

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Industrial

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE
MEDICIÓN EN ENSAYOS FÍSICO-MECÁNICOS DE ESPUMA DE POLIURETANO
PARA LA ACREDITACIÓN DEL LABORATORIO DE CALIDAD LAMITEX S.A. BAJO
NORMA ISO/IEC 17025:2017**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Industrial.

Autores:

Katherine Gabriela García Contreras
José Luis Jiménez Pacheco

Director:

Paulina Rebeca Espinoza Hernández
ORCID:  0000-0001-9416-5225

Cuenca, Ecuador
2024-07-09

Resumen

Este ensayo académico tiene la finalidad de dar cumplimiento específicamente a los requisitos 7.6.1 y 7.6.3 de la norma NTE INEN ISO 17025:2017 “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración” como aporte a la Acreditación del Laboratorio de Calidad Lamitex S.A. de la ciudad de Cuenca, a través del Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE). El objetivo es estimar y comparar la incertidumbre de medición de los resultados de los ensayos que enumera la norma técnica ecuatoriana NTE INEN-ISO 5999:2013 “Materiales poliméricos celulares flexibles – espuma de poliuretano para aplicaciones bajo carga excluyendo refuerzos de alfombra – requisitos”, mediante la implementación de la metodología GUM “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” o también llamada Guía ISO/IEC 98-3. Como población de estudio, se seleccionaron tres tipos de espuma de poliuretano, alta, media y baja densidad, las cuales representan una evaluación global e integral. Los métodos de ensayo cumplen con requisitos técnicos y metodologías normalizadas, es decir, cada propiedad se mide de acuerdo con la norma correspondiente. El proceso de estimación de la incertidumbre de medición parte de la definición del mensurando, el cual relaciona las magnitudes de entrada que caracterizan a la propiedad estudiada. Finalmente, se definen los límites máximos de incertidumbre apoyados en la regla de decisión basada en la aceptación simple, y se validan todos los ensayos garantizando el cumplimiento de los requisitos establecidos en la normativa correspondiente y comprobando que la incertidumbre cumple un papel importante en la evaluación de la conformidad.

Palabras clave del autor: materiales poliméricos, laboratorio de ensayo, gomaespuma



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

The purpose of this academic essay is to specifically comply with requirements 7.6.1 and 7.6.3 of the standard NTE INEN ISO 17025:2017 “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories” as a contribution to the Accreditation of the Lamitex S.A. Quality Laboratory of the city of Cuenca, through the Ecuadorian Accreditation Service (SAE). The objective is to estimate and compare the measurement uncertainty of the test results listed in the Ecuadorian technical standard NTE INEN-ISO 5999:2013 “Flexible cellular polymeric materials – polyurethane foam for applications under load excluding carpet reinforcements – requirements”, through the implementation of the GUM methodology “Guide to the Expression of Uncertainties in Measurement” or also called ISO/IEC Guide 98-3. Three types of polyurethane foam were selected as the study population: high, medium and low density, which represent a global and comprehensive evaluation. The test methods comply with technical requirements and standardized methodologies, i.e., each property was measured according to the corresponding standard. The measurement uncertainty estimation process starts with the definition of the measurand, which relates the input magnitudes that characterize the property under study. Finally, the maximum uncertainty limits are defined supported by the decision rule based on simple acceptance, and all tests are validated guaranteeing compliance with the requirements established in the corresponding standard and verifying that uncertainty plays an important role in the conformity assessment.

Author keywords: polymeric materials, testing laboratory, foam



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

1.	Antecedentes y descripción del problema	17
1.1.	Reseña del caso de estudio	17
1.2.	Servicios que pretende ofrecer el laboratorio del caso de estudio	17
1.2.1.	Determinación de la densidad	17
1.2.2.	Determinación de la dureza	17
1.2.3.	Determinación de la resiliencia por Bola Rebotante	17
1.2.4.	Determinación de la deformación remanente	18
1.2.5.	Determinación de la fatiga dinámica	18
1.2.6.	Determinación de la resistencia a la tracción y elongación a la rotura	18
1.2.7.	Determinación del comportamiento al fuego.....	18
1.2.8.	Determinación del envejecimiento térmico	18
1.2.9.	Determinación del envejecimiento por humedad	18
1.3.	Organización del laboratorio del caso de estudio	18
1.4.	Descripción del problema	19
2.	Objetivos.....	22
2.1.	Objetivo General	22
2.2.	Objetivos Específicos	22
3.	Marco Teórico.....	23
3.1.	Fundamentos metrológicos	23

3.2. Definición, objetivo y clasificación de la metrología	23
3.3. Aspectos e impactos de la metrología	24
3.4. Metrología internacional	24
3.4.1. Convención del metro	25
3.4.2. Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM)	25
3.4.3. Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM)	25
3.4.4. Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM).....	25
3.4.5. Organizaciones Regionales de Metrología (RMO)	25
3.4.6. Institutos Nacionales de Metrología (INM)	26
3.5. Metrología nacional.....	26
3.5.1. Sistema Ecuatoriano de Calidad	26
3.5.2. Acreditación	27
3.5.3. Evaluación de la conformidad	27
3.5.4. Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE).....	27
3.5.5. Organismos de Evaluación de la Conformidad (OEC)	27
3.5.6. Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN)	27
3.6. Mediciones de la evaluación de la conformidad	28
3.7. Límites de aceptación.....	28
3.8. Intervalo de aceptación.....	28
3.9. Regla de decisión basada en la aceptación simple	28
3.10. Incertidumbre de medida	29

3.11. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)	29
3.12. Aseguramiento de la validez de los resultados.....	31
3.12.1. Credibilidad, confianza y toma de decisiones	31
3.12.2. Garantía de calidad.....	31
3.12.3. Cumplimiento normativo	31
3.12.4. Colaboración e intercambio de datos.....	31
3.12.5. Responsabilidad ética.....	31
3.12.6. Economía de recursos.....	32
3.12.7. Satisfacción del cliente	32
3.12.8. Mejora continua	32
4. Equipos e instrumentos de medición	33
4.1. Flexómetro Stanley	33
4.2. Pie de Rey o Calibrador Digital Stanley	33
4.3. Balanza de precisión Mettler Toledo ME4001T/00	34
4.4. Cámara de humedad y temperatura HD-E702-100B40	34
4.5. Equipo de Fatiga/Dureza por Golpe HD-F750-1A	35
4.6. Equipo de deformación remanente HD-F750-4	36
4.7. Equipo de envejecimiento térmico y por humedad HD-E805	37
4.8. Equipo de Rebote/Resiliencia HD-F754.....	37
4.9. Equipo de resistencia a la tracción y elongación HD-F750A.....	38
4.10. Troquel/Cortadora Neumática HD-A547	39

4.11. Equipo de comportamiento al fuego HD-F871	40
5. Metodología.....	41
5.1. Revisión al marco normativo	41
5.2. Toma de probetas y ejecución de ensayos.....	41
5.3. Proceso de estimación de la incertidumbre de medición	42
5.3.1. Definir el mensurando.....	43
5.3.2. Construir el modelo de medición.....	44
5.3.3. Identificar las fuentes de incertidumbre.....	45
5.3.4. Cuantificar las fuentes de incertidumbre	45
5.3.4.1. Variabilidad por factores aleatorios. Incertidumbre estándar tipo A	46
5.3.4.2 Variabilidad por factores sistemáticos. Incertidumbre estándar tipo B	47
5.3.5. Calcular la incertidumbre combinada	49
5.3.6. Verificar los estimados de incertidumbre	53
5.3.7. Calcular la incertidumbre expandida	53
5.3.8. Expresar la incertidumbre de medida.....	54
6. Resultados.....	55
6.1. Resultados de la implementación de la metodología. Ejemplo de densidad	55
6.1.1. Cuantificación de la incertidumbre típica.....	55
6.1.1.1. Incertidumbre debida a la repetibilidad del ensayo.....	55
6.1.1.2. Incertidumbre del certificado de calibración del instrumento o equipo.....	55
6.1.1.3. Incertidumbre debida a la resolución del instrumento o equipo	55

6.1.1.4.	Incertidumbre debida a la deriva del instrumento o equipo	56
6.1.1.5.	Incertidumbre debida al error del instrumento o equipo	56
6.1.1.6.	Incertidumbre debida a la influencia de la temperatura.....	56
6.1.2.	Determinación del factor de correlación – Magnitudes correlacionadas.....	59
6.1.3.	Determinación de los coeficientes de sensibilidad	59
6.1.4.	Cálculo de las incertidumbres estándar combinadas	59
6.1.5.	Verificación de los estimados de incertidumbre.....	60
6.1.6.	Estimación de la incertidumbre combinada de la densidad.....	61
6.1.7.	Cálculo de la incertidumbre expandida de la densidad	61
6.1.8.	Expresión de la incertidumbre de medición de la densidad	61
6.2.	Incertidumbre máxima permitida para el caso de estudio	61
6.3.	Interpretación de resultados de la incertidumbre expandida	63
7.	Discusión de resultados	75
8.	Conclusiones y Recomendaciones.....	79
	Referencias	81
	Glosario	87
	Anexos	89
Anexo A.	Marco Normativo	89
Anexo B.	Diagrama de causa efecto – Ensayo de densidad.....	90
Anexo C.	Diagrama de causa efecto – Ensayo de dureza.....	91
Anexo D.	Diagrama de causa efecto - Ensayo de resiliencia	92
Anexo E.	Diagrama de causa efecto - Ensayo de deformación remanente	93

Anexo F.	Diagrama de causa efecto - Ensayo de fatiga (Pérdida de espesor)	94
Anexo G.	Diagrama de causa efecto - Ensayo de fatiga (Pérdida de dureza)	95
Anexo H.	Diagrama de causa efecto - Ensayo de resistencia a la tracción	96
Anexo I.	Diagrama de causa efecto - Ensayo de alargamiento a la rotura	97
Anexo J.	Diagrama de causa efecto - Ensayo de comportamiento al fuego	98
Anexo K.	Proceso de verificación de medidas de las probetas	99
Anexo L.	Identificación de probetas mediante códigos	99
Anexo M.	Acondicionamiento de probetas y ejecución de ensayos	100
Anexo N.	Ensayos de comportamiento al fuego y tracción-elongación.....	100
Anexo O.	Reunión con el técnico para la verificación de metodología implementada .	101

Índice de figuras

Figura 1. Matriz de interrelación de los procesos del laboratorio Lamitex	19
Figura 2. Clasificación de la metrología.....	23
Figura 3. Organizaciones Regionales de Metrología – BIPM.....	26
Figura 4. Proceso de estimación de la incertidumbre de medida.....	30
Figura 5. Flexómetro Stanley	33
Figura 6. Pie de rey o calibrador digital Stanley.....	33
Figura 7. Balanza de precisión Mettler Toledo ME4001T/00	34
Figura 8. Cámara de humedad y temperatura HD-E702-100B40	35
Figura 9. Equipo de fatiga/dureza por golpe HD-F750-1A	36
Figura 10. Equipo de deformación remanente HD-F750-4.....	36
Figura 11. Equipo de envejecimiento térmico y por humedad HD-E805	37
Figura 12. Equipo de rebote/resiliencia HD-F754	38
Figura 13. Equipo de resistencia a la tracción y elongación HD-F750-3	39
Figura 14. Troquel/cortadora neumática HD-A547	39
Figura 15. Equipo de comportamiento al fuego HD-F871	40
Figura 16. Selección de probetas por tipo y nivel	41
Figura 17. Porcentaje de influencia de las magnitudes de entrada – Ensayo de densidad.	60
Figura 18. Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de densidad	63
Figura 19. Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de dureza, A-40%	64
Figura 20. Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de dureza, B-25%	65
Figura 21. Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de dureza, B-40%	66

Figura 22. Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de dureza, B-65%	67
Figura 23. Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de resiliencia....	68
Figura 24. Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de deformación remanente	69
Figura 25. Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de fatiga	70
Figura 26. Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de fatiga	71
Figura 27. Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de resistencia a la tracción.....	72
Figura 28. Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de elongación ..	73
Figura 29. Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de comportamiento al fuego	74

Índice tablas

Tabla 1. Requisitos de la norma ISO/IEC 2017	21
Tabla 2. Requisito 13 NTE INEN-ISO 5999:2013 – Métodos de ensayo.....	43
Tabla 3. Cuantificación de incertidumbre típica – Ensayo densidad 24 kg/m ³ , nivel medio	57
Tabla 4. Factor de correlación entre magnitudes	59
Tabla 5. Verificación de los estimados de la incertidumbre combinada de las magnitudes de entrada	60
Tabla 6. Incertidumbre máxima permitida de las propiedades estudiadas	62
Tabla 7. Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de densidad	63
Tabla 8. Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de dureza, método A-40%.....	64
Tabla 9. Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de dureza, método B-25%.....	65
Tabla 10. Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de dureza, método B-40%....	66
Tabla 11. Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de dureza, método B-65%....	67
Tabla 12. Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de resiliencia	68
Tabla 13. Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de deformación remanente...	69
Tabla 14. Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de fatiga	70
Tabla 15. Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de fatiga	71
Tabla 16. Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de resistencia a la tracción ...	72
Tabla 17. Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de elongación.....	73
Tabla 18. Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de comportamiento al fuego .	74

Dedicatoria

Este gran logro lo dedico a mis amados padres, por su paciencia y esfuerzo para forjar la persona que soy. Ha sido un largo camino y confieso que muchas veces estaba a punto de rendirme, pero pensaba en todo el sacrificio que han hecho para verme cumplir esta meta, la misma que no hubiera podido culminar sin su apoyo. Me criaron con valores, con el ejemplo y lo más valioso, con la libertad de poder decidir por mí misma y equivocarme, lo cual me ha motivado a alcanzar mis objetivos sin importar las adversidades y me ha inspirado a ser una gran profesional.

¡Gracias papá y mamá!

Gabriela García.

Dedico este ensayo académico a mis padres, Manuel y María, por su inquebrantable apoyo, amor y sacrificio a lo largo de mi vida y durante este arduo proceso de investigación. Su constante aliento y ejemplo de perseverancia han sido mi mayor inspiración. A la compañía de Laminados y Textiles Lamitex S.A que contribuyeron a la realización de esta tesis, mi más sincero agradecimiento. Este logro no habría sido posible sin su ayuda y colaboración.

¡Gracias a todos por formar parte de este importante capítulo de mi vida!

José Jiménez.

Agradecimiento

Desde el inicio de nuestra carrera, la universidad ha formado parte de nuestras vidas, nos ha facilitado las herramientas necesarias para nuestro crecimiento profesional y personal. Hoy más que nunca estamos agradecidos con la prestigiosa Universidad de Cuenca, con nuestros profesores y con nuestra tutora por todo el conocimiento adquirido y el apoyo brindado para culminar esta meta y convertirnos en grandes profesionales.

Nuestra gratitud hacia la Compañía de Laminados y Textiles Lamitex S.A., por contribuir al desarrollo de este ensayo académico, tanto por los recursos e instalaciones prestadas, así como por el personal técnico que colaboró con la validación de los métodos de ensayo.

Queremos también expresar nuestra más sincera gratitud a nuestra familia, en especial a nuestros padres, quienes han sido otro pilar fundamental, gracias por su apoyo incondicional, por todo el esfuerzo y paciencia, pero sobre todo gracias por el amor que nos ha impulsado para lograr este sueño.

Por último, pero no menos importante, agradecemos a cada persona que fue parte de este proceso, a nuestros amigos y compañeros, quienes de alguna manera aportaron con su granito de arena, gracias por formar parte de nuestra experiencia universitaria.

Introducción

Todo laboratorio acreditado se considera un Organismo Evaluador de la Conformidad (OEC), y, además, se caracteriza por su competencia técnica, imparcialidad y validez de los resultados, los cuales se obtienen mediante ensayos que deben estar reconocidos por organismos de acreditación y tener validez internacional por medio del cumplimiento de los requisitos establecidos en la normativa exigida por cada país (Vásquez Rodríguez, 2020).

En Ecuador, el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE, 2024b), es el organismo que revisa el cumplimiento de los requisitos establecidos en normas, evalúa la competencia técnica y verifica los criterios de acreditación, generando así confianza en los resultados de los ensayos, los cuales afectan a la mayor parte de las industrias y transacciones comerciales nacionales e internacionales.

Para acreditar un laboratorio, se debe dar cumplimiento a los requisitos señalados en la norma ISO 17025:2017. La implementación de esta norma resulta de gran importancia para las industrias debido que permite evitar defectos y no conformidades en los productos y servicios, obteniendo altos estándares de calidad y optimizando el tiempo de respuesta y la mejora continua. El cumplimiento de los requisitos de la ISO 17025:2017 demuestra la competencia técnica y de gestión, lo que permite al laboratorio declarar resultados válidos y confiables, garantizando la fidelidad y la satisfacción del cliente (Delgado, 2023).

En el portal oficial del SAE (2024a), en la opción “Buscador de OEC Acreditados”, reposan en una base de datos todos los laboratorios acreditados del país. Dentro de los diferentes alcances que existen, no se encuentra ningún laboratorio de ensayos físico-mecánicos de espumas de poliuretano acreditado a nivel nacional. Sin embargo, el grupo comercial Chaide & Chaide, mediante su laboratorio de calidad, en el año 2018 obtuvo el certificado de designación, el cual permite realizar análisis específicos de espumas manteniendo los requisitos mínimos de cumplimiento de la norma ISO 17025 (Chaide, 2020).

Tanto la acreditación como la designación parten de las mismas normas internacionales de competencia, pero se diferencian porque para obtener la acreditación se sigue un proceso más exhaustivo, en contraste con la designación que debe cumplir requisitos técnicos mínimos para prestar el servicio, siendo solo una medida provisional que se otorga para actividades en las que no existen OEC acreditados (SAE, 2024b).

Este ensayo académico pretende aportar específicamente al cumplimiento de los requisitos 7.6.1 y 7.6.3 de la norma antes mencionada, los mismos que, exigen la *Evaluación de la incertidumbre de medición*, un término importante para el aseguramiento de la validez de los resultados que

serán reportados al cliente. Así también, se da apoyo al cumplimiento de otros requisitos, los cuales ayudarán a alcanzar el objetivo del laboratorio, obtener la acreditación.

La investigación muestra la implementación de la metodología GUM para la estimación de la incertidumbre de medición, los resultados y comparaciones de las propiedades físico-mecánicas de las espumas de poliuretano descritas en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN-ISO 5999:2013, a excepción de los ensayos de envejecimiento térmico y envejecimiento por humedad que no se han podido ensayar. Mediante una regla de decisión basada en la aceptación simple, se eligió el mejor estimador de la incertidumbre de medición, para conocer si las espumas de poliuretano son o no conformes.

Finalmente, se espera que, cuando el laboratorio cuente con el equipo de ensayo de envejecimiento térmico y envejecimiento por humedad en condiciones de operación, realice los ensayos respectivos para completar las mediciones y evaluar si la incertidumbre de las propiedades físico-mecánicas de las espumas de poliuretano son conformes y cumplen con los requisitos para obtener la acreditación.

1. Antecedentes y descripción del problema

1.1. Reseña del caso de estudio

La compañía de Laminados y Textiles Lamitex S.A., se encuentra ubicada en la ciudad de Cuenca, ésta se dedica a la fabricación y comercialización principalmente de colchones con prestigiosas marcas como: Resorpedic, Dinastic, Ecuaespumas y Laminados del Ecuador. Esta empresa forma parte de la Corporación Gerardo Ortiz, la cual en el año 2016 obtiene el certificado de calidad ISO 9001:2015, permitiéndole cumplir con altos estándares de calidad.

En la actualidad, la compañía cuenta con un laboratorio recientemente implementado para medir las propiedades físico mecánicas de las espumas de poliuretano, principal materia prima utilizada en la elaboración de sus productos, con el objetivo de garantizar el cumplimiento de los requisitos señalados en la norma ISO 17025:2017 para obtener su acreditación.

Debido al crecimiento de la demanda y a la competencia, la empresa busca mejorar sus estándares de calidad, así como, adquirir una ventaja competitiva al brindar un servicio acreditado, como consecuencia de la implementación correcta de la normativa exigida por el SAE.

1.2. Servicios que pretende ofrecer el laboratorio del caso de estudio

Según lo mencionado, cuando el laboratorio de calidad Lamitex obtenga la acreditación, podrá brindar el servicio de pruebas de ensayo para medir las propiedades de las espumas de poliuretano enlistadas en el requisito 13 de la norma técnica ecuatoriana NTE INEN-ISO 5999:2013 “Materiales poliméricos celulares flexibles – espuma de poliuretano para aplicaciones bajo carga excluyendo refuerzos de alfombra – requisitos” (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2013).

1.2.1. Determinación de la densidad

Es la magnitud que relaciona la masa de una probeta con su volumen y se mide mediante ensayos de probetas normalizadas de acuerdo con el procedimiento PR-LB-PE-002 creado por el laboratorio, el cual se basa en la norma NTE INEN-ISO 845:2014.

1.2.2. Determinación de la dureza

La dureza de indentación es una medida de las propiedades de carga de los materiales y se determina de acuerdo con el procedimiento PR-LB-PE-003 creado por el laboratorio, el cual se basa en los métodos A y B de la norma NTE INEN-ISO 2439:2014.

1.2.3. Determinación de la resiliencia por Bola Rebotante

La resiliencia es la capacidad del material para recuperar su estado original después de haber sido sometido a una carga durante un periodo de tiempo y se medirá de acuerdo con el

procedimiento PR-LB-PE-004 creado por el laboratorio, el cual se basa en la norma NTE INEN-ISO 8307:2014.

1.2.4. Determinación de la deformación remanente

El ensayo de deformación remanente indica la diferencia entre el espesor inicial y el espesor final de una probeta después de un tiempo de recuperación y se mide de acuerdo con el procedimiento PR-LB-PE-005 creado por el laboratorio, el cual se basa en la Norma NTE INEN-ISO 1856:2014.

1.2.5. Determinación de la fatiga dinámica

La fatiga dinámica por carga constante cíclica hace referencia al daño estructural de la probeta, ya sea en términos de pérdida de espesor o pérdida de dureza y se mide de acuerdo con el procedimiento PR-LB-PE-006 creado por el laboratorio, el cual se basa en la norma NTE INEN-ISO 3385:2014.

1.2.6. Determinación de la resistencia a la tracción y elongación a la rotura

La resistencia a la tracción es el esfuerzo máximo aplicado durante la elongación a la rotura que corresponde al porcentaje de alargamiento a la rotura de una probeta. Estas propiedades se miden de acuerdo con el procedimiento PR-LB-PE-007 creado por el laboratorio, el cual se basa en la norma NTE INEN-ISO 1798:2014.

1.2.7. Determinación del comportamiento al fuego

Se determina la velocidad de combustión de la probeta, es decir, la longitud quemada durante el tiempo que tarda la llama en extinguirse, de acuerdo con el procedimiento PR-LB-PE-008 creado por el laboratorio, el cual se basa en la norma NTE INEN-ISO 3582:2014.

1.2.8. Determinación del envejecimiento térmico

Esta propiedad mide el aumento de la dureza y resistencia de los materiales a través de probetas normalizadas a 140 °C durante 16 horas de acuerdo con el procedimiento PR-LB-PE-009 creado por el laboratorio, el cual se basa en la norma NTE INEN-ISO 2440:2014.

1.2.9. Determinación del envejecimiento por humedad

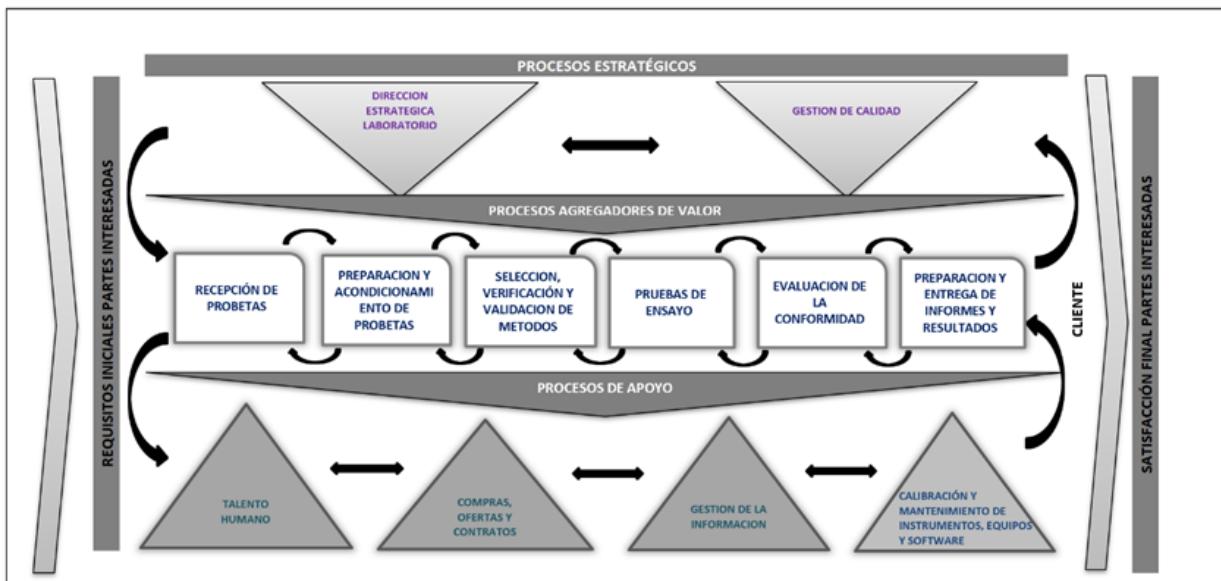
Para medir esta propiedad, las probetas de ensayo se mantendrán al 100 % de humedad relativa o vapor saturado por mínimo 3 horas de acuerdo con el procedimiento PR-LB-PE-009 creado por el laboratorio, el cual se basa en la norma NTE INEN-ISO 2440:2014.

