

Tabla D.3 – Tolerancias en relación con las dimensiones transversales de probetas

Medidas y tolerancias en milímetros

Denominación	Dimensión transversal nominal	Tolerancia de mecanizado en la dimensión nominal ^a	Tolerancia en la forma ^b
Diámetro de probetas mecanizadas de sección transversal circular y dimensiones transversales de probetas de sección transversal rectangular mecanizadas en sus cuatro caras	≥ 3 ≤ 6	± 0,02	0,03
	> 6 ≤ 10	± 0,03	0,04
	> 10 ≤ 18	± 0,05	0,04
	> 18 ≤ 30	± 0,10	0,05
Dimensiones transversales de probetas de sección transversal rectangular mecanizadas únicamente en dos caras opuestas	≥ 3 ≤ 6	± 0,02	0,03
	> 6 ≤ 10	± 0,03	0,04
	> 10 ≤ 18	± 0,05	0,06
	> 18 ≤ 30	± 0,10	0,12
	> 30 ≤ 50	± 0,15	0,15
<p>a Estas tolerancias son aplicables si se va a incluir el valor nominal del área de la sección transversal inicial, S_0, sin necesidad de medir cada probeta en el cálculo de los resultados. Si no se cumplen estas tolerancias de mecanizado, es esencial medir cada probeta de forma individual.</p> <p>b Máxima desviación entre las medidas de una dimensión transversal especificada a lo largo de toda la longitud calibrada, L_c, de la probeta.</p>			

D.4 Determinación del área de la sección transversal inicial

Pueden usarse las dimensiones nominales para calcular S_0 en probetas de sección transversal circular y rectangular, mecanizadas en sus cuatro caras, que cumplan con las tolerancias recogidas en la tabla D.3. Para otras formas de las probetas, el área de la sección transversal inicial debe calcularse a partir de los valores medidos en las dimensiones apropiadas, con un error que no exceda $\pm 0,5\%$ en cada dimensión.

Anexo E (Normativo)

Tipos de probetas que se deben utilizar para tubos

E.1 Forma de la probeta

La probeta consiste en un trozo de tubo completo o bien en una banda, longitudinal o transversal, cortada del tubo y que conserva el espesor total de la pared del mismo (véanse las figuras 14 y 15). También puede consistir en una probeta de sección circular mecanizada de la pared del tubo.

Las probetas transversales, longitudinales y de sección circular mecanizadas, se describen en el anexo B para espesores de pared de tubo inferiores a 3 mm, y en el anexo D para espesores de pared de tubo mayores o iguales a 3 mm. Como regla general, la banda longitudinal se utiliza para tubos de espesor de pared superior a 0,5 mm.

E.2 Medidas de la probeta

E.2.1 Tubo completo

El tubo puede ser obturado por medio de un tapón en cada extremo. La longitud libre entre el tapón y la marca de la longitud calibrada más próxima debe ser superior a $D_o/4$. En caso de litigio, y en tanto que haya material en cantidad suficiente, se debe utilizar el valor D_o .

La longitud desde el plano del tapón que sobresale de las mordazas de la máquina en dirección a las marcas de la longitud calibrada no debe exceder el diámetro D_o , y su forma debe ser tal que no afecte al alargamiento en la longitud entre marcas.

E.2.2 Bandas longitudinales o transversales

La longitud calibrada, L_c , de las bandas longitudinales no debe enderezarse, pero las cabezas de amarre sí se pueden enderezar para facilitar su sujeción en la máquina de ensayo.

Las normas de producto pueden especificar medidas de probetas transversales o longitudinales diferentes de las previstas en los anexos B y D.

Se deben tomar precauciones especiales para el enderezado de probetas transversales.

E.2.3 Probeta de sección circular mecanizada a partir de la pared del tubo

La toma de probetas está especificada en la norma de producto.

E.3 Determinación del área de la sección transversal inicial

S_o se debe determinar con una aproximación de $\pm 1\%$ o mejor.

El área de la sección transversal inicial S_o , de un tubo completo o la de una banda longitudinal o transversal, se puede determinar a partir de la masa de la probeta, de la cual se ha determinado su longitud y, de la masa específica del material utilizando la fórmula (E.1):

$$S_o = \frac{1\ 000\ m}{\rho\ L_t} \quad (\text{E.1})$$

donde

m es la masa, en gramos, de la probeta;

L_t es la longitud total, en milímetros, de la probeta;

ρ es la masa específica, en gramos por centímetro cúbico, del material de la probeta.

El área de la sección transversal inicial, S_o , de una probeta que consista en una muestra longitudinal se debe calcular conforme a la fórmula (E.2):

$$S_o = \frac{b_o}{4} (D_o^2 - b_o^2)^{1/2} + \frac{D_o^2}{4} \arcsen\left(\frac{b_o}{D_o}\right) - \frac{b_o}{4} \left[(D_o - 2a_o)^2 - b_o^2 \right]^{1/2} - \left(\frac{D_o - 2a_o}{2} \right)^2 \arcsen\left(\frac{b_o}{D_o - 2a_o}\right) \quad (\text{E.2})$$

donde

a_o es el espesor de la pared del tubo;

b_o es la anchura media de la banda;

D_o es el diámetro exterior del tubo.

Para probetas longitudinales, puede utilizarse la fórmula simplificada (E.3) donde la relación entre la anchura y el diámetro exterior del tubo debe estar dentro de los siguientes límites:

$$\left. \begin{aligned} S_o &= a_o b_o \left[1 + \frac{b_o^2}{6D_o (D_o - 2a_o)} \right] && \text{cuando } \frac{b_o}{D_o} < 0,25 \\ S_o &= a_o b_o && \text{cuando } \frac{b_o}{D_o} < 0,10 \end{aligned} \right\} \quad (\text{E.3})$$

En el caso de tubo completo, el área de la sección transversal inicial, S_o , se calcula a partir de la fórmula (E.4):

$$S_o = \pi a_o (D_o - a_o) \quad (\text{E.4})$$

Anexo F (Informativo)

Estimación de la velocidad de separación de las mordazas teniendo en cuenta la rigidez del equipo de ensayo

La fórmula (2) no tiene en cuenta ninguna deformación elástica del equipo de ensayo (bastidor, célula de carga, amarres, etc.) durante la aplicación de la fuerza a la probeta. Es posible estimar una compensación de la desviación del equipo de ensayo, utilizando la rigidez de la probeta en el punto de interés (por ejemplo, $R_{p0,2}$). Si el punto de interés está fuera del rango elástico (por ejemplo, $R_{p0,2}$), el uso de la rigidez de la probeta durante la porción elástica de la curva fuerza/deformación, resultará con una corrección sobredimensionada. La rigidez del equipo de ensayo debe ser además conocida para la configuración de los amarres y para la separación empleada de éstos. Para algunas configuraciones, la rigidez efectiva del equipo de ensayo puede incrementarse sustancialmente de forma que los amarres se introduzcan en la probeta durante el ensayo. Es obligatorio que la rigidez del equipo de ensayo sea evaluada en el punto de interés.

Si se desea, se puede utilizar el siguiente procedimiento para calcular la velocidad de separación de las mordazas que se compensa para la desviación del equipo durante el ensayo, utilizando la rigidez del equipo de ensayo en el punto de interés y la pendiente de la curva fuerza/deformación en el punto de interés. Se recomienda comprobar la velocidad de deformación resultante en el punto de interés mientras se realiza un ensayo que asegure que el cálculo se ha realizado correctamente.

La fórmula (F.1) indica la velocidad de deformación estimada, en segundos, durante un ensayo en el punto de interés (véase la referencia bibliográfica [39]):

$$\dot{\epsilon}_m = \frac{v_c}{\frac{m \cdot S_0}{C_M} + L_c} \quad (\text{F.1})$$

donde

C_M es la rigidez, en newtons por milímetro, del equipo de ensayo (en los alrededores del punto de interés, tal como $R_{p0,2}$, la rigidez no es lineal, por ejemplo cuando se utilizan mordazas de esquina;

L_c es la longitud de la parte calibrada, en milímetros, de la probeta;

m es la pendiente, en megapascales, de la curva carga unitaria-extensión porcentual en un momento dado del ensayo (por ejemplo, en los alrededores de un punto de interés como $R_{p0,2}$);

S_0 es el área de la sección transversal inicial, en milímetros cuadrados;

v_c es la velocidad de separación de las mordazas, en milímetros por segundo.

NOTA Los valores de m y de C_M que se obtienen a partir de la parte lineal de la curva carga unitaria/deformación no pueden utilizarse.

La fórmula (2) no compensa los efectos de rigidez (véase 10.3.2.1). Cuando se controle el ensayo mediante el desplazamiento de las mordazas, se puede lograr mejor aproximación de la velocidad de deformación requerida mediante la velocidad de separación de las mordazas, v_c , en milímetros por segundo. Esto resulta imprescindible para producir una velocidad de formación resultante en la probeta, a partir de la fórmula (F.2) (véase la referencia bibliográfica [40]):

$$v_c = \dot{\epsilon}_m \left(\frac{m S_o}{C_M} + L_c \right) \quad (\text{F.2})$$

Para utilizar la fórmula (F.1) o la fórmula (F.2), es necesario conocer la rigidez C_M del equipo completo de ensayo utilizado (anillo de ensayo, célula de carga, sistema de sujeción para probetas a ensayar). El siguiente procedimiento, descrito anteriormente en la referencia bibliográfica [53], proporciona los valores correctos de rigidez C_M .

Una probeta de la misma geometría y de propiedades similares al material ensayado, debe ser ensayada utilizando una determinada velocidad de separación de las mordazas lenta y constante. De esta forma, se deben determinar los siguientes parámetros:

- para el diagrama fuerza/deformación, la pendiente m alrededor del punto de interés;
- a partir de la curva porcentual alargamiento/tiempo, la velocidad de deformación resultante alrededor del punto de interés.

