

# Determinación de la incertidumbre de los resultados obtenidos en ensayos mecánicos de tracción y ensayos por espectrometría de emisión óptica aplicados al acero

**Aldo Bernardo Barbera Chacón**  
*Ingeniero Metalúrgico*  
*Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales*  
*Universidad Técnica de Oruro*  
aldo.barbera@uto.edu.bo

**Luis Demetrio Siles Terán**  
*Ingeniero Metalúrgico*  
*Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales*  
*Universidad Técnica de Oruro*  
Ldsiles

## Resumen

En este trabajo se realiza la determinación de la incertidumbre de los resultados arrojados por los equipos del Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, concretamente de la maquina universal de ensayos Galdabini Quasar 600 para ensayos de tracción y el espectrómetro de emisión óptica GNR Solaris CDD Plus para ensayos de composición química. Las incertidumbres combinada (total) y expandida (intervalo), fueron determinadas analizando todas las posibles fuentes de incertidumbre detectables que intervienen en el proceso de medida de cada equipo.

**Palabras clave:** Incertidumbre, Tracción, Espectrometría, Error, Calibración.

## Determination of the uncertainty of the results of mechanical traction tests and optical emission spectrometry tests applied to steel

### Abstract

This paper shows the uncertainty over the results given by the equipment in the Testing Laboratory of the Metallurgical and Science of Materials Engineering Department, specifically the universal testing machine Galdabini Quasar 600 for traction testing and optical emission spectrometer GNR Solaris CDD Plus used to test the chemical composition. The (total) combined uncertainties and expanded (interval) were determined by analyzing all the possible sources of uncertainty detectable that intervene in the measuring process in each equipment.

**Keywords:** Uncertainty, traction, spectrometry, error, calibration.

## Determinação da incerteza dos resultados de ensaios de tração mecânicos e ensaios por espectrometria de emissão óptica aplicados ao aço

### Resumo

Neste trabalho a determinação da incerteza dos resultados obtidos pelas equipes Materials Testing Laboratory da Escola de Engenharia e Ciência dos Materiais Metalurgia, especificamente a máquina universal de ensaios GALDABINI Quasar

600 para ensaios de tração foram realizados eo GNR espectrômetro de emissão óptica Solaris CDD Plus para testar a composição química. O combinado (total) e incerteza expandida (intervalo) foram determinadas através da análise de todas as possíveis fontes de incerteza detectável envolvidos no processo de medição para cada equipe.

**Palavras chave:** Incerteza, tração, espectrometria, erro, calibração.

## Introducción

En la realización de ensayos, ya sea en laboratorios, en la industria o en el campo académico, se obtienen resultados producto de la medición. El resultado obtenido de la medición de acuerdo a un método establecido es el valor más cercano al valor verdadero de la magnitud, mas no podrá decirse con certeza que son iguales. El valor verdadero de la magnitud es desconocido y así lo será siempre. Por más que se trate de obtener la mayor precisión posible, un apego estricto al método y a la correcta operación y estado del equipo siempre existirán factores que impidan lograr una medición verdadera.

Cuando se realiza una medición se requiere de la utilización de uno o varios instrumentos, con los cuales se debe tener mucho cuidado en la interpretación de resultados arrojados ya que se introducen errores aleatorios y sistemáticos, los cuales no pueden ser eliminados completamente pero si controlados, es por esto, que la metrología introduce el termino de incertidumbre como una cuantificación del grado de seguridad del resultado obtenido, que se expresa como un intervalo donde se encuentre contenido el valor real de la medida con una probabilidad o nivel de confianza determinados.