1.3. Organización del laboratorio del caso de estudio

El laboratorio de calidad Lamitex, cuenta con procesos estratégicos, procesos agregadores de valor y procesos de apoyo, los cuales están interrelacionados entre sí. La Figura 1 detalla cada uno de los procesos agregadores de valor en los que se participó para realizar este ensayo académico.

Figura 1

Matriz de interrelación de los procesos del laboratorio Lamitex.



Fuente: Lamitex S.A.

Es importante mencionar que, la estimación de la incertidumbre de medición es imprescindible dentro del proceso de evaluación de la conformidad. La incertidumbre de la medida hace que siempre exista el riesgo de equivocarse al decidir si un elemento cumple con un requisito determinado, basado en el valor medido de una propiedad. Hay dos tipos de decisiones incorrectas: cuando existe la posibilidad de que un elemento, que se acepta como conforme, en realidad no lo sea, y la posibilidad de que un elemento, que se rechaza por no ser conforme, en realidad lo sea (Centro Español de Metrología [CEM], 2015).

1.4. Descripción del problema

En el portal oficial del SAE en la opción “Buscador de OEC Acreditados”, se encuentra la base de datos actualizada, donde se pudo identificar que no existen laboratorios de ensayos físico mecánicos de espumas de poliuretano a nivel nacional, razón por la cual, el Grupo Ortiz decide implementar un laboratorio para control de calidad interno de sus productos y paralelamente seguir con el proceso de acreditación requerido por este órgano oficial para poder brindar un servicio garantizado (SAE, 2023).

Garantizar la calidad de los resultados entregados al cliente es uno de los requisitos de la norma NTE INEN ISO 17025:2017 para obtener la acreditación. Por esta razón, el laboratorio debe realizar los ensayos de las propiedades enumeradas en el requisito 13 de la norma NTE INEN-ISO 5999:2013 para las espumas de poliuretano y, posteriormente, estimar la incertidumbre

asociada a cada propiedad bajo las condiciones propias de cada ensayo para asegurar la validez de los resultados por medio de un informe o certificado.

El resultado de un certificado no está completo si no va acompañado del valor de la *incertidumbre de medición* asociada a la propiedad evaluada, tal como lo cita Pérez (2012) en su artículo Estimación de incertidumbres - Guía GUM, “una medida sin una indicación cuantitativa de la calidad del resultado es inservible, esta indicación es lo que denominaremos incertidumbre. La palabra incertidumbre significa duda, duda sobre la validez del resultado de una medida” (p. 114). En resumen, cuando el laboratorio estime la incertidumbre de medición y elija el mejor estimador para la población de estudio definida por el tipo de espuma y por el nivel del lote donde fueron tomadas las probetas, debe comprobar mediante límites de aceptación generalmente basados en una regla de decisión, si las espumas son o no conformes de acuerdo con los requisitos para informar resultados confiables y finalmente lograr acreditarse como un OEC.

En la Tabla 1, se presentan específicamente los ítems de los requisitos a los que apoyará al cumplimiento este estudio y, a su vez, contribuirán a la acreditación, teniendo como objetivo principal la evaluación de la incertidumbre de medición.

Tabla 1*Requisitos de la norma ISO/IEC 17025:2017*

Requisitos de la norma ISO/IEC 17025:2017		
Requisito	Descripción	Ítem
7.6 Evaluación de la incertidumbre de medición	7.6.1 Los laboratorios deben identificar las contribuciones a la incertidumbre de medición. Cuando se evalúa la incertidumbre de medición, se deben tener en cuenta todas las contribuciones que son significativas, incluidas aquellas que surgen del muestreo, utilizando los métodos apropiados de análisis.	N/A
	7.6.3 Un laboratorio que realiza ensayos debe evaluar la incertidumbre de medición. Cuando el método de ensayo no permite una evaluación rigurosa de la incertidumbre de medición, se debe realizar una estimación basada en la comprensión de los principios teóricos o la experiencia práctica de la realización del método.	N/A
7.7 Aseguramiento de la validez de los resultados	7.7.1 Los datos resultantes se deben registrar de manera que las tendencias sean detectables y cuando sea posible, se deben aplicar técnicas estadísticas para la revisión de los resultados:	c) comprobaciones funcionales del equipamiento de ensayo y de medición;
		f) repetición del ensayo o calibración utilizando los mismos métodos o métodos diferentes;
7.8 Informe de resultados	7.8.3.1 c) cuando sea aplicable, la incertidumbre de medición presentada en la misma unidad que el mensurando o un término relativo al mensurando cuando:	i) revisión de resultados informados.
		- sea pertinente a la validez o aplicación de los resultados de ensayo;
		- una instrucción del cliente que lo requiera;
		- la incertidumbre de medición afecte la conformidad con un límite de especificación.

Nota: En esta tabla se excluyen los ítems que no tienen alcance en el presente estudio.

* N/A: No aplica

2. Objetivos

2.1. *Objetivo General*

Estimar y comparar la incertidumbre de medición de los ensayos físico-mecánicos de espuma de poliuretano en el laboratorio de calidad Lamitex S.A., para contribuir a la acreditación de la norma ISO/IEC 17025:2017.

2.2. *Objetivos Específicos*

- Realizar una revisión de la bibliografía relacionada a los requisitos para la ejecución de los ensayos y a la metodología para la estimación de la incertidumbre de medición.
- Elaborar el procedimiento de estimación de la incertidumbre de medición de ensayos físico mecánicos del laboratorio Lamitex S.A.
- Ejecutar los ensayos para la recolección de datos para la estimación de la incertidumbre de medición.
- Implementar la metodología GUM mediante la identificación de las fuentes significativas de incertidumbre que afectan al sistema de medición.
- Diseñar un simulador que estime la incertidumbre expandida de las propiedades medidas en las espumas de poliuretano.
- Presentar los resultados después de compararlos y elegirlos de acuerdo con el criterio de aceptación con el que se pretende aportar a la acreditación del laboratorio.

3. Marco Teórico

3.1. Fundamentos metrológicos

La metrología es una ciencia básica que traduce el progreso de una sociedad en medidas. De acuerdo con el Instituto de la Ingeniería de España (IIE) & el Centro Español de Metrología (CEM) (2019) del libro La Metrología también existe, introducen al lector a la metrología y exponen en su obra la definición, objetivo, clasificación, aspectos e impactos, así como también hablan sobre la metrología internacional, lo cual se resume a continuación.

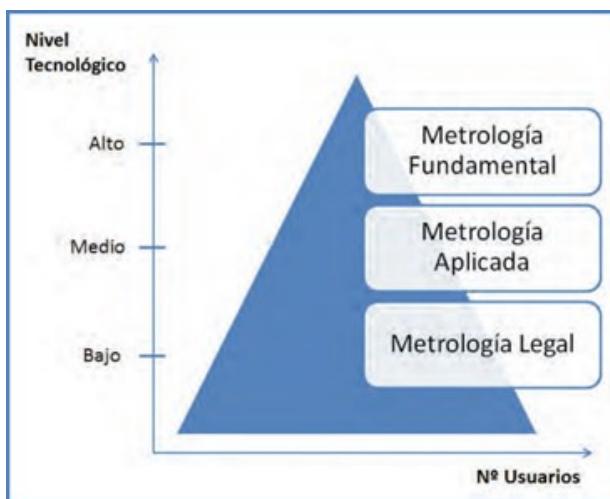
Hoy en día, con ayuda de la ciencia y la tecnología es posible desde desarrollar nuevos materiales, elaborar productos inteligentes hasta alterar la materia a nivel atómico o curar enfermedades catastróficas con instrumentos y técnicas no invasivas como los escáneres cerebrales gracias a la evolución de las medidas.

3.2. Definición, objetivo y clasificación de la metrología

De acuerdo con el CEM (2012), la metrología se define como la “Ciencia de las mediciones y sus aplicaciones”, incluyendo todos los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones, cualquiera que sea su incertidumbre de medida y su campo de aplicación. El objetivo de la metrología es el estudio de las propiedades medibles, los sistemas de unidades de medida, los patrones, métodos y técnicas de medición, la trazabilidad metrológica, la valoración de la exactitud de las mediciones y su mejora constante.

Figura 2

Clasificación de la metrología



Fuente: IIE & CEM, 2019.

La metrología se clasifica por el nivel de tecnología aplicada y la cantidad de usuarios a los que afecta, como se muestra en la Figura 2.

3.2.1. Metrología fundamental o científica

Su objetivo es el desarrollo y mantenimiento de los patrones de medida, realizaciones prácticas de las definiciones de las unidades correspondientes.

3.2.2. Metrología aplicada o industrial

Enfocada al aseguramiento de la exactitud de los instrumentos de medida utilizados en los procesos productivos y de control de la industria.

3.2.3. Metrología legal

Relacionada con el aseguramiento de la exactitud de los instrumentos de medida cuyos resultados pueden tener influencia sobre la transparencia de las transacciones comerciales, la salud y seguridad de las personas, así como en el medio ambiente. El estudio desarrollado hace uso de la metrología aplicada o industrial porque requiere de un nivel medio de tecnología y, por lo general, afecta a industrias, organismos y laboratorios que realizan ensayos y calibraciones en productos.

3.3. Aspectos e impactos de la metrología

La mayoría de las veces no se hace conciencia de la importancia de la metrología y cómo impacta en la sociedad. Prácticamente, toda persona es usuaria de la metrología desde que nace, porque se confía en los resultados de los equipos o instrumentos usados, de diferentes maneras como cuando un individuo se somete a un diagnóstico médico o una dosis terapéutica, necesita saber el nivel de consumo en servicios básicos, información estadística al navegar por internet, al comercializar productos es importante conocer sus pesos o volúmenes, o en actividades como identificar el tiempo al ver la hora en el reloj, o cuando se pide el valor que marca el taxímetro, etc. (Blanco et al., 2020).

Las legislaciones metrológicas establecen las bases para disponer de los patrones correctos para las unidades de medida, verificar el uso de los equipos e instrumentos, así como los procedimientos de medición aplicados y la evaluación de la conformidad de los productos, basándose en normas y requisitos. La metrología es considerada un término de competitividad, debido a que, la capacidad de medición de una empresa o país se refleja a través del nivel de apoyo a los procesos de innovación y desarrollo tecnológico e industrial (Velasco Agudelo, 2022).

3.4. Metrología internacional

El comercio internacional confía en las medidas y ensayos de productos, debido a que, la metrología ayuda a eliminar las barreras técnicas, así como al desarrollo de ciertas áreas como la ingeniería, la agricultura, la medicina, el medio ambiente, la química, las ciencias físicas,

biológicas, entre otras, que aportan al crecimiento social y económico de los países (Ticona Canaza & Prado Venegas, 2023).

La estructura metrológica internacional es de reconocimiento mundial y sirve a las diferentes estructuras metrológicas de los países para aceptar y confiar en las medidas a nivel internacional (Santizo Soto, 2022). Dentro de los organismos que la conforman se tiene:

3.4.1. Convención del metro

Tratado diplomático que da autoridad a la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), al Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) y al Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) como entes reguladores en temas metrológicos (Lugo Luévano, 2023).

3.4.2. Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM)

Está compuesta por representantes de Gobiernos de los estados miembros, y por observadores de otros estados y economías asociadas. Analiza informes del CIPM, examina el trabajo del BIPM y de los Institutos Nacionales de Metrología (INM), así también, aprueba recomendaciones y resoluciones metrológicas internacionales (Chalí Izquierdo, 2022).

3.4.3. Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM)

Conformado por 18 miembros de países firmantes de la Convención del Metro. Con ayuda de la CGPM deben garantizar la unificación y uniformidad de las unidades de medida. El CIPM mediante sus comités consultivos, participa en el avance del mundo científico, la redefinición de unidades de medida, el seguimiento, la identificación, planificación y ejecución de comparaciones de patrones nacionales de medida para asegurar la consistencia de la metrología mundial y del Sistema Internacional de Unidades (SI) (González et al., 2021).

3.4.4. Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM)

Su función es asegurar la uniformidad de las medidas y su trazabilidad al SI. Se encarga de la coordinación internacional de la metrología a través de los INM (Reyes Ponce & Mejías Sánchez, 2021).

3.4.5. Organizaciones Regionales de Metrología (RMO)

Agrupaciones de cada país que ayudan a fortalecer las relaciones, los intercambios y la cooperación científica entre los INM de las regiones vecinas. Actualmente existen 6 RMO reconocidas: EURAMET, COOMET, APMP, SIM, AFRIMETS y GULFMET (Hurtado-Mejía, 2022) como se puede ver en la Figura 3.

Figura 3

Organizaciones Regionales de Metrología – BIPM



Fuente: IIE & CEM, 2019.

3.4.6. Institutos Nacionales de Metrología (INM)

Conjunto de Institutos Nacionales de Metrología de diferentes países.

3.5. Metrología nacional

En 2001, el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN, 2024) es reconocido a nivel internacional como el representante en temas metrológicos del país. Este organismo se encarga de implementar los requisitos propuestos por el CIPM, dentro de los cuales incluye la implementación de un sistema de gestión de calidad basado en la norma ISO/IEC 17025 y el uso del SI.

En 2007, la ley del Sistema de Calidad Ecuatoriano otorgó al INEN el estatus de brazo técnico nacional dependiente del Ministerio de Industria y Productividad. El INEN también es miembro de la Comisión Panamericana de Normas (COPANT) y del Congreso de Normas del Área del Pacífico (PASC), y forma parte del Programa de Países Afiliados de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) (International Organization for Standardization [ISO], 2024).

3.5.1. Sistema Ecuatoriano de Calidad

El Sistema Ecuatoriano de Calidad está conformado por un conjunto de procesos, procedimientos e instituciones públicas responsables del cumplimiento de los principios y mecanismos de la calidad y la evaluación de la conformidad (Ley del Sistema Ecuatoriano de la Calidad, 2021).

3.5.2. Acreditación

Procedimiento mediante el cual un organismo autorizado reconoce que una organización es competente para la realización de una determinada actividad de evaluación de la conformidad (Serrano Blanco, 2013).

3.5.3. Evaluación de la conformidad

Actividad obligatoria para asegurar la consistencia de la conformidad en todos los niveles del proceso de producción, garantizando el cumplimiento de las condiciones normalizadas o los requisitos específicos del producto, proceso o sistema (Serrano Blanco, 2013).

En la evaluación de la conformidad, el resultado de una medida es utilizado para decidir si un elemento cumple con un requisito específico. Después de medir una magnitud determinada, se puede (a) aceptar el elemento, (b) rechazar el elemento, (c) realizar otra medida, y así continuamente (CEM, 2015). El Servicio de Acreditación Ecuatoriano y el Servicio Ecuatoriano de Normalización son parte esencial del Sistema Ecuatoriano de Calidad.

3.5.4. Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE)

En Ecuador, el órgano oficial de acreditación es el Servicio de Acreditación Ecuatoriano, entidad adscrita al Ministerio de Industrias y Productividad (MIPRO). El SAE acredita a laboratorios, organismos de inspección y organismos de certificación, quienes en conjunto forman los organismos de evaluación de la conformidad (OEC). Al Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE, 2024), lo evalúa otros organismos regionales y mundiales como:

IAAC: Cooperación Interamericana de Acreditación.

ILAC: Cooperación Internacional de Acreditación de Laboratorios.

IAF: Foro Internacional de Acreditación.

3.5.5. Organismos de Evaluación de la Conformidad (OEC)

Son personas o entidades independientes e imparciales, encargados de realizar actividades de evaluación de la conformidad. En Ecuador son designados mediante análisis de su capacidad técnica y operativa para prestar servicios de evaluación de la conformidad de la calidad de productos y servicios, de acuerdo a las competencias especificadas en la Ley del Sistema Ecuatoriano de Calidad (Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca, 2024).

3.5.6. Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN)

El INEN es el Instituto Ecuatoriano de Normalización, el cual se encarga de la regulación técnica y metrológica, la evaluación de la conformidad, con el fin de aportar al desarrollo de productos y

servicios que protejan la salud y seguridad de los consumidores, así como faciliten el comercio entre países (INEN, 2024).

3.6. *Mediciones de la evaluación de la conformidad*

La evaluación de la conformidad consta de la secuencia de tres operaciones:

- Medir la propiedad de interés.
- Comparar el resultado de medida con el requisito especificado.
- Decidir la siguiente acción.

Cuando se realizan ensayos y se obtiene el resultado de medida, normalmente, las comparaciones o decisiones se realizan mediante una regla de decisión establecida previamente, que depende del resultado de medida, del requisito especificado y de las consecuencias de una decisión incorrecta (CEM, 2015).

3.7. *Límites de aceptación*

Un elemento se acepta como conforme o se rechaza como no conforme de acuerdo con una especificación, basada en el valor medido de una propiedad del elemento relacionado a una regla de decisión que especifica el papel de la incertidumbre de medida al formular los criterios de aceptación (CEM, 2015).

3.8. *Intervalo de aceptación*

Definido por uno o dos límites de aceptación, intervalo de valores medidos de una propiedad, del que deriva la aceptación del elemento (CEM, 2015).

3.9. *Regla de decisión basada en la aceptación simple*

Dentro de reglas de decisión que pueden aplicarse cuando el conocimiento de una propiedad de interés se expresa en términos de la mejor estimación y su intervalo de cobertura correspondiente, se tiene a la denominada aceptación simple o riesgo compartido.

Esta regla indica que, tanto el fabricante como el consumidor comparten las consecuencias de las decisiones erróneas, debido a que, acuerdan aceptar o rechazar un elemento según cuya propiedad medida se encuentre dentro o fuera del intervalo de tolerancia.

En la práctica, para mantener la posibilidad de las decisiones erróneas dentro de límites aceptables, generalmente, se incorpora el requisito de considerar y juzgar la incertidumbre de medida como aceptable para el fin previsto.

Una aproximación a esta consideración radica en exigir que la incertidumbre expandida asociada U , para un factor de cobertura $k = 2$, satisfaga $U \leq U_{máx}$, siendo $U_{máx}$ una incertidumbre máxima aceptable, acordada entre ambas partes (CEM, 2015).

3.10. Incertidumbre de medida

El CEM (2012) define a la incertidumbre de medida como un parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza. Así también, el autor enlista las siguientes notas:

NOTA 1: La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos asociados a correcciones y a valores de patrones, así como de la incertidumbre debida a la definición. En ocasiones no se corrigen los efectos sistemáticos sino se tratan como componentes de incertidumbre.

NOTA 2: Las componentes de la incertidumbre de medida pueden determinarse mediante una evaluación tipo A, a través de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Así también, la evaluación tipo B, se evalúa a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.

Del mismo modo, la ISO (2017) en su norma ISO/IEC 17025:2017, en su nota 2 del requisito 7.6 evaluación de la incertidumbre de medición detalla que, para un método en particular en el que la incertidumbre de medición de los resultados se haya establecido y verificado, no se necesita evaluar la incertidumbre de medición para cada resultado, si el laboratorio puede demostrar que los factores críticos de influencia identificados están bajo control.

3.11. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)

En la página web de Interface Force Measurement Solutions (IFMS, 2023) en el contexto de prueba y medición, GUM significa guía para la expresión de la incertidumbre en la medición. Es un documento ampliamente reconocido y aceptado internacionalmente publicado por el Comité Conjunto de Guías en Metrología (JCGM), que proporciona pautas para evaluar y expresar incertidumbres en los resultados de las mediciones.

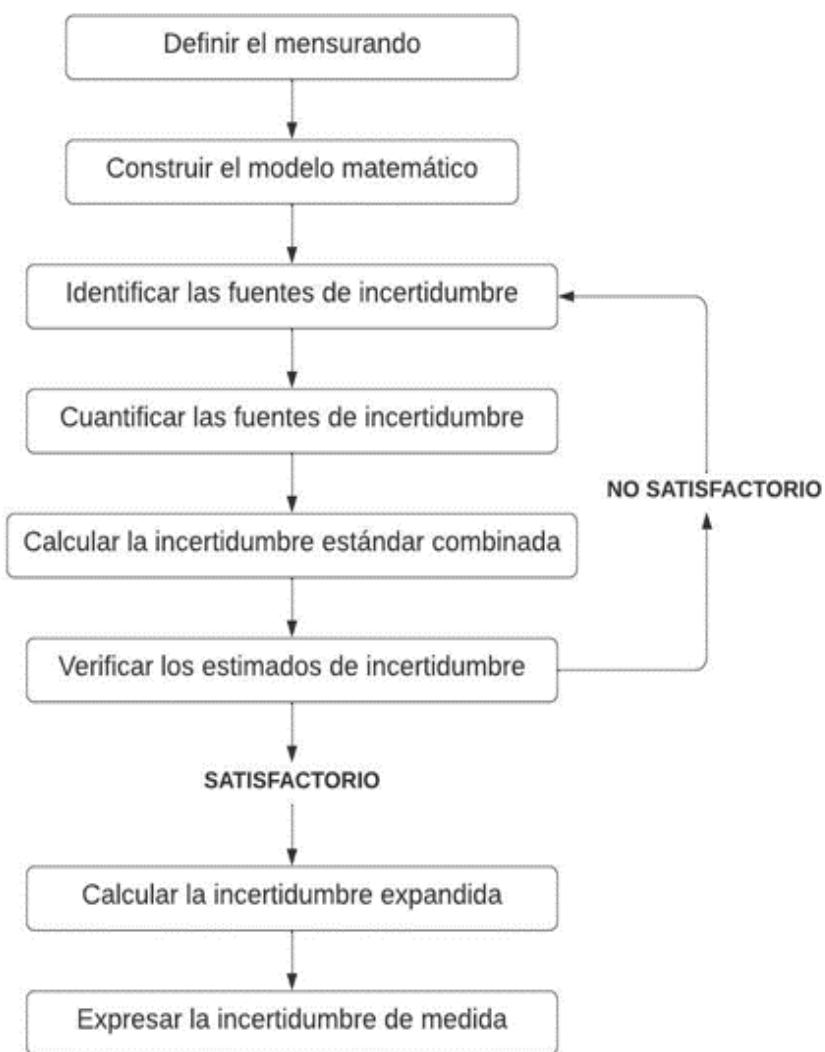
GUM establece reglas generales, términos y conceptos relacionados con la incertidumbre, así como los métodos para el cálculo de la incertidumbre y brinda orientación para informar y documentar las incertidumbres en los resultados de las mediciones.

La guía menciona que la evaluación de la incertidumbre no es una tarea rutinaria ni algo estrictamente matemático, sino que depende del conocimiento detallado del mensurando y del proceso de medición. La calidad y utilidad de la incertidumbre asociada al resultado de una medición dependen de la comprensión, análisis crítico e integridad de las personas involucradas en su estimación.

Para el laboratorio es importante conocer un valor de incertidumbre apropiado para cada una de las propiedades medidas en las espumas de poliuretano. Para obtener la acreditación, esta incertidumbre debe estimarse en base a referencias técnicas o guías normalizadas, es por esto que se adopta la metodología GUM para el tratamiento de los datos de este estudio, tal como se detalla en la siguiente figura.

Figura 4

Proceso de estimación de la incertidumbre de medida



Fuente: Elaboración propia.

3.12. Aseguramiento de la validez de los resultados

Dentro del proceso de medición en un laboratorio, es de vital importancia el aseguramiento de la validez de los resultados, debido a algunos factores que afectan la calidad y la confiabilidad de la información brindada. El laboratorio de calibración Metrindust (2023), enumera los beneficios que se obtienen al asegurar la validez de los resultados:

3.12.1. Credibilidad, confianza y toma de decisiones

Los resultados de laboratorio frecuentemente son utilizados para tomar decisiones de gran impacto en diversas áreas, como la medicina, la investigación científica, la industria y la seguridad alimentaria, entre otras. Asegurar la validez de los resultados es primordial para certificar la credibilidad y la confianza en la información entregada al cliente. Si los resultados no son válidos, se pueden tomar decisiones incorrectas que generan graves consecuencias.

3.12.2. Garantía de calidad

El aseguramiento de la validez es parte integral de los programas de garantía de calidad en laboratorios. Los estándares y las prácticas de aseguramiento de la calidad han sido diseñados para garantizar la veracidad, precisión, repetibilidad y confiabilidad de los procesos de medición.

3.12.3. Cumplimiento normativo

Los laboratorios están sujetos a regulaciones y normativas que requieren el cumplimiento de estándares específicos. Para cumplir con los requisitos y garantizar que los datos obtenidos cumplan los estándares que dicta la normativa correspondiente es importante asegurar la validez de los resultados.

3.12.4. Colaboración e intercambio de datos

La validez de los resultados está ampliamente relacionada con la capacidad de reproducir los experimentos y mediciones. Otros laboratorios no podrán repetir el estudio en el caso de no tener resultados válidos, los cuales son más propensos a ser admitidos y utilizados por otros investigadores y laboratorios, facilitando la colaboración y el intercambio de datos, lo cual estimula el desarrollo del conocimiento en la comunidad científica.

3.12.5. Responsabilidad ética

Asegurar la validez de los resultados es un asunto de ética. Proveer información errónea puede traer consecuencias perjudiciales para las empresas y la sociedad en general. Garantizar la integridad de los resultados es la responsabilidad ética del personal involucrado en el laboratorio.

3.12.6. Economía de recursos

Los resultados no válidos pueden ocasionar pérdida de recursos, tiempo y esfuerzo. Realizar experimentos una y otra vez debido a resultados no válidos puede generar mayores costos. El aseguramiento de la validez previene el desperdicio de recursos.

3.12.7. Satisfacción del cliente

En laboratorios que prestan servicios a clientes externos, como laboratorios de calibración, ensayos y/o clínicos; es primordial garantizar la validez de los resultados para la satisfacción del cliente. Los clientes que confían en la calidad de los resultados generalmente regresan a seguir utilizando los servicios del laboratorio.

3.12.8. Mejora continua

El aseguramiento de la validez involucra la implementación de procesos de control de calidad y la identificación de mejoras en los métodos y procedimientos. Esto provoca interés en la cultura de mejora continua en el personal del laboratorio.

