$

$$0,028868$$

Ver Anexo X.III

$$u_{L_{arcilla}} = \frac{0,1}{\sqrt{12}} =$$

$$0,028868$$

Ver Anexo X.III

$$u_{L_{acond}} = \frac{0,1}{\sqrt{12}} =$$

$$0,028868$$

Ver Anexo X.III

$$u_{\theta_{cribado}} =$$

$$0,54$$

Ver Anexo X.I

$$u_{\theta_{\sigma}} =$$

$$2,9$$

Ver Anexo X.I

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

$$u_{\%EA} = \left[(21,276596 * 0,028868)^2 + (-16,296967 * 0,028868)^2 + (1 * 0,028868)^2 + (1 * 0,54)^2 + (1 * 2,9)^2 \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$u_{\%EA} = 3,049755$$

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

$$U_{\%EA} = \frac{0,944375^4}{\frac{0,028868^4}{\infty} + \frac{0,028868^4}{\infty} + \frac{0,028868^4}{\infty} + \frac{0,54^4}{\infty} + \frac{0,029^4}{\infty}} = \infty$$

Paso 9. Estimación de la incertidumbre expandida.

$$U_{\%EA} = 3,049755 * 2 = 6,099509 \quad \% \quad ; \quad k = t_{95,45}^{\infty} = 2,00$$

Paso 10. Reporte de resultados.

%EA =	77 %	±	6,1 %
--------------	-------------	----------	--------------

Presupuesto de Incertidumbre

FV	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$		u_{xi}	$u_{Y/xi}$
θL_{arena}	$\frac{\partial \%EA}{\partial L_{arena}} =$	21,276596	0,028868	0,614202
$L_{arcilla}$	$\frac{\partial \%EA}{\partial L_{arcilla}} =$	-16,296967	0,028868	-0,470453
θL_{acond}	$\frac{\partial \%EA}{\partial L_{acond}} =$	1,0	0,028868	0,028868
$\theta_{cribado}$	$\frac{\partial \%EA}{\partial \theta_{cribado}} =$	1,0	0,54	0,540
$\partial \theta_{\sigma}$	$\frac{\partial \%EA}{\partial \theta_{\sigma}} =$	1,0	2,9	2,90

$u_{\%EA} =$	3,049755
$U =$	∞
$k =$	2,00
	Unidades
$U_{\%EA} =$	6,1 %

VII. EVALUACIÓN DE LA CONFORMIDAD EN GEOTECNIA.

Concepto de evaluación de la conformidad.

El resultado de la medición tiene asociado un intervalo de valores en el cual, de acuerdo a la información disponible, se puede suponer que se encuentra el valor verdadero. Sin esta estimación, la verificación del cumplimiento con estándares puede proporcionar 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, las normas correspondientes proponen que cuando el intervalo $y \pm U$ se encuentra 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 se encuentra completamente fuera de la especificación. En caso ambiguo, las normas correspondientes no establecen una solución general, por lo que es responsabilidad del proveedor definir reglas y garantías especiales para estos casos (Figura VII.1).

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 VII.1).

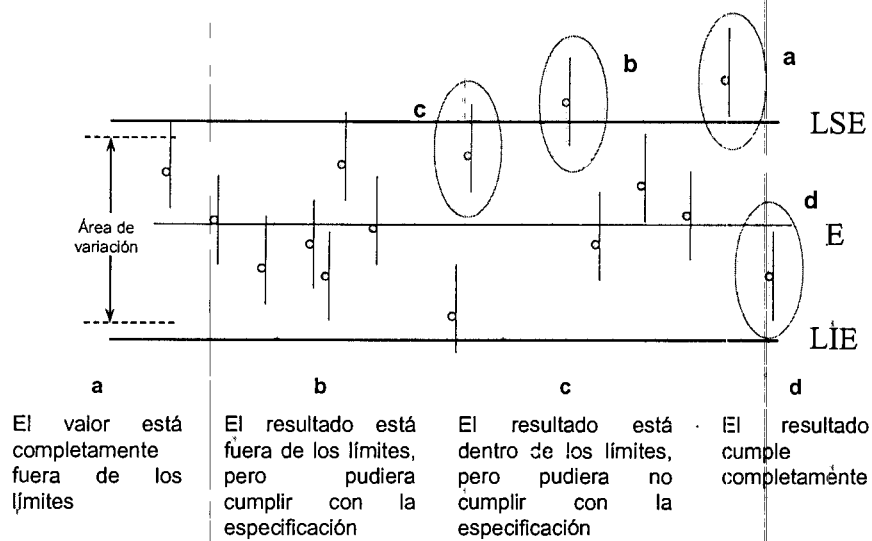


Figura VII.1 Esquema de Evaluación de la Conformidad e Incertidumbre.

Aplicación de la evaluación de la conformidad en Geotecnia.

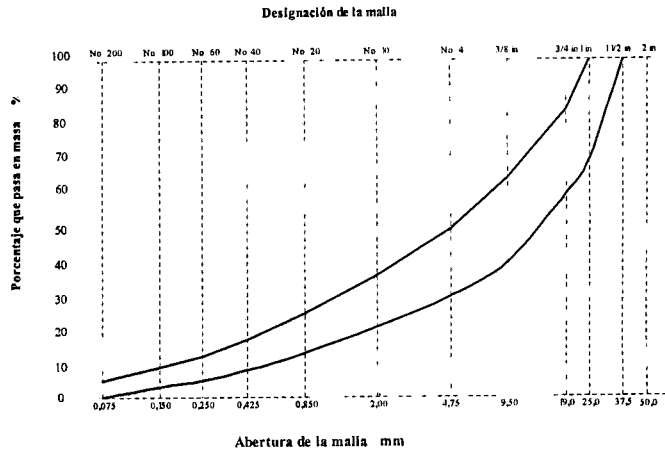
El caso de la aplicación de la incertidumbre en Geotecnia se vislumbra, por ahora, como algo intangible. Pero dentro de poco los laboratorios de ensayo tendrán que demostrar con evidencia contundente, clara y específica la calidad de su desempeño. Así mismo, podría dar la posibilidad de dar cierta flexibilidad a las normas y especificaciones que actualmente se aplican en el país.

El ejemplo se basará en los ensayos de granulometría, desgaste de los ángeles, determinación de partículas planas, alargadas o planas y alargadas, límite líquido, índice plástico y equivalente de arena. Los resultados se compararán con la normativa SCT Libro CMT Características de los materiales Parte 4 Materiales para pavimentos 02 Materiales para sub-bases y bases 002 Materiales para bases hidráulicas inciso D Requisitos de calidad para bases de pavimentos asfálticos y de pavimentos de concreto hidráulico. Para este análisis se tomará las características que debe cumplir una base que servirá para un pavimento con tratamiento asfáltico superficial.

Las especificaciones que marca la norma en cuanto a granulometría se presentan en la Figura VII.2.

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura	Designación	LSC	LIC
mm	in	%	
37,5	1 1/2	100	100
25,0	1	100	70
19,0	3/4	85	60
9,50	3/8	65	40
4,75	No. 4	50	30
2,00	No. 10	36	21
0,850	No. 20	25	13
0,425	No. 40	17	8
0,250	No. 60	12	5
0,150	No. 100	9	3
0,075	No. 200	5	0

Donde: LSC Límite Superior de Control
LIC Límite Inferior de Control



Donde: LSC y LIC son las tolerancias permitidas.

Figura VII.2 Zona granulométrica recomendable de los materiales para bases que sean cubiertas sólo con un tratamiento asfáltico superficial.

Las especificaciones que marca la norma para los ensayos desgaste de los ángulos y partículas planas, alargadas o planas y alargadas se presentan en la Tabla VII.1.

Tabla VII.1 Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos asfálticos.

Ensayo	LSC	LIC
Límite Líquido $LL_{\text{máximo}}$	25 %	0 %
Índice Plástico $IP_{\text{máximo}}$	6,0 %	0 %
Equivalente de arena $\%EA_{\text{mínimo}}$	100 %	50 %
$\% \text{Desgaste}_{\text{máximo}}$	30 %	0 %
$\% \text{Partículas}_{\text{máximo}}$	35 %	0 %

Los resultados del ensayo de granulometría se presentan en la Figura VII.3.