En el laboratorio de materiales de la Carrera de Metalurgia y Ciencia de Materiales de la Facultad Nacional de Ingeniería se realizan ensayos de tracción y ensayo de composición por Espectrometría de Emisión Óptica con las maquinas Galdabini Quasar 600 y GNR Solaris CCD Plus respectivamente, las cuales proporcionan magnitudes asociadas con el esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, deformación plástica final y composición en el caso del equipo de ensayo por espectrometría. Para tener confianza de los resultados proporcionados por estos equipos, el laboratorio debe poseer una acreditación otorgada por un organismo que avale el cumplimiento de los requisitos exigidos para el mismo. Uno estos requisitos es otorgar un grado de incertidumbre asociada al resultado de estos ensayos.

En esta investigación se identificarán las fuentes de incertidumbre asociadas a las medidas dadas por los equipos de ensayos de tracción, Galdabini Quasar 600 y ensayo por espectrometría de emisión óptica GNR Solaris CCD Plus, y se encontrará el valor de incertidumbre para las mediciones realizadas en el ensayo siguiendo los métodos de ensayo ASTM-A370 para ensayos de tracción, y ASTM-E415 para análisis químico por espectrometría de emisión óptica. Además el valor de incertidumbre se estimara bajo la norma Boliviana NB 131001:2007 para ensayos de tracción.

## Antecedentes

El Laboratorio de Ensayo de Materiales realiza ensayos de tracción y de composición química. El ensayo de tracción esta

complementado con la medición de diámetro mediante un calibrador Vernier, y la medición de longitud realizada con una regla graduada. El ensayo por espectrometría de emisión óptica no requiere de equipos de medición adicionales, pero si requiere equipos para la preparación de muestras.

## Incetidumbre

Es el parámetro que caracteriza el intervalo dentro del cual se cree se encuentra el valor verdadero de la magnitud medida. Pues aun cuando todos los errores posibles de ser estimados se hayan corregido, existen factores tales como la inevitable presencia de errores aleatorios, la posible existencia de errores sistémicos desconocidos o no constantes en el tiempo y la propia inseguridad de los valores de corrección, provocaran que el resultado corregido siga siendo inseguro. Dicho resultado puede ser muy cercano al valor verdadero de la magnitud medida pero jamás se podrá decir que son iguales [1].

## Necesidad de conocer la incertidumbre

En la actualidad, los laboratorios que realizan diferentes tipos de ensayos deben demostrar que sus métodos analíticos proporcionan resultados fiables y adecuados para la finalidad o propósito perseguidos, ya que muchas de las decisiones que se toman están basadas en la información que estos resultados proporcionan. La fiabilidad de los resultados se demuestra verificando la trazabilidad del método analítico y comprobándola periódicamente mediante la utilización de, por ejemplo, gráficos de control. Sin embargo, además de verificar la trazabilidad, es necesario suministrar un parámetro que proporcione una idea del grado de confianza de los resultados, es decir, que refleje lo que puede alejarse el resultado analítico del valor considerado verdadero. Por tanto, los analistas y los laboratorios deben proporcionar resultados trazables y con una incertidumbre apropiada [2].

Cabe destacar que el tener o pretender poseer un valor de incertidumbre pequeño en los resultados obtenidos no significa que los resultados sean buenos, existen infinidad de factores que influyen en la calidad de los resultados.

## Estimación de la incertidumbre

### Calculo Tipo A de la incertidumbre

Cuando se ha realizado n observaciones independientes de una de las magnitudes de entrada, bajo las mismas condiciones de medida, es posible usar el cálculo tipo A de la incertidumbre. Cuando una medición es repetida bajo las mismas condiciones, se observa una dispersión. La incertidumbre de una magnitud de entrada se estima a partir de la dispersión de los resultados individuales [3], entonces, el mejor estimador será la media ( $\bar{X}$ )

de los resultados de las mediciones individuales obtenidas, la dispersión antes mencionada estará alrededor de un valor medio. Para estimar la dispersión adecuadamente es posible utilizar la desviación estándar [4].