4. Equipos e instrumentos de medición

4.1. Flexómetro Stanley

Se define como un instrumento usado para medir longitudes en superficies rectas o curvas. Se compone básicamente de una cinta métrica de metal, autoenrollable, compactada al interior de una carcasa portátil (Pavco Wavin, 2018).

Figura 5

Flexómetro Stanley



Fuente: Pavco Wavin, 2018.

4.2. Pie de Rey o Calibrador Digital Stanley

Este calibrador manual (pie de rey o Vernier) con lectura digital de doble escala permite mediciones en pulgadas y milímetros, se utiliza para lecturas internas, externas y de profundidad con una precisión de 0,01mm (0,0005"). Debido a que es un instrumento de precisión se aconseja que sea guardado en su estuche cuando esté fuera de uso (Stanley, 2024).

Figura 6

Pie de rey o calibrador digital Stanley



Fuente: Stanley, 2024.

4.3. *Balanza de precisión Mettler Toledo ME4001T/00*

Es un equipo fiable para un pesaje sencillo, rápido y eficiente. Con una capacidad de 4.200 gramos, ajuste automático FACT, tecnologías de pesaje confiables entre otras características que garantizan un rendimiento de pesaje continuo y preciso. Su pantalla táctil cuenta con menús simples, haciéndola fácil de operar. Su construcción robusta de acero inoxidable y la protección de sobrecargas aseguran un rendimiento confiable, incluso bajo un intenso uso diario (Mettler-Toledo, 2024).

Figura 7

Balanza de precisión Mettler Toledo ME4001T/00



Fuente: Mettler-Toledo, 2024.

4.4. *Cámara de humedad y temperatura HD-E702-100B40*

Este equipo de acondicionamiento se trata de una cámara que puede simular varios ambientes de temperatura y humedad constante de acuerdo con las condiciones requeridas dentro de un rango de -70 °C a 150 °C y de 20 % al 98 % respectivamente. Es adecuado para ensayar productos electrónicos, electrodomésticos, alimentos, embalajes, caucho, plástico, metales, entre otros, cumpliendo con los parámetros de confiabilidad y estabilidad en entornos hostiles.

Se compone de una pantalla táctil, una ventana de observación de vidrio templado, múltiples funciones de control, interfaz de computadora y está equipada con control de programación de alta precisión y sistema de control de punto fijo, siendo fácil de operar y proporcionar el mejor rendimiento de ensayo en diferentes condiciones ambientales, tales como alta temperatura y baja humedad, alta temperatura y alta humedad y viceversa (Haida International, 2024a).

Figura 8

Cámara de humedad y temperatura HD-E702-100B40



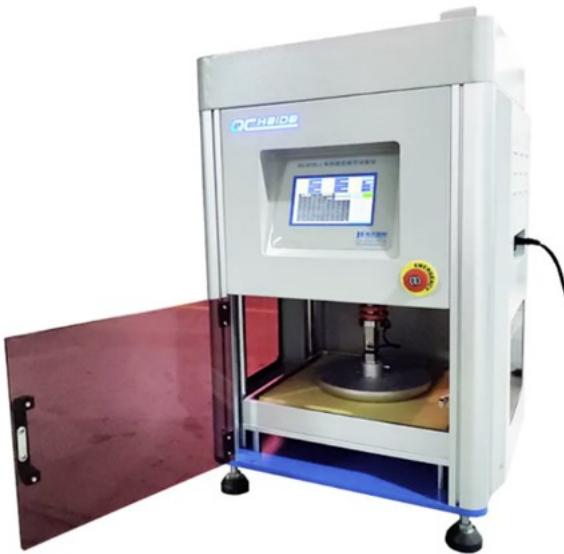
Fuente: Haida International, 2024a.

4.5. Equipo de Fatiga/Dureza por Golpe HD-F750-1A

El equipo de ensayo de fatiga dinámica de golpe de espuma se utiliza para probar la fatiga de la espuma repitiendo la indentación de una pieza de prueba con un indentador de área más pequeña que la pieza de prueba, manteniéndose la carga máxima alcanzada durante cada ciclo dentro de los límites especificados. La máquina puede ajustar la placa inferior automáticamente durante la prueba para proporcionar compensación de fuerza de acuerdo a lo programado (Haida International, 2024c).

Figura 9

Equipo de fatiga/dureza por golpe HD-F750-1A



Fuente: Haida International, 2024b.

4.6. Equipo de deformación remanente HD-F750-4

El equipo de deformación remanente de esponja es un tipo de horno de secado que funciona a través de métodos de circulación de aire caliente para homogeneizar la distribución de la temperatura, aplicado para secar, hornear, derretir cera, fundir y esterilizar, dentro de empresas industriales, mineras, laboratorios e institutos de investigación científica (Haida International, 2024f).

Figura 10

Equipo de deformación remanente HD-F750-4



Fuente: Haida International, 2024d.

4.7. *Equipo de envejecimiento térmico y por humedad HD-E805*

Conformado por una carcasa de acero inoxidable y agujeros de observación en la puerta, hecho con materiales refractarios de alta calidad, fibra o cerámica liviana. El horno de alta temperatura es usado en plástico, caucho, embalaje, aparatos, maquinaria y metalurgia, industria química, etc., y se aplica para la calefacción de empresas industriales y mineras, unidades de investigación científica para análisis químicos, determinación de laboratorio de física y tratamiento térmico de productos pequeños en general (Haida International, 2024d)

Figura 11

Equipo de envejecimiento térmico y por humedad HD-E805



Fuente: Haida International, 2024c.

4.8. *Equipo de Rebote/Resiliencia HD-F754*

Esta máquina cumple con los estándares de prueba ISO 8307. Es apropiado para medir el rendimiento del rebote de la bola que cae en la espuma de poliuretano. Utiliza una bola de acero con un diámetro y masa determinados para que caiga libremente sobre la muestra de espuma a una altura específica y calcula la altura máxima del rebote de la bola de acero. El porcentaje de la relación de altura de caída es la tasa de rebote, y la tasa de rebote representa el rendimiento de rebote de la espuma. La máquina está controlada por un microprocesador, y tiene características de seguridad, confiabilidad y alta precisión de medición (Haida International, 2024c).

Figura 12

Equipo de rebote/resiliencia HD-F754



Fuente: Haida International, 2024b.

4.9. *Equipo de resistencia a la tracción y elongación HD-F750A*

Los equipos de ensayos de tracción se utilizan para probar tensión, compresión, fuerza de corte, adhesión, fuerza de pelado, resistencia al desgarro, etc., de muestras, semiproductos y productos terminados en el campo del caucho, plástico, metal, nailon, telas, papel, aviación, embalaje, arquitectura, petroquímica, electrodomésticos, automóviles, etc., que son las instalaciones básicas para el control de calidad en la entrada (IQC), control de calidad (QC), inspección física, investigación mecánica y desarrollo de materiales.

Al adoptar la plataforma Windows, todas las configuraciones de parámetros se pueden procesar en el cuadro de diálogo que funciona fácilmente, los datos de la prueba pueden mostrarse directamente en la pantalla principal, este equipo cuenta con modelos de alta calidad, precisos y confiables (Haida International, 2024g).

Figura 13

Equipo de resistencia a la tracción y elongación HD-F750-3



Fuente: Haida International, 2024e.

4.10. Troquel/Cortadora Neumática HD-A547

La cortadora neumática debe estabilizarse en una superficie plana, su uso es ideal para el corte neumático de varias especificaciones de probetas, aptas para cortar caucho, plástico, cuero, etc., en el laboratorio. La máquina es una forma neumática de proporcionar la presión necesaria mediante una válvula de aire para cortar piezas, de forma rápida, la cual permite ahorrar la mano de obra para cortar todo tipo de piezas (Haida International, 2024e).

Figura 14

Troquel/cortadora neumática HD-A547



Fuente: Haida International, 2024d.

4.11. *Equipo de comportamiento al fuego HD-F871*

Este equipo está diseñado y fabricado de acuerdo con ISO 3582 para probar las características de combustión horizontal de muestras pequeñas de materiales poliméricos porosos flexibles expuestos a fuentes de calor de baja energía. El ensayo se limita a muestras con espesores superiores a 5 mm, y los resultados del ensayo de muestras con diferentes espesores no son comparables (Haida International, 2024b).

Figura 15

Equipo de comportamiento al fuego HD-F871



Fuente: Haida International, 2024b.

5. Metodología

El presente ensayo académico, se desarrolla en base a los resultados de los ensayos del laboratorio, mediante la revisión del marco normativo correspondiente, así como de implementación de la metodología GUM para la estimación de la incertidumbre de medida, con el objetivo de aportar a la acreditación del laboratorio de calidad Lamitex.

5.1. Revisión al marco normativo

Realizar pruebas de ensayo implica un nivel de responsabilidad para el analista o la persona encargada de ejecutar los ensayos, por esta razón, para el desarrollo del presente estudio se realiza la revisión de todos los documentos técnicos del laboratorio, tales como procedimientos, instructivos, manuales, registros, etc., así también, se sustenta en el marco normativo especificado en la tabla del Anexo A.

5.2. Toma de probetas y ejecución de ensayos

Al ser un estudio global e integral, para la población de estudio se tomaron tres tipos de espuma de diferentes densidades: alta, media y baja. De modo similar, las muestras se tomaron en tres niveles de distintos lotes, es decir, nivel superior, nivel medio y nivel inferior como se muestra en la Figura 16.

Figura 16

Selección de probetas por tipo y nivel

Tipo de espuma	Densidad (kg/m^3)	Nivel y lote		
		Lote 1	Lote 2	Lote 3
Negra especial	16	NS		
Amarilla especial	24		NM	
Amarilla látex	30			NI

Fuente: Elaboración propia

El laboratorio cuenta con sus propios procedimientos para la ejecución de cada uno de los ensayos, creados en base a las normas descritas en el requisito 13 de la norma técnica ecuatoriana NTE INEN-ISO 5999:2013 enlistadas en la Tabla 2, dependiendo de la propiedad a ser medida. Estos procedimientos cumplen con los requisitos que exige la normativa, tales como dimensiones, número de probetas, acondicionamiento, procedimiento de medición, expresión de resultados, entre otra información técnica.

Inicialmente, se separa el lote y se deja reposar por 72 horas, tal como lo indica el procedimiento general de preparación y acondicionamiento de probetas para ensayos físicos PR-LB-AP-001 del Laboratorio Lamitex.

El proceso de corte de probetas se realiza siguiendo el instructivo de corte de probetas IN-LB-RP-001 del laboratorio, el cual especifica las dimensiones que deben cumplir las probetas para ser ensayadas. Las mismas se identifican mediante un código creado por el laboratorio para dar trazabilidad al proceso de medición con base al procedimiento para la recepción, identificación, manipulación, protección, verificación, validación, almacenamiento, conservación y disposición o devolución de probetas PR-LB-RP-001.

En el Anexo K se ilustra el proceso de verificación de las dimensiones de las probetas antes de ejecutar los ensayos, si alguna no cumple se rechaza y se solicita otra hasta obtener el número de probetas necesarias para iniciar con la ejecución de los ensayos. Una vez verificadas, se ensayan siguiendo el procedimiento correspondiente a la propiedad medida y se recolectan los resultados en bases de datos en MS Excel para ser analizados posteriormente.

En realidad, para este caso de estudio, no se considera al muestreo como un aporte al presupuesto de incertidumbre porque el laboratorio al cumplir con los requisitos y las dimensiones con base a un plan de muestreo que cuenta con procesos normalizados y al registrar las mediciones, ha demostrado mediante cartas de control que el muestreo no representa una fuente significativa mientras se mantengan las mismas condiciones y factores a controlar.

5.3. Proceso de estimación de la incertidumbre de medición

Como se observa en la Figura 4, la incertidumbre de medida se estimó a través de la implementación de la metodología GUM, la cual se resume en ocho pasos. Para desarrollar este estudio se inicia identificando las propiedades a ser medidas, así como los resultados de los ensayos físico mecánicos de espuma de poliuretano que se muestran en la tabla a continuación, los cuales se realizaron en el Laboratorio de Calidad, perteneciente a la empresa Lamitex S.A. de la ciudad de Cuenca, la cual mantiene vigente la norma ISO 9001:2015, garantizando calidad en sus procesos productivos.

Tabla 2*Requisito 13 NTE INEN-ISO 5999:2013 – Métodos de ensayo*

NTE INEN-ISO 5999:2013		
Requisito 13	Métodos de ensayo	Norma
13.1	Condiciones de ensayo	ISO 23529:2010
13.2	Densidad aparente	NTE INEN-ISO 845:2014
13.3	Dureza	NTE INEN-ISO 2439:2014
13.4	Resiliencia	NTE INEN-ISO 8307:2014
13.5	Deformación remanente	NTE INEN-ISO 1856:2014
13.6	Fatiga dinámica mediante una carga constante cíclica	NTE INEN-ISO 3385:2014
13.7	Resistencia a la tracción y elongación a la rotura	NTE INEN-ISO 1798:2014
13.8	Comportamiento al fuego	NTE INEN-ISO 3582:2014
13.9	Envejecimiento térmico	NTE INEN-ISO 2440:2014
13.10	Envejecimiento por humedad	NTE INEN-ISO 2440:2014

Nota: En esta tabla se enlistan las propiedades de las espumas medidas en el laboratorio a través de los ensayos que enumera la norma técnica ecuatoriana NTE INEN-ISO 5999:2013 en su requisito 13.

Toda la información necesaria para el desarrollo de este estudio se recogió de normas, guías, manuales de equipos, certificados de calibración, procedimientos, registros, experiencia práctica y otros documentos técnicos proporcionados por el laboratorio.

Nota: En cumplimiento al acuerdo de confidencialidad y no divulgación del laboratorio, tanto los documentos técnicos usados, así como la información obtenida en este estudio es de propiedad exclusiva, por lo tanto, se mantendrá de forma confidencial y reservada, no pudiendo ser divulgada o publicada a personal interno o externo que no sean colaboradores del Laboratorio Lamitex S.A.

El presente ensayo académico demuestra cómo se estima la incertidumbre de medida mediante un ejemplo, específicamente del ensayo de densidad de espuma de poliuretano de 24 kg/m³, nivel medio. Este ensayo se mide con base al procedimiento para ensayo de densidad de espuma de poliuretano PR-LB-PE-002 creado por el laboratorio.

El análisis de los datos y la expresión de resultados de todos ensayos se desarrollan de la misma manera que en el ejemplo aquí presentado, teniendo en cuenta las variables propias del modelo matemático de la propiedad estudiada.

5.3.1. Definir el mensurando

El VIM, en su tercera edición publicado por el CEM (2012), define al mensurando como “magnitud que se desea medir”, en nuestro caso, se trata de las propiedades físico-mecánicas de las

espumas de poliuretano, medidas a través de ensayos, ejecutados bajo condiciones especificadas en procedimientos de medida creados por el laboratorio en base a la norma correspondiente a la magnitud que se desea medir.

Para definir el mensurando se debe tener en cuenta tanto las magnitudes de influencia como las fuentes de incertidumbre que afectan al método de medición. El método de medición se basa en normas estandarizadas, las cuales nos indican el proceso y los requisitos para realizar los ensayos, así como también, definen el mensurando mediante un modelo de medición.

Como se menciona anteriormente, se va a demostrar mediante un ejemplo cómo se implementó la metodología GUM para la estimación de la incertidumbre en el ensayo de densidad de espuma de poliuretano. Para esto, primero se revisa la norma NTE INEN-ISO 845:2014 (INEN, 2014), la cual define al mensurado como la densidad, en kilogramos por metro cúbico, mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \times 10^6 \quad (1)$$

Donde:

m masa, en gramos, de la probeta

V volumen, en milímetros cúbicos, de la probeta.

5.3.2. Construir el modelo de medición

Según el CEM (2008) en la mayoría de los casos, un mensurando Y no se mide directamente, sino que se determina a partir de otras N magnitudes X_1, X_2, \dots, X_N , por medio de una relación funcional f

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2)$$

Entonces, se puede decir que, el modelo de medición o modelo matemático se construye en función de las magnitudes de entrada del mensurando. Tomando como referencia a la densidad, se observa que, las magnitudes de entrada son la masa y el volumen. Al descomponer el volumen en magnitudes directas:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{l * a * e} \quad (3)$$

Donde:

- l* largo, en milímetros, de la probeta
a ancho, en milímetros, de la probeta
e espesor, en milímetros, de la probeta

Por lo tanto, el modelo matemático para la densidad es:

$$\rho = f(m, l, a, e) \quad (4)$$

5.3.3. Identificar las fuentes de incertidumbre

Este paso es uno de los más importantes dentro del proceso de estimación de la incertidumbre de medida, debido a que, aquí se identifican todas las fuentes que contribuyen a su medición.

Las principales fuentes de incertidumbre según la guía GUM son:

- variabilidad por efectos aleatorios de *n* observaciones independientes;
- resultados de mediciones anteriores;
- experiencia o conocimientos generales sobre el comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos utilizados;
- especificaciones del fabricante;
- datos suministrados por certificados de calibración u otros tipos de certificados;
- incertidumbres asignadas a valores de referencia procedentes de libros y manuales.

Para Núñez (2020) el método de las 5M aplicado en el diagrama de Ishikawa se desglosa de la siguiente forma: Materia Prima, Métodos, Mano de Obra, Medio Ambiente, Maquinaria. El laboratorio ha adaptado este método para identificar todas las fuentes significativas que aportan a la incertidumbre, reemplazando en este caso, a la materia prima dentro del proceso de fabricación con el mensurando dentro del proceso de medición.

Los diagramas de causa – efecto pueden variar, debido a que, para cada propiedad a medir se usan diferentes equipos e instrumentos, así como distintos parámetros para realizar los ensayos. Los diagramas de Ishikawa de las todas propiedades medidas se pueden revisar desde el **Anexo B**.

5.3.4. Cuantificar las fuentes de incertidumbre

Una vez identificadas las fuentes de incertidumbre, se procede a cuantificar mediante un valor numérico cada una de ellas con sus respectivas unidades, a esta incertidumbre se la denomina incertidumbre típica o estándar (*u*). También se define el tipo de incertidumbre y el tipo de

distribución de los datos. La incertidumbre puede ser de tipo A o tipo B, como lo explica Pérez (2012) en su artículo. Al finalizar esta sección, se resumen a través de la *Tabla 3* el valor de todos los aportes identificados para el ensayo de densidad después de realizar el siguiente análisis:

5.3.4.1. Variabilidad por factores aleatorios. Incertidumbre estándar tipo A

“La evaluación tipo A de la incertidumbre se utiliza cuando se realizan n observaciones independientes entre sí de una de las magnitudes de entrada X_i bajo las mismas condiciones de medida” (Pérez, 2012, p. 116).

5.3.4.1.1. Incertidumbre debida a la repetibilidad del ensayo

Para tomar en cuenta a la variabilidad debida a factores aleatorios se realizaron diez ensayos de cada tipo y nivel de espuma, bajo las mismas condiciones, tanto ambientales como las propias del método, los mismos equipos y el mismo analista, con las variaciones propias aceptables dentro del rango de tolerancia que nos indica la normativa en el periodo que se realizaron los ensayos.

Nota: El laboratorio al encontrarse en proceso de implementación, aún no cuenta con un analista, por lo que, los autores de la presente investigación fueron parte de este estudio, participando un estudiante como el analista para la ejecución de los ensayos, y el otro estudiante para el registro de los datos y su posterior análisis. Así, al mantener al mismo analista para la ejecución de los ensayos, este estudio descarta el aporte de incertidumbre debida a la reproducibilidad.

Según lo señalado en el artículo mencionado, se determinó el valor de la incertidumbre estándar debida a la repetibilidad mediante la ecuación (5):

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (5)$$

Donde:

q_k observaciones independientes de una magnitud que varía aleatoriamente

n el número de observaciones

Por consiguiente, la incertidumbre típica debida a la repetibilidad se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$u_{rep}(x_i) = s(\bar{X}_i) = \frac{s(\bar{x}_i)}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

5.3.4.1.2. Variabilidad por factores sistemáticos. Incertidumbre estándar tipo B.

Pérez (2012) afirma que la evaluación de tipo B de la incertidumbre típica se utiliza cuando la estimación x_i de una magnitud de entrada X_i no ha sido obtenida a partir de observaciones repetidas. La varianza estimada asociada $u^2(x_i)$, o la incertidumbre típica $u(x_i)$, se obtiene entonces mediante decisión científica basada en la información disponible acerca de la variabilidad posible de X_i .

5.3.4.1.3. Incertidumbre del certificado de calibración del instrumento o equipo

La incertidumbre típica se obtiene dividiendo la incertidumbre expandida dada en el certificado de calibración del patrón por el factor de cobertura indicado: (p. 117)

$$u(p) = \frac{U(p)}{k} \quad (7)$$

Cabe mencionar que, al momento de realizar el presente ensayo académico, se tomaron los datos de los certificados con los que contaba el laboratorio, los mismos que, al finalizar el estudio se encontraban en proceso de actualización, por lo que, el laboratorio está en la obligación de corregir los datos respecto a los aportes obtenidos a partir de los certificados de calibración de los equipos y/o instrumentos actualizados.

5.3.4.1.4. Incertidumbre Debida a la Resolución del Instrumento o Equipo

La resolución es una de las fuentes de incertidumbre del dispositivo indicador de un instrumento, si es un instrumento digital, o la incertidumbre debida a la resolución de lectura, en caso de un instrumento analógico. En este último caso, la resolución depende del operador o de los medios que éste emplee en la lectura.

Para Pérez (2012), la señal de entrada puede describirse por medio de una distribución rectangular de rango δx , dentro de un intervalo que va de $(X - \delta x)$ a $(X + \delta x)$ y varianza $u^2 = \delta x^2 / 12$, lo que supone una incertidumbre típica para cualquier indicación de:

$$u(R) = \frac{\delta x}{\sqrt{12}} = \frac{\Delta a}{\sqrt{12}} \quad (8)$$

Donde:

Δa amplitud del rango δx

Por otra parte, el caso 4 de la tesis de grado de las autoras Cano Uribe & García López (2011) habla sobre la incertidumbre asociada a la resolución de la indicación de un instrumento de medición, la cual puede obtenerse considerando que la información que se pueda contener en

la porción menos significativa de la indicación de un instrumento, tiene una función de distribución tipo rectangular. Si se trata de una indicación digital, la incertidumbre básica obtiene la sensibilidad del dígito menos significativo, dividido entre dos, y dividida entre la raíz cuadrada de tres:

$$\text{ANÁLOGOS} \quad u_{R1} = \frac{\text{RESOLUCIÓN}}{\sqrt{3}}$$

$$\text{DIGITALES} \quad u_{R2} = \frac{\text{RESOLUCIÓN}}{2\sqrt{3}}$$

De acuerdo a lo expuesto, y siguiendo con el desarrollo del ejemplo del ensayo de densidad, al ser una propiedad que involucra magnitudes directas como la masa, el largo, el ancho y el espesor, para medir y verificar las medidas de las probetas se usan la balanza digital, el flexómetro y el calibrador o pie de rey, según las dimensiones que indica la norma respectiva. Entonces, por medio de los certificados de calibración o las especificaciones del fabricante se definen las fuentes de incertidumbre asociadas a la resolución de los instrumentos y/o equipos.

5.3.4.1.5. Incertidumbre debida a la deriva del instrumento o equipo

La deriva de un patrón es un parámetro independiente y característico de cada patrón. Su valor varía de acuerdo con las condiciones de uso y mantenimiento, la frecuencia de utilización, la exactitud del instrumento o equipo, del periodo de calibraciones, etc. Para calcular la deriva de los instrumentos usados en el proceso de medición de la densidad se parte del histórico de calibraciones sucesivas del patrón tanto de la balanza digital como del flexómetro y del pie de rey, para estimar una variación del valor certificado δp . Se puede asumir una distribución rectangular o triangular, según los conocimientos que se tienen del histórico del patrón (Pérez, 2012).

En contraste, el procedimiento ME-003 para la calibración de manómetros, vacuómetros y manovacuómetros (CEM, 2019), cita que, el valor de la deriva por lo general se consigue del estudio de los certificados de calibración a partir de la máxima variación obtenida de los resultados entre dos calibraciones. Si no se puede obtener este dato debido a que sólo existe una calibración, se estimará a partir de las especificaciones del fabricante. Al ser una incertidumbre tipo B, se considera una distribución rectangular, luego dicho valor se dividirá entre $(3)^{0.5}$.

5.3.4.1.6. Incertidumbre debida al error del instrumento o equipo

En el caso 3 de la evaluación tipo B de la incertidumbre estándar, Cano Uribe & García López (2011) afirman que la especificación de incertidumbre no es explícita, sino que se da un límite máximo para el error del instrumento. Esto involucra que el comportamiento del instrumento tiene características de una distribución tipo rectangular o uniforme dentro de unos límites establecidos. Para esta distribución, la incertidumbre estándar se estima así: (p.43)

$$u_E = \frac{\text{ESPECIFICACIONES}}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

Uno de los valores que se declara en el certificado de calibración, es el error máximo permitido, el mismo que se asume como una especificación o un límite de error de los instrumentos de medida que intervienen en el proceso de medición.

5.3.4.1.7. Incertidumbre Debida a la Influencia de la Temperatura.

El laboratorio realiza los ensayos a una temperatura ambiente, la cual fluctúa entre los 16 °C y 25 °C. La norma no especifica las condiciones de temperatura en el procedimiento del ensayo de densidad, sin embargo, el laboratorio considera a esta variación como un aporte que puede influir en el presupuesto de incertidumbre de otros ensayos, lo cual se analiza en cada propiedad medida.