Malla		Resultados ensayo	
Designación in	Abertura mm	% Pasa \pm U	
2	50,0	100 %	\pm 0,0 %
1 1/2	37,5	99 %	\pm 0,6 %
1	25,0	87 %	\pm 1,6 %
3/4	19,0	78 %	\pm 4,5 %
3/8	9,50	57 %	\pm 2,6 %
No. 4	4,75	42 %	\pm 2,6 %
No. 10	2,00	29 %	\pm 2,6 %
No. 20	0,850	21 %	\pm 2,6 %
No. 40	0,425	13 %	\pm 2,0 %
No. 60	0,250	10 %	\pm 1,5 %
No. 100	0,150	8 %	\pm 1,5 %
No. 200	0,075	3 %	\pm 1,1 %

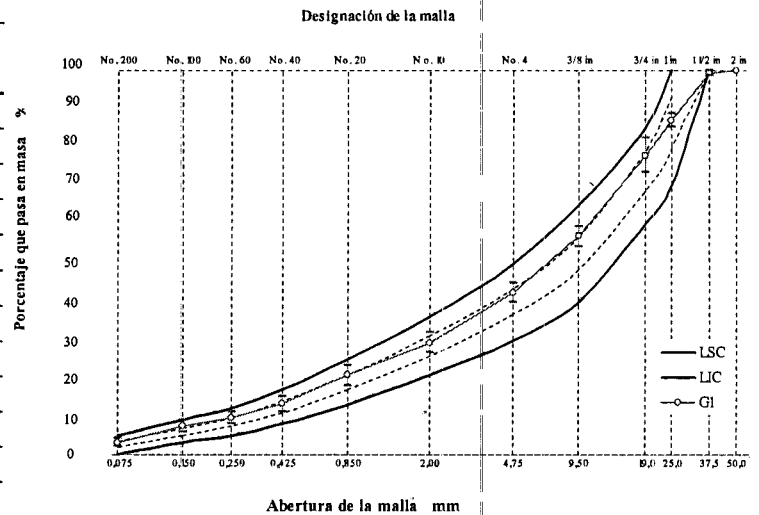


Figura VII.3 Granulometría 1.

Los resultados de los ensayos de límite plástico, índice plástico, equivalente de arena, desgaste de los ángulos y de partículas planas, alargadas o planas y alargadas se presentan en la Tabla VII.2.

Tabla VII.2 Resultados de los ensayos realizados.

Ensayo	Resultado	\pm U
Límite Líquido, $LL_{\text{máximo}}$	31 %	\pm 4,0 %
Índice Plástico, $IP_{\text{máximo}}$	13 %	\pm 4,4 %
Equivalente de arena, $\%EA_{\text{mínimo}}$	35 %	\pm 6,1 %
$\% \text{Desgaste}_{\text{máximo}}$	15,2 %	\pm 2,0 %
$\% \text{Partículas}_{\text{máximo}}$	22,0 %	\pm 1,0 %

Tabla VII.3 Comparación de los resultados de los ensayos realizados con la norma especificada.

Ensayo	Resultado	$\pm U$	Especificación
Límite Líquido, $LL_{\text{máximo}}$	31 %	$\pm 4,0 \%$	25 %
Índice Plástico, $IP_{\text{máximo}}$	13 %	$\pm 4,4 \%$	6,0 %
Equivalente de arena, $\%EA_{\text{mínimo}}$	35 %	$\pm 6,1 \%$	50 %
$\% \text{ Desgaste}_{\text{máximo}}$	15,2 %	$\pm 2,0 \%$	30 %
$\% \text{ Partículas}_{\text{máximo}}$	22,0 %	$\pm 1,0 \%$	35 %

Como se puede verse en la Figura VII.3 la granulometría cumple con las especificaciones, incluyendo su incertidumbre. En Tabla VII.3 se puede ver que los resultados de los ensayos de límite líquido, índice plástico y equivalente de arena no cumplen con normativa aún tomando en cuenta su incertidumbre. Para el caso de desgaste de los ángeles y de partículas planas, alargadas o planas y alargadas, los resultados cumplen con lo especificado.

Incertidumbre requerida, U_r , en Geotecnia.

El ejemplo que se presentará a continuación, pretende orientar a los clientes de los laboratorios de ensayo la conveniencia de solicitar que los resultados de los ensayos realizados indiquen de manera cuantitativa la calidad del resultado, de manera que pueda apreciarse la confiabilidad de la medición, es decir, solicitar la mejor estimación del valor de la propiedad evaluada y la estimación de la incertidumbre de ese valor.

Puede ser que las especificaciones de una norma sean estrictas, pero siempre son en razón de garantizar una calidad en los materiales y así asegurar una vida útil de proyecto de la estructura. Con esto en mente, los responsables de cumplir con esta normativa pueden exigir a su laboratorio de ensayo una calidad en sus ensayos, tal que la incertidumbre - reflejo de la calidad de las mediciones realizadas en laboratorio- defina dentro de normativa las propiedades analizadas. Esto quiere decir, que puede establecerse para los laboratorios

de ensayo una incertidumbre que siempre este dentro de los límites establecidos. Esto se puede apreciar de manera gráfica en la Figura VII.1 d).

Primero se divide la zona de control especificada. Para este caso, se dividió en tres la zona de control y se puede apreciar en la Figura VII.4.

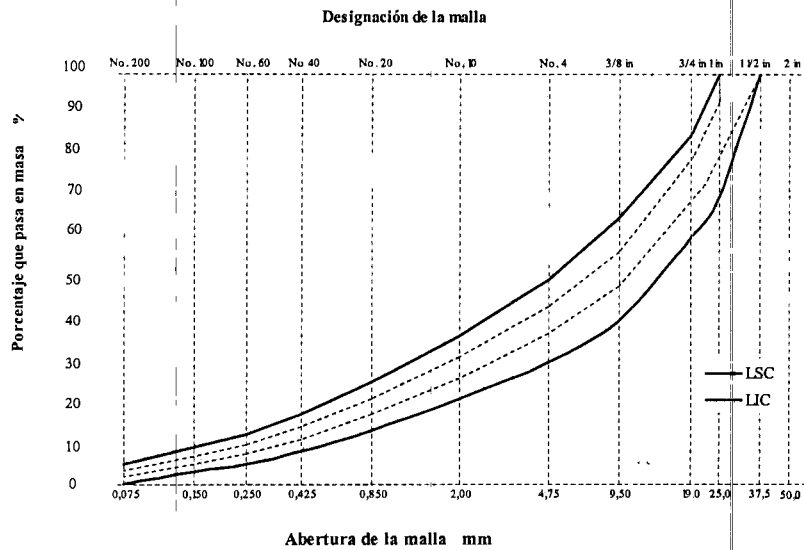


Figura VII.4 División de la zona de control.

Por lo que, se puede decir que la incertidumbre requerida se puede obtener con la siguiente fórmula:

$$U_r = \frac{LSC - LIC}{3 * f_r} \quad (\text{Ec. VII.1})$$

donde:

- | | | | |
|-------|----------------------------|-------|-------------------------------------|
| U_r | Incertidumbre requerida | f_r | Factor de riesgo |
| LSC | Límite superior de control | 3 | Divisiones de la gráfica de control |
| LIC | Límite inferior de control | | |

El factor de riesgo queda establecido de acuerdo al riesgo que se tenga en la utilización de los resultados de los ensayos. Es decir, si de por medio existe la posibilidad de pérdidas humanas, el factor de riesgo se establece como el número máximo. En la Tabla VII.4 se establecen dichos factores.

Tabla VII. 4 Factores de riesgo.

Riesgo	Factor de riesgo f_r
Peligro de vida.	10
Peligro de salud. Viola las disposiciones legales. Pérdida de clientes.	8
Pérdidas mayores. Reclamaciones serias de clientes.	6
Pérdidas moderadas. Reclamaciones de clientes.	4
Pérdidas leves.	2
No causa pérdidas.	1

El factor de riesgo $f_r = 2$ en donde se consideran pérdidas leves se aplicará en este ejemplo.

En la ec. VII.1 con la sustitución de los valores de los límites superior, inferior, de la división de la zona de control y del factor de riesgo se tiene que:

Tabla VII.5 Incertidumbre requerida para un factor de riesgo = 2 y división de la zona de control en 3 para granulometría para bases que sean cubiertas sólo con un tratamiento asfáltico superficial.

Malla No.		LSC	LIC	U_r	
Designación	Abertura				
in	mm	%	%	%	
1 1/2	37,5	100	100	0,0	
1	25,0	100	70	5,0	
3/4	29,0	85	60	4,2	
3/8	9,50	65	40	4,2	
No. 4	4,75	50	30	3,3	
No. 10	2,00	36	21	2,5	
No. 20	0,850	25	13	2,0	
No. 40	0,425	17	8	1,5	
No. 60	0,250	12	5	1,2	
No. 100	0,150	9	3	1,0	
No. 200	0,075	5	0	0,8	

$$U_r = \frac{LSC - LIC}{3 * f_r}$$

$f_r = 2$ de Tabla 6 3.1
 División de zona de control 3

Si comparamos los resultados de incertidumbre requerida para un factor de riesgo de 2 y una división de tres en la zona de control con los obtenidos en los resultados del ensayo que se muestran en la Figura VII.3 se puede resaltar que en algunos casos es necesario mejorar en la calidad de los resultados del ensayo (Tabla VII.6).

Tabla VII.6 Comparación de la incertidumbre requerida para granulometría para bases que sean cubiertas sólo con un tratamiento asfáltico superficial con respecto a la incertidumbre declara por el laboratorio.