### Calculo Tipo B de la incertidumbre

Es posible usar el cálculo tipo B de la incertidumbre cuando no se tienen observaciones repetidas y cuando su valor se establece o se calcula en base a toda la información disponible. Cuando se tiene una estimación  $x_i$  de una cantidad  $X_i$  que no se ha obtenido de observaciones repetidas, la varianza estimada  $u^2(x_i)$  o la incertidumbre estándar  $u(x_i)$  se evalúan por un método científico basado en toda la información disponible acerca de la variabilidad de  $X_i$ , es decir, se recurre a datos de los certificados de calibración, resultados de mediciones anteriores, especificaciones y cualidades del equipo, incertidumbres tomadas de manuales, etc. para determinar la incertidumbre [5].

$$U^2(Y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial Y}{\partial X_i} \right)^2 U^2(X_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial Y}{\partial X_i} \frac{\partial Y}{\partial X_j} U(X_i) U(X_j) r(X_i, X_j)$$

Donde:

$U(Y)$ : Incertidumbre combinada estimada para la magnitud de salida.

$U(X_i)$ : Incertidumbre típica estimada para cada magnitud de entrada.

$\partial Y / \partial X$ : Derivadas parciales que representan el coeficiente de sensibilidad de la magnitud de salida con respecto a cada magnitud de entrada.

$U(X_i)U(X_j)(X_i, X_j)$ : Covarianza asociada a las magnitudes de entrada.

$r$ : Coeficiente de correlación entre cada par de magnitudes de entrada.

En la realidad, las magnitudes de entrada casi nunca están correlacionadas, y el coeficiente  $r$  es de valor cero. Entonces la fórmula para obtener la incertidumbre combinada sería:

$$U^2(Y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial Y}{\partial X_i} \right)^2 U^2(X_i)$$

### Incertidumbre expandida

Para casos donde es necesario tener un mayor grado de confianza se usa la incertidumbre expandida, para tal efecto se utilizara un coeficiente  $K$  en función del nivel de confianza que se desee obtener y también en función de los datos. La incertidumbre expandida es un intervalo en el cual se encuentra el valor verdadero de la medición.

$$U = K U(Y)$$

### Incertidumbre combinada

La incertidumbre combinada es la incertidumbre final que aporta el proceso de medición. Para su determinación se debe determinar de qué forma afecta cada variable de entrada en el resultado final obtenido. Para esta determinación se recurre a la ley de propagación de varianzas, que analiza el efecto de variables de incertidumbre (o errores) en la incertidumbre de una función matemática basada en ellos. Cuando las variables son los valores de mediciones experimentales, tienen incertidumbre debido a la medición de limitaciones (por ejemplo, instrumento de precisión), que se propagan a la combinación de variables en la función [6].

Las incertidumbres típicas están representadas por el cuadrado de sus desviaciones típicas (varianzas), las cuales están dadas por:

### Fuentes de incertidumbre

Las fuentes de incertidumbre a considerarse pueden ser muchas, algunas fuentes son difíciles o casi imposibles de cuantificar. Hasta los detalles más pequeños relacionados con el proceso de medición pueden aportar incertidumbre. Las fuentes de incertidumbre que se tomaron en cuenta para esta investigación son:

- Incertidumbre de calibración.
- Incertidumbre de repetitividad.
- Incertidumbre debida a la deriva.
- Incertidumbre debida a resolución del equipo.
- Incertidumbre debida a la variación de temperatura.

### Trabajo experimental

#### Materiales

Los materiales usados para la realización de esta investigación fueron: alambroón de acero SAE1010 de 5.5 mm de diámetro proveniente de la empresa de China HEBEI IRON & STEEL CO. LTD. TANGSHAN, usado como materia prima por la empresa CORINSA.

Los ensayos de espectrometría de emisión óptica se aplicaron a platinas de acero A36 proveniente de la empresa ACEROS AREQUIPA del Perú, de un tamaño de 2"x1".