La rigidez puede ser ahora calculada utilizando la fórmula (F.3) [conversión de la fórmula (F.1) o la (F.2)] de acuerdo con C_M :

$$C_m = \frac{m \cdot S_o}{\frac{v_c}{\dot{\epsilon}_m} - L_c} \quad (\text{F.3})$$

Este procedimiento debería ser utilizado solamente para materiales con un comportamiento de cedencia no discontinuo en el intervalo relevante. Para materiales de ensayo que presenten cedencia discontinua o serrada, no es necesario el conocimiento de la rigidez ya que la deformación estimada, la velocidad sobre la longitud de la parte calibrada, $\dot{\epsilon}_{L_c}$ y la fórmula simplificada (2) (véase 10.3.2.1) en lugar de la fórmula (2), debería ser utilizada para el cálculo de la velocidad de separación de las mordazas v_c .

Anexo G (Normativo)

Determinación del módulo de elasticidad de los materiales metálicos utilizando un ensayo de tracción uniaxial

G.1 Introducción

Aunque la Norma ISO 6892-1 requiere la generación de una línea recta con inclinación paralela a la región lineal de la curva esfuerzo-deformación, con el fin de determinar el límite elástico especificado, R_p , del material a ensayar, y la mayoría de usuarios suponen normalmente que la pendiente de la región elástica lineal de la curva esfuerzo-deformación corresponde al Módulo de Elasticidad del material ensayado, desde que el Módulo de Elasticidad E es proporcionado por la relación $E = \text{esfuerzo} / \text{deformación}$. No obstante, en general el extensómetro de Clase 1 requerido para el ensayo de tracción no es suficientemente preciso para medir deformaciones muy pequeñas en la región elástica e indicar con exactitud los valores del Módulo con un nivel de incertidumbre aceptable.

No se exige la utilización de este anexo para obtener la pendiente de la parte elástica de la curva de alargamiento porcentual del esfuerzo para determinar el límite elástico.

La Norma ASTM E 111^[52] proporciona una descripción adicional para determinar el Módulo de Elasticidad mediante el ensayo de tracción. Para más información, véase también SEP 1235^[43].

G.2 Generalidades

Este anexo contiene requisitos adicionales para la determinación del módulo de elasticidad utilizando el ensayo de tracción uniaxial. Este método de ensayo se limita a los materiales que cumplen los siguientes criterios:

- efectos despreciables de fluencia del material en el intervalo evaluado;
- línea recta suficiente en el intervalo elástico del material en el intervalo evaluado.

Estos requisitos son relativos al diseño del equipo de ensayo, la probeta y la evaluación del ensayo.

El módulo de elasticidad es una propiedad característica del material y se utiliza para el cálculo de la elasticidad de los productos y componentes de acuerdo a la Ley de Hooke.

NOTA Normalmente, este ensayo se realiza de forma separada del ensayo de tracción, debido a la limitación que provoca el desplazamiento del extensómetro.

G.3 Equipo de ensayo

G.3.1 Exactitud del equipo de ensayo

G.3.1.1 Dispositivo de medición de la fuerza

El sistema de medición de la fuerza de la máquina de ensayo debe ser conforme con la Norma ISO 7500-1, clase 1, en el intervalo relevante.

G.3.1.2 Sistema del extensómetro

El sistema del extensómetro debe ser conforme con la Norma ISO 9513, clase 0,5, en el intervalo relevante.

La deformación se debe medir en lados opuestos de la probeta.

Se recomienda el uso de un extensómetro largo para longitud entre marcas (por ejemplo, ≥ 50 mm).

G.3.1.3 Resolución del sistema de ensayo

La resolución del sistema de ensayo debe ser suficiente para obtener al menos 50 valores discretos de medida diferentes en el intervalo evaluado.

G.3.1.4 Dispositivos de medición para la determinación de las dimensiones importantes de la probeta

Todos los dispositivos de medición utilizados para la determinación del área inicial de la sección transversal deben calibrarse conforme a las normas correspondientes, con la trazabilidad del Sistema Nacional de Medición. El dispositivo de medición debe ser capaz de garantizar con una precisión mayor al $\pm 0,5\%$ de los datos medidos.

G.3.2 Método de sujeción y alineación

El método de sujeción y alineación es importante para la determinación del módulo de elasticidad. Para los requisitos con respecto al método de sujeción, véase el apartado 10.2 y para información adicional, véase la Norma ASTM E1012. Además, se puede encontrar información útil en la Norma ISO 23788.

Se recomienda utilizar dispositivos mecánicos (por ejemplo, barreras) para situar la probeta a fin de alcanzar una buena alineación.

G.4 Probetas

G.4.1 Generalidades

Las probetas deben ser rectas.

NOTA Probetas dobladas o torcidas no pueden ser ensayadas conforme a este anexo.

La superficie de la probeta debe estar en tales condiciones que no influya en los resultados de ensayo.

Cuando se presentan esfuerzos residuales en la muestra, bien como resultado del proceso anterior o por la preparación de la muestra, los valores del módulo determinados pueden no ser representativos del material base

G.4.2 Determinación del área inicial de la sección transversal

Para la determinación del área inicial de la sección transversal, véase el capítulo 7. Además de los requisitos de dicho capítulo 7, deben realizarse un mínimo de tres mediciones para cada dimensión. El área inicial de la sección transversal, S_0 , es el área media de la sección transversal y se debe calcular a partir de las mediciones de las dimensiones correspondientes. El área inicial de la sección transversal se debe determinar con una exactitud igual o mayor al $\pm 0,5\%$.

G.5 Procedimiento

G.5.1 Generalidades

Si no se conoce la curva esfuerzo-deformación hasta R_{eH} o $R_{p0,2}$, se debe realizar un preensayo antes de la medición del módulo de elasticidad.

G.5.2 Instalación de la fuerza al punto cero

La instalación de la fuerza al punto cero se debe realizar conforme al apartado 10.1.

G.5.3 Condiciones de ensayo

G.5.3.1 Velocidad de ensayo

Comparado con otras propiedades determinadas dentro del ensayo de tracción, el módulo de elasticidad es menos sensible a la velocidad de ensayo. La velocidad de ensayo debería ser conforme al Intervalo 1 del Método A. Se permiten otras velocidades de ensayo incluyendo el uso del Método B.

La velocidad de ensayo debe ser baja para alcanzar el número exigido de datos para el análisis.

Puede utilizarse una separación constante de la velocidad de las mordazas para evitar cualquier discontinuidad.

G.5.3.2 Frecuencia de muestreo de los datos

La frecuencia de muestreo de los datos debe elegirse de forma que se obtenga un mínimo de 50 valores medidos en el intervalo relevante (R_1 , R_2).

La frecuencia mínima de muestreo de los datos puede calcularse mediante la fórmula (G.1):

$$f = \frac{N \cdot E \cdot \dot{\epsilon}}{R_2 - R_1} \quad (G.1)$$

donde N es el número de valores medidos en el intervalo relevante.

Para el acero con $R_1 = 10$ MPa y $R_2 = 50$ MPa y una velocidad de ensayo de $0,000\ 07\ \text{s}^{-1}$, la frecuencia de muestreo de los datos debe ser mayor a 18 Hz.

G.5.3.3 Procedimiento de ensayo

Si la probeta es utilizada más de una vez para la determinación del módulo, la carga aplicada no debe ser mayor al valor correspondiente al 50% de los valores esperados de R_{eH} o $R_{p0,2}$.

De otra forma, se recomienda realizar el ensayo hasta un punto en que la deformación plástica pueda observarse.

G.6 Evaluación

G.6.1 Promedio de las señales del extensómetro

La deformación media, necesaria para el cálculo en el apartado G.6.2, se calcula para cada valor de fuerza por el promedio de la deformación desde los lados opuestos de la probeta.

Los datos de deformación de cada lado de la probeta pueden mostrarse y las diferencias de pendientes de las dos curvas pueden reducirse mediante la optimización del equipo de ensayo (reduciendo el doblado). Para más información, véase la Norma ASTM E 1012. Además, se puede encontrar información útil en la Norma ISO 23788.

G.6.2 Cálculo del módulo de elasticidad

Para la evaluación de los datos registrados, se recomienda el siguiente método interactivo.

El método se basa en una determinación numérica de la línea que mejor encaja en el intervalo elástico (método de los cuadrados menores), incluyendo una evaluación visual de la unión entre esta línea de mejor encaje y la curva de las lecturas actuales de medida, seguidas por el recálculo con parámetros alterados, cuando sea adecuado. Por tanto, esto corresponde normalmente a un análisis manual de un gráfico X-Y.

El uso de este método depende de la disponibilidad de un programa informático adecuado.

Se debe realizar una regresión lineal sobre la deformación (G.4) entre el valor menor de fuerza R_1 y el valor superior de fuerza R_2 (alternativamente, se pueden utilizar los valores de deformación e_1 y e_2).

$$R = \frac{E \cdot e}{100\%} + b \quad (\text{G.2})$$

donde

R es la fuerza en megapascales;

E es el módulo de elasticidad en megapascales;

e es el porcentaje de alargamiento en %;

b es la deformación inclinada en megapascales.

La línea recta determinada de esta forma debe dibujarse sobre el diagrama fuerza-deformación, mientras que la parte inicial de este diagrama se aumenta para este motivo. La unión entre la línea recta y la curva se debe evaluar visualmente. Puede ser útil considerar el coeficiente de correlación R^2 , el cual debería estar cerca de 1 ($> 0,9995$), por medio del cual el número de puntos de datos considerados debería ser al menos 50.

Otra herramienta útil es el cálculo de la desviación típica relativa. La desviación típica relativa tiene en cuenta el coeficiente de correlación R^2 y el número de puntos de datos considerados dentro de otros datos estadísticos. Debería ser menor al 1%.