Malla		Resultados ensayo	$\pm U,$ %
Designación in	Abertura mm	% Pasa $\pm U$ %	
2	50,0	100 % \pm 0,0 %	
1 1/2	37,5	99 % \pm 0,6 %	0,0
1	25,0	87 % \pm 1,6 %	5,0
3/4	19,0	78 % \pm 4,5 %	4,2
3/8	9,50	57 % \pm 2,6 %	4,2
No. 4	4,75	42 % \pm 2,6 %	3,3
No. 10	2,00	29 % \pm 2,6 %	2,5
No. 20	0,850	21 % \pm 2,6 %	2,0
No. 40	0,425	13 % \pm 2,0 %	1,5
No. 60	0,250	10 % \pm 1,5 %	1,2
No. 100	0,150	8 % \pm 1,5 %	1,0
No. 200	0,075	3 % \pm 1,1 %	0,8

Si aplicamos el mismo factor de riesgo y la división de tres en las zonas de control para los ensayos de límite líquido, índice plástico, equivalente de arena, desgaste de los ángeles y partículas planas, alargadas o planas y alargadas, la incertidumbre requerida queda como:

Tabla VII.7 Incertidumbre estimada por el laboratorio en los resultados de los ensayos de límite líquido, índice plástico, equivalente de arena, desgaste de los ángeles y partículas planas, alargadas o planas y alargada.

Ensayo	Resultado	± U	
Límite Líquido, $LL_{\text{máximo}}$	31 %	±	4,0 %
Índice Plástico, $IP_{\text{máximo}}$	13 %	±	4,4 %
Equivalente de arena, $\%EA_{\text{mínimo}}$	35 %	±	6,1 %
$\% \text{Desgaste}_{\text{máximo}}$	15,2 %	±	2,0 %
$\% \text{Partículas}_{\text{máximo}}$	22,0 %	±	1,0 %

Tabla VII.8 Comparación de la incertidumbre requerida en límite líquido, índice plástico, equivalente de arena, desgaste de los ángeles y partículas planas, alargadas o planas y alargada para materiales de bases que sean cubiertas sólo con un tratamiento asfáltico superficial con respecto a la incertidumbre declarada por el laboratorio.

Ensayo	Resultado	± U		± U _r
Límite Líquido, $LL_{\text{máximo}}$	31 %	±	4,0 %	4,2
Índice Plástico, $IP_{\text{máximo}}$	13 %	±	4,4 %	1,0
Equivalente de arena, $\%EA_{\text{mínimo}}$	35 %	±	6,1 %	8,3
$\% \text{Desgaste}_{\text{máximo}}$	15,2 %	±	2,0 %	5,0
$\% \text{Partículas}_{\text{máximo}}$	22,0 %	±	1,0 %	5,0

En la Tabla VII.8 se aprecia nuevamente, que en algunos casos la incertidumbre declarada por el laboratorio es menor a la incertidumbre requerida calculada para un factor de riesgo =2 y división de la zona de control en tres.

VIII. CONCLUSIONES.

Hoy en día el uso del concepto de incertidumbre se encuentra cada vez más difundido en las ciencias experimentales. En el trabajo de laboratorio no es suficiente reconocer la variabilidad estocástica de las observaciones sino que es imprescindible cuantificarla, para ofrecer la mayor confiabilidad estadística en los resultados.

Mediante esta investigación se considera que se hace un aporte al conocimiento geotécnico en los órdenes metodológico y técnico.

En términos generales, el aporte metodológico consiste en incorporar a los ensayos de laboratorio la consideración de los efectos de la variabilidad en los procedimientos de medición, aplicados a muestras de suelos, en la estimación de la incertidumbre de los resultados. Lo cual tiene importantes efectos en la calidad de los resultados del trabajo de laboratorio, en la economía de la ingeniería que utiliza la información geotécnica para el diseño de la obra civil y finalmente en la seguridad de las personas que día con día utilizan la infraestructura

El aporte técnico consiste en la incorporación del concepto de incertidumbre en los procedimientos de ensayo del laboratorio de geotecnia. El uso de la "incertidumbre" implica el manejo experto de conocimiento proveniente de la teoría de probabilidad y la estadística matemática, pero también de técnicas metrológicas y de los procedimientos geotécnicos de ensayo.

El uso de métodos normalizados nos brinda la posibilidad de identificar y controlar los efectos que producen los errores en las variables aleatorias que intervienen en el proceso de medición.

En la Tabla VIII.1 se observa que la influencia de la incertidumbre estimada del proceso de medición sobre la incertidumbre total estimada es a partir de 0,01 %. Por lo que podría decirse que, la incertidumbre total estimada es el doble de la repetibilidad y reproducibilidad del procedimiento de ensayo normalizado.

Sin embargo, este trabajo de tesis solo evidencia este hecho, sobre el entendido de que el laboratorio cumple estrictamente los requisitos metrológicos, ambientales y capacitación de personal técnico que marca el procedimiento. Fuera de esas condiciones este trabajo no proporciona evidencia alguna.

Otra cosa importante que se evidencia en la Tabla VIII.1 es que la capacitación del personal técnico es primordial para que se cumpla la repetibilidad y reproducibilidad que marca el procedimiento de ensayo normalizado. No se debe olvidar que es necesario crear evidencia de tal capacitación y competencia técnica por parte del personal.

Tabla VIII.1 Comparación de la incertidumbre estimada y la repetibilidad del procedimiento de ensayo normalizado.

Ensayo	Resultado	U	θ_{σ}
% w (%)	19,4 %	± 1,05 %	2,70 % *
% Mat más fino	79,7 %	± 0,30 %	0,15 %
% Pasa malla 3/4	89 %	± 1,62 %	0,81 %
LL	67,0 %	± 3,97 %	0,70 %
LP	24,0 %	± 1,64 %	0,50 %
IP	43,0 %	± 4,30 %	0,80 %
$G_{S,i}$	2,596	± 0,056	0,027
γ_d	12,26 kN/m ³	± 0,24 kN/m ³	0,08 kN/m ³
	1,250 Mg/m ³	± 0,025 Mg/m ³	0,009 Mg/m ³
% Desgaste	16,4 %	± 2,03 %	2,00 %
% Partículas	2,79 %	± 1,04 %	0,512 %
% EA	77 %	± 6,1 %	2,9 %

El cumplimiento y uso de procedimientos de ensayo normalizados por parte de un laboratorio de ensayos, no quiere decir que cumple con la repetibilidad y reproducibilidad del procedimiento de ensayo, este cumplimiento debe demostrarse mediante ensayos interlaboratorio y multilaboratorio.

Por ultimo, cabe señalar que los valores de repetibilidad y reproducibilidad que se dan en los procedimientos de ensayo cubren muchas situaciones, que tal vez de manera

local no se presentan en un laboratorio de ensayos. Así que, los valores de repetibilidad y reproducibilidad de un laboratorio de ensayo deben ser menores que los valores dados por el procedimiento de ensayo normalizado. En caso de que no sea así, debe tenerse especial cuidado en la capacitación y destreza por parte del personal técnico que labora en el laboratorio de ensayos.

IX. BIBLIOGRAFÍA.

1. Auvinet G. G. 2002. Incertidumbre en Geotécnica. Décimo Sexta Conferencia Nabor Carrillo. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.
2. Avila M. J, Martinez F y Salas J. A. 2002. Desarrollo de material de referencia de esferas de vidrio con distribución de tamaño de partícula de 20 a 150 micrómetros. Simposio de metrología. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro., México.
3. Bement A. 2004. Metrology is fundamental to economic and social development. Simposio de metrología. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro., México.
4. Bich W. 2001. Application of the guide to the expresión of uncertainty in measurement at the industrial level. Simposio de Metrología. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro., México.
5. Castelazo S. I. 2002. Incertidumbre en las mediciones: impactos económicos y sociales. Simposio de Metrología. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro., México.
6. Castelazo S. I. 2002. Uso de la distribución t en la estimación de la incertidumbre de la medición. Nota. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro., México.
7. CENAM. 2003. El sistema internacional de unidades (SI). Publicación técnica CNM-MMM-PT-003. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
8. CENAM. 2004. Guía técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en la medición de presión con manómetros. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
9. CENAM. 2004. Guía técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en la medición con máquinas de compresión y/o tracción. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
10. CENAM. 2004. Guía técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en metrología dimensional. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.

11. Doiron T. and Stoup J. 1997. Uncertainty and dimensional calibrations. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. Volume 102, Number 6, November-December. 647-676
12. Gutierrez, A. 2006. Determination of Atterberg Limits: Uncertainty and Implications. Technical notes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Marzo.
13. Motolinia V. F. 2005. La metrología como elemento para la creación de valor. XVII Congreso ADIAT. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
14. Durán A. 2001. Clasificación de instrumentos para pesar por exactitud según la NOM-010-SCFI-1994 y selección de patrones. Simposio de Metrología. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
15. Drake M., J. M. 2005. Instrumentación electrónica de comunicaciones. Tema I Introducción a los sistemas de instrumentación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones, Universidad de Cantabria.
16. Hernández G. A.; Fabela G. M. J. y Martínez M. M. 2001. Sistemas de calidad aplicados a laboratorios de prueba. Publicación Técnica No. 185. Secretaría de comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano el Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.
17. Juárez B. y Rico R. 1986. Mecánica de Suelos Tomo I Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Tercera edición. Editorial LIMUSA. México.
18. Lazos M. R. J. 2001. ISO 9001:2000, Trazabilidad e incertidumbre. Simposio de Metrología. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
19. Lazos M. R. J. 2002. Uso de certificados de calibración. Nota. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
20. Lazos M. R. J. 2006. Mediciones confiables en la práctica de la ingeniería. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
21. Marbán R. M. y Pellicer J. A. 2002. Metrología para no-metrólogos. Sistema Interamericano de metrología. Organización de los Estados Americanos, OEA.
22. Martínez R., R. 2004. Estadística aplicada a las mediciones. Empresas Marbor de México S.A. de C.V.