#### Procedimiento

Los ensayos de tracción se realizaron a 12 probetas de alambroón de acero SAE1010 y los ensayos de espectrometría de emisión óptica a 10 probetas de platina de acero A36, preparadas según las normas ASTM-A370 para ensayos de tracción y ASTM-E415 para análisis químico por espectrometría

de emisión óptica. Los resultados obtenidos que se tomaron para el cálculo de la incertidumbre fueron: esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y deformación plástica para ensayos de tracción y valores de carbono, hierro, manganeso, fósforo, azufre y silicio expresados en porcentaje para el ensayo por espectrometría de emisión óptica. Para el cálculo de la incertidumbre del ensayo de tracción se tomó como referencia los certificados de calibración de la máquina de ensayos universal Galdabini Quasar 600 y del calibrador Vernier Mitutoyo ABS Digimatic Serie 500, la medición de longitudes se realizó con una regla graduada la cual no tiene certificado de calibración (lo cual es una gran fuente de incertidumbre). Además se tomaron las incertidumbres de repetitividad, resolución, debida a la deriva y debida al proceso de medida del

proceso global. Para la determinación de la incertidumbre del ensayo de espectrometría de emisión óptica no se pudo determinar las fuentes de incertidumbre correctamente, ya que el equipo no cuenta con un certificado de calibración. Para este ensayo solo se determinó las fuentes de incertidumbre de repetitividad y debida al proceso de medida.

## Resultados de los ensayos

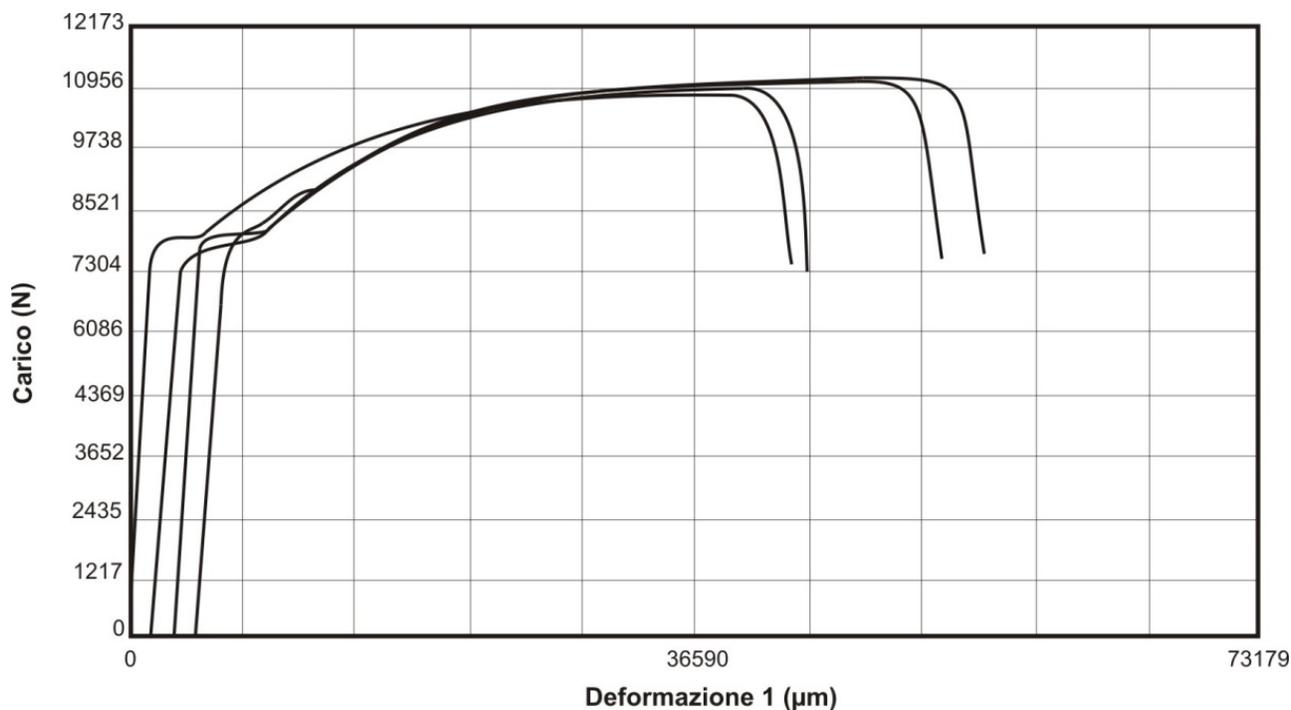
### Resultados de los ensayos de tracción