Cambiando los valores inferior y superior y recalculando la fórmula convenientemente, la línea del mejor encaje (es decir, el módulo de elasticidad) se puede adaptar a la curva.

Se recomiendan los siguientes valores como puntos de inicio para el cálculo de la regresión:

- valor inferior de fuerza R_1 : $\approx 10\%$ de R_{eH} o $R_{p0,2}$.
- valor superior de fuerza R_1 : $\approx 40\%$ de R_{eH} o $R_{p0,2}$.

Adicionalmente, la inclinación de la deformación se puede calcular de acuerdo a la fórmula (G.3):

$$x_{(y=0)} = \frac{-b}{E} \quad (\text{G.3})$$

Bajo condiciones óptimas de ensayo, los valores escogidos por defecto no tendrán una gran influencia sobre los resultados de los cálculos. Ejemplo: si el material cumple las condiciones generales descritas en el capítulo G.2 y los valores determinados por defecto R_1 y R_2 son el 10% y el 40% de R_{eH} o $R_{p0,2}$ respectivamente, el recálculo de la fórmula por el uso de los valores por defecto dentro del intervalo determinado (por ejemplo, 10% a 20%, 20% a 30%, 30% a 40% de R_{eH} o $R_{p0,2}$ respectivamente) no tendrán influencia significativa en el resultado.

En los casos en que los materiales no muestren una línea recta elástica, por ejemplo, el hierro, o los datos para la regresión no sean de suficiente calidad, es decir, $R^2 < 0,9995$, no se debería determinar el Módulo de Elasticidad.

Se recomienda realizar comprobaciones periódicas sobre la repetitividad de los resultados, utilizando probetas de referencia adecuadas en la configuración empleada para el ensayo.

Estas probetas de referencia pueden fabricarse de forma casera y deberían tener la misma geometría que las probetas de ensayo.

Otros enfoques matemáticos y métodos informáticos de análisis están disponibles para la evaluación del módulo de elasticidad.

G.7 Incertidumbre de medida

G.7.1 Generalidades

La estimación de la incertidumbre de medida para un determinado módulo de elasticidad, puede hacerse conforme al capítulo A.5^[9] de la CWA 15261-2:2005, o de acuerdo al anexo K.

NOTA La estimación de la incertidumbre de medida conforme a la CWA 15261-2 se basa en valores absolutos. Estos resultados en estimaciones diferentes de los presupuestos correspondientes de incertidumbres individuales, por ejemplo, si difieren las dimensiones de la probeta o la longitud de la longitud entre marcas del extensómetro. La estimación de la incertidumbre de medida conforme al anexo K se basa en estimaciones relativas. Por tanto, las estimaciones relativas normalmente no cambiarán. La excepción es el presupuesto de la incertidumbre de medición relativa para la medida de la deformación. A causa de los pequeños alargamientos durante el ensayo en la parte elástica, la incertidumbre absoluta de la medición de la deformación es importante para la contribución de la incertidumbre (conforme a la Norma ISO 9513).

G.7.2 Estimación de la incertidumbre de medida conforme a la CWA 15261-2

G.7.2.1 Generalidades

NOTA En la CWA 15261-2, el símbolo L_o se utiliza para la longitud entre marcas y m_E para la pendiente de la parte elástica de la curva fuerza-alargamiento. Para la conformación con esta parte de la Norma ISO 6892 y para evitar la confusión en lo sucesivo (diferente de la CWA), el símbolo L_e se utiliza para la longitud entre marcas del extensómetro y S_g para la pendiente de la parte elástica de la curva fuerza-alargamiento.

$$u_c(E) = \sqrt{\left(\frac{L_e}{S_o}\right)^2 \cdot u^2(S_E) + \left(\frac{S_E}{S_o}\right)^2 \cdot u^2(L_e) + \left(-\frac{S_E L_e}{S_o^2}\right)^2 \cdot u^2(S_o)} \quad (G.4)$$

donde

L_e es la longitud entre puntos del extensómetro;

S_o es el área inicial de la sección transversal;

S_E es la pendiente de la curva fuerza-alargamiento;

$u(L_e)$ es la incertidumbre de la longitud entre puntos del extensómetro;

$u(S_o)$ es la incertidumbre del área inicial de la sección transversal;

$u(S_E)$ es la incertidumbre de la pendiente de la curva fuerza-alargamiento.

G.7.2.2 Ejemplo para el cálculo de la incertidumbre de medida

La tabla G.1 muestra los resultados de un ejemplo para la medición de la incertidumbre conforme a la CWA 15261-2, para un valor medido del módulo de elasticidad de 186,7 GPa^[54] basado en los siguientes datos:

L_e : 50 mm

S_o : 78,5 mm²

S_E : 293,07 kN/mm
 $u(L_e)$: 0,144 mm
 $u(S_o)$: 0,785 mm²
 $u(S_E)$: 0,064 kN/mm

Tabla G.1 – Condiciones de incertidumbre, ejemplo 1 de acuerdo a CWA 15261-2

Parámetro	Coefficientes de sensibilidad ^a	Contribución de incertidumbre ^a
$\frac{L_e}{S_o}$	0,637 mm ⁻¹	
$u(S_E)$		0,064 kN/mm
$\frac{S_E}{S_o}$	3,733 kN/mm ³	
$u(L_e)$		0,144 mm
$-\frac{S_E L_e}{S_o^2}$	-2,378 kN/mm ⁴	
$u(S_o)$		0,785 mm ²
$U_c(E)^b$		1,9 kN/mm ²
a Los valores sólo se indican para información. b $u_c(E)$ se calcula de acuerdo a la fórmula (G.5).		

$$u_c(E) = \sqrt{0,637^2 \cdot 0,064^2 + 3,733^2 \cdot 0,144^2 + (-2,378)^2 \cdot 0,785^2} = 1,9 \text{ GPa} \quad (\text{G.5})$$

Para un nivel de confianza del 95%, la incertidumbre combinada se debe multiplicar por un factor de cobertura, $k = 2$ [véase la fórmula (G.6)].

$$U(E) = k \cdot u_c(E) = 2 \cdot 1,9 \text{ GPa} = 3,8 \text{ GPa} \quad (\text{G.6})$$

Esto es un 2,0% basado en el módulo de elasticidad de 186,7 GPa.

El resultado del ensayo para el módulo de elasticidad es: 186,7 GPa \pm 3,8 GPa (nivel de confianza $k = 2,95\%$).

Esto significa que con un nivel de confianza del 95%, el valor verdadero del módulo de elasticidad está en el intervalo entre 182,9 GPa y 190,5 GPa.

G.7.3 Estimación de la incertidumbre de medida conforme al anexo K

La tabla G.2 indica la contribución de la incertidumbre que debería considerarse para el módulo de elasticidad de acuerdo al anexo K.

Tabla G.2 – Contribución de incertidumbre, ejemplo 2 de acuerdo al anexo K

Parámetro	Contribución de incertidumbre ^a %
Desviación típica de la pendiente $S_{m(\text{rel})}$	0,2
Desviación típica de los valores X de la gráfica X-Y, $S_X^{b,c}$	3
Desviación típica de los valores Y de la gráfica X-Y, S_Y	1
Longitud entre puntos del extensómetro, L_e	0,5
Área inicial de la sección transversal, S_o	1

a Los valores sólo se indican para información.
 b S_m consiste en S_x y S_y , por lo tanto, S_x y S_y se deben considerar.
 c Basada en pequeños alargamientos medidos en el ensayo, el valor absoluto (1,5 μm de una clase 0,5 del extensómetro) tiene que ser utilizado. $\Delta R = 200 \text{ MPa}$, $E = 200 \text{ GPa}$, $L_e = 50 \text{ mm}$ resulta en un alargamiento de 0,5 mm. Utilizando un margen de error de 1,5 μm (valor absoluto de una clase 0,5 del extensómetro), la contribución de la incertidumbre es del 3%.

La fórmula G.7 indica la incertidumbre combinada para el módulo de elasticidad, expresada como un porcentaje.

$$u_c(E) = \sqrt{\left(\frac{0,2}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{3}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2} = 1,9\% \quad (\text{G.7})$$

Para un nivel de confianza del 95%, la incertidumbre combinada se debe multiplicar por un factor de cobertura, $k = 2$ [véase la fórmula (G.8)].

$$U(E) = k \times u_c(E) = 2 \times 1,9\% = 3,8\% \quad (\text{G.8})$$

El resultado del ensayo para el módulo de elasticidad es: (186,7 \pm 7,1) GPa (nivel de confianza $k = 2,95\%$).

Esto significa que con un nivel de confianza del 95%, el valor verdadero del módulo de elasticidad está en el intervalo entre 179,6 GPa y 193,8 GPa.

G.7.4 Ensayo de competencia

Se realizó un ensayo de competencia del "Módulo de Young" y se determinó la incertidumbre de las mediciones para todos los participantes. Cualquier incertidumbre de la medición para la determinación del módulo de elasticidad entre el 1,2% y 5% (nivel de confianza del 95%) es adecuada.^[54]

G.8 Informe de ensayo

Este informe de ensayo debe contener la información exigida en los aparatos a) a f) del capítulo 22, además de la siguiente información que debe incluirse:

- a) tipo de sistema de extensómetro;
- b) valores por defecto de fuerza R_1 y R_2 (en MPa) o los valores por defecto de deformación e_1 y e_2 (en %), respectivamente;
- c) número de valores medidos en el intervalo evaluado (entre R_1 y R_2 , o entre e_1 y e_2);
- d) el módulo de elasticidad E (en GPa), redondeado al 0,1 GPa más cercano y de acuerdo con la Norma ISO 80000-1;
- e) incertidumbre de la medición incluyendo el nivel de confianza (en GPa) y el método de determinación (capítulo A.5 de la CWA 15261-2:2005 o la tabla G.2);
- f) el coeficiente de correlación R^2 del mejor encaje de la línea recta o de la desviación típica S_m (en GPa) o la desviación típica relativa S_{mrel} (en %).