23. Martínez R., R. 2003. Incertidumbre en procesos de medición. Entidad Mexicana de Acreditación A. C
24. Nava J. H. 2001. Reseña y Perspectiva de las mediciones en México. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
25. Norma Mexicana. 2002. NMX-CH-140-IMNC-2002 Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones. Instituto Mexicano de Normalización y Certificación A. C. México.
26. Norma Mexicana. 2000. NMX-EC-17025-IMNC-2000 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración. Instituto Mexicano de Normalización y Certificación A. C. México.
27. Norma SCT. 2006. N-CMT-4-02-002/04 Libro CMT Características de los materiales. Parte 4 Materiales para pavimentos. Título 02 Materiales para subbases y bases. Capítulo 002 Materiales para bases hidráulicas. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. México.
28. Sáez R. S. J. y Font A. L. 2001. Incertidumbre de la medición: Teoría y Práctica. L & S Consultores C. A. Maracay, Edo. Aragua.
29. Schaum's outline series. 1961. Theory and problems of statistics.
30. Schmid W. A. 2002. La simulación numérica como una herramienta en la estimación de la incertidumbre de medición. Simposio de Metrología. Centro nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
31. Schmid W. A. 2002. La incertidumbre expandida y los grados de libertad: Un análisis comparativo entre el método recomendado por la GUM y métodos simplificados. Simposio de Metrología. Centro nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
32. Schmid W. A. 2004. Interacción de la resolución y la repetibilidad en la incertidumbre combinada. Simposio de Metrología. Centro nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
33. Schmid W. A. 2004. Distribución de la media y el teorema del límite central. Simposio de Metrología. Centro nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.

34. Schmid W. A. y Lazos M. R. J. 2004. Guía para estimar la incertidumbre de la medición. Centro nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
35. Sedano L. S. 1982. Aproximación requerida y dispersión de resultados en ensayos comunes de laboratorio de Mecánica de Suelos. Tesis de Maestría en Ingeniería, Mecánica de suelos. UNAM.
36. Taylor B. N. and Kuyatt C. E. 1994. Guidelibes for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results. NIST Technical Note 1297. United States Department of Commerce Technology Administration. National Institute of Standards and Technology
37. Tufiño V. M. 2002. Metrología, normalización y calidad: estrategia para lograr la competitividad educativa y tecnológica. Simposio de Metrología. Centro nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
38. Vara S. R 2002. Diseño de experimentos en metrología. Simposio de Metrología. Centro nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
39. Villa D. E. 2002. Técnicas de simulación para el análisis estadístico de datos de medición. Simposio de Metrología. Centro nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
40. Villa D. E. 2004. La incertidumbre de medición en el control estadístico de procesos. Simposio de Metrología. Centro nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
41. Villa D. E. 2004. El número efectivo de grados de libertad. Simposio de Metrología. Centro nacional de Metrología. El Marqués, Querétaro, México.
42. Walpole R. E. y Myers R. H. 1997. Probabilidad y estadística. Cuarta edición. Mc Graw Hill.

X. ANEXO I. REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD DE LOS PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO DE GEOTECNIA.

Contenido de agua (humedad) en suelos y rocas.

Desviación. No hay un valor de referencia aceptable para este método de ensayo, por lo tanto, el sesgo no puede determinarse.

Precisión de un operador. Se ha encontrado que el **coeficiente de variación por operador es de 2,7 %**. Por lo tanto, los resultados de dos ensayos llevados a cabo por el mismo operador con el mismo equipo deben ser considerados confiables a menos que entre ellos se difiera más de 7,8 % de su media.

Precisión multilaboratorio. El coeficiente de variación multilaboratorio ha sido encontrado como 5,0 %. Por lo tanto, los resultados de dos ensayos llevados a cabo con diferentes operadores usando diferentes equipos deben ser considerados confiables a menos que entre ellos difieran más de 14 % de su media.

Cantidad de suelo más fino que 75 μm (Malla No. 200).

Precisión. Los criterios para juzgar la aceptabilidad de los resultados de ensayo por estos métodos en un rango de tipos de suelos usando el método B son dados en la Tabla X.I.1 y X.I.2. Estas estimaciones de precisión están basadas en ensayos interlaboratorios llevadas a cabo por el programa de ensayos de suelos ASTM. En este programa, algunos laboratorios desarrollan tres ensayos por tipo de suelo (ensayos triplicados), mientras otros laboratorios desarrollan solo un ensayo por suelo (ensayo único). Una descripción de los tipos de suelo se da en párrafos posteriores. La precisión estimada puede variar con el tipo de suelo y con el método usado (método A ó B). Se requiere de criterio cuando se aplican estas estimaciones a otro tipo de suelo o método.

Tabla X.I.1 Resumen de los resultados de ensayos triples realizados por los laboratorios (porcentaje de finos).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Tipo de suelo	Ensayos triples de laboratorio	Valor promedio ^A (Porcentaje en puntos)	Desviación normal ^B (Porcentaje en puntos)	Rango aceptable de dos resultados ^C (Porcentaje en puntos)
<i>Resultados por operador (dentro de un mismo laboratorio: Repetibilidad):</i>				
CH	13	98,83	0,15	0,4
CL	13	88,55	0,14	0,4
ML	14	99,00	0,12	0,3
SP	13	2,47	0,20	0,5
<i>Resultados multilaboratorio (entre laboratorios: Reproducibilidad):</i>				
CH	13	98,83	0,22	0,6
CL	13	88,55	0,40	1,1
ML	14	99,00	0,13	0,4
SP	13	2,47	0,36	1,0

^A El número de dígitos significativos y los decimales son resultado de los datos obtenidos. De acuerdo con la práctica D 6026, la desviación normal y el rango aceptable de resultados no pueden tener mas decimales que los datos de entrada

^B La desviación normal es calculada de acuerdo con la práctica E 691 y se hace referencia al límite de una vez la desviación normal (1s)

^C El rango aceptable de los resultados se refiere al límite de dos veces la desviación normal, que se calcula como $1,960 \cdot (2)^{0,5} \cdot 1s$, como se define en E 177. La diferencia entre dos propiedades de los ensayos no debe exceder este límite. El número significativo de decimales presentados es igual a los descritos por el método de ensayo D 6026. En suma, el valor presentado puede tener el mismo número de decimales como la desviación normal, aún si el resultado tiene mas dígitos significativos que la desviación normal.

Tabla X.I.2 Resumen de los resultados de un ensayo de cada laboratorio (porcentaje de finos)^A.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Tipo de suelo	Número de laboratorios	Valor promedio (Porcentaje en puntos)	Desviación normal (Porcentaje en puntos)	Rango aceptable de dos resultados (Porcentaje en puntos)
<i>Resultados multilaboratorio (un ensayo realizado por cada laboratorio)</i>				
CH	25	98,74	0,22	0,6
CL	24	88,41	0,52	1,4
ML	25	99,00	0,18	0,5
SP	25	2,647	0,60	1,7

^A Ver las notas de pie de la Tabla 1

Los datos de la Tabla X.I.1 están basados en tres ensayos desarrollados por laboratorio en cada tipo de suelo. Un operador y desviación normal multilaboratorio se muestran en la Tabla X.I.1, columna 4 obtenidas de acuerdo con la práctica E 691, la cual recomienda a cada laboratorio desarrollar un mínimo de tres ensayos. Los resultados de dos ensayos llevados a cabo por un operador en el mismo material, usando el mismo equipo y en el menor periodo de tiempo no debe diferir de los límites para operador individual d2s mostrados en la Tabla X.I.1, columna 5. Por definición de d2s vea la nota a pie C en la

Tabla X.I.2. Los resultados de dos ensayos llevados a cabo por diferente operador y en diferentes días no deben diferir de los límites d2s mostrados en la Tabla X.I.1, columna 5.

En el programa de ensayos de referencia ASTM, muchos de los laboratorios desarrollan solamente un ensayo en cada tipo de suelo. Esto es práctica común en la industria de la construcción. Los datos para cada tipo de suelo de la Tabla X.I.2 están basados en los resultados triplicados de ensayos de laboratorio y en ensayos individuales de otros laboratorios. Los resultados de dos ensayos llevados a cabo por dos laboratorios diferentes con diferentes operadores usando diferente equipo y diferentes días no deben de variar más allá de los límites d2s de la Tabla X.I.2, columna 5.