Los resultados de los ensayos de tracción para la primera serie de probetas son los siguientes:

**Tabla 1.** Resultados de la primera serie de pruebas de ensayo de tracción.

|                            | 1010 P1 C1 | 1010 P1 C2 | 1010 P1 C3 | 1010 P1 C4 |
|----------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Esfuerzo de fluencia (MPa) | 363.21     | 318.68     | 335.3      | 325.27     |
| Esfuerzo máximo (MPa)      | 497.87     | 438.93     | 473.43     | 452.52     |
| Alargamiento (%)           | 11.21      | 14.12      | 12.09      | 15.1       |

Las gráficas tensión deformación para la primera serie de probetas son las siguientes:



**Figura 1.** Curvas tensión-deformación para la primera serie de pruebas.

Resultados de los ensayos por espectrometría de emisión óptica:

Tabla 2. Resultados de composición química por espectrometría de emisión óptica.

| %  | A36-P1 | A36-P2 | A36-P3 | A36-P4 | A36-P5 | A36-P6 | A36-P7 | A36-P8 | A36-P9 | A36-P10 |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| C  | 0.095  | 0.095  | 0.089  | 0.123  | 0.081  | 0.09   | 0.078  | 0.089  | 0.121  | 0.129   |
| Si | 0.146  | 0.147  | 0.15   | 0.147  | 0.147  | 0.146  | 0.147  | 0.147  | 0.158  | 0.156   |
| Mn | 0.626  | 0.62   | 0.629  | 0.618  | 0.617  | 0.615  | 0.612  | 0.611  | 0.653  | 0.637   |
| P  | 0.013  | 0.014  | 0.013  | 0.014  | 0.013  | 0.017  | 0.013  | 0.015  | 0.016  | 0.012   |
| S  | 0.048  | 0.056  | 0.055  | 0.041  | 0.051  | 0.041  | 0.055  | 0.049  | 0.053  | 0.056   |
| Fe | 98.44  | 98.47  | 98.43  | 98.49  | 98.49  | 98.53  | 98.45  | 98.49  | 98.45  | 98.42   |

## Valores de incertidumbre

Los resultados de los valores de incertidumbre se detallan a continuación.

Fuentes de incertidumbre para la medición de carga:

Tabla 3. Fuentes y valores de incertidumbre para la medición de carga.

|                                           | Esfuerzo máximo | Esfuerzo de fluencia | Deformación plástica |
|-------------------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
|                                           | Mpa             | Mpa                  | %                    |
| Incertidumbre de repetitividad (tipo A)   | 8.50E-02        | 1.47E-01             | 7.41E-01             |
| Incertidumbre de calibración              | 5.00E-05        | 5.00E-05             | ***                  |
| Incertidumbre debida a la resolución      | 1.44E-06        | 1.44E-06             | 2.89E-01             |
| Incertidumbre debida a la deriva          | 5.77E-05        | 5.77E-05             | ***                  |
| Incertidumbre debida al proceso de medida | 3.33E-01        | 9.39E-01             | ***                  |

Fuentes y valores de incertidumbre para medición de área:

Tabla 4. Fuentes y valores de incertidumbre para medición de área.