Para el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2020), el aporte de incertidumbre debida a la influencia de la temperatura es de tipo B con una distribución rectangular:

$$u(T) = \frac{\Delta T * \lambda * \bar{\rho}}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

Donde, la variación de temperatura ΔT del laboratorio ha sido tomada de cartas de control con un valor promedio de 5°C y el coeficiente de dilatación térmica de las espumas λ es aproximadamente $8 \times 10^{-5} \frac{1}{K}$ (Integral Buenos Aires, 2011). La ecuación (10) se debe calcular con el valor promedio de la propiedad estudiada, en este caso $\bar{\rho}$ se refiere a la densidad promedio.

5.3.4. Calcular la incertidumbre combinada

Según Cano Uribe & García López (2011), la incertidumbre estándar combinada (u_c) o incertidumbre total del resultado de una medición o magnitud de salida se mide combinando apropiadamente las incertidumbres estándar de los estimados de las magnitudes de entrada, las

mismas que se relacionan mediante la función derivada de la *Ley de Propagación de Incertidumbres* de la cual se habla más adelante. En este punto se pueden presentar dos casos:

5.3.5.1. Magnitudes de entrada no correlacionadas

Todas las magnitudes son independientes o no existe una relación entre dos o más magnitudes de entrada.

5.3.5.2. Magnitudes de entrada correlacionadas

Existe una relación significativa entre dos o más magnitudes de entrada o dependen una de la otra. La GUM digital publicada por el (CEM, 2008, p. 22), cita que, para magnitudes de entrada no correlacionadas, “la incertidumbre típica combinada $uc(y)$ es la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada $uc^2(y)$, dada por”:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (11)$$

Donde f es la relación funcional dada en la construcción del modelo matemático y todas las $u(x_i)$ son cada una de las fuentes de incertidumbre típica cuantificadas a partir de la evaluación tipo A o tipo B.

La varianza combinada $u_c^2(y)$ puede considerarse como una suma de términos, cada uno de ellos representando la varianza estimada asociada a y , debido a la varianza asociada a cada estimación de entrada x_i , por lo que la ecuación anterior queda de la forma:

$$u_c^2(y) = \sum_{j=1}^N [c_j u(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (12)$$

Donde:

$c_i = \partial f / \partial x_i$ son las derivadas parciales de y con respecto a x_i o también llamadas coeficientes de sensibilidad, y describen cómo varía la estimación de salida y , en función de las variaciones de los valores de las estimaciones de entrada x_1, x_2, \dots, x_N .

$u_i(y) = |c_i| u(x_i)$ son incertidumbres estándar de y producidas por variaciones debidas a las incertidumbres típicas de la estimación en x_i .

La ecuación (12) se utiliza en el caso de magnitudes de entrada no correlacionadas. Para el caso de magnitudes de entrada correlacionadas se usa otra ecuación, ambas basadas en el desarrollo

de la serie de Taylor de primer orden de $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$, expresan lo que en la guía se denomina *Ley de propagación de la incertidumbre*.

La ecuación (13) describe la expresión adecuada para la varianza combinada $u_c^2(y)$ asociada al resultado de medida cuando las magnitudes de entrada están correlacionadas.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (13)$$

El grado de correlación entre x_i y x_j viene dado por el coeficiente de correlación:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (14)$$

Donde:

$u(x_i, x_j)$ es la covarianza asociada a x_i y x_j ;

En la práctica, la covarianza suele estar relacionada con el coeficiente de correlación $r(x_i, x_j)$, que nos indica el grado de correlación entre x_i y x_j .

$$u(x_i, x_j) = u(x_i)u(x_j)r(x_i, x_j) \quad (15)$$

Donde:

$$-1 \leq r(x_i, x_j) \leq 1$$

Si las estimaciones x_i y x_j son independientes, $r(x_i, x_j) = 0$, y una variación en una de las dos no implica una variación en la otra. Este análisis se muestra en la *Tabla 4*, la cual indica que existe correlación entre la masa con el largo, ancho y espesor, y entre el largo con el ancho. Por otro lado, el espesor con el largo y ancho no mantienen correlación debido a que son valores aproximados a cero.

5.3.5.3 Determinación de los coeficientes de sensibilidad

El coeficiente de sensibilidad describe, qué tan sensible es el mensurando con respecto a variaciones de la magnitud de entrada correspondiente. Existen dos métodos para determinarlo según los autores (Schmid & Lazos Martínez, 2000), en este caso, se aplica el método de la determinación a partir de una relación funcional.

Si el modelo matemático para el mensurando $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ describe la influencia de la magnitud de entrada X_i suficientemente bien mediante una relación funcional, el coeficiente de sensibilidad c_i se calcula por la derivada parcial de f con respecto a X_i :

$$c_i = \frac{\partial f(X_1, \dots, X_N)}{\partial X_i} |X_1 = x_1 \dots X_N = x_N \quad (16)$$

Para el ejemplo que estamos desarrollando se determinaron los coeficientes de sensibilidad mediante la ecuación (16), a partir de las primeras derivadas parciales de la relación funcional de las magnitudes de entrada que conforman la densidad:

$$\rho = f(m, l, a, e)$$

- **Coeficiente de sensibilidad de la masa C_m :**

$$C_m = \frac{1}{l * a * e} \quad (17)$$

- **Coeficiente de sensibilidad del largo C_l :**

$$C_l = -\frac{m}{l^2 * a * e} \quad (18)$$

- **Coeficiente de sensibilidad del ancho C_a :**

$$C_a = -\frac{m}{l * a^2 * e} \quad (19)$$

- **Coeficiente de sensibilidad del espesor C_e :**

$$C_e = -\frac{m}{l * a * e^2} \quad (20)$$

Una vez determinados los coeficientes de sensibilidad, se procede a estimar la incertidumbre estándar combinada de cada una de las magnitudes de entrada:

- **Incertidumbre estándar combinada de la masa:**

$$u(m) = \sqrt{u_{RepM}^2 + u_{CB}^2 + u_{RB}^2 + u_{DB}^2 + u_{EB}^2} \quad (21)$$

- **Incertidumbre estándar combinada del largo:**

$$u(l) = \sqrt{u_{Repl}^2 + u_{CF}^2 + u_{RF}^2 + u_{DF}^2 + u_{EF}^2} \quad (22)$$

- **Incertidumbre estándar combinada del ancho:**

$$u(a) = \sqrt{u_{Repa}^2 + u_{CF}^2 + u_{RF}^2 + u_{DF}^2 + u_{EF}^2} \quad (23)$$

- **Incertidumbre estándar combinada del espesor:**

$$u(e) = \sqrt{u_{Repe}^2 + u_{CPR}^2 + u_{RPR}^2 + u_{DPR}^2 + u_{EPR}^2} \quad (24)$$

5.3.5. Verificar los estimados de incertidumbre

En la Tabla 5 se verifican los aportes de las magnitudes de entrada que intervienen en la estimación de la incertidumbre de medición del ensayo de densidad, donde se muestran tanto las incertidumbres estándar combinadas, como los coeficientes de sensibilidad y sus porcentajes de influencia correspondiente a cada una de ellas.

Después de verificar los valores de la incertidumbre estándar combinada de las magnitudes de entrada con sus respectivos coeficientes de sensibilidad, y de determinar que se trata de magnitudes correlacionadas estamos listos para calcular la incertidumbre combinada total de la densidad mediante el desarrollo de la ecuación (25).

$$\begin{aligned} u_c(\rho) = & \sqrt{(C_m^2 * u_{(m)}^2) + (C_l^2 * u_{(l)}^2) + (C_a^2 * u_{(a)}^2) + (C_e^2 * u_{(e)}^2) + 2((C_m * C_l * u_m * u_l) \dots \\ & \sqrt{\dots * r(m, l) + (C_m * C_a * u_m * u_a) * r(m, a) + (C_m * C_e * u_m * u_e) * r(m, e) + \dots} \\ & \sqrt{\dots (C_a * C_l * u_a * u_l) * r(a, l)) + u_T^2} \end{aligned} \quad (25)$$

5.3.6. Calcular la incertidumbre expandida

Los autores Cano Uribe & García López (2011) expresan que, para algunas aplicaciones industriales, comerciales y regulatorias es importante brindar una medida de la incertidumbre que represente un intervalo cercano al resultado de la medición dentro del cual puedan hallarse los valores que razonablemente pueden atribuirse al mensurando con un alto nivel de confianza.

El resultado de las mediciones se expresa de la forma $Y = y \pm U$, donde y es el mejor estimado del mensurando Y , y el intervalo $y - U; y + U$ contiene los valores que pueden atribuirse razonablemente a Y con un alto nivel de confianza P .

A esta medida de la incertidumbre se la denomina incertidumbre expandida (U), resultante de la multiplicación de la incertidumbre combinada por un factor de cobertura (k):

$$U = u_c * k \quad (26)$$

5.3.7.1. Factor de cobertura y nivel de confianza

Así mismo, estimar el factor de cobertura significa considerar la incertidumbre de $u_c(y)$, es decir, cuan bien $u_c(y)$ estima la variabilidad asociada al resultado de la medición. Para ello hay que partir del conocimiento sobre la distribución de probabilidades que representa a la magnitud de salida.

En la práctica se aplica el *Teorema del Límite Central*, que establece que la distribución de los valores de la magnitud de salida puede ser considerada aproximadamente como una distribución normal si su varianza $\sigma^2(y)$ es mucho mayor que cualquiera de las contribuciones individuales $c_i^2 \sigma^2(x_i)$ de las magnitudes de entrada.

Se observa que, las magnitudes de mayor influencia sobre la medición de la incertidumbre del ensayo de densidad tienen una distribución normal, por lo tanto, cumpliendo con lo que establece el Teorema del Límite Central y con la guía para estimar la incertidumbre de la medición del CENAM (Schmid & Lazos Martínez, 2000), se puede elegir el valor de $k = 2,00$ que corresponde a $P = 95,45\%$ dentro del límite de una distribución normal.

5.3.7. Expresar la incertidumbre de medida

En el laboratorio de calidad Lamitex, la política es expresar los resultados de los ensayos con un nivel de confianza del 95% aproximadamente, de acuerdo a la mayor parte de laboratorios de industrias similares. Schmid & Lazos Martínez (2000) aseguran que la forma de expresar el resultado de las mediciones es:

$$Y = y \pm U \quad (27)$$

Para expresar la incertidumbre de medida de manera correcta se debe tener en cuenta el número de cifras significativas, que generalmente es uno o dos cuando la exactitud es alta. Además, el número de cifras significativas del mensurando debe ser consistente con el de la incertidumbre. Los resultados de todas las propiedades medidas se muestran en el punto 6.3 donde se comparan mediante gráficas según el tipo de espuma y el nivel del bloque donde ha sido tomada la muestra.

6. Resultados

En esta sección se presentan tanto los resultados del proceso de estimación de la incertidumbre de medición del ejemplo desarrollado para la espuma de 24 kg/m³, nivel medio, así como la incertidumbre máxima permitida para cada propiedad y tipo de espuma y la interpretación de los resultados de la incertidumbre expandida con sus correspondientes gráficas comparativas.

6.1. Resultados de la implementación de la metodología. Ejemplo de densidad

6.1.1. Cuantificación de la incertidumbre típica

6.1.1.1. Incertidumbre debida a la repetibilidad del ensayo

- Incertidumbre por repetibilidad de la masa u_{RepM}

$$u_{rep}(M) = \frac{0,204}{\sqrt{10}} = 0,064 \text{ g}$$

- Incertidumbre por repetibilidad del largo u_{Repl}

$$u_{rep}(l) = \frac{0,561}{\sqrt{10}} = 0,177 \text{ mm}$$

- Incertidumbre por repetibilidad del ancho u_{Repa}

$$u_{rep}(a) = \frac{1,011}{\sqrt{10}} = 0,320 \text{ mm}$$

- Incertidumbre por repetibilidad del espesor u_{Repe}

$$u_{rep}(e) = \frac{0,296}{\sqrt{10}} = 0,093 \text{ mm}$$

6.1.1.2. Incertidumbre del certificado de calibración del instrumento o equipo

- Incertidumbre del certificado de calibración de la balanza u_{CB} :

$$u_{CB} = \frac{U_{CB}}{k} = \frac{0,058}{2} = 0,029 \text{ g}$$

- Incertidumbre del certificado de calibración del flexómetro u_{CF} :

$$u_{CF} = \frac{U_{CF}}{k} = \frac{0,101}{2} = 0,050 \text{ mm}$$

- Incertidumbre del certificado de calibración del pie de rey/calibrador u_{CPR} :

$$u_{CPR} = \frac{U_{CPR}}{k} = \frac{0,005}{2} = 0,002 \text{ mm}$$

6.1.1.3. Incertidumbre debida a la resolución del instrumento o equipo

- Incertidumbre debida a la resolución de la balanza digital u_{RB} :

$$u_{RB} = \frac{\Delta a}{2\sqrt{12}} = \frac{a}{2\sqrt{3}} = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,028 \text{ g}$$

- Incertidumbre debida a la resolución del flexómetro u_{RF} :

$$u_{RF} = \frac{\Delta a}{\sqrt{12}} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577 \text{ mm}$$

- Incertidumbre debida a la resolución del pie de rey/calibrador u_{RPR} :

$$u_{RPR} = \frac{\Delta a}{2\sqrt{12}} = \frac{a}{2\sqrt{3}} = \frac{0,01}{2\sqrt{3}} = 0,002 \text{ mm}$$

6.1.1.4. Incertidumbre debida a la deriva del instrumento o equipo

- Incertidumbre debida a la deriva de la balanza digital u_{DB}

$$u_{DB} = \frac{|U|}{\sqrt{3}} = 0,033 \text{ g}$$

- Incertidumbre debida a la deriva del flexómetro u_{DF}

$$u_{DF} = \frac{|U|}{\sqrt{3}} = 0,059 \text{ mm}$$

- Incertidumbre debida a la deriva del pie de rey/calibrador u_{DPR} :

$$u_{DPR} = \frac{|C1 - C2|}{\sqrt{3}} = \frac{|0,003 - 0|}{\sqrt{3}} = 0,002 \text{ mm}$$

6.1.1.5. Incertidumbre debida al error del instrumento o equipo

- Incertidumbre debida al error de carga de la balanza digital u_{EB}

$$u_{EB} = \frac{\Delta a}{\sqrt{12}} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,057 \text{ g}$$

- Incertidumbre debida al error del flexómetro u_{EF}

$$u_{EF} = \frac{\Delta a}{\sqrt{12}} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,18}{\sqrt{3}} = 0,104 \text{ mm}$$

- Incertidumbre debida al error del instrumento/pie de rey u_{EPR}

$$u_{EPR} = \frac{\Delta a}{\sqrt{12}} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0}{\sqrt{3}} = 0$$

6.1.1.6. Incertidumbre debida a la influencia de la temperatura

$$u(T) = \frac{278 \text{ K} * 0,00008 \frac{1}{K} * 0,0000235 \frac{\text{g}}{\text{mm}^3}}{\sqrt{3}} = 0,000000302 \frac{\text{g}}{\text{mm}^3}$$

Tabla 3

Cuantificación de incertidumbre típica – Ensayo densidad 24 kg/m³, nivel medio

ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE: NTE INEN-ISO 845						
CUANTIFICACIÓN DE INCERTIDUMBRE TÍPICA						
Modelo físico	$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m}{l * a * e}$	Modelo matemático	$\rho = f(m, l, a, e)$	Número de datos (n)	10	
Fuentes	Variables	Tipo de incertidumbre	Distribución	Incertidumbre típica $u(x_i)$	$u(x_i)$	Unidad
MENSURANDO (Masa, Volumen)	MASA	A: Incertidumbre por repetibilidad de la masa u_{Rep_M}	Normal	$u(Rep_M) = \frac{s}{\sqrt{n}}$	0,064477	g
MANO DE OBRA (Analista)	LARGO	A: Incertidumbre por repetibilidad del largo u_{Rep_l}	Normal	$u(Rep_l) = \frac{s}{\sqrt{n}}$	0,177514	mm
MÉTODO (Precisión)	ANCHO	A: Incertidumbre por repetibilidad del ancho u_{Rep_a}	Normal	$u(Rep_a) = \frac{s}{\sqrt{n}}$	0,319722	mm
	ESPESOR	A: Incertidumbre por repetibilidad del espesor u_{Rep_e}	Normal	$u(Rep_e) = \frac{s}{\sqrt{n}}$	0,093894	mm
		B: Certificado de calibración de la balanza u_{CB}	Normal	$U_{CB} = u * k$	0,029000	g
MÁQUINA (Equipo/ Instrumento)	Balanza Mettler Toledo	B: Resolución de la balanza digital u_{RB}	Rectangular	$u(RB) = \frac{\Delta a}{2\sqrt{12}} = \frac{a}{2\sqrt{3}}$	0,028868	g
		B: Deriva de la balanza digital u_{DB}	Rectangular	$u(DB) = \frac{U}{\sqrt{3}}$	0,033486	g
		B: Error de carga de la balanza digital u_{EB}	Rectangular	$u(EB) = \frac{\Delta a}{\sqrt{12}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$	0,057735	g

Flexómetro/Regla metálica	B: Certificado de calibración del flexómetro Ucf	Normal	$U_{CF} = u * k$	0,050725	mm
	B: Resolución del flexómetro u_{RF}	Rectangular	$u(RF) = \frac{\Delta a}{\sqrt{12}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$	0,577350	mm
	B: Deriva del flexómetro u_{DF}	Rectangular	$u(DB) = \frac{U}{\sqrt{3}}$	0,058572	mm
	B: Error del instrumento/flexómetro u_{EF}	Rectangular	$u(EF) = \frac{\Delta a}{\sqrt{12}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$	0,103923	mm
Pie de rey/ Flexómetro Century	B: Certificado de calibración del pie de rey u_{CPR}	Normal	$U_{CPR} = u * k$	0,002890	mm
	B: Resolución del pie de rey/calibrador u_{RPR}	Rectangular	$u(RPR) = \frac{\Delta a}{2\sqrt{12}} = \frac{a}{2\sqrt{3}}$	0,002887	mm
	B: Deriva del pie de rey/calibrador u_{DPR}	Rectangular	$u(DPR) = \frac{ C_1 - C_2 }{\sqrt{3}}$	0,001732	mm
MEDIO AMBIENTE	B: Error del instrumento/pie de rey u_{EPR}	Rectangular	$u(EPR) = \frac{\Delta a}{\sqrt{12}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$	0,000000	mm
	Temperatura	B: Incertidumbre por variación de Temperatura u_T	Rectangular	$u(T) = \frac{\Delta T * \lambda * \bar{p}}{\sqrt{3}}$	0,000000302 $\frac{g}{mm^3}$

Fuente: Elaboración propia.

6.1.2. Determinación del factor de correlación – Magnitudes correlacionadas

Tabla 4

Factor de correlación entre magnitudes

DENSIDAD 24 - AMARILLA				
	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR
MASA	1			
LARGO	0,9194747	1		
ANCHO	0,9149914	0,8627013	1	
ESPESOR	0,9249541	0,0298907	0,0961469	1

Fuente: Elaboración propia

6.1.3. Determinación de los coeficientes de sensibilidad

- Coeficiente de sensibilidad de la masa C_m :

$$C_m = \frac{1}{101,68 * 101,6 * 49,15} = 0,00000196 \frac{1}{mm^3}$$

- Coeficiente de sensibilidad del largo C_l :

$$C_l = -\frac{11,97}{(101,68)^2 * 101,6 * 49,15} = 0,000000231 \frac{g}{mm^4}$$

- Coeficiente de sensibilidad del ancho C_a :

$$C_a = -\frac{11,97}{101,68 * (101,6)^2 * 49,15} = 0,000000232 \frac{g}{mm^4}$$

- Coeficiente de sensibilidad del espesor C_e :

$$C_e = -\frac{11,97}{101,68 * 101,6 * (49,15)^2} = 0,000000479 \frac{g}{mm^4}$$

6.1.4. Cálculo de las incertidumbres estándar combinadas

- Incertidumbre estándar combinada de la masa:

$$u(m) = \sqrt{0,064^2 + 0,029^2 + 0,028^2 + 0,033^2 + 0,057^2} = 0,101 g$$

- Incertidumbre estándar combinada del largo:

$$u(l) = \sqrt{0,177^2 + 0,050^2 + 0,577^2 + 0,059^2 + 0,104^2} = 0,617 mm$$

- Incertidumbre estándar combinada del ancho:

$$u(a) = \sqrt{0,320^2 + 0,050^2 + 0,577^2 + 0,059^2 + 0,104^2} = 0,672 \text{ m}$$

- Incertidumbre estándar combinada del espesor:

$$u(e) = \sqrt{0,093^2 + 0,002^2 + 0,002^2 + 0,002^2 + 0^2} = 0,094 \text{ mm}$$

6.1.5. Verificación de los estimados de incertidumbre

Tabla 5

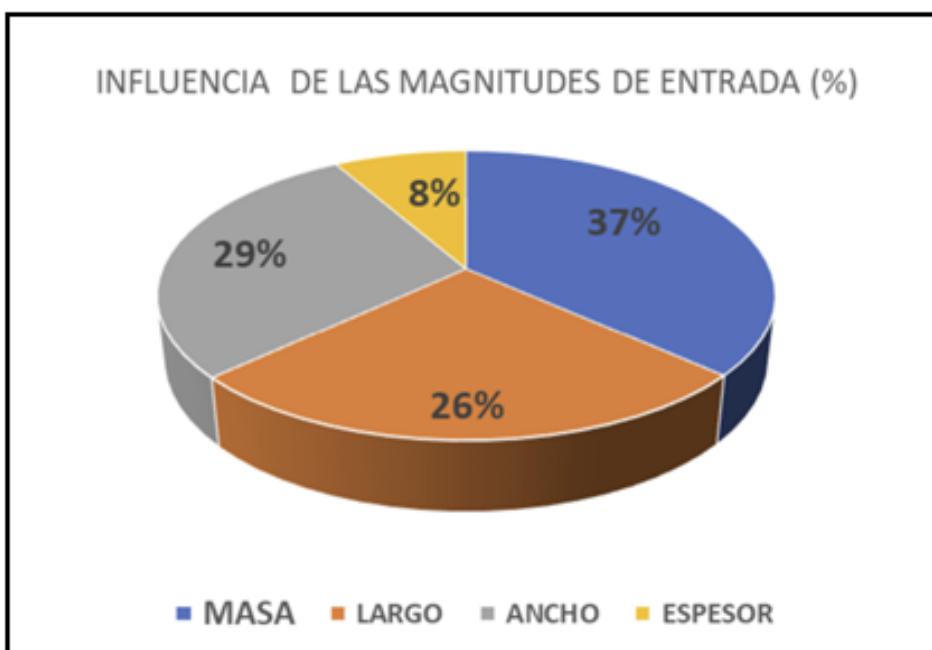
Verificación de los estimados de la incertidumbre combinada de las magnitudes de entrada

Estimación de la incertidumbre combinada				
MAGNITUD	$u(X_i)$	C_i	$C_i * u(X_i)$	Influencia (%)
$u(m)$	0,10142	1,9692E-06	1,99716E-07	37
$u(l)$	0,61778	2,3186E-07	1,43238E-07	26
$u(a)$	0,67258	2,3204E-07	1,56065E-07	29
$u(e)$	0,09400	4,7961E-07	4,50833E-08	8
Suma	$u(X_i) = u_c(\rho)$		5,44104E-07	100

Fuente: Elaboración propia

Figura 17

Porcentaje de influencia de las magnitudes de entrada – Ensayo de densidad



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados evidencian que, la masa es la magnitud de entrada más significativa o la que más aporta al presupuesto de la incertidumbre de medición en el ensayo de densidad de espuma de poliuretano, puesto que, representa el 37 %, mientras que el largo y el ancho tienen un aporte similar, con el 26 % y 29 % respectivamente, y el restante pertenece al espesor con el menor porcentaje, como se puede ver en la Figura 17.

6.1.6. Estimación de la incertidumbre combinada de la densidad

$$u(\rho) = \sqrt{(1,969E - 06^2 * 0,101^2) + (2,318E - 07^2 * 0,617^2) + (2,32E - 07^2 * 0,672^2) + \dots}$$

$$\sqrt{\dots (4,796E - 07^2 * 0,094^2) + 2((1,969E - 06 * 2,318E - 07 * 0,101 * 0,617) * 0,919 + \dots)}$$

$$\sqrt{\dots (1,969E - 06 * 2,32E - 07 * 0,101 * 0,672) * 0,915 + (1,969E - 06 * 4,796E - 07 * 0,101 \dots)}$$

$$\sqrt{\dots * 0,094) * 0,925 + (2,32E - 07 * 2,318E - 07 * 0,672 * 0,617) * 0,863) + 3,02E - 07^2}$$

$$u(\rho) = 5,854E - 07 \frac{g}{mm^3} = 0,585 \frac{kg}{m^3}$$

6.1.7. Cálculo de la incertidumbre expandida de la densidad

$$U(\rho) = 2 * u(\rho) = 2 * 0,585 = 1,17 \frac{kg}{m^3}$$

6.1.8. Expresión de la incertidumbre de medición de la densidad

$$\delta = 23,50 \pm 1,17 \frac{kg}{m^3}$$

6.2. Incertidumbre máxima permitida para el caso de estudio

Apoyados en el punto 3.9, la regla de decisión basada en la aceptación simple permite definir el límite máximo para la incertidumbre expandida de las propiedades de las espumas de poliuretano estudiadas en este ensayo académico. La Tabla 6 detalla las incertidumbres máximas permitidas para cada propiedad, definidas por el laboratorio como el doble de las desviaciones estándar de los resultados de cada tipo de espuma.