La Tabla X.I.1 presenta una interpretación rigurosa de un ensayo triplicado de acuerdo con la práctica E 691 de laboratorios pre-calificados. La Tabla X.I.2 se deriva de los datos que representan la práctica común

Tipos de suelos. Basados en resultados de ensayos multilaboratorio, los suelos usados en el programa se describen de acuerdo con la práctica D 2487. Además, se proporcionan los nombres locales:

CH: Arcilla plastica. CH, finos: 99 %,
LL = 60 %, IP = 39 %, color: gris café,
preparación del suelo: seco y pulverizado.
Nombre local: Arcilla Vicksburg Buckshot.

CL: Arcilla limosa. CL, finos: 89 %,
LL = 33 %, IP = 13 %, color: gris,
preparación del suelo: seco y pulverizado.
Nombre local: Arcilla Anápolis.

ML: Limo, ML, finos: 99%,
LL = 27 %, IP = 4 %, color: café claro,
preparación del suelo: seco y pulverizado.
Nombre local: Limo Vicksburg.

SP: Arena mal graduada; SP,
arena gruesa: 20 %, mediana: 48 %, fina: 30 %.

Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos, mediante tamices.

Precisión. La precisión para este método de ensayo puede apreciarse en la Tabla X.I.3. La estimación está basada 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 basados en el análisis de ensayos de 65 a 233 laboratorios que ensayaron 18 pares de muestras de agregado grueso y resultados de ensayos de 74 a 222 laboratorios que ensayaron 17 pares de muestras de agregado fino. Los valores de la Tabla X.I.3 están dados para diferentes rangos del porcentaje total de agregados que pasan una malla.

La precisión de los valores, para agregado fino en la Tabla X.I.3, está basada 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 X.I.4, los cuales indican solamente pequeñas diferencias debidas al tamaño de la muestra.

Nota. Los valores para agregado fino de la Tabla X.I.3, serán revisados para indicar el tamaño de la muestra de 300 g cuando un número suficiente de ensayos de aprovechamiento en agregados esté siendo dirigido usando tamaños de especímenes para proveer datos confiables.

Desviación. No existe material de referencia adecuado para determinar el sesgo en este método de ensayo.

Tabla X.I.3 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
	<20	≥ 15	0,96	2,7
Precisión de un solo operador	<15	≥ 10	1,00	2,8
	<10	≥ 5	0,75	2,1
	<5	≥ 2	0,53	1,5
	<2	> 0	0,27	0,8
	<100	≥ 95	0,35	1,0
	<95	≥ 85	1,37	3,9
Precisión multilaboratorio	<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
	<5	≥ 2	1,04	3,0
	<2	> 0	0,45	1,3
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
Precisión de un solo operador	<15	≥ 10	0,36	1,0
	<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 esta basada en agregados con tamaño nominal máximo de 19,0 mm (¾ in)

Tabla X.I.4 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
ASTM C 136 / AASHTO T 27							
Material total pasa la malla No 4	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 pasa la malla No 8	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 pasa la malla No 16	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 pasa la malla No 30	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 pasa la malla No 50	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 pasa la malla No 100	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 pasa la malla No 200	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

Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos

Precisión. El criterio para juzgar la aceptabilidad de los resultados de ensayo por estos métodos de ensayo en un rango de tipos de suelos que están dados en las Tablas X.I.5 y X.I.6. En la ejecución de estos métodos de ensayo, el Método A y el Método de preparación húmeda (excepto que los suelos fueron secados al aire) fueron usados

Estas estimaciones de precisión están basadas en los resultados del Programa Interlaboratorio conducido por la ASTM Programa de Ensayos y suelos de referencia. En este programa, algunos laboratorios llevaron a cabo tres ensayos por tipo de suelo (ensayos de laboratorio por triplicado), mientras que otros laboratorios llevaron a cabo un solo ensayo por tipo de suelo (un solo ensayo por laboratorio). Una descripción de los suelos ensayados se presenta en párrafos posteriores. La precisión estimada varía con el tipo de suelo y los métodos usados. Se requiere de criterio para aplicar estas estimaciones a otros tipos de suelo y métodos usados (Método A ó B, o Método de Preparación húmeda o seca)

Los datos de la Tabla X.I.5 están basados en ensayos llevados a cabo por triplicado por cada laboratorio en cada uno de los tipos de suelo. La desviación estándar de un solo operador y la multilaboratorio se muestran en la Tabla X.I.5, columna 4, que fueron obtenidas de acuerdo con la Practica E 691, en la cual se recomienda que cada laboratorio de ensayos lleve a cabo un mínimo de tres ensayos. Los resultados de dos ensayos conducidos apropiadamente realizadas por el mismo operador en el mismo material, usando el mismo equipo, en el mismo periodo práctico de tiempo no deben diferir por más de d_{2s} los límites de un solo operador mostrados en la Tabla X.I.5, columna 5. Para definición de los límites d_{2s} ver pie de nota C en la Tabla X.I.5. Los resultados de dos ensayos conducidos apropiadamente realizados por diferentes operadores y en diferentes días no debe diferir por mas de los límites d_{2s} multilaboratorio mostrados en la Tabla X.I.5, columna 5.

En el programa de ensayos y suelos de referencia de la ASTM, muchos de los laboratorios llevaron a cabo un solo ensayo en cada tipo de suelo. Esto es una practica

común en la industria de la construcción y el diseño. Los datos para cada tipo de suelo en la Tabla X.I.6 están basados en los primeros resultados de ensayo de los laboratorios que las realizaron por triplicado y los resultados de un solo ensayo de los otros laboratorios. Los resultados de dos ensayos realizados apropiadamente por dos laboratorios diferentes con diferentes operadores usando diferente equipo y en diferentes días no deben variar por más de los límites d2s mostrados en la Tabla X.I.6, columna 5.

La Tabla X.I.5 presenta una interpretación rigurosa de los datos de los ensayos triplicados de acuerdo con la Práctica E 691 de los laboratorios precalificados. La Tabla X.I.6 es derivada de los datos de ensayo que se representan en la práctica común

Tipos de suelos. Con base en los resultados de los ensayos multilaboratorio, los suelos usados en el programa se describen de acuerdo con la práctica D 2487. Además, se dan los nombres locales de los suelos:

CH	Arcilla franca,	CH,	finos 99 %, LL = 60 %, IP = 39 %, color café grisáceo, el suelo ha sido secado al aire y pulverizado Nombre local: Arcilla Buckshot Vicksburg.
CL	Arcilla limosa,	CL,	finos 89%, LL = 33 %, IP = 13 %, color gris, el suelo ha sido secado al aire y pulverizado Nombre local: Arcilla Annapolis.
ML	Limo,	ML,	finos 99 %, LL = 27 %, IP = 4 %, ligeramente café, el suelo ha sido secado al aire y pulverizado Nombre local: Limo Vicksburg.

Tabla X.I.5 Resumen de los resultados de ensayo de laboratorio que realizaron ensayos por triplicado (Límites de Atterberg)

(1) Tipo de suelo	(2) Número de laboratorios de ensayo que realizaron los ensayos por triplicado			(3) Valor promedio A (Puntos porcentuales)			(4) Desviación estándar B (Puntos porcentuales)			(5) Rango aceptable de dos resultados C (puntos porcentuales)		
	Tipo de ensayo											
	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
Resultados de un solo operador (Repetibilidad dentro del laboratorio)												
CH	13	13	13	59,8	20,6	39,2	0,7	0,5	0,8	2	1	2
CL	14	13	13	33,4	19,9	13,6	0,3	0,4	0,5	1	1	1
ML	12	11	11	27,4	23,4D	4,1D	0,5	0,3	0,6	2	1	2
Resultados multilaboratorio (Reproducibilidad entre laboratorios)												
CH	13	13	13	59,8	20,6	39,2	1,3	2,0	2,5	4	6	7
CL	14	13	13	33,4	19,9	13,6	1,0	1,2	1,7	3	3	5
ML	12	11	11	27,4	23,4D	4,1D	1,3	0,9	1,9	4	3	5

A El número de dígitos significativos y lugares decimales presentes son representativos de los datos de entrada. De acuerdo con la Práctica D 6026, la desviación estándar y el rango aceptable de los resultados no pueden tener más lugares decimales que los datos de entrada.

B La desviación estándar es calculada de acuerdo con la Práctica E 691 y es referida como el límite 1s.

C El rango aceptable de dos resultados es referido como el límite d2s. Éste es calculado como: $-1,960\sqrt{2}1s$, como es definido en la Práctica E 177. La diferencia entre dos ensayos conducidos apropiadamente no debe exceder este límite. El número de dígitos significativos/lugares decimales presentados es igual a los descritos por este método de ensayo o por la Práctica D 6026. Además, el valor presentado puede tener el mismo número de lugares decimales que la desviación estándar, también si estos resultados tienen más dígitos significativos que la desviación estándar.

D Para el suelo ML, 2 de los 14 laboratorios que realizaron ensayos triplicados reportaron el suelo como no plástico.