|                                                       | mm       |
|-------------------------------------------------------|----------|
| Incertidumbre obtenida del certificado de calibración | 3.36E-02 |
| Incertidumbre debido a la repetitividad del Vernier   | 2.89E-03 |
| Incertidumbre debido a la resolución del Vernier      | 3.38E-02 |

Incertidumbre combinada para ensayo de tracción:

Tabla 5. Valores de incertidumbre combinada para ensayo de tracción.

| Medición             | Incertidumbre combinada (Mpa) |
|----------------------|-------------------------------|
| Esfuerzo máximo      | 0.0152                        |
| Esfuerzo de fluencia | 0.0401                        |
| Deformación plástica | 0.0171                        |

Incertidumbre expandida para ensayo de tracción:

**Tabla 6.** Valores de incertidumbre expandida para ensayo de tracción.

| Medición                       | Incertidumbre expandida (Mpa) |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Esfuerzo máximo ( $\pm$ )      | 0.0304                        |
| Esfuerzo de fluencia ( $\pm$ ) | 0.0801                        |
| Deformación plástica ( $\pm$ ) | 0.0343                        |

Fuentes y valores de incertidumbre para la medición de concentración:

**Tabla 7.** Fuentes y valores de incertidumbre para la medición de concentración.

|                                           | % C    | % Fe   | % Mn   | % P    | % S    | % Si   |
|-------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Incertidumbre de repetitividad (tipo A)   | 0,0058 | 0,0112 | 0,0058 | 0,0005 | 0,0018 | 0,0014 |
| Incertidumbre de calibración              | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| Incertidumbre debida a la resolución      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| Incertidumbre debida a la deriva          | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| Incertidumbre debida al proceso de medida | 0,0294 | 0,0652 | 0,0294 | 0,0029 | 0,0087 | 0,0052 |

Incertidumbre combinada para ensayo por espectrometría de emisión óptica:

**Tabla 8.** Valores de incertidumbre combinada para ensayos de espectrometría de emisión óptica.

| Medición | Incertidumbre combinada |
|----------|-------------------------|
| % C      | 3,1782                  |
| % Fe     | 0,1008                  |
| % Mn     | 3,1782                  |
| % P      | 8,4515                  |
| % S      | 4,4499                  |
| % Si     | 2,5898                  |

Incertidumbre expandida para ensayo por espectrometría de emisión óptica:

**Tabla 9.** Valores de incertidumbre expandida para ensayos de espectrometría de emisión óptica.

| Medición       | Incertidumbre expandida |
|----------------|-------------------------|
| % C ( $\pm$ )  | 6,3564                  |
| % Fe ( $\pm$ ) | 0,2016                  |
| % Mn ( $\pm$ ) | 6,3564                  |
| % P ( $\pm$ )  | 16,903                  |
| % S ( $\pm$ )  | 8,8999                  |
| % Si ( $\pm$ ) | 5,1795                  |

## Discusión de resultados

La medición del área de las probetas de alambón para ensayos de tracción reportan un margen bastante estrecho, esto más que todo debido a la formación de cascarilla en la superficie de la probeta. Esta cascarilla es producto de la exposición de la materia prima con la cual se fabrica el alambón a altas temperaturas ya sea por tratamiento térmico o por el mismo proceso de manufactura, además de la exposición a la intemperie del alambón durante el periodo de entrega a la empresa. Otro factor que conlleva a la variación y por tanto un aporte de incertidumbre para el caso concreto del alambón es

la irregularidad de este, que indefectiblemente afecta a las probetas, ya que el alambroón tiene una presentación en bobinas, teniendo de esta manera probetas onduladas.

Es normal encontrar una variación grande en los resultados de tracción, más aun en este tipo de materiales, lo que no significa una imprecisión del equipo, sino más bien una verificación del orden aleatorio y caprichoso de los granos que conforman la estructura cristalina del material, además de las imperfecciones que puedan existir, ya sea por el proceso productivo de manufactura, que puede involucrar un deficiente proceso de colado del material, un defectuoso o inexistente desgasado del acero fundido, inconsistencias en la composición del material o la presencia de impurezas que alteren la estructura cristalina.