G.9 Consideraciones adicionales

En general, resulta complicado determinar valores fiables del módulo en los ensayos de tracción, a menos que se utilice el promedio de un sistema de extensómetro de resolución especial alta; tales dispositivos no son normalmente adecuados para cubrir todo el intervalo del ensayo de tracción. Si se utiliza un extensómetro de un solo lado o un calibre de pinza, cualquier pequeña desalineación de la probeta puede derivar en enormes errores de la medición aparente del módulo.

G.10 Otros métodos para la determinación del Módulo

El ensayo de tracción no es el mejor método para determinar valores fiables del Módulo de Elasticidad y son preferibles otros métodos alternativos, por ejemplo, Excitación por Impulsos o Ultrasonidos. Las Referencias [17], [44] y [46] muestran más información al respecto.

G.11 Incertidumbre y Reproducibilidad

Aquí no se incluyen todos los presupuestos completos de incertidumbre, pero sí los procedimientos para estimar la incertidumbre basados en GUM^[4] asociados con las mediciones de los módulos que han sido desarrolladas como parte del proyecto europeo UNCERT, tanto para el ensayo de Tracción^[47] como para las Mediciones Dinámicas^[48].

La reproducibilidad de las mediciones de los módulos se basa en 3 ocasiones la Desviación Típica (DT) de una serie de ejercicios de ensayos interlaboratorios, agrupados como parte del Proyecto TENSTAND y se resumen en la tabla G.3^[45].

**Tabla G.3 – Resumen de los ensayos en cadena:
Módulo de elasticidad o pendiente de la línea elástica, respectivamente**

Referencia	Autores	Año	Material	Reproducibilidad (± 2SD) %
Ensayo de Materiales de Construcción	Unwin ^[50]	1910	Acero templado	2
WAMAS	Lord, Roerbuck y Orkney ^[51]	1995	SIC/Al MMC	6
BCR Material de Tracción de Referencia CRM 661	Ingelbrecht y Loveday ^[29]	2000	Nimonic 75	12
TENSTAND WP3 Medición del Módulo	Lord, Rides y Loveday ^[49]	2005	Varios	5-25
TENSTAND WP2 Registros de datos de ASCII	Lord, Loveday, Rides y McEnteggart ^[49]	2005	Varios – registros de datos de ASCII	1-6

Debería apuntarse que la mayoría de los resultados mostrados anteriormente están todos basados en los criterios establecidos en la Norma ISO 6892 o en sus normas equivalentes anteriores. Debería considerarse además que el propósito de la realización de varios ensayos es la determinación de las propiedades comunes del ensayo de tracción (por ejemplo, la generación de los conjuntos de datos de ASCII en el TENSTAND WP2). Por tanto, fueron empleados los extensómetros individuales de un lado de Clase 1 típicos con una exactitud limitada en el intervalo elástico y la pendiente de la parte elástica de la curva fuerza-porcentaje de alargamiento m_g fue determinada con el fin de la evaluación de $R_{p0,2}$ y ñas otras propiedades, y no para determinar el módulo de elasticidad E como propiedad intrínseca del material. Si se utilizan los extensómetros de doble lado y alta resolución de Clase 0,5, tal y como se especifica en este anexo, la incertidumbre de las mediciones debería ser inferior y la reproducibilidad mucho mejor.

Anexo H (Informativo)

Medida del alargamiento porcentual después de la rotura si el valor preestablecido es menor del 5%

Cuando se mida el alargamiento porcentual tras la rotura, deberían tomarse precauciones si el valor preestablecido es menor del 5%.

Uno de los métodos recomendados es el siguiente:

Con un compás de puntas se toma la medida de la longitud entre puntos y se traza un arco con la marca como centro. Después de la rotura, se deberían colocar los fragmentos de la probeta en un dispositivo de fijación donde se le aplica una fuerza axial de compresión, preferiblemente mediante un tornillo, suficiente para mantener las piezas unidas durante la medida. A continuación debería trazarse un segundo arco de igual radio desde el mismo centro próximo a la rotura, y medirse la distancia entre los dos arcos mediante un microscopio de medida o cualquier otro instrumento adecuado. Para hacer las marcas más fácilmente visibles, se puede aplicar una película de tinte a la probeta antes de realizar el ensayo.

NOTA En el apartado 20.2 se describe otro método de ensayo (en el que se mide el alargamiento tras la rotura con un extensómetro).

Anexo I (Informativo)

Medida del alargamiento porcentual después de la rotura por el método de la subdivisión de la longitud inicial entre puntos

I.1 Para evitar tener que rechazar aquellas probetas en las que la rotura se produce fuera de la zona prescrita en el apartado 20.1, pero que la estricción tiene lugar dentro de la longitud base del extensómetro, se puede utilizar el siguiente método:

- a) antes del ensayo, se subdivide la longitud inicial entre puntos, L_0 , en N partes iguales de 5 mm (recomendado) a 10 mm;
- b) después del ensayo, se designa como X al punto de la longitud inicial en el fragmento más corto y se llama Y, en el fragmento más largo, a la subdivisión que está a la misma distancia de la rotura que la marca X.

I.2 Si n es el número de intervalos entre X e Y, el alargamiento después de la rotura se determina de la siguiente forma:

- a) Si $N - n$ es un número par [(véase la figura I.1 a)], se mide la distancia entre X e Y, l_{XY} , y la distancia desde Y hasta la división Z, l_{YZ} , situada a $(N - n)/2$ intervalos a partir de Y.

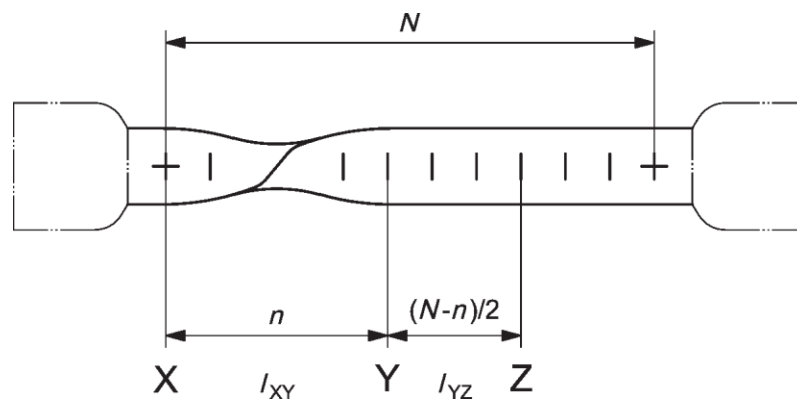
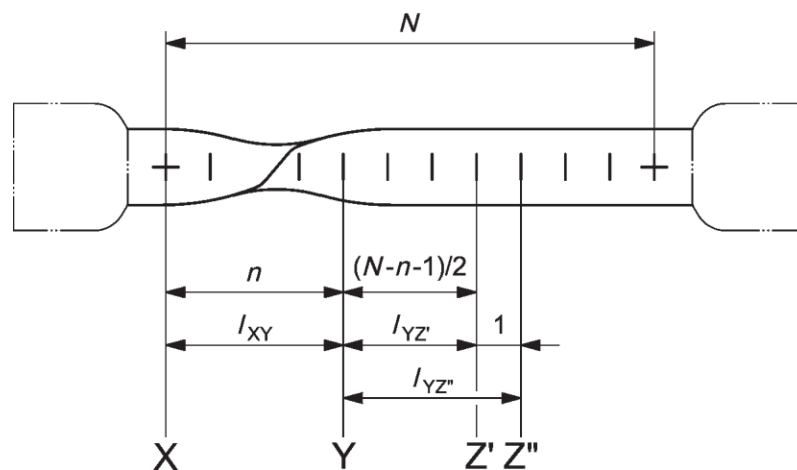
Se calcula el alargamiento porcentual después de la rotura, A , mediante la fórmula (I.1):

$$A = \frac{l_{XY} + 2l_{YZ} - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (I.1)$$

- b) Si $N - n$ es un número impar [(véase la figura I.1 b)], se mide la distancia entre X e Y y la distancia desde Y a las divisiones Z' y Z'', $l_{YZ'}$ y $l_{YZ''}$, situadas respectivamente a $(N - n - 1)/2$ y $(N - n + 1)/2$ intervalos a partir de Y.

El alargamiento porcentual tras la rotura se calcula la fórmula (I.2):

$$A = \frac{l_{XY} + l_{YZ'} + l_{YZ''} - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (I.2)$$

a) $N - n$ es un número parb) $N - n$ es un número impar

Leyenda

- n Número de intervalos entre X e Y
- N Número de partes iguales
- X Punto de la longitud inicial en el fragmento más corto
- Y Punto de la longitud inicial en el fragmento más largo
- Z, Z', Z'' Divisiones de la longitud inicial

NOTA La forma de las cabezas de amarre se da sólo como orientación.

Figura I.1 – Ejemplos de medida del alargamiento porcentual después de la rotura

Anexo J (Informativo)

Determinación del alargamiento total porcentual sin estricción, A_{wn} , para productos largos tales como barras, hilos, varillas

Este método se debe poner en práctica en la parte más larga de una probeta rota.

Antes del ensayo, se hacen marcas equidistantes sobre la longitud entre puntos, siendo la distancia entre dos marcas sucesivas igual a un submúltiplo de la longitud inicial entre puntos, L'_o . El marcado de la longitud inicial entre puntos, L'_o , debería hacerse con una exactitud de $\pm 0,5$ mm. La medida de la longitud final entre puntos, L'_u , se hace sobre el segmento más largo de la probeta y debería medirse con una exactitud de $\pm 0,5$ mm.