Tabla X.I.6 Resumen de los resultado de un solo ensayo de cada laboratorio (Límites de Atterberg).

(1) Tipo de suelo	(2) Número de laboratorios	(3) Valor promedio (puntos porcentuales)			(4) Desviación estándar (puntos porcentuales)			(5) Rango aceptable de dos resultados (puntos porcentuales)		
		Tipo de ensayo								
CH	24	59,9	20,4	39,5	2,1	2,7	3,1	6	7	9
CL	24	33,3	19,9	13,4	0,8	1,3	1,6	2	4	4
ML	18	27,1	23,2B	3,9B	1,3	1,2	1,8	4	3	3

A Pie de nota para columna, ver tabla 3.

B Para el suelo ML, 6 de los 24 laboratorios lo reportaron como no plástico, NP.

Gravedad específica de los suelos por el método del picnómetro con agua.

Precisión. En las Tablas X.I.7 y X.I.8 se muestra el criterio para juzgar la aceptabilidad de los resultados obtenidos del ensayo para estos métodos de ensayo en el rango de tipo de suelo usando 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 (los datos están disponibles en las oficinas de ASTM). En este programa algunos laboratorios ejecutan tres

pruebas por tipo de suelo (ensayo triplicado de laboratorio), mientras que otros laboratorios ejecutan un ensayo simple por tipo de suelo (ensayo simple de laboratorio). 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.

Los datos en la Tabla X.I.8 se basan en ensayos de tres repeticiones ejecutados para cada ensayo de laboratorio triplicado en cada tipo de suelo. La desviación estándar de un solo operador y multilaboratorios se muestran en la Tabla X.I.8, columna 4 la cual se obtuvo de E 691, en la cual se recomienda que cada ensayo de laboratorio se realice por lo menos tres veces. El resultado de dos ensayos conducidos apropiadamente, ejecutados por el mismo operador con el mismo material, usando el mismo equipo y en periodos de tiempo relativamente cortos no deben diferir más que en límites para un solo operador en d2s mostrado en la Tabla X.I.8, columna 5. Para definición de d2s ver nota C en la Tabla X.I.7. Los resultados de dos ensayos conducidos apropiadamente, ejecutados por diferentes operadores, en diferentes días no deben diferir más de límites de d2s multilaboratorio mostrados en la Tabla X.I.8, columna 5

Tabla X.I.7 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 d2s 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.

En los suelos de referencia y programas de ensayo ASTM, muchos laboratorios ejecutaron únicamente un ensayo. Esta es una práctica común en la industria del diseño y construcción. Los datos en la Tabla X.I.8 se basan en el primer resultado de los ensayos de laboratorio triplicados y en los resultados de ensayos simples 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 d2s mostrados en la Tabla X.I.8, columna 5.

Tabla X.I.8 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

La Tabla X.I.7 presenta una interpretación rigurosa de los datos de ensayo triples de acuerdo con la práctica E 691 de laboratorios precalificados. La Tabla X.I.8 se deriva de los datos de ensayo que se presentan en la práctica común.

Tipo de suelo se basa en los resultados de ensayo multilaboratorio. El suelo usado en el programa se describe de acuerdo con la práctica D 2487. Los siguientes son 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, finos 99 % café grisáceo	ML	limo, LL = 27 %, IP = 4 % el suelo ha sido secado al aire y pulverizado nombre local: Limo Vicksburg.	ML, 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, 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,

Características de compactación de un suelo con una energía de 600 kN•m/m³.

Precisión. Los criterios para juzgar la aceptabilidad de los resultados de ensayo obtenidos se muestran en la Tabla X.I.9 y en la Tabla X.I.10. Estas estimaciones de precisión están basadas en los resultados de un programa interlaboratorio llevado a cabo con los suelos de referencia ASTM y el programa de ensayo. En este programa se usaron el método A y el método de preparación seca. Algunos laboratorios desarrollaron tres ensayos por cada tipo de suelo de acuerdo con el método A, B ó C, ó método de preparación húmeda/seca. Se requiere de criterio para aplicar estas estimaciones a otros suelos.

Los datos de la Tabla X.I.9 están basados en ensayos triples de cada tipo de suelo. Los ensayos se obtuvieron de acuerdo con la práctica E 691, la cual recomienda que cada laboratorio de ensayo desarrolle un mínimo de 3 ensayos. Los resultados de dos ensayos desarrollados por el mismo operador en el mismo material, usando el mismo equipo y el período de tiempo relativamente corto no debe diferir por más de d2s mostrado en la Tabla X.I.9, columna 5. Por definición de d2s, ver pie de nota D en la Tabla X.I.9. Los resultados de dos ensayos llevados a cabo por diferente operador y en diferentes días no deben diferir por más de los límites multilaboratorio d2s mostrados en la Tabla X.I.9, columna 5.

En el programa de ensayos de suelos ASTM, muchos de los laboratorios desarrollaron solamente un ensayo en cada tipo de suelo. Esto es común en la industria de la construcción y diseño. Los datos para cada tipo de suelo se muestran en la Tabla X.I.10, son resultados del primer ensayo de los laboratorios que llevaron a cabo tres ensayos y del resultado que obtuvieron los que desarrollaron solo un ensayo. Los resultados de dos ensayos llevados a cabo por dos laboratorios diferentes con diferente operador usando diferente equipo y en diferentes días no debería de variar más de d2s mostrada en la Tabla X.I.10, columna 5.

La Tabla X.I.9 presenta una interpretación rigurosa de los datos de ensayo triplicados de acuerdo con la práctica E 691 de laboratorios precalificados. La Tabla X.I.10 se deriva de datos de ensayo que representan la práctica común.

Tabla X.I.9 Resumen de resultados de ensayos para ensayos de laboratorio triples (energía de compactación estándar).

(1)			(2)	(3)			(4)			(5)		
Número de ensayos de laboratorio triples			Valor del ensayoA (unidades)	Valor promedioB			Desviación estándarC			Rango aceptable de dos resultadosDE		
Tipo de suelo:												
CH	CL	ML		CH	CL	ML	CH	CL	ML	CH	CL	ML
Resultados de un solo operador (repetibilidad)												
11	12	11	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	16,26	17,14	16,69	0,08	0,06	0,08	0,20	0,19	0,20
11	12	11	Wopt (%)	22,8	16,6	17,1	0,2	0,3	0,3	0,7	0,9	0,9
Resultados multilaboratorio (reproducibilidad)												
11	12	11	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	15,26	17,14	16,69	0,22	0,13	0,09	0,61	0,36	0,25
11	12	11	Wopt (%)	22,8	16,6	17,1	0,7	0,5	0,5	1,8	1,5	1,3

A $\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m³) estándar del peso volumétrico seco máximo en kN/m³
wopt (%) estándar del contenido de agua óptimo en por ciento.

B 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 de los datos de entrada

C La desviación estándar se calcula de acuerdo con la Práctica E 691 y se refiere como el límite 1s

D El rango aceptable de dos resultados es referido como el límite 2ds. Este es calculado como $1,960 \sqrt{2} * 1s$, como se define en la práctica E 177. La diferencia entre dos ensayos conducidos apropiadamente no debe exceder este límite. El número de decimales/dígitos significativos presentados es igual que lo descrito en este ensayo o por la práctica D 6026. Además, el valor presentado puede tener el mismo número de decimales que la desviación estándar, aún y cuando el resultado tiene más dígitos significativos que la desviación estándar.

E Los valores $\gamma_{dm\acute{a}x}$ y wopt deben caer dentro de los valores dados para el tipo de suelo seleccionado.

Tabla X.I.10 Resumen de ensayos individuales para cada uno de los laboratorios (energía de compactación estándar)^A.

(1)		(2)	(3)			(4)			(5)		
Número de ensayos de laboratorio triples		Valor del ensayoA (unidades)	Valor promedioB			Desviación estándarC			Rango aceptable de dos resultadosDE		
Tipo de suelo:											
CL	ML		CH	CL	ML	CH	CL	ML	CH	CL	ML
Resultados multilaboratorio (reproducibilidad)											
26	25	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	15,28	17,14	16,67	0,25	0,17	0,16	0,71	0,47	0,46
		Wopt (%)	22,6	16,4	16,7	0,9	0,7	1,0	2,4	1,8	2,9

A ver nota de pie de la tabla 6.3

Tipos de suelo. Basados en datos de ensayo multilaboratorio los suelos usados se describen de acuerdo con la práctica D 2487 y se mencionan los nombres locales:

CH	arcilla plástica, LL = 60 %, IP = 39 %, el suelo fue secado al aire y pulverizado nombre local: Arcilla Vicksburg Buckshot.	CH,	finos 99 %, café grisáceo,
CL	arcilla limosa, LL = 33 %, IP = 13 %, el suelo fue secado al aire y pulverizado nombre local: Arcilla Anápolis.	CL,	finos 89 %, color gris,
ML	limo, LL = 27 %, IP = 4 %, el suelo fue secado al aire y pulverizado nombre local: Limo de Vicksburg	ML,	finos 99 %, color café claro,

Resistencia a la degradación de agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión en la Máquina de los Ángeles.