Todos estos factores antes mencionados influyen en la graficación de la medida, ya que existe la posibilidad de obtener curvas atípicas tensión-deformación las cuales dificultan la interpretación de estas. Tal es el caso de la ausencia de mesetas de fluencia en algunas, las cuales requieren un cálculo gráfico adicional para determinar el esfuerzo de fluencia según el método ya mencionado.

La presencia de un grado de variación notable en la medición de longitudes para el cálculo de elongación implica una fuente considerable de incertidumbre, ya que el equipo usado no cuenta con las características necesarias para realizar los ensayos y complementarse de esta manera con los demás equipos empleados.

Las fuentes de incertidumbre especificadas para el caso de la maquina universal son bastante pequeñas, esto debido a la calidad del equipo, a su resolución y principalmente al proceso de calibración al cual ha sido sometido, siendo esta certificada por un organismo de renombre como es la A2LA.

Los buenos resultados de la máquina de ensayos no se ven del todo relacionadas con las mediciones complementarias. En el caso de la medición de diámetros, al tener un equipo también certificado, de buena resolución y de buena calidad hace un complemento perfecto a la hora de realizar el ensayo. Todo esto se ve opacado por la presencia de una medición adicional que aporta bastante incertidumbre al proceso global de ensayo: la medición de longitud mediante la regla graduada, disminuyendo así la confiabilidad de los resultados.

El valor de incertidumbre combinada (final) pese a tener una gran fuente de incertidumbre tiene valores pequeños, para los tres casos de medición de carga. Las posibles causas de que este valor se mantenga bajo son las características de los equipos y su calibración. La operación conjunta de la máquina de ensayos universal y el calibrador Vernier es perfecta para obtener resultados de gran confiabilidad.

La incertidumbre expandida, así como se tiene un valor pequeño de incertidumbre combinada, por defecto se tendrá un valor de incertidumbre expandida también pequeño, teniendo así lo siguiente:

En el caso del espectrómetro de emisión óptica los resultados no son satisfactorios. El no poder identificar todas las fuentes de incertidumbre le resta confiabilidad al equipo. Una fuente de incertidumbre clave es la calibración. Los estándares al no estar certificados no son un parámetro para validar una fuente de incertidumbre, en este caso la de calibración, por ende el equipo no está calibrado y al no estar calibrado menos se tendrá un certificado de calibración.

La inaccesibilidad del equipo hace que este sea un misterio en cuanto a información adicional de los ensayos se refiere. Solo se tiene acceso a las composiciones finales y a algunas funciones estadísticas y no así a otro tipo de información como ser las longitudes de onda que están estrechamente ligadas a la composición y que permitiría calcular los valores de incertidumbre aportados por la resolución del equipo.

La falta de un proceso y certificado de calibración hacen que la incertidumbre debida a la deriva sea imposible de evaluar ya que esta incertidumbre se evalúa a partir del historial de las calibraciones sucesivas a las cuales fue sometido el equipo, es decir, que mínimamente se necesitara una calibración previa para poder evaluar esta fuente de incertidumbre.

Otra fuente de incertidumbre y que es fundamental para la operación del equipo es la incertidumbre debida a la variación de temperatura, no aplicable para el ensayo de tracción pero muy importante para el ensayo por espectrometría de emisión óptica ya que el equipo es muy sensible a cambios de temperatura. Durante los ensayos se observó una variación de temperatura de 6 °C aproximadamente. El fabricante indica que si es un factor fundamental para la operación del equipo, pero hasta el momento no se tiene respuesta alguna de este ante las repetidas consultas sobre el coeficiente de sensibilidad por grado de temperatura del equipo, además del valor de incertidumbre usado para calibrar el equipo en la fábrica.