Para que esta medida sea válida, deberían respetarse las dos condiciones siguientes:

- a) los límites de la zona de medida deberían estar situados a una distancia de al menos $5 d_o$ de la sección de rotura y a $2,5 d_o$ de la mordaza;
- b) la longitud entre puntos de medida debería ser al menos igual al valor establecido en la norma del producto.

El alargamiento porcentual no proporcional sin estricción se calcula según la fórmula (J.1):

$$A_{wn} = \frac{L'_u - L'_o}{L'_o} \cdot 100 \quad (J.1)$$

NOTA En muchos materiales metálicos, la fuerza máxima se produce en el intervalo en el que comienza la estricción. Esto supone que los valores de A_g y A_{wn} para estos materiales sean prácticamente iguales. Las diferencias serán mayores en materiales altamente deformados en frío, como por ejemplo planchas de estaño doblemente reducidas o aceros estructurales irradiados, o en ensayos efectuados a altas temperaturas.

Anexo K (Informativo)

Estimación de la incertidumbre de medida

K.1 Generalidades

Este anexo proporciona una guía sobre cómo estimar la incertidumbre de las medidas realizadas de acuerdo con esta parte de la Norma ISO 6892. Debería señalarse que no es posible efectuar una declaración absoluta de incertidumbre para este método de ensayo, ya que existen contribuciones a la incertidumbre tanto *dependientes del material* como *independientes del mismo*. La Guía 98-3 de ISO/IEC^[4] es un documento detallado, de más de 90 páginas, basado en métodos estadísticos rigurosos para la suma de incertidumbres procedentes de varias fuentes. Su complejidad ha conducido a un cierto número de organizaciones a elaborar versiones simplificadas (véanse los documentos NIS 80^[15], NIS 3003^[16] y la referencia bibliográfica [23]). Todos estos documentos proporcionan una guía de cómo estimar la incertidumbre de medida basándose en el concepto de "evaluación de la incertidumbre". Para una descripción detallada, véase la Norma EN 10291^[11] y la referencia bibliográfica [24]. Las referencias bibliográficas [25] y [26] proporciona información complementaria para la estimación de la incertidumbre. La medición de la incertidumbre aquí recogida no describe la dispersión que resulta de la falta de homogeneidad del material, por ejemplo, de un lote, desde el principio y en el final de un perfil extruído o de una bobina arrollada, o de las diferentes localizaciones en una pieza moldeada. La incertidumbre resulta de la dispersión de los datos obtenidos en diferentes ensayos, diferentes máquinas o diferentes laboratorios para un material homogéneo ideal. En los capítulos siguientes se describen las diferentes influencias y se proporciona una guía para la determinación de las incertidumbres.

Los valores de reproducibilidad utilizados en las tablas K.2 a K.4 son intervalos de la mitad de anchura de acuerdo con la Guía ISO/IEC 98-3^[4] y deberían interpretarse como el valor de las tolerancias de dispersión en más y en menos (\pm).

K.2 Estimación de la incertidumbre

K.2.1 Generalidades

La incertidumbre típica, u , del valor de un parámetro puede estimarse de dos maneras.

K.2.2 Tipo A – Por medición repetida

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{K.1})$$

donde

s es la desviación típica de las mediciones;

n es el número de observaciones hechas en el cálculo de la media para indicar el resultado de la medición en circunstancias normales.

K.2.3 Tipo B – Procedente de otras fuentes, por ejemplo, certificados de calibración o tolerancias

Aquí, el valor verdadero tiene igual probabilidad de ocurrir en cualquier punto del intervalo definido, por lo que se describe la distribución como rectangular o uniforme. En este caso, la incertidumbre típica viene dada por la fórmula (K.2):

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (\text{K.2})$$

donde a es la mitad de la anchura del intervalo en el que se presupone que está la cantidad.

A menudo, la estimación de una cantidad, y , implica la medición de otras cantidades. La estimación de la incertidumbre en y debe tener en cuenta las contribuciones de las incertidumbres en estas mediciones. Se conoce por tanto como una incertidumbre combinada. Si la estimación únicamente supone la adición o sustracción de una serie de medidas, x_1, x_2, \dots, x_n , entonces la incertidumbre combinada en y , $u(y)$, viene dada por la fórmula (K.3):

$$u(y) = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + \dots + u(x_n)^2} \quad (\text{K.3})$$

donde $u(x_1)$ es la incertidumbre en el parámetro x_1 , etc.

K.3 Efecto de los parámetros del equipo en la incertidumbre de los resultados de ensayo

La incertidumbre de los resultados determinados a partir de un ensayo de tracción contiene componentes debidos al equipo utilizado. Diversos resultados de ensayo tienen contribuciones a la incertidumbre que difieren dependiendo del modo en que se determinen. La tabla K.1 indica las contribuciones a la incertidumbre del equipo que deberían tenerse en cuenta para algunas de las propiedades de los materiales más comunes determinadas en un ensayo de tracción. Algunos de los resultados de ensayo pueden determinarse con una incertidumbre más baja que otros. Por ejemplo, el límite superior de cedencia, R_{eH} , únicamente depende de las incertidumbres en la medida de la fuerza y el área de la sección transversal, mientras que el límite elástico convencional, R_p , depende de la fuerza, el alargamiento, la longitud entre puntos, el área de la sección transversal y otros parámetros. Para el coeficiente de estricción, Z , es necesario tener en cuenta las incertidumbres de medida del área de la sección transversal antes y después de la rotura.

Tabla K.1 – Contribuciones a la incertidumbre de los resultados de ensayo debido a los dispositivos de medida

Parámetro	Resultados de ensayo					
	R_{eH}	R_{eL}	R_m	R_p	A	Z
Fuerza	×	×	×	×	—	—
Alargamiento	—	—	—	×	×	—
Longitud entre puntos	—	—	—	×	×	—
S_o	×	×	×	×	—	×
S_u	—	—	—	—	—	×
× Pertinente — No pertinente						

La incertidumbre de los resultados de ensayo enumerados en la tabla K.1 puede obtenerse a partir de certificados de calibración de los dispositivos empleados para la determinación de los resultados de ensayo. Por ejemplo, el valor de la incertidumbre típica para un parámetro de fuerza cuando se utilice una máquina con un certificado de incertidumbre del 1,4%, sería 1,4/2 o 0,70%. Debería tenerse en cuenta que una clasificación Clase 1,0 (para la máquina del ensayo de tracción o el extensómetro) no garantiza necesariamente una incertidumbre del 1%. La incertidumbre podría ser significativamente mayor o menor (véase la Norma ISO 7500-1 para un ejemplo de la fuerza), y debería consultarse el certificado del equipo. También deberían tenerse en cuenta las contribuciones a la incertidumbre debidas a factores tales como la deriva del equipo desde su calibración y su utilización en diferentes condiciones ambientales.

Continuando con el ejemplo según la fórmula (K.3), teniendo en cuenta las incertidumbres en la fuerza o las medidas del extensómetro, la incertidumbre combinada de los resultados de ensayo para R_{eH} , R_{eL} ,

R_m y A es $\sqrt{\left(\frac{1,4}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{0,70^2 + 0,58^2} = 0,91\%$ utilizando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados.

Cuando se esté estimando la incertidumbre de R_p , no es adecuado aplicar simplemente la suma de los componentes de las incertidumbre típicas deducidas de la clasificación de los dispositivos de medida. Debe examinarse, la curva fuerza-extensión. Por ejemplo, cuando la determinación de R_p se realiza en un punto de la curva fuerza-extensión en el que la indicación de fuerza no cambia a lo largo del intervalo de la incertidumbre de medida del alargamiento, la incertidumbre de la indicación de la fuerza debida al dispositivo de medida del alargamiento es despreciable. Por el contrario, cuando la determinación de R_p se realiza en un punto de la curva fuerza-extensión en el que la fuerza cambia mucho en relación con el alargamiento, la incertidumbre en dicha fuerza puede ser mucho mayor que el componente de incertidumbre debido a la clasificación del dispositivo. Además, la determinación de la pendiente de la parte elástica de la curva carga unitaria-extensión porcentual, m_E , podría influir en los resultados de R_p si la curva, en este intervalo, no es una línea recta ideal.

Tabla K.2 – Ejemplos de contribuciones a la incertidumbre para diferentes resultados de ensayo debidas a los dispositivos de medida

Parámetro	Contribución a la incertidumbre ^a				
	%				
	R_{eH}	R_{eL}	R_m	A	Z
Fuerza	1,4	1,4	1,4	—	—
Alargamiento	—	—	—	1,4	—
Longitud entre puntos, L_e, L_o	—	—	—	1	—
S_o	1	1	1	—	1
S_u	—	—	—	—	2

a Estos valores únicamente tienen carácter informativo.

La incertidumbre combinada para Z , u_z , expresada como tanto por ciento, viene dada por la fórmula (K.4):

$$u_z = \sqrt{\left(\frac{a_{S_o}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{a_{S_u}}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{0,577^2 + 1,155^2} = \sqrt{0,33 + 1,33} = 1,29 \quad (K.4)$$

Utilizando un enfoque similar, en la tabla K.3 se muestran ejemplos de incertidumbres típicas combinadas para un intervalo de resultados de ensayo.

Tabla K.3 – Ejemplos de incertidumbre combinada

Incertidumbre combinada para diferentes parámetros				
%				
R_{eH}	R_{eL}	R_m	A	Z
0,91	0,91	0,91	0,91	1,29

De acuerdo con la Guía ISO/IEC 98-3^[4], la incertidumbre total expandida se obtiene multiplicando las incertidumbres típicas combinadas por una función de cobertura, k . Para un nivel de confianza del 95%, $k = 2$.