Tabla 6

Incertidumbre máxima permitida de las propiedades estudiadas

Propiedad Medida	Incertidumbre Máxima Permitida			Unidades
	D16	D24	D30	
Densidad	2,1650	1,7280	1,6053	kg/m ³
Dureza A-40 %	2,6263	3,2270	3,0982	N
Dureza B-25 %	2,0769	2,3064	2,0746	N
Dureza B-40 %	2,8780	2,8241	2,5496	N
Dureza B-65 %	4,9444	4,3956	3,9947	N
Resiliencia	0,0119	0,0119	0,0119	mm
Deformación remanente	0,5836	0,3907	0,5098	%
Fatiga: pérdida de espesor	1,4987	1,3963	1,4414	%
Fatiga: pérdida de dureza	2,0095	2,1350	2,1670	%
Resistencia a la tracción	4,8847	4,1894	4,3177	kPa
Elongación a la rotura	3,3419	3,2669	2,8111	%
Comportamiento al fuego	0,0268	0,0446	0,0724	mm/s

Fuente: Elaboración propia.

Determinado el límite de aceptación se puede conocer si se acepta o rechaza un elemento según cuya propiedad medida se encuentre dentro o fuera del límite máximo permitido. Para el ejemplo desarrollado, la espuma D24 es conforme debido a que su incertidumbre expandida es menor a la incertidumbre máxima permitida, por lo tanto:

$$1,17 \frac{kg}{m^3} \leq 1,72 \frac{kg}{m^3}$$

6.3. Interpretación de resultados de la incertidumbre expandida

Tabla 7

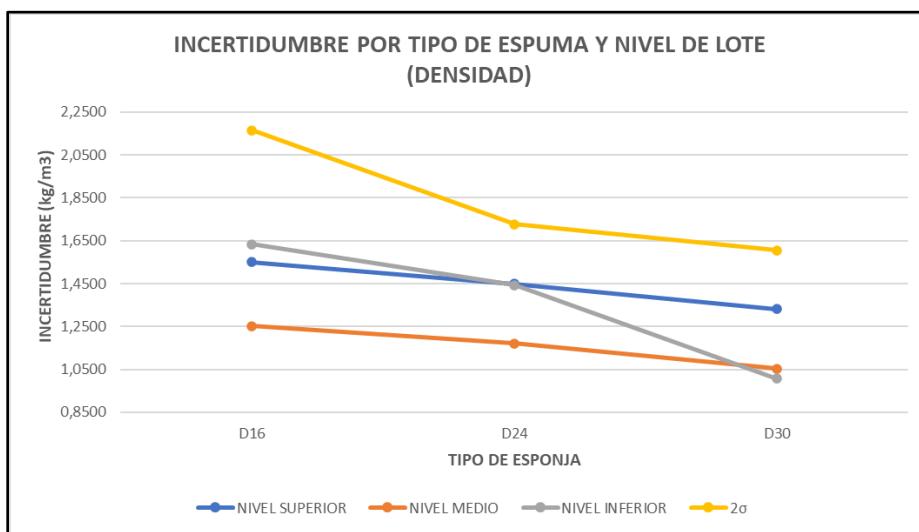
Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de densidad

PROPIEDAD DENSIDAD	RESULTADOS		
	D16	D24	D30
kg/m ³			
NIVEL SUPERIOR	1,5496	1,4496	1,3305
NIVEL MEDIO	1,2524	1,1708	1,0540
NIVEL INFERIOR	1,6346	1,4428	1,0069

Fuente: Elaboración propia.

Figura 18

Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de densidad



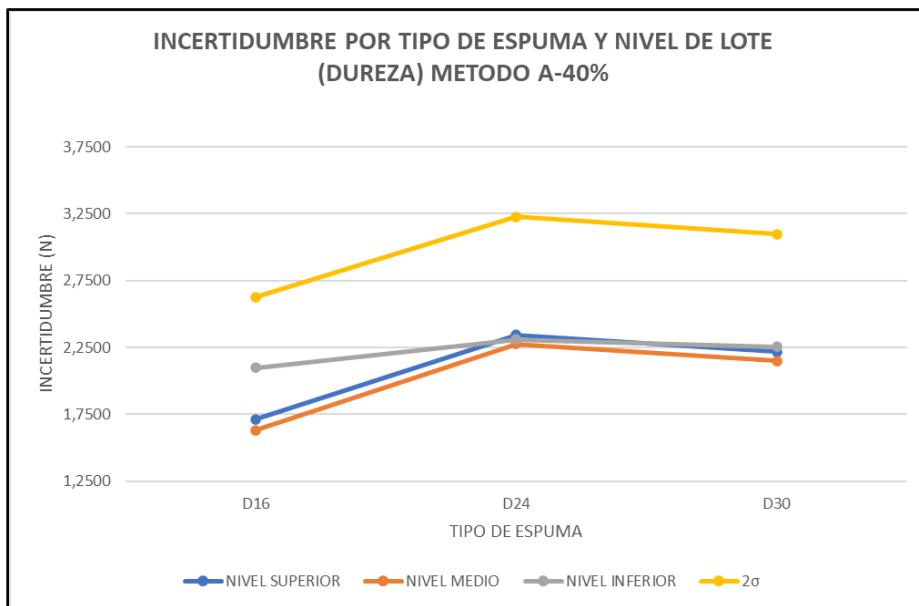
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 18 se observa que, en el nivel medio la incertidumbre de medida de los tres tipos de espuma es considerablemente menor con respecto a los niveles superior e inferior. Por tipo de espuma se determina que, la incertidumbre es menor para la espuma de mayor densidad D30, mientras que, para la espuma de menor densidad D16 la incertidumbre es mayor en cualquiera de los tres niveles analizados. De acuerdo con la regla de decisión tomada por el laboratorio, las incertidumbres reportadas en la gráfica se aceptan debido a que se encuentran dentro del límite máximo permitido (2σ).

Tabla 8*Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de dureza, método A-40 %*

PROPIEDAD DUREZA	RESULTADOS METODO A 40 %			
	N	D16	D24	D30
NIVEL SUPERIOR	1,7147	2,3452	2,2200	
NIVEL MEDIO	1,6307	2,2773	2,1500	
NIVEL INFERIOR	2,0997	2,3091	2,2568	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19*Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de dureza, A-40%*

Fuente: Elaboración propia.

En esta gráfica se observa que, la espuma D16 presenta menor incertidumbre con respecto a la D24 y D30, siendo la espuma D24 la que obtiene mayor incertidumbre en los tres niveles del lote. En la Figura 19, al igual que en el ensayo de densidad, se evidencia que nivel medio de los tres tipos de espumas tiene menor incertidumbre, pero se comporta de manera similar que la incertidumbre del nivel superior. En general, la incertidumbre es muy cercana para las espumas D24 y D30 en los tres niveles. Se observa también que todas las incertidumbres se encuentran dentro del límite máximo permitido (2σ), es decir, se aceptan como válidas para ser declaradas en los certificados.

Tabla 9

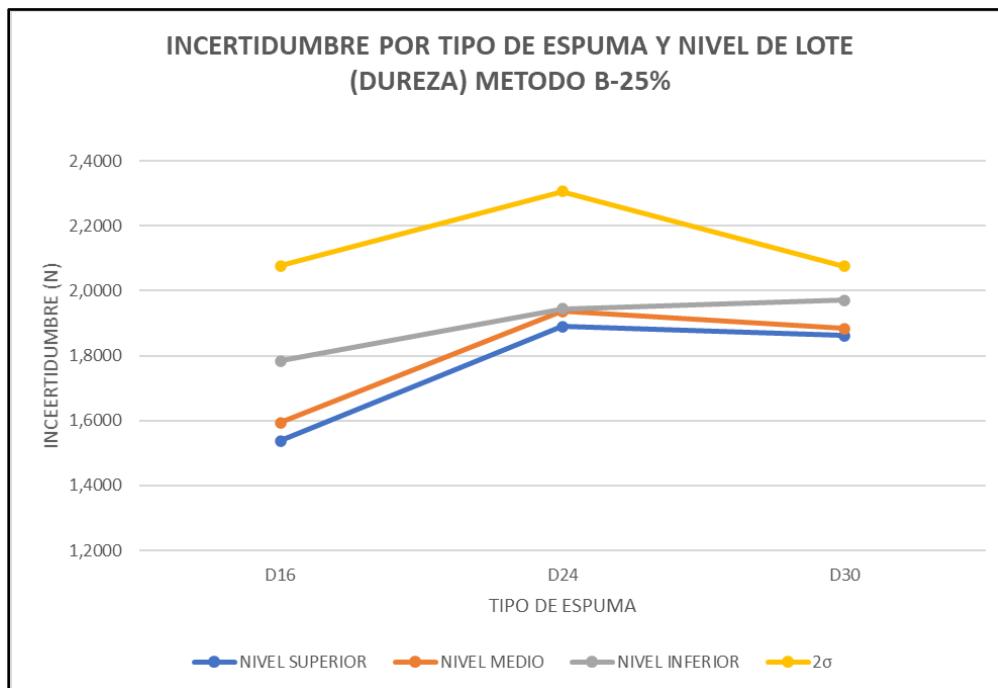
Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de dureza, método B-25 %

PROPIEDAD DUREZA	RESULTADOS METODO B 25 %		
	N	D16	D24
NIVEL SUPERIOR	1,5381	1,8900	1,8611
NIVEL MEDIO	1,5936	1,9365	1,8838
NIVEL INFERIOR	1,7837	1,9438	1,9710

Fuente: Elaboración propia.

Figura 20

Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de dureza, B-25%



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 20 se evidencia que, para los tres tipos de espuma estudiados, los niveles medio y superior tienen comportamientos y valores similares, mientras que el nivel inferior presenta mayor incertidumbre en la espuma D16 y D30. La espuma D24 tiene aproximadamente la misma incertidumbre en los tres niveles. En la gráfica se puede ver que todas las incertidumbres graficadas están por debajo del límite máximo permitido (2σ).

Tabla 10

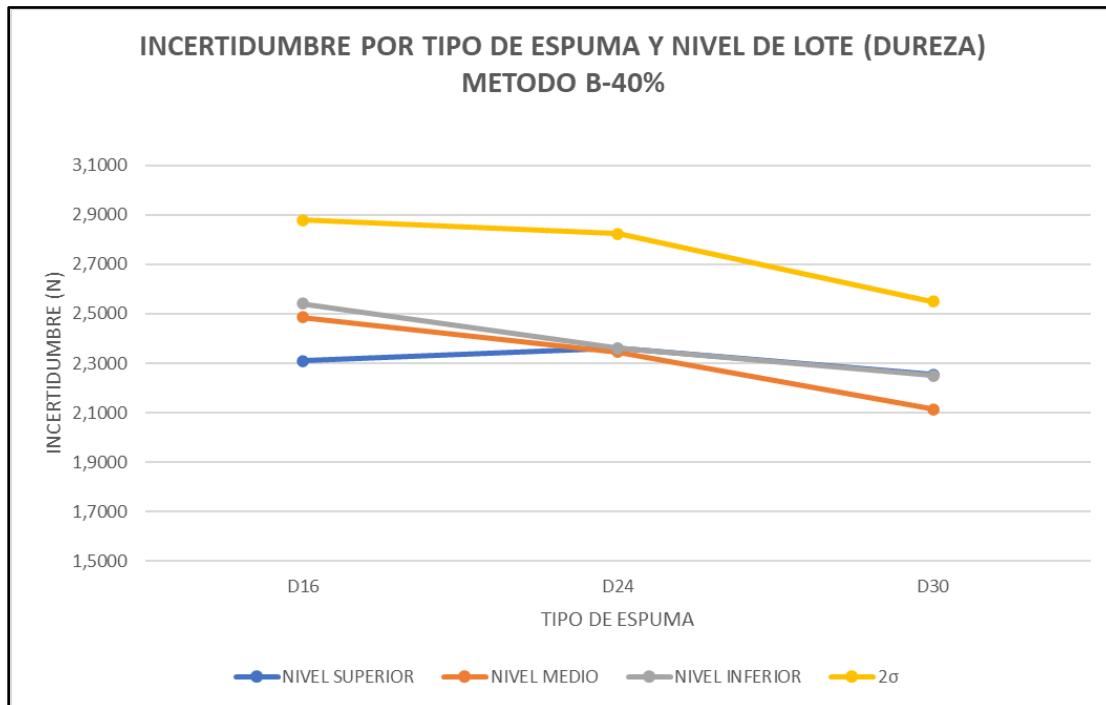
Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de dureza, método B-40 %

PROPIEDAD DUREZA	RESULTADOS METODO B 40 %		
	N	D16	D24
NIVEL SUPERIOR	2,3100	2,3607	2,2547
NIVEL MEDIO	2,4856	2,3450	2,1149
NIVEL INFERIOR	2,5414	2,3605	2,2506

Fuente: Elaboración propia.

Figura 21

Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de dureza, B-40 %



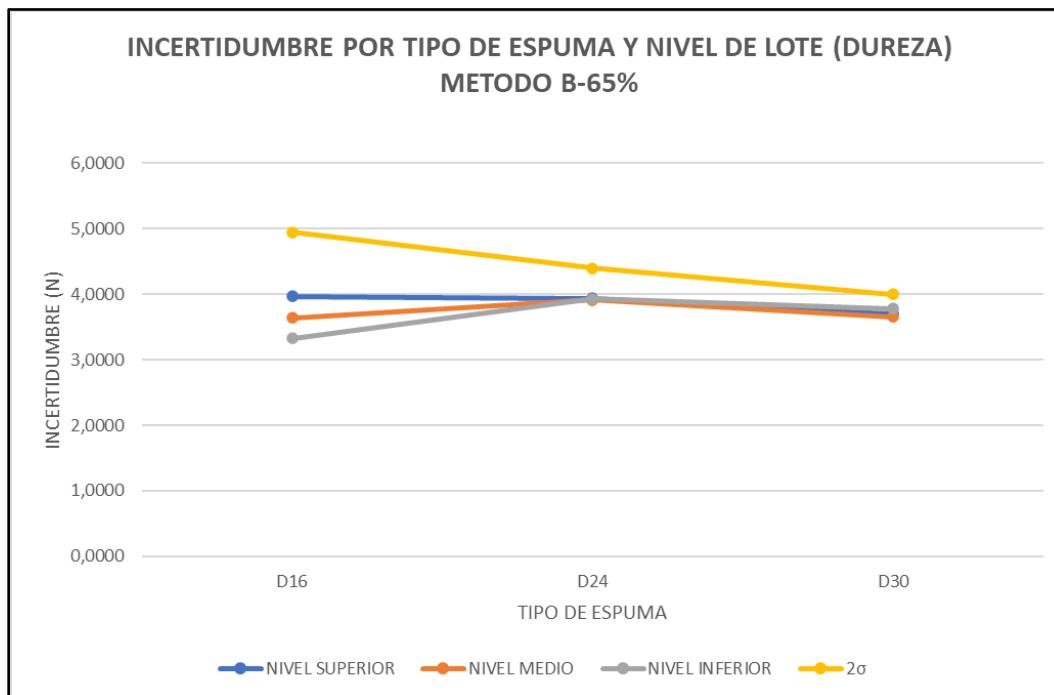
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 21 se observa el punto más alto de incertidumbre en la espuma de menor densidad D16, nivel inferior, mientras que, el punto con menor incertidumbre se encuentra en el nivel medio de la espuma de mayor densidad D30, y la espuma D24 presenta la misma incertidumbre en los tres niveles analizados. Como se puede evidenciar en la gráfica, se aceptan todas las incertidumbres reportadas debido a que están dentro del límite máximo permitido (2σ).

Tabla 11*Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de dureza, método B-65 %*

PROPIEDAD DUREZA	RESULTADOS METODO B 65 %			
	N	D16	D24	D30
NIVEL SUPERIOR		3,9674	3,9357	3,6977
NIVEL MEDIO		3,6348	3,9094	3,6511
NIVEL INFERIOR		3,3270	3,9306	3,7826

Fuente: Elaboración propia.

Figura 22*Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de dureza, B-65%*

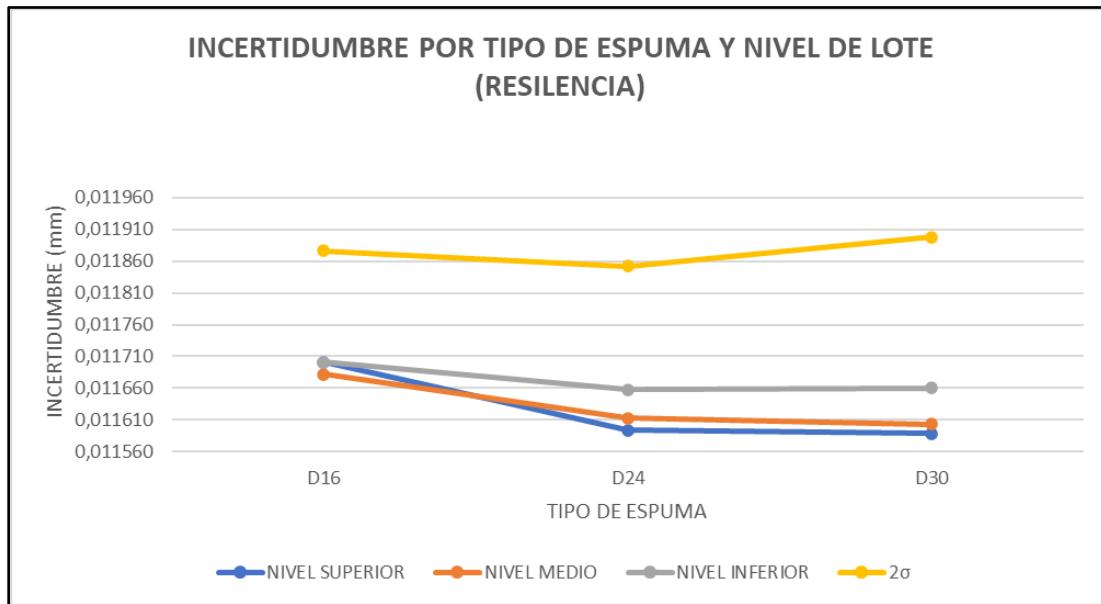
Fuente: Elaboración propia.

La presente gráfica reporta que la espuma D24 tiene la misma incertidumbre en los tres niveles. Por otra parte, las espuma D16 y D30 presentan diferencias decimales entre niveles, siendo el punto más alto de incertidumbre la espuma D16 en su nivel superior. Así como en las propiedades anteriores, las incertidumbres estimadas para este ensayo se aceptan al encontrarse dentro del límite máximo permitido (2σ) como se puede evidenciar en la Figura 22.

Tabla 12*Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de resiliencia*

PROPIEDAD RESILIENCIA	RESULTADOS			
	mm	D16	D24	D30
NIVEL SUPERIOR		0,011701	0,011593	0,011589
NIVEL MEDIO		0,011681	0,011612	0,011603
NIVEL INFERIOR		0,011701	0,011658	0,011660

Fuente: Elaboración propia.

Figura 23*Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de resiliencia*

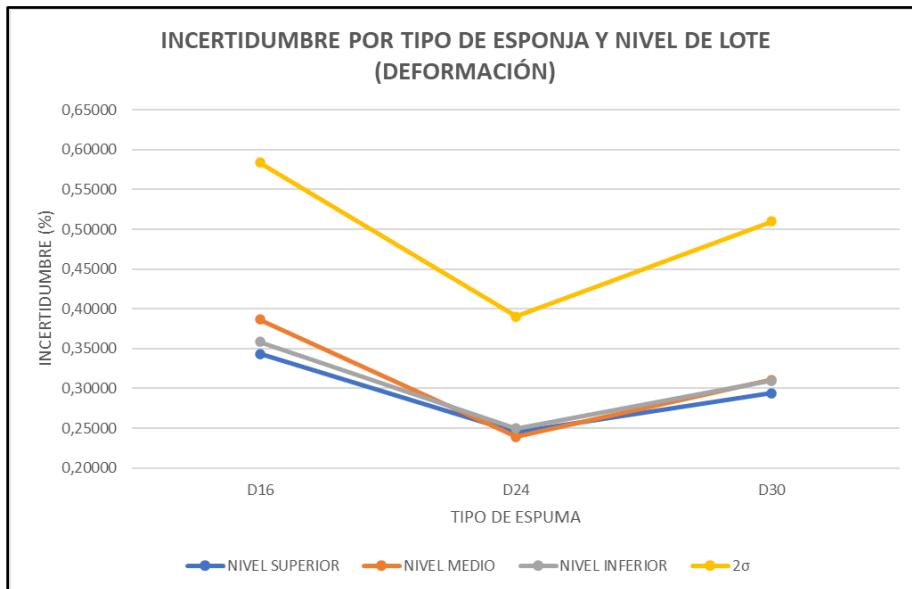
Fuente: Elaboración propia.

Esta gráfica pone en evidencia que la resiliencia presenta una mínima variabilidad en las estimaciones de la incertidumbre de los tres tipos de espumas en los diferentes niveles ensayados, es decir, tienen la misma incertidumbre, con diferencias centesimales como se puede verificar en la Tabla 12, esto puede deberse a la exactitud con la que mide el equipo de medición. Se observa mediante la Figura 23 que todos los valores de incertidumbre de los diferentes niveles y tipos de espuma se encuentran muy por debajo del límite máximo permitido (2σ).

Tabla 13*Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de deformación remanente*

PROPIEDAD DEFORMACIÓN	RESULTADOS			
	%	D16	D24	D30
NIVEL SUPERIOR		0,34330	0,2454	0,2943
NIVEL MEDIO		0,38642	0,2392	0,3110
NIVEL INFERIOR		0,35864	0,2499	0,3095

Fuente: Elaboración propia.

Figura 24*Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de deformación remanente*

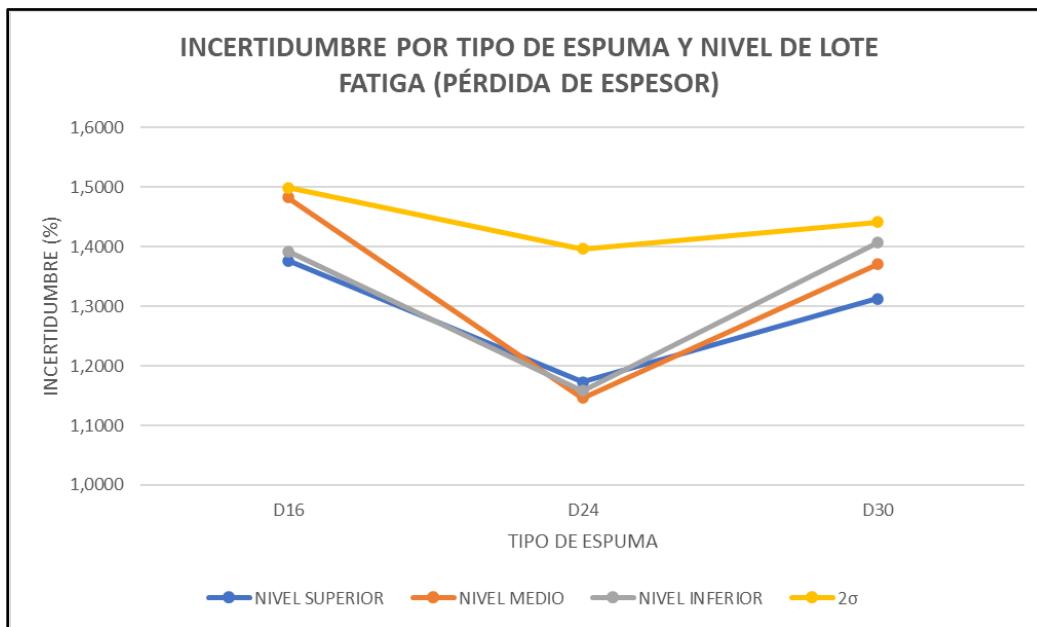
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 24 se evidencia que en los tres niveles la espuma D24 tiene los valores más bajos de incertidumbre, mientras que la espuma D16 reporta las incertidumbres más significativas. El comportamiento de la incertidumbre es similar, siendo el punto menos significativo en el nivel medio de la espuma D24, mientras que las espumas D16 y D30 presentan menor incertidumbre en el nivel superior. Se aceptan los estimados de incertidumbre en los tres tipos de espuma ya que se encuentran muy por debajo del límite máximo permitido (2σ).

Tabla 14*Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de fatiga*

PROPIEDAD	RESULTADOS PÉRDIDA DE ESPESOR		
	FATIGA	ESPESOR	
%	D16	D24	D30
NIVEL SUPERIOR	1,3769	1,1725	1,3125
NIVEL MEDIO	1,4825	1,1465	1,3707
NIVEL INFERIOR	1,3918	1,1583	1,4070

Fuente: Elaboración propia.

Figura 25*Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de fatiga*

Fuente: Elaboración propia.

La presente gráfica muestra que el punto más alto de incertidumbre se encuentra en la espuma D16, y el más bajo en la espuma D24, del nivel medio en ambos casos, mientras que, en los niveles superior e inferior estas espumas presentan el mismo comportamiento. La espuma D24 reporta similitud en la incertidumbre en sus tres niveles. Como se puede ver en la Figura 25 existen puntos críticos, por ejemplo, la incertidumbre de la espuma D16, nivel medio está muy cerca del límite máximo permitido (2σ), lo cual indica que dicha incertidumbre puede ser rechazada y deberá corregirse.