Las únicas fuentes que fueron posibles de evaluar son la incertidumbre de repetitividad y debida al proceso de medida, ya que son evaluaciones estadísticas simples que solo requieren la información arrojada por el equipo para ser determinadas.

La evaluación de la incertidumbre se realizó en cada una de las concentraciones que indica la norma para el acero A36, siendo Carbono, Silicio, Manganeso, Fosforo, Azufre y Hierro las especies analizadas.

Como se puede apreciar en los resultados se tiene valores grandes de incertidumbre. La figura no varía para la incertidumbre expandida teniendo los siguientes rangos en los que se encontraría la concentración de las especies presentes en una muestra.

## Referencias

1. SÁNCHEZ G. Enrique, *Incertidumbre de los resultados medidos en el ensayo de tracción, obtenidos en las maquinas del laboratorio de materiales de Ing. Mecánica PUCP*, Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2010.

2. MAROTO, Alicia; BOQUE Ricard; RIU, Jordi; RIUS, F. Xavier. *Incertidumbre y precisión*. Departamento de Química Analítica y Química Orgánica. Instituto de Estudios Avanzados. Universitat Rovira i Virgili. Tarragona. España. p. 2-3.
3. RUBIO, Higinio. *La incertidumbre en las medidas*. Universidad Carlos III. Madrid. España: p. 25-52.
4. SPIEGEL. Murray; *Estadística*. Tercera Edición. Madrid: Editorial McGraw-Hill, 1991, p. 91-96.
5. CHUNGARA, Victor. *Estadística y probabilidades*. Editorial Leonardo. p. 91-113.
6. GOODMAN Leo. *On the Exact Variance of Products*. Journal of the American Statistical Association. p. 708–713. doi:10.2307/2281592
7. MIROLIUBOV. ENGALICHEV. SERGUIEVSKI. ALMAMETOV. KURITSIN. SMIRNOV-VASILIEV. YASHINA. *Resistencia de Materiales*. 4ta Edición. Moscú: Editorial MIR, 1981.
8. NASH. William. *Resistencia de Materiales*. 1ra Edición. México: Editorial McGraw-Hill, 1992.
9. TIMOSHENKO. S. *Resistencia de Materiales*. 3ra Edición. Madrid: Editorial Espasa Calpe, 1976.
10. HIBBELER. H.C., *Mecánica de Materiales*. 3ra Edición. México: Editorial Prentice-Hal, 1997.
11. ORTIZ B. Luis. *Resistencia de Materiales*. 1ra Edición. Madrid: Editorial McGraw-Hill, 1990.
12. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. Pennsylvania: ASTM International. 2004.
13. IBNORCA. *Catálogo de normas Bolivianas*. La Paz: Dirección nacional de normalización. 2013.
14. SPIEGEL. Murray R. *Estadística*. 3ra Edición. Madrid: Editorial McGraw Hill, 1997.
15. MOYA C. Rufino. *Estadística descriptiva*. 1ra Edición. Lima: Editorial San Marcos.
16. CHUNGARA C. Víctor. *Estadística y probabilidades*. 1ra Edición. La Paz: Editorial Leonardo, 2008.
17. PALACIOS C. Severo. *Diseño y Análisis de Experimentos Industriales*. 1ra Edición. Oruro: Latinas Editores, 1997.
18. NB-ISO-IEC 17025:2005. *Requisitos Generales para la Competencia Técnica de Laboratorios de Calibración y Ensayo*.
19. IBMETRO. DTA-CRI-009. *Acreditación de laboratorios de ensayo y calibración de acuerdo a la Norma NB-ISO-IEC 17025:2005*.
20. IBMETRO. DTA-CRI-011. *Estimación de la incertidumbre de las mediciones en laboratorios de ensayos*.
21. IBMETRO. DTA-CRI-016. *Verificación y validación de métodos*.