Precisión. Para agregado de tamaño nominal máximo de 19,0 mm (3/4 in) con pérdidas en el rango de 10 % a 45 % , el coeficiente de variación multilaboratorio se ha encontrado que es de 4,5 %. Por lo tanto, los resultados de dos ensayos realizados apropiadamente en 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 solo operador se ha encontrado que es de 2,0 %. Por lo tanto, los resultados de dos ensayos realizados 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.

Desviación. No existe material de referencia adecuado para determinar el sesgo en este método de ensayo.

Partículas planas, alargadas o planas y alargadas de agregado grueso.

Precisión. Los valores de precisión listados en la Tabla X.I.11, Tabla X.I.12 y Tabla X.I.13 son promedios obtenidos de muestras de muestras usadas en el Programa de habilidades en muestras de agregados (Ver Nota 1). Los límites de desviación 1s% y D2s% proporcionadas son descritas en la práctica ASTM C 670.

Nota. Fue usada una relación 3 a 1.

Tabla X.I.11 Tamaño de 19,00 mm a 12,50 mm Planas y alargadas (porcentaje).

Precisión	Resultado del ensayo %	1s %	D2s %
Un operador	2,7	51,20	144,80
Multilaboratorio	---	88,50	250,30

Tabla X.I.12 Tamaño de 12,00 mm a 9,50 mm Planas y alargadas (porcentaje).

Precisión	Resultado del ensayo %	1s %	D2s %
Un operador	34,9	22,19	64,70
Multilaboratorio	---	43,00	121,80

Tabla X.I.13 Tamaño de 9,50 mm a 4,75 mm Planas y alargadas (porcentaje).

Precisión	Resultado del ensayo %	1s %	D2s %
Un operador	24,1	19,00	53,60
Multilaboratorio	---	46,10	13,03

Equivalente de arena de suelo y agregados finos.

Las siguientes estimaciones de precisión para este método de prueba se basan en resultados obtenidos por el laboratorio de referencia AASHTO de materiales: “Programa de muestreo de Referencia (AMRL)”, con el muestreo realizado usando este método de prueba AASHTO T176. No hay diferencias significativas entre los dos métodos. Los análisis de datos están basados en el análisis de 8 pares de resultados de 50 a 80 laboratorios, con el rango de valores de equivalente de arena promedio para ensayos con variación aproximada de 60 a 90.

Precisión del operador. La desviación normal debida al operador fue de 1,5 para valores de equivalente de arena mayores a 80 y 2,9; para valores menores que 80 (1s)⁹. Por lo 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).

⁹ Estos números representan, respectivamente, los límites (1s) y (d2s) como se describe en la práctica C 670.

Precisión multilaboratorio. La desviación normal debida a diversos laboratorios fue de 4,4 para valores de equivalente de arena mayores que 80 y 8 para valores menores que 80 (1s)⁹ por lo tanto, los resultados de dos ensayos realizados por diferentes laboratorios en materiales similares no debería diferir por mas de 12,5 y 22,6⁹, respectivamente (d2s).

Se dispone de datos adicionales de precisión de un estudio hecho por una agencia estatal que involucra la circulación de pares de ensayos en 20 laboratorios en tres ocasiones diferentes. El rango de variación de valores de equivalente de arena para esos ensayos va de aproximadamente de 30 a 50; estos materiales contenían más finos que las muestras del laboratorio AASHTO reportadas en 9.1.1 y 9.1.2.

La desviación normal multilaboratorio de esta agencia fue de 3,2 (1s). Por lo 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).

Desviación. El sesgo obtenido en este método de ensayo se define únicamente en términos del método de ensayo, por lo que, el sesgo no es válido.

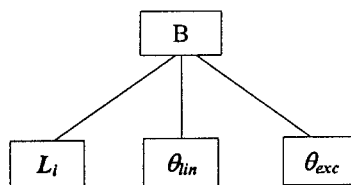
X. ANEXO II. MODELO DE ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE PARA LAS MEDICIONES EN UNA BALANZA

Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando: B Peso del espécimen
- Variables necesarias para determinar el mensurando:

L_i	Error por lectura
θ_{lin}	Error por linealidad
θ_{exc}	Error por excentricidad
- Equipo con se realiza las mediciones:
 - a) Básculas o balanza de funcionamiento no automático de lectura en desplegado electrónico.
 - b) Báscula o balanza de funcionamiento no automático de lectura manual.

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



donde: B Balanza o báscula

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

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

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

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

donde: $u_{patrón}$ Incertidumbre heredada del patrón

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

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

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

a) Básculas o balanza de funcionamiento no automático de lectura en desplegado electrónico.

➤ *Errores:*

- *de lectura (L_i).* La lectura que despliega una balanza electrónica es que toda señal antes de la mitad de la resolución de lectura el resultado es el número entero anterior y lecturas iguales o mayores a la mitad de la resolución el resultado es el número entero siguiente y el error se calcula como:

$$E_{RL} = 0,5 RL$$

donde: **RL** resolución de lectura del instrumento

Este error es más conocido como error por resolución del equipo.

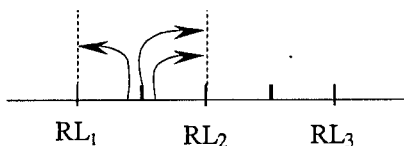


Figura X.II.1 Funcionamiento del procedimiento de lectura para el desplegado de resultados de una balanza electrónica.

- *de linealidad (θ_{lin}).* De acuerdo a la clasificación del instrumento para pesar según norma ASTM el error por linealidad se calcula como:

$$E_{lin} = 0,1 \% * L \quad \text{ó} \quad 0,01 \% * L$$

- *de excentricidad (θ_{exc}).* Se considera nulo, ya que si existiese el error, este es un error sistemático, además de que el usuario del instrumento pesa en el centro del plato:

$$E_{\theta_{exc}} = 0$$

➤ *Incertidumbre:*

- *debida a la lectura (u_{RL}).* Debido al funcionamiento de las balanzas o básculas el valor se encuentra dentro de un intervalo de valores máximos, por lo que se considera una distribución rectangular en la que se considera que el valor convencionalmente verdadero de la magnitud tiene la misma probabilidad de ser cualquier valor que se encuentre dentro del intervalo considerado y cero probabilidad de ser un valor fuera del intervalo (Figura X.II.1). Por lo que, esta incertidumbre (tipo B) se evalúa

$$\text{como: } u_{RL} = \frac{E_{RL}}{\sqrt{3}} = \frac{0,5RL}{\sqrt{3}} = \frac{RL}{\sqrt{12}}$$

$$u_{RL} = \frac{RL}{\sqrt{12}};$$

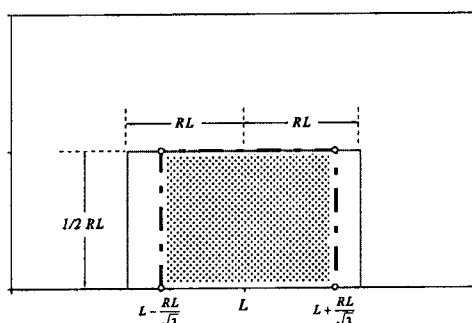


Figura X:II.2 Ilustración gráfica de la evaluación de incertidumbre normal para una magnitud a partir de una distribución rectangular.

- *debida a linealidad (u_{lin}):* La balanza esta en buen estado y debido a su funcionamiento la incertidumbre se estima con una incertidumbre tipo B con una distribución rectangular (Figura X.II.2):

$$u_{lin} = \frac{E_{lin}}{\sqrt{3}}; \text{ y}$$

- *debida a excentricidad* ($u_{\theta_{exc}}$). Se anula:

$$u_{\theta_{exc}} = 0$$

b) Báscula o balanza de funcionamiento no automático de lectura manual.

➤ *Errores:*

- *de lectura* (L_i). Para una balanza o báscula de lectura manual el error

por lectura se evalúa como: $E_{L_i} = \frac{RL}{2}$, para este tipo de balanza

o báscula se consideran dos errores de lectura, primero para la verificar la lectura en cero y después la lectura para determinar el valor de la magnitud, por lo que para duplicar el error se utiliza 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.