Tabla 15

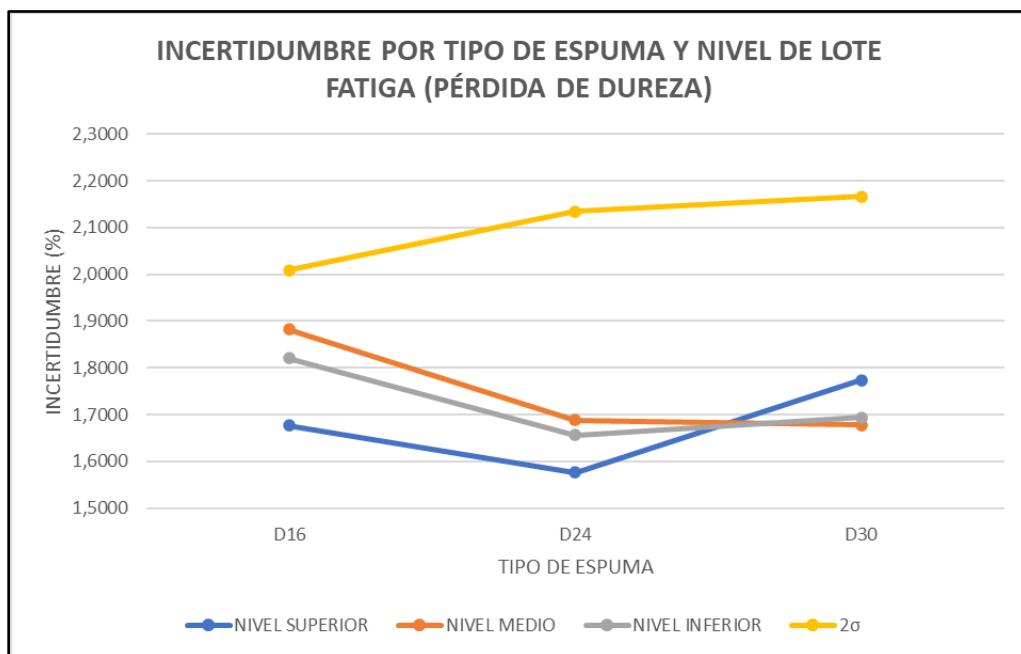
Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de fatiga

PROPIEDAD FATIGA	RESULTADOS PÉRDIDA DE DUREZA			
	%	D16	D24	D30
NIVEL SUPERIOR		1,6772	1,5764	1,7733
NIVEL MEDIO		1,8823	1,6879	1,6784
NIVEL INFERIOR		1,8207	1,6566	1,6934

Fuente: Elaboración propia.

Figura 26

Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de fatiga



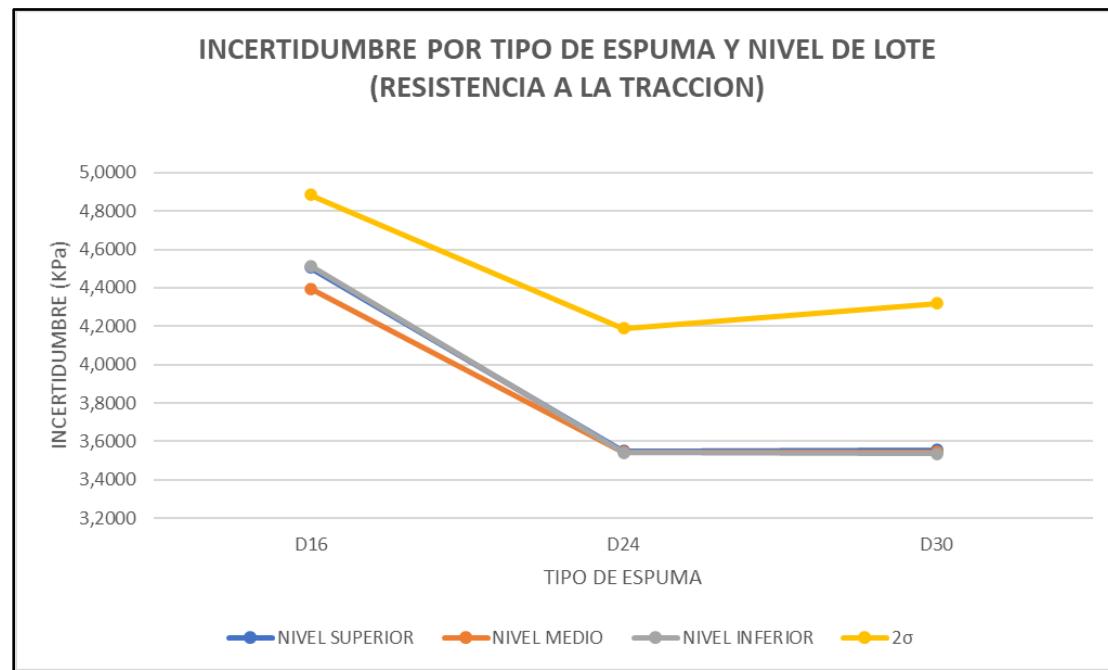
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 26 se observa que la incertidumbre más significativa se encuentra en el nivel medio de la espuma de menor densidad D16, mientras que el aporte menos significativo está en el nivel superior de la espuma D24. El comportamiento de las incertidumbres es similar en el nivel medio e inferior de los tres tipos de espuma, en contraste con el nivel superior, donde la incertidumbre aumenta para la espuma D30. Todos los valores de incertidumbre de esta propiedad se aceptan debido a que se ubican por debajo del límite máximo permitido (2σ).

Tabla 16*Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de resistencia a la tracción*

PROPIEDAD R. TRACCION	RESULTADOS			
	KPa	D16	D24	D30
NIVEL SUPERIOR	4,5064	3,5496	3,5544	
NIVEL MEDIO	4,3956	3,5432	3,5439	
NIVEL INFERIOR	4,5153	3,5402	3,5349	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 27*Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de resistencia a la tracción*

Fuente: Elaboración propia.

Mediante la Figura 27 se analiza que los aportes de incertidumbre de las espumas en los diferentes niveles ensayados tienen el mismo valor con diferencias centesimales, teniendo el menor aporte de incertidumbre en la espuma D30, y el aporte más alto en la espuma D16, ambas del nivel inferior. El límite máximo permitido (2σ) para la incertidumbre está muy por encima de los valores de incertidumbre de todas las espumas, por lo tanto, se aceptan como válidos.

Tabla 17

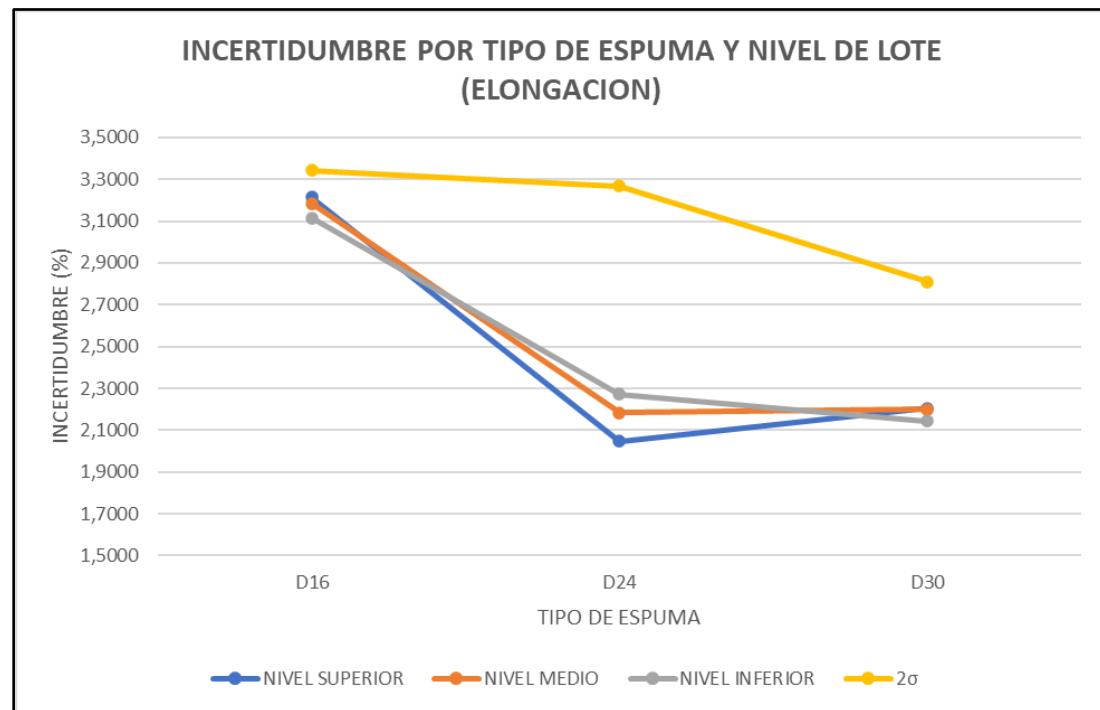
Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de elongación

PROPIEDAD ELONGACIÓN	RESULTADOS		
	%	D16	D24
NIVEL SUPERIOR	3,2153	2,0479	2,2041
NIVEL MEDIO	3,1836	2,1833	2,1985
NIVEL INFERIOR	3,1152	2,2715	2,1439

Fuente: Elaboración propia.

Figura 28

Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de elongación



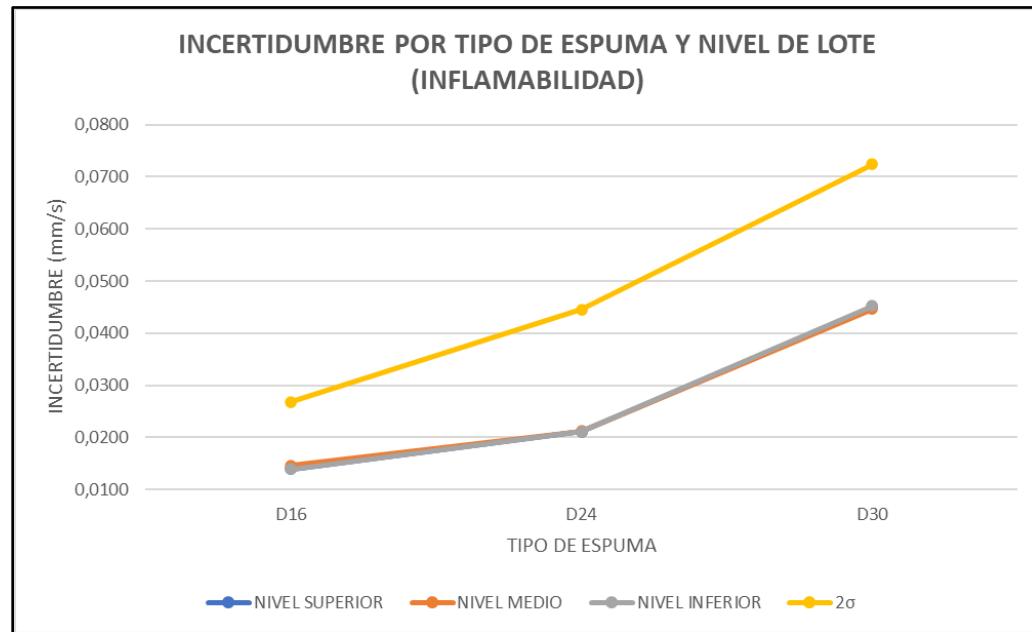
Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en la gráfica que los aportes con mayor incertidumbre se ubican en los niveles superior, medio e inferior de la espuma de menor densidad D16, comparado con los valores de las espumas D24 y D30, los cuales se reducen considerablemente, siendo el aporte más bajo el del nivel superior de la espuma D24. Así mismo, la Figura 28 muestra que todos los aportes de incertidumbre de las tres espumas están dentro del límite máximo permitido (2σ).

Tabla 18*Resultados de la incertidumbre expandida - Ensayos de comportamiento al fuego*

PROPIEDAD INFLAMABILIDAD	RESULTADOS			
	mm/s	D16	D24	D30
NIVEL SUPERIOR		0,0139	0,0211	0,0450
NIVEL MEDIO		0,0146	0,0212	0,0447
NIVEL INFERIOR		0,0140	0,0211	0,0452

Fuente: Elaboración propia.

Figura 29*Gráfica comparativa por tipo de espuma y nivel de lote - Ensayos de comportamiento al fuego*

Fuente: Elaboración propia.

En este ensayo, el comportamiento de los datos es homogéneo para todas las espumas en los tres niveles estudiados. Se analiza que el valor más bajo de incertidumbre se encuentra en la espuma de menor densidad D16, mientras que para las espumas D24 y D30 va aumentando, siendo la de mayor densidad la que obtiene el valor de incertidumbre más alto. En la Figura 29 se observa que el límite máximo permitido (2σ), es mayor que los valores de incertidumbre expandida de todos los niveles y espumas, por lo tanto, se aceptan como conformes.

7. Discusión de resultados

La experiencia práctica desarrollada en el laboratorio durante la realización del presente ensayo académico ha ayudado a interpretar objetivamente el comportamiento de las propiedades de las espumas. Tanto por su importancia técnica, como por el reconocimiento de la calidad de sus productos, los resultados de los ensayos de las propiedades físico-mecánicas de las espumas aseguran su validez mediante las estimaciones de la incertidumbre expandida, lo que, según Metrindust (2023) otorgará al laboratorio beneficios como certificar la calidad de la información entregada al cliente, la toma de decisiones correctas, la economía de recursos, la mejora continua, entre otros.

En las tablas y figuras presentadas, se observan las incertidumbres expandidas de las propiedades físico-mecánicas de las espumas de poliuretano, donde se comparan los valores para cada tipo de espuma y nivel de lote del que se tomaron las muestras ensayadas. Es importante aclarar que no se presentan las incertidumbres de los ensayos de envejecimiento térmico y envejecimiento por humedad debido a que el equipo de ensayo se encuentra fuera de operación, siendo una limitante para que el laboratorio obtenga la acreditación.

Basados en los fundamentos del CEM (2015), se afirma que las incertidumbres expandidas estimadas para las propiedades estudiadas se encuentran dentro del límite máximo permitido, a excepción de la pérdida de espesor del ensayo de fatiga, el cual debe ajustarse, y, como el resto de ensayos, satisfacer la condición $U \leq U_{máx}$ con un factor de cobertura $k = 2$, lo cual garantiza la calidad de los resultados que el laboratorio reportará al OEC o cliente a través de un informe o certificado. Entonces, se puede decir que, los resultados de la pérdida de espesor del ensayo de fatiga no son confiables ya que, a mayor incertidumbre, menor calidad de los mismos.

La acreditación del laboratorio requiere una revisión exhaustiva del cumplimiento de los requisitos técnicos de la norma ISO/IEC 17025:2017, es decir, se debe verificar que la medición de las propiedades esté completa. Este estudio aporta al cumplimiento de los requisitos 7.6.1 y 7.6.3 “Estimación de la incertidumbre de medición” y algunos ítems de los requisitos 7.7.1 y 7.8.3.1 de la norma citada, pero, al no estimar la incertidumbre de las dos propiedades detalladas anteriormente y, al haber sido rechazada la incertidumbre del ensayo de fatiga, el laboratorio está en la obligación de realizar las correcciones necesarias y completar el estudio para cumplir con su objetivo.

Teniendo en cuenta la literatura, la temperatura es una fuente de incertidumbre que puede afectar al mensurando, sin embargo, experimentalmente se ha observado que no influye en todas las propiedades de la misma manera, razón por la que no se considera como un aporte significativo

en algunos ensayos. Si este factor llegase a fluctuar demasiado y, si se detecta que su variación influye sobre el presupuesto de incertidumbre, el laboratorio deberá controlar las condiciones ambientales para realizar los ensayos. Para alcanzar los objetivos planteados en el presente ensayo académico se ejecutaron una serie de actividades y entregables, los cuales se enlistan a continuación:

Se revisaron las siguientes normas y guías técnicas:

- Norma ISO/IEC 17025:2017. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Traducción oficial.
- Norma ISO/IEC 98-3 (GUM 1995). Guía para la expresión de la incertidumbre en la medida.
- Norma ISO/IEC 99 (VIM). International Vocabulary of Metrology - Basic and General Concepts and Associated Terms.
- Norma NTE INEN-ISO 5999:2013. Materiales poliméricos celulares flexibles- Espuma de poliuretano para aplicaciones bajo carga excluyendo refuerzos de alfombra- Requisitos.
- Norma NTE INEN-ISO 23529:2010. Elastómeros. Procedimientos generales de preparación y acondicionamiento de probetas para ensayos físicos.
- Norma NC ISO 1923:2008. Plásticos y cauchos celulares. Determinación de las dimensiones lineales.
- Norma NTE INEN-ISO 845:2014. Plástico y cauchos celulares. Determinación de la densidad aparente.
- Norma NTE INEN-ISO 2439:2014. Materiales Poliméricos celulares flexibles. Determinación de dureza (Técnica de identación).
- Norma NTE INEN ISO-1856:2014. Materiales poliméricos celulares flexibles. Determinación de la deformación remanente por compresión.
- Norma NTE INEN-ISO 8307:2014. Materiales poliméricos celulares flexibles. Determinación de la resiliencia por bola rebotante.
- Norma ISO 3385:2014. Materiales poliméricos celulares flexibles. Determinación de la fatiga por indentación a carga constante.
- Norma NTE INEN-ISO 1798:2014. Materiales poliméricos celulares flexibles. Determinación de la resistencia a la tracción y alargamiento a la rotura.

- Norma NTE INEN-ISO 3582:2014. Materiales poliméricos celulares flexibles. Evaluación en el laboratorio de las características de comportamiento al fuego de probetas pequeñas sometidas a una llama pequeña.
- Norma NTE INEN-ISO 2440:2014. Materiales poliméricos celulares flexibles y rígidos. Ensayo de envejecimiento acelerado.
- RTE INEN 213. Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 213 "Colchones".

Se elaboró 1 procedimiento:

- Procedimiento para la estimación de la incertidumbre de medición para ensayos físico mecánicos de espuma de poliuretano del laboratorio de calidad Lamitex PR-LB-PE-010.

Nota: Este documento técnico pertenece al laboratorio y no podrá ser anexado o publicado en este ensayo académico por motivos de confidencialidad y no divulgación.

Se realizaron 7 simuladores en MS Excel de la estimación de la incertidumbre de medición de las propiedades estudiadas:

- Simulador de estimación de la incertidumbre de medición de la densidad de espuma de poliuretano.
- Simulador de estimación de la incertidumbre de medición de la dureza de espuma de poliuretano – métodos A-40 %, B-25 %, B-40 %, B-65 %.
- Simulador de estimación de la incertidumbre de medición de la resiliencia de espuma de poliuretano.
- Simulador de estimación de la incertidumbre de medición de la deformación remanente de espuma de poliuretano.
- Simulador de estimación de la incertidumbre de medición de la fatiga dinámica de espuma de poliuretano – pérdida de espesor, pérdida de dureza.
- Simulador de estimación de la incertidumbre de medición de la resistencia a la tracción y alargamiento a la rotura de espuma de poliuretano.
- Simulador de estimación de la incertidumbre de medición del comportamiento al fuego de espuma de poliuretano.

Se realizaron 12 estudios comparativos de estimación de la incertidumbre de medición de las propiedades que menciona la norma NTE INEN-ISO 5999:2013 para las espumas de poliuretano:

- Estimación de la incertidumbre de medición del ensayo de densidad de espuma de poliuretano.
- Estimación de la incertidumbre de medición del ensayo de dureza de espuma de poliuretano – método A-40 %.
- Estimación de la incertidumbre de medición del ensayo de dureza de espuma de poliuretano – método B-25 %.
- Estimación de la incertidumbre de medición del ensayo de dureza de espuma de poliuretano – método B-40 %.
- Estimación de la incertidumbre de medición del ensayo de dureza de espuma de poliuretano – método B-65 %.
- Estimación de la incertidumbre de medición del ensayo de resiliencia de espuma de poliuretano.
- Estimación de la incertidumbre de medición del ensayo de deformación remanente de espuma de poliuretano.
- Estimación de la incertidumbre de medición del ensayo de fatiga dinámica de espuma de poliuretano – pérdida de espesor.
- Estimación de la incertidumbre de medición del ensayo de fatiga dinámica de espuma de poliuretano – pérdida de dureza.
- Estimación de la incertidumbre de medición del ensayo de resistencia a la tracción de espuma de poliuretano.
- Estimación de la incertidumbre de medición del ensayo del alargamiento a la rotura de espuma de poliuretano.
- Estimación de la incertidumbre de medición del ensayo de comportamiento al fuego de espuma de poliuretano.

8. Conclusiones y Recomendaciones

El presente ensayo académico ha implementado la metodología GUM para la evaluación de la incertidumbre de medición como requisito de cumplimiento de la norma NTE INEN ISO 17025:2017 para laboratorios de ensayo y calibración. El objetivo principal fue conocer la calidad de los resultados entregados al cliente o al OEC mediante la estimación y comparación de las incertidumbres halladas para la población de estudio, lo que aportará a la acreditación del laboratorio.

La evaluación de la incertidumbre permite identificar las contribuciones más influyentes dentro del proceso de medición, donde se evidencia el estado general del laboratorio, la capacidad del analista, las condiciones de los equipos e instrumentos, se analiza los métodos y mitigan fuentes de error, y como consecuencia, mejora la validez y credibilidad de los resultados. Cabe aclarar que, no se realiza un estudio de reproducibilidad porque al ser el estudiante quien realiza los ensayos y cumple la función de analista, solo se considera el estudio de repetibilidad, pero en un futuro el aporte por mano de obra puede variar al no tratarse de condiciones reales de operación o al aumentar analistas, por lo que se deberá realizar un estudio de reproducibilidad.

Los resultados indican que, las incertidumbres estimadas, comparadas por tipo de espuma y nivel de lote, se encuentran dentro de los límites máximos permitidos para cada propiedad, estos límites se basan en la regla de decisión adoptada por el laboratorio. La única excepción se observa en la incertidumbre estimada para la pérdida de espesor del ensayo de fatiga de la espuma D16, nivel medio. En este caso, el estudio se deberá repetir desde cero, tratando de identificar los factores que influyen en el presupuesto de incertidumbre, corregir y/o reducir errores hasta estar conforme con la incertidumbre máxima permitida para dicho ensayo.

Para cumplir con los objetivos de este estudio, se crearon tanto el procedimiento para la estimación de la incertidumbre de medición para ensayos físico-mecánicos de espuma de poliuretano, como los simuladores en MS Excel, los cuales estiman automáticamente la incertidumbre de medición de las propiedades medidas en el laboratorio, ayudando a reducir el tiempo de análisis al ingresar directamente sólo los resultados de los ensayos que reposan en los registros de cada propiedad. El resto de parámetros por lo general no varían hasta que exista un cambio respecto a algún dato, que puede darse por la actualización de los certificados de calibración o por no mantener las mismas condiciones de operación.

En conclusión, la evaluación de la incertidumbre de medición es un requisito fundamental de la norma NTE INEN ISO 17025:2017, que contribuye al aseguramiento de la validez de los

resultados de los laboratorios de ensayo y calibración. Su implementación adecuada permite a los laboratorios mejorar la precisión de sus mediciones, brindar un producto o servicio confiable a sus clientes y cooperar al desarrollo metrológico nacional. Sin embargo, al no completar el estudio de la incertidumbre de todas las propiedades que dicta la norma NTE INEN ISO 5999:2013, el laboratorio no da total cumplimiento a los requisitos que demanda la normativa correspondiente, lo cual limita su acreditación.

Referencias

- Blanco, M. M., Chavarria, K. V., Bermuacute, L., Hidalgo, D., & Morales, S. C. (2020). La importancia de la metrología en el desarrollo de indicadores de gestión ambiental. *Ambientico*, 274, 33-38.
- Cano Uribe, J., & García López, A. (2011). *Desarrollo de una metodología para la estimación de la incertidumbre de medición en experimentos de física* [Universidad Tecnológica de Pereira]. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/c21b075a-dfb5-40ab-a7d7-fd29b44d7457/content>
- Centro Español de Metrología CEM. (2008). *Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la incertidumbre de Medida*. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. <https://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf>
- Centro Español de Metrología CEM. (2012). *Vocabulario Internacional de Metroología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados* (3a edición). Ministerio de Industria, Energía y Turismo. <https://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>
- Centro Español de Metrología CEM. (2015). *Evaluación de datos de medición—El papel de la incertidumbre de medida en la evaluación de la conformidad JCGM 106:2012*. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. https://www.cem.es/sites/default/files/jcgm2015_0.pdf
- Centro Español de Metrología CEM. (2019). *Procedimiento ME-003 para la calibración de manómetros, vacuómetros y manovacuómetros*. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. https://grupoinduscalidad.com/archivos/manometros_vacuometros_manovacuometros.pdf
- Chaide. (2020, abril 2). *Tecnología aplicada a los colchones para descansar mejor*. Chaide | Compra los mejores colchones del Ecuador. <https://www.chaide.com/espumas/tecology>

- Chalí Izquierdo, M. A. (2022). *Diseño para control del patrón primario de tensión DC, mantenido por un grupo de celdas saturadas en el Laboratorio de Metrología del CIIUSAC* [Universidad de San Carlos de Guatemala]. <https://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>
- Delgado, O. (2023, enero 31). 5 razones para Implantar la ISO/IEC 17025 en tu Laboratorio. *SGC-Lab.* <https://sgc-lab.com/por-que-implantar-un-sistema-iso-iec-17025/>
- González, E. L., Armas, M. P. de, Macías, Y. C., Cabrera, E. L., Martínez, T. de las M. E., & González, A. M. G. (2021). Consideraciones acerca del desempeño metrológico en unidades de salud. *MediSur*, 19(1), 142-456.
- Haida International. (2024a). *Environmental Test Chamber With Programmable*. <https://www.haidatestequipment.com/products-environmental-test-chamber-with-programmable.htm>
- Haida International. (2024b). *Equipo de inflamabilidad de espuma*. <https://www.haidatestequipment.com/>
- Haida International. (2024c). *Foam Pounding Dynamic Fatigue Test Machine*. <https://www.haidatestequipment.com/products-foam-pounding-dynamic-fatigue-test-machine.htm>
- Haida International. (2024d). *High Temperature furnace—Environment Test Chamber—Haidatestequipment.com*. <https://www.haidatestequipment.com/products/high-temperature-furnace.htm>
- Haida International. (2024e). *Rebanadora neumática HD-A547*. <https://www.haidatestequipment.com/>
- Haida International. (2024f). *Sponge permanent deformation tester-dongguan Hiada International Equipment Co.,ltd.* <https://www.haidatestequipment.com/sponge-permanent-deformation-tester.htm>

Haida International. (2024g). *Spongy indentation hardness testing machine.*

<https://www.haidatequipment.com/products/spongy-indentation-hardness-testing-machine.htm>

Hurtado-Mejía, D. (2022). *Plan de negocios para InnoQua, organización en calidad y metrología para la oferta de asesorías, consultorías, capacitación y auditoría enfocado a empresas del sector alimentario de Manizales* [Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD].