Tabla K.4 – Ejemplos para un nivel de confianza del 95%, $k = 2$ (basado en la tabla K.3)

Nivel de confianza del 95%, $k = 2$ para diferentes parámetros				
R_{eH}	R_{eL}	R_m	A	Z
1,82	1,82	1,82	1,82	2,58

En el cálculo mostrado sólo pueden añadirse contribuciones a la incertidumbre con la misma unidad. Para más información e información más detallada sobre la incertidumbre de medida en los ensayos de tracción, véanse el documento CWA 15261-2^[9] y la referencia bibliográfica [27].

Se recomienda que se lleven a cabo ensayos periódicos programados sobre las muestras y control de las diferencias en las desviaciones típicas de los resultados de un determinado material de ensayo. Las desviaciones típicas de los datos resultantes de los ensayos de muestras en el tiempo pueden proporcionar una buena indicación de si la incertidumbre de los datos del ensayo se encuentra dentro de lo esperado.

K.4 Parámetros que dependen del material y/o del procedimiento de ensayo

La precisión de los resultados de un ensayo de tracción depende de factores relacionados con el material ensayado, con la máquina de ensayo, con el procedimiento de ensayo y con los métodos utilizados para calcular las propiedades establecidas del material. Idealmente se deberían considerar todos los factores siguientes:

- a) temperatura de ensayo;
- b) velocidades de ensayo;
- c) la geometría y el mecanizado de la probeta;
- d) el método de fijación de la probeta y la axialidad de la aplicación de la fuerza;
- e) las características de la máquina de ensayo (rigidez, accionamiento, y modo de control);
- f) errores humanos y de software asociados a la determinación de las propiedades de tracción;
- g) geometría del montaje del extensómetro.

La influencia de estos factores depende del comportamiento específico del material y no se puede dar como un valor definido. Si se conoce dicha influencia, ésta puede tenerse en cuenta en el cálculo de incertidumbre recogido en el capítulo K.3. Sería posible introducir fuentes de incertidumbre adicionales en la estimación de la incertidumbre expandida de medida. Esto puede hacerse mediante el siguiente enfoque:

- a) El usuario debe identificar todas las posibles fuentes adicionales que pueden tener efecto, directa o indirectamente, sobre los parámetros de ensayo que se van a determinar;
- b) Las contribuciones relativas pueden variar en función del material ensayado y las condiciones especiales de ensayo. Se anima a los laboratorios individuales a elaborar una lista de posibles fuentes de incertidumbre y a evaluar su influencia sobre el resultado. Si se determina una influencia significativa, esta incertidumbre, u_i , debe incluirse en el cálculo. La incertidumbre u_i es la incertidumbre, expresada como tanto por ciento, de la fuente i sobre el valor que se va a determinar tal y como se indica en la fórmula (K.3). Para u_i debe identificarse la función de distribución del parámetro específico (normal, rectangular, etc.). A continuación tiene que identificarse la influencia sobre el resultado en el nivel uno sigma. Ésta es la incertidumbre típica.

Se pueden utilizar ensayos de comparación entre laboratorios para determinar la incertidumbre total de los resultados bajo condiciones próximas a las empleadas en laboratorios industriales, pero estos ensayos no pueden separar los efectos debidos a la falta de homogeneidad del material de los atribuibales al método de ensayo (véase el anexo L).

Debería considerarse que cuando estén disponibles los materiales de referencia certificados apropiados, éstos ofrecerán un medio muy útil de determinar la incertidumbre de medida total en cualquier máquina de ensayo dada, incluyendo la influencia de las fijaciones, el doblado, etc., que actualmente son difíciles de cuantificar. Un ejemplo de material de referencia certificado es el BCR-661 (Nimonic 75), que se puede obtener del IRMM (véase el documento CWA 15261-2^[9]).

De manera alternativa, se recomienda que se realicen periódicamente ensayos "de la casa" sobre materiales con un nivel bajo de dispersión en sus propiedades (materiales de referencia no certificados) con fines de control de la calidad (véase la referencia bibliográfica [28]).

Existen algunos ejemplos para los que es muy difícil dar valores de la incertidumbre precisos sin materiales de referencia. Cuando sea importante disponer de valores fiables de la incertidumbre, en algunos casos se recomienda el uso de un material de referencia certificado o de un material de referencia no certificado para confirmar la incertidumbre de las medidas. Si no puede utilizarse ningún material de referencia, se necesitan ejercicios de comparación adecuados (véanse las referencias bibliográficas [21] y [30]).

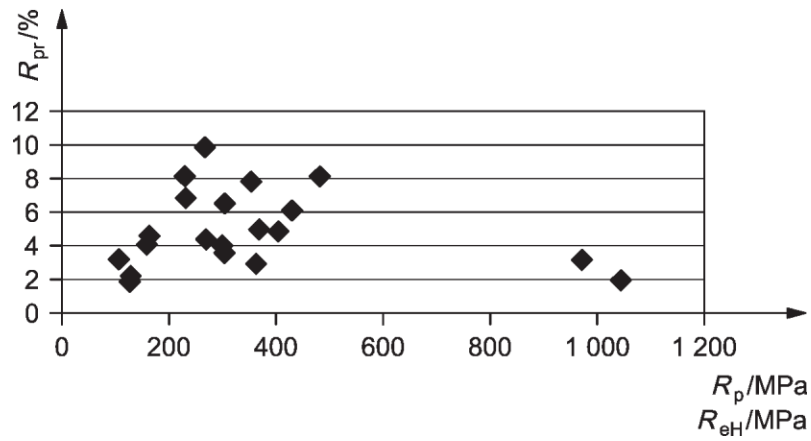
Anexo L (Informativo)

Precisión del ensayo de tracción. Resultados de los programas de comparación entre laboratorios

En las tablas L.1 a L.4 aparecen valores que dan una indicación de la dispersión típica en los resultados de ensayo de tracción para diversos materiales que han sido estudiados durante ejercicios de comparación entre laboratorios. Esta dispersión incluye tanto la dispersión del material como la incertidumbre de medida. Los resultados para la reproducibilidad están expresados en tanto por ciento y han sido calculados multiplicando por dos la desviación típica del parámetro que corresponda, por ejemplo R_p , R_m , Z y A , y dividiendo el resultado por el valor medio de dicho parámetro, proporcionando así valores de reproducibilidad que representan el nivel de 95% de confianza, de acuerdo con las recomendaciones dadas en la Guía ISO/IEC 98-3^[4], y que pueden compararse directamente con los valores de incertidumbre expandida calculados por métodos alternativos.

Tabla L.1 – Límites de cedencia (límites elásticos convencionales al 0,2% o límites superiores de cedencia). Reproducibilidad a partir de ejercicios de comparación entre laboratorios (la figura L.1 proporciona una representación gráfica de estos valores)

Material	Código	Límite de cedencia MPa	Reproducibilidad ± %	Referencia bibliográfica
Aluminio				
Plancha	AA5754	105,7	3,2	[31]
Plancha	AA5182-O	126,4	1,9	[20]
Plancha	AA6016-T4	127,2	2,2	[20]
	EC-H 19	158,4	4,1	[33]
	2024-T 351	362,9	3,0	[33]
Acero				
Plancha	DX56	162,0	4,6	[31]
Bajo en carbón, plancha	HR3	228,6	8,2	[34]
Plancha	ZStE 180	267,1	9,9	[31]
AISI 105	P245GH	367,4	5,0	[34]
	C22	402,4	4,9	[33]
Plancha	S355	427,6	6,1	[31]
Acero inoxidable austenítico	SS316L	230,7	6,9	[31]
Acero inoxidable austenítico	X2CrNi18-10	303,8	6,5	[34]
Acero inoxidable austenítico	X2CrNiMo18-10	353,3	7,8	[34]
AISI 316	X5CrNiMo17-12-2	480,1	8,1	[33]
Acero inoxidable martensítico	X12Cr13	967,5	3,2	[33]
Alta resistencia	30NiCrMo16	1 039,9	2,0	[34]
Aleaciones de níquel				
INCONEL 600	NiCr15Fe8	268,3	4,4	[33]
Nimonic 75	(BCR-661)	298,1	4,0	[29]
Nimonic 75	(BCR-661)	302,1	3,6	[31]



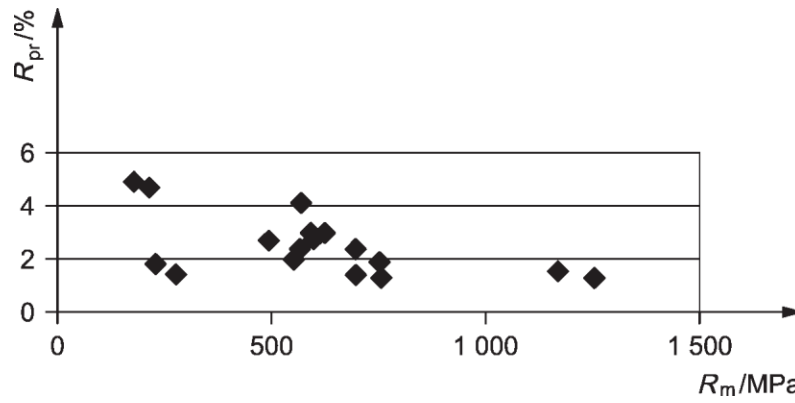
Leyenda

- R_{eH} Límite superior de cedencia, expresado en MPa
- R_p Límite elástico convencional, expresado en MPa
- R_{pr} Reproducibilidad, expresada en %

Figura L.1 – Presentación de los valores recogidos en la tabla L.1

Tabla L.2 - Resistencias a la tracción, R_m . Reproducibilidad a partir de ejercicios de comparación entre laboratorios (la figura L.2 proporciona una representación gráfica de estos valores)