Así que la suma de errores es:

$$\sqrt{(E_{L_i})^2 + (E_{L_i})^2} = \sqrt{2E^2} = \sqrt{2} * E \text{ y por lo que para dos errores}$$

se tiene que:

$$E_{L_i} = \frac{\sqrt{2} * RL}{2} \text{ para balanza o báscula de lectura manual;}$$

- *de linealidad* (θ_{lin}). De acuerdo a la clasificación del instrumento para pesar según norma ASTM el error por linealidad se calcula como:

$$E_{lin} = 0,1 \% * L \text{ ó } 0,01 \% * L; \text{ y}$$

- *de excentricidad* (θ_{exc}). Este error no aplica a este tipo de instrumento:

$$E_{\theta_{exc}} = 0$$

➤ *Incertidumbre:*

- *debida a la lectura* (u_{L_i}). Se estima como una incertidumbre del tipo B con una probabilidad a priori de distribución rectangular (Figura

X.I.2), por lo que la fórmula queda:

$$u_{L_i} = \frac{E_{L_i}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2} * RL}{2 * \sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2} * RL}{\sqrt{12}} = \frac{\sqrt{2} * RL}{\sqrt{2} * \sqrt{6}} = \frac{RL}{\sqrt{6}};$$

$$\boxed{u_{L_i} = \frac{RL}{\sqrt{6}}} \text{ Para una balanza o báscula de lectura manual;}$$

- *debida a linealidad* ($u_{\theta_{lin}}$). Se estima como una incertidumbre del tipo B con una probabilidad a priori de distribución rectangular (Figura X.I.2):

$$\boxed{u_{lin} = \frac{E_{lin}}{\sqrt{3}}}; y$$

- *debida a excentricidad* ($u_{\theta_{exc}}$). Se anula.

$$\boxed{u_{\theta_{exc}} = 0}.$$

Tabla X.II.1 Errores e incertidumbres para balanzas de funcionamiento no automático de lectura electrónica y de lectura manual.

	a) Báscula o balanza de funcionamiento no automático de lectura electrónica.		b) Báscula o balanza de funcionamiento no automático de lectura manual	
	Error	Incertidumbre	Error	Incertidumbre
Lectura	$E_{RL} = 0,5 RL$	$u_{RL} = \frac{RL}{\sqrt{12}}$	$E_{L_i} = \frac{\sqrt{2} * RL}{2}$	$u_{L_i} = \frac{RL}{\sqrt{6}}$
Linealidad	$E_{lin} = 0,1 \% * L$ ó $E_{lin} = 0,01 \% * L$	$u_{lin} = \frac{E_{lin}}{\sqrt{3}}$	$E_{lin} = 0,1 \% * L$ ó $E_{lin} = 0,01 \% * L$	$u_{lin} = \frac{E_{lin}}{\sqrt{3}}$
Excentricidad	$E_{\theta_{exc}} = 0$	$u_{\theta_{exc}} = 0$	No aplica	$u_{\theta_{exc}} = 0$
Incertidumbre heredada	---	$u_{patrón} = \frac{U}{k}$	---	$u_{patrón} = \frac{U}{k}$
Incertidumbre combinada	$u_B = \left[u_{RL}^2 + u_{lin}^2 + u_{patrón}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$		$u_B = \left[u_{L_i}^2 + u_{lin}^2 + u_{patrón}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada (u_B) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5) y de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable (Paso 6) en la ecuación definida en el Paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando:

$$U_B = \frac{u_B^4}{\frac{u_{L_i}^4}{U_{L_i}} + \frac{u_{\theta_{lin}}^4}{U_{\theta_{lin}}} + \frac{u_{\theta_{exc}}^4}{U_{\theta_{exc}}}} ; U_B = \infty$$

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

FV	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$	u_{xi}	$u_{Y/xi}$	
∂L_i	$\frac{\partial B}{\partial L_i} =$			
$\partial \theta_{lin}$	$\frac{\partial B}{\partial \theta_{lin}} =$			
$\partial \theta_{exc}$	$\frac{\partial B}{\partial \theta_{exc}} =$			
				Unidades
				$u_B =$
				$U = \infty$

X. ANEXO III. MODELO DE ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE PARA LAS MEDICIONES EN UNA PROBETA GRADUADA.

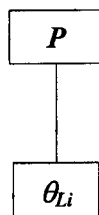
Paso 1. Definición del mensurando y del proceso de medición.

- Mensurando: ***P*** Lectura en la probeta
- Variables necesarias para determinar el mensurando:

θL_i Error por lectura
- Equipo con se realiza las mediciones:

Probeta con graduaciones para ensayo de equivalente de arena.

Paso 2. Definición de las variables aleatorias.



donde: ***P*** Probeta

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

$$P = f(\theta L_i) \quad ; \quad P = \theta L_i$$

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

$$u_P = \left[\left(\frac{\partial P}{\partial \theta L_i} u_{L_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Paso 5. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad para cada variable.

$$\frac{dP}{d\theta L_i} = 1$$

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

- *Error de lectura (L_i).* Para una lectura manual se consideran dos errores de lectura, primero para la verificar la lectura en cero y después la lectura para determinar el valor de la magnitud; por lo que el error se evalúa como:

$$E_{L_i} = \frac{\sqrt{2} * RL}{2}$$

- *Incertidumbre debida a la lectura (u_{L_i}).* Debido a que los valores de la magnitud varían alrededor de un valor medio es probable que los valores se encuentren cerca de los límites que acotan el intervalo especificado, por lo que la suposición de la distribución triangular (Figura X.III.1) para la estimación de la incertidumbre tipo B puede considerarse una mejor elección: $u_{lin} = \frac{E_{L_i}}{\sqrt{6}} = \frac{\sqrt{2} * RL}{2 * \sqrt{6}} = \frac{\sqrt{2} * RL}{\sqrt{2} * \sqrt{12}} = \frac{RL}{\sqrt{12}}$; donde: **RL** resolución de lectura del instrumento;

$$u_{L_i} = \frac{RL}{\sqrt{12}} \text{ Para la probeta con lectura manual.}$$

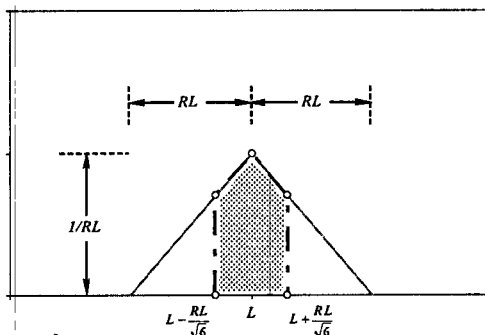


Figura X.III.1 Ilustración gráfica de la evaluación de incertidumbre normal para una magnitud a partir de una distribución triangular.

Paso 7. Estimación de incertidumbre combinada.

El cálculo de incertidumbre combinada (u_p) se hará con la sustitución de los coeficientes de sensibilidad para cada variable (Paso 5) y de los valores de la estimación de la incertidumbre de cada variable (Paso 6) en la ecuación definida en el Paso 4.

Paso 8. Determinación de los grados de libertad.

La cantidad de información utilizada para obtener las variables independientes que definen el mensurando se refleja en los grados de libertad. Por lo que, el número de grados de libertad es la cantidad de información útil en la estimación de incertidumbre del mensurando:

$$v_p = \frac{u_p^4}{\sum \frac{u_{L_i}^4}{v_{L_i}}} = \infty \quad ; \quad v_p = \infty$$

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

FV	$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$	u_{xi}	$u_{Y/xi}$	
∂L_i	$\frac{\partial P}{\partial L_i} =$..			Unidades
		$u_p =$		
		$v = \infty$		

X. ANEXO IV. MODELO DE ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE PARA REGRESIÓN LINEAL.

La regresión lineal generalmente será la relación más buscada debido a que es la más sencilla de calcular debido a que son ecuaciones de segundo orden.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

Análisis de cuadrante.

Primeramente se establece el centro del cuadrante como los valores intermedios de los datos a analizar (Figura X.IV.1).

Si la mayoría de los datos caen en el cuadrante II y III se puede decir que hay una correlación directamente proporcional.

Si la mayoría de los datos caen en el cuadrante I y IV se puede decir que hay una correlación inversamente proporcional.

Si los datos están dispersos no existe correlación.

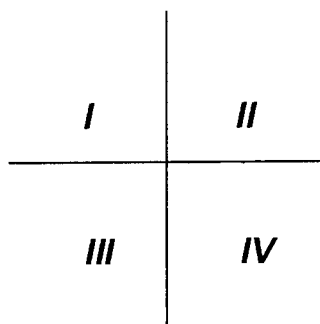


Figura X.IV.1 Cuadrantes establecidos.

Determinación de la ecuación lineal.

Calcular:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

Calcular:

$$a = \bar{Y} - b\bar{X}$$

Establecer la ecuación:

$$D = a + b * (\text{variable})$$

Cálculo del error en la estimación de a y b

Calcular:

$$S_{y/x} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - 2}$$

Calcular error de a:

$$S_a = S_{y/x} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n * \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Calcular error de b:

$$S_b = \frac{S_{y/x}}{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

Coefficiente de correlación

$$r = \sqrt{\frac{\text{var iación aplicada}}{\text{var iación real}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})}}$$

Cálculo de la incertidumbre de la medición:

Calcular:

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)^2}{n}$$

Calcular:

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)^2}{n}$$

Calcular:

$$S_{xy} = \sum XY - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)\left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)}{n}$$

Calcular:

$$S_y = \left[\frac{S_{yy} - \frac{(S_{xy})^2}{S_{xx}}}{n-2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Determinar el valor de t_{student} al 95% a dos colas.

Calcular la incertidumbre (W)

$$W = (S_y) t_{\text{student}} \left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{X})^2}{S_{xx}} \right]$$

Donde: x punto donde se quiere estimar la incertidumbre