<http://repository.unad.edu.co/handle/10596/52488>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. (2020). *Instructivo para estimación de la incertidumbre de medición.*

<http://sgt.ideam.gov.co/documents/412030/35488871/M-S-LC-I049+INSTRUCTIVO+PARA+ESTIMACI%C3%93N+DE+LA+INCERTIDUMBRE+DE+MEDICIÓN+C3%93N+v2.pdf/a457d7c8-e65e-4d80-b1b9-04db841bbd35?version=1.0>

Instituto de la Ingeniería de España IIE & Centro Español de Metrología CEM. (2019). *La Metrología también existe. Centro Español de Metrología.*

https://www.cem.es/sites/default/files/30363_lametrologiatambienexiste_web.pdf

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2024). *Laboratorio Nacional de Metrología.*

<https://www.normalizacion.gob.ec/laboratorio-nacional/>

Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (2013). *NTE INEN-ISO 5999:2013. Materiales poliméricos celulares flexibles—Espuma de poliuretano para aplicaciones bajo carga excluyendo refuerzos de alfombra—Requisitos.* https://tuxdoc.com/download/norma-tecnica-ecuatoriana-nte-inen-iso-59992013_.pdf

Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (2014). *NTE INEN-ISO 845. Plásticos y cauchos celulares. Determinación de la densidad aparente.*

Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (2024). *Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN.* <https://www.normalizacion.gob.ec/objetivos/>

Integral Buenos Aires. (2011). *Poliuretano expandido. Aislación Térmica. Poliuretano expandido aplicaciones.* <http://www.integralbuenosaires.com/poliuretano.html>

Interface Force Measurement Solutions IFMS. (2023, junio 29). *Understanding GUM and Measurement Uncertainty.* Interface. <https://www.interfaceforce.com/understanding-gum-and-measurement-uncertainty/>

International Organization for Standardization ISO. (2024). *INEN-Ecuador.* ISO. <https://www.iso.org/member/1711.html>

Ley del Sistema Ecuatoriano de la Calidad, 76, 0258-PCN (2021). https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2023-04/Documento_Ley-Sistema-Ecuatoriano-Calidad_0.pdf

Lugo Luévano, J. G. (2023). *Plan tecnológico en Institutos Nacionales de Metrología de Latinoamérica, Caso México* [Universidad Autónoma de Querétaro]. <https://ring.uaq.mx/handle/123456789/9601>

Metrindust. (2023). *¿Por qué es importante el aseguramiento de la validez de los resultados en un laboratorio?* <https://es.linkedin.com/pulse/por-qu%C3%A9-es-importante-el-aseguramiento-de-la-validez-nhxyf>

Mettler-Toledo. (2024). *Precisión Balance ME4001T/00.* https://www.mt.com/ca/en/home/products/Laboratory_Weighing_Solutions/precision-balances/ME4001T.html

Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca. (2024). *Designación de Organismos de Evaluación de la Conformidad. Ecuador—Guía Oficial de Trámites y Servicios.* <https://www.gob.ec/index.php/mpceip/tramites/designacion-organismos-evaluacion-conformidad>

Núñez, A. (2020, agosto 12). Método de las 5M aplicado en Diagrama de Ishikawa. *Diagrama de Ishikawa.* <https://diagramadeishikawa.com/metodo-de-las-5m-diagrama-de-ishikawa/>

Organización Internacional de Normalización ISO. (2017). *ISO/IEC 17025:2017. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.*

<https://dgn.isolutions.iso.org/obp/ui#iso:std:iso-iec:17025:ed-3:v2:es>

Pavco Wavin. (2018). ¿Qué es el Flexómetro y Cómo Utilizarlo?
<https://pavcowavin.com.co/blog/el-flexometro-que-es-y-como-utilizarlo>

Pérez, M. (2012). *Estimación de incertidumbres. Guía GUM.* 113-130.

Reyes Ponce, Y., & Mejías Sánchez, Y. (2021). Día Mundial de la Metrología. Medición para la salud en Cuba. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba,* 11(2).
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2304-01062021000200003&lng=es&nrm=iso&tlang=es

Santizo Soto, D. A. (2022). *Documentación de procedimientos de los laboratorios de la unidad de inspección y verificación en materia de metrología legal con base a la Norma Coguanor NTG/ISO/IEC 17020:2012* [Universidad de San Carlos de Guatemala].
<https://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>

Schmid, W., & Lazos Martínez, R. (2000). *Guía para estimar la incertidumbre de la medición.*
[http://www.paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/5404/GUIAPARAESTIMARLAINCERTIDUMBRE\(CENAM\)_26566.pdf](http://www.paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/5404/GUIAPARAESTIMARLAINCERTIDUMBRE(CENAM)_26566.pdf)

Serrano Blanco, G. (2013). *Establecimiento de los criterios de selección de un material de referencia para el ensayo del péndulo de deslizamiento USRV* [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/21550/>

Servicio de Acreditación Ecuatoriano. (2024). *Acreditación vs. Designación: ¿en qué se diferencian?* <https://www.acreditacion.gob.ec/acreditacion-vs-designacion-en-que-se-diferencian/>

Servicio de Acreditación Ecuatoriano SAE. (2023). *Consulta de organismos evaluadores de la conformidad (OEC) acreditados.* <https://www.acreditacion.gob.ec/wp-content/uploads/2017/04/OEC-acreditados.pdf>

Servicio de Acreditación Ecuatoriano SAE. (2024a). *¿Qué es la acreditación?* <https://www.acreditacion.gob.ec/que-es-la-acreditacion/>

Servicio de Acreditación Ecuatoriano SAE. (2024b). *Servicio de Acreditación Ecuatoriano – SAE.* <https://www.acreditacion.gob.ec/>

Stanley. (2024). *Calibrador Digital milímetros / pulgadas.* <https://co.stanleytools.global/producto/78-440la/calibrador-digital-milimetros-pulgadas>

Ticona Canaza, G., & Prado Venegas, E. (2023). *Caso de Estudio: Estrategia aplicada por la Dirección de Metrología para atender la demanda de certificación de instrumentos de medición* [Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. [https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/671714/Ticona\(CG.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/671714/Ticona(CG.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Vásquez Rodríguez, J. (2020). *Análisis de la perspectiva de la acreditación conforme la norma ISO/IEC 17025 para el cumplimiento de los reglamentos técnicos ecuatorianos de alimentos* [Universidad Andina Simón Bolívar]. <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/7931/1/T3415-MGCI-V%C3%A1squez-Analysis.pdf>

Velasco Agudelo, J. J. (2022). *Estudio de fundamentos de metrología para la formación en Ingeniería Eléctrica.* [Universidad de Pamplona]. <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/4933>

Glosario

Conformidad: Aportación de evidencia objetiva de que un elemento o medición satisface los requisitos especificados.

Deriva: Variación continua o incremental de una indicación a lo largo del tiempo, debida a variaciones de las características metrológicas de un instrumento de medida.

Desviación estándar: Medida que indica la dispersión de los valores en torno a la media de un conjunto de datos.

Error de medición: Es la diferencia existente entre el valor que se ha medido y el valor de referencia o real.

GUM: Guide to the expression of Uncertainty in Measurement.

Incertidumbre de medida: Parámetro que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando.

Límite Máximo Permitido: Es el valor extremo con respecto a un valor de referencia conocido, permitido por especificaciones o reglamentaciones, para una medición, instrumento o sistema de medida dado.

Magnitud de influencia: Magnitud que no es el objeto de la medición pero que tiene un efecto sobre el resultado de la misma.

Medición: Proceso para obtener experimentalmente uno o varios valores de un mensurando.

Mensurando: Propiedad cuantitativa que se desea medir.

Nivel de confianza: Probabilidad de que la estimación de un parámetro estadístico de una población se encuentre dentro del intervalo de confianza.

OEC: Organismo Evaluador de la Conformidad

Precisión: Proximidad entre los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas.

Procedimiento de medición: Descripción detallada que incluye cálculos necesarios para obtener un resultado de medida.

Regla de decisión: Regla que describe cómo se toma en cuenta la incertidumbre de medición cuando se declara la conformidad con un requisito especificado.

Repetibilidad: Capacidad de obtener los mismos resultados al repetir una medición bajo las mismas condiciones. Es una medida de la precisión interna de las mediciones realizadas.

Resolución: Capacidad de un sistema o instrumento para detectar y mostrar cambios o variaciones pequeñas en una magnitud o medida.

Sensibilidad: Mínima variación que un instrumento de medida es capaz de detectar.

Trazabilidad: Capacidad de relacionar los resultados de una medición individual a patrones nacionales o internacionales.

VIM: Vocabulario Internacional de Metrología

Anexos

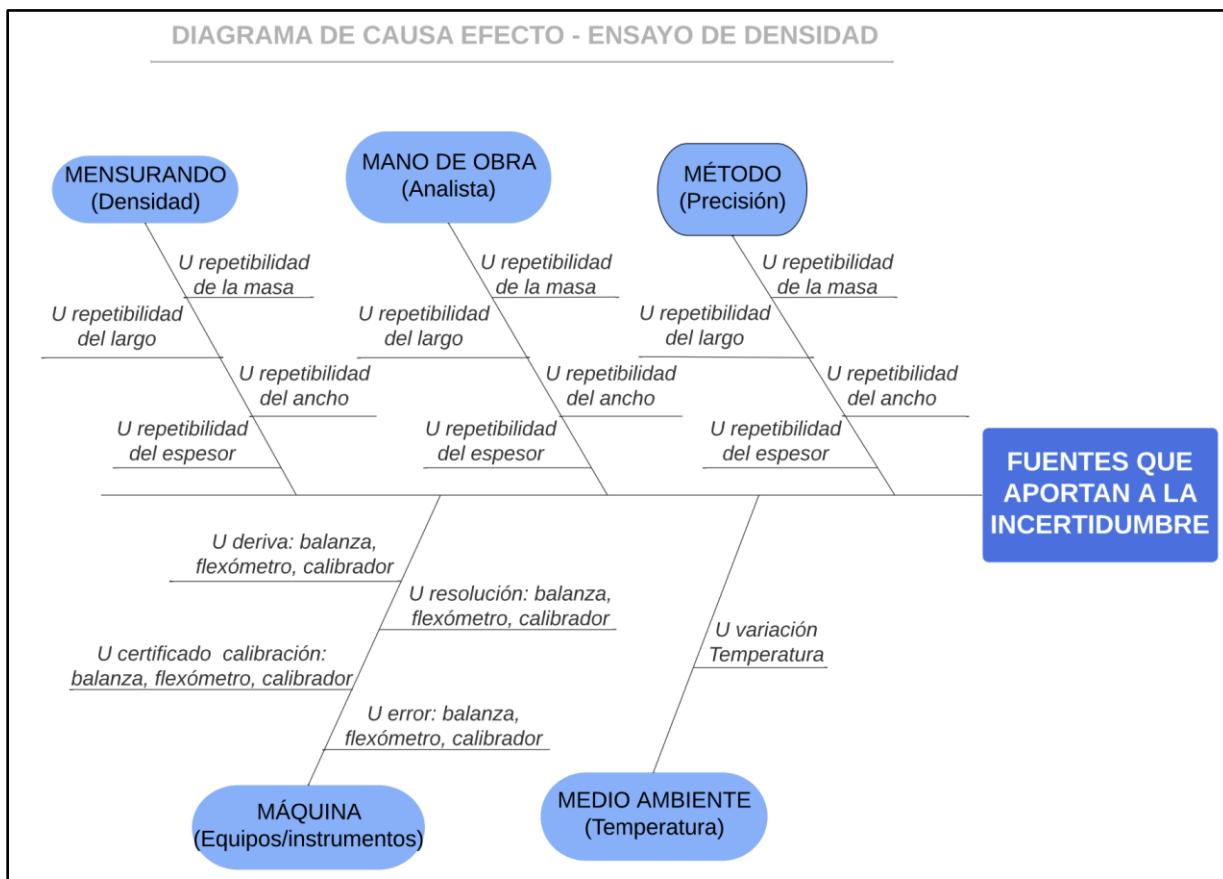
Anexo A. Marco Normativo

Marco normativo

ISO/IEC 17025:2017	Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Traducción oficial.
ISO/IEC 98-3 (GUM 1995)	Guía para la expresión de la incertidumbre en la medida.
ISO/IEC 99 (VIM)	International Vocabulary of Metrology - Basic and General Concepts and Associated Terms.
RTE INEN 213	Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 213 "Colchones".
NTE INEN-ISO 5999:2013	Materiales poliméricos celulares flexibles- Espuma de poliuretano para aplicaciones bajo carga excluyendo refuerzos de alfombra-Requisitos.
NTE INEN-ISO 23529:2010	Elastómeros. Procedimientos generales de preparación y acondicionamiento de probetas para ensayos físicos.
NC ISO 1923:2008	Plásticos y cauchos celulares. Determinación de las dimensiones lineales.
NC ISO 471:2005	Elastómeros - Temperaturas, humedades y duraciones normalizadas para acondicionamiento y ensayos.
NTE INEN-ISO 845:2014	Plástico y cauchos celulares. Determinación de la densidad aparente.
NTE INEN-ISO 2439:2014	Materiales Poliméricos celulares flexibles. Determinación de dureza (Técnica de indentación).
NTE INEN ISO-1856:2014	Materiales poliméricos celulares flexibles. Determinación de la deformación remanente por compresión.
NTE INEN-ISO 8307:2014	Materiales poliméricos celulares flexibles. Determinación de la resiliencia por bola rebotante
ISO 3385:2014	Materiales poliméricos celulares flexibles. Determinación de la fatiga por indentación a carga constante.
NTE INEN-ISO 1798:2014	Materiales poliméricos celulares flexibles. Determinación de la resistencia a la tracción y alargamiento a la rotura.
NTE INEN-ISO 3582:2014	Materiales poliméricos celulares flexibles. Evaluación en el laboratorio de las características de comportamiento al fuego de probetas pequeñas sometidas a una llama pequeña.
NTE INEN-ISO 2440:2014	Materiales poliméricos celulares flexibles y rígidos. Ensayo de envejecimiento acelerado.