Material	Código	Límite de cedencia MPa	Reproducibilidad ± %	Referencia bibliográfica
Aluminio				
Plancha	AA5754	212,3	4,7	[31]
Plancha	AA5182-0	275,2	1,4	[20]
Plancha	AA6016-T4	228,3	1,8	[20]
	EC-H 19	176,9	4,9	[33]
	2024-T 351	491,3	2,7	[33]
Acero				
Plancha	DX56	301,1	5,0	[31]
Bajo en carbono, plancha	HR3	335,2	5,0	[34]
Plancha	ZStE 180	315,3	4,2	[31]
AISI 105	Fe510C	552,4	2,0	[34]
	C22	596,9	2,8	[33]
Plancha	S355	564,9	2,4	[31]
Acero inoxidable austenítico	SS316L	568,7	4,1	[31]
Acero inoxidable austenítico	X2CrNi18-10	594,0	3,0	[34]
Acero inoxidable austenítico	X2CrNiMo18-10	622,5	3,0	[34]
AISI 316	X7CrNiMo17-12-2	694,6	2,4	[33]
Acero inoxidable martensítico	X12Cr13	1 253,0	1,3	[33]
Alta Resistencia	30NiCrMo16	1 167,8	1,5	[34]
Aleaciones de níquel				
INCONEL 600	NiCr15Fe8	695,9	1,4	[33]
Nimonic 75	(BCR-661)	749,6	1,9	[29]
Nimonic 75	(BCR-661)	754,2	1,3	[31]



Leyenda

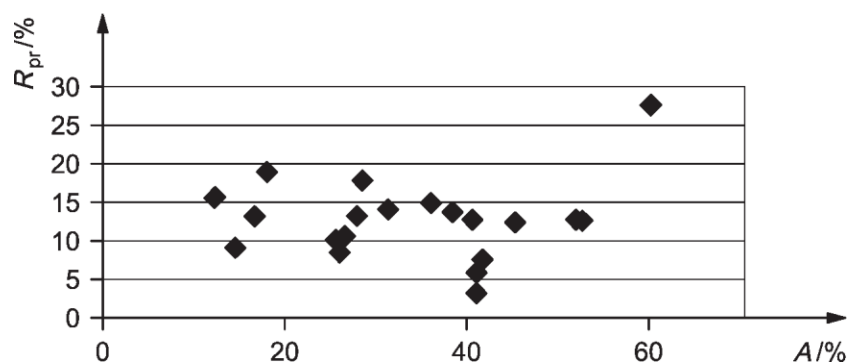
R_m Resistencia a la tracción, expresada MPa

R_{pr} Reproducibilidad, expresada en %

Figura L.2 – Presentación de los valores recogidos en la tabla L.2

Tabla L.3 – Alargamiento de rotura. Reproducibilidad a partir de ejercicios de comparación entre laboratorios (la figura L.3 proporciona una representación gráfica de estos valores)

Material	Código	Alargamiento de rotura A %	Reproducibilidad ± % ^a	Referencia bibliográfica
Aluminio				
Plancha	AA5754	27,9	13,3	[31]
Plancha	AA5182-0	26,6(A ₈₀ mm)	10,6	[20]
Plancha	AA6016-T4	25,9(A ₈₀ mm)	8,4	[20]
	EC-H 19	14,6	9,1	[33]
	2024-T 351	18,0	18,9 ^a	[33]
Acero				
Plancha	DX56	45,2	12,4	[31]
Bajo en carbono, plancha	HR3	38,4	13,8	[34]
Plancha	ZstE 180	40,5	12,7	[31]
AISI 105	Fe510C	31,4	14,0	[34]
	C22	25,6	10,1	[33]
Plancha	S355	28,5	17,7	[31]
Acero inoxidable austenítico	SS316L	60,1	27,6	[31]
Acero inoxidable austenítico	X2CrNi18-10	52,5	12,6	[34]
Acero inoxidable austenítico	X2CrNiMo18-10	51,9	12,7	[34]
AISI 316	X5CrNiMo17-12-2	35,9	14,9	[33]
Acero inoxidable martensítico	X12Cr13	12,4	15,5	[33]
Alta resistencia	30NiCrMo16	16,7	13,3	[34]
Aleaciones de níquel				
INCONEL 600	NiCr15Fe8	41,6	7,7	[33]
Nimonic 75	(BCR-661)	41,0	3,3	[29]
Nimonic 75	(BCR-661)	41,0	5,9	[31]
^a La reproducibilidad se expresa como tanto por ciento del valor medio respectivo de A para el material en cuestión; por ejemplo, para el aluminio 2024-T 351 el valor absoluto de A es (18,0 ± 3,4%).				



Leyenda

A Alargamiento de rotura, expresado en %

R_{pr} Reproducibilidad, expresada en %

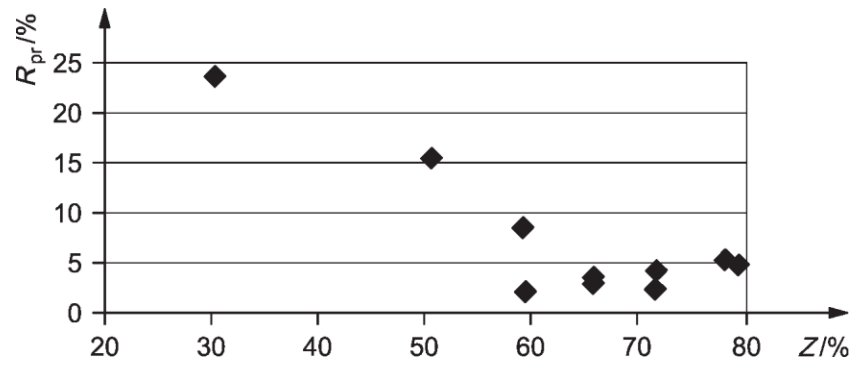
Figura L.3 – Presentación de los valores recogidos en la tabla L.3

Tabla L.4 – Coeficiente de estricción Z. Reproducibilidad a partir de ejercicios de comparación entre laboratorios (la figura L.4 proporciona una representación gráfica de estos valores)

Material	Código	Coeficiente de estricción Z %	Reproducibilidad ± % ^a	Referencia bibliográfica
Aluminio				
	EC-H 19	79,1	5,1	[33]
	2024-T 351	30,3	23,7 ^b	[33]
Acero				
Bajo en carbono, plancha	HR3			
AISI 105	Fe510C	71,4	2,7	[34]
	C22	65,6	3,8	[33]
Acero inoxidable austenítico	X2CrNi18-10			
Acero inoxidable austenítico	X2CrNiMo18-10	77,9	5,6	[34]
AISI 316	X5CrNiMo17-12-2	71,5	4,5	[33]
Acero inoxidable martensítico	X12Cr13	50,5	15,6 ^b	[33]
Alta resistencia	30NiCrMo16	65,6	3,2	[34]
Aleaciones de níquel				
INCONEL 600	NiCr15Fe8	59,3	2,4	[33]
Nimonic 75	(BCR-661)	59,0	8,8	[29]

a La reproducibilidad se expresa como tanto por ciento del valor medio respectivo de Z para el material en cuestión; por ejemplo, para el aluminio 2024-T 351 el valor absoluto de Z es $(30,3 \pm 7,2)\%$.

b Algunos valores de reproducibilidad pueden parecer relativamente altos; dichos valores indican, probablemente, la dificultad de realizar una medición fiable de las dimensiones de la probeta en la zona estrangulada de la rotura. En las probetas en forma de planchas finas, la incertidumbre de medida del espesor de la probeta puede ser muy grande. Asimismo, la medición del diámetro de la probeta en la zona de estrangulamiento depende mayormente de la habilidad y la experiencia del operador.



Leyenda

R_{pr} Reproducibilidad, expresada en %.

Z Coeficiente de estricción, expresado en %

Figura L.4 - Presentación de los valores recogidos en la tabla L.4

Bibliografía

- [1] ISO 3183, *Petroleum and natural gas industries. Steel pipe for pipeline transportation systems.*
- [2] ISO 11960, *Petroleum and natural gas industries. Steel pipes for use as casing or tubing for wells.*
- [3] ISO/TR 25679, *Mechanical testing of metals. Symbols and definitions in published standards.*
- [4] ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).*
- [5] ISO/TTA 2, *Tensile tests for discontinuously reinforced metal matrix composites at ambient temperatures.*
- [6] ASTM A370, *Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products.*
- [7] ASTM E8M, *Standard test methods for tension testing of metallic materials.*
- [8] ASTM E1012, *Standard practice for verification of test frame and specimen alignment under tensile and compressive axial force application.*
- [9] CWA 15261-2:2005, *Measurement uncertainties in mechanical tests on metallic materials*The evaluation of uncertainties in tensile testing.
- [10] DIN 50125, *Testing of metallic materials. Tensile test pieces.*
- [11] EN 10291, *Metallic materials. Uniaxial creep testing in tension. Methods of test.*
- [12] GB/T 228, *Metallic materials. Tensile testing at ambient temperature.*
- [13] IACS W2. Test specimens and mechanical testing procedures for materials. In: *Requirements concerning materials and welding*, pp. W2-1 to W2-10. International Association of Classification Societies, London, 2003. Available (2008-06-26) at:
http://www.iacs.org.uk/document/public/publications/unified_requirements/pdf/ur_w_pdf159.pdf.
- [14] JIS Z2241, *Test pieces for tensile test for metallic materials.*
- [15] NIS 80:1994, *Guide to the expression of uncertainty in testing.*
- [16] NIS 3003:1995. *The expression of uncertainty and confidence in measurement.*
- [17] DEAN G.D., LOVEDAY M.S., COOPER P.M. READ, B.E., ROEBUCK.B. & MORRELL.R. Aspects of modulus measurement. In: DYSON, B.G., LOVEDAY, M.S., GEE, M.G., editors. *Materials metrology and standards for structural performance*, pp. 150-209. Chapman & Hall, London, 1995.
- [18] ROEBUCK B., LORD J.D., COOPER P.M., MCCARTNEY L.N. Data acquisition and analysis of tensile properties for metal matrix composites. *J. Test. Eval.* 1994, **22** (1) pp. 63–69.