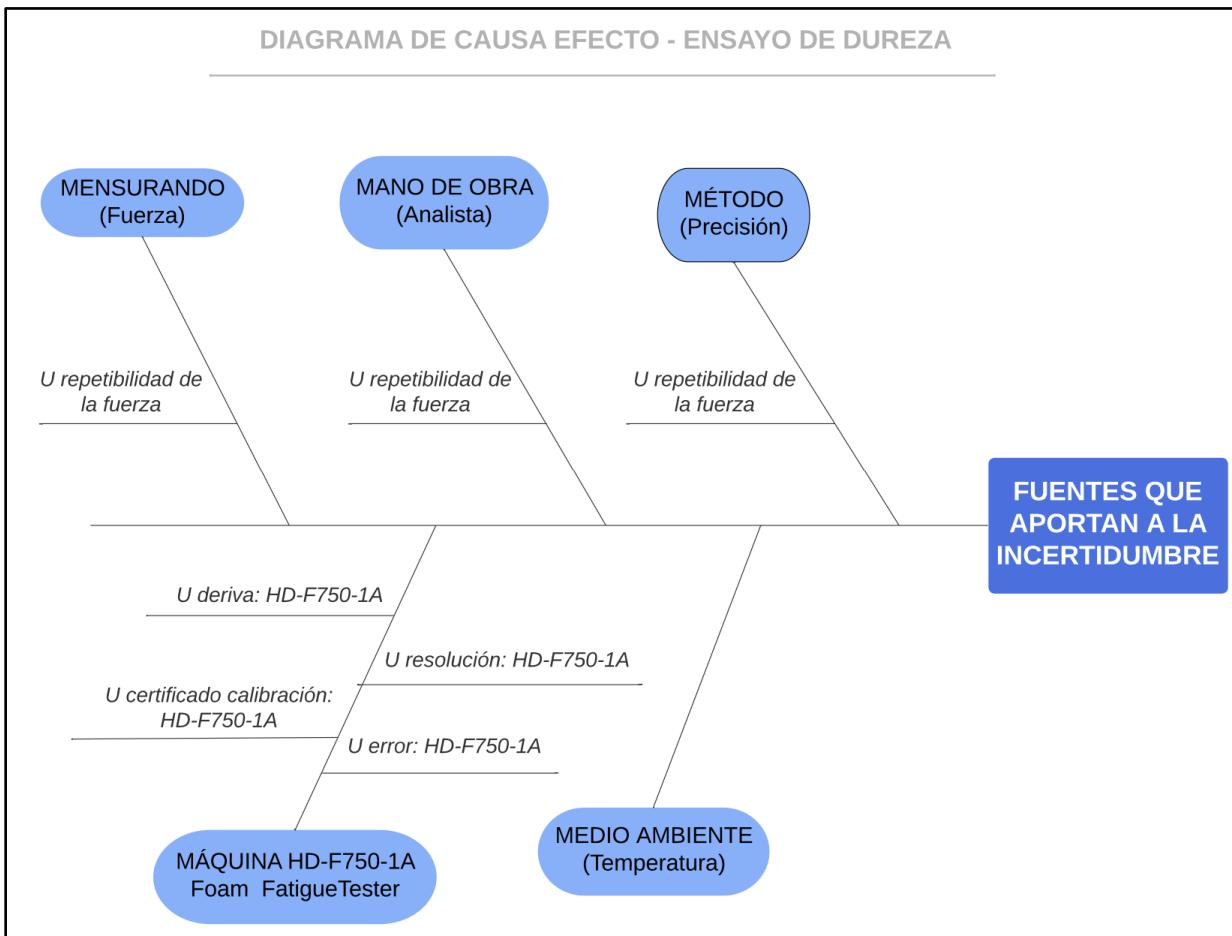
Fuente: Elaboración propia

Anexo B. Diagrama de causa efecto – Ensayo de densidad



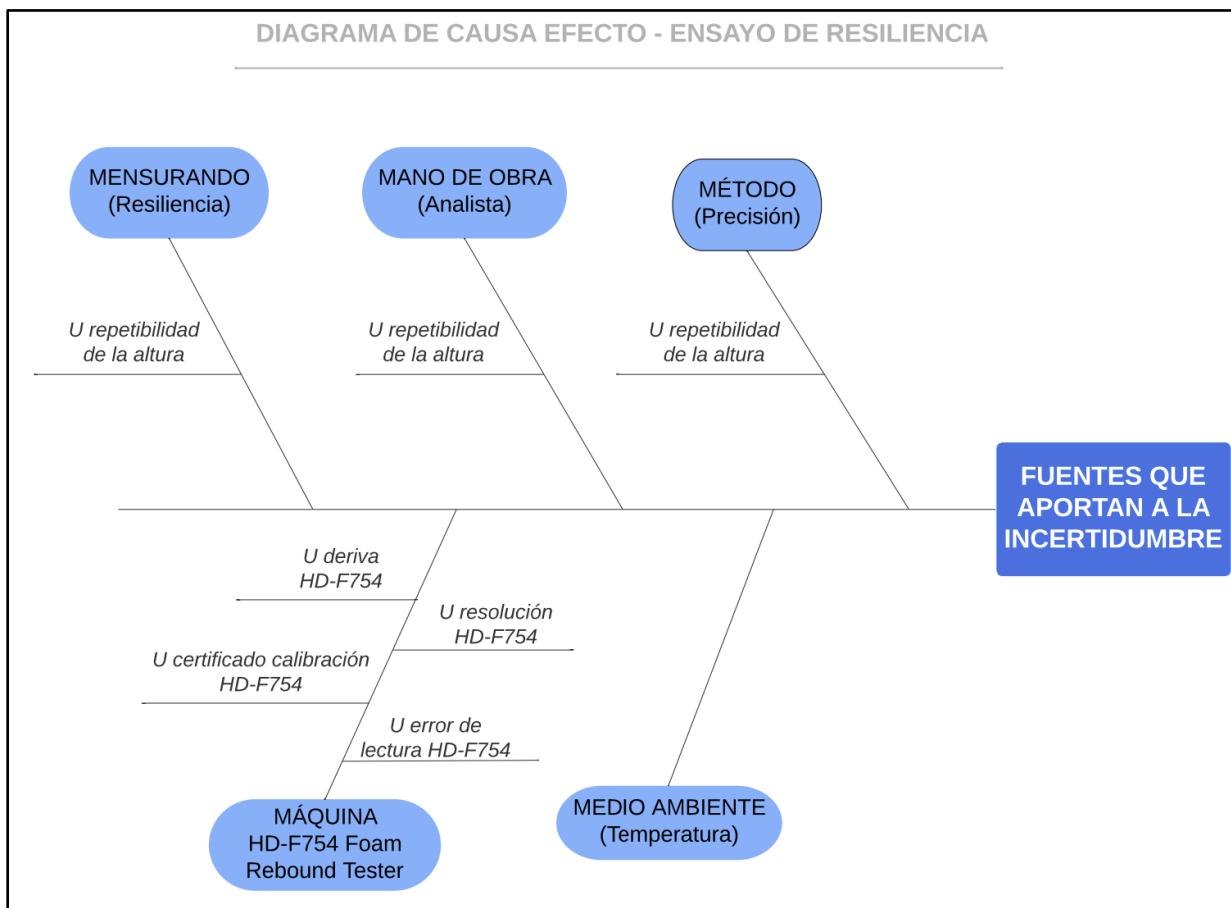
Fuente: Elaboración propia

Anexo C. Diagrama de causa efecto – Ensayo de dureza



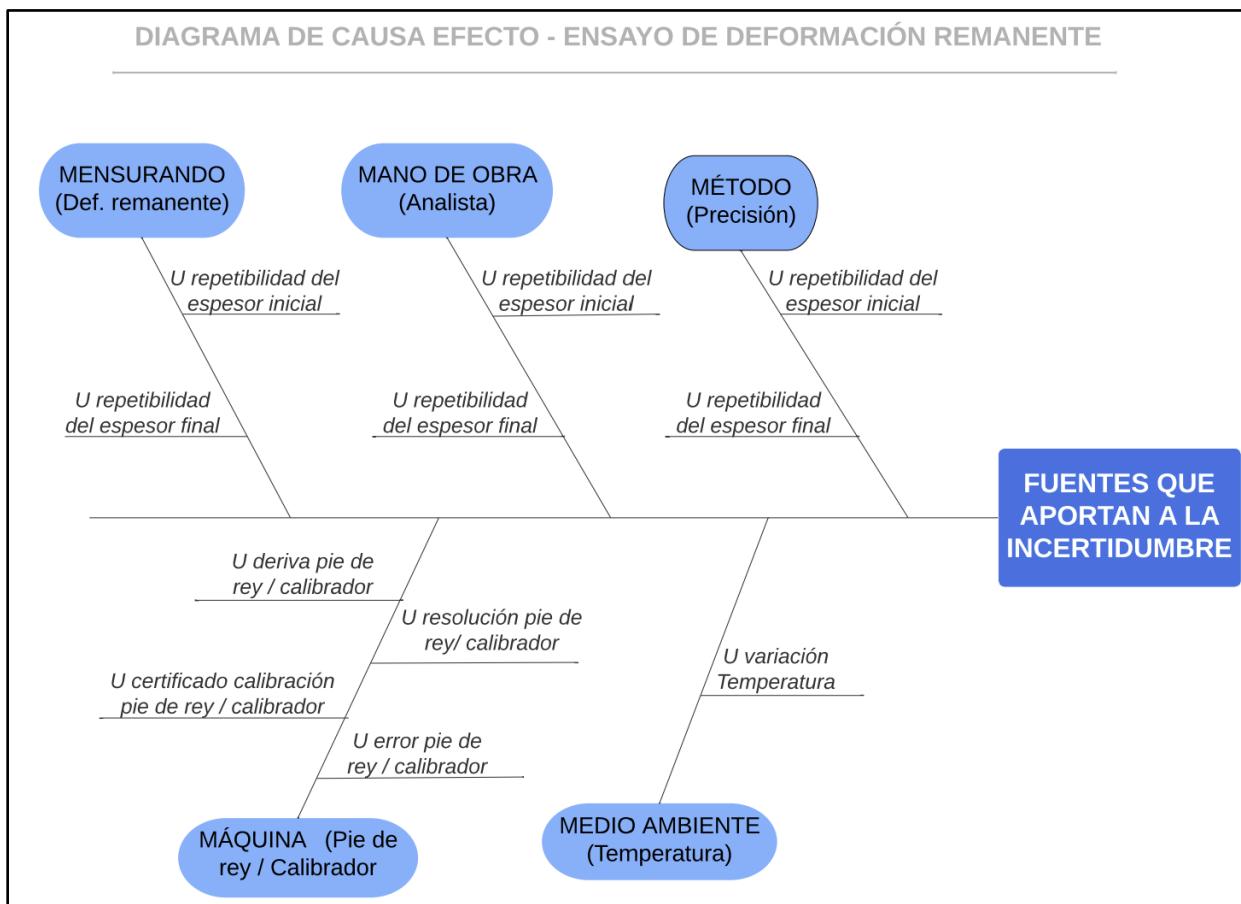
Fuente: Elaboración propia

Anexo D. *Diagrama de causa efecto - Ensayo de resiliencia*



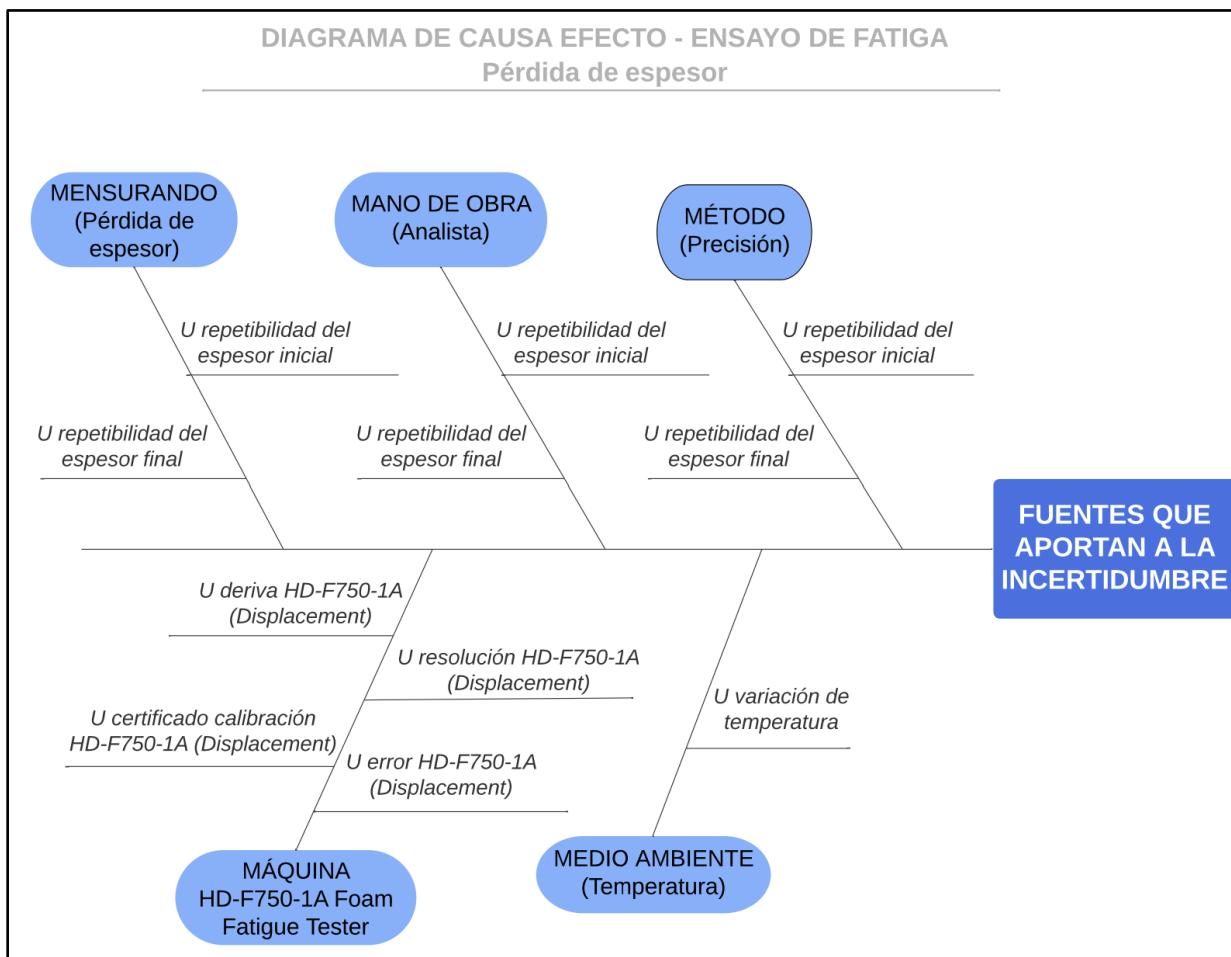
Fuente: Elaboración propia

Anexo E. Diagrama de causa efecto - Ensayo de deformación remanente



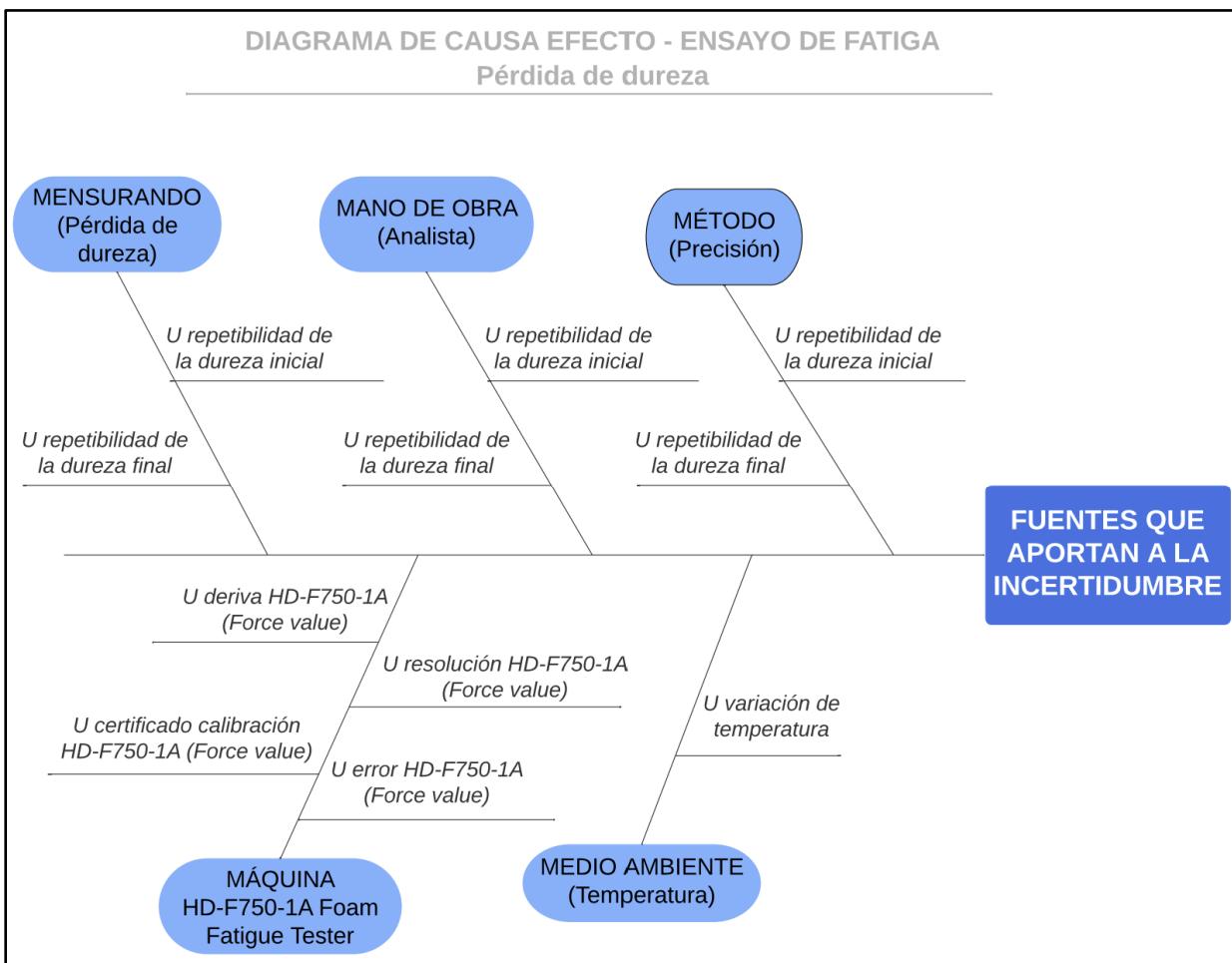
Fuente: Elaboración propia

Anexo F. *Diagrama de causa efecto - Ensayo de fatiga (Pérdida de espesor)*



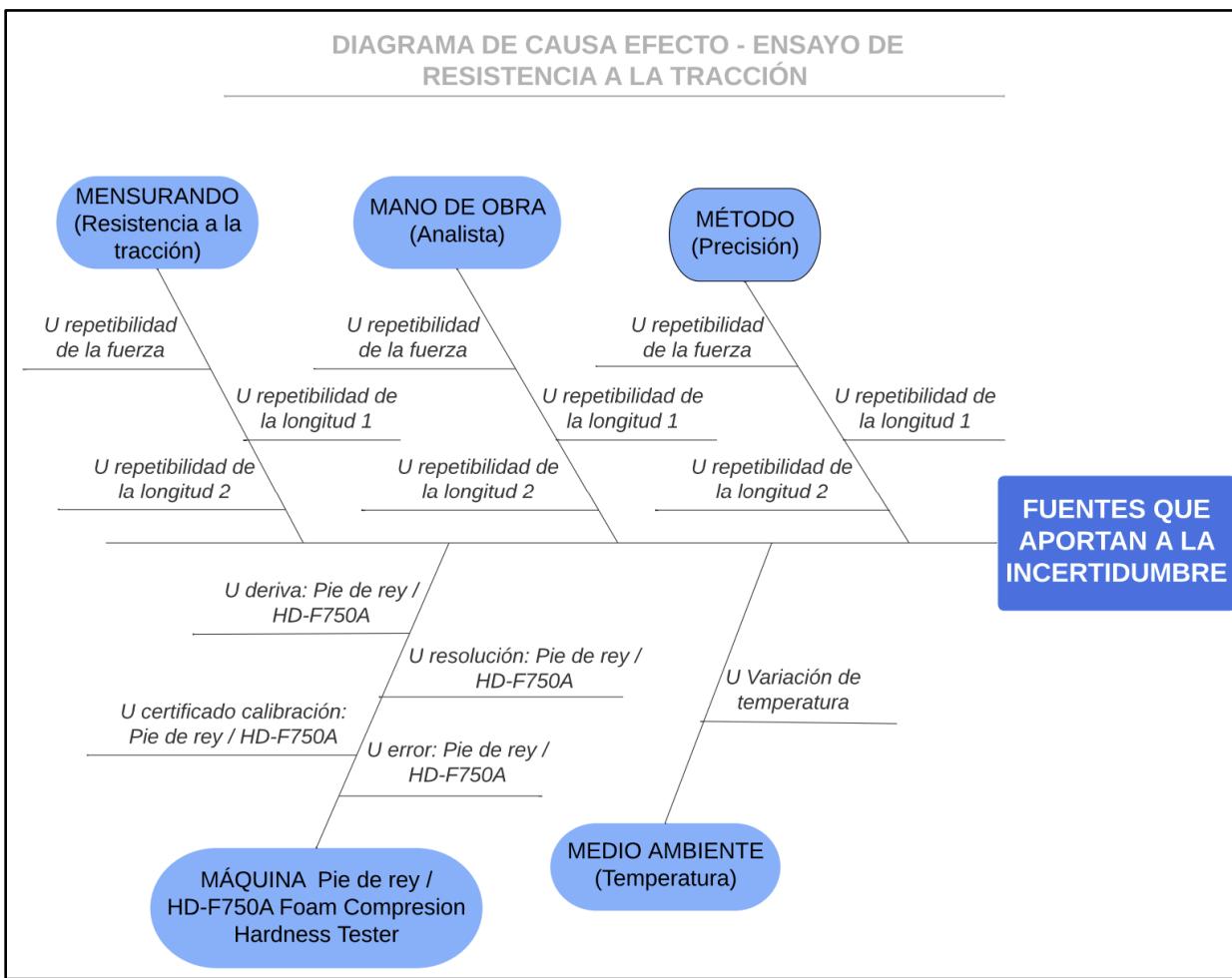
Fuente: Elaboración propia

Anexo G. *Diagrama de causa efecto - Ensayo de fatiga (Pérdida de dureza)*



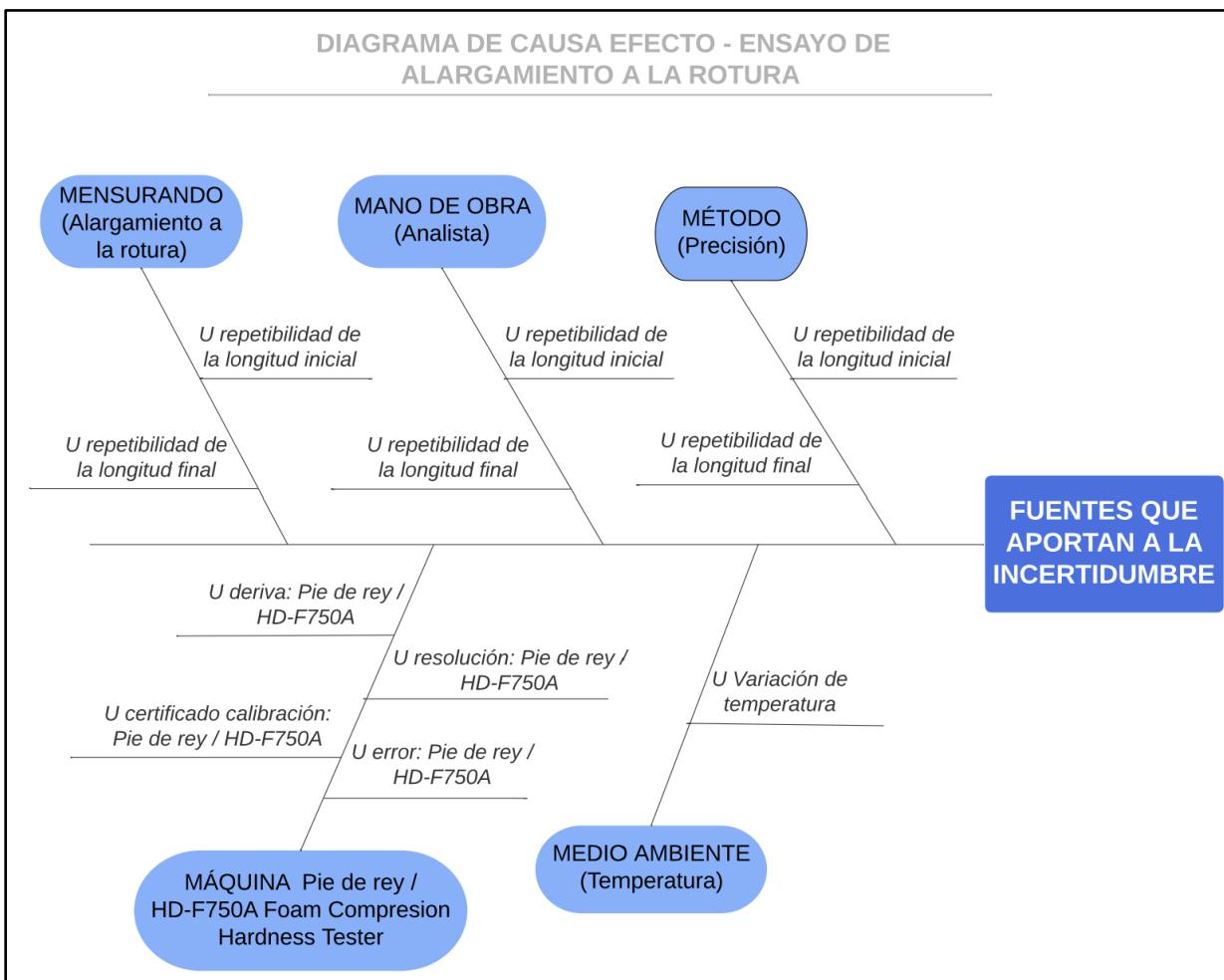
Fuente: Elaboración propia

Anexo H. *Diagrama de causa efecto - Ensayo de resistencia a la tracción*



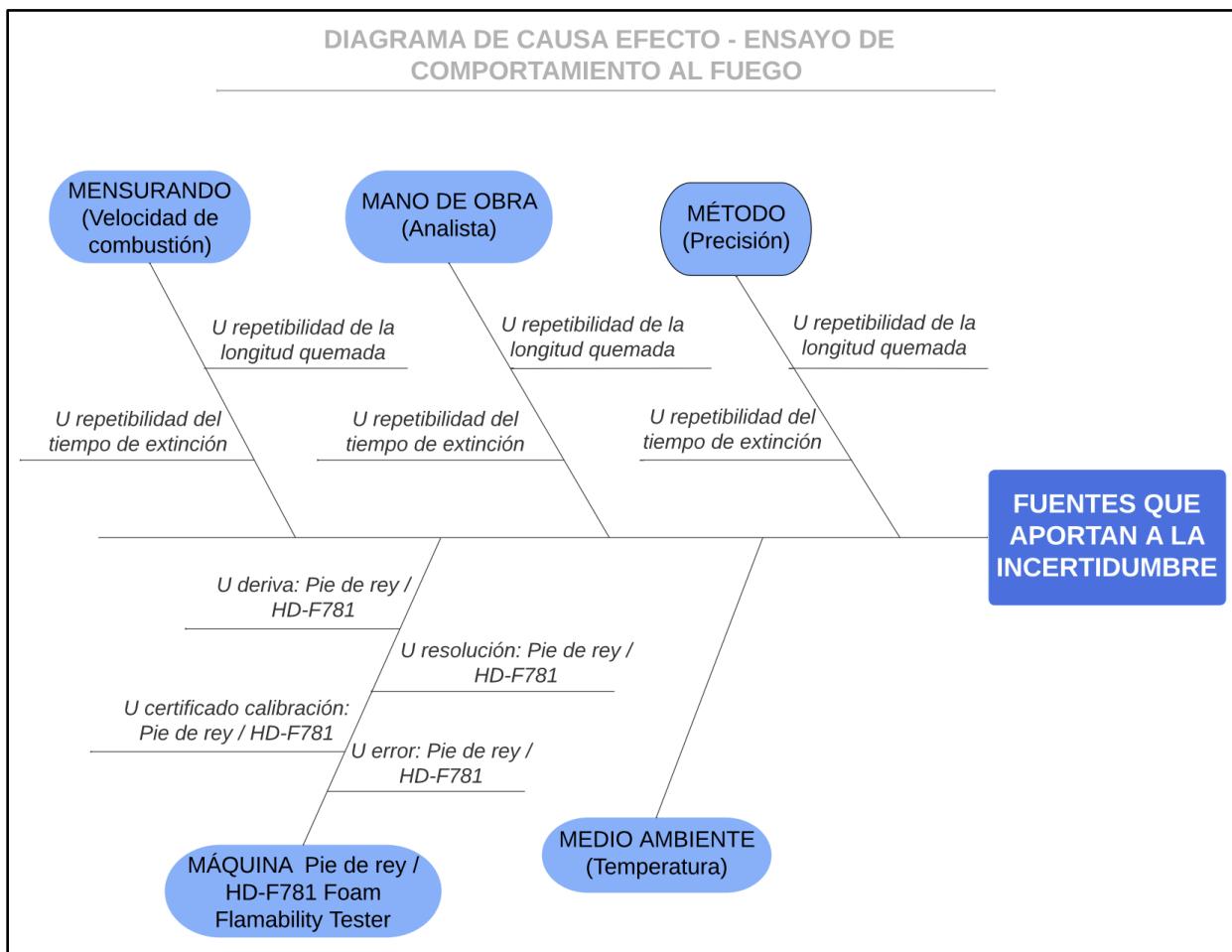
Fuente: Elaboración propia

Anexo I. Diagrama de causa efecto - Ensayo de alargamiento a la rotura



Fuente: Elaboración propia

Anexo J. Diagrama de causa efecto - Ensayo de comportamiento al fuego



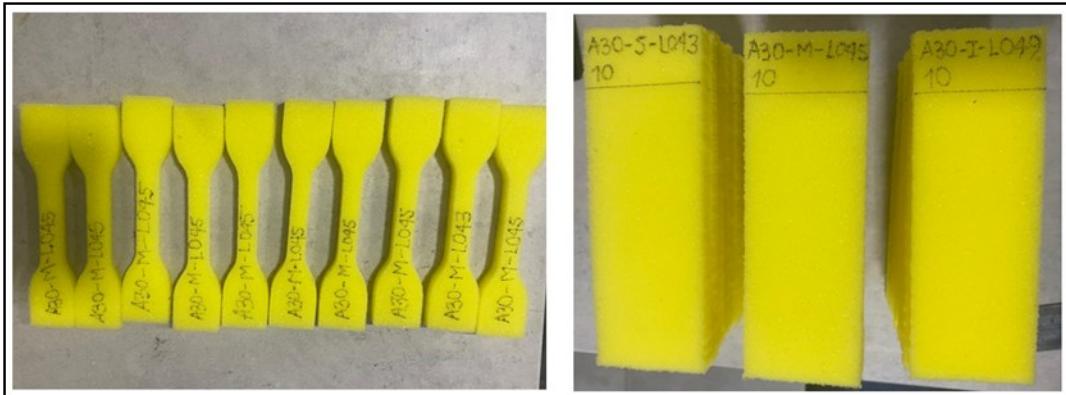
Fuente: Elaboración propia

Anexo K. Proceso de verificación de medidas de las probetas



Fuente: Elaboración propia

Anexo L. Identificación de probetas mediante códigos



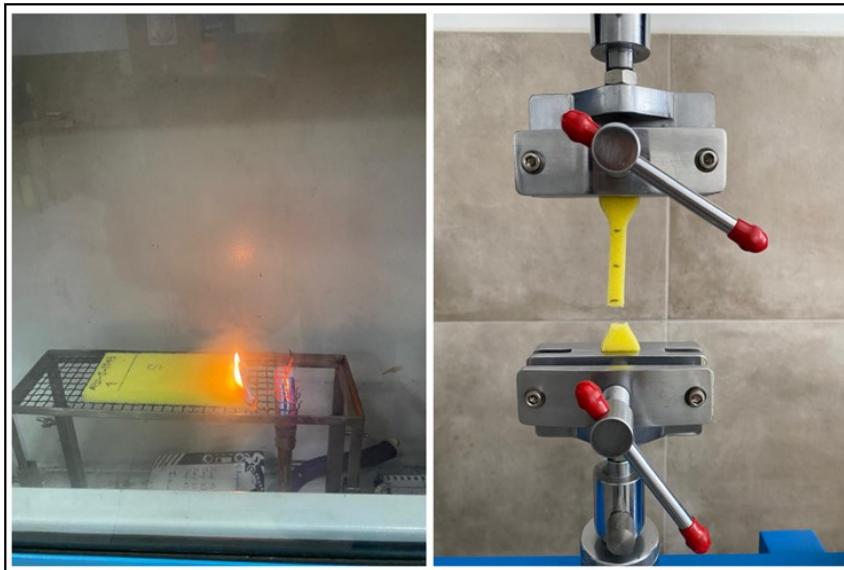
Fuente: Elaboración propia

Anexo M. Acondicionamiento de probetas y ejecución de ensayos

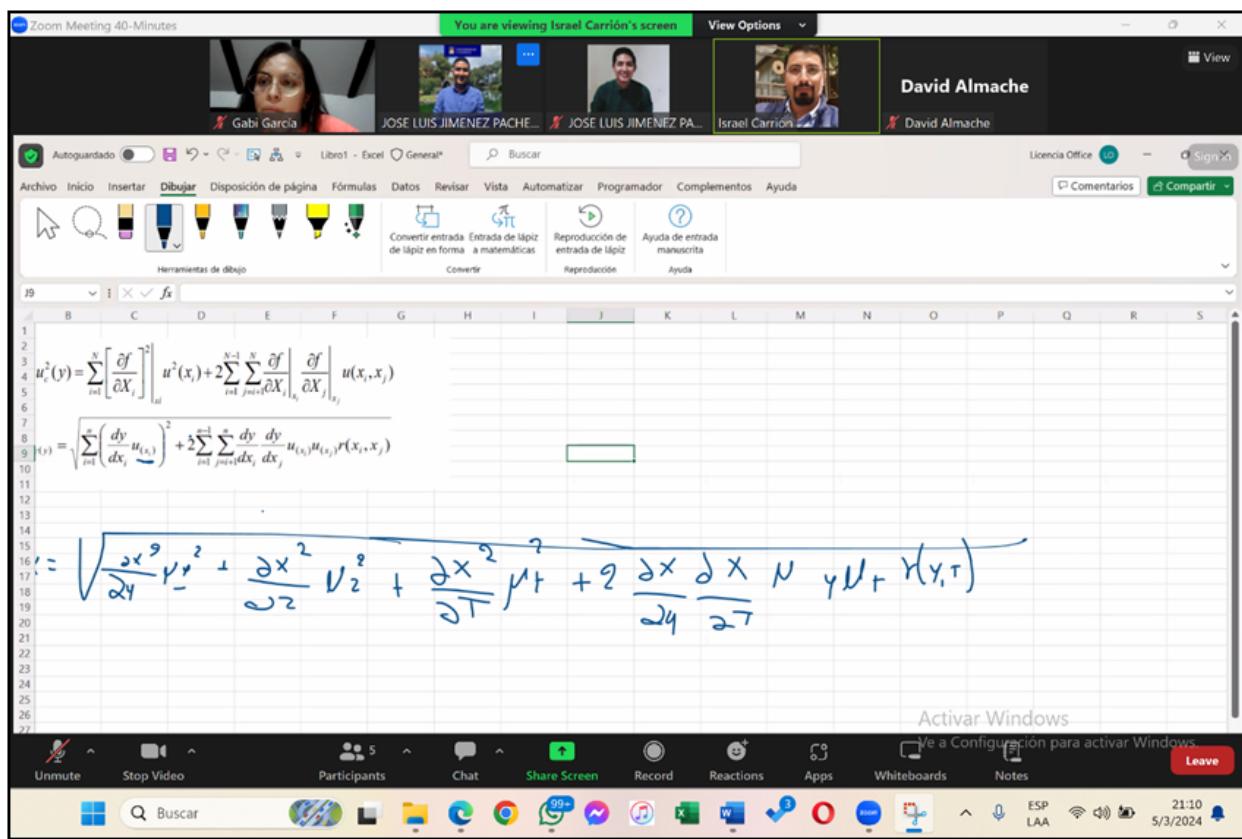


Fuente: Elaboración propia

Anexo N. Ensayos de comportamiento al fuego y tracción-elongación



Fuente: Elaboración propia

Anexo O. Reunión con el técnico para la verificación de metodología implementada

Fuente: Elaboración propia