- [19] SONNE H.M., HESSE B. B. Determination of Young's modulus on steel sheet by computerised tensile test. Comparison of different evaluation concepts. In: Proceedings of *Werkstoffprüfung* [Materials testing] 1993. DVM, Berlin.
- [20] AEGERTER J., KELLER S., WIESER D. Prüfvorschrift zur Durchführung und Auswertung des Zugversuches für Al-Werkstoffe [Test procedure for the accomplishment and evaluation of the tensile test for aluminium and aluminium alloys], In: Proceedings of *Werkstoffprüfung* [Materials testing] 2003, pp. 139-150. Stahleisen, Düsseldorf.
- [21] RIDES M., LORD J. *TENSTAND final report: Computer-controlled tensile testing according to EN 10002-1: Results of a comparison test programme to validate a proposal for an amendment of the standard*. National Physical Laboratory, Teddington, 2005.
- [22] LORD J. *Loveday, M.S., Rides, M., McEntaggart, I. TENSTAND WP2 final report: Digital tensile software evaluation: Computer-controlled tensile testing machines validation of European Standard EN 10002-1*. National Physical Laboratory, Teddington, 2005, 68 p.
- [23] TAYLOR B.N., KUYATT C.E. *Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results*. NIST, Gaithersburg, MD, 1994. 25 p. (*NIST Technical Note 1297*.) Available (2009-07-23) at: <http://physics.nist.gov/Pubs/guidelines/TN1297/tn1297s.pdf>.
- [24] LOVEDAY M.S. *Room temperature tensile testing: A method for estimating uncertainty of measurement*. National Physical Laboratory, Teddington, 1999. [*Measurement note CMMT (MN) 048*.] Available (2009-07-23) at: http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/cmmt_mn48.pdf.
- [25] BELL S.A. (1999) *A beginner's guide to uncertainty of measurement*, 2nd edition. National Physical Laboratory, Teddington, 2001. 41 p. (*Measurement Good Practice Guide*, No. 11.) Available (2009-07-31) at: http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/mgpg11.pdf.
- [26] BIRCH K. *Estimating uncertainties in testing*. National Physical Laboratory, Teddington, 2001. (*Measurement Good Practice Guide*, No. 36.) Available (2009-07-23) at: http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/mgpg36.pdf.
- [27] KANDIL F.A., LORD J.D., BULLOUGH C.K., GEORSSON P., LEGENDRE L., MONEY G. et al. *The UNCERT manual of codes of practice for the determination of uncertainties in mechanical tests on metallic materials* [CD-ROM]. EC, Brussels.
- [28] SONNE H.M., KNAUF G., SCHMIDT-ZINGES J. Überlegungen zur Überprüfung von Zugprüfmaschinen mittels Referenzmaterial [Considerations on the examination of course test equipment by means of reference material]. In: Proceedings of *Werkstoffprüfung* [Materials testing] 1996. Bad Nauheim. DVM, Berlin.
- [29] INGELBRECHT, C.D., LOVEDAY, M.S. The certification of ambient temperature tensile properties of a reference material for tensile testing according to EN 10002-1: CRM 661. EC, Brussels, 2000. (BCR Report EUR 19589 EN).
- [30] LI H.-P., ZHOU X. New Consideration on the uncertainty evaluation with measured values of steel sheet in tensile testing. In: *Metallurgical analysis*, 12th Annual Conference of Analysis Test of Chinese Society for Metals, 2004.

- [31] KLINGELHÖFFER H., LEDWORUSKI S., BROOKES S., MAY T. *Computer controlled tensile testing according to EN 10002-1. Results of a comparison test programme to validate a proposal for an amendment of the standard. Final report of the European project TENSTAND. Work Package 4.* Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, 2005. 44 p. (*Forschungsbericht* [Technical report] 268.) Available (2008-07-01) at:
http://www.bam.de/de/service/publikationen/publikationen_medien/fb268_vt.pdf.
- [32] LOVEDAY, M.S., GRAY, T., AEGERTER, J. *Tensile testing of metallic materials A review Final report of the TENSTAND project of work package 1.* Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, 2004.
- [33] ASTM Research Report E 28 1004:1994, *Round robin results of interlaboratory tensile tests.*
- [34] ROESCH, L., COUE, N., VITALI, J., DI FANT, M. *Results of an interlaboratory test programme on room temperature tensile properties. Standard deviation of the measured values.* (IRSID Report, NDT 93310).
- [35] LOVEDAY M.S. Towards a tensile reference material. In: *Loveday, M.S., Gibbons, T.B. Harmonisation of testing practice for high temperature materials.* Elsevier, London, pp. 111–53.
- [36] JOHNSON R.F., MURRAY J.D. The effect of rate of straining on the 0.2 % proof stress and lower yield stress of steel. In: *Proceedings of Symposium on High Temperature Performance of Steels*, Eastbourne, 1966. Iron and Steel Institute, 1967.
- [37] GRAY T.G.F., SHARP J. Influence of machine type and strain rate interaction in tension testing. In: PAPIRNO, R., WEISS, H.C. *Factors that affect the precision of mechanical tests.* ASTM, Philadelphia, PA. (*Special Technical Publication 1025*).
- [38] AEGERTER J., BLOCHING H., SONNE H.-M. Influence of the testing speed on the yield/proof strength. Tensile testing in compliance with EN 10002-1. *Materialprüfung*. 2001, **10** pp. 393–403.
- [39] AEGERTER, J. Strain rate at a given point of a stress/strain curve in the tensile test [Internal memorandum], VAW Aluminium, Bonn, 2000.
- [40] BLOCHING H. *Calculation of the necessary crosshead velocity in mm/min for achieving a specified stress rate in MPa/s.* Zwick, Ulm, 2000, 8 p. [Report].
- [41] MCENTEGGART I., LOHR R.D. Mechanical testing machine criteria. In: DYSON, B.G., LOVEDAY, M.S., GEE, M.G., editors. *Materials metrology and standards for structural performance*, pp. 19-33. Chapman & Hall, London, 1995.
- [42] AUSTIN. T., BULLOUGH, C., LEAL, D., GAGLIARDI, D. & LOVEDAY M., A Guide to the Development and Use of Standards Compliant Data Formats for Engineering Materials Test Data, CEN CWA 162002010: ftp://ftp.cen.eu/CEN/Sectors/List/ICT/CWAs/CWA16200_2010_ELSSI.pdf.
- [43] SEP 1235, *Determination of the modulus of elasticity on steels by tensile testing at room temperature*, Stahl-Eisen-Prüfblatt (SEP) des Stahlinstituts VDEh, Düsseldorf.

- [44] LORD J.D AND ORKNEY L.P. ELEVATED TEMPERATURE MODULUS MEASUREMENTS USING THE IMPULSE EXCITATION TECHNIQUE (IET). *NPL Measurement Note CMMT*. MN, 2000, pp. 049.
- [45] LORD J D and MORRELL R, Measurement Good Practice Guide No. 98 *Elastic Modulus Measurement*, ISSN 1744-3911 (2006)
http://resource.npl.co.uk/cgi-bin/download.pl?area=npl_publications&path_name=/npl_web/pdf/mgpg98.pdf.
- [46] CARPENTER. M*, NUNN, J, Impulse Excitation Modulus measurements of Hardmetal Rods using custom software on a standard personal computer and microphone. *Mater. Eval.* 2012, **70** (7) pp. 863–871.
- [47] GABAUER, W. The Determination of Uncertainties in Tensile Testing UNCERT COP 07:2000.
- [48] BULLOUGH C. K. The Determination of Uncertainties in Dynamic Young's Modulus UNCERT CoP 13:2000.
- [49] LORD. J., RIDES, M. & LOVEDAY, M. *Modulus Measurement Methods* TENSTAND WP3 Final Report NPL REPORT DEPC MPE 016 Jan 2005. ISSN 1744-0262.
- [50] UNWIN. W.C., *The testing of materials of construction*. Longmans, Green & Co, London, 1910, pp. 237–8.
- [51] LORD. J.D., ROEBUCK, B., ORKNEY, L.P., *Validation of a draft tensile testing standard for discontinuously reinforced MMC*, VAMAS Report No.20, National Physical Laboratory, May 1995.
- [52] ASTM E 111, Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus.
- [53] AEGERTER J., FRENZ H., KÜHN H.-J., WEIßMÜLLER C. ISO 6892-1:2009 Tensile Testing: Initial Experience from the Practical Implementation of the New Standard, Carl Hanser Verlag, München, Vol. 53, (2011) 10, pp. 595-603, correction of Fig. 6 in Carl Hanser Verlag, München, Vol. 53, (2011) 11.
- [54] WEIßMÜLLER C., FRENZ H. Measurement Uncertainty for the Determination of Young's Modulus on Steel, *Materials Testing*, Carl Hanser Verlag, München, 2013, Vol. 55 No. 9, pp. 643-647, available at: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/pdf/10.3139/120.110482>
- [55] ISO 377, *Steel and steel products. Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing*.
- [56] ISO 2566-1, *Steel. Conversion of elongation values. Part 1: Carbon and low alloy steels*.
- [57] ISO 2566-2, *Steel. Conversion of elongation values. Part 2: Austenitic steels*.
- [58] ISO 80000-1, *Quantities and units. Part 1: General*.

Para información relacionada con el desarrollo de las normas contacte con:

Asociación Española de Normalización

Génova, 6

28004 MADRID-España

Tel.: 915 294 900

info@une.org

www.une.org

Para información relacionada con la venta y distribución de las normas contacte con:

AENOR Internacional, S.A.U.

Tel.: 914 326 160

normas@aenor.com

www.aenor.com



organismo de normalización español en:

